

KARBON MESOPORI DARI PIROLISIS POLIMER SINTETIS DAN APLIKASINYA UNTUK PENJERAPAN GAS RUMAH KACA

Achmad Amrizal Fauzi⁽¹⁾, Imam Prasetyo⁽¹⁾, Rochmadi⁽¹⁾, Teguh Ariyanto⁽¹⁾

⁽¹⁾Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

*teguh.ariyanto@ugm.ac.id

ABSTRAK. Struktur pori perlu disesuaikan dengan penggunaan karbon agar diperoleh performa aplikasi yang tinggi. Pada penelitian ini, karbon mesopori dibuat dari pirolisis resin polimer resorsinol-fenol-formaldehid-etilen glikol (RPFEG) dan digunakan untuk penjerapan salah gas rumah kaca yaitu CO₂. Berbagai karbon dibuat dengan pirolisis resin RPFEG pada rentang suhu 650–775 °C. Karbon yang dihasilkan dipelajari struktur porinya dengan analisis sorpsi-N₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas permukaan spesifik dan volume pori yang dihasilkan mempunyai rentang antara 1000-1300 m²/g dan 0,6-1,4 cm³/g. Karbon dengan prosentase mesopori tinggi (>80%) mulai diperoleh pada suhu pirolisis 750 °C. Kurva isotherm menunjukkan bahwa adsorpsi pada suhu rendah lebih menguntungkan untuk memperoleh kapasitas adsorpsi yang tinggi. Fenomena kondensasi kapiler di mesopori terjadi pada suhu 25 °C dan tekanan 30 bar dan diperoleh kapasitas adsorpsi CO₂ hingga 30 mmol/g.

Kata kunci: karbon berpori, resin polimer, mesopori, pirolisis, adsorpsi

ABSTRACT. Pore structures are needed to be tuned depending on utilizations of carbons, hence obtaining high application performances. In this work, mesoporous carbon was synthesized by pyrolysis of polymeric resin of resorcinol-phenol-formaldehyde-ethylene glycol (RPFEG) and employed to adsorb a greenhouse gas of CO₂. Carbons were produced at 650-775 °C pyrolysis temperatures. Pore structure was studied by N₂-sorption analysis. The results showed that a high quality of carbon results, proven by high specific surface areas and pore volumes in the range of 1000-1300 m²/g and 0,6-1,4 cm³/g, respectively. Mesoporous carbon (>80% mesopores) was obtained when employing pyrolysis temperature of 750 °C. Isotherm curves showed that adsorption at lower temperature is appropriate to obtain a high adsorption capacity. Capillary condensation assisted to obtain high adsorption volume of CO₂ up to 30 mmol/g at 25 °C and 30 bar pressure.

Keywords: porous carbon, polymeric resin, mesopore, pyrolysis, adsorption

PENDAHULUAN

Pemanasan global saat ini menjadi salah satu pokok permasalahan dunia yang berakibat secara luas terhadap menurunnya kualitas lingkungan hidup dan terganggunya sistem iklim di dunia (UN, 1992). Penyebab utamanya adalah meningkatnya kadar komposisi gas rumah kaca (*green house gas*) di atmosfer antara lain CO₂, CH₄ dan N₂O. Gas rumah kaca berupa CO₂, saat ini, merupakan penyumbang terbesar sebagai *green house gas* dan emisi terbesarnya disumbangkan oleh pembakaran bahan bakar fosil untuk listrik, industri dan transportasi (US EPA, 2017). Upaya mengurangi pelepasan CO₂ ke udara bebas terus dilakukan baik dengan substitusi bahan bakar yang ramah lingkungan maupun penjerapan CO₂ yang keluar dari proses industri. Setelah diambil, gas tersebut dapat disimpan secara aman misalnya penyimpanan bawah tanah (Rao dan Rubin, 2002).

Proses penjerapan CO₂ dapat dilakukan dengan adsorpsi. Secara singkat, adsorpsi adalah proses pengumpulan substansi yang ada dalam fasa fluida oleh permukaan zat atau benda penjerap di mana terjadi suatu ikatan fisik dan atau kimia antara substansi dengan zat penjerap (Scheiwetzer, 1979). Bahan padat yang berfungsi sebagai penjerap disebut adsorben sedangkan bahan atau senyawa yang dijerap disebut adsorbat. Proses adsorpsi CO₂ dapat dilakukan menggunakan karbon berpori.

Karbon berpori dapat berperan sebagai adsorben memanfaatkan keunggulan karakteristik seperti afinitas atom karbon, luas permukaan dan volum pori tinggi. Karbon berpori dapat dibuat dari pirolisis bahan alam (polimer alam) ataupun dari bahan polimer sintetis. Struktur pori dari bahan sintetis lebih mudah diatur dengan dengan memodifikasi bahan penyusunnya (Ariyanto dkk., 2012 dan Prasetyo dkk., 2013). Material tersebut dapat menjerap berbagai zat dengan menarik molekul ke permukaan internal. Sebagai adsorben, volum pori dari

karbon berpori umumnya lebih besar dari 0,2 cm³/g dan luas permukaan internal umumnya lebih besar dari 400 m²/g (Vohler dkk., 2002). Diameter pori-pori berkisar antara 0,3 hingga beberapa ribu nanometer. Semua karbon berpori ditandai oleh sistem pori bercabang dengan berbagai ukuran dan berdasarkan IUPAC dibagi menjadi makropori ($d > 50$ nm), mesopori ($2 < d < 50$ nm), dan mikropori ($d < 2,0$ nm) (Thommes dkk., 2015).

Penjerapan CO₂ dengan menggunakan karbon berpori memiliki kapasitas yang lebih besar dibanding adsorben yang lain seperti silika gel dan zeolit (Berlier dan Frere, 1997; Prasetyo dkk., 2017). Selain itu, penelitian dari Himeno *et. al.*, (2005) menunjukkan bahwa semakin tinggi luas permukaan pori maka akan diperoleh kapasitas penjerapan CO₂ yang lebih besar. Kapasitas adsorpsi CO₂ akan bisa lebih besar lagi jika terbentuk kondensasi kapiler dalam pori (kondensasi dalam pori dengan tekanan lebih rendah dibanding tekanan pada permukaan datar). Kondisi ini tentunya membutuhkan kondisi spesifik berupa ukuran pori yang sesuai. Ukuran molekul CO₂ cukup besar sehingga dihipotesiskan bahwa ukuran mesopori dibutuhkan untuk terbentuknya kondensasi kapiler (Prasetyo dkk., 2011).

Pada penelitian ini, pembuatan karbon dengan karakteristik mesopori dilakukan dengan pirolisis polimer sintetis. Pengaruh suhu terhadap karakteristik karbon yang dihasilkan dipelajari dengan detail. Material karbon mesopori kemudian diuji kemampuannya untuk penjerapan CO₂ dan parameter adsorpsi dievaluasi.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan dan Alat

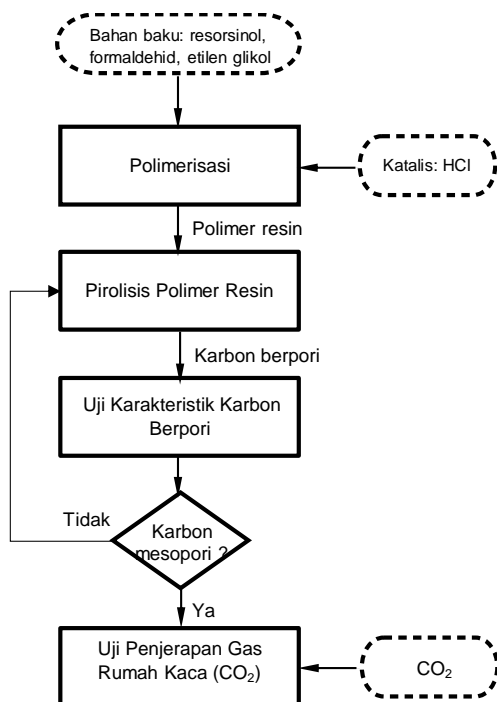
Bahan untuk membuat polimer sintetis yang digunakan dalam penelitian ini adalah resorsinol, formaldehid, dan etilen glikol. Bahan tersebut diperoleh dari Sigma Aldrich, Singapura (*synthesis grade*). Gas CO₂ dan N₂ diperoleh dari PT Aneka Gas Industri.

Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pembuatan resin (polimerisasi). Kemudian polimer yang dipirolisis sehingga terbentuk karbon. Produk yang dihasilkan dikarakterisasi struktur porinya. Ketika diperoleh karbon dengan karakteristik mesopori, kemudian uji adsorpsi CO₂ dilakukan. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Polimerisasi

Prosedur polimerisasi dapat diperoleh lengkap di Prasetyo dkk., 2013. Secara singkat dijelaskan sebagai berikut. Resin disintesis dengan cara mencampurkan resorsinol, fenol, formaldehid dan etilen glikol (perbandingan mol 0,7:0,3:2,8:2) ke dalam gelas beker, Katalis HCl ditambahkan dan campuran diaduk hingga terbentuk polimer. Polimer sintesis diberi nama resorsinol-fenol-formaldehid-etilen glikol (RPFEG).



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian untuk Pembuatan Karbon Mesopori dan Uji Aplikasinya.

Pirolisis Polimer Sintetis

Polimer yang telah disiapkan sebelumnya kemudian dimasukkan ke dalam krus porselen. *Temperature*

controller diatur pada kondisi suhu yang diinginkan dengan kenaikan suhu 2 °C/menit. Gas inert N₂ dialirkan ke dalam furnace sebagai pengusir oksigen dan agen pembawa gas hasil pirolisis. Setelah suhu pirolisis tercapai, dilakukan penahanan suhu selama 2 jam. Suhu akhir proses pirolisis diset 650, 675, 700, 725, 750, dan 775 °C. Hasil produk karbon (m_t) ditimbang dan dibandingkan dengan berat awalnya (m_o) untuk memperoleh prosentase produk (P), seperti dituliskan dalam **Persamaan (1)**.

$$P = \frac{m_t}{m_o} \cdot 100\% \quad (1)$$

Karbon yang dihasilkan dari proses pirolisis diberi kode nama Karbon Polimer (KP) kemudian diikuti nomor, sesuai Tabel 1.

Tabel 1. Penamaan Karbon Hasil Pirolisis Polimer

Suhu pirolisis, °C	Nama sampel
650	KP-1
675	KP-2
700	KP-3
725	KP-4
750	KP-5
775	KP-6

Uji Karakteristik Karbon Berpori

a. Menentukan luas permukaan karbon berpori

Penentuan luas permukaan spesifik dilakukan dengan metode sorpsi nitrogen menggunakan alat analisis NOVA 2000 (Quantrachrome, USA). Sampel karbon sebanyak 0,06 gram dimasukkan dalam tabung sampel kemudian sampel di-*degass* pada tekanan hampa dan temperatur 150°C selama 12 jam. Tujuannya adalah untuk menguapkan air dan zat-zat lain yang masih tertinggal dalam pori-pori sampel. Proses pengambilan data isoterm pada suhu 77 K kemudian dilakukan dengan mengalirkan nitrogen murni ke dalam labu tempat sampel sampai semua pori-porinya penuh (P/P_o mendekati 1). Persamaan BET (**Persamaan (2)**) kemudian digunakan

untuk mengevaluasi data isoterm (Do, 1998).

$$\frac{1}{W\left(\frac{P_o}{P}-1\right)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{(C-1)}{W_m C} \left(\frac{P}{P_o}\right) \quad (2)$$

di mana W adalah massa gas teradsorpsi pada permukaan adsorbent pada saat setimbang, W_m adalah massa adsorbat (gas) *monolayer* pada permukaan adsorben, P_o adalah tekanan jenuh adsorbat, P adalah tekanan adsorbat (gas) pada kesetimbangan (diambil rentang P/P_o sebesar 0,05–0,35, dan C adalah konstanta.

Metode regresi linear digunakan untuk menyelesaikan **Persamaan (2)** sehingga nilai C dan W_m dapat diketahui. Luas permukaan spesifik (SSA) kemudian dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$SSA = \frac{(W_m)(N)(A)}{(M)(w)} \quad (3)$$

di mana N adalah bilangan Avogadro ($6,023 \times 10^{23}$), A adalah *molecular cross-sectional area* dari adsorbat, M adalah berat molekul adsorbat dan w berat kering adsorben.

b. Menentukan distribusi ukuran pori

Metode yang digunakan untuk mengevaluasi distribusi ukuran pori adalah metode Barret-Joyner-Hallenda (BJH). Mesoporositas karbon berpori yang berupa volum mikropori (V_{mic}) dianalisis dengan menggunakan metode *t-plot* yaitu metode yang menghubungkan volum gas yang teradsorpsi dengan *statistical thickness* (t) sesuai **Persamaan (4)** (Do, 1998).

$$t(\text{\AA}) = 3,54 \left[\frac{5}{2,303 \log(P_o / P)} \right]^{1/3} \quad (4)$$

Dengan membentuk kurva hubungan volum gas teradsorpsi dengan *statistical thickness*, prosentase mikropori dan non-mikropori dapat dievaluasi.

c. Diameter rerata pori

Diameter pori rerata dihitung dengan menggunakan asumsi bahwa pori berbentuk silinder (**Persamaan (5)**). Volum pori total yang mengisi pori (V_{liq}) diestimasi dari jumlah adsorbat terjerap pada P/P_o sebesar 0,99.

$$d_v = \frac{4V_{liq}}{SSA} \quad (5)$$

Uji Kinerja Penjerapan CO₂ pada Karbon Berpori

Material karbon berpori yang akan dipergunakan dimasukkan dalam sistem penjerap gas CO₂. Sebelum dilakukan pengujian, material karbon dibersihkan dari uap air dan kotoran yang lain, dengan cara pemanasan pada suhu 125°C dan penghampaan selama 12 jam. Suhu penjerapan kemudian di-set pada kondisi yang sesuai. Percobaan penjerapan dimulai dengan cara memasukkan sejumlah gas CO₂ dialirkan ke dalam bejana tekan yang berisi material karbon. Perubahan tekanan dalam bejana diamati dengan *pressure indicator* sampai tercapai kesetimbangan. Dari selisih jumlah mol gas CO₂ sebelum dan sesudah penjerapan dapat dihitung jumlah mol gas CO₂ yang terjerap dalam material karbon. Percobaan dilakukan untuk berbagai tekanan sehingga diperoleh suatu kurva kesetimbangan (isoterm).

Evaluasi Model Kesetimbangan Adsorpsi

Persamaan Langmuir (**Pers. (6)**) digunakan untuk memodelkan kurva isoterm penjerapan CO₂. Dalam hal ini, data adsorpsi merupakan data kondisi tanpa kondensasi kapiler (Do, 1998).

$$C_\mu = \frac{bC_{\mu\max}P}{1+bP} \quad (6)$$

di mana C_μ adalah konsentrasi adsorbat yang terjerap per gram adsorben, P adalah tekanan pada kondisi setimbang, C_{\max} adalah konsentrasi adsorbat maksimum yang terjerap per gram adsorben, dan b dan konstanta kesetimbangan Langmuir.

Untuk menyelesaikan persamaan Langmuir, **Persamaan (6)** dapat dilinearkan menjadi:

$$\frac{1}{C_{\mu}} = \frac{1}{bPC_{\mu\max}} + \frac{1}{C_{\mu\max}} \quad (7)$$

Konstanta b dan nilai $C_{\mu\max}$ kemudian dapat dievaluasi dengan metode regresi.

Dari data masing-masing kapasitas adsorpsi pada masing-masing suhu, dapat diketahui hubungan tekanan kesetimbangan dengan mol gas terjerap pada tekanan rendah yang dapat dinyatakan dengan model Henry (**Persamaan (8)**). Nilai konstanta kesetimbangan Henry (K_p^*) dicari untuk kondisi yang masih linear pada kurva kesetimbangan. Persamaan van't Hoff (**Pers. (9)**) kemudian diaplikasikan untuk menghitung panas adsorpsi (ΔH).

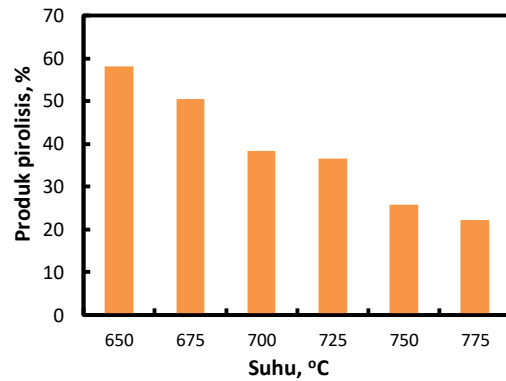
$$C_{\mu} = K_p^* \cdot P \quad (8)$$

$$\frac{d \ln K_p^*}{dT} = \left(\frac{\Delta H}{RT^2} \right) \quad (9)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Yield Karbon Hasil Pirolisis Polimer

Massa karbon yang dihasilkan pada berbagai suhu pirolisis dibandingkan dengan massa awal untuk mengetahui prosentase produk yang mampu dihasilkan. Nilai prosentase ditunjukkan pada **Gambar 2**. Produk yang dihasilkan berkisar 20-60% tergantung pada suhu proses pirolisis. Semakin tinggi suhu maka jumlah produk semakin rendah, yang berarti jumlah bahan yang terdegradasi semakin tinggi. Pada suhu tertinggi yaitu 775 °C, diperoleh sekitar 22% produk sehingga ketika 1 kg bahan baku digunakan, sebanyak 220 g karbon akan dihasilkan.

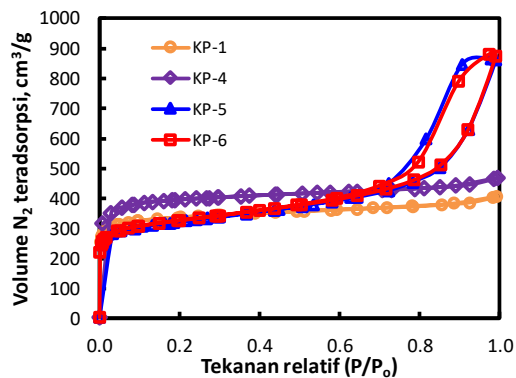


Gambar 2. Hasil Produk Karbon yang Dihasilkan dari Pirolisis Berbagai Suhu

Karakteristik Pori dari Karbon yang Dihasilkan

Sorpsi-N₂ dilakukan untuk mengetahui struktur pori karbon yang dihasilkan. Isoterm adsorpsi-desorpsi dari karbon KP-1, KP-4, KP-5 dan KP-6 ditunjukkan pada **Gambar 3**. Karbon KP-1 dan KP-4 mengikuti isoterm tipe I menurut IUPAC (Thommes dkk., 2015). Kedua kurva menunjukkan kapasitas adsorpsi yang meningkat pada $P/P_0 < 0.1$ dan kemudian relatif tetap jika P/P_0 dinaikan hingga mendekati 1,0. Hal ini mengindikasikan bahwa karbon KP-1 dan karbon KP-4 memiliki struktur mikropori yang lebih dominan dari pada struktur lainnya (mesopori dan makropori). Untuk karbon KP-2 dan KP-3 memiliki karakteristik yang sama (hasil tidak ditunjukkan).

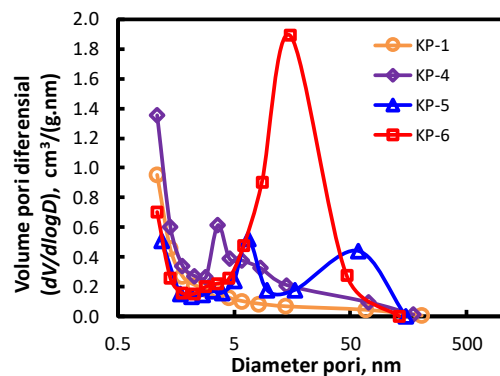
Isoterm adsorpsi-desorpsi karbon KP-5 dan KP-6 menunjukkan karakteristik karakteristik yang berbeda dengan karbon KP-1 hingga KP-4. Kedua karbon KP-5 dan KP-6 memiliki isoterm dengan tipe IV dan V standar IUPAC. Kedua kurva menunjukkan trend semakin vertikal pada tekanan relatif P/P_0 mendekati 1,0. Hal ini mengindikasikan bahwa karbon KP-5 dan karbon KP-6 memiliki struktur mesopori yang dominan. Pada kurva yang dihasilkan dari karbon KP-5 dan KP-6 tersebut juga terbentuk *hysteresis loop* yang cukup besar di mana histerisis hanya akan terjadi pada material yang berstruktur mesopori. Histerisis ini terjadi karena adsorbat mengalami kondensasi kapiler di dalam pori dalam rentang mesopori (Condon, 2006).



Gambar 3. Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Nitrogen pada Suhu 77 K untuk Karbon Hasil Pirolisis Polimer pada Berbagai Suhu

Distribusi ukuran pori dievaluasi dari kurva isoterm yang didapatkan. Grafik distribusi pori dari berbagai karbon ditunjukkan pada **Gambar 4**. Ukuran pori yang seragam ditunjukkan oleh sempitnya kurva volum pori vs. diameter pori. Dalam hal ini, distribusi pori karbon yang dihasilkan dari pirolisis pada suhu 775 °C (KP-6) cukup seragam pada kisaran diameter 10 nm. Harga puncak $dV(d \log D)$ yang ditunjukkan oleh KP-6 adalah sekitar 1,89 cm^3/g .

Dari kurva isoterm dan distribusi ukuran pori, dapat dilihat bahwa jenis polimer yang sama dapat menghasilkan struktur pori dominan yang berbeda apabila pirolisis dilakukan pada suhu yang berbeda. Struktur mesopori mulai dominan pada saat pirolisis polimer sintesis RPFEG dilakukan pada suhu di atas 750 °C.



Gambar 4. Distribusi Ukuran Pori metode BJH dari Karbon Hasil Pirolisis Polimer pada Berbagai Suhu

Struktur dari suatu karbon berpori meliputi luas permukaan internal (*internal surface area*), volume pori, volume mikropori serta distribusi ukuran pori diringkas pada **Tabel 2**. Semakin tinggi suhu, semakin tinggi pula luas permukaan internal karbon dan volume pori yang diperoleh. Reaksi yang terjadi selama proses pirolisis adalah proses pemutusan ikatan karbon serta pengoksidasian molekul-molekul pada permukaan karbon berpori, sehingga permukaan karbon berpori menjadi lebih porous, dan semakin porous karbon, semakin besar *internal surface area* nya. Luas permukaan internal dan volume pori tertinggi yang didapat pada penelitian ini adalah sebesar 1268 m^2/g dan 1,35 cm^3/g , didapat pada karbon KP-6. Nilai luas permukaan yang didapatkan sebanding dengan luas permukaan yang dimiliki karbon kualitas tinggi dan relatif baru seperti carbide-derived carbon (Ariyanto dkk., 2015; Ariyanto dkk., 2017a; Ariyanto dkk., 2017b).

Tabel 2 menunjukkan bahwa karbon KP-1 hingga KP-4 memiliki persentase volume mikropori di atas 50%, yang berarti struktur mikropori lebih dominan. Hal yang berbeda, karbon KP-5 dan KP-6 memiliki struktur mesopori yang dominan (sekitar 85%). Hal ini berarti telah terbentuk pori berukuran yang relatif besar. Karbon KP-6 dengan luas permukaan internal tertinggi memiliki persentase volume mikropori paling kecil, yaitu sebesar 15,13%. Nilai ini merupakan nilai paling rendah dibandingkan sampel karbon yang lainnya. Persentase volume mesopori yang besar disebabkan karena terjadinya perluasan pori (*pore widening*) pada suhu sangat tinggi (kisaran 750 °C ke atas) (Teng, 1999). Lebih lanjut keefektifan etilen glikol sebagai agen pembentuk pori mungkin juga merupakan faktor yang membantu pembentukan mesopori (Ariyanto dkk., 2012).

Tabel 2. Struktur Pori Karbon yang Dihasilkan dari Pirolisis Polimer pada Berbagai Suhu

Sampel	Suhu pirolisis, °C	Luas permukaan spesifik, m ² /g	Volume pori total, cm ³ /g	Volume mikro, cm ³ /g	% Mesopori	Diameter rerata, nm
KP-1	650	1050	0,62	0,42	33,06	2,38
KP-2	675	1088	0,65	0,46	30,17	2,40
KP-3	700	1116	0,68	0,51	24,92	2,44
KP-4	725	1133	0,72	0,47	34,76	2,54
KP-5	750	1168	1,32	0,21	84,29	4,54
KP-6	775	1268	1,35	0,20	84,87	4,24

Penggunaan Karbon Mesopori untuk Adsorpsi CO₂

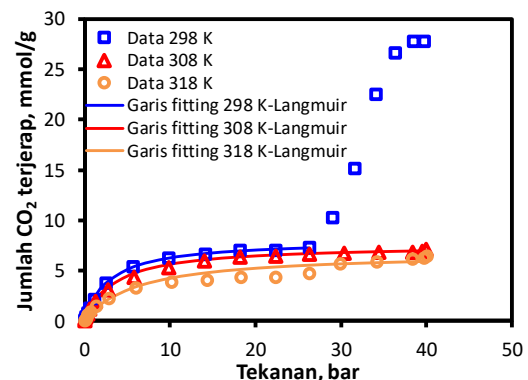
Adsorpsi gas CO₂ dilakukan secara metode *static volumetric* dengan menggunakan karbon berpori yang memiliki luas permukaan dan mesoporositas tinggi yaitu karbon KP-6. Kurva isoterm adsorpsi CO₂ pada rentang tekanan 0-40 bar dan suhu 298, 308 dan 318 K ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Pada suhu 308 K dan 318 K, jumlah mol gas CO₂ yang dapat terjerap masing-masing sebanyak 7,1 dan 6,4 mmol/g. Jumlah mol gas CO₂ yang teradsorpsi pada suhu 308 K lebih banyak daripada jumlah mol gas CO₂ yang teradsorpsi pada suhu 318 K. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tingginya suhu adsorpsi, maka kemampuan penjerapan karbon akan menurun. Jumlah mol gas CO₂ yang terjerap pada suhu 298 K sangat berbeda jauh dengan data adsorpsi pada suhu 308 K dan 318 K. Hal ini dikarenakan pada adsorpsi suhu 298 K terjadi kondensasi gas CO₂ di dalam pori-pori karbon, sehingga dapat menyerap CO₂ lebih banyak. Hal ini membuktikan bahwa ukuran pori berpengaruh terhadap karakteristik adsorpsi, jika ukuran pori tepat maka dapat terbentuk kondensasi kapiler (Prasetyo dkk., 2017).

Data adsorpsi CO₂ kemudian difitting dengan model kesetimbangan Langmuir. Secara umum dalam hal tidak terjadi kondensasi kapiler, data memiliki kedekatan yang baik dengan model Langmuir. Parameter konstanta dan kapasitas adsorpsi maksimum

ditunjukkan pada **Tabel 3**. $C_{\mu max}$ makin besar pada suhu yang lebih rendah.

Selanjutnya jika dilihat dari nilai konstanta kesetimbangan Langmuir (b), suhu lebih rendah menguntungkan dari sisi afinitas antara karbon dengan CO₂, yang ditandai dengan makin besarnya nilai b .



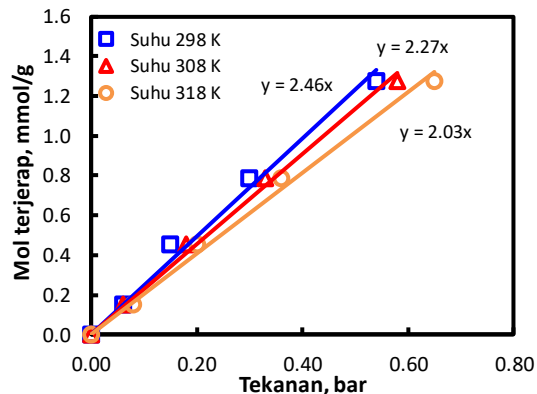
Gambar 5. Isoterm adsorpsi CO₂ dari tekanan 0-40 bar pada karbon KP-6 dan hasil *fitting* dengan model Langmuir. Suhu 298 K, fitting sampai tekanan 27 bar.

Tabel 3. Konstanta Hasil Evaluasi Data Isoterm. Suhu 298 K, fitting sampai tekanan 27 bar.

Suhu, K	Model Langmuir	
	$C_{\mu max}$, mmol/g	b , bar ⁻¹
298	8,03	0,35
308	7,51	0,29
318	6,75	0,17

Panas Adsorpsi CO₂ dalam Karbon Mesopori

Pada range tekanan adsorpsi 0–0,7 bar hubungan antara tekanan kesetimbangan dengan mol gas CO₂ terjerap berbentuk garis lurus (linear). Slope dari grafik hubungan tersebut merupakan konstanta Henry. **Gambar 6** menunjukkan isoterm adsorpsi CO₂ pada tekanan rendah dan garis linear yang dihasilkan.



Gambar 6. Isoterm Adsorpsi CO₂ pada Tekana Rendah dan Evaluasinya dengan Model Henry.

Konstanta Henry pada masing-masing suhu adsorpsi adalah 2,46 (pada 298 K), 2,27 (pada 308 K) dan 2,03 mmol/(g.bar) (pada 318 K). Evaluasi panas adsorpsi (ΔH) kemudian dilakukan dari nilai konstanta yang telah diperoleh. Penjerapan CO₂ pada karbon KP-6 merupakan proses eksotermik dan panas yang dihasilkan adalah sebesar 23,58 kJ/mol. Nilai ini menunjukkan bahwa adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi secara fisika, di mana ikatan terjadi karena gaya Van der Waals yang memiliki energi ikatan yang relatif lemah. Pada adsorpsi secara fisika, rentang nilai panas adsorpsi berkisar pada 1,4 – 80 kJ/mol (Masel, 1996).

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah

1. Suhu pirolisis mempengaruhi prosentase produk dan karakteristik karbon berpori yang dihasilkan dari pirolisis polimer sintesis.
2. Karbon mesopori dengan luas permukaan spesifik 1268 m²/g, volum pori 1,35 cm³/g dan diameter

rata-rata 4,24 nm didapatkan dari pirolisis polimer resorsinol-formaldehid-etilen glikol pada suhu pirolisis 775 °C.

3. Adsorpsi CO₂ dipengaruhi suhu di mana suhu rendah lebih menguntungkan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi, bahkan pada tekanan dan suhu tertentu kondensasi kapiler dapat terjadi.
4. Model kesetimbangan Langmuir cukup baik untuk menggambarkan adsorpsi CO₂ dalam karbon dalam hal tidak terjadinya kondensasi kapiler.
5. Penjerapan CO₂ pada karbon mesopori merupakan proses eksotermik dengan panas adsorpsi sebesar 23,58 kJ/mol

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas supervisi yang dilakukan oleh sdr. Rakhmat Yunanto ketika menggunakan *static volumetric rig*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariyanto, T., A. Kern., B.J.M. Etzold, G.-R. Zhang. 2017. *Carbide-derived carbon with hollow core structure and its performance as catalyst support for methanol electro-oxidation*. 2017. *Electrochem. Commun.* 81, 12-15.
- Ariyanto, T., B. Dyatkin, G.-R. Zhang, A. Kern., Y. Gogotsi, B.J.M. Etzold. 2015. *Synthesis of carbon core-shell pore structures and their performance as supercapacitors*. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 218, 130-136.
- Ariyanto, T., G.-R. Zhang, F. Riyahi, J. Glasel, B.J.M. Etzold. 2017. *Controlled synthesis of core-shell carbide-derived carbons through in situ generated chlorine*. *Carbon*, 115, 422-429.
- Ariyanto, T., I. Prasetyo, dan Rochmadi. 2012. *Pengaruh Struktur Pori Terhadap Kapasitansi Elektroda Superkapasitor yang Dibuat*

- dari Karbon Nanopori. Reaktor, Vol. 14 No. 1, 25-32
- Berlier, K. dan M. Frère. 1997. *Adsorption of CO₂ on Microporous Materials. 1. On Activated Carbon and Silica Gel*. J. Chem. Eng. Data, 42 (3), pp 533–537
- Condon, J.B. 2006. *Surface Area and Porosity Determination by Physisorption*. Roane State Community Collage, Harriman USA.
- Do, D.D. 1998. *Adsorption analysis: Equilibria and Kinetics*. Doctoral thesis. Imperial College, London.
- Himeno S., T. Komatsu, S. Fujita. 2005. *High-Pressure Adsorption Equilibria of Methane and Carbon Dioxide on Several Activated Carbons*. J. Chem. Eng. Data 50, 369–376
- Masel, R.I.. 1996. *Principles of Adsorption and Reaction on Solid Surfaces*, Wiley, New York.
- Prasetyo, I., R. Yunanto, dan T. Ariyanto. 2011. *Methane Storage by Methane Hydrate Formation within Water-Saturated Porous Carbon: The Effect of Mesoporosity*. Chemeca 2011, Engineers Australia.
- Prasetyo, I., Rochmadi, E. Wahyono, dan T. Ariyanto. 2017. *Controlling Synthesis of Polymer-Derived Carbon Molecular Sieve and its Performance for CO₂/CH₄*. Engineering Journal, Vol. 21, Issue 4, pp. 83-94.
- Prasetyo, I., Rochmadi, T. Ariyanto, dan R. Yunanto. 2013. *Simple Method to Produce Nanoporous Carbon for Various Applications by Pyrolysis of Specially Synthesized Phenolic Resin*. Indo. J. Chem., 13 (2), 95 - 100
- Rao, A.B., E.S., Rubin. 2002. *A Technical, Economic, and Environmental Assessment of Amine-Based CO₂ Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control*. Environ. Sci. Technol. 36, 4467-4475
- Scheiwetzer. 1979. *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Teng, H. and L. Hsu. 1999. *High Porosity Carbons Prepared from Bituminous Coal with Potassium Hydroxide Activation*. Ind. Eng. Chem. Res. 38, 2947 – 2953.
- The United States Environmental Protection Agency (US EPA). 2017. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2015*.
- Thommes, M., K. Kaneko, V. N. Alexander, J.P. Oliver, F. Rodriguez-Renoso, J. Rouquerol, dan K. S. W. Sing. *Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)*. Pure Appl. Chem. 87(9-10), 1051-1069
- United Nations. 1992. *United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Vohler, O., G. Nutsch, G. Collin, F. Sturm, E. Wage, W. Frohs, K.D. Henning, H. Koenle, M. Voll, P. Kleinschmid, O. Vostrowsky, dan A. Hirsch. 2002. *Carbon : Ulmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. Kga., Germany

