

## DISTRIBUSI ALIRAN DALAM REAKTOR BERKANAL MIKRO

Y.W. Budhi<sup>1\*)</sup>, E. Restiawaty<sup>1</sup> dan Subagjo<sup>1</sup>

### Abstrak

Reaktor mikro telah menempatkan diri pada posisi yang diminati dalam pengembangan teknologi reaktor modern yang memiliki karakteristik pokok dalam hal percepatan laju perpindahan massa dan panas yang berlipat ganda. Dengan dimensi yang berskala mikron, distribusi aliran dari pipa induk menuju masing-masing kanal merupakan salah satu persoalan penting untuk menjamin keseragaman aliran di setiap kanal. Makalah ini mengkaji distribusi aliran dalam lima model reaktor dan mempelajari karakteristik pemanasan awal dari keadaan dingin (cold start). Fokus ditujukan dalam shift converter yang mengkonversikan CO menjadi CO<sub>2</sub> agar tidak meracuni katalis dalam sel bahan bakar. Selanjutnya pada model reaktor dengan distribusi terbaik, karakteristik cold start up ditelaah lebih mendalam melalui teknik reaksi kimia tak tunak. Hasil studi menunjukkan bahwa start up pada shift converter dapat dilakukan dalam waktu yang sangat singkat yang menunjukkan bahwa secara praktis unit reaktor mikro ini dapat diterapkan.

**Kata kunci:** Reaktor mikro; Pemodelan dan simulasi; Shift converter; Miniaturisasi

### Pendahuluan

Pada satu dekade terakhir, riset di bidang teknologi mikro telah membuka wahana baru dalam ilmu pengetahuan dan teknologi proses. Sejalan dengan perkembangan teknologi mikro tersebut, penguatan pada sub-bidang intensifikasi proses telah menjadikan system mikro ini menjadi sebuah kecenderungan yang kuat di pusat-pusat riset terkemuka di Eropa. Salah satu bidang dalam teknologi mikro yang dikaji secara intensif adalah reaktor mikro (*microreactor*). Keunggulan utama dari miniaturisasi adalah perpindahan panas dan massa yang lebih baik (Stankiewicz dan Moulijn, 2004; Delsman, 2005), perolehan waktu ruang yang lebih baik (Muk : 4), selektivitas reaksi yang lebih terkendali (Muk : 5), dan kemampuannya menangani bahan kimia berbahaya yang lebih aman. Sebagai gambaran, laju perpindahan panas dalam reaktor mikro dapat mencapai 20 ribu kali lebih cepat. Keunggulan-keunggulan tersebut telah dieksploitasi secara berkelanjutan untuk sejumlah implementasi baru seperti pengembangan teknologi baterai komputer jinjing (*portable*) dan mesin bakar internal kendaraan bermotor yang dikombinasikan dengan sel bahan bakar (Budhi, 2006).

Piranti digital jinjing senantiasa menjadi semakin kecil, serbaguna (*versatile*), dan intensif energi, namun keterbatasan teknologi baterai saat ini merintang miniaturisasi dan intensifikasi lebih lanjut. Sel bahan bakar mikro dipertimbangkan sebagai kandidat sumber daya jinjing untuk menggantikan baterai ion litium yang amat besar (*bulky*). Di samping itu, sel bahan bakar diyakini dapat beroperasi secara lebih efisien pada hidrogen. Namun, sebagai media energi tersimpan, hidrogen tidak ideal atas dasar

densitas energi yang rendah dan berbahaya. Sebaliknya metanol adalah alternatif yang tepat karena densitas energinya yang tinggi dan dapat diubah menjadi hidrogen insitu dalam prosesor bahan bakar mikro untuk digunakan dalam sel bahan bakar mikro. Kajian pengkonversian metanol menjadi hidrogen untuk kapasitas kendaraan bermotor berdaya 140 HP telah dilakukan oleh Budhi (2006).

Sebuah kompetisi teknologi terjadi antara penyimpanan energi hidrogen dalam tangki bertekanan (1000 bar) dan produksi hidrogen dari reformasi metanol secara insitu. Berbagai kekurangan dalam penyimpanan hidrogen dalam tangki bertekanan dan salah satu solusi yang ditawarkan telah disajikan dalam Budhi (2006). Kajian awal dalam pemetaan aliran bahan dan energi dalam rangkaian sistem proses telah disajikan dalam Budhi (2006). Kajian tersebut menitikberatkan pada telaahan termodinamika rangkaian proses, khususnya untuk mencapai target daya kendaraan sebesar 140 HP. Di dalam makalah ini, kajian yang berkenaan dengan distribusi aliran (*flow distribution*) dan kelakuan *start-up* unit dari keadaan dingin (*cold start-up*) dalam sebuah *micro-shift converter* disajikan.

### Shift Converter

Sejumlah rancangan reformer kukus berskala mikro telah diusulkan dan bahkan difabrikasi (lihat pustaka Muk : 12-15). Dalam makalah Budhi (2006), metanol merupakan bahan bakar cair yang direaksikan dengan kukus untuk menghasilkan hidrogen dan produk samping CO. Gas CO ini bisa meracuni katalis dalam sel bahan bakar, sehingga

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Tel. 022-2500989, Faks. 022-2501438

<sup>\*)</sup> Corresponding author: Y.Wibisono@che.itb.ac.id



aliran reformat memerlukan pengolahan lebih lanjut untuk menyingkirkan CO. Sekalipun teknologi membran sel bahan bakar yang sangat toleran terhadap CO sedang dikaji, pemurnian aliran hidrogen menggunakan teknik penyingkiran CO dalam WGSR (*water gas shift reaction*) masih dianggap pilihan yang penting (Karnik dkk., 2003).

*Water Gas Shift Reaction* (WGSR) mengacu pada reaksi CO dengan kukus untuk menghasilkan H<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>. Reaksi ini adalah reaksi yang sangat penting dalam industri kimia tradisional. Pada saat ini, telaahan lebih difokuskan pada pemurnian hidrogen untuk sel bahan bakar skala mikro. Berbagai mekanisme reaksi, lintasan reaksi, dan laju reaksi telah dilaporkan dalam berbagai pustaka untuk skala makro (Hakkarainen dkk., 1994; Amadeo dan Laborde, 1995; Gines dkk., 1997). Namun untuk skala mikro, ungkapan laju reaksi dan parameter-parameternya bisa berbeda (Mukherjee dkk., 2007).

Laju perpindahan panas dan massa dalam reaktor mikro dirancang sedemikian rupa sehingga nilainya berlipat ganda. Untuk merealisasikan produktivitas yang tinggi dalam unit berskala kecil, beberapa kanal mikro yang identik sangat diperlukan. Namun demikian, kombinasi kapasitas produksi yang tinggi dan skala reaktor yang kecil akan menghasilkan laju aliran yang tinggi di dalam unit reaktor. Hal ini sangat berpotensi menyebabkan hilang tekan dan distribusi yang tidak merata. Kualitas distribusi aliran dapat dinyatakan dengan rumusan matematika, yaitu simpangan baku relatif (Delsman, 2005). Di dalam makalah ini, kajian difokuskan pada tampilan visual distribusi aliran dari berbagai bentuk geometri reaktor.

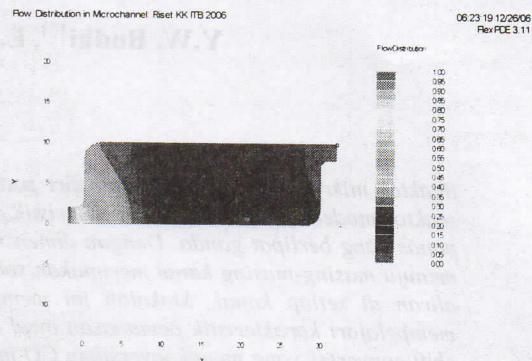
**Distribusi Aliran dan Hasil Simulasi**

Distribusi aliran dalam kanal berdiameter mikro dikaji untuk berbagai aplikasi. Masing-masing aplikasi dapat bersifat esa, sehingga pemodelan setiap konfigurasi diperlukan. Sebagai contoh, Bassiouny dan Martin (1984) mengembangkan sebuah model analitik untuk menghitung distribusi aliran pada kanal penukar panas jenis pelat berdasarkan perubahan kecepatan di bagian 'header' dan gesekan dinding kanal, namun mengabaikan gesekan dinding dalam 'header'. Choi dkk. (1993) menyajikan 'Computational Fluid Dynamic' pada modul pendinginan untuk mikroelektronika. Mereka mendapatkan bahwa nisbah luas penampang wadah distribusi aliran terhadap luas penampang kanal merupakan parameter yang penting yang mempengaruhi distribusi aliran.

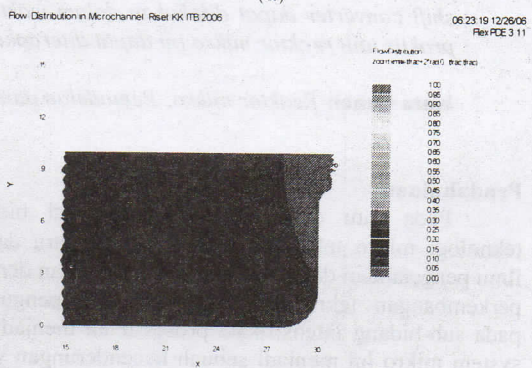
Dalam studi ini, satu lapis reaktor mikro yang memiliki panjang 30 mm dan lebar 10 mm. Adapun setiap kanal dirancang dengan panjang 10 mm dan lebar 300 µm. Hasil-hasil simulasi distribusi aliran ditunjukkan dalam Gambar 1-5. Adapun kualitas penjenahan konsentrasi ditunjukkan dalam Tabel 1.

Ditinjau dari tingkat penjenahan aliran yang keluar dari reaktor, Model A menunjukkan harga yang paling tinggi. Untuk Model A tersebut, posisi kanal

berkatalis dapat diposisikan pada 0.5 dari panjang reaktor total.

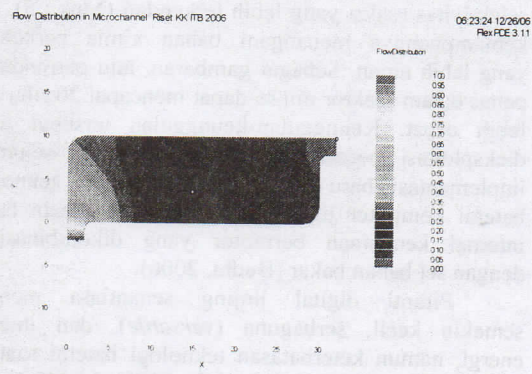


(a)



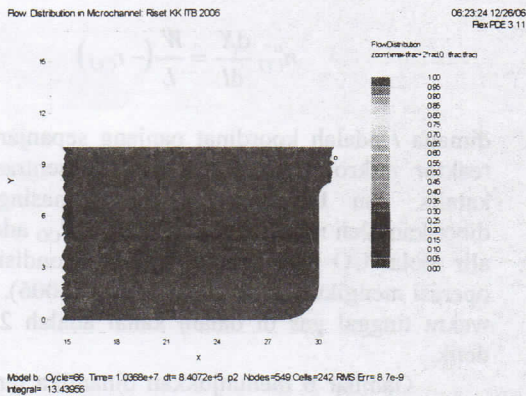
(b)

Gambar 1. Konfigurasi model reaktor A. Arah aliran inlet dan outlet masing-masing sejajar kanal ; inlet-outlet berseberangan. (a). Model utuh. (b). Perbesaran pada daerah outlet.



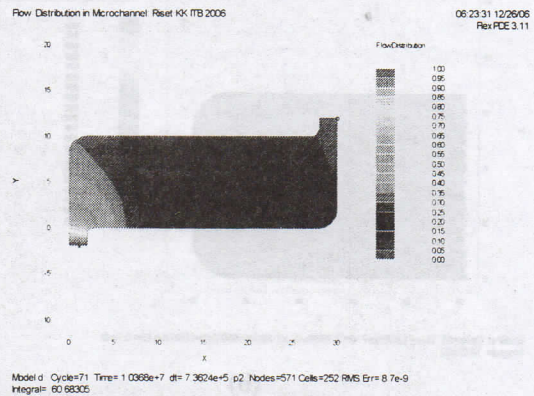
(a)





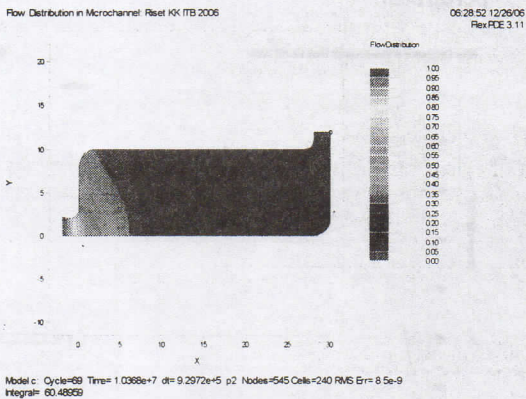
(b)

Gambar 2. Konfigurasi model reaktor B. Arah aliran inlet tegak lurus dan outlet sejajar kanal; inlet-outlet berseberangan. (a). Model utuh, (b). Perbesaran pada daerah outlet.



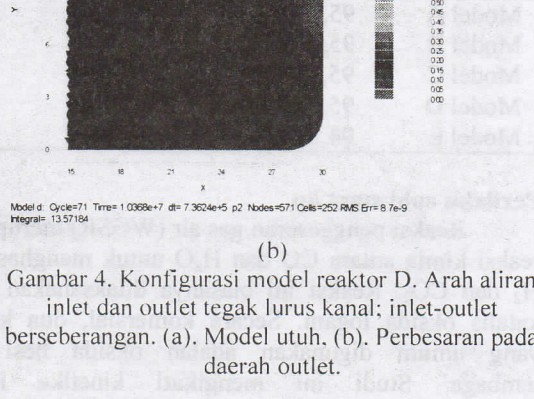
(a)

Gambar 4. Konfigurasi model reaktor D. Arah aliran inlet dan outlet tegak lurus kanal; inlet-outlet berseberangan. (a). Model utuh, (b). Perbesaran pada daerah outlet.



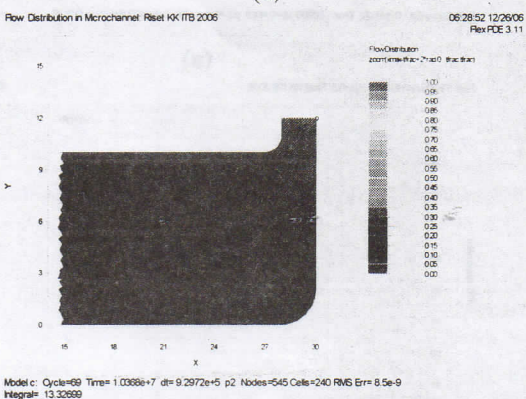
(a)

Gambar 3. Konfigurasi model reaktor C. Arah aliran inlet sejajar dan outlet tegak lurus kanal; inlet-outlet berseberangan. (a). Model utuh, (b). Perbesaran pada daerah outlet.



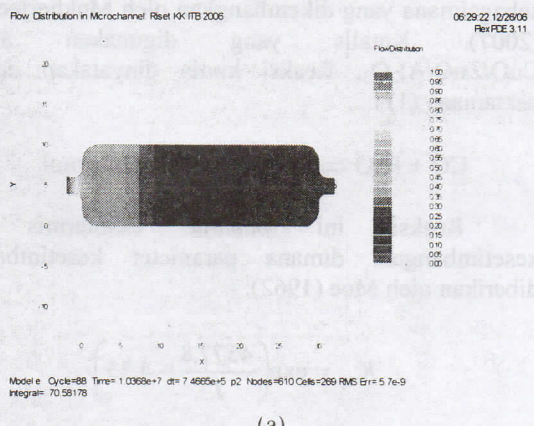
(b)

Gambar 4. Konfigurasi model reaktor D. Arah aliran inlet dan outlet tegak lurus kanal; inlet-outlet berseberangan. (a). Model utuh, (b). Perbesaran pada daerah outlet.



(b)

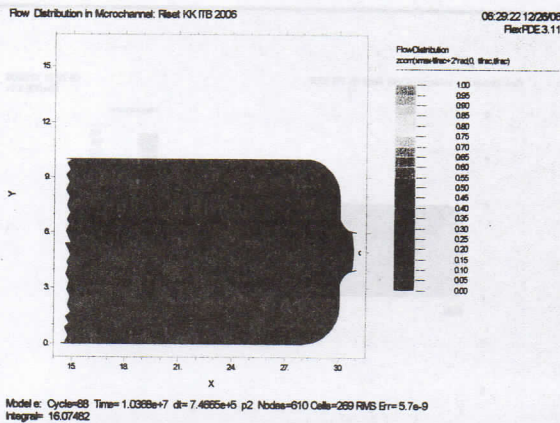
Gambar 3. Konfigurasi model reaktor C. Arah aliran inlet sejajar dan outlet tegak lurus kanal; inlet-outlet berseberangan. (a). Model utuh, (b). Perbesaran pada daerah outlet.



(a)

Konfigurasi model reaktor 5 memungkinkan posisi inlet kanal katalis yang lebih dekat dengan inlet reaktor, namun kualitas penenuhan di bagian outlet lebih rendah dibandingkan dengan model reaktor yang lain. Lebih rendahnya kualitas penenuhan ini disebabkan oleh kurangnya tingkat pencampuran akibat lebih kecilnya kualitas turbulensi dari titik inlet reaktor.





(b)

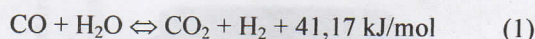
Gambar 5. Konfigurasi model reaktor E. Arah aliran inlet dan outlet sejajar kanal; inlet-outlet segaris. (a). Model utuh, (b). Perbesaran pada daerah outlet.

Tabel 1. Kualitas penjuanan.

	Penjuanan	Posisi kanal ( $z/L_r$ )
Model A	95,39%	0,50
Model B	95,29%	0,52
Model C	95,33%	0,50
Model D	95,24%	0,51
Model E	94,21%	0,17

**Perilaku cold start up**

Reaksi penggeseran gas air (WGSR) merupakan reaksi kimia antara CO dan H<sub>2</sub>O untuk menghasilkan H<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>. Reaksi ini biasanya dilaksanakan pada katalis oksida logam. Secara komersial, dua katalis yang umum digunakan adalah oksida besi dan tembaga. Studi ini mengikuti kinetika reaksi sebagaimana yang dikembangkan oleh Mukherjee dkk. (2007). Katalis yang digunakan adalah CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Reaksi kimia dinyatakan dengan persamaan (1) :



Reaksi ini bersifat eksotermis dan kesetimbangan, dimana parameter kesetimbangan diberikan oleh Moe (1962):

$$K_{eq} = \exp\left(\frac{4577,8}{T} - 4,33\right) \quad (2)$$

dimana  $T$  adalah temperatur dalam Kelvin. Persamaan laju reaksi mengikuti persamaan (3):

$$r_{CO} = -k\left(C_{CO}C_{H_2O} - \frac{C_{H_2}C_{CO_2}}{K_{eq}}\right) \quad (3)$$

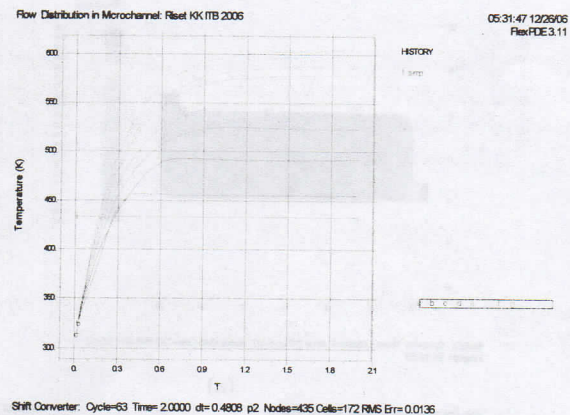
Berdasarkan pada pengidealan aliran sumbat, persamaan kontinuitas yang menyatakan hubungan

antara konversi CO ( $X$ ) sepanjang reaktor dinyatakan dalam persamaan (4):

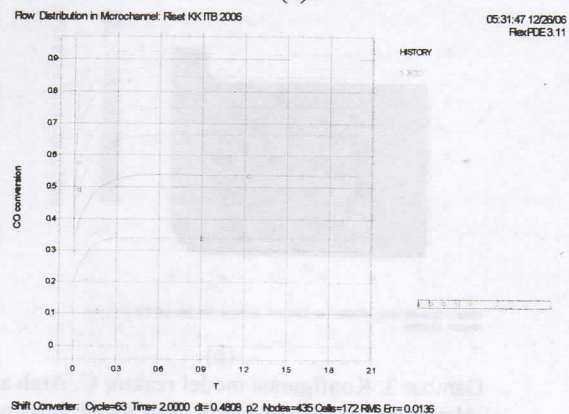
$$n_{CO}^o \frac{dX}{dl} = \frac{W}{L}(-r_{CO}) \quad (4)$$

dimana  $l$  adalah koordinat panjang sepanjang kanal reaktor mikro. Laju alir molar, konsentrasi, berat katalis, dan tetapan laju reaksi masing-masing diberikan oleh notasi  $n$ ,  $C$ ,  $W$ , dan  $k$ .  $n_{CO}^o$  adalah laju alir molar CO pada umpan reaktor. Kondisi-kondisi operasi mengikuti hasil kajian Budhi (2006). Adapun waktu tinggal gas di dalam kanal adalah 2,58 mili detik.

Gambar 6 menunjukkan dinamika temperatur (6a) dan konsentrasi (6b) di sepanjang reaktor sebagai fungsi dari waktu. Keadaan tunak untuk temperatur dicapai pada waktu 2 detik, sedangkan untuk konsentrasi dicapai pada waktu 1 detik. Perbedaan waktu mencapai keadaan tunak tersebut disebabkan oleh adanya beda skala waktu dalam merespon perturbasi.



(a)

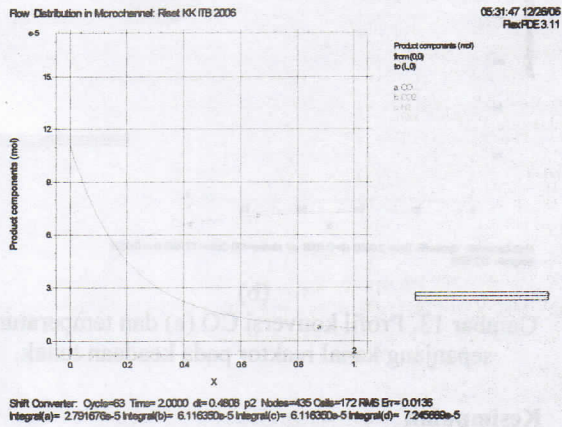


(b)

Gambar 6. Perilaku dinamik dari temperatur gas (a) dan konversi CO (b) di sepanjang reaktor sebagai fungsi waktu.

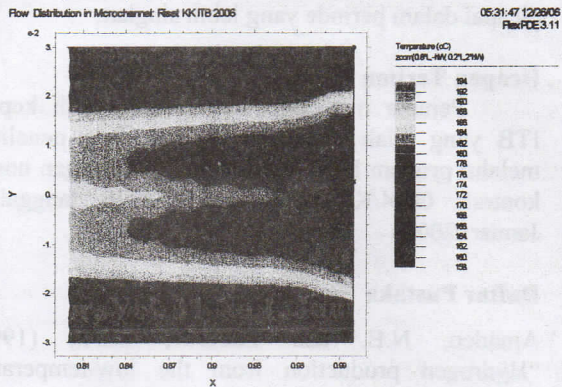


Gambar 7 menunjukkan distribusi CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>O di sepanjang reaktor setelah kondisi tunak dicapai. Kurva CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> berada pada garis yang berimpitan.

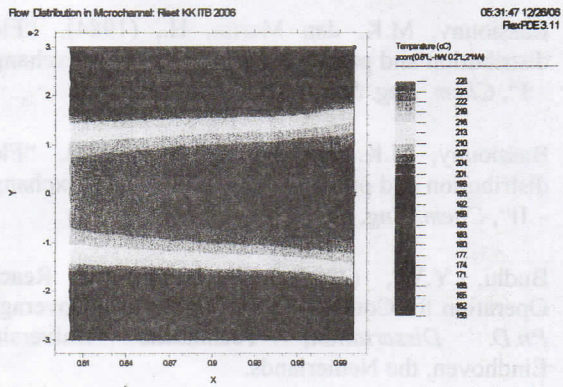


Gambar 7. Distribusi komponen di sepanjang reaktor pada keadaan tunak.

Histori dari distribusi temperatur di dalam reaktor, khususnya pada daerah outlet (zoom) ditunjukkan pada Gambar 8-11. Sedangkan Gambar 12 menunjukkan distribusi temperatur pada kondisi tunak yang terdiri dari profil tumpah (a), dan profil pada daerah outlet (zoom) (b,c).

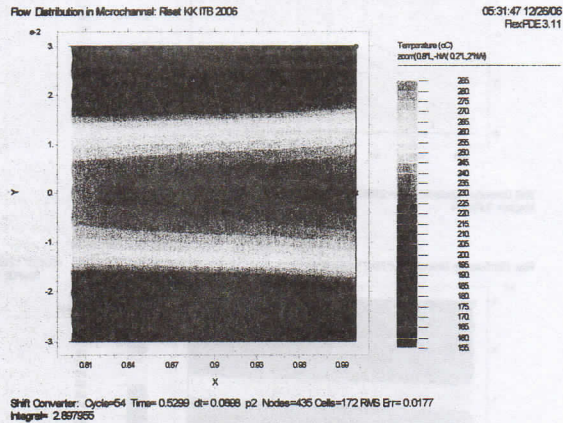


Gambar 8. CFD temperatur keluaran pada t=0,03 s.

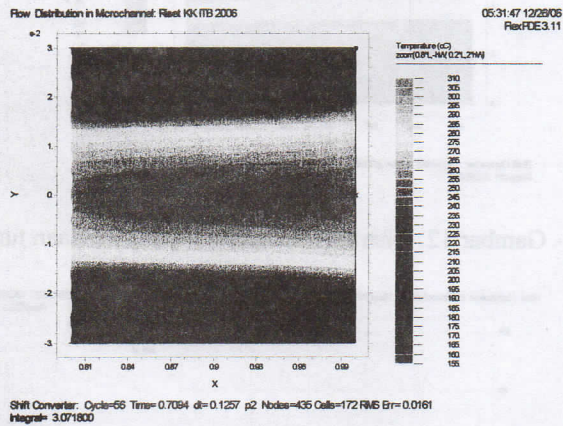


Gambar 9. CFD temperatur keluaran pada t=0,3 s.

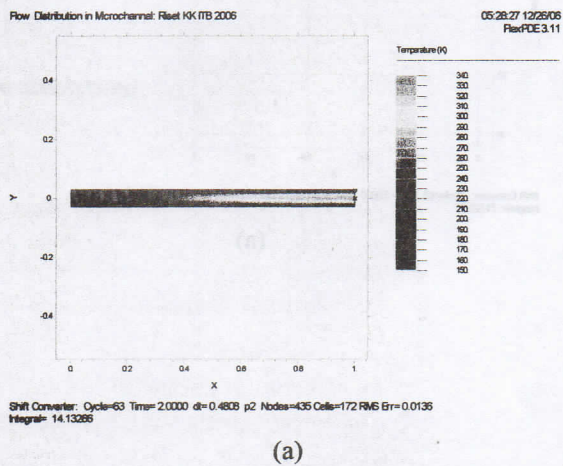
Gambar 13 menunjukkan profil konversi CO (a) dan temperatur di sepanjang kanal reaktor pada keadaan tunak. Konversi CO pada keadaan kesetimbangan dan distribusi temperatur sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 13b mencapai 92%.



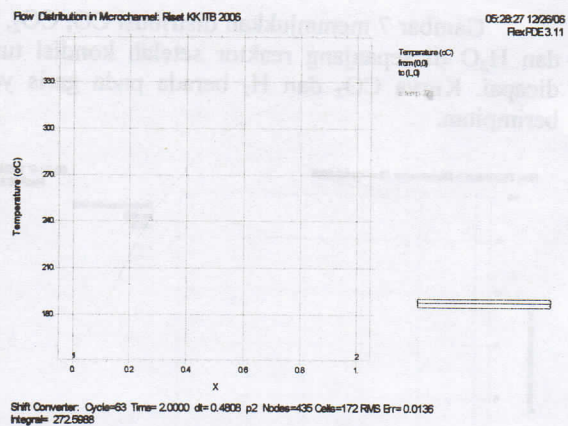
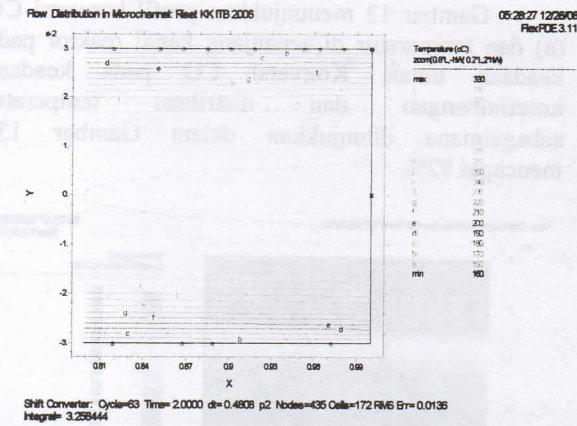
Gambar 10. CFD temperatur keluaran pada t=0,5 s.



Gambar 11. CFD temperatur keluaran pada t=0,7 s.



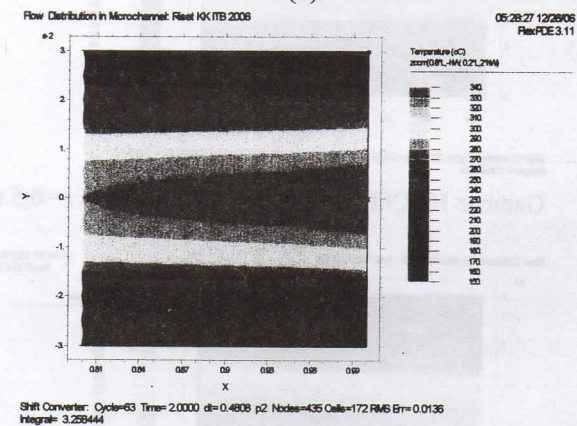




(b)

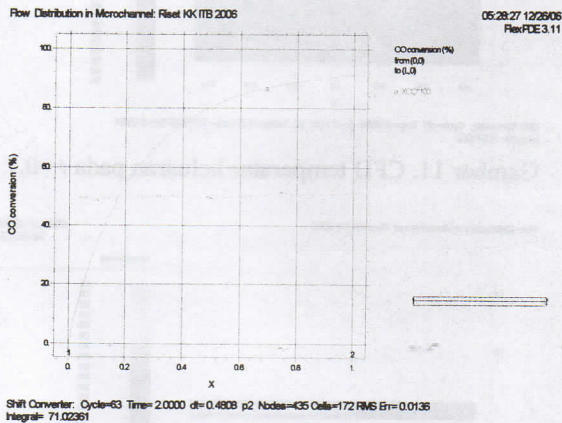
(b)

Gambar 13. Profil konversi CO (a) dan temperatur di sepanjang kanal reaktor pada keadaan tunak.



(c)

Gambar 12. Distribusi temperatur pada keadaan tunak.



(a)

**Kesimpulan**

Kajian pengaruh model reaktor terhadap distribusi aliran di setiap kanal ditelaah melalui simulasi komputer. Inlet dengan arah sejajar kanal, dan outlet dengan arah sejajar kanal memberikan hasil distribusi yang paling maksimal. Pada model reaktor ini, kajian teknik reaksi kimia dilakukan untuk mengamati perilaku reaktor pada saat *start up*. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur tunak sangat singkat, sedangkan konsentrasi tunak dicapai dalam periode yang lebih singkat.

**Ucapan Terima Kasih**

Penulis menyampaikan terima kasih kepada ITB yang telah memberi bantuan dana penelitian melalui progam Riset ITB tahun 2006 dengan nomor kontrak 0004/K01.03.2/PL2.1.5/I/2006 tanggal 4 Januari 2006.

**Daftar Pustaka**

Amadeo, N.E. dan Laborde, M.A., (1995), "Hydrogen production from the low-temperature water gas shift reaction: kinetics and simulation of the industrial reactor", *Int. J. Hydrogen energy*, 20, hal 949-956.

Bassiouny, M.K. dan Martin, H., (1984), "Flow distribution and pressure drop in plate heat exchanger – I", *Chem. Eng. Sci.*, 39, hal. 693-700.

Bassiouny, M.K. dan Martin, H., (1984), "Flow distribution and pressure drop in plate heat exchanger – II", *Chem. Eng. Sci.*, 39, hal. 701-704.

Budhi, Y.W., (2005), "Reverse Flow Reactor Operation for Control of Catalyst Surface Coverage", *Ph.D. Dissertation*, Technische Universiteit Eindhoven, the Netherlands.



Budhi, Y.W., (2005), "Pemodelan Dan Simulasi Reaktor Mikro Untuk Produksi Hidrogen Sebagai Umpan Sel Bahan Bakar Kendaraan Bermotor", *Pros. Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia*, Palembang, ISBN 979-97893-0-3.

Choi, S.H., Shin, S., dan Cho. Y.I., (1993). "The effect of area ratio on the flow distribution in liquid cooling module manifolds for electronic packaging". *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 20, hal. 221-234.

Delsman, E. (2005), "Microstructured Reactors for a Portable Hydrogen Production Unit". *PhD Dissertation*, Technische Universiteit Eindhoven, the Netherlands.

Gines, M.J.L., Marchi, A.J., dan Apesteguia, C.R., (1997), "Kinetic study of the reverse water gas shift reaction over CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst". *Appl. Catal. A: Gen.*, 154, hal. 155-171.

Hakkarainen, R., Salmi, T., dan Keiski, R.L., (1994). "Comparison of the dynamics of the high-temperature water gas shift reaction on oxide catalyst". *Catal. Today*, 20, hal. 395-408.

Karnik, S.V., Hatalis, M.K., dan Kothare, M.V., (2003). "Towards a palladium micromembrane for the water gas shift reaction: microfabrication approach and hydrogen purification results". *J. Microelectromech. Syst.*, 12, hal. 93-100.

Moe, J.M., (1962). "design of water gas shift reactors". *Chem. Eng. Prog.*, 58, hal. 33-37.

Mukherjee, S., Hatalis, M.K., dan Kothare, M.V., (2007). "Water gas shift reaction in a glass microreactor". *Catal. Today*, 120, hal. 107-120.

Stankiewicz, A., dan Moulijn, J., (2004). "Re-Engineering the Chemical Processing Plant: Process Intensification", Marcel Dekker Inc., New York.

This article discusses the chemical properties of glycerol and other related compounds. It starts with a general introduction to glycerol, which is a trihydric alcohol. The text then describes the synthesis of glycerol from various sources, including the hydrolysis of triglycerides and the epichlorohydrin process. It also covers the physical and chemical properties of glycerol, such as its high boiling point, viscosity, and ability to form hydrogen bonds. The article further explores the uses of glycerol in various industries, including pharmaceuticals, cosmetics, and food processing. It concludes by discussing the environmental impact of glycerol production and the potential for sustainable glycerol synthesis.

Introduction  
Glycerol is the natural triglyceride product after the hydrolysis of triglycerides. The production of glycerol has increased significantly from 1982 to 2001. In Indonesia, glycerol production is around 100,000 tons per year. This is caused by the increasing demand for glycerol in various industries, such as pharmaceuticals, cosmetics, and food processing. The price of glycerol is low, but it is still a valuable product. This article discusses the chemical properties of glycerol and other related compounds. It starts with a general introduction to glycerol, which is a trihydric alcohol. The text then describes the synthesis of glycerol from various sources, including the hydrolysis of triglycerides and the epichlorohydrin process. It also covers the physical and chemical properties of glycerol, such as its high boiling point, viscosity, and ability to form hydrogen bonds. The article further explores the uses of glycerol in various industries, including pharmaceuticals, cosmetics, and food processing. It concludes by discussing the environmental impact of glycerol production and the potential for sustainable glycerol synthesis.