

SECOND ORDER UPWIND DIFFERENCING SCHEME OF $K-\epsilon$ TURBULENCE MODEL FOR AIR AND EGR FLOW MIXTURES IN INTAKE MANIFOLD OF DIESEL ENGINE

Syaiful*, Tommy Hendarto

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

*Email:syaiful.undip2011@gmail.com

ABSTRACT

Fluent is one of the commercial software of computational fluid dynamics using a finite volume of discretization method. This method divides a domain of model becoming several small finite volumes. This software may be used to predict the fluid flow, heat transfer, chemical reaction and other fluids phenomena. In the recent study, the Fluent is used as a tool to predict the characteristics of air and partial exhaust gas mixtures in an intake manifold of diesel engine. In this modeling, the observed mixtures characteristics are the fluid flow and temperature distributions. The type of fluid flowing in the intake manifold of EGR is a turbulent flow. Fluent serves some turbulence models which are $k-\epsilon$, $k-\omega$ and Reynolds Stress Model (RSM) models. Each turbulence model has a different characteristics. It is important, therefore, to know the appropriate turbulence model type for investigating the fluid flow mixtures phenomena in the intake manifold. The fluids flowing into this intake manifold are varied based on the percentage of opening valve EGR, opening load valve and diesel engine speeds. The study shows that the $k-\epsilon$ turbulence model is the best model than the other models. This turbulence model has small error with the experimental results for several the opening load valves in which for opening load valve of 0% (0.374% error), 50% (0.495% error), 75% (0.444% error) dan 100% (0.505% error). However, the $k-\omega$ turbulence model has the smallest error (0.381%) at the opening load valve of 25%.

Kata kunci: EGR, intake manifold EGR, Fluent, model turbulen

Pendahuluan

Aliran fluida, baik cair maupun gas, adalah suatu zat yang sangat kentara dengan kehidupan sehari-hari. Untuk kebutuhan penelitian bahkan sampai dengan tingkat desain, dibutuhkan suatu alat yang mampu menganalisa atau memprediksinya dengan cepat dan akurat. Maka, berkembanglah suatu ilmu yang dinamakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) atau komputasi aliran fluida dinamik. Secara definisi, CFD adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, rekasi kimia, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika dalam model matematika. Pada dasarnya, persamaan-persamaan pada fluida dibangun dan dianalisis berdasarkan persamaan-persamaan diferensial parsial (PDE) yang mempresentasikan hukum-hukum konversi massa, momentum, dan energi. Sebuah perangkat lunak CFD akan memberikan simulasi aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa, benda-benda bergerak, aliran multi fasa, reaksi kimia, interaksi fluida dengan struktur, dan sistem akuisisi hanya dengan pemodelan di komputer. Prototipe virtual dari sebuah sistem atau alat yang akan dianalisis dengan menerapkan kondisi nyata dilapangan dapat dibuat dengan menggunakan *software* ini. *Software* CFD akan memberikan data-data, gambar-gambar, atau kurva-kurva yang menunjukkan prediksi dari performansi keandalan sistem yang disimulasikan (Ridwan Arief, 2009). Fluent merupakan salah satu *software* CFD yang menggunakan metode diskritisasi volume hingga. Metode ini membagi domain suatu model menjadi suatu bagian-bagian kecil yang jumlahnya berhingga.

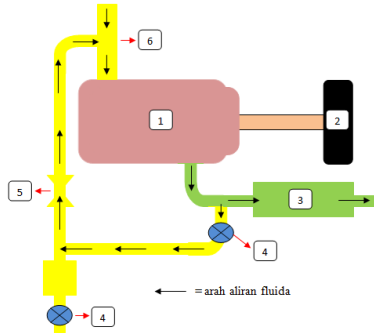
Studi Bappenas pada tahun 2009 melaporkan bahwa Indonesia menjadi negara dengan tingkat polusi udara tertinggi ketiga di dunia. Kontribusi gas buang kendaraan bermotor sebagai sumber polusi udara terbesar mencapai 60-70%, dibanding dengan industri yang hanya berkisar antara 10-15%. (Aryo Sasmita, 2011). Oleh karena itu perlu adanya upaya untuk mereduksi emisi kendaraan bermotor. Salah satu upaya yang digunakan dengan penggunaan *exhaust gas recirculation* (EGR). *Exhaust gas recirculation* (EGR) merupakan suatu metode dimana sebagian gas buang hasil pembakaran dimasukkan kembali ke ruang bakar. EGR efektif untuk mengurangi kadar NO_x (Zheng Ming, 2003).

Dalam penelitian mengenai *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) ini Fluent difokuskan sebagai alat bantu untuk memprediksi karakteristik pencampuran antara udara dan gas buang di dalam *intake manifold* EGR. Karakteristik pencampuran yang diamati dalam penelitian ini adalah temperatur dan distribusi temperatur. Aliran fluida yang melewati *intake manifold* EGR merupakan aliran turbulen. Dalam pemodelan aliran turbulen di Fluent terdapat berbagai jenis model turbulen antara lain $k-\epsilon$, $k-\omega$ dan *Reynolds Stress Model* (RSM). Masing-masing model turbulen memiliki karakteristik yang berbeda-beda, oleh karena itu penting untuk mengetahui jenis model turbulen apa yang paling sesuai untuk pemodelan aliran dalam *intake manifold* EGR. Simulasi ini menggunakan FLUENT 6.3.26.

METODOLOGI PENELITIAN

1. Skema Sistem EGR

Pada eksperimen dilakukan pengujian dengan variasi bukaan katup beban dan EGR pada berbagai putaran mesin yaitu 1300 rpm, 1700 rpm, 2100 rpm, dan 2500 rpm. Variasi bukaan katup beban adalah 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%. Sedangkan variasi bukaan katup EGR dari 25%, 50%, 75% sampai 100%. Data-data yang didapat dari pengujian ini nantinya akan digunakan untuk simulasi.



Gambar 4. Skema sistem EGR yang digunakan dalam eksperimen.

Keterangan gambar:

- 1 = Mesin diesel
- 2 = Dinamometer
- 3 = Exhaust muffler
- 4 = Katup
- 5 = Venturi scrubber
- 6 = Intake manifold EGR

2. Model Turbulen

2.1 Model $k-\varepsilon$ Standard

Model $k-\varepsilon$ standar merupakan model semi empiris berdasarkan persamaan *transport* untuk energi kinetik (k) dan laju disipasi (ε) (Fluent, 1999). Energi kinetik turbulen, (k) dan laju disipasi (ε) diperoleh dari persamaan *transport* berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k + G_b \\ &- \rho \varepsilon + S_k \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \varepsilon u_i &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \\ &+ G_k + G_{3\varepsilon} G_b - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned}$$

2.2 Model $k-\omega$ standard

Model $k-\omega$ standar merupakan model empiris berdasarkan persamaan *transport* untuk energi kinetik (k) dan laju disipasi spesifik (ω) (Fluent, 1999). Energi kinetik turbulen, (k) dan laju disipasi spesifik (ω) diperoleh dari persamaan *transport* berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - Y_k + S_k$$

dan

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \omega u_i &= \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \end{aligned}$$

2.3 Reynold Stress Model (RSM)

RSM mendekati persamaan *Navier-Stokes* (*Reynolds-averaged*) dengan menyelesaikan persamaan *transport* untuk tegangan *Reynolds* bersama-sama dengan persamaan laju disipasi. RSM tidak selalu memberikan hasil yang lebih baik dibanding dengan model yang lebih sederhana (dengan 1 atau 2 persamaan) pada semua jenis aliran dengan komputasi yang lebih berat (Fluent, 1999). Persamaan *transport* yang tepat untuk *transport* tegangan Reynolds, $\rho u'_i u'_j$, dapat ditulis sebagai berikut:

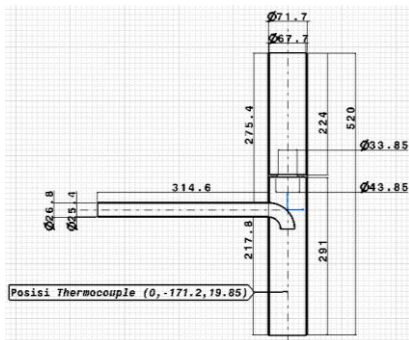
| | | | | |
|---|---|--|---|---|
| $\frac{\partial}{\partial t} (\rho u'_i u'_j)$ | + | $\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k u'_i u'_j)$ | = | $-\frac{\partial}{\partial x_k} \rho u'_i u'_j u'_k + (p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j))$ |
| penurunan waktu lokal | | $C_{ij} \equiv$ konveksi | | $D_{T,ij} \equiv$ difusi turbulen |
| $+\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (u'_i u'_j) \right)$ | - | $\rho u'_i u'_k \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + u'_j u'_k \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}$ | | $-\rho \beta g'_i u'_j \theta + g'_j u'_i \theta$ |
| $D_{L,ij} \equiv$ difusi molekuler | | $P_{ij} \equiv$ produksi tegangan (<i>stress</i>) | | $G_{T,ij} \equiv$ produksi gaya apung |
| | | $+\rho \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \right)$ | | $-2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}$ |
| | | $\phi_{ij} \equiv$ tegangan regangan | | $\epsilon_{ij} \equiv$ disipasi |
| | | | | $-2\rho \Omega_k (u'_j u'_m \epsilon_{ikm} + u'_i u'_m \epsilon_{jkm})$ |
| | | | | $F_{ij} \equiv$ produksi dari sistem yang berotasi |

3. Pemodelan intake manifold EGR

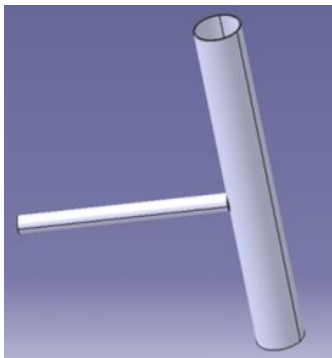
Pada penelitian ini pembuatan model CAD *intake manifold* EGR digambarkan *software* Catia V5R14 lalu di-import ke GAMBIT 2.3.16 untuk dilakukan *meshing* dan penentuan kondisi batas.



Gambar 5. Manifold intake EGR.



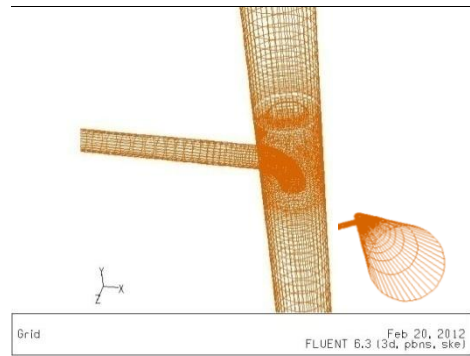
Gambar 6. Gambar spesifikasi geometri manifold intake EGR.



Gambar 7. Gambar geometri 3D model manifold intake EGR.

Penggenerasian jenis *mesh* dilakukan berbeda menyesuaikan dengan bentuk geometri pada pembagian volume yang ada. Pada 3 percabangan pipa penggenerasian *mesh* menggunakan *mode* lapisan batas dengan *mesh* volume elemen *Hex/Wedge* dengan tipe *Copper*. Pemakaian *mode* lapisan batas (*boundary layer*) pada 3 percabangan ini diharapkan dapat meningkatkan keakuratan pengukuran gaya gesek pada aliran turbulen yang ada. Sedangkan daerah pertemuan pipa percabangan menggunakan tipe *mesh* volume *Tet/Hybrid* dengan tipe *Tgrid*. Gambar 8

memperlihatkan hasil penggenerasian *mesh* pada model yang selanjutnya dijadikan sebagai model komputasi.

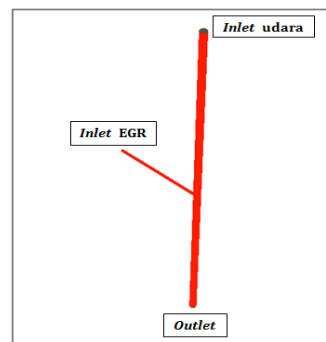


Gambar 8. Grid terstruktur pada domain.

Terdapat 116.600 sel pada *mesh* yang dijadikan sebagai model komputasi. Setelah itu, dilakukan penilaian *mesh* elemen. Syarat yang harus dipenuhi pada volume terburuk menunjukkan $< 0,85$. Apabila syarat ini tidak terpenuhi, maka kembali pada langkah sebelumnya, yaitu *meshing*.

Tabel 1. Penentuan tipe batas spesifik intake manifold EGR.

| Nama domain | Tipe batas spesifik |
|-------------|---------------------|
| Inlet EGR | Velocity Inlet |
| Inlet Udara | Velocity Inlet |
| Outlet | Outflow |
| Wall | Wall |
| Interface | Interface |



Gambar 9. Daerah domain untuk EGR

4. Simulasi intake manifold EGR

Simulasi pada penelitian ini menggunakan metode solusi *pressure based*. Hal ini terkait dengan asumsi aliran yang inkompresibel. Sedangkan model turbulensi yang digunakan adalah model *standard k- ϵ* , model *standard k- ω* , dan *Reynolds Stress Model (RSM)*.

- 1) Jenis fluida = air (udara)
- 2) Densitas (kg/m^3) = *incompressible ideal gas*
- 3) Kalor spesifik (J/kgK) = polinomial
- 4) Konduktivitas termal (W/mK) = polinomial
- 5) Viskositas ($kg/m.s$) = polinomial
- 6) Massa molekul ($kg/kgmol$) = 28.966

Tabel 2. Koefisien polinomial untuk fluida inlet EGR dan inlet udara.

| Koefisien Polinomial | Properties | | |
|----------------------|------------|--------|--------|
| | C_p | k | μ |
| 1 | 958.27 | 0.003 | 1e-06 |
| 2 | 0.2418 | 8e-05 | 7e-08 |
| 3 | -0.0001 | -8e-09 | -4e-11 |
| 4 | 6e-08 | -1e-11 | 2e-14 |
| 5 | | 7e-15 | -3e-18 |

Tabel 3. Jenis diskritisasi yang digunakan dalam simulasi.

| Discretization | Type |
|-------------------------------|----------|
| Pressure-Velocity Coupling | SIMPLE |
| Pressure | Standard |
| Momentum | Orde dua |
| Turbulence Kinetic Energy | Orde dua |
| Turbulence Dissipation Rate** | Orde dua |
| Specification Diss. Rate ^ | Orde dua |
| Energy | Orde dua |
| Reynolds Stresses* | Orde dua |

* = Persamaan tambahan pada model turbulen RSM
 ^ = Persamaan tambahan pada model turbulen k- ω
 “ = Persamaan tambahan pada model turbulen k- ϵ dan RSM

Kondisi *velocity inlet* diterapkan pada batas masuk inlet EGR dan inlet udara. Untuk sisi keluarnya pada bagian ujung bawah *manifold intake* EGR diterapkan kondisi *outflow* karena dalam pengukuran tidak diketahui sifat fluida pada sisi tersebut. Antar muka dari *mesh* volume yang ada diterapkan kondisi *interface*. Permukaan daerah asal *manifold intake* EGR diperlakukan sebagai *wall*.

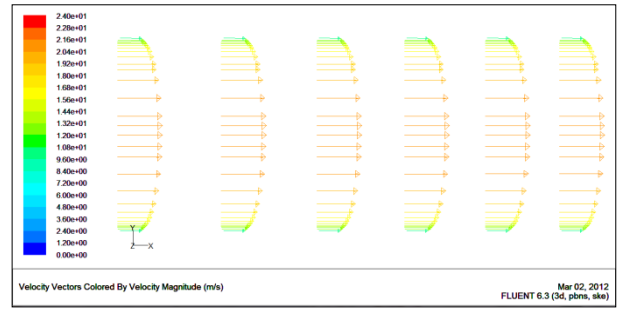
Input kecepatan dan temperatur divariasikan sesuai data hasil pengukuran eksperimen penelitian EGR pada berbagai bukaan katup beban, bukaan katup EGR dan putaran mesin.

Sebelum proses iterasi dilakukan, perlu dilakukan *initialization*, yaitu memasukkan input awal. Setelah diinisialisasi, iterasi dijalankan hingga memenuhi kriteria konvergensi yang disyaratkan. Pada simulasi ini menggunakan kriteria konvergensi 10^{-3} untuk semua persamaan kecuali persamaan energi yaitu sebesar 10^{-6} .

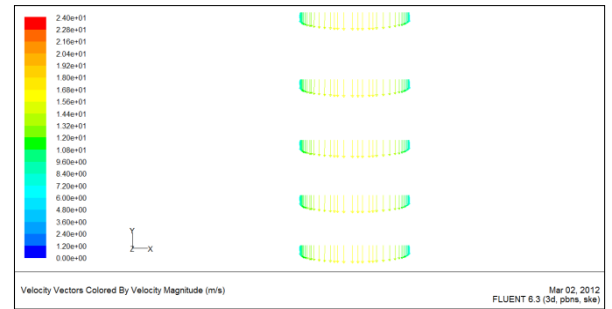
Setelah tahap iterasi dilakukan proses adaptasi untuk meningkatkan keakuratan hasil simulasi. Adaptasi menggunakan *Yplus/Ystar* yaitu dengan y^+ berkisar 30-60.

HASIL DAN PEMBAHASAN

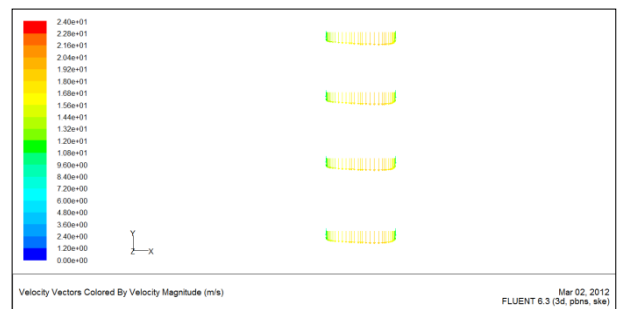
- Karakteristik Aliran pada *Intake Manifold* EGR
 - Profil Kecepatan



(a)



(b)

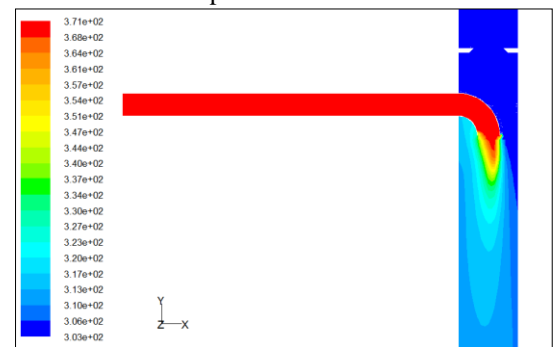


(c)

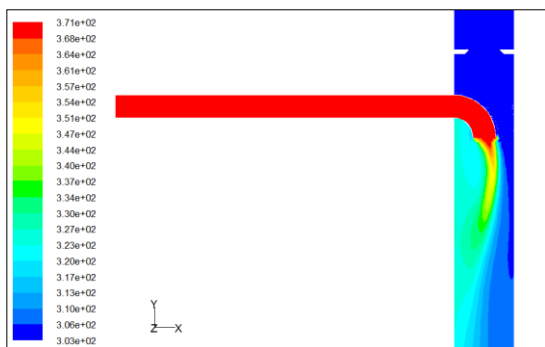
Gambar 10. Profil kecepatan *fully develop* hasil simulasi pada (a) sisi masuk gas buang, (b) sisi masuk udara, dan (c) sisi keluar *intake manifold* EGR

Gambar 10 merupakan profil aliran fluida yang telah *fully develop* dimana profil kecepatan berbentuk *flat* ditengah-tengah. Ini menunjukkan bahwa aliran ini merupakan aliran *fully develop* turbulen.

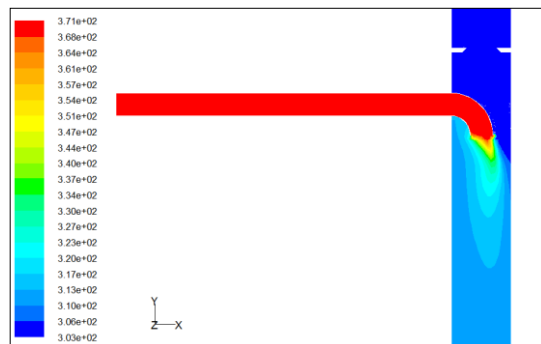
b. Kontur Temperatur



(a)



(b)



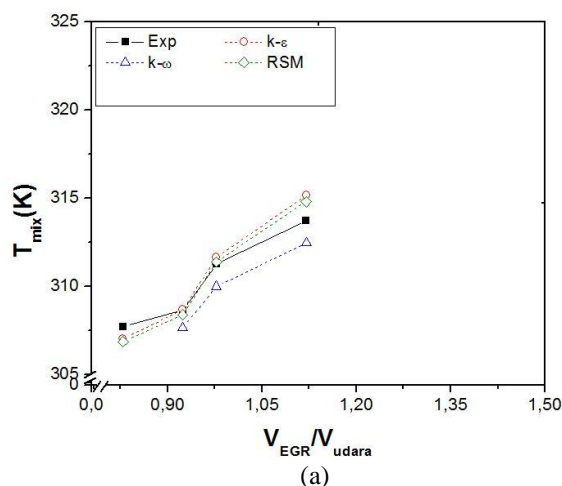
(c)

Gambar 11. Kontur distribusi temperatur hasil simulasi intake manifold EGR pada model turbulen (a) $k-\epsilon$, (b) $k-\omega$ dan (c) Reynolds Stress Model (RSM).

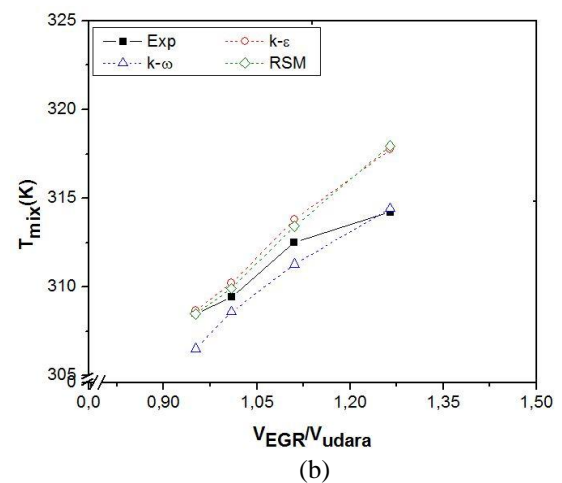
Gambar 11 merupakan gambar kontur distribusi temperatur pada pemodelan pencampuran udara dengan EGR pada bukaan katup beban 25%, bukaan katup EGR 25%, dan putaran 2100 rpm pada posisi perpotongan bidang $z=0$ dengan model turbulen (a) $k-\epsilon$, (b) $k-\omega$ dan (c) Reynolds Stress Model (RSM).

Pada gambar model turbulen RSM terlihat terjadi peningkatan gradien temperatur disepanjang daerah pencampuran dan distribusi temperatur terlihat merata didaerah pencampuran udara dengan EGR dimana termokopel diletakkan. Sedangkan pada model turbulen $k-\epsilon$ terlihat bahwa peningkatan *gradient* temperatur pada daerah pencampuran belum begitu sempurna dibanding dengan model RSM dan distribusi temperatur terlihat tidak merata didaerah pencampuran udara dengan EGR dimana termokopel diletakkan. Lalu pada gambar model turbulen $k-\omega$ tidak terjadi peningkatan gradien temperatur pada daerah pencampuran dan distribusi temperatur terlihat tidak merata di daerah pencampuran udara dengan EGR dimana termokopel diletakkan.

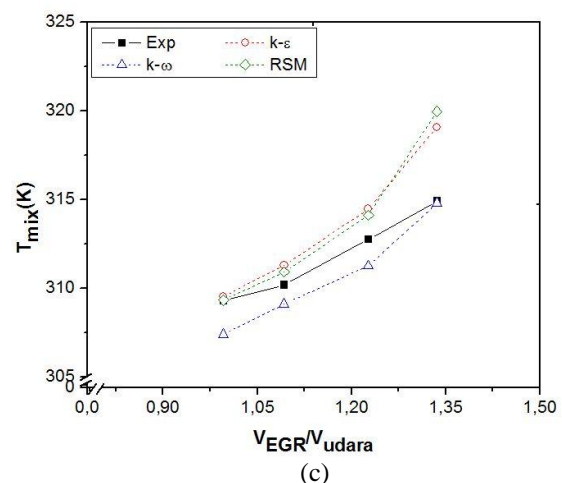
2. Hasil Simulasi



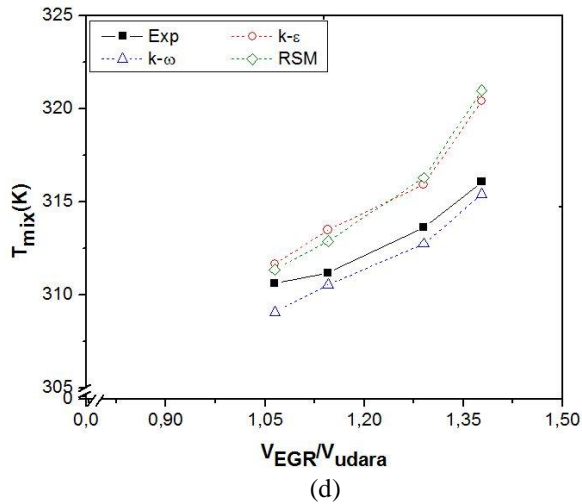
(a)



(b)



(c)

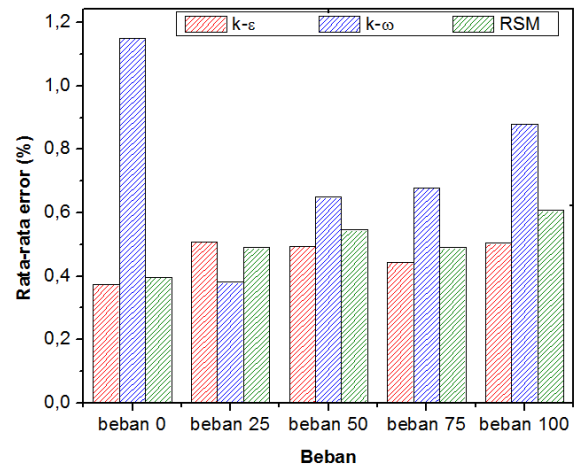


Gambar 12. Grafik perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi untuk berbagai rasio kecepatan EGR dan kecepatan udara terhadap temperatur campuran di intake manifold EGR pada bukaan katup beban 25% dengan variasi bukaan katup EGR (a) 25%, (b) 50%, (c) 75%, dan (d) 100%.

Dari Gambar 12 yang merupakan grafik perbandingan hasil simulasi hot EGR menunjukkan kecenderungan tingkatan jenis model turbulen dari paling mendekati hasil eksperimen sampai dengan terjauh adalah sebagai berikut urutannya: $k-\epsilon$, RSM dan $k-\omega$. Akan tetapi pada variasi bukaan katup EGR tinggi dan rasio antara kecepatan EGR dan udara tinggi, model turbulen $k-\epsilon$ dan RSM mengalami *overestimated*. Hal ini disebabkan pada rasio kecepatan tinggi, gradien kecepatan yang ada di antara sel cukup tinggi, sehingga menyebabkan hasil iterasi nilai dari sisi sel menjadi terlalu menyimpang. Nilai gradien yang tinggi merupakan salah satu kelemahan dari skema diskritisasi *Second-Order Upwind*. Secara umum $k-\epsilon$ memiliki keakuratan rata-rata yang baik.

Tabel 4. Presentase error rata-rata hasil simulasi

| Beban (%) | Rata-Rata Error (%) | | |
|-----------|---------------------|------------|-------|
| | $k-\epsilon$ | $k-\omega$ | RSM |
| 0 | 0,374 | 1,151 | 0,397 |
| 25 | 0,509 | 0,381 | 0,490 |
| 50 | 0,495 | 0,650 | 0,546 |
| 75 | 0,444 | 0,679 | 0,490 |
| 100 | 0,505 | 0,880 | 0,608 |

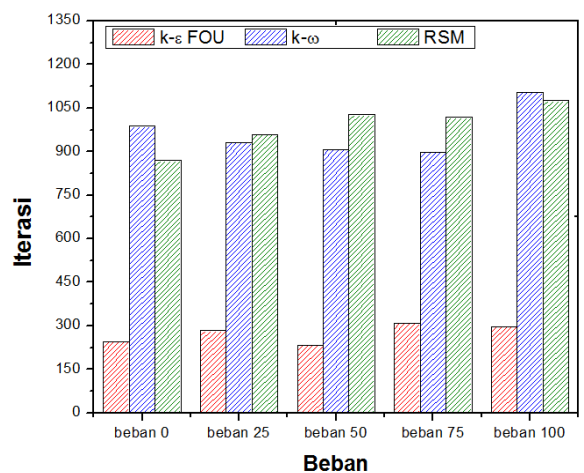


Gambar 13. Diagram prosentase error rata-rata hasil simulasi menggunakan berbagai model turbulen pada simulasi intake manifold EGR.

Berdasarkan Tabel 4 dapat diketahui bahwa $k-\epsilon$ merupakan model turbulen terbaik pada bukaan katup beban 0% (nilai error 0,374%), 50% (nilai error 0,495%), 75% (nilai error 0,444%) dan 100% (nilai error 0,505%), sedangkan pada bukaan katup beban 25%, model turbulen memiliki nilai error terkecil yaitu 0,381%.

Tabel 5. Besar iterasi rata-rata hasil simulasi

| Beban (%) | Rata-Rata besar iterasi | | |
|-----------|-------------------------|------------|------|
| | $k-\epsilon$ | $k-\omega$ | RSM |
| 0 | 246 | 987 | 870 |
| 25 | 284 | 931 | 959 |
| 50 | 234 | 907 | 1028 |
| 75 | 310 | 898 | 1018 |
| 100 | 298 | 1105 | 1076 |
| Rata-rata | 267 | 966 | 990 |



Gambar 14. Diagram time consuming pada simulasi intake manifold EGR.

Dari Tabel 5 menunjukkan bahwa simulasi dengan menggunakan model turbulen $k-\epsilon$ memiliki *time consuming* yang selalu lebih sedikit dibandingkan dengan model turbulen $k-\omega$ dan RSM.

KESIMPULAN

Dari penelitian dan analisa data yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa model turbulen k- ϵ dapat dikatakan sebagai model turbulen terbaik untuk simulasi *intake manifold EGR* karena selain nilai *error* dan *time consuming* yang rendah.

Nomenklatur

| | |
|-----|---|
| C | model konstan |
| D | difusi turbulen |
| F | produksi sistem rotasi |
| G | produksi gaya apung |
| g | gaya gravitasi (ms^{-2}) |
| k | energi kinetik per satuan massa (Jkg^{-1}) |
| S | kondisi sumber yang didefinisikan pengguna |
| t | waktu (s) |
| u | kecepatan (ms^{-1}) |
| x | arah sumbu x |

Greek letters

| | |
|------------|--|
| β | koefisien ekspansi termal (K^{-1}) |
| Γ | difusi efektif |
| δ | fungsi delta |
| ϵ | laju disipasi turbulen (m^2s^{-3}) |
| ρ | massa jenis (kgm^{-3}) |
| σ | bilangan Prandtl |
| ω | laju disipasi spesifik (s^{-1}) |
| Ω | kecepatan angular |

Subscripts

i, j, k arah vektor

REFERENSI

1. Ridwan Arief Subekti dan Anjar Susatyo, 2009, "Perancangan Penstock Menggunakan Software Computational Fluid Dynamics", Prosiding Seminar Nasional Daur Bahan Bakar 2009, pp. C27-C32.
2. Sasmita, Aryo, "Kajian Model Emisi Karbondioksida dari Kegiatan Transportasi di Kota Surabaya", Tesis, Magister Teknik Lingkungan ITS, 2011.
3. Zheng Ming, Graham T.R., dan Hawley J.G., 2003, "Diesel engine exhaust gas recirculation-a review on advanced and novel concepts", *Elsevier-Journal Of Energy Conversion And Management*, pp. 883-900.
4. FLUENT, Inc., 1999, *Manual FLUENT Documentation*, FLUENT, Inc, p4.