



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**ANALISA NUMERIK MODEL TURBULEN ALIRAN CAMPURAN
UDARA DAN *HOT* EGR MESIN DIESEL**

TUGAS AKHIR

TOMMY HENDARTO

L2E 007 078

**FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN**

**SEMARANG
MARET 2012**

TUGAS AKHIR

- Diberikan Kepada : Nama : Tommy Hendarto
NIM : L2E 007 078
- Dosen Pembimbing : Dr. Syaiful, ST, MT
- Jangka Waktu : 6 bulan (enam bulan)
- Judul : Analisa Numerik Model Turbulen Aliran Campuran Udara dan *Hot EGR* Mesin Diesel
- Isi Tugas : 1. Untuk mengetahui model turbulen yang sesuai pada aliran campuran udara dan *hot EGR* dengan diskritisasi yang berbeda.
2. Untuk mengetahui informasi mengenai temperatur campuran udara dan *hot EGR* pada mesin diesel melalui simulasi numerik.

Semarang, 15 Maret 2012

Pembimbing



Dr. Syaiful, ST, MT

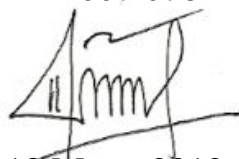
NIP. 197403081999031005

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

NAMA : Tommy Hendarto

NIM : L2E 007 078

Tanda Tangan : 

Tanggal : 13 Maret 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Tommy Hendarto

NIM : L2E 007 078

Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Analisa Numerik Model Turbulen Aliran Campuran Udara dan *Hot EGR* Mesin Diesel

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan/Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.





TIM PENGUJI

Pembimbing : Dr. Syaiful, ST, MT

Penguji : Ir. Sudargana, MT

Penguji : Dr. Achmad Widodo, ST, MT

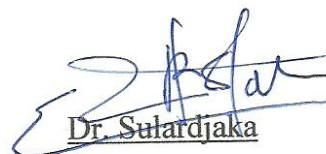
Penguji : Dr. Sri Nugroho, ST, MT

()
()
()
()

Semarang, 13 Maret 2012

Jurusan Teknik Mesin

Ketua,


Dr. Sulardjaka

NIP. 197104201998021001

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : TOMMY HENDARTO
NIM : L2E 007 078
Jurusan/Program Studi : TEKNIK MESIN
Fakultas : TEKNIK
Jenis Karya : SKRIPSI

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

ANALISA NUMERIK MODEL TURBULEN ALIRAN CAMPURAN UDARA *HOT* EGR
MESIN DIESEL

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Semarang
Pada Tanggal : 13 Maret 2012

Yang menyatakan



(TOMMY HENDARTO)
NIM. L2E 007 078

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini saya persembahkan untuk:

Ayahanda Sutarno, Ibunda Rofi'ah, dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan support, semangat, doa dan harapan mereka kepadaku. Tanpa mereka aku tidak akan menjadi seperti sekarang ini.

Terima Kasih.

MOTTO

Cintailah apa yang sedang kau jalani,
Bersemangatlah dengan apa yang sedang kau hadapi,
Tersenyumlah pada apapun hasil yang kau dapati,
karena...
Itu semua adalah proses...
untuk menjadi pribadi yang lebih baik.

Tetaplah angin optimisme yang harus kita hembuskan ketika bendera kita layu dan sulit berkibar. Yakin, berusaha, dan berdoa kawan. Jalan terang kan segera muncul.

Man jadda wa jadda, man shabara zhafira

Orang yang bekerja keras akan sukses, orang yang sabar akan beruntung.

Kesuksesan tidak akan datang tanpa kerja keras, doa dan pengorbanan.

ABSTRACT

Exhaust gas recirculation (EGR) is a method in which most of the combustion exhaust gases inserted back into the engine cylinder. EGR serves to reduce the levels of NO_x emissions. Numerical simulations of CFD is used to determine the characteristics of mixing between air and EGR gases in the intake manifold EGR in diesel engines that not be seen directly through the experiment without the use of sophisticated tools such as thermal cameras. Information obtained from numerical simulations is used to identify the temperature of air mixture and EGR.

Fluid in this modeling is hot air and cold air. Velocity and temperature of incoming fluid at the entrance of the intake manifold and EGR pipe was varied in the range of openings, loads and rounds. Turbulence modeling used is the k - ϵ model, k - ω model and reynolds stress model (RSM) with first-order upwind (FOU) and second-order upwind (SOU) discretization.

The result showed that the FOU RSM turbulence model gives the best accuracy results than other turbulence models at the time of loading of 25% (0.291% error value), 50% (0.443% error value), 75% (0.419% error value) while at loading 0% (0.374% error value) and 100% (0.505% error value) SOU k - ϵ turbulence model has the best accuracy.

Keywords: EGR, turbulence model, discretization

ABSTRAK

Resirkulasi gas buang (EGR) adalah suatu metode dimana sebagian gas buang hasil pembakaran dimasukkan kembali ke silinder mesin. EGR berfungsi untuk mengurangi kadar NO_x dalam gas buang. Simulasi numerik dalam CFD digunakan untuk mengetahui karakteristik pencampuran udara dengan EGR di dalam *manifold intake* EGR pada mesin diesel yang tidak bisa dilihat langsung melalui eksperimen tanpa menggunakan alat-alat yang canggih seperti kamera *thermal*. Informasi yang diperoleh dari simulasi numerik tersebut digunakan untuk mengidentifikasi temperatur campuran udara dan EGR.

Fluida kerja yang digunakan dalam pemodelan ini adalah udara panas dan udara dingin. Kecepatan dan temperatur fluida masuk pada sisi masuk pipa EGR dan *manifold intake* divariasikan pada berbagai bukaan, beban dan putaran. Pemodelan turbulensi yang digunakan adalah $k-\varepsilon$ model, $k-\omega$ model dan *reynolds stress model* (RSM) dengan diskritisasi *first-order upwind* (FOU) dan *second-order upwind* (SOU).

Pemilihan model turbulen RSM FOU pada pemodelan pencampuran udara dengan EGR memberikan hasil keakuratan yang terbaik dibandingkan model turbulen lain pada saat pembebanan 25% (nilai error 0,291%), 50% (nilai error 0,443%), 75% (nilai error 0,419%) sedangkan pada pembebanan 0% (nilai error 0,374%) dan 100% (nilai error 0,505%) model turbulen $k-\varepsilon$ SOU memiliki keakuratan terbaik.

Kata kunci: EGR, model turbulen, diskritisasi

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan judul “ANALISA NUMERIK MODEL TURBULEN ALIRAN CAMPURAN UDARA DAN *HOT EGR* MESIN DIESEL”. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi pada program strata satu (S1) di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih atas bimbingan, bantuan, serta dukungan kepada Dr. Syaiful, ST, MT, selaku Dosen Pembimbing.

Dalam penulisan tugas akhir ini penulis menyadari banyak kekurangan. Oleh karena itu segala kritik yang bersifat membangun akan diterima dengan senang hati untuk kemajuan bersama. Akhir kata penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat kepada siapa saja yang membutuhkan data maupun referensi yang ada dalam laporan ini.

Terima kasih.

Semarang, 13 Maret 2012

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN TUGAS SARJANA	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
HALAMAN MOTTO DAN PERSEMBAHAN	vi
<i>ABSTRACT</i>	viii
ABSTRAKSI	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
NOMENKLATUR	xxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Batasan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Metode Penelitian	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II DASAR TEORI	6
2.1 Mesin Diesel	6
2.2 <i>Exhaust Gas Recirculating</i> (EGR)	7
2.3 Definisi Fluida	9
2.4 Klasifikasi Fluida	10
2.4.1 Aliran Viskos dan Non-viskos	11
2.4.2 Aliran Laminar dan Turbulen	12

2.4.3	Aliran Mampu-mampat dan Tak Mampu-mampat	12
2.4.4	Aliran Internal dan Eksternal.....	13
2.5	Bilangan Reynolds.....	14
2.6	Aliran di Dalam Pipa	15
2.7	Aliran Fluida Melalui Belokan/ <i>Bend</i>	19
2.8	Intensitas Turbulensi.....	20
2.9	Persamaan Dasar Aliran Fluida.....	21
2.9.1	Persamaan Kekekalan Massa.....	21
2.9.2	Persamaan Kekekalan Momentum	24
2.9.3	Persamaan Energi.....	28
2.9.4	Persamaan Navier-Stokes untuk Sebuah Fluida Newtonian	33
2.10	Teori Dasar Metode Volume Hingga	35
2.11	Skema Numerik.....	40
2.11.1	Metode Solusi <i>Pressure Based</i>	40
2.11.2	Metode Solusi <i>Density Based</i>	42
2.12	Model Turbulen (<i>Turbulence Modeling</i>)	46
2.12.1	Model <i>k-epsilon (k-ε) Standart</i>	46
2.12.2	Model <i>k-omega (k-ω) Standart</i>	48
2.12.3	Model <i>Reynolds Stress (RSM)</i>	49
2.13	Solusi Kontrol	50
2.14	Diskretisasi.....	50
2.14.1	<i>First-order Upwind Scheme</i>	53
2.14.2	<i>Second-order Upwind Scheme</i>	53
2.14.3	<i>Central Differencing Scheme</i>	54
2.14.4	<i>Power Law Scheme</i>	55
2.14.5	<i>Quick Scheme</i>	56
2.14.6	<i>Under-relaxation Factor</i>	57
2.15	Adaptasi Grid.....	57
2.15.1	Proses Adaptasi.....	57
2.15.2	Adaptasi Y^+ dan Y^*	58
2.16	Jenis Grid	58

2.17 Kualitas Mesh.....	59
BAB III SIMULASI DAN METODE KOMPUTASI.....	60
3.1 Langkah Pengerjaan	60
3.2 Simulasi Aliran Campuran Udara dan <i>Hot</i> EGR	62
3.2.1 Deskripsi Masalah.....	62
3.2.2 Penggenerasian Mesh.....	65
3.2.3 Penentuan Kondisi Batas	66
3.2.4 Simulasi Fluent 6.3.....	67
3.2.4.1 <i>Solver</i> dan Model Turbulensi.....	68
3.2.4.2 Pendefinisian Material.....	69
3.2.4.3 Pendefinisian Kondisi Operasi.....	71
3.2.4.4 Pendefinisian Kondisi Batas	71
3.2.4.5 <i>Grid Interfaces</i>	75
3.2.4.6 Solusi Kontrol	75
3.2.4.7 Proses Iterasi.....	76
3.2.4.8 Adaptasi.....	77
BAB IV ANALISA HASIL SIMULASI	78
4.1 Profil Kecepatan Aliran Turbulen pada Pemodelan Campuran Udara dengan EGR	78
4.2 Kontur Kecepatan pada Pemodelan Campuran Udara dengan EGR.....	81
4.3 Kontur Temperatur pada Pemodelan Campuran Udara dengan EGR...	89
4.4 Model Turbulen pada Pemodelan Campuran Udara dengan EGR.....	97
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	111
5.1 Kesimpulan	111
5.2 Saran	112

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN 1. Tabel data pengukuran variasi bukaan katup EGR dan beban.
- LAMPIRAN 2. Tabel *thermophysical properties of gases at atmospheric pressure*.
- LAMPIRAN 3. Tabel data input simulasi untuk inlet udara variasi bukaan katup beban
- LAMPIRAN 4. Tabel data input simulasi untuk inlet EGR variasi bukaan katup beban
- LAMPIRAN 5. Tabel data error hasil simulasi *intake manifold* EGR
- LAMPIRAN 6. Tabel *time consuming* hasil simulasi *intake manifold* EGR

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persamaan Pembangun Aliran Fluida Newtonian Kompresibel.....	35
Tabel 2.2 Berbagai variasi solusi kontrol pada Fluent 6.3.....	50
Tabel 3.1 Penentuan tipe batas spesifik <i>intake manifold</i> EGR	67
Tabel 3.2 Koefisien polinomial untuk fluida inlet EGR dan inlet udara.....	70
Tabel 3.3 Jenis diskritisasi yang digunakan dalam simulasi.....	76
Tabel 4.1 Prosentase error rata-rata hasil simulasi.....	108
Tabel 4.2 Besar iterasi rata-rata hasil simulasi.....	110

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. <i>Flowchart</i> Penelitian.....	3
Gambar 2.1 Sistem kerja mesin diesel empat langkah	5
Gambar 2.2 Skema sederhana dari sistem EGR.....	8
Gambar 2.3 Perbedaan perilaku dari benda padat dan fluida karena tegangan geser ..	10
Gambar 2.4. Klasifikasi aliran fluida.....	10
Gambar 2.5 Berbagai daerah aliran lapisan batas diatas plat rata	11
Gambar 2.6 Variasi kecepatan (satu dimensi) terhadap waktu	12
Gambar 2.7 Aliran dalam pipa	14
Gambar 2.8 Aliran eksternal yang melewati sebuah bola tenis dan daerah turbulen yang terbentuk di belakang bola	14
Gambar 2.9 <i>Entrance region</i> , <i>developing flow</i> , dan <i>fully developing flow</i> dalam sebuah sistem pipa.....	16
Gambar 2.10 Tipe profil kecepatan (a) aliran laminar berkembang penuh dan (b) aliran turbulen berkembang penuh.....	18
Gambar 2.11 Profil kecepatan turbulen untuk aliran berkembang penuh dalam <i>smooth pipe</i>	19
Gambar 2.12 Profil kecepatan aliran melalui belokan/ <i>bend</i>	19
Gambar 2.13 Efek <i>swirl</i> yang dihasilkan karena aliran melalui <i>elbow</i> dengan bidang yang berbeda	20
Gambar 2.14 Massa mengalir kedalam dan keluar elemen fluida.....	22
Gambar 2.15 Komponen tegangan pada tiga bidang elemen fluida.....	25
Gambar 2.16 Komponen tegangan dalam arah x	26
Gambar 2.17 Komponen vektor <i>flux</i> panas.....	30
Gambar 2.18 (a) Pembagian <i>control volume</i> 1 dimensi, (b) Panjang <i>control volume</i> ..	37
Gambar 2.19 <i>Grid</i> 2 dimensi.....	39
Gambar 2.20 <i>Grid</i> 3 dimensi.....	39
Gambar 2.21 Skema metode solusi <i>Pressure Based</i>	41
Gambar 2.22 Skema metode solusi <i>Density Based</i>	42

Gambar 2.23 Lukisan Leonardo da Vinci yang menggambarkan aliran turbulen	43
Gambar 2.24 Volume kendali yang digunakan untuk mengilustrasikan diskritisasi persamaan <i>transport</i> skalar.....	52
Gambar 2.25 Skema penentuan nilai sisi sel pada diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	53
Gambar 2.26 Skema penentuan nilai sisi sel pada diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	54
Gambar 2.27 Skema penentuan nilai sisi sel pada diskritisasi <i>Central Differencing Scheme</i>	55
Gambar 2.28 Skema penentuan nilai sisi sel pada diskritisasi <i>Power Law Scheme</i>	55
Gambar 2.29 Skema penentuan nilai sisi sel pada diskritisasi <i>QUICK Scheme</i>	56
Gambar 2.30 Hasil <i>meshing</i> menggunakan adaptasi y^+	58
Gambar 2.31 Tipe sel 2D	59
Gambar 2.32 Tipe sel 3D	59
Gambar 3.1 Diagram alir langkah simulasi.....	62
Gambar 3.2 Skema sistem EGR yang digunakan dalam eksperimen.....	62
Gambar 3.3 <i>Manifold intake</i> EGR	63
Gambar 3.4 Gambar geometri 3D model <i>manifold intake EGR</i>	64
Gambar 3.5 Gambar spesifikasi geometri <i>manifold intake EGR</i>	64
Gambar 3.6 <i>Grid</i> terstruktur pada domain	65
Gambar 3.7 Daerah asal (<i>domain</i>) untuk model <i>intake manifold</i>	66
Gambar 3.8 Jendela <i>solver</i> untuk <i>manifold intake EGR</i>	68
Gambar 3.9 Jendela model viskos untuk aliran internal dalam <i>manifold intake EGR</i> .	69
Gambar 3.10 Jendela pendefinisian material	71
Gambar 3.11 Jendela pendefinisian kondisi operasi	71
Gambar 3.12 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>velocity inlet</i> untuk momentum.....	73
Gambar 3.13 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>velocity inlet</i> untuk suhu	73
Gambar 3.14 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>outflow</i>	74
Gambar 3.15 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>wall</i>	74
Gambar 3.16 Jendela pendefinisian <i>grid interfaces</i>	75
Gambar 3.17 Jendela inisialisasi solusi	76
Gambar 3.18 Jendela <i>residual monitors</i>	76
Gambar 3.19 Iterasi telah mencapai kriteria konvergensi	77

Gambar 4.1 Profil kecepatan (m/s) <i>fully develop</i> pada posisi <i>entrance</i> sisi masuk pipa EGR saat bukaan katub beban 100% bukaan katub EGR 25% putaran 2500 rpm dengan model turbulen $k-\varepsilon$ diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i> (SOU).....	79
Gambar 4.2 Profil kecepatan (m/s) <i>fully develop</i> pada posisi <i>entrance</i> sisi masuk <i>intake manifold</i> pada bukaan katub 25% bukaan katub EGR 75% putaran 2500 rpm dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i> (SOU)	80
Gambar 4.3 Profil kecepatan (m/s) <i>fully develop</i> pada sisi keluar <i>intake manifold</i> EGR pada bukaan katub beban 100% bukaan katub EGR 25% putaran 2500 rpm dengan model turbulen $k-\varepsilon$ diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i> (SOU)	83
Gambar 4.4 Kontur kecepatan (m/s) pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 50% bukaan katub EGR 75% putaran 2100 rpm dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i> (SOU).....	81
Gambar 4.5 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen RSM pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	84
Gambar 4.6 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen RSM pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	82
Gambar 4.7 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\varepsilon$ pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	83
Gambar 4.8 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\varepsilon$ pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	83

Gambar 4.9 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen <i>k-ω</i> pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	84
Gambar 4.10 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen <i>k-ω</i> pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	84
Gambar 4.11 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen RSM pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	85
Gambar 4.12 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen RSM pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	85
Gambar 4.13 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen <i>k-ϵ</i> pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	86
Gambar 4.14 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen <i>k-ϵ</i> pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	86
Gambar 4.15 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen <i>k-ω</i> pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	87
Gambar 4.16 Kontur kecepatan pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100	

	rpm model turbulen $k-\omega$ pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	87
Gambar 4.17	Kontur temperatur (K) pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 50% bukaan katub EGR 75% putaran 2100 rpm dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	89
Gambar 4.18	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen RSM pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	89
Gambar 4.19	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen RSM pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	90
Gambar 4.20	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\varepsilon$ pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	91
Gambar 4.21	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\varepsilon$ pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	91
Gambar 4.22	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\omega$ pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	92
Gambar 4.23	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\omega$ pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	92

Gambar 4.24	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\varepsilon$ pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	93
Gambar 4.25	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\varepsilon$ pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	93
Gambar 4.26	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen RSM pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	94
Gambar 4.27	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen RSM pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	94
Gambar 4.28	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\omega$ pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ dengan diskritisasi <i>First-Order Upwind</i>	95
Gambar 4.29	Kontur temperatur pemodelan pencampuran udara dengan <i>hot</i> EGR pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% putaran 2100 rpm model turbulen $k-\omega$ pada posisi perpotongan bidang $z=19,85$ dengan diskritisasi <i>Second-Order Upwind</i>	95
Gambar 4.30	Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 0% bukaan katub EGR 25%.....	97
Gambar 4.31	Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 0% bukaan katub EGR 50%.....	98

- Gambar 4.32 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 0 % bukaan katub EGR 75% 98
- Gambar 4.33 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 0% bukaan katub EGR 100% 99
- Gambar 4.34 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 25% 99
- Gambar 4.35 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 50% 100
- Gambar 4.36 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 75% 100
- Gambar 4.37 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 25% bukaan katub EGR 100% 101
- Gambar 4.38 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 50% bukaan katub EGR 25% 101
- Gambar 4.39 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 50% bukaan katub EGR 50% 102
- Gambar 4.40 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 50% bukaan katub EGR 75% 102
- Gambar 4.41 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 50% bukaan katub EGR 100% 103

Gambar 4.42 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 75% bukaan katub EGR 25%	103
Gambar 4.43 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 75% bukaan katub EGR 50%	104
Gambar 4.44 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 75% bukaan katub EGR 75%	104
Gambar 4.45 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 75% bukaan katub EGR 100%	105
Gambar 4.46 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 100% bukaan katub EGR 25%	105
Gambar 4.47 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 100% bukaan katub EGR 50%	106
Gambar 4.48 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 100% bukaan katub EGR 75%	106
Gambar 4.49 Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur pada bukaan katub beban 100% bukaan katub EGR 100% ..	107
Gambar 4.50 Diagram <i>prosentase</i> error rata-rata hasil simulasi menggunakan berbagai model turbulen pada pemodelan pencampuran udara dengan EGR pada berbagai variasi pembebanan serta diskritisasi <i>First-Order Upwind</i> dan <i>Second-Order Upwind</i>	108

Gambar 4.51 Diagram *Time Consuming* Simulasi pemodelan pencampuran udara dengan EGR menggunakan berbagai model turbulen pada pada berbagai variasi pembebanan serta diskritisasi *First-Order Upwind* dan *Second-Order Upwind* 109

NOMENKLATUR

A	Luasan aliran	m^2
D	Diameter pipa	m
D_H	Diameter hidrolis pipa	m
E	Energi dalam per satuan massa	Nm/kg
\bar{F}	Total gaya yang diberikan oleh fluida untuk melawan gesekan	N
g	Percepatan yang disebabkan gravitasi	m/s^2
L	Panjang pipa	m
n	Indeks Blassius	–
Q	Laju volumetrik aliran	m^3/s
T	Temperatur	K
u	Kecepatan	m/s
\bar{u}	Kecepatan rata-rata untuk aliran homogen	m/s
u'	Kecepatan fluktuasi	m/s
V_t	Volume total udara masuk ke silinder	kg/s
V_{EGR}	Volume udara EGR	kg/s
μ	Viskositas dinamis	Ns/m^2

ν	Viskositas kinematis	m^2/s
ρ	Densitas	kg/m^3
τ_w	Tegangan geser dinding	N/m^2
Φ	Fungsi disipasi	J/kg
Re	Bilangan Reynolds	-
u	Vektor kecepatan arah sumbu x	m/s
v	Vektor kecepatan arah sumbu y	m/s
w	Vektor kecepatan arah sumbu z	m/s
x,y,z	Sumbu koordinat kartesius	-