

**Analisis Perpindahan Panas Katalis Konventor Motor Diesel**  
(Studi Banding Pemodelan dengan Pengujian dan Perhitungan Ulang )

Wowo Sunaryo Kuswana

Abstrak

*Asumsi adanya perpindahan panas dari pengaruh gas buang hasil pembakaran pada motor diesel terhadap komponen dan lingkungan engine merupakan kejadian yang tidak dapat dipungkiri. Persoalannya adalah bagaimana mengendalikan efek yang bersifat merusakkan komponen engine dan mengurangi zat beracun pada kondisi lingkungan. Pemasangan katalis konventor, merupakan salah satu alternatif yang sudah lama dilakukan melalui berbagai penelitian antara lain dengan pemodelan. Penulis mencoba, membandingkan hasil pemodelan yang telah ada dengan perhitungan klasik dan pengujian pada motor disel Isuzu 1981. Fokus dari pengujian dan perhitungan ulang berkenaan dengan perpindahan panas dan massa dari oksidasi CO dan hidrokarbon parapin dalam siatusi aliran mulai dari laluan exaus manifold ke dalam tabung konventor.*

*Abstract*

*Assumption existence of heat transfer from exhaust gas influence result of baking at diesel motor to component and area engine is undeniable case. The problem is how controlling effect having the character of component pest engine and lessens poisonous matter at condition of area. Erection of catalyst konventor, be one of alternative which have been long enough been done through various researchs for example with modelling. Writer tries, compares modelling result that there have with classical calculation and assaying at diesel motor Isuzu 1981. Focus from assaying and reassessment with reference to heat transfer and earth from oxidation CO and hydrocarbon farapin in siatusi flow started from pass exaus manifold into tube konventor.*

*Key word :Konventor, Kanal, Monolit,Single-Channel,Multi-Channel*

## A. PENDAHULUAN

Persoalan yang mendasar dalam persoalan langit bersih di Indonesia, salah satunya belum diberlakukannya Undang-undang No 14 tahun 1994 mengenai batas ambang emisi gas buang. Oleh sebab itu, masih banyak industri atau mobil-mobil tua bermotor diesel terutama di perkotaan. Hal ini, tentunya ditinjau dari lingkungan sudah dapat diindikasikan jauh dari persyaratan dan akan berdampak pada kesehatan.

Kondisi tersebut, peneliti memandang urgen untuk melakukan analisis dan uji laboratorium berkenaan dengan komponen yang dapat mengurangi zat beracun serta dampaknya terhadap lingkungan. Salah satu objek yang dijadikan penelitian ini adalah motor diesel Isuzu Tahun 1982 dengan modifikasi motor 2300 CC. Selanjutnya dilakukan ujicoba penggunaan isolasi terbuat dari serbuk keramik dalam berbagai kondisi untuk dibandingkan dan dianalisis untuk mencapai tingkat efektivitasnya.

## B. TEORI DASAR

Pemodelan perpindahan panas pada katalis konverter motor diesel, sesungguhnya suatu simulasi oksidasi arang monoksida (CO) dan hidro karbon parafin (HC), sebagai akibat dari pembakaran yang tidak sempurna. Harapan dari hasil pemodelan ini, selain untuk meningkatkan kinerja motor ramah lingkungan, juga untuk memudahkan pemeliharaan dan perawatan komponen. Oleh sebab itu, para peneliti terdahulu melakukan penelitian yang fokus pada reduksi NO<sub>x</sub> katalis dan hasilnya cukup memuaskan.

Pemodelan matematis mengenai kompleksitas dari katalis konverter telah dikembangkan, melalui asumsi bilangan Reynolds dari aliran panas. Adapun masa dan koefisien perpindahan panas dihitung berdasarkan aliran laminar, hal ini dipandang dari hasilnya sangat teliti.



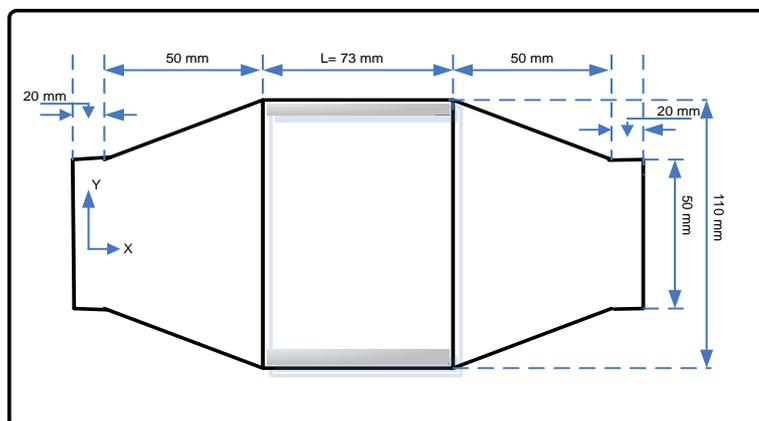
Gambar 1. Exhaus Manifold dan Konverter  
Hasil Adaptasi yang dimodifikasi Pada Diesel Isuzu

Namun demikian, pada saat ini masih ditemukan laboratorium konvensional dengan alat bantu perhitungan klasik yang digunakan media dan sumber belajar. Oleh sebab itu, peneliti mempunyai motivasi untuk membandingkan sejauhmana tingkat akurasi dan

kelayakan pemanfaatan laboratorium konvensional dengan pemodelan khususnya berkenaan dengan pengukuran gas buang dari motor diesel.

Beberapa hasil studi literatur terdahulu, korelasi-korelasi yang umum digunakan dalam perhitungan perpindahan panas seperti dilakukan oleh Hawthorn (2006), dengan menghitung variasi di sekitar bilangan Nusselt ( $Nu$ ) dan Sherwood dengan bilangan ( $Sh$ ) di sekitar pusat kanal laluan gas. Formula yang dijadikan dasar, merupakan penyelesaian deret Graetz untuk memfokuskan dari pemusatan suhu lapis batas serta medan percepatan aliran yang belapis. Adapun bagian permukaan yang dialiri gas buang pada konventor, ditetapkan kondisi fluks ( $NuH$  dan  $ShH$ ), sebagai reaksi pada permukaan dengan kondisi suhu tetap ( $Mur$  dan  $ShT$ ). Kesulitan yang timbul ketika menghitung reaksi permukaan yang bersifat eksotermik, pada reaksi kimia yang dapat menimbulkan fluida dinamik dapat diatasi dengan bilangan Damkohler,  $Da$  merupakan suatu konstanta. Perhitungan pengecekan antara perpindahan digunakan  $Nu$  dan  $Nu H$  sebelum kondisi panas tertinggi  $Nu T$ . Pada saat terjadinya reaksi eksotermik tidak hanya adanya peristiwa perubahan pemusatan panas dan lapis batas, juga karena ada medan percepatan yang dipengaruhi oleh densitas.

Salah satu alternatif yang mungkin dapat dieksploasi dari suatu hubungan dari  $Nu$  dan  $Sh$  pada  $Re$  dalam kandungan monolit yang tidak seimbang disebabkan oleh penyebaran. Mengingat dalam perhitungan  $Nu$  dan  $Sh$  diambil reratanya dalam totalitas reaktor multi-channel, maka ketergantungan dari massa aliran panas pada setiap bagian yang dilalui juga diambil reratanya. Pada studi analisis ini, kita ajukan pertanyaan apakah intra-channel dari aliran yang tidak seimbang lebih penting dari pada perbandingan prediksi CO dan HC di suatu katalis oksidasi.



Gambar 2. Simulasi Geometri dari Konventor Modifikasi

Secara geometri dari konventor hasil modifikasi ini, gas buang engine 340 ppm CO dengan 154 ppm HC dengan asumsi profena, kandungan air 2,32%, 2,68% dioksid karbon, 16,54% O<sub>2</sub> dan sisanya n, adapun Nox diabaikan.

**Tabel 1. Spesifikasi Simulasi dan Pembuatan Uji Coba Konventor**

Ukuran	Nilai
Panjang	0,073 m
Diameter	0,0110 m
$\bar{C}$	0,7435
Densitas sell	620000m <sup>-2</sup>
Diameter laluan gas	1,010 mm
Densitas substrat	2630 kg.m <sup>-3</sup>
Conduktivitas	1.675 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>

Suhu awal untuk menganalisis gas buang 300 K, selanjutnya suhu gas buang mencapai 575 K pada skala 1 detik secara konstan mempengaruhi *lightoff*. Pengukuran yang bersifat percobaan dengan keadaan tunak, persamaan yang lainnya diukur pada kondisi awal (dingin) yang diramalkan oleh *model multi-channel* digunakan untuk mengevaluasi kinerja persamaan reaktor dari model. Simulasi ini dengan lima percepatan udara yang berbeda berdasarkan volume dari monolit kisaran antara 16:5s<sup>-1</sup> sampai dengan 133.1s<sup>-1</sup>.

Parameter operasi lainnya, didasarkan pada percobaan dengan tingkat oksidasi yang dihasilkan, melalui pengukuran langsung dalam keadaan tunak pada Co dan HC dengan memperhatikan OEM-supplied katalisator oksidasi Isuzu 2.3 injeksi tidak langsung dengan Turbo L (TDI) diesel. Katalisator terpasang dengan 15 alur dalam konventor dari knalpot uji coba, laju alir volumetrik melalui katalisator dengan variabel (di) dengan percepatan antara 15.000 sampai 100.00 hr<sup>-1</sup> (asumsi pada volume tabung dan gas terbuang pada temperatur dan tekanan standar). Suhu pada lubang masuk katalisator terkendali dengan beban engine dengan variasi antara 373 sampai dengan 623 K, pengukuran emisi dalam keadaan tunak di lubang masuk, mencakup CO dan hidrokarbon parafin.

Taksiran atau prediksi dihitung berdasarkan batasan perpindahan panas, dengan pengamatan konversi asymtot CO dan HC (ketika reaksi peningkatan suhu, pertukaran masa di dalam lapisan yang terdapat di dalam konventor). Nilai koefisien pertukaran masa dapat diperkirakan dari hasil pengamatan laju rekasi oksidasi sebagai pendekatan asymtot.

Percobaan yang disimulasikan sebagai tabung silinder dengan diameter 11 cm dan diameter 7.2 cm (gbr 2), lubang laluan masuk dan keluaran tidak melalui pendekatan kekuatan simetris radial, melainkan simetri saja, dengan asumsi permukaan nisbah dipandang kerucut ( $Re$ ). Aliran perangkat menggunakan komputasi persamaan alir axi-symmetric dari suatu serabut katalis, dimensi yang digunakan model aliran massa, momentum dan energi melalui masing-masing laluan.

Simulasi mendeskripsikan observasi yang bersifat percobaan, dalam kondisi pertama koefisien panas dan pertukaran masa diperoleh dari  $Nu$  dan  $Sh$  sesuai dengan keadaan tunak berlapis. Koreksi laluan gas yang masuk tergantung pada alur  $Re$  dan juga menjelaskan  $Re$  dari  $Nu$  dan  $Sh$ . Selanjutnya pada kondisi kedua, simulasi  $Sh$  dengan percobaan pada pembatasan perpindahan massa terkondisikan.

$$Sh = 0.128.Re^{0.62} \quad (1)$$

Angka Nuseelt merupakan salah satu peskalaan yang dipandang efektif sebagai alat perpindahan panas multi-channel. Pemodelan pengukuran  $Nu$  dan  $Sh$  di dalam konventor ditentukan dengan persamaan yang sejenis. Persamaan (1) berasal dari batasan pertukaran massa, dengan syarat tunak ketika permukaan komponen terjadi reaksi kondisi konstan.

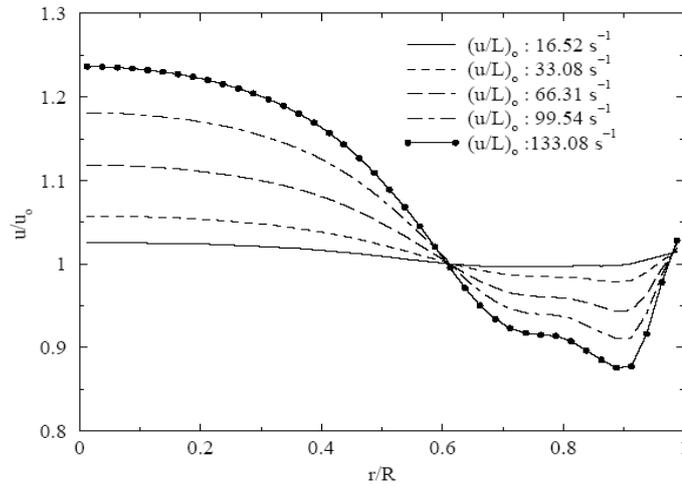
$$R_{CO} = 4.74 \times 10^{18} \exp \left[ -\frac{16000}{T} \right] \quad (2)$$

$$R_{HC} = 5.41 \times 10^{13} \exp \left[ -\frac{11000}{T} \right] \quad (3)$$

Ekspresi tingkat kinetik dari oksidasi CO dan HC diperoleh bersifat percobaan katalisator oksidasi engine.

### C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aliran masa dalam keadaan tunak di permukaan lubang laluan yang masuk ke konventor dari *exaus manifold*, melalui alur seperti pada gambar 3, ketidakhomogenan dengan meningkatnya laju aliran (rerata dalam laluan Bilangan Reynold)



Gambar 3. Distribusi Aliran pada Kecepatan di Permukaan  
(Data Terdahulu Hasil Pemodelan)

Aliran masa ditentukan oleh ekspansi aliran di dalam laluan masuk yang berupa kerucut dan terjadi penurunan tekanan dan geseran pada masing-masing laluan pada konventor. Hal itu, aliran memperlus dan memancarkan gas. Peredaran gas mempercepat pemenuhan di sekitar pusat konventor, penurunan tekanan di dalam monolit disebabkan adanya kerendahan tekanan dan gas buang mulai mengalir melalui hambatan berdasarkan medan yang dilalui. Model penurunan tekanan pada kondisi geseran adalah sama dengan korelasi yang bersifat percobaan, aliran pada suatu laju alir bersih dilakukan pengesetan simulasi.

Setiap perbedaan dalam efisiensi konversi semata-mata diakibatkan oleh perbedaan panas dan model pertukaran masa,  $Sh$  efektif pada sistem yang dibuat banyak alurnya dan bergantung pada luas permukaan kanal.

$$\epsilon u \frac{\partial C_g}{\partial x} = KS(C_s - C_g) \quad (4)$$

$$KS(C_g - C_s) = RC_s C_{s,O_2} \quad (5)$$

Variabel pada persamaan tersebut ditafsirkan rerata bersekat dari laluan konvantor untuk pembatasan keadaan tunak dan pertukaran massa, efisiensi konversi ( $Q$ ) dan koefisien pertukaran masa dan percepatan gas dalam ruangan, ( $u/L$ ). Untuk menghitung koefisien pertukaran masa  $K$ , yang proporsional terhadap  $Sh$ , dapat dihitung :

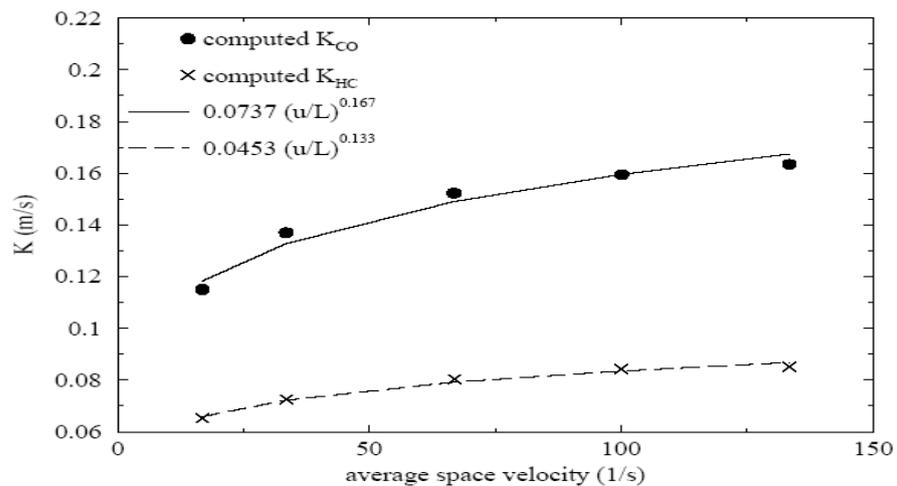
$$\theta = 1 - \exp \left[ -\frac{K S L}{\epsilon u} \right] \quad (6)$$

$$K = -\frac{\epsilon u}{S L} \log(1 - \theta) \quad (7)$$

K merupakan variasi dengan percepatan udara dalam ruang, untuk menghitung rerata dari simulasi dengan mengembangkan korelasi aliran laminar seperti pada gambar 4. Meskipun demikian, koefisien pertukaran masa untuk CO dan HC menunjukkan adanya ketergantungan pada percepatan gas, atau setara dengan Re yang proporsional. Ketergantungan yang lemah pada Re, disebabkan oleh meningkatnya korelasi panjang alur laluan yang berlapis.

Eksponen-eksponen dari percepatan gas di dalam korelasi-korelasi K untuk CO dan HC ditemukan untuk menjadi 0:6548 dan 0:6098 berturut-turut yang membandingkan, dan nilai-nilai diperoleh sesuai 0:6355 dan 0:6182 yang diperoleh secara eksperimen.

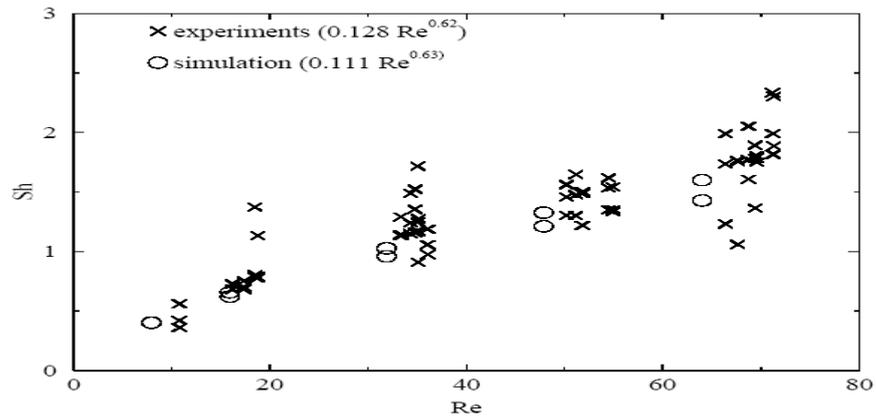
Gambar 4 dan 5 menunjukkan adanya ketergantungan Re dari bilangan Sherwood, pada gambar 4 rancangan kembali dengan Sh untuk monolit dan rerata Re, dalam gambar 5 ditunjukkan bilangan Sherwood dan dihitung lebih rendah dari sebelumnya.



Gambar 4: Prediksi efektivitas korelasi perpindahan massa (Data Terdahulu Hasil Pemodelan)

Hasil percobaan menunjukkan rerata Re, dan Sh yang efektif mempunyai hubungan fungsional dengan bilangan Reynold dan rerata kanal secara berurut-turut. Pengukuran

galat yang diskretisasi dalam rancangan kuantitatif selama aliran isothermal diperoleh Sh. Hasil pengukuran menunjukkan Sh mempengaruhi hubungan fungsional antara efisiensi konversi dengan percepatan gas dalam tabung konventor. Jika korelasi-korelasi berlapis untuk Sh digunakan (Sh lokal yang dalam hal ini adalah hampir konstan paling banyak lokasi-lokasi), equation(6) akibatkan hubungan yang berikut.



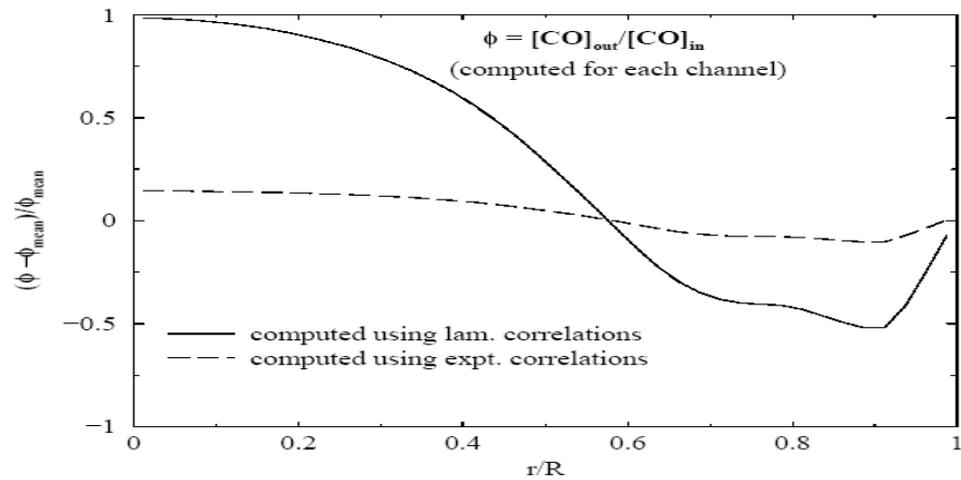
Gambar 5. Prediksi Perbandingan Percobaan Efktivitas Variasi (Data Terdahulu Hasil Pemodelan)

$$\theta \sim 1 - \exp(\alpha u^{-1}) \quad (8)$$

Hal itu, merupakan parameter bebas dari percepatan, dan selanjutnya kita hitung dengan skala;

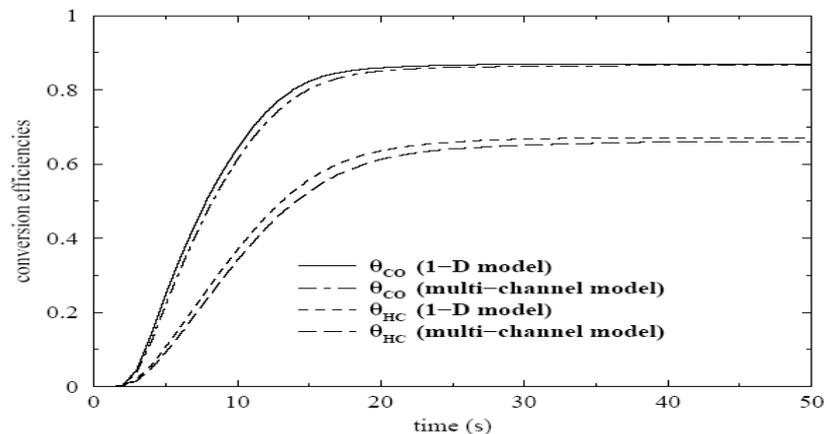
$$\theta \sim 1 - \exp(\beta u^{-0.38}) \quad (9)$$

Peramaan tersebut, merupakan parameter percepatan secara mandiri, oleh sebab itu tingkat efisinsi konversi yang bersentuhan dengan permukaan monolit dapat berkurang. Gambar 7 menunjukkan hasil yang dinormalisir, penyimpangan efisiensi terjadi sepanjang arah radial



Gambar 6. Ketidakseragaman Efisiensi Konversi Monolit  
(Data Terdahulu Hasil Pemodelan)

Setiap efisiensi kanal mendekati rerata pengukuran percobaan menunjukkan pertukaran masa, konsekuensinya tingkat aliran tidak homogen. Harga  $\text{Co}$  dan  $\text{HC}$ , dengan model satu dimensi memprediksi efisiensi konversi keadaan tunak itu di dalam 1% dari prediksi yang sesuai dengan model *multi-channel*.

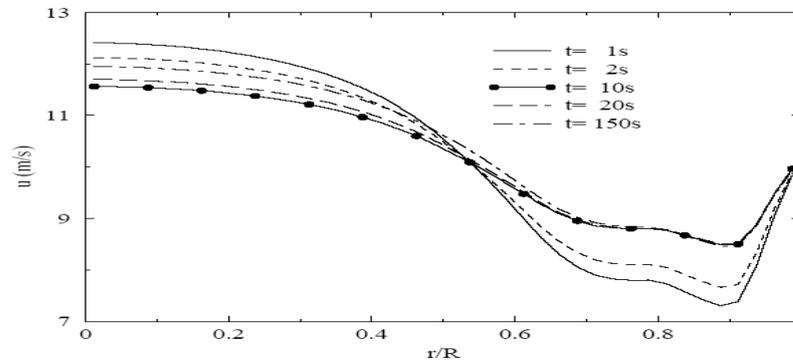


Gambar 7: Perbedaan Prediksi Efisiensi Konversi  
Antara Model *Multi-Channel* dengan Persamaan *Single-Channel*  
(Data Terdahulu Hasil Pemodelan)

Distribusi aliran dalam berbagai waktu, sebelum *light-off* dalam simulasi dengan laju alir maksimum (korelasi bersifat percobaan untuk panas dan perpindahan masa), ditunjukkan pada gambar 9, rasional dari perubahan dalam aliran pada saat monolit dipanaskan.

Konversi maksimum ke arah yang tidak homogen secara radial di dalam monolit pada model saluran tunggal, hal itu disebabkan suhu pada daerah yang rata menunjukkan homogen sepanjang arah radial di setiap kanal. Efisiensi konversi meningkat dengan

cepat ke arah yang bersebrangan. Aliran di semua kanal dari simulasi multi-channel tidak terjadi pada waktu yang sama. Oleh sebab itu, efisiensi meningkat secara bertahap dibandingkan di dalam model saluran tunggal bersamaan dengan waktu.



Gambar 8: Perubahan Distribusi Aliran Pada Phase *Transient* (Data Terdahulu Hasil Pemodelan)

## KESIMPULAN

1. Gas pembuangan motor diesel isuzu pada model simulasi dibandingkan dengan perhitungan menunjukkan adanya indikasi variasi pertukaran masa dengan aliran oksidasi diffusionlimited CO dan HC hasil intra-channel berubah arah aliran ke bagian hulu dari monolit.
2. Terjadi adanya ketergantungan bilangan Reynold hasil pengamatan dari reaktor simulasi, dugaan ini merupakan adanya permukaan konventor tidak rata atau adanya pori-pori.
3. Hasil perbandingan antara pemodelan dengan perhitungan ulang secara klasik dan uji coba, mempunyai perbedaan penyimpangan rerata sekitar 4%. Artinya ketelitian pemodelan lebih akurat, akan tetapi dengan perhitungan dan pengujian klasik masih dalam batas efektif.

## REFERENCES

1. A.Holmgren and B. Andersson. Mass transfer in monolith catalysts - co oxidation experiments and simulations. *Chemical Engineering Science*, 53:2285–2298, 1998.
2. B. Roduit, A. Baiker, F. Bettoni, J. Baldyga, and A. Wokaun. 3-d modeling of scr of nox by ammonia on vanadia honeycomb catalysts. *AIChE Journal*, 44:2731–2744, 1998.
3. C. H. Li and B. A. Finlayson. Heat transfer in packed beds - a reevaluation. *Chemical Engineering Science*, 32:1055–1066, 1977.
4. C. P. Tso and S. P. Mahulikar. The role of brinkman number in analyzing flow transitions in microchannels. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 42:1813–1833, 1999.
5. C. P. Tso and S. P. Mahulikar. Experimental verification of the role of brinkman number in microchannels using local parameters. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 43:1837–1849, 2000.

6. C. S. Daw, R. Wagner, J. Green, V. K. Chakravarthy, and J. C. Conklin. Experimental measurement of mass transfer and kinetics in a diesel oxidation catalyst. 2001. under preparation.
7. G. C. Kolstakis, P. A. Konstantinidis, and A. M. Stametelos. Development and application range of mathematical models for 3-way catalytic converters. *Applied Catalysis B: Environmental*, 12:161–191, 1997.
8. G. Groppi, A. Belloli, E. Tronconi, and P. Forzatti. A comparison of lumped and distributed models of monolith catalytic converters. *Chemical Engineering Science*, 53:2285–2298, 1995.
9. Hawthorn R. D. Afterburner catalysts - effects of heat and mass transfer between gas and catalyst surface. *AIChE Symp. Ser.*, 70:428–438, 1974.
10. J. Votruba, O. Mikus, K. Nguyen, V. Hlavacek, and J. Skrivanek. Heat and mass transfer in honeycomb catalyst ii. *Chemical Engineering Science*, 30:201–206, 1975.
11. L. C. Young and B. A. Finlayson. Mathematical models of the monolith catalytic converter - i. development of model and application of orthogonal collocations. *AIChE Journal*, 22:331–341, 1976.
12. L. C. Young and B. A. Finlayson. Mathematical models of the monolith catalytic converter - ii. Application to automobile exhaust. *AIChE Journal*, 22:343–353, 1976.
13. N. Baba, K. Ohsawa, and S. Suguira. Numerical approach for improving the conversion characteristics of exhaust catalysts under warming-up condition. 1996. SAE paper No. 962076.
14. R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot. *Transport Phenomena*. Wiley, NY, 1960.
15. R. E. Hayes and S. T. Kolaczkowski. A study of nusselt and sherwood numbers in a monolith reactor. *Catalysis Today*, 47:295–303, 1999.
16. S. Jeong and W. Kim. A numerical approach to investigate transient thermal and conversion characteristics of automotive catalytic converters. In *International Congress & Exposition, Detroit, MI*, 1998. SAE paper No. 980881.
17. S. Jeong and W. Kim. Numerical analysis of lightoff performance and thermo-fluid characteristics in a three-way monolithic catalytic converter. In *Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress*, 2000.
18. S. Siemund, J. P. Leclerc, D. Schweich, M. Prigent, and F. Castagna. Three-way monolithic converter : Simulations versus experiments. *Chemical Engineering Science*, 50:2845–2852, 1996.
19. T.M.Harms, M. J. Kazmierczak, and F. M. Gerner. Developing convective heat transfer in deep rectangular micro-channels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20:149–157, 1999.

20. U. Ullah, S. P. Waldram, C. J. Bennett, and T. Truex. Monolithic reactors : mass transfer measurements under reacting conditions. *Chemical Engineering Science*, 47:2413–2418, 1992.
21. X. F. Peng and G. P. Peterson. Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannels. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 39(12):2599–2608, 1996.