

PEMBUATAN AYAKAN MOLEKULER BERBASIS KARBON UNTUK PEMISAHAN N_2/O_2 DARI PIROLISIS RESIN *PHENOL* *FORMALDEHYDE*

Imam Prasetyo^{*)}, Rochmadi dan Endro Wahyono

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM
Jl. Grafika 2, Kampus UGM, Yogyakarta, Telp. 0274-902171, Fax. 0274-902170

^{*)}Penulis korespondensi: imampras@chemeng.ugm.ac.id

Abstrak

Proses pemisahan campuran gas dengan menggunakan carbon molecular sieve (CMS) atau ayakan molekuler berbasis karbon merupakan teknologi proses pemisahan yang mulai banyak diterapkan di dalam industri kimia. Dalam penelitian ini, CMS untuk pemisahan N_2 dari udara dibuat dari pirolisis bahan polimer sintesis yaitu resin phenol formaldehyde (PF). Prekursor yang berupa resin tersebut dipanaskan dalam retort pada suhu 400-950°C selama 0,5-3 jam yang disertai dengan pengaliran gas N_2 ke dalam retort dengan laju 100 mL/jam. Dengan proses pirolisis, atom-atom non-karbon penyusun bahan polimer akan terurai dan menguap sehingga hanya menyisakan arang karbon dengan struktur kerangka atom karbon yang sesuai dengan struktur kerangka dasar rantai polimer. Kemudian karbon hasil pirolisis tersebut dipanaskan lebih lanjut pada suhu 750-950°C sambil dialiri gas CO_2 selama 1 jam. Pada kondisi ini karbon akan mengalami proses gasifikasi parsial sehingga terbentuk karbon dengan porositas tinggi. Melalui rekayasa proses polimerisasi dan karbonisasi dihasilkan material karbon berpori yang mayoritas porinya adalah mikropori dengan ukuran pori efektif < 2 nm yang dapat dikategorikan sebagai CMS yang dapat dipergunakan untuk memisahkan campuran gas N_2-O_2 . Pada penelitian ini dihasilkan CMS dengan selektivitas kinetis D_{N_2}/D_{O_2} sekitar 3.

Kata kunci: Carbon Molecular Sieve, pirolisa, resin Phenol Formaldehyde

Abstract

Separation processes of gas mixtures base on the adsorption kinetic of the gas molecule in the porous material so called carbon molecular sieve (CMS), has been widely used in many chemical industries. In this research, preparation of CMS for separation of N_2 from air has been developed by pyrolysis of phenol formaldehyde (PF) resin as carbon precursor. The research was initiated by synthesis of the resin PF precursor followed by thermal decomposition of the dried granular resin in a retort at 450-950°C in flowing N_2 inert gas at flow rate of 100 mL/h for 0.5-3 hours. The char produced from the pyrolysis process was further treated using CO_2 gas at 750-950°C for about 1 hour. In this condition, the char was gasified and the extent of the gasification reaction was controlled by changing the gasifying agent and nitrogen ratio. By this way, the char was converted into porous carbon having a majority of micropores with an effective pore size < 2 nm. The results show that the amount of the char produced from the pyrolysis was determined by the heating rate, whereas the porosity of the porous carbon material resulted from the gasification was determined by the rate of the gasification reaction. In this work, CMS with kinetic selectivity, D_{N_2}/D_{O_2} , as high as 3, was produced.

Keywords: Carbon Molecular Sieve, pirolysis, Phenol Formaldehyde resin

PENDAHULUAN

Proses pemisahan suatu campuran bahan merupakan bagian yang sangat penting dalam industri kimia. Tujuan dari proses pemisahan tersebut biasanya antara lain untuk peningkatan kemurnian suatu komponen atau pemungutan suatu komponen tertentu dari campurannya. Salah satu aspek yang sering

menjadi perhatian utama para praktisi industri terkait dengan proses pemisahan adalah biaya operasi yang tinggi untuk kebutuhan energi proses pemisahan tersebut. Seiring dengan semakin mahalnya energi, riset tentang metode pemisahan banyak difokuskan pada metode proses pemisahan yang konsumsi energinya rendah. Salah satu inovasi dalam teknologi

pemisahan yang banyak dilakukan adalah pemanfaatan material berpori sebagai medium pemisahan campuran gas. Proses pemisahan dengan menggunakan padatan berpori (adsorpsi) dimungkinkan karena adanya perbedaan afinitas dan difusivitas komponen campuran terhadap padatan berpori tertentu (Moore and Trimm, 1977; Verma and Walker, 1990). Jika dilihat dari aspek kebutuhan energi dan tipe peralatan yang digunakan, proses pemisahan campuran gas dengan metode adsorpsi relatif lebih murah dan lebih sederhana dibandingkan dengan metode konvensional seperti distilasi. Pada proses pemisahan campuran gas dengan metode distilasi, diperlukan energi yang sangat besar untuk menurunkan suhu campuran gas tersebut hingga titik embunnya sebelum dapat dipisahkan satu dengan lainnya. Sementara, proses pemisahan campuran gas dengan metode adsorpsi cukup dilakukan pada suhu kamar dengan suatu unit alat yang disebut sebagai *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Pada proses ini, campuran gas yang akan dipisahkan dilewatkan dalam kolom adsorber yang berisi material padatan berpori dan dioperasikan pada kisaran temperatur kamar dan tekanan yang tidak terlalu tinggi. Karena perbedaan difusivitas, komponen dari campuran gas yang semula masuk kolom PSA secara bersama-sama, akan terpisahkan satu dengan yang lain (Cabrera *et al*, 1993; Prasetyo and Do, 1999). Dengan mengoperasikan sepasang kolom adsorber yang beroperasi secara berselang-seling mengikuti pola adsorpsi-desorpsi, dapat dilakukan proses pemisahan gas secara sinambung.

Proses pemisahan secara adsorpsi dapat dilakukan untuk suatu campuran gas maupun cairan. Salah satu faktor utama yang menentukan kinerja pemisahan pada proses adsorpsi adalah kualitas dari material berpori atau adsorbent yang dipergunakan. Suatu adsorbent yang baik harus bersifat selektif atau mempunyai kemampuan memilah atau mengayak (*sieving property*) terhadap komponen penyusun campuran. Berdasarkan komponen penyusunnya, ayakan molekuler dapat dikelompokkan menjadi dua: ayakan molekuler berbasis silika-alumina yaitu *zeolite molecular sieve* (ZMS) dan ayakan molekuler berbasis karbon yaitu *carbon molecular sieve* (CMS). Untuk aplikasi pemisahan campuran gas, CMS lebih disukai karena sifat permukaannya yang relatif inert, dibandingkan dengan zeolite yang bersifat asam (Rodriguez-Reinoso, 1995). CMS adalah material padatan berpori yang tersusun atas atom karbon sedemikian rupa sehingga strukturnya membentuk jaringan pori-pori yang ukuran diameternya berkisar antara 0,3 s/d 1 nm. Dengan ukuran pori sekecil itu, maka material ini dapat dimanfaatkan untuk menyeleksi suatu campuran gas yang diameternya ada pada kisaran ukuran diameter rata-rata pori material karbon tersebut. CMS mempunyai

potensi aplikasi yang luas. Di samping dapat dipergunakan untuk adsorbent atau ayakan molekuler, CMS juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengemban katalis (Foley, 1988; Rodriguez-Reinoso, 1995). Pembuatan CMS dari bahan alam seperti batubara (Juntgen *et al*, 1981; Vyas *et al*, 1993), tempurung kelapa (Prasetyo dkk., 2004), atau tempurung kacang macademia (Ahmadpour and Do, 1997) mempunyai beberapa kekurangan antara lain kualitas produk yang dihasilkan kurang konsisten karena kualitas bahan baku alami seperti batu bara, tempurung kelapa, dan lain-lain sangat dipengaruhi oleh umur, jenis, dan kondisi alam. Di samping itu, distribusi ukuran pori dan surface area CMS yang terbuat dari bahan alami tersebut tidak mudah untuk dikontrol.

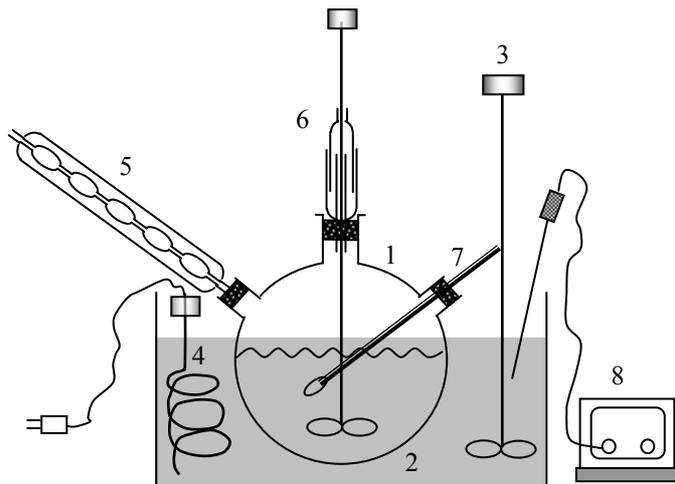
Dalam penelitian ini CMS dibuat dari bahan polimer sintesis *phenol formaldehyde* sebagai prekursor dengan melalui proses pirolisis dan gasifikasi parsial. Resin phenol formaldehid tersebut dibuat dengan mereaksikan antara *phenol* dengan *formaldehyde* sehingga membentuk bahan polimer melalui reaksi dua tahap, yaitu reaksi adisi dan reaksi kondensasi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan teknik pembuatan CMS untuk pemisahan campuran gas N_2/O_2 dari pirolisis suatu bahan polimer sintesis. Dengan menggunakan polimer sintesis sebagai prekursor diharapkan dapat diperoleh CMS yang ukuran porinya lebih homogen dan dapat dirancang sesuai dengan ukuran molekul gas yang akan dipisahkan.

METODE PENELITIAN

Proses pembuatan CMS dalam penelitian ini dimulai dengan pembuatan prekursor yang berupa bahan sintesis yang dibuat melalui suatu rekayasa proses polimerisasi. Kemudian prekursor yang berupa bahan polimer sintesis tersebut diubah menjadi arang karbon melalui proses pirolisis. Arang karbon hasil pirolisis kemudian ditingkatkan porositasnya dengan melalui proses gasifikasi parsial.

Preparasi Material Prekursor: Pembuatan Resin *Phenol Formaldehyde* (PF)

Prekursor dibuat dengan mereaksikan antara *phenol* dengan *formaldehyde* melalui suatu reaksi polimerisasi pada suhu kamar dengan menggunakan campuran asam klorida dengan asam asetat sebagai katalis. Reaksi polimerisasi dilakukan dalam labu leher tiga 500 mL yang berfungsi sebagai reaktor yang dilengkapi dengan pendingin balik, pengaduk mekanis dan thermometer seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Dalam percobaan ini parameter proses yang dikontrol dalam rangka pembentukan jaringan rantai polimer adalah pH, suhu, dan perbandingan antara *phenol* dengan *formaldehyde* yang dipergunakan dalam reaksi polimerisasi.



Keterangan gambar

1. Labu leher tiga
2. Bak pemanas gliserol
3. Pengaduk listrik
4. Pemanas listrik
5. Pendingin balik
6. Pengaduk merkuri
7. Termometer
8. Pengatur suhu (*thermocontroller*)

Gambar 1. Rangkaian alat polimerisasi untuk pembentukan precursor

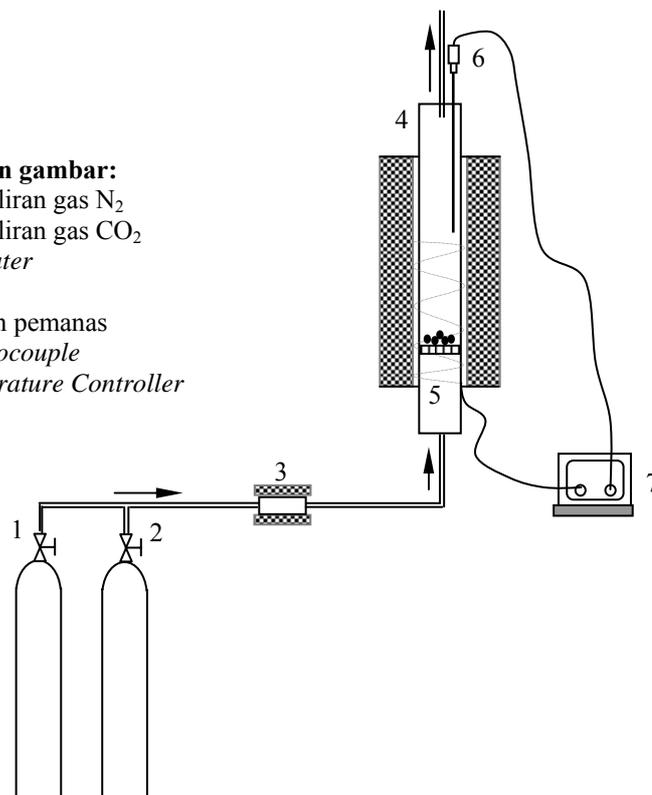
Pirolisis Resin Phenol Formaldehyde

Tujuan dari proses ini adalah menghilangkan unsur non-karbon yang terkandung dalam bahan polimer dan mengurai molekul penyusun polimer resin sehingga diperoleh arang karbon. Pada tahap ini, polimer resin (yang sudah dihancurkan) dipanaskan pada suhu 450-950°C dalam *retort* (reaktor) sambil dialiri gas nitrogen. Pada suhu tersebut, air dan atom non-karbon yang terkandung di dalam polimer akan teruapkan dan terbawa oleh gas nitrogen. Gas nitrogen disini berfungsi untuk mencegah masuknya udara ke dalam sistem pirolisis dan sebagai *carrier* agar molekul-molekul yang

teruapkan dan terurai selama pemanasan tidak terakumulasi di dalam *retort*. Dalam jangka waktu sekitar 3 jam, molekul-molekul penyusun resin akan terurai sempurna. Kran nitrogen kemudian dikecilkan dan pada saat yang sama ke dalam *retort* dialirkan gas CO₂ untuk menyempurnakan pembentukan jaringan pori dengan cara gasifikasi parsial arang karbon oleh gas CO₂. Skema rangkaian alat pirolisis dan gasifikasi dapat dilihat pada Gambar 2. Dari proses pirolisis akan dihasilkan arang karbon berpori, yang merupakan replika dari struktur rantai atom C bahan polimer prekursor yang diharapkan mempunyai sifat sebagai CMS.

Keterangan gambar:

1. Kran aliran gas N₂
2. Kran aliran gas CO₂
3. *Preheater*
4. *Retort*
5. Elemen pemanas
6. *Thermocouple*
7. *Temperature Controller*



Gambar 2. Gambar skematis rangkaian alat karbonisasi dan gasifikasi

Karakterisasi Produk CMS

Untuk mengetahui karakteristik CMS yang dihasilkan, dilakukan uji adsorpsi dengan gas nitrogen pada suhu 77 K (-196°C) dengan menggunakan *High Speed Gas Sorption Analyzer* NOVA 2000 buatan Quantachrome Instrument, untuk memperkirakan luas permukaan internal, volume pori, serta diameter rata-rata pori. Selain itu juga dilakukan uji adsorpsi terhadap gas N₂ dan O₂ untuk menentukan kapasitas dan selektivitas adsorpsi material CMS terhadap kedua gas tersebut.

a. Pengukuran luas permukaan internal dan volume pori dilakukan dengan mengevaluasi data kesetimbangan adsorpsi N₂ pada temperatur 77 K. Dari data kesetimbangan adsorpsi N₂ dapat diperkirakan luas permukaan internal padatan tersebut dengan model adsorpsi Brunauer-Emmet-Teller (BET).

$$\frac{1}{W((P_0/P)-1)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1)$$

b. Uji kapasitas adsorpsi yang menggambarkan kinerja CMS dari aspek kesetimbangannya ditentukan dengan metode volumetris pada temperatur 293, 303, dan 323 K dengan menggunakan molekul N₂ dan O₂ dalam suatu rangkaian alat seperti terlihat pada Gambar 3. Sebelum dilakukan uji adsorpsi sampel yang ada di dalam *sample cell* dibersihkan dengan cara dihisap dengan pompa vakum sambil dipanaskan pada temperatur 473 K, untuk membantu proses pembersihan jaringan pori dari kontaminan yang ada. Kemudian gas yang akan diujikan diinjeksikan ke dalam sistem yang telah bersih, pada berbagai tekanan. Untuk mengetahui kapasitas penjerapan untuk berbagai tekanan pada temperatur tertentu dilakukan evaluasi terhadap data kesetimbangan adsorpsi dengan

menggunakan persamaan kesetimbangan adsorpsi Toth, yaitu:

$$C_\mu = C_{\mu s} \frac{bP}{[1+(bP)^t]^{1/t}} \quad (2)$$

Sementara itu, selektifitas kinetis terhadap molekul N₂ dan O₂, ditentukan berdasarkan percobaan adsorpsi dinamis dengan menggunakan rangkaian alat adsorpsi yang sama dengan mengoperasikan alat tersebut secara *semi-batch constant molar flow*. Pada percobaan adsorpsi ini, sejumlah adsorbat diinjeksikan ke dalam sistem adsorpsi kemudian perubahan tekanan diamati sebagai fungsi waktu.

Data tersebut kemudian dievaluasi dengan persamaan berikut (Prasetyo and Do, 1998):

$$P = \frac{\left(\frac{N}{V}\right) R_g T / V}{(1+\beta)} + \frac{\beta}{(1+\beta)^2} \frac{N R_g T}{(s+1)(s+3) D_{app}} - 2(1+s)\beta \left[\left(\frac{N R_g T}{V}\right) \left(\frac{R^2}{D_{app}}\right) \right] \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp[-\lambda_n (D_{app} t / R^2)]}{\lambda_n^2 [(1+s)^2 \beta^2 + (1+s)^2 \beta + \lambda_n^2]} \quad (3)$$

dengan, *s* : faktor bentuk dari partikel; *D_{app}*: apparent diffusivity; dan *β*: parameter kesetimbangan yang didefinisikan sebagai berikut:

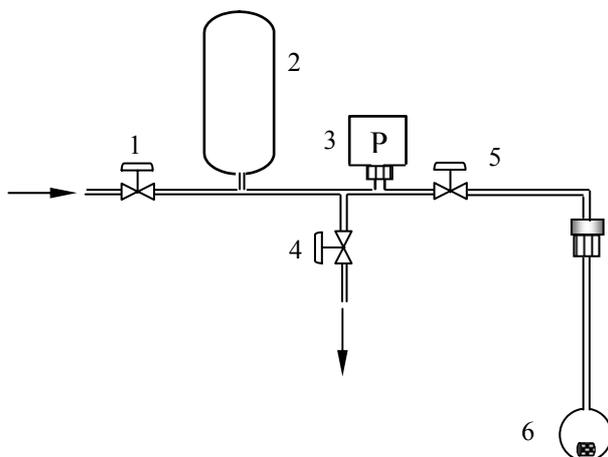
$$\beta = \frac{V_{app}}{V} = \left(\frac{m_p}{\rho_p}\right) \left(\frac{\epsilon_m + (1-\epsilon_m)K}{V}\right)$$

Slab (*s*=0) : $\beta \tan(\lambda) + \lambda = 0$

Silinder (*s*=1) : $2\beta J_1(\lambda) + \lambda J_0(\lambda) = 0$

Bola (*s*=3) : $\lambda \cot(\lambda) - 1 = \lambda^2 / 3\beta$

Dari data ini dapat diperoleh konstante diffusi untuk N₂ dan O₂ dalam CMS. Dengan membandingkan konstante diffusi antara kedua molekul gas tersebut dapat diperkirakan sifat selektivitas kinetis CMS terhadap gas N₂ dan O₂.



Keterangan gambar:

1. Valve pengisian gas (V₁)
2. Reservoir gas
3. Pressure transducer
4. Valve pemvakuman (V₂)
5. Valve pengaliran gas (V₃)
6. Sample cell

Gambar 3. Rangkaian alat uji adsorpsi fase gas

HASIL DAN PEMBAHASAN

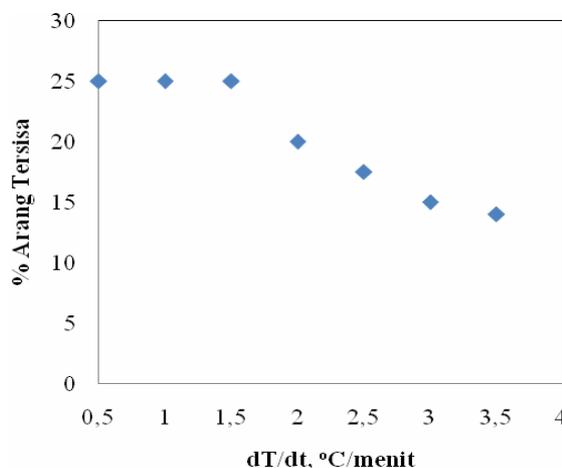
Preparasi CMS

Dalam penelitian ini dilakukan eksplorasi untuk mengembangkan cara baru dalam pembuatan CMS dari pirolisis polimer sintesis resin *phenol formaldehyde*. Padatan bahan polimer tersebut dihancurkan menjadi partikel dengan ukuran ≈ 2 mm, kemudian partikel resin dipanaskan pada suhu 450°C sambil dialirkan gas nitrogen di dalam suatu *retort* atau reaktor. Pemanasan pada suhu 450°C dalam atmosfer tanpa oksigen akan menyebabkan komponen volatil penyusun polimer akan menguap dan terbawa aliran nitrogen keluar *retort*. Proses pirolisis tersebut akan mengakibatkan polimer mengalami degradasi thermal dan menyisakan jaringan polimer yang rigid. Pemanasan lebih lanjut pada suhu 950°C sambil dialirkan gas CO_2 yang dikontrol konsentrasinya akan menyebabkan terjadinya proses gasifikasi parsial pada material karbon sehingga menciptakan pori-pori yang lebih banyak dan membentuk material karbon yang didomisasi oleh pori dengan ukuran mikro (Gambar 4).

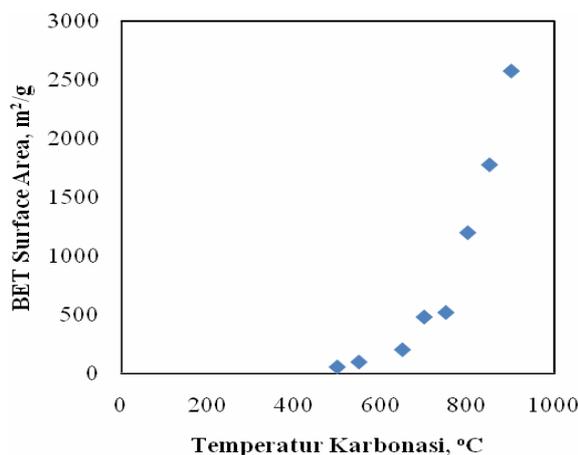
Target dari proses pirolisis adalah mendapatkan hasil arang karbon (*yield*) yang besar dengan cara mengontrol parameter proses, yaitu laju dan waktu pemanasan, agar tidak terjadi pembakaran C yang berlebihan (*burn-off*). Hasil percobaan pengaruh laju dan waktu pemanasan terhadap jumlah karbon yang dihasilkan dan luas permukaan karbon tersebut disajikan dalam Gambar 5 dan 6.

Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa laju pemanasan semakin besar dapat menghasilkan jumlah arang karbon yang semakin rendah. Proses pemanasan yang berlangsung secara perlahan-lahan akan menghasilkan pembakaran yang lebih banyak daripada pemanasan yang berlangsung lebih cepat. Pada pemanasan yang berlangsung cepat memungkinkan oksigen, hidrogen, dan air dari hasil pirolisis belum sempat terusir dari *retort* sehingga akan bereaksi dengan karbon. Akibatnya jumlah karbon yang terbakar semakin banyak dan karbon yang tertinggal menjadi berkurang. Proses pirolisis pada percobaan ini menghasilkan *yield* arang karbon rata-rata sebesar 26% dari berat kering prekursor. Menurut hasil

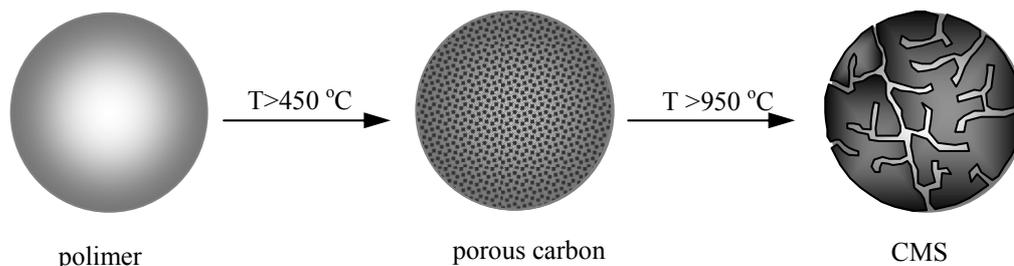
penelitian yang dilaporkan oleh Ahmadpour dan Do (1997), arang karbon yang dibuat dari limbah pertanian pada umumnya akan memberikan *yield* sebesar 25%.



Gambar 5. Pengaruh laju pemanasan terhadap *yield* arang karbon



Gambar 6. Pengaruh temperatur karbonisasi terhadap *surface area* arang karbon



Gambar 4. Transformasi dari bahan polimer menjadi CMS

Pengaruh suhu proses pirolisis dalam rangka menghasilkan material karbon berpori dapat dilihat pada Gambar 6. Suhu karbonisasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan struktur rangka karbon yang sudah terbentuk mengalami kolaps (Lenghaus, 2002). Hal ini ditunjukkan dengan turunnya luas permukaan internal CMS ketika suhu pirolisis di atas 900°C. Dari berbagai kondisi operasi proses polimerisasi prekursor dan pirolisis dihasilkan berbagai karakteristik CMS yang dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Rangkuman tipikal karakteristik CMS yang dihasilkan

BET surface Area (m ² /g)	53 – 2572
Solid Density (g/cm ³)	1,25 – 1,35
Pore Size (nm)	0,72 – 0,95
Microporous Volume (cm ³)	0,21 – 0,32

Uji Adsorpsi

Pada percobaan ini, sampel CMS yang diuji kemampuan adsorpsinya adalah CMS hasil preparasi yang mempunyai luas permukaan terbesar yaitu 2600 m²/g dengan ukuran pori dominan sebesar 0,75 Å. Kemampuan CMS dalam memisahkan gas N₂ dari O₂ diuji dengan melakukan percobaan adsorpsi secara volumetris dengan menggunakan alat seperti terlihat pada Gambar 3. Percobaan dilakukan pada berbagai tekanan sehingga diperoleh data kesetimbangan adsorpsi (pada temperatur 293, 303, 323 K). Dari persamaan kesetimbangan adsorpsi Toth dapat ditentukan kapasitas penjerapan CMS terhadap gas N₂ dan O₂ dan hasilnya disajikan dalam Tabel 2.

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa kapasitas adsorpsi CMS untuk kedua gas secara umum semakin kecil dengan semakin tingginya suhu percobaan. Hal ini dapat dimengerti karena proses penjerapan molekul gas oleh dinding pori adalah proses eksotermis sehingga kenaikan suhu akan menjauhkan gas dari permukaan dinding pori padatan akibatnya akan menurunkan afinitas gas tersebut. Selain itu, pada suhu yang sama kapasitas adsorpsi CMS terhadap gas O₂ terlihat lebih tinggi daripada terhadap gas N₂. Hal ini mengindikasikan bahwa afinitas CMS terhadap O₂ lebih besar daripada terhadap N₂. Dari data ini dapat diperkirakan bahwa CMS dapat menseleksi atau memisahkan gas N₂ dari gas O₂. Namun demikian data tersebut belum cukup untuk menunjukkan efektivitas pemisahannya. Mengingat bahwa pada operasi pemisahan kedua molekul gas dilakukan dengan proses adsorpsi dinamis, maka perlu untuk ditentukan selektivitas kinetisnya. Uji selektivitas kinetis CMS terhadap gas N₂ dari gas O₂ dilakukan dengan cara membandingkan difusivitas kedua molekul gas tersebut di dalam pori-pori CMS. *Apparent Difusivity* (D_{app}) untuk kedua molekul gas yang diperoleh dari eksperimen dengan system semi-batch disajikan dalam Tabel 3. Data dalam tabel tersebut menunjukkan secara umum bahwa kenaikan temperatur akan meningkatkan laju difusi. Selain itu, juga terlihat bahwa harga konstante difusi gas N₂ jauh lebih besar daripada harga konstante dari gas O₂. Hal ini mengindikasikan bahwa dalam jaringan pori CMS, molekul gas N₂ akan mendifusi lebih cepat daripada molekul gas O₂. Laju difusi dapat dipengaruhi oleh ukuran (diameter) maupun berat molekul dari gas yang mendifusi.

Tabel 2. Panas adsorpsi dan konstanta Henry untuk N₂, dan O₂ dalam CMS

Adsorbat	ΔH [kJ/mol]	Temperatur [K]	Konstanta Henry, K_p^*	Konstanta Henry, K^{**}
N ₂	10,5	293	$2,0 \times 10^{-5}$	16
		303	$0,9 \times 10^{-5}$	13
		323	$0,3 \times 10^{-5}$	5
O ₂	12,7	293	$2,2 \times 10^{-5}$	17
		303	$1,2 \times 10^{-5}$	14
		323	$0,5 \times 10^{-5}$	6,5

* dalam: gmol/(gram×kPa)

** tidak berdimensi, $K = (K_p \rho_p RT)(1 - \epsilon)$

Tabel 3. Apparent diffusivity (D_{app}) untuk N₂, dan O₂ dalam CMS

Adsorbat	Temperatur [K]	D_{app} [m ² /sec]
N ₂	293	$15,2 \times 10^{-7}$
	303	$17,0 \times 10^{-7}$
	323	$25,3 \times 10^{-7}$
O ₂	293	$5,2 \times 10^{-7}$
	303	$5,8 \times 10^{-7}$
	323	$8,4 \times 10^{-7}$

Kedua sifat fisis ini memberikan hubungan yang berbanding terbalik dengan laju difusi (Beek and Mutzall, 1975). Jika dilihat dari ukuran jari-jari molekulnya, maka ukuran molekul gas O₂ (0,3433 nm) lebih kecil daripada ukuran molekul gas N₂ (0,3667 nm) sehingga seharusnya laju difusi gas O₂ lebih tinggi daripada laju difusi gas N₂. Namun data memperlihatkan hal yang sebaliknya. Jika dilihat dari berat molekulnya, berat molekul gas O₂ (32) lebih besar daripada berat molekul gas N₂ (28), sehingga laju difusi molekul gas N₂ dalam CMS lebih besar daripada molekul gas O₂. Hal ini menjelaskan bahwa peran berat molekul dalam menentukan laju difusi lebih besar daripada peran ukuran molekul. Harga selektivitas kinetis sebesar 3 menandakan bahwa kedua gas tersebut dapat dipisahkan oleh CMS yang dihasilkan dalam percobaan tersebut secara kinetis dengan cukup baik (Wei *et al*, 2007).

KESIMPULAN

Polimer sintesis resin *phenol formaldehyde*, dapat digunakan sebagai prekursor pembuatan CMS. Laju pemanasan yang terlalu tinggi akan menghasilkan massa arang karbon yang lebih kecil. Suhu proses karbonisasi di atas 950°C akan mengakibatkan rusaknya struktur jaringan pori karbon. CMS hasil preparasi mempunyai kapasitas adsorpsi terhadap gas O₂ yang lebih besar daripada terhadap gas N₂. CMS hasil preparasi dapat dipergunakan untuk memisahkan campuran gas N₂ dan O₂ dengan metode adsorpsi dinamis

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadpour, A. and Do, D.D., (1997), Preparation of Activated Carbon from Macadamia Nut Shell by Chemical Activation, *Carbon*, 35, 1723-1732
- Beek, W.J. and Mutzall, M.K., (1975), *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Chichester, UK
- Cabrera, A.L., Zehner, S.E., Coe, C.G., Graffney, T.R., Farris, T.S., and Armor, J.N., (1993), Preparation of Carbon Molecular Sieves, *Carbon*, vol. 31, p. 969.
- Foley, H.C., (1988), Carbon Molecular Sieves, Properties and Applications in Perspectives, in: *Perspective in Molecular Sieve Science*, Editors: Flank, W.H, Whyte Jr., T.E., pp. 335-360, ACS Symposium Series # 368, American Chemical Society, Washington DC.
- Juntgen, H., Knoblauch, K., and Harder, K., (1981), Carbon Molecular Sieves: Production from Coal and Application in Gas Separation, *Fuel*, vol.60, pp. 817-822, IPC Business Press.
- Lenghaus, K, Qiao, G.G, Solomon, D.H, Gomez, C., Rodriguez-Reinoso, F., and Sepulveda-Escribano, A., (2002), Controlling Carbon Microporosity: the Structure of Carbons Obtained from Different Phenolic Resin Precursors, *Carbon*, vol 40, pp743-749, Pergamon Press
- Moore, S.V. and Trimm, D.L., (1977), The Preparation of Carbon Molecular Sieves by Pore Blocking, *Carbon*, vol. 15, pp. 177-180, Pergamon Press.
- Prasetyo, I., dkk., (2004), Pembuatan Ayakan Berbasis Karbon dari Tempurung Kelapa, *Laporan Penelitian RUT IX*, KNRT, Jakarta
- Prasetyo, I. and Do. D.D., (1998), Adsorption Rate of Methane and Carbon Dioxide on Activated Carbon by the Semi-Batch Constant Molar Flow Rate Method, *Chem. Eng. Sci.*, vol 53, no. 19, pp.3459-3467
- Prasetyo, I. and Do, DD., (1999), Pore Structure Alteration of Porous Carbon by Catalytic Coke Deposition, *Carbon*, vol. 37, pp. 1909-1918, Pergamon Pers
- Rodriguez-Reinoso, F., (1995), Carbon as a Catalyst Support, in: *Porosity in Carbons: Characterization and Applications*, ed.: Patrick, J.W., pp. 253-290, Edward Arnold London.
- Verma, S.K. and Walker Jr., P.L., (1990), Alteration of Molecular Sieving Properties of Microporous Carbons by Heat Treatment and Carbon Gasification, *Carbon*, vol.28, no.1, pp. 175-184, Pergamon Press Ltd.
- Vyas, S.N., Patwardhan, S.R. and Ganjadar, B., (1992), Carbon Molecular Sieves from Bituminous Coal by Controlled Coke Deposition, *Carbon*, vol.30. no.4, pp. 605- 612.
- Wei, W., Qin, G., Hu, H., You, L., and Chen, G., (2007), Preparation of supported carbon molecular sieve membrane from novolac phenol-formaldehyde resin, *Journal of Membrane Science*, vol. 303, pp. 80-85, Elsevier