



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**EFEK LOKASI INJEKTOR TERHADAP DISTRIBUSI MASSA
AMONIA DI DALAM SISTEM NH_3 -SCR *CATALYTIC FILTER*
DENGAN *DYNAMIC MIXER* UNTUK APLIKASI MESIN
DIESEL TRUK DENGAN MENGGUNAKAN SIMULASI
NUMERIK**

TUGAS AKHIR

**ISEU ANDRIANI
L2E 006 057**

**FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN**

**SEMARANG
SEPTEMBER 2011**

TUGAS AKHIR

- Diberikan Kepada : Nama : Iseu Andriani
NIM : L2E 006 057
- Dosen Pembimbing : Dr. Syaiful, ST, MT
- Jangka Waktu : 18 Bulan (Delapan belas bulan)
- Judul : **Efek Lokasi Injektor Terhadap Distribusi Massa Amonia di Dalam *NH₃-SCR Catalytic Filter* dengan *Dynamic Mixer* untuk Aplikasi Mesin Diesel Truk dengan Menggunakan Simulasi Numerik**
- Isi Tugas :
 - Mengetahui pengaruh distribusi amonia dengan dan tanpa perangkat *dynamic mixer* dalam sistem *NH₃-SCR catalytic filter*.
 - Mengetahui besarnya *pressure drop* dari penggunaan *Honeycomb*.

Semarang, 27 September 2011

Dosen Pembimbing




Dr. Syaiful, ST, MT

NIP. 197403081999031005

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

NAMA : Iseu Andriani
NIM : L2E 006 057
Tanda Tangan : 
Tanggal : 27 September 2011


HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
NAMA : Iseu Andriani
NIM : L2E 006 057
Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Efek Lokasi Injektor Terhadap Distribusi Massa Amonia di Dalam *NH3-SCR Catalytic Filter* dengan *Dynamic Mixer* untuk Aplikasi Mesin Diesel Truk dengan Menggunakan Simulasi Numerik

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

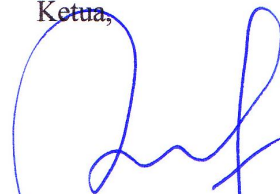
Pembimbing : Dr. Syaiful, ST, MT
Penguji : Muchammad, ST, MT.
Penguji : Ir. Budi Setiyana, MT.

()
()
()

Semarang, Oktober 2011

Jurusan Teknik Mesin

Ketua,



Dr. Dipl. Ing. Ir. Berkah Fadjar TK

NIP.195907221987031003

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : ISEU ANDRIANI
NIM : L2E 006 057
Jurusan/Program Studi : TEKNIK MESIN
Fakultas : TEKNIK
Jenis Karya : SKRIPSI

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

EFEK LOKASI INJEKTOR TERHADAP DISTRIBUSI MASSA AMONIA DI DALAM SISTEM NH₃-SCR CATALYTIC FILTER DENGAN DYNAMIC MIXER UNTUK APLIKASI MESIN DIESEL TRUK DENGAN MENGGUNAKAN SIMULASI NUMERIK

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia/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 : September 2011

Yang menyatakan



(Iseu Andriani)
NIM. L2E 006 057

MOTTO

✚ *Hari ini harus lebih baik dari hari kemarin*

✚ *Orang lain bisa, kenapa kita tidak*

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Ayah Sarju dan Ibu Eti serta seluruh saudaraku tersayang yang telah mencurahkan cinta, kasih sayang, dorongan dan doa yang tidak pernah putus.
2. Teman-teman seperjuangan yaitu Robi, Agung, Qadri, Parno, Yuyud dan Arman yang telah banyak membantu saya.
3. Seseorang special yang selalu memberi semangat dan dorongan serta doanya yaitu ayang ndudku tercinta Ranggalek.
4. Teman-teman “HST” yang selalu memberikan canda tawa.
5. Teman-teman seangkatan yang selama ini telah membuat saya tetap bertahan disini.
6. Anak-anak Griya Lotus yang selalu rame dan memberikan semangat.

ABSTRAK

Sebagian besar kendaraan mesin diesel menghasilkan emisi gas buang yang berbahaya bagi manusia. Salah satu emisi gas buang dari kendaraan tersebut adalah Nitrogen Oksida (NO_x), unsur tersebut sangat berbahaya bagi manusia dan material yang ada disekitarnya. Salah satu teknologi untuk mengurangi emisi gas buang tersebut adalah dengan menggunakan sistem *Selective Catalytic Reduction* (SCR) dengan menginjeksikan Amonia (NH₃) kedalam saluran gas buang, amonia yang diinjeksikan dapat berfase gas ataupun berfase cair (*liquid*).

SCR adalah suatu metode untuk mengurangi produk pembakaran dari mesin diesel yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan sekitar menjadi gas buang ramah lingkungan (tidak beracun). Penelitian tugas akhir ini mempunyai tujuan untuk mengetahui efek lokasi injektor terhadap distribusi massa ammonia pada sistem NH₃-SCR dengan *dynamic mixer* menggunakan simulasi software CFD. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah salah satu cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisa masalah yang melibatkan aliran fluida. Fluida kerja udara panas dengan temperatur 450 K dan gas ammonia dengan temperatur 300 K. Kecepatan fluida masuk pada sisi inlet pipa SCR dan injeksi ammonia divariasikan pada berbagai GHSV. Pemodelan yang digunakan adalah $k-\varepsilon$ model, aliran *incompressible flow* dan dengan material properties polynomial berdasar fungsi temperatur. Dari pemodelan tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa indeks pencampuran yang dihasilkan sistem NH₃-SCR *catalytic filter* dengan menggunakan *dynamic mixer* lebih tinggi di bandingkan dengan sistem tanpa menggunakan *dynamic mixer* dan semakin besar nilai GHSV semakin besar juga nilai penurunan tekanan pada SCR.

Kata kunci: *Selective Catalytic Reduction* (SCR), *dynamic mixer*, ammonia, indeks pencampuran, GHSV

ABSTRACT

Most of the diesel engine vehicle exhaust emissions that are harmful to humans. One of the exhaust emissions from vehicles are Nitrogen Oxides (NO_x), the substance is very hazardous to humans and the material around it. One of the technologies to reduce emissions is by using Selective Catalytic Reduction system (SCR) by injecting ammonia (NH₃) into the exhaust, ammonia is injected to the gas-phase or liquid-phase (liquid).

SCR is a method to reduce the combustion products from diesel engines that are harmful to health and the environment around the exhaust environmentally friendly (non toxic). Final task of this research has the objective to determine the effects of injection placement on the mass distribution of ammonia in the NH₃-SCR system with dynamic mixers using CFD simulation software. Computational Fluid Dynamics (CFD) is one branch of fluid mechanics that uses numerical methods and algorithms to solve and analyze problems involving fluid flow. Working fluid temperature of hot air with 450 K and ammonia gas with a temperature 300 K. Fluid velocity at the inlet pipe into the SCR and ammonia injection be varied at different GHSV. Modeling that is used is $k-\epsilon$ model, the flow incompressible flow and with material properties based polynomial function of temperature. Of modeling can be concluded that the index of mixing the resulting system of NH₃-SCR catalytic filter using dynamic mixer is higher in comparison with the system without using a dynamic mixer and the greater the value the greater the value of GHSV pressure drop in the SCR.

Key words: Selective Catalytic Reduction (SCR), dynamic mixer, ammonia, mixing index, GHSV

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, taufik, hidayah dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya. Tugas Akhir yang berjudul **“Efek Lokasi Injektor Terhadap Distribusi Massa Amonia Di Dalam Sistem NH₃-SCR *Catalytic Filter* Dengan Mixer Dinamik Untuk Aplikasi Mesin Diesel Truk Dengan Menggunakan Simulasi Numerik”** ini dimaksudkan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Pendidikan Tingkat Sarjana Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

Dalam kesempatan ini penyusun ingin menyampaikan rasa hormat dan terimakasih setulus-tulusnya kepada semua pihak yang telah membantu dan memberikan dorongan kepada penyusun selama penyusunan Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Dr. Syaiful, ST, MT selaku Pembimbing, yang telah memberikan bimbingan, pengarahan-pengarahan dan masukan-masukan kepada penyusun untuk menyusun Tugas Akhir ini.
2. Teman-teman satu kelompok yang telah bekerja sama dalam menyusun Tugas Akhir ini.

Dengan penuh kerendahan hati, penyusun menyadari akan kekurangan dan keterbatasan pengetahuan yang penyusun miliki, untuk itu penyusun mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak. Akhir kata semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semakin menambah kecintaan dan rasa penghargaan kita terhadap Teknik Mesin Universitas Diponegoro.

Semarang, September 2011

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN TUGAS SARJANA..... | ii |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | iii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI | v |
| HALAMAN MOTTO | vi |
| HALAMAN PERSEMBAHAN | vii |
| ABSTRAK..... | viii |
| <i>ABSTRACT</i> | ix |
| KATA PENGANTAR..... | x |
| DAFTAR ISI..... | iv |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR TABEL..... | xviii |
| NOMENKLATUR | xix |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Alasan Pemilihan Judul | 3 |
| 1.3. Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4. Batasan Masalah | 3 |
| 1.5. Metode Penelitian | 3 |
| 1.6. SistematikaPenulisan..... | 4 |
| | |
| BAB II DASAR TEORI..... | 5 |
| 2.1. Mesin Diesel | 5 |
| 2.1.1. Prinsip kerja..... | 5 |
| 2.1.2. Emisi dan Polusi Udara..... | 6 |
| 2.1.3. Standar Emisi Negara Eropa | 7 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.2. | <i>Selective Catalytic Converter</i> | 8 |
| 2.3. | <i>Catalytic Converter</i> | 10 |
| 2.4. | Definisi Fluida | 13 |
| 2.4.1. | Klasifikasi Aliran Fluida | 13 |
| 2.4.1.1. | Aliran Viskos dan Non-viskos (<i>Viscous and Inviscid Flow</i>) | 14 |
| 2.4.1.2. | Aliran Laminar dan Turbulen (<i>Laminar and Turbulent Flow</i>) | 15 |
| 2.4.1.3. | Aliran Mampat dan Tak Mampat (<i>Compressible and Incompressible Flow</i>)..... | 16 |
| 2.4.1.4. | Aliran Dalam dan Luar (<i>Internal and Eksternal Flow</i>) | 17 |
| 2.4.2. | Aliran di Dalam Pipa | 18 |
| 2.4.3. | Viskositas | 20 |
| 2.5. | Persamaan Pembangunan untuk Aliran Fluida | 22 |
| 2.5.1. | Persamaan Kekekalan massa..... | 22 |
| 2.5.2. | Persamaan Momentum..... | 24 |
| 2.5.3. | Hukum Kekekalan Energi..... | 27 |
| 2.5.4. | Model Aliran Turbulen, <i>Standard k-ε</i> | 28 |
| 2.6. | <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i> | 30 |
| 2.6.1. | Metode Numerik pada CFD | 30 |
| 2.6.1.1. | <i>Solver Segregated</i> | 31 |
| 2.6.1.2. | <i>Solver Coupled</i> | 32 |
| 2.6.2. | Solusi Kontrol..... | 33 |
| 2.6.3. | Bentuk <i>Grid</i> | 35 |
| 2.6.4. | <i>Mesh</i> | 36 |
| 2.6.4.1. | Kerapatan Nodal..... | 37 |
| 2.6.4.2. | Kehalusan (<i>Smoothness</i>)..... | 37 |
| 2.6.4.3. | Bentuk <i>Cell</i> | 37 |
| 2.6.5. | Adaptasi <i>Grid</i> | 38 |
| 2.6.5.1. | Proses Adaptasi | 38 |
| 2.6.6. | Intensitas Turbulen (<i>Turbulent Intensity</i>) | 38 |
| 2.6.7. | <i>Gas Hourly Space Velocity (GHSV)</i> | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 2.6.8. <i>Species Transport</i> | 39 |
| 2.6.9. <i>Porous Media</i> | 40 |
| 2.7. IndeksPencampuran (<i>Mixing Index</i>) | 41 |
| BAB III SIMULASI DAN METODE KOMPUTASI | 43 |
| 3.1. Langkah pengerjaan | 43 |
| 3.2. Simulasi Aliran padaSistem <i>Exhaust Gas</i> dengan <i>Selective</i> <i>Catalytic Reduction</i> | 45 |
| 3.2.1. Pemodelan Masalah | 45 |
| 3.2.2. Penggenerasian <i>Mesh</i> | 45 |
| 3.2.3. Simulasi <i>software</i> CFD | 47 |
| 3.2.3.1. Solver dan Model Turbulensi..... | 48 |
| 3.2.3.2. Pendefinisian Model Fisik | 48 |
| 3.2.3.3. Pendefinisian Kondisi Batas | 50 |
| 3.2.3.4. Proses Simulasi | 55 |
| 3.2.4. Verifikasi Hasil Simulasi | 56 |
| BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN | 61 |
| 4.1 Hasil Simulasi | 61 |
| 4.1.1 Indeks Pencampuran(<i>Mixing Index</i>)..... | 61 |
| 4.1.1.1. Visualisasi Kontur Kecepatan dan Vektor Kecepatan | 62 |
| 4.1.1.2. Visualisasi Kontur Intensitas Turbulen..... | 69 |
| 4.1.1.3. Visualisasi Kontur Distribusi Fraksi Massa Amonia | 73 |
| 4.1.2 Grafik <i>mixing index</i> Amonia Pada Variasi GHSV..... | 78 |
| 4.1.3 Grafik <i>mixing index</i> Amonia Pada Variasi <i>Mixer</i> | 81 |
| 4.1.4 <i>Pressure Drop</i> | 84 |
| 4.1.2.1. Visualisasi Kontur Tekanan | 84 |
| 4.1.2.2. Grafik <i>Pressure Drop</i> Pada Variasi GHSV..... | 86 |

| | |
|---------------------------------|----|
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 87 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 87 |
| 5.2 Saran..... | 87 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 88 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Sistem kerja mesin diesel empat langkah (<i>four-stroke engine</i>)..... | 5 |
| Gambar 2.2 | Standar Euro untuk kendaraan..... | 8 |
| Gambar 2.3 | Standar EURO NO _x dan PM untuk kendaraan bermesin diesel | 8 |
| Gambar 2.4 | Aplikasi sistem <i>selective catalytic reduction</i> pada automobil..... | 10 |
| Gambar 2.5 | <i>Catalytic converter</i> | 11 |
| Gambar 2.6 | <i>Catalytic converter ceramic pellet</i> | 11 |
| Gambar 2.7 | <i>Catalytic converter ceramic honeycomb</i> | 12 |
| Gambar 2.8 | <i>Catalytic converter metallic honeycomb</i> | 12 |
| Gambar 2.9 | Efek pada (a) benda padat (<i>solid</i>) dan (b) fluida, jika diberikan gaya geser yang konstan | 13 |
| Gambar 2.10 | Klasifikasi aliran fluida | 14 |
| Gambar 2.11 | Ketergantungan kecepatan fluida terhadap waktu | 15 |
| Gambar 2.12 | (a) Aliran luar (<i>external flow</i>) dan (b) aliran dalam (<i>internal flow</i>) | 18 |
| Gambar 2.13 | Daerah masuk aliran sedang berkembang dan aliran berkembang penuh di dalam sistem pipa | 19 |
| Gambar 2.14 | Profil kecepatan aliran dalam pipa (a) laminar berkembang penuh (b) turbulen berkembang penuh | 20 |
| Gambar 2.15 | Deformasi elemen fluida | 21 |
| Gambar 2.16 | Aliran massa masuk dan keluar dari elemen fluida | 22 |
| Gambar 2.17 | Gaya-gaya pada permukaan elemen fluida | 25 |
| Gambar 2.18 | Skema metode <i>solver segregated</i> | 32 |
| Gambar 2.19 | Skema metode <i>solver coupled</i> | 33 |
| Gambar 2.20 | Tipe <i>cell</i> 2D | 35 |
| Gambar 2.21 | Tipe <i>cell</i> 3D | 36 |

| | |
|---|----|
| Gambar 2.22 <i>Grid</i> 3D: <i>tetrahedral</i> tak terstruktur dan <i>polyhedral</i> | 36 |
| Gambar 2.23 <i>Grid</i> 2D: <i>quadrilateral</i> terstruktur dan <i>triangular</i> tak terstruktur | 36 |
| Gambar 3.1 Diagram alir langkah simulasi | 44 |
| Gambar 3.2 Geometri dan Desain sistem NH ₃ -SCR | 46 |
| Gambar 3.3 Grid Model pada domain komputasi | 46 |
| Gambar 3.4 Jendela pendefinisian material | 47 |
| Gambar 3.5 Jendela pendefinisian zona sel <i>moving reference frame</i> | 50 |
| Gambar 3.6 Jendela pendefinisian zona sel <i>porous zone</i> | 51 |
| Gambar 3.7 Kondisi batas untuk domain komputasi system NH ₃ -SCR | 52 |
| Gambar 3.8 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>velocity inlet</i> | 53 |
| Gambar 3.9 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>mass flow rate</i> | 53 |
| Gambar 3.10 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>pressure outlet</i> | 54 |
| Gambar 3.11 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>wall (moving wall)</i> | 54 |
| Gambar 3.12 Jendela pendefinisian kondisi batas <i>wall (stationary wall)</i> | 55 |
| Gambar 3.13 Iterasi telah mencapai kriteria konvergen | 55 |
| Gambar 3.14 <i>Skin friction coefficient</i> GHSV 10000..... | 56 |
| Gambar 3.15 <i>Skin friction coefficient</i> GHSV 20000 | 57 |
| Gambar 3.16 <i>Skin friction coefficient</i> GHSV 20000 | 58 |
| Gambar 3.17 <i>Skin friction coefficient</i> GHSV 30000 | 59 |
| Gambar 3.18 Grafik <i>friction factor vs Reynolds number</i> | 60 |
| Gambar 4.1 Kontur dan vector kecepatan | 68 |
| Gambar 4.2 Kontur intensitas turbulen | 72 |
| Gambar 4.3 Kontur distribusi massa amonia | 77 |
| Gambar 4.4 Perbandingan indeks pencampuran untuk kasus dengan <i>dynamic mixer</i> dan tanpa <i>static mixer</i> pada kondisi GHSV 10000 | 78 |
| Gambar 4.5 Perbandingan indeks pencampuran untuk kasus dengan <i>dynamic mixer</i> dan tanpa <i>static mixer</i> pada kondisi GHSV 20000 | 79 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 4.6 | Perbandingan indeks pencampuran untuk kasus dengan <i>dynamic mixer</i> dan tanpa <i>static mixer</i> pada kondisi GHSV 30000 | 79 |
| Gambar 4.7 | Perbandingan indeks pencampuran untuk kasus dengan <i>dynamic mixer</i> dan tanpa <i>static mixer</i> pada kondisi GHSV 40000 | 80 |
| Gambar 4.8 | Perbandingan indeks pencampuran untuk kasus dengan <i>dynamic mixer</i> , <i>static mixer</i> dan tanpa <i>mixer</i> pada kondisi GHSV 10000 | 81 |
| Gambar 4.9 | Perbandingan indeks pencampuran untuk kasus dengan <i>dynamic mixer</i> , <i>static mixer</i> dan tanpa <i>mixer</i> pada kondisi GHSV 20000 | 82 |
| Gambar 4.10 | Perbandingan indeks pencampuran untuk kasus dengan <i>dynamic mixer</i> , <i>static mixer</i> dan tanpa <i>mixer</i> pada kondisi GHSV 30000 | 82 |
| Gambar 4.11 | Perbandingan indeks pencampuran untuk kasus dengan <i>dynamic mixer</i> , <i>static mixer</i> dan tanpa <i>mixer</i> pada kondisi GHSV 40000 | 83 |
| Gambar 4.12 | Kontur tekanan | 85 |
| Gambar 4.13 | Grafik <i>pressure drop</i> pada variasi GHSV | 86 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 Berbagai Variasi Solus Kontrol pada CFD | 34 |
| Tabel 3.1 Ukuran <i>grid</i> berdasarkan jumlah sel, sisi, dan nodal..... | 47 |
| Tabel 3.2 Model solusi yang digunakan dalam simulasi | 47 |
| Tabel 3.3 Koefisien polynomial untuk fluida <i>hot air</i> | 49 |
| Tabel 3.4 Koefisien polynomial untuk fluida ammonia..... | 49 |
| Tabel 3.5 Variasi laju aliran massa ammonia | 53 |

NOMEN KLATUR

| | | |
|-----------------|------------------------------------|----------|
| A | Luasan | m^2 |
| C | Konsentrasifraksimassa | — |
| E | Energi dalam per satuan massa | Nm/kg |
| F | gaya | N |
| I | Intensitas turbulen | % |
| L | Panjang pipa | m |
| Q | Laju aliran | m^3/h |
| u | Kecepatan | m/s |
| \bar{u} | Kecepatan rata – rata untuk aliran | m/s |
| U | Kecepatan maksimum | m/s |
| ν | viskositaskinematis | m^2/s |
| V | volume | m^3 |
| μ | viskositas dinamik | Ns/m^2 |
| ρ | Densitas | kg/m^3 |
| τ_w | Tegangan geser dinding | N/m^2 |
| Γ | Indeks pencampuran | — |
| $\frac{du}{dy}$ | Gradient kecepatan | m/s |