



**OPTIMASI RANCANGAN KINCIR ANGIN MODIFIKASI
STANDAR NACA 4415 MENGGUNAKAN SERAT RAMI (*BOEHMERIA
NIVEA*) DENGAN *CORE* KAYU SENGON LAUT (*ALBIZIA FALCATA*)
YANG BERKELANJUTAN**

Sudarsono
NIM : L5K009008

PROGRAM DOKTOR ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2013

**OPTIMASI RANCANGAN KINCIR ANGIN MODIFIKASI
STANDAR NACA 4415 MENGGUNAKAN SERAT RAMI (*BOEHMERIA
NIVEA*) DENGAN *CORE* KAYU SENGON LAUT (*ALBIZIA FALCATA*)
YANG BERKELANJUTAN**

Disertasi
Untuk memperoleh gelar Doktor
dalam Ilmu Lingkungan

Untuk dipertahankan di hadapan
Sidang Ujian Terbuka Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro
pada tanggal 2 September 2013 pukul 13.00 wib

oleh
Sudarsono
Lahir di Bojonegoro

**OPTIMASI RANCANGAN KINCIR ANGIN MODIFIKASI
STANDAR NACA 4415 MENGGUNAKAN SERAT RAMI (*BOEHMERIA
NIVEA*) DENGAN *CORE* KAYU SENGON LAUT (*ALBIZIA FALCATA*)
YANG BERKELANJUTAN**

Sudarsono

NIM : L5K009008

Telah Disetujui oleh


Promotor



Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA

Tanggal : 31 JULI 2013


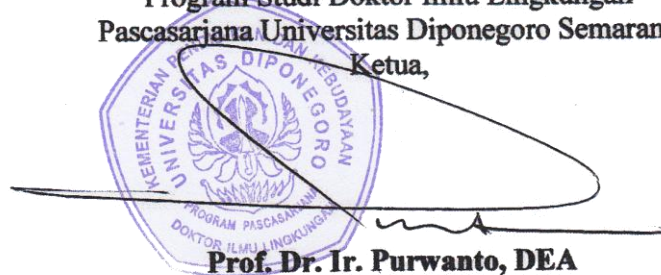
Ko Promotor



Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi, DEA

Tanggal : 2 AGUSTUS 2013

**Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan
Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang
Ketua,**



Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sudarsono
NIM : L5K009008
Mahasiswa : Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan
Pascasarjana Universitas Diponegoro

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Disertasi yang berjudul “**Optimasi Rancangan Kincir Angin Modifikasi Standar NACA 4415 Menggunakan Serat Rami (*Boehmeria Nivea*) dengan Core Kayu Sengon Laut (*Albizia falcata*) Yang Berkelanjutan**” adalah karya ilmiah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (doktor) di perguruan tinggi manapun.
2. Disertasi ini adalah murni ide, rumusan dan hasil penelitian saya serta dilakukan tanpa bantuan orang lain, kecuali Tim Promotor dan narasumber.
3. Disertasi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan judul aslinya serta dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidak benaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah saya peroleh, dan sanksi lain sesuai dengan norma yang berlaku di Universitas Diponegoro.

Semarang, September 2013
Yang Membuat Pernyataan,



Sudarsono

HALAMAN PERSEMBAHAN

Bagi orang tuaku yang telah membesarkan dan membimbingku;

Bagi para guruku yang telah memberi ilmu dan teladan bagiku;

Bagi istri dan anakku yang telah memberi kesempatan dan dukungan bagiku;

Bagi saudara dan sahabatku yang telah berbagi kehidupan denganku;

Bagi almamater (ITN dan UI) dan IST AKPRIND yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan serta menuntun arah perjalanan hidupku;

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi ini. Disertasi yang berjudul “**Optimasi Rancangan Kincir Angin Modifikasi Standar NACA 4415 Menggunakan Serat Rami (*Boehmeria Nivea*) dengan Core Kayu Sengon Laut (*Albizia falcata*) yang Berkelanjutan**” disusun sebagai salahsatu syarat dalam menyelesaikan pendidikan Program Doktor (S3) Program Doktor Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

Prof. H. Sudhartho Prawata Hadi MES, PhD, selaku Rektor Universitas Diponegoro, sekaligus penguji yang telah memberikan kesempatan untuk mengikuti program S-3 di Program Studi Ilmu Lingkungan UNDIP dan telah memberikan saran serta masukan yang berharga.

Prof. Dr. dr. Anies, M.Kes, PKK, selaku direktur Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro yang telah berkenan menguji dan memberi masukan, saran-saran untuk menyelesaikan disertasi.

Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA, selaku Ketua Program Doktor Ilmu Lingkungan UNDIP sekaligus sebagai Promotor yang telah meluangkan waktu untuk bimbingan dengan sabar, memberikan ilmu, arahan, dan motivasi dalam penyusunan disertasi.

Dr. Henna Rya Sunoko, MES, selaku Sekretaris Program Doktor Ilmu Lingkungan Program Pasca Sarjana UNDIP dan penguji yang telah memberi masukan, arahan, dan koreksi penyusunan disertasi.

Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi, DEA, Guru Besar Ilmu Korosi Fakultas Teknik Universitas Indonesia, selaku Ko. Promotor yang telah banyak memberikan arahan-arahan, bimbingan dan pemikiran selama penyusunan laporan disertasi.

Prof. Ir. Anne Zulifia, M.Phil, Ph.D, Guru Besar Material Komposit Fakultas Teknik Universitas Indonesia, selaku penguji eksternal yang telah memberikan koreksi dan masukan untuk perbaikan disertasi.

Dr. H. Totok Prasetyo, B.Eng, M.T, dosen Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang, selaku penguji eksternal yang telah memberikan koreksi dan masukan untuk perbaikan disertasi.

Dr. Hermawan, DEA, dosen Jurusan Teknik Elektro UNDIP selaku penguji internal Pra Promosi yang telah memberikan koreksi dan masukan untuk perbaikan disertasi.

Dr. Ir. Joko Windarto, M.T, dosen Jurusan Teknik Elektro UNDIP selaku penguji internal yang telah memberikan koreksi dan masukan untuk perbaikan disertasi.

Prof. Dr. Eng. Ir. Abraham Lomi, MSME, Guru Besar Teknik Elektro ITN Malang selaku penguji eksternal Pra Promosi yang telah memberikan koreksi dan masukan untuk perbaikan disertasi.

Seluruh dosen pengampu pada Program Doktor Ilmu Lingkungan UNDIP yang telah memberikan ilmunya sebagai penunjang penyusunan disertasi.

Ketua Pembina dan Pengurus Yayasan Pembina Potensi Pembangunan Yogyakarta, yang telah memberi izin kepada penulis untuk menjalani pendidikan program S-3 di Program Studi Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro.

Pimpinan Institut, Pimpinan Fakultas, dan Pimpinan Jurusan beserta segenap dosen di lingkungan IST AKPRIND Yogyakarta yang senantiasa memberikan dorongan dan bantuan kepada penulis selama menempuh program S-3.

Mayor Tek Bennny Abdillah beserta staff Dinas Litbang TNI AU LANUD Husein Sastranegara Bandung, Bpk. Soeripno - Bidang Konversi Energi Dirgantara LAPAN, Bpk. Chriswantoro – Teknisi PLTH Pandansimo, Ir. Sugiyanto M.Eng - POLBAN Bandung yang telah memberikan masukan dalam optimasi propeler.

Pengelola beserta teknisi Laboratorium pengujian SEM Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Laboratorium Teknik Bahan UGM, Laboratorium Teknologi Mekanik, Laboratorium Pengujian Bahan, dan Laboratorium Teknik Lingkungan IST AKPRIND, yang telah memberikan izin dan membantu pelaksanaan pengujian selama penelitian.

Kedua orang tua (Alm.) H. Ahmad Soemarlani dan (Alm.) Hj. Samingah, atas petuah dan kasih sayang yang tak terhingga.

Istri tercinta dan tersayang Dra. Nuniek Sudarsono, Ananda Esthi Budhiyanti, S.E, Akt., Ismira Dewi, S.Psi, M.Psi, dan cucu Alya Kirana Zhafirah atas segala pengorbanan, kesabaran, pengertian, serta dorongan dan semangat selama ini.

Rekan-rekan sejawat angkatan DIL 3 Program Studi Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang, kebersamaan dan dukungannya telah mendorong dan memberikan semangat dalam penyelesaian disertasi ini.

Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata penulis berharap semoga disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semuanya, terutama bagi perkembangan ilmu pengetahuan khususnya ilmu lingkungan serta aplikasinya pada rekayasa energi terbarukan.

Semarang, September 2013

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENJELASAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xxix
DAFTAR LAMBANG.....	xxx
DAFTAR SINGKATAN	xxxiii
GLOSARI	xxxv
ABSTRAK	xxxix
ABSTRACT	xl
RINGKASAN	xli
SUMMARY	liii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Perumusan Masalah.....	8
C. Orisinalitas	8
D. Tujuan Penelitian.....	14
E. Manfaat Penelitian	15

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	16
A. Hasil-hasil Pengembangan Riset Komposit Serat Alam	16
1. Sifat-sifat komposit serat alam	16
2. Riset komposit serat alam	17
B. Hasil-hasil Pengembangan Riset SKEA	23
C. Kajian Energi Angin Untuk Pemenuhan Kebutuhan Listrik	29
D. Pengaruh dan Dampak Lingkungan Terhadap SKEA.....	32
1. Pengaruh lingkungan terhadap komposit	32
2. Pengaruh lingkungan terhadap material komposit	34
3. Dampak lingkungan SKEA.....	35
E. Landasan Teori	38
1. Sifat udara	38
2. Model gerak udara	41
3. Diskretisasi	45
4. Koefisien aerodinamika	49
5. Komposit matriks polimer	50
6. Sumberdaya energi angin	66
 BAB III. KERANGKA TEORITIS, KONSEP DAN HIPOTESIS	72
A. Kerangka Teoritis	72
B. Kerangka Konsep	77
C. Hipotesis	79
1. Hipotesis mayor.....	79
2. Hipotesis minor	80
 BAB IV. METODE PENELITIAN	81
A. Penelusuran Literatur dan Studi Lapangan	81
B. Simulasi dengan CFD	82
C. Pembuatan Prototipe Propeler Airfoil Standar NACA 4415	89
D. Evaluasi dan Validasi	91

E. Pengelolaan Dampak Lingkungan Rekayasa SKEA	91
F. Lokasi Penelitian	92
G. Peralatan Penelitian	92
H. Teknik Pengambilan Sampel	93
I. Teknik Analisa Data	93
BAB V. HASIL PENELITIAN DAN BAHASAN.....	94
A. Simulasi dengan CFD	94
1. Efek dinding: tinjauan nilai y^+	94
2. Properties medan aliran	97
3. Koefisien aerodinamika	101
4. Kurva drag polar	105
5. Pemilihan airfoil sebagai bentuk dasar sudu turbin angin	138
B. Simulasi Numerik Aliran Melalui Sudu Turbin	138
C. Koreksi Rugi-rugi Pada Tepi Sudu (tip loss correction)	145
D. Daya yang Dihasilkan (power output)	146
E. Prosedur Perancangan Sudu	146
F. Perancangan Turbin Angin	147
1. Kurva polar 360°	147
2. Perancangan sudu dan rotor turbin berdasar NACA 4415 modif	151
3. Kondisi simulasi sudu dan rotor turbin berdasar NACA 4415 modif	156
4. Simulasi rotor turbin berdasar NACA 4415 modif	217
G. Pembuatan Prototype Propeler Kincir Angin	241
1. Peralatan dan mesin yang digunakan.....	241
2. Bahan dan material yang digunakan	242
3. Persiapan sampel	242
4. Proses pembuatan sampel	245
H. Hasil Uji Mekanik Komposit dan Bahan Pendukungnya	246
1. Kesalahan relatif fabrikasi	246
2. Uji mekanik komposit serat rami core KSL.....	249
3. Uji mekanik bahan pendukung komposit	253

I. Pengamatan Struktur Mikro	255
1. Hasil uji SEM pada spesimen komposit sebelum digunakan.....	256
2. Hasil uji SEM pada bahan komposit sudu setelah digunakan	258
3. Hasil uji EDS	259
J. Peran Sumber Energi Terbarukan Dalam Penyediaan Energi Listrik dan Penurunan Emisi Co2 Di Provinsi DIY	265
1. Produksi, konsumsi, dan potensi energi nasional	265
2. Produksi, konsumsi, dan potensi energi di DIY	265
3. Potensi energi terbarukan	270
4. Hasil pengukuran daya listrik	272
5. Dampak sosial dan pariwisata	274
6. Emisi CO ₂	276
K. Pengaruh lingkungan terhadap material komposit propeler	280
1. Pengaruh temperatur	281
2. Pengaruh kelembaban	281
L. Pengaruh SKEA terhadap lingkungan	284
1. Tinjauan ekosistem Pantai Pandansimo	284
2. Dampak penerapan SKEA	288
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN	290
A. Kesimpulan	290
B. Saran	292
DAFTAR PUSTAKA	294
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	302

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Matriks Orisinalitas	9
Tabel 2 Karakteristik resin poliester	55
Tabel 3 Sifat fisik dan mekanik serat alam dari sayuran dan polypropylene	56
Tabel 4 Komposisi kimia dan serat rami (jute) dan beberapa serat alam lain	59
Tabel 5 Rincian rencana pekerjaan penelitian propeler airfoil standar NACA	90
Tabel 6 Properties medan aliran	99
Tabel 7 Hasil tegangan uji tekuk	251
Tabel 8 Hasil regangan uji tekuk	251
Tabel 9 Hasil elastisitas	252
Tabel 10 Data hasil uji mekanik bahan pendukung komposit	254
Tabel 11 Komposisi kimia kayu pada sudu sebelum dan sesudah digunakan	261
Tabel 12 Komposisi kimia RESIN + RAMI pada sudu sebelum dan sesudah digunakan	263
Tabel 13 Komposisi kimia bagian kayu, resin dan rami pada sudu sebelum dan sesudah digunakan	264
Tabel 14 Produksi listrik di propinsi DIY	266
Tabel 15 Distribusi konsumsi energi di DIY	267
Tabel 16 Hasil pengukuran dan perhitungan energi listrik	273
Tabel 17 Faktor emisi CO ₂ berdasarkan sumber energi terbarukan	276

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Area operasi turbin angin dan Fokus pengembangan sudu turbin	28
Gambar 2 Definisi tekanan	37
Gambar 3 Terminologi tekanan udara	37
Gambar 4 Definisi jenis udara	38
Gambar 5 Kecepatan alir dan lintasan alir	38
Gambar 6 Ilustrasi kontrol volume menggunakan sel segitiga untuk diskritisasi	44
Gambar 7 Kontrol volume menggunakan kuadrilateral grade	46
Gambar 8 Diagram alir solusi dengan metode couple	48
Gambar 9 Distribusi tekanan dan tegangan geser pada permukaan airfoil	49
Gambar 10 Hubungan gaya normal, axial, dengan gaya angkat dan gaya hambat	50
Gambar 11 Struktur ideal dari poliester isoptalik	53
Gambar 12 Struktur selulosa lignin dan hemicellulose	59
Gambar 13 Diagram skematis dari interphase matriks – penguat (fiber) dan beberapa faktor yang berkontribusi terhadap pembentukannya	62
Gambar 14 Desain penampang propeler airfoil NACA 4415	67
Gambar 15 Faktor geometris airfoil	68
Gambar 16 Arah gaya yang bekerja pada propeler	70
Gambar 17 Faktor induksi	71
Gambar 18 Kerangka teori	74
Gambar 19 Kerangka konsep	77
Gambar 20 Struktur simulasi numerik	80
Gambar 21 Struktur simulasi numerik menggunakan fluent	80
Gambar 22 Sketsa permasalahan simulasi airfoil	81
Gambar 23 Messing domain komputasi airfoil sebanyak 29400	82
Gambar 24 Panel fluent untuk definisi sifat udara	83
Gambar 25 Panel fluent untuk definisi model turbulen/viscos	83
Gambar 26 Panel fluent untuk definisi kecepatan udara	84

Gambar 27 Panel fluent untuk mendefinisikan kondisi batas pressure outlet	84
Gambar 28 Panel fluent untuk mendefinisikan panel dinding	85
Gambar 29 Diagram alir untuk pencarian proses solusi	86
Gambar 30 Panel untuk mendefinisikan metode diskretisasi pada proses solver	86
Gambar 31 Panel fluent untuk mendefinisikan inisiasi pada proses solver	86
Gambar 32 Panel fluent untuk mendefinisikan iterasi pada proses solver.....	87
Gambar 33 Panel fluent untuk menampilkan kontur properties aliran hasil iterasi ...	87
Gambar 34 Kurve pengaruh dinding pada aliran yang ditunjukkan y^+ terhadap U^+	92
Gambar 35 Nilai y^+ pada bagian depan airfoil pada kecepatan freestream 3m/s	94
Gambar 36 Nilai y^+ pada bagian depan airfoil pada kecepatan freestream 18m/s	94
Gambar 37 Model turbulensi spallart allmaraz dan vorticity-based production	95
Gambar 38 Kontur tekanan statik aliran udara pada kecepatan freestream 3m/s	95
Gambar 39 Kontur kecepatan aliran udara pada kecepatan freestream 3m/s.....	96
Gambar 40 Kontur streamline dan kecepatan aliran udara pada freestream 3m/s	96
Gambar 41 Kurva koefisien tekanan C_p pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3m/s	100
Gambar 42 Kurva koefisien gesekan C_f pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3m/s	100
Gambar 43 Nilai C_l hasil iterasi pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3m/s	101
Gambar 44 Nilai C_d hasil iterasi pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3m/s.....	102
Gambar 45 Nilai C_m hasil iterasi pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3m/s	102
Gambar 46 Nilai C_l , C_d , C_m hasil iterasi pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3m/s	103
Gambar 47 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 pada $Re=41000$	104
Gambar 48 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 pada $Re=55000$	105
Gambar 49 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil	

NACA 4415 pada $Re=68000$	106
Gambar 50 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 pada $Re=82000$	107
Gambar 51 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 pada $Re=96000$	109
Gambar 52 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 pada $Re=250000$	110
Gambar 53 Perbandingan profil airfoil NACA 4415 (warna biru) dan hasil modifikasinya (NACA 4415 modif (warna merah))	111
Gambar 54 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 modif pada $Re=41000$	112
Gambar 55 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 modif pada $Re=55000$	113
Gambar 56 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 modif pada $Re=68000$	114
Gambar 57 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 modif pada $Re=82000$	115
Gambar 58 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 modif pada $Re=96000$	116
Gambar 59 Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 modif pada $Re=250000$	118
Gambar 60 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=41000$	119
Gambar 61 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=55000$	120
Gambar 62 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=68000$	121
Gambar 63 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=82000$	122
Gambar 64 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=96000$	123

Gambar 65 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=250000$	123
Gambar 66 Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=41000$	124
Gambar 67 Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=55000$	125
Gambar 68 Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=68000$	125
Gambar 69 Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=82000$	126
Gambar 70 Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=96000$	126
Gambar 71 Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=250000$	127
Gambar 72 Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=41000$	128
Gambar 73 Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=55000$	129
Gambar 74 Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=68000$	129
Gambar 75 Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=82000$	130
Gambar 76 Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=96000$	130
Gambar 77 Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap angle of attack airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=250000$	131
Gambar 78 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=41000$	132
Gambar 79 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=55000$	133
Gambar 80 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415	

dan NACA 4415 modif pada $Re=68000$	134
Gambar 81 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=82000$	134
Gambar 82 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=96000$	135
Gambar 83 Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re=250000$	135
Gambar 84 Tabung aliran aksial yang melalui turbin angin	137
Gambar 85 Tabung aliran anular yang berputar melalui turbin angin	138
Gambar 86 Notasi tabung aliran anular yang berputar	138
Gambar 87 Model teori elemen sudu	139
Gambar 88 Segitiga kecepatan aliran pada potongan sudu	140
Gambar 89 Gaya-gaya yang bekerja pada sudu turbin	141
Gambar 90 Kurva polar 360° pada kecepatan angin 3 m/s	146
Gambar 91 Kurva polar 360° pada kecepatan angin 4 m/s	146
Gambar 92 Kurva polar 360° pada kecepatan angin 5 m/s	147
Gambar 93 Kurva polar 360° pada kecepatan angin 6 m/s	147
Gambar 94 Kurva polar 360° pada kecepatan angin 7 m/s	148
Gambar 95 Kurva polar 360° pada kecepatan angin 18 m/s	148
Gambar 96 Distribusi panjang chord pada 20 elemen airfoil NACA 4415 modif	149
Gambar 97 Rancangan Sudu A, distribusi 20 elemen airfoil NACA 4415 modif pada sudu dan rotor turbin angin pada sudut twist, $\theta=0^\circ$ (pangkal sudu) sampai $\theta=0^\circ$ (tepi sudu).....	150
Gambar 98 Rancangan Sudu B, distribusi 20 elemen airfoil NACA 4415 modif pada sudu dan rotor turbin angin pada sudut twist, $\theta= +26,8^\circ$ (pangkal sudu) sampai $-2,7^\circ$ (tepi sudu).....	151
Gambar 99 Rancangan Sudu C, distribusi 20 elemen airfoil NACA 4415 modif pada sudu dan rotor turbin angin pada sudut twist $\theta=+27,3^\circ$ (pangkal sudu) sampai $-2,2^\circ$ (tepi sudu).....	152

Gambar 100 Rancangan Sudu D, distribusi 20 elemen airfoil NACA 4415 modif pada sudu dan rotor turbin angin pada sudut twist $\theta = +24,8^\circ$ (pangkal sudu) sampai $-4,7^\circ$ (tepi sudu)	153
Gambar 101 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	154
Gambar 102 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	155
Gambar 103 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva terbawah	156
Gambar 104 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva teratas	157
Gambar 105 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	158
Gambar 106 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	159
Gambar 107 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	160
Gambar 108 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	161
Gambar 109 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	162

Gambar 110 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	164
Gambar 111 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	164
Gambar 112 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	165
Gambar 113 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	166
Gambar 114 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	167
Gambar 115 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	168
Gambar 116 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	169
Gambar 117 Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	170
Gambar 118 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas.....	171
Gambar 119 Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	172

Gambar 120	Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	172
Gambar 121	Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	173
Gambar 122	Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	173
Gambar 123	Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	174
Gambar 124	Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	174
Gambar 125	Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	175
Gambar 126	Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	175
Gambar 127	Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	176
Gambar 128	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	177
Gambar 129	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	179

Gambar 130	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva terbawah	179
Gambar 131	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva teratas	180
Gambar 132	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	181
Gambar 133	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	182
Gambar 134	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	183
Gambar 135	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	184
Gambar 136	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	185
Gambar 137	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	186
Gambar 138	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	187
Gambar 139	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas.....	188

Gambar 140	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	189
Gambar 141	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	190
Gambar 142	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	191
Gambar 143	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	192
Gambar 144	Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	193
Gambar 145	Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas.....	194
Gambar 146	Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	195
Gambar 147	Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	196
Gambar 148	Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva teratas	197
Gambar 149	Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	198

Gambar 150 Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	199
Gambar 151 Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	200
Gambar 152 Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	201
Gambar 153 Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	202
Gambar 154 Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	203
Gambar 155 Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	204
Gambar 156 Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas.....	205
Gambar 157 Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas.....	206
Gambar 158 Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	207
Gambar 159 Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	208

Gambar 160	Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	209
Gambar 161	Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	210
Gambar 162	Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas.....	211
Gambar 163	Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas	212
Gambar 164	Nilai koefisien daya Betz terhadap TSR yang dihasilkan turbin berdasarkan Rancangan Sudu A, B, C dan D mulai kurva terbawah.....	213
Gambar 165	Nilai koefisien torsi terhadap TSR yang dihasilkan turbin berdasarkan Rancangan Sudu A, B, C dan D mulai kurva terbawah	214
Gambar 166	Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	215
Gambar 167	Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	216
Gambar 168	Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	217
Gambar 169	Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	218
Gambar 170	Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	219

Gambar 171 Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	220
Gambar 172 Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	221
Gambar 173 Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	222
Gambar 174 Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	223
Gambar 175 Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	224
Gambar 176 Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	225
Gambar 177 Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	226
Gambar 178 Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	227
Gambar 179 Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	228
Gambar 180 Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	229

Gambar 181 Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	231
Gambar 182 Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	231
Gambar 183 Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah	232
Gambar 184 Nilai daya terhadap kecepatan angin serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah	233
Gambar 185 Nilai torsi terhadap kecepatan angin dan optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah	233
Gambar 186 Nilai daya terhadap TSR serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah	235
Gambar 187 Nilai torsi terhadap TSR serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah	235
Gambar 188 Nilai koefisien daya terhadap kecepatan angin serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah	236
Gambar 189 Nilai koefisien daya terhadap TSR serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah	237
Gambar 190 Bentuk sudu turbin angin airfoil NACA 4415 modif	238
Gambar 191 Serat rami	241
Gambar 192 Perendaman kayu sengon laut dalam cairan NaOH	242
Gambar 193 Pengeringan dengan oven	242
Gambar 194 Proses fabrikasi sampel komposit	243
Gambar 195 Hasil komposit hybrid serat rami dengan core KSL	244
Gambar 196 Grafik kesalahan relatif berat spesimen komposit	244
Gambar 197 Grafik fraksi volume serat spesimen komposit	245

Gambar 198 Hasil perhitungan nilai sifat mekanis dan dari perhitungan yang menggunakan hukum pencampuran untuk tegangan	246
Gambar 199 Universal testing machine	247
Gambar 200 Skema pengujian tekuk	248
Gambar 201 Grafik hasil uji tekuk	250
Gambar 202 Gambar alat uji impak charpy	252
Gambar 203 Grafik hasil uji mekanik dari bahan pendukung komposit	253
Gambar 204 Alat SEM	254
Gambar 205 Hasil uji SEM pada spesimen sebelum digunakan	255
Gambar 206 Hasil uji SEM pada komposit sesudah digunakan (100x)	256
Gambar 207 Hasil uji SEM pada komposit sesudah digunakan (250x)	256
Gambar 208 Struktur mikro bagian kayu sudu sebelum dan sesudah digunakan	258
Gambar 209 Grafik komposisi kimia kayu sebelum dan sesudah digunakan.....	258
Gambar 210 Resin dan rami pada sudu sebelum dan sesudah digunakan	260
Gambar 211 Grafik komposisi kimia resin dan rami pada sudu (a) sebelum dan (b) sesudah digunakan	260
Gambar 212 Kayu, resin dan rami sebelum dan sesudah digunakan.....	261
Gambar 213 Grafik komposisi kimia kayu dan rami pada sudu sebelum dan sesudah digunakan	262
Gambar 214 Konsumsi energi sektor usaha	266
Gambar 215 Konsumsi energi sektor industri	267
Gambar 216 Distribusi konsumsi energi listrik	268
Gambar 217 Peran sumber energi terbarukan dalam penurunan emisi CO ₂	275
Gambar 218 Grafik hubungan antara kelembaban dan difusi uap air	281
Gambar 219 Pandan (<i>Pandanus tectorius</i>)	286
Gambar 220 Cemara Laut (<i>Casuarina equisetifolia Blanco</i>)	287

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil uji tarik serat rami	305
Lampiran 2 Hasil uji tarik Kayu Sengon Laut (KSL).....	307
Lampiran 3 Hasil uji tekan KSL	314
Lampiran 4 Pengolahan data hasil uji impak KSL	321
Lampiran 5.1 Uji flexural (tegangan tekuk) KSL + 1 lapis rami (2 gram)	324
Lampiran 5.2 Uji flexural strain (regangan tekuk) KSL + 1 lapis rami (2 gram)	324
Lampiran 5.3 Uji elastisitas KSL + 1 lapis rami (2 gram)	325
Lampiran 6.1 Uji flexural (tegangan tekuk) KSL + 2 lapis rami (4 gram)	329
Lampiran 6.2 Uji flexural strain (regangan tekuk) KSL + 2 lapis rami (4 gram)	329
Lampiran 6.3 Uji elastisitas KSL + 2 lapis rami (4 gram)	330
Lampiran 7.1 Perhitungan fraksi volume serat / penguat rami + KSL (vf)	335
Lampiran 7.2 Perhitungan kesalahan relatif berat komposit	336
Lampiran 7.3 Perhitungan fraksi volume matriks (resin polyester) (vm)	337
Lampiran 7.4 perhitungan tegangan komposit dengan teori ROM	338
Lampiran 8.1 Pengujian FESEM dan EDS komposit 2 lapis sebelum digunakan	339
Lampiran 8.2 Pengujian FESEM dan EDS komposit 2 lapis setelah digunakan	343
Lampiran 9 Perlakuan awal kayu sebelum uji tekuk	347
Lampiran 10 Proses fabrikasi spesimen komposit	349
Lampiran 11 Data kecepatan angin plant sistem energi listrik pantai Pandansimo	354
Lampiran 12 Data kelembaban dan temperatur udara pantai Pandansimo	365

DAFTAR LAMBANG

Simbol	Arti	Satuan
A	Luas Penampang	mm ²
α	Sudut Serang	°
a	Faktor Induksi	
β	Sudut Aliran Angin	°
c	Panjang Chord	mm
c_a	Koefisien Aksial	
C_b	Konstanta model turbulen Spallart Almaraz	
c_d	Koefisien Gaya Hambat	
c_f	Koefisien Geser Permukaan	
c_l	Koefisien Gaya Angkat	
c_m	Koefisien Momen	
c_n	Koefisien Normal	
c_p	Koefisien Tekanan	
D	Gaya Geser	N
$\Delta\varepsilon$	Selisih Regangan	mm/mm
$\Delta\lambda$	Pertambahan Panjang	mm
$\Delta\sigma$	Selisih Tegangan	MPa
ε	Regangan	mm/mm
E	Modulus Elastisitas	MPa
E_k	Energi Kinetik	J
F	Gaya	N
F_n	Gaya Normal	N
F_t	Gaya Tangensial	N
F_{viscos}	Gaya Viskos	N
Γ	Koefisien Difusi	
γ	Sudut Puntir	°
G_v	Kekentalan Turbulen	N.s/m ²
L	Gaya Angkat	N
l	Panjang Airfoil	m
λ	Tip Speed Ratio	
l_i	Panjang Akhir	mm

l_0	Panjang Awal	mm
λ_p	Tip Speed Ratio Lokal	
M	Massa	Kg
μ	Kekentalan Dinamik	N.s/m ²
M	Momen Puntir	N/m
M_c	Massa Komposit	Gr
M_f	Massa Fiber	Gr
N	Jumlah Sudu	
P	Tekanan	N/m ²
P	Daya	Watt
P_{abs}	Tekanan Absolut	N/m ²
P_{gauge}	Tekanan Ukur	N/m ²
P_{op}	Tekanan Operasional	N/m ²
Q	Debit Aliran	m ³ /s
Q_m	Densitas Matriks	gr/ml
ρ	Massa Jenis	Kg/m ³
Re	Bilangan Reynold	
ρ_ϕ	Massa Jenis Fiber	gr/ml
r_h	Radius Home	
ρ_μ	Massa Jenis Matriks	gr/ml
σ	Tegangan	MPa
σ_Φ	Tegangan Fiber	MPa
σ_μ	Tegangan Matriks	MPa
T	Temperatur	°X
T	Waktu	S
τ	Tegangan Geser	N/m ²
T	Torsi	Nm
T_g	<i>Glass Transition Temperature</i>	°X
U	Kecepatan	m/s
ν	Kekentalan Kinematik	m ² /s
V	Kecepatan	m/s
V_c	Volume Komposit	ml
V_f	Fraksi Volume Serat	%
Ω	Kecepatan putar sudu	Rad/s
W	Kecepatan Relatif Angin	m/s

W_f	Fraksi Berat Serat	%
ω	Kecepatan Putar Angin Downstream	rad/s
y^+	Efek Dinding	
Y_v	Destruksi Kekentalan Turbulen	N.s/m ²
κ	Konstanta Boltzman	J/K

DAFTAR SINGKATAN

Simbol	Arti
AFD	: Analytic Fluid Dynamics
ASTM	: American Standard Test Method
AWEA	: American Wind Energy Association
BBM	: Bahan Bakar Minyak
BEM	: Blade Element Momentum
BP	: British Petroleum
CFD	: Computational Fluids Dynamic
CO ₂	: Carbon Dioksida
DESDM	: Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral
EFD	: Experimental Fluid Dynamics
ELV	: End-of-Life Vehicle
GFRP	: Glass Fibre Reinforced Plastics
HPNFRP	: High Performance Natural Fibre Reinforced Plastics Composite
ISO	: International Standard Organization
IYNF	: International Years of Natural Fibre
KBE	: Knowledge Base Economy
KBS	: Knowledge Base Society
KSL	: Kayu Sengon Laut
LAPAN	: Lembaga Antariksa dan Penerbangan Nasional
LNS	: Light Natural Sandwich Material
MAPP	: Maleated Agent Poly Propylene
MEKPo	: Metil Etil Keton Peroksida
MES	: Momentum Elemen Sudu
MSD	: Material Service Density
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
NACO	: Natural Composite
NaOH	: Natrium Hidroksida
PLN	: Perusahaan Listrik Negara
PMC	: Polymer Matrix Composite
PP	: Poly Propylene
PVC	: Poly Vinyl Chloride
RBE	: Resource Base Economy
ROM	: Rule Of Mixture
SA	: Spallart Almaras
SBM	: Setara Barel Minyak
SEM	: Scanning Electron Microscope

SKEA	:	Sistem Konversi Energi Angin
SNI	:	Standard Nasional Indonesia
SPC	:	Soy Protein Concentrate
SPSS	:	Statistical Product and Service Solutions
TSR	:	Tip Speed Ration
UPRs	:	Unsaturated Polymer Resin

GLOSARI

Abiotik	:	Komponen penyusun ekosistem yang terdiri dari benda-benda tak hidup
Adhesi	:	Keadaan melekat pada benda lain
Angle of attack	:	Sudut datang angin terhadap sisi depan sebuah sudu
Alternatif	:	Pilihan diantara dua atau beberapa kemungkinan
Analisis	:	Investigasi secara mendalam terhadap keterkaitan diantara beberapa faktor berbeda dalam suatu kejadian
Aspek	:	Pemunculan atau penginterpretasian gagasan, masalah, situasi, dan sebagainya, pertimbangan yang dilihat dari sudut pandang tertentu
Atmosfer	:	Lapisan udara yg menyelubungi bumi sampai ketinggian 300 km (terutama terdiri atas campuran berbagai gas, yaitu nitrogen, oksigen, argon, dan sejumlah kecil gas lain)
Aliran tunak	:	Aliran fluida dimana kondisi alirannya tetap
Biotik	:	Makhluk hidup (tumbuhan, hewan, manusia), baik yang mikro maupun yang makro serta prosesnya
Core	:	Bagian inti dari sudu turbin
Dampak lingkungan	:	Setiap perubahan pada lingkungan baik yang merugikan atau bermanfaat yang keseluruhannya ataupun sebagian disebabkan oleh aspek lingkungan dari sistem yang diamati
Daya output	:	Besarnya daya yang dapat dihasilkan, misal besarnya energy listrik yang dapat dihasilkan oleh kincir angin
Deformasi	:	Perubahan bentuk suatu material sebagai akibat adanya beban yang bekerja
Density	:	Kerapatan atau jumlah massa yang terdapat di dalam satu satuan volume
Derau	:	Bunyi dengan gelombang yang tidak teratur
Degradasi thermal	:	Penurunan kekuatan material akibat adanya pengaruh temperatur
Difusi	:	Pencampuran gas atau zat cair
Drag	:	Gaya hambat yang terjadi pada benda yang bergerak
Ekologi	:	Ilmu tentang hubungan timbal balik antara makhluk hidup dan (kondisi) alam sekitarnya (lingkungannya)
Elastisitas	:	Kemampuan yang mudah berubah bentuknya dan mudah

	: kembali ke bentuk asal, sifat lentur
Emisi	: Pencemaran yang dihasilkan oleh suatu proses, misal emisi gas buang dari kendaraan bermotor
Energi	: Kemampuan untuk melakukan kerja, daya (kekuatan) yang dapat digunakan untuk melakukan berbagai proses kegiatan
Energi Konvensional	: Energi primer yang merupakan bahan bakar cair dan batubara
Fiber	: Serat, baik serat alam maupun serat buatan yang dapat dipakai sebagai matrik material komposit
Fraksi volume	: Persentase volume serat terhadap volume komposit
Fraksi berat	: Persentase berat serat terhadap berat komposit
Gaya aksial	: Gaya yang terjadi dengan arah sejajar terhadap luasan penampang benda
Gaya normal	: Gaya yang terjadi dengan arah tegak lurus terhadap luasan penampang benda
Gearbox	: Kotak yang berisi susunan roda gigi sebagai pemindah daya, transmisi
Generator	: Mesin yang mengubah energi mekanik poros menjadi energi listrik
Hand lay up	: Metode dalam pembuatan komposit dengan pelapisan beberapa lapisan dengan menggunakan tangan
Interfasce	: Batas diantara dua permukaan
Intermolekular	: Berhubungan antara dua atau lebih molekul
Interphase	: Kondisi dimana zat dalam keadaan phase yang berbeda
Irreversible	: Kondisi sistem yang tidak dapat kembali seperti kondisi awalnya jika arah proses dibalik, karena adanya rugi-rugi
Kadar air	: Kandungan air bebas dalam suatu bahan
Katalisator	: Sesuatu yang menyebabkan terjadinya perubahan dan menimbulkan kejadian baru atau mempercepat suatu reaksi kimia
Karakteristik	: Sifat-sifat khusus yang dimiliki oleh suatu material
Kelembaban	: Kandungan uap air yang terdapat dalam udara
Komposit	: Gabungan, campuran, paduan serat dan matrik
Konfigurasi	: Susunan
Kontinuitas	: Aliran fluida dengan debit aliran yang tetap, sehingga kecepatan aliran dipengaruhi oleh luas penampang saluran
Konversi Energi	: Mengubah suatu bentuk energi ke bentuk energi yang lainnya.
Leading edge	: Bagian depan atau sisi depan sudu kincir angin terhadap

	: arah angin
Lift	: Gaya angkat yang dihasilkan oleh adanya aliran fluida
Lingkungan	: Daerah atau kawasan dan sebagainya yang termasuk di dalamnya
Massa jenis	: Massa benda yang terdapat dalam setiap satuan volumenya
Melting point	: Temperature leleh dari suatu material
Meshing	: Membagi model menjadi elemen-elemen dengan ukuran tertentu didalam simulasi
Model	: Suatu pola, yang benar-benar ada secara fisik, atau formulasi matematika yang dapat mempresentasikan sistem aktual
Modifikasi	: Melakukan perubahan pada mesin atau alat untuk meningkatkan kinerjanya
Molding	: Proses manufaktur dengan penggunaan cetakan benda-benda yang akan di buat
Optimalisasi	: Modifikasi didalam perancangan yang dilakukan untuk mendapatkan unjuk kerja yang maksimal dari suatu alat atau mesin
Pemanasan Global	: (Efek rumah kaca) adalah pengaruh peningkatan temperature pada lapisan atmosfer terendah yang diakibatkan oleh kehadiran gas-gas rumah kaca yang mengadsorpsi radiasi gelombang pendek oleh permukaan bumi. Adsorpsi tersebut melepaskan panas sehingga terjadi peningkatan terhadap temperatur atmosfer
Pitching	: Gerakan osilasi pada sumbu horizontal
Plywood	: Kayu olahan yang dibuat dari beberapa lapisan kayu
Polimer	: zat yang dihasilkan dengan cara polimerisasi dari molekul yang sangat banyak dengan satuan struktur berantai panjang, baik lurus, bercabang, maupun menyilang yang berulang, misal plastik, serat, dan karet.
Regangan	: Pertambahan panjang material karena pembebanan, berhubungan dengan sifat plastis material
Renewable resources	: Sumber-sumber yang keberadaannya dapat diperbaharui
Reversible	: Kondisi sistem yang dapat kembali ke kondisi awal tanpa adanya rugi-rugi jika arah proses dibalik
Sandwich	: Komposit yang dibuat secara berlapis-lapis
Simulasi	: Penggambaran suatu sistem atau proses dengan peragaan berupa model
Sintetis	: Tiruan, bersifat hasil pengolahan manusia

Sistem	: Gabungan beberapa elemen yang saling bekerja bersama-sama untuk mencapai tujuan
Sistem Konversi Energi	: Gabungan beberapa elemen yang saling bekerja bersama-sama untuk mengubah suatu bentuk energi ke bentuk energi yang lainnya.
Skenario	: Gambaran situasi yang mungkin di masa akan datang
Spesimen	: Benda uji, bagian dari kelompok atau bagian dari keseluruhan
Shrinkage	: Penyusutan pada suatu material
Swell	: Pengelembungan material akibat adanya peresapan air melalui pori-pori material
Susut	: Mengerut menjadi pendek, kecil, dan sebagainya
Tensile	: Kemampuan untuk meregang, berkaitan dengan tarikan
Tensile strength	: Beban maksimum yang masih mampu ditahan oleh material sebelum material tersebut putus, kekuatan material terhadap beban tarikan
Tip Speed Ratio	: Perbandingan kecepatan pada ujung sudu terhadap kecepatan putaran rotor
Turbulensi	: Gerak bergolak tidak teratur yg merupakan ciri gerak zat alir pada kecepatan tinggi
Trailing edge	: Bagian belakang atau sisi belakang sudu kincir angin terhadap arah angin
Treatment	: Perlakuan yang dilakukan terhadap material komposit sebelum difabrikasi
Twist	: Besar kecilnya sudut puntiran yang dapat diberikan terhadap sudu turbin
Viscosity	: Kemampuan resistensi fluida terhadap adanya gaya geser, berhubungan dengan kekentalan fluida
Visual	: Dapat dilihat dengan indra penglihat (mata), berdasarkan penglihatan
Vorticity	: Ulekan-ulekan yang terjadi sebagai akibat adanya fluktuasi aliran fluida

ABSTRAK

Minyak bumi, batubara, gas (energi fosil) saat ini merupakan sumber energi dominan di Indonesia dan bahan baku industri petrokimia, namun ketersediaannya terbatas. Dengan tingkat produksi seperti 2008, dan tanpa penemuan cadangan baru, cadangan minyak bumi Indonesia akan habis dalam waktu 23 tahun mendatang. Pembakaran minyak bumi juga berkontribusi pada pemanasan global, karena penambahan CO₂ di udara. Indonesia merupakan negara kepulauan dan mempunyai garis pantai terpanjang ke-empat di dunia. Dengan keadaan tersebut, energi angin menjadi potensi yang harus dikembangkan dan dimanfaatkan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan komposit alami dari serat rami dan Kayu Sengon Laut sebagai bahan propeler kincir angin di daerah pesisir. Metode Hand Lay Up digunakan untuk pembuatan komposit 1 lapis dan 2 lapis, dengan serat rami sebagai matrik dan Sengon Laut sebagai intinya. Optimalisasi desain propeler dilakukan dengan simulasi dinamika fluida berbantuan software FLUENT. Model propeler yang optimal dari hasil simulasi selanjutnya difabrikasi dari material komposit dua lapisan serat rami. Propeler berbahan komposit ini digunakan sebagai kincir angin yang dipasang di pantai Pandasimo, Bantul, Yogyakarta selama 5,5 bulan.

Dari hasil simulasi, desain optimum propeler memiliki panjang 1,625 m dengan 20 elemen sudu. Panjang chord maksimum adalah 0,28 m dan minimum 0,08 m. Propeler memiliki koefisien Betz maksimum sebesar 0,4 pada Tip Speed Ratio 4. Pada kecepatan angin rata-rata 3-5 m/s, kincir angin yang terdiri dari tiga propeler ini dapat menghasilkan daya keluaran sebesar 50-240 watt, torsi sebesar 25-75 Nm, dan koefisien daya sebesar 0,35-0,40. Koefisien aerodinamis propeler hasil modifikasi NACA 4415 memiliki kinerja yang baik untuk bilangan Reynolds 41.000-250.000.

Fabrikasi dengan metode Hand Lay-Up memberikan kesalahan berat relatif rata-rata sekitar 12,148% untuk komposit 2 lapis dan 5,628% untuk komposit 1 lapis. Sedangkan fraksi volume serat untuk komposit 1 lapis sebesar 46,012% dan untuk komposit 2 lapis sebesar 49,130%. Dari uji tekuk didapatkan hasil bahwa komposit 2 lapis lebih baik dibandingkan komposit 1 lapis. Untuk komposit 2 lapis, tegangan tekuk tertinggi sebesar 30,881 MPa, modulus elastisitas sebesar 2,018 Gpa, dan regangan sebesar 1,795%. Hasil pengujian EDS menunjukkan unsur karbon (C) mengalami penurunan sebesar 4,01%, sedangkan unsur oksigen (O) mengalami kenaikan sebesar 7,85%. Fenomena tersebut disebabkan kelembaban yang tinggi, dengan rata-rata sebesar 69,98%.

Dengan asumsi bahwa kebutuhan energi listrik warga di sekitar Pantai Pandansimo sebesar 22,5 KW yang dipenuhi dengan 1 unit genset 30 KVA, dapat di-substitusi oleh penggunaan kincir angin dengan daya 1KW, dengan memperhitungkan efisiensi daya output sebesar 40%, maka diperlukan sebanyak 56 unit kincir angin dengan potensi pengurangan emisi CO₂ sebesar 70,81 ton / tahun.

Diharapkan pemanfaatan serat rami dan kayu sengon laut sebagai pengganti serat gelas pada pengembangan propeler kincir angin dapat diaplikasikan secara luas oleh masyarakat pesisir pantai dengan kecepatan angin rata-rata 3-5 m/s.

Kata kunci: optimasi, propeler NACA 4415, komposit alam, energi terbarukan, emisi CO2

ABSTRACT

Petroleum, coal, and gas as fossil energy is currently the dominant source of energy and raw materials in Indonesian petrochemical industry, but the availability is limited. With production levels as 2008, and without the discovery of new reserves, Indonesia's oil reserves will be exhausted within 23 years. Burning fossil fuels also contribute to global warming, because the addition of CO₂ in the air. Indonesia is an archipelago country which has the fourth longest coastline in the world. With these circumstances, the wind energy is potential must be developed and utilized.

The objective of this research is to study a feasibility of potential local genius material in Indonesia, particularly ramie fiber and Albizia wood as a material of hybrid composite for wind turbine propeller. Prototype of wind turbine is fabricated by modification of NACA 4415 standard airfoil, which proposed for low speed wind and environmentally friendly. Manufacturing method used for fabrication of this hybrid composite is Hand Lay Up Method with one and two layers of ramie fiber.

Optimization of the blade design is done by computational fluid dynamics with software FLUENT. Optimum blade model from simulation is then fabricated using two layers composite. This composite blade is used for wind turbine and being installed at Pandasimo beach, Bantul, Yogyakarta for 5.5 months.

The optimum design of blades is found to be 1.625 m in length with 20 elements blade with maximum chord length of 0.28 m and minimum of 0.08 m. Blade has a maximum Betz coefficient of 0.4 at Tip Speed Ratio of 4. At average wind speed of 3-5 m/s in Indonesia, this wind turbine can generate power output, torque, and power coefficient of 50-240 watts, 25 Nm-75 Nm, 0.35-0.40, respectively. The coefficient of aerodynamic of modified NACA 4415 has good performance at Reynolds number of 41000- 250000. Fabrication with hand lay-up method give the mean weight relative error about 7.182% in 2 layers and 6.880% in 1 layer. Mean fiber volume fraction for 1 layer and 2 layers composite are 46,012% and 49,130%, respectively. The highest bending stress is found to be 30.881 MPa in 2 layers composite. The modulus elasticity and bending strain of 2 layers composite are 2.018 GPa and 1.795%. EDS test results indicate that carbon element (C) decreased by 4.01%, while the oxygen element (O) increased by 7.85%. The phenomenon is caused by high humidity, with an average of 69.98%.

Assuming that the electrical energy needs of people around the Pandansimo Beaches ar 22.5 KW were filled with 1 unit 30 KVA generator, can be substituted by the use of 1 KW wind turbine consider the output power efficiency by 40%, then the utilization of 56 units wind turbine has CO₂ emission reduction potential of 70.81 tons / year.

Hopefully, utilization of ramie fiber and Albizia wood as a material of hybrid composite as substitution of glass fiber for wind turbine propeller development can be applied extensively by coastal communities with average wind speed of 3-5 m/s.

Keywords: *optimization, NACA 4415 propeller, natural composite, renewable energy, CO₂ emission*

RINGKASAN

Latar belakang

Minyak bumi, batubara, gas (energi fosil) saat ini merupakan sumber energi dominan di Indonesia dan bahan baku industri petrokimia, pemanfaatannya relatif mudah, namun ketersediaannya terbatas. Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi (DESDM, 2005) menyatakan bahwa cadangan minyak bumi Indonesia pada tahun 2008 berjumlah $8,2 \times 10^9$ barel, sedangkan tingkat produksi $3,57 \times 10^8$ barel/tahun. Dengan tingkat produksi seperti 2008, dan tanpa penemuan cadangan baru, cadangan minyak bumi Indonesia akan habis dalam waktu 23 tahun mendatang. Dalam Blueprint Pengelolaan Energi Nasional (DESDM, 2005), pada tahun 2005, sekitar 95% dari kebutuhan energi primer berasal dari bahan bakar fosil. Selanjutnya, jika tanpa usaha optimalisasi pengelolaan energi, pada tahun 2025 diperkirakan proporsi akan menjadi 97%.

Kemenristek (2006), menyatakan bahwa cadangan minyak bumi Indonesia pada tahun 2008 berjumlah $3,7 \times 10^9$ barel atau hanya 0,3% cadangan dunia, sedangkan tingkat produksi pada tahun itu sekitar 10^6 barel/hari atau 1,2% produksi dunia, dengan nilai R/P = 10,2 tahun. Dua skenario ini tentunya menggambarkan betapa seriusnya problem energi nasional, sehingga perlu diantisipasi dengan sungguh-sungguh. Pembakaran minyak bumi, yang tergolong energi fosil, juga berkontribusi pada pemanasan global, karena penambahan CO₂ di udara.

Indonesia merupakan negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang ke-empat di dunia (setelah AS, Kanada, dan Rusia) yaitu $\pm 95,181$ Km serta terletak di lintasan garis khatulistiwa, dan memiliki 17,480 pulau. Dengan batas tersebut, energi angin menjadi potensi yang harus dikembangkan dan dimanfaatkan. Di tengah potensi angin melimpah di kawasan pesisir Indonesia, total kapasitas terpasang dalam sistem konversi energi angin saat ini kurang dari 800 kilowatt. Mengacu pada kebijakan energi nasional, maka pembangkit listrik tenaga angin ditargetkan mencapai 250 megawatt (MW) pada tahun 2025. Pemanfaatan terhadap sumber daya alam yang

terbarukan merupakan hal-hal yang harus dan terus dikembangkan agar tidak terjadi krisis dan kelangkaan energi, khususnya untuk pemenuhan kebutuhan masyarakat kepulauan.

Menurut Dewan Nasional Perubahan Iklim bahwa Indonesia merupakan penghasil emisi gas rumah kaca (GRK) yang relatif besar, terutama dari pemanfaatan hutan dan lahan, tetapi juga dari penggunaan bahan bakar fosil yang meningkat dengan pesat. Emisi dari pemakaian batu bara mengalami peningkatan paling cepat dalam dekade terakhir akibat pemakaian yang terus meningkat untuk pembangkit tenaga listrik.

Pada Oktober 2000, di negara-negara Uni-Eropa telah menetapkan peraturan ”*End-of-Life Vehicles (ELV) directive (2000/53/EC)*”, yang menargetkan minimum 85% berat ELV harus dapat diperbaharui pada tahun 2006 dan minimum 95% berat ELV juga harus dapat diperbaharui pada tahun 2015. Selanjutnya FAO juga mendeklarasikan “*International Year of Natural Fiber (IYNF) 2009*” untuk mendesak berbagai industri manufaktur agar memanfaatkan bahan-bahan serat alam. Kedua aturan tersebut mendukung pemanfaatan potensi *local genius materials* di Indonesia khususnya “serat alam dan kayu alam” sebagai bahan rekayasa produk teknologi, termasuk *natural composite* (NACO). Dengan demikian, substitusi penggunaan bahan-bahan sintetis dengan bahan alam yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui menjadi persyaratan produk.

Saat ini propeler kincir angin, yang sebelumnya dibuat dari material logam, telah mulai dibuat dari material komposit *skin* GFRP (*glass fiber reinforced plastic*). Hal ini dikarenakan material propeler tersebut diharapkan mempunyai bobot yang ringan agar mudah berputar ketika ditiup angin. Berhubung propeler juga berfungsi sebagai struktur primer maka sebaiknya dibuat dari komposit yang ramah lingkungan. Potensi sumber daya alam rami dan KSL perlu dimanfaatkan untuk mereduksi penggunaan bahan sintetis impor.

Rumusan masalah

Permasalahan yang akan dikaji dan dicari penyelesaiannya dalam penelitian ini adalah (1) Bagaimana melakukan optimasi desain *propeler airfoil* standard NACA 4415 dengan simulasi CFD, (2) Bagaimana pemanfaatan potensi *local genius materials* di Indonesia khususnya “serat alam dan kayu alam” untuk pengembangan teknologi komposit lamina serat rami dan *core* kayu sengon laut untuk pembuatan prototipe *propeler airfoil* modifikasi NACA 4415 yang paling sesuai untuk angin kecepatan rendah dan ramah lingkungan, (3) Bagaimana pengaruh lingkungan pesisir pantai Pandansimo terhadap ketahanan propeler

berbahan baku komposit KSL dan serat rami yang dipasang di daerah pantai, (4) Bagaimana manfaat lingkungan penerapan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) di lingkungan di sekitar pantai Pandansimo Bantul.

Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain mendukung potensi budidaya rami di Indonesia sebagai salah satu langkah bijak untuk menyelamatkan kelestarian lingkungan dari limbah yang dibuat dan keterbatasan sumber daya alam fosil yang tidak dapat diperbaharui. Manfaat lain yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah pemanfaatan SKEA skala kecil dan menengah (50 W - 100 kW) di lokasi pesisir pantai Pandansimo untuk kebutuhan listrik rumah tangga, *cold storage* (pengawet ikan dan obat), catu daya peralatan komunikasi, serta pengisi baterai perahu nelayan. Dengan demikian diharapkan dapat berkontribusi dalam meningkatkan taraf hidup masyarakat pedesaan khususnya wilayah pesisir pantai melalui pemenuhan energi listrik.

Tinjauan Pustaka

Komposit merupakan penggabungan dari dua material atau lebih, yang dibentuk pada skala makroskopik dan menyatu secara fisik untuk memperoleh sifat-sifat baru yang tidak dimiliki oleh material pembentuknya (Kaw, 1997). Dalam penggabungan antara serat dan resin, serat akan berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*) yang biasanya mempunyai kekuatan dan kekakuan tinggi, sedangkan resin berfungsi sebagai perekat atau matrik untuk menjaga posisi serat, mentransmisikan gaya geser dan juga berfungsi sebagai pelapis serat. Matrik biasanya mempunyai kekuatan relatif rendah tetapi ulet, karena itu serat secara dominan akan menentukan kekuatan dan kekakuan komposit. Semakin kecil ukuran serat, maka akan memberikan perekatan dan kekuatan yang semakin baik, karena rasio antara permukaan dan volume serat semakin besar (Riedel, 1999).

Kekuatan komposit sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis, geometri, arah, distribusi, dan kandungan serat. Berdasarkan teori *Rule of Mixture* (ROM), kekuatan komposit meningkat seiring dengan penambahan kandungan serat mencapai 60-70% (Sanadi dkk., 1986). Pertimbangan pemilihan serat untuk komposit sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya adalah nilai kekuatan dan kekakuan komposit yang diinginkan, perpanjangan ketika patah, stabilitas termal, ikatan antara serat dan matrik, perilaku dinamik,

perilaku jangka panjang, massa jenis, harga, biaya proses, ketersediaan, dan kemudahan daur ulang (Riedel, 1999). Sebagai contoh, ketika komposit akan digunakan untuk struktur ringan, maka kekuatan dan kekakuan spesifiknya akan lebih diutamakan.

Riset komposit serat alam di Indonesia secara intensif dimulai tahun 2000-an. Misalnya riset yang dilakukan oleh Mulyadi dan Rochardjo (2003) dengan menggunakan serat *Agave cantala* dan matrik plastik. Pemanfaatan limbah serat buah sawit untuk berbagai aplikasi teknik juga telah diteliti secara komprehensif (Jamasri dkk., 2005-2006). Kajian sifat tarik komposit serat buah sawit acak bermatrik poliester juga telah dilakukan oleh Jamasri dkk. (2005). Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan kandungan volume serat buah sawit mampu meningkatkan fungsi panel komposit menjadi panel struktur, baik sebagai struktur sekunder maupun primer.

Tahun 2005, riset komposit sangat intensif dilakukan dengan memanfaatkan serat aren, serat kenaf, serat buah sawit, KSL, dan kayu sawit. Riset substitusi core sintesis dengan core KSL telah menunjukkan bahwa kekuatan komposit sandwich GFRP core KSL memiliki kekuatan bending lebih tinggi (108,7 MPa) dibandingkan dengan penggunaan core *divinycell PVC* (Diharjo, 2005). Pengkajian secara intensif pemanfaatan serat kenaf dan kayu sengon laut sebagai unsur utama pembentuk panel komposit sandwich dilakukan oleh Diharjo (2006). Kajian kompatibilitas antara serat rami dengan matrik epoxy agar dihasilkan *High Performance Natural Fiber Reinforced Plastic Composites* (HPNFRP) telah dilakukan oleh Marsyahyo (2006). Riset pemanfaatan serat alam pernah dilakukan oleh Diharjo dkk. (2005) yang mengembangkan pemanfaatan serat alam kenaf sebagai bahan komposit. Komposit kenaf – *polyester* dalam penelitian ini memiliki sifat tarik yang lebih baik daripada komposit kenaf – PP yang diteliti oleh Karnani dkk. (1997).

Selanjutnya Diharjo dkk. (2007) mengembangkan penelitian disertasi komposit *sandwich* dengan core kayu sengon laut (KSL). Sifat impak komposit *sandwich* serat kenaf acak – *polyester* dengan core KSL meningkat seiring dengan peningkatan ketebalan core. Pengembangan bahan biokomposit juga pernah dilakukan oleh Mujiyono dkk. (2008). Dalam penelitian ini serat alam yang digunakan adalah serat rami dan serat bambu, sedangkan matrik alam yang digunakan sebagai perekat adalah hasil sekresi kutu pohon albasia (sengon laut).

Airfoil yang digunakan untuk profil dasar sudu turbin adalah airfoil yang dilalui oleh angin kecepatan rendah (maksimum 10 m/s), sehingga parameter rasio gaya angkat terhadap

gaya hambat maksimum menjadi fokus pengembangan karakteristik airfoil untuk turbin angin (Timmer and Rooij, 2003) dengan rentang kecepatan angin 0-10 m/s. Studi pengembangan airfoil seri NACA 44xx yaitu NACA 4415 untuk bilangan Reynolds rendah dalam interval 50.000 sampai 600.000 (kecepatan rendah) telah dilakukan oleh Ostowari and Naik (1985) dan diperoleh bahwa NACA 4415 jika digunakan untuk turbin angin sumbu horizontal pada kecepatan angin tinggi dapat menimbulkan getaran dan noise yang besar, hal ini sesuai dan diperkuat dengan hasil penelitian Saliveros (1988). Hasil Studi oleh Hoffmann at.al (1996), dilakukan pada kondisi aliran mantap (*steady*) dengan bilangan Reynolds 106 yang melalui airfoil NACA 4415 didapat koefisien gaya angkat 1.35 pada sudut serang 14.3° dan dinyatakan bahwa jika aliran udara adalah tidak mantap (*unsteady*) maka akan terjadi peningkatan koefisien gaya angkat sebesar 10% sampai 15% dibanding pada kondisi aliran mantap, hal ini sesuai jika diaplikasikan pada turbin angin yang beroperasi pada kondisi angin yang tidak mantap. Timmer and Rooij (2003) juga menyatakan pada awal tahun 1980 sampai 1990, profil yang banyak digunakan sebagai bentuk dasar sudu turbin angin adalah airfoil yang dikembangkan oleh NASA yang diberi kode NACA 4 digit (seri NACA 44xx) dan NACA 5 digit (seri NACA 63xxx). Airfoil NACA tersebut dari hasil pengujian mengalami fenomena transisi yang lebih awal dari yang diprediksi dan hal ini sesuai dan diperkuat dengan yang dilakukan oleh Gómez and Álvaro (2006), sehingga perlu dikembangkan atau dilakukan modifikasi pada profil NACA tersebut terutama pada ketebalan airfoilnya.

Metodologi penelitian

Simulasi optimasi rancangan propeler standar NACA 4415 yang dimodifikasi dilakukan menggunakan komputer dengan bantuan software ANSYS FLUENT v6.3 CFD; yang bertujuan untuk menghemat waktu dan biaya dalam merancang airfoil.

Dalam penelitian ini juga diuraikan tentang analisis dampak lingkungan penerapan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA), khususnya untuk mengetahui aspek ketahanan lingkungan dari propeler berbahan baku komposit KSL dan serat rami yang dipasang di daerah pantai. Parameter yang akan diukur meliputi temperatur, kelembaban, dan kecepatan angin. Selanjutnya dilakukan pengujian pada struktur mikro untuk mengetahui ada tidaknya penurunan ketahanan bahan komposit.

Pengambilan data hasil pengujian di lapangan yang berupa kecepatan angin, temperatur dan kelembaban dilakukan setiap hari, dengan rata-rata 12 jam setiap hari pada waktu pagi (jam 06.00 – 12.00 WIB), dan malam hari (jam 18.00 – 24.00 WIB). Sumber data lainnya yang berupa kecepatan angin dan temperatur diperoleh dari logger milik LAPAN yang ditempatkan di Pantai Pandansimo. Selanjutnya data-data yang telah terkumpul diolah dan disajikan dalam bentuk tabel, angka, dan grafik menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, SPSS, dan Matlab.

Metode penelitian dilakukan dengan metode kuantitatif, yaitu dengan melakukan penelitian secara eksperimental lapangan dan penelitian secara teoritis dengan cara pengukuran langsung. Pengukuran dilakukan selama kurang lebih 5,5 bulan dengan pengambilan sampel dilakukan setiap 1 minggu sekali. Kondisi eksperimen di lapangan dari hasil penelitian ini merupakan pencerminan data operasional yang sebenarnya.

Hasil dan pembahasan

Kajian energi

Berdasarkan hasil simulasi numerik karakteristik airfoil NACA 4415 dan untuk meningkatkan nilai C_l terutama pada kondisi sudut serang pada rentang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat dan pada rentang $14 \leq \alpha \leq 20$ derajat, maka dilakukan modifikasi pada profil NACA 4415 bagian depan permukaan bawah dan bagian belakang permukaan atas airfoil. Peningkatan nilai C_l diperlukan untuk meningkatkan torsi yang dapat dihasilkan oleh sudu turbin.

Berdasarkan hasil simulasi, maka nilai koefisien aerodinamika untuk airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif dapat dibuat perbandingan kurva koefisien lift terhadap *angle of attack*. Pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 41000 terjadi peningkatan nilai C_l airfoil NACA dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 14,8%, untuk bilangan Reynolds 55000 besar peningkatan rata-rata adalah 7,2%, untuk bilangan Reynolds 68000 besar peningkatan rata-rata adalah 4,9%, untuk bilangan Reynolds besar peningkatan rata-rata adalah 2,3%, untuk bilangan Reynolds 96000 besar peningkatan rata-rata adalah 4,2%, untuk bilangan Reynolds 250000 besar peningkatan rata-rata adalah 2,2%.

Berdasarkan kurva perbandingan koefisien aerodinamika airfoil NACA 4415 dengan NACA 4415 modif, dapat disimpulkan bahwa airfoil NACA 4415 modif mempunyai kinerja yang lebih baik untuk aliran yang mempunyai bilangan Reynolds 4.1×10^4 sampai dengan 2.5

$\times 10^5$. Berdasarkan kajian numerik, maka airfoil NACA 4415 modif dapat digunakan sebagai dasar pembentukan kurva polar 360° dengan cara ekstrapolasi dari -180° sampai 180° .

Perancangan sudu turbin angin berdasarkan bentuk elemen airfoil NACA 4415 modif diawali dengan membuat kurva polar 360° dengan cara melakukan ekstrapolasi dari -180° sampai $+180^\circ$ terhadap kurva drag polar. Hasil ekstrapolasi untuk membentuk kurva polar 360° pada kondisi kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s berdasarkan kurva C_l dan C_d terhadap α pada $Re = 41000$ sampai $Re = 250000$.

Perancangan sudu turbin didasarkan pada kondisi kecepatan angin Indonesia pada umumnya dan kondisi kecepatan angin di daerah Pandansimo – Yogyakarta yang mempunyai kecepatan rata-rata 3 sampai 5 m/s dan potensi energi angin yang akan di ekstrak adalah 1000 Watt atau 1 kW, sehingga kondisi awal perancangan sudu mempunyai dimensi panjang sudu 1.50 m dan pada kondisi simulasi diabaikan rugi-rugi tepi sudu sehingga panjang sudu diperpanjang menjadi 1.625 m.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya dan torsi mempunyai kecenderungan yang sama (kurva identik) mempunyai gradient positif kecil (meningkat secara lambat/landai) dengan meningkatnya kecepatan angin dari 1 m/s sampai 5 m/s dan gradient positif cenderung membesar dengan meningkatnya kecepatan angin dari 5 m/s sampai 10 m/s dan gradient positif cenderung semakin membesar (meningkat secara esktrim) dengan meningkatnya kecepatan angin dari 10 m/s sampai 20 m/s.

Rotor turbin angin yang dibentuk terdiri dari 3 buah sudu yang dapat menghasilkan daya output 50 Watt sampai 240 watt pada interval kecepatan angin rata-rata di Indonesia 3 m/s sampai 5 m/s.. Rotor turbin mempunyai torsi 25 Nm sampai 75 Nm pada interval kecepatan angin rata-rata di Indonesia 3 m/s sampai 5 m/s. Sehingga rotor turbin mempunyai koefisien daya C_p 0,35 sampai 0,40 pada interval kecepatan angin rata-rata di Indonesia 3 m/s sampai 5 m/s

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa koefisien daya mempunyai kecenderungan yang sama (kurva indentik) mempunyai gradient positif yang besar dengan meningkatnya kecepatan angin dari 1 m/s sampai 3 m/s dan gradien cenderung kecil (relatif konstan) dengan meningkatnya kecepatan angin dari 3 m/s sampai 20 m/s. Berdasarkan kurva perbandingan koefisien aerodinamika airfoil NACA 4415 dengan NACA 4415 modif dapat disimpulkan

bahwa airfoil NACA 4415 modif mempunyai kinerja yang lebih baik untuk aliran yang mempunyai bilangan Reynolds 4.1×10^4 hingga 2.5×10^5 .

Bentuk sudu turbin angin yang optimum adalah bentuk yang dihasilkan dapat dipuntir sejauh maksimal $24,8^\circ$ pada bagian root (pangkal) sudu turbin angin serta $-4,7^\circ$ pada bagian tip (ujung) sudu turbin angin.

Material Komposit

Salah satu faktor penting yang menentukan karakteristik dari komposit adalah perbandingan matrik dan penguat/serat. Perbandingan ini dapat ditunjukkan dalam bentuk fraksi volume serat (V_f) atau fraksi berat serat (W_f). Namun, formulasi kekuatan komposit lebih banyak menggunakan fraksi volume serat.

Fraksi volume serat (penguat serat rami dan kayu sengon laut) pada komposit 2 lapis yaitu, $v_f : 49,130\%$ lebih kecil dibanding komposit yang difabrikasi 1 lapis yaitu sebesar $v_f : 46,012\%$. Penurunan fraksi volume serat dalam penelitian untuk kedua parameter ini ternyata berakibat pada peningkatan kekuatan mekanik terutama tegangan tekuk sebesar $62,42\%$ pada komposit 2 lapis. Keadaan ini terjadi dimungkinkan matriks cukup kuat dan mampu baik memindahkan gaya tekuk saat flexural test.

Uji kekuatan tekuk (*Flexural Test*) merupakan salah satu indikasi kekuatan dari material spesimen untuk pembuatan prototipe propeler airfoil standard NACA 4415. Spesimen dibuat dalam variasi 1 lapis dan 2 lapis untuk serat rami dengan 1 *core* kayu sengon laut. Hasil uji kekuatan tekuk (*Flexural Test*) dapat diambil tiga parameter karakteristik mekanik material, yaitu tegangan tekuk, regangan tekuk dan modulus elastisitas. Tegangan tekuk terbesar dimiliki oleh spesimen 2 lapis yaitu sebesar $30,881\text{ Mpa}$ dengan regangan $1,795\%$ dan modulus young $2,018\text{ Gpa}$. Pada spesimen 1 lapis tegangan tekuk sebesar $19,013\text{ Mpa}$ dengan regangan $2,313\%$ dan modulus young $0,776\text{ Gpa}$. Sehingga dalam pembuatan prototipe airfoil standard NACA 4415 ditetapkan menggunakan spesimen komposit serat rami 2 lapis core kayu sengon laut yang memiliki tegangan tekuk terbesar akan tetapi ringan agar mudah berputar pada debit angin 3m/s sesuai kondisi operasi atau kerja propeler.

Komposit serat rami *core* kayu sengon laut dilakukan dengan cukup baik menggunakan metode hand lay up dengan kesalahan relatif berat komposit fabrikasi terhadap berat komposit teori pada uji flexure adalah $5,626\%$ untuk satu lapis dan $12,148\%$ untuk dua lapis.

Hasil validasi menunjukkan bahwa perhitungan sifat mekanis dari hasil uji lebih besar daripada perhitungan dengan menggunakan hukum pencampuran (Rule of Mixture) untuk spesimen jenis material komposit 2 lapis (layer) yaitu sebesar 3,289 MPa (10,65%), dengan demikian sifat mekanis yang dihasilkan dari pengujian memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi. Pengamatan struktur komposit dengan SEM sebelum dan sesudah komposit dioperasikan sebagai propeler selama 5,5 bulan tidak mengalami perubahan secara signifikan.

Kayu sebagian besar tersusun atas tiga unsur yaitu unsur C, H dan O. Unsur-unsur tersebut berasal dari udara berupa CO₂ dan dari tanah berupa H₂O. Namun, dalam kayu juga terdapat unsur-unsur lain seperti N, P, K, Ca, Mg, Si, Al dan Na. Setelah sudu dipasang di lokasi pengujian selama 5,5 bulan, hasil pengujian EDS menunjukkan unsur karbon (C) mengalami penurunan sebesar 4,01 %, sedangkan unsur oksigen (O) mengalami kenaikan sebesar 7,85%. Fenomena tersebut disebabkan kelembaban yang tinggi, dengan rata-rata kelembaban selama 5,5 bulan sebesar 69,98%. Kelembaban yang tinggi menyebabkan oksigen yang terdapat di udara akan terdifusi ke dalam material sudu.

Aspek Lingkungan

Secara geografis, pesisir pantai selatan Yogyakarta merupakan lahan terbuka yang luas, matahari yang bersinar sepanjang hari dan kecepatan angin rata-rata 4 m/s. Kondisi tersebut menjadikan satu kriteria pemilihan lokasi pengembangan energi listrik di pantai Pandansimo, Desa Poncosari, Bantul. Lokasi ini didukung oleh kondisi alam di sebelah selatan yang berhadapan langsung dengan laut selatan Jawa. Energi listrik yang dihasilkan diharapkan mendukung sektor pertanian, perikanan, dan pariwisata yang saat ini sedang dikembangkan di pantai Pandansimo.

Selain berkontribusi dalam penyediaan energi listrik, pengembangan energi terbarukan dapat menurunkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan sebagai akibat aktivitas pembangkitan energi listrik. Dengan asumsi bahwa kebutuhan energi listrik warga di sekitar Pantai Pandansimo sebesar 22,5 KW yang dipenuhi dengan 1 unit genset 30 KVA, dapat disubstitusi oleh penggunaan kincir angin dengan daya 1 KW, dengan memperhitungkan efisiensi daya output sebesar 40%, maka diperlukan sebanyak 56 unit kincir angin dengan potensi pengurangan emisi CO₂ sebesar 70,81 ton / tahun.

Pengaruh lingkungan terhadap material komposit propeler

Dari beberapa penelitian sebelumnya dilaporkan bahwa material komposit mengalami degradasi kekuatan yang diakibatkan oleh pengaruh lingkungan, seperti pengaruh kelembaban udara, panas matahari, radiasi ultraviolet, bahkan oksidasi termal. Kelembaban misalnya, dapat menurunkan kekuatan material komposit karena adanya difusi uap air ke material komposit yang dapat menyebabkan penurunan sifat temperatur transisi glass, yaitu temperatur dimana resin berubah sifat dari kondisi padat menjadi kondisi viskoelastis. Selain hal tersebut, proses degradasi komposit juga dipengaruhi oleh sifat kimia resin dan matriknya serta jangka waktu terpapar pada lingkungan. Beberapa material komposit sangat sensitif terhadap cuaca. Kombinasi dua atau beberapa faktor lingkungan dapat menyebabkan degradasi kekuatan material komposit (Li, 2000).

Pengaruh lingkungan terhadap komposit tergantung pada pengaruhnya terhadap masing-masing komponen kompositnya, fiber, matrik, serta interface antara fiber dan matriknya. Pengaruh keseluruhan tergantung pada pengaruh lingkungan yang paling dominan terhadap salah satu komponen komposit. Seperti misalnya, tegangan melintang merupakan sifat komposit yang didominasi oleh sifat matriknya, sehingga pengaruh lingkungan terhadap sifat tegangan melintang akan tergantung daripada sensitivitas matrik terhadap pengaruh lingkungan.

Pengaruh Temperatur

Dalam kurun waktu operasional yang lama, propeller kincir angin mungkin terpapar pada lingkungan dengan temperatur rendah ($\leq -20^{\circ}\text{C}$) atau temperatur yang sangat tinggi ($\geq 50^{\circ}\text{C}$). Beberapa polimer akan menjadi rapuh jika dipapar pada temperatur yang sangat rendah (Schwartz, 1996). Beberapa tahun terakhir, telah banyak dilakukan penelitian untuk mengetahui ketahanan material komposit terhadap temperatur tinggi (Brinson, 1987), (Soutis, 1997), (Hale, 1997), dan (Zaaffaroni, 1998). Pengaruh temperatur terhadap sifat retak komposit secara detail telah diteliti oleh Marom (1989). Hasilnya menunjukkan bahwa energi retak interlaminar menurun 25-30% pada kenaikan temperatur 50 – 100⁰C.

Selain mempercepat proses penyerapan air, temperatur juga sangat berpengaruh terhadap resin komposit. Springer et al (1997) menyimpulkan bahwa untuk komposit laminasi 90⁰ (komposit didominasi resin), kenaikan temperatur dapat menurunkan modulus elastisitas dan kekuatan komposit, bahkan penurunan ini dapat mencapai 60% hingga 90%

Pengaruh kelembaban

Molekul-molekul air dapat berdifusi masuk ke pori-pori komposit dan dapat mempengaruhi sifat mekanik material komposit. Marom (1989) melaporkan bahwa kadar air dapat mempengaruhi kekuatan retak komposit. Shen dan Springer (1977) melaporkan bahwa komposit laminasi 90^0 , kekuatan tarik maksimal dan modulus elastisitasnya menurun terhadap kenaikan kadar air pada material komposit. Penurunan ini bisa mencapai 50% -90% . Difusi uap air ke dalam komposit menyebabkan degradasi pada ikatan fiber-matriknya (Schultheise, 1997) penurunan temperatur transisi glass (Brinson, 1987), sifat plastisnya dan kadang-kadang dapat menyebabkan retak halus pada matrik komposit (Schutte, 1994) (Grant, 1995).

Berat rata-rata tiga buah sudu sebelum dipasang adalah 3.025 gram. Setelah terpasang selama 5,5 bulan sudu diturunkan dan ditimbang. Berat rata-rata tiga buah sudu adalah 3.106 gram. Sehingga prosentase kandungan uap air yang terdifusi ke dalam material sudu selama 5,5 bulan adalah $(3.038,33 - 3.025) / 3.025 \times 100 = 0,44\%$. Hal tersebut menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan hasil analisis EDS terhadap kandungan unsur dominan pada material komposit sudu yang menunjukkan kandungan unsur oksigen (O) mengalami kenaikan sebesar 0,22 % selama 5,5 bulan. Grafik hubungan antara kelembaban udara dan difusi uap air selama pengujian diperlihatkan pada Gambar 5.189.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik yang dilakukan pada proses perancangan turbin angin sumbu horizontal, maka dapat disimpulkan sebagai berikut: (1) Airfoil yang digunakan sebagai bentuk dasar elemen sudu adalah hasil modifikasi airfoil NACA 4415. Sudu yang dibentuk mempunyai panjang 1,625 m terdiri dari 20 elemen sudu dengan profile NACA 4415 modif dengan panjang chord maksimum 0,28 m dan minimum 0,08 m yang bervariasi sesuai kurva pada Gambar 97. Rotor turbin angin yang dibentuk terdiri dari 3 buah sudu yang dapat menghasilkan daya output 50 Watt sampai 240 watt pada interval kecepatan angin rata-rata di Indonesia 3 m/s sampai 5 m/s seperti terjabarkan dalam Gambar 184. Rotor turbin mempunyai torsi 25 Nm sampai 75 Nm, sehingga rotor turbin mempunyai koefisien daya C_p 0,35 sampai 0,40 pada interval kecepatan angin rata-rata di Indonesia 3 m/s sampai 5 m/s. Berdasarkan kurva perbandingan koefisien aerodinamika airfoil NACA 4415 dengan NACA 4415 modif dapat disimpulkan bahwa airfoil NACA 4415 modif mempunyai kinerja yang lebih baik untuk aliran yang mempunyai bilangan Reynolds 4.1×10^4 hingga 2.5×10^5 . (2)

Serat rami core kayu sengon laut dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan komposit lamina serat rami dan KSL. Pembuatan komposit dilakukan dengan metode *hand lay up* 1 layer dan 2 layer. Fraksi volume serat pada komposit 2 lapis (49,130 %) lebih besar dibanding komposit yang difabrikasi 1 lapis (46,012%). Kenaikan fraksi volume serat berakibat pada peningkatan kekuatan mekanik terutama tegangan tekuk sebesar 62,42% pada komposit 2 lapis. Tegangan tekuk terbaik pada komposit 2 lapis serat rami yaitu sebesar 30,881 MPa, dengan modulus young 2,018 GPa dan regangan 1,795 %. Hasil validasi menunjukkan bahwa perhitungan sifat mekanis dari hasil uji lebih besar daripada perhitungan menggunakan hukum pencampuran (*Rule of Mixture-ROM*) untuk spesimen material komposit 2 lapis yaitu sebesar 3,289 Mpa (10,65 %). Dengan demikian sifat mekanis yang dihasilkan dari pengujian memiliki tingkat akurasi yang tinggi. (3) Pengamatan struktur komposit dengan SEM sebelum dan sesudah komposit dioperasikan sebagai propeler selama 5,5 bulan tidak mengalami perubahan secara signifikan. Hasil pengujian EDS menunjukkan unsur karbon (C) mengalami penurunan sebesar 4,01%, sedangkan unsur oksigen (O) mengalami kenaikan sebesar 7,85%. Fenomena tersebut disebabkan kelembaban yang tinggi, dengan rata-rata sebesar 69,98%. Kelembaban yang tinggi menyebabkan oksigen yang terdapat di udara akan terdifusi ke dalam material sudu. (4) Selain berkontribusi dalam penyediaan energi listrik, pengembangan energi terbarukan dapat menurunkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan sebagai akibat aktivitas pembangkitan energi listrik. Dengan asumsi bahwa kebutuhan energi listrik warga di sekitar Pantai Pandansimo sebesar 22,5 KW yang dipenuhi dengan 1 unit genset 30 KVA, dapat disubstitusi oleh penggunaan kincir angin dengan daya 1KW, dengan memperhitungkan efisiensi daya output sebesar 40%, maka diperlukan sebanyak 56 unit kincir angin dengan potensi pengurangan emisi CO₂ sebesar 70,81 ton / tahun. (5) Pembangunan SKEA di wilayah pesisir pantai Pandansimo secara langsung tidak berpengaruh secara signifikan karena menggunakan konsep *renewable energy* yang berasal dari energi angin sehingga tidak mempengaruhi komponen abiotik maupun biotik dalam ekosistem yang ada di Pantai Pandansimo.

Kata Kunci : Optimasi, Propeler NACA 4415, Komposit alam, Energi terbarukan, Emisi CO₂

SUMMARY

Introduction

Petroleum, Coal, and Gas as fossil energy are currently the dominant source of energy and raw materials in Indonesian petrochemical industry, because the utilization is relatively easy, but the reserves is limited. Directorate General of Electricity and Energy Utilization (DESDM, 2005) states that Indonesia's oil reserves in 2008 amounted to 8.2×10^9 barrels, while the production rate is 3.57×10^8 barrels / year. With production levels as 2008, and without the discovery of new reserves, Indonesia's oil reserves will be exhausted within next 23 years. In the National Energy Management Blueprint (DESDM, 2005), in 2005, approximately 94% of primary energy consumptions come from fossil fuels. Furthermore, if no energy management optimization efforts, in 2025 the proportion will be 97%.

The Ministry of Research and Technology (2006), stated that Indonesia's oil reserves in 2008 amounted to 3.7×10^9 barrels, or just 0.3% of world reserves, while the production level is about 10^6 barrels / day or 1.2% of world production, with value of $R / P = 10.2$ years. These two scenarios illustrate how serious the problem is certainly the nation's energy, so it should be anticipated in earnest. Combustion of petroleum, which is classified as fossil energy, also contribute to global warming, because the addition of CO_2 in the air.

Indonesia is an archipelago country which two thirds of its territory is ocean and Indonesia has the fourth longest coastline in the world (first USA, Canada, and Russia), $\pm 95,181$ Km, lies in equatorial which 17,480 islands. With these circumstances, the potential wind energy source of renewable energy must be utilized and need to be developed. Recently, in the abundant of wind energy in coastal areas of Indonesia, the total installed capacity of wind energy conversion systems is less than 800 kilowatts. Referring to the national energy policy, then wind power is expected to reach 250 megawatts (MW) by 2025.

According to Dewan Nasional Perubahan Iklim Nasional, Indonesia contribute a green gas emission relatively high, mainly from forest utilization and fossil fuel consumption. In addition, CO_2 emission increased significantly in last decade as a result of increasing in electric energy consumption.

In October 2000, European Union has set the rules "End-of-Life Vehicles (ELV) Directive (2000/53/EC)", which is targeting a minimum 85% by weight of ELV must be recycled in 2006 and a minimum of 95 % ELV weight should also be updated in 2015. FAO also declared "International Year of Natural Fiber (IYNF) 2009" to urge various manufacturing industries to utilize natural fiber materials. Both of these regulations support the potential use of local genius materials in Indonesia as an engineering material in manufacturing technology. These local genius material are natural fibers, wood, and also natural composite (NACO). Thus, substitution of synthetic materials with environmental friendly and renewable natural materials can be added into product regulations.

Nowdays, material of wind turbine propeller is been replaced by Skin Composite GFRP (*glass fiber reinforced plastic*). This GFRP propeller is light and easily rotates although in low speed wind. The wind turbine propeller from skin GFRP composite sandwich need to be developed in order to withstand greater external impact loads. Natural ramie fiber and Albizia wood should be used to reduce the use of imported synthetic materials. The aim of this research is to study the potential use of local genius materials in Indonesia, particularly natural fibers and natural wood to develop hybrid composite of ramie fiber with Albizia wood as a core. This hybrid composite is used as a material of wind turbine propeller. Prototype of this hybrid composite propeller is made by modify a model of NACA 4415 Standard Airfoil. This hybrids composite propeller is proposed for low wind speeds and environmentally friendly.

Problem statement

Issues related wind energy system being investigated in this study is to optimize the propeller design of standard NACA 4415 airfoil with CFD simulations. The propeller of wind turbine is made from composite of Albizia wood and ramie fiber. The aim of this research is to find out the optimum design of propeller for low wind speed and coastal climate at Pandansimo. Furthermore in this research, the effect of wind energy conversion on environment is also studied, particularly around the area of Pandansimo Bantul.

Research benefits

This research is able to support the potential of hemp cultivation in Indonesia and also as policy to save the green environment and non renewable source of energy. Other benefit expected from the results of this study is the use of small and medium scale SKEA (50 W -

100 kW) at coastal area of Pandansimo for many applications including household electricity, cold storage, power supplies for communication, and battery chargers of fishing boats. Finally, the result of this research is expected to contribute in improving the living standard of rural communities especially in the coastal area through the fulfillment of electrical energy.

Literature Review

Composite material is a combination of two or more material that formed at a macroscopic level and bond to obtain a new properties which different from its component (Kaw, 1997). the bonding between the fiber and resin, fiber will serve as reinforcement which usually have high strength and stiffness, while resin as an adhesive or matrix to maintain the position of the fiber, transmit shear forces and also as a fiber coatings. Matrices typically have relatively low strength. Fortunalety it aso resilient, hence this characteristic of fiber will play an inportant rule to the strength and stiffness of the composite. Smaller size the fiber, give better adhesion and strength to composite. This is because the ratio between the surface and the fiber volume increases with reduction in fiber size (Riedel, 1999).

Strength of composite is influenced by several factors such as type, geometry, direction, distribution, and fiber content. Based on theory of the Rule of Mixture (ROM), strength of composite increases with increasing of fiber content up to 60-70% (Sanadi *et al.*, 1986). Selection of composite fibers is influenced by several parameters such as strength and stiffness of the desired composite, maximum strain rate, thermal stability, the bond between the fiber and the matrix, dynamic behavior, the long-term behavior, density, price, processing cost, availability, and recycling method (Riedel, 1999). For example, when the composite is used for lightweight structures, the strength and specific stiffness would be more intested.

In Indonesia, research of natural fibers intensively began in the 2000s. Research has been conducted by Mulyadi and Rochardjo (2003) using Cantala Agave fiber and plastic matrix. Utilization of waste of palm fruit fiber for various engineering applications has also been studied comprehensively (Jamasri *et al.*, 2005-2006). Study of tensile properties of fiber composites polyester with randomly palm fruit matrix has also been done by Jamasri *et al.* (2005). The results showed that inreasing of palm fruit fiber volume content can improve the function of a composite as structure panel, either as a primary or secondary structure.

Work of utilization of kenaf fiber and albizia wood as the main component of composite sandwich panels has been done by Diharjo (2006). Compatibility studies between

flax fibers with epoxy matrix in order to produce High Performance Natural Fiber Reinforced Plastic Composites (HPNFRP) has been carried out by Marsyahyo (2006). Research in utilization of natural fibers has also made by Diharjo *et al.* (2005). In this study, Kenaf composites - polyester had better tensile properties than the composites of kenaf-PP been investigated by Karnani *et al.* (1997).

Furthermore, Diharjo *et al.* (2007) have developed a research on sandwich composite with Albizia wood as composite's core. Impact properties of randomly kenaf fiber composite sandwich-polyester with Albizia wood core is increasing with increasing of core thickness. Development of biocomposite materials has also been done by Mujiyono *et al.* (2008). Ramie fibers and bamboo fiber were used in this study. Meanwhile, natural matrix used for adhesive was from the secretion of Albazia's aphid.

Suizu N., et al, (2009), have investigated the use of natural fiber reinforced materials to produce eco-friendly and strong composite material. Composite was been made by mixing the hemp fiber with high alkali concentrations. Strong composite could be obtained from this work.

With the invention of modern computer systems, numerical methods have become increasingly useful in the simulation of engineering problems (Panchal (2010)). Computational Fluid Dynamics (CFD) plays an important role in solving complex fluid dynamics problems without performing an experimental work. Recently, CFD is used widely in engineering field, from design electronics hardware to design an aircraft

Research Methodology

Propeller of wind turbine used in this work is a modification of Standard NACA 4415. Optimization of propeller design is done by computational and simulation work with the help of FLUENT v6.3 software. This computational work aims to reduce the designing time and cost of an appropriate airfoil model for wind turbine propeller.

In this study, analysis an environmental factor on composite propeller is also investigated. These environment factors are temperature, humidity, and wind speed. The strength of composite propeller is tested using tensile test, bending test, and impact test. The results is then analysed to determine whether the strength of composite is reduced.

This composite propeller is installed at Pandasimo beach, Bantul, Yogyakarta. Data of wind speed, temperature and humidity are taken every day, average of 12 hours in the day

(6:00 to 12:00 am), and in the night (18.00 - 24.00 pm). Other data of wind speed and temperature is also obtained from the LAPAN's data logger at Pandansimo Coast. Furthermore, the collected data is then processed and presented in tables, figures, and charts using Microsoft Excel Software, SPSS, and Matlab.

Methods of research is conducted by quantitative method and theoretical method. Quantitative method is conducted by field observation, and theoretical method is done by direct measurement. Measurements are performed within 5.5 months, sample is taken every week. Experimental conditions in the field of this research is a reflection of the actual operational data.

Results and Discussion

Energy

The value of lift coefficient (C_l), the coefficient of drag (C_d) and the moment coefficient (C_m) from numerical simulations to the angle of attack at a particular Reynolds number can be expressed in a curve. Based on the results of numerical simulations NACA 4415 airfoil to increase the value of C_l in the range of angle of attack of $-12^\circ \leq \alpha \leq -10^\circ$ and in the range of $14^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$, standard NACA 4415 airfoil is modified at the front side of the bottom surface and at the rear side of upper surface. Increasing the value of C_l increases the torque generated by the wind turbine blades.

According to the results, the curve of lift coefficient to angle of attack of airfoil NACA 4415 and NACA 4415 modification is made. For airfoil of NACA 4415 modification, C_l increases about 14,8%, 7,2%, 4,9% 2,3%, 4,2%, and 2,2% at Reynolds number of 41000, 55000, 68000, 96000, and 250000, respectively. It can be concluded that the airfoil of NACA 4415 modification has a better performance at Reynolds number of 41000 to 250000. Based on numerical studies, the airfoil of NACA 4415 modification can be used as the basis for generating 360° polar curve by extrapolating from -180° to 180° .

Numerical Simulation Method of flow through turbine blades can be used for analysis of turbine blade design, known as Blade Element Momentum theory (BEM). BEM is used to design the airfoil of NACA 4415 for turbine blades based on the curve of lift and drag (drag polar). The results of this extrapolation are used to generate polar curve at airstream velocity of 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s. The design of turbine blades based on average wind speed conditions in Indonesia and specific wind speed conditions in Pandansimo-Yogyakarta. At

Pandansimo, an average wind speed is 3 to 5 m/s and potential energy is 1000 Watts (1 kW). Hence, the initial dimensional of wind turbine blade is designed with a length of 1, 50 m. For simulation purposes and losses at the edge of propeller is negligible, the blade length is extended to 1.65 m.

Based on the BEM, it can be made a turbine blade with chord length of airfoil element varies with radial position. Design of turbine blades based on the distribution of twist angles (θ) for different blade elements (consisting of 4 variations in the distribution of θ) and the turbine rotor has three blades for particular wind speed conditions. Simulation is then performed for wind speed of 3, 4, 5, 6, 7 and 18 m/s, and at Tip Speed Ratio of $1 \leq \text{TSR} \leq 10$. The results of numerical simulation of turbine rotor in term of aerodynamics performance can be presented as follows: the output power to the wind speed, the torque to the wind speed, the output power to the TSR, the torque to TSR, the output power coefficient to the wind speed, and power coefficient to the TSR. Simulation results show that the power and torque have the same trend. Power and torque increase with increasing wind speed, small positive gradient for wind speed of 1 to 5 m/s. This gradient increases for wind speed of 5 to 10 m/s. This positive gradient tends to slope up at wind speed of 10 m/s to 20 m/s.

The rotor of wind turbine consists of three blades that able to generate power output of 50 watts to 240 watts at wind speeds of 3 m/s to 5 m/s. Turbine rotor has a torque of 25 Nm to 75 Nm. The turbine rotor has a power coefficient C_p of 0.35 to 0.40. Comparison of the coefficient of aerodynamic of the airfoil between NACA 4415 standard and NACA 4415 modification show that NACA 4415 modification has better performance at Reynolds number 41000 to 250000. The optimum wind turbine blade can be twisted up $24,8^\circ$ at the root and 4.7° at the tip.

Material of Composite

Composition of matrix and reinforcement fiber is one of many important factors that determine the characteristics of the composite. The composition of matrix and fiber can be defined either in the form of fiber volume fraction (V_f) or fiber weight fraction (W_f). However, fiber volume fraction is more widely used to determine the composite properties.

Volume fraction of two layers composite is smaller than one layer composite. Volume fraction of two layers and one layers composite are 44,820 % and 47,118%, respectively. Volume fraction reduction in two layers composite increases a bending stress about 56,362%.

It is because a matrix has good properties and ability to transfer bending force during flexural test.

Mechanical property of composite is influenced by several factors such as type, geometry, direction, distribution, and fiber content. Based on the theory of Rule of Mixture (ROM), strength of the composite increases with the addition of fiber content up to 60-70% (Sanadi et al., 1986).

Flexural test is done for identification the strength of material composite of NACA 4415 modification. Specimens are made in two models, 1 layer and 2 layers hemp fiber with core of Albizia wood. Flexural results indicate mechanical characteristics of the material in terms of bending stress, bending strain, and modulus of elasticity. For 2 layers composite, bending stress, bending strain, and modulus of elasticity are 30,881 MPa, 1,795 %, and 2,018 GPa, respectively. Meanwhile for 1 layer composite, bending stress, bending strain, and modulus of elasticity are 19,013 MPa, 2,313 %, and 0,776 GPa. Thus, 2 layers composite is used for material of prototype NACA 4415 in this work. The selection of 2 layers composite is due to its high bending stress and its lighthweighth, hence suitable for low wind speed 3 m/s.

The ramie alignment is smoother and denser in 2 layers composite. The mean weight relative error of 1 layer composite and 2 layers composite are 7.182% and 6.880%, respectively. This result indicates that the composite fabrication process by hand lay-up method is done well, either on 1 layer composite or 2 layers composite.

Fiber volume fraction (reinforce, ramie fiber and Albizia) in 2 layers composite is 49.130%. This fraction is bigger than 1 layer fabricated composite which volume fraction of 46.012%. Increasing of fiber volume fraction also increases mechanical strength of composite. Increasing bending stress in 2 layers composite is found to be 62.42%. This situation occurs may due to the matrix have enough strength and good ability for load distribution during bending test.

Validation results show that the calculation of the mechanical properties of the test results is lower than the calculations using the Rule of Mixture for specimens of 2 layers of composite material that is equal to 3.289 Mpa (10.65 %), thus the resulting mechanical properties of testing has a very high accuracy rate.

Wood is mostly composed by three elements, Carbon, Hydrogen and Oxygen. These elements come from CO₂ in the air and from H₂O from the ground. However, the wood also

contains other elements such as Nitrogen, Phospor, Kalium, Calcium, Magnesium, Silikon, Alumina and Natrium. After 5,5 months installation of model, EDS test is conducted. The test result indicates that Carbon decreases by 4.01%, while Oxygen increases by 7.85%. This phenomenon is caused by high humidity at observation site, about 69.98%. This high humidity increases a diffusion of oxygen air into the propeller material.

Environmental Aspect

Geographically, the south coast of Yogyakarta is an open area which receive a sunlight all the day. The average wind speed is 4 m/s. These conditions suitable for installation of wind energy conversion system. Pandansimo, Poncosari village, Bantul is selected for installation of wind turbine in this work. This location directly faces to the south sea of Java. Electrical energy generated from this hybrid energy is expected to support the agriculture, fisheries and tourism at the Pandansimo beach.

Assuming that the electrical energy needs of people around the Pandansimo Beaches ar 22.5 KW per day were filled with 1 unit 30 KVA generator, can be substituted by the use of 1 KW wind turbine consider the output power efficiency by 40%, then the utilization of 56 units wind turbine has CO2 emission reduction potential of 70.81 tons / year.

Environmental influences on composite materials of propeller

From previous studies, degradation of composite material strength was caused by environmental factors, such as the effect of air humidity, solar thermal, ultraviolet radiation, and even thermal oxidation. Humidity for example, can reduce the strength of composite materials due to the diffusion of water vapor into the composite material. This diffusion can decrease in the nature of glass transition temperature, the temperature at which the resin changes the nature of a condition to viscoelastic solid condition. Besides the environmental factor, degradation is also affected by chemical composition of resin and matrix, and also and the time exposure to the environment. Some composite materials are very sensitive to the weather. The combination of two or more environmental factors can lead degradation of the strength of composite materials (Li, 2000).

Environmental influences on the composite depends on the effect on each component of the composite, fiber, matrix, and the interface between the fiber and the matrix. The overall effect depends on dominant environmental impact to composite components. For example, the

shear stress of a composite is primarily effected by its matrix. Hence, the environmental effects on shear stress of composites depend on matrix sensitivity to environment.

Effect of temperature

In the operational period of time, windmill propellers may be exposed to an extremely low temperatures condition. Some polymers will become brittle when exposed to extremely low temperatures (Schwartz, 1996). In recent years, many researches have been done to study the resistance of composite materials to high temperatures condition (Brinson, 1987), (Soutis, 1997), (Hale, 1997), and (Zaaffaroni, 1998). Effect of temperature on fracture properties of composites has been investigated in detail by Marom (1989). The results showed that the interlaminar fracture energy decreased 25-30% with increasing in temperatures of 50°C - 100°C.

In addition to accelerating the process of water absorption, the temperature also affects the composite resin. Springer et al (1997) concluded that for the composite laminate 900 (dominated composite resin), an increase in temperature can reduce modulus of elasticity and strength of the composite about 60% to 90%.

Effect of Moisture

Water molecules can diffuse into the pores of the composite and can affect the mechanical properties of composite materials. Marom (1989) reported that the water content can affect the crack characteristic of composite. Shen and Springer (1977) reported for the composite laminate 90⁰. The maximum tensile strength and modulus of elasticity decrease with increasing water content in the composite material. This reduction can reach 50% -90%. Diffusion of water vapor into the composite causes a degradation of the composite-fiber bonding. (Schultheise, 1997), degradation of glass transition temperature (Brinson, 1987), composite plasticity, and leads to cracks in the matrix composite (Schutte, 1994) (Grant,1995).

The average weight of all three blades before being installed is 3025 grams. After 5,5 months installation of this composite as windturbine blades, the weight is found to be 3.106 grams. So the percentage content of water vapor diffused into the blade material during 5,5 months is 0.44%. This result is not much different from the result obtained by EDS. Percentage of oxygen in composite increases by 0.22% after 5,5 months.

Conclusion

Based on numerical simulation on design of propeller of horizontal axis wind turbine, it is concluded as follow: (1) Design of wind turbine blade in this research is based on the airfoil modification of NACA 4415. Blade has 1.625 m in length with 20 elements blade with maximum chord length of 0.28 m and minimum chord length of 0.08 m as show in Figure 97. Rotor of wind turbine has three blades which able to produce output power from 50 Watt to 240 Watt in range of wind speed in Indonesia, from 3 m/s to 5 m/s as shown in Figure 184. Rotor of wind turbine produce torque from 25 Nm up to 75 Nm, hence the power coefficient (C_p) of the rotor is from 0,35 to 0,40 at the wind speed of 3 m/s to 5 m/s . Based on comparison of the coefficient of aerodynamic, it can be concluded that the NACA 4415 modification has a better performance than NACA 4415 at Reynolds number from $4,1 \times 10^4$ to $2,5 \times 10^5$. (2) Ramie fiber and Albizia core can be used as raw material of composite of Ramie fiber and Albizia. Composite of Ramie fiber and Albizia as a core can be manufactured by hand lay-up method of 1 layer and 2 layers. Mean fiber volume fraction (vf) of composite 2 layers (49.130%) is higher than of composite 1 layer (46.012%). Increasing in fiber volume fraction of 2 layers composite results an increasing of bending stress about 62,46% of 2 layers composite. The highest bending stress is found to be 30,88 MPa in 2 layers composite. The modulus elasticity and bending strain of 2 layers composite are 2.018 GPa and 1.795%. Validation by Law of Rule of Mixture (ROM) show that the mechanic properties of 2 layers composite from experimental test are higher than those from calculation of ROM, about 3,289 MPa (10,65%). Hence, result from experimental test of mechanical properties has good accuracy. (3) SEM analysis show that micro structure of 2 layers composite remains unchanged after 5.5 months. EDS result indicates that Carbon (C) decreases by 4,01%, while the Oxygen (O) increased by 7,85%. This phenomenon is caused by high humidity, with an average of 69.98%. High humidity causes the oxygen in the air diffuse into the composite material of wind turbine blade (4) Besides the contribution to electric energy supply, development of renewable energy also reduce CO₂ emission. Assuming that the electric energy needs of 1 unit generator (30 kVA) is substituted by 1 kW wind turbine which output power efficiency of 40%, it is required 56 units wind turbine to supply electric energy of 22,5

kW for population in Pandansimo Beaches. In turn, the substitution has potential to reduce about 70.81 tons/year CO₂ emission.

(5) Development of wind energy field in the coastal zone of Pandansimo has no significant effect due to use of the renewable energy concept so it does not affect the abiotic and biotic components of the ecosystems that exist in Pandansimo Beach.

Keywords: *Optimization, NACA 4415 propeller, natural composite, renewable energy, CO₂ emission*

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dalam era globalisasi saat ini, telah terjadi pergeseran paradigma dalam peradaban manusia menuju masyarakat berbasis pengetahuan (*Knowledge-Based Society*). Pergeseran paradigma tersebut berimplikasi pada pergeseran paradigma pembangunan negara-negara di dunia, termasuk Indonesia, dari pembangunan yang berbasis sumber daya alam menuju pembangunan berbasis sumber daya masyarakat berpengetahuan. Dalam kehidupan ekonomi, pergeseran paradigma tersebut memberikan implikasi terhadap terjadinya proses transisi perekonomian dunia yang semula berbasiskan pada sumber daya (*Resource-Based Economy*) menjadi perekonomian yang berbasis pengetahuan (*Knowledge-Based Economy*).

Minyak bumi, batubara, dan gas (energi fosil) merupakan sumber energi dominan di Indonesia dan bahan baku industri petrokimia, pemanfaatannya relatif mudah, namun ketersediaannya terbatas. Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi (DESDM, 2005) menyatakan bahwa cadangan minyak bumi Indonesia pada tahun 2008 berjumlah $8,2 \times 10^9$ barel, sedangkan tingkat produksi $3,57 \times 10^8$ barel/tahun. Dengan tingkat produksi seperti 2008, dan tanpa penemuan cadangan baru, cadangan minyak bumi Indonesia akan habis dalam waktu 23 tahun (disebut nilai R/P, perbandingan jumlah cadangan (R) dengan tingkat produksi (P)). BP (Kemenristek, 2006), menyatakan bahwa cadangan minyak bumi Indonesia pada tahun 2008 berjumlah $3,7 \times 10^9$ barel atau hanya 0,3% cadangan dunia, sedangkan tingkat produksi pada tahun itu sekitar 10^6 barel/hari atau 1,2% produksi dunia, dengan nilai R/P = 10,2 tahun. Dua skenario ini tentunya menggambarkan betapa seriusnya problem energi nasional, sehingga

perlu diantisipasi dengan sungguh-sungguh. Pembakaran minyak bumi, yang tergolong energi fosil, juga berkontribusi pada pemanasan global, karena penambahan CO₂ di udara.

Lebih bijaksana, jika Indonesia bisa lebih banyak memanfaatkan minyak bumi tersebut sebagai bahan dasar industri petrokimia karena nilai tambahnya lebih besar, daripada sebagai sumber energi.

Dalam Blueprint Pengelolaan Energi Nasional (DESDM, 2005), pada tahun 2005, sekitar 95% dari kebutuhan energi primer berasal dari bahan bakar fosil. Selanjutnya, jika tanpa usaha optimalisasi pengelolaan energi, pada tahun 2025 diperkirakan proporsi akan menjadi 97%. Elastisitas energi nasional Indonesia yang tinggi (1,84) dibandingkan negara lain seperti Jepang (0,10) dan Amerika Serikat (0,26) mengindikasikan penggunaan energi nasional termasuk kategori sangat boros (Prastowo, 2007). Sedangkan menurut Departemen ESDM (2005) menunjukkan bahwa intensitas energi Indonesia 470 (Jepang 92,3, Jerman sekitar 125, dan Thailand sekitar 263), sedangkan elastisitas pemakaian energi Indonesia 1,84 (Thailand 1,16, Perancis 0,47, Amerika Serikat 0,26, bahkan Jerman – 0,12). Elastisitas energi diukur dengan membandingkan antara tingkat pertumbuhan konsumsi energi dan tingkat pertumbuhan ekonomi nasional.

Indonesia merupakan negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang ke-empat di dunia (setelah AS, Kanada, dan Rusia) yaitu ± 95.181 Km serta terletak di lintasan garis khatulistiwa, dan memiliki 17.480 pulau. Dengan keadaan tersebut, energi angin menjadi potensi yang harus dikembangkan dan dimanfaatkan.

Di tengah potensi angin melimpah di kawasan pesisir Indonesia, total kapasitas terpasang dalam sistem konversi energi angin saat ini kurang dari 800 kilowatt. Di seluruh

Indonesia, lima unit kincir angin pembangkit berkapasitas masing-masing 80 kilowatt (kW) sudah dibangun. Tahun 2007, tujuh unit dengan kapasitas sama menyusul dibangun di empat lokasi, masing-masing di Pulau Selayar tiga unit, Sulawesi Utara dua unit, dan Nusa Penida, Bali, serta Bangka Belitung, masing-masing satu unit. Mengacu pada kebijakan energi nasional, maka pembangkit listrik tenaga angin ditargetkan mencapai 250 megawatt (MW) pada tahun 2025.

Menurut Dewan Nasional Perubahan Iklim bahwa Indonesia merupakan penghasil emisi gas rumah kaca (GRK) yang relatif besar, terutama dari pemanfaatan hutan dan lahan, tetapi juga dari penggunaan bahan bakar fosil yang meningkat dengan pesat. Emisi dari pemakaian batu bara mengalami peningkatan paling cepat dalam dekade terakhir akibat pemakaian yang terus meningkat untuk pembangkit tenaga listrik.

Berdasarkan data LAPAN (Daryanto, et al., 2005), angin di Indonesia memiliki kecepatan yang bervariasi, umumnya terkategori sebagai angin berkecepatan rendah. Penelitian sistem konversi energi angin (SKEA) kecepatan rendah belum banyak dilakukan di Indonesia, padahal ada beberapa lokasi yang mempunyai kecepatan angin rendah secara kontinu yang dapat dimanfaatkan.

Nanang Okta (2006), menyatakan bahwa energi angin relatif bersih dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan karbon dioksida (CO₂) atau gas-gas lain yang berperan dalam pemanasan global, sulphur dioksida dan nitrogen oksida (jenis gas yang menyebabkan hujan asam). Energi ini pun tidak menghasilkan limbah yang berbahaya bagi lingkungan ataupun manusia. Meski demikian, harap diingat bahwa sekecil apapun semua bentuk produksi energi selalu memiliki akibat bagi lingkungan. Hanya saja efek kincir angin sangat rendah, bersifat lokal dan mudah dikelola.

Yuli Setyo (2005), kecepatan angin minimum untuk menggerakkan sebuah kincir angin berskala kecil (10 kW), dapat menghasilkan listrik dengan kecepatan angin rata-rata sebesar 3 m/s. Sedangkan untuk kincir angin berskala besar (100 kW) dapat menghasilkan listrik dengan kecepatan angin rata-rata sebesar 5 m/s.

Departemen ESDM (2005) menyatakan bahwa secara umum, pemanfaatan tenaga angin di Indonesia memang kurang mendapat perhatian. Sampai tahun 2004, kapasitas terpasang dari pemanfaatan tenaga angin hanya mencapai 0.5 MW dari 9.29 GW potensi yang ada. Hal ini disebabkan karena harga energi terbarukan belum kompetitif bila dibandingkan dengan harga energi fosil sebagai akibat penerapan kebijakan penetapan harga energi melalui subsidi (Indarto, 2006).

Dari hasil perhitungan yang dilakukan AWEA juga memperlihatkan bahwa kincir angin sangat efektif untuk mengurangi emisi gas karbon dioksida (CO₂), gas utama penyebab efek rumah kaca. Kincir angin tunggal dengan daya 750 kW (kiloWatt), bentuk kincir angin yang banyak dipasang di tempat penghasil sumber tenaga angin diseluruh dunia, menghasilkan sekitar 2 juta kWh (kilo Watt hour) daya listrik dalam setahun. Berdasar ukuran rata-rata campuran bahan bakar di Amerika Serikat (AS), kira-kira dari setiap kWh yang digunakan akan menghasilkan 1,5 pon CO₂. Ini berarti setiap kincir angin biasa akan mencegah emisi sebesar 2 juta kWh x 1,5 pon CO₂/kWh = 3 juta pon CO₂ atau 1,5 ton CO₂ pertahun. Menurut Wackemagel (1996) dalam *Our Ecological Footprint*, sepetak lahan hutan menyerap kurang lebih 3 ton CO₂ per hektar per tahun. Jadi sebuah kincir angin sebesar 750 kWh dapat mencegah emisi CO₂ sebesar yang dapat diserap oleh hutan seluas setengah hektar.

Pemanfaatan terhadap sumber daya alam yang terbarukan merupakan hal-hal yang harus dan terus dikembangkan agar tidak terjadi krisis dan kelangkaan energi, khususnya untuk pemenuhan kebutuhan masyarakat kepulauan. Data komprehensif potensi kincir angin di Indonesia salah satunya mengacu pada “*Energy Outlook & Statistics*”, Universitas Indonesia. Terdapat 31 lokasi kincir angin di Jawa dan 104 kincir angin diluar pulau Jawa termasuk Bali. Sebagian besar telah digunakan untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga dengan kapasitas terbesar dibawah 10 kW dan hanya sedikit yang mencapai 14,4 dan 15 kW. Kendala terbesar bukan karena ketersediaan angin dan teknologi, karena angin di Indonesia bertiup relatif konsisten (3-5 m/s dan > 5 m/s di daerah pesisir), tetapi lebih dikarenakan kecenderungan memakai listrik PLN (sebelum pencabutan subsidi BBM).

Menurut Sasongko (2009), penentuan ketinggian dari kincir angin dilakukan dengan menganalisis data turbulensi angin dan kekuatan angin. Derau aerodinamis merupakan fungsi dari banyak faktor seperti desain sudu, kecepatan perputaran, kecepatan angin, turbulensi aliran masuk. Derau aerodinamis merupakan masalah lingkungan, oleh karena itu kecepatan perputaran rotor perlu dibatasi di bawah 70 m/s. Beberapa ilmuwan berpendapat bahwa penggunaan skala besar dari pembangkit listrik tenaga angin dapat merubah iklim lokal maupun global karena menggunakan energi kinetik angin dan mengubah turbulensi udara pada daerah atmosfer.

Pada Oktober 2000, di negara-negara Uni-Eropa telah ditetapkan peraturan “*End-of-Life Vehicles (ELV) directive (2000/53/EC)*”, yang menargetkan minimum 85% berat ELV harus dapat diperbaharui pada tahun 2006 dan minimum 95% berat ELV juga harus dapat diperbaharui pada tahun 2015. Selanjutnya pada 20 Desember 2006, FAO juga mendeklarasikan “*International Year of Natural Fiber (IYNF) 2009*” untuk mendesak

berbagai industri manufaktur agar memanfaatkan bahan-bahan serat alam. Kedua aturan tersebut mendukung pemanfaatan potensi *local genius materials* di Indonesia khususnya “serat alam dan kayu alam” sebagai bahan rekayasa produk teknologi, termasuk *natural composite* (NACO). Dengan demikian, substitusi penggunaan bahan-bahan sintetis dengan bahan alam yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui menjadi persyaratan produk.

Serat alam yang berpotensi sebagai penguat NACO adalah rami karena masa tanamnya pendek (55 hari) dan produktifitasnya tinggi (6 ton/kali panen/ha batang basah) (Budi, 2005), sedangkan kayu yang berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai *core* untuk material komposit *sandwich* adalah kayu sengon laut (KSL) karena ringan ($\rho = 0,33 \text{ gr/cm}^3$) (Diharjo, 2008).

Indonesia memiliki potensi yang cukup besar untuk mengembangkan rami karena memiliki lahan yang relatif luas dan iklim yang cocok untuk tanaman rami. Rami sangat cocok dikembangkan di Indonesia bagian barat yang beriklim basah karena tanaman ini memerlukan curah hujan sepanjang tahun. Berdasarkan persyaratan tumbuhnya banyak daerah yang sesuai antara lain: Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Sumatera Utara dan Sumatera Selatan.

Soeroto (1956) menyebutkan bahwa tanaman rami akan tumbuh dan berproduksi tinggi di Indonesia bila ditanam pada daerah dataran menengah sampai dataran tinggi (500-1500 m dpl.). Di wilayah DIY dan Jawa Tengah, daerah penghasil rami antara lain Kulonprogo, Pati, Semarang, Sleman, dan Surakarta (Wonosobo dan Garut).

Tingginya produktivitas KSL ditunjukkan oleh hasil listing Sensus Pertanian 2003 (ST03), dimana di Indonesia terdapat 59,83 juta pohon KSL dan sekitar 41,14% diantaranya

adalah KSL siap terbang. Tanaman KSL terkonsentrasi di tiga propinsi yaitu Jawa Tengah (34,84 %), Jawa Barat (30,62 %), Jawa Timur (10,88 %) dan sisanya di luar Jawa.

Saat ini propeler kincir angin, yang sebelumnya dibuat dari material logam, telah mulai dibuat dari material komposit *skin* GFRP (*glass fiber reinforced plastic*). Hal ini dikarenakan material propeler tersebut diharapkan mempunyai bobot yang ringan agar mudah berputar ketika ditiup angin. Berhubung propeler juga berfungsi sebagai struktur primer maka sebaiknya dibuat dari komposit *sandwich* yang ramah lingkungan.

Uraian tersebut menunjukkan bahwa rekayasa propeler kincir angin dari komposit *skin* GFRP perlu dikembangkan menjadi struktur *sandwich* agar mampu menahan beban luar (benturan) yang lebih besar. Potensi sumber daya alam rami dan KSL perlu dimanfaatkan untuk mereduksi penggunaan bahan sintesis impor.

Dalam perkembangannya SKEA dibagi menjadi kincir angin poros horisontal dan kincir angin poros vertikal. Kedua jenis kincir angin inilah yang kini memperoleh perhatian besar untuk dikembangkan. Pemanfaatannya yang umum sekarang sudah digunakan adalah untuk memompa air dan pembangkit listrik.

Pada SKEA poros horisontal pemanfaatannya harus diarahkan sesuai dengan arah angin yang paling tinggi kecepatannya. Kalau pada kincir poros vertikal pemanfaatannya tidak memerlukan orientasi pada arah angin (tidak perlu mendeteksi arah angin yang paling tinggi kecepatannya) seperti pada kincir angin poros horisontal.

Uraian tersebut menunjukkan bahwa rekayasa propeler kincir angin dari komposit *skin* GFRP perlu dikembangkan menjadi struktur lamina agar mampu menahan beban luar (benturan) yang lebih besar. Potensi sumber daya alam rami dan KSL perlu dimanfaatkan untuk mereduksi penggunaan bahan sintesis impor.

B. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji dan dicari penyelesaiannya dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana melakukan optimasi desain *propeler airfoil* standard NACA 4415 dengan simulasi CFD
2. Bagaimana pemanfaatan potensi *local genius materials* di Indonesia khususnya “serat alam dan kayu alam” untuk pengembangan teknologi komposit serat rami dan *core* kayu sengon laut untuk pembuatan prototipe *propeler airfoil* modifikasi NACA 4415 yang paling sesuai untuk angin kecepatan rendah dan ramah lingkungan
3. Bagaimana pengaruh lingkungan pesisir pantai Pandansimo terhadap ketahanan propeler berbahan baku komposit KSL dan serat rami yang dipasang di daerah pantai.
4. Bagaimana manfaat lingkungan penerapan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) di lingkungan di sekitar pantai Pandansimo Bantul

C. Orisinalitas

Seiring dengan kemajuan jaman, para ahli menyadari bahwa bahan tunggal memiliki keterbatasan baik dari sisi adopsi disain produk maupun kondisi pasar. Teknologi modern memerlukan bahan campuran baru yang memiliki kombinasi sifat-sifat unggul bahan pembentuknya seperti logam, keramik, dan polimer; yang disebut dengan bahan komposit. Dengan mengatur komposisi bahan pembentuknya, bahan komposit dapat memiliki sifat mekanik dan karakteristik yang lebih baik.

Pada tahun 1960, komposit polimer berpenguat serat gelas (*Glass Fiber Reinforced Plastic-GFRP*) berkembang pesat dan diikuti pengembangan serat sintetik lainnya seperti karbon, kevlar, dan *polyethylene*. Dalam penggabungan antara serat dan resin, serat yang

mempunyai kekuatan dan kekakuan tinggi berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*), sedangkan resin berfungsi sebagai perekat / matrik untuk menjaga posisi serat, mentransmisikan gaya geser dan melindungi serat. Matrik biasanya mempunyai kekuatan relatif rendah tapi ulet (Jamasri, 2008). Keuntungan utama penggunaan komposit polimer adalah kekuatan dan kekakuannya yang tinggi, densitas rendah, tahan korosi, umur lelah panjang, dan mudah dibentuk. Selain itu, komposit polimer juga memiliki koefisien gesek yang rendah (Diharjo, 2011).

Komposit serat alam dengan segala kelebihanannya mulai dilirik oleh berbagai industri, seperti industri kereta api, kapal, otomotif, militer, alat olah raga, kedokteran, dan konstruksi bangunan sipil, bahkan sampai industri peralatan rumah tangga. Hal ini terutama didukung oleh isu masalah lingkungan dan keterbatasan sumber bahan bakar fosil. Penggunaan serat alam sebagai penguat komposit didukung oleh adanya regulasi persyaratan habis pakai (*end of life vehicle-ELV*) produk otomotif bagi negara-negara Uni Eropa dan sebagian Asia. Kebijakan ini juga didukung oleh FAO pada tahun 2009 yang mendesak industri untuk memanfaatkan serat alam (Jamasri, 2008). Serat alam mempunyai kekuatan berkisar antara 220 MPa (serat buah kelapa) sampai dengan 1500 MPa (serat flax) dan modulus Young antara 6 GPa (serat buah kelapa) sampai dengan 80 GPa (flax), serta massa jenisnya berkisar 1,25 gram/cm³ sampai dengan 1,5 gram/cm³. Sedangkan serat gelas tipe E mempunyai kekuatan 2200 MPa dan modulus Young 73 GPa, serta massa jenis 2,55 gram/cm³, sehingga untuk beberapa serat alam seperti flax, hemp, rami dan sisal mempunyai modulus spesifik yang kompetitif dengan serat gelas (Mueller dan Krobjilowski, 2003).

Komposit sandwich merupakan campuran bahan yang tersusun dari dua lembar komposit skin dan core di bagian tengahnya. Komposit jenis ini memiliki sifat kekakuan

tinggi, ringan, isolasi termal dan redaman bising tinggi, mudah di-machining, dan mudah dibentuk (Wang et. al, 2010). Kekuatan komposit sandwich dipengaruhi oleh bahan komposit skin dan core, tebal komposit skin dan core, serta ikatan antara skin dan core. Umumnya semakin tebal core, semakin besar pula beban yang dapat ditahan. Peningkatan kapasitas beban dapat juga dilakukan dengan penggunaan core yang densitasnya lebih tinggi (Diharjo et. Al, 2002). Beberapa jenis core yang telah banyak digunakan di industri adalah *honeycomb core*, *polyurethane foam (PUF) core*, *divinycell PVC core*, dan *balsa-softwood core*. Diharjo (2007) telah mengembangkan produk core kayu sengon laut (KSL) yang kaku dan fleksibel dan sudah digunakan oleh PT. INKA Madiun untuk pembuatan panel sandwich seperti prototipe pintu kereta api.

Diharjo, dkk. (2005) meneliti tentang pemanfaatan serat alam kenaf sebagai bahan komposit. Komposit kenaf-polyester memiliki sifat tarik yang lebih baik daripada komposit kenaf-PP. Pengkajian secara intensif pemanfaatan serat kenaf dan kayu sengon laut sebagai unsur utama pembentuk panel komposit sandwich dilakukan oleh Diharjo (2006). Kajian kompatibilitas antara serat rami dengan matrik epoxy agar dihasilkan *High Performance Natural Fiber Reinforced Plastic Composites* (HPNFRP) telah dilakukan oleh Marsyahyo (2006). Sampai saat ini komposit serat alam belum banyak digunakan di berbagai industri di Indonesia. Industri yang sudah memanfaatkannya, misalnya adalah PT. INKA Madiun yang telah mengaplikasikan komposit baik serat sintetik maupun serat alam sebagai komponen gerbong kereta api, substitusi panel baja dengan panel komposit sudah mencapai 60% (Handiko dan Abdullah, 2000). Upaya mensubstitusi penggunaan penguat serat dan core sintetik dengan material alam telah dilakukan. Prototipe produk meja kereta eksekutif (K-1),

misalnya telah berhasil dibuat dari komposit berpenguat limbah serat buah sawit (Jamasri et al., 2005-2006).

Penelitian tentang komposit sandwich dengan *core* kayu sengon laut (KSL) juga dilakukan oleh Diharjo, dkk. (2007). Hasil penelitian menunjukkan sifat impak komposit sandwich serat kenaf acak polyester dengan *core* KSL meningkat seiring dengan peningkatan ketebalan *core*. Masih menurut Diharjo (2007), struktur komposit sandwich memiliki kemampuan menahan beban yang lebih besar daripada komposit lamina. Komposit hibrid sandwich juga memiliki kemampuan menahan beban bending sebesar 10,93% di atas komposit GFRP.

Tahun 2005, riset komposit sangat intensif dilakukan dengan memanfaatkan serat aren, serat kenaf, serat buah sawit, KSL, dan kayu sawit. Riset substitusi *core* sintetis dengan *core* KSL telah menunjukkan bahwa kekuatan komposit sandwich GFRP *core* KSL memiliki kekuatan bending lebih tinggi (108,7 MPa) dibandingkan dengan penggunaan *core divinycell PVC* (Diharjo, 2005). Diharjo et. Al (2009) berhasil memproduksi *core* KSL untuk pembuatan panel komposit *sandwich* untuk prototipe pintu kereta api di PT. INKA.

Nam dan Netravali (2006) meneliti sifat fisik serat rami untuk komposit ramah lingkungan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa serat rami memiliki tegangan tarik 627 Mpa, modulus elastisitas 31,8 Gpa, dan fracture strain 2,7%, serta kandungan air 9,9%. Sifat-sifat tersebut menjadikan rami cocok untuk komposit ramah lingkungan. Suizu, dkk (2008) meneliti tegangan tarik dan kekuatan impak pada komposit dari serat rami. Penggunaan rami dapat meningkatkan kekuatan terhadap impak. Ketahanan deformasi komposit meningkat sesuai dengan meningkatnya rata-rata regangan.

Mujiyono, dkk. (2008) meneliti pengembangan bahan biokomposit. Serat alam yang digunakan adalah serat rami dan serat bambu, sedangkan matrik alam yang digunakan sebagai perekat adalah hasil sekresi kutu pohon albasia (sengon laut). Hasil pengembangan penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan produk biokomposit yang benar-benar ramah lingkungan karena bersifat *fully biodegradable*.

Penelitian yang dilakukan oleh Suizu N., dkk, (2009), dengan menguntai serat rami dicampur dengan alkali konsentrasi tinggi dapat diperoleh komposit yang kuat. Hasil pengujian tegangan tarik (*tensile*) menunjukkan bahwa komposit benang rami memperlihatkan dua hingga tiga kali lebih besar pada uji patah, tanpa penurunan kekuatan dibandingkan dengan komposit tanpa benang untai. Komposit yang dilaminasi menggunakan untaian benang rami memiliki kekuatan impak dua kali lebih besar dibandingkan komposit tanpa benang rami. Penelitian yang dilakukan oleh Soemardi dkk. (2009) bertujuan untuk mendapatkan karakteristik mekanik komposit serat alam khususnya serat rami dengan matriks epoksi yang akan diaplikasikan sebagai bahan alternatif pada desain soket prosthesis. Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa komposit lamina serat rami epoksi berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material alternatif dalam pembuatan soket prosthesis atas lutut pada Vf 40-50%. Berdasarkan penelitian sebelumnya (Marsyahyo dkk, 2008), kerapatan serat rami jauh lebih rendah dibandingkan serat sintetis seperti serat E-glass, tetapi serat rami memiliki karakteristik permukaan untuk diaplikasikan sebagai penguat yang unggul dalam material komposit. Kekuatan spesifik dan modulus dari serat alami sebanding atau bahkan lebih unggul dibandingkan serat E-glass (Marsyahyo dkk, 2011). Oleh karena itu, ada peluang menggunakan serat alami seperti rami untuk menggantikan serat e-glass dalam penguatan komposit (Drzal dkk, 2004). Drzal et al (2004) mengemukakan bahwa

untuk mengembangkan biokomposit dengan sifat mekanik yang lebih baik, perlu untuk menyelesaikan masalah dengan perlakuan yang cocok untuk meningkatkan kompatibilitas antara serat dan matriks. Penggunaan bahan komposit serat rami untuk pembuatan blade dengan daya 3000 watt telah dilakukan oleh Koehuan, dkk. (2011). Hasil pengujian dengan beban kontinu menunjukkan blade dengan komposisi serat 3-2-2 mampu bertahan pada kecepatan angin hingga 20 m/s selama 360 menit dengan beban statis 20 kg.

Airfoil yang digunakan untuk profil dasar sudu turbin adalah airfoil yang dilalui oleh angin kecepatan rendah (maksimum 10 m/s), sehingga parameter rasio gaya angkat terhadap gaya hambat maksimum menjadi fokus pengembangan karakteristik airfoil untuk turbin angin dengan rentang kecepatan angin 0-10 m/s (Timmer and Rooij, 2003). Studi pengembangan airfoil seri NACA 44xx yaitu NACA 4415 untuk bilangan Reynolds rendah dalam interval 50.000 sampai 600.000 (kecepatan rendah) telah dilakukan oleh Ostowari and Naik (1985) dan diperoleh bahwa NACA 4415 jika digunakan untuk turbin angin sumbu horizontal pada kecepatan angin tinggi dapat menimbulkan getaran dan noise yang besar, hal ini sesuai dan diperkuat dengan hasil penelitian Saliveros (1988).

Hasil Studi oleh Hoffmann at.al (1996), dilakukan pada kondisi aliran mantap (*steady*) dengan bilangan Reynolds 10^6 yang melalui airfoil NACA 4415 didapat koefisien gaya angkat 1.35 pada sudut serang 14.3° dan dinyatakan bahwa jika aliran udara adalah tidak mantap (*unsteady*) maka akan terjadi peningkatan koefisien gaya angkat sebesar 10% sampai 15% dibanding pada kondisi aliran mantap, hal ini sesuai jika diaplikasikan pada turbin angin yang beroperasi pada kondisi angin yang tidak mantap. Timmer and Rooij (2003) juga menyatakan pada awal tahun 1980 sampai 1990, profil yang banyak digunakan sebagai bentuk dasar sudu turbin angin adalah airfoil yang dikembangkan oleh NASA yang diberi

kode NACA 4 digit (seri NACA 44xx) dan NACA 5 digit (seri NACA 63xxx). Airfoil NACA tersebut dari hasil pengujian mengalami fenomena transisi yang lebih awal dari yang diprediksi dan hal ini sesuai dan diperkuat dengan yang dilakukan oleh Gómez and Álvaro (2006), sehingga perlu dikembangkan atau dilakukan modifikasi pada profil NACA tersebut terutama pada ketebalan airfoilnya.

Saat ini propeler kincir angin, yang sebelumnya dibuat dari material logam, telah mulai dibuat dari material komposit *skin* GFRP (*glass fiber reinforced plastic*). Dari penelitian terdahulu diketahui bahwa Kayu Sengon Laut (*albizia falcata*) mempunyai tegangan tarik dan tegangan tekuk yang tinggi. Sedangkan rami memiliki tegangan tarik dan kekuatan impak yang tinggi pula. Struktur komposit sandwich memiliki kemampuan menahan beban yang lebih besar daripada komposit lamina. Uraian di atas menunjukkan bahwa rekayasa propeler kincir angin dari komposit *skin* GFRP perlu dikembangkan menjadi struktur komposit agar mampu menahan beban luar (benturan) serta mempunyai bobot yang ringan agar mudah berputar ketika ditiup angin.

Pada penelitian ini akan dikembangkan komposit lamina dengan core KSL dan serat rami sebagai penguat untuk bahan baku pembuatan propeler yang tahan terhadap iklim pesisir pantai Pandansimo. Komposit yang dibuat memiliki kekuatan dan kekakuan yang tinggi, densitas rendah, tahan korosi, kekuatan lelah (*fatigue*) yang tinggi, dan mudah dibentuk.

D. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Melakukan optimasi airfoil NACA 4415 standard dengan simulasi CFD serta pengembangan teknologi komposit serat rami dengan core kayu sengon laut untuk pembuatan prototipe propeler airfoil NACA 4415 modif

2. Melakukan analisis pengaruh lingkungan terhadap ketahanan propeler berbahan baku komposit KSL dan serat rami yang dipasang di daerah pantai Pandansimo.
3. Melakukan analisis dampak lingkungan penerapan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) di lingkungan di sekitar pantai.
4. Melakukan kajian energi listrik yang dihasilkan dari penerapan Sistem Konversi Energi Angin di pantai Pandansimo, untuk mengurangi penggunaan bahan bakar minyak (BBM).

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Substitusi pemanfaatan serat rami secara parsial sebagai pengganti serat gelas pada pengembangan komposit lamina akan mendukung potensi budidaya rami di Indonesia serta merupakan salah satu langkah bijak untuk menyelamatkan kelestarian lingkungan dari limbah yang dibuat dan keterbatasan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui.
2. Pemanfaatan SKEA skala kecil dan menengah (50 W - 100 kW) di lokasi potensial untuk : listrik rumah tangga, industri kerajinan rumah tangga, *cold storage* (pengawet ikan dan obat), catu daya peralatan komunikasi, pengisi baterai perahu nelayan, pemompaan air, dll.
3. Memberikan kontribusi dalam meningkatkan taraf hidup masyarakat pedesaan khususnya wilayah pesisir pantai melalui pemenuhan energi listrik.
4. PLN sebagai pengguna utama sistem interkoneksi dapat berperan untuk memanfaatkan teknologi SKEA, terutama di wilayah yang potensi anginnya bagus untuk mengurangi penggunaan BBM.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Hasil-hasil Pengembangan Riset Komposit Serat Alam

1. Sifat-sifat Komposit Serat Alam

Komposit merupakan penggabungan dari dua material atau lebih, yang dibentuk pada skala makroskopik dan menyatu secara fisik untuk memperoleh sifat-sifat baru yang tidak dimiliki oleh material pembentuknya (Kaw, 1997). Dalam penggabungan antara serat dan resin, serat akan berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*) yang biasanya mempunyai kekuatan dan kekakuan tinggi, sedangkan resin berfungsi sebagai perekat atau matrik untuk menjaga posisi serat, mentransmisikan gaya geser dan juga berfungsi sebagai pelapis serat.

Matrik biasanya mempunyai kekuatan relatif rendah tetapi ulet, karena itu serat secara dominan akan menentukan kekuatan dan kekakuan komposit. Semakin kecil ukuran serat, maka akan memberikan perekatan dan kekuatan yang semakin baik, karena rasio antara permukaan dan volume serat semakin besar (Riedel, 1999). Sifat mekanik komposit sangat dipengaruhi oleh orientasi seratnya, komposit bisa bersifat *quasi-isotropic* ketika digunakan serat pendek yang diorientasikan secara acak, *anisotropic* ketika digunakan serat panjang yang diorientasikan pada beberapa arah, atau *orthotropic* ketika digunakan serat panjang yang diorientasikan terutama pada arah yang saling tegak lurus. Kekuatan komposit sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis, geometri, arah, distribusi, dan kandungan serat. Berdasarkan teori *Rule of Mixture* (ROM), kekuatan komposit meningkat seiring dengan penambahan kandungan serat mencapai 60-70% (Sanadi dkk., 1986).

Menurut Brady dan Clavier (1991), serat sebagai penguat komposit harus memiliki panjang sekurang-kurangnya 100 kali diameter atau lebarnya untuk memperoleh penguatan yang optimal.

Pertimbangan pemilihan serat untuk komposit sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya adalah nilai kekuatan dan kekakuan komposit yang diinginkan, perpanjangan ketika patah, stabilitas termal, ikatan antara serat dan matrik, perilaku dinamik, perilaku jangka panjang, massa jenis, harga, biaya proses, ketersediaan, dan kemudahan daur ulang (Riedel, 1999). Sebagai contoh, ketika komposit akan digunakan untuk struktur ringan, maka kekuatan dan kekakuan spesifiknya akan lebih diutamakan.

2. Riset Komposit Serat Alam

Riset komposit serat alam di Indonesia secara intensif dimulai tahun 2000-an. Misalnya riset yang dilakukan oleh Mulyadi dan Rochardjo (2003) dengan menggunakan serat Agave cantala dan matrik plastik. Hasil riset menunjukkan bahwa pada fraksi volume 50%, kekuatan tarik meningkat menjadi 3 kali dibandingkan kekuatan plastiknya. Serat Cantala ini mempunyai kekuatan tarik sebesar 450 MPa, di bawah serat gelas yang mempunyai kekuatan tarik sekitar 2200 MPa.

Penggabungan serat agave dengan serat gelas memberikan efek hybrid pada pembebanan tarik maupun pembebanan kejut. Namun demikian, serat ini agak peka terhadap kandungan air. Pada pengujian tarik serat yang telah direndam ke dalam air, kekuatan tariknya turun hingga mencapai 200 MPa pada perendaman selama 500 jam. Penurunan ini disebabkan oleh terjadinya pembesaran micro-crack pada struktur serat (Rochardjo dkk., 2003).

Pemanfaatan limbah serat buah sawit untuk berbagai aplikasi teknik juga telah diteliti secara komprehensif (Jamasri dkk., 2005-2006). Kajian sifat tarik komposit serat buah sawit

acak bermatrik poliester juga telah dilakukan (Jamasri dkk., 2005). Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan kandungan volume serat buah sawit untuk meningkatkan fungsi panel komposit menjadi panel struktur, baik sebagai struktur sekunder maupun primer, juga telah dikembangkan riset panel komposit sandwich. Panel komposit sandwich ini tersusun dari dua buah komposit skin yang mengapit core (inti) ditengahnya. Komposit skin telah dibuat dari serat buah sawit, sedangkan intinya berasal dari pohon sawit. Konsep desain komposit sandwich ini adalah untuk memberikan penguatan yang tinggi pada komposit skin dengan meletakkan core yang murah di tengahnya. Panel komposit sandwich yang dihasilkan memiliki kekuatan tinggi dengan harga yang murah (Jamasri dkk., 2006).

Pengkajian secara intensif pemanfaatan serat kenaf dan kayu sengon laut sebagai unsur utama pembentuk panel komposit sandwich dilakukan oleh Diharjo (2006). Kajian kompatibilitas antara serat rami dengan matrik epoxy agar dihasilkan *High Performance Natural Fiber Reinforced Plastic Composites* (HPNFRP) telah dilakukan oleh Marsyahyo (2006).

Riset pemanfaatan serat alam pernah dilakukan oleh Diharjo dkk. (2005) yang mengembangkan pemanfaatan serat alam kenaf sebagai bahan komposit. Peningkatan kandungan serat kenaf acak mampu meningkatkan kekuatan dan modulus tarik. Pada $v_f = 32\%$, kekuatan dan modulus tarik komposit serat kenaf acak – *polyester* masing-masing adalah 59.03 MPa and 8.75 GPa. Kedua sifat mekanis tersebut meningkat 107.8% and 51.91% dibandingkan dengan komposit kenaf acak-*polyester* pada $v_f = 13.18\%$. Komposit kenaf – *polyester* dalam penelitian ini memiliki sifat tarik yang lebih baik daripada komposit kenaf – PP yang diteliti oleh Karnani dkk. (1997).

Masih menurut Diharjo dkk. (2005), kekuatan dan modulus tarik komposit serat kenaf kontinyu dengan orientasi serat 0^0 dengan matrik *polyester* pada $v_f = 54.63\%$ adalah 216.8 MPa dan 26.79 GPa. Kedua sifat mekanis tersebut meningkat 123% dan 163.7% dibandingkan dengan komposit kenaf kontinyu pada $v_f = 20.31\%$. Komposit hasil penelitian ini memiliki kekuatan dan modulus tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil penelitiannya Raharjo dkk. (2005), yaitu 157 MPa dan 20 GPa pada $v_f = 60\%$.

Selanjutnya Diharjo dkk. (2007) mengembangkan penelitian disertasi komposit *sandwich* dengan *core* kayu sengon laut (KSL). Sifat impak komposit *sandwich* serat kenaf acak – *polyester* dengan *core* KSL meningkat seiring dengan peningkatan ketebalan *core*. Komposit *sandwich* yang diperkuat serat kenaf perlakuan alkali selama 2 jam memiliki energi dan kekuatan impak yang lebih kecil dibandingkan dengan komposit *sandwich* berpenguat serat tanpa perlakuan. Penurunan kekuatan komposit *sandwich* berpenguat serat perlakuan alkali 2 jam disebabkan oleh adanya perubahan sifat patahan dari patahan ulet menjadi getas. Komposit *sandwich* tersebut memiliki kekuatan impak tertinggi pada ketebalan *core* KSL 10 mm.

Pengembangan bahan biokomposit juga pernah dilakukan oleh Mujiyono dkk. (2008). Dalam penelitian ini serat alam yang digunakan adalah serat rami dan serat bambu, sedangkan matrik alam yang digunakan sebagai perekat adalah hasil sekresi kutu pohon albasia (sengon laut). Hasil pengembangan penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan produk biokomposit yang benar-benar ramah lingkungan karena bersifat *fully biodegradable*. Pada panjang serat 1,58 mm, komposit serat kenaf - *polypropylene* (PP), dengan fraksi berat serat kenaf acak (w_f) 20, 40 dan 60% masing-masing memiliki modulus tarik 2,7, 2,8 dan 3,0 GPa, sedangkan kekuatan tariknya masing-masing adalah 26,9, 27,1 dan 27,4 MPa. Secara berurutan,

regangan luluhnya mengalami penurunan yang signifikan, yaitu 5,2, 3,0 dan 2,6%. Dengan penambahan 2% *coupling agent maleated polypropylene* (MAPP, w/w), kekuatan tarik komposit tersebut masing-masing meningkatkan menjadi 32,7 MPa, 41,3 MPa dan 53,8 MPa, sedangkan modulus tariknya menjadi 2,9, 3,4 dan 4,1 GPa. Peningkatan kadar MAPP 5% juga meningkatkan kekuatan tarik komposit menjadi 38,1, 49,4 dan 61,2 MPa, sedangkan modulusnya meningkat menjadi 3,2, 4,3 dan 5,1 GPa. Penambahan kadar serat dan MAPP juga meningkatkan kekuatan *bending*, modulus *bending* dan kekuatan impaknya komposit kenaf - PP (Karnani dkk., 1997).

Serat *sunhemp* (*crotalaria juncea*) juga merupakan jenis serat yang potensial sebagai penguat plastik untuk memproduksi material murah dengan ketangguhan tinggi. Besarnya kekuatan tarik dan modulus young serat *sunhemp* adalah 389 MPa dan 35,6 GPa. Modulus *Young* komposit serat *sunhemp-polyester* terjadi peningkatan secara linier hingga 14 GPa pada $v_f = 0,4$. Besarnya kekuatan tarik pada $v_f = 10, 20, 30$ dan 40% adalah 64, 104, 122 dan 140 MPa. Kekuatan impak izot komposit pada $v_f = 6, 12, 18$ dan 24% juga mengalami peningkatan secara linier, yaitu 6, 11, 16 dan 21 kJ/m². Perpatahan uji impak menunjukkan adanya *fiber pull out* dan *interface fracture* (Sanadi dkk., 1986).

Clark dan Ansell (1986) memodifikasi cara pencampuran komposit *hybrid* serat *jute* dan serat gelas dengan matrik *polyester* untuk memprediksi sifat-sifat tarik lamina yang diamati dan mengontrol kegagalan *hybrid* lamina pada regangan 0,8%. Serat dikenai perlakuan kimia (*coating*) dengan *metacrylato* yang kompatibel dengan resin *polyester*. Pengujian impak *charpy* untuk kombinasi fraksi volume serat 16% *jute*, 13% *jute*-3% glass, 13% *jute*-4% glass, 13% *jute*-8% gelas dan 12% *jute*-8% gelas menghasilkan peningkatan energi patah, yaitu masing-masing 2,9, 20,2, 10,1, 24,5 dan 44,0 kJ/m².

Pada w_f 50% dengan penambahan 2% MAPP, kekuatan spesifik dan modulus komposit serat kenaf sepanjang 1 cm dengan matrik PP ekuivalen atau lebih besar dibandingkan dengan komposit serat gelas – PP dengan 2% MAPP (Rowell dkk., 1999). Penambahan *coupling agent* 2% MAPP pada komposit serat kenaf-PP dengan $w_f = 50%$ meningkatkan kekuatannya dari 3,56 MPa menjadi 6,8 MPa. Peningkatan w_f dari 20, 30, 40, 50 dan 60% dengan 2% MAPP akan meningkatkan kekuatannya masing-masing menjadi 4,0, 4,8, 5,76, 6,8 dan 7,6 MPa.

Menurut Mueller dan Krobjilowski (2003), modulus elastisitas, kekuatan tarik, dan regangan serat kenaf adalah 53 GPa, 930 MPa, dan 1,6%. Massa jenis serat kenaf adalah 1,5 g/cm³. Untuk meningkatkan kekuatan komposit, serat kenaf dikombinasikan dengan serat gelas anyam, sehingga dihasilkan komposit hibrid berkekuatan tinggi.

Moller dkk. (2002) juga telah mengembangkan komposit *sandwich* dengan *core* susunan batang tanaman. Model *sandwich* yang tersebut dikenal dengan nama *light natural sandwich material* (LNS). Pembuatan *core* dilakukan dengan menyusun batang tanaman di dalam kotak *molding* yang diberi *foam glue*. Berat LNS yang dihasilkan dapat mencapai 50% lebih rendah dari berat *plywood*. Besarnya kekuatan dan modulus tekan LNS adalah 1,9 MPa dan 249 Mpa, sedangkan besarnya kekuatan dan modulus geser LNS adalah 0,35 MPa dan 15,1 MPa. Material LNS potensial sebagai pengganti *core* sintesis PVC *foam*.

Xu Xun, dkk. (2007) melakukan penelitian tentang bagaimana mengetahui daur hidup komposit serat kayu yang diperkuat (*wood fibre reinforced*) dibandingkan dengan *polypropylene* pada pengaruh terhadap lingkungan. Dalam penelitian ini diperkenalkan istilah “*material service density*” (MSD), yang didefinisikan sebagai volume material yang memenuhi kebutuhan kekuatan secara spesifik. Pengujian terhadap dua bahan, yaitu komposit

serat kayu yang diperkuat dan *polypropylene* menunjukkan bahwa ketika MSD digunakan sebagai unit fungsional, maka komposit serat kayu yang diperkuat lebih ramah lingkungan dibandingkan *polypropylene*. Pada volume bahan yang sama untuk membuat sebuah produk, bahan komposit memiliki kerapatan lebih rendah dibandingkan *polypropylene*.

Suizu N., dkk, (2009), meneliti tentang pemanfaatan serat alam yang diperkuat untuk menghasilkan bahan yang ramah lingkungan dan kuat. Dengan menguntai serat rami dicampur dengan alkali konsentrasi tinggi dapat diperoleh komposit yang kuat. Hasil pengujian ketegangan (tensile) menunjukkan bahwa komposit benang rami memperlihatkan dua hingga tiga kali lebih besar pada uji patah, tanpa penurunan kekuatan dibandingkan dengan komposit tanpa benang untai. Komposit yang dilaminasi menggunakan untaian benang rami memiliki kekuatan impak dua kali lebih besar dibandingkan komposit tanpa benang rami.

Nam dan Netravali (2006), menyimpulkan bahwa serat alam sangat potensial digunakan dalam industri sebagai pengganti bahan komposit. Alasan yang mendasari antara lain sifat terbarukan, berkelanjutan, *biodegradable*, serta tersedia di seluruh dunia. Secara kimiawi, sifat-sifat serat alam dapat diketahui berdasarkan struktur kimia, kandungan selulosa, orientasi dan kristalinitas. Dibandingkan dengan serat gelas, serat alam memiliki kekuatan ketegangan yang lebih rendah. Namun beberapa serat alam memiliki Modulus Young yang sama tinggi dengan serat aramid. Specimen komposit yang ramah lingkungan dibuat dari serat rami dan *resin soy protein concentrate* (SPC). Resin SPC digunakan untuk membungkus material dengan gliserin. Kekuatan tarik dan Modulus Young dari komposit ini akan memiliki perbandingan yang signifikan dan relatif besar dibandingkan dengan *resin soy protein concentrate* SPC murni. Kekuatan tarik dari komposit dalam arah longitudinal cukup

lembut dan didapatkan perubahan besar yang cukup signifikan bila dibandingkan dengan varietas kayu pada umumnya. Pada arah transversal/melintang, apabila dibandingkan dengan specimen kayu dengan metoda *micrograph Scanning Electron Microscope (SEM)* dari keretakan permukaan dari komposit alam mengindikasikan pengikatan antar permukaan yang baik antara serat rami dan *resin soy protein concentrate*.

B. Hasil-hasil Pengembangan Riset SKEA

Soltani dkk., (2011) melakukan serangkaian pengujian sebuah blade turbin angin 660 kW dilakukan pada terowongan angin berkecepatan rendah untuk mengetahui efek dari kontaminasi permukaan yang didistribusikan pada karakteristik kinerjanya. Airfoil yang diuji adalah airfoil dengan permukaan yang bersih, dua jenis kekasaran zigzag dan kekasaran jalur tape kemudian didistribusikan kombinasi kekasarannya. Model tepi lurus dan zigzag memiliki kekasaran untuk menyederhanakan hasil kontaminasi dari aliran turbulensi. Dalam penelitian ini, kontaminasi permukaan disimulasikan dengan menerapkan tinggi kekasaran 0,5 mm di atas seluruh permukaan atas airfoil. Distribusi Kepadatan bervariasi dari tepi menuju ke trailing edge dari model. Data menunjukkan bahwa airfoil tertentu sangat sensitif terhadap kontaminasi permukaan dan koefisien angkat maksimum menurun hingga 35%, sementara sudut serang sedikit meningkat. Kontaminasi permukaan, bagaimanapun, menyebabkan karakteristik patah menjadi sangat halus dan daya angkat mengalami penurunan. Berbeda dengan model dengan permukaan bersih, dimana daya angkat maksimum akan meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds.

Ahmed M., (2004) melakukan investigasi eksperimental efek ground aerodinamis pada tiga airfoil, NACA 0015, 4415 dan 6415, dilakukan dengan kecepatan terowongan angin rendah. Pada distribusi tekanan pada permukaan airfoil diperoleh dari tapping tekanan. Rata-

rata kecepatan Pengukuran dilakukan atas permukaan dari kontur airfoil dan kecepatan yang diplot. Pengukuran kecepatan rata-rata dan turbulensi intensitas dilakukan di wilayah pada dua lokasi. Percobaan dilaksanakan dengan berbagai sudut serang 00-100 dan *ground clearance* dari minimum yang mungkin nilai untuk satu panjang chord. Ditemukan bahwa nilai koefisien tekanan tinggi diperoleh pada permukaan bawah airfoil adalah ketika dekat dengan ground. Pada wilayah dengan tekanan tinggi diperpanjang hampir sepanjang chord dengan panjang keseluruhan untuk sudut serang tinggi. Aliran ditemukan untuk mempercepat atas airfoil dengan tertinggi percepatan diamati untuk NACA 4415 dan terendah untuk NACA 6415. Untuk NACA 4415, kecepatan rata-rata sangat tinggi bila diamati dekat dengan puncak lokasi. Untuk aliran, airfoil yang ditemukan untuk memisahkan dari permukaan untuk sudut serang 100 dan keatasan, sehingga menghasilkan jauh lebih rendah kecepatan di atas permukaan dan wilayah terbangun tebal dan sangat bergejolak.

Panchal (2010), dengan penemuan sistem komputer modern, metode numerik telah menjadi semakin berguna dalam simulasi berbagai masalah teknik. Tidak diragukan lagi, komputasi dinamika fluida (CFD) memainkan peran penting dalam memecahkan masalah cairan yang kompleks tanpa melakukan eksperimen fisik. NACA airfoil 4415 simulasi menunjukkan tidak hanya relatif sederhana dan kemudahan menentukan kinerja airfoil, tetapi juga potensi CFD dalam skema grand rekayasa aplikasi. Akhir-akhir ini, CFD digunakan dalam hampir setiap bidang teknik, dari elektronik desain hardware untuk kinerja pesawat.

Menurut Firman (2009) penentuan ketinggian dari kincir angin dilakukan dengan menganalisis data turbulensi angin dan kekuatan angin. Derau aerodinamis merupakan fungsi dari banyak faktor seperti desain sudu, kecepatan perputaran, kecepatan angin, turbulensi aliran masuk. Derau aerodinamis merupakan masalah lingkungan, oleh karena itu

kecepatan perputaran rotor perlu dibatasi di bawah 70m/s. Beberapa ilmuwan berpendapat bahwa penggunaan skala besar dari pembangkit listrik tenaga angin dapat merubah iklim lokal maupun global karena menggunakan energi kinetik angin dan mengubah turbulensi udara pada daerah atmosfer.

Ackermann, (2005) menyimpulkan bahwa kemampuan turbin savonius beroperasi pada kecepatan angin rendah dengan menghasilkan torsi besar sangat cocok untuk dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak sistem pompa, aerasi tambak, atau peralatan pengolahan hasil pertanian. Turbin jenis Savonius mempunyai kelebihan yang lain yaitu tidak mengalami masalah pada waktu start awal atau dengan kata lain, turbin Savonius bisa berputar tanpa diberi energi awal dari luar pada saat start. Karakteristik ini tidak dimiliki oleh kincir angin poros vertikal yang lain yaitu tipe Darius. Turbin darius dengan kemampuan menghasilkan torsi yang lebih besar dibandingkan Savonius sering tidak bisa start mandiri, sehingga harus dibantu dengan energi dari luar.

Kelebihan dari turbin Savonius untuk start mandiri menjadi inspirasi bagi banyak peneliti untuk menemukan desain modifikasi gabungan savonius dengan Darius yang mampu start mandiri. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Wakui, dkk (2002). Pada penelitian pertama yang mereka lakukan bertujuan untuk membandingkan dari tiga tipe kincir angin yaitu tipe Savonius-Darius, Darius, dan tipe kincir angin poros horizontal dua propeler. Dari hasil-hasil penelitian, mereka menyimpulkan bahwa gabungan Savonius Darius mempunyai keunggulan mampu start mandiri dibandingkan dengan Darius saja walaupun terjadi penurunan kuantitas daya output. Untuk kincir angin horizontal tipe propeler mempunyai output daya yang besar, dengan catatan harus mempunyai mekanisme *Yaw* yang bagus untuk merespon arah angin.

Pada penelitian selanjutnya Wakui, dkk (2004) melakukan penggabungan antara tipe Savonius-Darius yang bertujuan untuk menentukan tipe penempatan posisi Savonius sehingga dihasilkan turbin gabungan yang mempunyai keluaran daya yang lebih besar .

Sejalan dengan penelitian yang dilakukan Wakui, dkk (2004), Gupta, dkk (2006) melakukan penelitian yang membandingkan dua tipe yaitu tipe Savonius (U) dengan tipe gabungan Savonius-Darius pada kondisi *overlap* dan tanpa *overlap*. Dari hasil-hasil penelitian, mereka menyimpulkan bahwa gabungan Savonis-Darius mempunyai unjuk kerja yang lebih baik dibandingkan dengan tipe Savonius saja.

Disamping penelitian-penelitian yang bertujuan untuk menaikkan performa dari turbin Savonius dengan metode penggabungan tipe Savonius dan tipe Darius di atas, penelitian-penelitian yang bertujuan sama tetapi dengan metode yang berbeda yaitu dengan metode modifikasi propeler Savonius saja. Dengan metode tersebut diharapkan turbin Savonius mempunyai performa yang lebih baik untuk menghasilkan output torsi tanpa digabung dengan tipe Darius. Secara teknis akan lebih sederhana dan ekonomis.

Terdapat beberapa modifikasi propeler Savonius untuk mendapatkan unjuk kerja yang lebih baik, seperti yang dilakukan oleh Soelaiman, dkk (2007) yakni dengan menguji beberapa modifikasi tipe propeler yaitu propeler Savonius tipe U, Savonius tipe L, propeler tipe *windside* kecil dan *windside* besar. Dari pengujian, mereka meyimpulkan propeler Savonius bentuk L menghasilkan unjuk kerja yang paling baik dibandingkan dengan tipe yang lainnya.

Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan, semua bertujuan untuk menaikkan unjuk kerja dari kincir angin Savonius sendiri atau gabungan dengan turbin Darius. Turbin Savonius tipe U merupakan tipe yang mempunyai unjuk kerja (torsi) yang tidak sebaik

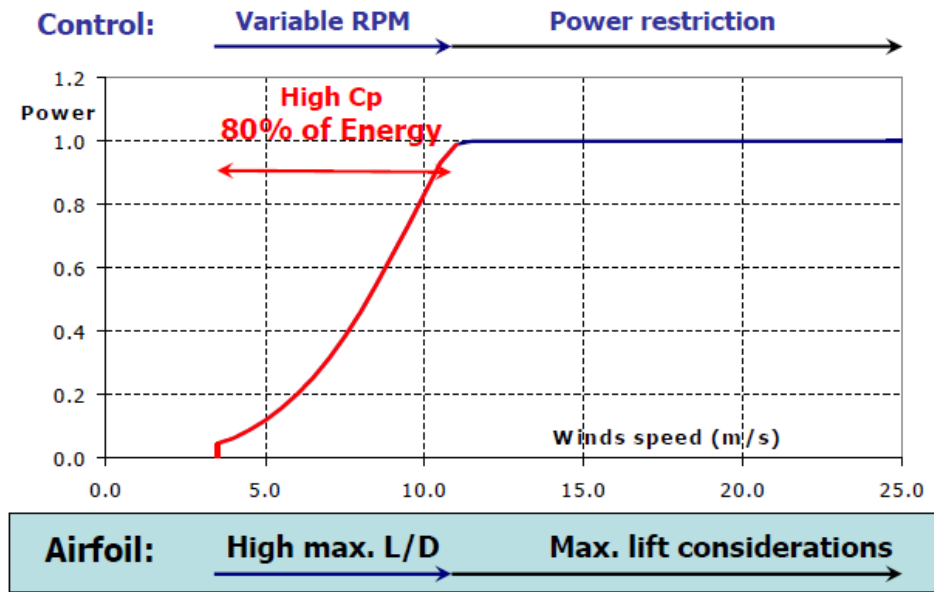
dengan tipe L, hal ini terlihat dari kesimpulan yang ditarik dari penelitian Soelaiman, dkk (2007). Untuk itu, dengan tujuan yang sama yaitu memodifikasi propeler turbin Savonius untuk memperbaiki unjuk kerja (torsi) Turbin Savonius tipe U, penelitian yang dilaksanakan adalah dengan mengkondisikan besar *overlap* propeler Savonius tipe U. Dengan kata lain, penelitian ini melihat seberapa besar pengaruh perubahan besar *overlap* sudu terhadap unjuk kerja (Torsi) dari Kincir angin Savonius tipe U. Panchal (2010), melakukan simulasi menggunakan komputer dengan bantuan software ANSYS v12.1 CFD; yang bertujuan untuk menghemat waktu dan biaya dalam merancang airfoil.

Berdasarkan mekanisme perancangan turbin angin dalam dalam hal ini titik awal perancangan diawali dengan menggunakan nilai tip speed ratio (TSR) lebih besar 3 ($TSR = 5$) sehingga dapat menggunakan airfoil sebagai profil dasar sudu turbin (Grant, 2011).

Airfoil yang digunakan untuk profil dasar sudu turbin adalah airfoil yang dilalui oleh angin kecepatan rendah (maksimum 10 m/s), sehingga parameter rasio gaya angkat terhadap gaya hambat maksimum menjadi fokus pengembangan karakteristik airfoil untuk turbin angin (Timmer and Rooij, 2003) dengan rentang kecepatan angin antara 5 – 10 m/s (Gambar 1a).

Timmer and Rooij (2003) juga menyatakan pada awal tahun 1980 sampai 1990, profil yang banyak digunakan sebagai bentuk dasar sudu turbin angin adalah airfoil yang dikembangkan oleh NASA yang diberi kode NACA 4 digit (seri NACA 44xx) dan NACA 5 digit (seri NACA 63xxx). Airfoil NACA tersebut dari hasil pengujian mengalami fenomena transisi yang lebih awal dari yang diprediksi dan hal ini sesuai dan diperkuat dengan yang dilakukan oleh Gómez and Álvaro (2006), sehingga perlu dikembangkan atau dilakukan modifikasi pada profil NACA tersebut terutama pada ketebalan airfoilnya. Fokus wilayah

sudu turbin sepanjang radial yang dilakukan modifikasi ditunjukkan oleh jumlah titik yang semakin banyak (Gambar 1b).



(a)

	> .28	.28 - .21	.21 >
Thickness-to-chord ratio	> .28	.28 - .21	.21 >
High maximum lift-to-drag ratio	●	●●	●●●
Low max. and benign post stall			●●
Insensitivity to roughness	●	●●	●●●
Low noise		●	●●●
Geometric compatibility	●●	●●	●●
Structural demands	●●●	●●	●

(b)

Gambar 1. (a) Area operasi turbin angin, (b) Fokus pengembangan sudu turbin angin (van Rooij and Timmer, 2004)

Studi pengembangan airfoil seri NACA 63xxx (Amerika), seri Riso A1xx (Denmark), seri FFA W3xxx (Swedia), seri FX (Stuttgart) dan seri DU (Belanda) khusus untuk turbin angin telah dilakukan oleh Bertagnolio et al (2001).

Studi pengembangan airfoil seri NACA 44xx yaitu NACA 4415 untuk bilangan Reynolds rendah dalam interval 50.000 sampai 600.000 (kecepatan rendah) telah dilakukan oleh Ostowari and Naik (1985) dan diperoleh bahwa NACA 4415 jika digunakan untuk turbin angin sumbu horizontal pada kecepatan angin tinggi dapat menimbulkan getaran dan noise yang besar, hal ini sesuai dan diperkuat dengan hasil penelitian Saliveros (1988). Hasil Studi oleh Hoffmann et.al (1996), dilakukan pada kondisi aliran mantap (*steady*) dengan bilangan Reynolds 1.000.000 yang melalui airfoil NACA 4415 didapat koefisien gaya angkat 1.35 pada sudut serang 14.3° dan dinyatakan bahwa jika aliran udara adalah tidak mantap (*unsteady*) maka akan terjadi peningkatan koefisien gaya angkat sebesar 10% sampai 15% dibanding pada kondisi aliran mantap, hal ini sesuai jika diaplikasikan pada turbin angin yang beroperasi pada kondisi angin yang tidak mantap.

C. Kajian Energi Angin Untuk Pemenuhan Kebutuhan Listrik

Kajian potensi energi angin di wilayah terisolir di daerah Sulawesi pernah dilakukan oleh Nurhalim (2007) dengan membuat sistem pembangkit listrik hibrida yang menggabungkan PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) dengan PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel). PLTD merupakan pembangkit listrik BBM dengan biaya operasi yang sangat tinggi pada saat ini. Bahkan untuk jangka panjang pembangkit ini sudah tidak ekonomis lagi karena dicabutnya subsidi dan mahalnnya harga BBM. PLTD pada umumnya merupakan pembangkit terisolir yang terletak di daerah yang sulit dijangkau seperti pedesaan pulau terpencil. Untuk mempertahankan investasi yang sudah ditanamkan dan produksi energi

listrik ekonomis, maka harus dieksploitasi potensi energi terbarukan di daerah terpencil tersebut.

Berdasarkan analisis terlihat bahwa kebutuhan energi suatu daerah terpencil dengan asumsi kebutuhan energi 280,5 kwh per hari dapat dilayani dengan membangun 10 unit PLTB dengan kapasitas 10 kW. Sedangkan 4 unit PLTD dengan kapasitas 8,5 kW hanya berfungsi sebagai cadangan. Sehingga dengan dibangunnya pembangkit listrik hibrida PLTB-Diesel akan mengurangi konsumsi bahan bakar minyak(BBM) di daerah tersebut.

Selanjutnya, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Al-Hasibi (2010), dengan menerapkan sebuah model skenario pengembangan energi terbarukan sebagai penyediaan energi listrik dengan menggunakan perangkat lunak Longe-range Energy Alternative Planning (LEAP) diketahui bahwa berdasarkan skenario pengembangan energi terbarukan, peran energi terbarukan dalam penyediaan energi listrik di Provinsi DIY sangat signifikan.

Hal ini diperlihatkan dengan kontribusi energi terbarukan dalam penyediaan energi listrik dapat mencapai 11,86 % dari keseluruhan kebutuhan energi listrik di Provinsi DIY. Kontribusi energi terbarukan dapat ditingkatkan dengan melibatkan jenis energi terbarukan lainnya seperti energi yang berasal dari biomasa dalam bentuk sampah kota maupun limbah pertanian. Selain berkontribusi dalam penyediaan energi listrik, pengembangan energi terbarukan dapat menurunkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan sebagai akibat aktivitas pembangkitan energi listrik. Dalam skenario pengembangan yang disimulasikan, peran energi terbarukan dalam penurunan emisi CO₂ mencapai 11,62 % dari emisi CO₂ tanpa energi terbarukan.

Sugiyono (2010) melakukan kajian prospek pemanfaatan energi angin melalui perencanaan energi daerah Propinsi DIY untuk rentang waktu 2007-2025 dengan

menggunakan model LEAP (*Long-Range Energy Alternatives Planning System*). Energi listrik yang digunakan untuk aktivitas perekonomian di Provinsi DIY sebagian besar dipasok dari jaringan interkoneksi listrik Jawa-Bali. Daya terpasang pada tahun 2007 mencapai 807,63 MW. Hanya sekitar 70 MW yang menggunakan *captive power* baik berupa *captive murni* maupun hanya sebagai cadangan bila pasokan dari PLN terganggu. Total penggunaan energi listrik mencapai sebesar 1.726,98 GWh dengan laju pertumbuhan dalam kurun waktu 2003-2007 rata-rata sebesar 8,41% per tahun. Penggunaan listrik terbesar adalah di sektor rumah tangga yaitu sebesar 57% dari total penggunaan listrik. Diikuti oleh sektor bisnis sebesar 19%, sektor industri sebesar 11%, dan sektor sosial sebesar 7%. Sedangkan sektor publik merupakan sektor yang paling sedikit mengkonsumsi energi listrik yaitu sebesar 6%.

Jumlah penduduk di DIY diperkirakan meningkat dari 3,47 juta pada tahun 2008 menjadi 4,39 juta pada tahun 2025. Dengan mempertimbangkan kedua parameter penggerak tersebut diperkirakan total kebutuhan energi di Propinsi DIY meningkat dari 4,68 juta SBM pada tahun 2008 menjadi 16,28 juta SBM pada tahun 2025 atau meningkat dengan laju pertumbuhan rata-rata sebesar 7,6% per tahun. Pada skenario BAU (*business as usual*), kebutuhan energi tersebut hampir 60% dipenuhi dengan menggunakan BBM. Pasokan listrik mencapai 28% dan sisanya menggunakan LPG yang makin meningkat penggunaannya dan mencapai 12% pada tahun 2025 karena adanya kebijakan konversi dari minyak tanah ke LPG. Alternatif energi yang mungkin untuk dikembangkan dalam mengurangi konsumsi BBM tergantung dari karakteristik sektor penggunaannya.

D. Pengaruh dan Dampak Lingkungan terhadap SKEA

1. Pengaruh lingkungan terhadap komposit

Dalam perancangan propeler kincir angin, pengaruh kelembaban dan cuaca yang ekstrim harus diperhatikan untuk menghasilkan propeler kincir angin yang tahan terhadap perubahan cuaca yang terjadi. Propeler kincir angin minimal dapat beroperasi selama 20-30 tahun. Dari beberapa penelitian sebelumnya dilaporkan bahwa material komposit mengalami degradasi kekuatan yang diakibatkan oleh pengaruh lingkungan, seperti pengaruh kelembaban udara, panas matahari, radiasi ultraviolet, bahkan oksidasi termal. Kelembaban misalnya, dapat menurunkan kekuatan material komposit karena adanya difusi uap air ke material komposit yang dapat menyebabkan penurunan sifat temperatur transisi glass, yaitu temperatur dimana resin berubah sifat dari kondisi padat menjadi kondisi viskoelastis. Selain hal tersebut, proses degradasi komposit juga dipengaruhi oleh sifat kimia resin dan matriknya serta jangka waktu terpapar pada lingkungan. Beberapa material komposit sangat sensitif terhadap cuaca. Kombinasi dua atau beberapa faktor lingkungan dapat menyebabkan degradasi kekuatan material komposit (Li, 2000).

Pengaruh lingkungan pada material komposit harus diperhitungkan di dalam tahap awal perancangan propeler dari bahan komposit. Jika hal ini diabaikan akan dapat menyebabkan pemborosan waktu, kegagalan design, energi dan biaya. Umumnya, derajat sensitivitas material komposit terhadap faktor lingkungan berbeda-beda. Temperatur dan kelembaban merupakan faktor utama penyebab degradasi kekuatan propeler komposit. Sehingga pengaruh temperatur dan kelembaban harus diperhatikan didalam perancangan dan pembuatan propeler kincir angin. Degradasi material komposit lebih tinggi bila disebabkan faktor temperatur dan kelembaban secara bersama-sama dibandingkan dengan hanya oleh faktor temperatur atau hanya kelembaban

saja. Kegagalan material komposit dapat diakibatkan oleh temperatur yang sangat tinggi dengan kelembaban yang tinggi (Hale, 1998) (Grant, 1995). Lingkungan terutama berpengaruh terhadap matrik kompositnya. Matrik dari komposit bertujuan untuk melindungi fiber komposit dari pengaruh kimia yang berasal dari lingkungannya.

a. Pengaruh Temperatur

Dalam kurun waktu operasional yang lama, propeller kincir angin mungkin terpapar pada lingkungan dengan temperatur rendah ($\leq -20^{\circ}\text{C}$) atau temperatur yang sangat tinggi ($\geq 50^{\circ}\text{C}$). Beberapa polimer akan menjadi rapuh jika dipapar pada temperatur yang sangat rendah (Schwartz, 1996). Beberapa tahun terakhir, telah banyak dilakukan penelitian untuk mengetahui ketahanan material komposit terhadap temperatur tinggi (Brinson, 1987). Dilaporkan bahwa pengaruh temperatur pada interface fiber-matrik sama besarnya terhadap perlakuan fiber dan sifat resin. Sifat mekanik yang lain, seperti kekuatan tekan, kekuatan tarik maksimumnya menurun pada temperatur tinggi seperti telah dilaporkan sebelumnya (Soutis, 1997) (Hale, 1997) (Zaaffaroni, 1998). Pengaruh temperatur terhadap sifat retak komposit secara detail telah diteliti oleh Marom (1989). Hasilnya menunjukkan bahwa energi retak interlaminar menurun 25-30% pada kenaikan temperatur 50 – 100⁰C.

Selain mempercepat proses penyerapan air, temperatur juga sangat berpengaruh terhadap resin komposit. Springer et al (1997) menyimpulkan bahwa untuk komposit laminasi 90⁰ (komposit didominasi resin), kenaikan temperatur dapat menurunkan modulus elastisitas dan kekuatan komposit, bahkan penurunan ini dapat mencapai 60% hingga 90%

b. Pengaruh kelembaban

Molekul-molekul air dapat berdifusi masuk ke pori-pori komposit dan dapat mempengaruhi sifat mekanik material komposit. Marom (1989) melaporkan bahwa kadar air dapat mempengaruhi kekuatan retak komposit. Shen dan Springer (1977) melaporkan bahwa komposit laminasi 90^0 , kekuatan tarik maksimal dan modulus elastisitasnya menurun terhadap kenaikan kadar air pada material komposit. Penurunan ini bisa mencapai 50% -90% . Difusi uap air ke dalam komposit menyebabkan degradasi pada ikatan fiber-matriknya (Schultheise, 1997) penurunan temperatur transisi glass (Brinson, 1987), sifat plastisnya dan kadang-kadang dapat menyebabkan retak halus pada matrik komposit (Schutte, 1994) (Grant, 1995). Pengetahuan untuk dapat memprediksikan adanya difusi uap air kedalam komposit dan pengaruhnya terhadap sifat resin sangat diperlukan dalam kurun waktu operasional yang lama.

2. Pengaruh lingkungan terhadap material komposit

Pengaruh lingkungan terhadap komposit tergantung pada pengaruhnya terhadap masing-masing komponen kompositnya, fiber, matik, serta interface antara fiber dan matriknya. Pengaruh keseluruhan tergantung pada pengaruh lingkungan yang paling dominan terhadap salah satu komponen komposit. Seperti misalnya, tegangan melintang merupakan sifat komposit yang didominasi oleh sifat matriknya, sehingga pengaruh lingkungan terhadap sifat tegangan melintang akan tergantung daripada sensitivitas matrik terhadap pengaruh lingkungan. Pengaruh lingkungan terhadap material dapat dipahami dengan baik, jika pengaruh lingkungan ini dipelajari secara terperinci terhadap komponen-komponen komposit tersebut.

Lingkungan sangat berpengaruh terhadap sifat dari polimer. Pengaruh ini dapat diklasifikasikan menjadi efek *reversible* dan efek *irreversible*. Jika terjadi difusi uap air ke dalam matrik, maka sifat plastis dan temperatur transisi gelas berubah sebagai akibat dari kenaikan

volume polimer. Sifat-sifat tadi dapat kembali seperti semula jika materialnya dikeringkan. Hal ini dinamakan dengan efek reversibel. Sedangkan jika ireversible, sifat komposit tidak dapat kembali normal seperti sebelum adanya pengaruh lingkungan walaupun dengan memberikan perlakuan pada material kompositnya. Retak halus pada komposit merupakan efek ireversible lingkungan. Komposit yang terpapar lama pada kelembaban tinggi dapat menyebabkan retak halus pada komposit.

Masing-masing resin memiliki sifat difusivitas dan kandungan uap air maksimum. Difusivitas menunjukkan laju difusi uap air yang terjadi. Keseimbangan kandungan uap air menunjukkan tinggi rendahnya tegangan swell. Semakin tinggi keseimbangan kandungan uap air, semakin tinggi tegangan swell dalam materialnya, dan semakin tinggi pula kemungkinan terdapat retak halus dan terjadinya hidrolisis (Schutte, 1994).

3. Dampak lingkungan SKEA

SKEA karena sifatnya yang terbarukan sudah jelas akan memberikan keuntungan karena angin tidak akan habis digunakan tidak seperti pada penggunaan bahan bakar fosil. Tenaga angin juga merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, dimana penggunaannya tidak mengakibatkan emisi gas buang atau polusi yang berarti ke lingkungan. Kalau dicermati dari pembangkit listrik tenaga angin ini tidak sepenuhnya ramah lingkungan, terdapat beberapa masalah di antaranya yaitu dampak visual, derau suara, beberapa masalah ekologi, dan keindahan.

Dampak visual biasanya merupakan hal yang paling serius dikritik (Sasongko, 2009). Penggunaan ladang angin sebagai pembangkit listrik membutuhkan luas lahan yang tidak sedikit dan tidak mungkin untuk disembunyikan. Penempatan ladang angin pada lahan yang masih dapat digunakan untuk keperluan yang lain dapat menjadi persoalan tersendiri bagi

penduduk setempat. Selain mengganggu pandangan akibat pemasangan barisan pembangkit angin, penggunaan lahan untuk pembangkit angin dapat mengurangi lahan pertanian serta pemukiman. Hal ini yang membuat pembangkitan tenaga angin di daratan menjadi terbatas. Beberapa aturan mengenai tinggi bangunan juga telah membuat pembangunan pembangkit listrik tenaga angin dapat terhambat. Penggunaan tiang yang tinggi untuk kincir angin juga dapat menyebabkan terganggunya cahaya matahari yang masuk ke rumah-rumah penduduk. Perputaran sudu-sudu menyebabkan cahaya matahari yang berkelap-kelip dan dapat mengganggu pandangan penduduk setempat.

Efek lain akibat penggunaan kincir angin yaitu terjadinya derau frekuensi rendah. Putaran dari sudu-sudu kincir angin dengan frekuensi konstan lebih mengganggu daripada suara angin pada ranting pohon. Selain derau dari sudu-sudu turbin, penggunaan *gearbox* serta *generator* dapat menyebabkan derau suara mekanis dan juga derau suara listrik. Derau mekanis yang terjadi disebabkan oleh operasi mekanis elemen-elemen yang berada dalam *nacelle* atau rumah pembangkit listrik tenaga angin. Dalam keadaan tertentu kincir angin dapat juga menyebabkan interferensi elektromagnetik, mengganggu penerimaan sinyal televisi atau transmisi gelombang mikro untuk perkomunikasian.

Penentuan ketinggian dari kincir angin dilakukan dengan menganalisis data turbulensi angin dan kekuatan angin. Derau aerodinamis merupakan fungsi dari banyak faktor seperti desain sudu, kecepatan perputaran, kecepatan angin, turbulensi aliran masuk. Derau aerodinamis merupakan masalah lingkungan, oleh karena itu kecepatan perputaran rotor perlu dibatasi di bawah 70m/s. Beberapa ilmuwan berpendapat bahwa penggunaan skala besar dari pembangkit listrik tenaga angin dapat merubah iklim lokal maupun global

karena menggunakan energi kinetik angin dan mengubah turbulensi udara pada daerah atmosfer (Sasongko, 2009).

Wilayah pantai Kuwaru dan pantai Baru telah dikembangkan sebagai Wisata Alam, wisata pendidikan berbasis teknologi yakni kincir angin sebagai pembangkit listrik, juga agrowisata, dan Perikanan dengan kolam sebanyak 10 kolam serta peternakan dengan 150 kandang dengan kelompok nelayan yang beranggotakan 96 orang. Rencananya ada genset biogas 2,5 kW dengan volume tampung 9 m³ yang juga dijadikan bahan bakar warung. Biogas tersebut dihasilkan kotoran sapi yang lokasinya berdekatan dengan PLTH. Program biogas tersebut merupakan program Kementrian Lingkungan Hidup.

Saat ini pembangkit listrik energi hybrid (PLTH) yang terpasang 35 unit turbin angin dengan tinggi rata-rata 18 meter, terdiri 26 turbin angin berkapasitas 1 kW, 6 turbin angin 2,5 kW, 2 turbin angin 10 kW, dan satu turbin angin 50 kW. Kecepatan angin di Indonesia tidak sebesar di negara seperti Belanda yang telah menggunakan energi kincir angin. Kekuatan kecepatan angin di sekitar pantai Kuwaru dan Pandasimo berkisar antara 3-5 meter per detik. Sehingga perlu dikombinasi dengan generator kecepatan rendah dan energi panas matahari.

Secara umum PLTH masih tergolong solusi antara yang menjadi kebutuhann primer untuk wilayah terpencil dan belum tersentuh listrik. Di lokasi wisata wilayah pantai Baru masing-masing warung mendapatkan rata-rata pasokan listrik sebesar 250 watt yang bersumber dari PLTH. Setiap warung rata-rata membayar iuran antara Rp. 4.000 hingga Rp. 10.000 per bulan bergantung pada besar kecilnya pasokan listrik.

Energi alternatif diakui masih sulit menggantikan energi konvensional, namun paling tidak saat ini energi terbarukan tersebut dapat menjadi energi pendukung terutama bagi wilayah yang belum teraliri listrik.

E. Landasan Teori

1. Sifat Udara

Ada tiga macam fluida, yaitu cair, uap dan gas, yang masing-masing mempunyai sifat tertentu yang dapat didekati dengan persamaan matematis yang serupa. Fluida yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah fluida gas atau udara.

Gas adalah kumpulan dari partikel-partikel (molekul, atom, ion dan sejenisnya) yang bergerak secara acak. Karena muatan-muatan partikel-partikel tersebut, maka terjadi saling mempengaruhi diantara partikel tersebut sehingga timbulnya gaya yang disebut gaya antar molekul (*intermolecular force*).

Sifat-sifat udara yang banyak digunakan dalam proses perhitungan adalah suhu, tekanan, massa jenis, kekentalan dan kecepatan.

a. Temperatur

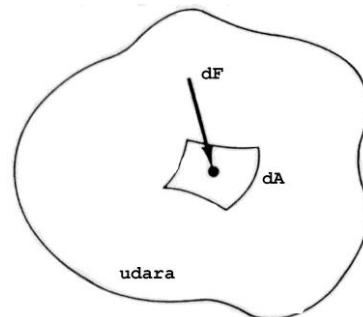
Temperatur T adalah rasio antara jumlah energi kinetik E_k partikel udara yang bergerak dengan konstanta Boltzmann $\kappa = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_k}{\kappa} \quad (1)$$

b. Tekanan

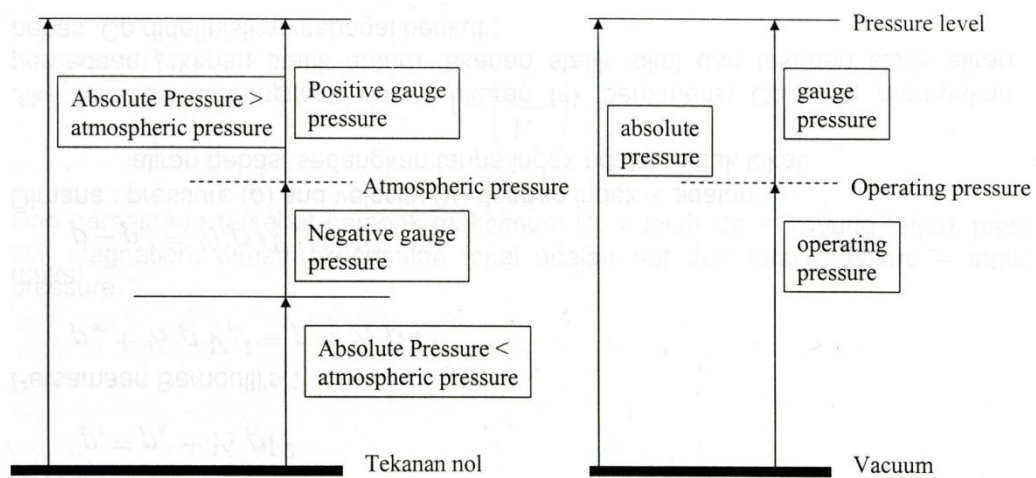
Tekanan (pressure) P pada suatu titik didefinisikan sebagai gaya dF yang bekerja normal terhadap luas permukaan elemen dA , seperti tampak pada Gambar 2. Sehingga tekanan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dF}{dA} \quad (2)$$



Gambar 2. Definisi tekanan

Terminologi pengukuran tekanan udara secara umum seperti tampak pada Gambar 3 (a), dan terminologi tekanan udara yang didefinisikan oleh Fluent seperti tampak pada Gambar 3 (b).



Gambar 3. Terminologi tekanan udara (a) secara umum, (b) definisi oleh Fluent (Fluent, 2006)

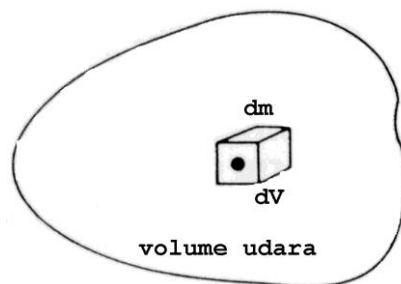
Hubungan tekanan absolut P_{abs} dengan tekanan operasi (*operating pressure*) P_{op} dan tekanan gauge (*gauge pressure*) P_{gauge} dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P_{abs} = P_{op} + P_{gauge} \quad (3)$$

c. Massa Jenis

Massa jenis (*density*) ρ adalah rasio antara massa dm yang dikandung volume elemen dV , seperti tampak pada Gambar 4. Sehingga massa jenis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\rho = \lim_{dV \rightarrow 0} \frac{dm}{dV} \quad (4)$$



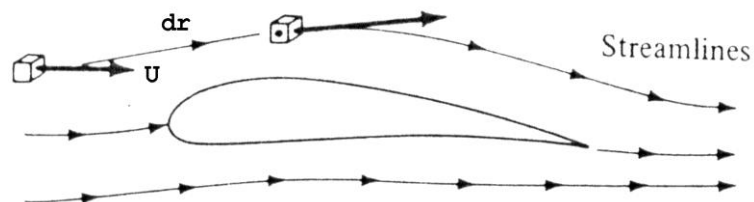
Gambar 4. Definisi massa jenis

d. Kecepatan

Kecepatan U adalah rasio besarnya perubahan posisi dr partikel terhadap perubahan waktu dt , yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$U = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{dr}{dt} \quad (5)$$

Kecepatan aliran elemen udara merupakan suatu vektor, sehingga memungkinkan kecepatan bervariasi dari satu titik ke titik yang lain di dalam aliran, seperti tampak pada Gambar 5.



Gambar 5. Kecepatan alir dan lintasan alir (Anderson, 2001)

e. Kekentalan

Kekentalan (*viscosity*) μ adalah sifat udara yang berkaitan dengan gesekan antara partikel-partikel yang menyebabkan terjadinya tegangan geser (*shear stress*) τ yang bervariasi terhadap gradien kecepatan dU/dy , yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} \quad (6)$$

f. Bilangan Reynold

Keserupaan tingkat keadaan mekanika fluida adalah suatu cara pencarian jawaban dari suatu masalah dengan pengujian model yang diperkecil sedemikian rupa sehingga jawaban dari model dapat digunakan dengan beberapa aturan atau kondisi untuk mendapatkan jawaban dari masalah yang sebenarnya.

Bilangan Reynold suatu aliran terhadap dimensi panjang (*chord*) airfoil dapat dituliskan sebagai berikut :

$$R_e = \frac{\rho U c}{\mu} \quad (7)$$

2. Model Gerak Udara

Permasalahan dalam fluida dinamik pada umumnya sangat kompleks. Metode penyelesaian permasalahan fluida dinamik pada terdiri dari metode Analytic Fluid Dynamics (AFD) dan metode Experimental Fluid Dynamics (EFD) dan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). CFD mempunyai keunggulan dalam menyelesaikan permasalahan fluid dinamik, di antaranya adalah: CFD lebih hemat biaya daripada EFD, menghasilkan database yang handal dan cepat didapat untuk mendiagnosa medan aliran, mampu mensimulasikan

kondisi ideal dan sebenarnya serta mampu mensimulasikan fenomena fisik fluida yang tidak dapat dilakukan oleh pengujian, seperti; simulasi skala penuh, pengaruh lingkungan.

Pengelompokan dua persamaan gerak linier dan *non-linier* dalam prakteknya muncul dalam aliran udara. Persamaan matematis dua jenis aliran tersebut dengan sejumlah variabel pada umumnya dibatasi pada aliran yang mengalami gangguan kecil (*small pertubation*) sehingga berlaku persamaan gerak linier. Sehingga penyelesaian analitik dan numerik pada persamaan menjadi sederhana untuk dilakukan.. Hasil analitik ataupun numerik (CFD) akan dibandingkan dengan hasil pengujian (karena penyederhanaan tersebut) untuk mendapatkan perbedaan yang masih dapat diterima.

Model gerak udara terdiri dari tiga prinsip dasar kekekalan yaitu kekekalan massa atau kontinuitas, kekekalan momentum dan kekekalan energi.

Hukum kekekalan massa atau kontinuitas dapat dituliskan dalam bentuk integral sebagai berikut (Anderson, 2001, Radi dkk, 2012) :

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_A \rho \vec{U} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (8)$$

Hukum kekekalan momentum dapat dituliskan dalam bentuk integral sebagai berikut (Anderson, 2001, Radi dkk, 2012) :

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \vec{U} dV + \iint_A (\rho \vec{U} \cdot d\vec{A}) \vec{U} = - \iint_A P d\vec{A} + \iiint_V \rho \vec{f} dV + \vec{F}_{viscous} \quad (9)$$

Hukum kekekalan energi dapat dituliskan dalam bentuk integral sebagai berikut (Anderson, 2001, Radi dkk, 2012):

$$\begin{aligned} \iiint_V \dot{q} \rho dV + \dot{Q}_{\text{viscous}} - \iint_A P \vec{U} \cdot d\vec{A} + \iiint_V \rho (\vec{f} \cdot \vec{U}) dV + \dot{W}_{\text{viscous}} \\ = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \left(e + \frac{U^2}{2} \right) dV + \iint_A \rho \left(e + \frac{U^2}{2} \right) \vec{U} \cdot d\vec{A} \end{aligned} \quad (10)$$

a. Simulasi Numerik Aliran Melalui Airfoil

Aliran turbulen dicirikan adanya medan kecepatan yang fluktuatif. Fluktuasi ini merupakan gabungan kuantitas transport seperti momentum dan energi. Fluktuasi ini mempunyai nilai yang relatif kecil dan frekuensi tinggi (Radi dkk, 2012).

Proses komputasi menjadi terlalu mahal untuk mensimulasikan secara langsung semua parameter teknik. Sehingga untuk mempermudah proses komputasi dibutuhkan sekumpulan persamaan yang terdiri dari variabel yang tidak diketahui yang telah dimodifikasi. Untuk itu dibutuhkan model turbulensi untuk menentukan variabel-variabel dalam bentuk kuantitas yang tidak diketahui (Radi dkk, 2012).

Model turbulensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah model Spallart Allmaras (S-A) yang dirancang khusus untuk bidang penerbangan. Model S-A merupakan model turbulensi yang sederhana karena hanya mempunyai satu persamaan yang dicari jawabnya yaitu dalam bentuk persamaan gerak kekentalan kinematik Eddy (*turbulent kinematic viscosity*) (Radi dkk, 2012).

b. Model Aliran Turbulen Spalart-Allmaras

Model S-A merupakan model untuk memecahkan persamaan gerak (8, 9 dan 10) dalam bentuk kuantitas modifikasi kekentalan kinematik turbulen $\bar{\nu}$, yang dapat dituliskan dalam persamaan (11) (Fluent, 2006):

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\bar{v}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v \quad (11)$$

dimana G_v adalah kekentalan turbulen yang dihasilkan, Y_v adalah destruksi kekentalan turbulen, σ_v dan C_{b2} adalah konstanta dan ν adalah kekentalan kinematik molekul udara.

c. Model Kekentalan Turbulen

Kekentalan turbulen μ_t dapat dituliskan sebagai berikut (Fluent, 2006):

$$\mu_t = \rho \bar{v} f_{v1} \quad (12)$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3} \text{ dan } \chi = \frac{\bar{v}}{\nu} \quad (13)$$

dimana f_{v1} adalah peredam kekentalan.

d. Model Produksi Turbulen

Model produksi turbulen dapat dituliskan sebagai berikut (Fluent, 2006) :

$$G_v = C_{b1} \rho \bar{S} \bar{v} \quad (14)$$

$$\bar{S} = S + \frac{\bar{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2} \quad (15)$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} \quad (16)$$

dimana C_{b1} dan κ adalah konstanta, d adalah jarak dari dinding dan S adalah skalar berdasarkan besar *vorticity*, yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$S = \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij}} + 2 \min(0, \sqrt{S_{ij} S_{ij}} - \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij}}) \quad (17)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (18)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (19)$$

e. Model Destruksi Turbulen

Model destruksi turbulen γ_v dapat dituliskan sebagai berikut (Fluent, 2006):

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\bar{v}}{d} \right)^2 \quad (20)$$

$$f_w = g \left(\frac{1 + C_w^3}{g^6 + C_w^6} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (21)$$

$$g = r + C_{w2} (r^6 - r) \quad (22)$$

$$r = \frac{\bar{v}}{S \kappa^2 d^2} \quad (23)$$

f. Model Konstanta

Nilai konstanta yang ada didalam model turbulen Spalart Allmaras adalah sebagai

berikut; $C_{b1} = 0.1335$, $C_{b2} = 0.622$, $\sigma_v = 2/3$, $\kappa = 0.41$ $C_{v1} = 7.1$,

$C_{w1} = (C_{b1}/\kappa^2) + (1 + C_{b2}/\sigma_v)$, $C_{w2} = 0.3$ $C_{w3} = 2.0$.

3. Diskretisasi

Untuk kondisi aliran tunak (*steady*), jika variabel tak bebas ϕ adalah fungsi ruang $\phi = f(x, y, z)$ yang tidak diketahui adalah solusi dari persamaan model gerak fluida (persamaan 8, 9 dan 10) serta persamaan model turbulen Spalart Allmaras (persamaan 11) dan ϕ merupakan kuantitas skalar (tekanan, densitas dan sejenisnya) atau kuantitas kecepatan, maka persamaan (8, 9, 10 dan 11) dapat dituliskan dalam bentuk persamaan (24) yang mengandung ϕ (Fluent, 2006, Radi dkk, 2012):

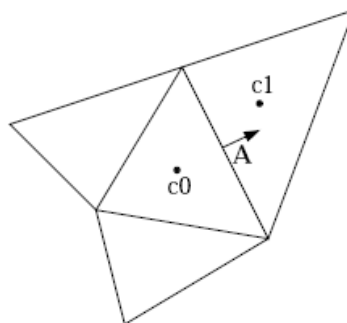
$$\oint_A \rho \phi \vec{U} \cdot d\vec{A} = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \iiint_V S_\phi dV \quad (24)$$

dimana Γ_ϕ adalah koefisien difusi dari variabel ϕ , $\nabla \phi$ adalah gradient ϕ dan S_ϕ adalah sumber dari ϕ persatuan volume. FLUENT menggunakan teknik kendali volume (*control volume*) untuk mengubah persamaan (24) ke dalam bentuk persamaan aljabar yang dapat dicari solusinya.

a. Persamaan Diskret

Untuk mendapatkan bentuk aljabar dari persamaan (24), maka dilakukan langkah-langkah sebagai berikut. Langkah pertama adalah melakukan diskretisasi persamaan 24 yang langkah selanjutnya adalah mengubah persamaan diskret menjadi bentuk aljabar (Radi dkk, 2012).

Pada diskretisasi untuk mendapatkan solusi ϕ , maka domain kontinu diubah menjadi domain diskret dalam bentuk cell 2D yaitu segiempat atau segitiga (*quadrilateral cell* atau *triangular cell*), sebagai contoh digunakan cell segitiga seperti tampak pada Gambar 6 (Fluent, 2006, Radi dkk, 2012).



Gambar 6. Ilustrasi control volume menggunakan cell segitiga untuk diskretisasi (Fluent, 2006)

Sehingga persamaan (24) dalam domain kontinu diubah dalam bentuk *domain diskret* (diskontinu) yang dapat dituliskan dalam persamaan (25) (Fluent, 2006).

$$\sum_f^{N_{face}} \vec{U}_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{face}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n A_f + S_\phi V \quad (25)$$

dimana N_{face} adalah jumlah muka pada cell tertutup, ϕ_f nilai ϕ yang dikonveksikan melalui muka f , \vec{U}_f adalah fluks massa melalui muka, $(\nabla\phi)_n$ adalah besar gradien ϕ normal terhadap muka f dan V adalah *volume cell*.

b. Solusi Numerik

Nilai ϕ yang diperoleh dari komputasi disimpan pada pusat *cell grid* yaitu titik c_0, c_1, \dots, c_n di dalam Gambar 10 dan nilai ϕ_f dibutuhkan untuk mengkonveksi bentuk persamaan 25 dengan cara interpolasi nilai-nilai pusat cell (Fluent, 2006, Radi dkk, 2012).

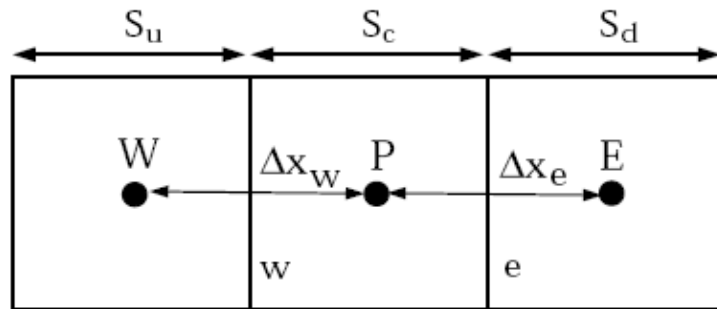
Untuk mendapatkan nilai ϕ_f , maka dapat dilakukan dengan menggunakan skema *upwind*. Skema *upwind* yang digunakan adalah derajat dua untuk mendapatkan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Berdasarkan pendekatan deret Taylor, maka nilai ϕ_f dapat dituliskan sebagai berikut (Fluent, 2006) :

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{dr} \quad (26)$$

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{\text{face}}} \phi_f A \quad (27)$$

dimana ϕ dan $\nabla\phi$ adalah nilai pada pusat cell dan nilai gradien pada cell depan (*upstream cell*), \vec{dr} adalah vektor perpindahan dari pusat cell ke pusat muka dan $\overline{\phi_f}$ adalah nilai rata-rata ϕ yang dihitung dari dua cell yang dipisahkan oleh muka cell yang sama.

Ilustrasi persamaan (26) untuk tipe cell segiempat dengan pusat cell adalah W, P dan E dan muka cell w dan e seperti tampak pada Gambar 7.



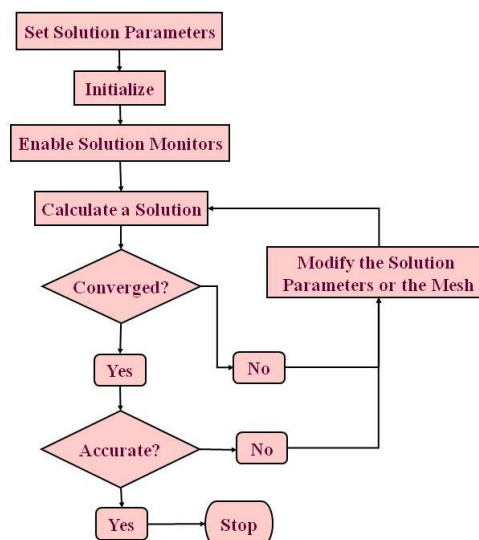
Gambar 7. Kontrol volume menggunakan quadrilateral grid (Fluent, 2006)

Berdasarkan Gambar 7, maka dapat ditentukan nilai ϕ pada muka e yaitu ϕ_e yang dapat dituliskan sebagai berikut (Fluent, 2006):

$$\phi_e = \frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \quad (28)$$

c. Solusi Segragate

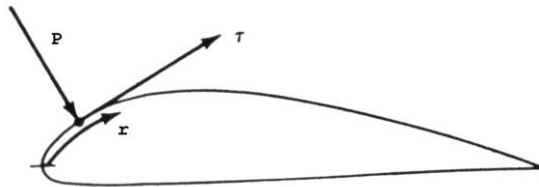
Untuk mendapatkan solusi ϕ maka dilakukan dengan metode *segragate*, diagramnya dapat digambarkan seperti tampak pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram alir solusi dengan metode segragate (Fluent, 2006)

4. Koefisien Aerodinamika

Jika solusi ϕ adalah kuantitas skalar tekanan $\phi = P$ dan atau skalar tegangan geser permukaan $\phi = \tau$ pada setiap titik pada kontur airfoil, seperti tampak pada Gambar 9.



Gambar 9. Distribusi tekanan dan tegangan geser pada permukaan airfoil (Anderson, 2001) maka, distribusi koefisien tekanan (*pressure coefficient*) c_p dan distribusi koefisien geser permukaan (*skin friction coefficient*) c_f , dapat dituliskan sebagai berikut :

$$c_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (29)$$

$$c_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (30)$$

Dengan mengintegrasikan distribusi c_p dan c_f dari *leading edge* sampai *trailing edge* airfoil, akan diperoleh koefisien normal c_n dan koefisien aksial (sejajar) c_a terhadap chordline, serta koefisien momen c_m , yang dapat dituliskan sebagai berikut (Anderson 2001, Radi dkk, 2012) :

$$c_n = \frac{1}{c} \int_0^c (c_{p,lower} - c_{p,upper}) dx + \frac{1}{c} \int_0^c \left(c_{f,upper} \frac{dy_{upper}}{dx} + c_{f,lower} \frac{dy_{lower}}{dx} \right) dx \quad (31)$$

$$c_a = \frac{1}{c} \int_0^c \left(c_{p,upper} \frac{dy_{upper}}{dx} - c_{p,lower} \frac{dy_{lower}}{dx} \right) dx + \frac{1}{c} \int_0^c (c_{f,upper} + c_{f,lower}) dx \quad (32)$$

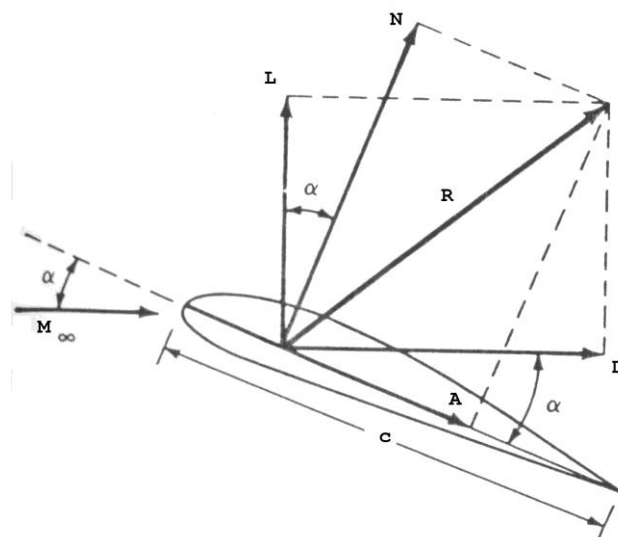
$$\begin{aligned}
c_m = & \frac{1}{c^2} \int_0^c (c_{P,upper} - c_{P,lower}) x dx - \frac{1}{c^2} \int_0^c \left(c_{f,upper} \frac{dy_{upper}}{dx} + c_{f,lower} \frac{dy_{lower}}{dx} \right) x dx \\
& + \frac{1}{c^2} \int_0^c \left(c_{P,upper} \frac{dy_{upper}}{dx} + c_{f,upper} \right) y_{upper} dx + \frac{1}{c^2} \int_0^c \left(c_{f,lower} - c_{P,lower} \frac{dy_{lower}}{dx} \right) y_{lower} dx
\end{aligned} \quad (33)$$

Berdasarkan persamaan (31) dan (32) serta Gambar 10, maka koefisien gaya angkat (*lift coefficient*) c_l , koefisien gaya hambat (*drag coefficient*) c_d dapat dituliskan sebagai berikut (Anderson 2001, Radi dkk, 2012):

$$c_l = c_n \cos \alpha - c_a \sin \alpha \quad (34)$$

$$c_d = c_n \sin \alpha + c_a \cos \alpha \quad (35)$$

$$c_{m,l/4chord} = c_m - \frac{1}{4} c_l \quad (36)$$



Gambar 10. Hubungan Gaya normal, aksial, gaya angkat dan gaya hambat (Anderson, 2001)

5. Komposit matriks polimer

Komposit matriks polimer merupakan teknologi komposit yang paling dikenal dan sering digunakan. Terdiri dari polimer (*epoxy, polyester, urethane*) kemudian diperkuat dengan fiber yang berdiameter kecil (grafit, aramids, boron serta serat alam). Material

komposit dengan matriks polimer memiliki rasio berat berbanding kekuatan yang tinggi. Sebagai contoh, komposit epoksi dengan fiber grafit memiliki kekuatan lima kali lebih besar dibandingkan baja dengan berat yang sama (Kaw, 2006). Ditambah dengan biaya yang rendah dan prinsip manufaktur yang tidak rumit maka tidaklah heran apabila material komposit dengan matriks polimer menjadi teknologi komposit yang paling sering digunakan. Pada komposit dengan matriks polimer, matriks yang digunakan disebut juga dengan resin. Berdasarkan dari pengaruh panas terhadap sifatnya, resin dapat dibagi menjadi dua macam yaitu, material yang tidak tahan terhadap perlakuan pada temperatur tinggi disebut juga dengan resin termoplastik dan material yang memiliki ketahanan temperatur yang tinggi disebut dengan resin termoset. Pada penggunaan resin termoplastik, kita harus merubah dahulu resin termoplastik dari fasa padat (berupa pelet) menjadi fasa cair dengan memanaskannya terlebih dahulu hingga mencapai temperatur leleh (*melting*), baru kemudian fiber dicampurkan dan diaduk sehingga terdispersi secara merata. Setelah itu material baru dibentuk. Resin termoplastik ini jika dipanaskan kembali sampai temperatur yang sesuai ia akan meleleh kembali dan dapat menjadi keras kembali jika didinginkan, dan proses ini dapat dilakukan secara berulang – ulang tanpa mempengaruhi secara signifikan sifat materialnya.

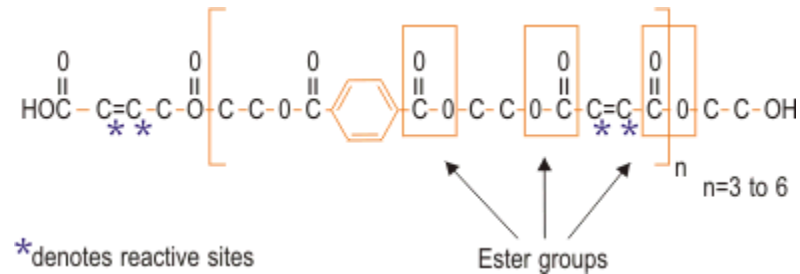
Contoh dari resin jenis ini adalah nilon, polipropilen dan ABS. Sedangkan resin termoset merupakan resin dengan fasa cair, yang akan mengeras jika ditambahkan aktivator dan atau katalisator. Metode pencampuran yang digunakan pada resin termoset relatif lebih sederhana, resin cair dicampurkan dengan fiber dengan kadar yang kita inginkan, kemudian diaduk, setelah itu ditambahkan *hardener* atau katalisator. Untuk beberapa jenis resin, seperti poliester cukup didiamkan pada temperatur ruang material akan mengeras. Berbeda dengan

resin termoplastik sekali mengeras maka resin termoset tidak dapat mencair kembali jika dipanaskan, walaupun pada temperatur tertentu yang dikenal dengan *Glass Transition Temperature* (Tg) sifat mekaniknya akan berubah secara signifikan. Tg pada setiap material termoset tidaklah sama tergantung dari jenis resin yang digunakan. Tipe Resin termoset yang sering digunakan dalam industri material komposit adalah Epoksi, Vinil Ester dan Poliester (Goodman, 1999).

a. Resin poliester

Resin poliester merupakan resin yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi yang menggunakan resin termoset, baik itu secara terpisah maupun dalam bentuk material komposit. Walaupun secara mekanik, sifat mekanik yang dimiliki oleh poliester tidaklah terlalu baik atau hanya sedang – sedang saja. Hal ini karena resin ini mudah didapat, harga relatif terjangkau serta yang terpenting adalah mudah dalam proses fabrikasinya. Jenis dari resin poliester yang digunakan sebagai matriks komposit adalah tipe yang tidak jenuh (*unsaturated polyester*) yang merupakan termoset yang dapat mengalami pengerasan (*curing*) dari fasa cair menjadi fasa padat saat mendapat perlakuan yang tepat. Berbeda dengan tipe poliester jenuh (*saturated polyester*) seperti Terylene™, yang tidak bisa mengalami curing dengan cara seperti ini. Oleh karena itu merupakan hal yang biasa untuk menyebut resin poliester tidak jenuh (*unsaturated polyester*) dengan hanya menyebutnya sebagai resin poliester. Ada dua prinsip dari resin poliester yang digunakan sebagai laminasi dalam industri komposit. Yaitu resin poliester orthophthalic, merupakan resin standar yang digunakan banyak orang, serta resin poliester isophthalic yang saat ini menjadi material pilihan pada dunia industri seperti industri perkapalan yang membutuhkan material dengan ketahanan terhadap air yang tinggi. Gambar 11 menunjukkan struktur ideal dari poliester Isophthalic. Perhatikan

posisi grup ester (CO - O - C) dan bagian yang reaktif atau bertangan ganda (C* = C*) dalam rantai molekul.



Gambar 11. Struktur ideal dari poliester Isophthalic (www.azonetwork.com)

Posisi antara gugus ester yang berurutan dan berdekatan dengan bagian paling reaktif, menyebabkan material poliester Isophthalic hampir jenuh, dan sulit untuk menyerap air. Hal inilah yang menyebabkan material ini memiliki ketahanan yang luarbiasa terhadap penyerapan air.

b. Penggunaan poliester pada material komposit

Resin poliester seperti yang telah dijelaskan diatas memiliki banyak kelebihan sekaligus beberapa kelemahan, dalam aplikasi komposit resin poliester dalam hal ini poliester tidak jenuh, biasanya ditambahkan penguat (*reinforced*) berupa serat. Serat yang digunakan sebagai penguat adalah bisa berupa serat gelas, serat alam, serat carbon dan berbagai serat lainnya. Karena sifatnya yang polar, hampir semua jenis serat bisa dikombinasikan dengan resin poliester. Penambahan *filler / fiber* pada resin poliester dilakukan dengan berbagai macam alasan, namun secara umum penambahan fiber pada material komposit dengan matrik resin poliester bertujuan untuk :

1. Mengurangi Biaya dari proses moulding / pencetakan
2. Untuk memfasilitasi proses moulding / pencetakan
3. Untuk memberikan sifat – sifat mekanik tertentu pada material yang ingin dibuat

Penambahan filler untuk material komposit ini bisa dilakukan dengan kuantitas yang bervariasi bahkan hingga 70% dari berat resin, walaupun penambahan persentase akan berakibat pada *tensile strength* dan *flexural strength* material komposit. Penambahan filler bisa juga dilakukan untuk meningkatkan ketahanan terhadap api dari laminate. Dalam melakukan fabrikasi menggunakan resin poliester, kita harus meyakinkan bahwa resin dan additif lainnya harus sudah tersebar secara merata sebelum katalis ditambahkan. dan dalam proses pengadukan jangan sampai ada udara yang terperangkap didalam larutan komposit. Karena udara itu kemudian akan menyebabkan sifat mekanik dari material komposit berkurang secara signifikan. kemudian pemberian katalis juga harus diperhatikan, terlalu banyak katalis akan mengakibatkan proses pengerasan terlalu cepat sedangkan jika terlalu sedikit komposit yang terbentuk akan *under-cure*. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan jika akan menggunakan resin poliester, yaitu :

1. *Shrinkage* (penyusutan volume) yang relatif tinggi pada saat pengerasan
2. Waktu pengerjaan yang terbatas, karena akan mengeras sendiri jika di diamkan terlalu lama.
3. Mengeluarkan emisi gas *styrene* dalam kadar yang tinggi, sehingga dapat membahayakan kesehatan.

Dengan perlakuan yang tepat maka kekurangan – kekurangan yang terdapat pada resin poliester ini dapat dikurangi.

Tabel 2

Karakteristik Resin Poliester (Harper, 2000)

Product specifications at 25°C	
Flash point, Seta closed cup, °F	89
Shelf life, minimum, months	3
Specific gravity	1.10–1.20
Weight per gallon, lb	9.15–10.0
% styrene monomer	31–35
Viscosity, Brookfield model LVF, #3 spindle at 60 r/min, cP	650–850
Gel time	
150–190°F, min	4–7
190°F to peak exotherm, min	1–3
Peak exotherm, °F	385–425
Color	Amber clear
Typical physical properties (clear casting)	
Barcol hardness (ASTM D 2583)	47
Heat-deflection temperature, °C (°F) (ASTM D 648)	87 (189)
Tensile strength, lb/in ² (ASTM D 638)	8000
Tensile modulus, 10 ⁵ lb/in ² (ASTM D 638)	5.12
Flexural strength, lb/in ² (ASTM D 790)	13,500
Flexural modulus, 10 ⁵ lb/in ² (ASTM D 790)	6.0
Compressive strength (ASTM D 695)	22,000
Tensile elongation, % at break (ASTM D 638)	1.5

c. Serat alam

Selain serat – serat sintetis seperti serat gelas, serat karbon, serat aramid dan sebagainya, perkembangan material komposit saat ini juga mulai menggunakan serat alam sebagai penguat. Serat – serat alam, seperti rami, serat kelapa, serat bamboo dan serat nanas kita ketahui sangat melimpah di sekitar kita, bahkan sampai disia – disiakan, di lain sisi, kita mengerahkan segala potensi kita baik dana maupun tenaga untuk memproduksi serat sintetis untuk memenuhi kebutuhan terhadap aplikasi material komposit. Dalam konteks ini, bagaimanapun, sebagian besar serat sintetis yang biasa digunakan pada material komposit tidak tersedia pada negara – negara berkembang, dan walaupun tersedia biaya yang

dibutuhkan sangat besar untuk sebagian besar orang. Hal ini telah menstimulasi penelitian yang luas mengenai desain komposit yang diperkuat dengan serat alam, seperti bambu, kelapa, serat tebu, kayu, rami bahkan serat pisang. Usaha yang besar dikerahkan untuk mengganti fiber sintetis yang merusak dengan serat alam alternatif yang tersedia dari hasil pertanian dan perkebunan atau dari sampah industri, yang memiliki sedikit sekali nilai ekonomi (Arsene dkk., 2006). Selain memiliki keuntungan secara ekonomis dan pelestarian terhadap lingkungan, serat alam di lain sisi juga memiliki potensi yang besar karena ternyata dari beberapa penelitian serat alam memiliki kekuatan yang bisa disejajarkan dengan serat sintetis. Bahkan untuk material tertentu serat alam dapat mengungguli serat sintetis, seperti yang terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3

Sifat Fisik dan Mekanik Serat Alam Dari Sayuran dan Polipropilen (Arsene, 2006)

Properties	Density (kg/m ³)	Water absorption (% by mass)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	1370	110.0	4.3 ^a	458 ^a	15.2 ^a
Coir (<i>Cocos Nucifera</i>)	1177	93.8	23.9 - 51.4 ^a	95 - 118 ^a	2.8 ^b
Malva (<i>Urena lobata</i>)	1409	182.2	5.2 ^c	160 ^c	17.4 ^b
Disintegrated newsprint (<i>P. elliotii</i> & <i>E. citriodora</i>)	1200 - 1500 ^a	400 ^a	na	300 - 500 ^a	10 - 40 ^a
Bamboo (<i>Bambusa vulgaris</i>)	1158 ^a	145 ^a	3.2 ^a	575 ^a	28.8 ^a
Piassava (<i>Attalea funifera</i>)	1054 ^a	34.4 - 108 ^a	6.0 ^a	143 ^a	5.6 ^a
Polypropylene	913	-	22.3 - 26.0	250	2.0

Note: ^a Agopyan (1988), ^b Guimaraes (1984) and ^c Oliveira and Agopyan (1990).
Obs.: na = non available information.

d. Serat Rami

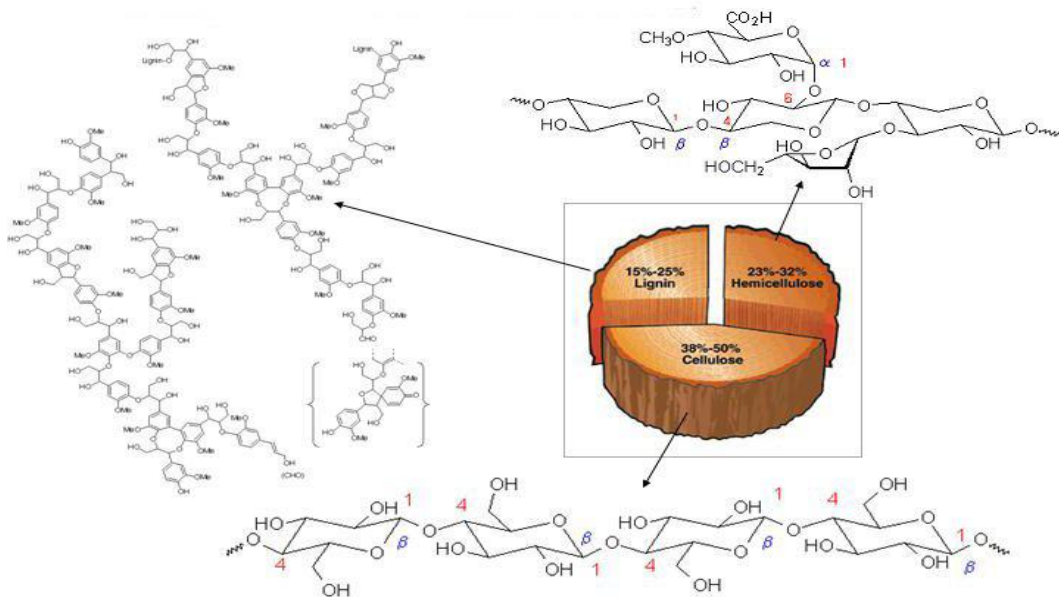
Walaupun tak sepenuhnya menggeser serat sintetis, pemanfaatan serat alam yang ramah lingkungan merupakan langkah bijak untuk menyelamatkan kelestarian lingkungan.

Tanaman rami (*Boehmeria Nivea*) merupakan salah satu jenis tanaman serat (*bast fiber*) yang tumbuh subur di Indonesia, seperti di daerah Garut Jawa Barat dan Wonosobo Jawa Tengah (Diharjo, 2007). Tanaman Rami yang sudah ada sejak jaman Jepang pada waktu Perang Dunia II, adalah tanaman tahunan yang berbentuk rumpun mudah tumbuh dan dikembangkan di daerah tropis, tahan terhadap penyakit dan hama, serta dapat mendukung pelestarian alam dan lingkungan. Tanaman Rami yang dikenal dengan nama latinnya *Boehmeria nivea* (L) Goud merupakan tanaman tahunan berbentuk rumpun yang dapat menghasilkan serat alam nabati dari pita (*ribbons*) pada kulit kayunya yang sangat keras dan mengkilap. Serat rami mempunyai sifat dan karakteristik serat kapas (*cotton*) yaitu sama-sama dipintal ataupun dicampur dengan serat yang lainnya untuk dijadikan bahan baku tekstil. Dalam hal tertentu serat rami mempunyai keunggulan dibanding serat-serat yang lain seperti kekuatan tarik, daya serap terhadap air, tahan terhadap kelembaban dan bakteri, tahan terhadap panas, lebih ringan dibanding serat sentetis dan ramah lingkungan (tidak mengotori lingkungan sehingga baik terhadap kesehatan). Pengembangan tanaman rami memiliki prospek sangat cerah, kebutuhan serat rami dunia 400.000 ton per tahun sampai saat ini kekurangan pasokan sebesar 300.000 ton per tahun, dengan total penawaran (produksi) 100.000 ton. Dari hasil penelitian, serat rami di Indonesia kualitasnya mampu bersaing dengan serat rami dari Cina, Brazil, Filipina, Taiwan, Korea, Komboja, Thailand dan Vietnam. Dengan demikian pengembangan tanaman ini memiliki prospek yang sangat cerah, karena sampai saat ini Indonesia merupakan potensi yang besar untuk menggerakkan ekonomi rakyat melalui perekonomian pedesaan, pendapatan petani dan komoditi ekspor non migas (Sudiro, 2008). Hingga saat ini, mayoritas produk serat rami tersebut diekspor ke Jepang, seperti yang dilakukan oleh Koppontren Darussalam Garut. Produk serat rami juga digunakan sebagai bahan tekstil dan kertas. Menurut Eichhorn

(2008) produksi rami dunia telah mencapai 100.000 ton per tahun, lebih tinggi dari produksi serat abaca yang hanya mencapai 70.000 ton per tahun. Penggunaan serat rami sebagai penguat dalam material komposit memiliki banyak keuntungan, rami merupakan serat yang dapat diperbaharui (*renewable resources*), dapat digunakan pada berbagai macam kondisi, mudah terurai, mudah dipadukan dengan berbagai material lain. Serat rami juga memiliki aspek rasio yang tinggi, kekuatan yang baik dibandingkan dengan rasio beratnya, tidak memerlukan energi yang tinggi untuk mengolahnya dan memiliki sifat insulator yang baik. Beberapa mungkin menganggap sebagian sifat ini adalah kelemahan seperti mudah terurai dan mudah terbakar, tapi sifat ini juga berarti kita dapat memprediksi dan memprogram mekanisme pengolahan limbahnya dengan lebih mudah, yang tidak dapat didapat dengan mudah pada material lain.

e. Struktur kimia dan komposisi serat rami

Komposisi kimia dari serat rami tidak selalu persis sama, karena seperti diketahui serat alam adalah material komposit yang di desain secara alami, tanpa ada campur tangan manusia secara langsung sehingga komposisi yang ada tidak bisa secara pasti ditentukan, namun kita bisa mengambil kisarannya (lihat Tabel 4).



Gambar 12. Struktur Cellulose, Lignin dan Hemicellulose (chemistry.edu)

Secara umum serat rami mengandung Hemicellulose dan lignin sebagai unsur dominan disamping selulosa ($C_5H_{10}O_5$) yang menjadi unsur utama dalam setiap serat alam (Gambar 12). Masing – masing unsur pembentuk serat rami memberikan pengaruh terhadap sifat serat rami secara keseluruhan, hemmicellulose memberikan pengaruh terhadap bio degradasi, penyerapan mikro dan degradasi termal, sedangkan lignin berfungsi sebagai penstabil suhu namun rentan terhadap degradasi violet.

Tabel 4

Komposisi kimia dari serat rami dan serat alam lainnya (Lewin dan Pearce)

Fiber	Cellulose (Wt %)	Hemicelluloses (Wt %)	Lignin (Wt %)	Pectin (Wt %)	Moisture Content (Wt %)	Waxes	Microfibrillar Angle (Deg)
Flax	71	18.6-20.6	2.2	2.3	8-12	1.7	5-10
Hemp	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	6.2-12	0.8	2.6.2
Jute	61-71.5	13.6-20.4	12-13	0.2	12.5-13.7	0.5	8

f. Pengolahan serat rami

Untuk memperoleh serat yang menyerupai serat kapas membutuhkan proses yang agak panjang, kemudian dilakukan pemotongan guna menghasilkan serat pendek halus (seukuran dengan serat kapas) sehingga menghasilkan serat yang menyerupai serat kapas, proses yang dibuat sampai menyerupai serat kapas menyebabkan harga serat akan menjadi mahal, namun tidak masalah apabila rami disubstitusi dengan kapas atau serat polyester dapat lebih murah dan kualitas lebih baik. Pengolahan serat diperoleh setelah melalui mesin dan proses mekanisme serta proses bakterisasi/kimiawi sebagai berikut (Sudiro, 2008) :

1. Proses Dekortikasi: Proses pemisahan serat dari batang tanaman, hasilnya serat kasar disebut “China Grass “.
2. Proses Degumisasi: Proses pembersihan serat dari getah pectin, lignin wales dan lain-lain, hasilnya serat degum disebut “ Degummed Fiber “.
3. Proses Softening: Proses pelepasan dan proses penghalusan baik secara kimiawi maupun mekanis agar serat rami tersebut dapat diproses untuk dijadikan seperti kapas.
4. Proses Cutting dan Opening: Proses mekanisasi untuk memotong serat dan membukanya agar serat tersebut menjadi serat individual untuk serat panjang disebut “Top Rami” dan untuk serat pendek disebut “Staple Fiber “.

g. Sifat Mekanik Serat rami

Massa jenis dari serat rami adalah berkisar antara 1.5 – 1.6 gr/cm³ dengan kekuatan tarik serat rami berkisar antara 400 – 1050 MPa. Modulus elastisitas tarik dan regangannya adalah sekitar 61.5 GPa dan 3.6 %. Pada umumnya serat rami memiliki diameter sekitar 0.04 – 0.08 mm (Mueller 2003).

h. Interface dan interphase

Gaya ikat (*adhesi*) antara matriks – penguat merupakan suatu variable yang perlu dioptimalkan untuk mendapatkan sifat dan performa terbaik dari suatu material komposit. Gaya ikat dari suatu *interphase* tidak hanya merupakan suatu interaksi fisik dan kimia antara matriks dan penguat, namun juga struktur dari matriks dan penguat di daerah dekat *interface*.

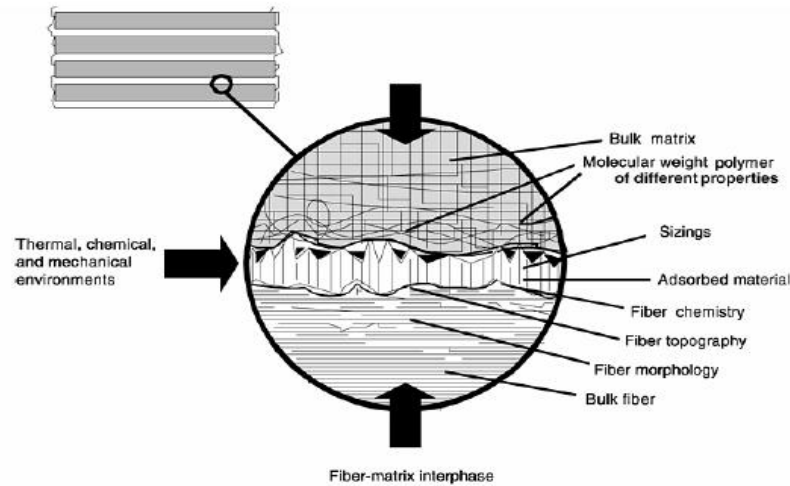
i. Interface

Dalam komposit, penguat dan matriks menghasilkan kombinasi sifat mekanik yang berbeda dengan sifat dasar dari masing-masing matriks maupun penguat karena adanya *interface* antara kedua komponen tersebut. *Interface* antara matriks-penguat dalam pembuatan komposit sangat berpengaruh terhadap sifat akhir dari komposit yang terbentuk, baik sifat fisik maupun sifat mekanik. Pengertian dari *interface* yaitu daerah antar permukaan matriks dan penguat yang mengalami kontak dengan keduanya dengan membuat suatu ikatan antara keduanya untuk perpindahan beban. Ikatan yang terjadi pada *interface* matriks – penguat terbentuk saat permukaan penguat telah terbasahi oleh matriks (Matthews dan Rawling, 1994). *Interface* yang ada pada komposit ini berfungsi sebagai penerus (*transmitter*) beban antara matriks dan penguat. Bila energi permukaan semakin kecil maka akan semakin mudah terjadi pembasahan. Hubungannya dengan kelarutan (*adsorpsi*) adalah, bila semakin besar *adsorpsi* maka energi permukaan akan semakin kecil. *Adsorpsi* merupakan reaksi permukaan yang tergantung pada konsentrasi dan temperatur.

ii. Interphase

Hubungan daya ikat antara matriks – penguat terhadap sifat mekanis komposit sangatlah erat, karena apabila daya ikat antara matriks – penguat baik maka dapat meningkatkan sifat mekanis dan performa dari komposit. *Interface* matriks – penguat

merupakan suatu batas dua dimensi, sementara *interphase* matriks – penguat merupakan batas tiga dimensi.



Gambar 13. Diagram skematis dari *interphase* matriks – penguat (fiber) dan beberapa faktor yang berkontribusi terhadap pembentukannya (ASM Handbook)

Dari Gambar 13 *interphase* hadir dari beberapa titik di dalam penguat (*fiber*) dimana sifat lokal yang ada mulai berubah dari sifat *bulk* penguat, melalui *interface* matriks – penguat, dan menjadi matriks dimana sifat lokal kembali sama dengan sifat *bulk*. Dalam daerah ini, berbagai jenis komponen yang pengaruhnya diketahui maupun yang tidak diketahui terhadap *interphase* dapat diidentifikasi. Sebagai contoh, penguat memiliki berbagai macam bentuk di dekat permukaan penguat, yang tidak terdapat di *bulk* penguat. Luas permukaan penguat dapat jauh lebih besar dibandingkan nilai geometrisnya, karena adanya poros, *pitting*, ataupun retak di permukaannya. Komposisi atomik dan molekular dari permukaan penguat sangat berbeda dengan komposisi yang terdapat di dalam *bulk*. Ketika matriks dan permukaan penguat bersentuhan, ikatan kimia dan fisika dapat terbentuk pada *interface*. Gugus kimia permukaan penguat dapat bereaksi dengan gugus kimia yang ada pada matriks, yang dapat membentuk ikatan kimia; gaya tarik Van der Wals, ikatan hidrogen, dan

ikatan elektrostatik. Jenis dan banyaknya dari masing-masing ikatan yang ada tersebut secara kuat mempengaruhi daya ikat antara matriks – penguat. Sifat fisik dan kimia yang dimiliki oleh penguat dapat merubah bentuk lokal dari matriks di dalam daerah *interphase*. Komponen matriks yang tidak bereaksi serta pengotor yang ada dapat terdifusi ke dalam daerah *interphase*, yang dapat merubah struktur lokal dan/atau dapat pula mengganggu kontak antara matriks – penguat atau dapat pula menghasilkan material dengan sifat mekanis yang kurang baik. Masing-masing dari fenomena tersebut dapat berbeda-beda besarnya dan dapat terjadi secara bersamaan di dalam daerah *interphase*. Bergantung pada sistem material, yaitu *interphase* itu sendiri yang dapat tersusun oleh beberapa komponen atau seluruh komponen tersebut dan dapat meningkatkan ketebalan dari beberapa nanometer hingga ratusan nanometer. Pada pembuatan komposit *interphase* selalu terbentuk, struktur yang ada pada daerah ini dapat memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap performa dari komposit terutama dalam hal kekuatan mekanisnya dan ketahanan kimia dan termal. Oleh karena itu komposisi dan sifat yang tepat dari daerah tersebut harus benar-benar diperhatikan.

i. Pengaruh konsentrasi dan arah serat

Salah satu faktor penting yang menentukan karakteristik dari komposit adalah perbandingan matriks dan penguat/serat. Perbandingan ini dapat ditunjukkan dalam bentuk fraksi volume serat (V_f) atau fraksi berat serat (W_f). Namun, formulasi kekuatan komposit lebih banyak menggunakan fraksi volume serat. Fraksi volume serat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Diharjo, 2008):

$$V_f = \frac{\left| V_c - \frac{M_c - M_f}{QM} \right|}{V_c} \quad (37)$$

Keterangan : QM : Densitas matriks (gram/ml)

Jika selama proses pembuatan komposit diketahui massa serat dan matrik, serta *density* serat dan matrik, maka fraksi volume dan fraksi massa serat dapat dihitung dengan persamaan (38):

$$w_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_M}{\rho_M}} \quad (38)$$

Fraksi massa serat pada persamaan (38) dapat disederhanakan menjadi :

$$w_f = \frac{\rho_f V_f}{\rho_f V_f + \rho_M V_M} \quad (39)$$

$$w_f = \frac{W_f}{W_c} \quad (40)$$

Keterangan (Persamaan 37- 40) :

V_c, V_f, V_M : Volume komposit, fiber dan Matriks, (ml).

M_c, M_f, M_M : Berat Komposit, fiber dan matriks (gram)

v_c, v_f, v_M : Fraksi volume komposit, fiber dan matriks (%)

w_c, w_f, w_M : Fraksi berat komposit, fiber dan matriks (%).

ρ_c, ρ_f, ρ_M : Massa jenis komposit, fiber dan matriks (gram/ml)

Analisis kekuatan komposit biasanya dilakukan dengan mengasumsikan ikatan serat dan matrik sempurna. Pergeseran antara serat dan matriks dianggap tidak ada dan deformasi serat sama dengan deformasi matrik.

Kekuatan tekan dapat dihitung dengan persamaan (Callister, 1997):

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (41)$$

Keterangan σ : Tegangan (MPa)

A : Luas Penampang (mm²)

P : Gaya Tekan (Newton)

Regangan dapat dihitung dengan persamaan:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (42)$$

Keterangan ε : Regangan (mm/mm)

l_o : Panjang awal (mm)

l_i : Deformasi (mm)

Δl : Pertambahan panjang (mm)

Berdasarkan kurva uji, modulus elastisitas dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (43)$$

Berdasarkan hukum pencampuran (*Rule of Mixture*), kekuatan dan modulus tekan komposit berpenguat serat tidak kontinyu dan tidak beraturan dapat dihitung dengan persamaan (Callister, 1997) :

$$\sigma_c = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m \quad (44)$$

$$E_c = KE_f V_f + E_m \cdot V_m \quad (45)$$

Keterangan : E : Modulus Elastisitas (MPa)

$\Delta \sigma$: Selisih Tegangan (MPa)

σ_f : Tegangan Fiber (MPa)

$\Delta \varepsilon$: Selisih regangan (mm/mm)

σ_m : Tegangan Matriks (MPa)

6. Sumber daya energi angin

a. Energi Angin

Untuk pembuatan Kincir angin perlu dilakukannya survey mengenai kecepatan angin di lokasi tersebut. Hubungan kecepatan angin dan energi yang dihasilkan sangat penting untuk perencanaan pengembangan kincir angin di lokasi mana akan dibuat. Berikut adalah hubungan dalam bentuk matematik antara kecepatan angin dan energi angin. Benda bergerak contohnya angin memiliki energi kinetik (E_k) yang besarnya adalah :

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2 \quad (46)$$

Dimana m adalah massa dari angin dan V adalah kecepatan angin. Untuk menentukan besarnya massa angin yang mengenai suatu permukaan dapat dihitung berdasarkan debit angin yaitu volume persatuan waktu. Volume adalah massa per berat jenis ($\text{Volume} = m/\rho$). Debit juga merupakan perkalian antara area dan kecepatan ($Q = A \times V$). dari persamaan tersebut maka dapat diturunkan persamaan massa angin persatuan waktu (m/t) yaitu:

$$m/t = \rho_{\text{udara}} \times A \times V_{\text{angin}} \quad (47)$$

Dimana A adalah luas area baling-baling. Daya (P /power) adalah energi per satuan waktu sehingga dari persamaan 47 dapat ditulis menjadi :

$$P = E_k / t = \frac{1}{2} m/t (V_{\text{angin}})^2 \quad (48)$$

Substitusi dari persamaan (48) persamaan daya (P) menjadi :

$$P = \frac{1}{2} \rho \times A \times (V_{\text{angin}})^3 \quad (49)$$

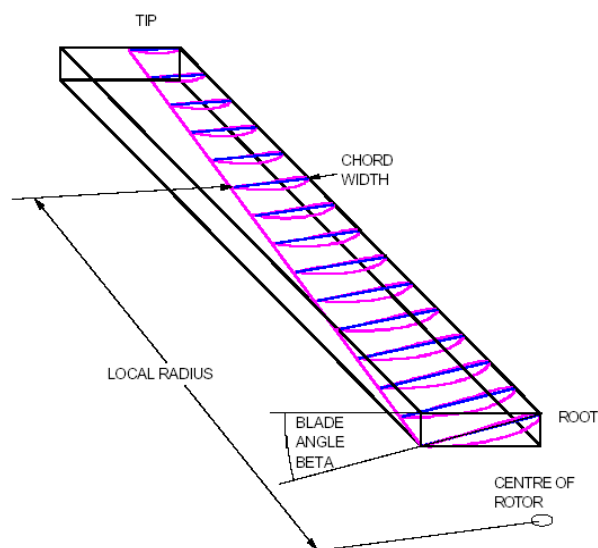
Energi angin yang mengenai baling-baling seluas A pada umumnya dinyatakan dalam Daya per area (P/A) atau di istilahkan dengan Power density (P^* /Daya spesifik) dengan satuan watt/m². Jika berat jenis udara rata-rata adalah 1 kg/m³, maka besarnya daya spesifik dari angin adalah (Hofman, 1987):

$$P^* = \frac{1}{2} V^3 \quad (50)$$

Daya tersebut merupakan daya teoritis, sedang untuk daya sebenarnya yang dihasilkan harus dikalikan efisiensi, karena sebagian energi akan hilang untuk transfer energi pada sistem mekaniknya.

b. Propeler *Airfoil*

Bentuk propeler yang ideal adalah bentuk *airfoil*, karena bentuk tersebut dapat menyerap energi kinetik angin menjadi energi gerak putar dengan maksimal. Bentuk penampang *airfoil* telah distandarkan oleh NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*). Tipe standar yang banyak digunakan untuk propeler kincir angin NACA 0012, NACA 63(2)-215, LS(1)-0417 dan NACA 4415 dan masih banyak lagi tipe lainnya. Untuk kincir angin berukuran besar (diameter rotor > 20 m) bentuk penampang *propeler airfoil* dapat beragam pada tiap titik penampang. Gambar 14 menunjukkan bentuk dan desain penampang propeler airfoil NACA 4415.

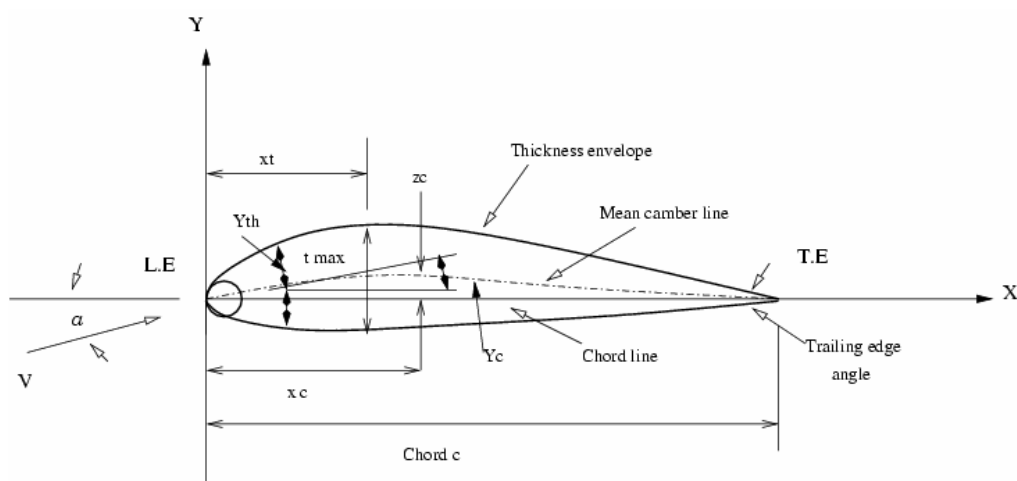


Gambar 14. Desain penampang *propeler Airfoil* NACA 4415.

Bagian-bagian dari sebuah *airfoil* adalah :

- *Mean chamber line* adalah garis tengah antara permukaan atas dan bawah dari *airfoil*.
- *Leading edge* adalah titik paling depan pada *mean chamber line*.
- *Trailing edge* adalah titik paling belakang pada *mean chamber line*.
- *Chord line* adalah garis lurus yang menghubungkan *leading edge* dan *trailing edge*.
- *Chord (c)* adalah jarak antara *leading edge* dan *trailing edge* sepanjang *chord line*.
- *Chamber* (permukaan yang benjol) adalah jarak antara *mean chamber line*, tegak lurus terhadap *chord line*.
- *Thickness* adalah jarak antara permukaan atas dan bawah, juga tegak lurus terhadap *chord line*.
- *Angle of attack* adalah sudut antara angin relatif dengan *chord line*.

Parameter yang mempunyai efek pada performansi aerodinamik sebuah *airfoil* termasuk: *chord line*, *mean chamber line*, *thickness envelope*, *thickness maximum*, *chord line*, *chord c*, dan *trailing edge angle* seperti pada Gambar 15.



Gambar 15. Faktor Geometris Airfoil (Zang J, 2004)

c. Perilaku Airfoil

Sangat penting untuk mempertimbangkan perilaku dari sebuah *airfoil* simetrik titik awal untuk memilih *airfoil* pada kincir angin. Yaitu bahwa dibawah kondisi-kondisi ideal, koefisien daya angkat (*lift coefficient*) suatu plat adalah:

$$C_l = 2\pi \sin(\alpha) \quad (51)$$

Dan juga, dibawah kondisi-kondisi serupa, airfoil simetrik dengan ketebalan terbatas mempunyai koefisien daya angkat yang sama. Ini berarti bahwa koefisien daya angkat akan meningkat dengan meningkatkan sudut datang (*angle of attack*) dan terus berlanjut sampai sudut datang (*angle of attack*) mencapai 90°.

d. Gaya Angkat, gaya geser dan parameter non-dimensional

Saat *propeler* dikenai energi kinetik angin, maka *propeler* mengalami gaya-gaya (*Manwell, et al, 2002*):

1. Gaya angkat (*lift forces*), dimana arah gaya angkat tegak lurus terhadap arah datangnya aliran udara. Koefisien gaya angkat (C_l) dirumuskan sebagai

$$C_l = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \quad (52)$$

2. Gaya geser (*drag forces*), dimana arah gaya geser paralel dengan arah datangnya aliran udara. Koefisien gaya geser (C_d) dirumuskan sebagai :

$$C_d = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \quad (53)$$

3. Momen puntir (*pitching moment*), dimana arah momen puntir tegak lurus terhadap poros *airfoil*. Koefisien momen puntir (C_m) dirumuskan sebagai :

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \quad (54)$$

Ketrangan (persamaan 52-54):

L = Gaya angkat

D = Gaya geser

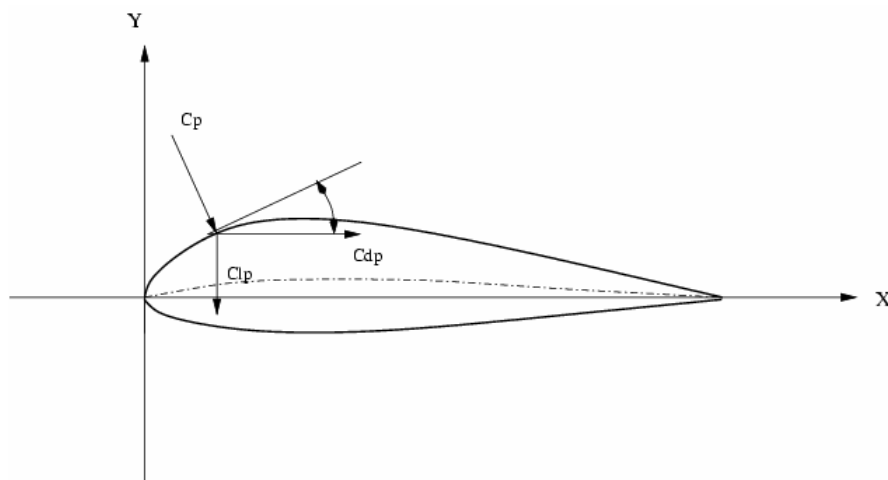
M = Momen punter

U = kecepatan aliran udara

ρ = Massa jenis udara

c = Panjang chord

l = Panjang *airfoil*



Gambar 16. Arah gaya yang bekerja pada propeler (Zang J, 2004)

Teori dan riset menunjukkan bahwa kebanyakan masalah aliran dapat dikarakteristikan dengan parameter non dimensional. Hal terpenting dari parameter non dimensional untuk menentukan karakteristik dari suatu aliran fluida adalah bilangan reynold (Re). Bilangan reynold sangat penting diketahui karena rancangan rotor harus dibuat sesuai

dengan data bilangan reynold (Re) yang tersedia, dimana Re dirumuskan sebagai (Manwell, et al, 2009) :

$$R_e = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (55)$$

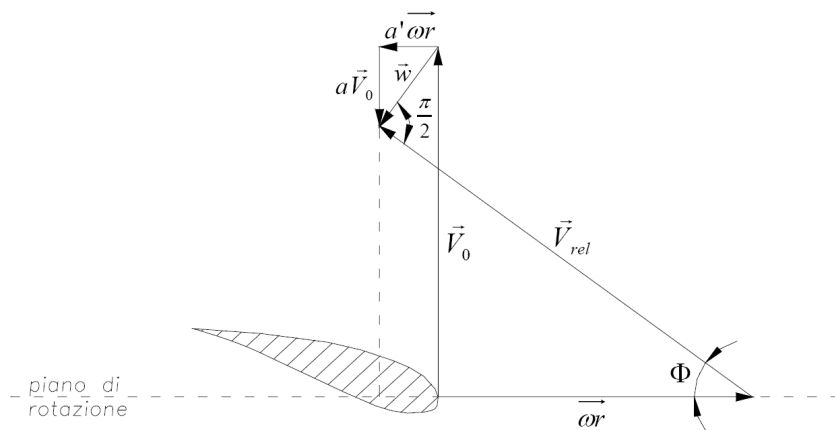
Keterangan:

ρ = massa jenis fluida

μ = kepekatan fluida

U = kecepatan fluida

L = panjang karakteristik dari aliran



Gambar 17. Faktor Induksi (Carcangiu C.E., 2008)

BAB III

KERANGKA TEORITIS, KERANGKA KONSEP, DAN HIPOTESIS

A. Kerangka Teoritis

Riset komposit serat alam di Indonesia secara intensif dimulai tahun 2000-an. Misalnya riset yang dilakukan oleh Mulyadi dan Rochardjo (2003) dengan menggunakan serat *Agave cantala* dan matrik plastik. Pemanfaatan limbah serat buah sawit untuk berbagai aplikasi teknik juga telah diteliti secara komprehensif (Jamasri dkk., 2005-2006). Kajian sifat tarik komposit serat buah sawit acak bermatrik poliester juga telah dilakukan (Jamasri dkk., 2005). Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan kandungan volume serat buah sawit Untuk meningkatkan fungsi panel komposit menjadi panel struktur, baik sebagai struktur sekunder maupun primer, juga telah dikembangkan riset panel komposit sandwich.

Pengkajian secara intensif pemanfaatan serat kenaf dan kayu sengon laut sebagai unsur utama pembentuk panel komposit sandwich dilakukan oleh Diharjo (2006). Selanjutnya Diharjo dkk. (2007) mengembangkan penelitian disertasi komposit *sandwich* dengan *core* kayu sengon laut (KSL). Sifat impak komposit *sandwich* serat kenaf acak – *polyester* dengan *core* KSL meningkat seiring dengan peningkatan ketebalan *core*.

Pengembangan bahan biokomposit juga pernah dilakukan oleh Mujiyono dkk. (2008). Dalam penelitian ini serat alam yang digunakan adalah serat rami dan serat bambu, sedangkan matrik alam yang digunakan sebagai perekat adalah hasil sekresi kutu pohon albasia (sengon laut).

Suizu N., dkk, (2009), meneliti tentang pemanfaatan serat alam yang diperkuat untuk menghasilkan bahan yang ramah lingkungan dan kuat. Dengan menguntai serat rami dicampur dengan alkali konsentrasi tinggi dapat diperoleh komposit yang kuat.

Serat alam juga sangat potensial digunakan dalam industri sebagai pengganti bahan komposit. Alasan yang mendasari antara lain sifat terbarukan, berkelanjutan, *biodegradable*, serta tersedia di seluruh dunia. Dibandingkan dengan serat gelas, serat alam memiliki kekuatan ketegangan yang lebih rendah. Namun beberapa serat alam memiliki Modulus Young yang sama tinggi dengan serat aramid (Nam dan Netravali, 2006).

Pertimbangan pemilihan serat untuk komposit sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya adalah nilai kekuatan dan kekakuan komposit yang diinginkan, perpanjangan ketika patah, stabilitas termal, ikatan antara serat dan matrik, perilaku dinamik, perilaku jangka panjang, massa jenis, harga, biaya proses, ketersediaan, dan kemudahan daur ulang (Riedel, 1999). Sebagai contoh, ketika komposit akan digunakan untuk struktur ringan, maka kekuatan dan kekakuan spesifiknya akan lebih diutamakan.

Saat ini propeler kincir angin, yang sebelumnya dibuat dari material logam, telah mulai dibuat dari material komposit *skin* GFRP (*glass fiber reinforced plastic*). Hal ini dikarenakan material propeler tersebut diharapkan mempunyai bobot yang ringan agar mudah berputar ketika ditiup angin. Berhubung propeler juga berfungsi sebagai struktur primer maka sebaiknya dibuat dari komposit yang ramah lingkungan.

Uraian tersebut menunjukkan bahwa rekayasa propeler kincir angin dari komposit *skin* GFRP perlu dikembangkan menjadi struktur serat rami dan KSL agar mampu menahan beban luar (benturan) yang lebih besar. Potensi sumber daya alam rami dan KSL perlu dimanfaatkan untuk mereduksi penggunaan bahan sintesis impor.

Indonesia merupakan negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang di dunia (\pm 81.000 km), terletak di lintasan garis khatulistiwa, dan memiliki lebih dari 17.000 pulau. Dengan keadaan tersebut, energi angin menjadi potensi yang harus dikembangkan dan dimanfaatkan.

Berdasarkan data LAPAN (Daryanto, et al., 2005), angin di Indonesia memiliki kecepatan yang bervariasi, umumnya dikategorikan sebagai angin berkecepatan rendah. Penelitian sistem konversi energi angin (SKEA) kecepatan rendah belum banyak dilakukan di Indonesia, padahal ada beberapa lokasi yang mempunyai kecepatan angin rendah secara kontinu yang dapat dimanfaatkan.

Ackermann, (2005) menyimpulkan bahwa kemampuan turbin savonius beroperasi pada kecepatan angin rendah dengan menghasilkan torsi besar sangat cocok untuk dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak sistem pompa, aerasi tambak, atau peralatan pengolahan hasil pertanian. Turbin jenis Savonius mempunyai kelebihan bisa berputar tanpa diberi energi awal dari luar pada saat start. Karakteristik ini tidak dimiliki oleh kincir angin poros vertikal yang lain yaitu tipe Darius.

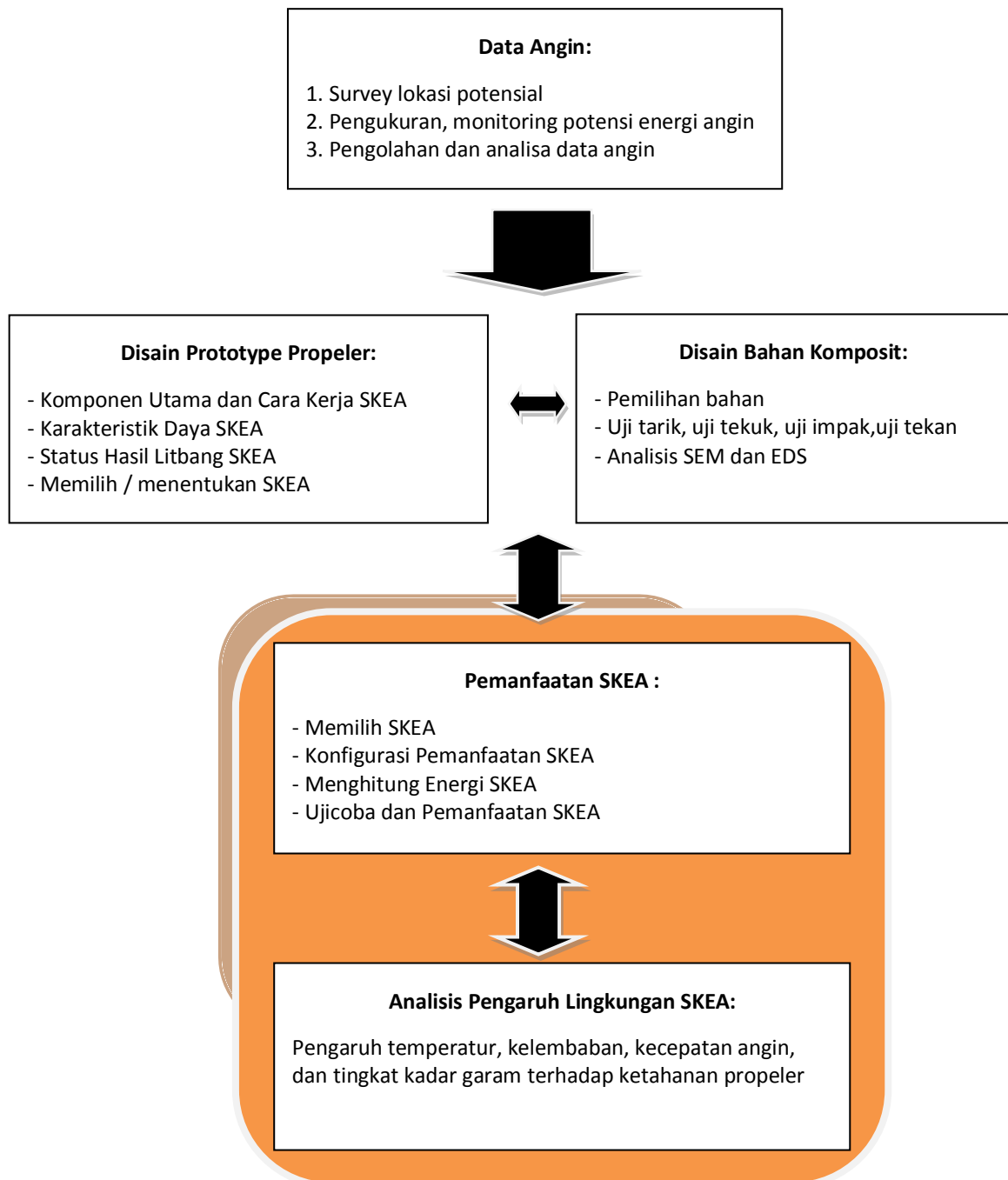
Tidak diragukan lagi, komputasi dinamika fluida (CFD) memainkan peran penting dalam memecahkan masalah cairan yang kompleks tanpa melakukan eksperimen fisik. NACA airfoil 4415 simulasi menunjukkan tidak hanya relatif sederhana dan kemudahan menentukan kinerja airfoil, tetapi juga potensi CFD dalam skema grand rekayasa aplikasi. Akhir-akhir ini, CFD digunakan dalam hampir setiap bidang teknik, dari elektronik desain hardware untuk kinerja pesawat.

Pemasangan kincir angin di wilayah pesisir pantai tentu berdampak pada ketahanan propeler yang digunakan. Dalam perancangan propeler kincir angin, pengaruh kelembaban dan

cuaca yang ekstrim harus diperhatikan untuk menghasilkan propeler kincir angin yang tahan terhadap perubahan cuaca yang terjadi. Propeler kincir angin minimal dapat beroperasi selama 20-30 tahun. Dari beberapa penelitian sebelumnya dilaporkan bahwa material komposit mengalami degradasi kekuatan yang diakibatkan oleh pengaruh lingkungan, seperti pengaruh kelembaban udara, panas matahari, radiasi ultraviolet, bahkan oksidasi termal. Kelembaban misalnya, dapat menurunkan kekuatan material komposit karena adanya difusi uap air ke material komposit yang dapat menyebabkan penurunan sifat temperatur transisi glass, yaitu temperatur dimana resin berubah sifat dari kondisi padat menjadi kondisi viskoelastis. Selain hal tersebut, proses degradasi komposit juga dipengaruhi oleh sifat kimia resin dan matriknya serta jangka waktu terpapar pada lingkungan. Beberapa material komposit sangat sensitif terhadap cuaca. Kombinasi dua atau beberapa faktor lingkungan dapat menyebabkan degradasi kekuatan material komposit (Li, 2000).

Oleh karena itu, dalam penelitian ini juga diuraikan tentang analisis dampak lingkungan penerapan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA), khususnya untuk mengetahui aspek ketahanan lingkungan dari propeler berbahan baku komposit KSL dan serat rami yang dipasang di daerah pantai. Parameter yang akan diukur meliputi temperatur, kelembaban, kecepatan angin, dan tingkat kadar garam.

Berdasarkan referensi tersebut, maka disusun kerangka penelitian sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Kerangka teori

B. Kerangka Konsep

Berdasarkan kerangka teoritis yang telah disusun, maka disusun konsep penelitian yang meliputi :

1. Optimasi desain propeler modifikasi standar NACA 4415 dengan simulasi *Computational Fluids Dynamic* (CFD)
2. Disain bahan komposit dan proses fabrikasi propeler, serta pengujian unjuk kerja propeler di lokasi penelitian dan sekaligus mengamati pengaruh lingkungan yang ditimbulkan.

Kerangka konsep penelitian dijelaskan pada bagian di bawah ini. Sedangkan bagan alir kerangka konsep disajikan dalam Gambar 19.

Salah satu faktor penting yang menentukan karakteristik dari komposit adalah perbandingan matrik dan penguat/serat. Perbandingan ini dapat ditunjukkan dalam bentuk fraksi volume serat (V_f) atau fraksi berat serat (W_f). Kekuatan komposit (sifat mekanis) sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis, geometri, arah, distribusi, dan kandungan serat. Berdasarkan teori *Rule of Mixture* (ROM), kekuatan komposit meningkat seiring dengan penambahan kandungan serat mencapai 60-70% (Sanadi dkk., 1986).

Pengujian mekanik bahan komposit (uji tarik untuk serat rami dan kayu sengon laut, uji tekan dan uji ketangguhan impak untuk bahan pendukung kayu sengon laut) dimaksudkan untuk mengetahui sejauh mana material pendukung pada proses fabrikasi komposit serat rami *core* kayu sengon laut bisa memberikan kontribusi terhadap kekuatan dari komposit yang akan digunakan untuk pembuatan propeler yang akan diaplikasikan pada kondisi operasi yang memiliki kelembaman oksida dan debit angin yang relatif kecil (3-4 m/s). Sehingga dalam hal

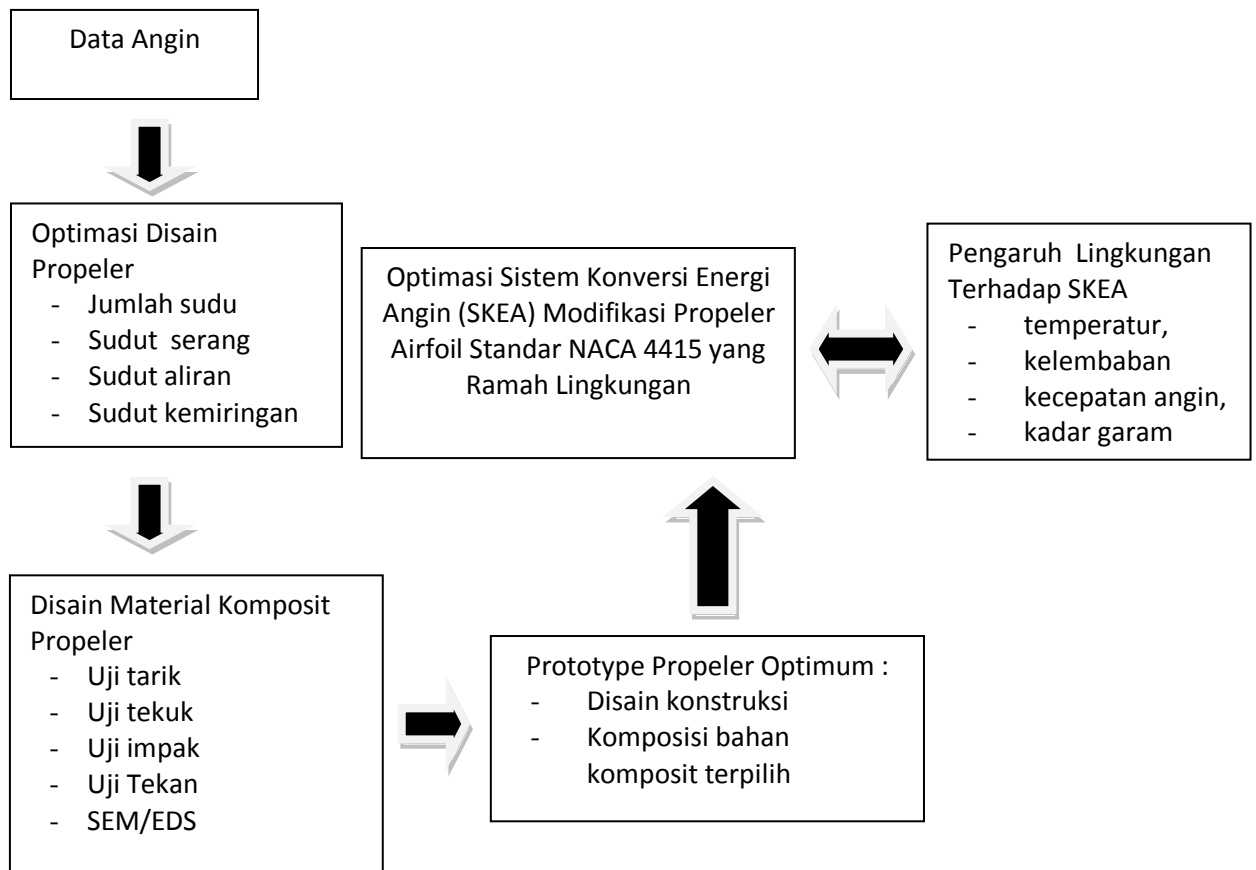
ini dibutuhkan propeler yang ringan, kuat dan tahan terhadap oksidasi air laut serta ramah lingkungan.

Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan pada spesimen komposit sebelum digunakan dan sesudah diaplikasikan sebagai propeler. Daerah yang diamati adalah permukaan potongan melintang komposit untuk melihat interface dari material tersebut. Sedangkan pengamatan unsur pada interface yang terdapat pada material PMCs (*Polymer Matrix Composites*) dilakukan dengan menggunakan instrumen EDS (*Energy Dispersive X-Ray spectrometer*).

Dari beberapa penelitian sebelumnya dilaporkan bahwa material komposit mengalami degradasi kekuatan yang diakibatkan oleh pengaruh lingkungan, seperti pengaruh kelembaban udara, panas matahari, radiasi ultraviolet, bahkan oksidasi termal. Kelembaban misalnya, dapat menurunkan kekuatan material komposit karena adanya difusi uap air ke material komposit yang dapat menyebabkan penurunan sifat temperatur transisi glass, yaitu temperatur dimana resin berubah sifat dari kondisi padat menjadi kondisi viskoelastis. Selain hal tersebut, proses degradasi komposit juga dipengaruhi oleh sifat kimia resin dan matriknya serta jangka waktu terpapar pada lingkungan.

Secara geografis, pesisir pantai selatan Yogyakarta merupakan lahan terbuka yang luas, matahari yang bersinar sepanjang hari dan kecepatan angin rata-rata 4 m/s. Kondisi tersebut menjadikan satu kriteria pemilihan lokasi pengembangan SKEA di pantai Pandansimo, Desa Poncosari, Bantul. Lokasi ini didukung oleh kondisi alam di sebelah selatan yang berhadapan langsung dengan laut selatan Jawa. Kondisi ini cukup layak dijadikan tempat pembangkit listrik tenaga angin dengan turbin putaran rendah. Energi listrik

yang dihasilkan dari SKEA ini diharapkan mendukung sektor pertanian, perikanan, dan pariwisata yang saat ini sedang dikembangkan di pantai Pandansimo.



Gambar 19. Kerangka konsep

C. Hipotesis

Berdasarkan rumusan permasalahan dan tujuan penelitian, dapat dinyatakan hipotesis penelitian sebagai berikut :

1. Hipotesis Mayor

- a. Terdapat hubungan antara kecepatan angin dan energi angin yang dihasilkan dari putaran propeler.

- b. Berat propeler yang ringan dan kuat dari material komposit KSL dan serat rami cocok untuk angin kecepatan rendah.
- c. Material komposit tahan terhadap pengaruh lingkungan pesisir pantai, seperti pengaruh kelembaban udara, panas matahari, radiasi ultraviolet, bahkan oksidasi termal

2. Hipotesis Minor

- a. Sudut kemiringan propeler berpengaruh terhadap energi angin yang dihasilkan dari putaran propeler.
- b. Unjuk kerja propeler kincir angin dipengaruhi oleh diameter, sudut puntir, panjang chord, dan luas permukaan propeler
- c. Kekuatan komposit (sifat mekanis) sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis, geometri, arah, distribusi, dan kandungan serat.
- d. Terdapat pengaruh iklim pesisir pantai terhadap daya tahan propeler dengan bahan baku komposit, antara lain berupa degradasi mekanis dari bahan komposit.
- e. Pengembangan energi terbarukan dapat menurunkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan sebagai akibat aktivitas pembangkitan energi listrik.

BAB IV

METODE PENELITIAN

Kegiatan penelitian ini berjalan selama 1 (satu) tahun dengan titik berat tujuan dan konsep metodologinya secara umum sebagai berikut:

1. Penelusuran literatur dan studi lapangan
2. Simulasi dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD)
3. Pembuatan prototipe produk modifikasi propeler airfoil standard NACA 4415
4. Evaluasi produk dan validasi
5. Pengelolaan dampak lingkungan rekayasa SKEA

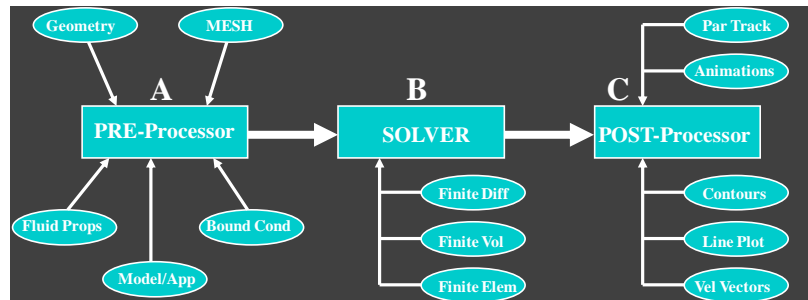
A. Penelusuran Literatur dan Studi Lapangan

Penelitian dilakukan di Laboratorium LAPAN Pantai Selatan Pandansimo Kabupaten Bantul Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, karena secara geografis pesisir pantai selatan Yogyakarta merupakan lahan terbuka yang luas, kecepatan angin rata-rata dengan intensitas 4m/s, kondisi tersebut menjadikan satu kriteria pemilihan lokasi pengembangan energi angin. Lokasi ini didukung oleh kondisi alam di sebelah selatan yang berhadapan langsung dengan laut selatan Jawa. Metode pengumpulan data baik data primer maupun sekunder dilakukan melalui *library research* dan *field research* melalui *depth interview* dengan responden yang telah dipilih secara non random sampling dan ditentukan secara *purposive*.

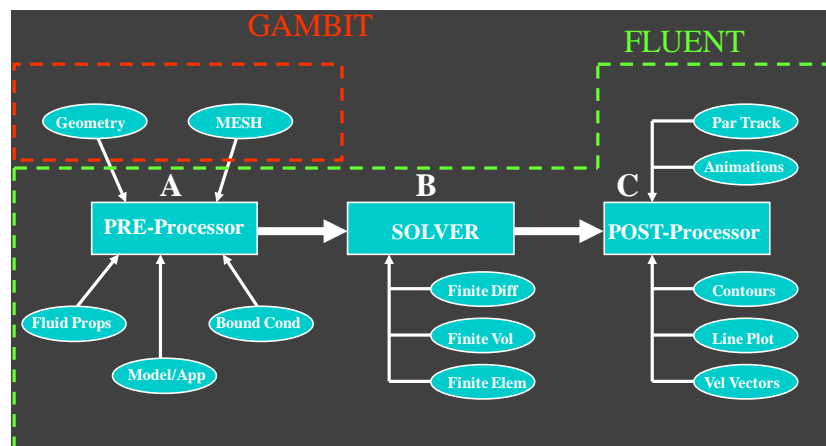
Data kemudian dianalisis dengan beberapa tahap, yaitu pertama dengan menelaah seluruh data yang diperoleh dari berbagai sumber, kedua adalah reduksi data dengan cara membuat abstraksi, ketiga adalah penyusunan dalam satuan-satuan, yang kemudian pada langkah keempat data tersebut dikategorisasikan, dan kelima, pengujian keabsahan data.

B. Simulasi dengan CFD

Struktur simulasi numerik aliran fluida atau *computational fluid dynamic* (CFD) secara umum terdiri dari tahapan-tahapan seperti tampak pada Gambar 20 dan struktur simulasi numerik menggunakan Fluent dapat digambarkan seperti tampak pada Gambar 21.



Gambar 20. Struktur simulasi numerik

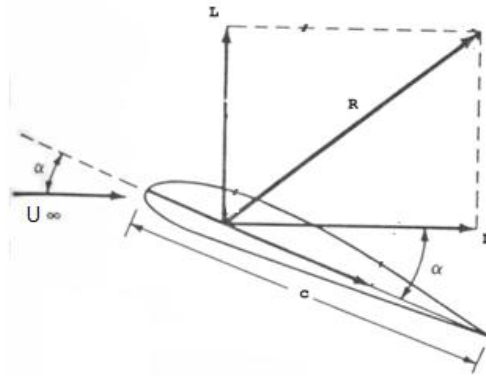


Gambar 21. Struktur simulasi numerik menggunakan FLUENT

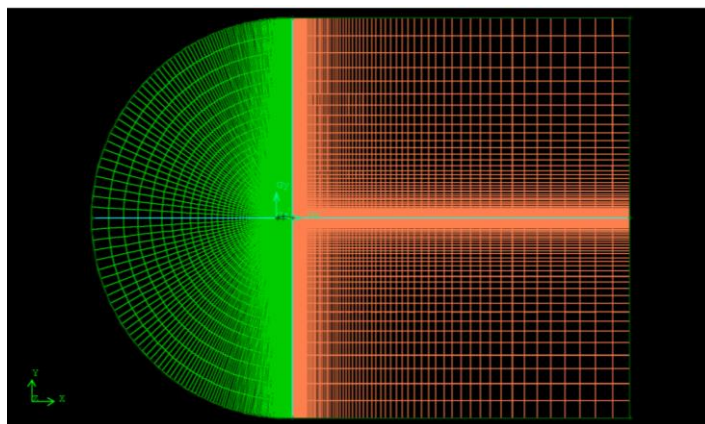
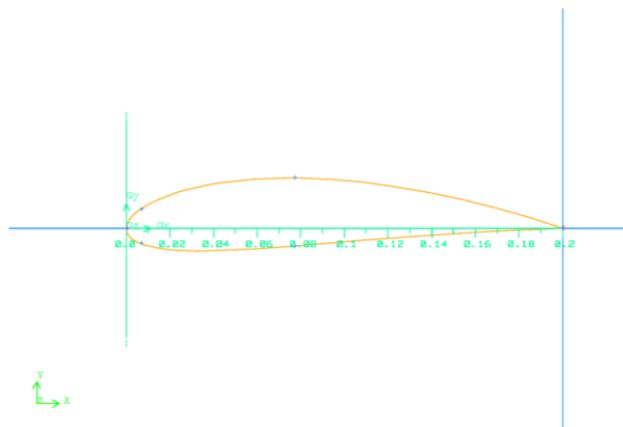
a. Geometri dan Meshing Grid Model Airfoil NACA 4415 modif

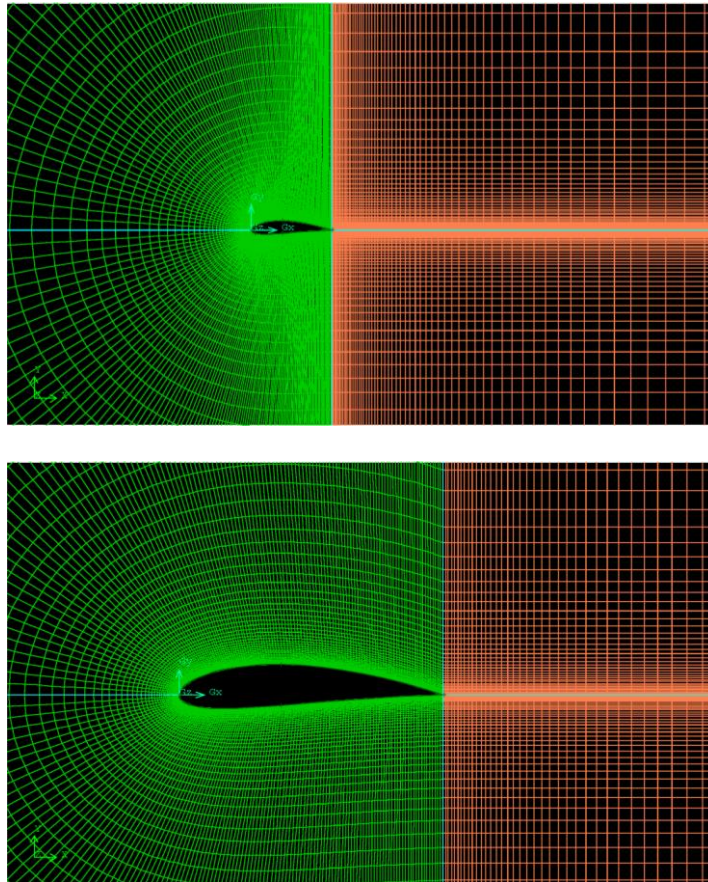
Proses simulasi numerik aliran fluida (*computational fluid dynamic*, CFD) aliran udara yang melalui airfoil seperti tampak pada Gambar 22. Geometri Airfoil yang mempunyai variasi kecepatan aliran udara bebas ($U_{\infty} = 3, 4, 5, 6, 7$ dan 18 m/s) dan sudut serang (*angle of attack* $\alpha = -12, -10, -8, -6, 0, 6, 12, 14, 16, 18$ dan 20 degree). Geometri atau domain komputasi airfoil dibuat di Gambit Versi 2.4.6 serta proses meshing grid

menggunakan jenis meshing segiempat. jumlah grid adalah 29400. Domain komputasi yang telah di meshing, seperti tampak pada pada Gambar 23.



Gambar 22. Sketsa permasalahan simulasi airfoil

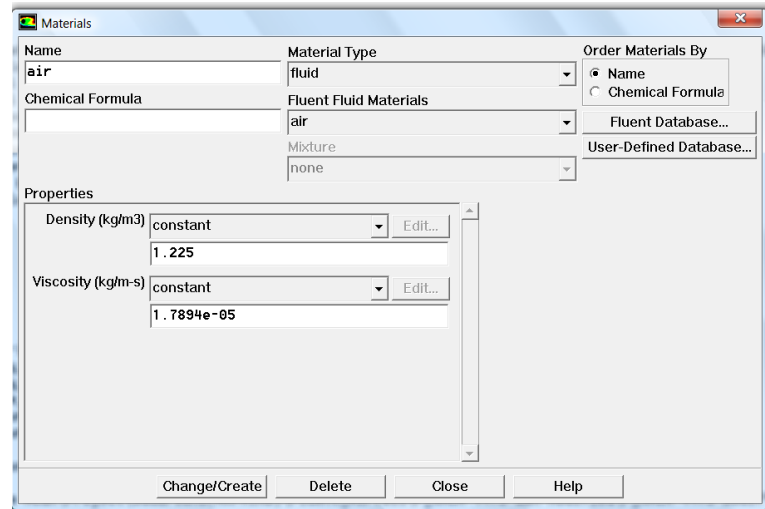




Gambar 23. Meshing domain komputasi Airfoil sebanyak 29400

b. Properties Fluida Kerja

Properties fluida kerja yaitu udara dengan sifat fluida sebagai berikut densitas udara 1.225 kg/m^3 dan viskositas $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ yang di definisikan di dalam panel Fluent seperti tampak pada Gambar 24.

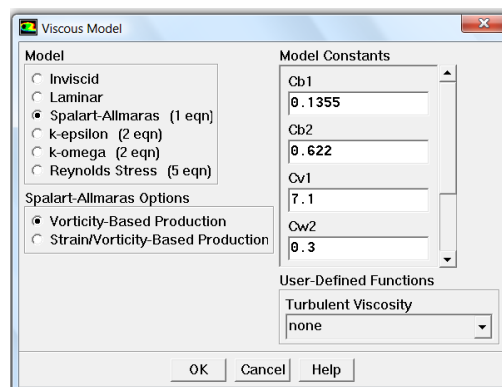


Gambar 24. Panel Fluent untuk definisi sifat udara

c. Model Phenomena Fisik Aliran

Kondisi aliran (laminar atau turbulen) ditentukan berdasarkan nilai bilangan Reynolds terhadap panjang airfoil (chord) yaitu untuk kecepatan udara bebas 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s adalah 4.1×10^4 , 5.5×10^4 , 6.8×10^4 , 8.2×10^4 , 9.6×10^4 , dan 2.5×10^5 .

Berdasarkan bilangan Reynolds maka kondisi aliran yang melalui airfoil adalah turbulen, sehingga model turbulen yang digunakan adalah model Spalart Allmaras, seperti tampak pada Gambar 25.



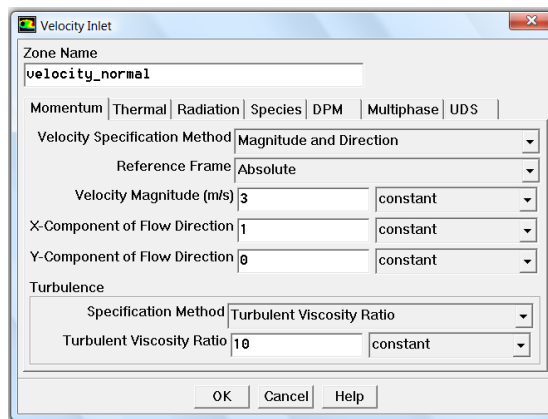
Gambar 25. Panel Fluent untuk definisi model turbulen/viscous

d. Kondisi Batas

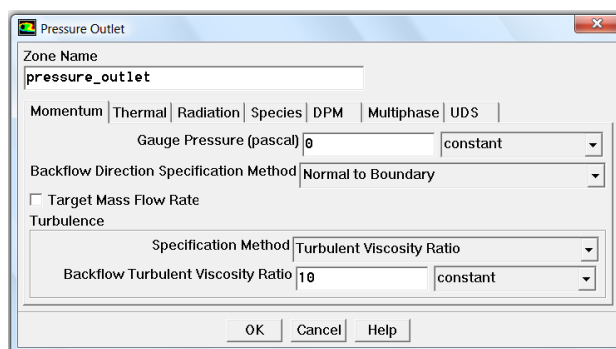
Untuk proses simulasi numerik, dibutuhkan definisi kondisi batas yang sesuai dengan kondisi aliran lingkungan. Tipe kondisi batas yang digunakan terbagi 3 jenis yaitu:

Velocity inlet. velocity inlet adalah kondisi batas yang diterapkan sesuai dengan kondisi kecepatan udara lingkungan. Parameter yang didefinisikan terdiri dari kecepatan aliran udara yang melalui airfoil dan Rasio viskositas turbulen.

Adapun data kecepatan udara yang melalui Airfoil yang digunakan pada proses simulasi numerik adalah seperti tampak pada Gambar 26.



Gambar 26. Panel Fluent untuk definisi kecepatan udara

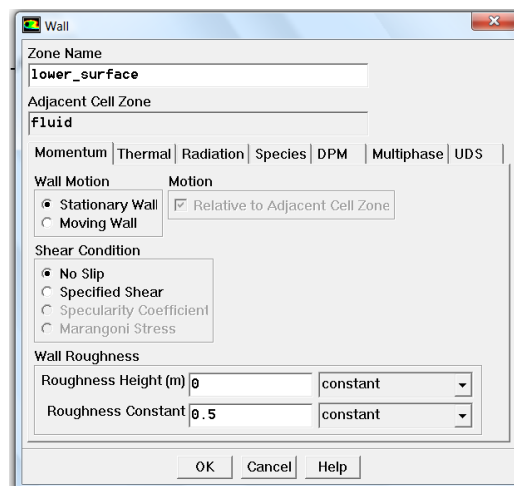


Gambar 27. Panel Fluent untuk mendefinisikan kondisi batas *pressure outlet*

Pressure outlet. pressure outlet yaitu kondisi batas yang diterapkan pada penampang keluar. Parameter yang didefinisikan adalah *Gauge pressure* dan Rasio viskositas turbulen. Adapun data tekanan dapat didefinisikan seperti tampak pada Gambar 27.

Wall. wall atau dinding adalah kondisi batas yang diterapkan pada dinding permukaan pipa. Parameter yang diterapkan pada kondisi batas ini adalah Dinding tidak bergerak dan fluida di dalamnya *no slip* dan Konstanta kekasaran 0.5 untuk dinding licin.

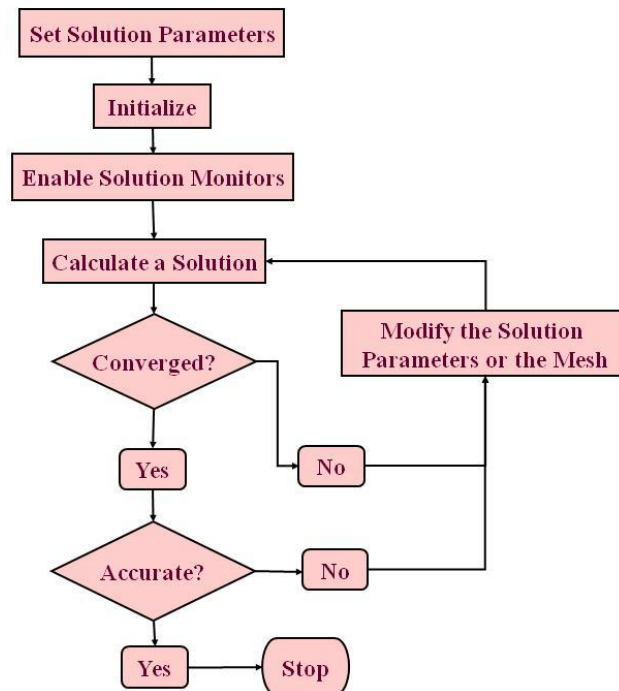
Panel Fluent untuk mendefinisikan kondisi batas dinding adalah seperti tampak pada Gambar 28.



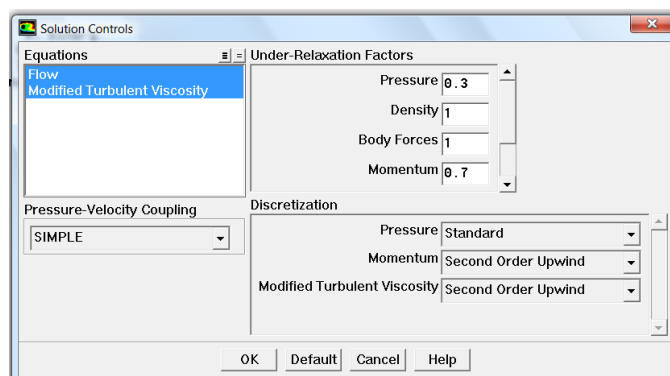
Gambar 28. Panel fluent untuk mendefinisikan dinding

e. Solver

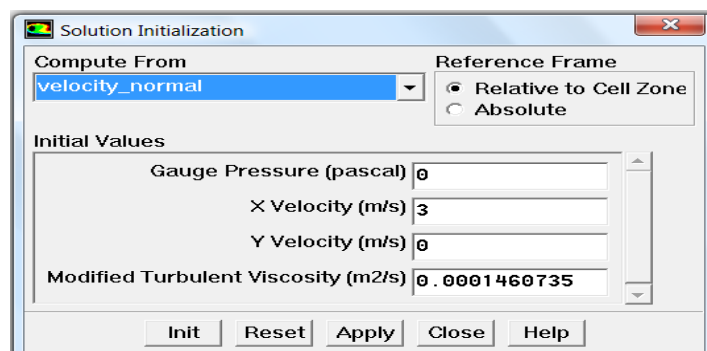
Proses selanjutnya dari simulasi numerik adalah proses pencarian solusi untuk mendapatkan properties aliran udara turbulensi yang mempunyai diagram alir seperti tampak pada Gambar 29. Dengan menggunakan panel fluent seperti tampak pada Gambar 30. untuk mendefinisikan metode diskretisasi dan panel fluent Gambar 31 untuk mendefinisikan nilai awal.



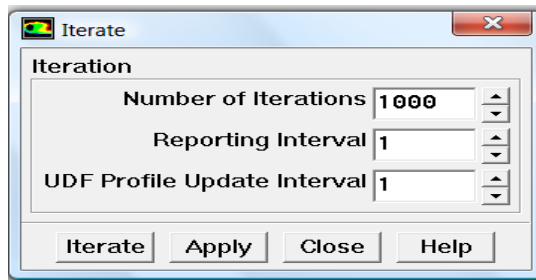
Gambar 29. Diagram alir untuk proses pencarian solusi.



Gambar 30. Panel untuk mendefinisikan metode diskretisasi pada proses solver



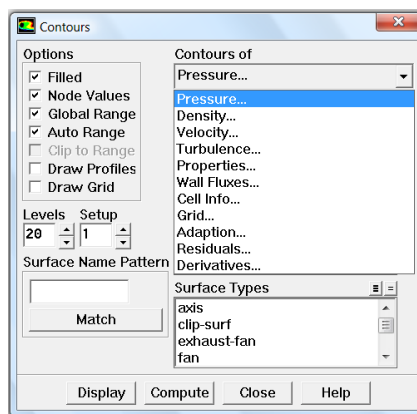
Gambar 31. Panel Fluent untuk mendefinisikan inialisasi pada proses solver



Gambar 32. Panel Fluent untuk mendefinisikan iterasi pada proses solver

f. Post-processing

Menampilkan properties fluida hasil pencarian solusi dalam bentuk kontur, vektor dan lainnya sebagainya seperti tampak pada panel fluent Gambar 33.



Gambar 33. Panel Fluent untuk menampilkan kontur properties aliran hasil iterasi

C. Pembuatan Prototipe Modifikasi *Propeler Airfoil Standard NACA 4415*

Detail rencana tahapan penelitian *Propeler Airfoil Standard NACA* disajikan pada tabel 5.

Tabel 5

Rincian pekerjaan penelitian *Propeler Airfoil Standard NACA*

Tahapan	Rincian kegiatan	Aktivitas kegiatan penelitian	Outcome/ Indikator Keberhasilan
Persiapan	Pengadaan raw material	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pembelian serat rami 2. Pembelian KSL 3. Survei pengukuran dimensi propeler di laboratorium LAPAN Pandansimo Bantul DIY 	Tersedianya serat rami dan dimensi disain propeler pada dua minggu pertama
Studi Literatur & Inventarisasi Hasil Riset Terdahulu	Studi literatur	Melakukan penelusuran literatur dan jurnal tentang sifat fisis-mekanis serat E-glass, UPRs, Serat rami, KSL, komposit E-glass-UPRs, komposit serat rami – UPRs dan komposit <i>sandwich</i> sebagai acuan pembandingan hasil riset.	Diperoleh data acuan pembandingan hasil penelitian
	Inventarisasi hasil riset terdahulu	Melakukan inventarisasi data hasil riset terdahulu	Data-riset terdahulu sebagai acuan pelaksanaan penelitian.
Spesifikasi Teknis Serat Rami	Density mat serat rami	Melakukan penimbangan serat rami	Density serat rami tertentu
	Uji tarik	Melakukan pengujian tarik serat tunggal sesuai standar ASTM D 3379	Tegangan, modulus, regangan
Spesifikasi Teknis Core KSL	Uji kadar air	Melakukan pemanasan di dalam oven pada suhu 105 °C dan ditimbang secara periodik setiap 15 menit pemanasan (untuk tiap variasi tebal <i>core</i>)	Diperoleh kurva laju penurunan kadar air
	Uji sifat mekanis	Melakukan pengujian bending (ASTM D-4761), tarik (SNI 03-3399-1994), tekan (SNI 03-3958-1995), Impak (ASTM D-5942).	Sifat mekanis (bending, tarik, tekan, Impak.
	Uji pengeringan	Melakukan pemanasan <i>core</i> KSL pada suhu 105 °C selama 72 jam dan diikuti pengukuran dimensi <i>core</i> KSL	Prosentasi penyusutan berat
Pembuatan Core KSL Segmen	Pembuatan <i>core</i> KSL	Melakukan proses pembuatan <i>core</i> KSL segmen yang direkatkan pada serat rami	Produk <i>core</i> segmen lembaran di atas serat rami
Pembuatan Prototipe produk	Pembuatan prototipe propeler	Melakukan proses manufaktur pembuatan prototipe propeler dengan metode <i>hand lay-up</i>	Prototipe produk <i>Propeler Airfoil Standard NACA 4415</i> modifikasi
Finishing	Pengecatan propeler	Melakukan pelapisan propeler dengan cat anti korosi	Propeler yang sudah dilapisi cat

D. Evaluasi dan validasi

Kelayakan produk modifikasi *propeler airfoil standard* NACA 4415 juga diujikan secara langsung di lokasi pantai selatan Pandansimo Kabupaten Bantul Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta yang juga merupakan Laboratorium LAPAN.

Dalam pengujian SKEA, ada beberapa langkah yang harus dilakukan sebelum dan pada saat melakukan pengujian yaitu :

1. Persiapan benda uji
2. Memasang propeler pada poros, dan kemudian pada menara (tower)
3. Menentukan arah angin dan kecepatan angin rata-rata
4. Mendirikan tower (menara) sesuai dengan arah angin
5. Mengatur besar sudut datang pada masing-masing propeler yang terpasang pada dudukan, sesuai hasil simulasi CFD
6. Setelah sudutnya diatur, dan propeler mulai berputar, maka kecepatan angin dan putaran poros (rpm) yang dihasilkannya mulai dihitung dan dicatat

E. Pengelolaan dampak lingkungan rekayasa SKEA

Dalam penelitian ini juga diuraikan tentang analisis dampak lingkungan penerapan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA), khususnya untuk mengetahui aspek ketahanan lingkungan dari propeler berbahan baku komposit KSL dan serat rami yang dipasang di daerah pantai. Parameter yang akan diukur meliputi temperatur, kelembaban, dan kecepatan angin.

Dari masing-masing parameter tersebut, kemudian dilakukan pengujian dengan variasi waktu / lama ekspose. Hasil yang diharapkan berupa nilai degradasi mekanis dari bahan komposit. Selanjutnya dilakukan pengujian kembali pada aspek kekuatan dengan uji tarik, uji

bending, dan uji impak. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui ada tidaknya penurunan ketahanan bahan komposit.

Metode penelitian dilakukan dengan metode kuantitatif, yaitu dengan melakukan penelitian secara eksperimental lapangan dan penelitian secara teoritis dengan cara pengukuran langsung. Pengukuran dilakukan selama kurang lebih 5,5 bulan dengan pengambilan sampel dilakukan setiap 1 minggu sekali.

Kondisi eksperimen di lapangan dari hasil penelitian ini merupakan pencerminan data operasional yang sebenarnya. Untuk selanjutnya dilakukan pengujian di laboratorium untuk mengetahui kekuatan bahan komposit setelah dipasang selama kurang lebih 5,5 bulan di lokasi. Pengujian dilakukan pada aspek uji tekuk (*flexural test*).

F. Lokasi Penelitian

Lokasi Penelitian ini dilakukan di Laboratorium LAPAN di Pantai Selatan Pandansimo Kabupaten Bantul Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Laboratorium Teknologi Mekanik IST AKPRIND, Laboratorium Pengujian Bahan IST AKPRIND, Laboratorium Kimia Proses dan Analisa IST AKPRIND Yogyakarta, dan Laboratorium Uji Departemen Teknik Metalurgi dan Bahan Universitas Indonesia.

G. Peralatan Penelitian

1. Pengamatan di lapangan

Peralatan yang dipakai dalam pengamatan di lapangan berupa :

- a. Thermometer, untuk mencatat temperatur
- b. Anemometer, untuk mengukur kecepatan angin dan turbulensi angin
- c. Higrometer, untuk mengukur kelembaban udara

2. Pengamatan di Laboratorium

Sedangkan peralatan yang digunakan dalam laboratorium berupa :

- a. Mesin Universal Testing Material, digunakan untuk uji tarik, uji tekan dan uji tekuk
- b. Mesin uji impak Charpy, digunakan untuk uji impak
- c. SEM (Scanning Electron Microscopy), digunakan untuk analisis struktur mikro dari bahan komposit
- d. EDS (Energy Dispersive X-Rayspectrometer), digunakan untuk pengujian komposisi kimia bahan
- e. Oven listrik, digunakan untuk pengeringan spesimen KSL
- f. Alat ukur keseimbangan beban, digunakan untuk mengukur keseimbangan propeler

H. Teknik Pengambilan Sampel

Pengambilan data hasil pengujian di lapangan yang berupa kecepatan angin, temperatur dan kelembaban dilakukan setiap hari, dengan rata-rata 12 jam setiap hari pada waktu pagi (jam 06.00 – 12.00 WIB), dan malam hari (jam 18.00 – 24.00 WIB).

Sumber data lainnya yang berupa kecepatan angin dan temperatur diperoleh dari logger milik LAPAN yang ditempatkan di Pantai Pandansimo. Selanjutnya data-data yang telah terkumpul diolah dan disajikan dalam bentuk tabel, angka, dan grafik menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, SPSS, dan Matlab.

I. Teknik Analisa Data

Data yang telah diambil harus dihitung lebih dulu faktor koreksi untuk mengkonversi model perhitungan lama dengan model perhitungan baru yang lebih akurat, kemudian dilakukan analisis dengan menggunakan alat bantu perangkat lunak SPSS, Matlab, dan Microsoft Excel untuk mengetahui grafik hasil uji sampel.

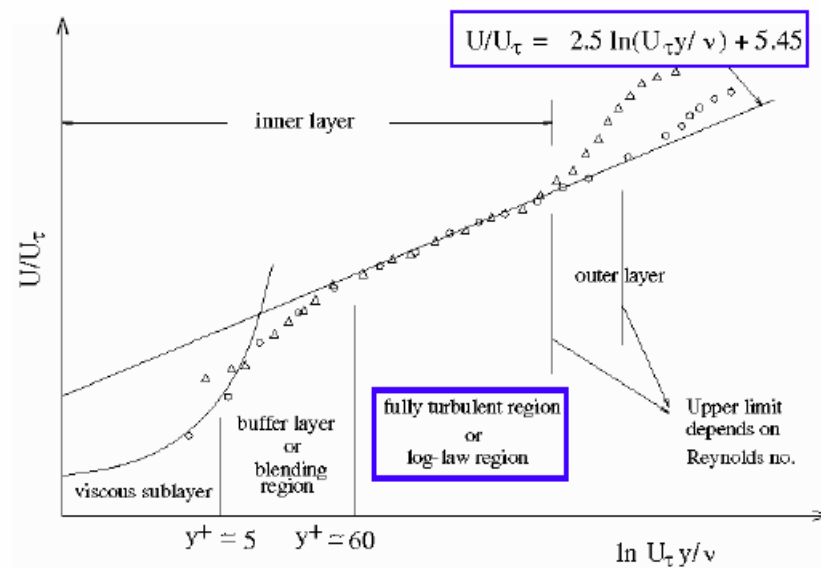
BAB V

HASIL PENELITIAN DAN BAHASAN

A. Simulasi dengan CFD

1. Efek dinding: tinjauan nilai y^+

Efek dinding pada aliran dapat ditinjau berdasarkan nilai y^+ . Efek dinding dapat didekatkan dengan dua tipe fungsi yaitu fungsi dinding linier (*linear wall functions*) dan fungsi dinding logaritmik (*logarithmic wall functions*). Kriteria penggunaan fungsi dinding linier atau logaritmik didasarkan pada rentang nilai y^+ sebagaimana diperlihatkan oleh Gambar 34.

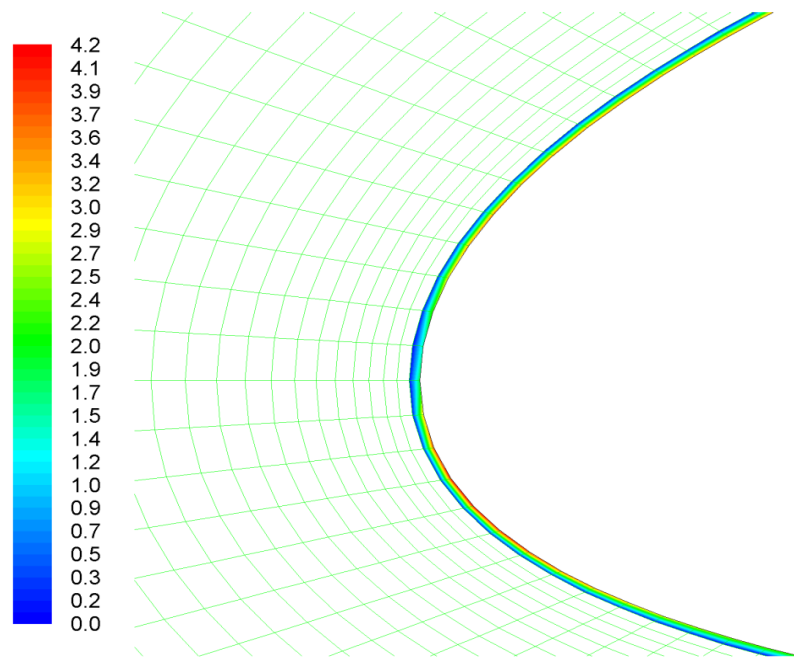


Gambar 34. Kurve pengaruh dinding pada aliran yang ditunjukkan y^+ terhadap U^+

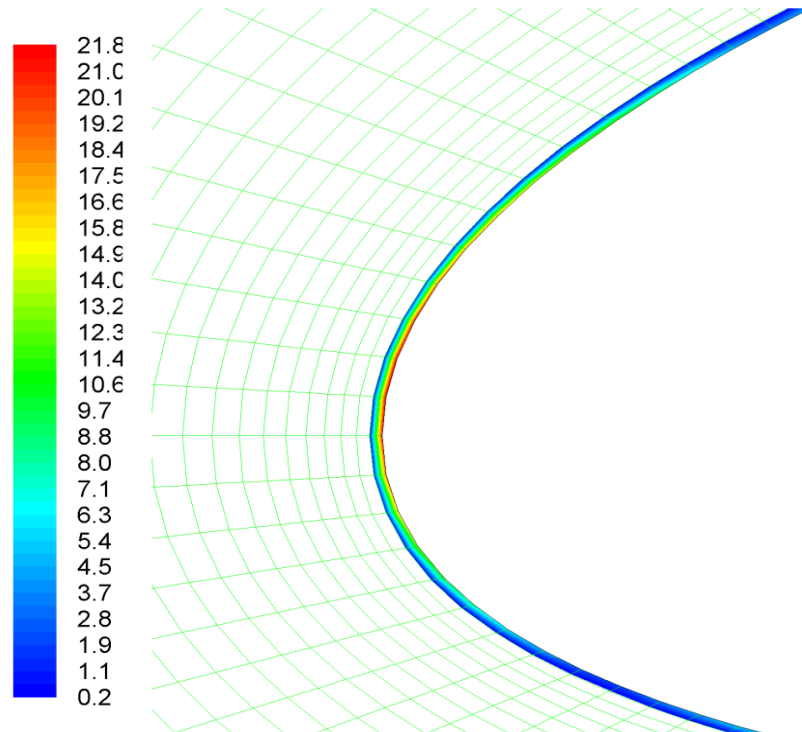
- $y^+ \leq 5$: menunjukkan aliran didominasi oleh gaya viscous fluida (viscous sublayer) sehingga aliran fluida pada daerah dekat dinding merupakan aliran laminar dan efek dinding dapat didekatkan dengan fungsi linier ($y^+ = U^+$)

- $5 < y^+ < 60$: menunjukkan aliran didominasi oleh gaya viscous dan gaya inersia (*buffer layer*) sehingga merupakan daerah transisi dari aliran laminar menuju aliran turbulen dan efek dinding dapat didekatkan dengan fungsi linier untuk bilangan Reynolds (Re) lebih rendah atau dapat pula didekatkan dengan fungsi dinding logaritmik pada kondisi nilai bilangan Reynolds lebih tinggi.
- $y^+ \geq 60$: menunjukkan aliran didominasi oleh gaya inersia fluida sehingga aliran fluida pada daerah dekat dinding merupakan aliran turbulen penuh (*fully turbulent*) dan efek dinding dapat didekatkan dengan fungsi logaritmik ($y^+ = 2,5 \ln (U_\tau y/\nu) + 5,45$).

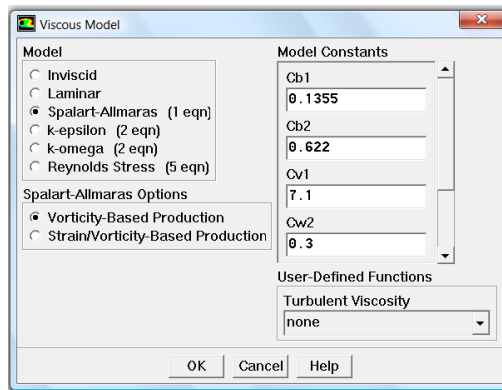
Berdasarkan kriteria nilai y^+ dan hasil simulasi numerik aliran yang melalui permukaan airfoil yang mempunyai nilai y^+ dalam rentang $4.2 < y^+ < 21.8$ seperti tampak pada Gambar 35 dan Gambar 36, maka jarak meshing dekat terhadap dinding sudah cukup bagus dan aliran dekat dinding didominasi oleh gaya viscous sehingga aliran dekat dinding adalah laminar serta kecenderungan efek dinding terhadap aliran dapat menggunakan model pendekatan linier yang dikenal sebagai *vorticity-base production* efek dinding yang menggunakan model viscous Spallard Allmaras seperti tampak pada Gambar 37.



Gambar 35. Nilai y^+ pada bagian depan airfoil pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 0 degree



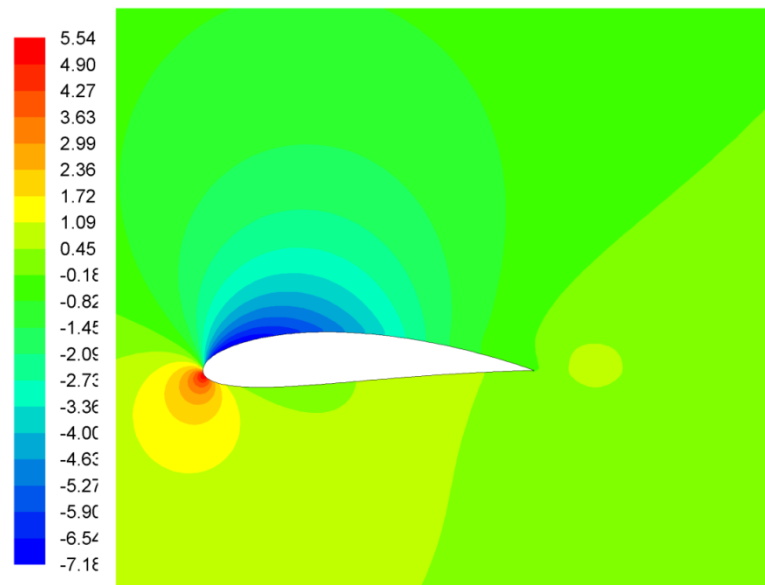
Gambar 36. Nilai y^+ pada bagian depan airfoil pada kecepatan freestream 18 m/s dan *angle of attack* 20 degree



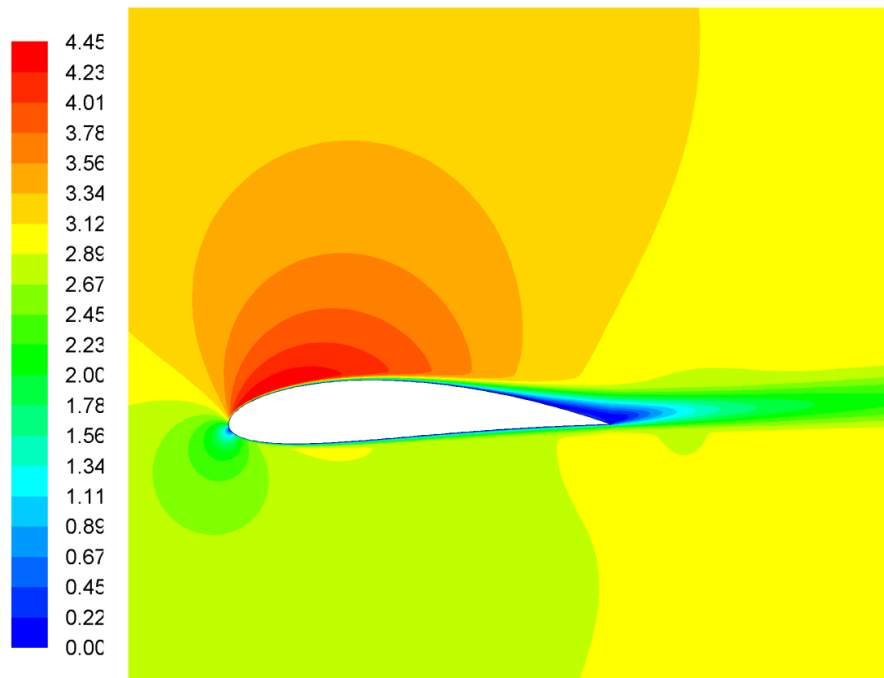
Gambar 37. Model turbulensi Spalart Allmaras dan vorticity-Base Production

2. Properties medan aliran

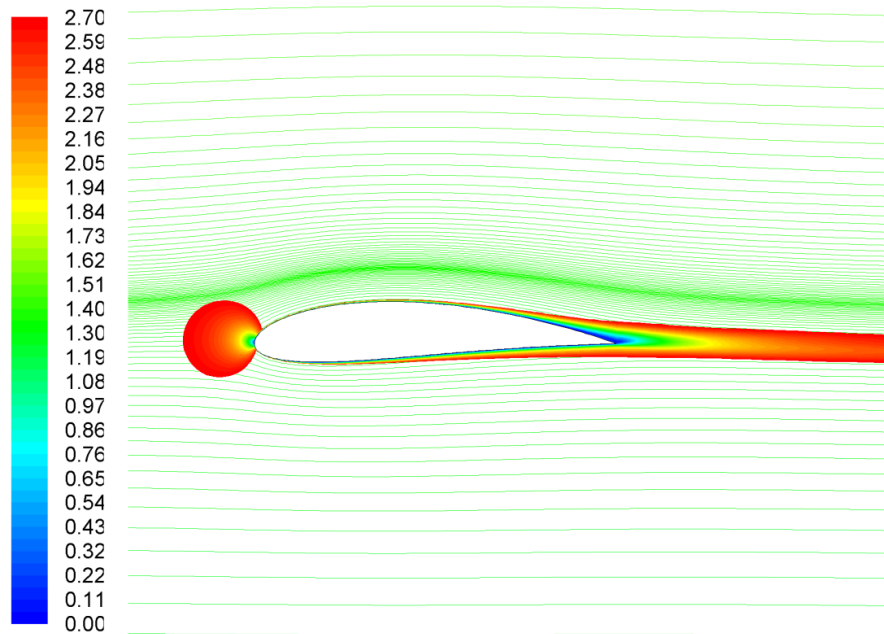
Solusi numerik dapat ditampilkan dalam bentuk tekanan, kecepatan dan garis alir (*streamline*) medan aliran udara dalam domain komputasi dan yang melalui permukaan airfoil, seperti tampak pada Gambar 38 sampai dengan Gambar 40 (yang ditampilkan hanya pada kondisi kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree, dan khusus untuk garis alir pada kondisi *angle of attack* 0 degree).



Gambar 38. Kontur tekanan statik (dalam Pascal) aliran udara pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree



Gambar 39. Kontur kecepatan aliran udara (dalam m/s) pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree

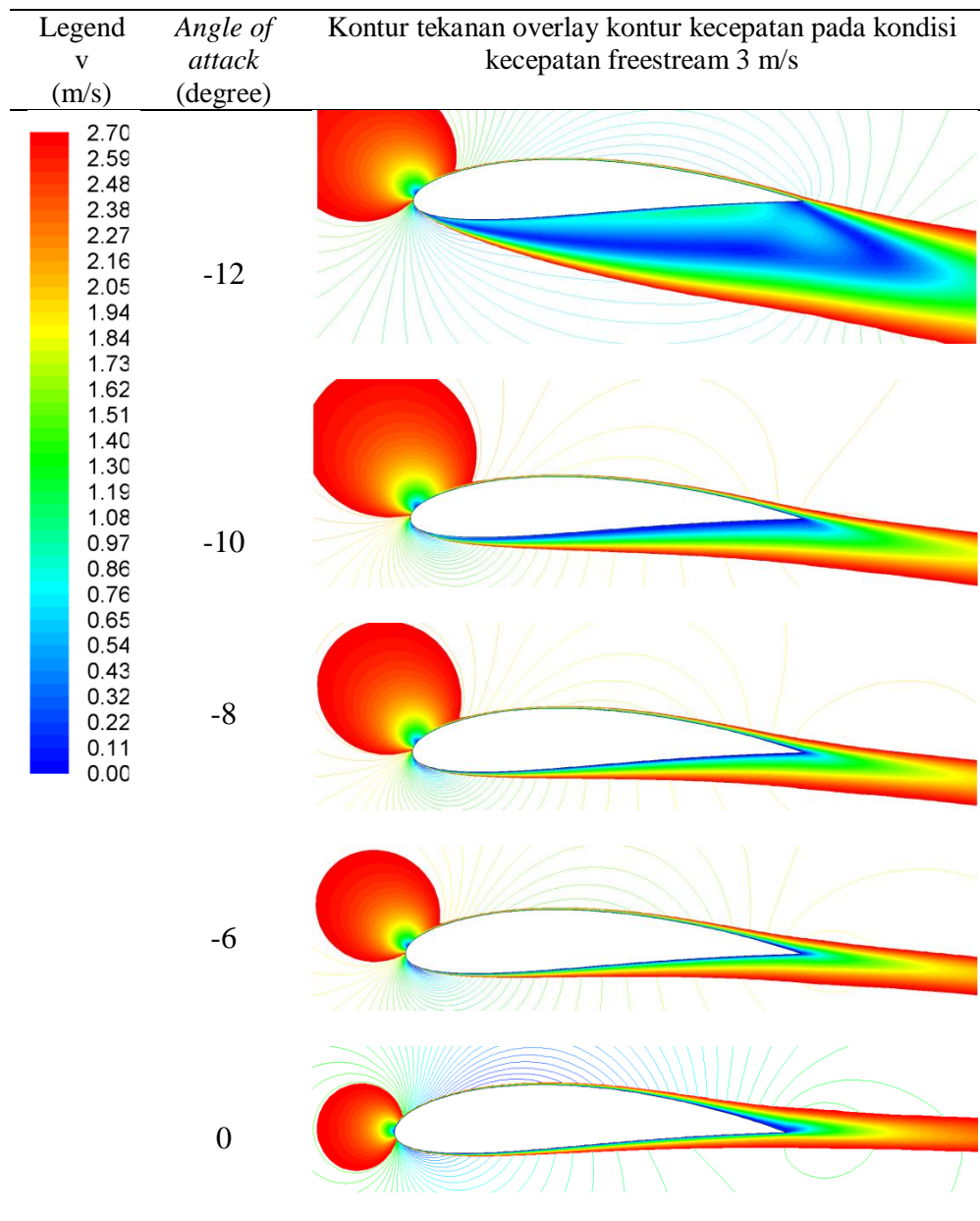


Gambar 40. Kontur streamline dan kecepatan aliran udara (dalam m/s) pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 0 degree

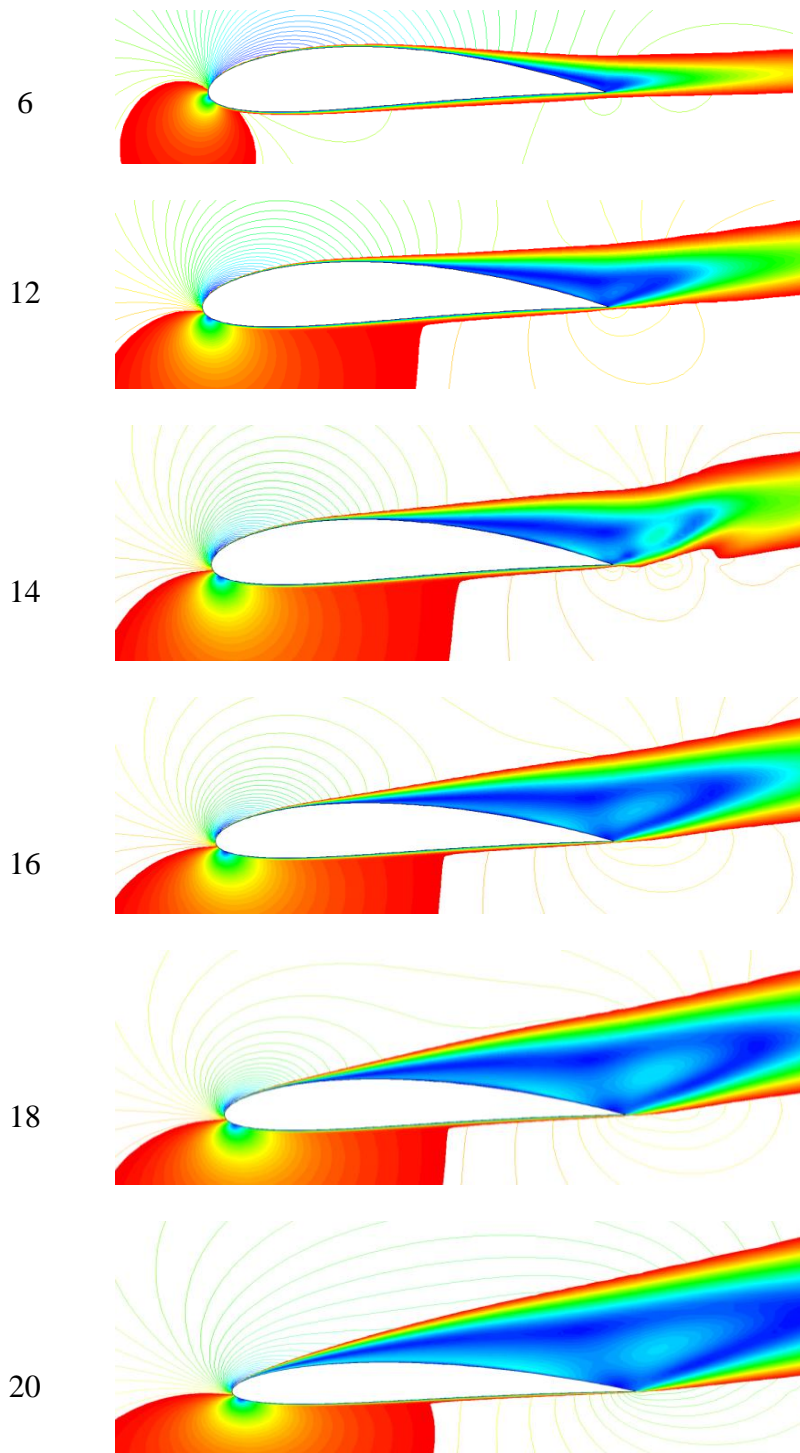
Properties medan aliran dalam domain komputasi dapat ditampilkan pada kondisi kecepatan aliran freestream tertentu (3 m/s) dan *angle of attack* yang bervariasi seperti tampak pada Tabel 6.

Tabel 6

Properties medan aliran



Tabel 6 (Lanjutan)



Berdasarkan gambar kecepatan aliran udara yang melalui permukaan airfoil seperti tampak pada tabel 6 pada kondisi kecepatan freestream 3 m/s, pada kondisi *angle of attack* -12 degree tampak terlihat kecepatan aliran menuju kearah kanan bawah searah dengan aliran kecepatan udara freestream dan terbentuk pusaran aliran di bawah permukaan airfoil dengan kecepatan aliran yang rendah (warna biru) dengan rentang 0 – 0.65 m/s. Pusaran aliran akan menghilang secara bertahap dengan meningkatnya *angle of attack* sampai pada nilai *angle of attack* 0 degree seperti tampak pada gambar untuk *angle of attack* -10, -8, -6 dan 0 degree. Sebagai akibatnya nilai gaya angkat (*lift force*) mempunyai nilai negatif atau gaya angkat ke arah bawah dan gaya angkat secara bertahap menuju ke atas dengan bertambahnya nilai *angle of attack* dari -12 degree menuju 0 degree

Pusaran aliran udara akan mulai terjadi di bagian permukaan atas airfoil secara bertahap dengan bertambah nilai *angle of attack* seperti tampak pada gambar untuk *angle of attack* 6, 12, 14, 16,18 dan 20 degree. Sebagai akibatnya gaya angkat semakin membesar ke arah atas dan mencapai nilai maksimal pada *angle of attack* 14 degree dan nilai gaya angkat mulai menurun pada *angle of attack* menuju 16, 18 dan 20 degree.

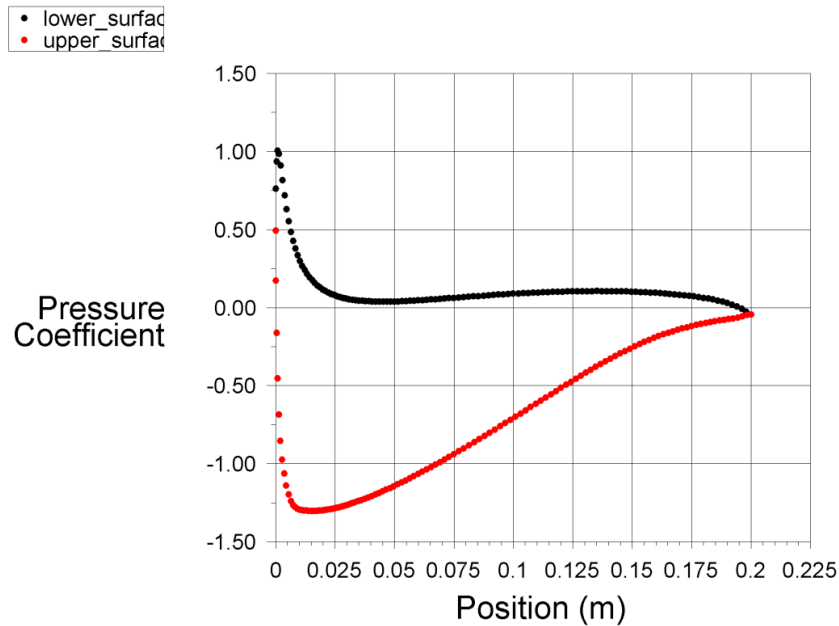
Fenomena yang sama akan terjadi untuk kondisi kecepatan freestream yang lain yaitu 4, 5 dan 18 m/s pada *angle of attack* -12,-10, -8,-6, 0, 6, 12, 14, 16, 18 dan 20 degree.

3. Koefisien Aerodinamika

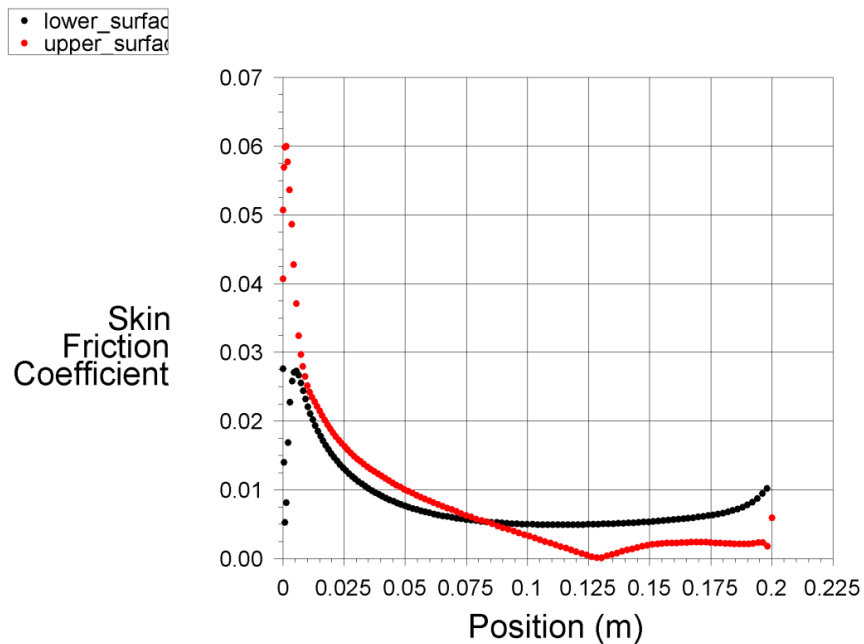
Besarnya nilai gaya aerodinamik seperti gaya angkat (*lift*), gaya hambat (*drag*) dan moment dapat disajikan dalam bentuk nilai koefisien aerodinamik yaitu koefisien lift (C_l), koefisien drag (C_d) dan koefisien moment (C_m).

Berdasarkan properties medan aliran seperti tampak pada Gambar 38 dan 39 serta Tabel 6 yang diformulasi menggunakan persamaan (29) dan (30), maka dapat ditentukan nilai

koefisien tekanan (pressure coefficient, C_p) dan nilai koefisien gesek (friction coefficient, C_f) dan ditampilkan kurva nilai C_p dan C_f seperti tampak pada Gambar 41 dan 42.



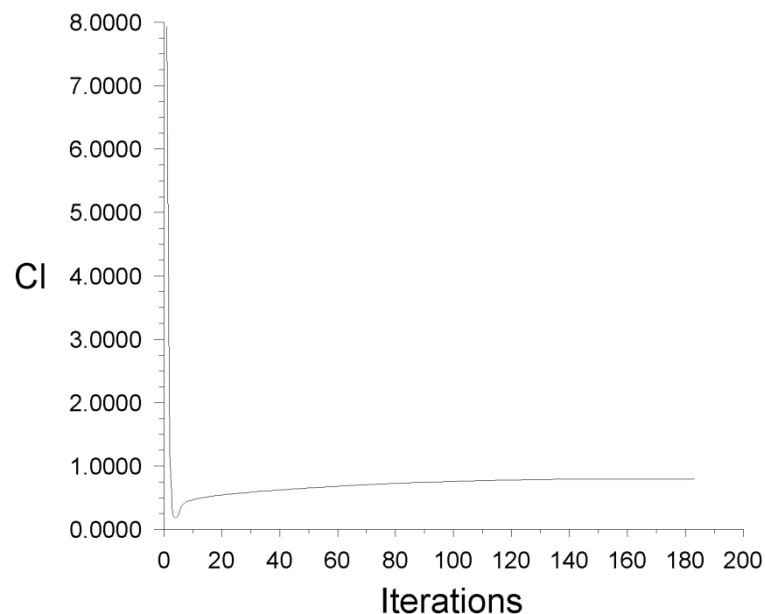
Gambar 41. Kurva koefisien tekanan C_p pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree.



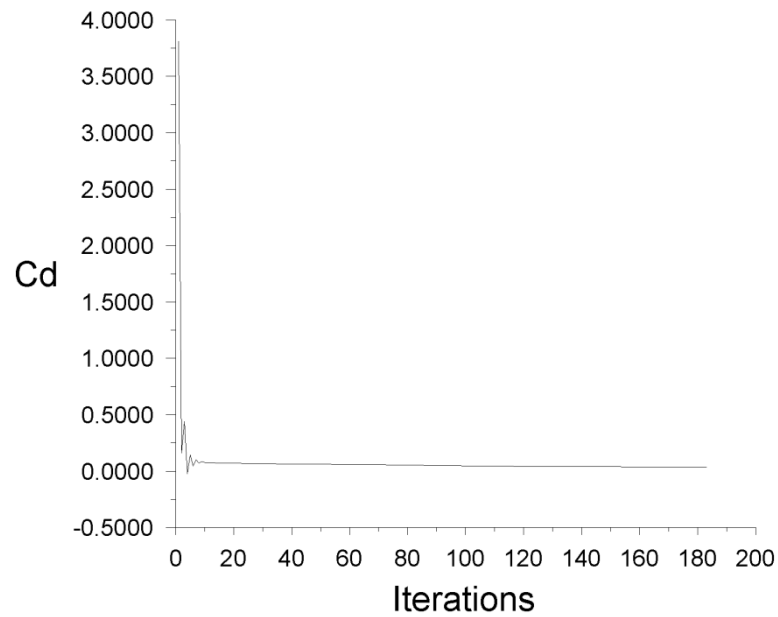
Gambar 42. Kurva koefisien gesekan C_f pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree

Berdasarkan nilai koefisien tekanan (C_p) dan koefisien gesek (C_f) sepanjang dinding permukaan airfoil yang membentuk kurva seperti tampak pada Gambar 41 dan 42, maka dapat ditentukan nilai koefisien normal (C_n) dan koefisien tangensial (C_t) serta koefisien moment (C_m) dengan menggunakan persamaan (31), (32) dan persamaan (33).

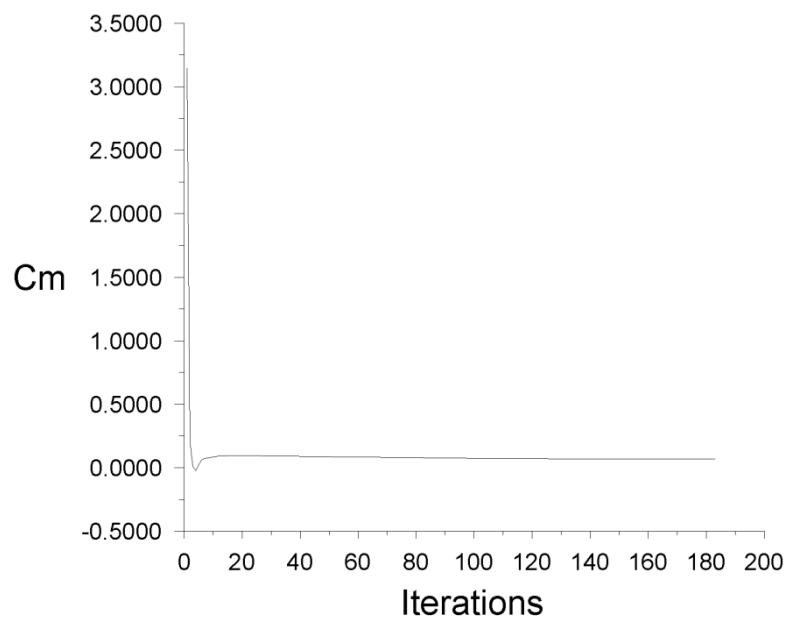
Berdasarkan nilai koefisien normal (C_n), koefisien tangensial (C_t) dan koefisien moment (C_m) serta nilai *angle of attack* (α) maka dapat ditentukan nilai koefisien aerodinamik yang terdiri dari koefisien lift (C_l), koefisien drag (C_d) dan koefisien moment (C_m). dengan menggunakan persamaan (34), (35) dan persamaan (36). Nilai koefisien aerodinamik hasil simulasi numerik selama proses iterasi dapat ditampilkan seperti tampak pada Gambar 43, 44 dan Gambar 45.



Gambar 43. Nilai C_l hasil iterasi pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree



Gambar 44. Nilai C_d hasil iterasi pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree



Gambar 45. Nilai C_m hasil iterasi pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree

Nilai pastinya koefisien aerodinamik hasil proses iterasi yang mencapai konvergen dapat ditampilkan seperti tampak pada Gambar 46.

```

180 2D velocity-inlet faces, zone 6, binary.
240 2D velocity-inlet faces, zone 7, binary.
58400 2D interior faces, zone 9, binary.
29800 nodes, binary.
29800 node flags, binary.

Building...
grid,
materials,
interface,
domains,
mixture
zones,
  default-interior
  velocity_normal
  velocity_tangential
  pressure_outlet
  upper_surface
  lower_surface
  fluid
  shell conduction zones.
Done.
Reading "D:\Data Acak\Project\Sudarsono(AKPRIND)\Fluent_Airfoil\F_NACA 4415 dan Modified\F_NACA 4415 modif\NACA 4415 modif_3
Done.

Reading existing force monitor file cd-3_6_SA...done.
Reading existing force monitor file cl-3_6_SA...done.
Reading existing force monitor file cm-3_6_SA...done.
iter continuity x-velocity y-velocity      nut          cm          cl          cd          time/iter
! 181 solution is converged
181 9.7912e-04 9.0732e-06 7.0083e-06 2.7080e-05 6.7206e-02 7.9523e-01 3.8406e-02 0:00:00 1
! 182 solution is converged
182 9.3158e-04 8.9381e-06 6.9486e-06 2.6255e-05 6.7211e-02 7.9518e-01 3.8414e-02 0:00:00 0

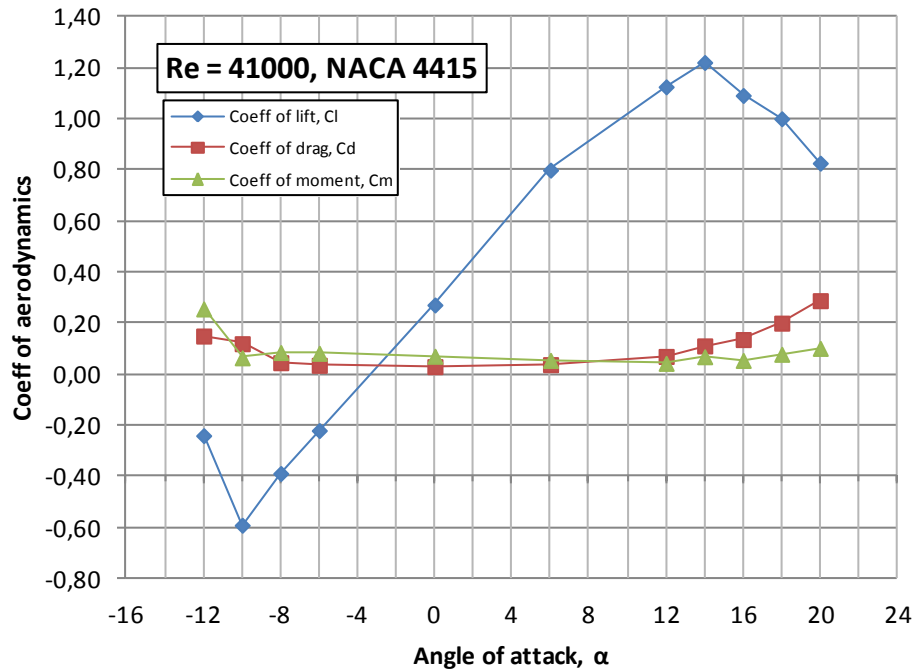
```

Gambar 46. Nilai C_l , C_d , dan C_m hasil iterasi pada permukaan airfoil pada kecepatan freestream 3 m/s dan *angle of attack* 6 degree

Nilai koefisien aerodinamik dapat ditentukan dengan cara yang sama untuk kondisi kecepatan freestream yang lain yaitu 4, 5, dan 18 m/s pada *angle of attack* -12,-10, -8,-6, 0, 6, 12, 14, 16, 18 dan 20 degree.

4. Kurva Drag Polar

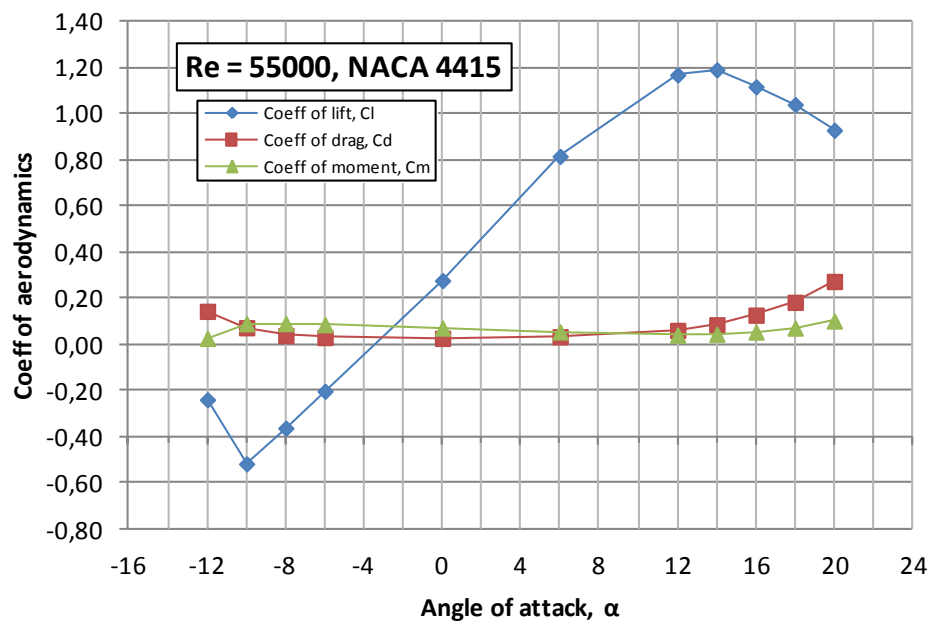
Besarnya nilai koefisien aerodinamik yaitu koefisien lift (C_l), koefisien drag (C_d) dan koefisien moment (C_m) hasil simulasi numerik terhadap *angle of attack* pada bilangan Reynolds tertentu dapat disajikan dalam bentuk kurva, seperti tampak pada Gambar 47 sampai Gambar 52 untuk airfoil NACA 4415.



Gambar 47. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 pada $Re = 41000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 berdasarkan Gambar 47 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 41000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,2413 menuju -0,5925 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,5925 menuju nilai maksimum 1,2212 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,2212 menuju 0,8266 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,1490 menuju 0,0445 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,0445 menuju 0,0691 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,0691 menuju 0,2876 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,2553 menuju 0,0844 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat

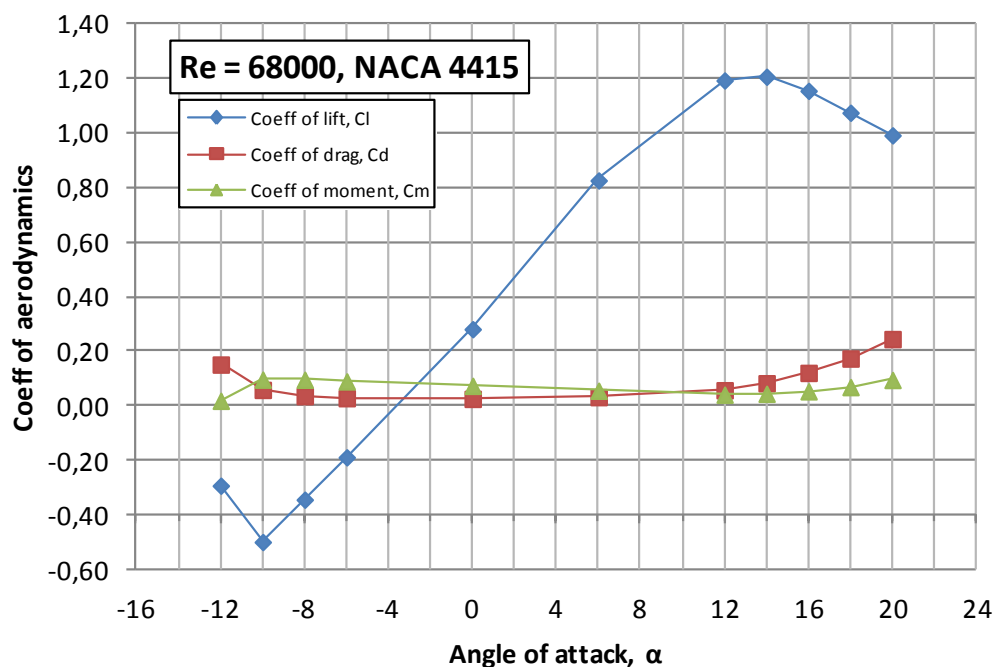
kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,0844 menuju 0,0420 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,0420 menuju 0,1007 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.



Gambar 48. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 pada $Re = 55000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 berdasarkan Gambar 48 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 55000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,23911 menuju -0,51724 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,51724 menuju nilai maksimum 1,1921 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,1921 menuju 0,92976 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,1490 menuju 0,0445 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,14446 menuju 0,039354 pada rentang sudut

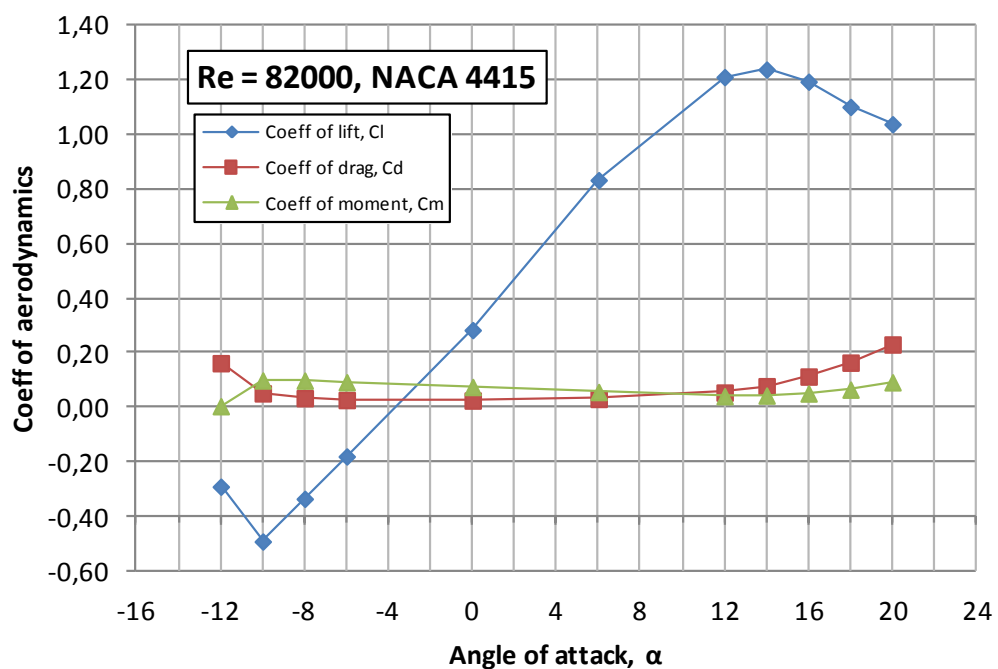
serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,039354 menuju 0,274 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,027187 menuju 0,091478 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,091478 menuju 0,041534 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,091478 menuju 0,10256 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.



Gambar 49. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 pada $Re = 68000$

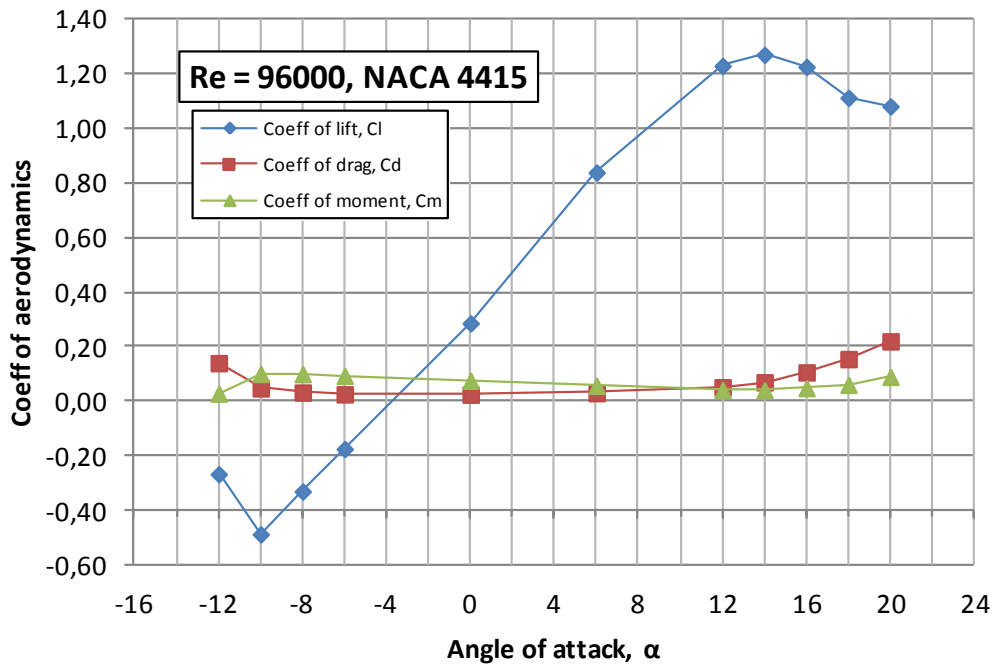
Karakteristik airfoil NACA 4415 berdasarkan Gambar 49 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 68000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,29234 menuju -0,49904 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,49904 menuju nilai maksimum 1. 2076 pada rentang nilai

sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1. 2076 menuju 0. 99265 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,15203 menuju 0,036169 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,036169 menuju 0,057742 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,057742 menuju 0,24545 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,01908 menuju 0,096261 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,096261 menuju 0,041593 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,041593 menuju 0,095462 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.



Gambar 50. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 pada $Re = 82000$

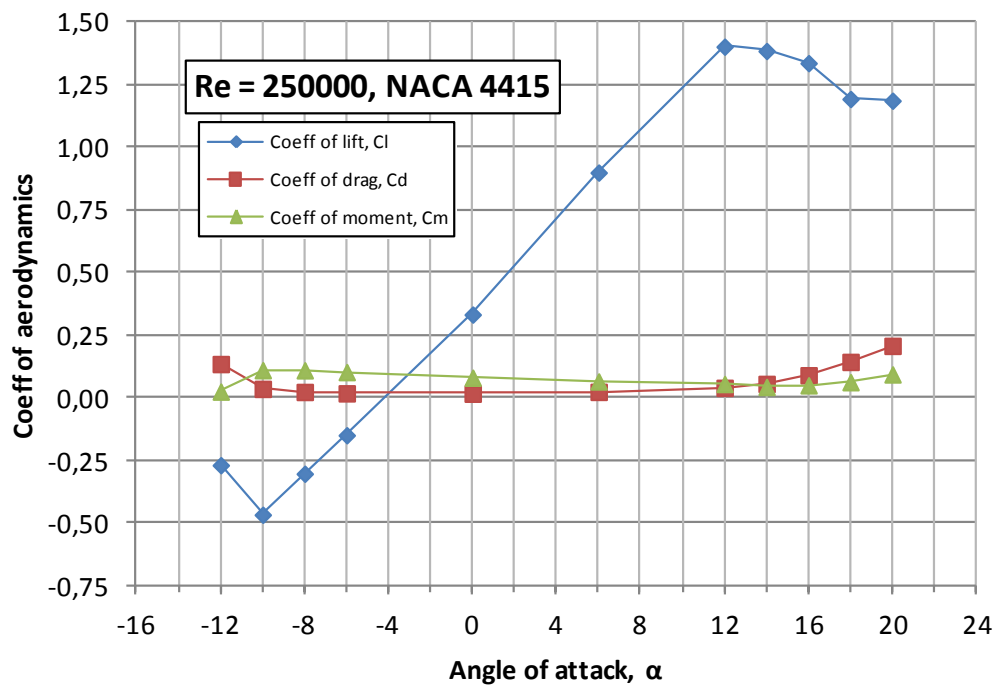
Karakteristik airfoil NACA 4415 berdasarkan Gambar 50 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 82000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,29052 menuju -0,49169 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,49169 menuju nilai maksimum 1,2394 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,2394 menuju 1,0389 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,16247 menuju 0,034177 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,034177 menuju 0,054667 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,054667 menuju 0,23109 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,0047403 menuju 0,098664 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,098664 menuju 0,041508 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,041508 menuju 0,092366 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.



Gambar 51. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoi NACA 4415 pada $Re = 96000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 berdasarkan Gambar 51 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 96000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,26694 menuju -0,48747 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,48747 menuju nilai maksimum 1,2713 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,2713 menuju 1,0821 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,14064 menuju 0,032586 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,032586 menuju 0,052011 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,052011 menuju 0,22045 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,02877 menuju 0,10025 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha$

≤ -8 derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,10025 menuju 0,041767 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,041767 menuju 0,090284 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.

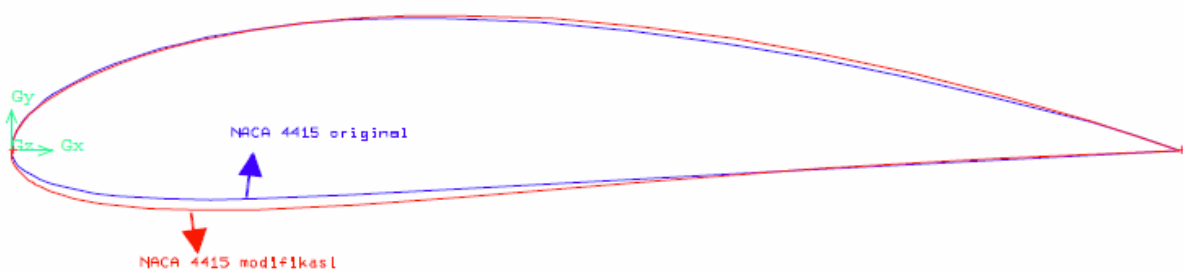


Gambar 52. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 pada $Re = 250000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 berdasarkan Gambar 52 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 250000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,26835 menuju -0,46634 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,46634 menuju nilai maksimum 1,4026 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 12$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,4026 menuju 1,1869 pada rentang nilai sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,1355 menuju 0,024098 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d

mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,024098 menuju 0,024384 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 6$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,024384 menuju 0,20812 pada rentang sudut serang $6 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,02551 menuju 0,11042 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,11042 menuju 0,055822 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,055822 menuju 0,094109 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.

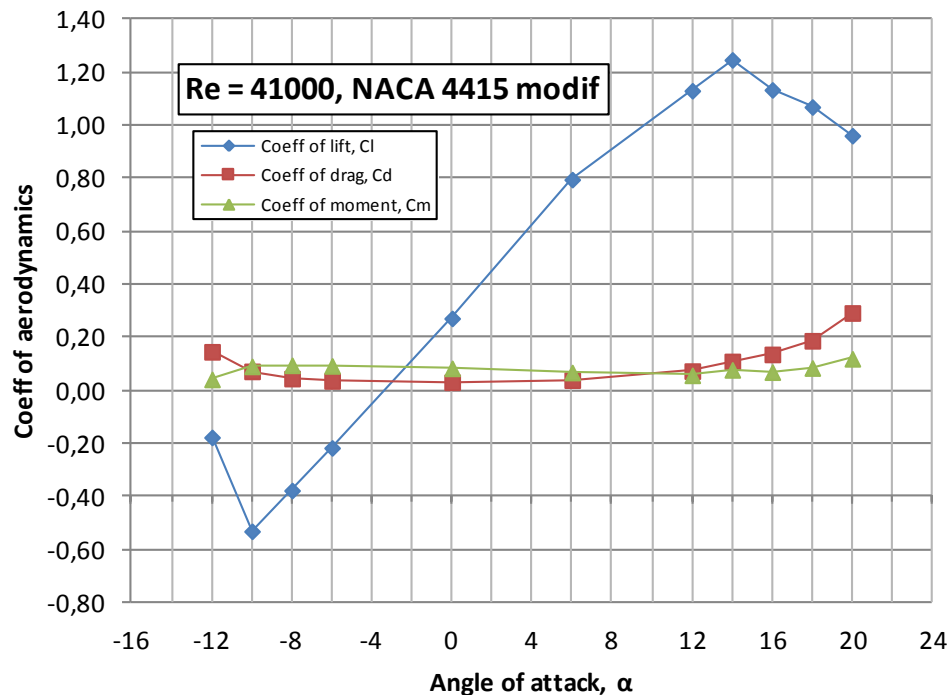
Berdasarkan hasil simulasi numerik karakteristik airfoil NACA 4415 pada Gambar 46 sampai Gambar 52 dan untuk meningkatkan nilai C_l terutama pada kondisi sudut serang pada rentang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat dan pada rentang $14 \leq \alpha \leq 20$ derajat serta untuk meningkatkan nilai C_m , maka dilakukan modifikasi pada profil NACA 4415 bagian depan permukaan bawah dan bagian belakang permukaan atas airfoil, seperti tampak pada Gambar 53. Peningkatan nilai C_l dan C_m diperlukan untuk meningkatkan torsi yang dapat dihasilkan oleh sudu turbin.



Gambar 53. Perbandingan profil airfoil NACA 4415 (warna biru) dan hasil modifikasinya (NACA 4415 modif (warna merah))

Karakteristik airfoil NACA 4415 hasil modifikasi (NACA 4415 modif) hasil simulasi numerik berupa besarnya nilai koefisien aerodinamik yaitu koefisien lift (C_l), koefisien drag (C_d) dan koefisien moment (C_m) hasil simulasi numerik terhadap *angle of*

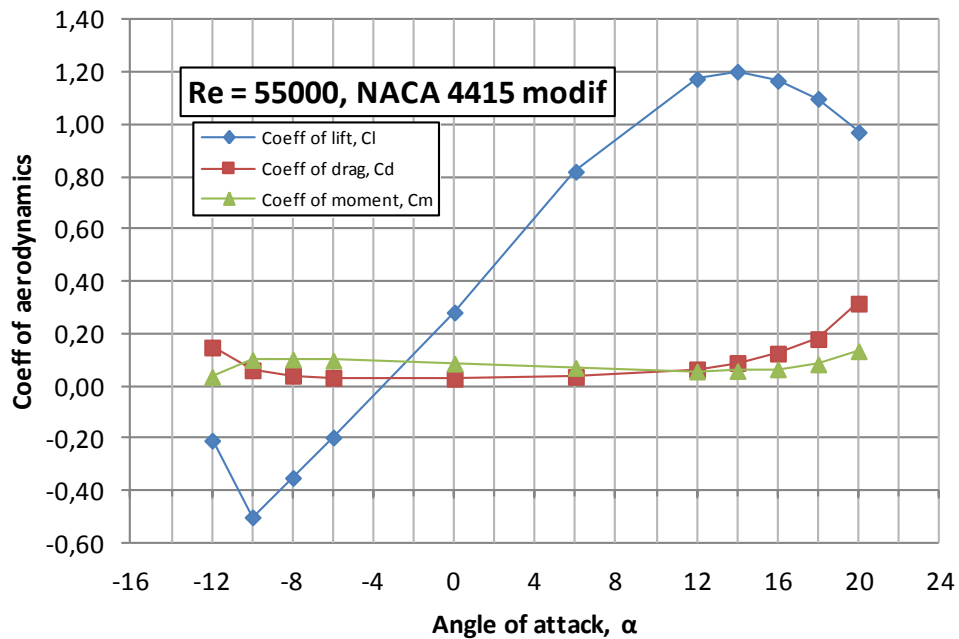
attack pada bilangan Reynolds tertentu dapat disajikan dalam bentuk kurva, seperti tampak pada Gambar 54 sampai Gambar 59.



Gambar 54. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 modif pada $Re = 41000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 modif berdasarkan Gambar 54 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 41000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,17771 menuju -0,53215 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,53215 menuju nilai maksimum 1,2469 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,2469 menuju 0,96099 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,14532 menuju 0,04441 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,04441 menuju 0,072494 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,072494 menuju 0,29185 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,041108 menuju 0,094425 pada rentang nilai sudut serang -12

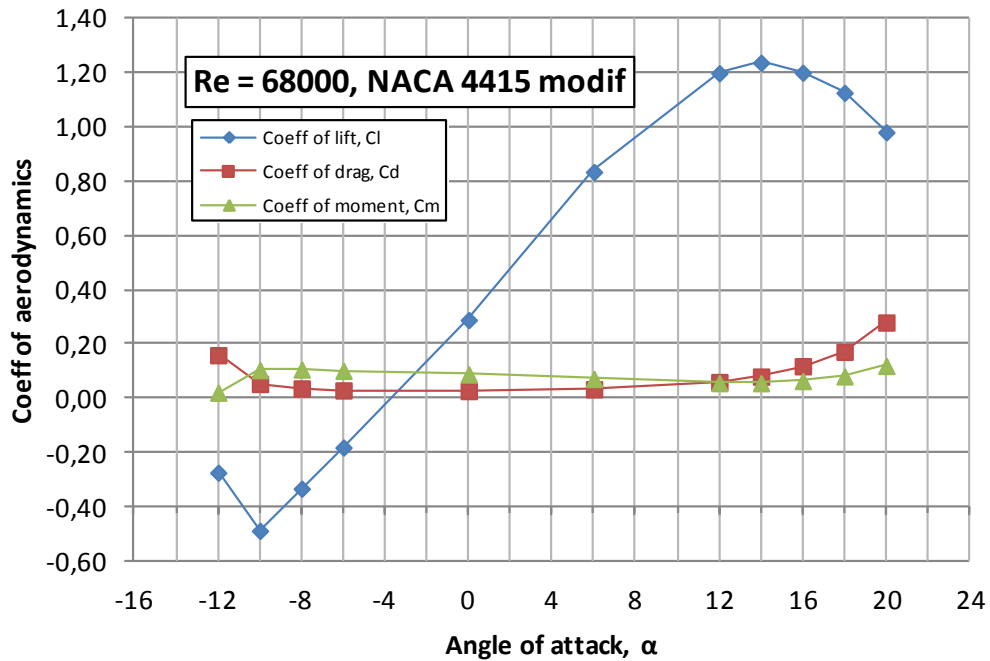
$\leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,094425 menuju 0,056633 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,056633 menuju 0,11895 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.



Gambar 55. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 modif pada $Re = 55000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 modif berdasarkan Gambar 55 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 55000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,20854 menuju -0,5017 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,5017 menuju nilai maksimum 1,2027 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,2027 menuju 0,97091 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,14782 menuju 0,039773 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,039773 menuju 0,064297 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,064297 menuju 0,31569 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,035331 menuju 0,10177 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,10177

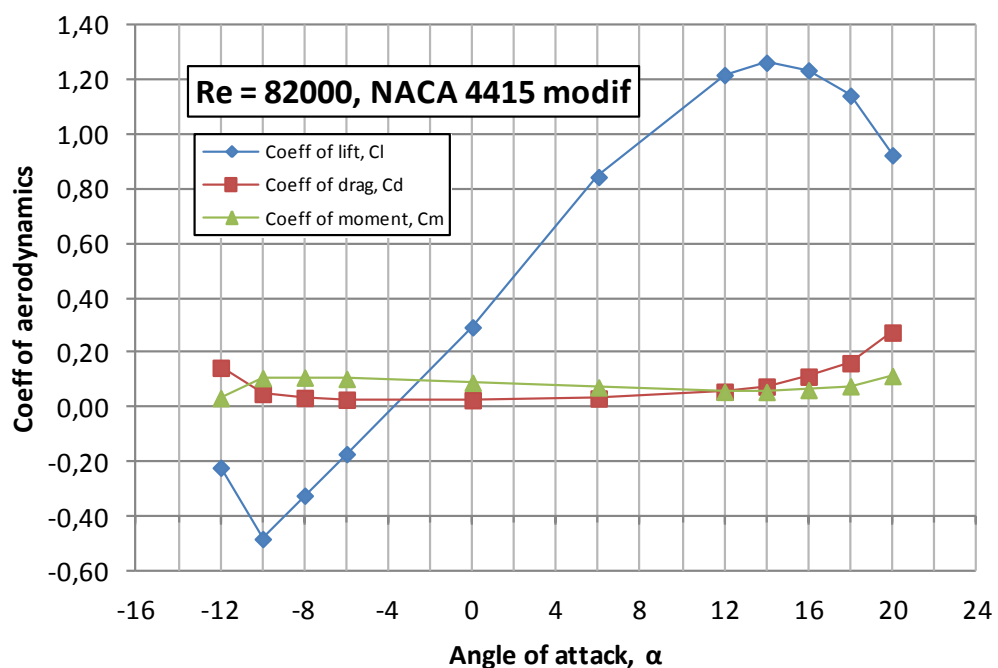
menuju 0,057845 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 14$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,057845 menuju 0,13354 pada rentang sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$.



Gambar 56. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 modif pada $Re = 68000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 modif berdasarkan Gambar 56 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 68000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,27397 menuju -0,48842 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,48842 menuju nilai maksimum 1,238 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,238 menuju 0,98144 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,15959 menuju 0,0368 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,0368 menuju 0,06041 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,06041 menuju 0,27996 pada

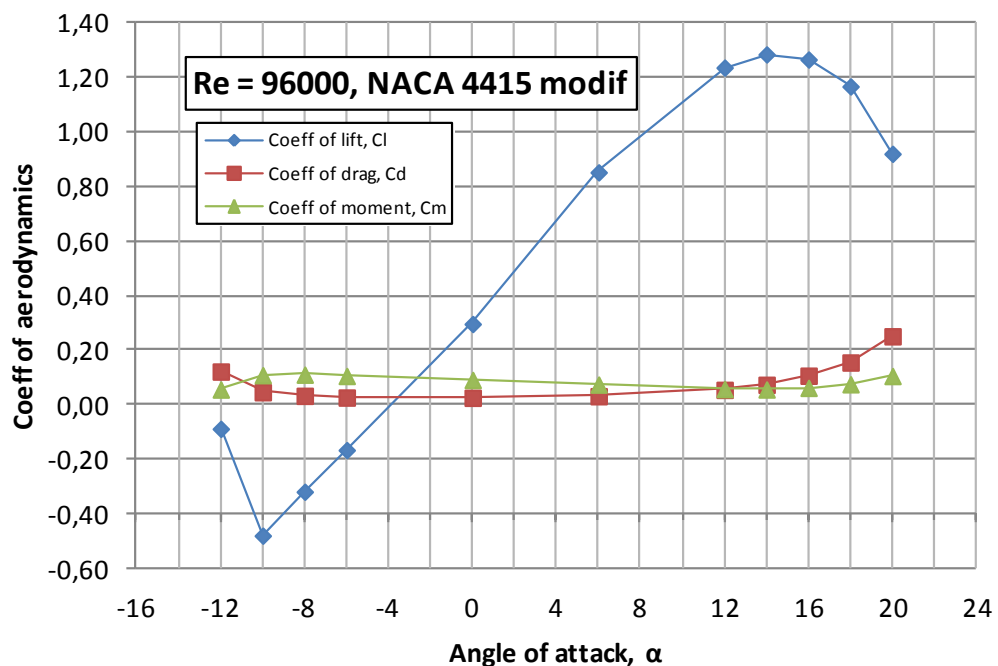
rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,021364 menuju 0,10668 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,10668 menuju 0,056628 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,056628 menuju 0,12005 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.



Gambar 57. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 modif pada $Re = 82000$

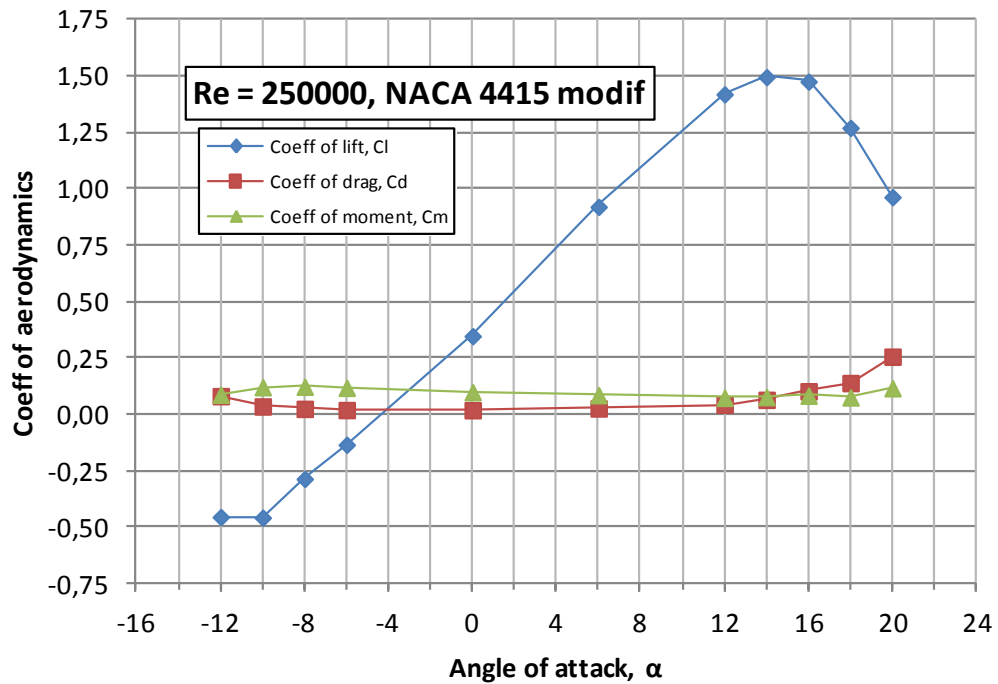
Karakteristik airfoil NACA 4415 modif berdasarkan Gambar 57 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 82000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,22144 menuju -0,48292 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari 0,48292 menuju nilai maksimum 1,2642 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,2642 menuju 0,92467

pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,1452 menuju 0,034737 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,034737 menuju 0,05744 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,05744 menuju 0,27444 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,034077 menuju 0,10933 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,10933 menuju 0,057177 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,057177 menuju 0,11511 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.



Gambar 58. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 modif pada $Re = 96000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 modif berdasarkan Gambar 58 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 96000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,087896 menuju -0,47976 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,47976 menuju nilai maksimum 1,2854 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 14$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,2854 menuju 0,92087 pada rentang nilai sudut serang $14 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,12225 menuju 0,033149 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,033149 menuju 0,055128 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,055128 menuju 0,25153 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,05627 menuju 0,11089 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,11089 menuju 0,057845 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,057845 menuju 0,10585 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.

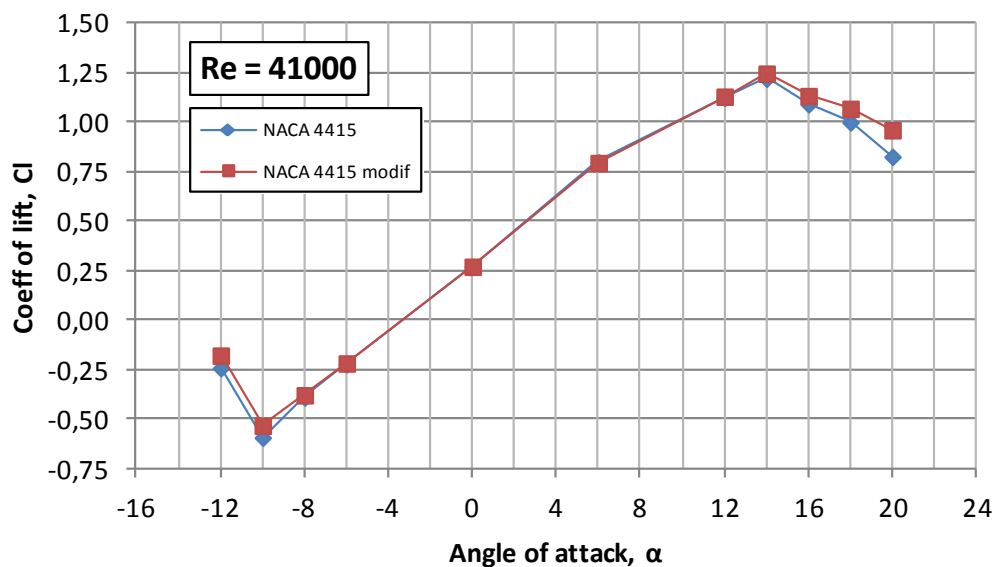


Gambar 59. Kurva koefisien aerodinamik C_l , C_d , terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 modif pada $Re = 250000$

Karakteristik airfoil NACA 4415 modif berdasarkan Gambar 59 pada kondisi aliran dengan bilangan Reynolds 250000 untuk nilai C_l mengalami penurunan dari -0,4559 menuju -0,45883 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat kemudian nilai C_l mulai meningkat secara linier dari -0,45883 menuju nilai maksimum 1,4192 pada rentang nilai sudut serang $-10 \leq \alpha \leq 12$ derajat selanjutnya nilai C_l menurun mulai dari 1,4192 menuju 0,9632 pada rentang nilai sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_d mengalami penurunan dari 0,080473 menuju 0,024011 pada rentang nilai sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_d mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,024011 menuju 0,02588 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 6$ derajat dan nilai C_d mulai meningkat dari 0,02588 menuju 0,2555 pada rentang sudut serang $6 \leq \alpha \leq 20$. Untuk nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai yang mendekati nilai C_d yaitu dari 0,086723 menuju 0,12222 pada rentang nilai sudut

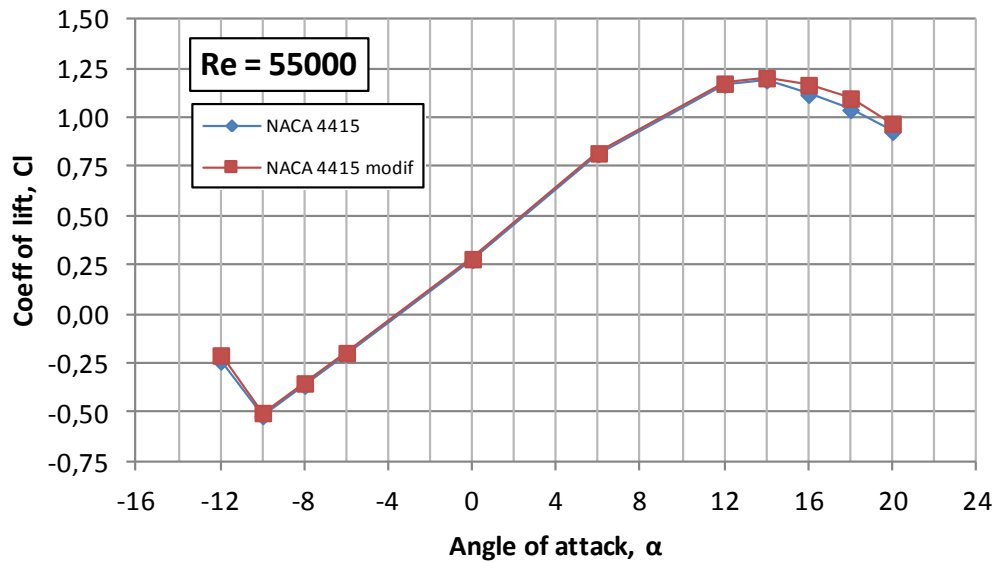
serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat kemudian nilai C_m mempunyai kecenderungan nilai konstan dari 0,12222 menuju 0,072856 pada rentang sudut serang $-8 \leq \alpha \leq 12$ derajat dan nilai C_m mulai meningkat dari 0,072856 menuju 0,11534 pada rentang sudut serang $12 \leq \alpha \leq 20$.

Berdasarkan kurva pada Gambar 47 sampai Gambar 59, maka nilai koefisien aerodinamika untuk airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif dapat dibuat perbandingan kurva koefisien lift terhadap *angle of attack* tampak pada Gambar 60 sampai Gambar 65.



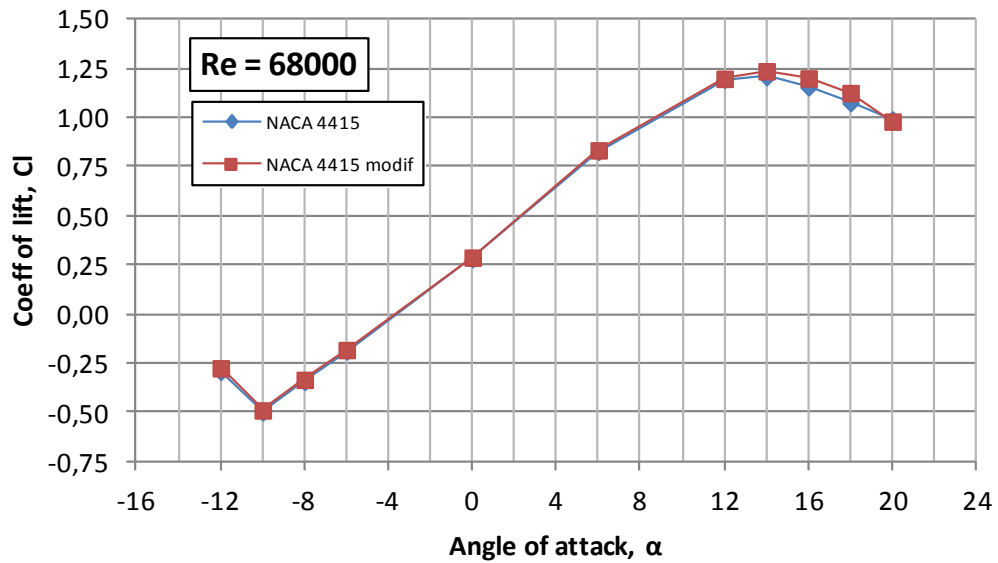
Gambar 60. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 41000$

Berdasarkan Gambar 60, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 41000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -8$ derajat dan pada rentang $14 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 14,8%.



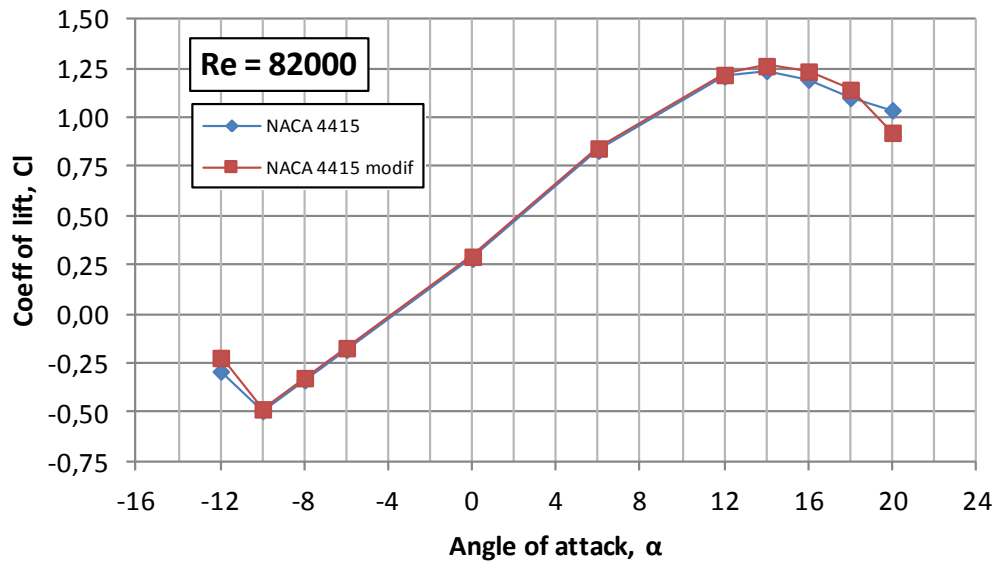
Gambar 61. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 55000$

Berdasarkan Gambar 61, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 55000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat dan pada rentang $14 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 7,2%.



Gambar 62. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 68000$

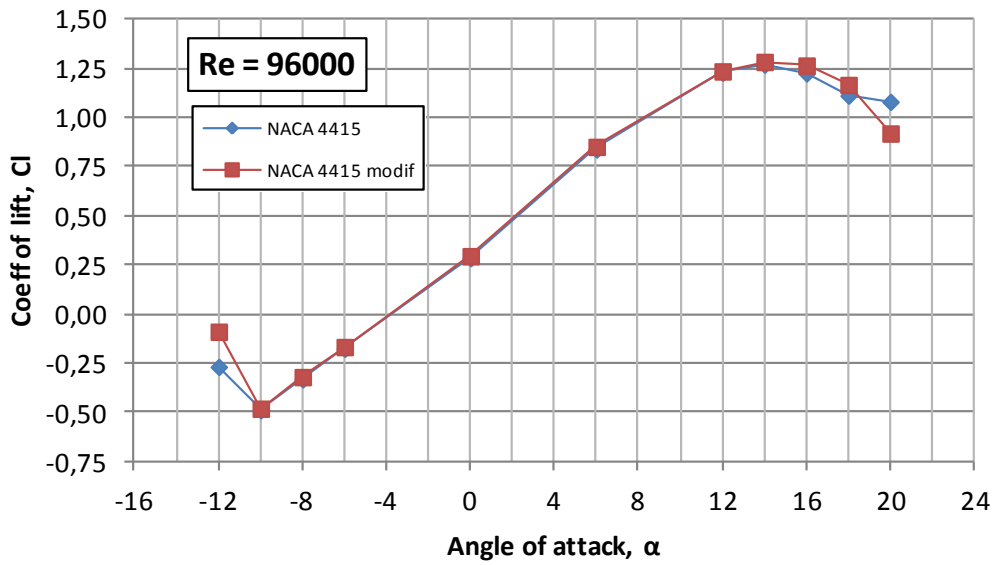
Berdasarkan Gambar 62, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 68000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat dan pada rentang $14 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 4,9%.



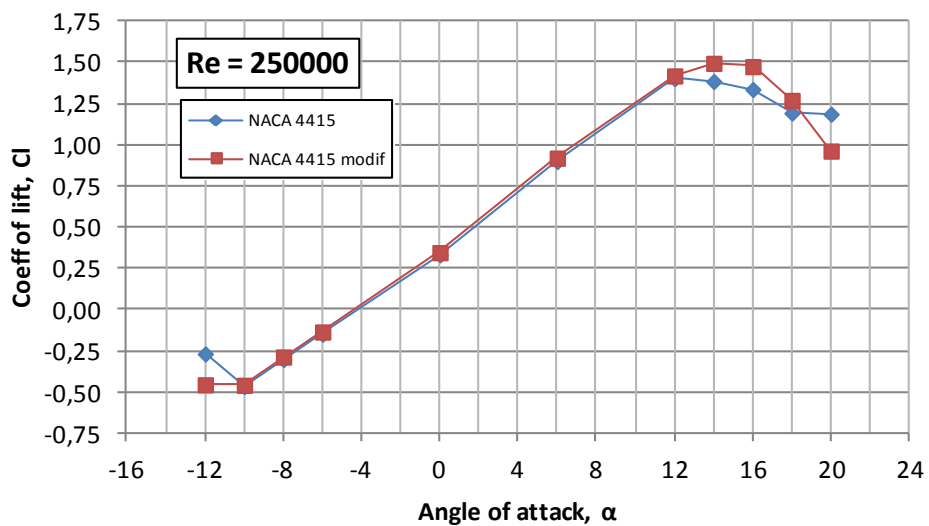
Gambar 63. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 82000$

Berdasarkan Gambar 63, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 82000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat dan pada rentang $14 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 2,3%.

Berdasarkan Gambar 64, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 96000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat dan pada rentang $14 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 4,2%.



Gambar 64. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 96000$

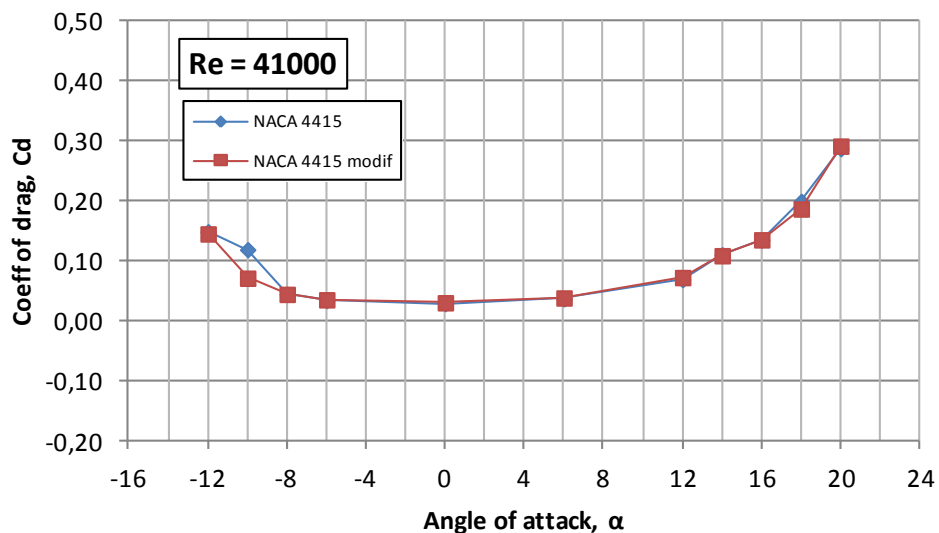


Gambar 65. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 250000$

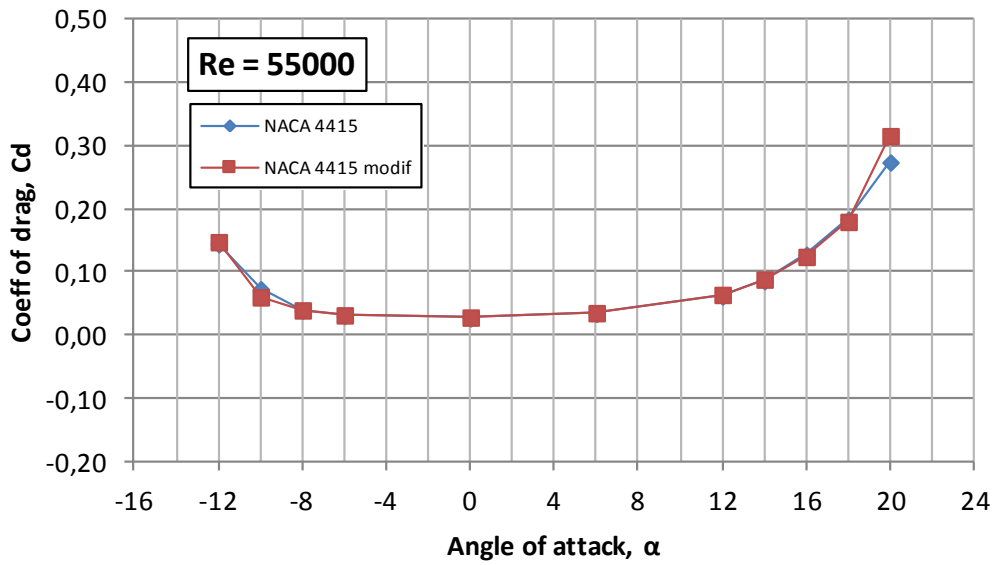
Berdasarkan Gambar 65, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 250000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat dan pada rentang $14 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 2,2%.

Berdasarkan kurva pada Gambar 60 sampai Gambar 65, tampak terlihat bahwa nilai koefisien lift NACA 4415 modif relative lebih besar dari NACA 4415 terutama pada *angle of attack* $-12 < \alpha < -8$ dan $12 < \alpha < 20$.

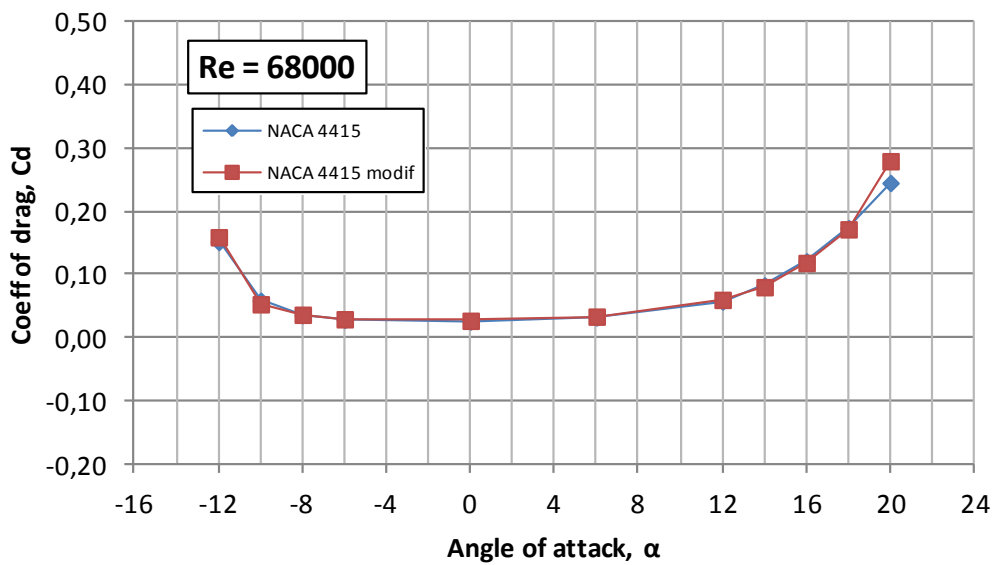
Berdasarkan kurva pada Gambar 47 sampai Gambar 59, maka nilai koefisien aerodinamika untuk airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif dapat dibuat perbandingan kurva koefisien drag terhadap *angle of attack* tampak pada Gambar 66 sampai Gambar 71.



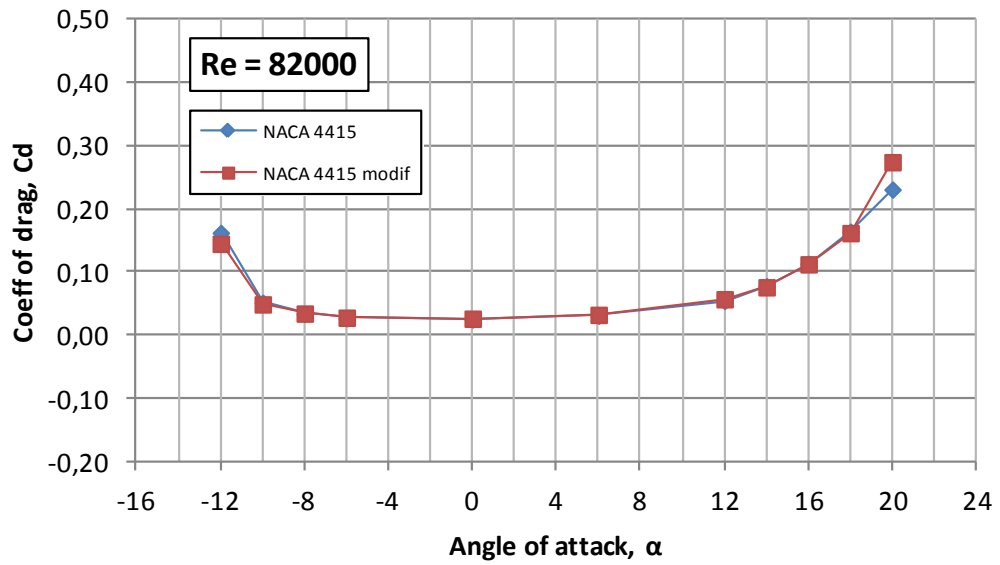
Gambar 66. Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 41000$



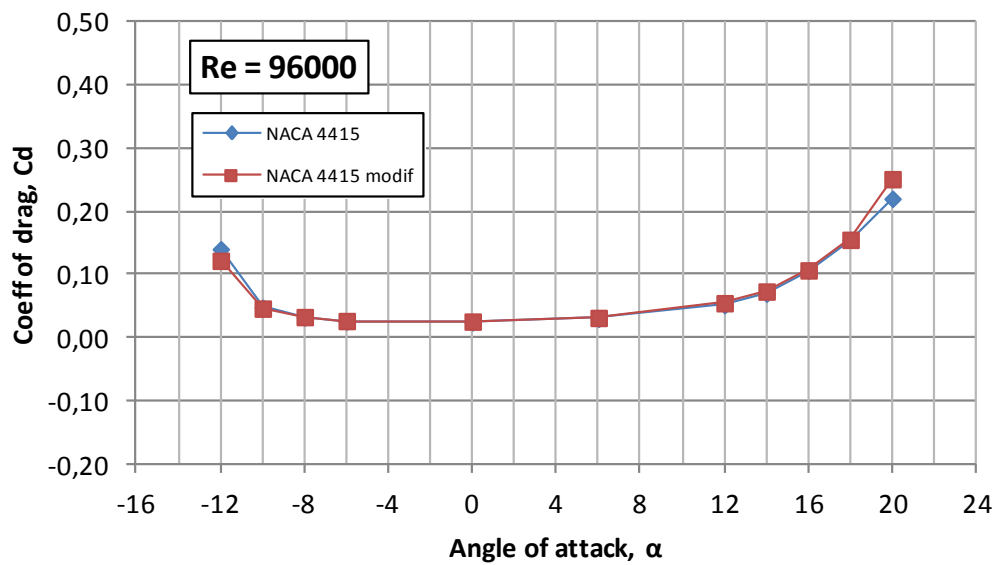
Gambar 67. Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 55000$



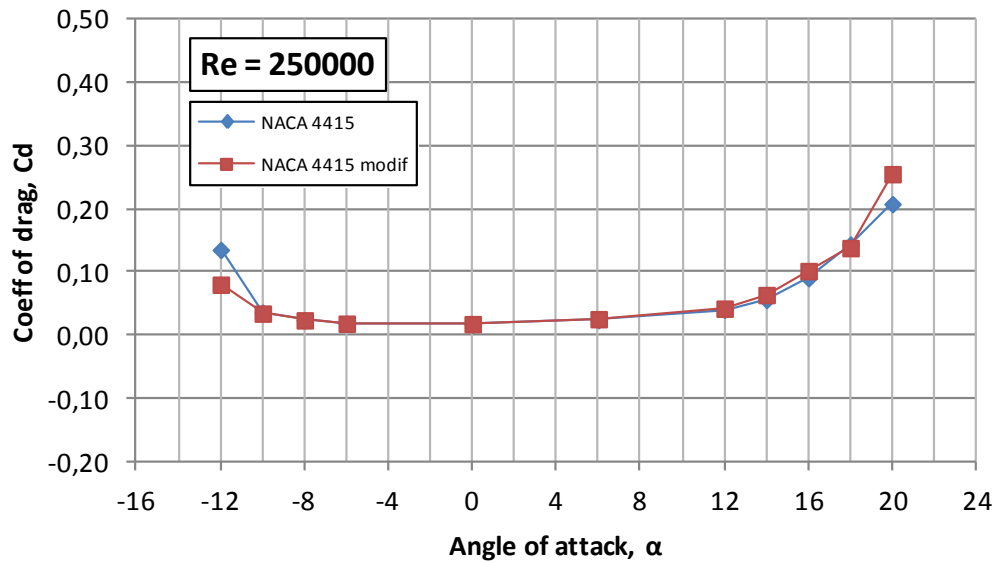
Gambar 68. Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 68000$



Gambar 69. Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 82000$



Gambar 70. Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 96000$

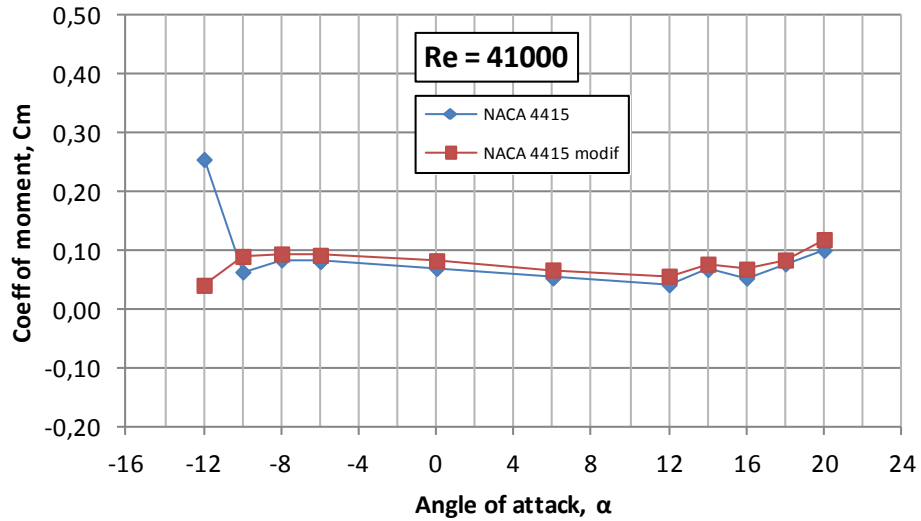


Gambar 71. Kurva koefisien aerodinamik C_d terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 250000$

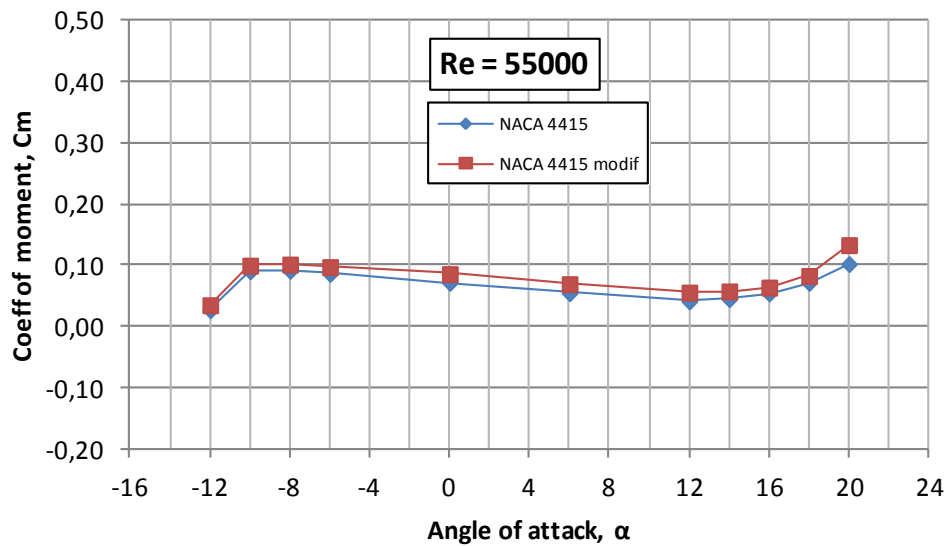
Berdasarkan kurva pada Gambar 66 sampai Gambar 71, tampak terlihat bahwa nilai koefisien drag NACA 4415 modif relative sama (kurva cenderung berhimpit) dengan NACA 4415 terutama pada *angle of attack* $-8 < \alpha < 16$, sehingga relative tidak ada perubahan nilai koefisien drag antara NACA 4415 dengan NACA 4415 modif.

Berdasarkan kurva pada Gambar 47 sampai Gambar 59, maka nilai koefisien aerodinamika untuk airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif dapat dibuat perbandingan kurva koefisien moment terhadap *angle of attack* seperti tampak pada Gambar 72 sampai Gambar 77.

Berdasarkan Gambar 72, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 41000 tampak terlihat terjadi penurunan nilai C_m airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq -10$ derajat dan peningkatan nilai C_m pada rentang $-10 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 37,0%.

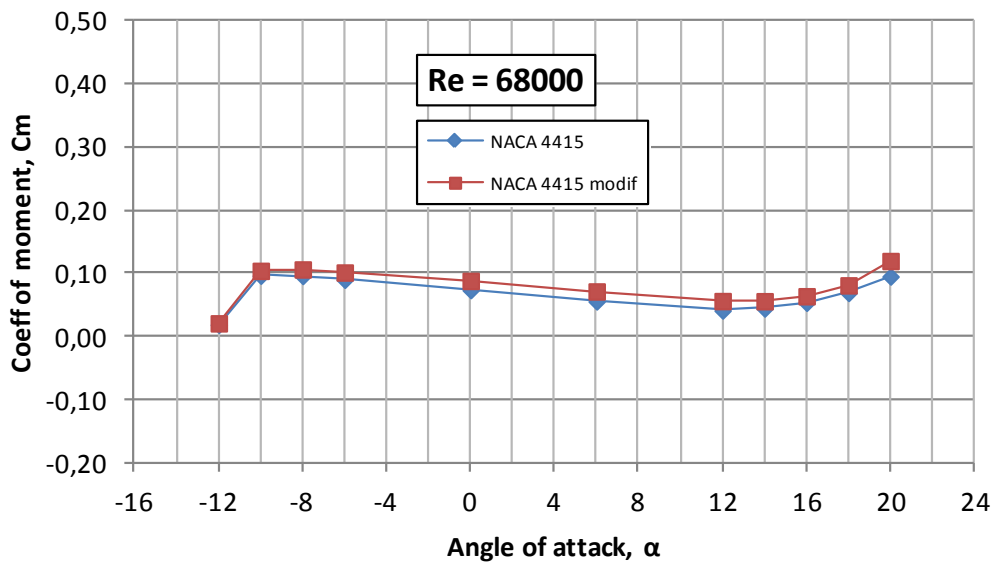


Gambar 72. Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 41000$



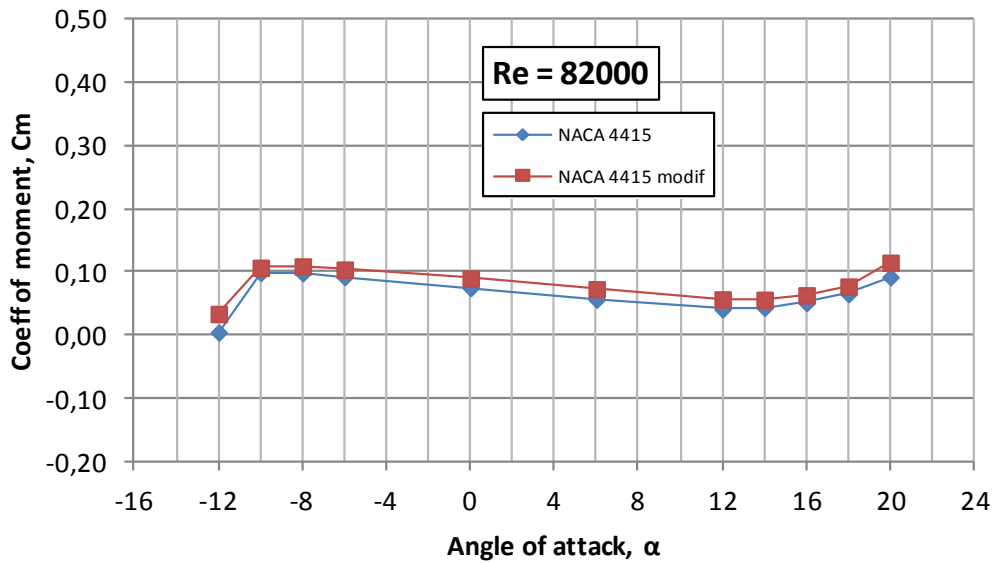
Gambar 73. Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 55000$

Berdasarkan Gambar 73, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 55000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_m airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 19,9%.



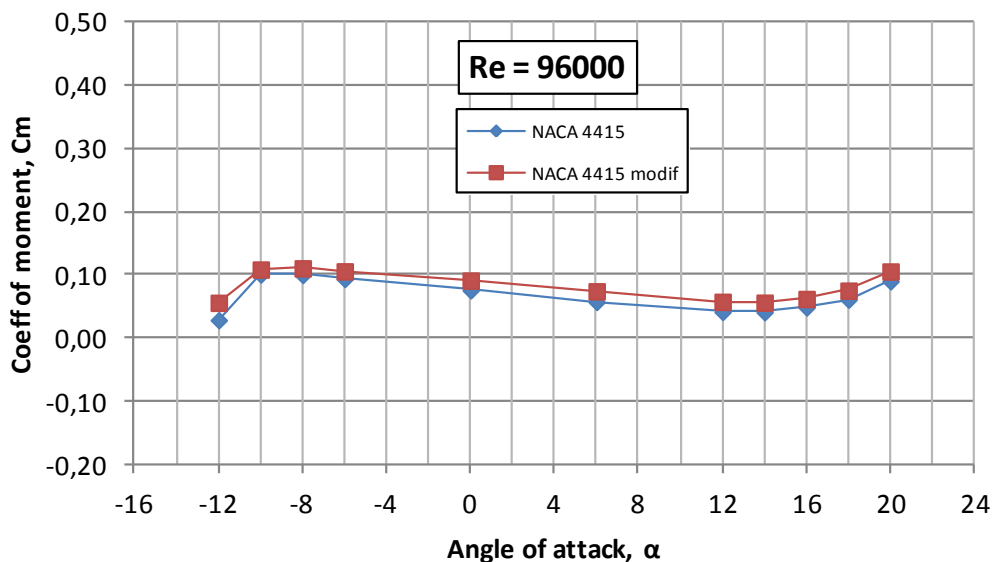
Gambar 74. Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 68000$

Berdasarkan Gambar 74, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 68000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_m airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 18,5%.



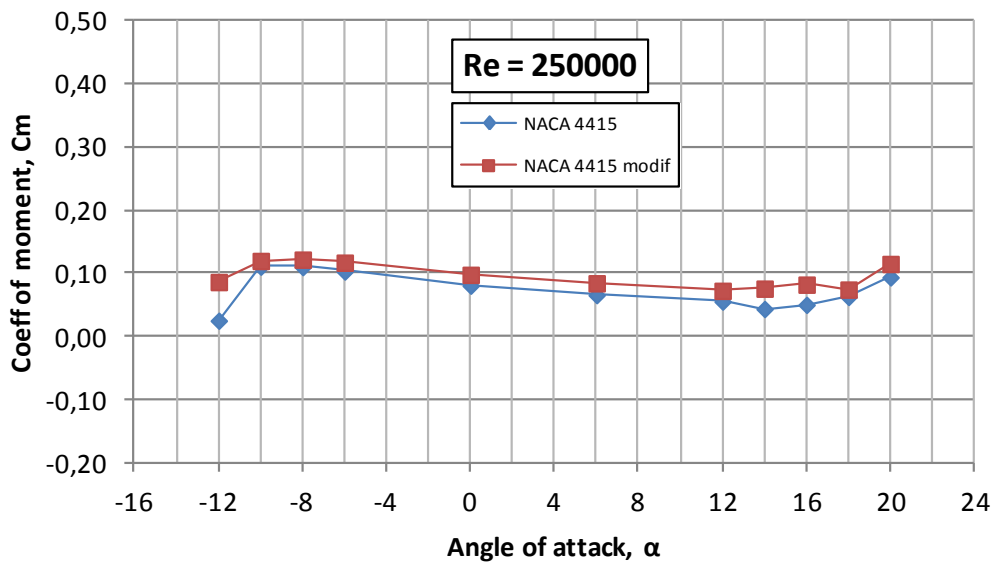
Gambar 75. Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 82000$

Berdasarkan Gambar 75, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 82000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_m airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq 20$ derajat derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 23,1%.



Gambar 76. Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 96000$

Berdasarkan Gambar 76, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 96000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_m airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 22,3%.

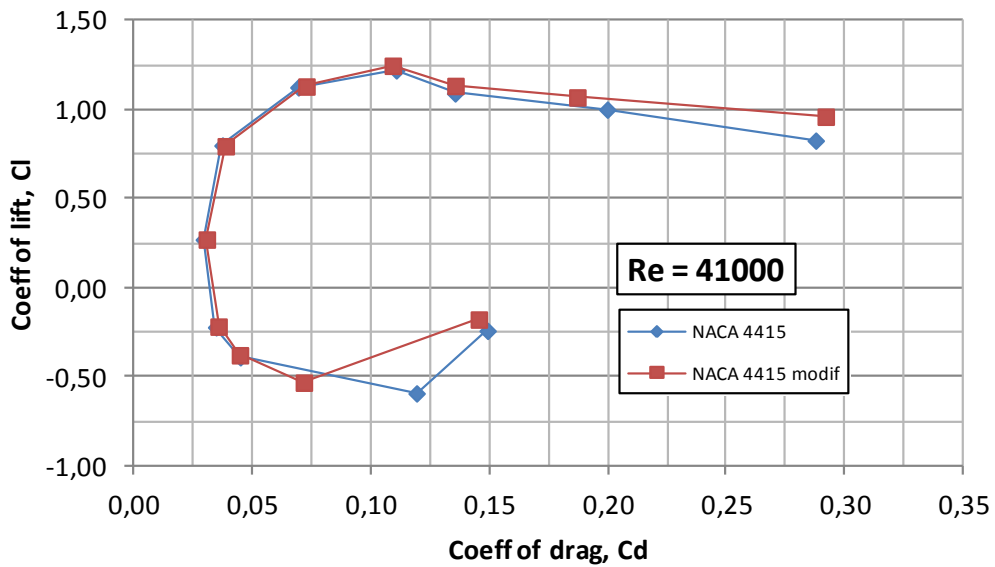


Gambar 77 . Kurva koefisien aerodinamik C_m terhadap *angle of attack* airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 250000$

Berdasarkan Gambar 77, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 250000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_m airfoil NACA 4415 modif pada rentang sudut serang $-12 \leq \alpha \leq 20$ derajat dengan persentase besar peningkatan rata-rata adalah 30,6%.

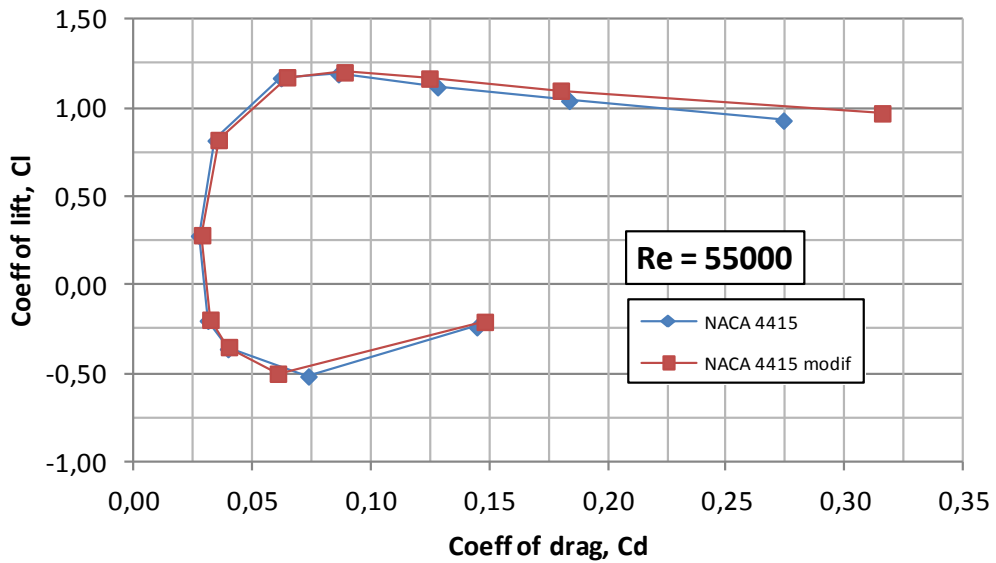
Berdasarkan kurva pada Gambar 78 sampai Gambar 83, tampak terlihat bahwa nilai koefisien moment NACA 4415 modif relatif lebih besar dari NACA 4415 pada *angle of attack* $-12 < \alpha < 20$.

Kinerja airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif dapat ditentukan yang terbaik berdasarkan kurva drag polar yaitu kurva koefisien lift terhadap koefisien drag untuk bilangan Reynolds tertentu, seperti tampak pada Gambar 52.



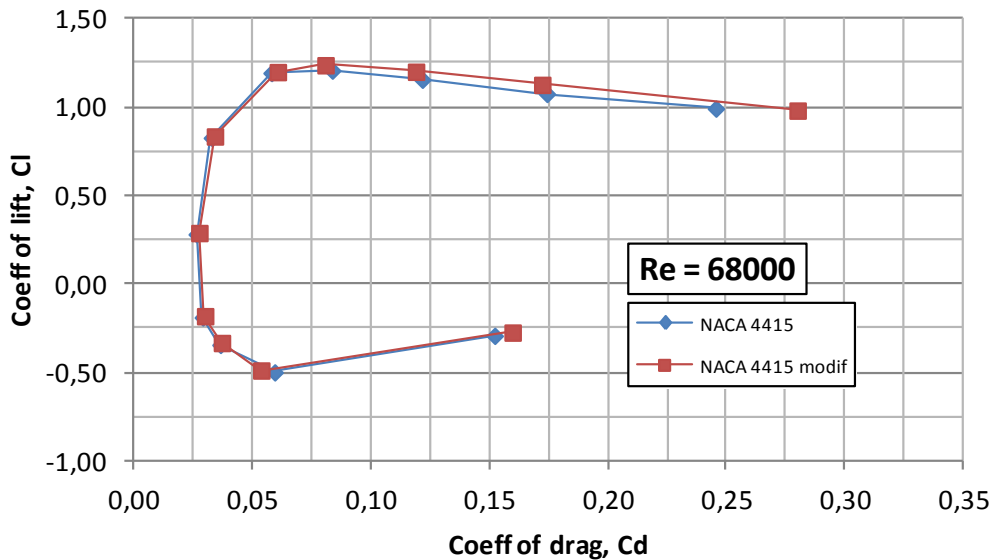
Gambar 78. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 41000$

Berdasarkan Gambar 78, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 41000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 modif dengan persentase peningkatan rata-rata adalah 14,8%.



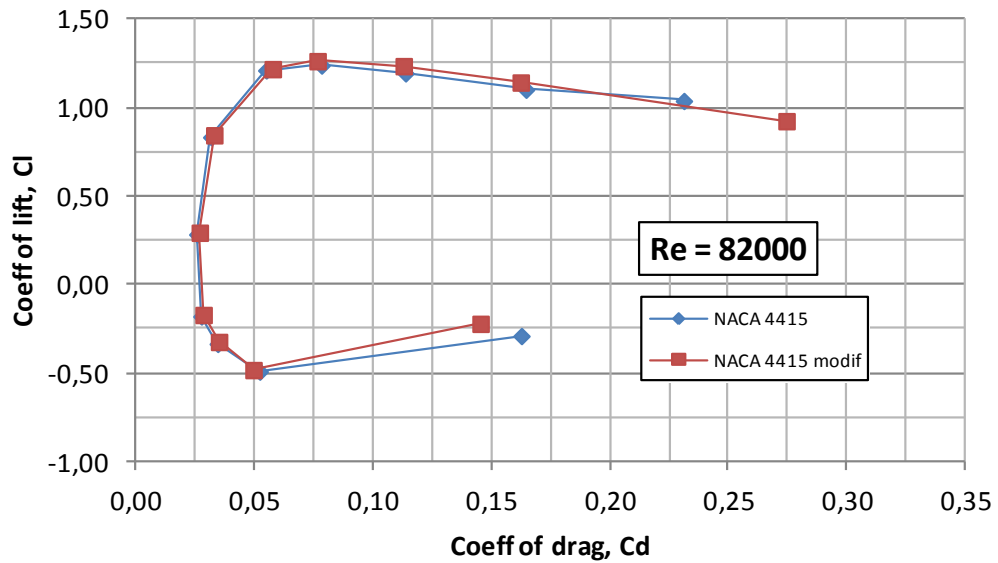
Gambar 79. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 55000$

Berdasarkan Gambar 79, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 55000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 modif dengan persentase peningkatan rata-rata adalah 7,2%.



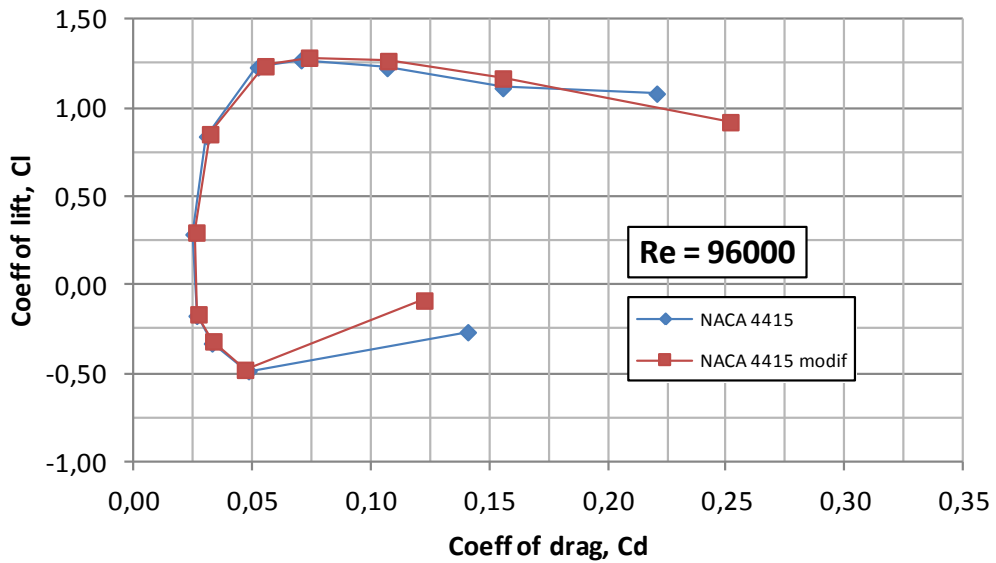
Gambar 80. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 68000$

Berdasarkan Gambar 80, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 68000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 modif dengan persentase peningkatan rata-rata adalah 4,9%.



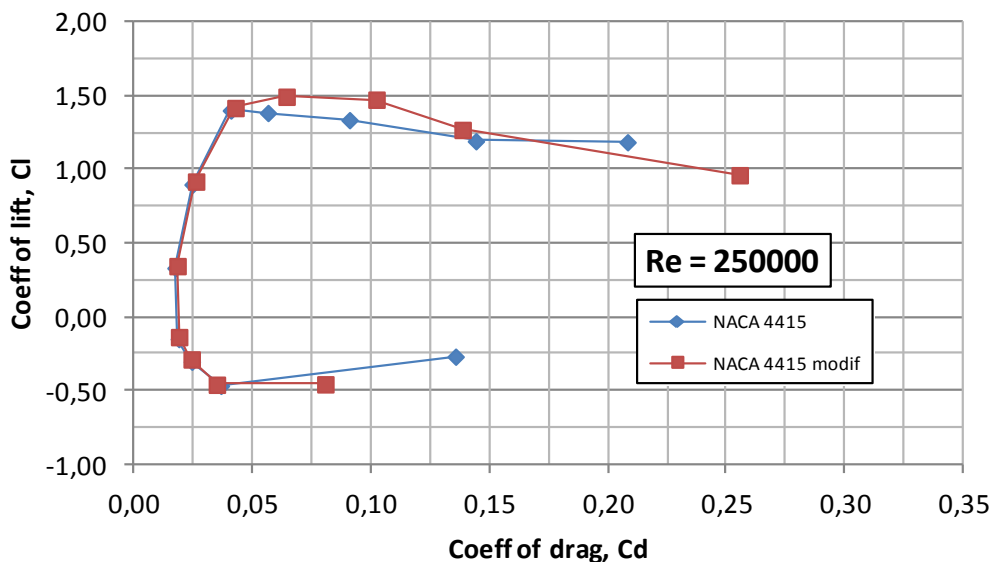
Gambar 81. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 82000$

Berdasarkan Gambar 81, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 82000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 modif dengan persentase peningkatan rata-rata adalah 2,3%.



Gambar 82. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 96000$

Berdasarkan Gambar 82, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 96000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 modif dengan persentase peningkatan rata-rata adalah 4,2%.



Gambar 83. Kurva koefisien aerodinamik C_l terhadap C_d airfoil NACA 4415 dan NACA 4415 modif pada $Re = 250000$

Berdasarkan Gambar 83, pada kondisi aliran udara dengan bilangan Reynolds 250000 tampak terlihat terjadi peningkatan nilai Cl terhadap Cd airfoil NACA 4415 modif dengan persentase peningkatan rata-rata adalah 2,2%.

Berdasarkan kurva pada Gambar 78 sampai Gambar 83, tampak terlihat bahwa kurva drag polar NACA 4415 modif relatif lebih besar dari kurva drag polar NACA 4415.

5. Pemilihan Airfoil sebagai Bentuk Dasar Sudu Turbin Angin

Berdasarkan kurva perbandingan koefisien aerodinamika airfoil NACA 4415 dengan NACA 4415 modif pada Gambar 66 sampai dengan Gambar 83, dapat disimpulkan bahwa airfoil NACA 4415 modif mempunyai kinerja yang lebih baik untuk aliran yang mempunyai bilangan Reynolds 4.1×10^4 sampai dengan 2.5×10^5 .

Berdasarkan kajian numerik yang terjabarkan pada kurva Gambar 60 sampai Gambar 65, maka airfoil NACA 4415 modif dapat digunakan sebagai dasar pembentukan kurva polar 360° dengan cara ekstrapolasi dari -180° sampai 180° .

B. Simulasi Numerik Aliran Melalui Sudu Turbin

Metode ini dapat digunakan untuk analisis perancangan sudu turbin yang dikenal dengan teori Momentum Elemen Sudu (*Blade Element Momentum*) yang digunakan untuk menyelesaikan perancangan sudu turbin berdasarkan kurva gaya angkat dan gaya hambat (drag polar) dari airfoil yang digunakan dalam hal ini airfoil NACA 4415 modif.

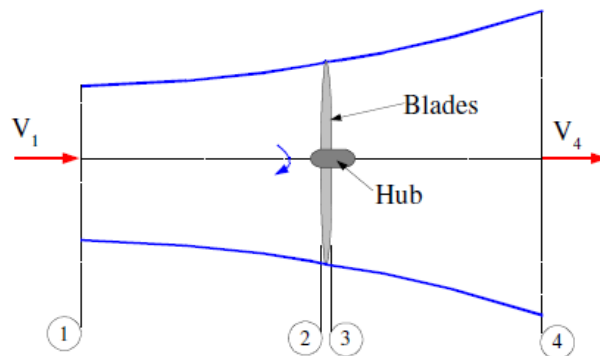
1. Teori Momentum Elemen Sudu (MES)

Teori MES mempunyai dua metode untuk berdasarkan prinsip kerja turbin angin. Metode pertama berdasarkan prinsip kesetimbangan momentum pada aliran berbentuk tabung yang melalui turbin. Metode kedua berdasarkan gaya yang dihasilkan berupa koefisien gaya

angkat dan gaya hambat yang bervariasi pada setiap bagian sepanjang sudu. Dua metode ini memberikan sejumlah persamaan yang dapat dicari solusinya berdasarkan proses iterasi.

a. Teori Momentum

Teori momentum dapat dijelaskan dengan memperhatikan tabung aliran seperti tampak pada Gambar 84 dan Gambar 85.



Gambar 84. Tabung aliran aksial yang melalui turbin angin

Berdasarkan Gambar 84, ada empat posisi yang ditunjukkan yaitu posisi 1 adalah posisi aliran di depan turbin (upstream), posisi 2 adalah posisi aliran sebelum melalui sudu, posisi 3 adalah posisi aliran setelah melalui sudu dan posisi 4 adalah aliran dibelakang turbin (downstream). Diantara posisi 2 dan 3, energi angin di ekstrak yang menyebabkan tekanan posisi 2 dan 3 berbeda.

Berdasarkan asumsi tekanan posisi 1 dan posisi 4 sama $p_1 = p_4$ dan kecepatan posisi 2 dan 3 sama $v_2 = v_3$ serta dapat juga diasumsikan aliran tidak ada gesekan antara posisi 1 dan 2 serta antara posisi 3 dan 4, sehingga persamaan Bernoulli dapat diterapkan untuk menghubungkan perubahan tekanan posisi 2 dan 3 dengan perubahan kecepatan aliran posisi 1 dan 4, dan dengan mendefinisikan satu parameter yang dikenal dengan nama factor induksi aksial a yang dituliskan sebagai :

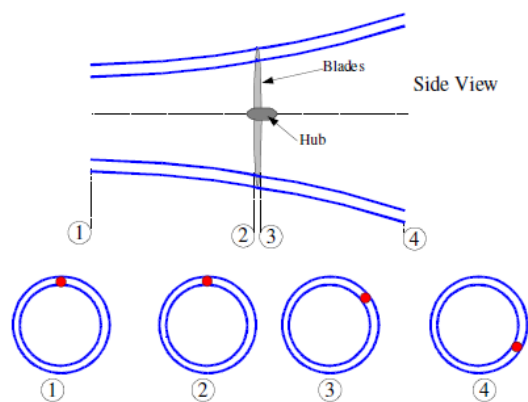
$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (56)$$

Sehingga dapat ditunjukkan bahwa :

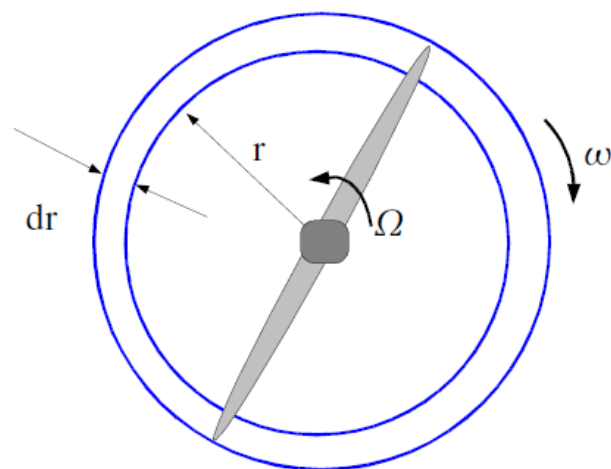
$$V_2 = V_1(1 - a) \quad (57)$$

$$V_4 = V_1(1 - 2a) \quad (58)$$

Tabung aliran annular yang berputar seperti tampak pada Gambar 85 dan notasi besarnya putaran wake sudu ω dan besarnya kecepatan putar sudu Ω , seperti tampak pada Gambar 86.



Gambar 85. Tabung aliran annular yang berputar yang melalui turbin angin



Gambar 86. Notasi tabung aliran annular yang berputar

Berdasarkan Gambar 86, maka dapat didefinisikan parameter yang dikenal dengan nama faktor induksi angular a' yang dapat dituliskan :

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (59)$$

Sehingga berdasarkan persamaan factor induksi aksial (persamaan 56) dan factor induksi angular (persamaan 59), dapat dituliskan gaya aksial F_x dan gaya tangensial atau torsi T yang dapat dituliskan :

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho V_1^2 [4a(1-a)] 2\pi r dr \quad (60)$$

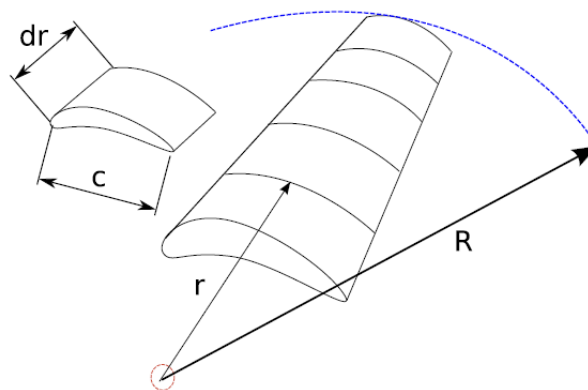
$$dT = 4a'(1-a) \rho V \Omega \pi r^3 dr \quad (61)$$

Persamaan 60 dan 61 dikenal sebagai teori momentum dari turbin angin.

b. Teori Elemen Sudu

Teori elemen sudu dapat ditinjau berdasarkan Gambar 87 dan mempunyai dua asumsi yaitu :

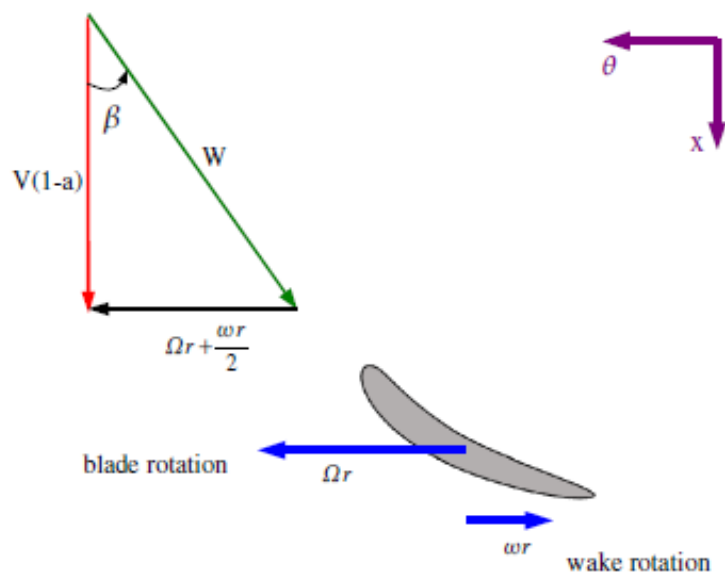
1. Tidak ada interaksi aerodinamika antara elemen-elemen sudu yang berbeda.
2. Gaya-gaya yang bekerja pada elemen sudu ditentukan oleh koefisien gaya angkat dan koefisien gaya hambat.



Gambar 87. Model teori elemen sudu

Berdasarkan Gambar 87, masing-masing elemen akan dilalui oleh kondisi aliran yang mempunyai kecepatan putar yang berbeda sebesar Ωr , panjang chord c yang berbeda dan sudut twist γ yang berbeda pula. Pada umumnya teori elemen sudu membagi sudu menjadi sejumlah elemen sudu yang berjumlah 10 sampai 20 elemen sudu dan menghitung kondisi aliran pada setiap elemen sudu. Karakteristik sudu merupakan integrasi numerik sepanjang span sudu.

Kondisi aliran yang melalui sudu dapat dianalisis menggunakan segitiga kecepatan seperti tampak pada Gambar 88.



Gambar 88. segitiga kecepatan aliran pada potongan sudu

Berdasarkan Gambar 88, kecepatan putar sudu Ωr dan kecepatan putar wake sudu ωr dapat dituliskan sebagai :

$$\Omega r + \frac{\omega r}{2} = \Omega r(1 + a') \quad (62)$$

Dan sudut aliran β dapat dituliskan sebagai :

$$\tan \beta = \frac{\Omega r(1 + a')}{V(1 - a)} \quad (63)$$

Dimana V adalah dapat mempresentasikan kecepatan V_1 dan nilai sudut β bervariasi dari suatu elemen sudu terhadap elemen sudu yang lain. Tip speed ratio local λ_r dapat dituliskan sebagai :

$$\lambda_r = \frac{\Omega \cdot r}{V} \quad (64)$$

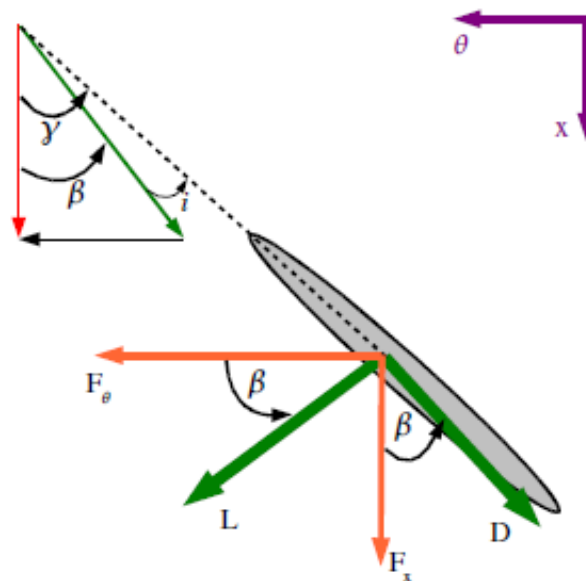
Sehingga sudut aliran β (persamaan 63) dapat ditulis ulang menjadi :

$$\tan \beta = \frac{\lambda_r(1 + a')}{(1 - a)} \quad (65)$$

Dan kecepatan relatif angin dapat dituliskan sebagai :

$$W = \frac{V(1 - a)}{\cos \beta} \quad (66)$$

Gaya-gaya yang bekerja pada sudu turbin seperti tampak pada Gambar 89.



Gambar 89. Gaya-gaya yang bekerja pada sudu turbin.

Gaya-gaya yang bekerja pada sudu turbin berdasarkan gaya angkat elemen sudu dL dan gaya hambat elemen sudu dD yang tegak lurus dan sejajar aliran udara pada setiap elemen sudu dapat dituliskan sebagai :

$$dF_{\theta} = dL \cos \beta - dD \sin \beta \quad (67)$$

$$dF_x = dL \sin \beta - dD \cos \beta \quad (68)$$

Dimana dL dan dD dapat dituliskan sebagai :

$$dL = C_L \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (69)$$

$$dD = C_D \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (70)$$

Dan koefisien gaya angkat C_L dan koefisien gaya hambat C_D untuk airfoil NACA 4415 modif seperti tampak pada Gambar 90.

Jika jumlah sudu turbin angin adalah N buah, maka gaya yang bekerja pada elemen sudu dapat dituliskan ulang menjadi :

$$dF_{\theta} = N \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) c dr \quad (71)$$

$$dF_x = N \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta) c dr \quad (72)$$

Torsi yang bekerja pada elemen sudu dapat dituliskan sebagai :

$$dT = N \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) c r dr \quad (73)$$

Jika faktor kepadatan sudu local pada radius r didefinisikan sebagai :

$$\sigma' = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (74)$$

maka gaya aksial yang bekerja pada elemen sudu dF_x dan torsi yang bekerja pada elemen sudu dT dapat dituliskan ulang menjadi :

$$dF_x = \sigma \cdot \pi \rho \frac{V^2 (1-a)^2}{\cos^2 \beta} (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta) r dr \quad (75)$$

$$dT = \sigma \cdot \pi \rho \frac{V^2 (1-a)^2}{\cos^2 \beta} (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) r^2 dr \quad (76)$$

C. Koreksi Rugi-rugi pada Tepi Sudu (*Tip Loss Correction*)

Rugi-rugi pada tepi sudu turbin akibat pusaran angin pada tepi sudu turbin dapat dihitung menggunakan MES berdasarkan factor koreksi rata-rata Q yang bervariasi nilainya dari 0 sampai 1 yang dapat dituliskan sebagai :

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left\{ - \left(\frac{0.5N[1-r/R]}{[r/R] \cos \beta} \right) \right\} \right] \quad (77)$$

Nilai \cos^{-1} dalam satuan radian. Koreksi rugi-rugi tepi sudu dapat diterapkan pada gaya aksial dan torsi yang ditulis ulang sebagai :

$$dF_x = Q \rho V_1^2 [4a(1-a)] \pi r dr \quad (78)$$

$$dT = Q 4a(1-a) \rho V \Omega \pi r^3 dr \quad (79)$$

Prosedur perancangan sudu turbin dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta)}{4Q \cos^2 \beta} \quad (80)$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta)}{4Q \lambda_r \cos^2 \beta} \quad (81)$$

D. Daya yang Dihasilkan (Power Output)

Total daya yang dihasilkan oleh sudu turbin yang berputar dapat dituliskan sebagai :

$$P = \int_{r_h}^R \Omega dT dr \quad (82)$$

Dimana r_h adalah radius hub. Koefisien daya (power coefficient C_p dapat dituliskan sebagai :

$$C_p = \frac{P}{P_{angin}} = \frac{\int_{r_h}^R \Omega dT dr}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} Q \lambda_r^3 a' (1-a) \left[1 - \frac{C_D}{C_L} \tan \beta \right] d\lambda_r \quad (83)$$

E. Prosedur Perancangan Sudu

1. Menentukan diameter sudu berdasarkan daya yang dibutuhkan $P = C_p 0.5 \rho \pi R^2 V^3$, dengan pedoman nilai $C_p = 0.3$ sampai 0.4 untuk turbin modern yang mempunyai 3 sudu
2. Memilih tip speed ratio λ dengan pedoman ($4 < \lambda < 10$) dan memilih jumlah sudu N berdasarkan data empirik pada tabel di bawah ini.

λ	N
1	8 – 24
2	6 – 12
3	3 – 6
4	3 – 4
Lebih dari 4	1 – 3

3. Memilih jenis airfoil (untuk $\lambda < 3$ dapat menggunakan plat melengkung) dan menentukan Koefisien gaya angkat dan gaya hambat dari airfoil yang digunakan. (dalam satu sudu dapat menggunakan jenis airfoil yang berbeda sepanjang span sudu).
4. Menentukan kondisi aerodinamika masing-masing airfoil yang digunakan, pada umumnya 80% gaya angkat maksimum untuk dapat menentukan sudut twist sudu

yang efektif. Sudut twist terbesar terjadi pada elemen sudu dekat hub turbin dan lebih besar dari sudut serang (*angle of attack*).

- Menentukan distribusi panjang chord c airfoil yang digunakan berdasarkan pendekatan, rumus pendekatan tersebut menghasilkan bentuk sudu yang kompleks dan dirancang ulang bentuk sudunya berdasarkan prinsip hubungan linier.

$$c = \frac{8\pi r \cos \beta}{3N\lambda_r} \quad (84)$$

- Membagi sudu menjadi sejumlah k elemen sudu, pada umumnya dalam rentang nilai $10 < k < 20$
- Untuk menentukan kondisi awal iterasi, dapat menggunakan pendekatan sudut aliran β dan factor induksi aksial a dan angular a' sebagai berikut :

$$\beta = 90^\circ - \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) \quad (85)$$

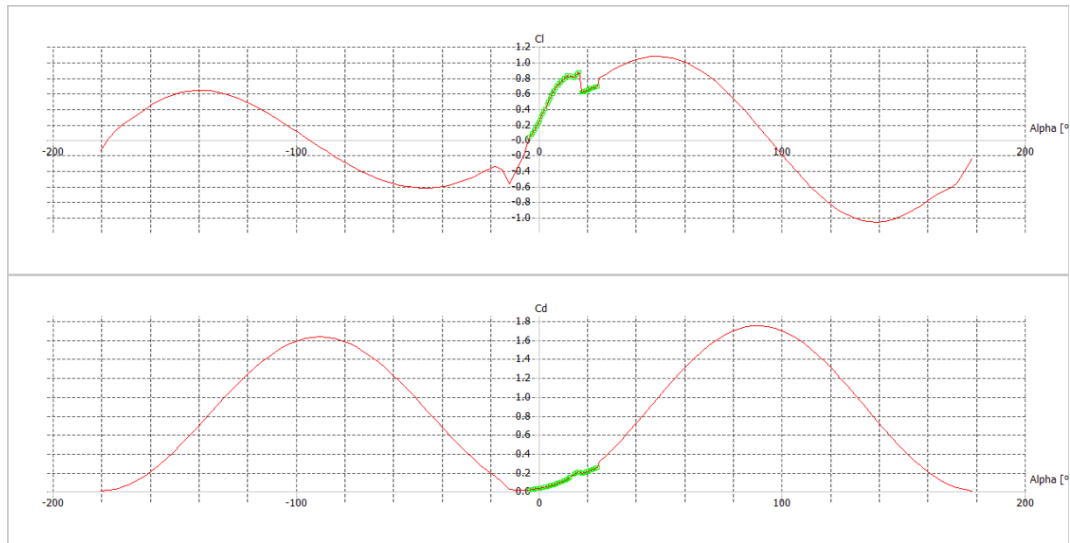
$$a = \left(1 + \frac{4 \cos^2 \beta}{\sigma' C_L \sin \beta} \right)^{-1} \quad (86)$$

F. Perancangan Turbin Angin

1. Kurva Polar 360°

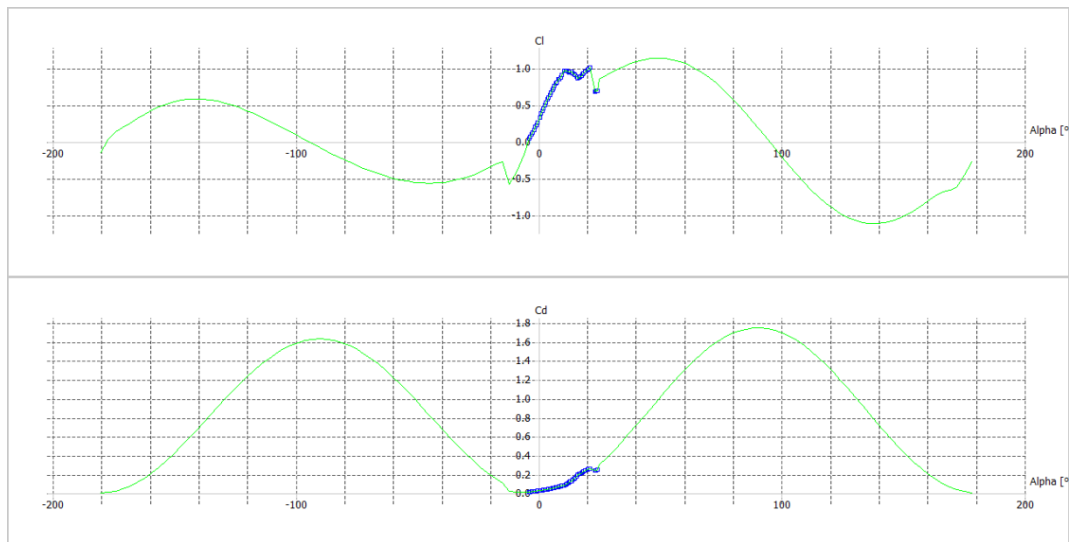
Perancangan sudu turbin angin berdasarkan bentuk elemen airfoil NACA 4415 modif diawali dengan membuat kurva polar 360° dengan cara melakukan ekstrapolasi dari -180° sampai +180° terhadap kurva drag polar pada Gambar 60 sampai Gambar 65.

Hasil ekstrapolasi untuk membentuk kurva polar 360° pada kondisi kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s berdasarkan kurva C_l dan C_d terhadap α pada $Re = 41000$ sampai $Re = 250000$ seperti tampak pada Gambar 90 sampai Gambar 95.



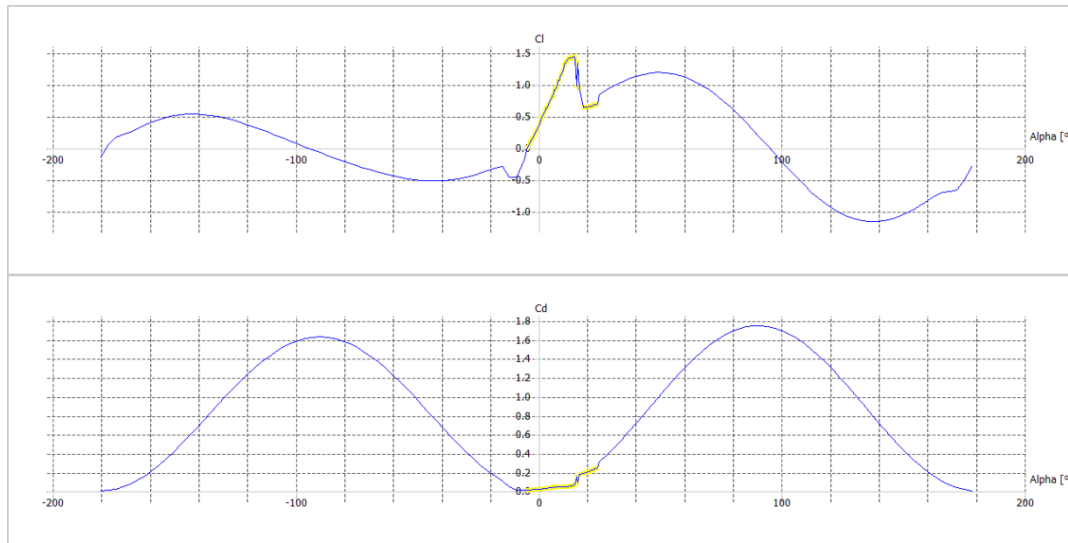
Gambar 90. Kurva Polar 360° pada kecepatan angin 3 m/s

Gambar 90 adalah kurva Polar 360° hasil ekstrapolasi dari -180° sampai +180° kurva C_l dan C_d terhadap α (Gambar 60) pada kondisi kecepatan angin 3 m/s.



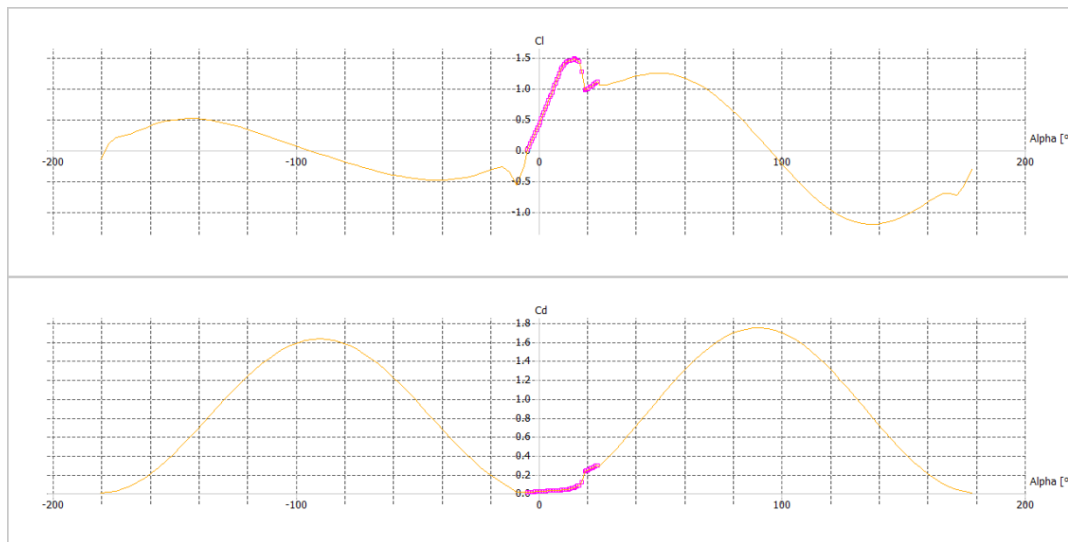
Gambar 91. Kurva Polar 360° pada kecepatan angin 4 m/s

Gambar 91 adalah kurva Polar 360° hasil ekstrapolasi dari -180° sampai +180° kurva C_l dan C_d terhadap α (Gambar 61) pada kondisi kecepatan angin 4 m/s.



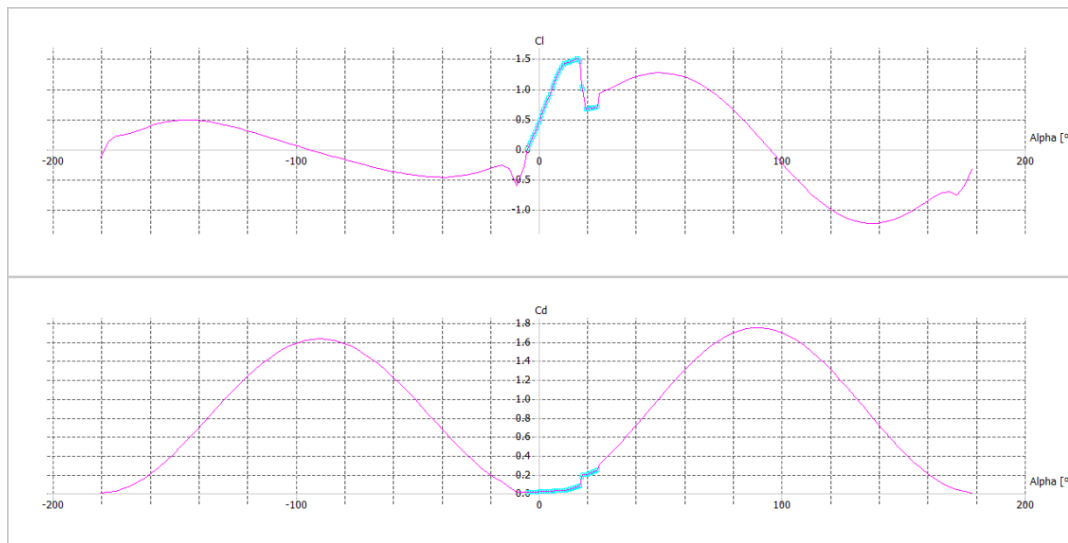
Gambar 92. Kurva Polar 360° pada kecepatan angin 5 m/s

Gambar 92 adalah kurva Polar 360° hasil ekstrapolasi dari -180° sampai +180° kurva C_l dan C_d terhadap α (Gambar 62) pada kondisi kecepatan angin 5 m/s.



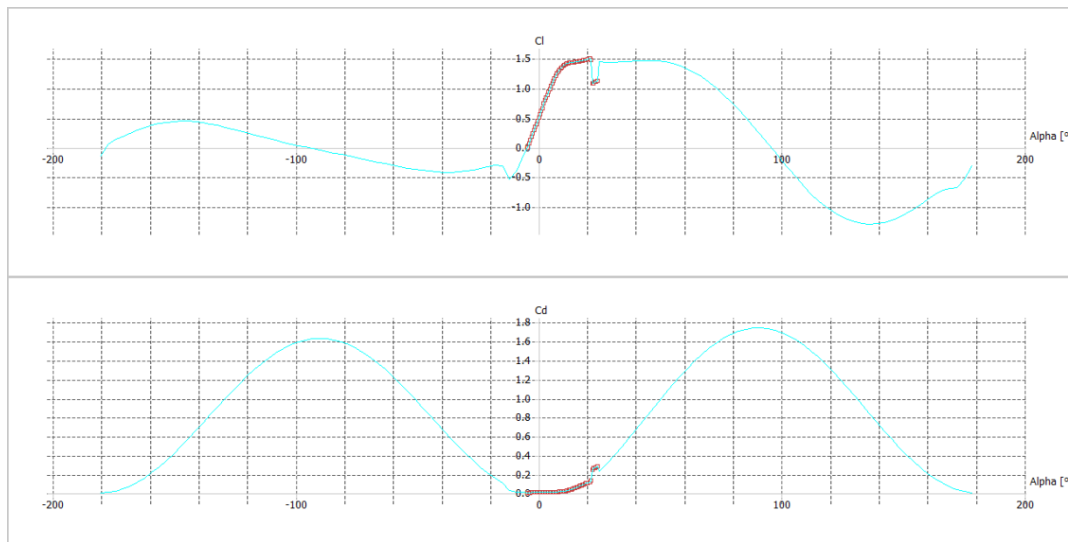
Gambar 93. Kurva Polar 360° pada kecepatan angin 6 m/s

Gambar 93 adalah kurva Polar 360° hasil ekstrapolasi dari -180° sampai +180° kurva C_l dan C_d terhadap α (Gambar 63) pada kondisi kecepatan angin 6 m/s.



Gambar 94. Kurva Polar 360° pada kecepatan angin 7 m/s

Gambar 94 adalah kurva Polar 360° hasil ekstrapolasi dari -180° sampai +180° kurva Cl dan Cd terhadap α (Gambar 64) pada kondisi kecepatan angin 7 m/s.



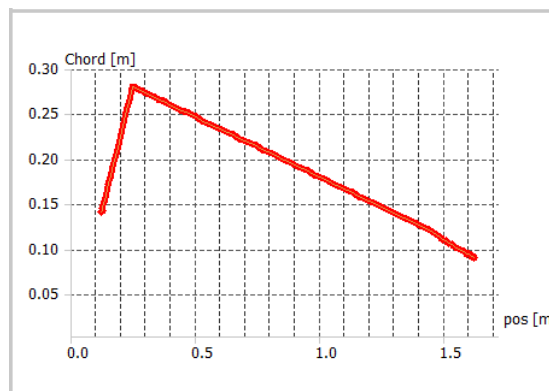
Gambar 95. Kurva Polar 360° pada kecepatan angin 18 m/s

Gambar 95 adalah kurva Polar 360° hasil ekstrapolasi dari -180° sampai +180° kurva Cl dan Cd terhadap α (Gambar 65) pada kondisi kecepatan angin 18 m/s.

2. Perancangan Sudu dan Rotor Turbin berdasar NACA 4415 modif

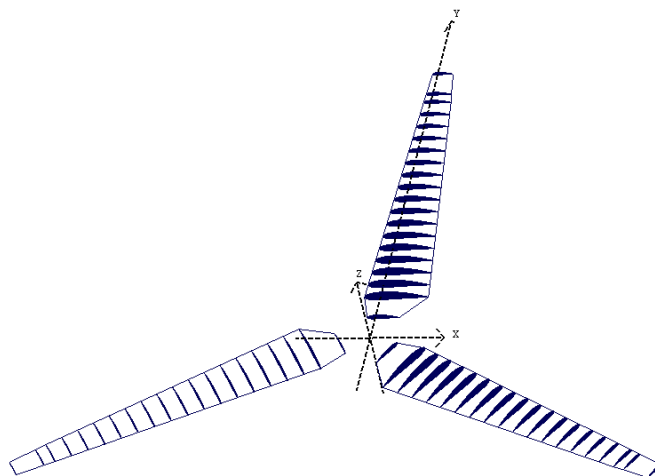
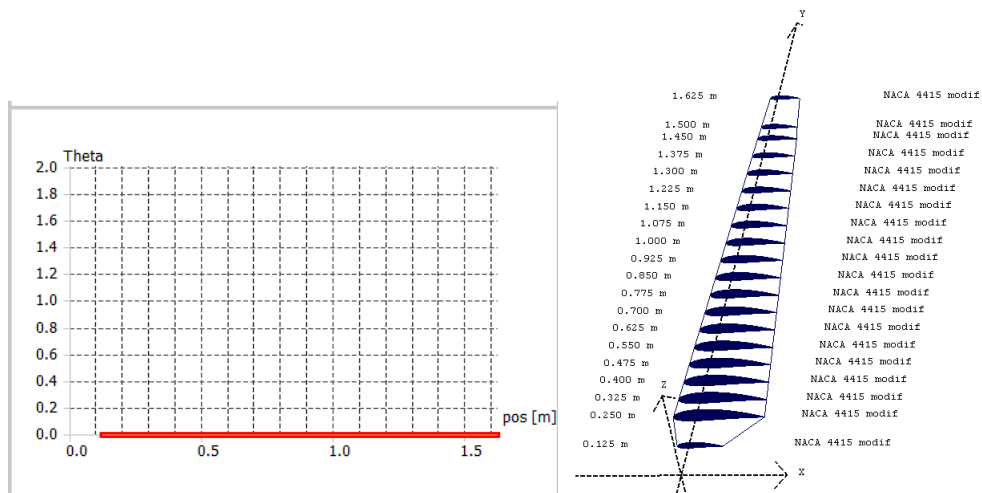
Perancangan sudu turbin didasarkan pada kondisi kecepatan angin Indonesia pada umumnya dan kondisi kecepatan angin di daerah Pandansimo – Yogyakarta pada khususnya yang mempunyai kecepatan rata-rata 3 sampai 5 m/s dan potensi energi angin yang akan diekstrak adalah 1000 Watt atau 1 kW, sehingga kondisi awal perancangan sudu mempunyai dimensi panjang sudu 1.50 m dan pada kondisi simulasi diabaikan rugi-rugi tepi sudu sehingga panjang sudu diperpanjang menjadi 1.625 m.

Berdasarkan persamaan 84, maka dapat dibentuk sudu turbin yang mempunyai elemen airfoil dengan panjang chord yang bervariasi terhadap posisi radial seperti tampak pada Gambar 96.



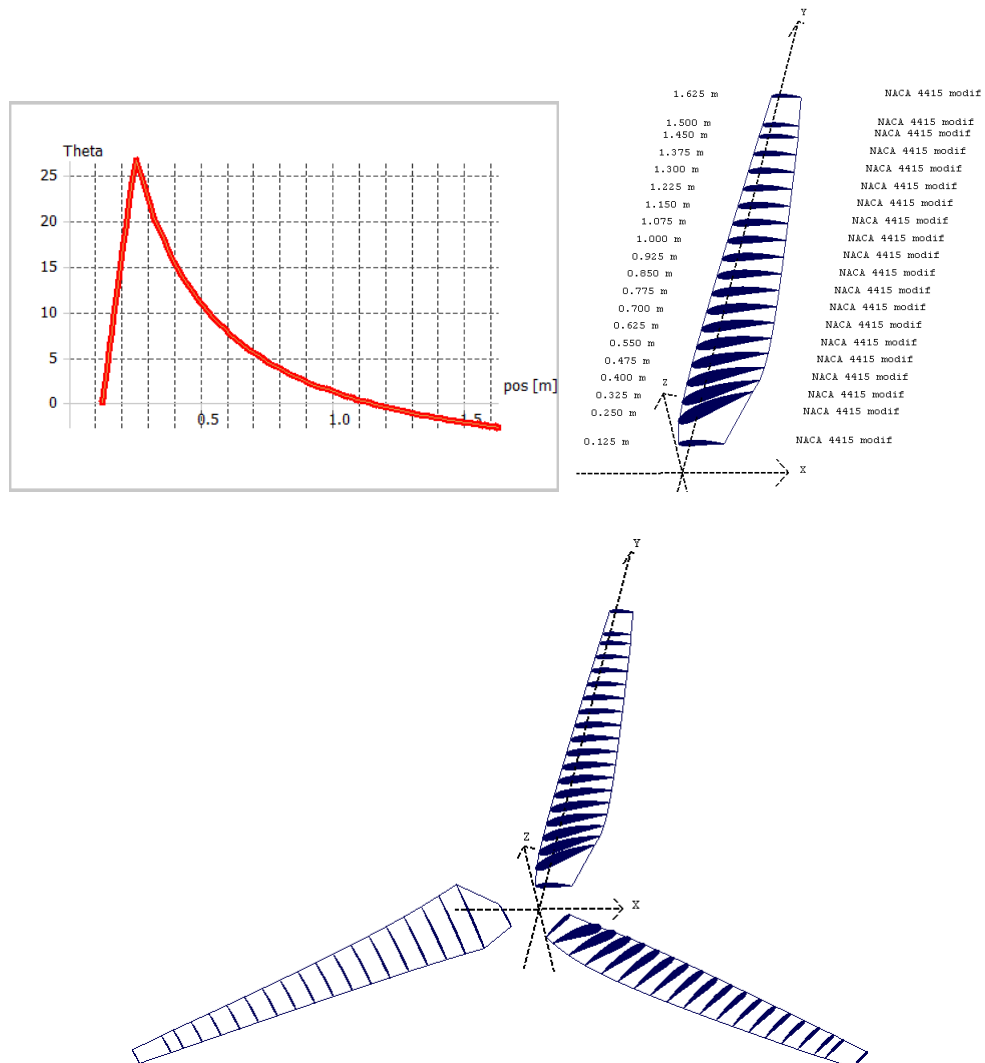
Gambar 96. Distribusi panjang chord pada 20 elemen airfoil NACA 4415 modif sepanjang sudu (posisi radial pada sudu) 1,625 m.

Serta berdasarkan persamaan 85, perancangan sudu turbin didasarkan pada distribusi sudut twist (θ) elemen sudu yang berbeda (terdiri dari 4 variasi distribusi θ yang selanjutnya akan disebut Rancangan Sudu A, B, C dan D) dan bentuk rotor turbin yang terdiri dari 3 sudu pada kondisi kecepatan angin tertentu, seperti tampak pada Gambar 97 sampai Gambar 100.



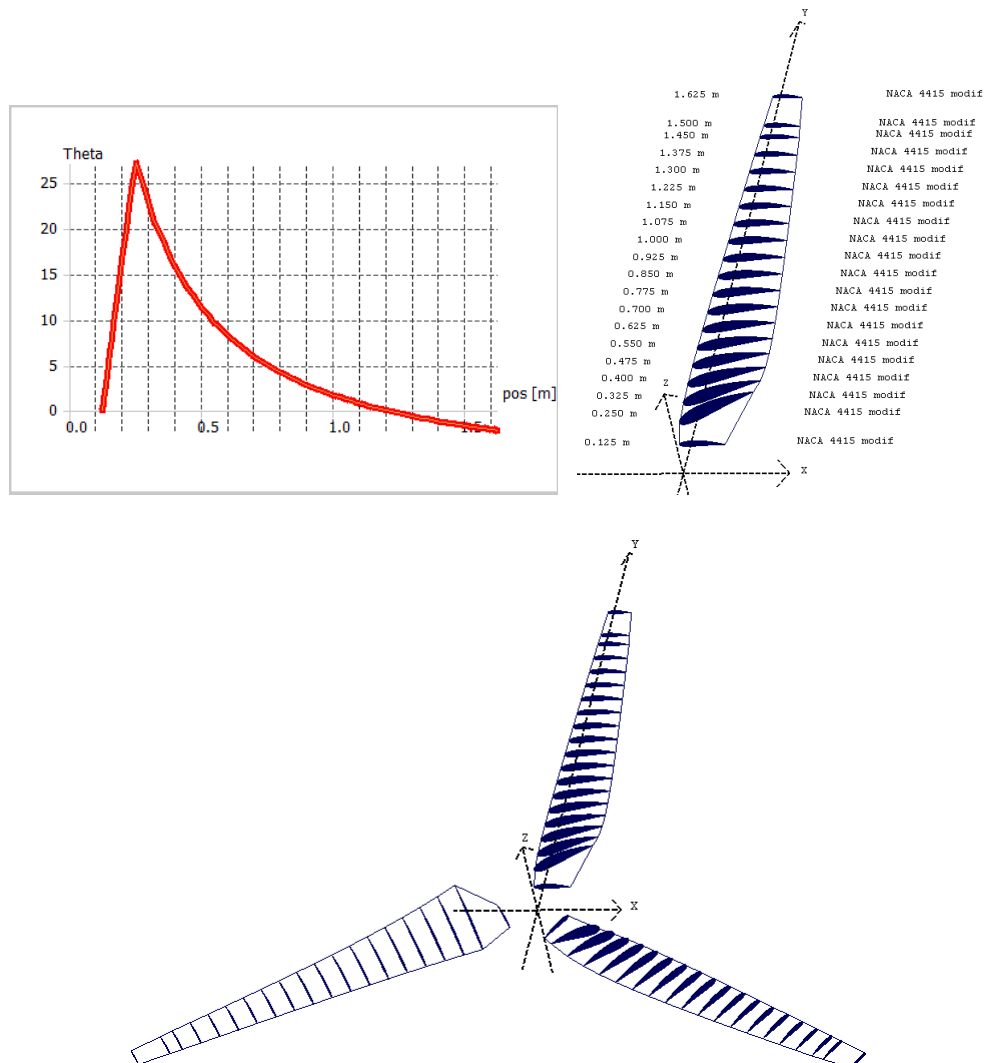
Gambar 97. Rancangan Sudu A, distribusi 20 elemen airfoil NACA 4415 modif pada sudu dan rotor turbin angin pada sudut twist, $\theta=0^\circ$ (pangkal sudu) sampai $\theta=0^\circ$ (tepi sudu).

Gambar 97 memvisualisasi Rancangan Sudu A yang mempunyai distribusi elemen sudu airfoil NACA 4415 modif yang mempunyai sudut twist θ yang merata yaitu 0° pada pangkal sudu sampai tepi sudu. Bentuk rancangan sudu pada Gambar 97 merupakan bentuk dasar tanpa proses optimalisasi yang bertujuan sebagai rancangan rujukan untuk proses rancangan sudu dengan proses optimalisasi seperti tampak pada Gambar 98 sampai Gambar 100.



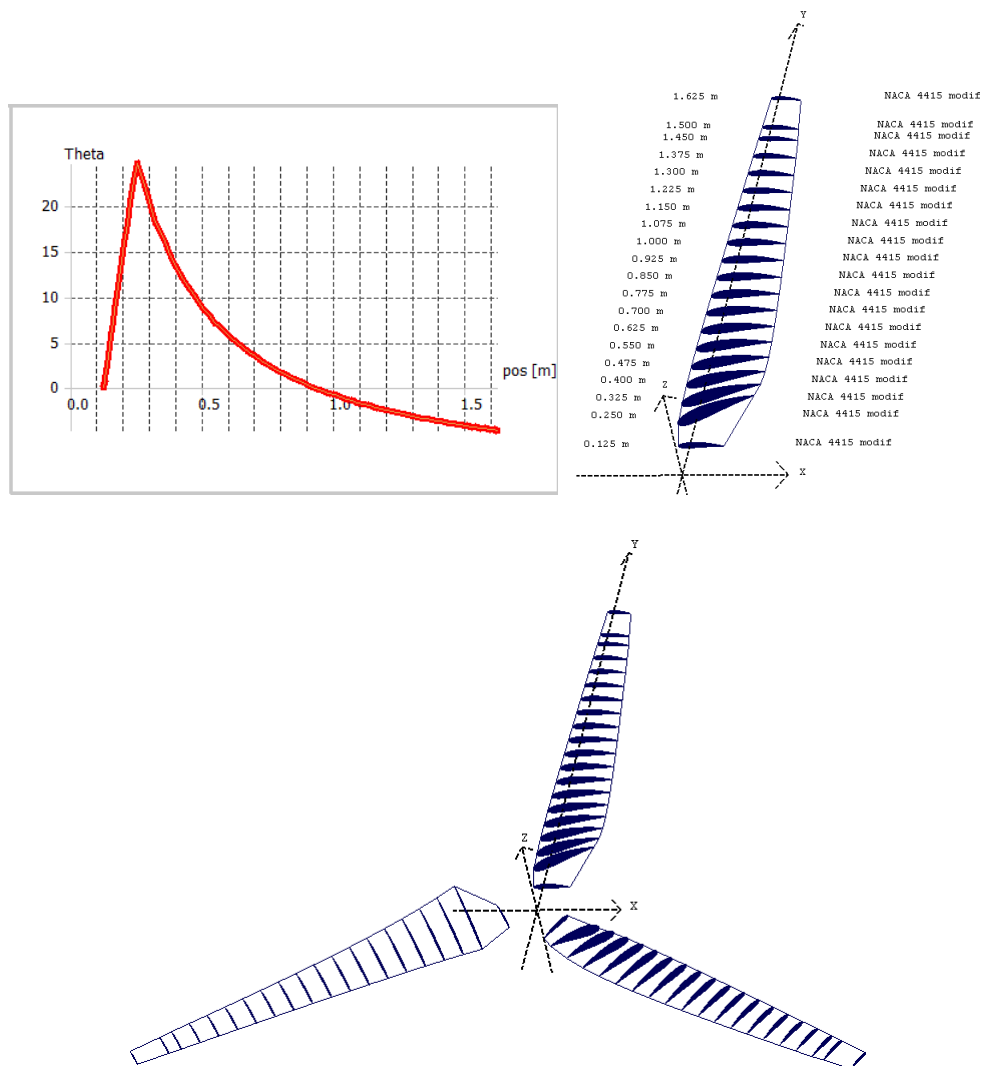
Gambar 98. Rancangan Sudu B, distribusi 20 elemen airfoil NACA 4415 modif pada sudu dan rotor turbin angin pada sudut twist, theta= +26,8° (pangkal sudu) sampai -2,7° (tepi sudu)

Gambar 98 memvisualisasi Rancangan Sudu B yang mempunyai distribusi elemen sudu airfoil NACA 4415 modif dengan sudut twist $\theta = +26,8^\circ$ pada pangkal sudu sampai -2,7° pada tepi sudu. Bentuk rancangan sudu tersebut merupakan bentuk sudu berdasarkan distribusi elemen sudu airfoil NACA 4415 modif melalui proses optimalisasi nilai C_l/C_d pada kondisi $\alpha = 5^\circ$ dengan iterasi pada nilai awal sudut twist 0° dan bilangan Reynolds 41000 terhadap panjang chord airfoil NACA 4415 modif rata-rata (0.20 m).



Gambar 99. Rancangan Sudu C, distribusi 20 elemen airfoil NACA 4415 modif pada sudu dan rotor turbin angin pada sudut twist $\theta = +27,3^\circ$ (pangkal sudu) sampai $-2,2^\circ$ (tepi sudu)

Gambar 99 memvisualisasi Rancangan Sudu C yang mempunyai distribusi elemen sudu airfoil NACA 4415 modif yang mempunyai sudut twist $\theta = +27,3^\circ$ pada pangkal sudu sampai $-2,2^\circ$ pada tepi sudu. Bentuk rancangan ini merupakan bentuk sudu berdasarkan distribusi elemen sudu airfoil NACA 4415 modif melalui proses optimalisasi nilai C_l/C_d pada kondisi $\alpha = 5^\circ$ dengan iterasi pada nilai awal sudut twist 0° dan bilangan Reynolds 55000 terhadap panjang chord airfoil NACA 4415 modif rata-rata (0.20 m).



Gambar 100. Rancangan Sudu D, distribusi 20 elemen airfoil NACA 4415 modif pada sudu dan rotor turbin angin pada sudut twist $\theta = +24,8^\circ$ (pangkal sudu) sampai $-4,7^\circ$ (tepi sudu)

Gambar 100 memvisualisasi Rancangan Sudu D yang mempunyai distribusi elemen sudu airfoil NACA 4415 modif yang mempunyai sudut twist $\theta = +24,8^\circ$ pada pangkal sudu sampai $-4,7^\circ$ pada tepi sudu. Bentuk rancangan ini merupakan bentuk sudu berdasarkan distribusi elemen sudu airfoil NACA 4415 modif melalui proses optimalisasi nilai C_l/C_d pada

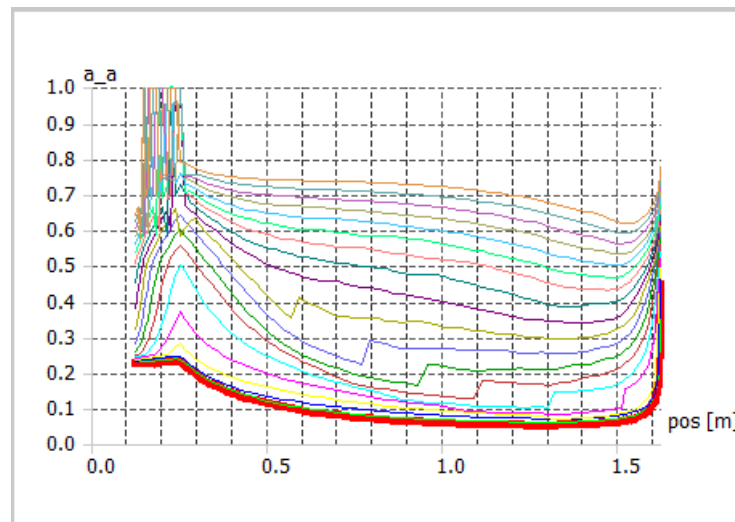
kondisi $\alpha = 5,5^\circ$ dengan iterasi pada nilai awal sudut twist 0° dan bilangan Reynolds 250000 terhadap panjang chord airfoil NACA 4415 modif rata-rata (0.20 m).

3. Kondisi Simulasi Sudu dan Rotor Turbin berdasar NACA 4415 modif

Berdasarkan perancangan sudu turbin seperti tampak pada Gambar 97 sampai Gambar 100, maka dilakukan simulasi kinerja sudu pada kondisi kecepatan angin yang bervariasi dengan nilai 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s serta pada kondisi tip speed ratio (TSR atau λ) bervariasi ($1 \leq \text{TSR} \leq 10$) pada Rancangan Sudu A, B, C dan D.

a. Hasil Simulasi Sudu Turbin: Faktor Induksi

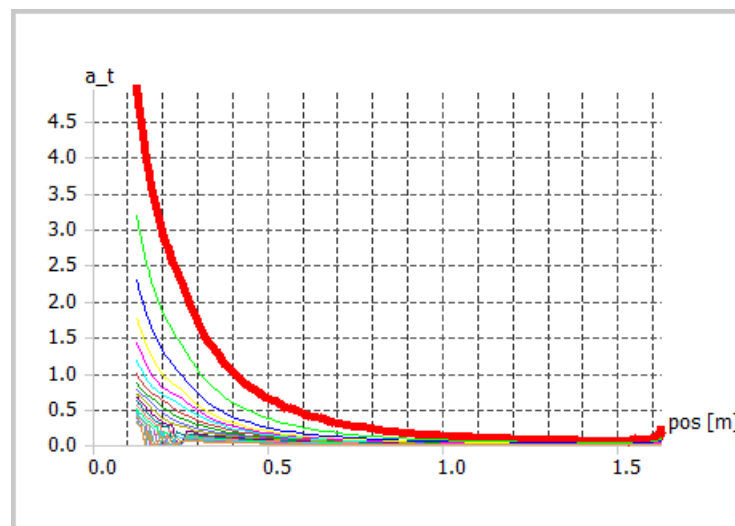
Nilai faktor induksi aksial (a_a) dan faktor induksi tangensial (a_t) pada posisi radial sepanjang sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s. seperti tampak pada Gambar 99 dan Gambar 113.



Gambar 101. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk $\text{TSR} = 1$ sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 101, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu

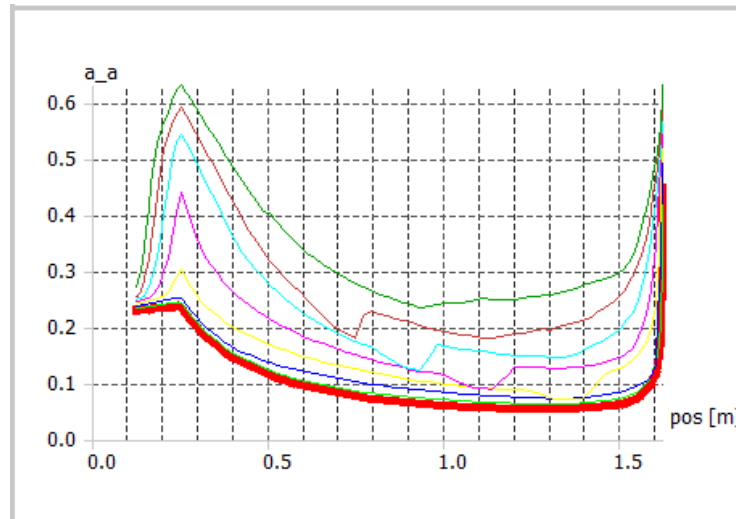
mengalami peningkatan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,26$ dan cenderung menurun pada rentang $0,26 \leq r \leq 1,50$ dan meningkat kembali pada rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,05 pada rentang $0,060 \leq a_a \leq 1$ seperti tampak pada Gambar 91 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



Gambar 102. Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk $\text{TSR} = 1$ sampai 10 berurut dari kurva teratas

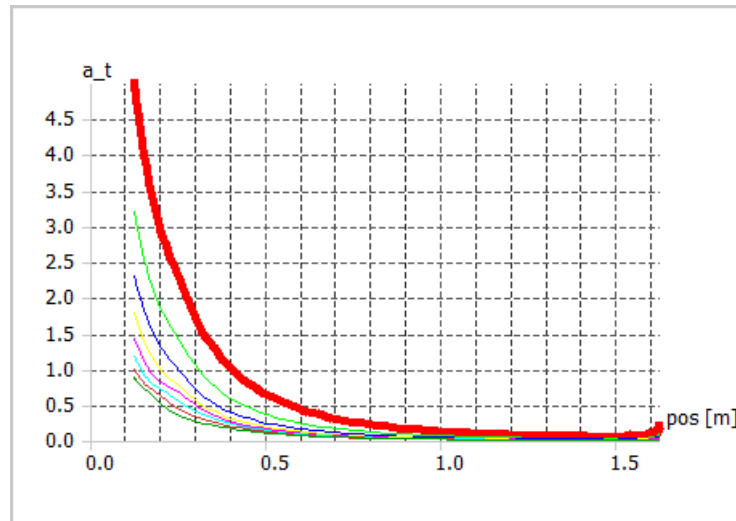
Berdasarkan Gambar 102, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai a_t secara rata-rata 0,235 pada rentang $0,00 \leq a_t \leq 4,70$ seperti tampak pada

Gambar 102 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



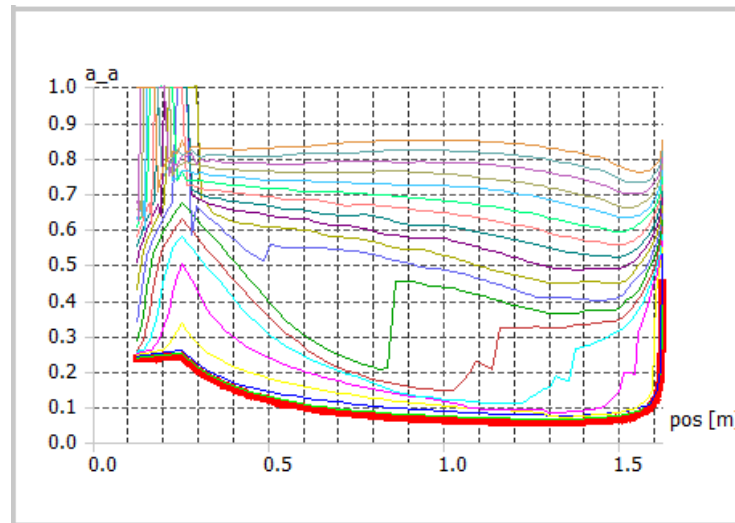
Gambar 103. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 103, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,26$ dan cenderung menurun pada rentang $0,26 \leq r \leq 0,9$ dan meningkat kembali pada rentang $0,9 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 4,5$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,05 pada rentang $0,060 \leq a_a \leq 0,6$ seperti tampak pada Gambar 103 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna hijau).



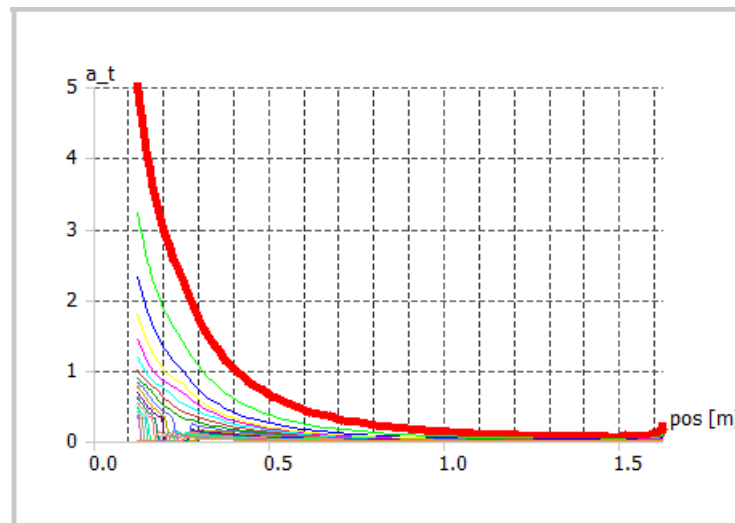
Gambar 104. Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 104, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 4,5$ akan terjadi penurunan nilai a_t secara rata-rata 0,225 pada rentang $0,00 \leq a_t \leq 4,70$ seperti tampak pada Gambar 104 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna hijau).



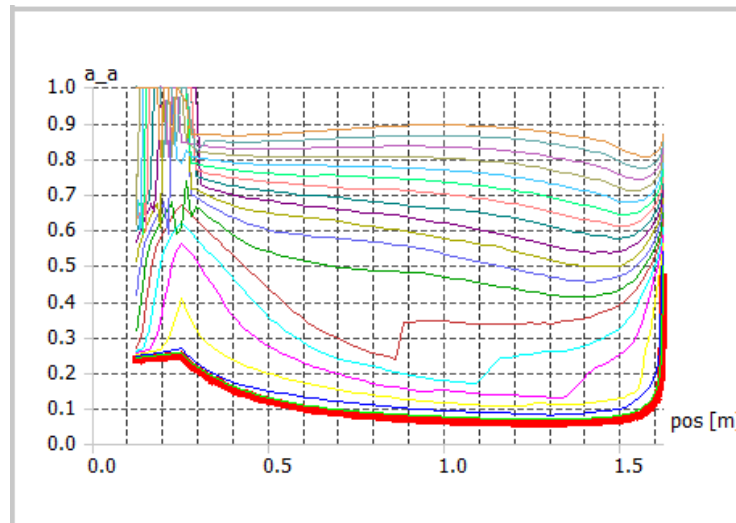
Gambar 105. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 105, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 5 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,26$ dan cenderung menurun pada rentang $0,26 \leq r \leq 1,00$ dan meningkat kembali pada rentang $1,00 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,05 pada rentang $0,060 \leq a_a \leq 1$ seperti tampak pada Gambar 105 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



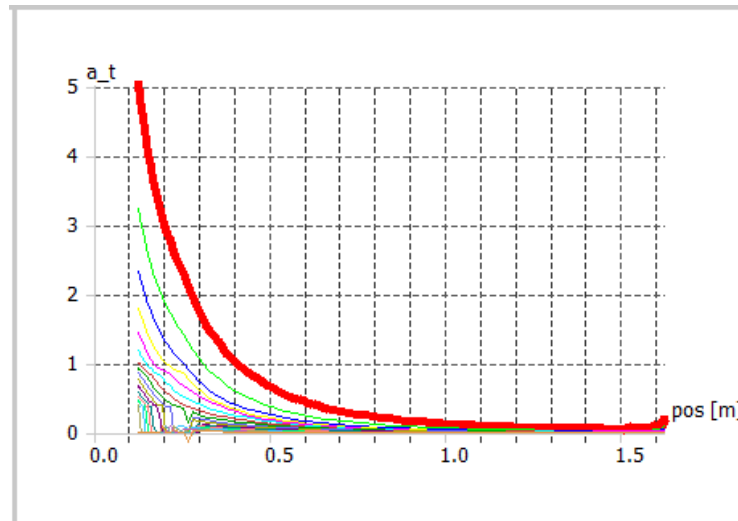
Gambar 106. Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 106, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 5 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai a_t secara rata-rata 0,25 pada rentang $0,00 \leq a_t \leq 5,00$ seperti tampak pada Gambar 106 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



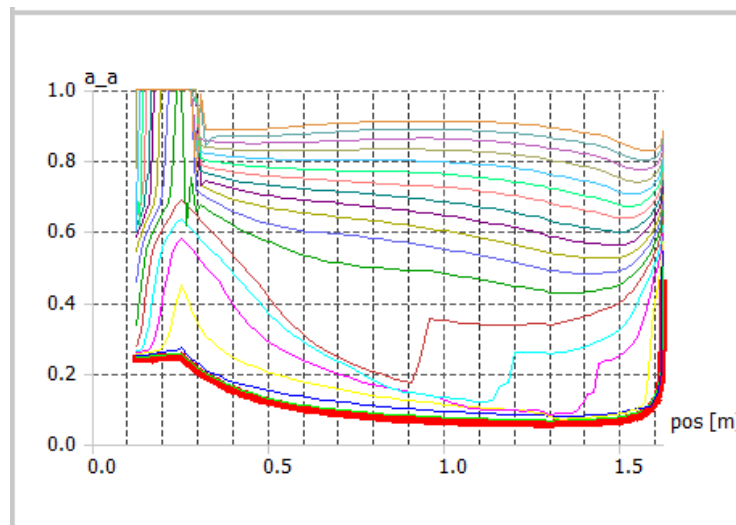
Gambar 107. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 107, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 6 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,26$ dan cenderung menurun pada rentang $0,26 \leq r \leq 1,10$ dan meningkat kembali pada rentang $1,10 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,05 pada rentang $0,060 \leq a_a \leq 1$ seperti tampak pada Gambar 107 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



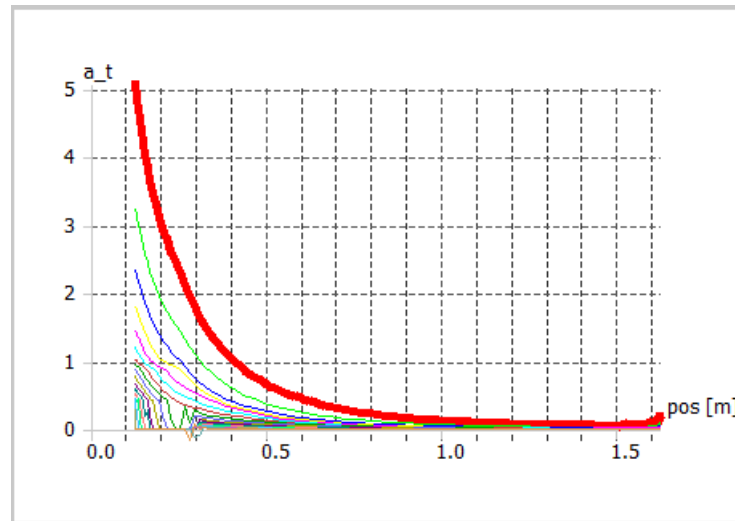
Gambar 108. Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 108, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 6 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai a_t rata-rata 0,25 pada rentang $0,00 \leq a_t \leq 5,00$ seperti tampak pada Gambar 108 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



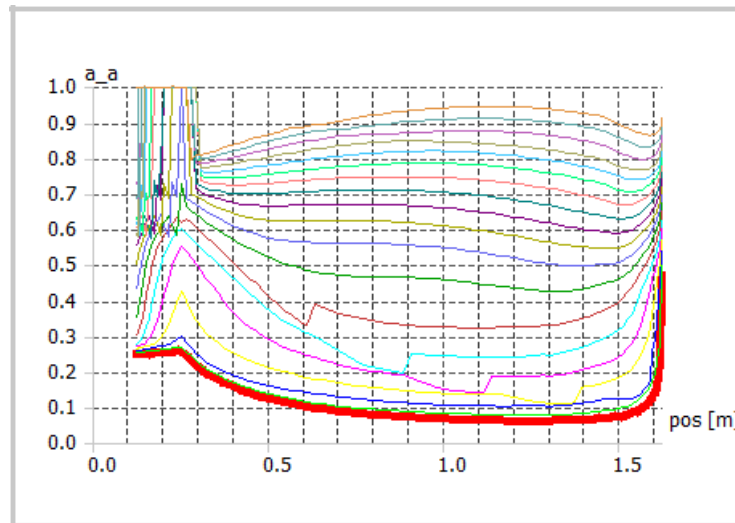
Gambar 109. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 109, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,26$ dan cenderung menurun pada rentang $0,26 \leq r \leq 1,30$ dan meningkat kembali pada rentang $1,30 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,05 pada rentang $0,060 \leq a_a \leq 1$ seperti tampak pada Gambar 109 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



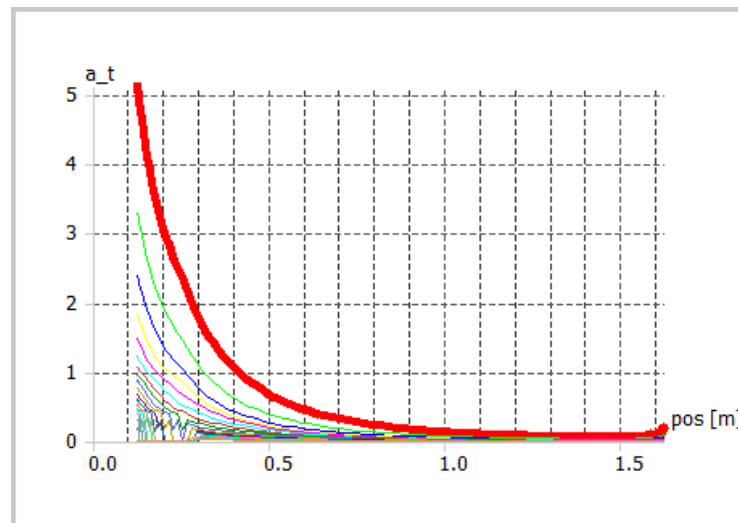
Gambar 110. Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 110, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai a_t rata-rata 0,25 pada rentang $0,00 \leq a_t \leq 5,20$ seperti tampak pada Gambar 110 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



Gambar 111. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

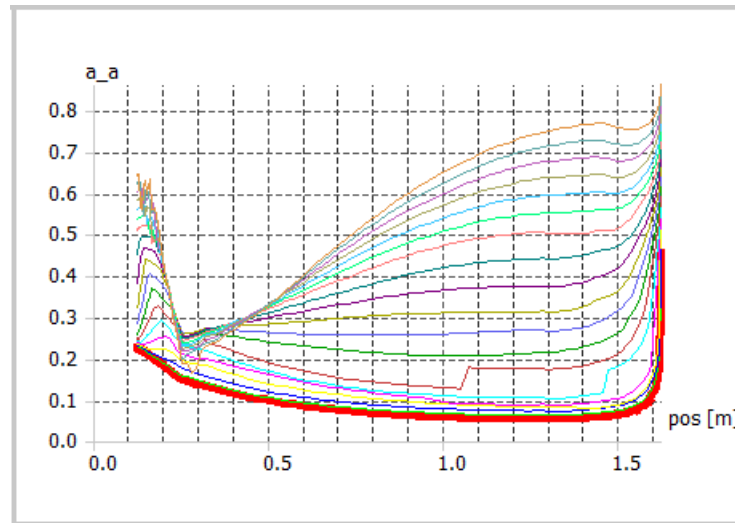
Berdasarkan Gambar 111, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,26$ dan cenderung menurun pada rentang $0,26 \leq r \leq 1,30$ dan meningkat kembali pada rentang $1,30 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,05 pada rentang $0,060 \leq a_a \leq 1$ seperti tampak pada Gambar 111 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



Gambar 112. Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

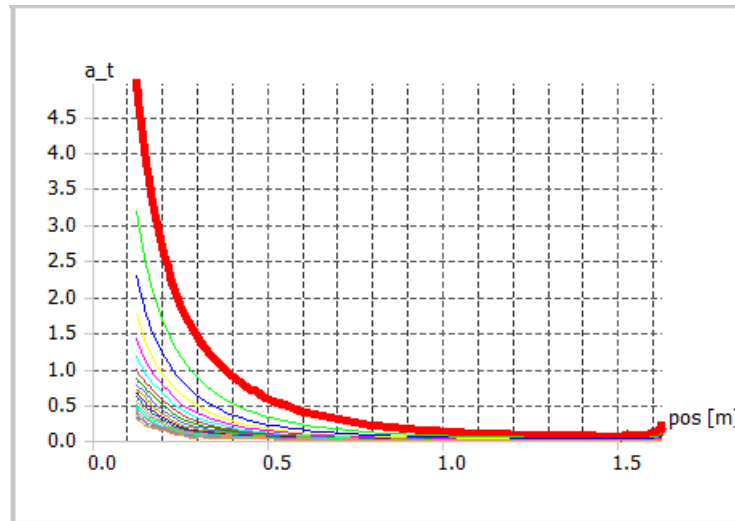
Berdasarkan Gambar 112, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai a_t rata-rata 0,25 pada rentang nilai $0,00 \leq a_t \leq 5,20$ seperti tampak pada Gambar 112 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).

Nilai faktor induksi aksial (a_a) dan faktor induksi tangensial (a_t) pada posisi radial sepanjang sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s. seperti tampak pada Gambar 113 dan Gambar 114.



Gambar 113. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

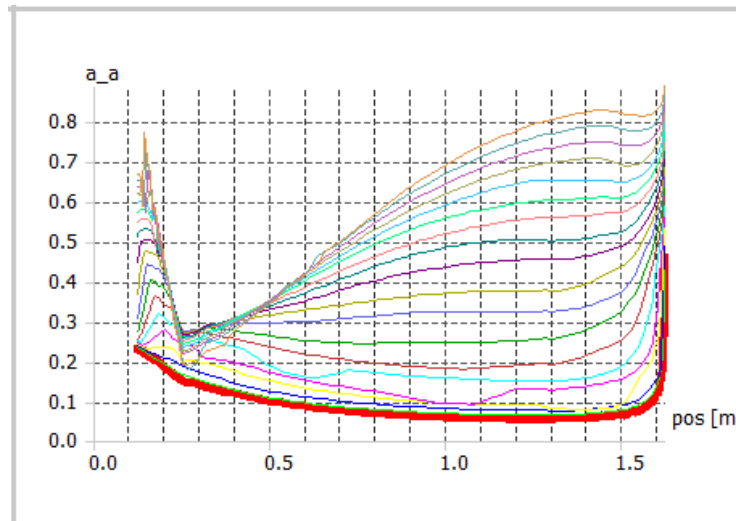
Berdasarkan Gambar 113, pada Rancangan Sudu B yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,2 \leq a_a \leq 0,6$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,17$ dan menurun secara tajam pada rentang $0,17 \leq r \leq 2,50$ dan meningkat kembali secara signifikan dengan nilai $0,06 \leq a_a \leq 0,8$ pada rentang $2,50 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,04 pada rentang $0,06 \leq a_a \leq 0,8$ seperti tampak pada Gambar 113 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



Gambar 114 Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

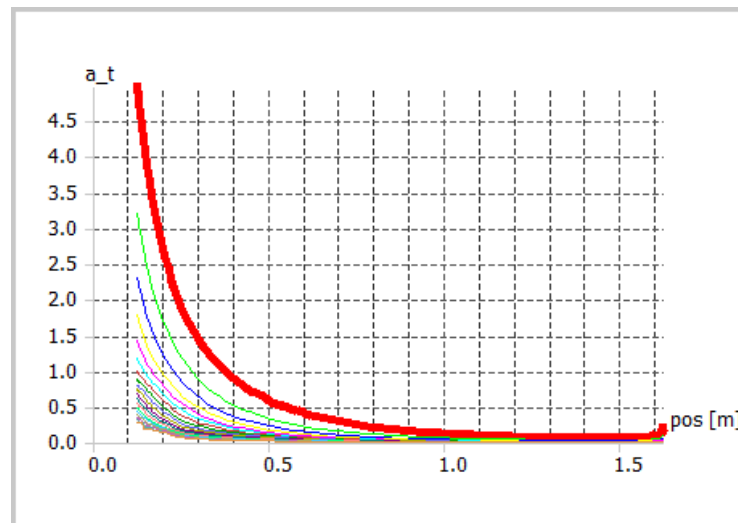
Berdasarkan Gambar 114, pada Rancangan Sudu B yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai a_t rata-rata 0,235 pada rentang $0,00 \leq a_t \leq 4,70$ seperti tampak pada Gambar 114 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).

Nilai faktor induksi aksial (a_a) dan faktor induksi tangensial (a_t) pada posisi radial sepanjang sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s. seperti tampak pada Gambar 115 dan Gambar 116.



Gambar 115. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

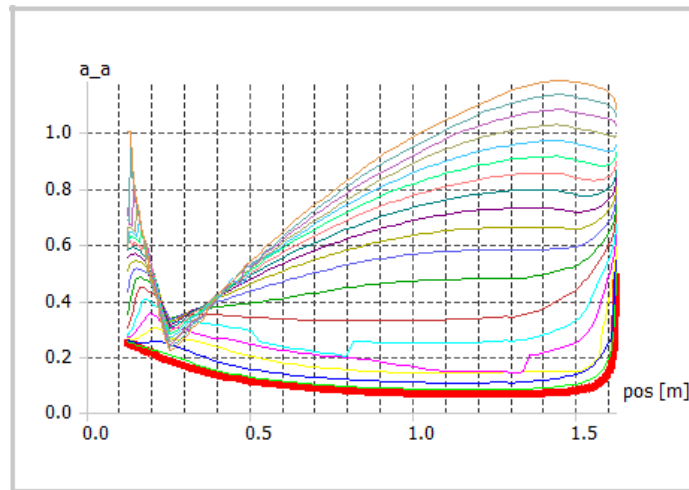
Berdasarkan Gambar 115, pada Rancangan Sudu C yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,2 \leq a_a \leq 0,75$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,17$ dan menurun secara tajam pada rentang $0,17 \leq r \leq 2,50$ dan meningkat kembali secara signifikan dengan nilai $0,06 \leq a_a \leq 0,85$ pada rentang $2,50 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,04 pada rentang $0,06 \leq a_a \leq 0,85$ seperti tampak pada Gambar 115 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



Gambar 116. Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

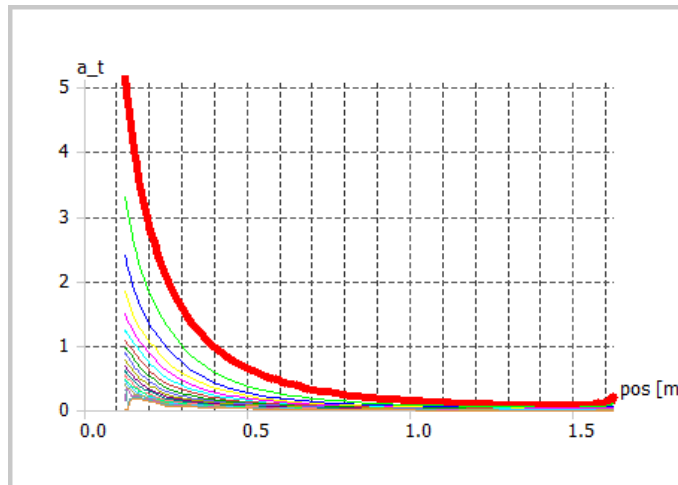
Berdasarkan Gambar 116, pada Rancangan Sudu C yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai a_t rata-rata 0,235 pada rentang $0,00 \leq a_t \leq 4,70$ seperti tampak pada Gambar 116 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).

Nilai faktor induksi aksial (a_a) dan faktor induksi tangensial (a_t) pada posisi radial sepanjang sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 18 m/s. seperti tampak pada Gambar 117 dan Gambar 118.



Gambar 117. Distribusi nilai faktor induksi aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 117, pada Rancangan Sudu D yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,2 \leq a_a \leq 1,0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam pada rentang $0,15 \leq r \leq 2,50$ dan meningkat kembali secara signifikan dengan nilai $0,06 \leq a_a \leq 1,9$ pada rentang $2,50 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi aksial (a_a) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_a akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai a_a rata-rata sebesar 0,095 pada rentang $0,06 \leq a_a \leq 1,9$ seperti tampak pada Gambar 117 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



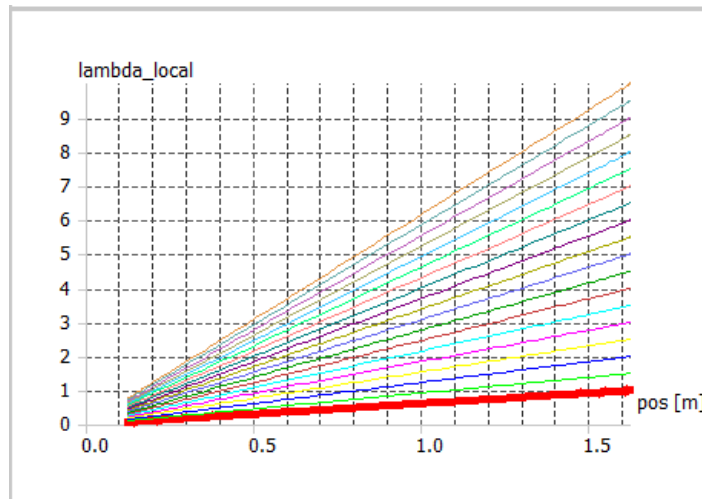
Gambar 118. Distribusi nilai faktor induksi tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 118, pada Rancangan Sudu D yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai faktor induksi tangensial (a_t) sepanjang radial sudu mengalami penurunan sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,65$. Faktor induksi tangensial (a_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai a_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai a_t rata-rata 0,25 pada rentang nilai $0,0 \leq a_t \leq 5,2$ seperti tampak pada Gambar 118 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).

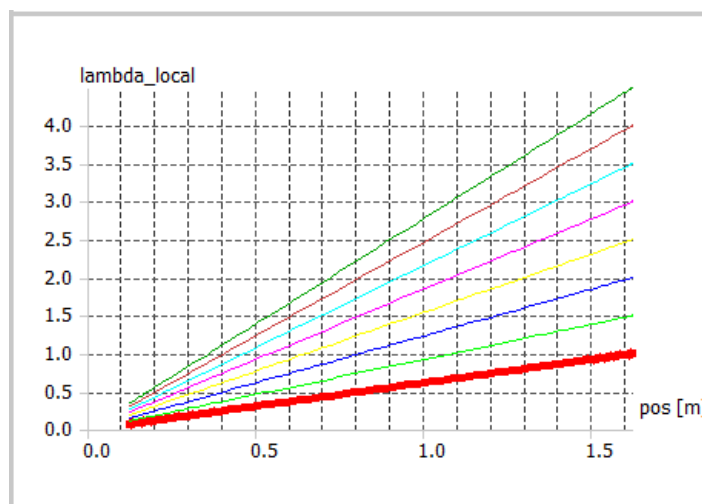
Berdasarkan Gambar 101 sampai Gambar 118, terlihat nilai faktor induksi aksial (a_a) terhadap posisi radial sepanjang sudu mempunyai kecenderungan meningkat dengan meningkatnya posisi radial dan dengan meningkatnya nilai TSR dari 1 sampai 10 dengan nilai peningkatan TSR setiap 0,5, dan nilai faktor induksi tangensial (a_t) mempunyai kecenderungan menurun dengan meningkatnya posisi radial dan dengan meningkatnya nilai TSR dari 1 sampai 10 dengan nilai peningkatan TSR setiap 0,5.

b. Hasil Simulasi Sudu Turbin: λ lokal

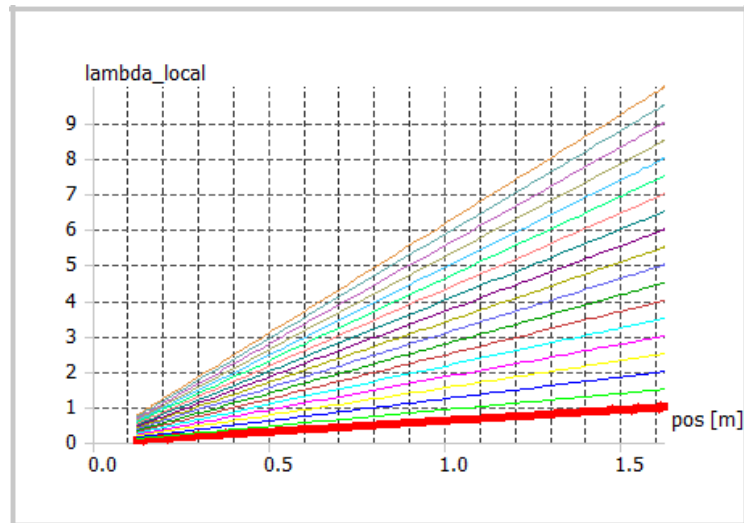
Nilai tip speed ratio pada posisi radial (λ lokal) sepanjang sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s seperti tampak pada Gambar 119 dan Gambar 124.



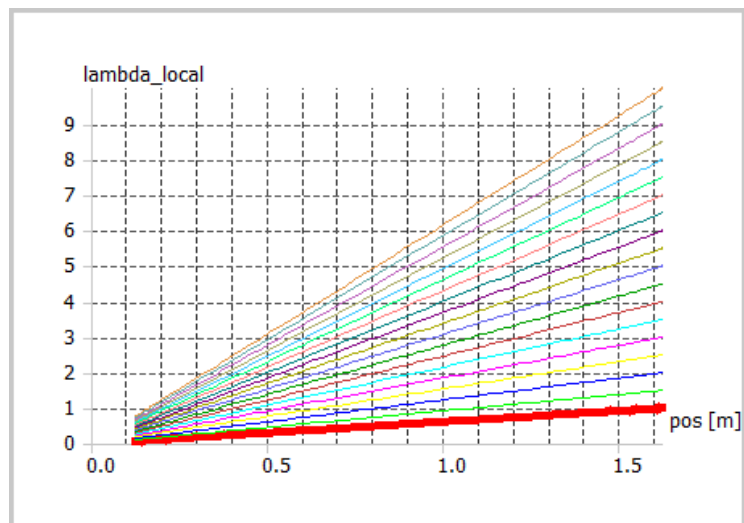
Gambar 119. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah



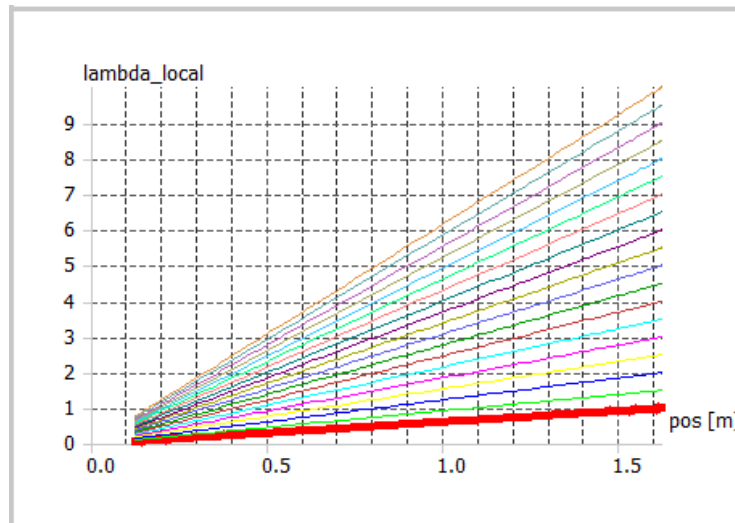
Gambar 120. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah



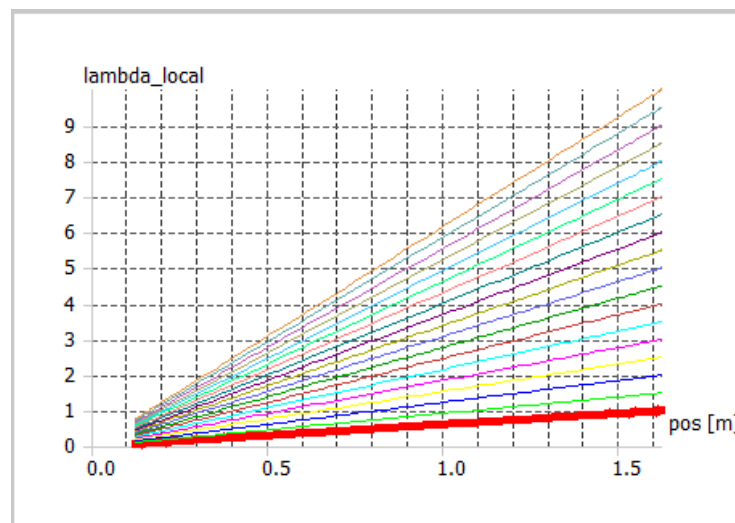
Gambar 121. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah



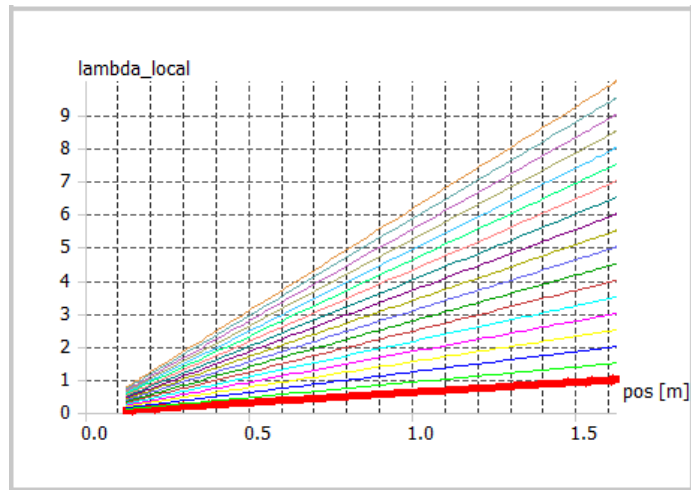
Gambar 122. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah



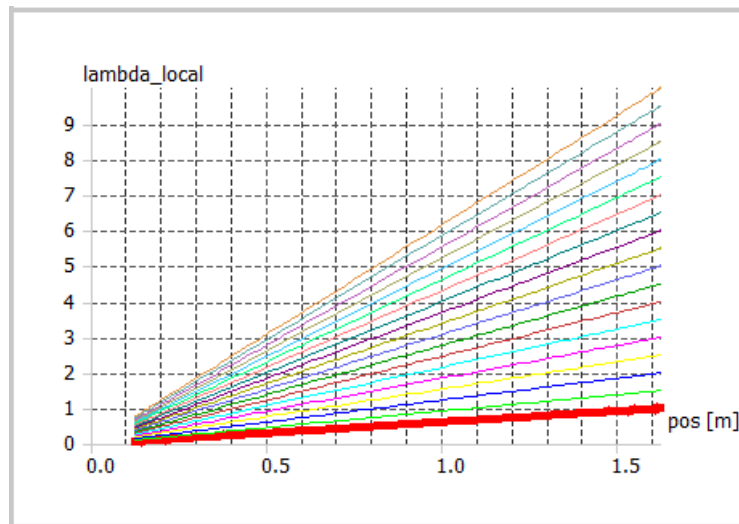
Gambar 123. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah



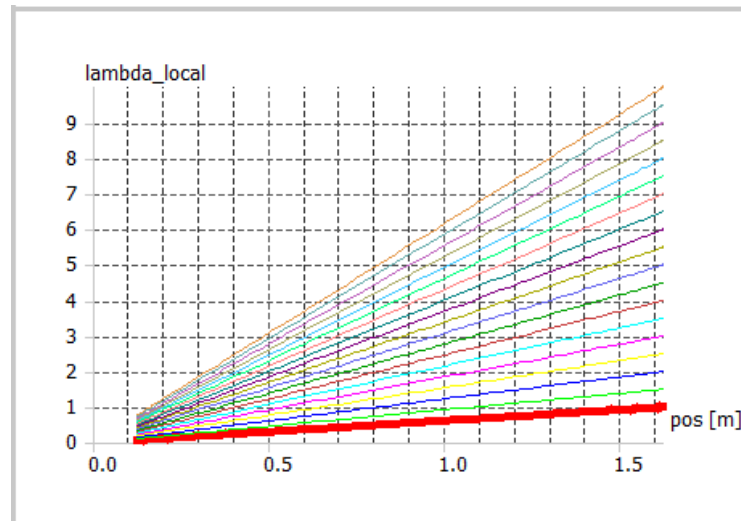
Gambar 124. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah



Gambar 125. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah



Gambar 126. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

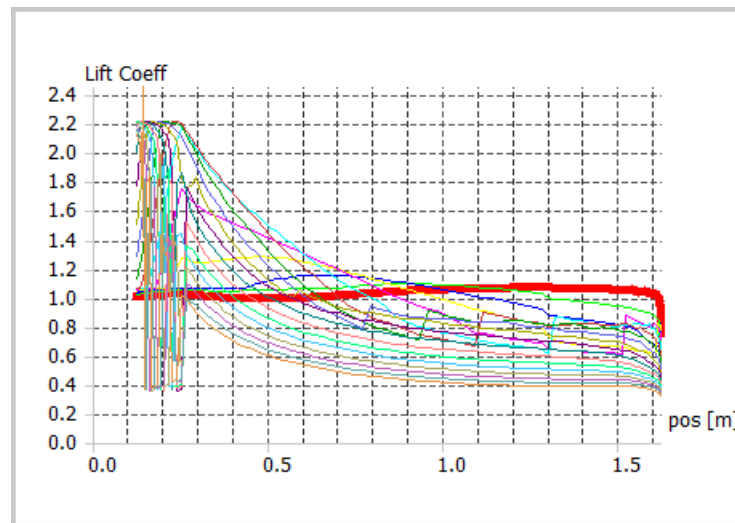


Gambar 127. Distribusi nilai λ lokal pada sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 119 sampai Gambar 127, tampak terlihat kecenderungan nilai lamda lokal (λ lokal) akan meningkat seiring dengan meningkatnya nilai posisi radial sepanjang sudu secara linier dan meningkat pula nilai lamda lokal dengan meningkatnya nilai TSR dari 1 sampai 10, kecenderungan peningkatan yang linier tersebut sesuai dengan persamaan 64.

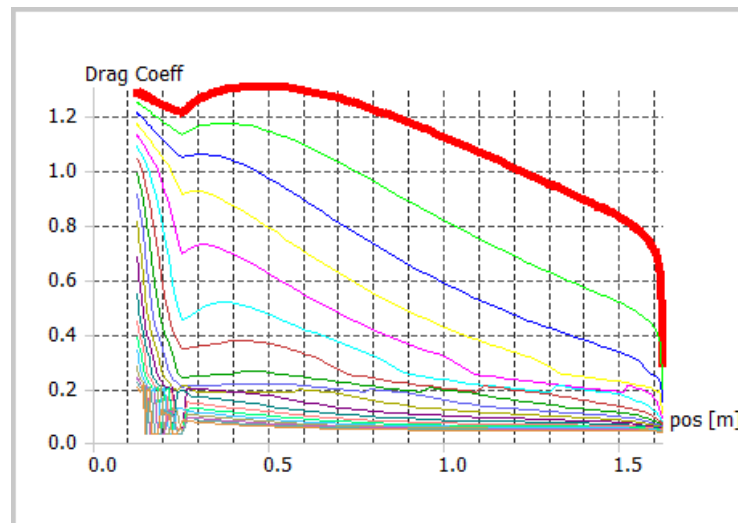
c. Hasil Simulasi Sudu Turbin: Koefisien Aerodinamika

Nilai koefisien aerodinamika yaitu koefisien gaya angkat (lift coeff, C_L) dan koefisien gaya hambat (drag coeff, C_D) pada posisi radial sudu twist 0° pada pangkal sudu sampai tepi sudu untuk kondisi nilai TSR dari 1 sampai 10 dan kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/ seperti tampak pada Gambar 128 sampai dan Gambar 139.



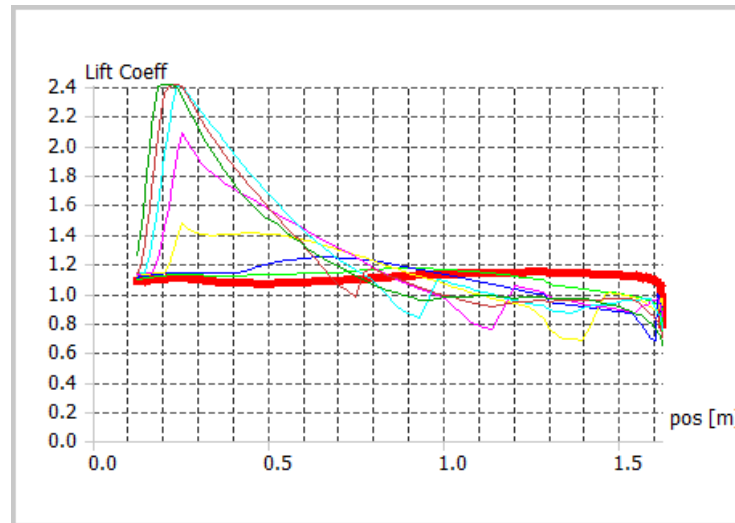
Gambar 128. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 128, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,4 \leq Cl \leq 2,2$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,9$ dan cenderung konstan sepanjang rentang nilai $0,9 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cl akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cl rata-rata sebesar 0,11 pada rentang nilai $0,4 \leq Cl \leq 2,2$ seperti tampak pada Gambar 128 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



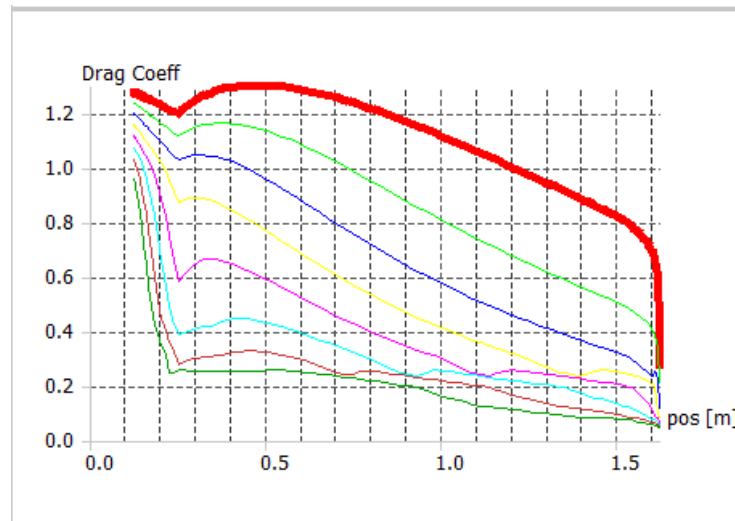
Gambar 129. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 129, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq C_d \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_d akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_d rata-rata sebesar 0,06 pada rentang $1,2 \geq C_d \geq 0,05$ seperti tampak pada Gambar 129 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



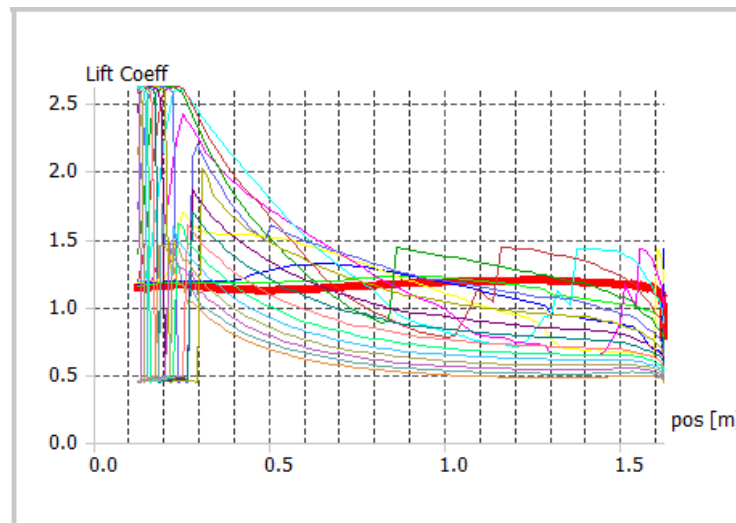
Gambar 130. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 130, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $1,0 \leq Cl \leq 2,4$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,7$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,7 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cl akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 4,5$ akan terjadi penurunan nilai Cl rata-rata sebesar 0,07 pada rentang nilai $0,6 \leq Cl \leq 2,4$ seperti tampak pada Gambar 130 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



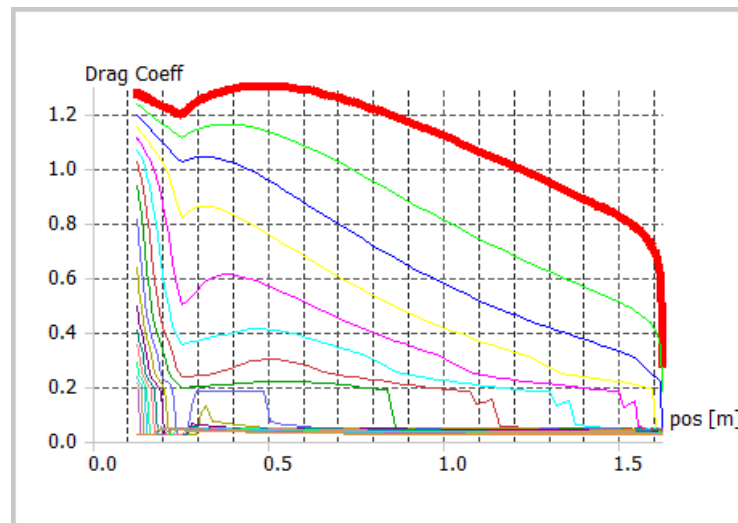
Gambar 131. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 131, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq C_d \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_d akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_d rata-rata sebesar 0,125 pada rentang $1,2 \geq C_d \geq 0,05$ seperti tampak pada Gambar 131 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



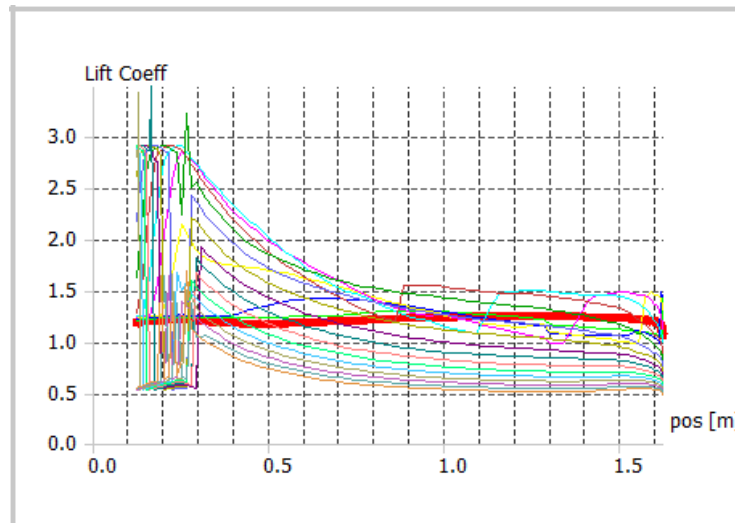
Gambar 132. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 132, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 5 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq Cl \leq 2,6$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cl akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cl rata-rata sebesar 0,08 pada rentang $0,5 \leq Cl \leq 2,6$ seperti tampak pada Gambar 132 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



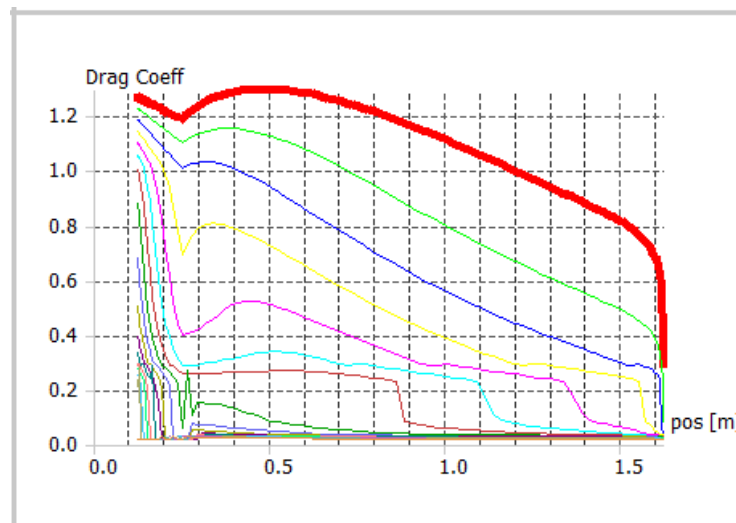
Gambar 133. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 133, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 5 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq C_d \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_d akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_d rata-rata sebesar 0,125 pada rentang $1,2 \geq C_d \geq 0,05$ seperti tampak pada Gambar 133 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



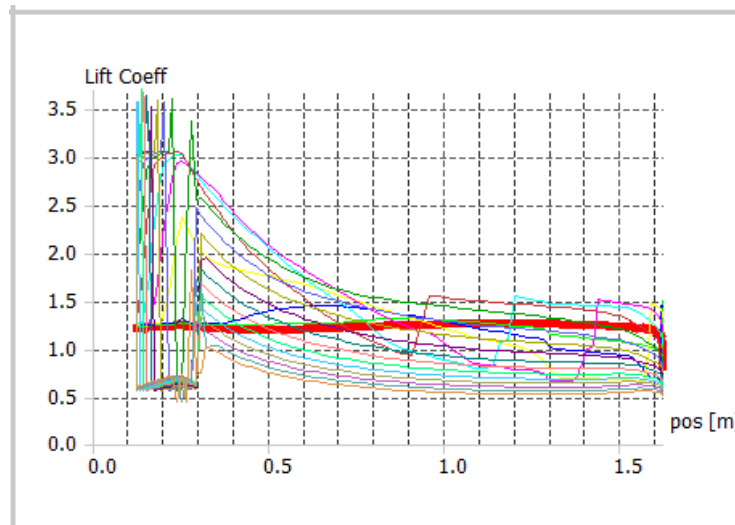
Gambar 134. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 134, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 6 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq Cl \leq 3,0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cl akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cl rata-rata sebesar 0,08 pada rentang nilai $0,5 \leq Cl \leq 3,0$ seperti tampak pada Gambar 132 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



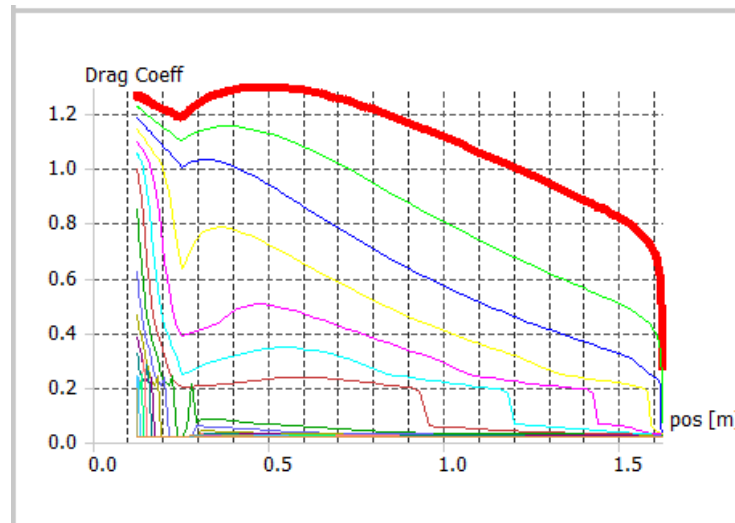
Gambar 135. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 135, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 6 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, Cd) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq Cd \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, Cd) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cd akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cd rata-rata sebesar 0,06 pada rentang $1,2 \geq Cd \geq 0$ seperti tampak pada Gambar 135 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



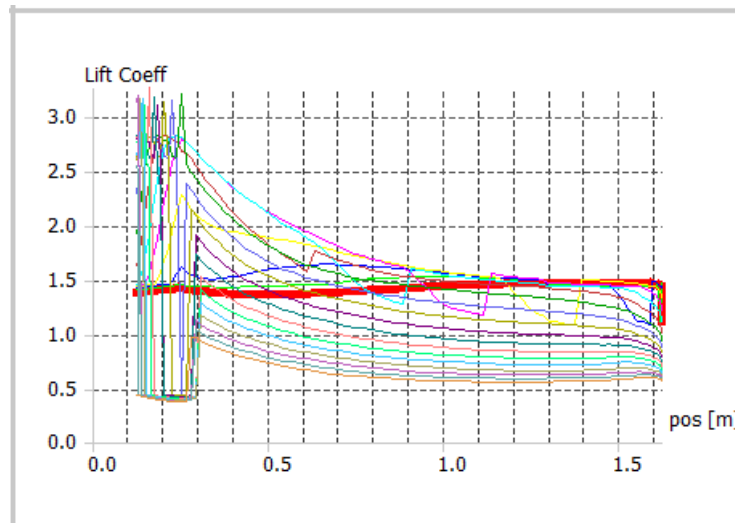
Gambar 136. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 136, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq Cl \leq 3,5$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cl akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cl rata-rata sebesar 0,09 pada rentang $0,5 \leq Cl \leq 3,5$ seperti tampak pada Gambar 136 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



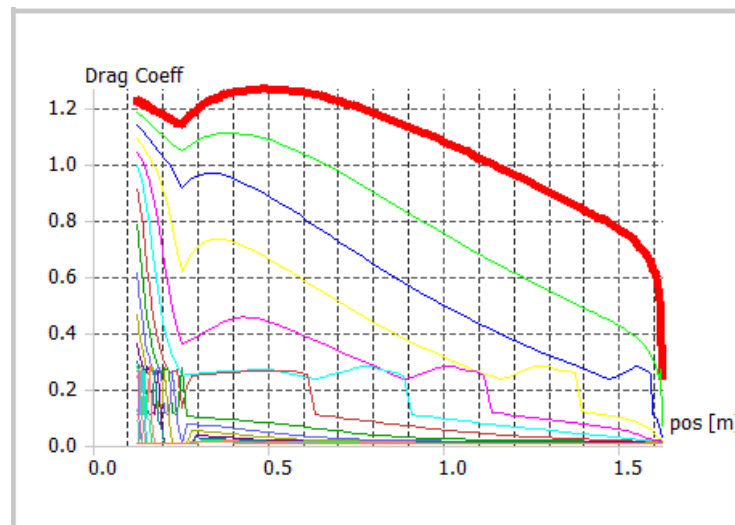
Gambar 137. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 137, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, Cd) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq Cd \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, Cd) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cd akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cd rata-rata sebesar 0,06 pada rentang $1,2 \geq Cd \geq 0$ seperti tampak pada Gambar 137 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



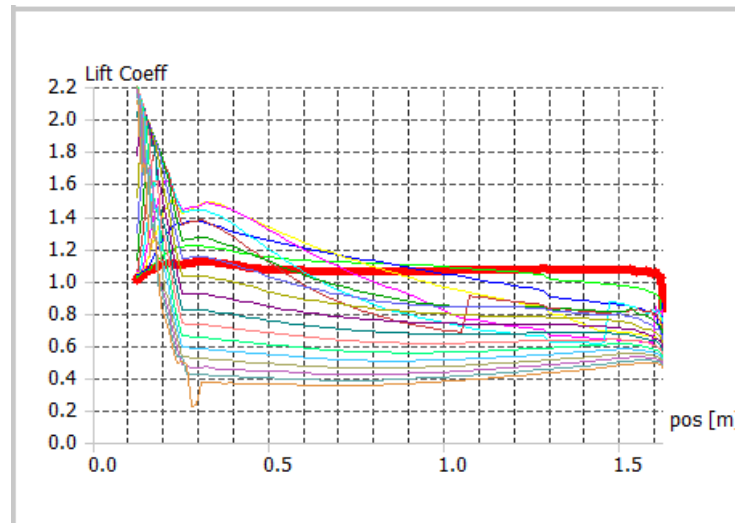
Gambar 138. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 138, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, C_l) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq C_l \leq 3,2$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,9$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,9 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, C_l) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_l akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_l rata-rata sebesar 0,08 pada rentang nilai $0,5 \leq C_l \leq 3,2$ seperti tampak pada Gambar 138 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



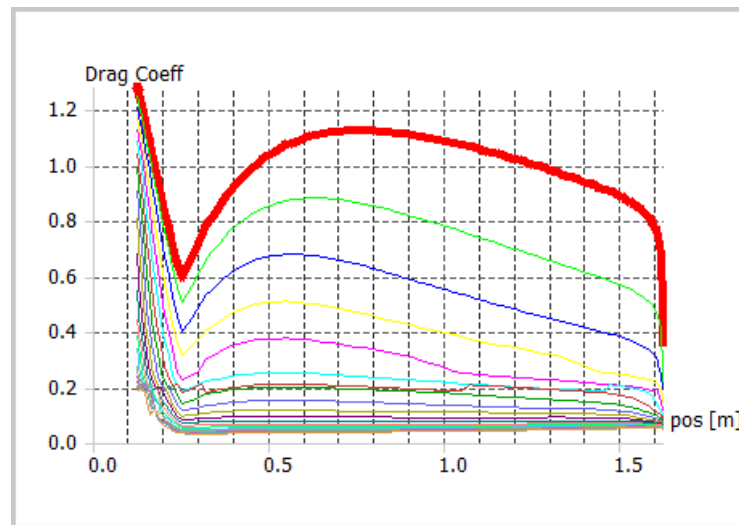
Gambar 139. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 139, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq C_d \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_d akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_d rata-rata sebesar 0,06 pada rentang $1,2 \geq C_d \geq 0$ seperti tampak pada Gambar 139 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



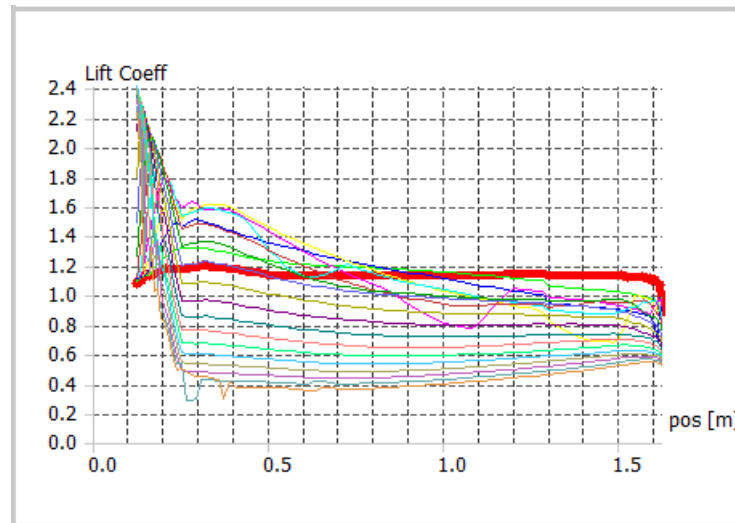
Gambar 140. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 140, pada Rancangan Sudu B yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $1,0 \leq Cl \leq 2,2$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cl akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cl rata-rata sebesar 0,09 pada rentang nilai $0,2 \leq Cl \leq 2,2$ seperti tampak pada Gambar 140 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



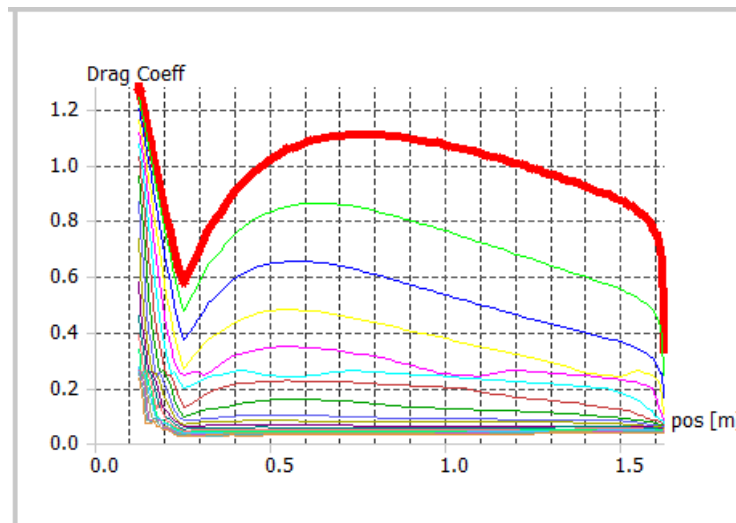
Gambar 141. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 141, pada Rancangan Sudu B yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq C_d \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_d akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_d rata-rata sebesar 0,06 pada rentang $1,2 \geq C_d \geq 0$ seperti tampak pada Gambar 141 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



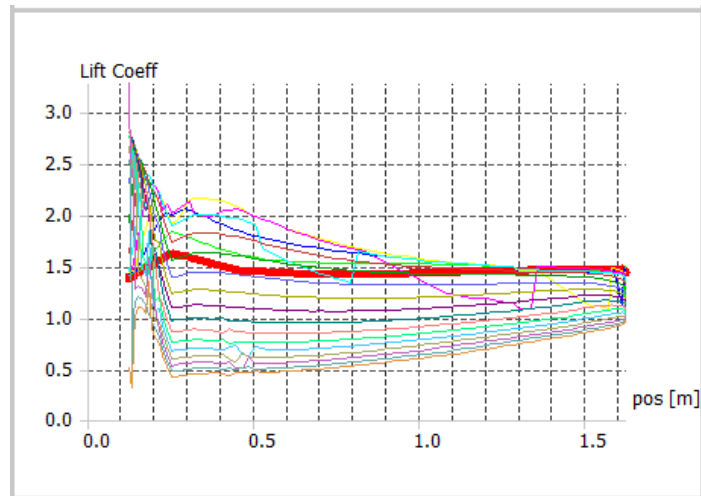
Gambar 142. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 142, pada Rancangan Sudu C yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $1,1 \leq Cl \leq 2,4$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cl akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cl rata-rata sebesar 0,09 pada rentang $0,3 \leq Cl \leq 2,4$ seperti tampak pada Gambar 142 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



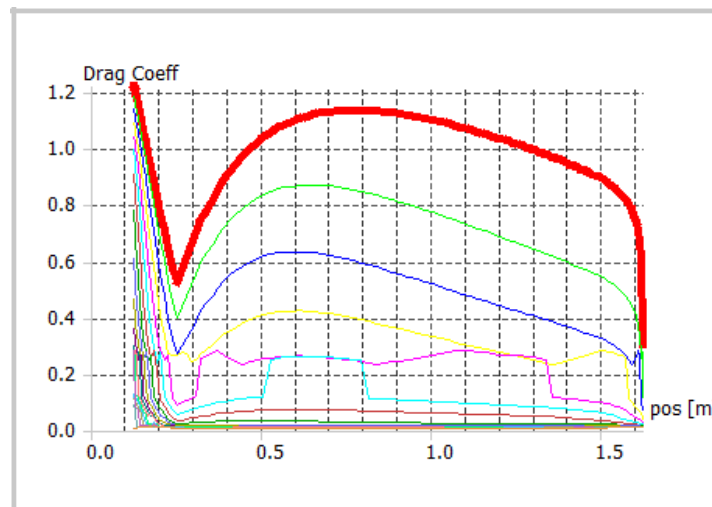
Gambar 143. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 143, pada Rancangan Sudu C yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq C_d \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_d akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_d rata-rata sebesar 0,06 pada rentang $1,2 \geq C_d \geq 0$ seperti tampak pada Gambar 143 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



Gambar 144. Distribusi nilai koefisien gaya angkat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 144, pada Rancangan Sudu D yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $1,4 \leq Cl \leq 3,5$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung meningkat dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya angkat (lift coeff, Cl) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai Cl akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq TSR \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai Cl rata-rata sebesar 0,09 pada rentang $0,5 \leq Cl \leq 3,5$ seperti tampak pada Gambar 144 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



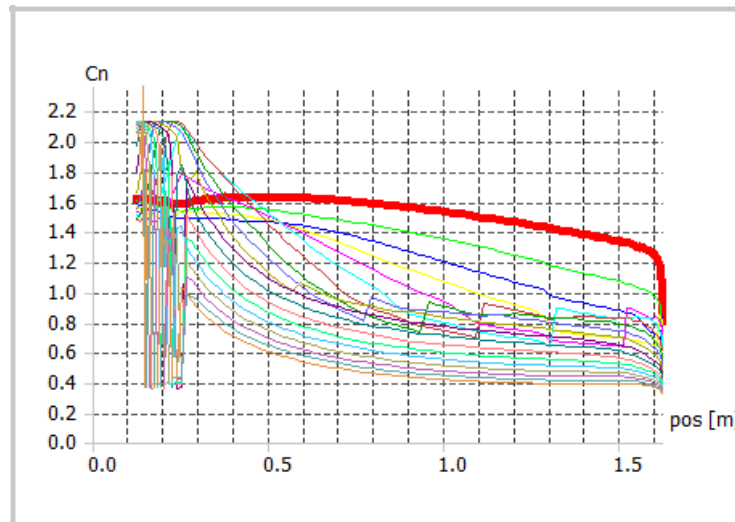
Gambar 145. Distribusi nilai koefisien gaya hambat sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 145, pada Rancangan Sudu D yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) sepanjang radial sudu mengalami penurunan dengan nilai $1,2 \geq C_d \geq 0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai koefisien gaya hambat (drag coeff, C_d) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_d akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_d rata-rata sebesar 0,06 pada rentang $1,2 \geq C_d \geq 0$ seperti tampak pada Gambar 145 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).

d. Hasil Simulasi Sudu Turbin: Koefisien Gaya pada Sudu

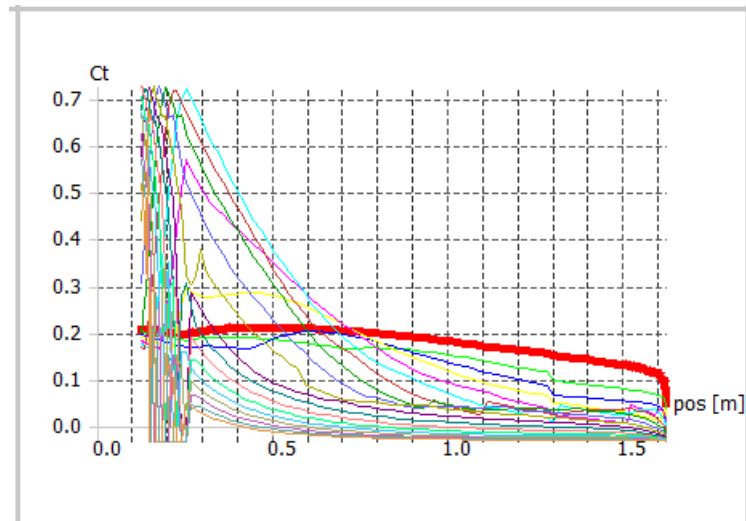
Nilai koefisien gaya yang bekerja pada Rancangan Sudu A, B, C dan D yaitu koefisien gaya aksial atau normal (normal coeff, C_n) dan koefisien gaya tangensial (tangensial coeff, C_t) pada posisi radial sudu twist 0° pada pangkal sudu sampai tepi sudu untuk kondisi

nilai TSR dari 1 sampai 10 dan kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s seperti tampak pada Gambar 146 sampai Gambar 157.



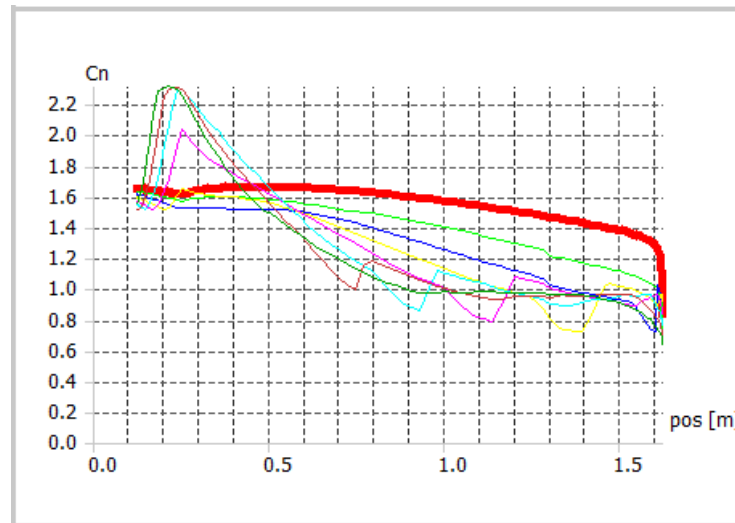
Gambar 146. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 146, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $1,6 \leq C_n \leq 2,1$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,1 pada rentang $0,4 \leq C_n \leq 2,1$ seperti tampak pada Gambar 146 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



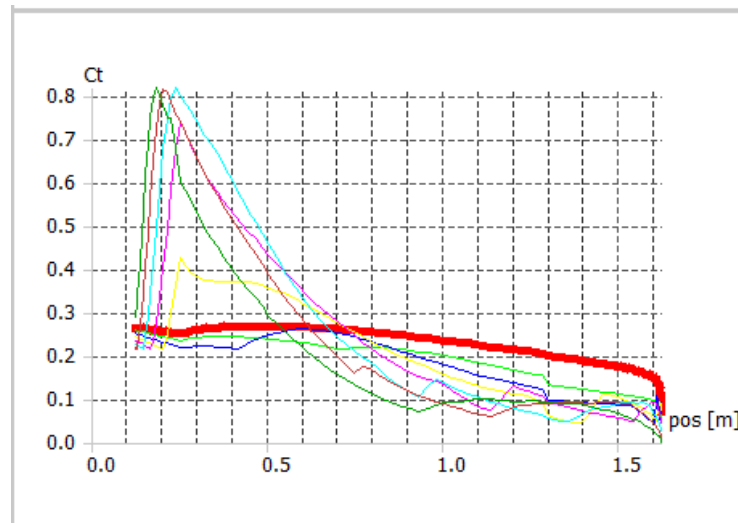
Gambar 147. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 147, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $-0,05 \leq C_t \leq 0,75$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,1 pada rentang nilai $0,4 \leq C_t \leq 0,75$ seperti tampak pada Gambar 147 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



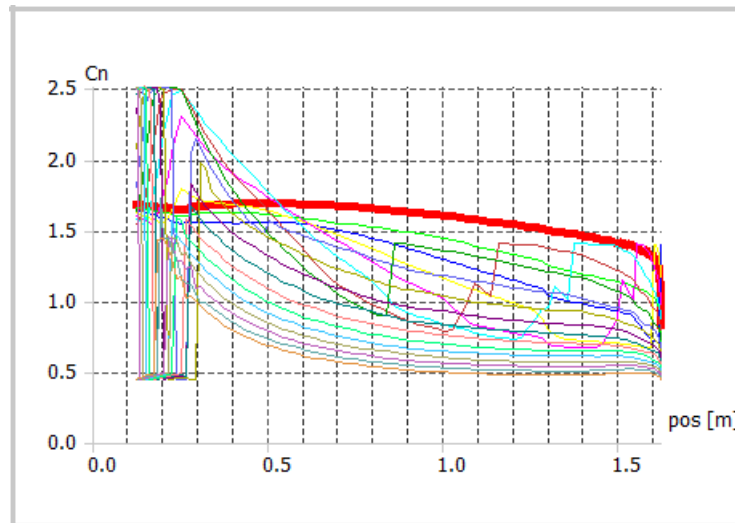
Gambar 148. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 4,5 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 148, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $1,6 \leq C_n \leq 2,3$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,5$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,5 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 4,5$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,1 pada rentang nilai $0,8 \leq C_n \leq 2,3$ seperti tampak pada Gambar 148 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna hijau).



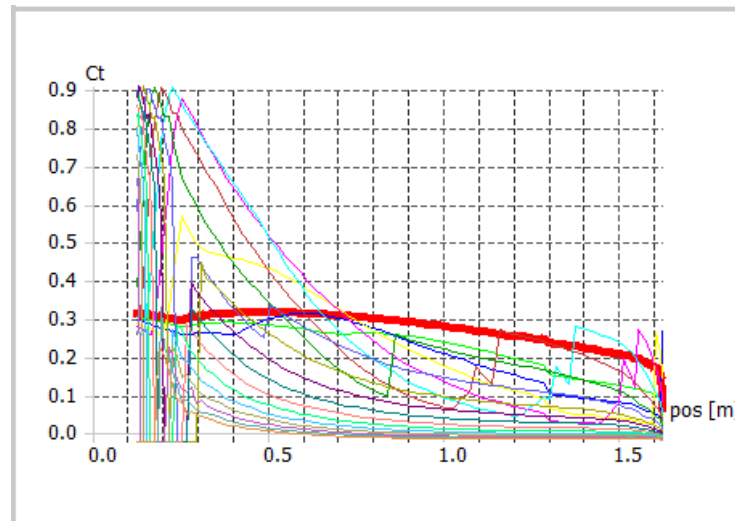
Gambar 149. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 149, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,2 \leq C_t \leq 0,8$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,5$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,5 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 4,5$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,1 pada rentang $0,05 \leq C_t \leq 0,8$ seperti tampak pada Gambar 149 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna hijau).



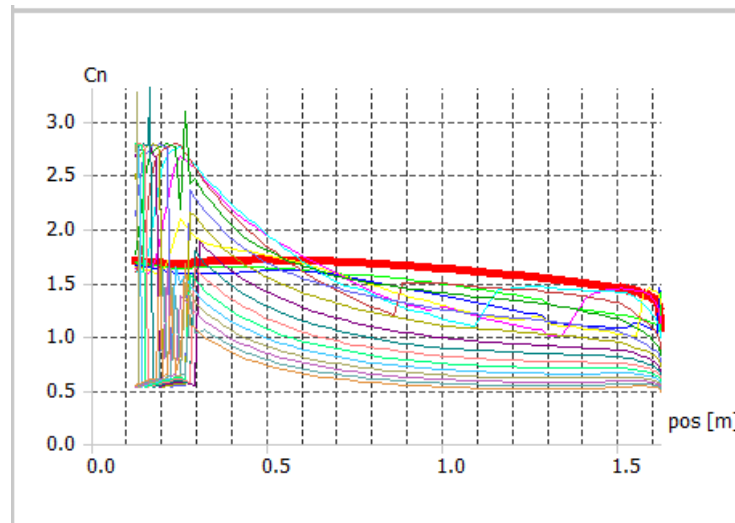
Gambar 150. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 150, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 5 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq C_n \leq 2,5$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,1 pada rentang nilai $0,5 \leq C_n \leq 2,5$ seperti tampak pada Gambar 150 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



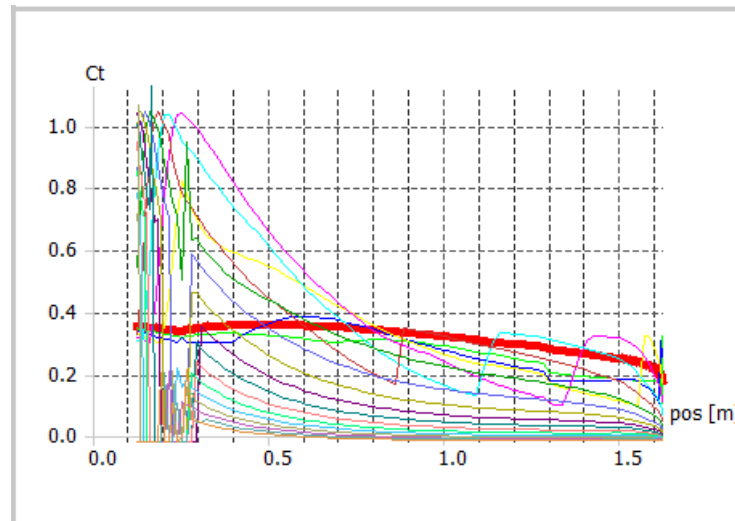
Gambar 151. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 151, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 5 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $-0,05 \leq C_t \leq 0,9$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,03 pada rentang $-0,05 \leq C_t \leq 0,9$ seperti tampak pada Gambar 151 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



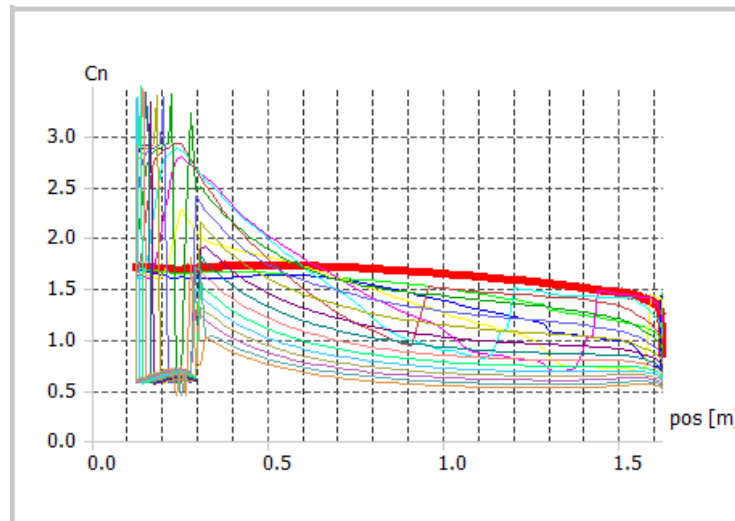
Gambar 152. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 152, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 6 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq C_n \leq 3,0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,9$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,9 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,1 pada rentang nilai $0,5 \leq C_n \leq 3,0$ seperti tampak pada Gambar 152 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



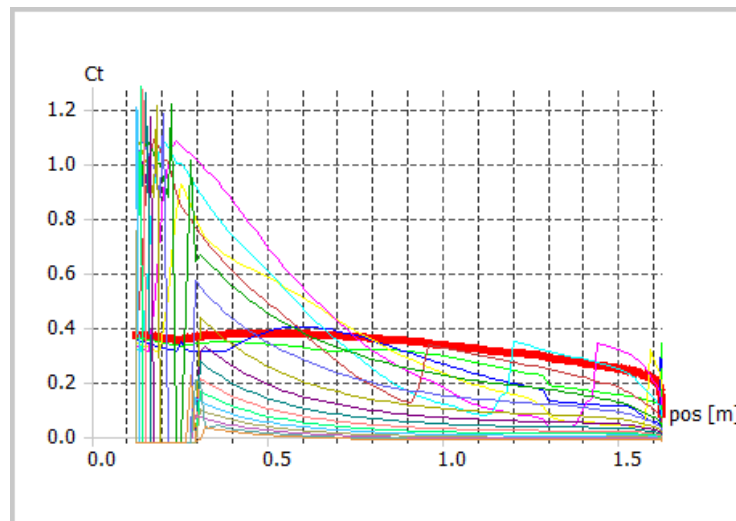
Gambar 153. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 153, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 6 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,0 \leq C_t \leq 1,1$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,02 pada rentang nilai $0,0 \leq C_t \leq 1,1$ seperti tampak pada Gambar 153 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



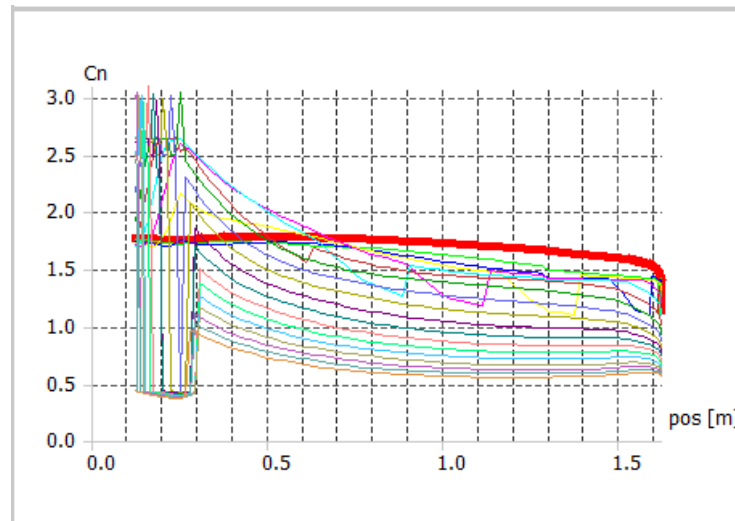
Gambar 154. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 154, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq C_n \leq 3,5$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,9$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,9 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,09 pada rentang nilai $0,5 \leq C_n \leq 3,5$ seperti tampak pada Gambar 154 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



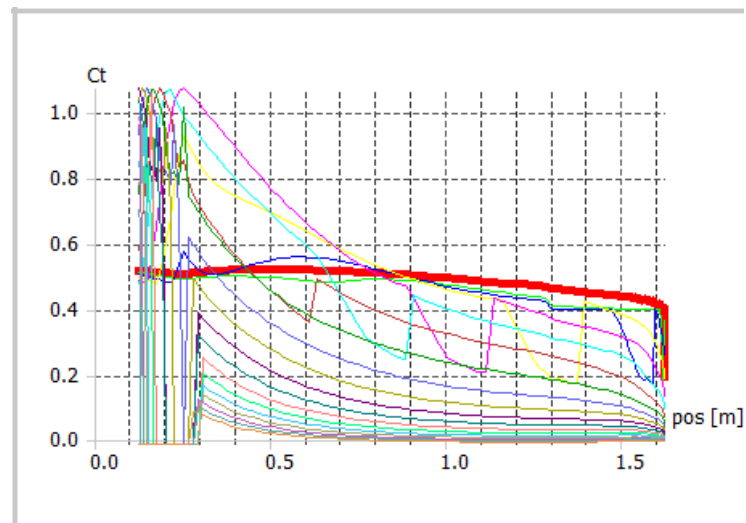
Gambar 155. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 155, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq C_t \leq 1,2$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,9$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,9 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,05 pada rentang nilai $0,5 \leq C_t \leq 1,2$ seperti tampak pada Gambar 155 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



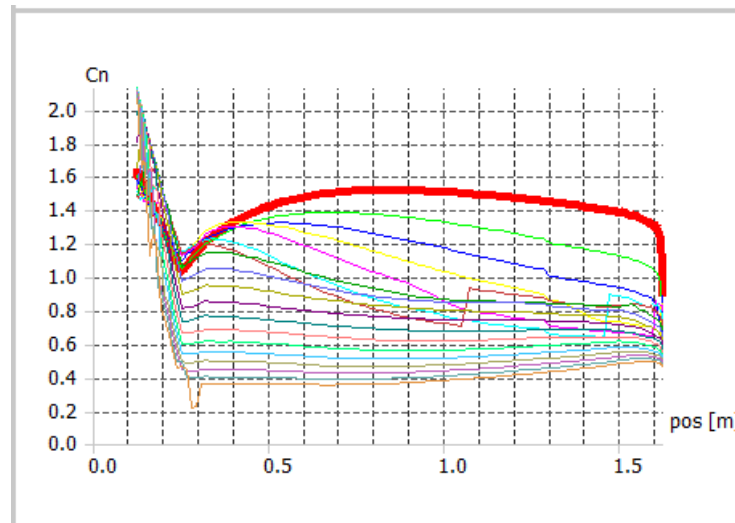
Gambar 155. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 155, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq C_n \leq 3,0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,1 pada rentang nilai $0,5 \leq C_n \leq 3,0$ seperti tampak pada Gambar 155 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



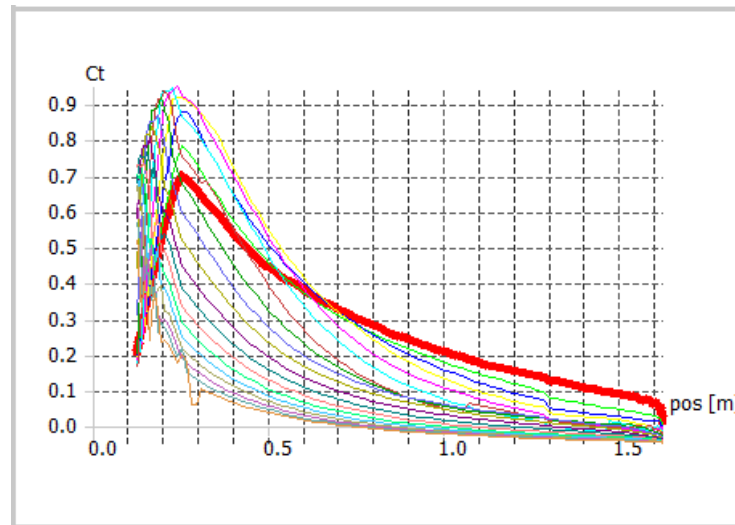
Gambar 157. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 157, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,05 \leq C_t \leq 1,1$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,8$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,8 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,1 pada rentang $0,05 \leq C_t \leq 1,1$ seperti tampak pada Gambar 157 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



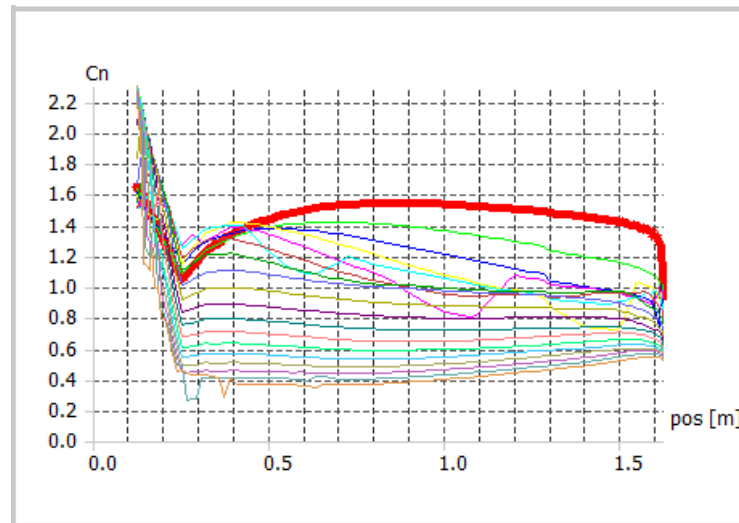
Gambar 158. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 158, pada Rancangan Sudu B yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $1,4 \leq C_n \leq 2,0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,09 pada rentang nilai $0,4 \leq C_n \leq 2,0$ seperti tampak pada Gambar 158 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



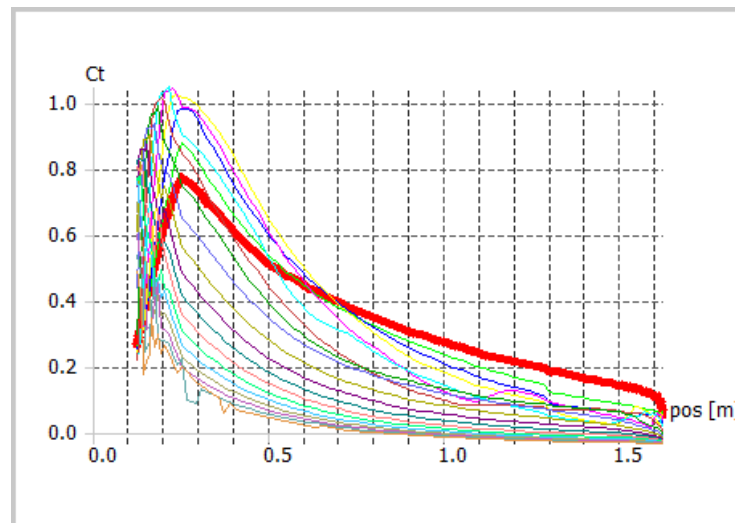
Gambar 159. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 159, pada Rancangan Sudu B yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,2 \leq C_t \leq 0,9$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,09 pada rentang $0,0 \leq C_t \leq 0,9$ seperti tampak pada Gambar 159 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



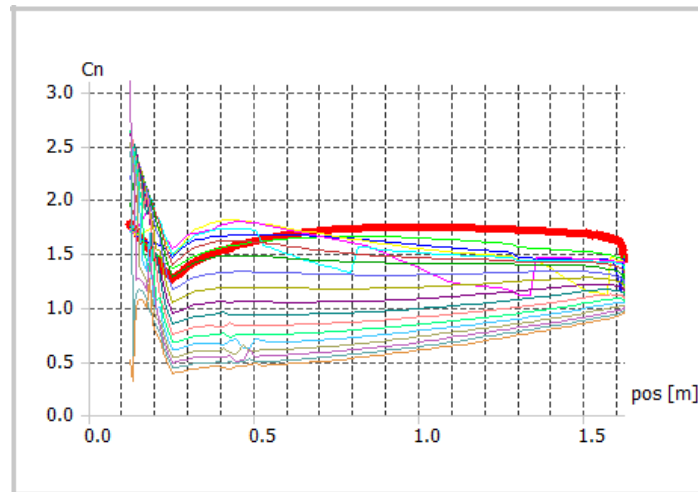
Gambar 160. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 160, pada Rancangan Sudu C yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $1,6 \leq C_n \leq 2,2$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,09 pada rentang nilai $0,4 \leq C_n \leq 2,2$ seperti tampak pada Gambar 160 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



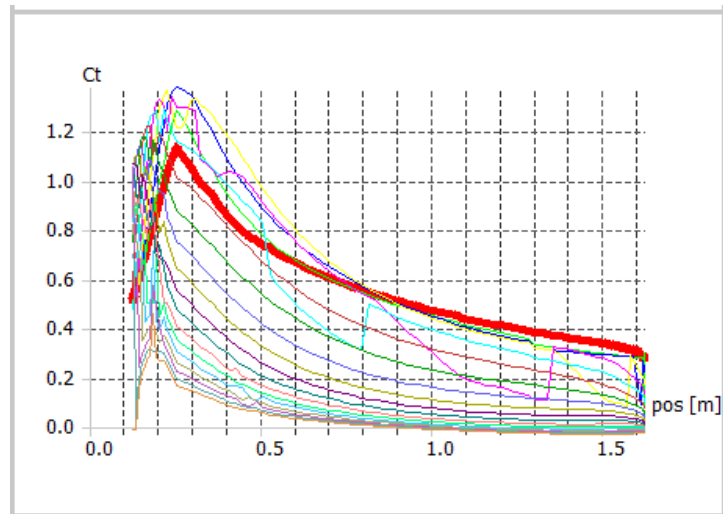
Gambar 161. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 161, pada Rancangan Sudu C yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,2 \leq C_t \leq 1,0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung menurun dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,05 pada rentang nilai $0,0 \leq C_t \leq 1,0$ seperti tampak pada Gambar 161 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).



Gambar 162. Distribusi nilai koefisien gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 162, pada Rancangan Sudu D yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya aksial (C_n) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,5 \leq C_n \leq 3,0$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung meningkat dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya aksial (C_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_n akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_n rata-rata sebesar 0,1 pada rentang nilai $0,4 \leq C_n \leq 2,2$ seperti tampak pada Gambar 162 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).

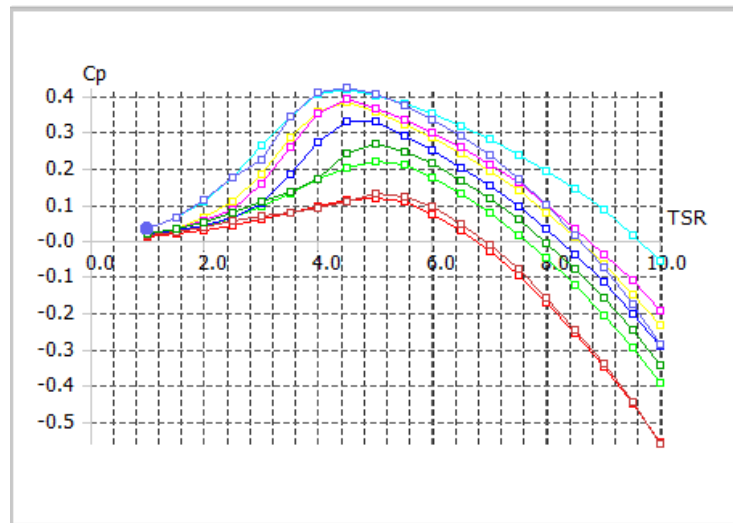


Gambar 163. Distribusi nilai koefisien gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva teratas

Berdasarkan Gambar 163, pada Rancangan Sudu D yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai koefisien gaya tangensial (C_t) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0,0 \leq C_t \leq 1,2$ sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,15$ dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,15 \leq r \leq 0,25$ dan cenderung meningkat dengan landai sepanjang rentang nilai $0,25 \leq r \leq 1,65$. Nilai koefisien gaya tangensial (C_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai C_t akan menurun dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi penurunan nilai C_t rata-rata sebesar 0,05 pada rentang $0,4 \leq C_t \leq 1,4$ seperti tampak pada Gambar 163 secara berurutan dari kurva teratas (warna merah) sampai kurva terbawah (warna orange).

e. Hasil Simulasi Sudu Turbin: Koefisien Daya Betz

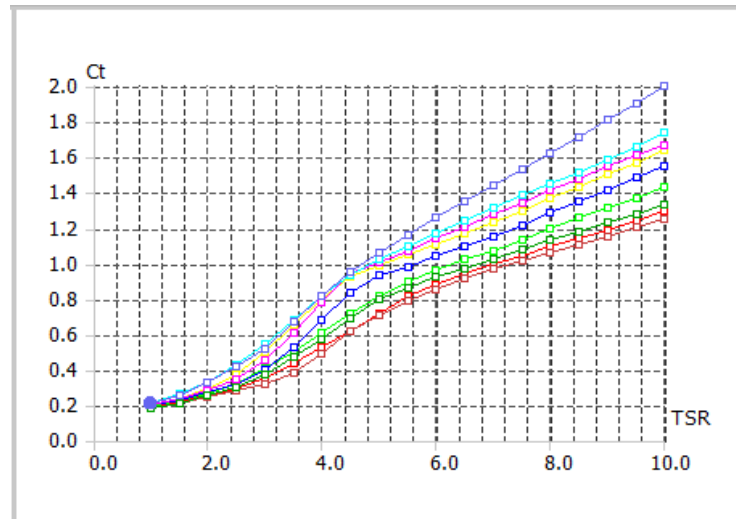
Nilai koefisien daya output yang berpedoman pada konsep Betz (koefisien daya Betz, C_p) dan koefisien torsi (C_t) yang dihasilkan oleh sudu turbin berdasarkan Rancangan Sudu A, B, C dan D pada nilai TSR tertentu ($1 \leq \text{TSR} \leq 10$) pada kondisi kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s seperti tampak pada Gambar 164 sampai dan Gambar 165.



Gambar 164. Nilai koefisien daya Betz terhadap TSR yang dihasilkan turbin berdasarkan Rancangan Sudu A, B, C dan D mulai kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 164, terlihat nilai koefisien daya Betz (C_p) mengalami peningkatan dari 0,1 sampai 0,41 dengan meningkatnya TSR dari 1 sampai 4 dan nilai C_p menurun dari 0,4 menuju nilai -0,55 dengan meningkatnya TSR dari 4,0 menuju 10. Nilai C_p juga dipengaruhi oleh geometri sudu (Rancangan Sudu A, B, C dan D) yaitu nilai C_p secara berurutan mulai terendah sampai tertinggi terjadi untuk Rancangan Sudu A pada kecepatan angin 3 m/s (warna merah), Rancangan Sudu B (merah marun), Rancangan Sudu C (hijau terang), rancangan Sudu A (kecepatan angin 4 m/s (hijau tua), 5 m/s (biru), 6 m/s (kuning), 7 m/s (pink), 18 m/s (biru muda)) dan Rancangan Sudu D pada kecepatan angin 18 m/s (warna

(biru terang) dengan nilai C_p Betz maksimum secara berurutan 0,11; 0,12; 0,21; 0,27; 0,31; 0,36; 0,38; 0,40; 0,41.



Gambar 165. Nilai koefisien torsi terhadap TSR yang dihasilkan turbin berdasarkan Rancangan Sudu A, B, C dan D mulai kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 165, tampak terlihat nilai koefisien torsi (C_t) mengalami peningkatan dari 0,2 sampai 2,1 dengan meningkatnya TSR dari 1 sampai 10 Nilai C_t juga dipengaruhi oleh geometri sudu (Rancangan Sudu A, B, C dan D) yaitu nilai C_t secara berurutan mulai terendah sampai tertinggi terjadi untuk Rancangan Sudu A pada kecepatan angin 3 m/s (warna merah), Rancangan Sudu B (merah marun), Rancangan Sudu C (hijau terang), rancangan Sudu A (kecepatan angin 4 m/s (hijau tua), 5 m/s (biru), 6 m/s (kuning), 7 m/s (pink), 18 m/s (biru muda)) dan Rancangan Sudu D pada kecepatan angin 18 m/s (warna (biru terang) dengan nilai C_t maksimum secara berurutan 1,25; 1,30; 1,35; 1,41; 1,55; 1,60; 1,62; 1,72; 2,0.

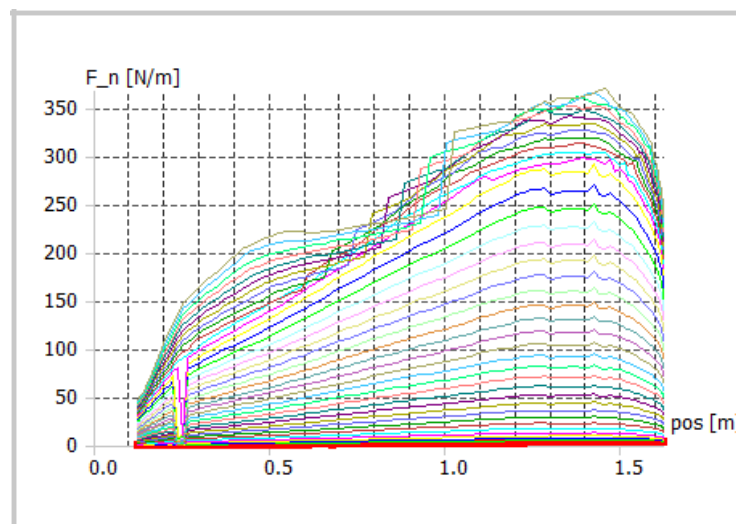
4. Simulasi Rotor Turbin berdasar NACA 4415 modif

Proses simulasi kinerja turbin angin dilanjutkan dengan melakukan simulasi kinerja rotor turbin berdasarkan hasil simulasi kinerja sudu yang telah dijabarkan dalam Gambar 101 hingga Gambar 113.

Hasil simulasi kinerja rotor turbin berupa gaya-gaya yang bekerja pada sudu-sudu turbin dan daya output yang dapat dihasilkan oleh rotor turbin angin dengan mengekstrak energi angin.

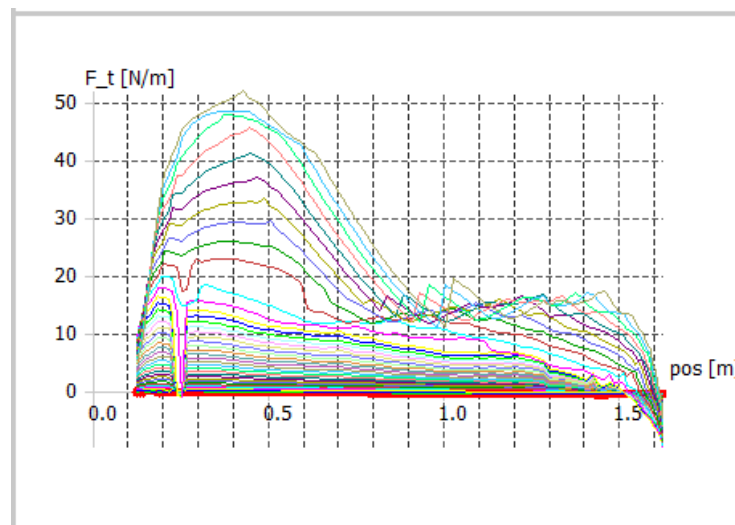
a. Hasil Simulasi Rotor Turbin: Gaya pada Sudu

Nilai gaya yang bekerja pada sudu hasil Rancangan Sudu A, B, C dan D yaitu gaya aksial atau normal (normal force, F_n) dan gaya tangensial (tangensial force, F_t) pada posisi radial sudu twist 0° pada pangkal sudu sampai tepi sudu untuk kondisi nilai TSR dari 1 sampai 10 dan kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 dan 18 m/s seperti tampak pada Gambar 166 sampai dan Gambar 187.



Gambar 166. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk $TSR = 1$ sampai 10 berurut dari kurva terbawah

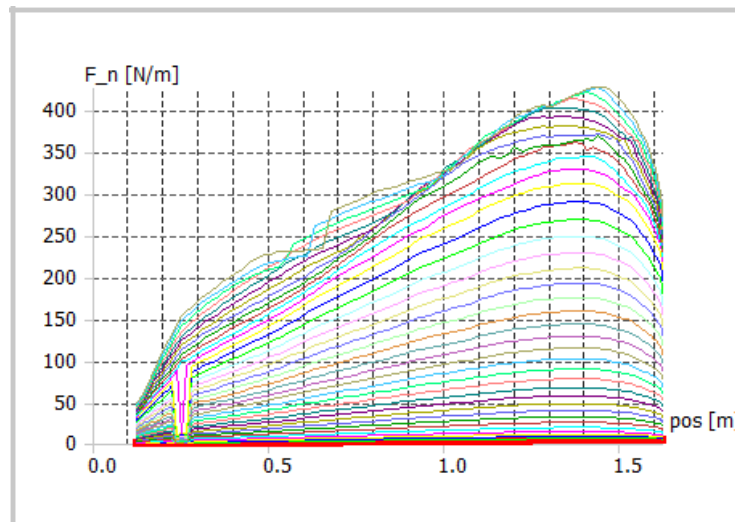
Berdasarkan Gambar 166, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 350$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 17,5 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 350$ N/m seperti tampak pada Gambar 166 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



Gambar 167. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 3 m/s untuk $\text{TSR} = 1$ sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 167, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 50$ N/m

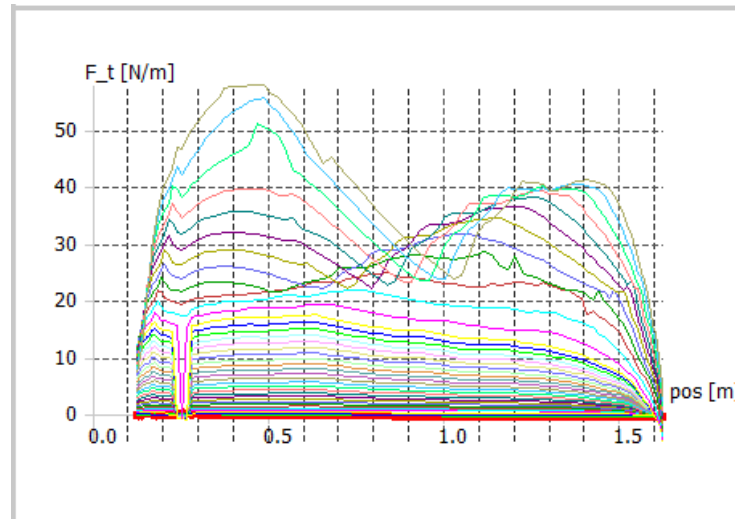
sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,5 \leq r \leq 0,9$ m dan menurun secara landai pada rentang $0,9 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 2,5 N/m pada rentang $0 \leq F_t \leq 50$ N/m seperti tampak pada Gambar 167 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



Gambar 168. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk $\text{TSR} = 1$ sampai 10 berurut dari kurva terbawah

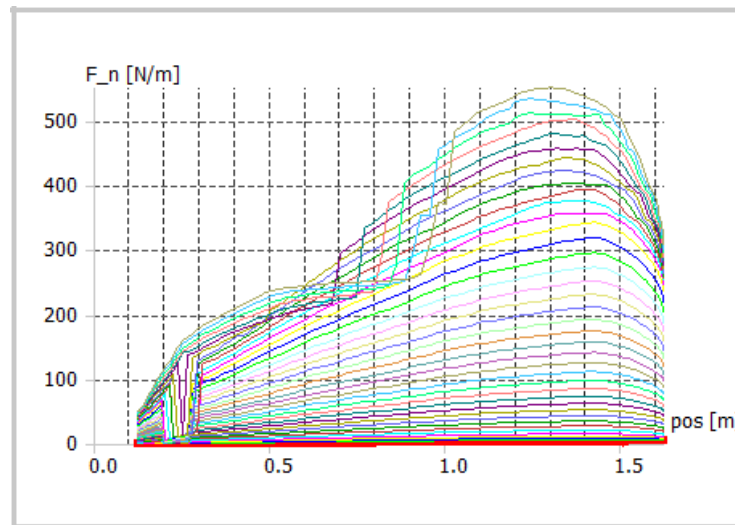
Berdasarkan Gambar 168, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 425$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq$

TSR ≤ 10 akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 20 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 425$ N/m seperti tampak pada Gambar 168 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



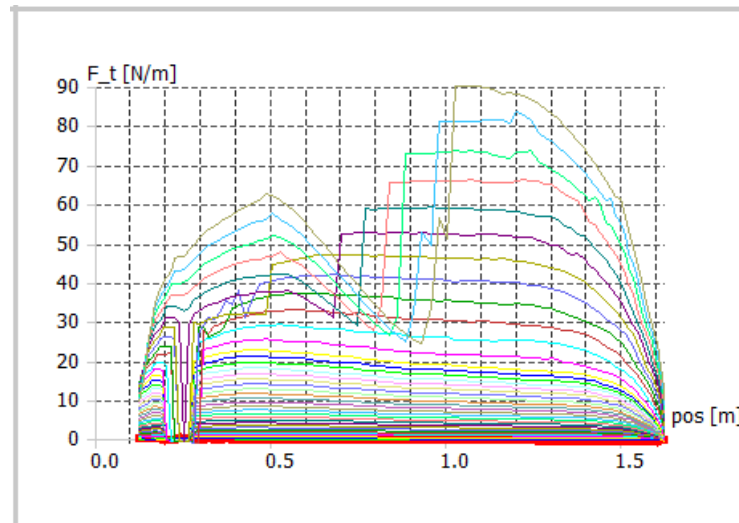
Gambar 169. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 169, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 60$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,5 \leq r \leq 0,9$ m dan menurun secara landai pada rentang $0,9 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 2,25 N/m pada rentang $0 \leq F_t \leq 50$ N/m seperti tampak pada Gambar 169 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



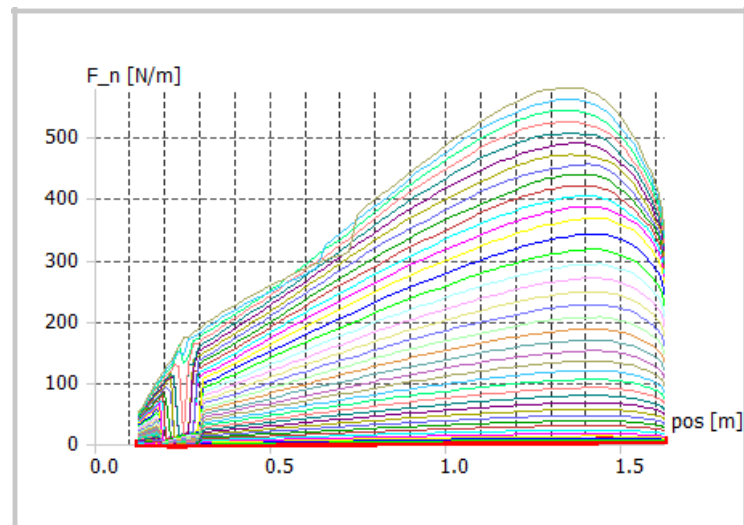
Gambar 170. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 170, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 5 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 550$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 27,5 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 550$ N/m seperti tampak pada Gambar 170 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



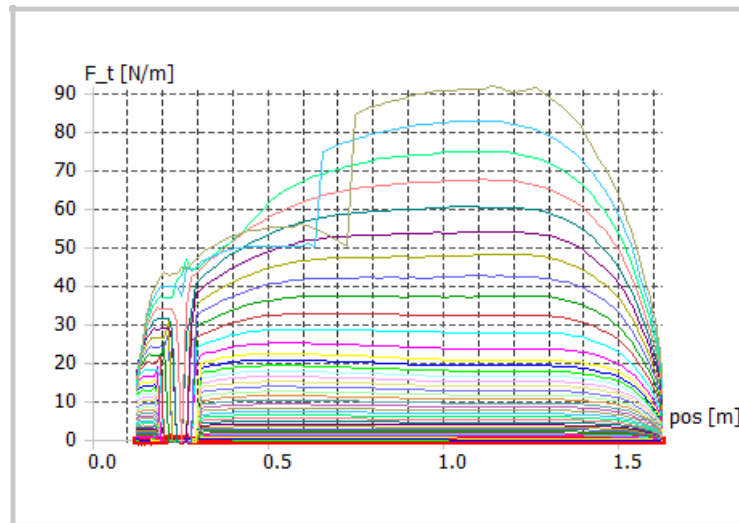
Gambar 171. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 5 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 171, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 5 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 65$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,5 \leq r \leq 0,9$ m dan meningkat kembali secara tajam dengan nilai $25 \leq F_t \leq 90$ N/m pada rentang $0,9 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 4,5 N/m pada rentang $0 \leq F_t \leq 90$ N/m seperti tampak pada Gambar 171 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



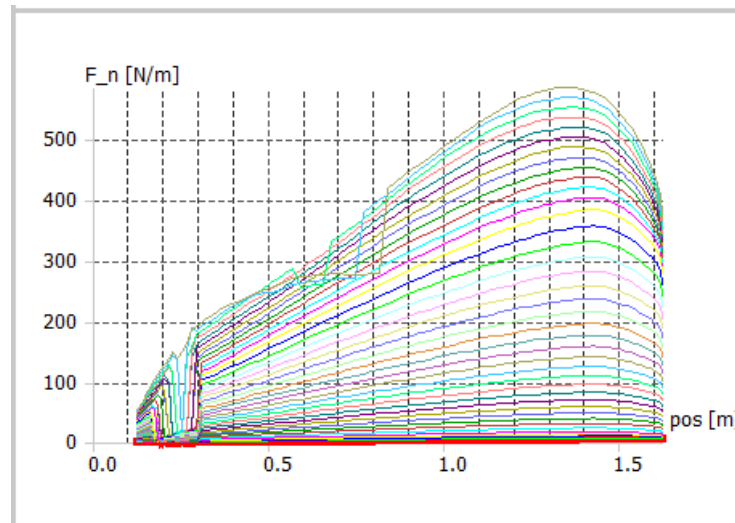
Gambar 172. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 172, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 6 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 575$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 28,5 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 575$ N/m seperti tampak pada Gambar 172 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



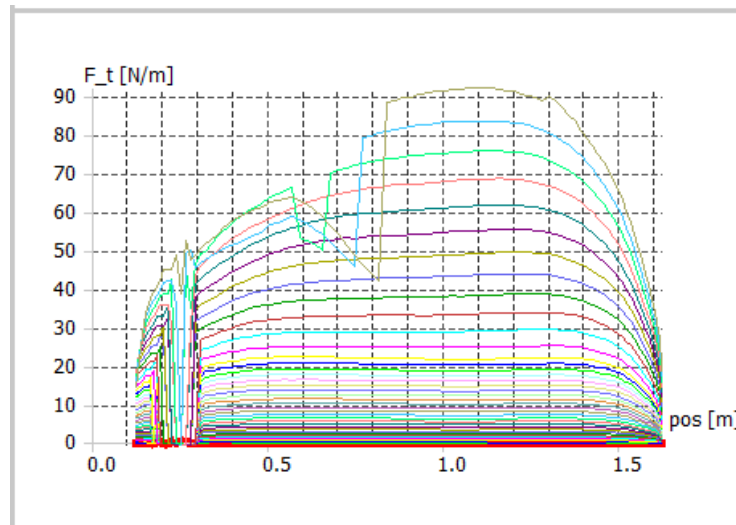
Gambar 173. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 6 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 173, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 6 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 90$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 4,5 N/m pada rentang $0 \leq F_t \leq 90$ N/m seperti tampak pada Gambar 173 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



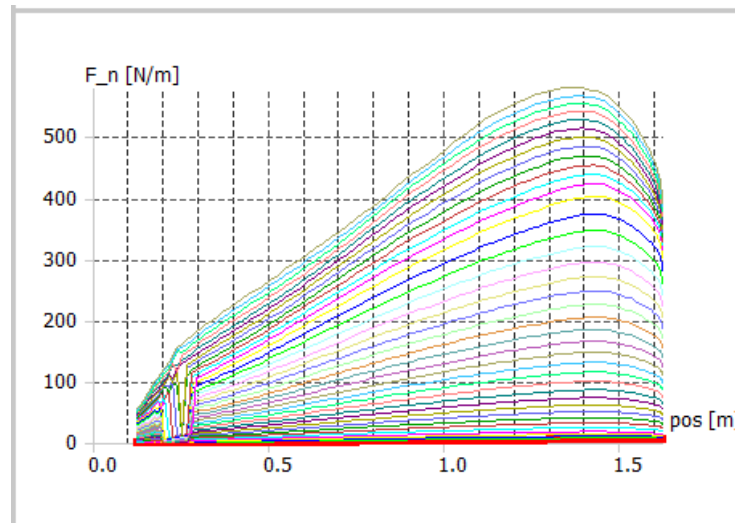
Gambar 174. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 174, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 600$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 30 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 600$ N/m seperti tampak pada Gambar 174 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



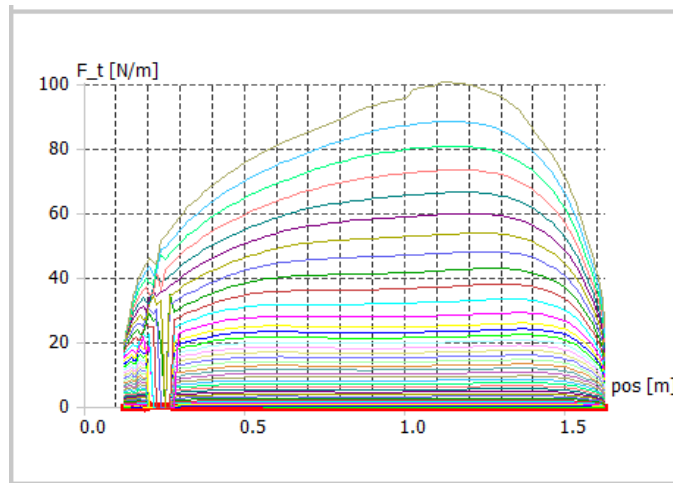
Gambar 175. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 7 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 175, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 92$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 4,5 N/m pada rentang $0 \leq F_t \leq 92$ N/m seperti tampak pada Gambar 170 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



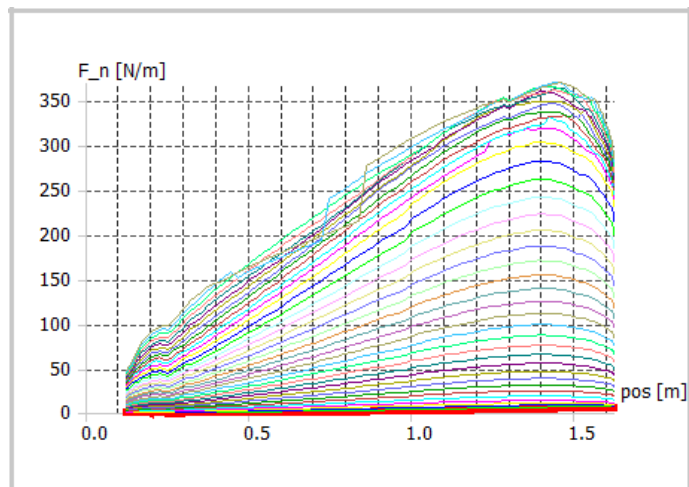
Gambar 176. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 176, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 600$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 30 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 600$ N/m seperti tampak pada Gambar 176 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



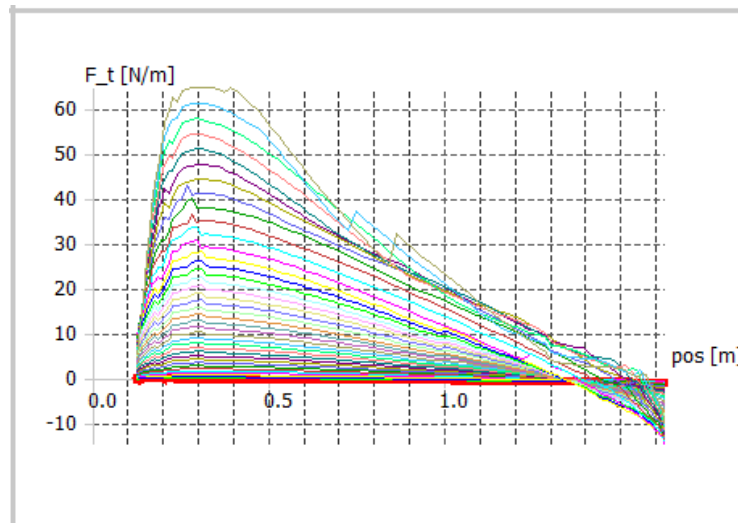
Gambar 177. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu A dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 177, pada Rancangan Sudu A yang dilalui angin dengan kecepatan 7 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 100$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 5 N/m pada rentang $0 \leq F_t \leq 100$ N/m seperti tampak pada Gambar 177 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



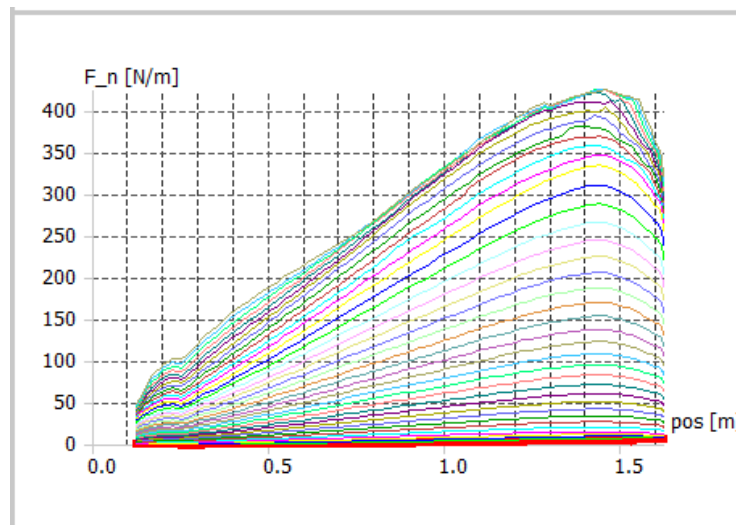
Gambar 178. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 178, pada Rancangan Sudu B yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 360$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 18 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 360$ N/m seperti tampak pada Gambar 178 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



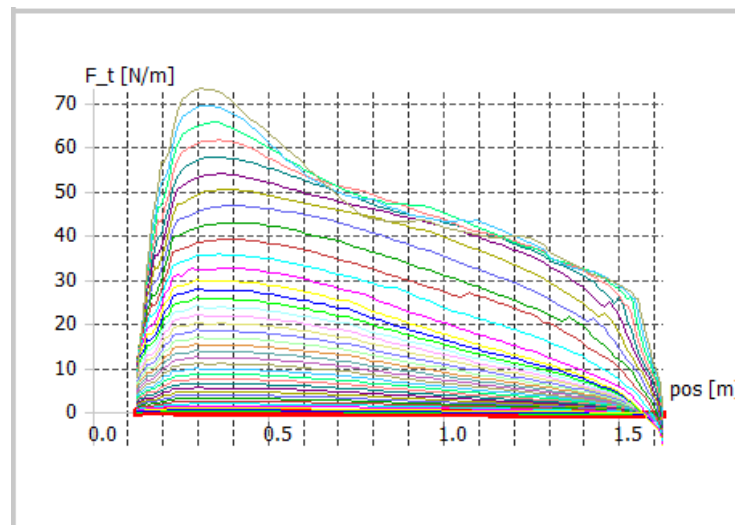
Gambar 179. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu B dengan kecepatan angin 3 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 179, pada Rancangan Sudu B yang dilalui angin dengan kecepatan 3 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 65$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 3,25 N/m pada rentang $10 \leq F_t \leq 65$ N/m seperti tampak pada Gambar 179 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



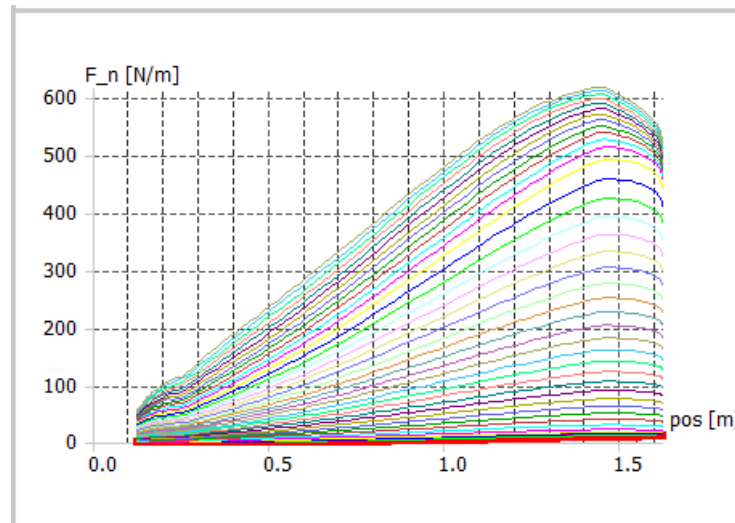
Gambar 180. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 180, pada Rancangan Sudu C yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 425$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 15 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 425$ N/m seperti tampak pada Gambar 180 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



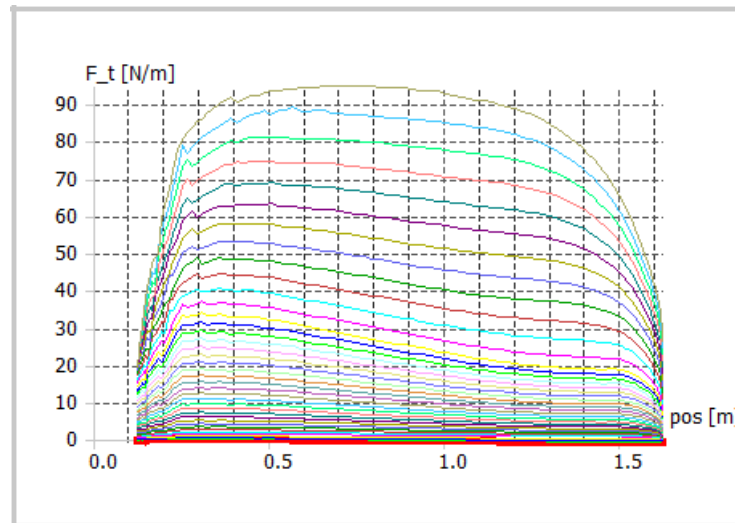
Gambar 181. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu C dengan kecepatan angin 4 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 181, pada Rancangan Sudu C yang dilalui angin dengan kecepatan 4 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 70$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $0,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 3,5 N/m pada rentang $10 \leq F_t \leq 70$ N/m seperti tampak pada Gambar 181 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



Gambar 182. Distribusi nilai gaya aksial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 182, pada Rancangan Sudu D yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai gaya aksial (F_n) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_n \leq 600$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 1,5$ m dan menurun secara tajam sepanjang rentang $1,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya aksial (F_n) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_n akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_n rata-rata sebesar 25 N/m pada rentang $0 \leq F_n \leq 600$ N/m seperti tampak pada Gambar 182 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).



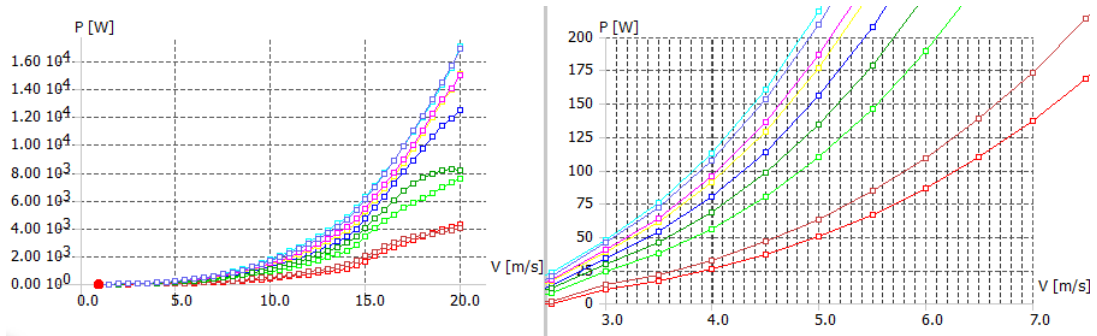
Gambar 183. Distribusi nilai gaya tangensial sepanjang posisi elemen sudu pada Rancangan Sudu D dengan kecepatan angin 18 m/s untuk TSR = 1 sampai 10 berurut dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 183, pada Rancangan Sudu D yang dilalui angin dengan kecepatan 18 m/s tampak terlihat nilai gaya tangensial (F_t) persatuan panjang profil sudu (chord) sepanjang radial sudu mengalami peningkatan dengan nilai $0 \leq F_t \leq 95$ N/m sepanjang rentang $0,1 \leq r \leq 0,5$ m dan menurun secara landai sepanjang rentang $0,5 \leq r \leq 1,65$ m. Nilai gaya tangensial (F_t) dipengaruhi pula oleh nilai TSR yaitu nilai F_t akan meningkat dengan meningkat TSR, yaitu untuk setiap peningkatan nilai TSR sebesar 0,5 pada rentang nilai $1 \leq \text{TSR} \leq 10$ akan terjadi peningkatan nilai F_t rata-rata sebesar 4,5 N/m pada rentang $10 \leq F_t \leq 70$ N/m seperti tampak pada Gambar 183 secara berurutan dari kurva terbawah (warna merah) sampai kurva teratas (warna orange).

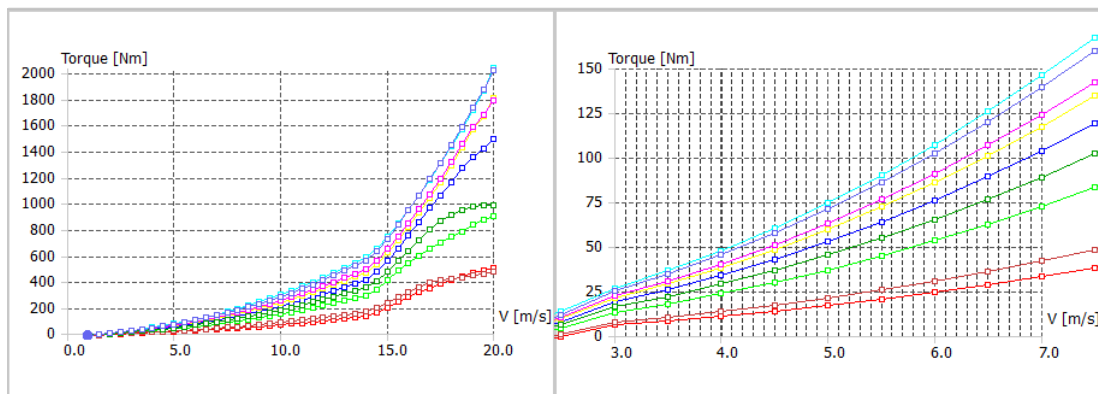
b. Hasil Simulasi Rotor Turbin: Daya Output

Simulasi numerik rotor turbin berupa daya output yang diekstrak dari energi angin dapat disajikan berupa kurva daya output terhadap kecepatan angin (Gambar 184), kurva torsi terhadap kecepatan angin (Gambar 185), berupa kurva daya output terhadap TSR (Gambar

186), kurva torsi terhadap TSR (Gambar 187) dan berupa kurva koefisien daya output terhadap kecepatan angin (Gambar 188), kurva koefisien daya terhadap TSR (Gambar 189).



Gambar 184. Nilai daya terhadap kecepatan angin serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah



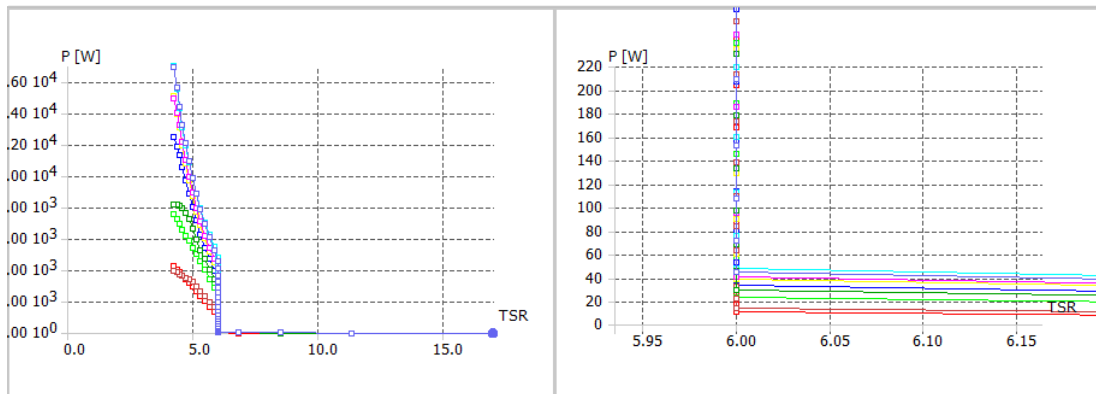
Gambar 185. Nilai torsi terhadap kecepatan angin dan optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 184 dan Gambar 185 dengan gambar sebelah kanan merupakan perbesaran skala dari gambar sebelah kiri, tampak terlihat bahwa daya dan torsi mempunyai kecenderungan yang sama (kurva identik) mempunyai gradient positif kecil (meningkat secara lambat/landai) dengan meningkatnya kecepatan angin dari 1 m/s sampai 5 m/s dan gradient positif cenderung membesar dengan meningkatnya kecepatan angin dari 5 m/s

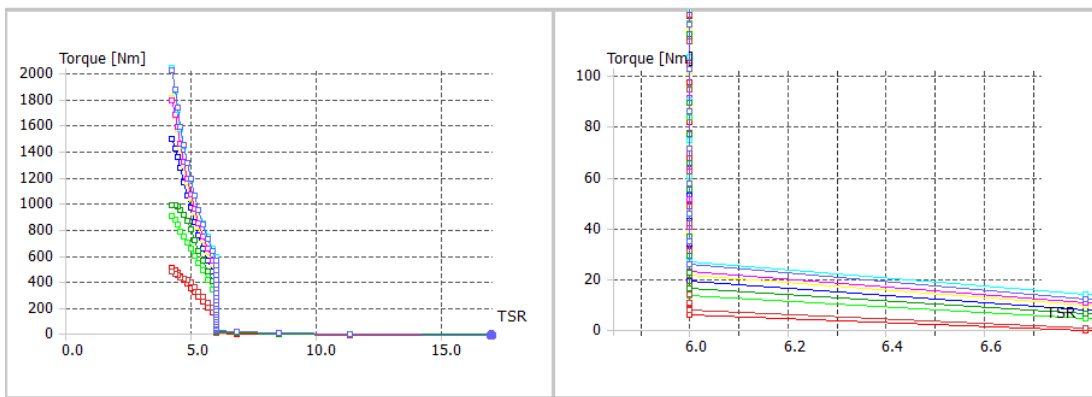
sampai 10 m/s dan gradient positif cenderung semakin membesar (meningkat secara esktrim) dengan meningkatnya kecepatan angin dari 10 m/s sampai 20 m/s.

Berdasarkan Gambar 184, pada kecepatan angin dari 1 m/s sampai 5 m/s, daya output yang dihasilkan 0 Watt sampai 50 Watt pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan 0 Watt sampai 240 Watt pada sudu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$, pada kecepatan angin 5 m/s sampai 10 m/s daya output yang dihasilkan 50 Watt sampai 400 Watt pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan 240 Watt sampai 1700 Watt pada sudu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$, serta pada kecepatan angin 10 m/s sampai 20 m/s daya output yang dihasilkan 400 Watt sampai 4000 Watt pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan 1700 Watt sampai 17000 Watt pada sudu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$.

Berdasarkan Gambar 185, pada kecepatan angin dari 1 m/s sampai 5 m/s, torsi yang dihasilkan 0 Nm sampai 17 Nm pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan 0 Nm sampai 75 Nm pada sudu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$, pada kecepatan angin 5 m/s sampai 10 m/s torsi yang dihasilkan 17 Nm sampai 68 Nm pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan 75 Nm sampai 300 Nm pada sudu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$ dan pada kecepatan angin 10 m/s sampai 20 m/s daya output yang dihasilkan 68 Nm sampai 475 Nm pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan Nm 300 Nm sampai 2040 Nm pada sudu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$.



Gambar 186. Nilai daya terhadap TSR serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah



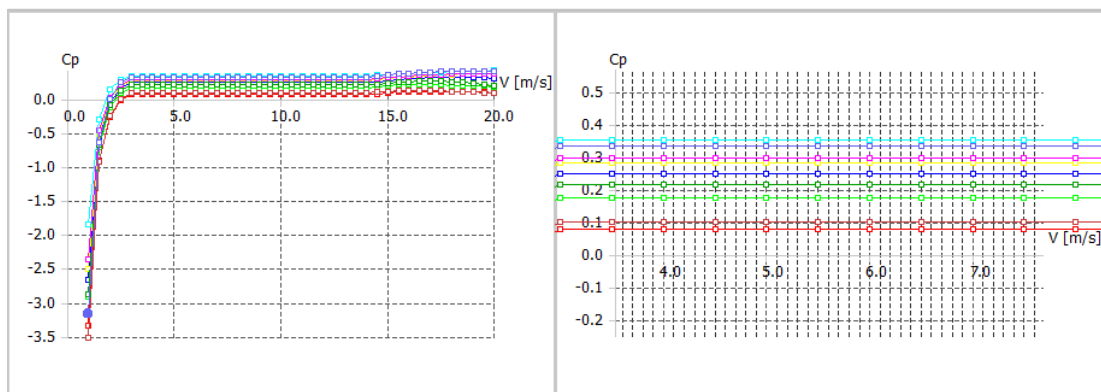
Gambar 187. Nilai torsi terhadap TSR serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 186 dan 187 dengan gambar sebelah kanan merupakan perbesaran skala dari gambar sebelah kiri, tampak terlihat bahwa daya dan torsi mempunyai kecenderungan yang sama (kurva indentik) mempunyai gradient negatif yang besar dengan meningkatnya TSR dari 1 sampai 6 dan gradient negatif cenderung kecil dengan meningkatnya TSR dari 6 sampai 10 atau lebih.

Berdasarkan Gambar 186, pada tip speed ratio TSR dalam interval $4 < \text{TSR} < 6$, daya output yang dihasilkan menurun dari 4000 Watt menuju 1100 Watt pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan dari 17000 Watt menuju 4800 Watt pada sudu dengan kondisi

optimalisasi $Re = 250000$, pada $TSR \approx 6$ daya output yang dihasilkan menurun dari 1100 Watt menuju 11 Watt pada suhu dengan kondisi $Re = 41000$ dan menurun dari 4800 menuju 47 Watt pada suhu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$, dalam interval $6 \leq TSR \leq 10$ daya output yang dihasilkan menurun secara lambat dari 11 Watt menuju 0 Watt pada suhu dengan kondisi $Re = 41000$ dan menurun dari 47 Watt menuju 0 Watt pada suhu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$.

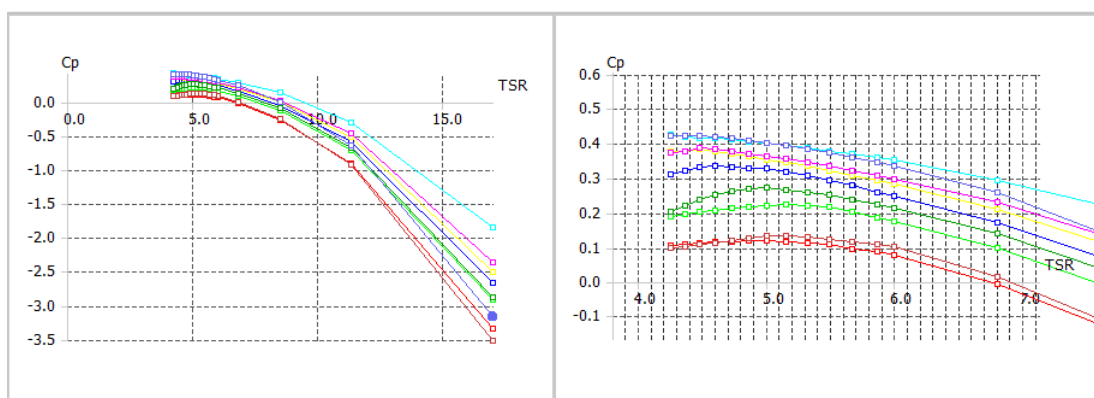
Berdasarkan Gambar 187, pada tip speed rasio TSR dalam interval $4 < TSR < 6$, torsi yang dihasilkan menurun dari 480 Nm menuju 132 Nm pada suhu dengan kondisi $Re = 41000$ dan dari 2040 Nm menuju 584 Nm pada suhu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$, pada $TSR \approx 6$ torsi yang dihasilkan menurun dari 132 Nm menuju 6 Nm pada suhu dengan kondisi $Re = 41000$ dan menurun dari 584 Nm menuju 27 Nm pada suhu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$, dalam interval $6 \leq TSR \leq 10$ torsi yang dihasilkan menurun secara lambat dari 6 Nm menuju 0 Nm pada suhu dengan kondisi $Re = 41000$ dan menurun dari 27 Nm menuju 0 Nm pada suhu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$.



Gambar 188. Nilai koefisien daya terhadap kecepatan angin serta optimalisasi cl/cd 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 188 dengan gambar sebelah kanan merupakan perbesaran skala dari gambar sebelah kiri, tampak terlihat bahwa koefisien daya mempunyai kecenderungan yang sama (kurva indentik) mempunyai gradient positif yang besar dengan meningkatnya kecepatan angin dari 1 m/s sampai 3 m/s dan gradien cenderung kecil (relatif konstan) dengan meningkatnya kecepatan angin dari 3 m/s sampai 20 m/s.

Pada kecepatan angin 1 m/s sampai 3 m/s, koefisien daya C_p mengalami peningkatan dari -3,5 sampai 0,08 pada sudut dengan kondisi $Re = 41000$ dan mengalami peningkatan dari -1,85 sampai 0,35 pada sudut dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$ dan pada kecepatan angin 3 m/s sampai 20 m/s koefisien daya mengalami peningkatan dari 0,08 sampai 0,1 pada sudut dengan kondisi $Re = 41000$ dan dari 0,35 sampai 0,42 pada sudut dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$.

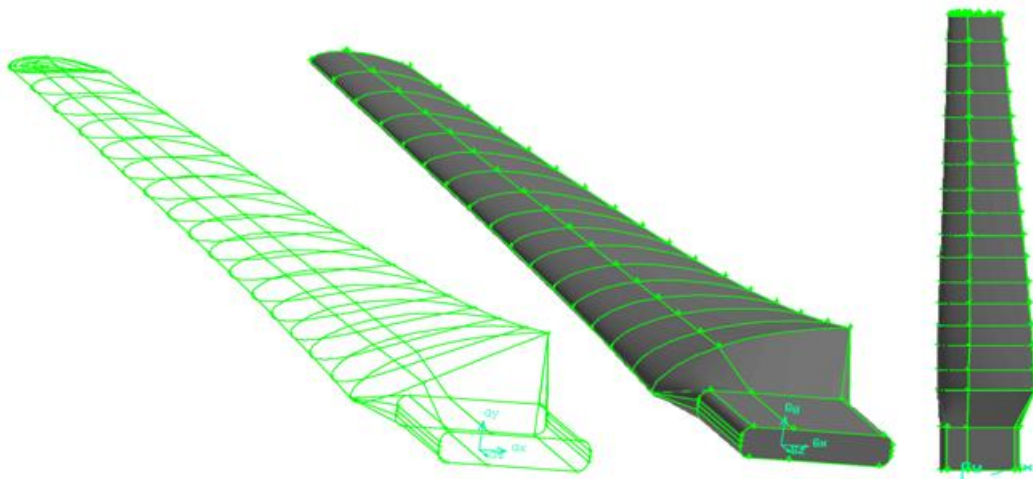


Gambar 189. Nilai koefisien daya terhadap TSR serta optimalisasi c_l/c_d 5 deg dan 5,5 deg pada berbagai Re secara berurutan dari kurva terbawah

Berdasarkan Gambar 189 dengan gambar sebelah kanan merupakan perbesaran skala dari gambar sebelah kiri, tampak terlihat bahwa koefisien daya mempunyai kecenderungan yang sama (kurva indentik) mempunyai gradient negatif yang kecil dengan meningkatnya TSR dari 4 sampai 5,5 dan gradient negatif cenderung membesar dengan meningkatnya TSR dari 5,5 sampai 10.

Pada TSR dari 4 sampai 5,5, koefisien daya C_p mengalami peningkatan dari 0,08 sampai 0,11 pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan mengalami penurunan dari 0,42 sampai 0,38 pada sudu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$ dan pada TSR dari 5,5 sampai 10 koefisien daya mengalami penurunan dari 0,11 sampai -0,55 pada sudu dengan kondisi $Re = 41000$ dan dari 0,38 sampai -0,08 pada sudu dengan kondisi optimalisasi $Re = 250000$.

Bentuk sudu turbin angin yang optimum adalah bentuk yang terjabarkan dalam Gambar 190 yang dapat dipuntir sejauh maksimal $24,8^\circ$ pada bagian root (pangkal) sudu turbin angin serta $-4,7^\circ$ pada bagian tip (ujung) sudu turbin angin.



Gambar 190. Bentuk sudu turbin angin airfoil NACA 4415 modif

G. Pembuatan prototype propeler kincir angin

Propeler kincir angin sebelumnya terbuat dari material logam, dampak adanya perkembangan teknologi saat ini menyebabkan propeler telah mulai dibuat dari material komposit *skin* GFRP (*glass fiber reinforced plastic*). Hal ini dikarenakan material propeler tersebut diharapkan mempunyai bobot yang ringan agar mudah berputar ketika ditiup angin. Selain ringan, struktur propeler harus kuat menahan beban luar. Oleh sebab itu propeler kincir angin yang terbuat dari komposit *skin* GFRP perlu dikembangkan menjadi struktur *sandwich* agar mampu menahan beban luar (benturan) yang lebih besar. Potensi sumber daya alam rami dan KSL perlu dimanfaatkan untuk mereduksi penggunaan bahan sintetis impor.

Proses fabrikasi yang dipilih untuk membuat material komposit Poliester – kayu sengon laut dan serat rami adalah metode *Hand Lay Up* 1 lapis dan 2 lapis serat rami. Pemilihan metode ini dilakukan karena prosesnya yang sederhana dan mudah serta biaya produksi yang relatif rendah untuk produksi skala kecil. Namun di sisi lain, metode ini juga memiliki beberapa kekurangan, diantaranya adalah tingkat kesempurnaan proses yang tidak stabil, karena sangat bergantung dari operator yang mengerjakan dan alat yang digunakan sehingga mengakibatkan banyaknya hasil produksi cacat (*reject*).

1. Peralatan dan mesin yang digunakan

Alat – alat yang dipergunakan selama proses fabrikasi komposit propeler adalah :

1. Gunting
2. Gelas Ukur
3. Batang pengaduk
4. Gelas Kaca
5. Cetakan dari Kaca, Plastik, dan Acrylic
6. Mesin potong dan gergaji
7. Oven Listrik

8. Amplas
9. Alat Press Cetakan
10. Mesin Bor Listrik
11. Hand Sprayer

Alat – alat yang dipergunakan untuk pengujian material komposit propeler adalah :

1. Mesin Universal Testing Material
2. Alat ukur keseimbangan beban
3. Mesin uji Impak charpy
4. SEM (Scanning Electron Microscopy)

2. Bahan dan material yang digunakan

Pada penelitian bahan – bahan dan material yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Bahan kayu sengon laut dan serat alam jenis rami
2. Resin unsaturated polyester dengan merek Yukalac C 108 B sebagai matriks
3. Metil Etil Keton Peroksida (MEKPo) sebagai Hardener / curing agent
4. Vaseline untuk mencegah menempelnya resin ke permukaan cetakan.

3. Persiapan sampel

Serat yang digunakan untuk fabrikasi propeler adalah serat rami yang telah mengalami degumisasi (*degummed fiber*) seperti ditunjukkan pada Gambar 191. Degumisasi ialah proses pembersihan serat dari getah pectin, lignin wales dan lain-lain, bertujuan agar serat menjadi lebih halus serta meningkatkan kinerja interface antara serat rami dengan matriks pada material PMC. Namun pengurangan lignin tidak seluruhnya melainkan hanya sebagian saja, karena pengurangan keseluruhan akan mengakibatkan material menjadi tidak baik kemampuan termalnya menurut penelitian sebelumnya serat rami ini memiliki massa jenis 0.9 gram / ml.



Gambar 191. Serat Rami

Kemudian serat rami tersebut diluruskan dan dirapihkan dengan cara disisir hingga serat rami yang tadinya menggumpal dan menyatu menjadi terpisah satu – satu. Setelah disisir, kemudian serat rami dipotong dengan variasi dua ukuran, 14 cm dan 10 cm. Setelah itu serat rami dikeringkan menggunakan oven listrik selama tiga jam pada temperatur 100°C. Perlakuan ini diberikan karena sifat rami yang sangat mudah menyerap air sedangkan dalam fabrikasi material komposit rami – polyester, keberadaan air akan mengurangi interaksi interface antara matriks dan serat, sehingga kekuatan mekanik akan semakin berkurang.

Rainforcement/ penguat serat kayu sengon laut diambil pada satu batang dengan harapan karakteristik bahan kayu sama, dan setelah dibelah dibuat bahan spesimen dengan ukuran 200mm x 50mm x 10mm. Kemudian spesimen tersebut di *treatment* perendaman dalam NaOH selama 3 jam untuk mengurangi/mengeluarkan getah dari dalam kayu sehingga dalam proses fabrikasi terjadinya interface antara matrik dengan serat kayu dapat seminimal mungkin. Setelah mengalami proses perendaman dengan NaOH spesimen kayu sengon laut di open selama 3 jam pada temperatur 110⁰C sampai dengan 115⁰C untuk mengurangi kadar air

dalam kayu. Gambar 192 menunjukkan proses perendaman dalam cairan NaOH sedangkan proses pengeringan dengan oven ditunjukkan pada Gambar 193.



Gambar 192. Perendaman kayu sengon laut dalam cairan NaOH



Gambar 193. Pengeringan dengan oven

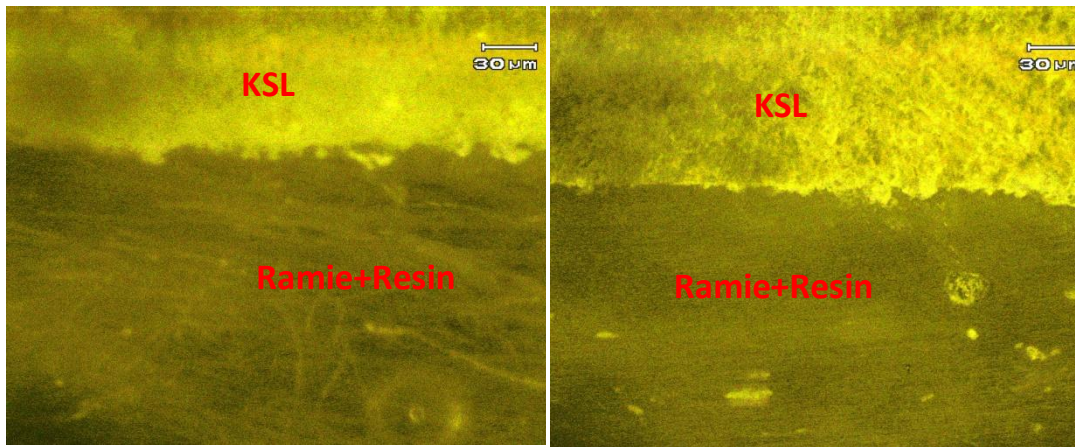
4. Proses pembuatan sampel komposit hibrid sandwich serat rami dengan core KSL

Sampel komposit lamina serat rami dengan core kayu sengon laut untuk pembuatan prototipe propeler airfoil standard NACA 4415 yang dimodifikasi dilakukan dengan metode *hand lay up* 1 lapis dan 2 lapis dapat ditunjukkan pada Gambar 194.



Gambar 194. Proses fabrikasi sampel komposit

Setelah proses *hand lay up* selesai dilakukan maka selanjutnya di tunggu sampai komposit benar-benar kering, kemudian hasil fabrikasi tersebut dimachining untuk mendapatkan sampel sesuai dengan bentuk dan ukuran spesimen. Hasil komposit lamina serat rami dengan core kayu sengon laut ditunjukkan pada Gambar 195 (a) untuk 1 lapis dan (b) 2 lapis.



(a)

(b)

Gambar 195. Hasil komposit hibrid sandwich serat rami dengan core kayu sengan laut
(a) 1 lapis dan (b) 2 lapis

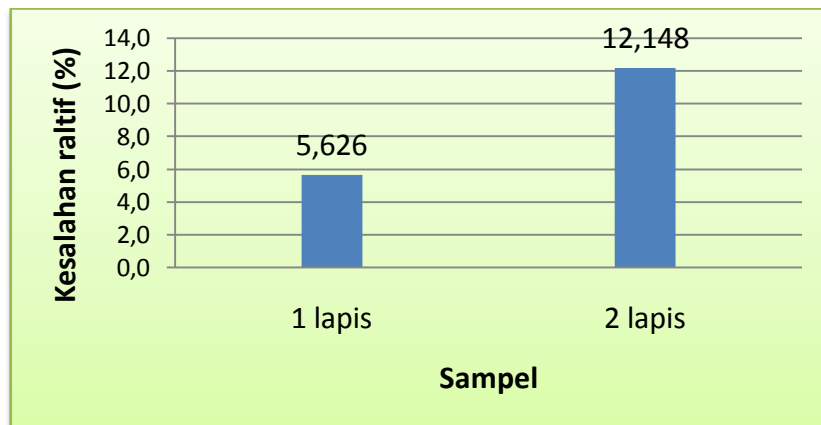
H. Hasil Uji Mekanik Komposit dan Bahan Pendukungnya

1. Kesalahan relatif fabrikasi

Penghitungan berat komposit hasil fabrikasi terhadap berat teori untuk dihitung kesalahan relatifnya. Adapun formula yang digunakan yaitu :

$$\% \text{kesalahan} = \frac{\text{Berat}_{\text{teori}} - \text{Berat}_{\text{fabrikasi}}}{\text{Berat}_{\text{teori}}}$$

Hasil perhitungan rerata kesalahan relatif berat spesimen komposit 1 dan 2 lapis hasil fabrikasi terhadap berat teori ditunjukkan pada Gambar 196.

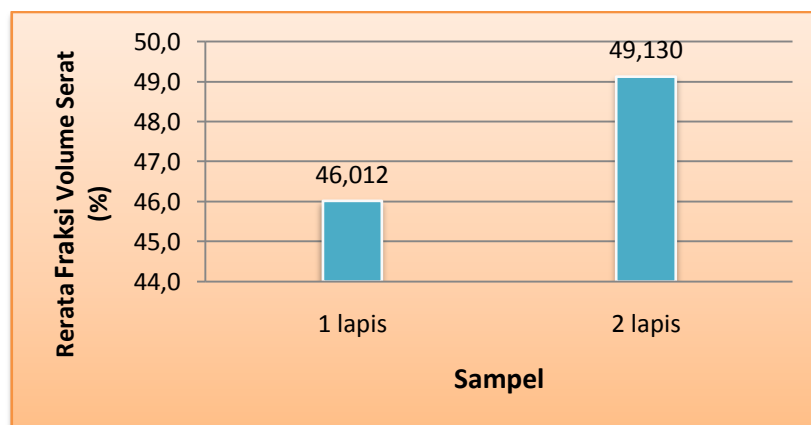


Gambar 196. Grafik kesalahan relatif berat spesimen komposit

Perhitungan kesalahan relatif berat teori terhadap berat fabrikasi dimaksudkan untuk mengetahui konsentrasi serat rami pada komposit dan rerata perhitungan kesalahan berat komposit 1 lapis yaitu sebesar 5,626% dan komposit 2 lapis sebesar 12,148%. Hal ini menunjukkan bahwa proses fabrikasi komposit dengan metode hand lay up berjalan dengan baik pada komposit 1 dan 2 lapis.

Salah satu faktor penting yang menentukan karakteristik dari komposit adalah perbandingan matrik dan penguat/serat. Perbandingan ini dapat ditunjukkan dalam bentuk fraksi volume serat (V_f) atau fraksi berat serat (W_f). Namun, formulasi kekuatan komposit lebih banyak menggunakan fraksi volume serat. Fraksi volume serat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 37.

Hasil rerata fraksi volume serat (penguat) komposit 1 lapis dan 2 lapis pada spesimen uji flexure dengan volume cetakan 204ml ditunjukkan pada Gambar 197.



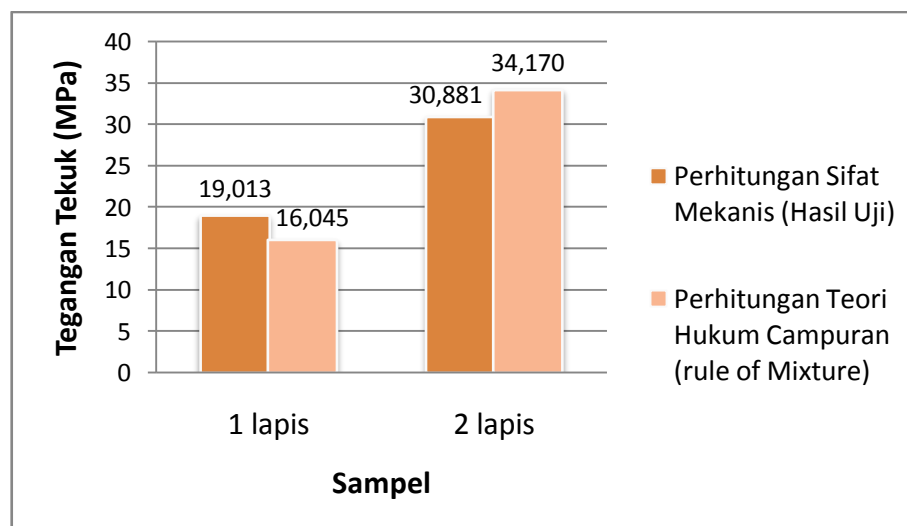
Gambar 197. Grafik fraksi volume serat spesimen komposit

Fraksi volume serat (penguat serat rami dan kayu sengon laut) pada komposit 2 lapis yaitu, v_f : 49,130% lebih besar dibanding komposit yang difabrikasi 1 lapis yaitu sebesar v_f : 46,130%. Kenaikan fraksi volume serat dalam penelitian untuk kedua parameter ini ternyata berakibat pada peningkatan kekuatan mekanik terutama tegangan tekuk sebesar 62,42% pada

komposit 2 lapis. Keadaan ini terjadi dimungkinkan matriks cukup kuat dan mampu baik memindahkan gaya tekuk saat flexural test.

Keakurasian nilai sifat (*properties*) mekanis komposit

Kekuatan komposit (sifat mekanis) sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis, geometri, arah, distribusi, dan kandungan serat. Berdasarkan teori *Rule of Mixture* (ROM), kekuatan komposit meningkat seiring dengan penambahan kandungan serat mencapai 60-70% (Sanadi dkk., 1986). Hasil uji sifat mekanis di laboratorium dari fabrikasi komposit sudah diolah dalam perhitungan dan untuk melihat keakurasian dari nilai sifat mekanis tersebut dilakukan validasi (membandingkan) dengan menggunakan hukum pencampuran (*Rule of Mixture*) dari teori komposit. Gambar 198 menunjukkan hasil perhitungan nilai sifat mekanis dan dari perhitungan yang menggunakan hukum pencampuran untuk uji tegangan tekuk (*flexural test*).



Gambar 198. Hasil perhitungan nilai sifat mekanis dan dari perhitungan yang menggunakan hukum pencampuran untuk tegangan tekuk (*flexural test*)

Uji kekuatan tekuk (*flexural test*) sebagai salah satu indikasi kekuatan dari material spesimen untuk pembuatan prototipe propeler airfoil standard NACA 4415 modif

menggunakan komposit serat rami 2 lapis (*layer*) core kayu sengon laut bermatriks resin poliester.

Hasil validasi menunjukkan bahwa perhitungan sifat mekanis dari hasil uji empiris lebih kecil daripada perhitungan dengan menggunakan hukum pencampuran (*Rule of Mixture*) untuk spesimen jenis material komposit 2 lapis (*layer*) yaitu sebesar 3,289 Mpa (10,65%), dengan demikian sifat mekanis yang dihasilkan dari pengujian memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi.

Hasil validasi pada material komposit 1 lapis menunjukkan bahwa proses fabrikasi kurang baik sehingga perhitungan menggunakan hukum pencampuran lebih rendah dibandingkan dengan hasil uji empiris.

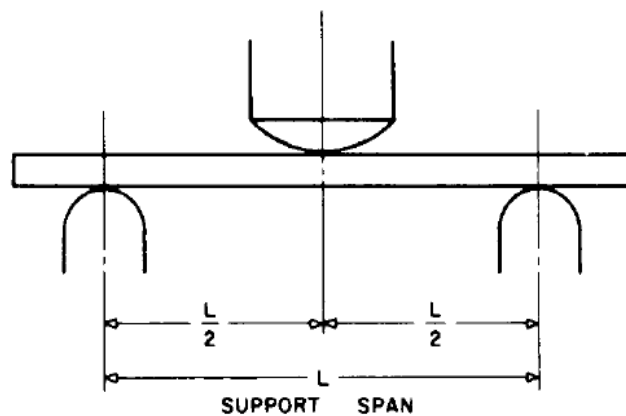
2. Uji mekanik komposit serat rami core kayu sengon laut

Uji tekuk (*Flexural test*) mengukur kekuatan yang dibutuhkan untuk membengkokkan sebuah papan plastik yang diberi beban pada tiga titik. Data tersebut terkadang digunakan untuk memilih material untuk parts (bagian) yang akan menerima beban tanpa mengalami pembengkokan (*flexing*). Flexural modulus digunakan sebagai indikasi untuk kekakuan material ketika dibengkokkan. Alat yang digunakan untuk uji tekuk, sama dengan yang digunakan untuk uji tarik dan tekan, yaitu universal testing machine (Gambar 199).



Gambar 199. Universal Testing Machine

Skema pengujian tekuk ditunjukkan pada Gambar 200 dan hasil uji tekuk ditunjukkan pada Tabel 7.



Gambar 200. Skema pengujian tekuk

Uji kekuatan tekuk (*Flexural Test*) sebagai salah satu indikasi kekuatan dari material spesimen untuk pembuatan prototipe propeler airfoil standard NACA 4415 modif ditunjukkan pada Gambar 201. Spesimen di buat dalam variasi 1 lapis dan 2 lapis untuk serat raminya dengan 1 *core* kayu sengon laut.

Tabel 7

Hasil tegangan uji tekuk

Jenis Sampel	Sampel Uji	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Luas (mm ²)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk σ_f (Mpa)	Rerata Tegangan Tekuk σ_f (Mpa)
1 Lapis	L	22,25	52,2	1161,45	1638,27	16,17	19,013
	J	21,67	52,81	1144,39	1206,63	12,41	
	O	21,13	51,13	1080,38	1844,28	20,60	
	E	20,55	52,8	1085,04	2540,79	29,06	
	T	20,54	52,24	1073,01	1510,74	17,48	
	Q	21,12	52,22	1102,89	1677,51	18,36	
2 Lapis	R	22,25	52,25	1162,56	3207,87	31,62	30,881
	I	22,8	52,2	1190,16	3698,37	34,75	
	K	23,87	52,2	1246,01	2540,79	21,78	
	A	22,2	52,21	1159,06	3659,13	36,26	
	G	21,66	52,2	1130,65	2746,8	28,60	
	M	21,24	52,25	1109,79	2982,24	32,26	

Tabel 8

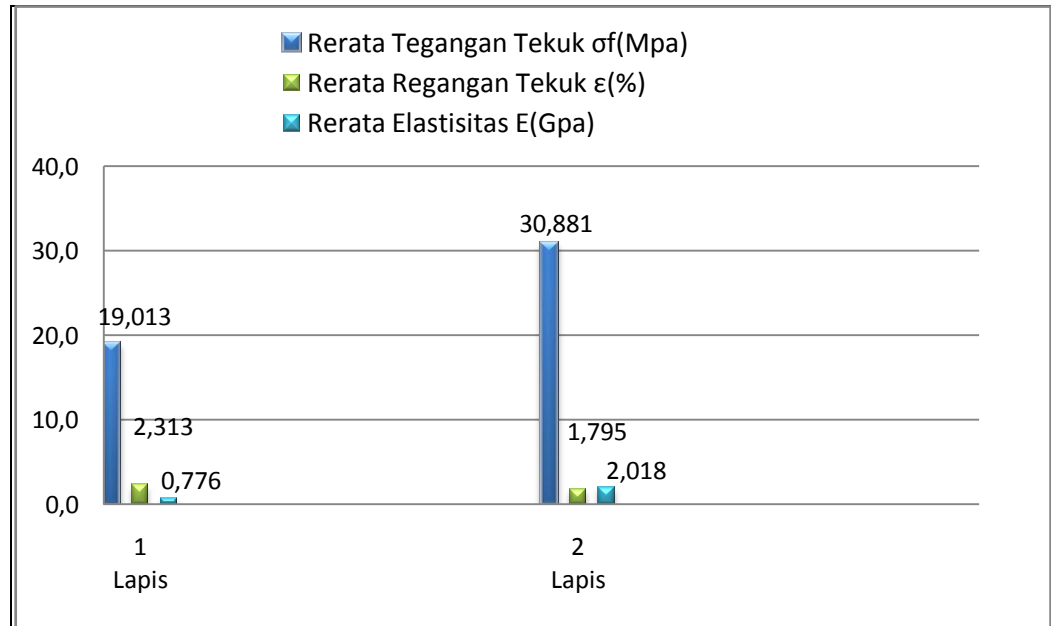
Hasil regangan uji tekuk

Jenis Sampel	Bahan Uji	Tebal (mm)	Luas (mm ²)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)	Deformasi (mm)	Regangan Tekuk ϵ (%)	Rerata Regangan Tekuk ϵ (%)
1 Lapis	L	22,25	1161,45	1638,27	16,17	6,00	2,77	2,313
	J	21,67	1144,39	1206,63	12,41	4,00	1,80	
	O	21,13	1080,38	1844,28	20,60	6,00	2,63	
	E	20,55	1085,04	2540,79	29,06	5,00	2,13	
	T	20,54	1073,01	1510,74	17,48	5,00	2,13	
	Q	21,12	1102,89	1677,51	18,36	5,50	2,41	
2 Lapis	R	22,25	1162,563	3207,87	31,62	3,00	1,39	1,795
	I	22,8	1190,16	3698,37	34,75	3,50	1,66	
	K	23,87	1246,014	2540,79	21,78	6,00	2,97	
	A	22,2	1159,062	3659,13	36,26	4,50	2,07	
	G	21,66	1130,652	2746,8	28,60	4,00	1,80	
	M	21,24	1109,79	2982,24	32,26	2,00	0,88	

Tabel 9

Hasil Elastisitas

Jenis Sampel	Bahan Uji	Luas (mm ²)	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)	Deformasi (mm)	Elastisitas E(GPa)	Rerata Elastisitas E(Gpa)
1 Lapis	L	1161,45	22,25	52,2	1638,27	16,17	8,00	0,44	0,776
	J	1144,39	21,67	52,81	1206,63	12,41	4,00	0,69	
	O	1080,38	21,13	51,13	1844,28	20,60	8,00	0,59	
	E	1085,04	20,55	52,8	2540,79	29,06	5,00	1,36	
	T	1073,01	20,54	52,24	1510,74	17,48	5,00	0,82	
	Q	1102,89	21,12	52,22	1677,51	18,36	5,50	0,76	
2 Lapis	R	1162,563	22,25	52,25	3207,87	31,62	3,00	2,28	2,018
	I	1190,16	22,8	52,2	3698,37	34,75	3,50	2,10	
	K	1246,014	23,87	52,2	2540,79	21,78	6,00	0,73	
	A	1159,062	22,2	52,21	3659,13	36,26	4,50	1,79	
	G	1130,652	21,66	52,2	2746,8	28,60	4,00	1,59	
	M	1109,79	21,24	52,25	2982,24	32,26	2,00	3,66	

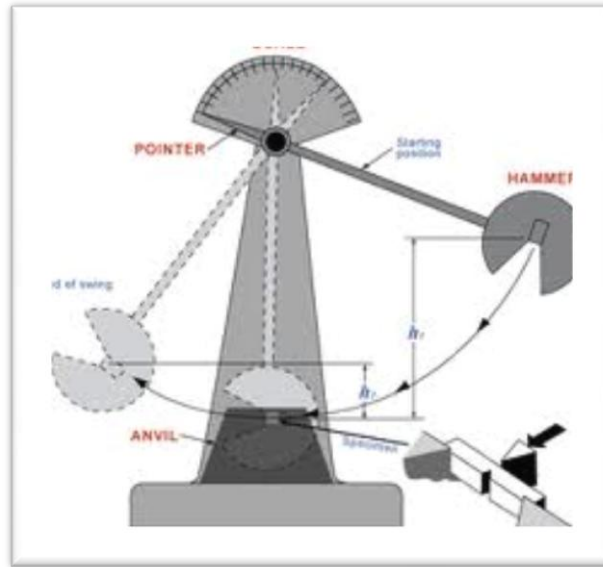


Gambar 201. Grafik hasil uji Tekuk (*Flexural Test*)

Hasil uji kekuatan tekuk (*Flexural Test*) dapat diambil tiga parameter karakteristik mekanik material, yaitu tegangan tekuk, regangan tekuk dan modulus elastisitas. Tegangan tekuk terbesar dimiliki oleh spesimen 2 lapis yaitu sebesar 30,881 Mpa dengan regangan 1,795 % dan modulus young 2,018 Gpa. Pada spesimen 1 lapis tegangan tekuk sebesar 19,013 Mpa dengan regangan 2,313 % dan modulus young 0,776 Gpa. Penambahan 1 lapisan serat rami memberikan sifat mekanik tegangan tekuk yang signifikan sebesar 62,42%, dan perbedaan berat komposit antara 1 lapis dan 2 lapis tidak terlalu jauh. Sehingga dalam pembuatan prototipe airfoil standard NACA 4415 ditetapkan menggunakan spesimen komposit serat rami 2 lapis dengan core kayu sengon laut yang memiliki tegangan tekuk terbesar akan tetapi ringan agar mudah berputar pada kecepatan angin 3m/s sesuai kondisi operasi atau kerja propeler.

3. Uji mekanik bahan pendukung komposit

Pengujian mekanik dari bahan komposit (uji tarik untuk serat rami dan kayu sengon laut, uji tekan dan uji ketangguhan impak untuk bahan pendukung kayu sengon laut) dimaksudkan untuk mengetahui sejauh mana material pendukung pada proses fabrikasi komposit serat rami *core* kayu sengon laut bisa memberikan kontribusi terhadap kekuatan dari komposit yang akan digunakan untuk pembuatan propeler yang akan diaplikasikan pada kondisi operasi yang memiliki kelembaman oksida dan kecepatan angin yang relatif kecil (3m/s). Sehingga dalam hal ini dibutuhkan propeler yang ringan, kuat dan tahan terhadap oksidasi air laut serta ramah lingkungan. Alat yang digunakan untuk melakukan uji impak ditunjukkan oleh Gambar 202.



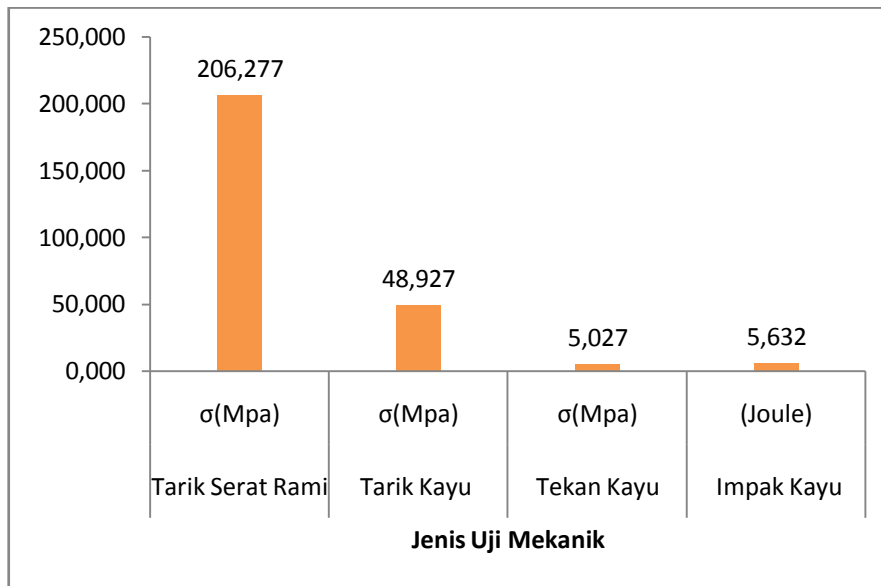
Gambar 202. Alat uji impak charpy

Tabel 10 menunjukkan data hasil uji mekanik bahan pendukung komposit serat rami *core* kayu sengon.

Tabel 10

Data Hasil Uji Mekanik Bahan Pendukung Komposit

No Spesimen	Tarik Serat Rami σ (Mpa)	Jenis Uji Mekanik		
		Tarik Kayu σ (Mpa)	Tekan Kayu τ (Mpa)	Impak Kayu (Joule)
1	191,083	51,201	5,855	7,398
2	204,021	42,596	4,301	4,317
3	191,083	57,440	4,489	4,317
4	212,314	54,213	4,693	5,838
5	216,561	38,293	4,724	7,398
6	212,314	42,381	4,740	5,838
7	216,561	56,364	6,388	4,317
Rerata	206,277	48,927	5,027	5,632



Gambar 203. Grafik Hasil Uji Mekanik dari Bahan Pendukung Komposit

Sifat mekanik dari bahan pendukung juga memiliki kontribusi pada sifat mekanik komposit yang dihasilkan meskipun juga dipengaruhi *interface* ataupun *interphase* dari matriks-penguat.

Hasil uji mekanik dari rerata tegangan tarik serat rami sebesar 206,27 MPa, sedangkan pada kayu sengon laut lebih rendah dari serat rami yaitu sebesar 48,927 MPa. Rerata tegangan tekan dan impak kayu masing-masing adalah 5,027 MPa dan 5,632 Joule. Dari sifat mekanik bahan pendukung komposit yang dihasilkan ternyata memberikan kontribusi pada tegangan tekuk komposit sebagai prototipe untuk pembuatan propeler airfoil standard NACA 4415 sebesar 30,881 MPa. Dengan demikian *interface* yang terjadi antara matiks (resin) dan penguat (serat rami dan kayu sengon laut) cukup baik.

Fabrikasi komposit serat rami core kayu sengon laut dilakukan dengan cukup baik melalui proses *hand lay up* 2 lapis sebagai prototipe untuk pembuatan propeler airfoil standard NACA 4415. Tegangan tekuk komposit yang dihasilkan sebesar 30,881 MPa, dengan modulus young 2,018 GPa dan regangan 1,795 %.

I. PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO

Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan pada spesimen komposit dua lapis sebelum digunakan dan sesudah diaplikasikan sebagai propeler selama 5,5 bulan. Daerah yang diamati adalah permukaan potongan melintang komposit untuk melihat interface dari material tersebut. Sedangkan pengamatan unsur pada interface yang terdapat pada material PMCs (*Polymer Matrix Composites*) dilakukan dengan menggunakan instrumen EDS (*Energy Dispersive X-Ray spectrometer*). Pengujian komposisi kimia dilakukan bersamaan dengan pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM. Alat pengujian diperlihatkan pada Gambar 204.

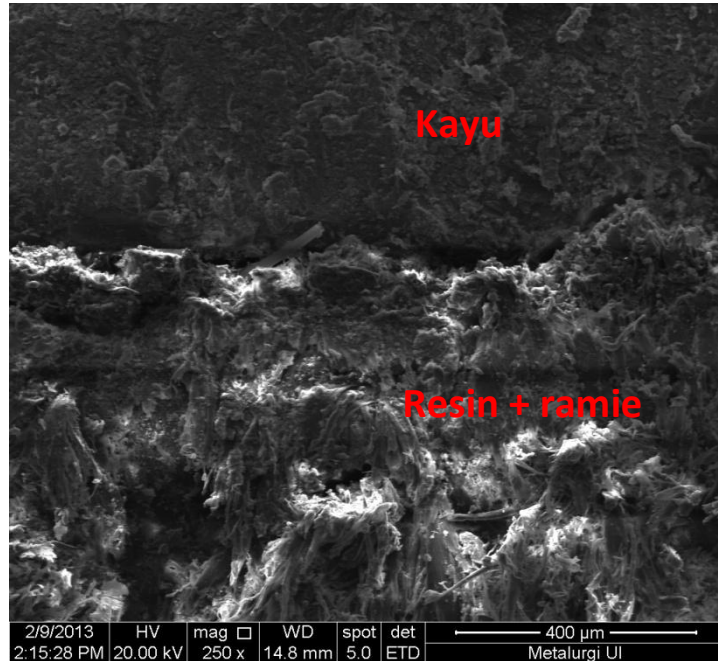


Gambar 204. Alat SEM (*Scanning Electron Microscope*)

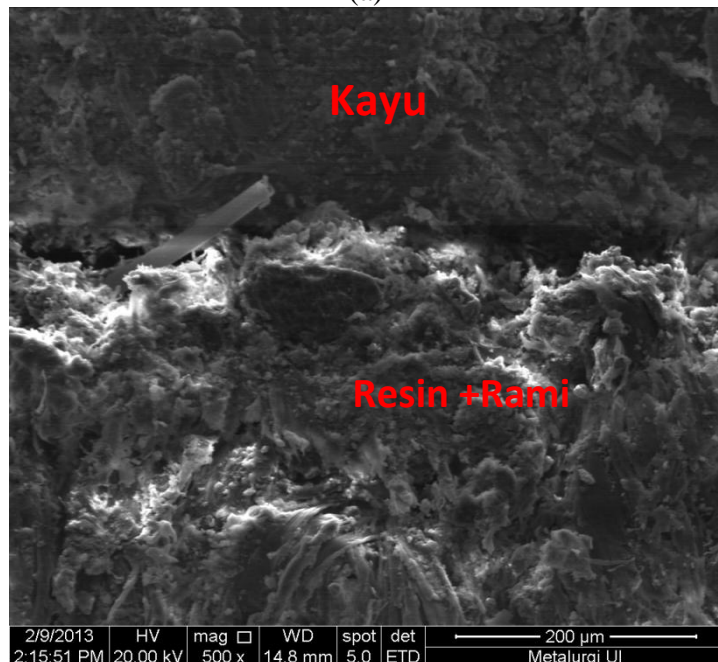
1. Hasil uji SEM pada spesimen komposit sebelum digunakan

Gambar 205 menunjukkan foto SEM permukaan potongan melintang komposit 2 lapis sebelum digunakan. Dari pengamatan hasil foto mikro SEM memperlihatkan bahwa interface antara core KSL dan resin beserta penguat serat rami pada spesimen komposit sebelum

diaplikasikan sebagai propeler cukup rapat atau dapat dikombinasikan dengan baik karena resin yang dipakai bersifat polar.



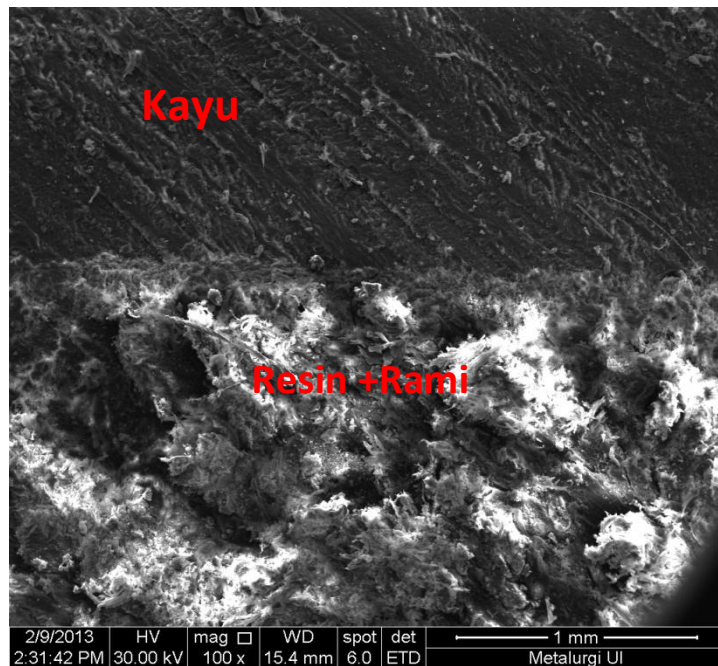
(a)



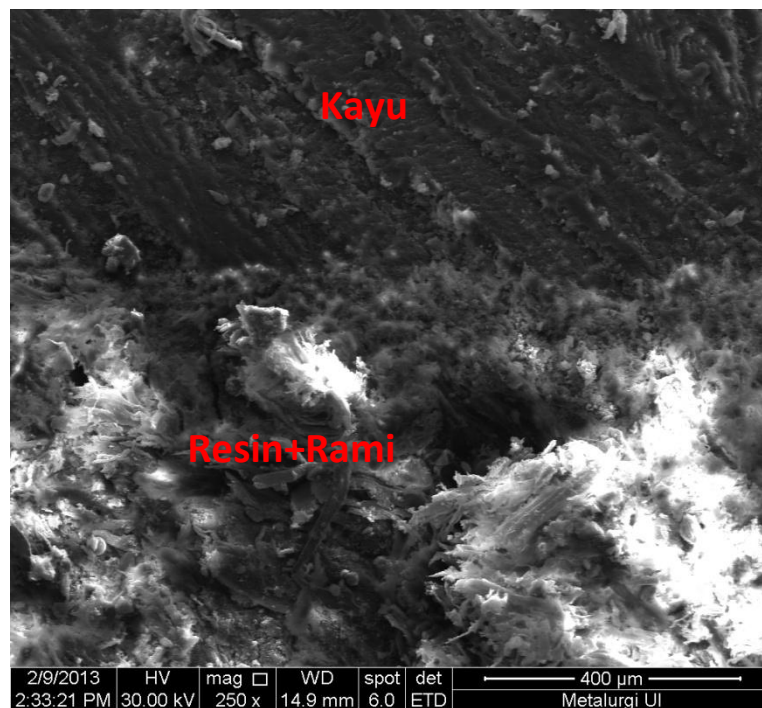
(b)

Gambar 205. Hasil uji SEM pada spesimen sebelum digunakan dengan pembesaran (a) 250x dan (b) 500x

2. Hasil uji SEM pada bahan komposit sudu setelah digunakan



Gambar 206. Hasil uji SEM pada komposit sesudah digunakan (100x)



Gambar 207. Hasil uji SEM pada komposit sesudah digunakan (250x)

Sedangkan spesimen komposit setelah diaplikasikan sebagai propeler selama 5,5 bulan tidak mengalami degradasi pada interface (Gambar 206 dan 207). Pembuatan komposit serat rami core kayu sengon laut dilakukan dengan cukup baik menggunakan metode hand lay up dengan kesalahan relatif berat komposit fabrikasi terhadap berat komposit teori pada uji *flexure* adalah 5,626% untuk satu lapis dan 12,148% untuk dua lapis. Rerata fraksi volume serat (vf) untuk komposit satu dan dua lapis masing-masing 46,012% dan 49,130%. Tegangan tekuk terbaik pada komposit 2 lapis serat rami yaitu sebesar 30,881 MPa, dengan modulus young 2,018 GPa dan regangan 1,795 %. Pengamatan struktur komposit dengan SEM sebelum dan sesudah komposit dioperasikan sebagai propeler selama 5,5 bulan tidak mengalami perubahan secara signifikan.

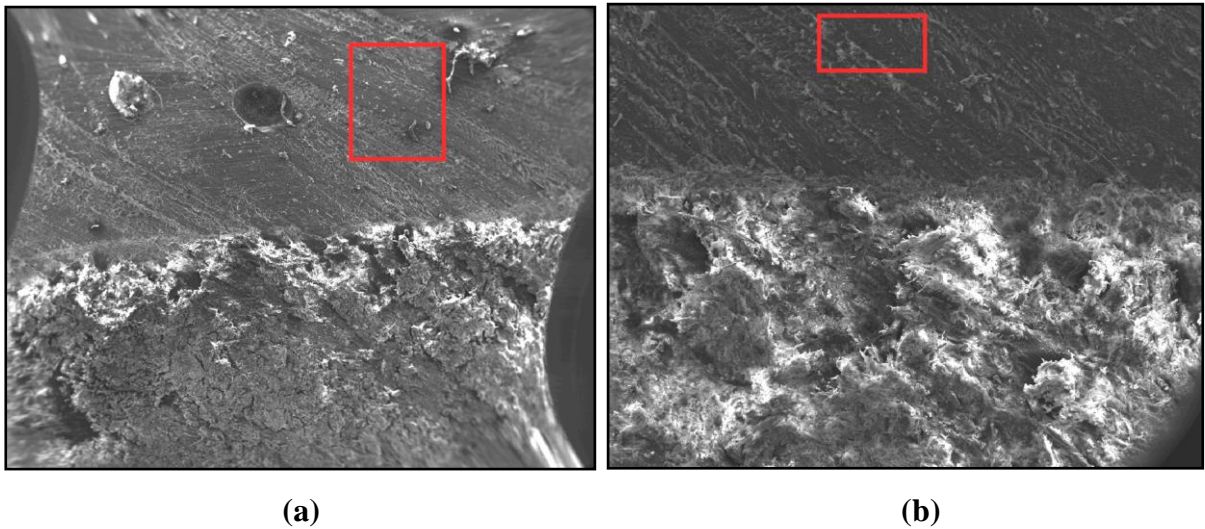
3. Hasil uji EDS

Kayu sebagian besar tersusun atas tiga unsur yaitu unsur C, H dan O. Unsur-unsur tersebut berasal dari udara berupa CO₂ dan dari tanah berupa H₂O. Namun, dalam kayu juga terdapat unsur-unsur lain seperti N, P, K, Ca, Mg, Si, Al dan Na. Unsur-unsur tersebut tergabung dalam sejumlah senyawa organik, secara umum dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu; komponen lapisan luar yang terdiri atas fraksi-fraksi yang dihasilkan oleh kayu selama pertumbuhannya. Komponen ini sering disebut dengan zat ekstraktif. Zat ekstraktif ini adalah senyawaan lemak, lilin, resin dan lain-lain.

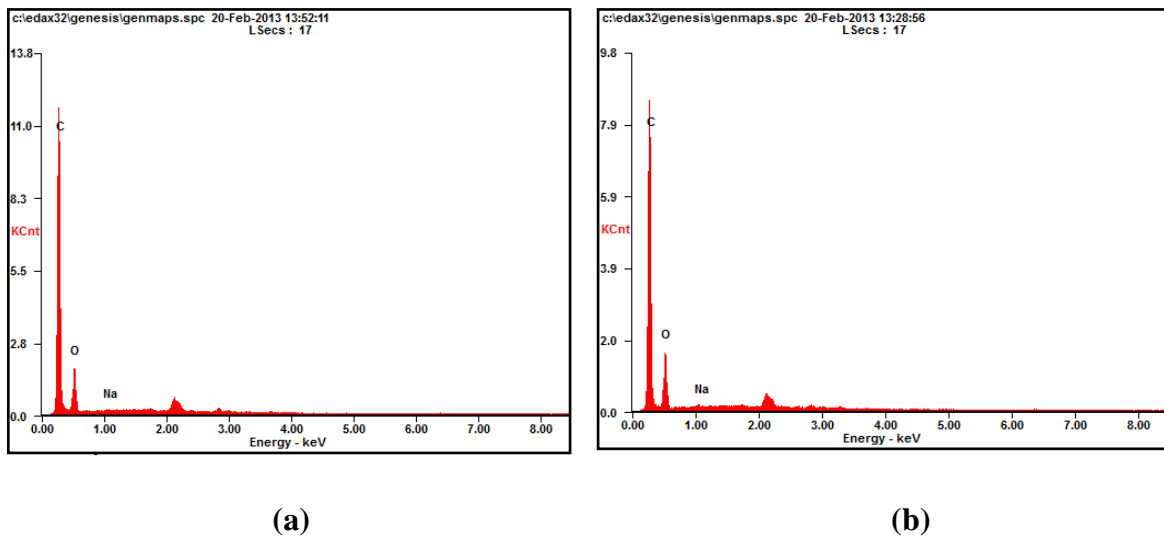
Sedangkan komponen lapisan dalam terbagi menjadi dua fraksi yaitu, fraksi karbohidrat yang terdiri atas selulosa dan hemiselulosa, fraksi non karbohidrat yang terdiri dari lignin. Secara kimia selulose merupakan senyawa polimer yang dibentuk oleh monomer-monomer glukosa dengan rumus kimia : $C_6H_{11}O_6(C_6H_{10}O_5)_n C_6H_{11}O_5$. (Fengel dan Wegener, 1995)

Dari hasil penelitian yang dilakukan untuk analisa EDS (untuk mengetahui komposisi senyawa kimia yang terkandung di dalam sampel, dalam hal ini kayu yang telah dibentuk sudu) ditunjukkan pada sub bab di bawah ini.

a. Kayu sudu sebelum dan sesudah digunakan



Gambar 208. Struktur mikro bagian kayu sudu (a) sebelum dan (b) sesudah digunakan



Gambar 209. Grafik komposisi kimia bagian kayu (a) sebelum dan (b) sesudah digunakan

Tanda kotak berwarna merah pada Gambar 208 menunjukkan bagian pada kayu sudu sebelum dan sesudah digunakan sebagai propeler yang diuji menggunakan EDS. Hasil pengamatan EDS diperlihatkan pada Gambar 209. Hasil penelitian yang dilakukan untuk analisa EDS pada bagian kayu yang telah dibentuk sudu diperlihatkan pada Tabel 11.

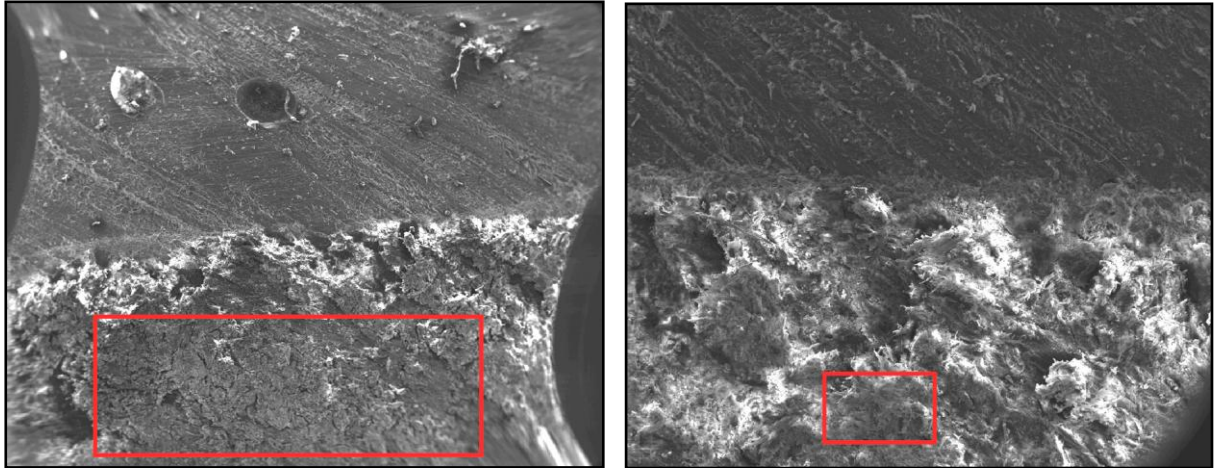
Tabel 11

Komposisi kimia bagian kayu pada sudu sebelum dan sesudah digunakan

UNSUR	SEBELUM DIGUNAKAN (Wt%)	SESUDAH DIGUNAKAN (Wt%)
C	73,13	69,45
O	26,58	30,02
Na	00,29	00,54

Unsur Hidrogen (H) yang terdapat dalam kayu sebagai senyawa H₂O atau air telah teruapkan sebelum kayu dilapisi resin dan rami karena pemanasan. Karena kelembaban udara lingkungan memiliki kandungan oksigen yang cukup tinggi maka akan mempengaruhi kadar oksigen dalam material. Sehingga kadar oksigen pada sudu akan meningkat sesuai dengan hasil Tabel 11 dan Tabel 12. Dengan adanya unsur Na mengakibatkan perubahan prosentase unsur C mengalami penurunan dan unsur O mengalami kenaikan.

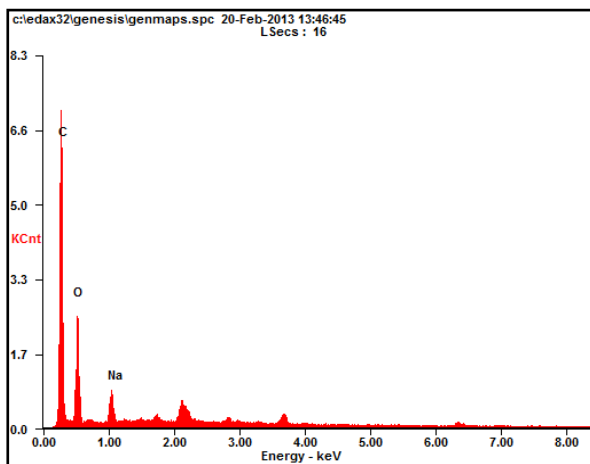
b. Resin dan Rami sebelum dan sesudah digunakan



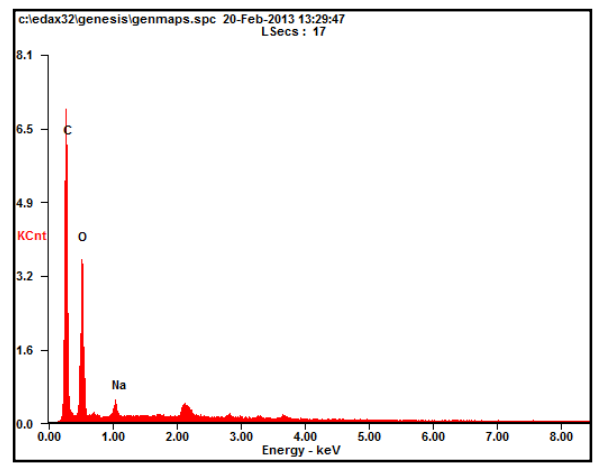
(a)

(b)

Gambar 210. Bagian resin dan rami pada sudu (a) sebelum dan (b) sesudah digunakan



(a)



(b)

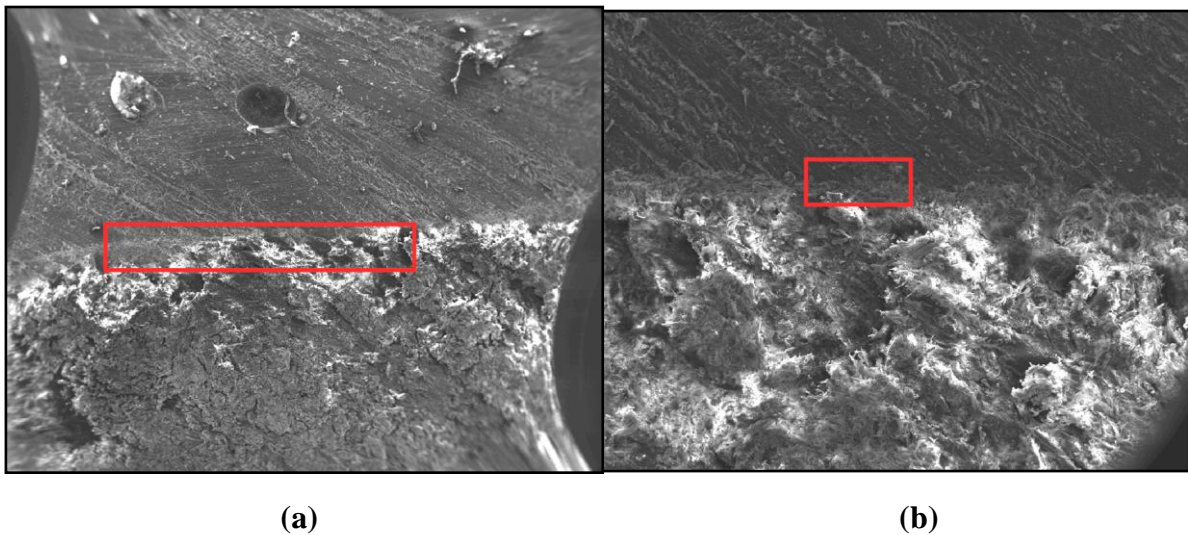
Gambar 211. Grafik komposisi kimia resin dan rami pada sudu (a) sebelum dan (b) sesudah digunakan

Tabel 12

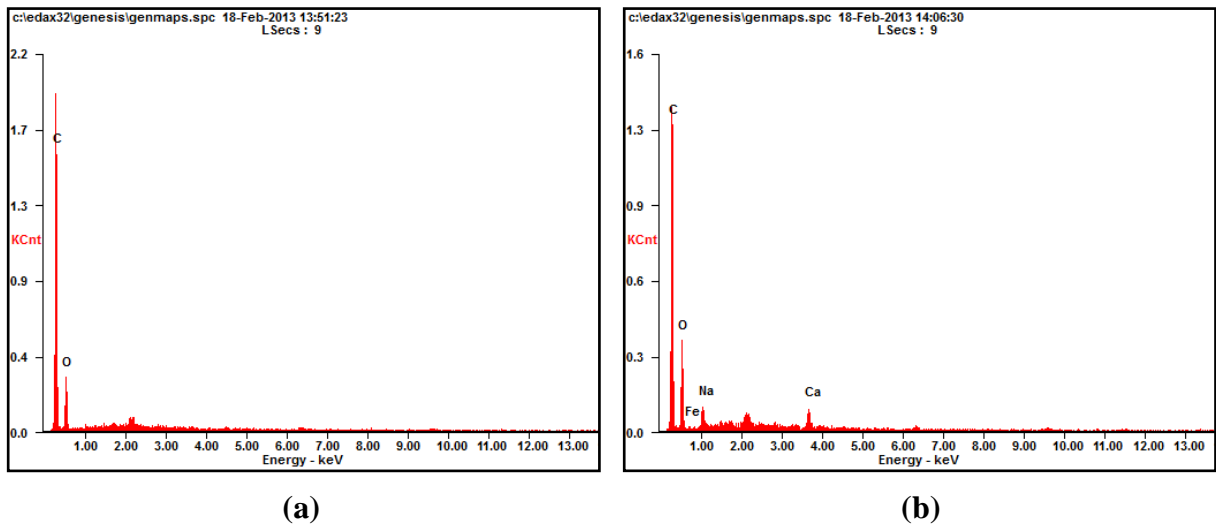
Komposisi kimia resin dan rami pada sudu sebelum dan sesudah digunakan

UNSUR	SEBELUM DIGUNAKAN (Wt%)	SESUDAH DIGUNAKAN (Wt%)
C	59,90	54,95
O	35,77	44,13
Na	04,33	00,91

c. Kayu, resin dan rami sebelum dan sesudah digunakan



Gambar 212. Kayu, resin dan rami pada sudu (a) sebelum dan (b) sesudah digunakan



Gambar 213. Grafik komposisi kimia kayu, resin dan rami pada sudu (a) sebelum dan (b) sesudah digunakan

Hasil penelitian yang dilakukan untuk analisa EDS pada bagian resin dan rami yang telah dibentuk sudu sebelum dan sesudah digunakan diperlihatkan pada Tabel 13.

Tabel 13

Komposisi kimia bagian kayu, resin dan rami pada sudu sebelum dan sesudah digunakan

UNSUR	SEBELUM DIGUNAKAN (Wt%)	SESUDAH DIGUNAKAN (Wt%)
C	59,69	55,68
O	36,17	44,02
Na	04,14	01,30

Setelah sudu dipasang di lokasi pengujian selama 5,5 bulan, hasil pengujian EDS menunjukkan unsur karbon (C) mengalami penurunan sebesar 4,01%, sedangkan unsur oksigen mengalami kenaikan sebesar 7,85%. Fenomena tersebut disebabkan kelembaban yang tinggi, dengan rata-rata kelembaban selama 5,5 bulan sebesar 69,98%. Kelembaban yang tinggi menyebabkan oksigen yang terdapat di udara akan terdifusi ke dalam material sudu.

J. PERAN SUMBER ENERGI TERBARUKAN DALAM PENYEDIAAN ENERGI LISTRIK DAN PENURUNAN EMISI CO₂ DI PROVINSI DIY

1. Produksi, konsumsi, dan potensi energi nasional

Secara nasional kebutuhan energi di Indonesia terus meningkat seiring dengan laju pertumbuhan penduduk. Peningkatan kebutuhan energi mencapai 8,5% per tahun, namun laju kebutuhan yang sangat cepat tersebut tidak diimbangi dengan produksi riil sektor energi di Indonesia (ESDM, 2005)

Produksi puncak minyak bumi di Indonesia telah berlalu, dan saat ini Indonesia sedang dalam posisi penurunan produksi minyak. Penemuan sumber baru pun diperkirakan tidak akan dapat sejajar dengan nilai produksi puncak di masa lalu. Terbatasnya cadangan energi fosil saat ini menuntut pemerintah untuk segera melakukan pemanfaatan energi alternatif dengan berorientasi pasar menuju pola bauran energi (*energy mix*) yang terpadu, optimal, dan bijaksana.

Saat ini energi nasional masih terfokus pada energi fosil, yaitu minyak bumi, gas, dan batubara. Jika tidak dikembangkan inovasi energi non fosil, maka Indonesia akan mengalami krisis energi yang berkepanjangan. Potensi energi non fosil seperti tenaga air, panas bumi, biomassa, tenaga surya, dan tenaga angin cukup melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal. Pemanfaatan energi non fosil tersebut akan mendukung terciptanya lingkungan yang bersih dan mencegah pemanasan global.

2. Produksi, konsumsi, dan potensi energi di DIY

Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) merupakan provinsi tanpa sumber energi listrik dengan sistem pembangkit listrik konvensional. Di Provinsi DIY tidak ada pembangkit listrik skala kecil, menengah dan besar yang digunakan untuk penyediaan kebutuhan energi listrik. Kebutuhan energi listrik di DIY disuplai dari luar provinsi, yaitu dari pembangkit

listrik yang berada di Jawa Tengah, Jawa Barat dan Jawa Timur melalui sistem interkoneksi. Jawa-Madura-Bali (JAMALI)

Potensi energi di DIY

Provinsi DIY memiliki potensi sumber-sumber energi terbarukan yang dapat dioptimalkan dalam penyediaan energi listrik. Potensi-potensi sumber energi terbarukan yang ada di Provinsi DIY antara lain adalah radiasi matahari, energi angin, dan *Micro Hydro Power Plant* (MHPP). Potensi radiasi matahari di Provinsi DIY adalah 4,8 kWh/m²/hari. Kecepatan angin yang ada di sepanjang pantai Provinsi DIY adalah 4 s.d. 5 m/detik. Potensi keseluruhan MHPP yang ada di Provinsi DIY adalah 1.188,6 kW (Carepi, 2008).

Tabel 14

Produksi Listrik di Propinsi DI Yogyakarta

Tahun	Produksi (KWH)	Terpasang (KWH)	Terjual (KWH)	Susut (KWH)	Persentase Susut
2001	1.047.817.722	582.153.103	966.509.300	81.308.422	7,76
2002	1.229.568.187	615.934.569	1.098.609.062	130.959.125	10,65
2003	1.292.662.049	653.096.369	1.130.827.845	161.834.204	12,52
2004	1.389.182.171	697.724.494	1.244.409.538	144.772.633	10,42
2005	1.480.699.686	744.623.087	1.343.319.722	137.379.964	9,28
2006	1.485.725.974	765.032.624	1.355.586.720	130.139.254	8,76
2007	1.635.087.745	837.431.019	1.481.573.049	153.514.696	9,39
2008	1.733.410.946	10.361.433.660	1.578.453.018	154.957.928	8,94
2009	1.866.766.573	10.877.445.146	1.705.941.418	160.825.155	8,62
2010	1.975.726.468	11.467.865.926	1.809.022.224	166.704.244	8,44

Sumber: esdm-jogja.com, 2013

Berdasarkan Tabel 14, terlihat tingkat konsumsi listrik dari tahun 2001 sampai 2010 mengalami peningkatan. Rata-rata kenaikan konsumsi listrik setiap tahun dalam 10 tahun terakhir adalah 7,82 persen. Konsumsi listrik (listrik terjual) pada tahun 2006 mengalami kenaikan yang relatif kecil yaitu 0,91 persen yang disebabkan oleh terjadinya musibah gempa bumi, tetapi pada tahun 2007 tingkat kenaikan konsumsi listrik kembali ke nilai normal yaitu 9,29 persen.

Kenaikan produksi dan konsumsi listrik di Yogyakarta juga diikuti oleh susut (*losses*) energi yang cukup signifikan. Susut energi (KWH) dalam 10 tahun terakhir berfluktuasi meskipun memiliki kecenderungan naik secara kuantitas. Rata-rata susut energi dalam 10 tahun terakhir berdasarkan data yang ditunjukkan pada Tabel 11 adalah 9,48 persen.

Distribusi konsumsi energi

Penyediaan energi listrik di Propinsi Yogyakarta dilayani melalui 8 rayon, yaitu: Rayon Wates, Rayon Wonosari, Rayon Bantul, Rayon Yogya Selatan, Rayon Yogya Utara, Rayon Sleman, Rayon Sedayu dan Rayon Kalasan. Berdasarkan data tahun 2007, distribusi konsumsi listrik dari delapan rayon yang ada di Yogyakarta ditunjukkan pada Tabel 15.

Tabel 15
Distribusi konsumsi energi di DIY

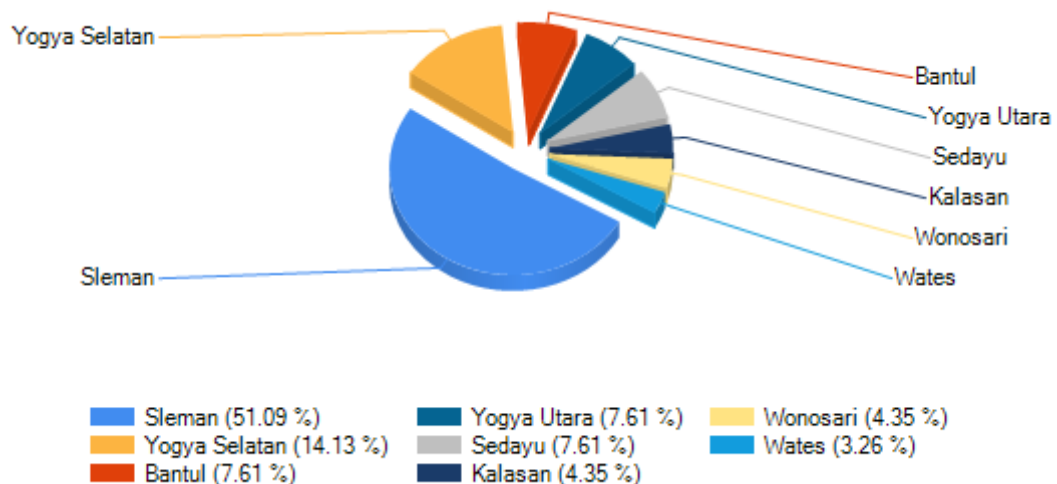
No	Rayon	Terjual (KWH)				Jumlah
		Rmh Tangga	Usaha	Industri	Umum	
1	Wates	62.120.370	5.621.430	5.266.263	7.956.568	80.964.631
2	Wonosari	93.067.714	10.901.756	17.566.125	9.431.138	130.966.733
3	Bantul	98.599.720	10.981.277	12.966.761	10.404.394	132.952.152
4	Yogya Selatan	141.703.460	78.697.756	22.181.349	30.553.185	273.135.750
5	Yogya Utara	147.105.961	133.526.486	11.917.893	78.902.105	371.452.445
6	Sleman	116.911.340	32.518.380	81.818.095	16.990.746	248.238.561
7	Sedayu	99.495.469	15.946.220	13.259.218	9.799.565	138.500.472
8	Kalasan	69.948.116	10.182.195	9.925.711	15.296.283	105.352.305
Total		828.952.150	298.375.500	174.901.415	179.333.984	1.481.563.049

Sumber: esdm-jogja.com, 2013

Data Tabel 15 menunjukkan bahwa wilayah Rayon Yogya Utara mengkonsumsi energi listrik paling besar yaitu 25 persen dari total energi, selanjutnya berturut-turut diikuti Rayon Yogya Selatan yaitu mengkonsumsi energi listrik 18 persen dari total energi, Rayon Sleman mengkonsumsi energi listrik 17 persen dari total energi, Rayon Sedayu, Rayon Bantul dan Rayon Wonosari sama-sama mengkonsumsi energi listrik 9 persen dari total energi, Rayon Kalasan mengkonsumsi energi listrik 7 persen dari total energi dan terakhir Rayon Wates mengkonsumsi energi sebesar 6 persen dari total energi.

Rincian Konsumsi Energi Sektor Usaha dan Industri di Setiap Rayon

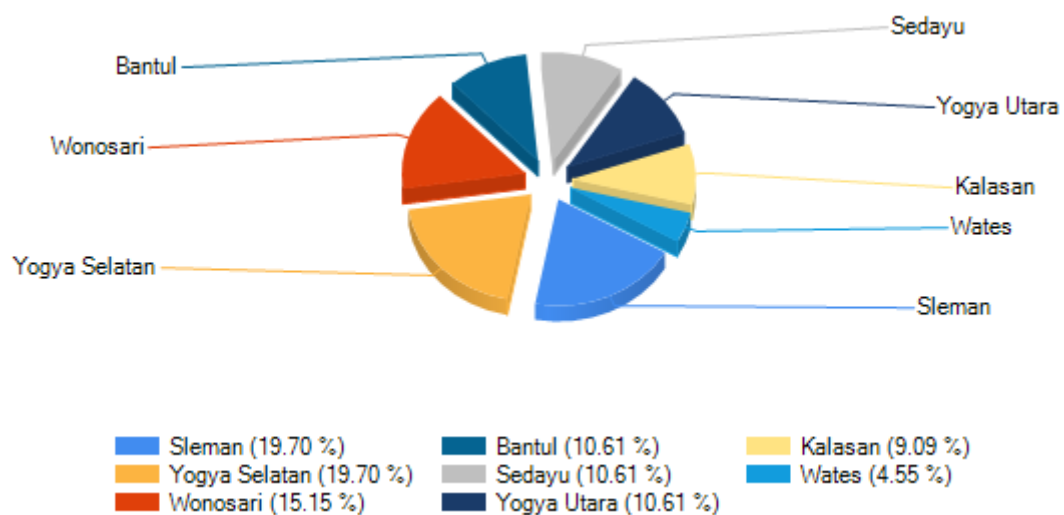
Selain konsumen sektor rumah tangga, sektor lain yang jumlah konsumsinya cukup besar adalah sektor usaha (bisnis). Rincian data jumlah konsumsi energi listrik setiap rayon untuk jenis pengguna sektor usaha ditunjukkan pada Gambar 214. Berdasarkan gambar tersebut dapat diamati bahwa konsumen pada sektor usaha yang paling besar adalah Rayon Yogya Utara yaitu 45 persen dari total konsumsi energi pada sektor usaha dan berturut-turut diikuti oleh Rayon Yogya Selatan (26%), Rayon Sleman (11%), Rayon Sedayu (5%), Rayon Wonosari dan Rayon Bantul (4%), Rayon Kalasan (3%) serta Rayon Wates (2%). Data tersebut menunjukkan bahwa Rayon Yogya Utara memiliki konsumen sektor usaha paling dominan dibandingkan rayon lainnya. Kondisi ini dapat dimaknai bahwa sektor usaha di rayon tersebut.



Gambar 214. Konsumsi energi sektor usaha (esdm-jogja.com, 2013)

Rincian data jumlah konsumsi energi listrik setiap rayon untuk konsumen sektor industri ditunjukkan pada Gambar 215. Berdasarkan gambar tersebut dapat diamati bahwa konsumen sektor industri yang paling besar terletak di Rayon Sleman yaitu 47 persen dari total konsumsi energi pada sektor industri, selanjutnya berturut-turut diikuti oleh Rayon

Yogya Selatan (13%), Rayon Wonosari (10%), Rayon Bantul, Rayon Yogya Utara dan Rayon Sedayu (7%), Rayon Kalasan (6%) serta Rayon Wates (3%). Sama halnya dengan uraian di atas, data tersebut juga menunjukkan bahwa Rayon Sleman memiliki konsumen di sektor industri yang paling dominan dibandingkan rayon lainnya. Kondisi ini dapat dimaknai bahwa konsumen sektor industri di rayon tersebut memiliki peluang konservasi yang cukup besar bila pada sektor tersebut memiliki potensi penghematan yang signifikan.

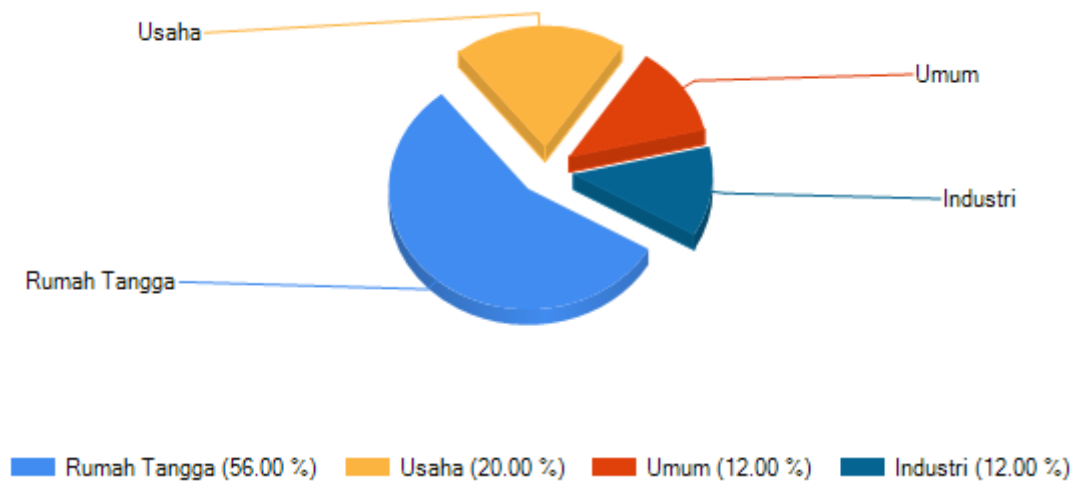


Gambar 215. Konsumsi energi sektor industri (esdm-jogja.com, 2013)

Rincian Distribusi Konsumsi Energi Listrik Berdasarkan Sektor Pengguna

Persentase distribusi pemakaian energi listrik berdasarkan sektor pengguna secara grafis ditunjukkan pada Gambar 216. Berdasarkan gambar tersebut, konsumsi energi paling besar yaitu sektor rumah tangga yang mengkonsumsi energi 56 persen dari total energi, sektor kedua yang mengkonsumsi energi paling besar yaitu sektor usaha (20%) serta sektor industri dan sektor umum yang mengkonsumsi energi sebesar 12%. Dengan demikian, salah satu sektor yang perlu diperhatikan terkait dengan potensi peluang penghematan adalah sektor rumah tangga karena mengkonsumsi energi listrik lebih dari 50 persen. Sektor kedua yang perlu diperhatikan potensi peluang penghematannya adalah sektor usaha yang mengkonsumsi

energi listrik sebesar 20 persen, sektor selanjutnya yang perlu diperhatikan potensi peluang penghematannya adalah sektor industri yang mengkonsumsi energi listrik sebesar 12 persen dan sektor terakhir yang juga perlu diperhatikan potensi peluang penghematannya adalah sektor umum yang mengkonsumsi energi listrik kurang lebih 12 persen. Sektor industri meskipun hanya menyerap 12 persen dari total konsumsi energi akan tetapi jumlah konsumennya sedikit sehingga pemakaian setiap konsumen di sektor industri cukup besar, oleh karena itu potensi peluang penghematan setiap konsumennya juga cukup besar.



Gambar 216. Distribusi konsumsi energi listrik (esdm-jogja.com, 2013)

3. Potensi energi terbarukan

Energi listrik hibrid sangat cocok untuk dipasang di beberapa wilayah pesisir kawasan Indonesia. Pembangkit listrik ini merupakan sumber energi terbarukan yang paling relevan untuk dikembangkan di Indonesia, karena potensi energi surya di Indonesia sangat tinggi, dengan intensitas radiasi rata-rata 4-5 kWh/m² yang berlaku sepanjang tahun. Saat ini, pemanfaatan energi surya baru mencapai 5 MWp (ESDM, 2005).

Skenario pengembangan energi terbarukan di wilayah DIY diutamakan pada potensi Micro Hydro Power Plant (MHPP), energi angin, dan energi radiasi matahari. Berdasarkan

roadmap di dalam Rencana Umum Energi Daerah (RUED) Provinsi DIY, pengembangan MHPP akan dimulai pada tahun 2010 secara bertahap dengan target maksimal seluruh potensi yang ada dapat digunakan sebagai MHPP.

Potensi energi angin yang potensial untuk dikembangkan adalah potensi energi angin yang terdapat di sepanjang pantai selatan. Potensi energi angin di sepanjang pantai selatan adalah sampai dengan 10 MW dan khusus di pantai Sundak, Srandakan, Baron, dan Samas potensi energi angin dapat mencapai 10 MW – 100 MW (Dinas Pekerjaan Umum, 2009).

Pengembangan energi radiasi matahari sebagai penyedia energi listrik diarahkan sebagai solar home system (SHS). Penggunaan SHS ditujukan untuk keluarga dengan kelompok pendapatan menengah dan 20 % teratas. Target penggunaan SHS yang ada di dalam RUED di tahun 2010 adalah sebesar 30 % dari pelanggan R2 dan R3 atau sebesar 11,50 MW. Pertumbuhan kapasitas SHS ditargetkan setara dengan pertumbuhan penduduk untuk kedua kelompok pendapatan tersebut, yaitu sebesar 0,69 % di antara tahun 2010 – 2025 (Dinas Pekerjaan Umum, 2009).

Kapasitas dan energi yang dibangkitkan tersebut diperoleh berdasarkan asumsi-asumsi pengembangan energi terbarukan yang telah ditentukan. Dalam skenario diversifikasi, energi terbarukan dengan sumber energi radiasi matahari, energi angin, dan MHPP mulai dikembangkan pada tahun 2010. Di tahun 2010, PLTS yang dikembangkan adalah sebesar 11,50 MW. PLTAngin dan PLTMH dikembangkan berturut-turut sebesar 10 MW dan 0,70 MW.

Sebagai hasil asumsi pengembangan PLTS, 12,70 MW PLTS akan dikembangkan di tahun 2025 di sektor rumah tangga di kelompok pendapatan menengah dan 20 % teratas. Pengembangan PLTAngin di tahun 2025 mencapai kapasitas sebesar 30 MW. Pengembangan

PLMH di tahun 2025 mencapai 1.8 MW dengan asumsi seluruh potensi kapasitas MHPP di Provinsi DIY dapat dikembangkan. (Al Hasibi, 2010)

Total energi listrik yang dihasilkan dari pembangkit dengan sumber energi terbarukan pada tahun 2010 adalah sebesar 194,47 GWh. Sedangkan di tahun 2025, energi listrik yang dihasilkan dari ketiga pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan sebesar 389,82 GWh.

Sebagian kebutuhan energi listrik dari tahun 2010 sampai tahun 2025 diperoleh dari output pembangkit listrik PLTS, PLTA_{Angin}, dan PLTMH. Kontribusi rata-rata dari tahun 2010 – 2025 dari ketiga jenis pembangkit ini adalah sebesar 11,86 % dari keseluruhan kebutuhan energi listrik pada interval tahun yang sama.

Secara geografis, pesisir pantai selatan Yogyakarta merupakan lahan terbuka yang luas, matahari yang bersinar sepanjang hari dan kecepatan angin rata-rata 4 m/s. Kondisi tersebut menjadikan satu kriteria pemilihan lokasi pengembangan energi hibrid di pantai Pandansimo, Desa Poncosari, Bantul. Lokasi ini didukung oleh kondisi alam di sebelah selatan yang berhadapan langsung dengan laut selatan Jawa. Kondisi ini cukup layak dijadikan tempat pembangkit listrik energi hibrid dengan turbin putaran rendah.

Energi listrik yang dihasilkan dari energi hibrid ini diharapkan mendukung sektor pertanian, perikanan, dan pariwisata yang saat ini sedang dikembangkan di pantai Pandansimo.

4. Hasil pengukuran daya listrik

Berdasarkan hasil penelitian dan pengukuran di lapangan selama 6 bulan diperoleh data kecepatan angin rata-rata dan dari perhitungan serta pengukuran didapatkan data energi listrik (Tabel 16).

Tabel 16

Hasil pengukuran dan perhitungan energi listrik tahun 2012

Bulan	Rerata Kecepatan Angin (m/dt)	Daya Hasil Perhitungan (Watt)	Daya Hasil Pengukuran (Watt)
Juli	3,9	108,96	98,4
Agustus	4,2	136,09	123,6
September	3,8	100,79	91,2
Oktober	3,5	78,76	70,8
Nopember	3,2	60,19	54
Desember	3,1	54,72	49,2

Daya angin maksimum yang dapat diekstrak oleh turbin angin dengan luas sapuan rotor A dihitung menggunakan persamaan (49). Daya tersebut merupakan daya teoritis, sedangkan untuk daya sebenarnya yang dihasilkan harus dikalikan efisiensi karena sebagian energi akan hilang untuk transfer energi pada sistem mekaniknya. Nilai efisiensi pada kondisi normal adalah $16/27$ ($=59,3\%$) yang dikenal dengan batas Betz. Pada kenyataannya, karena ada rugi-rugi gesekan dan kerugian di ujung sudu, efisiensi aerodinamik dari rotor akan lebih kecil lagi berkisar pada harga maksimum 0,45 untuk sudu yang dirancang sangat baik. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi airfoil NACA 4415 modifikasi diperoleh angka efisiensi 0,35 – 0,40 pada kondisi kecepatan angin 3 m/s sampai 5 m/s.

Dengan menggunakan persamaan (49) yang hasilnya kemudian dikalikan dengan angka efisiensi (0,40), diperoleh hasil perhitungan yang diperlihatkan pada Tabel 16. Jika diamati, semakin tinggi kecepatan angin, maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Arus dan tegangan yang dihasilkan kincir angin berupa arus AC yang kemudian pada junction box di-searahkan menjadi DC, arus dan tegangan tersebut kemudian disimpan pada baterai. Jika terjadi kelebihan arus dan tegangan maka akan dibuang atau di-ground-kan

hingga tegangan tersebut mencapai batas maksimum. Selanjutnya arus dan tegangan disimpan di baterai dan dialirkan menuju inverter. Inverter berfungsi untuk mengubah daya dari DC menjadi AC, kemudian didistribusikan untuk keperluan masyarakat, seperti mesin pembuatan es balok, penerangan jalan umum dan warung.

Selama pengamatan di panel sistem kontrol dicatat arus listrik (i =Ampere) yang besarnya bervariasi, sedangkan besarnya tegangan (E) 12 Volt. Dengan menggunakan rumus $w=i * E$, diperoleh daya hasil pengukuran (Watt) sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 16. Daya hasil perhitungan dan pengamatan kemudian dibandingkan. Dari hasil pengukuran daya listrik di lapangan dapat disimpulkan bahwa dalam pengukuran terjadi penurunan daya sebesar 10%. Hal ini terjadi karena adanya rugi-rugi mekanis (losses) pada generator sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 16. Data rerata kecepatan angin selama bulan Juli hingga Desember 2012 diperlihatkan dalam lampiran 11.

5. Dampak Sosial dan Pariwisata

Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Pantai Baru, Pandansimo Bantul mampu menggerakkan dan membangkitkan ekonomi masyarakat setempat melalui kegiatan pertanian, perikanan, kuliner, dan pariwisata. Dari catatan retribusi masuk pantai yang besarnya Rp.5000 per orang, rata-rata terkumpul Rp. 25 juta setahun sebelum tahun 2010. Namun sejak adanya obyek wisata PLTA sekarang sekitar Rp120 juta. Uang retribusi ini sepenuhnya masuk Pemkab Bantul.

Dari pemasukan retribusi parkir juga mengalami peningkatan. Dulu, pemasukan dari parkir di hari libur mencapai Rp. 250-300 ribu, sekarang dapat mencapai Rp. 4-5 juta. Bahkan jika libur khusus, seperti Lebaran dan tahun baru bahkan dapat mencapai Rp. 9-10 juta. Hasil parkir dibagi dua: operator parkir yakni pemuda desa dan untuk kas desa.

Perubahan yang terjadi di wilayah Pantai Baru Pandansimo ini terjadi sejak 2010 seiring dengan berdirinya Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH). Listrik dari surya dan bayu itu disalurkan ke warung-warung. Minimal warung kecil butuh listrik untuk lampu dan alat masak, rata-rata 250 watt. Sedangkan warung yang besar punya lampu lebih banyak, pompa air 125 watt, televisi, dan kadang menyalakan sound system. Pemilik warung besar membayar biaya listrik sebesar Rp.10 ribu per bulan. Sedangkan pemilik warung lain yang kecil rata-rata Rp 3-4 ribu. Listrik PLTH juga digunakan untuk mengoperasikan 4 mesin pembuat es, yang hasilnya dijual ke warung warga dengan harga Rp. 4000 per kilogram.

Jalan aspal baru pun telah dibangun di kawasan itu. Kincir-kincir angin menjulang terbagi dalam dua area yang dipisahkan oleh bentangan panel surya di atas kolam air. Selain media tanaman air, air dari kolam juga dialirkan untuk pengairan pertanian lahan pasir dan kolam ikan.

Kincir angin didirikan berjarak sekitar 500 meter dari perkampungan penduduk untuk menghindari bising. Kincir angin yang dipasang di sisi timur merupakan buatan LAPAN ada 12 unit, yang memiliki ekor dengan adopsi teknologi dari Belanda dan Jerman. Sedangkan di bagian barat sebanyak 21 unit merupakan bantuan Ristek dengan adopsi teknologi generator dan baling-baling dari Cina. Tinggi tiang penyangga bervariasi antara 10 hingga 18 meter. Besar kecilnya daya tiap kincir ditentukan generator dan diameter baling-baling. Diameter kincir mulai dari 150 cm, 5 meter, sampai paling besar 7-8 meter. Semua punya baling-baling tiga bilah dan menghadap selatan, ke arah pantai.

Daya kincir terpasang berkisar antara 1 -10 KW. Total seluruh daya yang bisa dihasilkan 56 KW. PLTH memiliki 218 unit panel surya dengan daya 100-200 watt. Sehingga total instalasi PLTH ini sanggup memproduksi daya maksimal hingga 83 KW, yang disimpan

dalam 160 batere aki. Masing-masing batere berkekuatan 12 volt dengan 105Ah. Total penyimpanan energi 4045 Ah. Hasil daya kemudian dibagi-bagi. Selain untuk warung-warung tadi, juga untuk lampu jalan, operasional kantor, dan mesin balok es. Total kebutuhannya tercatat 22,5 KW. Di seberang panel surya, juga telah berdiri sejumlah kandang sapi. Rencananya akan ada genset biogas 2,5 KW dengan volume tampung 9 meter kubik yang juga dijadikan bahan bakar warung. Program dari kementerian lingkungan Hidup ini belum berjalan.

6. Emisi CO₂

Emisi CO₂ yang dihasilkan dari simulasi implementasi energi terbarukan sebagai penyedia energi listrik dapat dilihat pada Tabel 17. Emisi CO₂ ini merupakan emisi life cycle dari setiap teknologi energi terbarukan sebagai pembangkit listrik.

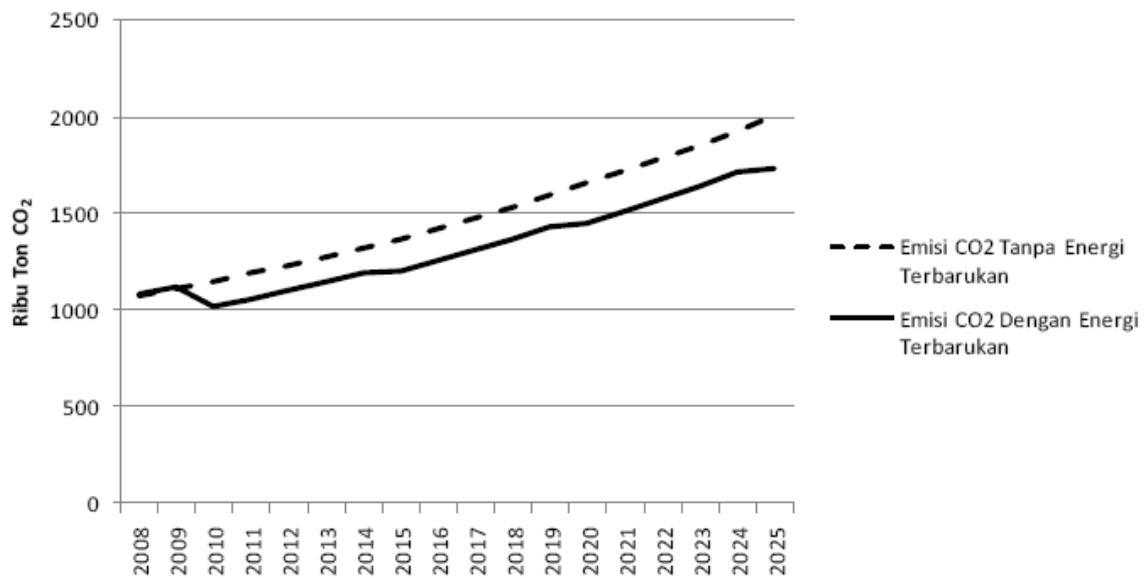
Faktor emisi CO₂ dari proses pembangkitan energi listrik oleh PLN adalah sebesar $0,719 \times 10^{-3} \text{ tCO}_2/\text{kWh}$. Faktor emisi ini dihitung berdasarkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan untuk menghasilkan keseluruhan energi listrik.

Tabel 17

Faktor emisi CO₂ berdasarkan sumber energi terbarukan

Sumber Energi	tCO ₂ /kWh
Energi angin	$21,0 \times 10^{-6}$
<i>Hydro</i>	$15,0 \times 10^{-6}$
Radiasi matahari	$6,00 \times 10^{-6}$

(Sumber : Lenzen, 2008)



Gambar 217. Peran sumber energi terbarukan dalam penurunan emisi CO₂ (Al Hasibi, 2010)

Gambar 217 memperlihatkan grafik emisi CO₂ dari aktivitas pembangkitan energi listrik. Dari gambar tersebut terlihat bahwa emisi CO₂ yang dihasilkan oleh PLN untuk membangkitkan energi listrik yang digunakan di Provinsi DIY tanpa peran sumber energi terbarukan lebih tinggi jika dibandingkan dengan pembangkitan energi listrik dengan melibatkan sumber energi dihasilkan tanpa keterlibatan energi terbarukan adalah sebesar 1,155.43 ribu Ton CO₂ dan menjadi 2,007.88 ribu Ton CO₂ di tahun 2025. Dengan dikembangkannya PLTS, PLTA Angin, dan PLTMH di tahun 2010, emisi CO₂ yang dihasilkan adalah sebesar 1,018.15 Ribun Ton CO₂ dan menjadi 1,734.02 Ribun Ton CO₂ di tahun 2025. Dalam interval 2010 – 2025, rata-rata penurunan emisi CO₂ dengan keterlibatan sumber energi terbarukan adalah sebesar 11,62 %. Tanpa keterlibatan energi terbarukan, pertumbuhan emisi CO₂ di tahun 2025 mencapai 4,04% per tahun. Dengan keterlibatan energi terbarukan, pertumbuhan emisi CO₂ di tahun 2025 dapat ditekan menjadi 0,85 % per tahun.

Berdasarkan skenario pengembangan energi terbarukan, peran energi terbarukan dalam penyediaan energi listrik di Provinsi DIY sangat signifikan. Hal ini diperlihatkan dengan kontribusi energi terbarukan dalam penyediaan energi listrik dapat mencapai 11,86 % dari keseluruhan kebutuhan energi listrik di Provinsi DIY. Kontribusi energi terbarukan dapat ditingkatkan dengan melibatkan jenis energi terbarukan lainnya seperti energi yang berasal dari biomasa dalam bentuk sampah kota maupun limbah pertanian. Selain berkontribusi dalam penyediaan energi listrik, pengembangan energi terbarukan dapat menurunkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan sebagai akibat aktivitas pembangkitan energi listrik. Dalam skenario pengembangan yang disimulasikan, peran energi terbarukan dalam penurunan emisi CO₂ mencapai 11,62 % dari emisi CO₂ tanpa energi terbarukan.

Menghitung konsumsi solar untuk Generator Set (Genset)

Perhitungan kontribusi pengurangan emisi CO₂ menggunakan asumsi bahwa kebutuhan konsumsi listrik penduduk di sekitar Pantai Pandansimo untuk penerangan jalan dan warung, pembuatan es balok, dan operasional kantor tercatat total kebutuhannya sebesar 22,5 kilowatt. Dengan asumsi bahwa kebutuhan listrik tersebut dapat dipenuhi dengan menggunakan genset berkapasitas 30 KVA, maka dapat dihitung emisi CO₂ yang dihasilkan dari penggunaan solar untuk operasional genset tersebut.

Berikut adalah cara menghitung konsumsi solar untuk Generator Set (Genset) tanpa perlu melihat flow meter per jamnya, menggunakan persamaan :

$$F_c = k \times P \times t \quad (87)$$

Dimana :

F_c : Konsumsi bahan bakar (liter)

k : 0.21 (faktor ketetapan konsumsi solar per kilowatt per jam)

P : Daya Genset (KVA=KiloVolt Ampere)

t : Waktu operasional genset (jam)

Misalkan : Daya Genset adalah 30 KVA, digunakan selama 12 jam, maka solar yang dibutuhkan adalah :

$$F_c = 0.21 \times 30 \times 12 = 75,6 \text{ liter}$$

Selanjutnya dapat dihitung emisi CO₂ yang dihasilkan dari penggunaan genset dengan persamaan :

$$\text{CO}_2 \text{ ton e} = F_c \times F_K \times \text{GWP} / 1000 \quad (88)$$

Dimana :

F_c : Konsumsi bahan bakar (liter)

F_K : Faktor konversi (2,6413 Kg/liter)

GWP : Global Warming Potential (1, diperoleh dari Climate Change 1995)

Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (87) didapat konsumsi bahan bakar sebesar 75,6 liter; sehingga hasil perhitungan emisi CO₂ adalah :

$$\text{CO}_2 \text{ ton e} = (75,6 \times 365 \text{ hari}) \times 2,6413 \times (1/1000) = 72,88 \text{ ton / tahun}$$

Menghitung emisi CO₂ yang dihasilkan oleh penggunaan kincir angin

Asumsi berikutnya yang digunakan adalah apabila kebutuhan listrik sebesar 22,5 kilowatt yang dihasilkan oleh genset di-substitusi oleh penggunaan kincir angin dengan daya 1 KW. Dengan memperhitungkan efisiensi daya output sebesar 40%, maka jumlah kincir angin yang diperlukan untuk menghasilkan daya sebesar 22,5 KW adalah 56 unit kincir angin. Faktor emisi CO₂ kincir angin diperoleh dari Tabel 17 sebesar 21×10^{-6} ; dan GWP kincir angin tidak diperhitungkan. Untuk menghitung emisi CO₂ yang dihasilkan oleh kincir angin digunakan persamaan :

$$\text{CO}_2 \text{ ton e} = \text{JPL} \times \text{FK} \quad (89)$$

Dimana :

JPL : Jumlah Pemakaian Listrik (kWh)

FK : Faktor Konversi (21×10^{-6} ton/KWh)

Dengan menggunakan persamaan (89) dapat dihitung emisi CO₂ yang dihasilkan oleh kincir angin per tahun sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ ton e} &= (22,5 \text{ kilowatt} \times 12 \text{ jam}) \times 365 \text{ hari} \times (21 \times 10^{-6}) \\ &= 2,07 \text{ ton / tahun} \end{aligned}$$

Dengan asumsi bahwa jumlah kincir angin terpasang sebanyak 56 unit, maka potensi emisi CO₂ yang dihasilkan sebesar 2,07 ton / tahun. Dengan membandingkan emisi CO₂ yang dihasilkan oleh penggunaan genset dengan pemanfaatan energi kincir angin, maka diketahui potensi pengurangan emisi CO₂ sebesar $72,88 - 2,07 = 70,81$ ton / tahun.

K. Pengaruh lingkungan terhadap material komposit propeler

Dari beberapa penelitian sebelumnya dilaporkan bahwa material komposit mengalami degradasi kekuatan yang diakibatkan oleh pengaruh lingkungan, seperti pengaruh kelembaban udara, panas matahari, radiasi ultraviolet, bahkan oksidasi termal. Kelembaban misalnya, dapat menurunkan kekuatan material komposit karena adanya difusi uap air ke material komposit yang dapat menyebabkan penurunan sifat temperatur transisi glass, yaitu temperatur dimana resin berubah sifat dari kondisi padat menjadi kondisi viskoelastis. Selain hal tersebut, proses degradasi komposit juga dipengaruhi oleh sifat kimia resin dan matriknya serta jangka waktu terpapar pada lingkungan. Beberapa material komposit sangat sensitif terhadap cuaca. Kombinasi dua atau beberapa faktor lingkungan dapat menyebabkan degradasi kekuatan material komposit (Li, 2000).

Pengaruh lingkungan terhadap komposit tergantung pada pengaruhnya terhadap masing-masing komponen kompositnya, fiber, matrik, serta interface antara fiber dan matriknya. Pengaruh keseluruhan tergantung pada pengaruh lingkungan yang paling dominan terhadap salah satu komponen komposit. Seperti misalnya, tegangan melintang merupakan sifat komposit yang didominasi oleh sifat matriknya, sehingga pengaruh lingkungan terhadap sifat tegangan melintang akan tergantung daripada sensitivitas matrik terhadap pengaruh lingkungan.

1. Pengaruh Temperatur

Dalam kurun waktu operasional yang lama, propeller kincir angin mungkin terpapar pada lingkungan dengan temperatur rendah ($\leq -20^{\circ}\text{C}$) atau temperatur yang sangat tinggi ($\geq 50^{\circ}\text{C}$). Beberapa polimer akan menjadi rapuh jika dipapar pada temperatur yang sangat rendah (Schwartz, 1996). Beberapa tahun terakhir, telah banyak dilakukan penelitian untuk mengetahui ketahanan material komposit terhadap temperatur tinggi (Brinson, 1987), (Soutis, 1997), (Hale, 1997), dan (Zaaffaroni, 1998). Pengaruh temperatur terhadap sifat retak komposit secara detail telah diteliti oleh Marom (1989). Hasilnya menunjukkan bahwa energi retak interlaminar menurun 25-30% pada kenaikan temperatur 50 – 100^oC.

Selain mempercepat proses penyerapan air, temperatur juga sangat berpengaruh terhadap resin komposit. Springer et al (1997) menyimpulkan bahwa untuk komposit laminasi 90^o (komposit didominasi resin), kenaikan temperatur dapat menurunkan modulus elastisitas dan kekuatan komposit, bahkan penurunan ini dapat mencapai 60% hingga 90%

2. Pengaruh kelembaban

Molekul-molekul air dapat berdifusi masuk ke pori-pori komposit dan dapat mempengaruhi sifat mekanik material komposit. Marom (1989) melaporkan bahwa kadar air dapat mempengaruhi kekuatan retak komposit. Shen dan Springer (1977) melaporkan bahwa

komposit laminasi 90⁰, kekuatan tarik maksimal dan modulus elastisitasnya menurun terhadap kenaikan kadar air pada material komposit. Penurunan ini bisa mencapai 50% -90% . Difusi uap air ke dalam komposit menyebabkan degradasi pada ikatan fiber-matriknya (Schultheise, 1997) penurunan temperatur transisi glass (Brinson, 1987), sifat plastisnya dan kadang-kadang dapat menyebabkan retak halus pada matrik komposit (Schutte, 1994) (Grant, 1995). Dhakal dkk. (2006) meneliti pengaruh penyerapan uap air terhadap sifat-sifat mekanik komposit serat rami yang diperkuat polyester tak jenuh (HFRUPE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi penurunan kekuatan tarik dan kekuatan tekuk pada ikatan serat dan matriknya.

Penyerapan kelembaban dihitung oleh perbedaan berat sudu sebelum dan sesudah dipasang selama 5,5 bulan. Prosentase kandungan uap air yang terdifusi ke dalam komposit dapat dihitung menggunakan persamaan (Naceri, 2009):

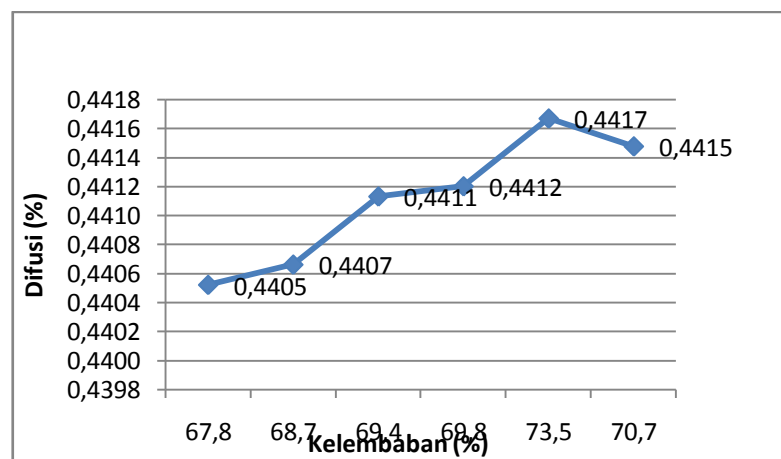
$$M (\%) = \left(\frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \right) \times 100$$

dengan W_{wet} : berat sudu setelah dipasang
 W_{dry} : berat sudu sebelum dipasang

Berat rata-rata tiga buah sudu sebelum dipasang adalah 3.025 gram. Setelah terpasang selama 5,5 bulan sudu diturunkan dan ditimbang. Berat rata-rata tiga buah sudu setelah dipasang adalah 3.083,33 gram. Sehingga prosentase kandungan uap air yang terdifusi ke dalam material sudu selama 5,5 bulan adalah $(3.083,33 - 3.025) / 3.025 \times 100 = 0,44\%$. Hal tersebut menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan hasil analisis EDS terhadap kandungan unsur dominan pada material komposit sudu yang menunjukkan kandungan unsur oksigen (O) mengalami kenaikan sebesar 0,22 % selama 5,5 bulan. Grafik hubungan antara kelembaban udara dan difusi uap air selama pengujian diperlihatkan pada Gambar 218.

Hasil uji kekuatan tekuk (*Flexural Test*) pada propeler setelah digunakan selama 5,5 bulan dengan menggunakan tiga parameter karakteristik mekanik material komposit, yaitu

tegangan tekuk, regangan tekuk dan modulus elastisitas menunjukkan bahwa tegangan tekuk mengalami penurunan dari 30 MPa menjadi 29,04 MPa, sedangkan regangan tekuk juga mengalami penurunan dari mula-mula sebesar 1,7% menjadi 1,68%. Pada parameter ketiga yaitu modulus elastisitas juga menunjukkan penurunan dari 2,018 GPa menjadi 1,879 GPa. Penurunan pada ketiga parameter karakteristik mekanik material komposit mengindikasikan bahwa terdapat pengaruh / hubungan antara kelembaban, difusi uap air dan kekuatan mekanis propeler.



Gambar 218. Grafik hubungan antara kelembaban dan difusi uap air

Hasil pengujian pada spesimen komposit setelah diaplikasikan sebagai propeler selama 5,5 bulan tidak mengalami degradasi pada interface (Gambar 206 dan 207). Hal tersebut dibuktikan oleh hasil pengamatan struktur komposit dengan SEM sebelum dan sesudah komposit dioperasikan sebagai propeler selama 5,5 bulan tidak mengalami perubahan secara signifikan.

Hasil pengujian EDS setelah sudu dipasang di lokasi pengujian selama 5,5 bulan, menunjukkan unsur karbon (C) mengalami penurunan sebesar 4,01%, sedangkan unsur oksigen mengalami kenaikan sebesar 7,85%. Fenomena tersebut disebabkan kelembaban yang

tinggi, dengan rata-rata kelembaban selama 5,5 bulan sebesar 69,98%. Kelembaban yang tinggi menyebabkan oksigen yang terdapat di udara akan terdifusi ke dalam material sudu.

Dari hasil analisis berdasar beberapa parameter di atas, dapat diambil kesimpulan bahwa sifat tarik dan sifat lentur material komposit menurun seiring dengan peningkatan penyerapan persentase kelembaban. Kelembaban juga mengakibatkan penurunan kekuatan material komposit seiring dengan peningkatan suhu.

L. Pengaruh SKEA terhadap lingkungan Pantai Pandansimo

1. Tinjauan ekosistem Pantai Pandansimo

Ekosistem pantai merupakan ekosistem yang berada di wilayah perbatasan antara air laut dan daratan, yang terdiri dari komponen biotik dan komponen abiotik. Komponen abiotik pantai terdiri dari gelombang, arus, angin, pasir, batuan dan sebagainya sedangkan komponen biotik pantai terdiri dari manusia, tumbuhan dan hewan yang hidup di daerah pantai.

Pantai Pandansimo dengan luas ± 37 Ha merupakan lahan pasir pantai karena didominasi oleh hamparan dataran pasir atau yang sering disebut gumuk pasir (*sand dunes*) baik yang berupa pasir hitam, abu-abu atau putih jenis *typic tropopsamment* dan *typic tropofluent* dengan kandungan lempung, debu, dan zat hara yang sangat minim, bersifat sangat *porous*, kurang kuat menahan air, permeabilitas dan drainase sangat cepat sehingga mudah mengalirkan air sekitar 150 cm per jam. Angin yang bertiup ke arah daratan membawa pasir yang memiliki berat dan massa jenis yang berbeda-beda sehingga menghasilkan gumuk pasir dengan berbagai ukuran dan bentuk yang berbeda pula. Sedangkan batuan hampir tidak ditemukan. Kondisi pantai tersebut hingga kini menjadi lahan yang tidak menguntungkan sebagai daerah pertanian, karena kebutuhan pupuk menjadi berlipat dan kandungan bahan organik serta nitrogen yang rendah.

Sebagian kecil masyarakat berprofesi sebagai petani untuk tanaman berusia pendek pada lahan-lahan yang agak jauh dari Gumuk Pasir \pm 1 km. Dengan kondisi pantai Pandansimo yang tidak menguntungkan sebagai daerah pertanian sebagian masyarakat lainnya berprofesi sebagai nelayan serta utamanya berprofesi jasa wisata pantai.

Terdapat 2 (dua) formasi vegetasi yakni formasi **Pes-caprae** dan formasi **Baringtonia**.

a. Formasi **Pes-caprae** :

Diambil dari nama jenis herba berbunga ungu, merambat dengan daun tebal seperti kaki kambing. Beberapa di antara tumbuhan ini tumbuh dari biji yang terapung-apung yang terbawa ombak sampai ke batas pasang surut tertinggi. Leeuwan (1927) dalam Monk et al (2000) menjelaskan bahwa jenis *Ipomoea pes-caprae* biasanya tidak berbuah di tempat yang jauh dari garis pantai, karena jenis ini tampaknya mengalami penyerbukan oleh *Xylocopa* dan *Hymenoptera* lainnya.

Zona ini memiliki jenis tumbuhan yang mampu tumbuh di tanah yang berkadar garam (salinitas) tinggi, mempunyai kemampuan menyesuaikan diri pada keadaan pasir yang kering, terhadap angin, terhadap tanah yang miskin unsur hara dan terhadap suhu tanah yang tinggi serta memiliki akar yang dalam (Anwar et al., 1984; Wong, 2005).

Tumbuhan yang ditemukan pada formasi ini diantaranya :

1. Jenis-jenis legum, diantaranya *Canavalia maritima* & *Vigna marina*
2. Rumput-rumputan diantaranya *Cyperus maritima*
3. Semak-semakan yang menjalar di atas pasir (*Spinefex littreus*, *Andropogon zizanioides* dan *Thuarea involuta*) serta tegakan cemara laut (*Casuarina equisetifolia*)

b. Formasi **Barringtonia** :

Formasi ini terdapat pada daerah dengan kadar salinitas agak sedikit rendah. Makin jauh dari tepi pantai ke arah daratan semakin banyak ditemukan belukar dan pepohonan. Tumbuhan pada zona ini berdaun tebal dan mengkilap serta didominasi oleh Barringtonia sehingga kemudian disebut dengan formasi Barringtonia. Anwar et al., (1984) menjelaskan bahwa *Barringtonia asiatica* sebagai penciri zona ini tidak selalu terdapat di formasi ini. Buah dari pepohonan pada formasi ini mempunyai kemampuan untuk tetap mengambang di atas air sehingga mudah terbawa oleh arus laut. Menurut Fairchild (1943) dalam Monk et al (2000) menyebutkan buah Barringtonia dapat mengapung selama berminggu-minggu atau berbulan-bulan tanpa mengalami kerusakan.

Tumbuhan yang ditemukan pada formasi ini diantaranya :

1. *Pandanus tectorius* atau Pandan, pohon dapat mencapai ketinggian hingga 6 m (Gambar 219). Daun Berduri pada sisi daun dan ujungnya tajam. Panjang antara 0,5 – 2,0 meter, bunga warna merah ungu. Buahnya seperti buah nenas dan ketika matang berwarna kuning jeruk. Tumbuh pada habitat dengan substrat berpasir di depan garis pantai, terkena pasang surut hingga agak ke belakang garis pantai.



Gambar 219. Pandan (*Pandanus tectorius*) (Goltenboth et al., 2006)

2. *Casuarina equisetifolia* Blanco atau Cemara laut. Jenis ini berbentuk pohon dengan percabangan halus dan memiliki daun seperti jarum (Gambar 220). Umumnya tumbuh di pinggir pantai berpasir, biasanya dari 0-100 m dpl. Jenis ini membutuhkan banyak sinar matahari, toleran terhadap air garam, tanah berkapur dan agak alkali dan sangat mudah adaptasi pada tanah kurang subur. Jenis ini dapat menambat (fiksasi) N₂ dari atmosfer dengan bantuan bakteri frankia (Goltenboth et al., 2006; Noor et al., 2006).



Gambar 220. Cemara Laut (*Casuarina equisetifolia* Blanco)

3. Hewan (Fauna). Dengan kondisi lingkungan yang cenderung ekstrim tekstur pasir kwarsa yang didominasi oleh vegetasi pantai berupa tanaman pandan (*Pandanustectorius*) dijadikan sebagai tempat penting bagi berbagai jenis penyu untuk bertelur serta beberapa jenis lain diantaranya kadal dan beberapa jenis burung. Sedangkan rantai makanan yang terjadi dalam ekosistem gumuk pasir di daerah pantai terjadi melalui tiga bentuk yakni melalui pengembalaan ternak (*grazers*), pelapukan (*detritivores*) dan biota dalam tanah (*interstitial fauna*).

2. Dampak penerapan SKEA

Energi angin merupakan energi yang berkelanjutan karena senantiasa tersedia di alam dalam waktu yang relatif panjang sehingga tidak perlu khawatir akan kehabisan sumbernya. SKEA mempunyai keuntungan sebagai energi alternatif yang bisa menggantikan bahan bakar fosil, merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan bebas polusi, serta tidak menghasilkan gas rumah kaca dan tidak menghasilkan limbah beracun.

a. Dampak langsung

Kerugian yang mungkin ditimbulkan sebagai akibat penggunaan ladang angin sebagai pembangkit listrik karena membutuhkan lahan yang luas dan tidak dapat disembunyikan. Penempatan ladang angin juga dapat menjadi persoalan bagi penduduk setempat, karena dapat mengurangi lahan pertanian serta pemukiman. Putaran dari sudu-sudu turbin angin dengan frekuensi konstan serta penggunaan gearbox dan generator dapat menyebabkan derau suara mekanis dan derau suara listrik. Dalam keadaan tertentu turbin angin juga dapat menyebabkan interferensi elektromagnetik, mengganggu penerimaan sinyal televisi atau transmisi gelombang mikro untuk telekomunikasi.

Pembangunan SKEA di wilayah pesisir pantai Pandansimo secara langsung tidak berpengaruh secara signifikan karena menggunakan konsep *renewable energy* yang berasal dari energi angin sehingga tidak mempengaruhi komponen abiotik maupun biotik dalam ekosistem yang ada di Pantai Pandansimo.

b. Dampak tidak langsung

Dengan adanya kincir angin sebagai bagian dari wisata pantai selain berdampak positif juga akan berdampak negatif berupa kerusakan ekosistem pantai. Kerusakan tersebut sangat dipengaruhi oleh berbagai aktivitas manusia dan faktor eksternal lainnya (McLachlan and

Brown, 2006). Wilayah pantai dijadikan sebagai tempat strategis bagi masyarakat umum, pengusaha untuk beraktivitas dan cenderung tidak mempertimbangkan daya dukung (*carrying capacity*) dan kemampuan alamiah untuk memperbaharui (*assimilative capacity*) serta kesesuaian penggunaannya sehingga ekosistem pantai mengalami degradasi fungsi. Perubahan bentang alam berhubungan dengan aktivitas merubah kondisi geomorfologi lahan setempat untuk penggunaan lainnya (Mc.Lachlan and Brown, 2006).

Perubahan bentang alam terjadi melalui berbagai bentuk :

1. Eliminasi habitat (untuk konstruksi bangunan, lahan parkir, konstruksi jalan, dll),
2. Perubahan habitat selama penggunaan lahan (zona rekreasi, penginapan, dll)
3. Perubahan bentuk geomorfologi (penghilangan pasir untuk kepentingan pembangunan tanggul penahan banjir, tanggul untuk menghindari penggenangan, perbaikan bentang alam untuk rekreasi, sarana parkir, prasarana jalan, dll)

Kegiatan lain seperti pengamatan perilaku, reproduksi, migrasi burung dan penyu yang tidak terkendali (bagian dari ekoturisme) dapat mengganggu kehidupan dan tempat pembiakannya.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian optimasi rancangan kincir angin modifikasi Standar NACA 4415 menggunakan serat rami dengan core kayu sengon laut (*albizia falcata*) maka dapat disimpulkan hasil-hasil sebagai berikut :

1. *Airfoil* yang digunakan sebagai bentuk dasar elemen sudu adalah hasil modifikasi *airfoil* NACA 4415. Sudu yang dibentuk mempunyai panjang 1,625 m terdiri dari 20 elemen sudu dengan profile NACA 4415 modif dengan panjang chord maksimum 0,28 m dan minimum 0,08 m yang bervariasi sesuai kurva pada Gambar 97. Rotor turbin angin yang dibentuk terdiri dari 3 buah sudu yang dapat menghasilkan daya output 50 Watt sampai 240 watt pada interval kecepatan angin rata-rata di Indonesia 3 m/s sampai 5 m/s seperti terjabarkan dalam Gambar 184. Rotor turbin mempunyai torsi 25 Nm sampai 75 Nm, sehingga rotor turbin mempunyai koefisien daya C_p 0,35 sampai 0,40 pada interval kecepatan angin rata-rata di Indonesia 3 m/s sampai 5 m/s. Berdasarkan kurva perbandingan koefisien aerodinamika *airfoil* NACA 4415 dengan NACA 4415 modif dapat disimpulkan bahwa *airfoil* NACA 4415 modif mempunyai kinerja yang lebih baik untuk aliran yang mempunyai bilangan Reynolds 4.1×10^4 hingga 2.5×10^5 .
2. Komposit serat rami core kayu sengon laut dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan komposit lamina. Pembuatan komposit dilakukan dengan metode *hand lay up* 1 layer dan 2 layer. Salah satu faktor penting yang menentukan karakteristik dari

komposit adalah perbandingan matriks dan penguat/serta. Perbandingan ini dapat ditunjukkan dalam bentuk fraksi volume serat (vf) atau fraksi volume berat (wf). Fraksi volume serat pada komposit 2 lapis (49,130 %) lebih besar dibanding komposit yang difabrikasi 1 lapis (46,012%). Kenaikan fraksi volume serat berakibat pada peningkatan kekuatan mekanik terutama tegangan tekuk sebesar 62,42% pada komposit 2 lapis. Tegangan tekuk terbaik pada komposit 2 lapis serat rami yaitu sebesar 30,881 MPa, dengan modulus young 2,018 GPa dan regangan 1,795 %. Hasil validasi menunjukkan bahwa perhitungan sifat mekanis dari hasil uji lebih besar daripada perhitungan menggunakan hukum pencampuran (*Rule of Mixture-ROM*) untuk spesimen material komposit 2 lapis yaitu sebesar 3,289 Mpa (10,65%). Dengan demikian sifat mekanis yang dihasilkan dari pengujian memiliki tingkat akurasi yang tinggi.

3. Pengamatan struktur komposit dengan SEM sebelum dan sesudah komposit dioperasikan sebagai propeler selama 5,5 bulan tidak mengalami perubahan secara signifikan. Hasil pengujian EDS menunjukkan unsur karbon (C) mengalami penurunan sebesar 4,01%, sedangkan unsur oksigen (O) mengalami kenaikan sebesar 7,85%. Fenomena tersebut disebabkan kelembaban yang tinggi, dengan rata-rata sebesar 69,98%. Kelembaban yang tinggi menyebabkan oksigen yang terdapat di udara akan terdifusi ke dalam meterial sudu.
4. Selain berkontribusi dalam penyediaan energi listrik, pengembangan energi terbarukan dapat menurunkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan sebagai akibat aktivitas pembangkitan energi listrik. Dengan asumsi bahwa kebutuhan energi listrik warga di sekitar Pantai Pandansimo sebesar 22,5 KW yang dipenuhi dengan 1 unit genset 30

KVA, dapat di-substitusi oleh penggunaan kincir angin dengan daya 1KW, dengan memperhitungkan efisiensi daya output sebesar 40%, diperlukan sebanyak 56 unit kincir angin dengan potensi emisi CO₂ yang dihasilkan sebesar 2,07 ton / tahun. Dengan membandingkan emisi CO₂ yang dihasilkan oleh penggunaan genset dengan pemanfaatan energi kincir angin, maka diketahui potensi pengurangan emisi CO₂ sebesar 70,81 ton / tahun.

5. Pembangunan SKEA di wilayah pesisir pantai Pandansimo secara langsung tidak berpengaruh secara signifikan karena menggunakan konsep *renewable energy* yang berasal dari energi angin sehingga tidak mempengaruhi komponen abiotik maupun biotik dalam ekosistem yang ada di Pantai Pandansimo.

B. Saran

1. Diharapkan pemanfaatan serat rami dan kayu sengon laut sebagai pengganti serat gelas pada pengembangan propeler kincir angin dapat diaplikasikan secara luas di masyarakat pesisir Pantai Pandansimo.
2. Untuk menekan biaya investasi pemanfaatan teknologi SKEA, perlu digalakkan penggunaan produksi lokal komponen SKEA dengan menciptakan pasar yang kondusif dan mendorong sektor swasta berperan aktif.
3. Pengguna teknologi SKEA yang potensial adalah pemerintah kabupaten terutama di wilayah pesisir, yang memiliki potensi angin cukup tinggi dapat memanfaatkan SKEA untuk listrik (pengisi baterai, lampu, komunikasi dll) dan pemompaan air, sehingga akan tercipta pasar teknologi SKEA.

4. Pemanfaatan ladang angin sebagai tujuan wisata sebaiknya mempertimbangkan daya dukung (*carrying capacity*) dan kemampuan alamiah untuk memperbaharui (*assimilative capacity*) serta kesesuaian penggunaannya sehingga ekosistem pantai tidak mengalami degradasi fungsi.
5. PLN sebagai pengguna utama sistem interkoneksi dapat berperan untuk memanfaatkan teknologi SKEA, terutama di wilayah yang potensi anginnya bagus untuk mengurangi penggunaan BBM.

DAFTAR PUSTAKA

- Adminbts, 2007, *Peluang Industri Berbahan Baku Kenaf*, Ditjen Perkebunan RI, Jakarta
- Al Hasibi, R.A., 2010, Peran Sumber Energi Terbarukan dalam Penyediaan Energi Listrik dan Penurunan Emisi CO₂ di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, *JURNAL ILMIAH SEMESTA TEKNIKA*, Vol. 13, No. 2, pp. 155-164
- Anderson, J. D., 2001, *Fundamental of Aerodynamics 3rd Edition*, Mc. Graw-Hill Inc., New York
- Anwar J, Damanik SJ, Hisyam N, Whitten AJ, 1984, *Ekologi Ekosistem Sumatera*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta
- Asy'ari, H. dan Budiman, AJ., 2011, *Pemanfaatan Potensi Angin dan Turbin Angin Tipe Darius untuk Pembangkit Listrik yang Ramah Lingkungan*, Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin X , 2-3 November 2011, Jurusan Mesin Fakultas Teknik UB, pp. 459
- ASM, 2003, *ASM Handbook Vol 21 Composite*, USA
- ASTM, 2003, *Annual Book of ASTM Standar*, West Conshohocken
- Ackermann, T., 2005, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd. England
- AWEA, 2004, *The American Wind Energy Association*, www.awea.org
- Bertagnolio F., Niels S., Jeppe J., and Peter F., 2001, *Wind Turbine Airfoil Catalogue*, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark
- Budi, U.S., Hartati, S., Purwati, D.R., 2005, *Biologi Tanaman Rami*, Monograf Balittas No.8, BALAI PENELITIAN TANAMAN TEMBAKAU DAN SERAT, ISSN : 0853-9308
- BP, *BP Statistical Review of World Energy*, www.bp.com, Juni, 2009.
- Brinson, H.F., 1987, *Accelerated Life Prediction*, Volume 2 *Engineered Materials Handbook*, ASM International, pp.788-796.
- BWEA, 2002., *The British Wind Energy Association*, www.bwea.com
- Calister dan William D., 1997, *Material Science and Engineering : an Introduction*, 4th edition, John Wiley & Son Inc, Canada
- Carcangiu, C.E., 2008, *CFD-RANS Study of Horizontal Axis Wind Turbines*, Thesis for The Degree of Doctor of Philosopy, Dipartimento Dgli Studi di Cagliari Piazza d'Armi, Italy.
- CAREPI, 2008, *Regional Energy Outlook of Yogyakarta Province*, CAREPI Project, Universitas Muhammdiyah Yogyakarta & Energy Research Center of the Netherlands.
- Clark R.A. dan Ansel M.P., 1986, *Jute and glass Fibre Hybrid laminates*, *Journal of Materials Science* 21, pp. 269-276, UK.

- Çetin, N.S., Yurdusev, M.A., Ata, R., Özdemir, A., 2005, *Assessment Of Optimum Tip Speed Ratio Of Wind Turbines*, Mathematical and Computational Applications, Vol. 10, No. 1, pp. 147-154.
- Dhakal H.N., Zhang Z.Y., Rihcardson M.O.W., 2006, *Effect of Water Absorption on The Mechanical Properties of Hemp Fibre Reinforced Unsaturated Polyester Composites*, Composites Science and Technology, doi:10.1016
- Daryanto, Y., F. A. Yohanes, F. Hasim, 2005, *Potensi, Peluang dan Tantangan Energi Angin di Indonesia*, BPPT Tangerang.
- Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, 2005, *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2005-2025*, Jakarta.
- Dewan Nasional Perubahan Iklim, 2010, *Peluang dan Kebijakan Pengurangan Emisi*, Jakarta
- Diharjo K., Jamasri, Soekrisno, Rochardjo H. S. B., 2005. *Tensile Properties of Unidirectional Continuous Kenaf Fiber Reinforced Polyester Composite* International Proceeding, Ketingan Physics Forum, Sebelas Maret University, Indonesia, Sept. 2005.
- Diharjo K., Jamasri, Soekrisno R., Rochardjo H.S.B., 2008. *Kajian Sifat Fisis-Mekanis dan Akustik Komposit Sandwich Serat Kenaf-Polyester Dengan Core kayu Sengon Laut*, Draft Laporan Disertasi, Jurusan Teknik mesin dan Industri, FT-UGM, Yogyakarta.
- Diharjo K. dan Jamasri, 2007. *Panel Komposit Sandwich Berpenguat Serat Kenaf Dengan Inti KSL*, Paten Terdaftar No. P00200700088, Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Dept Kehakiman dan Hak Asasi Manusia, republik Indonesia.
- Diharjo K., Jamasri dan Firdaus F., 2007. *Rekayasa Panel Interior Kabin Kendaraan Berkekuatan dan Ketahanan Nyala Api Tinggi Dari Bahan Komposit Hibrid Geopolimer (Limbah Fly Ash-Serat Gelas-Serat Kenaf-Polyester)*, Laporan Penelitian Tahun I, Program Insentif Riset Terapan, KNRT Republik Indionesia.
- Diharjo K., Jamasri, Soekrisno, Rochardjo H. S. B., 2005. *Tensile Properties of Unidirectional Continuous Kenaf Fiber Reinforced Polyester Composite* International Proceeding, Ketingan Physics Forum, Sebelas Maret University, Indonesia, Sept. 2005.
- Diharjo K., Jamasri, Soekrisno, Rochardjo H. S. B., 2007. *Effect of Faces Thickness on Impact Properties of Kenaf-Polyester Sandwich Composite With Albizzia Wood Core*, Proceeding of The Malaysia-Japan International Symposium On Advanced Technology (MJISAT 2007), 12TH – 15TH November, 2007a, Hotel Seri Pacific, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Diharjo K., Jamasri, Soekrisno, Rochardjo H. S. B., 2007b. *Effect of Core Thickness on Impact Properties of Kenaf-Polyester Sandwich Composite Panel With Albizzia Wood Core*, Proceeding of The 3rd International Conference on Product Design and Development 2007 (IPDD 2007), Department of Mechanical and Industrial Engineering, Engineering Faculty, Gadjah Mada University, Yogyakarta, December 12-13, 2007.

- Dinas Pekerjaan Umum, 2009, Rencana Umum Energi Daerah Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Bagian Energi dan Sumber Daya Mineral Dinas Pekerjaan Umum Provinsi DIY.
- Dirjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Nasional, 2009, *Strategi Pengelolaan Energi Nasional dalam Menjamin Keamanan Ketersediaan Energi Bagi Industri Nasional*, Workshop Perencanaan Pengembangan Faktor-faktor Utama Sektor Industri dalam Mencapai Visi Indonesia Sebagai Negara Maju Tahun 2020”, Jakarta.
- Drzal, L., Mohanty, D., Burgueno, R. & Misra, M. 2004, *Biobased structural composite materials for housing and infrastructure applications: opportunities and challenges*. Proceedings of the NSF Housing Research Agenda Workshop 2: 129-140
- Fengel D., dan Wenger G., 1995, *Kayu, Kimia Ultra Struktur Reaksi – Reaksi*, Gajah Mada University Pers, Yogyakarta
- Fluent Inc., 2006, *Fluent 6.3 User Guide*, PathScale Corporation, Lebanon
- Goodman, S.H., 1999, *Handbook of Thermoset Plastic*, William Andrew Inc
- Gómez and Álvaro Pinilla, 2006, Aerodynamic Characteristics of Airfoils with Blunt Trailing Edge, Recibido 13 de marzo de 2006, aprobado 1 de junio de 2006.
- Grant, S.T., Bradley, L.W., *In-situ Observations in SEM of Degradation of Graphite/Epoxy Composite Materials Due to Seawater Immersion*, Journal of Composite Materials, Vol.29, No.7 / 1995, pp. 853-867.
- Grant I., 2011, Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method
- Gupta N, 2003, *Characterization of Syntactic Foams and Their Sandwich Composites: Modeling and Experimental Approaches*, Desertasi, Louisiana State University, USA
- Hale, J.M., Gibson,G.A., 1997, *Strength Reduction of GRP Composites Exposed to High Temperature Marine Environments*, Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14th-18th, pp. 411-420.
- Hale, J.M., Gibson, G.A., 1998, *Coupon Tests of Fibre Reinforced Plastics at Elevated Temperatures in Offshore Processing Environments*, Journal of Composite Materials, Vol.32, No.6, pp. 526-542.
- Handiko, G.W. dan Abdullah, G, 2000, Aplikasi Komposit GFRP untuk Front end KRL-Nas dan KRLI, INKA, Madiun
- Harper, C.A, 2000, *Modern Plastics and Modern Plastics Handbook*, McGraw-Hill, New York
- Hoffmann M. J., R. Reuss Ramsay, G.M. Gregorek, 1996, Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the NACA 4415 Airfoil, Airfoil Performance Report-National Renewable Energy Laboratory, The Ohio State University
- Indarto, 2006, Sumber, *Konversi dan Konservasi Energi*, Pidato pengukuhan guru besar UGM

- Jamasri, Diharjo K., dan Gunesti W.H, 2005, *Rekayasa dan Manufaktur Komposit Sandwich Berpenguat Limbah Serat Buah Sawit Dengan Core Limbah Kayu Sawit Untuk Komponen Gerbong Kereta Api*, RUT XII, KMNRT, Jakarta
- Jamasri, Diharjo, K., dan Gunesti, 2006, *Studi perlakuan alkali dan tebal core terhadap sifat bending komposit sandwich berpenguat serat sawit dengan core kayu sawit*, Indonesian Journal of Materials Science, Vol. 8, No. 1.
- Karnani R., Krishnan M., and Narayan R, 1997, *Biofiber-Reinforced Polypropylene Composites*, Polymer Engineering and science, Vol. 37 No. 2, pp. 476 – 483.
- Kaw A.K., 1997, *Mechanics of Composite materials*, CRC Press, New York.
- Kementrian Riset dan Teknologi, 2010, *Menggapai “Indonesia Bisa” Teknologi Energi Listrik Hibrid di Bantul DIY*, Jakarta
- Kementrian Riset dan Teknologi, 2006, *Buku Putih Penelitian, Pengembangan dan Penerapan ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi baru Terbarukan untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2025*, Jakarta
- Khalfallah M.G., dan Koliub A.M., *Effect of dust on the performance of wind turbines*, Desalination, 2007, pp. 209–220.
- Koehuan, V.A, Boimau K., Galla W.F, 2011, *Aplikasi bahan komposit serat rami pada perancangan pembuatan blade rotor turbin angin tipe propeler tiga blade dengan daya 3000 watt*, Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin X, Universitas Brawijaya Malang
- Lenzen, M., 2008, *Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclearenergy: A review*, Energy Conversion and Management.
- Li, M., 2000, Temperature And Moisture Effects On Composite Materials For Wind Turbine Blades, *Thesis*, MONTANA STATE UNIVERSITY-BOZEMAN, Montana
- Manwell J.F and McGowan J.G., 2009, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Willy & Sons, United Kingdom
- Marom, G., 1989, *Environmental Effects on Fracture Mechanical Properties of Polymer Composites*, Application of Fracture Mechanics to Composite Materials, edited by Friedrich, K., pp. 397-423.
- Marsyahyo, E., Soekrisno, Rochardjo, H.S.B., Jamasri.,2008, *Identification of Ramie Single Fiber Surface Topography Influenced by Solvent Based Treatment*, Journal of Industrial Textiles, vol.38, no.2, Sage Publ.
- Marsyahyo E., Astuti S., Ruwana I., 2011, *Mechanical Improvement of Ramie Woven Reinforced-Starch Based Biocomposite Using Biosizing Method*, Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials, pp. 297-306
- Matthews F.L. dan Rawlings R.D., 1994, *Composite Materials : Engineering and Science*, Chapman and Hall, London
- McLachlan A, dan Brown AA, 2006, *The ecology of sandyshores*, Academic Press, California.
- Menachem L. dan Pearce E.M., *Handbook of Fiber Chemistry – Jute and Kenaf*, 2nd Edition

- Möller F., Heijdra J.J. dan Seifert H., 2002. *Research Project Bio - Blade*, FAL Institut für Betriebstechnik und Bauforschung, E.C.N. Netherlands Energy Research Foundation, *DEWI Magazin Nr. 20, February 2002*.
- Monk KA, Fretes YD, Lilley GR, 2000, *Ekologi Nusa Tenggara dan Maluku*, Seri Ekologi Indonesia, Buku V, Prehallindo, Jakarta
- Mueller D. H. dan Krobjilowski A, 2003, *New Discovery in The Properties of Composites Reinforced With Natural Fiber*, *Jurnal of Industrial Textiles*, Vol. 33, No. 2-October 2003, pp. 111-130.
- Mujiyono, Jamasri, Soekrisno R. dan Rocharjo H.S.B., 2008, *Biokomposit serat rami dan bambu bermatrik sekresi kutu pohon sengon*, Penelitian Pendahuluan Disertasi S3, Jurusan Teknik mesin dan Industri, FT-UGM, Yogyakarta.
- Mulyadi dan Rochardjo, H.S.B, 2003, *Impact Behaviour of Polyester Hybrid Composites Reinforced by Agave cantala and Glass Fibers*, International Seminar on Aerospace Technology, Yogyakarta.
- Naceri, A., 2009, *Moisture Diffusion Properties of Fabric Composite (Glass Fibre / Epoxy Resin)*, *IJE Transactions B:Applications*, Vol. 22, No.2, pp. 205-210
- Nam, S. and Netravali, A.N., 2002, *Interfacial and Mechanical Properties of Ramie Fibre and Soy Protein Green Composites*, ICCE-9, San Diego, California, ed D Hui, pp 551–552.
- Neil Panchal N., 2010, ME 7751 Final Project NACA 4415 Airfoil Using ANSYS ICEM CFX Meshing package and FLUENT 6.3 Simulation software.
- Noor YR, Khazali M, Suryadiputra INN, 2006, *Panduan Pengenalan Mangrove di Indonesia*. Wetlands International Indonesia Programme, Bogor
- Nurhalim, 2007, *Studi Analisis Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Pembangkit Hibrida*, *Jurnal Sains dan Teknologi*, Vol.6, No. 2, pp. 34-38
- Ostowari C. and Naik D., 1985, Post-Stall Wind Tunnel Data for NACA 44XX Series Airfoil Sections, U.S. Department of Energy
- Permatasari dan Diharjo K., 2006. *Kajian Pengaruh Orientasi Serat dan Tebal Core Terhadap Kekuatan Impak Komposit sandwich GFRP Dengan Core Divinycell PVC*, Prosiding Seminar Nasional TEKNOIN, FTI-UII, Yogyakarta, 22 Juli 2006
- Preusser, S. 2006, *Use of natural fibres in composites in the automotive sector in Germany from 1999 to 2005*, Trade Commissioner – S&T, Canadian Embassy, Berlin, Germany
- Radi S.K, Tria M.A, Sugianto, 2012, *Simulasi Numerik Pengaruh Protuberance pada Koefisien Aerodinamika Airfoil NACA 631412 pada Kecepatan Subsonik*, Vol.6, No.2, 26-44, *Jurnal MeTriK POLBAN*
- Rafiuddin, A. M, 2004, *Flow Over Thick Airfoils in Ground Effect Flow Over Thick Airfoils in Ground Effect-An Investigation On The Influence Of Camber*, 24 th International Congress of The Aeronautical Science.

- Riedel U., Nickel J., Herrmann A.S., 1999, *High Performance Applications Of Plant Fibres In Aerospace And Related Industries*, German Aerospace Center (DLR), Germany
- Rochardjo, H.S.B., Marsyahyo, E., Soekrisno, Jamasri., 2009, *Preliminary investigation on Bulletproof Panels Made from Ramie Fiber Reinforced Composites for NIJ Level II, IIA, and IV*, Journal of Industrial Textiles, vol. 39, no.1, Sage Publ.
- Rowell R.M., 1997. *Economic Opportunities in Natural Fiber Thermoplastic Composite*, Proceeding of fourth International Conference on Science and Technology of Polymers and Advanced Materials, Cairo, Egypt, Januari 4-9, 1997. Edited by P.N/ Prasad *et al.*, Plenum Press, New York, 1998.
- Rowell R.M., Sanadi A., Jacobson R. dan Caufield D., 1999. *Properties of kenaf Polypropylene Composites*, Processing and Product, Mississippi State university, Ag. & Bio Engineering, pp. 381-392. ISBN 0-9670559-0-3, Chapter 32.
- Ruud van Rooij and Nando Timmer , 2004, *Design of Airfoils for Wind Turbine Blades*, , Delft University of Technology, The Netherlands
- Sasongko, F., 2009. *Dampak Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Angin*, Konversi ITB, Bandung
- Saliveros E., 1988, The aerodynamic performance of the NACA-4415 aerofoil section at low Reynolds numbers, MSc(R) thesis, University of Glasgow
- Sarun Benjanirat, 2006, *Computational Studies of Horizontal Axis Wind Turbines in High Wind Speed Condition Using Advanced Turbulence Models*, a Thesis in Partial Fullfillment of the Degree of Doctor of Philosophy in The School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology
- Sanadi A.R., Prasad S.V. dan Rohatgi P.K., 1986. *Sunhemp Fibre-Reinforced Polyester*, Journal of Materials Science 21, pp. 4299-4304, UK
- Sanadi A.R., Caulfield D.F., Jacobson R.E, Rowell RM, 1995, *Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics: Mechanical properties of kenaf fiber-polypropylene composites*, American Chemical Society, pp. 1889-1896
- Schultheisz, R.C., McDonough, G.W., Kondagunta, S., Schutte, L.C., Macturk, S.K., McAuliffe, M., Hunston, L.D., *Effect of Moisture on E-Glass/Epoxy Interfacial and Fiber Strengths*, Composite Materials: Testing and Design, Thirteenth Volume,
- Schwartz, 1984. *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill Book CoMPany, New York, USA.
- Schwartz, M.M. 1996, *The influence of Environmental Effects*, Composite Materials, Properties, Nodestructive, Testing and Repair, pp. 117-119.
- Schutte, L.C., 1994, *Environmental Durability of Glass Fiber Composites*, Polymer Composites Group, Polymers Division, NIST
- Shen, C., Springer, S.G., 1977a, *Environmental Effects on the Elastic Moduli of Composite Materials*, Journal of Composite Materials, Vol.11, pp. 250-264.
- Shen, C., Springer, S.G., 1977b, *Effects of Moisture and Temperature on the Tensile Strength of Composite Materials*, Journal of Composite Materials, Vol.11, pp.2-15.

- Springer, G.S., 1984, *Model for Predicting the Mechanical Properties of Composites at Elevated Temperatures*, Environmental Effects on Composite Materials, Vol.2, pp. 151-161
- Springer, G. S., Environmental Effects on Composite Materials, Vol. 3, G. S. Springer, ed., Lancaster, PA: Technomic Publishing Company, Inc., pp. 1–34.
- Soemardi, T.P., Kusumaningsih, W., Irawan, A.P., 2009, *Karakteristik Mekanik Komposit Lamina Serat Rami Epoksi Sebagai Bahan Alternatif Soket Prostesis*, MAKARA of Technology Series, Vol 13, No 2., pp. 96-101.
- Soltani M. R., Birjandi A.H., Mooranic M.S, 2011, *Effect of surface contamination on the performance of a section of a wind turbine blade*, Scientia Iranica, 18 (3), 349-357
- Soutis, C., Turkmen, D., 1997, *Moisture and Temperature Effects of the Compressive Failure of CFRP Unidirectional Laminates*, Journal of Composite Materials, Vol.31, No.8, pp. 833-848.
- Sudiro, 2008, *Rami tanaman asli indonesia untuk meningkatkan kemandirian kebutuhan alat pertahanan*, Puslitbang Balitbang Dephan (<http://buletinlitbang.dephan.go.id>)
- Sugiyono, A., 2010, *Pengembangan Energi Alternatif Di DIY: Prospek Jangka Panjang*, Prosiding Seminar Nasional VI UTY, ISBN No. 978-979-1334-29-7
- Sugianto, 2011, *Simulasi Numerik Pemisahan Aliran 2 fase kerosine-Water di dalam T-Junction*, Thesis, UGM
- Suizu N., Uno T., Goda K., Ohgi J., 2009, *Tensile and impact properties of fully green composites reinforced with mercerized ramie fibers*, Journal of Materials Science, May 2009, Volume 44, Issue 10, pp 2477-2482
- Takizawa K., Henicke B., Tezduyar T.E., Hsu C.M., Bazilevs Y., 2011, *Stabilized Space-Time Computation of Wind-Turbine Rotor Aerodynamics*, Springer
- Tuakia, F., 2008, *Dasar-dasar CFD Menggunakan Fluent*, Penerbit Informatika, Bandung
- Turyanto, 2005. *Kenaf alternatif penghasil pulp yang belum dilirik*, Enterprise portal, Bisnis Indonesia, 13 Sept. 2005, dari <http://www.bisnis.com>.
- Wang B, Wu LZ, Ma L, Sun YG, Du SY, 2010, *Manufacturing and mechanical behavior of the sandwich structure with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss cores*. Mater Des 2010;31:2659–63
- W. A. Timmer, R. P. J. O. M. van Rooij, Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils, AIAA-2003-0352
- Wakui, T., dan Hashizume, T. 2002. *Optimal Operating Method of the Wind Turbine-Generator Systems Matching the Wind Condition and Wind Turbine Type* Waseda University. Japan
- Wackernagel, M. and Rees, W.E., 1996, *Our Ecological Footprint : Reducing Human Impact on the Earth*, New Society Publishers, Gabriola Island, BC
- Wong PP, 2005, *The Coastal Environment of Southeast Asia*. dalam : Gupta, A. (editor) *The Physical Geography of Southeast Asia*, Oxford University Press, New York

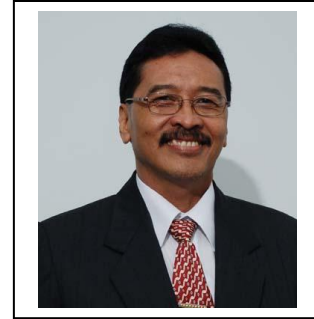
Xua. X, Jayaramana K., Morin C., Pecqueux N., 2008, *Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites*, journal of materials processing technology, 198, pp. 168–177

Zaffaroni, G., Cappelletti, C., 1998, *Comparison Of Two Accelerated Hot-Wet Aging Conditions of a Glass-Reinforced Epoxy Resin*, Composite Materials: Fatigue and Fracture-Seventh Volume, ASTM STP 1330, pp. 233-244.

<http://www.azonetwork.com/journalofmaterials/resinsystemsinfibrereinforced-compositematerials.html>, 5 Juni 2012

<http://chemistry.umeche.maine.edu/Fort/Cole-Fort.html>, 5 Juni 2012

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : Ir. Sudarsono, MT
Tempat / Tgl. Lahir : Bojonegoro, 19 Februari 1955
Agama : Islam
Status Perkawinan : Menikah
Istri : Dra. Nuniek Sudarsono
Anak : Esthi Budhiyanti, S.E, Akt.
Ismira Dewi, S.Psi, M.Psi.
Menantu : Agni Trian Bawono, S.T, M.T
Cucu : Alya Kirana Zhafirah
Orangtua : H. Ahmad Sumarlan (Alm) dan Hj. Samingah (Alm)
Mertua : H. Sudirman dan Hj. Arifah Sudirman
Alamat :
Rumah : Jl. Pertanian Gg Salak 26 Banguntapan
Yogyakarta
Telp. 0274 – 412345

Kantor : Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta
Jl. Kalisahak No. 28 Komplek Balapan Yogyakarta
Telp. 0274 – 653029
Fax. 0274 – 563847

Email : sudarsono@akprind.ac.id, sudarsono1574@gmail.com

Fakultas / Jurusan : Teknologi Industri / Teknik Mesin

Jabatan Fungsional : Lektor Kepala

Pangkat/Golongan : Pembina Utama Muda / IVc

NIDN : 0519025501

I. Riwayat Akademik :

- | | | |
|--------|--------------------------------|-----------------------|
| 1. SD | : SDN Kepoh Baru Bojonegoro | lulus tahun 1967 |
| 2. SMP | : SMPN Baureno Bojonegoro | lulus tahun 1970 |
| 3. SMK | : STMN Bojonegoro | lulus tahun 1973 |
| 4. D-3 | : ATN Malang, Teknik Mesin | lulus tahun 1979 |
| 5. S-1 | : ITN Malang, Teknik Mesin | lulus tahun 1988 |
| 6. S-2 | : UI Jakarta, Teknik Metalurgi | lulus tahun 1997 |
| 7. S-3 | : Program DIL UNDIP | tahun 2010 – sekarang |

II. Riwayat Pekerjaan :

1. Dosen tetap Yayasan Pembina Potensi Pembangunan IST AKPRIND Yogyakarta, tahun 1988 s/d sekarang
2. Kepala Lab. Mesin IST AKPRIND Yogyakarta, tahun 1989 s/d 1990

3. Kepala Lab. Teknologi Mekanik IST AKPRIND Yogyakarta, tahun 1991 s/d 1993
4. Ketua Jurusan Teknik Mesin IST AKPRIND Yogyakarta, tahun 1994 s/d 1995
5. Pembantu Dekan I FTI IST AKPRIND Yogyakarta, tahun 1997 s/d 2000
6. Pembantu Rektor III IST AKPRIND Yogyakarta, tahun 2000 s/d 2008
7. Rektor IST AKPRIND Yogyakarta, tahun 2008 s/d Sekarang

III. Riwayat Penelitian / Publikasi (5 tahun terakhir) :

1. Analisis tentang *Main Time break Failure seri Bearing 6304 pada crankshaf Gasoline Engine* (Jurnal Teknologi FTI IST AKPRIND), tahun 2009
2. Pembuatan Papan Partikel Berbahan Baku Sabut kelapa dengan Bahan Pengikat Alami (Jurnal Teknologi FTI IST AKPRIND), tahun 2010
3. Laju Korosi Terkendali terhadap *chassis* Mitsubishi FE 114 dengan Variasi *Quenching* (Jurnal Teknologi TECHNOSCIENTIA 2010)
4. Pemanfaatan Limbah padat (Serat) Industri Pengolahan sagu sebagai Bahan Pembuatan *Nitrosellulosa* (Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Lingkungan Hidup di Pasca Sarjana UNDIP), tahun 2010
5. Limbah padat Industri Elektroplating Sebagai Bahan Campuran Tambahan Pada Industri Keramik (Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Lingkungan Hidup di Pasca Sarjana UNDIP), tahun 2010
6. Analysis of FSW Weld Made of Aluminium Alloy 6110 (Prosiding Conference on Material at Departement of Mechanical and Industrial Engineering Faculty of Engineering Universitas Gajah Mada), tahun 2011
7. Pengaruh Penggunaan Spontan Power Terhadap Unjuk Kerja Motor Bensin NF 100 D (Jurnal Teknologi TECHNOSCIENTIA 2011)
8. Optimasi Penggunaan Serbuk Grafit Sebagai Material Alternatif Proses Metalisasi pada Elektroplating Non Konduktor (Seminar Industri Service 2011 Universitas Sultan Agung Tirtayasa Cilegon) 2011
9. Prediksi Aluminium sebagai Pembawa Mn, Cd, As, dan Cr ke dalam Sedimen pada Sistem Aliran Sungai (Seminar Industri Service 2011 Universitas Sultan Agung Tirtayasa Cilegon) 2011
10. Analisa Perubahan Volume Pada Cylinder Head dan Tinggi lubang Exhaust Terhadap Kenaikan Daya sepeda Motor 2 langkah (Jurnal Teknologi TECHNOSCIENTIA 2011)
11. Analisa Pengaruh Penggunaan Bahan Bakar Lpg Dan Pertamina Terhadap Emisi Gas Buang Pada Motor Matic (Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin X 2011, Universitas Brawijaya Malang)
12. Intervention on Stamping Process Improved Work Quality, Satisfaction and Efficiency PT. ADM Jakarta (2nd East Asian Ergonomics Federation Symposium, Taiwan Oktober 2011)
13. Kajian Sifat Mekanik Material Komposit Propeler Kincir Angin Standar NACA 4415 Modifikasi (Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains dan Teknologi 2012, IST AKPRIND Yogyakarta)
14. Computational Fluids Dynamics Performace Analysis of Ramie-albizia Composit for Wind Turbin Rotor (International Conference on Future Energy & Materials Research - FEMR, Singapore Juni 2013)
15. Optimization Design of Airfoil Propellers of Modified NACA 4415 Using Computational Fluids Dynamics (The 13th International Conference on QiR, Yogyakarta Juni 2013)

16. Utilization Of Albizia Wood (*Albizia Falcata*) And Ramie Fibers As Wind Turbine Propeller Modification Of Naca 4415 Standard Airfoil (The 2nd International Conference on Advances in Mechanics Engineering - ICAME, Jakarta Juli 2013)
17. Computational Fluids Dynamics Performace Analysis of Ramie-albizia Composited for Wind Turbin Rotor (Advanced Materials Research Vol. 772 (2013) pp. 735-738)
18. Optimization Design of Airfoil Propellers of Modified NACA 4415 Using Computational Fluids Dynamics (Advanced Materials Research Vol. 789 (2013) pp. 403-407)
19. Utilization Of Albizia Wood (*Albizia Falcata*) And Ramie Fibers As Wind Turbine Propeller Modification Of Naca 4415 Standard Airfoil (Applied Mechanics and Material Journal Vol. 391 (2013) pp. 41-45)

IV. Riwayat Pengabdian Masyarakat :

1. Pembuatan Kincir Angin untuk Penggerak Pompa Air di Desa Bugel Kulonprogo, Hibah PPM Dikti, 2010
2. Penerapan IPTEKS dan Transfer Teknologi Produksi Gula Semut dengan Metode *Vacuum* dan *Steam Curing*, Hibah lbM Dikti, 2011
3. Teknologi Pengolahan Air Bersih dan Air Minum, PonPes AI HIKMAH Gunungkidul, 24 September 2011
4. Pelatihan Keterampilan Perbengkelan Las BKM Pringgo Mukti, Yogyakarta, 17 Feb – 4 Maret 2012
5. Pelatihan Kerja Las Bagi Pemuda FKPPI, Yogyakarta, 15-16 September 2012
6. Teknologi Penerapan Produksi Bersih dan Pengolahan Limbah, Yogyakarta, 11 Maret 2013

Demikian daftar riwayat hidup ini dibuat dengan sebenarnya dan penuh tanggung jawab.

Yogyakarta, 22 Agustus 2013

Ir. Sudarsono, MT

LAMPIRAN 1
HASIL UJI TARIK SERAT RAMI

Spesimen	Diameter	Satuan		Luas penampang	Tegangan Tarik
	(mm)	N	Kg	(mm ²)	(Mpa)
1	0.1	1.5	0.16	0.008	191.083
2	0.16	4.1	0.41	0.020	204.021
3	0.1	1.5	0.16	0.008	191.083
4	0.06	0.6	0.06	0.003	212.314
5	0.1	1.7	0.18	0.008	216.561
6	0.06	0.6	0.06	0.003	212.314
7	0.1	1.7	0.18	0.008	216.561
				Rerata	206.277

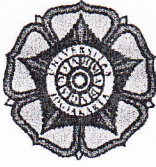
Keterangan:

d=diameter rami (mm)

A=luas penampang (mm²)

σ =tegangan tarik (MPa)

F=beban yang diberikan saat pengujian (N atau Kg)



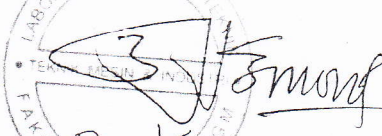
Universitas Gajah Mada
Laboratorium Teknik Bahan

Jl. Grafika No.2, Yogyakarta 55281

Uji Spesimen Serat Rami Tunggal

No	Spesimen ke	Diameter Spesimen (mm)	Satuan	
			(N)	(kg)
1	1	0,1	1,5	0,16
2	2	0,16	1,1	0,12
3	3	0,16	4,1	0,41
4	4	0,13	2,1	0,16
5	5	0,13	1,3	0,14
6	6	0,33	4,3	0,44
7	7	0,1	0,02	0,03
8	8	0,1	1,5	0,16
9	9	0,16	2,4	0,25
10	10	0,06	0,6	0,06
11	11	0,26	3,6	0,36
12	12	0,1	1,7	0,18

Yogyakarta, 30 Januari 2012


Dr. Kusnoro

LAMPIRAN 2
HASIL UJI TARIK KAYU SENGON LAUT (KSL)

No.	Area (mm ²)	Gaya (Kg)	Tegangan Tarik	
			(Kg/mm ²)	(Mpa)
1	45.60	238	5.219	51.201
2	45.60	198	4.342	42.596
3	45.60	262	5.746	56.364
4	45.60	267	5.855	57.440
5	45.60	252	5.526	54.213
6	45.60	178	3.904	38.293
7	45.60	197	4.320	42.381
Rerata			4.987	48.927

Keterangan:

d=diameter rami (mm)

A=luas penampang (mm²)

σ =tegangan tarik (MPa)

F=beban yang diberikan saat pengujian (Kg)

Rumus $\sigma = F/A$ (MPa)

REGANGAN TARIK KSL

No.	Area (mm ²)	Panjang Awal (mm)	Panjang Akhir (mm)	ΔL (mm)	Regangan
1	45.60	260	260.8	0.80	0.0031
2	45.60	260	262.0	2.00	0.0077
3	45.60	260	260.35	0.35	0.0013
4	45.60	260	261.02	1.02	0.0039
5	45.60	260	260.5	0.50	0.0019
6	45.60	260	261.7	1.70	0.0065
7	45.60	260	261.7	1.70	0.0065
Rerata					0.0044

Keterangan

e=regangan (mm/mm)

l_0 = panjang awal (mm)

l_i =pertambahan akhir (mm)

Δl =pertambahan panjang (mm)

Rumus $(l_i - l_0) / l_0$

PENGUJIAN TARIK



Universal Testing Machine



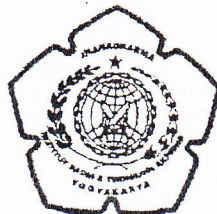
Spesimen uji tarik



Spesimen pada saat uji tarik



Hasil uji tarik



uji tarik . KSL

DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 1
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 238. ✓ 5.21
BREAK: 238. 5.21

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 238. 5.21
BREAK: 238. 5.21

DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 2
MAX LOAD: 10000. KG

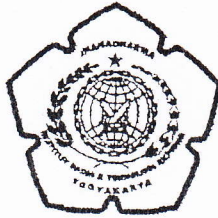
TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 159. 3.48
BREAK: 159. 3.48

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 159. 3.48
BREAK: 159. 3.48

DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 3
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 198. ✓ 4.342
BREAK: 198. 4.342

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 198. 4.342
BREAK: 198. 4.342



DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 4
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 262. ✓ 5.746
BREAK: 262. 5.746

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 262. 5.746
BREAK: 262. 5.746

DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 5
MAX LOAD: 10000. KG

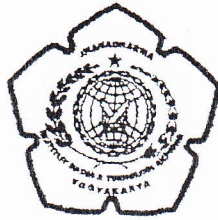
TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 267. ✓ 5.85
BREAK: 267. 5.85

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 267. 5.85
BREAK: 267. 5.85

DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 6
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 172. 3.77
BREAK: 172. 3.77

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 172. 3.77
BREAK: 172. 3.77



DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 7
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 252. ✓ 5.52
BREAK: 239. 5.24

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 252. 5.52
BREAK: 239. 5.24

DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 8
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 178. ✓ 3.90
BREAK: 178. 3.90

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 178. 3.90
BREAK: 178. 3.90

DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 9
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 197. ✓ 4.32
BREAK: 196. 4.29

AVERAGE
AREA: 45.60 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 197. 4.32
BREAK: 196. 4.29

LAMPIRAN 3

HASIL UJI TEKAN KAYU SENGON LAUT (KSL)

No.	Area	Gaya	Tegangan Tekan	
	(mm)		(Kg/mm ²)	(Mpa)
1	625	373	0.597	5.855
2	625	274	0.438	4.301
3	625	286	0.458	4.489
4	625	299	0.478	4.693
5	625	301	0.482	4.724
6	625	302	0.483	4.740
7	625	407	0.651	6.388
		Rerata	0.512	5.027

Keterangan:

d=diameter rami (mm)

A=luas penampang (mm²)

σ =tegangan tarik (MPa)

F=beban yang diberikan saat pengujian (Kg)

REGANGAN TEKAN KSL

No.	Area	Panjang	Panjang	ΔL	Regangan
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
1	625	25	25.90	0.90	0.036
2	625	25	26.20	1.20	0.048
3	625	25	26.10	1.10	0.044
4	625	25	26.15	1.15	0.046
5	625	25	27.80	2.80	0.112
6	625	25	27.22	2.22	0.089
7	625	25	27.25	2.25	0.090
			Rerata		0.066

Keterangan

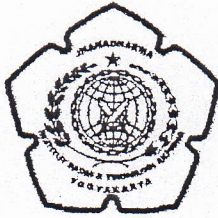
Rumus $(l_i - l_0) / l_0$

e=regangan (mm/mm)

l_0 = panjang awal (mm)

l_i =deformasi (mm)

Δl =pertambahan panjang (mm)



Uji TEKAN KSL

DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 1
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 373. ✓ 0.596
BREAK: 0. 0.000

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 373. 0.596
BREAK: 0. 0.000

DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 2
MAX LOAD: 10000. KG

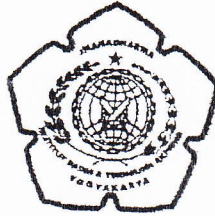
TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 274. ✓ 0.438
BREAK: 0. 0.000

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 274. 0.438
BREAK: 0. 0.000

DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 3
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 286. ✓ 0.458
BREAK: 0. 0.000

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 286. 0.458
BREAK: 0. 0.000



DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 4
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
 FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 158. 0.252
BREAK: 158. 0.252

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
 FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 158. 0.252
BREAK: 158. 0.252

DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 5
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
 FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 210. 0.336
BREAK: 0. 0.000

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
 FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 210. 0.336
BREAK: 0. 0.000



DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 6
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 299. ✓ 0.478
BREAK: 111. 0.177

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 299. 0.478
BREAK: 111. 0.177

DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 7
MAX LOAD: 10000. KG

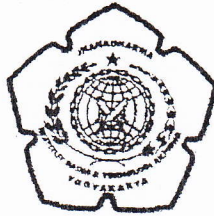
TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 301. ✓ 0.481
BREAK: 276. 0.441

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 301. 0.481
BREAK: 276. 0.441

DATE: 22. 02. 12 LOT NO: 8
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 302. ✓ 0.929
BREAK: 242. 0.744

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 302. 0.929
BREAK: 242. 0.744



FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK MESIN
LABORATORIUM PENGUJIAN BAHAN
Jl. I Dewa Nyoman Oka No. 32, Kotabaru, Yogyakarta 55224
Telp. (0274) 561338 – Fax . (0274) 563847
E-mail : ista@indo.nct.id * <http://www.akprind.ac.id>

DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 9
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 253. 0.404
BREAK: 253. 0.404

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 253. 0.404
BREAK: 253. 0.404

DATE: 17. 02. 12 LOT NO: 10
MAX LOAD: 10000. KG

TEST NO: 1
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 407. 0.651
BREAK: 346. 0.553

AVERAGE
AREA: 625.00 MM2
FORCE (KG) STRESS (KG/MM2)
PEAK: 407. ✓ 0.651
BREAK: 346. 0.553

LAMPIRAN 4

PENGOLAHAN DATA HASIL UJI IMPAK KAYU SENGON LAUT (KSL)

No.	l (mm)	d (mm)	A (mm ²)	α (°)	β (°)	R (m)	G (Kg)	W (Kgm)	HI (Joule)	HK (Joule/mm ²)
1	10.6	11.06	117.236	150	145	0.674	234.16	157.824	7.398	0.063
2	10.01	13.0	130.13	150	147	0.674	234.16	157.824	4.317	0.033
3	11.01	13.01	143.2401	150	147	0.674	234.16	157.824	4.317	0.030
4	11.0	12.07	132.77	150	146	0.674	234.16	157.824	5.838	0.044
5	10.05	12.03	120.9015	150	145	0.674	234.16	157.824	7.398	0.061
6	11.03	12.03	132.6909	150	146	0.674	234.16	157.824	5.838	0.044
7	11.02	12.07	133.0114	150	147	0.674	234.16	157.824	4.317	0.032
Rerata									5.632	0.044

Keterangan :

l=tebal di bawah takik (mm)

d=lebar spesimen (mm)

A=luas penampang (mm²)

α =sudut ayunan tanpa benda uji

β =sudut ayunan mematahkan benda uji

R=jarak titik beban ke pusat ayunan

G=W x g = berat beban x gravitasi

HI = energi = [GxR(cos β -cos α)]

HK=kekuatan impact = [HI/A]

PENGUJIAN IMPAK



Alat uji impak Charpy



Spesimen uji impak



Hasil uji impak



Hasil uji impak

LAMPIRAN 5

5.1. Uji Flexural (Tegangan Tekuk) KSL + 1 lapis Rami (2 gram)

No	Bahan Uji	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)
1	L	22.25	52.2	1161.45	1638.27	16.17
2	J	21.67	52.81	1144.39	1206.63	12.41
3	O	21.13	51.13	1080.38	1844.28	20.60
4	E	20.55	52.8	1085.04	2540.79	29.06
5	T	20.54	52.24	1073.01	1510.74	17.48
6	Q	21.12	52.22	1102.89	1677.51	18.36
<i>Rerata</i>						19.013

Keterangan

Rumus $\sigma_f = 3 PL / 2bd^2$

σ_f = Flexural Strength (MPa)

L = support span (mm) 170

P = beban yang diberikan saat pengujian (Newton)

b = lebar specimen (mm)

d = tebal spesimen (mm)

5.2. Uji Flexural Strain (Regangan Tekuk) KSL + 1 lapis Rami (2 gram)

No	Bahan Uji	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)	Deformasi (mm)	Regangan Tekuk (%)
1	L	22.25	1161.45	1638.27	16.17	6.00	2.7716
2	J	21.67	1144.39	1206.63	12.41	4.00	1.7996
3	O	21.13	1080.38	1844.28	20.60	6.00	2.6321
4	E	20.55	1085.04	2540.79	29.06	5.00	2.1332
5	T	20.54	1073.01	1510.74	17.48	5.00	2.1322
6	Q	21.12	1102.89	1677.51	18.36	5.50	2.4116
<i>Rerata</i>							2.313

Keterangan

Rumus $\epsilon_f = (6Dd/L^2)$

ϵ_f = Regangan Tekuk (%)

L = support span (mm)

D = nilai deformasi maks pada span tengah (mm)

d = tebal spesimen (mm)

5.3. Uji Elastisitas

No	Bahan Uji	Luas Penampang (mm ²)	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)	Deformasi (mm)	Elastisitas (Mpa)
1	L	1161.45	22.25	52.2	1638.27	16.17	8.00	0.44
2	J	1144.39	21.67	52.81	1206.63	12.41	4.00	0.69
3	O	1080.38	21.13	51.13	1844.28	20.60	8.00	0.59
4	E	1085.04	20.55	52.8	2540.79	29.06	5.00	1.36
5	T	1073.01	20.54	52.24	1510.74	17.48	5.00	0.82
6	Q	1102.89	21.12	52.22	1677.51	18.36	5.50	0.76
							<i>Rerata</i>	0.776

Keterangan

Rumus $E_f = L^3 m / 4bd^3$

E_f = modulus elastisitas tekuk (MPa)

L = Support span (mm) 170

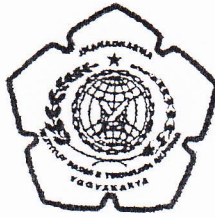
m = kemiringan kurva tegangan-regangan (p/D)

b = lebar spesimen (mm)

d = tebal spesimen (mm)

p = beban (Newton)

D = deformasi (mm)



LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Nomor : 21/LAB-PH/LHP/V/2012
Nomor Analisis : 53/LHP
Asal contoh : Ir. Sudarsono, MT.
Jl. Kalisahak 28 Yogyakarta
Jenis contoh : Material komposit
Tanggal Penerimaan Contoh : 27 Mei 2012
Tanggal Pelaksanaan Analisis : 28 Mei 2012
Untuk analisis : Uji Flexural kayu sengon laut + 1 lapis rami

Hasil Pengujian :

No.	Kode	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)
1.	L	22,25	52,20	1161,45	1638,27	16,17
2.	J	21,67	52,81	1144,39	1206,63	12,41
3.	O	21,13	51,13	1080,38	1844,28	20,60
4.	E	20,55	52,80	1085,04	2540,79	29,06
5.	T	20,54	52,24	1073,01	1510,74	17,48
6.	Q	21,12	52,22	1102,89	1677,51	18,36
Rerata						19,013

Yogyakarta, 28 Mei 2012

Kepala Laboratorium



Agus Duniawan, ST., M.Eng.

LAMPIRAN 6

6.1. Uji Flexural (Tegangan Tekuk) KSL + 2 lapis Rami (4 gram)

No	Bahan Uji	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)
1	R	22.25	52.25	1162.5625	3207.87	31.62
2	I	22.8	52.2	1190.16	3698.37	34.75
3	K	23.87	52.2	1246.014	2540.79	21.78
4	A	22.2	52.21	1159.062	3659.13	36.26
5	G	21.66	52.2	1130.652	2746.8	28.60
6	M	21.24	52.25	1109.79	2982.24	32.26
Rerata						30.881

Keterangan

Kayu sengon direndam dalam cairan NaOH selama 3 jam.

L	170	mm
Resin	300	ml
Katalis	30	ml
konversi kg-	9.81	m/dt ²

Rumus $\sigma_f = 3 PL / 2bd^2$

σ_f = Flexural Strength (MPa)

L = support span (mm)

P = beban yang diberikan saat pengujian (Newton)

b = lebar specimen (mm)

d = tebal spesimen (mm)

6.2. Uji Flexural Strain (Regangan Tekuk) KSL + 2 lapis Rami (4 gram)

No	Bahan Uji	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)	Deformasi (mm)	Regangan Tekuk (Mpa)
1	R	22.25	1162.5625	3207.87	12.28	3.00	1.39
2	I	22.8	1190.16	3698.37	34.75	3.50	1.66
3	K	23.87	1246.014	2540.79	21.78	6.00	2.97
4	A	22.2	1159.062	3659.13	18.76	4.50	2.07
5	G	21.66	1130.652	2746.8	28.60	4.00	1.80
6	M	21.24	1109.79	2982.24	11.04	2.00	0.88
Rerata						1.795	

Keterangan

Rumus $\epsilon_f = (6Dd / L^2)$

ϵ_f = Regangan Tekuk (%)

L = support span (mm)

D = nilai deformasi maks pada span tengah (mm)

d = tebal spesimen (mm)

6.3. Uji Elastisitas

$$E_f = L^3 m / 4bd^3$$

No	Bahan Uji	Luas Penampang (mm ²)	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)	Deformasi (mm)	Elastisitas (Gpa)
1	R	1162.5625	22.25	52.25	3207.87	31.62	3.00	2.28
2	I	1190.16	22.8	52.2	3698.37	34.75	3.50	2.10
3	K	1246.014	23.87	52.2	2540.79	21.78	6.00	0.73
4	A	1159.062	22.2	52.21	3659.13	36.26	4.50	1.75
5	G	1130.652	21.66	52.2	2746.8	28.60	4.00	1.59
6	M	1109.79	21.24	52.25	2982.24	32.26	2.00	3.66
							Rerata	2.018

Keterangan

Rumus $E_f = L^3 m / 4bd^3$

E_f = modulus elastisitas tekuk (MPa) 3207.87

L = Support span (mm) 170 3698.37

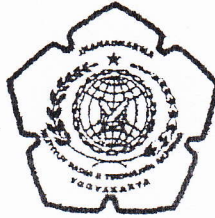
m = kemiringan kurva tegangan-regangan (p/D) 2540.79

b = lebar spesimen (mm) 3659.13

d = tebal spesimen (mm) 2746.8

p = beban (Newton) 2982.24

D = deformasi (mm)



LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Nomor : 25/LAB-PH/LHP/V/2012
Nomor Analisis : 57/LHP
Asal contoh : Ir. Sudarsono, MT.
Jl. Kalisahak 28 Yogyakarta
Jenis contoh : Material komposit
Tanggal Penerimaan Contoh : 27 Mei 2012
Tanggal Pelaksanaan Analisis : 28 Mei 2012
Untuk analisis : Uji Flexural strain kayu sengon laut + 2 lapis rami

Hasil Pengujian :

No.	Kode	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban (Newton)	Tegangan Tekuk (Mpa)	Deformasi (mm)	Regangan Tekuk (%)
1.	R	22,25	1161,562	3207,87	31,62	3,00	1,39
2.	I	22,80	1190,160	3698,37	34,75	3,50	1,66
3.	K	23,87	1246,014	2540,79	21,78	6,00	2,97
4.	A	22,20	1159,062	3659,13	36,26	4,50	2,07
5.	G	21,66	1130,652	2746,80	28,60	4,00	1,80
6.	M	21,24	1109,79	2982,24	32,26	2,00	0,88
Rerata							1,795

Yogyakarta, 28 Mei 2012

Kepala Laboratorium

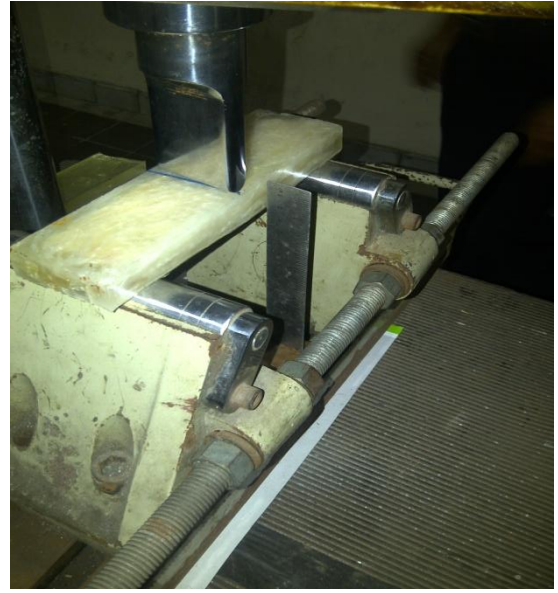


Agus Duniawan, ST., M.Eng.

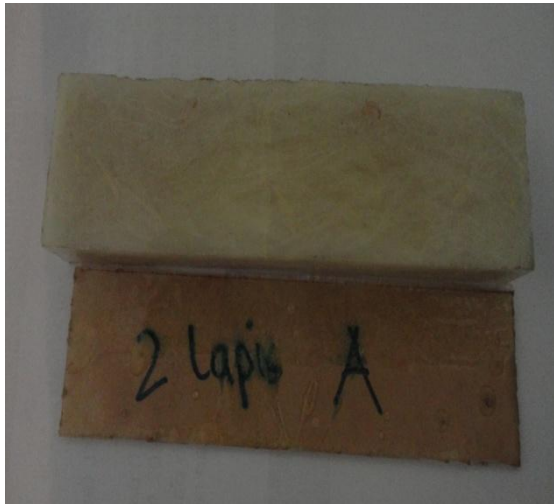
PENGUJIAN TEKUK



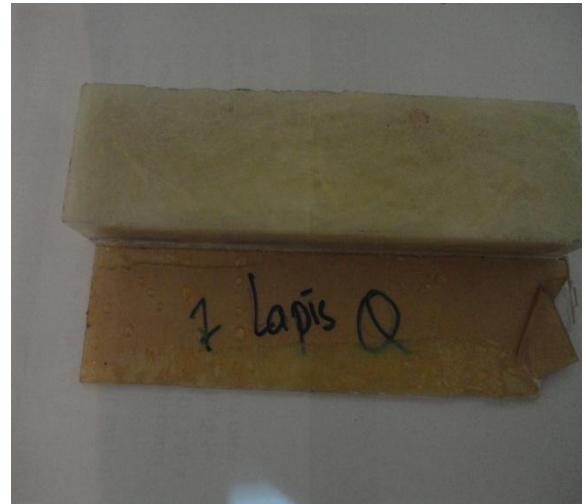
Spesimen pada saat diuji



Spesimen pada saat diuji dan diukur



Spesimen uji 2 lapis rami



Spesimen uji 1 lapis rami



Hasil patahan uji tekuk



Hasil patahan uji tekuk

LAMPIRAN 7.1

Perhitungan Fraksi Volume Serat/Penguat Rami+KSL (vf)

Pada cetakan uji flexture 204ml

Jenis Sampel	Sampel Uji	Tebal (cm)	Lebar (cm)	Luas (cm ²)	panjang (cm)	volume (ml)	berat komposit (gr)	berat rami+ksl (gr)	Density matriks (gr/ml)	Fraksi volume serat/penguat (%) vf (%)	Rerata vf (%)
1 layers	L	2,225	5,22	11,615	17,1	198,61	180,606	39,544	1,3	45,365	46,012
	J	2,167	5,281	11,444	17,2	196,84	177,152	36,488	1,3	45,029	
	O	2,113	5,113	10,804	17	183,66	165,298	37,04	1,3	46,283	
	E	2,055	5,28	10,850	17	184,46	166,011	41,741	1,3	48,176	
	T	2,054	5,224	10,730	17	182,41	164,170	33,253	1,3	44,792	
	Q	2,112	5,222	11,029	17,15	189,15	170,231	38,508	1,3	46,430	
2 layers	R	2,225	5,225	11,626	17,2	199,96	179,965	31,103	1,3	42,734	49,130
	I	2,28	5,22	11,902	17,1	203,52	183,166	48,623	1,3	49,147	
	K	2,287	5,22	11,938	17	202,95	182,654	55,155	1,3	51,675	
	A	2,22	5,221	11,591	17	197,04	177,336	38,421	1,3	45,768	
	G	2,166	5,22	11,307	17,1	193,34	174,007	60,181	1,3	54,713	
	M	2,124	5,225	11,098	17,1	189,77	170,797	49,273	1,3	50,742	

Rumus $vf = (Vc - (Mc - Mf) / Qm) / Vc$

dimana :

vf : Fraksi volume serat /penguat rami+KSL (%)

Vc : Volume Komposit (ml)

Mc : Berat Komposit (gr)

Mf : Berat fiber/serat penguat rami+KSL (gr)

Qm : Density matriks (resin polyester) (gr/ml)

LAMPIRAN 7.2

Perhitungan Kesalahan Relatif Berat Komposit Fabrikasi terhadap Berat Komposit Teori

cetakan untuk flexural 204ml

Jenis Sampel	Sampel Uji	Rami+KSL (gr)	Resin (ml)	Resin (gr)	Berat komposit		Kesalahan relatif (%)
					teori (gr)	fabrikasi (gr)	
1 layers	L	39,544	110	143	182,544	180,606	1,062
	J	36,488	110	143	179,488	177,152	1,301
	O	37,040	110	143	180,04	165,298	8,188
	E	41,741	110	143	184,741	166,011	10,138
	T	33,253	110	143	176,253	164,170	6,855
	Q	38,508	110	143	181,508	170,231	6,213
2 layers	R	31,103	120	156	187,103	179,965	3,815
	I	48,623	120	156	204,623	183,166	10,486
	K	55,155	120	156	211,155	182,654	13,498
	A	38,421	120	156	194,421	177,336	8,787
	G	60,181	120	156	216,181	174,007	19,508
	M	49,273	120	156	205,273	170,797	16,795

Kesalahan Relatif = ((Berat Komposit Teori - Berat Komposit Fabrikasi)/Berat Komposit Teori)*100 (%)

LAMPIRAN 7.3
Perhitungan Fraksi Volume Matriks (Resin Polyester) (vm)

Pada cetakan uji flexture 204ml

Jenis Sampe	Sampel Uji	Tebal cm	Lebar cm	Luas (cm ²)	panjang cm	Vc ml	Mc gr	Mm gr	Qf gr/ml	vm (%)	Rerata vm (%)
1 layers	L	2,225	5,22	11,615	17,1	198,61	180,606	141,012	3,3	93,959	
	J	2,167	5,281	11,444	17,2	196,84	179,120	132,137	3,3	92,767	
	O	2,113	5,113	10,804	17	183,66	167,134	123,104	3,3	92,735	93,259
	E	2,055	5,28	10,850	17	184,46	167,856	132,391	3,3	94,174	
	T	2,054	5,224	10,730	17	182,41	165,995	126,095	3,3	93,372	
	Q	2,112	5,222	11,029	17,15	189,15	172,122	125,592	3,3	92,545	
2 layers	R	2,225	5,225	11,626	17,2	199,96	181,964	145,166	3,3	94,423	
	I	2,28	5,22	11,902	17,1	203,52	185,201	148,405	3,3	94,521	
	K	2,287	5,22	11,938	17	202,95	184,683	149,739	3,3	94,782	94,136
	A	2,22	5,221	11,591	17	197,04	179,307	140,693	3,3	94,062	
	G	2,166	5,22	11,307	17,1	193,34	175,941	127,334	3,3	92,382	
	M	2,124	5,225	11,098	17,1	189,77	172,694	139,178	3,3	94,648	

$$\text{Rumus } vm = (((Vc - (Mc - Mm)) / Qf) / Vc)$$

dimana :

vm : Fraksi volume matriks /resin polyester (%)

Vc : Volume Komposit (ml)

Mc : Berat Komposit (gr)

Mm : Berat Matriks/Resin Polyester (gr)

Qf : Density fiber (Rami+KSL) (gr/ml)

LAMPIRAN 7.4

7.4 Perhitungan Tegangan Komposit dengan Teori Rule of Mixture

Jenis Sampel	σ_f (Rami+KSL) (MPa)	v_f (Rami+KSL) (%)	σ_m (Resin) (Mpa)	v_m (Resin Polyester) (%)	σ_c (MPa)	Rerata σ_c (MPa)
1 layers	34,690	45,365	0,089	93,959	15,821	16,045
	34,690	45,029	0,089	92,767	15,703	
	34,690	46,283	0,089	92,735	16,138	
	34,690	48,176	0,089	94,174	16,796	
	34,690	44,792	0,089	93,372	15,621	
	34,690	46,430	0,089	92,545	16,189	
2 layers	34,690	42,734	0,089	94,423	29,733	34,170
	34,690	49,147	0,089	94,521	34,182	
	34,690	51,675	0,089	94,782	35,936	
	34,690	45,768	0,089	94,062	31,838	
	34,690	54,713	0,089	92,382	38,042	
	34,690	50,742	0,089	94,648	35,289	

Rumus $\sigma_c = (\sigma_f \cdot v_f) + (\sigma_m \cdot v_m)$ (untuk 1 layer)

$\sigma_c = (2(\sigma_f \cdot v_f)) + (\sigma_m \cdot v_m)$ (untuk 2 layer)

dimana :

σ_f : Tegangan Fiber (Rami+KSL) (MPa)

v_f : Fraksi Volume fiber (Rami+KSL) (%)

σ_m : Tegangan Matriks (Resin Polyester) (MPa)

v_m : Fraksi Volume Matriks (Resin Polyeste) (%)



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA

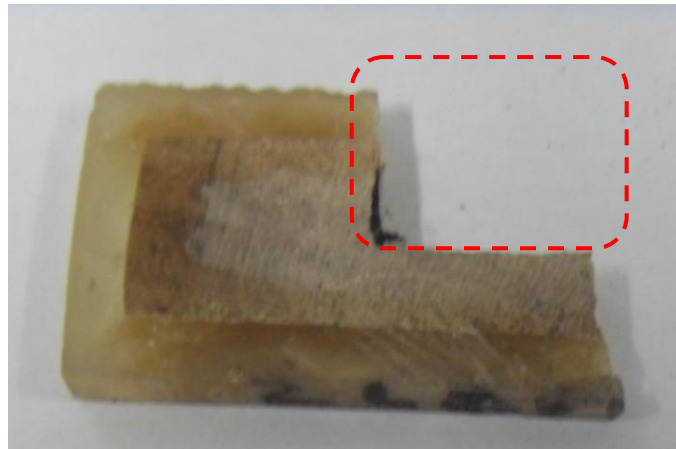
Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN FESEM DAN UJI KOMPOSISI KIMIA (EDS)
FESEM AND CHEMICAL COMPOSITION (EDS) TEST REPORT

Page 1 of 4

No Laporan <i>Report Nr</i>	0129	Bahan <i>Material</i>	Komposit
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Sudarsono	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Code: 2 Lapis
Alamat <i>Address</i>	IST Akprind Jogja	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	13 Februari 2013
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0129/PT.02/FT04/P/2012	Standar <i>Standard</i>	-
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	18 Februari 2013	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	FE-SEM FEI INSPECT F50 EDAX EDS Analyzer

Foto Sampel
Sample Photograph



Depok, 19 Februari 2013
Manajer Teknis
Laboratorium Uji
Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

(Ahmad Asthary, ST)

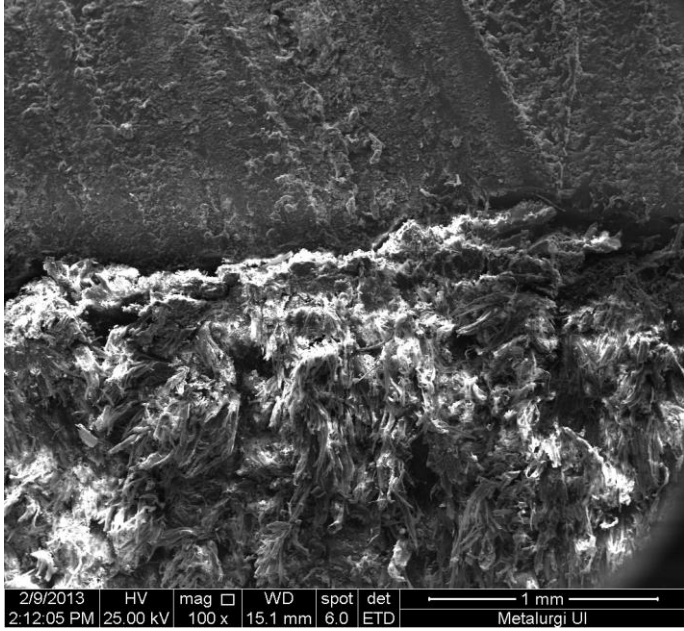
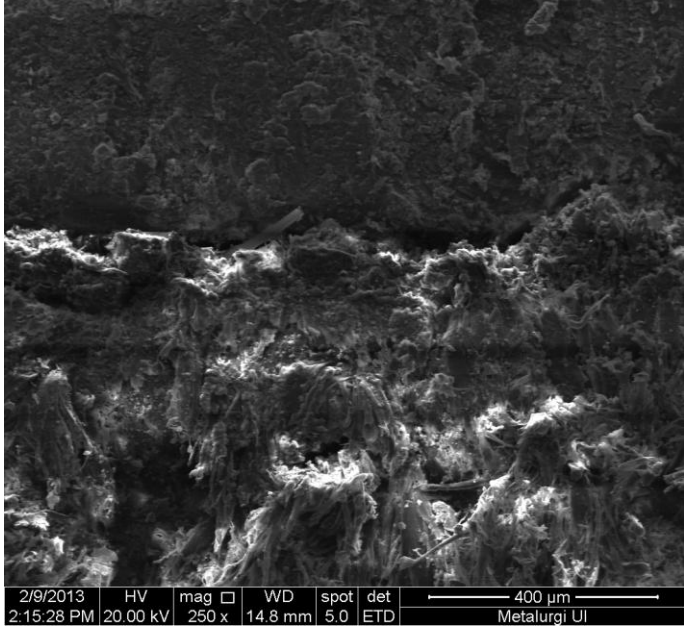


FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA

Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

Page 2 of 4

Kode Sampel Sample Code	Perbesaran Magnification	Lokasi Foto Photo Location	Pembersihan Cleaning	Keterangan Remark
2 Lapis	See "Mag" label	See Photo Sample	No	-
				
				

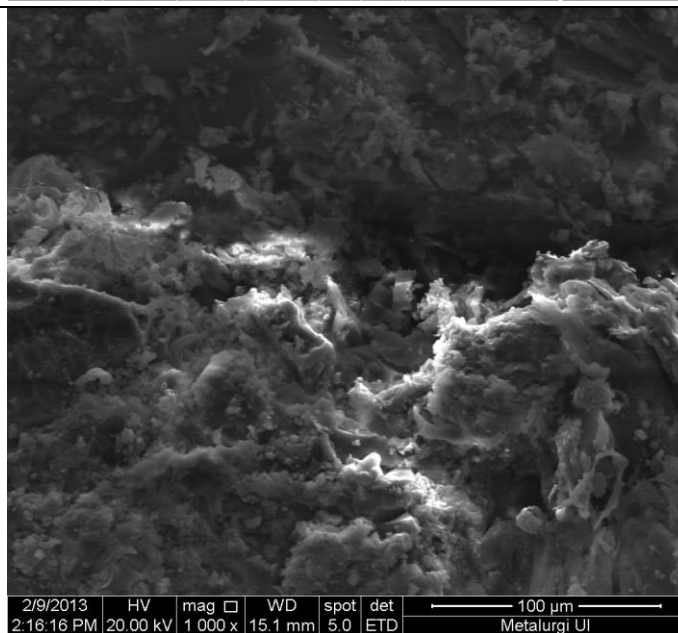
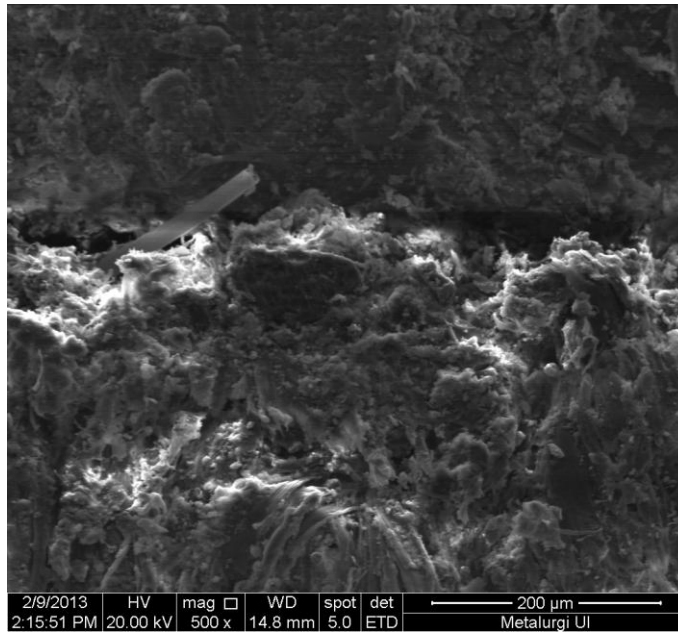


FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA

Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

Page 3 of 4





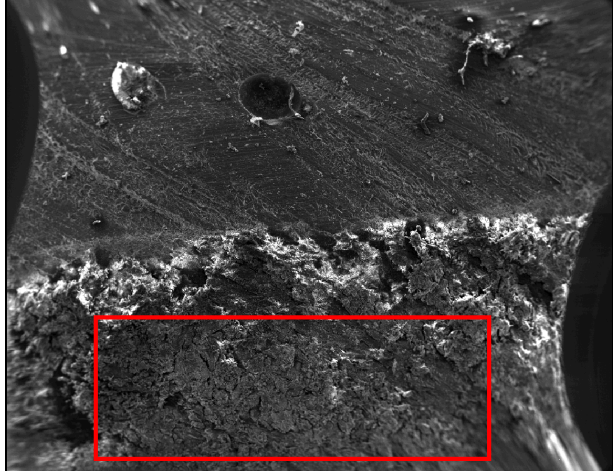
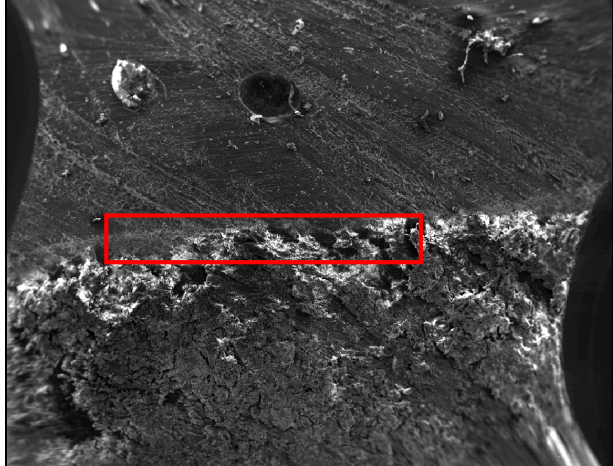

FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA

Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

HASIL PENGUJIAN EDS
EDS TEST RESULTS

Page 4 of 4

	<table border="1"><thead><tr><th><i>Element</i></th><th><i>Wt%</i></th><th><i>At%</i></th></tr></thead><tbody><tr><td><i>CK</i></td><td>59.90</td><td>67.29</td></tr><tr><td><i>OK</i></td><td>35.77</td><td>30.17</td></tr><tr><td><i>NaK</i></td><td>04.33</td><td>02.54</td></tr><tr><td><i>Matrix</i></td><td>Correction</td><td>ZAF</td></tr></tbody></table>	<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>	<i>CK</i>	59.90	67.29	<i>OK</i>	35.77	30.17	<i>NaK</i>	04.33	02.54	<i>Matrix</i>	Correction	ZAF
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>														
<i>CK</i>	59.90	67.29														
<i>OK</i>	35.77	30.17														
<i>NaK</i>	04.33	02.54														
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF														
	<table border="1"><thead><tr><th><i>Element</i></th><th><i>Wt%</i></th><th><i>At%</i></th></tr></thead><tbody><tr><td><i>CK</i></td><td>59.69</td><td>67.06</td></tr><tr><td><i>OK</i></td><td>36.17</td><td>30.51</td></tr><tr><td><i>NaK</i></td><td>04.14</td><td>02.43</td></tr><tr><td><i>Matrix</i></td><td>Correction</td><td>ZAF</td></tr></tbody></table>	<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>	<i>CK</i>	59.69	67.06	<i>OK</i>	36.17	30.51	<i>NaK</i>	04.14	02.43	<i>Matrix</i>	Correction	ZAF
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>														
<i>CK</i>	59.69	67.06														
<i>OK</i>	36.17	30.51														
<i>NaK</i>	04.14	02.43														
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF														
	<table border="1"><thead><tr><th><i>Element</i></th><th><i>Wt%</i></th><th><i>At%</i></th></tr></thead><tbody><tr><td><i>CK</i></td><td>73.13</td><td>78.44</td></tr><tr><td><i>OK</i></td><td>26.58</td><td>21.40</td></tr><tr><td><i>NaK</i></td><td>00.29</td><td>00.16</td></tr><tr><td><i>Matrix</i></td><td>Correction</td><td>ZAF</td></tr></tbody></table>	<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>	<i>CK</i>	73.13	78.44	<i>OK</i>	26.58	21.40	<i>NaK</i>	00.29	00.16	<i>Matrix</i>	Correction	ZAF
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>														
<i>CK</i>	73.13	78.44														
<i>OK</i>	26.58	21.40														
<i>NaK</i>	00.29	00.16														
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF														



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA

Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN FESEM DAN UJI KOMPOSISI KIMIA (EDS)
FESEM AND CHEMICAL COMPOSITION (EDS) TEST REPORT

Page 1 of 4

No Laporan <i>Report Nr</i>	0129	Bahan <i>Material</i>	Komposit
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Sudarsono	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Code: 6 Bulan
Alamat <i>Address</i>	IST Akprind Jogja	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	13 Februari 2013
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0129/PT.02/FT04/P/2012	Standar <i>Standard</i>	-
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	18 Februari 2013	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	FE-SEM FEI INSPECT F50 EDAX EDS Analyzer

Foto Sampel
Sample Photograph



Depok, 19 Februari 2013

Manajer Teknis
Laboratorium Uji

Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

(Ahmad Ashari, ST)

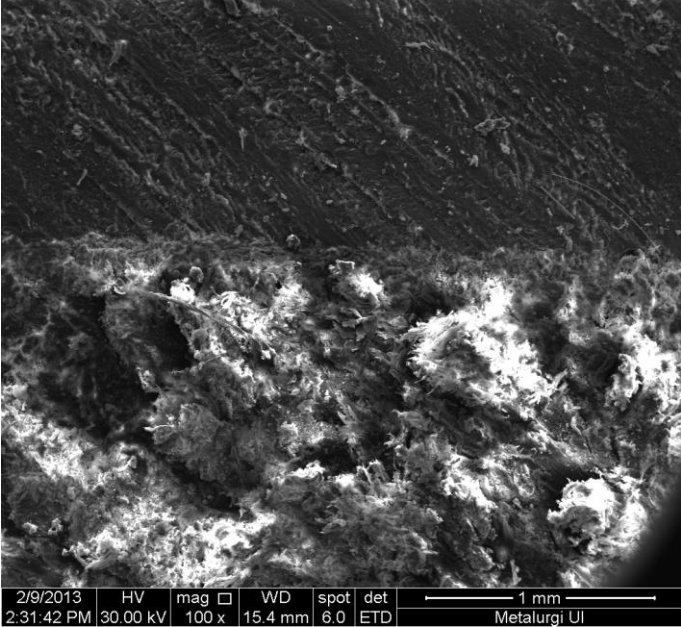
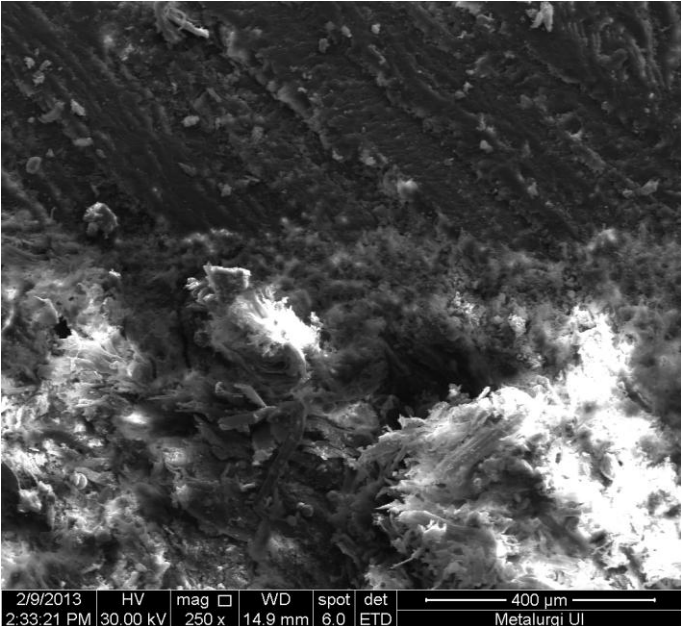


FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA

Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

Page 2 of 4

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Perbesaran <i>Magnification</i>	Lokasi Foto <i>Photo Location</i>	Pembersihan <i>Cleaning</i>	Keterangan <i>Remark</i>
6 Bulan	See "Mag" label	See Photo Sample	No	-
				
				

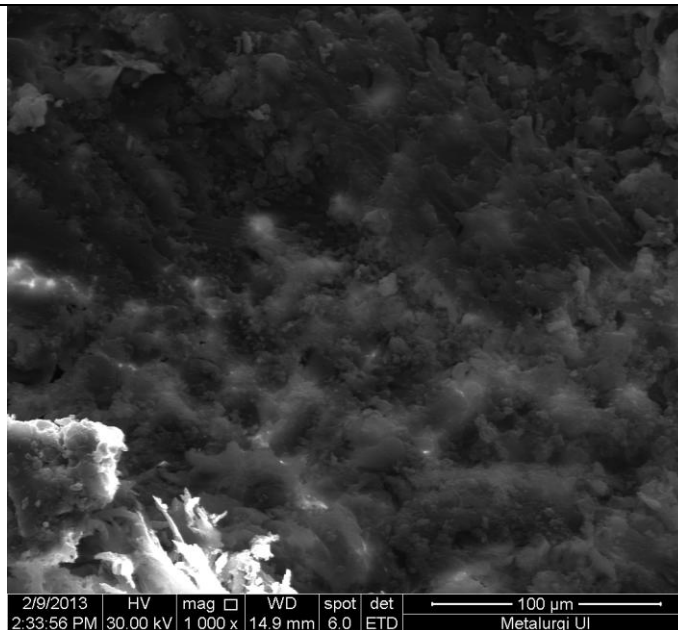
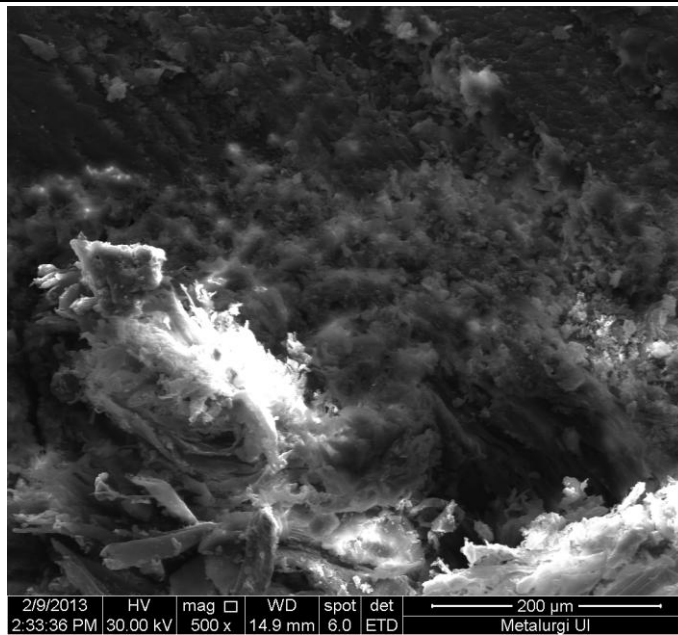


FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA

Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

Page 3 of 4





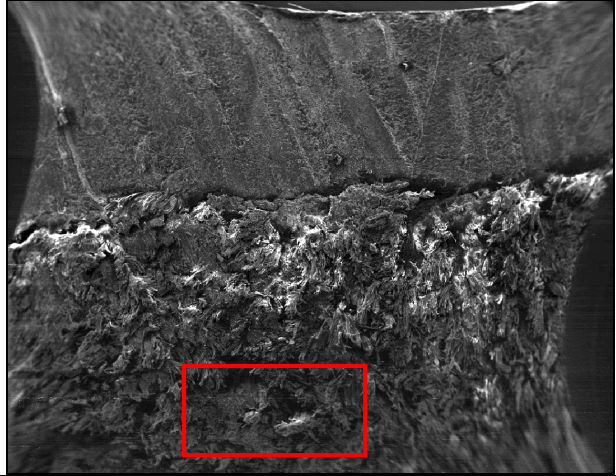


FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA

Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

HASIL PENGUJIAN EDS
EDS TEST RESULTS

Page 4 of 4

	<table border="1"><thead><tr><th><i>Element</i></th><th><i>Wt%</i></th><th><i>At%</i></th></tr></thead><tbody><tr><td><i>CK</i></td><td>54.95</td><td>62.05</td></tr><tr><td><i>OK</i></td><td>44.13</td><td>37.41</td></tr><tr><td><i>NaK</i></td><td>00.91</td><td>00.54</td></tr><tr><td><i>Matrix</i></td><td>Correction</td><td>ZAF</td></tr></tbody></table>	<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>	<i>CK</i>	54.95	62.05	<i>OK</i>	44.13	37.41	<i>NaK</i>	00.91	00.54	<i>Matrix</i>	Correction	ZAF
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>														
<i>CK</i>	54.95	62.05														
<i>OK</i>	44.13	37.41														
<i>NaK</i>	00.91	00.54														
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF														
	<table border="1"><thead><tr><th><i>Element</i></th><th><i>Wt%</i></th><th><i>At%</i></th></tr></thead><tbody><tr><td><i>CK</i></td><td>69.45</td><td>75.27</td></tr><tr><td><i>OK</i></td><td>30.02</td><td>24.42</td></tr><tr><td><i>NaK</i></td><td>00.54</td><td>00.30</td></tr><tr><td><i>Matrix</i></td><td>Correction</td><td>ZAF</td></tr></tbody></table>	<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>	<i>CK</i>	69.45	75.27	<i>OK</i>	30.02	24.42	<i>NaK</i>	00.54	00.30	<i>Matrix</i>	Correction	ZAF
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>														
<i>CK</i>	69.45	75.27														
<i>OK</i>	30.02	24.42														
<i>NaK</i>	00.54	00.30														
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF														
	<table border="1"><thead><tr><th><i>Element</i></th><th><i>Wt%</i></th><th><i>At%</i></th></tr></thead><tbody><tr><td><i>CK</i></td><td>55.68</td><td>69.33</td></tr><tr><td><i>OK</i></td><td>44.02</td><td>29.92</td></tr><tr><td><i>NaK</i></td><td>01.30</td><td>00.75</td></tr><tr><td><i>Matrix</i></td><td>Correction</td><td>ZAF</td></tr></tbody></table>	<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>	<i>CK</i>	55.68	69.33	<i>OK</i>	44.02	29.92	<i>NaK</i>	01.30	00.75	<i>Matrix</i>	Correction	ZAF
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>														
<i>CK</i>	55.68	69.33														
<i>OK</i>	44.02	29.92														
<i>NaK</i>	01.30	00.75														
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF														

LAMPIRAN 9
PERLAKUAN AWAL KAYU SEBELUM UJI TEKUK

No.	Kode Kayu	Berat awal sebelum perendaman (gram)	Berat setelah perendaman (gram)	Berat kayu setelah di oven (gram)		
				1 jam	2 jam	2,5 jam
1	A	30	47,97	37,11	31,42	28,82
2	B	32	55,23	45,33	37,24	34,64
3	C	35	51,19	42,33	36,52	33,92
4	D	27	40,76	32,77	27,82	25,22
5	E	36	56,35	47,68	40,66	37,74
6	F	33	49,34	41,12	34,83	31,53
7	G	52	74,08	65,85	56,73	52,18
8	H	31	45,35	36,9	31,99	29,08
9	I	37	58,6	49,69	43,12	40,62
10	J	31	47,97	37,76	32,48	29,72
11	K	48	64,34	53,77	47,15	44,26
12	L	35	51,07	38,75	35,54	32,14
13	M	40	60,56	52	44,54	41,27
14	N	32	45,97	39,64	33,99	29,89
15	O	32	44,52	37,85	33,04	30,06
16	P	39	56,31	49,34	42,73	39,53
17	Q	33	46,86	40,06	34,5	30,74
18	R	23	33,94	27,43	23,1	20,5
19	S	36	57,57	50,4	40,57	36,54
20	T	28	42,58	35,07	29,25	25,24
21	U	21	32,82	23,97	20,13	17,43

Gambar Penimbangan KSL



Gambar Pemanasan dalam oven



LAMPIRAN 10

PROSES FABRIKASI SPESIMEN KOMPOSIT

1. Persiapan bahan KSL, Resin, dan Serat rami



2. Pengeringan KSL dalam oven (skala pabrik) selama 3 x 24 jam



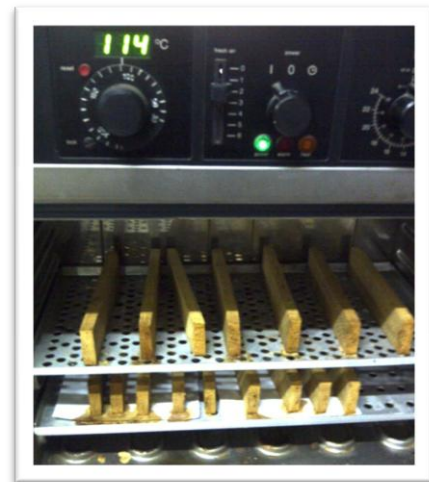
3. Pemotongan KSL sesuai ukuran



4. Perendaman KSL dalam larutan NaOH selama 2-3 jam



5. Pengeringan KSL dalam oven (skala lab) selama 1-3 jam



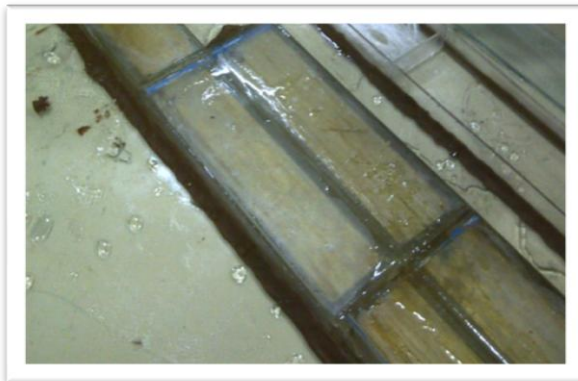
6. Membuat cetakan



7. Proses Hand lay-up 1 lapis dan 2 lapis



8. Proses pengeringan selama 24 jam



9. Pengujian bahan (uji tekuk)



10. Hasil uji tekuk



PROSES FABRIKASI PROPELER (SUDU)

1. Persiapan bahan KSL, Serat rami, dan Resin



2. Pengeringan KSL dalam oven (skala pabrik) selama 3 x 24 jam



3. Pembuatan sudu turbin sesuai standar NACA 4415 modif



4. Proses Hand lay-up 2 lapis dan pengeringan



5. Proses balancing sudu turbin



6. Proses finishing sudu turbin



PROSES UJI DI LAPANGAN

1. Pemasangan sudu ke dalam hub



2. Pemasangan sudu di tower



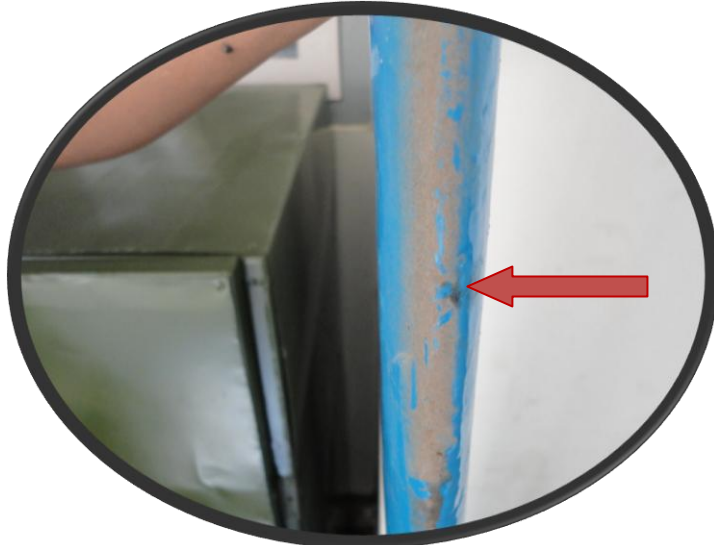
3. Pemasangan sudu pada generator



4. Alat ukur kecepatan angin, kelembaban, dan suhu



5. Pengambilan sampel polutan



Kadar NaCL = 0,358%

LAMPIRAN 11

Data Kecetapan Angin Plant Sistem Energi Listrik Pantai Pandansimo Bantul, DIY

Bulan	Rerata kecepatan angin (m/s)		
	2010	2011	2012
Januari	3.0	-	-
Pebruari	3.8	-	-
Maret	3.2	2.9	-
April	3.6	2.6	3.2
Mei	3.5	2.5	2.9
Juni	4.5	3.3	3.4
Juli	4.8	3.8	3.9
Agustus	5.1	3.2	4.2
September	4.5	3.3	3.8
Oktober	3.8	3.2	3.5
Nopember	3.0	3.3	3.2
Desember	3.1	3.0	3.1
Rerata	3.82	3.11	3.46

Sumber data:

- Tahun 2010 dan 2011 : LAPAN
- Tahun 2012 : hasil pengukuran di lokasi penelitian

Data Daya Energi Listrik Plant Pantai Pandansimo Bantul, DIY

Bulan	Kecepatan Angin	Daya Hasil Perhitungan (Watt)	Daya Hasil Pengukuran (Watt)
Juli	3,9	108,96	98,40
Agustus	4,2	136,09	123,60
September	3,8	100,79	91,20
Oktober	3,5	78,76	70,80
Nopember	3,2	60,19	54,00
Desember	3,1	54,72	49,20
Rerata	3,62	89,92	81,20

$$\text{Daya (P)} = C_p \times 0,5 \rho A V^3 \text{ Watt}$$

dimana :

- C_p : koefisien daya (=0,4)
- ρ : kerapatan udara (kg/m^3)
- A : luas area propeler (m^2)
- V : kecepatan angin (m/s)

Site Information:

Project: Hybrid System
 Location: Pandansimo_Bantul
 Elevation: 10

Sensor on channel 3:

NRG #40 Anem. m/s
 Height: 15 m Units: m/s
 Serial #: SN:XXXX

May 2011

Hourly Averages Table Ch 3

SITE 0100
 Pandansimo

Day	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	AVG
1	2.1	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1.0	1.9	2.2	2.2	2.3	2.2	2.7	2.5	3.6	2.2	0.8	0.8	0.5	0.4	0.5	1.3
2	0.6	1.5	1.0	0.8	1.4	1.1	0.6	0.9	1.5	1.2	2.2	3.0	2.0	1.1	1.5	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.8	1.0
3	0.6	0.5	0.7	0.5	0.6	0.8	1.5	1.9	0.7	2.2	2.8	3.6	3.1	3.4	3.2	3.3	2.8	3.2	2.1	1.6	0.7	0.4	0.5	0.5	1.7
4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	0.5	0.8	1.3	0.8	2.1	3.2	3.3	2.8	5.6	3.4	3.0	2.7	1.8	1.8	2.4	2.0	1.4	0.7	1.9	1.7
5	3.0	1.7	1.2	1.4	3.2	6.0	7.4	8.1	6.1	2.3	1.8	2.7	2.5	1.6	1.2	1.1	0.9	0.6	0.5	0.4	0.4	0.7	0.7	1.0	2.4
6	1.4	1.4	2.5	2.9	3.0	3.0	2.7	1.8	1.1	2.3	4.8	5.6	5.7	6.4	6.5	6.1	7.0	6.8	4.8	1.8	1.2	2.1	1.4	2.1	3.5
7	0.9	0.9	0.8	1.2	2.4	1.7	1.5	2.5	2.6	2.1	0.9	1.7	3.5	3.5	3.0	3.0	2.5	0.9	1.5	1.8	0.9	2.5	0.8	0.6	1.8
8	0.4	0.4	0.4	0.4	1.3	0.6	0.7	0.6	1.2	2.1	4.8	3.8	4.3	2.8	2.0	1.9	0.9	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.9	1.3
9	0.4	0.4	0.6	1.0	0.7	1.0	0.9	0.6	0.6	2.1	1.7	2.2	2.7	2.5	2.7	2.9	3.3	3.1	2.3	2.1	1.7	0.6	0.5	0.9	1.6
10	0.8	1.1	1.4	1.2	1.4	1.7	1.6	1.8	1.7	1.2	1.8	2.4	2.5	2.7	2.3	1.7	1.5	1.8	1.3	1.2	0.6	0.6	0.7	0.8	1.5
11	0.9	0.9	1.3	1.6	1.4	1.2	0.8	1.0	0.7	2.0	2.4	2.4	2.4	2.7	2.7	2.2	2.9	3.5	3.5	3.3	2.8	1.2	0.5	0.4	1.9
12	0.4	0.4	0.4	0.5	0.8	0.8	0.6	0.5	0.7	1.1	2.5	2.7	3.0	5.2	3.8	3.2	3.0	2.5	2.7	1.1	0.4	0.4	0.6	0.9	1.5
13	0.8	1.7	3.1	0.9	1.5	1.7	0.7	0.9	0.5	1.3	2.2	2.3	2.6	2.9	3.5	3.6	2.5	2.0	2.2	2.1	2.0	2.1	2.0	1.7	1.9
14	2.5	1.6	1.0	0.5	0.8	2.2	1.4	1.5	2.1	0.9	2.5	3.2	3.8	3.5	3.5	2.2	1.2	0.6	2.1	0.9	0.6	0.5	0.8	1.5	1.6
15	2.0	2.0	2.4	1.4	2.0	1.4	1.0	1.2	1.0	1.2	1.1	1.8	2.5	3.4	4.0	3.9	2.8	2.9	3.5	4.3	3.2	1.6	0.6	1.4	2.2
16	0.8	0.7	1.1	1.1	1.1	0.9	1.5	1.6	0.5	0.9	1.5	2.2	3.4	5.7	3.7	3.4	3.4	3.1	3.0	1.6	0.8	0.5	0.4	0.5	1.7
17	1.0	0.4	0.6	1.5	1.4	1.5	1.3	1.8	1.1	1.7	3.7	5.0	4.5	4.6	4.7	4.9	5.3	4.4	5.0	5.1	6.3	5.8	4.6	2.6	3.3
18	0.7	2.1	0.7	0.9	1.2	1.4	1.6	1.0	2.7	3.6	3.2	3.7	4.5	4.9	5.3	5.0	4.3	4.4	3.7	4.1	2.5	1.5	1.6	1.4	2.7
19	1.1	0.8	1.7	1.1	1.3	0.8	0.6	1.9	3.5	4.5	5.4	6.2	6.7	6.6	6.2	6.5	6.2	5.1	5.6	5.3	4.3	2.3	0.8	1.1	3.6
20	2.2	2.0	2.2	1.0	1.1	1.6	1.0	1.2	2.0	4.2	5.9	6.3	6.5	6.5	7.2	7.2	6.9	6.0	5.7	5.3	4.6	3.3	2.4	1.7	3.9
21	1.3	2.0	3.5	1.9	2.6	3.1	2.9	3.1	1.7	3.8	5.4	6.2	6.4	6.4	6.8	6.5	6.7	6.4	6.8	5.9	3.1	1.8	2.6	2.5	4.1
22	2.2	2.0	1.5	4.8	6.1	4.4	2.6	4.5	6.3	6.4	6.6	6.6	6.6	6.6	6.9	6.3	6.2	3.2	1.8	2.4	1.8	1.3	1.6	2.0	4.2
23	2.3	1.9	1.3	1.5	1.9	2.3	1.8	1.3	3.1	4.1	5.5	5.7	5.7	6.2	6.4	6.7	6.4	6.2	5.6	3.9	1.6	1.3	1.1	1.1	3.5
24	1.1	1.3	1.0	1.3	1.3	1.3	1.0	0.5	1.8	3.8	5.2	5.1	5.6	6.0	5.5	5.2	5.3	5.5	4.8	2.9	2.6	2.5	2.0	1.4	3.1
25	1.5	1.4	0.9	1.1	1.5	1.3	1.9	1.9	1.6	1.8	3.1	4.7	5.2	5.3	5.7	5.4	5.5	5.2	3.1	2.1	1.8	1.9	1.1	0.7	2.7
26	0.6	0.9	0.8	0.7	0.7	1.2	1.7	1.1	1.1	2.0	2.1	4.7	5.3	5.6	5.7	5.0	4.9	4.6	4.7	3.9	1.6	1.1	0.9	1.1	2.6
27	1.1	0.6	1.0	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	2.0	2.6	3.2	5.9	6.0	5.0	4.8	5.2	5.3	4.5	2.4	2.0	1.2	1.5	1.1	2.6
28	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.3	1.3	0.8	1.5	3.3	4.9	5.7	5.4	6.2	5.7	5.6	4.6	4.6	3.4	1.4	1.4	1.0	1.2	0.8	2.8
29	1.4	1.1	0.6	1.8	1.9	2.0	1.7	1.7	1.4	1.7	4.0	5.2	5.7	5.7	6.0	5.7	5.6	5.7	5.2	4.5	3.3	2.6	1.7	0.7	3.2
30	1.0	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	1.0	2.2	4.3	5.2	5.0	5.2	5.5	5.6	4.9	4.0	4.1	3.3	3.0	3.5	2.7	2.8	2.8
31	2.0	0.8	1.2	0.9	0.8	0.8	0.5	0.5	1.2	2.8	4.4	5.6	5.8	7.0	5.6	5.3	5.2	5.3	4.5	3.3	0.6	0.8	3.4	1.8	2.9
AVG	1.3	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	2.4	3.3	4.0	4.3	4.5	4.4	4.2	4.0	3.7	3.3	2.7	1.9	1.5	1.3	1.3	2.5

Site Information:

Project: Hybrid System
 Location: Pandansimo_Bantul
 Elevation: 10

Sensor on channel 3:

NRG #40 Anem. m/s
 Height: 15 m Units: m/s
 Serial #: SN:XXXX

June 2011

Hourly Averages Table Ch 3

SITE 0100
 Pandansimo

Day	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	AVG
1	0.6	0.8	1.0	1.1	0.4	0.5	0.7	1.8	1.2	2.0	2.8	3.8	5.3	6.0	6.4	6.7	6.8	6.2	6.1	5.9	5.2	5.2	3.9	4.0	3.5
2	4.3	3.5	3.9	4.1	3.2	2.8	3.9	2.1	1.9	2.7	4.2	4.8	5.0	5.7	5.8	6.9	7.3	5.8	5.4	5.3	4.7	4.4	4.2	3.5	4.4
3	3.6	3.6	2.7	1.9	2.5	2.7	2.8	2.9	3.5	3.6	4.4	5.0	5.5	5.5	6.3	6.0	5.8	5.5	5.5	5.0	5.1	4.3	3.5	0.8	4.1
4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	1.6	1.6	2.2	2.1	2.2	2.3	3.7	4.5	4.8	4.9	5.3	5.4	5.3	5.2	4.6	2.8	3.2	1.5	0.4	2.7
5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6	0.5	0.9	2.3	2.8	3.1	2.9	2.5	3.8	3.9	4.0	4.0	3.6	2.1	0.4	0.5	0.4	1.7
6	0.8	0.4	0.6	1.2	0.7	0.9	0.5	0.7	1.1	2.2	2.9	3.7	4.5	4.8	5.1	4.9	4.6	3.9	3.4	2.3	0.9	0.5	1.0	1.6	2.2
7	1.4	1.1	0.7	1.0	0.6	1.0	1.1	1.1	1.6	1.3	2.5	3.1	2.8	2.6	2.8	3.5	4.3	4.3	3.7	2.7	2.2	0.4	0.7	1.4	2.0
8	0.8	0.9	0.6	1.0	1.4	1.0	0.9	0.8	1.4	3.1	3.7	4.3	4.9	4.7	4.6	4.6	4.6	3.9	3.4	2.5	1.9	1.5	1.1	1.6	2.5
9	1.3	1.2	1.2	1.7	1.6	1.4	0.6	1.0	3.0	3.6	4.2	4.9	5.0	4.4	4.5	4.3	3.9	2.9	2.6	1.5	2.9	3.3	1.3	0.9	2.6
10	0.9	0.9	1.3	1.4	1.5	0.9	0.9	1.3	2.1	4.1	4.4	5.5	5.9	5.9	7.6	7.5	7.2	6.6	5.2	4.7	4.6	2.0	1.5	2.1	3.6
11	2.1	2.0	0.9	1.3	1.8	1.6	1.5	1.3	1.5	3.4	5.5	7.2	7.5	7.8	7.7	7.5	7.1	6.8	5.0	2.9	2.7	2.4	2.2	2.3	3.8
12	2.0	1.6	1.6	1.9	1.8	1.9	1.8	1.4	3.3	4.8	5.0	5.2	5.6	5.7	5.8	5.5	5.6	5.6	4.9	3.0	2.5	1.9	2.3	1.9	3.4
13	1.6	1.7	2.1	2.0	1.6	1.9	1.7	1.6	1.7	4.8	5.4	6.2	5.8	6.1	5.9	5.3	4.2	4.2	4.2	3.2	2.5	2.2	2.3	3.0	3.4
14	2.4	2.2	1.8	1.3	1.7	1.7	1.8	1.4	1.5	5.4	6.4	5.8	6.2	6.3	6.9	6.5	5.7	5.3	3.8	2.3	1.8	1.4	1.6	1.3	3.4
15	1.5	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.6	1.8	2.6	4.3	4.2	4.0	5.1	5.4	5.6	5.3	5.3	5.8	5.7	5.1	4.0	2.6	3.0	2.7	3.5
16	2.1	1.5	1.4	1.2	1.5	1.6	2.0	1.8	2.0	3.9	4.7	5.3	4.9	5.4	4.8	4.5	4.2	4.5	4.4	3.4	1.6	1.4	1.6	1.5	2.9
17	1.8	1.8	2.2	2.2	2.1	1.9	1.5	1.2	1.4	2.3	5.0	5.6	5.9	5.9	5.2	5.1	5.1	5.1	4.9	4.7	2.4	1.0	1.2	1.1	3.2
18	1.0	1.1	1.3	1.5	1.6	1.1	1.1	1.2	4.8	5.5	5.9	6.2	5.2	4.9	5.8	5.7	5.9	5.3	5.0	4.1	3.6	4.3	2.4	1.2	3.6
19	1.3	1.3	1.9	1.8	2.1	1.1	1.0	1.0	3.1	4.0	4.2	4.7	5.8	5.9	6.2	6.0	6.4	5.7	4.6	3.0	2.8	2.3	1.3	1.4	3.3
20	1.3	1.5	1.4	1.5	1.5	1.6	1.4	1.7	3.0	5.3	5.7	6.9	6.4	6.0	7.1	6.9	6.3	6.5	5.6	4.0	3.0	2.8	3.0	2.6	3.9
21	1.8	2.0	1.1	1.4	1.6	1.5	1.4	1.0	1.5	2.4	3.8	5.7	6.2	6.8	6.6	6.7	6.6	6.5	6.2	5.3	5.1	4.3	2.9	2.8	3.8
22	2.3	1.1	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.6	1.1	4.2	6.4	6.6	6.6	6.5	6.8	6.8	6.1	5.4	4.8	3.3	2.3	2.1	1.8	1.3	3.3
23	1.1	1.5	1.4	1.1	1.0	1.2	0.9	0.6	2.9	5.3	6.2	6.3	6.1	6.0	6.6	6.6	6.4	5.8	4.6	4.0	3.0	2.1	1.9	0.8	3.5
24	0.6	1.1	0.8	0.8	0.9	1.7	1.7	1.0	1.6	4.6	5.1	5.9	6.4	6.4	6.7	6.5	5.9	5.5	4.6	4.6	3.6	3.0	2.2	2.3	3.5
25	2.0	0.7	0.9	1.2	1.4	1.4	0.9	0.6	1.1	2.7	5.5	6.4	6.2	6.2	6.6	6.6	6.2	5.9	6.1	5.8	3.4	1.8	1.3	0.8	3.4
26	0.5	1.4	1.3	1.4	1.7	1.2	0.9	0.7	1.3	5.4	6.2	7.4	7.3	7.3	7.3	8.0	7.5	6.7	5.9	5.1	4.9	5.0	5.1	4.8	4.4
27	5.0	4.8	4.4	4.8	4.7	4.5	3.9	4.2	4.5	5.4	5.4	5.4	6.1	5.5	5.7	5.9	6.0	5.7	5.4	4.8	3.9	4.2	3.9	3.6	4.9
28	3.3	3.1	3.0	3.0	2.3	2.5	1.4	0.4	1.5	2.5	4.3	5.7	6.1	5.9	5.9	6.3	6.1	3.7	2.5	2.3	2.6	1.9	1.5	0.5	3.3
29	0.4	0.4	0.5	0.5	0.8	0.7	0.8	0.4	0.9	2.1	3.5	4.7	5.1	5.4	5.9	6.5	5.6	4.2	3.9	4.3	3.2	2.4	1.7	1.0	2.7
30	1.3	1.0	1.5	0.7	0.8	0.4	0.9	1.4	2.2	4.0	5.3	6.7	7.0	6.6	6.8	7.3	6.5	6.2	5.2	3.7	3.4	3.2	2.8	2.4	3.6
AVG	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	2.1	3.6	4.6	5.3	5.6	5.6	5.9	6.0	5.7	5.3	4.7	3.9	3.2	2.6	2.2	1.9	3.3

Site Information:

Project: Hybrid System
 Location: Pandansimo_Bantul
 Elevation: 10

Sensor on channel 3:

NRG #40 Anem. m/s
 Height: 15 m Units: m/s
 Serial #: SN:XXXX

July 2011

Hourly Averages Table Ch 3

SITE 0100
 Pandansimo

Day	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	AVG	
1	1.4	2.2	1.9	3.5	3.2	2.3	3.4	4.0	3.8	4.2	5.0	5.4	5.8	6.2	6.6	6.2	6.3	6.0	5.6	5.1	4.5	3.2	1.7	2.4	4.2	
2	3.3	3.3	4.0	4.2	3.9	3.5	3.1	3.6	4.2	5.1	6.2	6.6	7.0	6.9	6.6	6.2	5.0	4.4	4.3	2.7	2.1	2.5	2.6	1.3	4.3	
3	0.4	0.8	1.1	1.0	0.4	0.5	0.8	0.7	1.0	2.4	3.0	3.2	3.6	3.6	4.2	5.2	5.5	4.8	4.0	3.3	3.0	2.1	0.8	2.5	2.5	
4	0.5	0.6	1.0	0.9	1.4	1.9	0.9	1.6	1.1	0.8	2.8	3.9	4.3	5.3	4.5	5.4	5.3	5.2	4.4	4.4	3.8	2.4	0.7	0.6	2.7	
5	0.4	0.6	0.8	0.5	0.6	0.8	1.2	0.9	0.8	1.3	2.8	5.0	6.0	6.2	5.8	6.0	6.0	4.3	3.8	3.8	3.8	2.9	2.6	3.0	2.9	
6	1.7	0.6	0.9	0.8	0.9	1.1	1.6	1.3	0.7	2.1	3.3	4.0	5.5	6.4	6.9	6.9	6.8	5.5	4.8	4.3	4.3	3.0	1.3	1.3	3.2	
7	1.1	0.7	1.8	0.8	1.5	1.5	1.0	0.7	1.0	1.8	3.8	5.8	5.6	6.5	6.1	6.2	5.9	5.9	5.6	4.8	3.9	2.1	1.1	2.3	3.2	
8	1.0	1.4	1.4	1.5	1.0	1.5	1.1	0.6	0.8	2.0	2.9	3.6	5.2	5.7	5.9	5.7	5.8	5.6	5.6	4.9	4.2	4.7	2.7	1.3	3.2	
9	0.9	0.6	0.9	1.2	0.9	0.8	0.6	0.5	0.9	2.0	2.5	3.3	4.8	5.2	6.0	5.5	4.9	4.5	4.1	4.0	3.6	3.5	2.0	1.4	2.7	
10	0.6	0.5	0.6	1.0	1.1	1.6	0.9	0.5	0.9	2.8	3.5	2.9	3.2	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3	2.4	1.7	1.7	0.9	0.5	0.8	1.9	
11	0.8	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.7	0.5	0.9	1.5	2.4	2.8	3.0	3.3	3.3	3.3	3.7	3.6	3.5	2.7	3.0	1.0	0.5	1.2	1.8	
12	1.2	0.8	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.8	2.5	3.3	4.6	4.6	5.3	5.9	6.4	6.6	6.0	5.8	5.0	4.3	4.4	4.5	4.3	3.8	3.4	
13	2.7	3.6	3.8	4.7	4.6	4.6	3.8	3.9	4.4	5.0	5.5	6.6	7.5	7.1	7.2	6.8	7.2	6.8	7.2	6.8	5.4	4.1	2.8	2.2	3.1	5.0
14	2.7	1.8	2.3	2.3	2.1	1.7	2.6	3.0	3.2	4.8	5.7	5.8	6.5	6.6	6.7	6.4	5.9	6.0	5.4	5.1	5.4	5.7	4.6	4.2	4.4	
15	4.7	4.4	4.5	4.7	4.6	4.0	2.8	2.6	3.6	4.7	5.6	5.4	6.7	6.4	7.0	6.8	5.9	5.1	5.2	5.2	4.9	5.0	5.2	4.2	5.0	
16	3.4	2.9	1.7	2.1	0.8	1.4	1.2	2.1	3.9	4.4	5.2	5.3	4.7	5.7	5.7	7.6	6.9	5.9	5.1	4.8	4.3	4.6	3.9	4.1	4.1	
17	4.0	4.5	3.8	2.5	4.0	3.4	4.1	4.4	4.6	4.4	5.6	6.0	6.5	7.1	6.9	6.3	6.0	5.9	5.3	4.7	4.4	4.3	2.8	2.5	4.8	
18	0.8	0.5	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	1.2	5.0	5.6	5.7	6.6	6.4	6.8	6.7	6.6	6.2	6.2	5.3	5.1	5.2	5.7	5.3	5.2	4.2	
19	5.1	3.7	1.6	1.3	0.9	0.9	1.1	2.5	4.5	4.7	5.4	6.4	7.3	7.4	7.6	7.3	7.2	7.0	6.9	6.6	5.9	5.4	3.9	3.9	4.8	
20	2.8	1.5	1.1	2.2	1.4	1.3	0.6	1.5	3.7	4.5	4.7	5.1	5.8	6.1	6.5	6.8	6.4	6.5	6.3	6.2	5.5	4.8	3.8	2.0	4.1	
21	2.0	1.6	3.1	4.0	4.2	4.0	2.0	2.1	3.8	4.4	5.1	5.3	6.2	6.3	6.6	6.5	6.6	6.3	6.1	5.7	5.3	4.1	4.3	3.7	4.6	
22	2.0	0.7	1.1	1.3	0.5	0.9	3.1	4.2	5.3	6.1	7.0	7.4	7.5	6.8	7.2	7.5	7.3	6.4	6.4	5.6	4.5	5.4	3.2	1.6	4.4	
23	1.2	2.9	1.2	1.9	1.3	0.8	0.4	2.7	4.9	6.2	6.4	6.6	6.7	6.9	7.0	6.4	6.1	6.0	5.6	4.5	3.8	2.5	2.4	1.6	4.0	
24	0.9	2.0	1.7	1.5	2.0	1.3	0.7	0.9	3.2	5.7	5.8	6.6	6.7	6.2	6.8	6.0	5.5	4.6	4.0	4.0	2.7	1.5	1.0	0.7	3.4	
25	0.9	1.1	1.2	1.5	1.2	1.1	0.7	0.6	1.6	2.6	4.4	4.4	4.6	5.6	5.6	5.2	5.7	4.8	3.6	3.9	3.2	1.4	1.1	1.6	2.8	
26	1.8	1.7	1.8	1.4	1.3	1.2	1.4	1.0	4.0	5.8	6.6	7.1	7.1	6.9	6.8	6.3	6.1	5.6	5.6	5.3	5.4	5.3	3.8	1.0	4.2	
27	1.0	1.3	1.2	1.0	1.6	1.4	1.6	1.9	1.8	2.9	4.4	5.9	6.6	7.0	7.0	6.9	6.8	6.6	6.1	6.3	6.0	6.2	4.9	3.3	4.2	
28	2.1	1.5	0.9	0.9	1.2	1.1	2.4	5.2	5.5	6.1	6.4	6.7	7.2	7.6	7.9	7.4	7.4	6.7	5.9	5.8	6.0	5.7	4.6	3.5	4.8	
29	4.4	3.8	4.4	4.0	4.2	3.1	2.7	3.7	5.6	5.8	5.6	6.3	5.8	5.0	4.9	5.7	6.1	6.1	6.1	5.9	3.5	2.8	2.6	2.6	4.6	
30	2.0	1.5	1.5	1.7	1.7	1.6	1.5	2.3	5.3	5.2	6.4	6.7	7.6	7.7	7.5	7.3	6.6	6.4	6.6	6.5	5.8	4.1	3.5	3.1	4.6	
31	1.8	1.6	1.6	1.3	1.5	1.7	1.6	1.1	2.7	5.5	6.6	6.9	7.3	7.5	7.4	7.1	7.1	6.5	6.5	5.9	5.5	4.1	3.2	3.4	4.4	
AVG	1.9	1.8	1.8	1.9	1.8	1.7	1.6	2.0	3.0	4.0	4.8	5.4	5.9	6.2	6.3	6.2	6.0	5.7	5.2	4.8	4.3	3.7	2.9	2.4	3.8	

Site Information:

Project: Hybrid System
 Location: Pandansimo_Bantul
 Elevation: 10

Sensor on channel 3:

NRG #40 Anem. m/s
 Height: 15 m Units: m/s
 Serial #: SN:XXXX

August 2011

Hourly Averages Table Ch 3

SITE 0100
 Pandansimo

Day	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	AVG	
1	2.2	2.2	2.6	1.1	2.0	3.9	4.6	4.8	5.4	6.0	6.5	7.1	7.8	8.0	7.6	7.6	7.1	7.0	6.6	5.9	5.8	5.4	5.1	4.8	5.3	
2	3.0	1.3	0.5	1.0	0.7	0.4	0.8	1.5	3.3	5.0	6.1	6.1	6.2	6.4	6.5	6.4	6.4	6.0	5.4	5.0	3.5	3.5	2.9	2.9	3.8	
3	3.0	2.9	2.7	3.0	2.2	2.2	2.4	3.2	3.2	4.2	5.1	6.1	6.3	6.3	6.1	6.2	5.9	5.4	4.8	3.8	2.6	2.5	2.6	2.2	4.0	
4	1.2	0.6	0.7	0.6	1.3	1.3	0.5	1.5	3.3	3.7	4.2	4.9	5.2	4.2	5.4	5.2	5.2	4.2	3.4	1.7	2.1	1.2	0.5	0.7	2.6	
5	0.6	0.9	0.7	1.2	1.4	1.5	1.2	0.6	1.8	2.4	3.5	4.5	5.3	5.1	5.7	5.2	4.3	5.1	4.4	3.5	2.7	2.2	2.0	1.4	2.8	
6	1.4	0.7	0.9	1.1	1.0	1.4	0.8	0.5	1.4	3.5	6.1	6.1	7.0	6.9	6.5	6.2	5.8	5.6	5.0	4.1	4.0	3.8	3.0	2.3	3.6	
7	1.9	1.0	1.7	1.5	1.6	1.6	1.4	0.9	1.2	2.1	2.3	2.6	3.6	4.6	4.9	5.1	4.8	4.5	4.3	4.0	3.3	2.5	1.3	0.9	2.7	
8	0.7	0.5	0.4	0.9	0.7	0.8	0.8	1.1	1.3	2.0	2.9	3.8	4.9	5.3	5.7	5.8	5.6	5.9	5.7	4.8	4.1	3.7	4.0	3.4	3.1	
9	1.8	1.4	1.7	1.4	0.5	0.6	0.5	0.9	3.1	2.9	2.5	3.4	5.3	5.9	6.5	5.9	5.8	5.9	5.2	4.4	4.2	3.3	2.1	0.5	3.2	
10	0.9	0.8	1.1	1.1	0.7	0.6	0.4	0.5	1.4	3.6	3.9	4.7	4.9	5.7	5.9	5.5	5.1	4.7	3.2	3.1	2.0	1.3	0.9	0.7	2.6	
11	0.4	0.5	0.4	0.6	0.5	0.6	0.7	0.5	1.7	2.4	2.8	3.7	3.7	4.0	3.8	3.8	3.9	3.4	1.9	1.8	1.5	1.0	0.5	1.0	1.9	
12	0.6	0.7	1.1	0.7	0.7	0.9	0.8	1.0	1.3	2.1	3.4	4.5	5.5	5.5	5.6	5.2	4.6	4.7	4.3	4.0	3.7	3.0	3.0	1.3	2.8	
13	0.9	1.0	0.7	0.5	0.8	0.4	0.4	0.8	1.3	2.4	3.2	3.3	4.0	4.5	5.0	5.2	5.0	5.2	4.7	4.2	3.7	3.6	3.3	2.6	2.8	
14	2.0	1.9	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.4	1.5	1.9	2.3	3.5	4.4	4.2	4.2	4.2	3.9	3.2	3.3	2.2	2.5	1.7	1.2	1.0	2.2	
15	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	1.0	2.9	4.6	5.1	5.5	5.6	5.2	5.2	4.2	4.0	3.6	3.2	3.3	2.4	0.8	0.4	2.5	
16	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	2.3	5.1	5.0	4.9	6.5	6.7	7.1	7.5	7.7	6.4	6.3	5.4	3.5	4.7	4.1	3.7	3.8	
17	3.6	3.3	3.3	3.9	4.1	4.1	3.2	4.0	4.8	5.9	6.4	7.4	5.9	5.8	5.7	5.0	4.6	4.6	4.7	4.5	4.1	2.8	3.2	3.0	4.5	
18	2.6	3.2	3.0	3.2	2.9	2.2	2.4	2.3	3.5	5.0	6.7	7.2	6.2	6.2	5.9	5.6	5.6	5.0	4.3	3.8	4.0	4.0	3.6	3.2	4.2	
19	2.7	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1.9	2.4	2.7	3.4	5.5	6.2	6.1	5.7	5.4	4.8	3.9	3.6	3.8	4.0	4.0	3.3	3.0	
20	3.2	1.2	0.5	0.4	0.8	0.6	0.4	0.5	1.4	2.1	3.2	5.2	5.5	5.3	4.8	4.3	4.4	3.8	1.9	2.3	2.0	1.9	1.0	0.4	2.4	
21	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6	0.5	0.8	1.2	2.1	2.7	2.9	3.7	4.4	4.7	5.8	5.7	4.9	3.8	3.9	3.7	3.4	3.2	3.5	2.7	
22	3.2	3.7	2.1	0.9	0.5	0.4	0.7	0.7	3.6	5.6	6.7	6.3	6.5	7.0	6.9	6.8	6.1	5.7	6.1	4.0	3.6	3.6	3.5	2.8	4.0	
23	3.0	2.8	1.9	2.0	0.6	0.5	1.1	0.4	1.4	3.1	4.1	5.9	6.6	6.6	6.6	6.5	6.6	5.7	3.9	3.9	4.0	3.6	3.6	3.7	3.7	
24	3.4	3.4	3.2	2.8	2.4	1.5	2.0	3.5	5.5	5.6	4.7	4.5	3.4	3.6	6.1	5.2	4.0	2.1	1.3	1.7	1.3	2.6	2.8	1.5	3.3	
25	0.9	0.8	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	1.9	3.2	4.8	4.8	5.5	6.0	6.7	6.4	5.8	5.4	2.0	1.2	1.5	2.0	2.5	2.2	2.8	
26	2.0	1.6	2.1	1.9	1.8	1.7	1.1	0.8	1.7	3.4	6.2	7.1	6.4	6.9	6.5	6.7	6.7	5.8	5.1	3.3	3.4	3.1	3.6	3.5	3.8	
27	3.2	3.2	2.7	1.6	1.5	0.8	0.5	1.2	2.5	3.7	5.8	6.2	6.0	6.3	5.9	5.3	4.8	4.8	5.0	4.5	4.3	4.1	3.2	2.9	3.6	
28	2.7	1.5	0.7	0.6	0.8	0.6	0.5	0.5	1.8	2.3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	3.6	
29	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.2
30	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
31	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
AVG	1.9	1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	2.3	3.4	4.3	5.0	5.5	5.6	5.9	5.7	5.4	5.0	4.2	3.6	3.3	3.0	2.6	2.2	3.2	

Generated Friday, September 09, 2011
 Total 10-minute intervals: 4464 Intervals used in calculations: 3948 Percent data used: 88.4
 NRG-Systems SDR Version 6.05

Data Angin Tahun 2012

Bulan : Juli

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	0.4	0.8	0.6	1.5	0.4	2.6	1.4	0.8	5.3	5.2	5.2	6.3	5.5	6.7	5.5	5.4	6.1	5.3	5.9	5.3	5.1	0.7	2.4	0.7	3.5
2	0.8	2.2	0.7	2.2	1.7	2.0	0.6	1.4	5.3	5.7	5.8	5.2	6.3	5.7	5.1	6.0	6.2	6.3	6.7	6.4	5.7	1.5	1.3	0.9	3.8
3	1.0	0.5	3.4	2.8	1.3	3.8	1.3	0.4	5.3	5.7	6.5	5.1	6.5	5.5	7.9	5.3	6.6	5.2	6.8	6.3	6.5	2.4	2.3	0.7	4.1
4	0.7	3.5	0.6	3.7	1.2	1.1	1.1	2.2	5.3	5.7	6.1	5.2	5.2	6.2	5.3	6.6	6.4	5.6	5.2	5.5	6.8	0.9	3.0	1.1	3.9
5	0.9	1.3	2.7	0.9	0.7	2.2	1.4	0.8	6.2	6.5	5.3	5.7	5.6	5.6	5.6	5.8	5.8	6.7	7.0	6.0	6.3	0.5	0.6	1.6	3.8
6	2.4	1.1	2.5	2.0	2.5	0.9	1.4	1.2	5.2	5.1	5.1	5.9	5.2	6.0	5.6	5.4	8.0	6.3	5.2	5.7	6.2	0.7	1.2	3.2	3.9
7	0.7	1.0	1.3	0.8	0.6	0.4	2.4	0.4	6.2	5.2	7.1	5.2	5.2	5.7	5.3	5.2	5.2	7.2	6.3	5.6	5.6	1.7	1.4	3.5	3.7
8	0.9	1.9	2.2	1.1	1.2	4.5	1.3	0.6	6.7	5.3	7.5	7.3	5.4	5.4	5.9	5.8	5.9	5.8	7.5	5.3	5.8	0.8	0.7	0.5	4.0
9	3.5	0.4	1.5	1.9	4.4	1.7	3.7	0.5	6.4	6.4	7.2	5.4	6.8	7.6	6.6	5.4	6.0	6.0	6.0	6.2	5.9	1.2	0.8	1.4	4.3
10	0.4	2.9	1.1	1.3	0.8	0.4	1.3	1.2	5.5	6.6	5.4	6.9	5.5	6.3	7.4	7.1	6.8	6.7	7.1	7.8	6.7	1.6	1.3	1.7	4.2
11	1.0	0.5	0.5	0.5	1.7	0.4	1.5	5.6	5.4	5.8	6.2	6.3	5.4	5.3	6.7	5.2	7.4	7.0	6.1	5.3	5.2	1.7	0.9	0.6	3.8
12	0.9	1.9	1.4	0.9	3.3	2.6	1.4	0.9	6.1	5.4	6.6	5.8	5.2	5.2	5.6	7.7	7.1	5.2	6.1	7.4	5.6	0.5	1.1	1.7	4.0
13	3.2	2.2	2.1	2.1	0.7	0.9	0.8	2.1	5.2	6.7	5.8	6.8	5.4	5.2	5.5	5.5	5.4	5.9	5.3	5.2	6.1	0.9	3.8	2.0	3.9
14	1.1	2.6	4.4	0.7	1.2	2.1	2.0	5.7	5.7	5.9	5.3	5.4	7.0	5.5	6.1	5.1	7.0	5.4	5.9	5.2	5.6	1.0	0.9	0.6	4.0
15	4.7	1.5	1.9	2.2	0.7	1.4	0.6	1.0	5.3	5.3	6.9	7.7	5.6	6.5	7.1	5.7	7.5	5.5	6.9	5.9	6.6	0.6	2.8	2.0	4.2
16	1.6	0.8	2.5	0.6	1.6	1.1	0.7	1.0	5.4	5.7	5.5	5.6	5.5	5.6	5.6	5.7	5.4	5.2	5.5	5.4	5.2	1.0	0.7	1.4	3.5
17	0.4	0.5	3.4	0.7	1.6	0.6	1.6	0.7	5.7	6.8	5.3	6.1	5.9	6.8	6.1	6.0	7.3	6.0	5.7	5.9	6.3	1.8	0.6	0.7	3.9
18	0.5	0.5	2.3	1.4	0.9	0.5	2.0	1.7	6.6	5.1	5.2	5.6	6.5	6.3	6.0	6.7	5.2	6.8	5.4	6.6	7.7	1.7	0.5	1.9	3.9
19	2.2	1.4	2.8	2.6	0.9	0.8	0.8	1.6	5.6	5.8	5.2	5.7	5.9	5.7	6.0	5.2	6.1	7.2	5.1	5.1	5.2	2.9	0.7	2.9	3.9
20	0.5	2.5	4.2	1.3	1.4	2.6	3.2	1.7	5.6	6.3	5.4	6.0	5.7	5.1	6.6	5.7	5.6	6.1	6.1	6.8	5.7	1.2	0.5	1.5	4.1
21	1.0	1.6	0.5	0.8	0.8	0.6	2.1	0.9	5.2	5.1	5.9	7.1	5.2	6.0	7.2	7.7	6.0	5.4	6.6	6.5	5.6	1.3	1.2	0.8	3.8
22	0.8	1.7	0.6	1.5	1.7	1.8	0.7	1.4	5.6	6.7	5.7	5.6	6.7	5.5	6.6	5.2	5.9	5.2	5.8	5.4	5.2	2.1	0.6	1.2	3.7
23	0.8	0.8	3.1	1.3	1.0	0.5	4.2	0.6	5.5	7.7	5.7	5.3	5.3	5.6	6.1	5.8	5.5	6.8	6.2	5.2	5.7	0.5	0.9	1.3	3.8
24	1.1	2.3	1.4	0.9	1.4	0.5	1.0	1.0	5.8	6.3	5.2	5.6	6.1	5.4	5.8	5.8	5.9	5.8	6.1	5.1	5.4	1.0	1.6	1.4	3.7
25	0.5	2.0	3.4	3.5	1.0	1.6	3.6	0.8	6.5	5.6	5.7	5.3	5.5	5.2	5.3	5.6	6.3	6.0	6.5	5.5	7.1	0.6	0.6	2.1	4.0
26	0.6	2.8	2.3	1.3	2.7	0.5	4.9	0.5	7.2	5.5	5.2	6.0	5.5	6.2	6.7	5.6	5.6	5.5	5.4	6.2	5.6	0.6	0.6	0.8	3.9
27	0.6	1.4	2.0	0.9	0.8	1.2	0.5	1.3	6.5	5.2	5.4	5.3	6.6	5.5	5.8	6.4	5.2	7.1	5.7	6.6	5.4	1.6	0.8	2.3	3.8
28	0.8	1.1	0.6	1.6	1.8	1.5	1.3	2.3	5.3	5.4	5.3	6.6	5.2	5.3	5.1	5.6	5.4	7.6	7.5	5.5	5.5	1.2	0.7	1.1	3.7
29	0.6	2.8	3.3	0.9	1.2	0.5	1.4	0.6	5.3	5.7	7.0	6.1	5.2	6.1	7.3	5.7	6.0	5.3	6.1	5.5	5.8	1.5	0.8	1.2	3.8
30	2.2	0.7	0.6	0.6	1.4	1.8	1.4	0.9	5.7	6.5	6.0	5.3	5.4	5.1	5.6	5.2	6.4	5.8	5.7	7.0	5.3	1.1	3.5	2.3	3.8
31	0.86	0.4	1.12	0.59	1.05	1.26	1.19	1.29	5.35	7.25	6.07	5.18	5.64	5.24	5.67	5.34	5.86	5.25	5.39	7.18	6.46	0.76	1.73	1.68	3.7
Rata-rata/jam	1.2	1.5	2.0	1.5	1.4	1.4	1.7	1.4	5.7	5.9	5.9	5.9	5.7	5.8	6.1	5.8	6.2	6.0	6.1	6.0	5.9	1.2	1.3	1.5	3.9

Data Angin Tahun 2012

Bulan : Agustus

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	1.6	0.6	1.7	2.1	0.4	0.6	1.2	1.0	7.7	5.5	6.1	8.0	7.1	8.4	6.0	5.8	5.7	8.0	5.7	6.3	8.4	3.5	2.7	1.6	4.4
2	0.7	0.7	0.7	1.4	0.8	0.7	0.7	1.3	6.6	6.2	5.4	7.8	7.1	7.1	5.8	6.3	6.9	7.0	5.6	5.5	5.6	2.6	1.9	2.2	4.0
3	1.7	0.6	1.1	1.2	1.7	0.6	0.8	1.8	5.5	5.7	6.3	7.0	6.4	5.8	6.3	5.5	5.9	8.2	6.0	6.1	5.4	2.5	2.8	1.8	4.0
4	0.9	1.3	1.1	1.3	1.6	1.1	1.2	0.8	7.6	7.1	6.2	6.2	5.9	5.9	5.4	7.1	5.8	6.4	5.8	5.6	6.2	3.1	3.0	2.0	4.1
5	0.5	4.5	0.7	1.0	0.8	0.7	0.7	2.0	5.5	7.2	5.7	6.9	6.1	6.0	5.9	6.7	6.4	7.6	5.7	8.4	5.8	1.6	6.1	2.1	4.4
6	0.4	0.4	0.9	0.6	3.3	0.6	0.5	0.5	6.0	6.0	5.6	6.3	5.9	5.8	7.9	7.2	6.6	6.8	5.7	5.5	6.6	2.0	1.9	3.7	4.0
7	0.7	1.1	0.6	2.9	0.9	1.0	2.7	0.8	6.4	5.7	6.0	6.2	6.8	6.2	6.0	5.7	7.6	6.8	7.6	5.5	7.9	2.0	1.7	1.6	4.2
8	0.5	1.6	1.1	0.7	0.6	1.5	4.0	0.6	5.7	6.1	7.1	5.9	7.1	5.5	6.1	7.1	5.5	6.7	6.0	5.8	6.7	3.7	2.9	3.5	4.2
9	1.7	1.6	0.5	2.2	1.3	0.6	1.1	1.7	7.1	7.1	7.1	7.6	7.7	5.9	5.6	5.6	5.7	6.8	7.7	5.8	6.6	2.2	2.6	2.1	4.3
10	0.6	1.7	2.0	2.7	1.7	0.5	3.1	0.4	7.2	8.3	5.8	5.9	6.8	5.6	6.0	6.4	5.6	5.6	5.4	5.6	6.3	3.0	1.8	2.9	4.2
11	0.7	1.3	0.9	1.3	1.9	1.6	2.1	0.6	5.6	6.9	6.3	5.4	5.4	5.6	5.7	7.8	5.5	6.9	8.2	6.3	6.1	3.5	1.9	2.0	4.1
12	2.1	1.8	0.8	0.4	0.5	0.8	1.4	4.1	7.5	5.8	5.9	6.2	6.6	5.4	5.9	5.7	5.8	6.3	8.1	5.5	5.4	2.3	1.7	1.6	4.1
13	3.0	2.0	1.1	0.7	1.2	0.7	0.5	2.1	7.5	5.8	5.9	6.2	6.1	5.5	6.4	6.7	7.2	5.5	5.5	6.7	5.5	2.0	1.7	1.9	4.1
14	0.8	1.4	2.2	2.5	1.4	1.0	3.0	0.6	6.3	7.4	8.1	5.4	6.9	7.6	6.8	8.2	6.6	6.6	5.4	5.9	5.6	2.3	1.7	3.4	4.5
15	2.7	0.4	0.5	1.6	0.5	0.8	1.9	1.8	5.7	6.5	5.6	6.5	6.7	5.6	6.7	7.9	7.6	6.2	6.3	5.9	6.2	3.5	1.5	2.4	4.2
16	1.0	1.3	1.4	0.7	2.2	2.0	0.6	2.5	5.8	6.0	6.7	5.8	6.1	5.5	6.1	5.5	7.3	5.8	5.8	5.6	5.7	2.0	3.4	1.6	4.0
17	1.4	3.6	0.5	3.5	0.6	2.7	1.1	0.9	7.8	6.8	6.5	5.8	7.5	6.0	5.6	5.9	8.3	5.6	5.9	5.7	6.9	4.2	2.2	1.9	4.4
18	1.1	0.5	1.8	0.4	0.9	2.2	2.7	1.0	5.7	5.9	7.5	5.8	7.3	5.9	6.0	6.1	5.8	5.7	7.1	5.6	6.9	2.4	3.0	3.1	4.2
19	0.9	0.8	1.3	6.3	2.8	0.9	1.4	0.7	6.7	5.6	5.6	8.4	5.5	5.4	5.4	7.3	5.8	5.7	5.5	7.3	6.6	2.6	1.6	3.3	4.3
20	1.1	0.8	0.6	0.9	0.6	1.1	0.5	0.5	6.2	8.3	5.7	5.4	6.4	7.0	6.4	5.9	6.6	5.6	6.8	5.7	5.9	2.4	1.8	1.8	3.9
21	0.6	3.6	0.8	0.9	0.6	1.4	0.6	1.4	6.2	6.4	6.3	5.5	6.9	6.3	5.7	6.4	5.4	7.3	6.1	6.1	5.4	1.9	2.8	2.2	4.0
22	1.7	0.5	0.7	0.5	0.7	1.5	0.4	1.4	5.6	7.2	7.4	5.5	6.2	5.5	6.5	7.5	6.5	5.9	8.0	5.6	6.3	3.0	2.7	2.0	4.1
23	0.8	0.6	0.7	0.7	0.5	0.4	1.3	0.8	6.9	5.6	6.1	5.4	5.5	6.7	7.1	7.4	5.5	6.1	6.5	6.8	7.0	3.1	2.7	2.8	4.0
24	0.4	0.8	1.0	0.6	0.7	1.9	1.2	0.5	5.7	5.7	6.9	5.4	5.6	6.8	6.8	5.7	5.8	5.6	7.0	7.5	6.6	4.9	2.0	4.6	4.2
25	0.5	0.5	1.1	0.5	0.5	0.7	2.4	0.5	5.9	6.3	5.9	5.9	6.0	5.7	6.1	7.2	6.5	5.9	6.6	5.8	5.9	2.5	2.2	2.4	3.9
26	2.5	0.9	0.6	1.3	3.6	1.8	0.7	1.8	6.7	7.1	5.5	5.4	6.2	5.6	6.8	7.4	7.2	8.0	6.7	5.7	5.8	2.5	3.4	3.2	4.4
27	0.4	0.9	1.2	2.6	0.5	1.4	0.9	1.9	6.6	5.5	5.4	5.6	6.6	6.6	6.8	5.6	6.2	5.5	6.4	5.5	6.4	2.1	2.0	4.6	4.0
28	0.5	1.1	1.2	2.0	1.7	4.3	1.3	0.4	6.3	5.4	5.6	5.8	8.0	5.8	6.2	5.4	6.5	5.7	6.0	5.8	6.6	2.4	2.1	4.2	4.2
29	1.4	0.5	0.5	0.9	0.9	1.4	0.8	0.5	5.9	6.2	5.7	5.9	6.4	5.5	5.9	6.0	5.8	5.5	7.3	5.6	5.5	6.2	2.4	3.8	4.0
30	1.5	0.5	0.5	2.3	0.4	0.5	1.0	1.6	5.7	5.9	5.6	5.7	5.5	5.5	5.4	6.1	7.6	5.9	7.5	5.8	7.4	1.8	1.8	2.0	3.9
31	0.7	1.9	1.1	2.4	3.4	0.5	0.8	1.3	5.5	7.1	5.6	5.4	5.6	6.0	7.3	6.9	6.4	8.3	5.9	8.3	6.7	3.4	4.4	1.9	4.4
Rata-rata/jam	1.1	1.3	1.0	1.6	1.3	1.2	1.4	1.2	6.4	6.4	6.2	6.1	6.5	6.1	6.2	6.5	6.4	6.4	6.4	6.1	6.3	2.8	2.5	2.6	4.2

Data Angin Tahun 2012

Bulan : September

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	22	23	Rata-rata/hari	
1	1.9	2.4	3.3	1.7	1.2	1.7	1.7	1.3	1.7	4.2	4.4	4.4	5.8	5.5	5.1	5.9	5.5	5.3	5.1	4.9	4.5	3.7	2.6	2.1	2.4	3.6
2	2.4	1.8	2.9	1.8	1.2	0.9	1.5	2.1	6.0	3.8	4.3	6.8	5.4	5.3	5.5	5.9	6.4	4.8	4.8	4.6	4.6	3.4	2.8	1.9	2.1	3.7
3	1.0	0.8	2.6	1.3	2.1	2.0	1.5	1.7	3.0	4.7	4.6	4.8	6.7	6.3	6.6	7.9	5.1	5.1	5.4	4.3	3.3	3.3	2.6	3.5	2.2	3.7
4	1.7	2.6	1.7	2.4	1.6	1.7	1.2	2.0	3.4	3.1	4.9	6.5	5.2	6.3	5.2	5.1	4.9	5.6	6.5	4.2	3.5	3.3	2.9	2.2	3.6	
5	2.7	1.3	3.3	1.6	2.6	2.4	1.3	4.0	2.9	3.7	4.4	5.1	5.2	5.2	5.2	6.6	7.6	5.1	4.8	4.3	4.0	4.2	3.6	1.5	3.9	
6	1.5	1.3	1.9	1.5	1.6	0.8	1.1	2.1	2.9	3.4	4.1	6.0	5.6	7.9	7.9	6.3	6.9	6.8	4.8	4.3	4.7	3.7	2.5	2.7	3.8	
7	2.2	1.8	2.3	3.0	1.6	1.2	1.0	2.1	3.3	4.3	5.1	4.8	6.2	7.2	7.0	7.6	6.4	6.5	5.3	4.4	4.2	5.0	2.6	1.9	4.1	
8	2.2	1.0	1.2	2.5	1.9	2.0	3.3	1.6	3.3	3.4	4.1	5.3	6.4	5.5	7.2	5.8	5.9	7.6	4.9	3.9	3.6	2.5	3.4	3.8	3.8	
9	2.4	1.5	1.8	1.6	1.5	1.1	1.4	2.2	2.5	5.7	4.4	5.0	6.6	5.5	6.4	6.6	5.1	7.0	4.7	4.0	3.3	2.5	3.2	1.6	3.7	
10	2.7	0.9	2.0	1.7	1.3	1.5	2.9	3.1	2.9	3.0	6.8	5.7	5.8	7.0	5.5	5.9	7.3	4.9	5.6	5.5	2.5	3.1	2.6	3.2	3.9	
11	1.9	3.7	1.5	1.3	1.1	1.1	1.6	2.3	4.4	3.3	5.0	5.0	6.3	5.1	7.2	6.1	5.1	5.0	4.7	4.3	3.7	3.4	2.2	2.9	3.7	
12	1.6	1.0	1.1	1.3	3.3	1.1	0.7	1.6	2.6	3.5	4.1	6.4	5.5	5.1	8.0	5.4	5.1	4.9	6.6	4.3	2.9	3.9	2.3	2.8	3.6	
13	1.2	2.7	1.4	2.2	1.8	2.8	1.0	4.1	2.9	7.9	4.3	5.5	5.4	5.4	5.2	5.0	7.3	7.1	6.5	3.9	5.9	4.1	2.0	1.9	4.1	
14	1.1	1.4	1.2	2.2	3.2	2.3	1.1	1.7	2.8	3.8	4.2	7.4	7.0	6.4	7.7	5.0	5.1	5.1	5.2	5.4	2.7	2.9	2.8	1.5	3.7	
15	2.6	0.8	3.0	3.2	1.4	2.5	2.5	2.5	1.6	2.7	3.3	4.1	7.3	5.4	6.7	6.5	5.4	5.3	4.8	5.0	3.0	3.1	5.3	2.8	3.9	
16	2.4	1.4	2.5	1.4	1.1	1.7	1.7	1.4	1.8	2.5	4.3	4.0	5.0	5.1	6.7	5.2	6.0	4.8	5.2	4.2	5.2	3.7	2.3	2.7	3.6	
17	2.3	1.8	2.3	1.7	1.2	2.1	1.6	1.7	2.8	3.1	4.1	4.9	5.5	6.2	7.6	5.9	5.2	6.2	5.1	6.8	4.6	2.6	1.9	3.7	3.8	
18	3.2	1.5	2.2	1.3	2.5	0.8	0.8	1.8	3.9	3.1	5.1	5.1	5.4	5.4	5.6	7.1	5.0	6.8	4.9	4.0	3.3	3.9	2.1	1.7	3.6	
19	1.1	0.8	2.1	1.4	1.2	1.3	1.2	2.4	3.7	3.1	5.1	4.8	6.3	6.7	5.8	6.1	7.1	5.5	6.2	4.3	2.7	3.1	2.7	2.1	3.6	
20	1.1	0.9	2.1	1.3	1.9	1.5	1.5	2.6	2.4	2.5	3.3	4.8	4.8	5.7	5.5	6.3	6.9	5.4	4.8	4.8	5.4	3.0	2.4	2.4	3.7	
21	1.1	2.3	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	3.4	5.1	3.8	4.2	5.6	5.1	5.6	5.3	6.5	5.1	5.7	5.2	5.2	2.8	4.6	2.0	2.4	3.6	
22	2.3	1.9	1.8	1.2	2.2	1.5	2.6	1.5	3.1	3.8	6.1	4.7	5.5	7.7	5.3	6.2	6.5	4.8	5.5	4.8	3.2	3.4	2.1	1.5	3.7	
23	1.8	2.0	2.2	2.7	2.8	1.3	1.8	3.1	2.5	6.4	5.7	4.9	6.2	5.2	5.7	5.0	5.4	5.5	4.7	5.3	3.9	4.2	3.4	1.5	3.9	
24	2.3	1.0	1.2	1.9	1.8	1.3	1.2	1.6	3.5	6.2	4.2	5.0	5.9	5.9	5.4	5.2	7.4	6.0	5.1	6.6	6.2	3.3	2.6	2.7	3.9	
25	2.0	1.9	2.0	1.5	1.2	0.8	1.0	1.6	3.0	6.0	5.4	5.5	7.4	5.2	5.6	7.7	4.9	5.0	6.2	6.6	3.8	3.3	3.0	2.1	3.9	
26	1.2	2.2	2.0	1.2	2.0	3.5	1.5	1.7	2.7	3.5	7.0	4.8	5.9	5.4	7.0	4.9	5.3	5.5	4.9	5.5	2.7	3.3	2.6	1.7	3.7	
27	4.9	1.1	3.6	1.6	1.4	1.3	1.4	2.8	2.8	5.3	4.1	5.7	7.0	7.0	5.3	7.0	7.3	5.1	4.7	4.6	4.2	5.4	3.2	1.6	4.1	
28	1.2	0.9	2.5	1.3	1.5	2.1	1.9	2.7	3.8	3.0	4.7	5.1	5.7	5.6	6.2	5.6	5.7	5.2	6.6	4.4	3.0	5.1	3.3	4.9	3.8	
29	3.2	1.4	1.9	2.7	1.4	3.1	2.8	2.0	2.8	3.9	4.2	5.0	6.3	5.5	5.8	7.4	5.5	5.1	5.4	4.3	3.4	3.8	2.8	2.2	3.8	
30	1.7	1.6	3.3	1.7	2.2	1.5	2.0	1.8	2.7	3.1	4.8	5.1	5.7	5.8	6.6	6.3	5.8	6.0	6.1	6.1	2.7	4.2	3.8	2.1	3.9	
Rata-rata/jam	2.0	1.6	2.1	1.8	1.8	1.7	1.6	2.2	3.2	4.1	4.7	5.4	5.9	6.0	6.2	6.1	5.9	5.6	5.3	4.8	3.7	3.5	2.8	2.4	3.8	

Data Angin Tahun 2012
Bulan : Oktober

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	2.1	3.0	1.3	0.4	0.9	1.3	1.0	0.5	1.7	3.1	3.4	6.9	5.6	5.0	6.3	5.5	6.4	5.3	5.9	6.4	3.1	3.0	1.9	1.7	3.5
2	1.7	2.1	2.3	2.9	3.1	0.5	1.2	0.5	1.5	2.4	3.6	5.2	5.5	5.9	7.9	5.1	4.9	4.8	4.9	2.8	2.8	3.7	2.2	2.7	3.4
3	1.7	0.9	0.9	0.7	1.8	1.9	0.4	2.4	2.3	2.7	4.2	4.0	4.9	5.0	5.3	6.7	6.2	5.4	5.0	3.5	4.2	2.6	3.3	3.5	3.4
4	1.6	1.0	0.8	3.8	0.5	0.9	2.4	0.5	1.8	5.6	4.5	5.0	5.3	5.0	5.3	6.7	7.5	5.8	4.3	3.1	4.9	2.5	3.1	2.9	3.6
5	2.4	0.4	1.3	0.8	0.5	2.0	1.1	0.9	1.9	2.6	3.6	7.8	5.2	5.1	5.9	5.2	4.8	5.8	5.0	3.5	3.0	3.7	2.6	3.0	3.3
6	1.5	3.3	1.2	0.6	1.5	3.1	0.5	0.5	1.6	2.3	3.1	4.4	6.5	6.0	6.7	5.2	4.9	5.9	5.6	4.1	3.0	2.4	2.5	1.7	3.3
7	3.7	2.9	2.5	1.0	1.1	2.4	0.8	1.4	2.2	2.8	3.5	5.0	6.7	5.6	5.2	6.7	7.6	5.4	7.1	3.2	4.0	3.2	2.8	1.8	3.7
8	1.7	2.2	1.3	0.6	2.9	0.5	0.5	1.2	4.8	3.0	4.0	4.1	5.3	5.2	7.3	6.3	5.4	4.9	5.2	4.8	2.9	2.6	3.3	1.7	3.5
9	1.7	0.4	0.4	0.7	1.0	0.9	1.5	0.6	1.7	2.5	2.9	4.2	4.9	5.6	5.8	6.3	5.3	5.2	4.7	4.6	3.5	7.0	3.3	1.9	3.3
10	2.1	2.7	0.9	2.8	1.8	0.4	1.0	1.0	4.2	6.2	3.8	4.6	4.9	5.3	6.3	7.1	6.0	6.7	5.6	2.9	3.4	3.9	2.4	2.4	3.7
11	2.8	2.0	1.6	3.6	0.8	1.0	1.8	2.5	1.9	2.5	3.0	5.2	5.0	6.7	5.7	4.9	5.9	4.8	4.9	4.6	3.5	3.3	2.3	4.5	3.6
12	2.0	1.5	3.0	2.1	2.8	2.0	0.7	0.4	2.1	5.1	3.2	5.0	5.2	5.0	5.4	7.6	5.0	5.3	6.4	3.8	3.5	2.9	2.3	1.8	3.6
13	1.6	1.2	1.5	0.8	0.9	0.9	2.7	0.7	2.0	2.6	2.9	4.7	5.6	5.3	5.8	5.5	5.4	5.4	4.2	4.5	4.6	2.3	2.4	2.0	3.2
14	1.7	1.4	0.6	0.6	0.5	1.2	1.8	1.3	1.6	4.1	3.0	4.6	5.1	5.6	5.5	5.4	5.7	5.6	4.8	3.1	4.3	4.5	5.5	4.0	3.5
15	2.0	0.5	0.8	2.5	2.0	0.4	0.6	2.2	1.9	3.5	4.7	4.1	5.1	5.0	5.6	4.8	4.8	5.9	4.2	3.3	2.9	4.9	2.6	3.5	3.3
16	1.5	0.8	0.9	1.6	1.6	0.6	0.7	3.0	4.6	3.3	4.7	4.2	4.9	4.9	5.0	5.1	5.2	5.2	4.8	6.0	3.6	5.3	2.9	1.5	3.5
17	2.6	0.8	1.8	0.7	1.7	0.8	3.2	1.0	3.3	2.4	6.5	6.7	5.0	5.7	5.9	5.0	5.6	5.4	5.0	3.3	3.2	2.3	2.3	1.8	3.5
18	1.9	1.2	0.4	0.6	0.8	4.4	1.3	1.7	2.1	4.7	3.7	4.3	6.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.1	5.4	3.1	2.6	2.8	1.5	3.5
19	1.8	1.1	1.3	2.5	0.8	1.9	1.6	0.7	2.1	2.7	3.5	5.0	4.9	6.8	5.9	5.4	6.3	7.1	5.3	4.4	3.1	3.3	3.3	2.6	3.5
20	1.6	1.3	2.1	0.5	0.5	0.5	0.4	3.5	1.6	2.9	3.5	5.0	5.0	5.1	7.7	7.4	5.4	5.0	6.5	3.2	2.9	2.4	2.6	1.6	3.3
21	2.7	0.8	1.4	0.7	0.8	1.5	0.8	0.9	1.9	3.3	4.1	4.0	5.7	6.3	5.9	7.8	6.2	7.8	4.3	3.8	6.2	2.4	3.8	3.3	3.6
22	3.6	2.2	0.9	2.3	0.9	0.8	0.6	0.8	3.6	3.6	3.6	5.6	7.9	6.6	6.6	5.3	5.4	5.0	4.5	3.6	3.8	4.1	2.6	1.8	3.6
23	2.9	2.4	2.2	0.9	1.9	0.7	3.2	2.9	1.8	5.2	3.7	6.0	4.9	5.7	5.2	5.9	5.3	4.9	5.1	3.9	4.3	2.8	2.2	2.3	3.6
24	2.6	0.9	1.2	1.3	1.8	0.8	1.0	0.8	1.9	3.8	4.4	4.4	5.7	5.2	4.8	5.0	5.6	5.6	5.8	3.4	3.0	2.9	2.7	4.3	3.3
25	1.6	1.0	1.6	1.3	1.9	0.6	0.9	0.5	3.1	3.4	7.1	5.4	5.0	5.0	5.1	4.9	6.1	5.1	4.9	3.8	3.2	2.7	3.1	1.5	3.4
26	2.0	0.9	2.7	0.7	2.2	1.4	0.6	0.4	2.5	2.3	4.5	4.3	5.3	5.2	6.0	5.9	5.4	5.0	4.3	2.8	3.4	3.7	2.4	1.5	3.2
27	2.0	2.4	0.5	0.6	0.6	3.2	1.5	0.7	2.3	3.2	7.4	4.1	5.0	5.6	6.7	5.0	5.8	4.8	4.7	2.8	3.6	2.3	2.2	2.5	3.4
28	1.6	0.8	1.4	1.7	1.9	0.6	1.4	0.8	1.5	2.3	4.6	7.2	5.0	5.6	5.2	5.2	6.1	5.3	4.3	4.5	5.9	3.6	3.2	1.7	3.5
29	2.2	3.1	3.5	0.5	1.4	0.5	0.9	1.1	3.4	2.5	3.1	4.6	5.0	5.7	5.4	6.1	5.1	5.6	4.5	5.3	2.8	3.5	3.2	2.1	3.4
30	2.4	1.9	1.9	3.5	0.6	1.6	0.9	0.7	2.1	2.4	4.6	5.0	6.4	7.1	5.0	7.9	5.3	5.1	6.2	4.1	3.7	2.8	5.9	2.2	3.8
31	3.0	0.6	1.8	0.4	1.8	0.4	0.5	2.6	2.0	2.7	3.2	4.3	4.9	4.8	5.7	5.0	5.9	7.0	6.7	4.6	4.1	2.9	2.3	2.3	3.3
Rata-rata/jam	2.1	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.3	2.4	3.3	4.1	5.0	5.4	5.6	5.9	5.8	5.7	5.5	5.2	4.0	3.7	3.3	2.9	2.4	3.5

Data Angin Tahun 2012
Bulan : Nopember

Hari-ke	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	21	17	19	18	20	22	23	Rata-rata/hari
1	1.8	1.7	0.7	0.8	1.7	0.6	2.6	0.4	1.9	3.0	4.2	5.3	6.4	5.2	6.8	6.1	4.5	6.8	4.5	2.4	3.0	3.9	2.5	2.1	3.3
2	2.8	0.5	0.7	1.4	0.5	3.6	0.4	0.6	1.6	2.2	4.5	5.7	5.1	5.4	6.2	5.2	5.4	5.3	4.2	4.0	3.2	2.6	2.1	1.4	3.1
3	1.5	1.5	0.4	0.6	1.5	1.1	1.7	2.6	2.4	2.7	3.4	4.2	5.3	5.2	6.4	5.8	4.1	4.5	3.4	4.6	2.7	3.0	3.4	3.0	3.1
4	0.6	1.3	1.6	0.4	1.3	1.3	0.5	2.3	2.2	2.1	3.7	4.9	5.3	5.1	5.4	7.6	4.2	5.4	6.6	2.5	2.7	2.6	2.0	2.2	3.1
5	2.4	0.9	2.1	1.2	1.3	0.4	0.7	0.7	1.5	4.5	3.7	4.1	5.6	7.1	6.3	5.3	6.7	4.5	4.0	2.5	3.2	4.5	4.2	2.0	3.3
6	1.7	1.9	1.2	0.6	0.5	1.2	1.2	2.3	1.7	2.6	4.5	4.7	5.3	5.0	5.8	5.1	5.7	5.8	3.9	2.6	6.5	2.4	2.6	2.0	3.2
7	3.2	0.8	1.6	0.4	1.7	0.8	0.6	0.4	1.8	2.8	3.4	4.1	5.0	6.4	5.4	5.0	4.3	4.4	3.6	2.4	2.6	2.8	2.7	2.1	2.8
8	2.5	2.6	1.9	1.3	1.5	1.8	0.6	0.9	3.0	3.0	4.9	4.2	6.7	6.0	5.2	6.3	4.2	5.0	4.4	3.5	4.1	2.7	2.8	3.3	3.4
9	0.8	1.2	1.4	1.4	0.7	1.1	1.6	2.0	1.9	2.3	3.4	4.2	5.3	5.2	5.5	5.4	4.5	5.1	4.1	2.7	2.4	3.1	3.0	2.6	3.0
10	0.5	3.0	0.6	1.4	1.5	0.8	1.0	0.8	2.8	2.9	3.5	6.2	5.1	5.1	5.0	5.1	7.4	4.3	4.4	4.2	3.0	2.8	2.2	2.4	3.2
11	1.3	1.5	2.5	0.4	2.4	0.5	0.7	0.6	1.6	2.4	5.6	4.8	5.6	5.3	7.2	5.4	6.0	5.2	3.5	2.4	4.1	5.1	2.0	4.1	3.3
12	3.9	3.8	2.1	1.6	0.5	1.4	1.1	0.4	1.6	3.3	4.1	4.1	7.0	5.4	6.3	5.3	4.3	4.8	5.5	2.5	2.6	2.7	4.3	1.5	3.3
13	1.5	1.9	1.1	1.5	1.4	0.9	1.2	0.6	1.9	3.3	5.1	4.2	5.1	5.7	5.2	5.8	7.7	5.2	3.4	2.9	2.6	3.2	1.9	1.6	3.1
14	0.7	0.5	2.3	1.2	1.2	0.7	1.1	0.4	1.8	2.2	3.3	5.2	5.2	5.5	5.2	6.4	4.4	4.2	3.7	5.2	2.4	2.7	3.1	1.9	2.9
15	1.2	1.2	0.8	0.5	1.7	1.6	0.7	0.5	2.3	3.3	5.3	4.6	5.4	6.7	5.3	5.4	7.2	5.5	5.6	4.5	4.1	3.7	1.8	1.7	3.4
16	0.6	1.3	2.5	1.4	0.9	0.9	0.7	0.7	1.5	2.2	7.2	5.8	5.3	5.8	5.3	6.4	6.4	5.0	4.1	2.4	3.0	2.5	1.5	3.9	3.2
17	0.5	0.9	1.4	0.6	0.9	0.6	0.5	1.6	4.7	2.9	4.4	5.4	5.9	6.0	6.0	6.1	5.9	6.2	4.8	3.9	4.8	4.3	2.4	3.1	3.5
18	1.3	1.5	2.0	0.8	1.0	1.7	1.2	0.5	3.0	3.4	3.5	4.2	5.2	5.4	6.1	6.0	5.8	4.5	3.3	4.2	3.3	4.8	1.5	1.5	3.2
19	1.5	2.0	0.8	0.5	1.2	0.7	3.4	1.8	2.0	3.1	3.4	5.4	5.1	5.1	5.5	5.3	5.1	4.4	3.5	2.3	2.3	3.0	3.0	2.6	3.0
20	1.2	0.9	0.5	0.4	1.0	2.1	1.6	1.0	1.7	2.4	4.7	4.3	5.3	6.8	6.2	5.2	4.1	6.1	3.4	5.1	2.6	2.8	2.6	2.1	3.1
21	3.3	0.4	1.2	0.8	1.8	1.1	0.7	0.9	1.5	2.5	3.5	4.3	5.5	6.4	5.4	7.8	5.4	4.2	3.4	5.1	4.5	2.4	3.0	1.7	3.2
22	2.3	1.7	0.8	4.5	2.0	0.5	0.4	2.5	4.2	3.8	4.0	6.7	5.4	6.4	7.0	5.6	7.1	4.1	3.6	6.1	2.8	2.4	1.6	1.5	3.6
23	1.0	3.5	0.8	1.6	0.8	1.3	0.4	1.3	1.5	4.4	3.5	5.6	5.4	5.3	5.0	5.7	4.1	4.2	3.5	2.8	3.0	2.4	1.6	1.5	2.9
24	1.0	0.5	0.5	1.7	2.0	0.6	0.5	0.5	2.5	2.5	4.8	4.5	5.1	5.9	7.4	5.0	4.2	4.2	3.7	4.5	2.8	2.6	5.0	1.9	3.1
25	0.5	2.0	2.1	1.8	0.6	2.3	1.5	3.0	2.0	3.6	4.6	4.2	6.0	5.1	5.8	5.2	6.4	4.6	4.7	2.9	3.2	2.4	2.8	2.0	3.3
26	1.2	0.8	1.7	0.5	1.0	0.5	0.9	0.7	1.8	5.8	4.1	6.7	5.5	5.3	6.2	7.6	5.2	4.3	3.7	2.6	4.3	2.3	2.3	2.5	3.2
27	4.4	0.6	0.8	1.6	0.8	1.0	1.8	4.0	2.7	2.2	4.3	7.9	5.6	5.2	6.0	5.5	5.7	5.8	4.1	3.4	4.0	3.9	3.5	2.0	3.6
28	2.6	1.6	1.7	2.9	0.5	0.8	0.4	0.5	1.7	3.0	4.2	5.0	5.9	6.1	5.3	5.7	5.2	6.1	5.0	2.6	3.1	2.6	1.5	2.2	3.2
29	0.9	2.7	0.6	1.8	2.4	1.5	1.3	1.2	1.7	4.4	3.8	6.5	6.0	7.2	5.8	5.9	6.6	4.6	3.4	3.5	2.4	3.0	4.7	1.6	3.5
30	2.1	1.7	1.3	0.8	1.1	1.6	0.6	1.6	2.8	3.4	4.1	5.6	6.1	6.3	5.9	7.4	5.5	4.3	4.4	5.4	3.3	2.4	1.4	2.0	3.4
Beta-rata/jam	1.7	1.5	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.3	2.2	3.1	4.2	5.1	5.6	5.7	5.9	5.8	5.4	5.0	4.1	3.5	3.3	3.0	2.6	2.2	3.2

Data Angin Tahun 2012
Bulan : Desember

Hari-ke\jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	3.5	0.4	1.9	1.6	0.9	1.0	1.4	1.4	1.7	3.7	4.3	4.7	5.3	7.1	5.2	7.7	6.0	5.0	3.8	3.3	3.9	4.1	2.2	1.4	3.4
2	2.4	0.6	0.8	1.0	1.4	0.8	0.9	1.1	2.7	3.1	4.1	4.1	4.8	6.6	5.0	6.7	4.5	6.1	4.7	2.9	3.3	2.3	2.2	1.0	3.0
3	1.8	1.8	1.0	1.8	1.9	1.4	0.6	2.1	3.5	3.8	3.6	4.2	6.1	5.1	5.4	5.0	4.4	4.4	3.5	2.9	2.4	2.0	2.6	1.8	3.0
4	0.7	0.8	0.9	0.5	0.7	1.3	2.0	1.0	2.9	3.4	6.3	4.2	4.7	5.5	7.2	5.6	6.1	5.0	3.6	3.1	2.0	2.3	1.9	2.1	3.1
5	0.5	0.5	0.8	1.4	1.3	0.5	0.7	1.0	3.0	3.0	5.0	5.8	4.7	5.6	5.1	4.9	4.6	4.1	3.6	3.8	2.0	1.7	2.6	1.2	2.8
6	1.9	1.0	0.6	1.1	0.7	0.7	2.1	1.1	1.7	3.1	3.4	5.7	5.1	5.0	6.9	6.7	4.9	4.8	3.5	3.0	2.8	3.4	3.3	5.1	3.2
7	1.1	2.0	1.0	0.5	1.0	1.8	1.8	0.9	1.8	3.3	5.7	5.1	5.2	6.0	5.1	5.9	5.1	4.1	3.7	4.9	2.1	2.6	2.6	1.9	3.1
8	2.0	1.5	0.7	0.4	0.8	0.8	1.0	0.5	1.7	3.1	3.7	5.6	6.5	5.3	5.6	5.2	4.7	6.4	4.5	3.0	2.3	2.1	2.6	1.4	3.0
9	1.8	3.0	0.4	3.6	0.5	1.3	1.2	0.6	1.9	3.3	4.5	5.2	5.4	5.2	6.5	5.7	5.8	6.4	3.5	3.0	4.8	4.1	2.2	3.2	3.5
10	2.5	0.5	1.1	1.7	2.2	0.7	0.6	1.0	2.4	3.0	3.5	5.3	6.6	5.1	6.6	6.5	4.2	4.5	3.8	3.1	2.0	1.9	2.8	2.9	3.1
11	1.1	0.7	1.4	0.7	0.5	1.4	1.0	1.3	4.5	3.9	4.3	6.9	4.6	5.6	5.9	5.1	4.9	5.0	4.0	3.4	2.4	3.5	2.7	2.8	3.2
12	1.8	1.0	0.5	1.9	0.5	0.8	0.5	2.0	1.8	3.4	3.7	4.8	4.8	4.8	7.8	5.4	6.5	4.1	3.5	3.8	2.0	2.8	3.1	1.4	3.0
13	0.9	0.5	0.5	2.2	0.7	0.7	1.1	0.4	2.0	4.2	4.3	4.7	6.9	5.4	5.1	6.4	6.2	6.6	5.3	3.9	2.9	3.8	2.3	1.4	3.3
14	0.6	1.6	0.7	0.9	0.5	0.9	0.5	3.0	4.0	3.6	4.9	4.6	4.6	5.7	5.4	5.9	5.4	4.3	4.7	3.2	2.9	1.7	2.3	1.1	3.0
15	0.6	1.5	0.9	0.5	0.9	1.1	0.7	1.5	3.5	4.1	3.9	5.0	6.1	4.9	7.3	6.7	5.2	4.9	4.6	2.9	3.6	3.1	2.8	4.2	3.3
16	3.6	1.5	1.2	2.7	0.5	2.0	0.6	1.9	1.5	3.2	5.5	4.7	5.3	6.5	6.2	4.8	6.4	4.6	3.5	3.2	3.7	3.7	2.4	1.4	3.4
17	2.2	1.7	0.4	0.5	1.0	1.5	0.7	0.6	1.8	3.9	3.9	5.2	5.3	6.7	5.2	5.1	4.4	6.2	4.1	3.0	2.4	2.0	2.0	1.1	3.0
18	0.4	0.8	2.9	3.1	1.1	0.6	2.0	1.2	1.5	4.0	4.2	4.5	5.4	5.3	6.0	5.7	5.6	4.4	3.7	4.2	2.0	4.7	2.0	1.0	3.2
19	1.3	0.8	1.6	0.7	2.1	1.8	0.5	0.5	2.6	3.1	3.8	4.0	5.0	5.5	5.1	5.2	4.7	4.6	4.1	3.6	2.9	2.1	2.0	1.6	2.9
20	1.7	1.8	0.7	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	1.6	3.6	4.7	4.0	5.2	4.8	4.9	5.2	4.6	6.5	4.0	6.9	2.2	1.6	2.3	2.5	3.0
21	0.9	2.5	0.5	0.7	1.3	0.6	3.8	1.3	3.3	3.7	5.1	4.5	5.7	6.3	5.6	5.3	4.3	5.9	3.7	3.0	1.9	1.5	1.9	2.1	3.1
22	0.4	0.5	3.4	1.4	0.7	2.0	1.1	0.4	1.8	4.4	4.4	5.5	5.8	5.0	4.9	5.5	4.3	4.6	3.7	3.3	2.7	1.5	2.8	1.8	3.0
23	1.1	2.7	2.6	0.7	0.5	2.4	0.7	3.9	2.3	3.7	3.4	4.2	4.9	4.7	6.2	4.9	5.1	4.8	5.1	4.2	2.7	3.0	2.5	1.3	3.2
24	2.1	1.0	0.6	0.5	0.8	0.4	1.1	1.9	4.3	3.6	4.3	5.6	5.5	5.4	6.4	8.0	4.3	4.1	5.2	4.6	4.1	1.9	2.1	4.5	3.4
25	1.7	3.3	1.7	0.9	1.7	0.5	0.7	0.9	1.5	3.3	3.4	6.9	4.7	4.8	5.0	5.2	6.2	4.0	5.8	5.5	2.3	4.1	2.3	2.2	3.3
26	0.9	1.1	2.0	0.7	2.6	1.7	0.5	0.4	1.5	3.6	5.0	4.1	6.2	6.5	5.5	5.8	6.0	4.3	4.6	4.4	3.4	2.2	2.0	1.6	3.2
27	1.9	0.9	0.7	3.2	1.3	3.2	3.1	2.9	2.5	3.6	3.4	4.1	4.7	6.1	5.8	4.9	4.3	4.7	3.9	2.9	2.8	2.0	4.9	1.0	3.3
28	0.4	1.0	1.5	0.6	1.4	0.6	0.5	1.0	1.7	3.1	5.2	5.0	6.3	6.6	6.5	4.8	6.3	4.2	4.3	3.4	4.3	2.6	3.4	1.1	3.2
29	4.3	0.5	0.7	1.1	1.6	0.9	1.5	0.5	2.1	3.4	5.0	4.0	5.0	4.7	6.8	4.9	4.6	5.0	6.0	3.8	2.2	3.3	2.4	2.3	3.2
30	3.5	1.6	0.8	0.4	2.3	0.4	1.5	0.5	2.2	2.9	3.6	4.1	5.2	4.8	5.3	4.9	5.8	4.2	3.9	3.2	3.8	1.7	2.4	1.2	2.9
31	2.1	2.1	1.0	0.9	0.8	2.5	1.1	0.9	2.3	3.7	4.1	4.8	4.8	6.7	5.2	7.6	7.0	4.8	3.9	3.3	3.1	1.8	2.0	2.0	3.3
Rata-rata/jam	1.7	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.3	2.4	3.5	4.3	4.9	5.4	5.6	5.8	5.7	5.2	4.9	4.2	3.6	2.8	2.6	2.5	2.0	3.1

LAMPIRAN 12
DATA KELEMBABAN dan TEMPERATUR UDARA
TAHUN 2012

Bulan	Kelembaban (%)	Temperatur (°C)
Januari	68	24,8
Pebruari	68,1	25,6
Maret	66,8	26,2
April	67,2	25,9
Mei	67,1	26,1
Juni	67	25,5
Juli	67,8	24,9
Agustus	68,7	25,7
September	69,4	26,2
Oktober	69,8	26,7
Nopember	73,5	26,3
Desember	70,7	25,8
Rerata	68,67	25,8

Data Kelembaban Tahun 2012

Bulan : Juli

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	77.2	81.1	82.1	80.3	84.2	83.5	58.3	73.8	76.1	34.5	39.3	33.8	49.0	33.5	76.6	69.7	68.4	71.2	85.0	77.7	73.8	82.2	72.5	84.4	68.7
2	84.2	78.3	79.8	76.9	77.0	83.8	75.2	68.0	67.1	59.7	33.1	48.0	68.8	37.0	52.5	56.2	66.4	52.3	72.8	78.0	82.5	74.5	73.6	76.1	67.6
3	76.7	82.0	76.4	79.7	78.6	84.0	58.3	60.3	76.9	58.9	36.5	31.9	51.7	39.7	62.0	65.2	58.1	52.6	81.7	73.8	80.4	72.6	79.3	78.0	66.5
4	80.9	82.7	83.4	75.3	81.7	75.1	62.4	58.0	66.4	58.7	48.4	45.1	64.4	46.7	59.0	54.0	50.4	58.6	72.7	76.8	73.1	76.0	78.4	74.6	66.8
5	79.6	80.7	77.1	80.4	83.6	79.4	80.2	77.2	61.4	47.0	60.0	39.3	53.1	64.0	60.8	54.3	53.0	76.6	69.5	76.2	77.6	77.3	72.4	75.8	69.0
6	81.1	75.8	77.7	75.8	76.7	80.0	68.8	73.5	74.7	39.2	66.5	40.5	57.7	38.5	58.0	53.8	66.3	56.2	77.8	83.2	82.6	77.9	69.5	70.3	67.6
7	81.5	80.4	76.3	79.9	78.7	75.9	80.8	75.4	78.5	32.5	53.9	65.2	46.4	73.4	68.6	65.9	61.4	54.8	78.8	69.8	79.5	78.9	77.6	84.1	70.8
8	77.5	79.0	81.7	84.2	82.5	83.7	70.1	65.0	74.6	66.6	32.3	37.9	34.4	43.3	60.8	71.0	52.9	66.5	69.9	70.9	73.2	75.1	71.9	71.1	66.5
9	80.1	81.4	79.9	77.1	79.8	83.8	66.4	68.3	78.5	36.8	37.6	55.5	44.2	30.0	69.8	71.8	69.7	56.2	83.3	82.3	82.0	77.2	73.8	74.9	68.4
10	80.6	79.1	84.7	76.2	77.0	78.8	63.2	58.5	60.2	34.4	71.1	31.5	62.9	33.8	73.4	70.5	62.1	73.1	84.2	70.3	70.9	72.5	83.2	80.0	68.0
11	80.9	79.2	84.5	81.8	82.9	79.5	59.3	60.7	79.6	34.9	39.0	53.0	73.2	30.6	50.5	61.6	54.2	50.3	72.8	70.8	83.5	81.0	80.4	78.1	66.8
12	84.0	79.1	79.8	75.4	77.5	75.6	69.0	77.6	63.6	36.2	58.3	38.3	59.3	43.5	64.9	70.4	65.5	60.9	84.4	72.5	74.7	80.8	81.1	74.2	68.6
13	80.5	79.0	81.3	79.6	75.5	84.5	77.0	66.1	59.5	49.6	30.4	70.3	46.1	64.0	78.2	77.0	68.7	65.2	70.9	72.4	73.3	81.5	70.1	72.4	69.7
14	81.4	80.2	84.8	82.0	75.3	77.9	64.7	67.2	60.1	41.8	55.7	66.5	50.9	63.5	50.9	74.9	74.4	61.0	79.6	71.3	76.3	79.1	81.5	70.4	69.6
15	78.8	80.2	81.5	82.9	79.0	84.5	58.9	76.0	69.0	57.3	59.6	35.1	36.6	33.5	50.1	71.6	55.7	62.8	72.5	79.8	79.8	70.6	83.9	70.0	67.1
16	77.5	75.4	75.5	84.2	76.2	76.2	62.6	63.5	73.1	50.7	56.7	33.6	31.7	55.3	70.8	56.3	60.6	58.6	76.6	78.9	74.0	76.7	83.7	73.1	66.7
17	81.7	77.7	82.1	82.7	83.0	79.8	68.6	63.9	80.9	33.5	39.8	32.0	40.4	35.7	63.5	61.0	51.4	51.4	74.8	83.9	76.4	80.1	74.8	69.1	65.3
18	77.8	83.5	82.8	84.5	75.0	83.1	59.4	66.0	61.8	37.0	31.1	52.6	34.3	38.3	64.2	68.9	56.0	50.8	69.4	69.9	84.8	72.0	82.5	82.4	65.3
19	75.5	83.5	83.8	75.4	81.2	85.0	78.0	60.0	75.0	53.0	41.0	71.5	43.9	43.9	67.0	56.2	71.2	58.2	73.3	78.4	73.1	80.1	75.8	75.9	69.2
20	75.7	79.6	75.0	78.9	81.3	75.7	61.1	67.6	72.0	34.2	35.9	48.3	55.1	62.5	53.9	66.3	57.3	58.2	73.5	82.9	73.8	81.6	76.4	78.6	66.9
21	76.1	78.2	76.8	77.5	82.2	75.1	62.9	79.8	61.2	34.7	33.0	40.2	52.3	34.7	75.6	63.1	50.8	56.5	70.3	75.9	76.4	81.1	80.3	75.7	65.4
22	84.2	81.9	82.3	76.0	82.9	75.1	63.8	73.2	74.4	35.0	31.5	33.9	56.2	49.2	51.2	54.4	55.8	62.5	79.3	73.6	78.4	74.2	80.5	73.1	65.9
23	81.2	75.9	81.5	79.8	82.4	78.8	71.7	65.7	59.6	31.2	48.8	36.8	65.8	39.7	75.3	50.1	71.9	57.7	83.3	82.4	82.3	77.9	73.9	84.1	68.2
24	79.8	83.6	76.1	78.4	83.5	78.3	69.3	60.4	62.3	47.4	42.6	33.2	40.0	46.4	50.8	61.1	59.7	64.8	74.0	72.2	71.7	72.7	72.3	69.5	64.6
25	78.8	82.5	76.9	76.4	77.2	83.5	61.1	58.9	77.7	62.8	72.5	45.7	50.0	72.2	61.2	53.6	65.9	71.9	83.6	71.5	76.8	70.8	70.0	69.2	69.6
26	78.8	84.7	79.9	80.0	79.7	76.6	71.7	71.0	75.3	53.7	67.2	30.4	72.3	61.9	63.0	51.9	73.3	58.6	70.2	70.4	72.1	77.4	74.7	74.6	69.6
27	82.4	82.7	78.9	79.6	82.7	83.1	72.2	78.7	73.8	74.4	37.0	56.4	31.4	69.6	71.8	62.9	53.3	68.7	83.7	73.0	78.1	78.3	83.2	82.9	71.6
28	84.8	78.0	83.1	76.1	77.4	77.4	63.1	73.3	58.1	59.5	39.1	38.9	43.8	37.2	67.9	72.2	62.3	77.5	77.7	82.0	79.1	71.8	73.3	82.3	68.2
29	77.4	78.3	79.6	80.2	83.9	82.4	63.3	63.5	77.4	67.8	55.7	41.2	64.3	32.2	58.0	68.8	76.7	57.7	75.1	81.3	70.7	72.8	78.7	82.9	69.6
30	77.9	83.4	75.7	83.5	82.6	81.5	70.8	59.0	58.5	62.1	32.1	34.6	32.0	32.8	52.3	66.5	66.4	69.5	76.8	75.5	81.4	70.8	80.8	82.2	66.2
31	75.4	76.7	79.7	81.4	79.3	82.6	61.4	75.2	65.7	33.4	33.7	48.8	40.9	66.5	62.3	67.7	54.4	57.8	76.6	76.9	77.9	71.8	78.7	75.8	66.7
Rata-rata/jam	79.7	80.1	80.0	79.4	80.0	80.1	66.9	67.9	69.5	47.0	45.8	44.2	50.1	46.9	62.7	63.5	61.7	61.2	76.6	76.0	77.1	76.4	77.1	76.3	67.8

Data Kelembaban Tahun 2012

Bulan : Agustus

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	82.7	79.4	75.2	79.0	79.5	76.4	62.0	66.9	66.3	74.3	59.6	52.5	61.0	47.1	58.6	50.6	73.8	60.7	74.6	81.0	81.2	69.6	71.6	68.2	68.8
2	81.9	75.9	78.7	83.5	82.4	81.0	68.3	60.1	58.6	48.0	53.2	58.0	42.2	67.9	79.3	60.0	54.8	52.6	69.1	67.0	69.4	67.2	78.7	69.6	67.0
3	80.9	83.1	83.2	76.3	78.0	78.4	69.2	76.4	68.8	59.7	40.5	40.7	46.9	57.0	57.5	56.1	59.3	51.0	76.3	67.4	72.6	74.1	73.2	71.9	66.6
4	76.0	84.1	84.3	78.0	78.7	78.4	73.0	68.0	77.6	60.7	54.0	54.9	61.5	53.9	74.5	69.6	75.0	54.1	68.6	69.6	80.8	70.9	78.8	80.5	71.1
5	78.6	82.5	78.0	81.3	81.8	83.6	78.9	58.8	68.0	52.1	61.5	65.2	65.8	41.5	75.7	76.5	64.4	71.8	69.0	84.7	68.4	67.0	77.9	76.4	71.2
6	76.2	79.3	80.9	82.4	82.7	77.6	64.7	62.2	66.7	57.8	45.4	75.8	60.4	45.5	50.5	59.1	73.6	62.1	72.9	83.6	79.5	82.7	69.6	76.7	69.5
7	75.9	82.8	77.2	76.9	75.5	82.3	65.5	72.2	64.2	62.1	76.2	62.8	70.4	40.8	53.1	66.8	51.1	75.6	82.1	79.3	76.8	78.4	75.7	81.8	71.1
8	76.8	80.8	76.7	80.2	81.2	77.8	68.2	79.3	60.5	59.9	46.1	45.4	58.7	52.8	60.6	51.0	56.5	54.1	74.1	75.0	70.9	68.3	70.9	76.2	66.7
9	81.4	76.1	77.1	80.2	81.5	84.5	62.9	63.0	71.0	40.1	49.2	74.1	46.0	53.1	55.8	65.3	52.8	64.6	68.1	68.2	74.6	75.2	77.1	81.6	67.6
10	82.1	84.1	84.4	77.1	77.6	77.2	69.5	68.4	71.6	58.3	73.2	67.4	71.1	51.9	51.5	57.8	56.7	57.7	76.3	71.8	68.4	81.3	70.9	67.2	69.7
11	79.5	76.2	83.0	84.1	82.1	79.6	73.0	66.8	58.5	41.3	67.8	40.4	49.4	42.6	75.1	53.7	50.2	50.3	68.7	71.5	71.2	79.8	73.0	71.0	66.2
12	78.3	84.8	77.7	75.9	76.0	80.3	70.2	61.9	66.0	60.4	41.0	74.9	46.5	42.5	53.8	79.5	59.6	61.6	73.8	71.2	74.6	78.0	68.5	74.6	68.0
13	83.6	75.1	78.1	83.3	83.3	76.1	65.7	66.9	72.4	66.7	47.8	61.0	44.2	52.1	59.3	64.8	62.6	77.1	71.3	77.9	81.7	82.9	80.0	71.8	70.2
14	75.8	82.7	82.3	77.3	83.3	84.0	78.6	74.9	71.6	59.9	50.5	59.1	60.2	43.0	58.4	58.2	66.8	63.7	74.9	79.7	81.1	76.1	77.0	69.7	70.4
15	81.4	76.9	76.8	79.8	78.6	78.1	79.0	58.2	70.0	44.1	63.8	40.2	59.4	57.6	63.9	54.4	52.2	51.3	78.3	78.9	76.0	80.7	70.4	67.6	67.4
16	75.1	82.6	76.4	83.1	81.1	77.9	69.5	58.8	60.3	45.4	49.3	51.1	42.7	54.8	52.0	51.6	61.4	50.6	83.3	76.7	78.5	84.0	69.0	77.1	66.3
17	78.5	75.8	78.9	81.9	76.0	76.5	58.2	77.4	61.1	77.8	59.9	60.2	51.1	52.7	61.2	54.0	74.8	79.9	83.3	69.6	82.9	67.0	68.4	73.9	70.0
18	79.3	80.3	75.5	84.8	84.6	77.6	63.6	61.6	62.5	42.2	41.7	54.2	51.3	63.7	58.1	66.4	73.7	62.4	69.2	68.3	80.6	67.1	78.9	83.7	68.0
19	76.6	78.1	75.5	77.4	81.8	78.4	65.2	74.4	76.8	47.8	55.4	61.6	51.1	64.7	55.4	64.0	60.8	51.1	72.1	82.7	68.6	81.7	82.0	69.7	68.9
20	80.8	84.8	82.0	80.6	80.1	79.4	77.3	73.2	78.2	52.4	40.4	75.5	62.2	59.0	52.9	66.7	51.3	71.3	69.0	77.8	77.9	77.8	71.0	77.9	70.8
21	80.3	76.5	83.1	76.9	84.7	81.5	61.9	73.6	66.9	40.2	42.1	50.1	51.0	70.4	68.8	63.3	55.5	52.2	79.4	68.9	77.5	81.1	77.6	67.0	67.9
22	80.2	82.3	78.6	76.5	81.8	78.0	71.8	75.9	66.2	45.8	43.2	49.8	56.2	42.8	50.5	50.1	61.7	50.5	76.7	78.0	82.0	82.2	71.4	84.2	67.4
23	76.7	81.0	77.6	81.0	76.1	80.7	60.3	72.4	58.8	47.0	60.6	43.1	76.3	66.4	72.1	60.7	73.1	57.8	78.9	68.8	68.3	74.9	76.7	68.1	69.1
24	77.2	77.9	80.4	75.6	75.2	76.8	61.2	75.0	58.3	55.1	45.8	40.7	46.6	45.0	59.6	66.3	55.7	74.5	80.9	74.2	68.2	69.8	69.1	77.4	66.1
25	83.5	77.5	78.5	76.0	80.2	80.9	79.9	79.8	63.5	50.2	43.5	60.1	56.2	46.4	54.7	67.6	50.7	63.6	72.9	76.4	72.4	78.4	79.9	81.0	68.9
26	80.5	84.7	81.9	76.2	82.4	83.7	73.5	79.3	59.5	68.1	58.0	43.7	46.9	48.3	50.2	59.1	62.1	70.9	78.0	67.8	76.8	81.7	76.7	67.2	69.1
27	75.3	81.0	75.4	77.4	83.8	80.8	58.9	63.2	61.4	73.9	60.8	60.2	51.3	56.4	72.0	66.0	78.8	65.0	77.3	78.3	73.0	73.6	70.3	75.4	70.4
28	77.5	81.0	81.7	80.1	80.1	79.1	60.0	65.9	59.5	58.9	59.5	45.8	55.7	68.3	71.1	79.8	51.4	61.3	75.2	78.4	76.4	79.9	78.1	67.9	69.7
29	81.3	79.7	77.2	84.9	78.0	79.2	66.8	77.9	72.6	51.3	56.6	56.2	49.9	42.1	60.2	55.3	56.1	56.2	73.2	70.7	71.9	80.3	80.1	73.4	68.0
30	83.7	80.5	78.2	84.1	76.6	83.1	65.5	71.9	73.6	67.2	43.2	69.8	45.4	40.0	52.5	54.0	58.0	79.4	74.1	78.6	79.1	84.7	68.5	72.0	69.3
31	80.9	77.4	84.1	83.8	78.4	84.9	76.3	65.1	63.1	58.8	43.0	50.3	55.9	64.5	60.3	61.7	52.4	53.5	75.3	67.2	82.6	68.2	74.6	67.7	67.9
Rata-rata/jam	79.3	80.2	79.3	79.9	80.1	79.8	68.3	69.3	66.3	55.7	52.7	56.3	54.6	52.8	60.6	61.6	60.9	61.6	74.7	74.5	75.6	76.3	74.4	73.8	68.7

Data Kelembaban Tahun 2012

Bulan : September

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	80.4	77.5	84.1	81.2	78.4	84.7	59.1	77.0	62.5	63.1	45.3	56.4	47.6	57.4	52.9	62.9	61.3	63.7	70.5	67.6	76.1	76.9	77.3	82.7	68.6
2	77.8	84.0	84.2	77.3	77.9	79.8	59.0	77.9	75.9	55.8	46.1	52.3	63.9	78.5	72.0	64.1	61.2	55.7	71.9	84.4	68.7	70.6	76.8	82.5	70.8
3	79.9	81.8	79.4	81.0	80.4	84.3	62.8	67.3	59.0	56.7	55.1	69.1	56.3	40.8	69.1	55.0	75.4	56.8	79.4	83.6	79.1	77.0	73.9	76.6	70.0
4	79.1	76.6	75.9	82.8	75.7	77.9	69.6	68.7	79.6	42.0	63.6	54.0	67.6	48.4	63.4	63.6	61.9	76.6	78.0	78.8	67.2	70.1	82.4	76.8	70.0
5	78.3	75.8	75.5	77.0	75.1	84.7	61.8	77.4	65.6	54.2	47.6	49.4	40.0	42.8	63.7	66.0	58.3	52.6	76.3	84.6	69.1	74.8	69.1	72.6	66.4
6	76.5	77.8	75.5	77.6	76.9	79.0	69.2	79.0	74.9	62.8	48.6	79.4	52.9	60.5	54.3	71.9	68.2	78.0	72.3	68.8	72.4	73.9	68.3	79.6	70.8
7	80.8	76.9	78.8	75.9	78.6	75.1	61.6	65.0	61.8	77.6	78.3	80.0	42.9	75.0	54.7	62.0	74.2	60.6	77.8	76.3	79.6	70.8	80.0	68.3	71.3
8	76.5	81.2	80.5	80.3	82.6	81.4	58.2	82.6	81.1	45.5	60.9	53.2	48.7	66.8	65.5	50.9	57.6	69.6	69.1	80.3	76.0	75.6	72.8	71.4	69.5
9	79.4	78.3	76.6	75.4	84.4	84.7	60.4	61.3	61.2	68.8	58.6	56.1	45.7	45.9	66.7	67.7	65.5	65.6	80.1	83.3	77.1	79.8	67.6	83.1	69.7
10	80.0	82.9	80.2	78.7	82.2	81.3	79.3	81.1	67.4	56.3	60.0	40.1	63.4	69.7	54.3	58.4	52.6	53.6	72.7	68.1	72.3	78.3	68.2	84.9	69.4
11	75.4	80.8	79.2	82.2	80.0	83.0	68.9	73.2	82.4	72.5	51.9	58.4	79.0	71.5	53.1	54.5	73.2	65.3	68.1	75.6	78.3	73.3	72.9	77.3	72.1
12	80.0	83.8	80.5	75.3	82.5	82.1	66.5	60.5	60.0	40.7	49.8	44.8	40.8	53.6	57.2	62.4	57.1	77.3	74.8	77.9	82.9	75.6	78.1	77.3	67.6
13	82.3	79.8	77.0	80.4	83.9	77.8	58.8	68.2	58.0	59.3	57.7	44.1	53.7	68.0	52.7	59.0	75.3	69.3	80.3	75.3	74.3	76.2	68.1	70.7	68.8
14	78.6	83.6	78.6	78.5	84.8	81.3	74.2	64.8	66.5	59.1	40.9	52.3	44.5	47.6	55.3	55.3	57.4	75.5	70.7	73.3	69.8	70.5	73.5	70.0	66.9
15	78.0	76.1	76.9	77.5	77.2	81.2	64.2	81.2	66.3	49.9	48.2	43.1	56.2	77.2	79.9	64.2	68.1	58.6	79.5	84.1	82.2	69.7	79.8	68.9	70.3
16	83.4	75.8	76.4	75.8	81.2	81.2	69.7	62.0	64.6	46.1	57.8	48.6	41.2	57.3	54.7	59.3	77.9	71.6	71.1	77.2	69.3	78.2	83.2	72.4	68.2
17	77.4	77.1	84.0	77.9	82.7	77.4	78.4	80.2	79.2	50.1	43.1	44.2	67.6	41.3	75.8	67.2	51.0	59.3	74.5	68.4	71.7	76.5	78.0	73.7	69.0
18	84.1	85.0	75.8	81.8	81.5	76.9	59.2	64.8	80.4	57.9	41.6	63.2	40.1	56.2	61.6	70.4	65.1	51.5	70.0	67.1	67.4	83.0	70.8	73.9	67.9
19	84.6	77.8	77.4	78.3	76.2	77.8	62.5	78.3	60.9	69.6	42.6	49.6	43.3	66.1	54.8	56.4	56.1	63.0	78.4	84.8	82.2	69.2	72.3	69.7	68.0
20	85.0	77.8	80.5	76.7	79.5	80.0	58.8	64.1	72.0	52.4	64.2	70.4	68.5	67.6	51.3	53.4	69.7	60.6	67.1	75.8	74.0	78.2	77.2	77.1	70.1
21	84.5	84.1	83.4	77.2	77.8	78.1	66.7	80.6	58.0	40.1	65.6	58.6	47.5	61.6	54.8	59.1	56.4	70.3	70.3	80.0	75.4	79.1	71.8	70.8	68.8
22	81.0	78.0	76.3	83.3	76.1	78.3	81.5	68.9	63.1	58.2	50.1	50.2	66.9	68.3	75.5	58.4	68.1	67.8	71.7	83.3	71.1	75.2	81.6	76.9	71.2
23	80.5	84.0	80.7	78.6	77.0	77.4	80.5	62.7	70.8	68.5	48.6	55.8	53.8	64.9	71.3	62.2	77.0	53.1	69.8	76.3	68.1	81.7	71.8	68.6	70.2
24	80.8	76.1	83.6	77.3	76.7	83.9	63.8	68.0	71.2	51.3	59.4	49.4	44.6	69.8	63.6	60.3	57.1	57.2	68.9	69.6	78.5	70.0	67.3	72.5	67.5
25	76.3	82.3	82.6	82.2	76.5	82.4	64.3	74.3	81.0	74.7	55.3	46.5	42.4	45.0	73.3	60.3	51.4	68.1	72.0	76.4	75.4	81.0	74.7	74.2	69.7
26	76.3	84.6	75.1	81.8	81.0	77.2	59.3	73.0	65.5	71.5	61.2	66.7	70.8	79.5	60.5	56.4	62.8	64.8	78.7	80.2	76.8	77.4	74.8	69.1	71.9
27	84.8	76.3	81.0	79.1	76.1	75.5	72.1	61.2	74.1	45.8	41.2	45.8	72.1	66.8	64.1	72.2	79.3	53.6	71.1	76.7	68.0	72.7	78.8	83.9	69.7
28	81.2	84.3	80.9	76.3	81.6	78.3	60.3	63.4	80.1	42.3	41.6	75.7	52.7	50.7	68.6	52.5	54.4	68.7	78.6	71.7	74.6	76.4	83.7	72.9	68.8
29	78.4	81.7	79.4	75.6	81.0	75.3	59.3	80.0	71.9	59.5	61.1	65.7	71.3	61.8	61.7	51.0	51.4	57.7	77.6	68.6	71.4	68.2	82.9	77.3	69.6
30	75.1	79.9	75.1	79.9	84.7	77.9	79.3	65.9	71.2	41.4	42.5	46.3	70.3	61.6	66.1	65.8	79.3	53.9	77.8	72.0	73.5	68.0	75.5	69.7	68.9
Rata-rata/jam	79.9	80.1	79.2	78.8	79.7	79.9	66.3	71.1	69.5	56.5	52.9	55.7	55.2	60.7	62.4	60.8	64.1	63.3	74.0	76.3	74.1	74.9	75.1	74.9	69.4

Data Kelembaban Tahun 2012

Bulan : Oktober

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	79.8	76.2	75.2	81.5	77.8	84.4	61.1	59.0	72.4	53.2	56.3	67.3	72.0	56.3	58.7	51.5	59.9	65.5	70.1	71.4	79.2	76.9	75.5	83.5	69.4
2	77.7	81.7	84.3	76.9	76.9	83.9	81.7	62.0	81.4	56.6	57.0	73.9	49.2	75.3	52.1	56.6	53.5	68.2	75.1	82.1	76.3	70.3	84.2	76.2	71.4
3	83.8	81.2	82.4	76.2	75.7	82.7	67.9	64.5	61.6	44.6	58.8	55.6	70.8	62.7	64.7	73.8	63.1	63.8	84.0	80.3	75.6	78.2	81.0	73.3	71.1
4	75.8	76.2	81.4	79.4	79.5	82.4	65.0	76.7	70.6	56.3	57.4	44.0	56.3	45.6	78.7	60.8	78.5	61.6	75.1	81.9	72.2	79.6	84.6	74.2	70.6
5	82.0	75.2	79.6	77.6	84.0	79.6	60.1	81.2	58.8	43.6	44.0	59.7	52.7	53.9	74.1	67.3	70.7	60.5	72.1	73.6	80.7	78.2	73.0	82.7	69.4
6	78.5	80.6	83.3	83.5	79.6	76.1	75.0	60.8	79.2	74.5	58.4	56.4	48.3	42.1	65.8	67.6	51.4	66.6	76.6	71.6	77.0	71.5	74.6	77.6	69.9
7	82.6	75.6	80.2	79.7	77.4	76.6	82.3	58.5	82.8	46.3	48.8	62.5	50.8	44.3	60.3	61.2	51.0	77.3	79.1	72.6	70.9	79.3	80.3	70.8	68.8
8	76.1	82.9	83.3	75.1	77.5	78.8	72.0	73.6	81.9	69.7	71.8	70.2	61.3	51.3	52.9	59.5	75.0	79.9	80.2	82.1	84.5	69.7	74.6	73.1	73.2
9	75.2	75.5	77.9	78.5	82.4	82.2	70.5	68.0	64.3	43.9	54.3	57.7	55.3	52.8	60.6	60.4	63.8	65.3	69.7	71.4	72.4	78.7	74.7	73.7	67.9
10	79.4	83.9	75.9	80.2	77.8	78.4	64.9	79.8	77.6	42.3	48.8	62.3	40.8	47.7	55.8	51.3	74.6	59.9	81.8	69.4	78.0	70.2	79.3	76.9	68.2
11	77.5	80.2	78.1	77.2	81.8	84.1	59.3	71.0	82.4	45.2	51.7	73.7	65.3	41.2	66.4	53.0	51.0	77.8	73.8	70.7	74.8	77.5	83.4	84.2	70.1
12	77.0	78.8	82.6	76.1	77.6	78.4	80.3	77.3	65.0	61.1	63.5	65.4	52.3	46.3	73.5	52.2	77.9	62.6	78.0	78.5	71.2	74.5	69.2	75.4	70.6
13	76.6	84.7	80.8	83.3	80.8	76.9	75.1	71.3	61.4	67.3	68.8	47.7	40.7	46.0	60.5	59.0	61.1	78.4	77.4	69.2	78.2	74.4	73.2	81.3	69.8
14	75.9	83.5	82.6	80.6	81.5	80.3	64.0	62.1	71.6	44.8	53.5	69.8	46.3	57.6	57.4	55.4	63.6	70.6	74.3	70.4	84.7	71.4	80.9	74.5	69.1
15	81.1	84.5	80.9	82.6	76.7	82.4	73.6	67.9	59.2	65.1	47.0	52.0	54.7	60.5	57.1	60.0	75.3	52.6	77.8	76.7	80.2	73.5	72.7	80.6	69.8
16	81.4	78.2	77.0	79.8	78.1	78.6	66.4	76.7	61.0	61.3	53.4	61.1	47.2	59.5	72.0	54.0	55.7	53.2	81.8	71.2	79.4	69.0	74.7	79.2	68.7
17	83.1	77.9	79.2	80.0	84.9	82.5	72.5	62.6	60.5	55.5	45.2	68.3	42.6	42.5	66.5	64.8	59.2	55.8	72.8	72.5	83.2	82.1	73.3	80.2	68.7
18	77.9	75.7	78.1	78.3	78.6	77.6	75.6	73.2	79.9	51.7	66.5	55.9	52.0	41.6	63.7	73.3	56.2	72.0	75.2	71.1	73.7	73.7	70.6	73.4	69.4
19	75.9	79.1	75.1	83.0	79.6	79.9	78.3	62.6	76.2	42.4	58.9	64.8	73.1	43.8	75.4	78.2	71.8	53.1	74.1	79.9	69.5	84.4	84.7	77.2	71.7
20	78.9	78.1	78.4	82.6	83.2	75.8	75.8	76.6	73.0	44.5	40.5	42.1	43.3	69.4	61.2	58.4	70.3	78.4	76.7	79.2	78.6	80.0	84.0	76.5	70.2
21	84.6	82.4	82.9	77.7	83.8	78.6	73.9	74.4	70.3	50.7	41.2	48.1	58.4	40.0	71.8	51.6	57.7	57.9	78.2	69.5	70.5	77.6	73.2	78.0	68.0
22	79.2	78.6	79.1	84.5	76.3	77.6	66.0	65.4	65.3	54.7	72.0	44.7	43.2	41.9	53.7	59.0	75.5	63.2	84.8	78.1	80.5	75.5	76.7	72.0	68.6
23	75.2	81.5	80.0	81.4	84.9	75.1	65.9	65.2	68.3	51.9	57.3	62.0	72.1	57.2	70.7	52.3	58.9	55.7	74.4	69.2	69.3	78.3	81.5	75.7	69.3
24	79.0	82.9	75.1	82.4	76.9	77.5	70.1	68.1	60.0	49.7	54.9	71.4	58.2	59.8	73.6	58.4	62.8	61.7	73.0	83.8	79.8	81.2	80.2	78.6	70.8
25	79.0	75.7	75.1	84.4	75.3	79.7	59.4	66.2	75.1	42.3	51.7	40.6	46.5	51.8	74.9	55.6	61.6	53.8	71.9	76.0	77.4	80.1	73.6	79.1	67.0
26	83.2	80.9	83.7	80.6	76.8	77.6	70.4	72.7	82.5	49.0	59.6	43.0	65.5	58.0	60.4	63.3	62.2	60.6	73.7	70.8	70.4	84.6	75.3	83.2	70.3
27	77.8	84.8	83.2	84.2	82.9	78.1	58.8	71.7	81.1	67.9	56.6	60.4	51.6	64.4	72.3	71.4	77.4	69.5	72.7	70.0	77.4	77.6	73.3	71.0	72.3
28	83.4	82.9	79.2	83.3	75.8	75.9	76.0	67.2	71.9	65.6	49.1	61.7	63.2	45.1	63.6	77.0	53.7	66.3	75.1	76.1	73.7	81.3	73.6	70.3	70.5
29	79.2	80.7	75.0	81.1	80.3	78.8	59.2	62.4	67.2	52.7	48.2	42.0	54.8	76.4	53.2	62.1	67.0	78.1	77.1	77.2	82.0	81.5	78.2	71.6	69.4
30	78.4	75.5	77.7	75.5	79.7	81.0	66.8	67.9	68.8	43.4	71.1	73.7	46.7	60.3	56.5	64.6	68.4	53.2	77.5	74.6	71.0	81.1	70.4	85.0	69.5
31	77.4	80.5	80.4	84.3	80.3	83.3	73.7	78.3	62.0	70.1	60.1	76.7	45.2	53.5	58.5	66.9	51.3	50.5	76.8	75.0	73.5	84.3	82.1	76.8	70.9
Rata-rata/jam	79.1	79.9	79.6	80.4	79.5	79.5	69.7	69.2	70.8	53.8	55.7	59.2	54.2	53.2	64.1	61.3	63.9	64.3	76.2	74.7	76.3	77.3	77.0	77.0	69.8

Data Kelembaban Tahun 2012

Bulan : Nopember

Hari-ke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari	
1	76.1	79.7	79.1	84.9	84.8	83.1	64.9	68.5	64.7	53.5	54.4	67.8	60.4	53.2	70.6	64.4	79.1	67.7	78.6	77.6	79.3	82.3	78.1	77.6	72.1
2	79.6	83.4	75.2	75.3	77.7	77.6	70.8	68.6	61.0	53.2	64.3	70.7	60.9	63.6	60.4	64.3	71.6	74.4	81.9	78.0	75.0	80.2	73.6	78.0	71.6
3	76.6	84.9	76.4	82.9	75.2	79.7	69.9	66.9	75.4	72.1	59.9	73.1	56.5	74.1	74.5	77.8	68.2	74.5	75.9	74.1	84.7	84.5	82.5	74.2	74.8
4	79.7	81.0	84.6	77.5	77.8	76.5	62.0	61.2	72.9	58.2	74.3	65.2	52.7	79.4	76.9	74.9	65.8	70.8	73.3	75.4	79.2	76.9	77.7	73.9	72.8
5	75.9	76.9	83.6	80.7	76.0	82.8	66.3	66.1	81.7	73.8	61.5	58.8	51.1	60.5	64.6	78.2	83.3	65.6	77.0	83.8	78.1	77.0	76.5	74.5	73.1
6	77.9	78.9	75.8	83.0	81.6	81.5	82.1	74.8	70.9	78.7	68.7	61.1	51.4	68.5	74.3	81.9	68.1	78.8	79.2	79.4	73.1	82.3	83.8	76.4	75.5
7	81.9	77.2	79.3	76.9	81.4	79.5	70.1	72.1	73.3	70.4	71.0	79.2	66.2	65.2	60.5	82.3	69.4	73.3	74.2	80.0	84.7	84.8	80.9	78.2	75.5
8	80.4	76.6	84.8	80.3	78.0	83.2	63.7	60.5	75.0	55.9	50.4	66.2	63.0	51.5	67.4	83.5	61.3	63.2	78.1	80.2	79.0	78.2	80.3	79.8	71.7
9	81.4	84.3	80.4	82.0	78.1	82.5	60.6	61.1	79.0	58.3	69.4	61.9	60.5	53.6	67.0	81.6	62.4	60.7	81.1	78.5	82.9	82.1	73.4	83.5	72.8
10	78.4	76.8	77.1	78.8	76.2	82.4	60.3	74.6	65.0	57.6	53.9	70.1	57.7	71.6	61.4	62.4	73.6	69.9	79.8	79.2	79.5	75.1	80.2	83.9	71.9
11	77.9	83.2	80.4	78.4	81.0	83.4	70.7	80.8	65.7	78.1	65.7	55.7	79.9	79.0	61.0	79.2	63.4	67.5	74.1	78.8	83.2	84.9	81.5	80.9	75.6
12	77.3	83.5	78.0	79.3	80.2	77.6	76.6	79.0	60.2	67.2	69.8	54.9	57.0	54.5	78.2	76.4	64.1	82.7	81.0	82.7	80.0	75.3	73.7	79.0	73.7
13	76.0	80.2	82.7	76.5	77.0	79.2	68.0	74.3	62.9	53.0	55.5	70.3	50.7	63.4	72.9	81.3	70.9	73.5	85.0	78.2	79.3	82.9	83.4	74.1	73.0
14	76.6	84.2	83.3	76.9	82.2	79.2	71.6	78.0	74.7	79.9	74.4	78.3	67.1	71.3	62.2	78.7	61.7	73.0	79.0	75.7	74.8	74.1	73.4	80.2	75.4
15	75.6	81.5	80.6	83.7	79.8	84.9	79.1	72.7	67.5	69.3	57.6	59.1	65.1	61.1	80.0	60.3	63.2	73.2	78.8	81.1	74.0	76.6	80.5	83.2	73.7
16	76.7	76.4	79.0	76.3	84.6	79.7	73.0	61.3	71.4	65.4	57.8	73.0	61.4	73.5	78.0	61.6	62.4	60.3	77.0	81.2	75.7	75.3	82.4	81.2	72.7
17	76.2	76.6	77.6	77.7	79.7	84.0	80.6	80.6	62.4	53.5	72.9	60.5	63.6	56.8	73.3	65.6	61.3	65.4	75.6	75.8	73.5	79.0	84.9	76.3	72.2
18	82.2	76.6	78.0	84.4	84.1	79.3	64.7	63.4	76.2	51.7	70.3	74.6	72.0	75.9	68.9	64.0	65.5	71.6	84.5	77.3	74.1	81.8	82.6	84.1	74.5
19	84.2	82.0	81.2	77.3	82.2	84.6	76.7	69.3	73.1	53.2	69.4	66.0	65.2	71.4	74.3	76.0	81.6	82.7	73.2	83.6	79.9	78.0	80.1	79.7	76.0
20	82.3	83.0	80.9	75.6	81.8	81.4	71.0	67.0	64.3	58.6	60.4	62.7	53.3	54.8	76.9	82.9	61.4	61.3	73.7	83.9	83.6	73.5	76.6	76.1	72.0
21	82.5	79.7	84.6	75.4	81.1	78.8	67.4	60.3	62.7	72.0	52.3	53.3	66.9	76.5	76.0	76.8	74.8	74.5	80.1	83.1	78.6	73.5	79.2	73.8	73.5
22	79.3	82.9	76.8	83.3	75.2	81.1	66.7	82.6	74.0	63.0	52.1	69.7	59.4	58.8	79.2	64.2	75.0	70.3	83.2	79.5	82.3	79.6	83.5	81.8	74.3
23	80.7	84.7	84.6	83.3	84.9	75.2	80.4	72.9	71.2	54.5	64.0	57.0	56.1	63.0	68.3	77.8	70.2	66.2	83.5	77.4	79.4	75.2	79.8	76.6	73.6
24	76.3	76.1	79.6	80.4	83.0	84.2	61.9	77.8	76.4	72.2	79.1	74.4	65.4	73.1	74.0	81.1	76.1	68.7	79.2	80.7	82.6	74.2	77.3	76.2	76.2
25	75.6	79.0	76.8	77.7	80.5	80.8	80.7	78.1	65.2	60.4	58.4	70.6	63.5	63.4	72.7	63.7	79.4	65.0	74.3	82.0	76.9	77.9	79.9	74.3	73.2
26	76.7	81.8	82.4	79.3	81.4	83.9	61.1	65.6	64.6	52.4	58.5	71.7	59.0	64.4	64.4	71.7	69.8	67.0	80.6	83.7	83.4	82.1	83.5	78.1	72.8
27	84.4	79.0	82.3	76.6	76.8	81.5	63.2	82.4	63.2	71.9	71.7	66.7	54.1	50.3	70.3	68.1	81.1	79.2	81.1	84.8	83.9	73.6	75.0	77.9	74.1
28	75.7	78.4	77.6	82.2	78.0	80.8	73.5	69.4	64.1	57.4	69.5	54.0	59.7	64.1	68.6	65.6	75.0	60.9	76.2	76.1	78.2	81.8	76.9	78.1	71.7
29	77.6	81.9	79.8	77.1	82.7	83.7	74.4	81.7	61.9	62.0	77.6	58.2	70.2	77.7	68.1	60.5	67.1	67.8	77.6	76.9	77.1	82.2	84.0	73.9	74.2
30	76.6	80.8	77.7	80.8	76.0	79.6	61.3	78.3	71.0	67.5	57.6	71.1	67.4	59.6	64.7	64.7	60.5	60.5	78.3	78.1	78.8	75.5	81.2	74.2	72.1
Rata-rata/jam	78.6	80.4	80.0	79.5	80.0	81.1	69.8	71.7	69.0	63.2	64.1	65.9	61.3	65.1	70.5	72.4	69.7	69.7	78.5	79.6	79.2	78.7	79.5	78.0	73.5

Data Kelembaban Tahun 2012

Bulan : Desember

Hari-ke	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	84.4	78.3	83.9	82.0	76.6	79.2	60.6	68.0	60.9	45.5	61.3	40.8	45.6	58.5	62.9	76.3	70.8	69.9	76.1	70.3	83.4	82.7	77.5	70.6	69.4
2	79.8	83.2	78.6	75.2	84.6	77.0	74.8	62.8	82.1	54.2	62.1	68.5	51.8	73.2	76.7	79.2	68.8	69.4	74.2	71.5	79.6	69.0	75.0	81.5	73.0
3	81.5	76.0	76.4	78.1	82.7	83.8	58.9	71.4	64.3	75.5	51.8	60.2	57.0	75.5	62.9	72.7	72.5	73.5	70.4	74.7	70.4	77.3	77.4	72.0	71.5
4	82.5	78.3	83.7	84.4	83.2	81.1	66.5	66.6	63.3	41.9	42.3	44.4	69.3	44.9	74.6	78.6	64.8	72.4	71.0	84.9	80.4	81.7	84.9	73.4	70.8
5	82.3	83.9	83.5	84.5	84.6	83.6	59.1	81.1	60.0	45.4	40.0	67.2	49.3	70.5	63.5	74.0	77.8	61.6	74.9	69.8	70.3	71.5	75.9	76.4	70.4
6	78.7	77.8	84.5	76.4	82.2	75.4	67.8	69.6	64.3	53.5	72.8	46.3	73.2	45.6	79.6	62.5	72.0	60.6	76.7	72.9	80.6	72.6	70.4	82.6	70.8
7	77.6	83.8	80.1	78.1	75.3	79.0	64.8	72.9	76.0	45.4	41.6	58.1	45.2	48.6	77.7	69.6	68.6	69.1	73.5	80.1	72.2	70.5	80.2	75.4	69.3
8	75.7	78.9	80.3	78.3	77.1	77.0	73.6	68.7	63.2	42.3	48.8	42.3	52.2	78.1	73.0	71.7	76.1	66.1	69.7	76.9	77.0	71.5	84.3	71.0	69.7
9	75.2	77.2	76.4	79.9	82.6	82.1	80.3	79.2	82.8	47.4	52.3	46.9	47.9	50.3	70.5	62.8	62.3	68.9	81.3	76.7	80.1	81.6	84.1	71.5	70.9
10	76.1	75.7	76.5	79.0	78.4	82.0	74.8	60.2	79.0	49.0	52.3	45.9	66.7	67.5	62.1	63.6	64.4	64.8	75.9	80.9	78.9	82.0	71.0	78.9	70.2
11	83.2	79.3	81.7	79.6	84.7	82.0	73.5	62.7	61.3	54.4	63.4	44.6	77.7	60.5	63.2	74.5	77.4	79.6	71.8	72.1	73.8	81.9	75.7	71.1	72.1
12	75.3	77.4	75.8	78.9	78.8	85.0	72.0	82.6	76.6	78.4	63.5	69.3	57.5	49.9	60.1	67.2	78.1	74.3	69.4	71.3	76.2	74.6	70.1	79.0	72.6
13	84.7	81.3	83.3	76.3	75.6	83.6	61.6	74.2	61.5	41.3	61.5	66.1	45.6	64.8	76.7	70.0	78.5	70.4	70.4	69.9	78.8	76.1	83.3	83.4	71.6
14	82.3	82.8	77.0	79.1	83.5	82.8	73.1	72.7	79.1	44.9	59.1	69.9	51.1	59.3	73.2	79.1	62.0	62.3	80.8	75.7	79.3	79.1	83.3	71.6	72.6
15	77.8	79.3	81.7	76.8	81.4	81.3	66.0	80.1	72.7	42.0	41.2	65.9	50.0	54.9	77.5	69.2	68.8	68.1	70.7	75.9	69.6	71.8	72.5	82.6	69.9
16	83.6	77.4	84.7	76.3	78.4	84.3	64.7	80.4	77.1	41.9	78.3	70.1	47.4	61.2	70.0	72.2	77.9	72.2	81.4	77.8	72.3	77.6	76.0	72.1	73.1
17	81.2	85.0	77.1	82.9	79.7	79.0	69.8	64.3	77.5	59.3	40.9	75.6	43.8	50.0	71.3	73.2	70.2	63.4	82.4	82.3	81.1	81.0	78.4	80.6	72.1
18	78.0	75.0	81.7	81.7	75.7	80.2	67.2	70.6	66.5	67.9	50.9	51.4	46.2	61.5	60.1	67.1	74.4	70.7	72.4	70.2	83.6	72.3	69.1	72.2	69.4
19	83.6	80.9	76.7	77.1	78.8	80.3	61.0	58.4	62.6	40.2	48.2	44.8	48.8	40.7	72.6	76.3	65.1	60.9	72.4	80.1	73.0	72.3	77.3	70.6	66.8
20	78.5	81.3	79.7	83.5	84.4	81.4	66.4	72.9	71.6	46.2	68.2	61.9	42.1	63.4	71.7	61.2	61.7	78.5	84.6	81.1	73.2	81.3	70.9	77.5	71.8
21	76.2	75.8	77.9	82.0	78.5	83.6	61.3	73.4	80.5	43.9	42.1	47.6	51.4	49.5	71.9	75.2	79.9	63.0	74.2	80.8	72.7	73.9	70.9	74.6	69.2
22	75.7	79.0	76.4	78.8	75.9	82.6	82.7	80.8	64.8	60.8	44.3	74.4	58.2	45.6	66.3	64.5	64.8	69.4	70.2	71.8	78.3	79.1	70.6	74.5	70.4
23	81.9	78.8	79.6	83.6	79.4	77.2	59.2	81.9	73.9	69.1	65.0	41.6	58.8	42.9	64.0	67.2	78.5	69.7	69.2	70.1	76.9	76.1	72.7	76.1	70.6
24	75.3	79.6	76.6	84.8	81.8	80.3	59.7	79.0	59.6	56.0	60.8	65.0	56.9	74.9	70.6	74.1	68.4	67.4	82.1	74.4	74.5	78.6	69.5	78.0	72.0
25	81.9	81.5	82.1	75.3	78.1	82.2	63.4	75.5	77.1	76.0	46.7	42.3	45.1	76.8	66.7	64.2	68.3	65.0	76.8	74.6	71.9	74.5	82.3	70.0	70.8
26	75.0	75.5	76.7	76.9	75.3	77.5	62.0	78.6	61.3	63.7	50.0	60.9	63.1	51.4	65.4	71.5	73.5	77.3	74.3	71.5	74.1	69.1	71.8	84.9	70.1
27	77.0	80.8	81.7	79.1	80.8	76.0	69.4	60.9	59.6	45.8	40.5	52.7	56.5	79.7	64.6	74.5	65.3	64.6	70.3	74.1	84.9	71.1	73.2	83.1	69.4
28	78.0	77.0	79.3	82.9	75.7	83.8	69.8	71.6	65.0	75.4	54.5	77.8	73.2	44.1	62.0	61.1	71.9	73.5	81.4	84.3	72.3	83.4	80.4	75.9	73.1
29	80.6	77.4	82.6	75.7	76.3	76.1	58.2	73.6	71.1	45.2	54.3	49.2	56.1	40.9	62.0	66.8	69.5	65.5	84.7	74.0	74.3	71.5	74.9	76.6	68.2
30	83.3	76.1	78.0	84.0	78.0	82.4	71.2	58.6	64.2	53.2	43.2	73.3	47.1	78.1	70.0	68.1	62.7	67.0	78.4	82.6	74.0	76.8	73.1	76.7	70.8
31	75.8	83.0	76.8	79.2	75.0	80.6	62.4	60.3	72.3	64.2	52.7	78.2	40.7	43.8	69.5	77.8	66.5	62.9	69.4	70.2	81.6	75.8	84.8	73.2	69.9
Rata-rata/jam	79.4	79.3	79.7	79.7	79.5	80.7	67.0	71.4	69.4	53.9	53.4	58.2	54.0	58.3	68.8	70.5	70.4	68.4	75.2	75.6	76.4	76.1	76.2	76.1	70.7

Data Temperatur Tahun 2012

Bulan : Juli

Hari-ke	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	22.4	21.5	21.7	21.4	22.8	25.2	24.1	25.6	24.9	23.3	27.0	26.5	28.6	28.1	27.9	26.5	26.2	25.9	24.9	24.2	24.9	24.1	24.8	24.9	24.9
2	22.3	22.3	22.5	22.4	22.3	24.4	25.4	24.6	26.2	23.7	26.8	28.7	28.7	29.0	28.6	27.0	26.4	25.7	24.9	24.9	24.7	24.3	24.5	24.5	25.2
3	21.1	22.9	21.7	22.6	22.8	23.2	24.6	23.8	25.0	25.9	27.4	26.9	28.0	28.4	27.6	27.0	27.0	25.9	24.7	24.9	24.6	24.7	24.9	24.9	25.0
4	21.9	22.8	22.9	21.8	22.6	25.9	23.5	23.8	23.9	26.2	28.4	27.2	27.7	28.9	29.0	26.9	26.3	25.8	24.7	24.8	24.2	24.7	24.8	24.2	25.1
5	22.3	21.4	22.3	21.1	21.7	24.3	23.1	23.2	25.6	23.4	27.3	27.5	26.6	27.6	28.7	26.6	26.4	25.9	24.9	24.4	24.6	24.5	24.7	24.0	24.7
6	21.5	21.1	21.6	21.2	21.3	25.9	23.3	25.9	25.0	23.9	26.9	28.1	28.6	28.8	28.9	27.1	27.4	25.3	24.4	24.9	24.1	24.1	24.1	24.3	24.9
7	22.6	22.9	21.8	22.3	21.5	23.9	25.8	25.6	25.3	23.3	27.1	28.4	27.6	27.8	28.4	26.8	26.2	25.3	24.6	24.8	24.6	24.4	24.2	24.8	25.0
8	22.4	23.0	21.3	22.7	22.1	23.1	25.0	26.4	23.3	23.2	27.3	27.0	26.9	27.6	27.9	26.1	26.7	25.4	24.8	24.7	24.7	24.1	24.8	24.2	24.8
9	21.2	21.1	21.9	21.3	22.1	24.8	25.7	26.3	24.1	24.9	28.8	28.6	28.7	28.4	28.8	27.5	27.5	25.7	24.2	24.1	24.3	24.1	24.1	24.2	25.1
10	21.6	21.8	22.6	21.6	21.5	25.4	23.3	26.1	23.2	26.0	27.3	28.0	27.3	27.9	28.6	27.4	27.1	25.2	24.5	24.4	25.0	24.3	24.6	24.8	25.0
11	21.9	21.7	21.6	22.0	22.1	23.1	24.2	23.6	24.8	26.5	29.0	26.8	27.4	28.2	28.9	26.8	26.5	25.5	24.5	24.4	24.0	24.0	24.7	24.6	24.9
12	22.2	21.3	21.4	21.3	21.7	26.1	25.6	25.7	24.3	25.1	26.7	26.8	26.8	28.0	28.2	26.6	26.1	25.1	24.1	24.0	24.1	24.3	24.2	24.2	24.7
13	22.2	21.4	21.2	22.5	22.4	24.3	24.7	24.5	24.2	23.2	27.4	27.5	26.9	28.6	28.4	27.4	26.5	25.4	24.2	24.6	24.6	24.6	24.1	24.1	24.8
14	21.4	22.1	22.1	21.4	22.2	23.2	24.8	25.5	24.3	23.5	27.6	28.3	27.0	28.8	28.0	26.9	26.6	25.3	24.0	24.1	24.7	24.0	25.0	24.6	24.8
15	21.5	22.7	21.3	22.8	22.9	26.2	26.4	23.6	25.3	23.7	27.3	26.8	26.9	28.3	27.9	26.5	27.1	25.7	24.9	24.4	24.9	24.3	24.3	24.9	25.0
16	22.3	21.4	22.6	22.2	21.7	26.2	26.5	26.3	25.5	24.0	26.6	28.3	27.3	28.1	28.1	26.5	26.9	25.9	24.2	25.0	24.7	24.2	24.2	24.8	25.2
17	21.9	21.6	21.1	22.8	21.9	26.3	24.1	23.2	25.5	26.3	26.6	28.7	28.5	28.2	28.9	26.9	27.4	25.5	24.9	24.4	24.2	24.5	24.6	24.8	25.1
18	21.1	22.8	22.0	21.6	22.9	25.2	23.3	24.5	23.5	23.3	28.6	28.4	26.9	28.6	28.2	26.7	26.5	25.6	24.2	24.5	24.1	24.1	24.9	25.0	24.9
19	22.8	22.8	22.5	21.3	21.3	24.0	23.2	25.9	23.7	25.3	28.6	27.2	27.0	28.0	28.8	26.3	27.3	25.6	24.0	24.0	24.3	24.5	25.0	24.8	24.9
20	21.9	22.7	21.4	22.4	22.4	24.7	26.0	24.7	24.2	26.1	27.1	28.3	27.4	28.3	27.8	26.3	26.6	25.8	24.7	24.9	24.8	24.1	24.8	24.5	25.1
21	21.3	21.8	22.5	21.5	22.6	25.0	25.8	25.5	25.0	24.6	28.6	28.8	28.2	27.9	28.2	26.0	26.2	25.5	24.6	24.6	24.5	24.7	24.6	24.6	25.1
22	22.5	22.7	23.0	21.1	22.6	25.1	24.5	24.9	25.8	24.0	27.0	28.7	26.9	28.7	28.4	27.0	26.4	25.4	24.4	24.6	25.0	24.4	24.2	24.2	25.1
23	21.1	21.1	22.6	21.6	21.5	26.2	25.1	24.6	24.9	23.4	27.5	28.9	28.8	27.7	28.4	27.0	26.4	25.0	24.7	25.0	24.2	24.2	24.7	24.6	25.0
24	21.8	22.2	21.6	22.4	22.5	25.1	25.2	24.6	24.3	23.2	28.2	28.4	28.1	28.4	28.0	26.3	26.9	25.9	24.1	24.4	24.6	24.2	24.1	25.0	25.0
25	22.6	23.0	21.9	21.1	22.1	25.2	23.1	26.1	23.6	24.9	28.2	27.4	28.7	28.0	28.9	26.3	26.6	25.3	24.9	24.1	25.0	24.6	24.5	24.5	25.0
26	21.1	21.9	22.5	21.8	22.0	25.9	25.6	24.8	23.4	25.7	28.5	27.8	27.7	28.5	28.2	26.6	27.1	25.3	24.4	24.6	24.5	24.6	24.0	24.8	25.1
27	21.8	22.0	22.1	22.2	21.2	24.1	25.6	23.6	24.2	24.5	28.0	28.7	26.8	28.2	27.6	26.2	27.2	25.2	24.1	24.4	24.8	24.9	24.2	24.7	24.8
28	21.4	22.8	22.0	22.5	21.0	24.7	23.4	26.0	25.1	25.8	26.9	27.7	28.7	28.6	28.0	26.9	27.1	25.2	24.5	24.4	24.8	24.2	24.6	24.6	25.0
29	21.5	22.4	22.7	21.6	22.4	23.3	24.4	25.9	23.6	24.1	27.0	28.0	28.9	27.6	28.0	26.6	26.1	25.7	24.7	24.0	24.4	24.2	24.3	24.1	24.8
30	22.2	21.8	22.0	22.3	22.4	23.3	23.5	26.3	23.1	26.2	27.2	27.2	27.2	27.7	28.6	27.4	27.1	25.1	24.5	24.2	24.8	24.2	24.5	24.2	24.9
31	22.3	21.3	21.9	21.6	21.3	23.4	26	23.3	23.3	25.6	27.1	28.3	28.4	28.1	28.4	26.5	26.1	25	24.4	24.6	24.7	24.3	24.9	24.8	24.8
Rata-rata/jam	21.9	22.1	22.0	21.9	22.1	24.7	24.7	25.0	24.5	24.6	27.6	27.9	27.7	28.2	28.3	26.7	26.7	25.5	24.5	24.5	24.6	24.4	24.5	24.6	24.96

Data Temperatur Tahun 2012

Bulan : Agustus

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	24.1	24.1	23.8	23.3	22.6	24.7	24.7	25.3	25.8	25.1	27.5	28.9	27.4	29.5	30.0	27.7	27.7	26.0	24.3	24.2	24.6	24.5	24.3	24.2	25.6
2	24.4	22.4	23.3	22.7	23.6	25.8	25.7	24.7	25.5	26.6	28.8	29.0	29.7	29.6	29.6	26.4	27.6	25.5	24.4	25.1	24.8	24.4	24.9	25.1	25.8
3	22.6	23.6	24.2	24.1	22.8	24.6	25.4	26.1	25.9	26.6	28.9	29.9	29.1	29.3	29.1	26.2	27.5	25.9	24.0	24.5	25.0	24.2	25.2	24.9	25.8
4	23.6	24.1	22.3	22.8	23.6	26.1	26.4	25.8	25.0	25.1	28.5	28.4	27.0	29.8	28.6	28.4	27.0	25.5	24.9	25.0	24.6	24.6	25.0	24.3	25.7
5	22.0	23.4	23.1	23.3	24.5	24.9	26.5	25.5	25.7	25.8	29.2	27.3	28.1	29.6	29.9	27.5	27.2	25.4	25.0	24.8	24.8	25.0	24.6	24.1	25.7
6	22.7	23.6	24.0	22.2	23.9	25.3	25.4	26.4	26.5	24.5	29.6	27.4	28.7	29.0	29.9	26.9	27.0	25.2	24.5	24.4	24.2	24.0	24.1	24.9	25.6
7	24.0	22.0	23.6	22.5	23.3	24.7	25.7	27.0	26.0	26.5	27.8	28.5	28.2	29.2	29.6	28.3	27.7	26.1	25.0	24.2	24.4	24.5	24.6	24.3	25.7
8	23.1	22.3	23.2	24.3	23.4	25.1	26.4	25.8	26.7	24.6	27.1	27.5	28.3	29.4	29.8	27.4	27.0	25.9	24.4	25.1	24.2	24.1	24.6	24.2	25.6
9	24.4	23.3	22.6	22.1	24.2	26.9	27.0	25.6	26.4	25.0	27.6	29.8	28.3	29.3	28.8	27.4	27.5	25.9	24.0	24.7	24.2	24.3	24.7	24.2	25.8
10	22.8	23.5	24.0	22.1	23.7	26.5	25.7	24.6	25.4	24.9	27.0	28.8	28.2	28.6	29.5	27.5	28.3	25.6	24.3	25.2	24.9	24.4	24.1	24.1	25.6
11	23.3	24.4	23.0	23.3	22.2	25.3	24.9	26.4	26.3	25.3	29.7	27.8	27.3	29.7	29.0	28.1	26.8	26.0	24.3	24.3	24.1	24.8	25.0	24.7	25.7
12	22.2	24.5	23.6	22.5	24.1	24.8	25.4	25.3	24.8	25.4	29.4	29.0	27.5	29.6	28.6	26.3	27.6	26.0	24.9	24.9	24.5	25.0	25.1	24.8	25.7
13	23.0	24.0	23.9	23.6	23.3	27.0	26.7	26.7	25.9	24.7	28.2	28.1	29.5	29.5	29.2	26.5	26.5	25.5	24.8	25.0	24.3	24.6	24.2	24.7	25.8
14	22.6	23.0	23.5	22.9	22.9	24.9	25.9	26.0	25.2	25.7	29.3	27.8	29.6	28.6	28.7	27.6	27.8	25.5	24.4	25.0	24.8	25.1	24.8	25.1	25.7
15	23.2	23.1	22.6	23.2	24.0	25.1	25.5	24.8	26.9	25.9	28.0	27.8	28.5	28.8	28.6	27.2	27.0	25.9	25.0	24.4	24.2	24.1	25.2	24.2	25.5
16	23.9	22.2	22.6	23.8	22.7	25.2	25.8	25.0	24.6	24.7	27.9	29.0	28.9	29.5	29.3	28.1	26.9	25.6	24.8	24.0	25.1	24.8	25.2	25.1	25.6
17	23.6	23.6	23.3	23.0	22.8	25.1	26.2	24.9	25.9	25.7	28.4	27.0	28.5	29.5	29.8	26.5	27.6	26.1	24.4	24.7	24.5	24.7	25.0	24.2	25.6
18	22.5	23.3	24.0	23.9	22.6	25.3	24.8	25.7	25.2	26.8	29.3	28.1	29.1	28.6	29.6	28.3	26.6	26.2	24.9	24.8	24.7	24.9	25.1	24.9	25.8
19	22.0	24.0	22.9	22.4	22.0	26.1	24.9	24.7	25.2	25.1	29.7	27.7	28.5	29.9	29.3	28.5	26.3	25.3	24.8	24.3	24.6	24.4	24.9	24.2	25.5
20	24.0	22.4	24.1	22.3	23.0	25.0	26.5	25.5	24.8	25.2	28.3	27.5	28.0	28.8	29.9	26.8	27.8	26.2	24.4	24.9	24.9	24.9	24.9	24.8	25.6
21	24.4	23.0	24.1	22.1	23.2	26.8	25.3	25.8	26.2	25.4	28.9	27.9	28.6	28.7	28.7	26.4	27.8	25.9	25.0	24.3	24.2	24.5	25.0	24.1	25.7
22	22.7	22.8	23.1	24.5	22.7	26.4	25.4	25.7	26.3	26.3	29.4	29.6	27.1	29.9	29.9	27.1	28.0	25.4	24.1	24.7	24.5	24.7	25.0	24.9	25.8
23	23.8	23.5	23.4	23.6	23.6	24.9	25.4	25.1	26.2	25.3	29.5	29.6	29.2	29.1	28.9	26.7	27.6	26.1	24.4	24.8	25.0	24.7	25.1	24.1	25.8
24	22.9	22.5	24.0	23.6	23.2	24.6	25.2	26.2	24.5	26.0	29.9	27.1	29.8	28.7	28.7	28.2	28.4	25.5	24.5	25.0	24.6	24.9	24.2	24.4	25.7
25	23.1	24.2	23.7	23.6	23.6	26.6	25.6	26.7	25.6	24.8	27.8	28.9	27.4	28.8	29.3	28.4	27.0	25.9	24.7	24.4	25.0	24.6	24.6	24.6	25.8
26	24.4	22.0	23.1	23.2	23.6	24.6	25.7	26.4	26.6	25.9	27.2	28.2	29.0	29.4	29.1	27.9	26.6	25.5	24.9	24.1	24.7	24.0	24.4	24.5	25.6
27	22.3	22.3	23.7	24.2	22.2	24.7	25.0	25.4	26.0	26.2	28.5	28.3	29.1	28.5	29.7	26.4	27.0	26.1	24.2	24.2	24.5	24.2	24.9	24.8	25.5
28	23.4	24.0	22.2	23.3	22.5	26.7	26.7	26.7	26.4	25.2	28.8	28.4	29.0	28.6	29.1	27.7	28.1	26.0	25.0	24.4	25.0	24.8	24.5	24.4	25.9
29	22.0	23.7	24.2	23.7	23.3	24.6	25.0	26.3	26.7	26.1	29.4	29.3	27.5	28.9	28.9	26.8	27.7	25.5	24.1	24.1	24.1	24.1	25.1	24.0	25.6
30	22.5	23.2	22.7	23.3	23.3	24.9	25.2	25.9	25.2	25.2	28.6	27.1	28.6	29.5	29.4	27.1	26.3	25.4	24.7	24.4	24.9	24.5	24.2	24.2	25.4
31	24.0	22.9	22.9	24.0	24.3	26.5	25.1	26.2	26.6	26.9	27.2	28.9	27.7	29.8	29.3	26.9	26.3	25.6	24.9	25.0	25.2	24.7	24.3	24.7	25.8
Rata-rata/jam	23.2	23.3	23.4	23.2	23.2	25.5	25.6	25.7	25.8	25.6	28.6	28.3	28.4	29.2	29.3	27.3	27.3	25.8	24.6	24.6	24.6	24.5	24.7	24.5	25.68

Data Temperatur Tahun 2012
Bulan : September

Hari-ke	Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1		24.7	24.0	24.5	24.3	23.7	25.2	26.0	25.1	25.2	26.8	28.8	29.8	29.0	29.4	29.2	27.6	28.2	25.7	25.0	25.4	25.4	25.5	25.6	25.1	26.2
2		23.4	23.2	24.7	23.6	23.6	26.6	25.5	25.4	25.7	27.1	28.2	27.5	28.0	29.0	28.7	27.7	26.8	26.2	25.2	25.4	25.6	25.7	25.5	25.6	26.0
3		23.1	23.9	24.5	23.3	24.1	26.5	25.8	25.8	25.7	27.0	27.6	28.3	28.9	29.9	29.7	26.4	26.6	25.8	25.5	25.2	25.4	25.6	25.0	25.2	26.0
4		23.2	23.0	24.4	23.7	25.0	25.2	25.4	25.5	26.5	25.5	28.9	28.0	29.8	29.2	30.0	26.7	28.5	25.8	25.3	25.3	25.2	25.4	25.6	25.0	26.1
5		24.1	23.3	23.6	24.0	23.1	26.9	27.3	26.0	26.5	25.9	29.0	29.0	28.9	29.2	29.2	26.9	26.3	26.0	25.6	25.1	25.2	25.7	25.1	25.3	26.1
6		23.1	23.3	24.5	24.3	24.8	26.1	26.0	25.9	26.5	27.2	27.8	28.0	29.5	29.9	28.7	26.8	26.7	25.8	25.0	25.3	25.2	25.0	25.4	25.2	26.1
7		24.7	23.8	24.4	24.1	24.3	25.2	25.3	26.4	26.1	25.8	29.8	29.1	28.1	29.1	29.8	26.5	27.2	25.7	25.2	25.6	25.2	25.3	25.4	25.4	26.1
8		24.2	23.5	23.6	24.1	24.4	25.1	25.6	27.2	26.7	27.5	28.2	28.0	29.7	28.8	29.1	27.9	28.5	25.7	25.4	25.1	25.7	25.2	25.6	25.6	26.3
9		24.6	24.0	24.7	24.5	24.6	26.1	26.0	27.4	25.5	25.5	27.9	28.7	29.7	29.4	29.9	26.7	27.2	26.1	25.3	25.2	25.6	25.5	25.4	25.3	26.3
10		24.5	23.5	23.5	23.3	24.4	25.3	26.7	27.3	27.5	26.8	28.0	29.4	27.5	29.5	28.9	26.7	27.2	26.1	25.6	25.3	25.2	25.6	25.5	25.3	26.2
11		23.7	23.9	23.3	24.7	23.2	26.7	26.0	27.5	26.1	26.6	29.8	28.9	29.9	29.7	29.7	28.2	27.2	26.1	25.4	25.6	25.1	25.1	25.7	25.3	26.4
12		23.5	24.7	25.0	23.1	24.8	26.4	26.0	25.3	25.2	25.7	29.5	29.3	29.7	29.1	28.8	28.0	26.4	25.8	25.6	25.3	25.3	25.2	25.1	25.3	26.2
13		24.8	24.8	24.1	23.7	23.6	27.4	27.0	27.0	25.7	26.2	29.9	29.6	29.7	29.2	29.5	27.4	28.7	25.9	25.3	25.6	25.3	25.0	25.3	25.1	26.5
14		24.7	24.5	23.9	23.9	23.1	27.4	25.9	25.9	25.8	25.1	28.0	28.1	28.1	29.9	29.2	27.5	27.8	25.8	25.4	25.1	25.7	25.4	25.6	25.5	26.1
15		24.6	24.3	24.9	23.8	23.3	25.1	26.7	26.5	25.2	26.9	28.9	29.7	28.6	29.8	28.9	26.3	28.5	26.0	25.4	25.5	25.2	25.3	25.2	25.3	26.3
16		23.7	23.9	23.8	23.9	24.3	26.8	26.9	26.2	25.9	25.1	27.5	28.2	27.7	28.9	29.6	28.2	28.7	25.8	25.3	25.1	25.6	25.1	25.2	25.2	26.1
17		24.3	23.3	24.9	24.1	23.1	27.1	27.2	26.7	26.0	25.4	29.6	29.7	28.5	29.0	28.8	26.9	26.5	26.1	25.5	25.2	25.5	25.5	25.2	25.1	26.2
18		24.5	24.1	23.5	23.8	25.0	27.2	27.4	25.9	26.1	25.9	28.7	27.7	28.4	29.0	28.9	26.8	27.1	25.9	25.4	25.0	25.2	25.1	25.3	25.6	26.1
19		24.7	23.4	24.6	23.4	23.9	25.2	27.3	27.1	26.8	27.0	28.0	28.2	28.1	29.4	28.9	27.2	27.3	25.9	25.5	25.6	25.7	25.6	25.1	25.1	26.2
20		23.1	23.8	23.9	23.8	23.2	26.6	26.5	25.8	26.6	26.5	27.8	27.9	28.0	28.9	29.3	28.6	28.2	26.1	25.3	25.3	25.3	25.5	25.6	25.2	26.1
21		23.7	24.3	24.4	24.2	23.9	25.7	26.6	26.6	26.0	25.6	28.9	29.4	28.4	29.1	29.7	27.3	27.1	26.0	25.2	25.2	25.2	25.5	25.6	25.2	26.2
22		23.8	23.8	24.0	24.3	24.0	26.0	26.9	26.0	26.1	26.0	29.3	28.2	29.9	29.3	30.0	26.9	27.8	26.0	25.3	25.1	25.4	25.4	25.6	25.0	26.3
23		24.4	24.1	24.0	23.5	23.7	25.1	26.8	26.3	26.8	26.8	28.8	29.7	29.2	29.0	28.7	28.4	28.1	26.0	25.4	25.5	25.4	25.4	25.7	25.3	26.3
24		23.3	24.6	24.8	24.1	25.0	26.8	26.7	25.7	26.2	27.0	27.6	29.5	27.6	29.6	29.0	27.7	26.7	25.7	25.2	25.0	25.5	25.6	25.4	25.1	26.2
25		23.7	23.2	23.5	24.6	23.2	25.5	26.0	26.9	26.0	26.1	29.1	29.9	28.4	28.9	29.3	26.2	27.1	25.8	25.4	25.5	25.7	25.0	25.7	25.3	26.1
26		23.9	23.1	23.4	24.2	24.3	27.3	25.1	25.3	25.9	25.8	28.3	28.4	28.9	28.9	28.7	26.5	26.6	25.9	25.3	25.6	25.6	25.2	25.2	25.1	25.9
27		23.9	23.5	24.8	23.9	23.8	25.2	25.3	25.2	26.1	27.2	29.5	28.9	28.5	28.8	29.7	27.2	27.3	25.7	25.0	25.1	25.2	25.6	25.6	25.3	26.1
28		23.8	24.7	24.8	24.9	23.0	26.5	25.3	25.4	25.2	25.8	29.0	28.4	29.1	29.3	29.7	27.4	27.7	26.0	25.3	25.6	25.5	25.1	25.0	25.3	26.2
29		24.8	23.4	24.6	23.5	24.9	27.1	27.0	26.2	25.6	25.1	28.9	27.6	28.8	29.9	29.4	26.4	28.3	25.7	25.1	25.5	25.6	25.7	25.3	25.7	26.3
30		24.5	23.9	24.2	23.9	24.2	26.6	26.0	26.6	27.0	25.4	27.7	27.9	28.9	28.9	29.9	28.1	27.3	25.9	25.3	25.4	25.0	25.5	25.7	25.3	26.2
Rata-rata/jam		24.0	23.8	24.2	24.0	24.0	26.2	26.3	26.2	26.1	26.2	28.6	28.7	28.8	29.3	29.3	27.3	27.4	25.9	25.3	25.3	25.4	25.4	25.4	25.3	26.2

Data Temperatur Tahun 2012

Bulan : Oktober

Hari-ke	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	24.3	23.7	23.7	25.4	25.0	26.2	26.0	27.1	25.7	25.8	28.5	31.0	28.5	30.2	30.5	29.0	28.1	27.5	26.5	26.3	25.2	25.3	25.5	25.9	26.7
2	24.2	24.1	23.6	25.2	24.2	27.0	26.1	27.2	26.2	26.3	29.5	29.4	30.4	30.6	29.1	28.4	28.7	28.0	25.9	25.8	26.4	25.1	26.2	26.4	26.8
3	23.8	23.8	23.6	24.6	25.0	25.9	27.0	26.3	26.3	25.8	27.8	30.9	30.1	30.3	29.7	28.4	28.0	26.6	26.3	25.9	26.2	25.9	26.2	25.3	26.7
4	24.2	23.8	25.5	25.0	24.7	27.1	25.6	27.0	27.0	27.3	30.7	28.3	29.5	30.9	29.6	28.7	28.9	26.6	25.5	25.6	25.7	26.2	25.0	25.6	26.8
5	25.2	24.1	24.6	24.0	24.3	26.3	26.3	25.7	26.8	26.6	27.9	30.3	27.9	30.5	29.5	28.1	28.0	27.1	25.1	25.8	26.3	26.3	26.4	26.4	26.7
6	24.0	25.3	25.3	25.0	24.9	25.8	27.0	27.4	26.6	26.4	29.1	27.9	29.5	30.1	29.2	28.4	28.5	27.6	26.0	25.7	26.3	25.1	26.2	25.6	26.8
7	25.5	25.0	23.5	23.7	24.1	26.3	26.9	25.6	26.9	25.7	30.3	28.2	29.3	30.5	30.6	28.5	28.8	26.7	26.5	25.8	25.2	25.4	25.3	25.3	26.6
8	24.5	23.5	23.9	24.3	23.9	25.9	26.9	26.5	26.1	25.6	27.5	27.7	27.6	29.3	29.0	28.7	28.8	27.3	25.5	26.4	26.1	25.4	25.8	25.2	26.3
9	23.8	25.4	24.1	24.0	25.0	25.6	27.3	25.7	26.6	26.7	29.9	28.5	27.8	29.8	30.7	28.2	28.3	27.0	26.1	25.8	25.6	26.3	26.4	26.3	26.7
10	24.4	24.7	24.2	23.7	24.2	27.1	26.6	26.3	26.4	26.3	30.2	30.4	27.8	30.8	29.5	28.1	28.1	27.9	26.4	25.7	26.5	25.0	26.4	25.2	26.7
11	24.9	24.2	24.2	25.2	24.3	25.9	26.6	26.9	26.1	25.8	27.5	29.3	30.7	29.9	29.2	28.6	28.0	27.9	25.2	25.1	25.8	26.5	25.3	26.2	26.6
12	23.6	24.1	25.4	25.2	23.9	26.3	25.9	26.0	27.4	27.5	28.8	28.4	30.3	29.5	29.1	28.3	28.3	27.3	25.8	26.3	26.4	25.2	26.4	25.4	26.7
13	25.3	25.1	24.3	24.2	25.4	27.2	27.3	26.8	26.9	26.4	28.0	27.6	28.6	30.7	30.6	29.0	28.7	26.8	25.7	26.2	26.4	25.1	26.4	25.3	26.8
14	24.6	25.4	24.7	24.4	24.0	25.7	26.0	26.3	26.6	25.6	28.5	28.1	29.4	30.6	30.4	28.8	28.5	26.8	25.6	26.0	25.3	26.0	25.0	26.0	26.6
15	24.1	24.8	25.2	24.2	24.5	27.0	26.3	25.7	26.4	26.2	28.9	29.6	29.5	29.9	30.4	28.1	28.2	26.7	26.4	25.6	26.2	25.5	25.9	26.4	26.7
16	23.7	23.6	25.5	25.2	25.1	26.8	27.2	27.0	25.9	25.8	28.5	30.6	29.0	29.8	30.9	28.2	28.2	26.9	25.9	26.2	25.3	25.8	26.2	25.1	26.8
17	25.1	23.8	23.7	24.9	23.8	26.8	26.7	27.0	27.2	25.9	27.9	28.8	29.9	29.3	31.0	28.2	28.8	26.6	25.8	25.5	25.4	26.0	26.4	26.0	26.7
18	23.9	25.2	25.2	24.1	25.1	26.1	25.8	26.7	26.7	26.3	30.2	29.4	30.9	29.0	29.7	28.0	28.4	26.6	25.3	26.0	25.4	26.3	26.2	26.1	26.8
19	25.3	24.4	24.1	23.9	23.8	25.6	26.0	25.9	26.0	26.5	29.4	27.7	28.6	30.5	30.3	28.9	28.8	26.9	26.3	25.8	25.5	26.2	25.3	26.1	26.6
20	23.9	25.3	24.2	23.5	24.3	26.7	25.7	25.7	25.7	26.1	27.5	27.9	29.1	30.1	29.0	28.1	28.2	27.7	26.0	25.8	25.4	25.4	25.1	26.2	26.4
21	23.8	23.6	25.0	25.0	24.2	25.9	25.8	27.2	26.2	26.4	28.3	27.8	29.5	30.4	30.3	28.1	28.2	26.9	25.9	25.7	25.1	26.4	25.8	26.3	26.6
22	25.4	24.2	23.7	24.6	23.8	25.8	27.5	26.0	26.1	26.4	27.6	30.7	29.7	29.6	29.8	28.9	28.5	28.0	25.1	25.3	25.4	25.1	25.9	25.8	26.6
23	25.4	24.2	23.9	25.0	24.9	27.4	27.0	26.9	27.3	26.0	31.0	30.2	31.0	30.9	29.3	28.6	28.5	27.8	25.7	26.3	26.1	25.3	25.4	25.5	27.1
24	24.7	23.8	23.8	24.6	24.8	25.6	25.8	27.3	26.8	26.8	28.9	29.5	29.3	29.5	29.6	28.3	28.9	27.0	25.7	25.3	25.4	25.7	25.1	25.9	26.6
25	24.6	25.2	24.1	23.6	24.8	27.3	26.1	26.3	25.6	26.2	28.5	28.6	31.0	30.5	29.1	28.6	28.3	27.5	26.0	25.6	25.6	25.6	25.3	25.7	26.7
26	24.6	24.9	23.6	24.8	23.8	26.8	27.0	26.3	25.8	25.8	28.1	28.1	29.6	29.8	29.7	28.2	28.3	26.8	25.5	25.4	26.2	25.0	25.1	25.3	26.4
27	24.1	25.5	25.4	24.9	23.7	25.9	27.3	25.7	26.6	26.9	28.9	27.9	30.8	30.0	29.3	28.3	28.8	27.9	25.7	26.2	25.2	26.0	25.1	25.6	26.7
28	24.4	25.4	24.4	25.1	24.5	27.3	26.1	25.7	26.8	25.6	27.6	28.6	29.3	30.2	30.2	28.5	28.5	27.8	26.5	25.9	26.4	26.3	25.3	25.1	26.7
29	24.1	24.7	24.2	24.8	24.3	26.4	25.7	27.1	25.5	26.2	29.7	28.9	29.7	30.8	30.2	28.3	28.1	26.9	25.8	25.9	25.6	25.8	25.2	25.2	26.6
30	24.1	24.3	23.9	24.6	24.9	25.9	26.7	25.7	26.2	26.6	28.7	30.3	28.1	29.7	30.4	28.9	28.2	27.1	25.0	25.1	26.1	26.2	25.1	26.4	26.6
31	23.5	24.0	25.4	24.9	23.6	26.7	27.4	26.5	26.0	25.5	27.9	28.4	30.2	29.3	29.6	28.5	28.6	26.9	25.5	26.0	25.9	26.0	25.7	26.0	26.6
Rata-rata/jam	24.4	24.5	24.4	24.6	24.4	26.4	26.5	26.4	26.2	28.8	29.0	29.4	30.1	29.9	28.5	28.4	27.2	25.8	25.8	25.8	25.7	25.7	25.7	25.8	26.7

Data Temperatur Tahun 2012
Bulan : Nopember

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	24.7	24.1	23.8	24.5	24.4	25.0	26.6	26.7	25.2	26.5	28.0	27.5	28.9	29.9	29.9	27.7	27.7	26.2	25.1	25.8	25.2	25.6	25.8	25.6	26.3
2	23.5	23.7	23.8	23.4	24.0	27.1	26.9	26.6	25.7	26.2	28.5	29.3	28.3	29.7	29.3	27.0	27.9	26.6	25.0	25.3	25.7	25.7	25.5	25.6	26.3
3	23.2	24.1	23.8	23.7	23.9	25.5	26.7	25.3	25.7	26.5	29.2	28.1	29.6	29.2	29.2	27.1	27.0	25.9	25.2	25.8	25.8	25.4	25.0	25.7	26.1
4	25.0	23.4	23.2	24.1	23.7	27.2	26.8	26.9	25.4	27.3	29.5	29.7	29.6	29.1	29.5	27.3	28.2	26.1	25.6	25.1	25.1	25.1	25.5	25.7	26.4
5	23.3	23.3	23.4	24.4	24.7	27.1	25.2	26.0	26.1	25.2	29.5	29.4	29.8	29.3	29.6	26.9	26.9	26.6	25.7	25.2	25.2	25.1	25.8	25.5	26.2
6	24.7	23.9	24.9	23.8	23.1	27.1	26.6	25.1	26.8	26.2	27.9	28.0	29.7	29.7	29.9	28.2	28.0	26.2	25.5	25.3	25.2	25.2	25.2	25.1	26.3
7	23.8	23.9	23.1	23.4	24.3	26.9	25.9	25.2	26.5	26.3	27.9	29.6	28.8	29.1	29.4	28.2	28.3	26.4	25.2	25.4	25.2	25.7	25.3	25.7	26.2
8	24.0	24.4	23.7	24.1	24.9	25.2	26.9	25.6	27.4	26.0	27.7	29.8	29.6	29.9	29.5	27.8	27.6	26.0	25.6	25.7	25.7	25.8	25.4	25.6	26.4
9	24.3	24.4	24.1	24.1	23.9	25.1	26.4	25.2	26.5	25.2	28.5	27.8	28.6	29.7	29.5	28.4	27.7	25.8	25.6	25.3	25.3	25.0	25.5	25.5	26.2
10	23.6	23.4	23.5	23.7	24.3	25.4	25.7	25.2	25.6	26.3	28.2	27.9	29.6	29.3	29.2	27.6	28.4	26.8	25.7	25.6	25.7	25.7	25.1	25.3	26.1
11	23.2	24.7	24.9	23.6	24.9	25.4	26.1	27.1	26.9	26.3	29.2	27.8	28.2	29.1	29.4	28.2	26.8	26.4	25.1	25.1	25.1	25.2	25.7	25.6	26.3
12	24.5	24.8	23.0	24.3	23.8	25.5	27.4	25.9	25.3	26.8	28.4	29.7	27.9	29.7	29.4	26.9	28.4	26.3	25.4	25.8	25.7	25.1	25.7	25.2	26.3
13	25.0	23.7	24.3	24.5	24.8	25.9	25.2	26.9	25.7	26.7	28.6	27.9	28.3	29.5	29.6	28.3	29.0	26.4	25.3	25.3	25.5	25.6	25.6	25.5	26.4
14	24.8	23.4	24.8	23.6	23.7	26.4	25.2	25.2	25.5	26.3	28.7	28.0	29.9	29.8	29.2	27.3	27.5	26.3	25.6	25.3	25.3	25.0	25.1	25.3	26.1
15	23.6	24.4	24.6	24.9	24.1	26.6	25.8	25.4	26.5	26.1	28.3	27.6	28.2	29.5	30.0	27.8	28.6	26.2	25.5	25.7	25.1	25.0	25.4	25.2	26.3
16	24.1	23.6	23.0	23.3	24.3	26.2	25.9	25.2	25.9	25.9	28.9	27.6	28.2	29.2	29.9	27.9	27.8	26.7	25.0	25.4	25.4	25.8	25.2	25.3	26.1
17	23.4	25.0	23.5	23.8	23.8	26.9	25.4	27.1	26.9	26.0	29.0	29.5	27.9	29.2	30.0	28.1	28.8	26.4	25.3	25.0	25.4	25.2	25.5	25.6	26.4
18	24.8	23.3	23.5	24.6	24.0	26.0	27.0	25.4	26.1	26.7	29.8	29.3	27.5	29.7	29.1	26.9	28.7	26.6	25.2	25.6	25.7	25.6	25.7	25.2	26.3
19	23.3	24.7	24.2	24.9	24.3	27.3	26.1	25.9	25.4	26.7	29.3	29.9	29.2	29.4	29.5	26.8	28.4	26.6	25.5	25.1	25.3	25.5	25.3	25.0	26.4
20	23.1	25.0	24.0	24.2	24.2	26.5	27.0	26.8	25.2	26.0	29.7	29.7	29.3	29.4	29.2	27.4	28.0	26.1	25.4	25.7	25.3	25.0	25.7	25.8	26.4
21	24.1	23.0	23.3	23.6	24.0	25.8	25.8	27.2	27.4	25.9	28.9	29.5	28.0	29.7	29.9	28.8	27.0	26.6	25.0	25.3	25.6	25.5	25.8	25.5	26.3
22	24.5	24.6	24.7	23.8	24.0	26.3	25.2	26.9	26.6	25.5	29.3	28.5	29.7	29.9	29.3	28.0	27.3	26.6	25.6	25.5	25.1	25.2	25.7	25.4	26.4
23	24.3	23.9	23.3	24.6	24.2	25.2	26.0	26.2	25.5	26.6	28.1	28.0	28.8	29.6	29.9	26.9	27.6	26.8	25.2	25.5	25.6	25.4	25.3	25.6	26.2
24	23.3	23.3	24.9	24.1	24.0	25.6	25.3	26.4	25.8	26.9	28.6	29.6	29.3	29.9	29.9	28.7	28.1	26.0	25.1	25.1	25.7	25.2	25.0	25.4	26.3
25	24.3	24.0	24.6	23.5	23.2	27.2	27.4	25.7	26.2	27.2	28.4	28.4	28.1	29.5	29.8	27.7	28.5	26.5	25.0	25.5	25.8	25.6	25.5	25.6	26.4
26	23.2	23.7	23.6	24.7	23.4	27.0	26.3	26.8	25.9	27.2	30.0	28.4	29.9	29.7	29.0	28.7	27.2	26.6	25.3	25.2	25.1	25.2	25.5	25.7	26.4
27	24.4	23.6	23.2	23.5	24.5	25.1	26.8	27.1	25.4	26.2	29.4	29.0	29.3	29.6	29.6	27.6	27.6	26.7	25.4	25.4	25.7	25.0	25.7	25.6	26.3
28	24.1	23.1	24.3	23.8	24.9	27.2	26.5	26.2	26.2	26.5	30.0	28.8	29.9	30.0	29.1	27.2	27.7	26.3	25.3	25.6	25.7	25.3	25.7	25.4	26.4
29	24.3	23.7	24.6	23.5	23.9	26.3	27.3	26.3	27.1	27.4	28.1	30.0	29.8	30.0	29.4	28.6	28.7	26.3	25.0	25.7	25.2	25.3	25.1	25.4	26.5
30	23.7	23.4	23.1	23.7	23.9	25.7	25.4	26.0	26.6	25.4	29.1	28.0	28.9	29.3	29.2	28.9	27.7	26.2	25.1	25.3	25.0	25.7	25.4	25.6	26.1
Rata-rata/jam	24.0	23.9	23.9	24.0	24.1	26.2	26.2	26.1	26.1	26.3	28.8	28.7	29.0	29.6	29.5	27.8	27.9	26.4	25.3	25.4	25.4	25.4	25.5	25.5	26.3

Data Temperatur Tahun 2012

Bulan : Desember

Hari-ke\Jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Rata-rata/hari
1	24.7	24.1	23.8	24.5	24.4	25.0	26.6	26.7	25.2	26.5	28.0	27.5	28.9	29.9	29.9	27.7	27.7	26.2	25.1	25.8	25.2	25.6	25.8	25.6	26.3
2	23.5	23.7	23.8	23.4	24.0	27.1	26.9	26.6	25.7	26.2	28.5	29.3	28.3	29.7	29.3	27.0	27.9	26.6	25.0	25.3	25.7	25.5	25.6	25.6	26.3
3	23.2	24.1	23.8	23.7	23.9	25.5	26.7	25.3	25.7	26.5	29.2	28.1	29.6	29.2	29.2	27.1	27.0	25.9	25.2	25.8	25.8	25.4	25.0	25.7	26.1
4	25.0	23.4	23.2	24.1	23.7	27.2	26.8	26.9	25.4	27.3	29.5	29.7	29.6	29.1	29.5	27.3	28.2	26.1	25.6	25.1	25.1	25.5	25.7	25.1	26.4
5	23.3	23.3	23.4	24.4	24.7	27.1	25.2	26.0	26.1	25.2	29.5	29.4	29.8	29.3	29.6	26.9	26.9	26.6	25.7	25.2	25.2	25.1	25.8	25.5	26.2
6	24.7	23.9	24.9	23.8	23.1	27.1	26.6	25.1	26.8	26.2	27.9	28.0	29.7	29.7	29.9	28.2	28.0	26.2	25.5	25.3	25.2	25.2	25.2	25.1	26.3
7	23.8	23.9	23.1	23.4	24.3	26.9	25.9	25.2	26.5	26.3	27.9	29.6	28.8	29.1	29.4	28.2	28.3	26.4	25.2	25.4	25.2	25.7	25.3	25.7	26.2
8	24.0	24.4	23.7	24.1	24.9	25.2	26.9	25.6	27.4	26.0	27.7	29.8	29.6	29.9	29.5	27.8	27.6	26.0	25.6	25.7	25.7	25.8	25.4	25.6	26.4
9	24.3	24.4	24.1	24.1	23.9	25.1	26.4	25.2	26.5	25.2	28.5	27.8	28.6	29.7	29.5	28.4	27.7	25.8	25.6	25.3	25.0	25.5	25.5	25.7	26.2
10	23.6	23.4	23.5	23.7	24.3	25.4	25.7	25.2	25.6	26.3	28.2	27.9	29.6	29.3	29.2	27.6	28.4	26.8	25.7	25.6	25.7	25.1	25.3	25.6	26.1
11	23.2	24.7	24.9	23.6	24.9	25.4	26.1	27.1	26.9	26.3	29.2	27.8	28.2	29.1	29.4	28.2	26.8	26.4	25.1	25.1	25.2	25.7	25.6	25.1	26.3
12	24.5	24.8	23.0	24.3	23.8	25.5	27.4	25.9	25.3	26.8	28.4	29.7	27.9	29.7	29.4	26.9	28.4	26.3	25.4	25.8	25.7	25.1	25.7	25.2	26.3
13	25.0	23.7	24.3	24.5	24.8	25.9	25.2	26.9	25.7	26.7	28.6	27.9	28.3	29.5	29.6	28.3	29.0	26.4	25.3	25.3	25.5	25.6	25.6	25.5	26.4
14	24.8	23.4	24.8	23.6	23.7	26.4	25.2	25.2	25.5	26.3	28.7	28.0	29.9	29.8	29.2	27.3	27.5	26.3	25.6	25.3	25.0	25.1	25.3	25.5	26.1
15	23.6	24.4	24.6	24.9	24.1	26.6	25.8	25.4	26.5	26.1	28.3	27.6	28.2	29.5	30.0	27.8	28.6	26.2	25.5	25.7	25.1	25.0	25.4	25.2	26.3
16	24.1	23.6	23.0	23.3	24.3	26.2	25.9	25.2	25.9	25.9	28.9	27.6	28.2	29.2	29.9	27.9	27.8	26.7	25.0	25.4	25.4	25.8	25.2	25.3	26.1
17	23.4	25.0	23.5	23.8	23.8	26.9	25.4	27.1	26.9	26.0	29.0	29.5	27.9	29.2	30.0	28.1	28.8	26.4	25.3	25.0	25.4	25.2	25.5	25.6	26.4
18	24.8	23.3	23.5	24.6	24.0	26.0	27.0	25.4	26.1	26.7	29.8	29.3	27.5	29.7	29.1	26.9	28.7	26.6	25.2	25.6	25.7	25.6	25.7	25.2	26.3
19	23.3	24.7	24.2	24.9	24.3	27.3	26.1	25.9	25.4	26.7	29.3	29.9	29.2	29.4	29.5	26.8	28.4	26.6	25.5	25.1	25.3	25.5	25.3	25.0	26.4
20	23.1	25.0	24.0	24.2	24.2	26.5	27.0	26.8	25.2	26.0	29.7	29.7	29.3	29.4	29.2	27.4	28.0	26.1	25.4	25.7	25.3	25.0	25.7	25.8	26.4
21	24.1	23.0	23.3	23.6	24.0	25.8	25.8	27.2	27.4	25.9	28.9	29.5	28.0	29.7	29.9	28.8	27.0	26.6	25.0	25.3	25.6	25.5	25.8	25.5	26.3
22	24.5	24.6	24.7	23.8	24.0	26.3	25.2	26.9	26.6	25.5	29.3	28.5	29.7	29.9	29.3	28.0	27.3	26.6	25.6	25.5	25.1	25.2	25.7	25.4	26.4
23	24.3	23.9	23.3	24.6	24.2	25.2	26.0	26.2	25.5	26.6	28.1	28.0	28.8	29.6	29.9	26.9	27.6	26.8	25.2	25.5	25.6	25.4	25.3	25.6	26.2
24	23.3	23.3	24.9	24.1	24.0	25.6	25.3	26.4	25.8	26.9	28.6	29.6	29.3	29.9	28.7	28.1	26.0	25.1	25.1	25.7	25.2	25.2	25.0	25.4	26.2
25	24.3	24.0	24.6	23.5	23.2	27.2	27.4	25.7	26.2	27.2	28.4	28.4	28.1	29.5	29.8	27.7	28.5	26.5	25.0	25.5	25.8	25.6	25.5	25.6	26.3
26	23.2	23.7	23.6	24.7	23.4	27.0	26.3	26.8	25.9	27.2	30.0	28.4	29.9	29.7	29.0	28.7	27.2	26.6	25.3	25.2	25.1	25.2	25.5	25.7	26.4
27	24.4	23.6	23.2	23.5	24.5	25.1	26.8	27.1	25.4	26.2	29.4	29.0	29.3	29.6	29.6	27.6	27.6	26.7	25.4	25.4	25.7	25.0	25.7	25.6	26.4
28	24.1	23.1	24.3	23.8	24.9	27.2	26.5	26.2	26.2	26.5	30.0	28.8	29.9	30.0	29.1	27.2	27.7	26.3	25.3	25.6	25.7	25.3	25.7	25.4	26.3
29	24.3	23.7	24.6	23.5	23.9	26.3	27.3	26.3	27.1	27.4	28.1	30.0	29.8	30.0	29.4	28.6	28.7	26.3	25.0	25.7	25.2	25.3	25.1	25.4	26.4
30	23.7	23.4	23.1	23.7	23.9	25.7	25.4	26.0	26.6	25.4	29.1	28.0	28.9	29.3	29.2	28.9	27.7	26.2	25.1	25.3	25.0	25.7	25.4	25.6	26.5
Rata-rata/jam	24.0	23.9	23.9	24.0	24.1	26.2	26.2	26.1	26.1	26.3	28.8	28.7	29.0	29.6	29.5	27.8	27.9	26.4	25.3	25.4	25.4	25.4	25.5	25.5	26.3