

---

# PEMODELAN DAN SIMULASI REAKTOR MIKRO UNTUK PRODUKSI HIDROGEN SEBAGAI UMPAN SEL BAHAN BAKAR KENDARAAN BERMOTOR

Yogi Wibisono Budhi, Subagjo

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung  
Jl. Genesha 10, Bandung 40132, Phone: 022-2500989  
e-mail: [Y.Wibisono@che.itb.ac.id](mailto:Y.Wibisono@che.itb.ac.id), [subagjo@che.itb.ac.id](mailto:subagjo@che.itb.ac.id)

## Abstrak

*Terminologi pengembangan reaktor mikro merupakan salah satu 'kata kunci' dalam intensifikasi proses yang memainkan peranan penting, terutama dalam sistem reaksi yang memerlukan laju perpindahan panas dan massa yang besar. Makalah ini menyampaikan gagasan tentang miniaturisasi mesin kendaraan bermotor melalui kombinasi sistem prosesor bahan bakar dan sel bahan bakar. Hidrogen yang diperlukan sebagai umpan sel bahan bakar disediakan secara insitu dari reformasi metanol. Gas sintesis dari reformer diumpankan ke dalam reaktor oksidasi preferensial untuk menyisihkan CO sebelum diumpankan ke dalam sel bahan bakar. Rangkaian sistem proses penyedia hidrogen secara insitu ini dikemas dalam paket teknologi mikro sebagai jawaban atas kebuntuan sistem penyediaan hidrogen pada tekanan tinggi yang memiliki banyak kelemahan.*

**Kata Kunci:** Intensifikasi proses; Pemodelan dan simulasi; Teknologi reaktor mikro

## Abstract

*The terminology of micro-reactor development is one of the keywords in process intensification, which plays an important role, particularly in the reaction system requiring extremely large heat and mass transfers. This paper conveys an idea about miniaturization of the combustion engine through a combination of fuel processor system and fuel cell system. Hydrogen as a fuel cell feedstock is provided in-situ by methanol reforming. The synthesis gas produced by reformer is introduced into preferential oxidation reactor to remove CO before it enters the fuel cell. The process system for producing hydrogen is equipped in the micro-technology package as an answer to hydrogen storage at high pressure, which meets several shortcomings.*

**Keywords:** Process intensification; Modeling and simulation; Micro-reactor technology

## 1. Pendahuluan

Seiring dengan semakin menipisnya cadangan minyak bumi, pengembangan bahan bakar alternatif terus dilakukan oleh institusi penelitian. Salah satu bidang yang sedang digiatkan dan rasional adalah penggunaan sel bahan bakar (*fuel cell*) untuk kendaraan bermotor. Kendaraan bermotor yang dijalankan dengan sel bahan bakar merupakan salah satu alternatif sarana transportasi masa depan. Selain menawarkan keuntungan dari segi sumber energi alternatif, sel bahan bakar juga menghasilkan efisiensi termal yang tinggi dan lebih ramah lingkungan jika dibandingkan dengan mesin bakar konvensional.

Beberapa perusahaan otomotif telah mengawali penelitian dan uji coba sistem sel bahan bakar ini. Salah satu perusahaan otomotif yang dimaksud adalah Ford (lihat Gambar 1) yang saat ini sedang mengkaji pemilihan proses penggunaan hidrogen sebagai sumber bahan bakunya. Namun, pemilihan apakah hidrogen akan digunakan secara langsung atau hidrogen diperoleh dari hasil reformasi metanol ataupun gasolin masih terus dikaji secara mendalam. Di samping itu, metode penyimpanan hidrogen juga merupakan persoalan yang masih buntu.

Permasalahan yang dihadapi adalah bahwa penggunaan hidrogen secara langsung dari stasiun tangki ke dalam sel bahan bakar memerlukan bejana penyimpanan dalam kendaraan yang bertekanan tinggi, yaitu sekitar 1000 bar, yang menyebabkan ketidaknyamanan bagi penumpang kendaraan. Adapun kompresi hidrogen gas menjadi cair pada tekanan tersebut memerlukan energi yang sangat tinggi, kurang lebih setengah dari energi yang disimpan dalam hidrogen. Di samping itu, penyediaan hidrogen melalui unit reformasi metanol umumnya memerlukan ruang yang besar. Massa termal sistem pemroses bahan bakar yang besar menjadi penyebab utama terjadinya keterlambatan dalam pencapaian temperatur operasi. Solusi yang ditawarkan melalui riset ini adalah dengan meminiaturisasi sistem pemroses reformasi agar produksi hidrogen *insitu* dapat dilangsungkan dalam kendaraan bermotor dan ruang yang diperlukan hanya sedikit, bahkan lebih kecil daripada mesin pembakaran internal sebagaimana yang ada pada kendaraan bermotor saat ini. Lebih lanjut, strategi sistem pemanasan yang cepat, terutama untuk alat-alat yang kritis, perlu dikembangkan guna mencapai proses pemanasan (*start-up*) yang cepat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji alternatif penyediaan hidrogen sebagai sumber bahan baku dalam sel bahan bakar yang paling layak untuk diterapkan dalam kendaraan bermotor masa depan. Gagasan yang

disampaikan dalam riset ini adalah melalui miniaturisasi sistem pemroses yang terlibat dalam produksi hidrogen dari metanol dalam bentuk paket teknologi sistem mikro. Kapasitas sel bahan bakar adalah 1,62 kmol H<sub>2</sub> per jam yang setara dengan energi listrik antara 115 – 140 daya kuda. Di dalam riset ini, sistem pabrik kimia berskala mikro dirancang untuk menghasilkan daya sebesar 140 PK yang cukup digunakan untuk menggerakkan mesin kendaraan bermotor (contoh Honda Jazz IDSi-Vtech). Pabrik kimia mikro ini tersusun dari *micro micro reformer-burner*, *converter-exchanger*, *micro static-mixer* dan *micro vaporizer-cooler*.



Gambar 1. Mobil Ford yang menggunakan sel bahan bakar.

## 2. Fundamental

### Intensifikasi proses

Intensifikasi proses telah membuka khazanah baru dalam bidang teknik kimia. Namun demikian, praktik industrial yang mengejawantahkan pengintensifikasian dasar-dasar proses telah terjadi sejak tahun 1556, yaitu pada proses pendulangan bijih emas. Dalam perkembangan terkini, ilmu intensifikasi proses mulai dimekarkan secara terstruktur menurut jalur pematuration peralatan maupun jalur kebaruan metodologi. Artikel-artikel tentang intensifikasi proses telah dipublikasikan dan dapat ditemukan di beberapa prosiding dalam negeri (Budhi, 2005; 2006). Salah satu contoh intensifikasi proses adalah reaktor mikro untuk menghasilkan gas hidrogen secara *insitu* dengan menggunakan bahan baku metanol.

Penelitian reaktor mikro untuk produksi hidrogen secara *insitu* terus meningkat. Paket *reformer* – sel bahan bakar digagas sebagai salah satu alternatif sumber listrik jinjing (*portable*) yang akan bersaing dengan sumber listrik konvensional seperti baterai laptop dan telepon genggam karena kemampuannya menyediakan pasokan listrik yang tidak terputus selama ketersediaan metanol dan air masih ada. Penggunaan reaktor mikro untuk reformasi metanol secara *insitu* ini merupakan pola baru (Pfeifer dkk, 1999; Fitzgerald dkk., 2000).

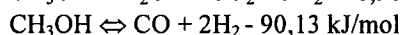
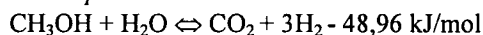
### Reformasi metanol

Hidrogen merupakan salah satu jenis gas yang diperkirakan menjadi sumber energi utama di masa mendatang. Pada saat ini, hidrogen merupakan bahan kimia yang sangat penting dalam industri kimia dan petrokimia. Salah satu pertimbangannya adalah karena hidrogen merupakan bahan bakar yang bersih yang tidak mengeluarkan CO<sub>2</sub> ketika dibakar atau digunakan dalam sel bahan bakar H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>. Selain itu, hidrogen dapat disimpan baik dalam bentuk gas atau cair (terlepas dari berapa energi yang dibutuhkan untuk kompresi).

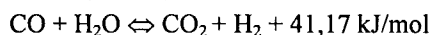
Metanol merupakan salah satu bahan baku yang potensial untuk produksi hidrogen. Pada kondisi ruangan, metanol berbentuk cair, sehingga dapat disimpan dengan mudah dalam tangki. Selain itu, metanol juga mempunyai nisbah H/C yang cukup tinggi, dan dapat dikonversikan menjadi hidrogen, baik dengan menggunakan kukus atau oksigen pada temperatur yang relatif rendah dibandingkan dengan bahan bakar lain. Reformasi metanol dengan menggunakan kukus telah digunakan secara luas di industri dan biasanya merupakan cara yang paling ekonomis untuk menghasilkan hidrogen. Secara teoritis, metanol dapat dikonversikan menjadi hidrogen dengan efisiensi yang lebih baik dibandingkan hidrokarbon lain. Penggunaan metanol untuk memproduksi hidrogen sangat menarik karena selektivitasnya yang rendah ke arah produk samping seperti CO dan metana (Ahmed dan Krumpelt, 2001). Sejumlah CO yang dihasilkan dari reformasi ini menuntut adanya proses penyisihan melalui reaksi penggeseran. Untuk mereduksi konsentrasi CO hingga batas yang dapat diterima oleh sel bahan bakar, reaktor oksidasi preferensial digunakan sebelum gas sintesis diumpankan ke dalam sel bahan bakar (Oetjen dkk., 1996).

Reformasi metanol menggunakan kukus dengan katalis Cu/ZnO dan pada temperatur 200-250 °C untuk produksi hidrogen telah banyak dikaji. Reaksi reformasi metanol ini dapat dikelompokkan sebagai berikut:

#### Reaksi primer:

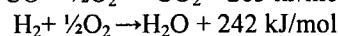


#### Reaksi sekunder:



Aliran gas sintesis yang keluar dari reformer mengandung sejumlah CO yang harus disisihkan untuk mencegah peracunan katalis anoda sel bahan bakar (Delsman, 2005). Hal ini dapat dilakukan dengan reaktor oksidasi

preferensial melalui oksidasi dengan udara pada katalis yang disangga logam nikel dengan suhu reaksi 150 °C. Dua reaksi berlangsung masing-masing dengan selektivitas sekitar 50%.



Meskipun di dalam proses ini jumlah hidrogen yang disisihkan kurang lebih sama dengan jumlah CO, hal ini dapat diterima selama jumlah CO dalam gas hasil reformasi tetap rendah. Gas yang kaya hidrogen dan bebas CO akhirnya dioksidasi dalam sel bahan bakar untuk menghasilkan sejumlah listrik. Sisa hidrogen yang tidak terkonsumsi di dalam sel bahan bakar digunakan sebagai sumber panas reaksi yang sangat endotermik dalam reformer. Dengan asumsi efisiensi sel bahan bakar 50-70%, maka untuk mencapai jumlah daya sekitar 140 HP, umpan metanol yang dibutuhkan untuk memproduksi hidrogen dapat ditentukan.

### Reaktor mikro

Secara fundamental reaktor mikro dapat didefinisikan sebagai sebuah piranti yang digunakan dalam sistem reaksi kimia dengan skala yang diminiaturisasi. Ukuran kanal reaksi umumnya berdiameter 10-500 µm. Dengan ukuran dimensi yang kecil tersebut, nisbah luas permukaan perpindahan terhadap volume sistem reaksi menjadi besar, sehingga mampu meningkatkan gaya penggerak dalam peristiwa perpindahan panas dan massa. Oleh karena itu, reaktor mikro sangat sesuai untuk reaksi-reaksi yang sangat cepat yang melibatkan pengaruh panas yang besar. Sebagai gambaran umum, laju perpindahan panas dalam reaktor mikro dapat ditingkatkan hingga lebih dari 10.000 kali.

Aplikasi reaktor mikro dalam bidang proses relatif luas. Beberapa contoh yang menarik untuk disampaikan adalah penggunaan reaktor mikro dalam konversi cairan menjadi gas (metanol dan etanol menjadi gas yang kaya hidrogen), serta gas menjadi gas (gas alam menjadi gas sintesis). Produksi gas yang kaya hidrogen melalui reaktor mikro dapat diintegrasikan dengan sel bahan bakar untuk menghasilkan listrik. Integrasi sistem reaktor mikro dan sel bahan bakar mempunyai implementasi yang sangat menjanjikan sebagai pencatu daya untuk piranti-piranti elektronik jinjing (portable), sebagai contoh untuk laptop, serta untuk kendaraan bermotor. Penggerak riset di bidang ini adalah karena tingginya densitas energi sistem sel bahan bakar jika dibandingkan dengan sel kering yang memungkinkan waktu operasi mandiri yang lebih lama. Selain itu,

sistem sel bahan bakar memiliki keunggulan dibandingkan mesin pembakaran internal karena lebih efisien, ramah lingkungan, dan kurang gaduh.

Silikon adalah bahan yang sesuai untuk fabrikasi reaktor mikro karena kekuatan materialnya yang tinggi (ikatan Si-Si), bahan bersifat inert, dan stabilitas termal yang tinggi. Teknik permesinan mikro pada silikon yang telah berkembang dengan baik dan banyak digunakan dalam industri mikro-elektronika membuka peluang untuk perancangan dan pembuatan kanal berskala mikro. Oleh karena itu, silikon banyak digunakan sebagai material dalam fabrikasi reaktor mikro.

### 3. Metodologi

Kajian dalam makalah dilakukan melalui perancangan sistem proses, pemodelan matematika, dan simulasi komputer dengan menggunakan perangkat lunak Aspen Plus (neraca massa dan energi/termodinamika), Aspen Icarus Process Evaluator (kelayakan ekonomi), dan FlexPDE (model tak tunak). Pertimbangan teknis dan ekonomis dilakukan secara komprehensif untuk memberikan gambaran awal tentang peluang pengembangan teknologi mikro untuk kendaraan bermotor masa depan. Tahap perancangan reaktor hanya akan dapat dilakukan dengan baik jika pemodelan matematika dan simulasi komputer membuahkan hasil yang berarti.

### 4. Hasil dan Analisis

#### Distribusi aliran massa dan energi

Perhitungan distribusi aliran massa dan energi dapat dilakukan setelah rangkaian sistem proses pabrik mikro dirancang. Rangkaian sistem proses yang ditawarkan ditunjukkan dalam Gambar 2. Campuran metanol dan air dengan nisbah 3:7 yang berasal dari masing-masing tangki penyimpanan dicampur dan diuapkan hingga mencapai temperatur > 100°C. Campuran tersebut kemudian diumpungkan ke dalam reformer untuk melangsungkan reaksi reformasi metanol dengan kukus pada temperatur sekitar 200°C pada katalis Cu/ZnO dan menghasilkan gas sintesis yang kaya hidrogen dan sedikit mengandung CO. Gas sintesis ini dicampur dengan udara (nisbah 1:2) di dalam sebuah *micro static-mixer*, dan kemudian diumpungkan ke dalam reaktor oksidasi preferensial untuk menyisihkan CO dengan katalis Pt. Selain mengoksidasi CO, oksigen juga akan mengoksidasi sebagian hidrogen. Gas sintesis yang kaya akan hidrogen dan sedikit CO ini (1%-vol. CO) dapat diumpungkan ke dalam sel bahan bakar.

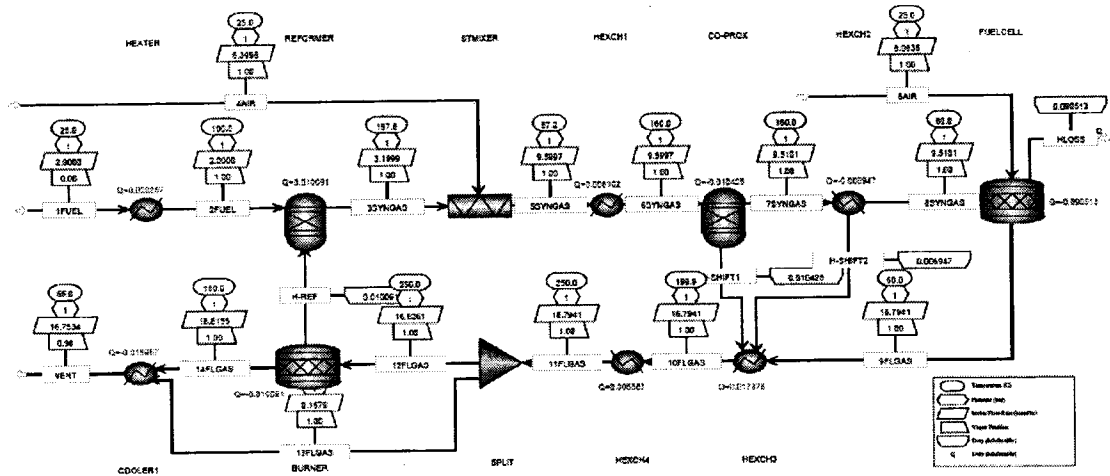
Temperatur operasi di dalam sel bahan bakar adalah 60°C sebagaimana hasil perhitungan dari neraca antara air yang masuk ke dalam sel bahan bakar dan yang terbentuk di dalam sel, serta air yang meninggalkan sel bahan bakar yang harus dalam keadaan uap. Dalam simulasi ini, komposisi air yang meninggalkan sel bahan bakar adalah 15%-vol. dan aliran produk berada dalam fasa uap. Konversi hidrogen di dalam sel bahan bakar dihitung berdasarkan daya yang dibutuhkan, yaitu sekitar 140 HP. Kelebihan oksigen di dalam sel bahan bakar ini akan digunakan untuk mengoksidasi sisa hidrogen dari sel bahan bakar di dalam *microburner* dan memberikan panasnya ke *microreformer*. Komposisi aliran yang keluar dari *microreformer* dan *microconverter* yang dihitung berdasarkan simulasi termodinamika ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi operasi dan komposisi produk *microreformer* dan *microconverter*.

Aliran	3	7
	Produk reformer	Produk converter
Temperatur (°C)	197	160
Tekanan (bar)	1	1
Fraksi uap	1	1
Laju alir mol (kmol/hr)	3,2	9,5
Laju alir massa (kg/hr)	44,4	228,8
Debit (m <sup>3</sup> /hr)	125,2	342,5
Fraksi mol		
CH <sub>3</sub> OH	1,3 · 10 <sup>-5</sup>	0
H <sub>2</sub> O	0,252	0,104
CO	0,002	0,001
CO <sub>2</sub>	0,186	0,063
H <sub>2</sub>	0,561	0,170
O <sub>2</sub>	0	0,125
N <sub>2</sub>	0	0,538

#### Efek temperatur dalam *microreformer*

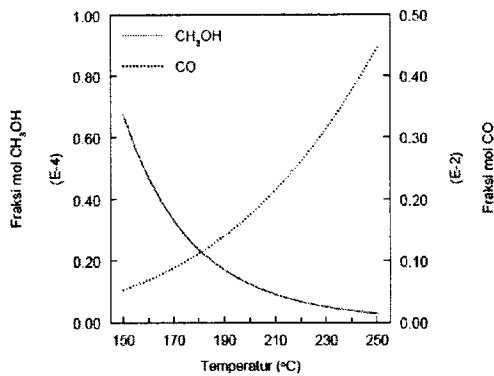
Reaksi reformasi metanol adalah reaksi yang bersifat endotermik. Reaksi tersebut berlangsung di dalam sebuah reformer. Dalam kasus ini, sebuah *microreformer* digunakan untuk memproduksi gas sintesis yang kaya hidrogen. Produk lain adalah CO dan CO<sub>2</sub>. Sebagaimana yang telah disebutkan bahwa komposisi CO yang masuk ke dalam sel bahan bakar harus di bawah 0,5%-vol. (Delsman, 2005). Sekalipun CH<sub>3</sub>OH dan CO<sub>2</sub> juga dapat mempengaruhi katalis sel bahan bakar, namun efeknya tidak sebesar CO. Pada temperatur 190-200°C, komposisi CO yang keluar dari *microreformer* adalah 0,2%-vol. dan diturunkan lebih lanjut menjadi 0,1%-vol. dalam *microconverter*. Pada temperatur reaksi yang lebih tinggi, konsentrasi CH<sub>3</sub>OH yang keluar dari *microreformer* akan menurun, namun



Gambar 2. Rangkaian unit proses pabrik produksi hidrogen berteknologi mikro untuk menggerakkan kendaraan bermotor dengan kapasitas daya 140 HP.

konsentrasi CO juga meningkat sebagaimana yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Selain itu, konsentrasi CO<sub>2</sub> juga meningkat pada suhu yang lebih tinggi, sedangkan konsentrasi H<sub>2</sub> akan mengalami penurunan (lihat Gambar 4).

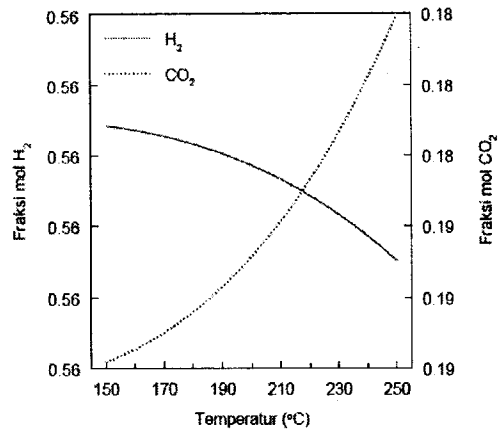
Oleh karena itu, reaksi reformasi ini sebaiknya tidak dilangsungkan pada temperatur > 200°C. Namun perlu dipertimbangkan bahwa jika temperatur reaksinya rendah, maka laju reaksi akan mengalami penurunan. Kajian lebih lanjut tentang teknik reaksi kimia sangat diperlukan, terutama pada saat *cold start-up* mesin dari keadaan dingin. Selain itu, manipulasi selektivitas ke arah CO atau CO<sub>2</sub> juga merupakan bagian yang penting untuk dikaji lebih mendalam.



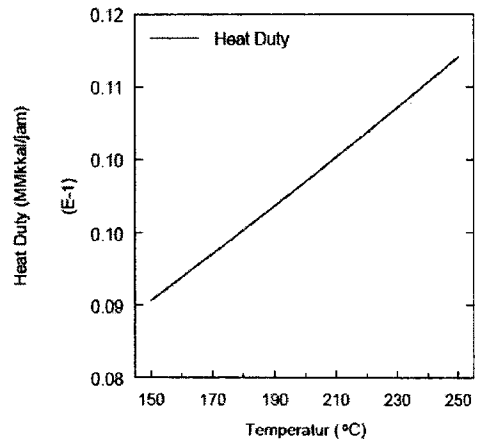
Gambar 3. Pengaruh temperatur *micro-reformer* pada konsentrasi CH<sub>3</sub>OH dan CO.

Kebutuhan panas reaksi dalam *micro-reformer* akan meningkat jika reaksi reformasi diinginkan pada temperatur yang lebih tinggi. Dalam kasus ini, pelaksanaan reaksi pada temperatur yang lebih tinggi bukan

pilihan yang menarik atas pertimbangan bahwa perolehan hidrogen akan menurun, dan sebaliknya perolehan CO akan meningkat.



Gambar 4. Pengaruh temperatur *micro-reformer* terhadap konsentrasi H<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>.

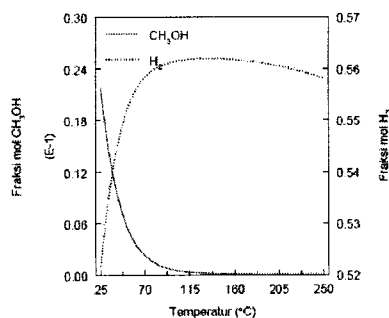


Gambar 5. Pengaruh temperatur *micro-reformer* terhadap *heat duty*

Faktor lain yang kurang menguntungkan adalah dibutuhkan energi yang lebih besar untuk melangsungkan reaksi reformasi, sementara sumber panas untuk reaksi tersebut sebenarnya adalah sisa hidrogen yang tidak dikonsumsi dalam sel bahan bakar, artinya jika produksi hidrogen dalam *microreformer* menurun, maka pasokan panas untuk melangsungkan reaksi reformasi juga akan menurun. *Heat duty* dalam *microreformer* ini ditunjukkan dalam Gambar 5.

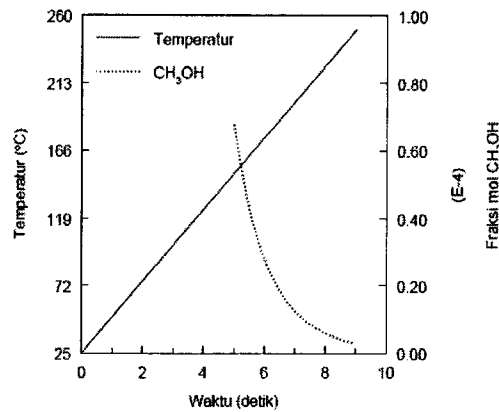
**Proses cold start-up**

Pelaksanaan *cold start-up* dalam sistem proses dan sel bahan bakar ini merupakan pokok kajian yang masih langka, namun sebetulnya sangat penting. Pada temperatur di bawah 130°C, konsentrasi CH<sub>3</sub>OH yang keluar dari reaktor sangat tinggi (lihat Gambar 6). Oleh karena itu, proses pemanasan yang ekstra cepat sangat dibutuhkan dalam sistem ini. Dengan paket teknologi mikro, waktu tinggal di dalam pabrik mikro kurang dari 1 detik, sehingga proses pengaliran massa dari unit *microreformer* yang membawa hidrogen menuju unit *microburner* untuk memasok panas unit *microreformer* akan berlangsung sangat cepat. Selain itu, dengan sifat khas kemampuan memindahkan energi dengan laju yang sangat cepat, maka panas hasil pembakaran dalam *microburner* dapat dipindahkan menuju *microreformer* dengan laju yang tinggi untuk menaikkan temperatur reaksi hingga sekitar 200°C. Pada Gambar 7 dan 8 ditunjukkan proses *start-up* yang berlangsung selama 5 detik dan perubahan konsentrasi CH<sub>3</sub>OH dan H<sub>2</sub> sebagai fungsi dari waktu. Pada dasarnya, efek ketransienan ini juga perlu dikaji secara khusus, terutama yang menyangkut masalah proses *cold start-up*, karena pengaruh ketransienan ini akan berdampak pada kinerja reaktor-reaktor yang selanjutnya mempengaruhi unjuk kerja sel bahan bakar. Kajian ketransienan ini disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak FlexPDE.

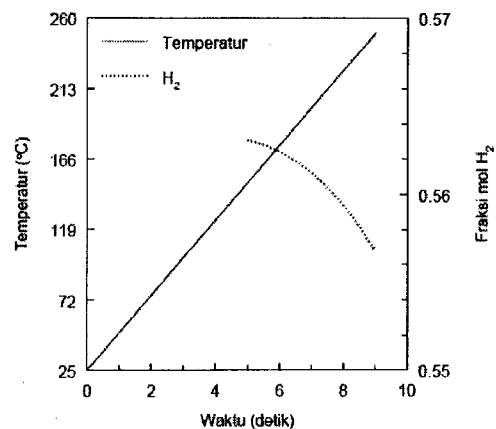


Gambar 6. Pengaruh temperatur *micro-reformer* pada *start-up*.

Kelakuan *start-up* pada setiap unit dapat menunjukkan perbedaan. Proses *start-up* ini dapat berlangsung lebih lama jika proses perpindahan panas mengalami hambatan yang besar dan material yang digunakan memiliki kapasitas panas yang besar. Selain itu, material pendukung lain juga perlu direduksi untuk mengurangi lamanya waktu *start-up*. Kelakuan *start-up* ini dapat diperbaiki dengan baik melalui optimisasi perancangan dan proses fabrikasi.



Gambar 7. Proses *start-up* unit *microreformer* dan konsentrasi produk CH<sub>3</sub>OH.



Gambar 8. Proses *start-up* unit *microreformer* dan konsentrasi produk H<sub>2</sub>.

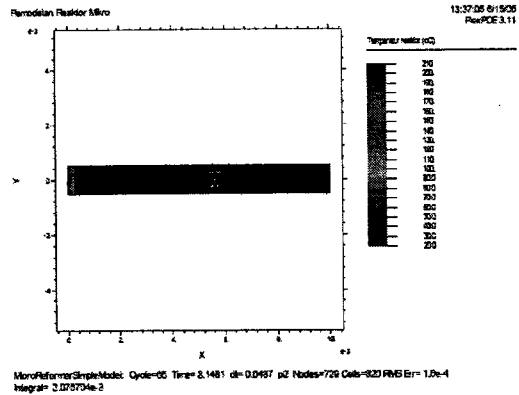
**Computational Fluid Dynamic**

Untuk memberikan visualisasi perubahan temperatur di dalam *microreformer*, pada studi ini *Computational Fluida Dynamic* (CFD) dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak FlexPDE. Hasil-hasil simulasi cukup memberikan gambaran awal tentang bagaimana proses pemanasan reaktor pada saat

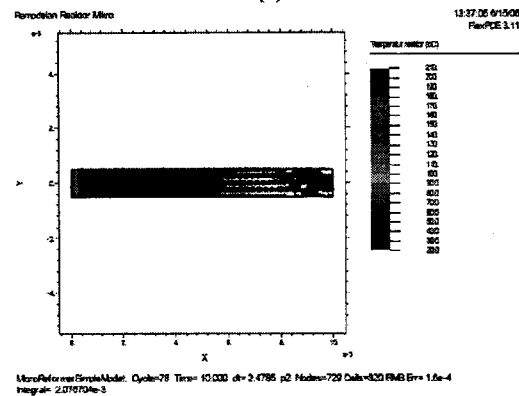
*cold start-up* yang harus dilakukan secara cepat. Hasil-hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil simulasi ini menguatkan hasil-hasil studi sebelumnya (teoritik maupun eksperimental) bahwa proses perpindahan panas yang cepat sangat dimungkinkan dalam sistem reaktor mikro.

**Kelakuan start-up**

Kelakuan ini ditentukan oleh beberapa faktor, di antaranya adalah kapasitas panas material. Untuk sebuah *microreformer* dengan pembangkitan panas sebesar 14 HP, maka kapasitas perpindahan panas (laju alir massa x kapasitas panas) adalah 70 W/K. Angka ini tergolong rendah jika dibandingkan dengan kapasitas panas material sebesar 460 J/K yang dapat menghasilkan waktu *start-up* lebih lama. Namun dengan sistem mikro ini, waktu yang dibutuhkan untuk memanaskan peralatan proses dapat direduksi. Gambar 10 menunjukkan kelakuan temperatur *microreformer* dalam *start-up*, mulai  $t = 10^{-6}$  detik s.d. 10 detik.

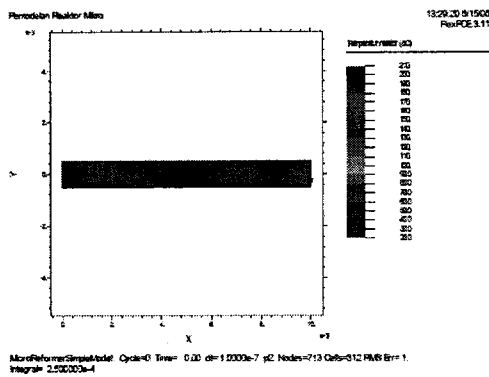


(c)

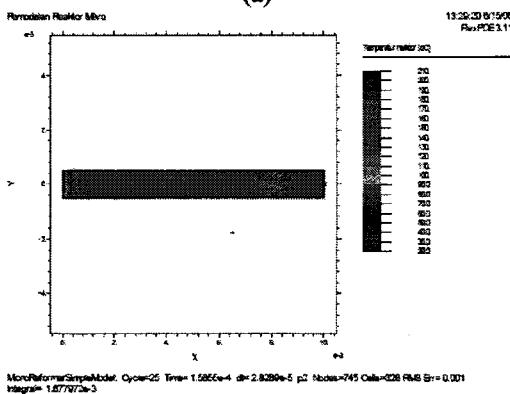


(d)

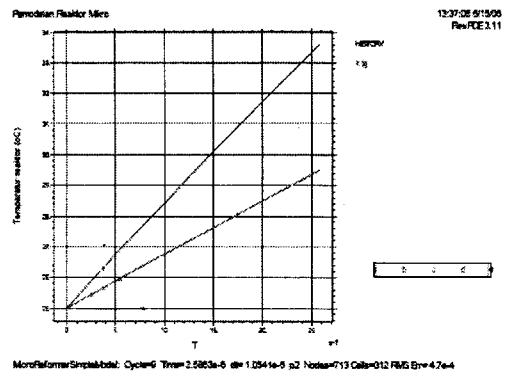
**Gambar 9. Profil temperatur di dalam *microreformer* pada saat: a)  $t = 0$  detik, b)  $t = 0,0001$  detik, c)  $t = 3$  detik, dan d)  $t = 12$  detik.**



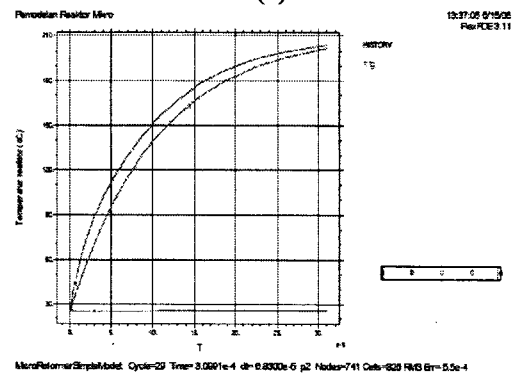
(a)



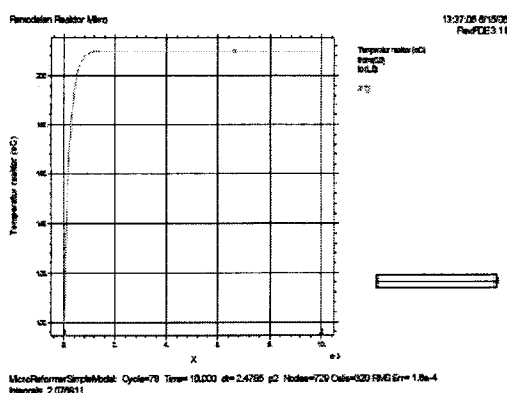
(b)



(a)



(b)



(c)  
Gambar 10. Temperatur di sepanjang microreformer selama start-up.

Kajian pendahuluan terhadap pabrik berteknologi mikro ini menunjukkan bahwa untuk membuat satu paket sistem proses, biaya yang dibutuhkan adalah sekitar Rp 25 juta, tidak termasuk sel bahan bakar dan tanpa memperhatikan tingkat kesulitan selama fabrikasi pada fasa perdana. Estimasi biaya tersebut dilakukan dengan simulator proses dan diperuntukkan bagi pasar professional. Namun untuk produksi masa, harga tersebut diperkirakan akan jauh lebih murah, apalagi jika teknik fabrikasi unit mikro ini telah dikuasai dengan baik.

## 5. Kesimpulan

Pemodelan dan simulasi proses produksi hidrogen dengan teknologi mikro telah dilakukan. Untuk mencapai daya 140 HP diperlukan sekitar 1,62 kmol  $H_2$  per jam atau metanol sekitar 0,6 kmol  $CH_3OH$  per jam. Dengan sistem mikro ini, proses perpindahan panas dapat berlangsung sangat cepat, demikian juga dengan distribusi panas di dalam microreformer. Pelaksanaan start-up yang berlangsung selama 5 detik memungkinkan teknologi sistem mikro memiliki potensi yang sangat tinggi untuk dikembangkan di masa mendatang, terutama jika sistem kendaraan bermotor menggunakan bahan bakar hidrogen. Dalam teknologi mikro ini, hidrogen dapat diproduksi secara *insitu* yang berarti menghilangkan sistem penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi yang mengganggu kenyamanan penumpang.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada ITB yang telah memberikan bantuan dana untuk melaksanakan penelitian ini, yaitu melalui Riset Fakultas tahun 2006.

## Daftar Pustaka

- [1] Ahmed, S., Krumpelt, M. (2001), Int. J. Hydrogen Energy 26, 291.
- [2] Budhi, Y.W. (2005), "Intensifikasi Proses: Daya Dorong Tapal Batas Teknik Kimia dalam Merekayasa Ulang Pabrik Kimia", *Prosiding Seminar Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia ITS* (ISSN: 1410-5667).
- [3] Budhi, Y.W. (2005), "Intensifikasi Proses dalam Operasi Reaktor Aliran Bolak-Balik", *Prosiding Seminar Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia ITS* (ISSN: 1410-5667).
- [4] Budhi, Y.W. (2005), "Process Intensification for Process Innovation: Improved Productivity, Selectivity, Conversion, and Reduced Energy Consumption via Dedicated Flow Reversal", *Prosiding Seminar Soehadi Reksowardojo, Jurusan Teknik Kimia ITB* (ISSN: 0854-7769).
- [5] Budhi, Y.W. (2006), "Proses-Proses Keadaan Tak Tunak dalam Katalisis", *Prosiding Indonesian Symposium on Science & Technology on Chemistry 2006*.
- [6] Delsman, E. (2005), "Microstructured Reactors for a Portable Hydrogen Production Unit", *PhD Dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, the Netherlands*.
- [7] Fitzgerald, S., Wegeng, R., Tonkovich, A., Wang, Y., Freeman, H., Marco, J., Robert, G., VanderWeil, D. (2000), *Prosiding Seminar Internasional ke-4 Microreaction Technology*. Atlanta, GA, 358-363.
- [8] Oetjen, H.E., Schmidt, V.M., Stimming, U., Trila, F. (1996), J. Electrochem. Soc. 142, 3838.
- [9] Pfeifer, P., Fichtner, M., Schubert, K., Liauw, M., Emig, G. (1999). "Microstructured catalysts for methanol steam reforming", *Proceedings of the Third International Conference on Microreaction Technology*. 372-382. Frankfurt, Germany.