

PENGARUH STRUKTUR PORI TERHADAP KAPASITANSI ELEKTRODA SUPERKAPASITOR YANG DIBUAT DARI KARBON NANOPORI

Teguh Ariyanto^{*)}, Imam Prasetyo, dan Rochmadi

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jln. Grafika, No. 2, Yogyakarta, Indonesia, 55281

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

Abstract

THE EFFECT OF PORE STRUCTURE ON THE ELECTRODE CAPACITANCE OF SUPERCAPACITOR PREPARED BY NANOPOROUS CARBON. *Nanoporous carbons, due to high specific surface area, high pore accessibility, and relatively low cost, have been used as material electrode supercapacitors. In this work, the influence of pore structure of nanoporous carbons on the specific capacitance of supercapacitors was examined. Nanoporous carbons with several types of pore structure were prepared by carbonization of phenolic resin produced by polymeric condensation of phenolic compound with formaldehyde. Furthermore, ethylene glycol, as a filler, was added in the phenolic resin polymerization to increase the mesoporosity of nanoporous carbon. The nanoporous carbons produced were characterized for their surface morphology, specific internal surface area (BET method), and pore structure. Samples were used as electrode material in supercapacitor and specific capacitances were characterized by galvanostatic test using 30% KOH aqueous solution as electrolyte. The capacitance test of supercapacitors exhibited that increasing mesoporosity increase specific capacitance value of supercapacitors. The highest specific capacitance of 336 F/g was obtained by using mesoporous carbon produced by carbonization of resorcinol phenol formaldehyde ethylene glycol (C-RPFEG2) as electrode material of supercapacitors.*

Keywords: *mesoporosity; phenolic resin; porous carbon; supercapacitor*

Abstrak

Karbon nanopori dikarenakan memiliki luas permukaan internal yang tinggi, aksesibilitas pori yang baik, dan relatif murah telah digunakan sebagai material elektroda superkapasitor. Pada penelitian ini, pengaruh struktur pori dari karbon nanopori terhadap kapasitansi spesifik superkapasitor telah dipelajari. Karbon berpori dengan berbagai struktur pori dibuat dengan cara karbonisasi phenolic resin yang dibuat dengan cara polimerisasi kondensasi senyawa phenolic dengan formaldehide. Selain itu, etilen glikol sebagai filler ditambahkan pada saat polimerisasi phenolic resin untuk meningkatkan mesoporositas dari karbon nanopori. Karbon yang diperoleh dikarakterisasi berupa morfologi permukaan, luas permukaan spesifik (metode BET), dan struktur pori. Karbon tersebut kemudian digunakan sebagai material elektroda superkapasitor dan kapasitansi spesifik dikarakterisasi dengan tes galvanostatik menggunakan KOH 30% sebagai elektrolit. Uji kapasitansi superkapasitor menunjukkan bahwa meningkatnya mesoporositas karbon nanopori akan meningkatkan nilai kapasitansi spesifik. Kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 336 F/g diperoleh jika menggunakan karbon mesopori hasil karbonisasi resorcinol phenol formaldehide ethylene glycol (C-RPFEG2) sebagai material elektroda superkapasitor.

Kata kunci: *mesoporosity; phenolic resin; karbon berpori; superkapasitor*

PENDAHULUAN

Superkapasitor, sebagai alat penyimpan energi, telah digunakan secara luas pada bidang elektronik dan transportasi, seperti sistem telekomunikasi digital, komputer dan *pulse laser system, hybrid electrical*

vehicles, dan sebagainya (Zhu dkk., 2007). Superkapasitor memiliki banyak kelebihan dibanding dengan alat penyimpan energi yang lain seperti baterai. Dari sisi teknis, superkapasitor memiliki jumlah siklus yang relatif banyak (>100000 siklus),

kerapatan energi yang tinggi, kemampuan menyimpan energi yang besar, prinsip yang sederhana dan konstruksi yang mudah (An dkk., 2001; Shukla dkk., 2000). Sedangkan dari sisi keramahan terhadap pengguna, superkapasitor meningkatkan keamanan karena tidak ada bahan korosif dan lebih sedikit bahan yang beracun (Miller dan Simon, 2008). Material yang digunakan untuk pembuatan elektroda superkapasitor antara lain *graphene*, *carbon nanotube*, *carbon aerogel*, karbon berpori, dan komposit mineral-karbon (Hu dkk., 2006; Zhu dkk., 2007; Stoller dkk., 2008; Simon dan Burke, 2008; Izadi Nakafabadi dkk., 2011). Saat ini, material elektroda dari superkapasitor komersial menggunakan karbon berpori yang dibuat dari bahan alam yaitu tempurung kelapa (Miller dan Simon, 2008).

Karbon berpori potensial untuk digunakan sebagai material elektroda superkapasitor karena memiliki potensi kerapatan energi yang tinggi, aksesibilitas pori yang baik, dan biaya pembuatan yang relatif murah (Dietz dkk., 2002). Untuk meningkatkan kapasitansi energi dari superkapasitor dapat dilakukan dengan menyiapkan material karbon berpori yang memiliki fraksi mesopori dan luas permukaan yang tinggi (Zhu dkk., 2007). Karbon berpori dapat dibuat dengan cara karbonisasi bahan alami seperti batu bara, tempurung kelapa, bonggol jagung, kayu, bambu, limbah kertas, (Khalili dkk., 2000; Macia dkk., 2004; Zhang dkk., 2008; Tangjuank dkk., 2009) atau bahan sintesis seperti *phenol formaldehyde*, *polianiline*, *melamine formaldehyde*, (Lengthaus dkk., 2001; Park dan Park, 2002; Hulicova dkk., 2004). Bahan sintesis kualitasnya lebih homogen dan dapat dimanipulasi struktur molekulnya sehingga dapat diperoleh karbon berpori yang lebih seragam ukuran porinya dan dapat diperoleh luas permukaan yang lebih tinggi meskipun tanpa penambahan zat tertentu (Zhang dkk., 2007; Prasetyo dkk., 2009). Oleh karena itu, banyak penelitian yang menggunakan bahan sintesis dengan memanipulasi struktur polimer dan penggunaan zat tertentu agar diperoleh karbon berpori yang berkualitas baik yang nantinya akan digunakan sebagai elektroda material superkapasitor.

Pada penelitian ini prekursor untuk pembuatan material karbon berpori dibuat dari polimer sintesis melalui proses polimerisasi kondensasi senyawa *phenolic* dengan *formaldehyde* pada kondisi asam. Untuk memperoleh material karbon berpori yang mempunyai struktur pori yang beragam dilakukan variasi jenis senyawa *phenolic*, perbandingan senyawa *phenolic* dengan *formaldehyde*, dan penambahan *filler* berupa etilen glikol. Karbon berpori yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai material elektroda superkapasitor dan kapasitansi spesifik dikarakterisasi menggunakan metode galvanostatik. Efek dari struktur pori dari karbon berpori terhadap kapasitansi spesifik akan dipelajari sehingga akan dapat diketahui karbon berpori dengan struktur pori terbaik sebagai material elektroda superkapasitor.

METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan baku pembuatan prekursor karbon berpori adalah *phenol* (kemurnian 96%), *resorcinol* (kemurnian 99%), dan larutan *formaldehyde* (kemurnian 26%), dan *filler* berupa etilen glikol (kemurnian 99,5%). Semua bahan tersebut digunakan tanpa proses pemurnian. Nitrogen dengan kemurnian 99,95% digunakan sebagai gas inert pada proses karbonisasi dan untuk menentukan isoterm adsorpsi-desorpsi N₂ pada 77 K digunakan N₂ gas berupa *ultra high purity* (99,9995) sebagai adsorbat dan N₂ cair sebagai pendingin.

Cara Penelitian

Pembuatan karbon berpori dari *phenolic resin*

Prekursor karbon berpori dibuat dengan cara polimerisasi kondensasi senyawa *phenolic* dengan *formaldehyde* dalam suasana asam yang dibuat dengan cara memvariasikan jenis senyawa *phenolic*, perbandingan senyawa *phenolic* dengan *formaldehyde* (F), dan penambahan *filler* berupa etilen glikol (EG). Bahan *phenolic* yang digunakan yaitu *phenol* (P) dan *resorcinol* (R). Reaksi polimerisasi dilakukan pada reaktor batch dengan volum 500 mL menggunakan HCl pekat (37%) sebagai katalis. Polimer yang didapatkan selanjutnya dikeringkan pada 398 K (tekanan ruang) dengan menggunakan *furnace*, kemudian dipotong menjadi ukuran seragam dan siap dikarbonisasi atau disebut prekursor karbon berpori. Prekursor kemudian dikarbonisasi pada reaktor *furnace* dengan aliran nitrogen (gas inert) dari temperatur kamar sampai 1023 K dengan kecepatan pemanasan 3K/menit dan dijaga selama 2 jam pada suhu 1023 K. Kemudian *furnace* didinginkan sampai temperatur ruang dengan tetap mengalirkan nitrogen. Hasil karbon yang diperoleh kemudian diberi nama sesuai dengan nama prekursor dan perbandingan senyawa yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kode sampel dan perbandingan mol yang digunakan

Kode Sampel	Perbandingan Mol			
	P	R	F	EG
C-PF	1	0	2,8	0
C-RPF	0,3	0,7	2,8	0
C-RF	0	1	2,8	0
C-RPFEG1	0,3	0,7	2,8	1
C-RPFEG2	0,3	0,7	2,8	2
C-RPFEG3	0,3	0,7	2,8	3
C-RPFEG4	0,3	0,7	2,8	4

Karakterisasi dari karbon berpori yang dihasilkan

Morfologi dari material karbon berpori dikarakterisasi dengan JEOL JSM-6360LA *analytical scanning electron microscope* (SEM) dan isoterm N₂ (adsorpsi-desorpsi) dikarakterisasi dengan NOVA 2000 *adsorption analyzer* (Quantachrome) pada 77 K. Untuk menghilangkan senyawa volatil pada uji

adsorpsi-desorpsi, karbon *didegass* pada 473 K selama 8 jam.

Persamaan Brunauer-Emmett-Teller (BET) digunakan untuk mengevaluasi keseimbangan adsorpsi multilayer dengan menggunakan data isotherm pada rentang 0,05-0,30 (Do, 1998).

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C-1}{V_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

Dengan P, tekanan uap pada keadaan kesetimbangan, atm; V, volum dari gas yang teradsorpsi, mol/g; V_m, volum dari gas yang teradsorpsi yang membentuk monolayer, mol/g; dan C, konstanta. Luas permukaan internal dihitung dengan menggunakan data hasil perhitungan yang diperoleh dari persamaan BET dengan menggunakan persamaan 2.

$$S = V_m N_A a_m \quad (2)$$

Dengan N_A, bilangan Avogadro (6,023 x 10²³ molekul/mol) dan a_m, luas proyeksi suatu molekul (Å²/molekul). Nilai a_m adalah 16,2 Å²/molekul jika menggunakan N₂ sebagai adsorbat.

Mikroporositas suatu material berpori yang berupa luas permukaan mikropori (S_{mic}) dan volum mikropori (V_{mic}) dianalisis dengan menggunakan metode *t*-plot yaitu metode yang menghubungkan volum gas yang teradsorpsi dengan *statistical thickness* (*t*). Hubungan *statistical thickness* dengan tekanan adsorpsi N₂ pada 77 K dituliskan dengan persamaan Halsey yang ditunjukkan pada Persamaan 3 (Do, 1998).

$$t \left(\frac{\text{Å}}{\text{Å}} \right) = 3,54 \left[\frac{5}{2,303 \log (P_0/P)} \right]^{1/3} \quad (3)$$

Grafik hubungan antara volum gas teradsorpsi pada suatu P/P₀ dengan *statistical thickness* akan menunjukkan 2 daerah berbeda dimana garis lurus dengan *slope* dan *intersept* berbeda dapat diperoleh pada daerah tersebut. Garis lurus pada daerah t > 3,54 Å

merupakan daerah adsorpsi multilayer dengan jumlah layer sebanyak t/σ dengan σ merupakan *thickness* satu layer dari N₂ sebesar 3,54 Å. Luas permukaan non mikropori dapat dihitung dari *slope*, s, pada daerah adsorpsi multilayer yaitu menggunakan persamaan 4.

$$S_{\text{non mikropori}} = s N_A a_m \quad (4)$$

S_{mic} merupakan pengurangan dari luas permukaan total yang dihitung dengan metode BET dengan luas permukaan non mikropori yang dihitung dengan metode *t*-plot. V_{mic} merupakan *intersept* dari garis lurus pada daerah adsorpsi multilayer dan V_{non-mikropori} dapat ditentukan dengan cara mengurangi V_t dengan V_{mic}. Baik luas permukaan maupun volum non mikropori merupakan gabungan dari sifat mesopori dan makropori.

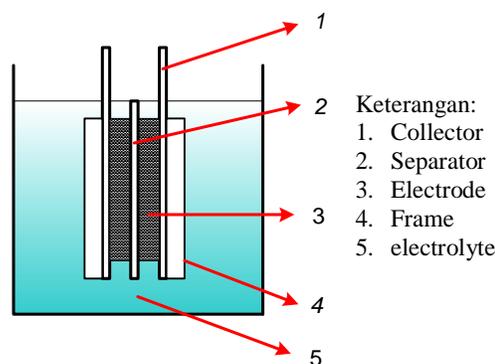
Volum pori total (V_t) diestimasi dari jumlah adsorbat terjerap pada P/P₀ sebesar 0,99 dan diameter pori rerata dihitung dengan menggunakan asumsi

bahwa pori berbentuk silinder dengan menggunakan persamaan 5.

$$D_{Av} = \frac{4V_{liq}}{S} \quad (5)$$

Penentuan kapasitas spesifik superkapasitor

Material elektroda baik positif maupun negatif dibuat dengan mencampurkan 80%wt karbon berpori, 10%wt *carbon black*, dan 10%wt polivinilalkohol (PVA) menggunakan etanol 70% untuk menghasilkan campuran yang homogen. Hasil pasta yang diperoleh kemudian dilapiskan ke Cu sebagai pengumpul muatan (*collector*) dengan tebal 0,2 ± 0,1 mm dan berat material aktif 10-20 mg. Ukuran elektroda dibuat 1 cm x 1 cm dan lembaran polipropilen digunakan sebagai *separator*. Diagram sederhana superkapasitor ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian untuk tes sederhana suatu superkapasitor

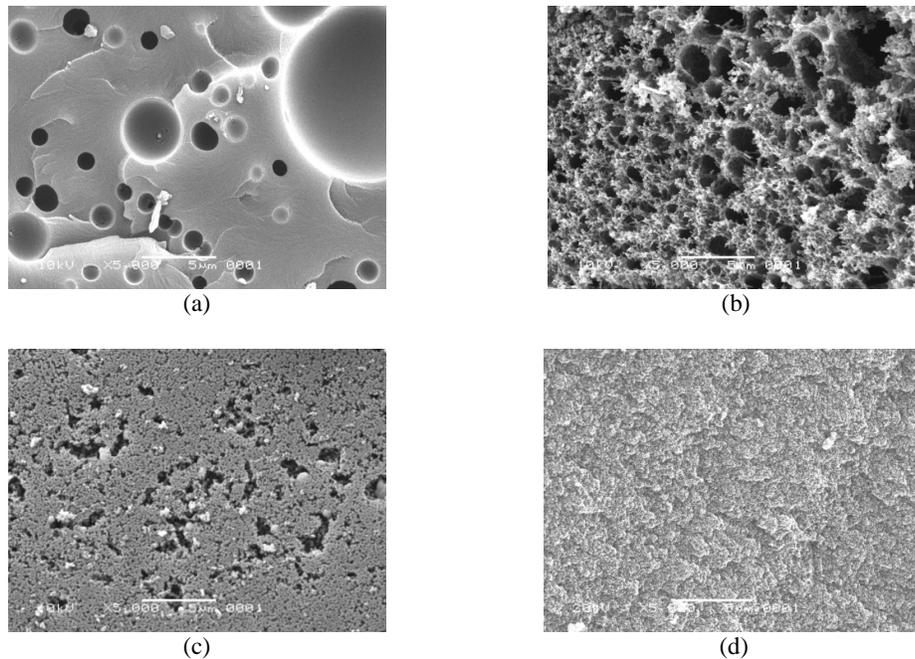
Kapasitansi superkapasitor dilakukan dengan metode galvanostatik yaitu memberi dan melepaskan muatan pada arus konstan dengan kerapatan sebesar 1 mA/cm² dengan menggunakan KOH 30% sebagai elektrolit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Karbon Berpori

Hasil foto SEM dari karbon berpori hasil karbonisasi berbagai prekursor yaitu PF, RF, RPF, dan RPFEG pada suhu 1023 K ditunjukkan masing-masing pada Gambar 2a, 2b, 2c, dan 2d. Keempat karbon berpori tersebut menunjukkan perbedaan morfologi permukaan yang sangat signifikan yang dipengaruhi oleh jenis prekursornya. C-RPF yang merupakan kopolimer dari *phenol* dan *resorcinol* terlihat memiliki morfologi gabungan dari C-PF dan C-RF sedangkan C-RPFEG yang mengandung etilen glikol menunjukkan *cavity* yang tidak tampak.

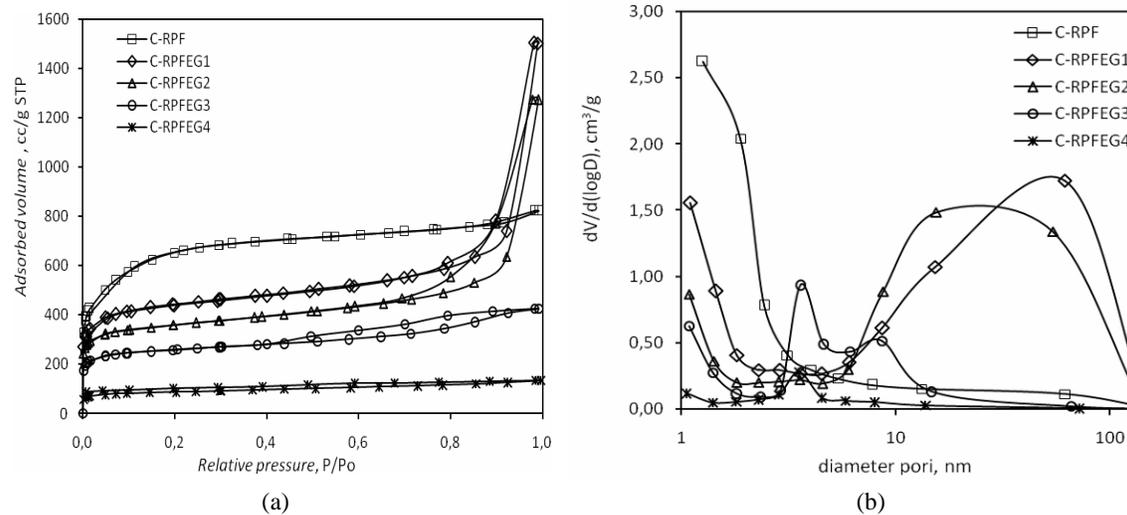
Isotherm adsorpsi-desorpsi N₂ dan distribusi ukuran pori dengan metode BJH untuk berbagai karbon berpori ditunjukkan masing-masing pada Gambar 3a dan 3b.



Gambar 2. Foto SEM dari (a) C-PF, (b) C-RF, (c) C-RPF, (d) C-RPFEG2

Kurva isoterm tersebut menunjukkan bahwa adsorpsi N₂ pada C-RPF merupakan adsorpsi tipe I atau isoterm Langmuir menurut klasifikasi IUPAC yang merupakan tipe adsorpsi untuk material mikropori. Berbeda dengan isoterm C-RPF, isoterm dari karbon hasil karbonisasi prekursor yang mengandung etilen glikol (C-RPFEG) menunjukkan isoterm tipe II yaitu tipe adsorpsi yang terjadi pada material mesopori. Hal ini diperkuat dengan adanya fenomena histerisis pada C-RPFEG yang menunjukkan bahwa adanya mesoporositas pada

karbon tersebut. Berdasar klasifikasi IUPAC (Sing dkk., 1985), pori dibagi menjadi 3 jenis yaitu mikropori (d<2 nm), mesopori (2<d<50 nm), dan makropori (d>50). Berdasar klasifikasi tersebut, Gambar 3b menunjukkan bahwa C-RPF memiliki distribusi pori yang dominan berupa mikropori sedangkan C-RPFEG1 dan C-RPFEG2 memiliki distribusi pori yang dominan berupa mesopori. Selain itu, gambar tersebut juga menunjukkan bahwa hanya ada sebagian kecil distribusi pori yang berada pada daerah makropori.



Gambar 3. Isoterm adsorpsi-desorpsi N₂ (a) dan distribusi ukuran pori dengan metode BJH (b) dari berbagai karbon hasil karbonisasi prekursor pada suhu 750°C

Tabel 2. Karakteristik struktur pori dari karbon berpori hasil karbonisasi berbagai prekursor pada suhu 750°C

Sampel	S, m ² /g	S _{mic} , m ² /g	% S _{mic}	V, cm ³ /g	V _{mic} , cm ³ /g	% V _{mic}	D _{Av} , nm
C-PF	782	695	88,88	0,412	0,306	74,24	2,11
C-RPF	2174	1725	79,35	1,262	0,662	52,46	2,32
C-RF	1457	1177	80,78	0,926	0,503	54,32	2,54
C-RPFEG1	1469	566	38,50	2,310	0,211	9,13	6,29
C-RPFEG2	1194	403	33,72	1,957	0,161	8,23	6,56
C-RPFEG3	859	602	70,16	0,655	0,267	40,81	3,05
C-RPFEG4	496	344	69,35	0,383	0,160	41,81	3,08

Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan dari luas permukaan spesifik (S) dengan metode *BET*, volum pori (V), luas permukaan spesifik mikropori (S_{mic}) dan volum mikropori (V_{mic}) yang dihitung dengan metode *t-plot*, serta diameter pori rerata (D_{Av}) untuk berbagai material karbon nanopori. Tabel tersebut menunjukkan rentang yang cukup lebar dari karakterisasi karbon nanopori seperti luas permukaan spesifik dari 400-2200 m²/g, volum pori dari 0,3-2,3 cm³/g, dan diameter rerata dari 2,1-6,5 nm.

Berdasarkan distribusi ukuran pori pada Gambar 3b dan klasifikasi pori berdasarkan IUPAC, maka luas permukaan dan volum pori non mikropori yang dihitung dengan metode *t-plot* untuk selanjutnya digunakan sebagai parameter mesoporositas yaitu luas permukaan dan volum mesopori. C-RPFEG1 dan C-RPFEG2 memiliki mesoporositas yang sangat dominan dengan prosentase S_{meso} yaitu 61,5% (C-RPFEG1) dan 66,28% (C-RPFEG2) sementara prosentase V_{meso} yaitu 90,87% (C-RPFEG1) dan 91,77% (C-RPFEG2). Berdasarkan analisis di atas maka sampel karbon tersebut sangat cocok dan mewakili dalam mempelajari pengaruh dari struktur pori dari karbon berpori terhadap kapasitansi spesifik superkapasitor.

Karakterisasi Elektrokimia Karbon Berpori Hasil Karbonisasi Prekursor

Karbon yang diperoleh dari karbonisasi berbagai prekursor kemudian digunakan sebagai material elektroda superkapasitor tipe *electric double layer capacitor* (EDLC). EDLC merupakan suatu rangkaian yang terdiri dari bagian utama yaitu elektroda, pemisah, dan elektrolit. Kapasitansi spesifik dihitung dengan menggunakan waktu pengeluaran muatan karena energi inilah yang benar-benar tersimpan dan dapat dimanfaatkan pada superkapasitor (Ariyanto dkk., 2010).

Kapasitansi merupakan perbandingan dari muatan (q) dengan voltase (V) atau dituliskan dalam Persamaan 6:

$$C = \frac{dq}{dE} \quad (6)$$

Oleh karena menggunakan arus konstan, maka:

$$C = I \frac{dt}{dE} \quad (7)$$

Total kapasitansi yang diperoleh merupakan gabungan dari dua ekuivalen satu elektroda yang disusun seri. Oleh karena itu, persamaan untuk kapasitansi satu elektroda adalah $C_1 = 2 C_{cell}/\text{massa}$ satu elektroda.

Hasil perhitungan kapasitansi spesifik dari semua karbon yang digunakan sebagai material elektroda dituliskan pada Tabel 3. Tabel perhitungan kapasitansi spesifik tersebut menunjukkan bahwa performa EDLC yang sangat baik didapatkan jika C-RPFEG yang memiliki mesoporositas tinggi dijadikan sebagai material elektroda. Hasil ini jauh lebih baik dari penelitian-penelitian yang lain yang menggunakan karbon berpori sebagai elektroda material (Zhang dkk., 2007; Zhu dkk., 2007). Kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 336 F/g didapatkan jika superkapasitor menggunakan C-RPFEG2 yang memiliki prosentase mesopori ≈ 92%.

Tabel 3. Kapasitansi spesifik superkapasitor yang diperoleh dengan tes galvanostatik dengan kerapatan arus 1 mA/cm²

Sampel karbon	C _g , F/g
C-PF	56
C-RPF	246
C-RF	229
C-RPFEG1	286
C-RPFEG2	336
C-RPFEG3	221
C-RPFEG4	60

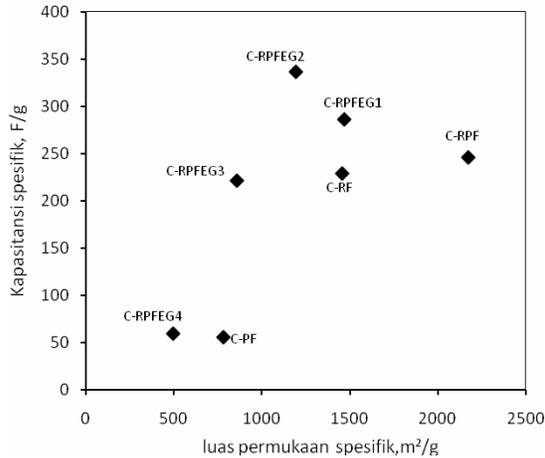
Hubungan Karakteristik Karbon Terhadap Kapasitansi Spesifik dari EDLC

Hubungan luas permukaan spesifik dengan kapasitansi spesifik

Hubungan luas permukaan spesifik dengan kapasitansi spesifik EDLC yang diperoleh ditunjukkan oleh Gambar 4. Pada gambar tersebut terlihat bahwa dengan meningkatnya luas permukaan spesifik maka nilai kapasitansi spesifik EDLC yang diperoleh akan naik kemudian menurun dengan semakin naiknya luas permukaan spesifik karbon yang digunakan. Meningkatnya luas permukaan dari karbon yang digunakan akan menyebabkan semakin banyak ion baik kation maupun anion yang mampu terjerap dalam elektroda sehingga meningkat pula kapasitansi dari

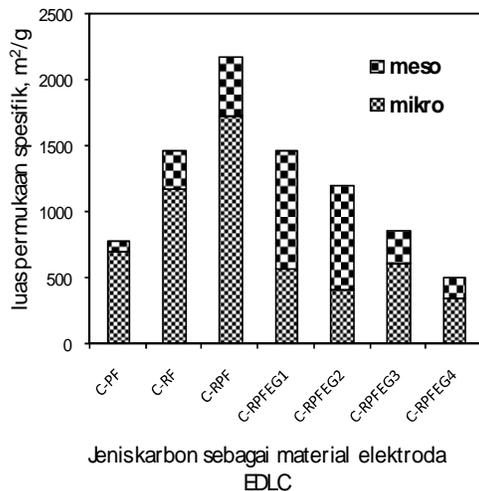
EDLC tetapi hal ini tidak linear dikarenakan faktor lain berupa struktur pori.

Jika material C-RPFEG1 dan C-RF dengan luas permukaan spesifik sekitar 1500 m²/g digunakan sebagai material elektroda superkapasitor, maka didapatkan nilai kapasitansi spesifik yang berbeda. C-RPFEG1 memiliki nilai kapasitansi spesifik lebih tinggi karena karbon tersebut memiliki pori yang dominan meso dibandingkan karbon C-RF yang dominan berupa mikro.



Gambar 4. Hubungan luas permukaan spesifik dengan kapasitansi spesifik EDLC menggunakan berbagai karbon berpori

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara jenis karbon sebagai material EDLC dengan luas permukaan spesifik, yang merupakan gabungan luas spesifik mikropori dan mesopori, dan kapasitansi spesifik EDLC yang didapatkan. Pada gambar tersebut terlihat bahwa dengan meningkatnya mesoporositas akan menyebabkan makin baiknya performa elektrokimia dari karbon yang digunakan sebagai

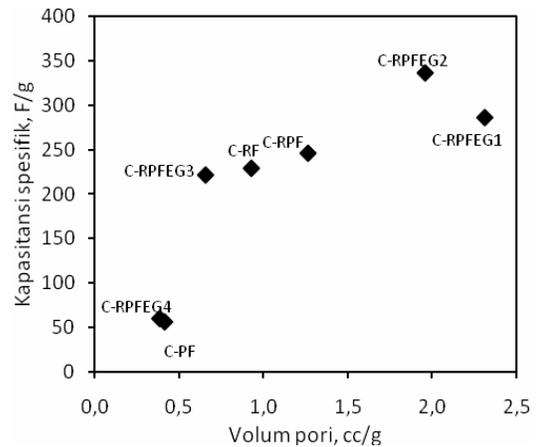


Gambar 5. Hubungan berbagai jenis karbon sebagai material elektroda EDLC dengan luas permukaan spesifik dan dengan kapasitansi spesifik

material elektroda. Hal ini dikarenakan karena semakin besar mesoporositas maka aksesibilitas ion akan lebih cepat dan akan meningkatkan efisiensi dari luas permukaan elektroda.

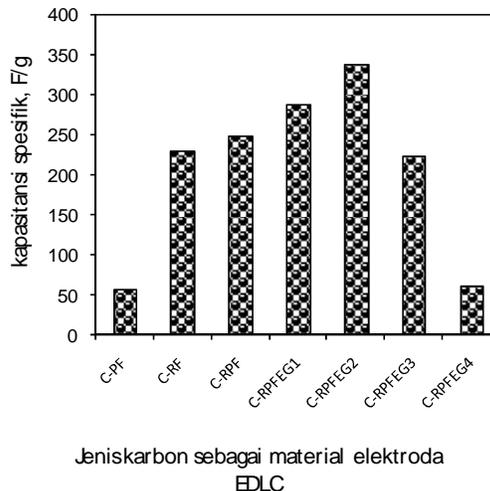
Hubungan volum pori dengan kapasitansi spesifik

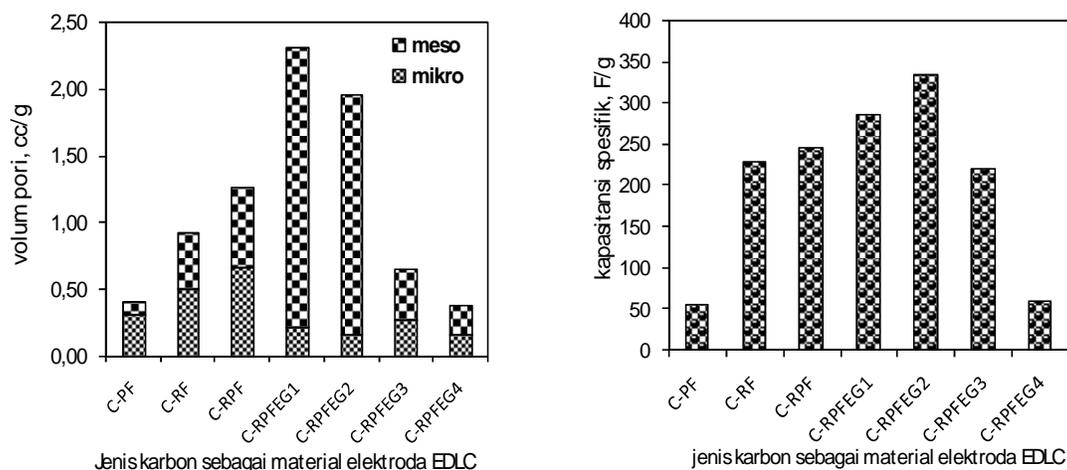
Gambar 6 menunjukkan hubungan antara volum pori total dengan nilai kapasitansi spesifik. Pada gambar tersebut terlihat dengan jelas bahwa kapasitansi spesifik EDLC akan meningkat dengan meningkatnya volum pori tetapi kemudian menurun ketika volum pori lebih besar dari sekitar 2 cc/g.



Gambar 6. Hubungan volum pori dengan kapasitansi spesifik EDLC menggunakan berbagai karbon berpori

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara jenis karbon sebagai material EDLC dengan volum pori, yang merupakan gabungan volum mikropori dan mesopori, dan kapasitansi spesifik EDLC yang didapatkan.





Gambar 7. Hubungan berbagai jenis karbon sebagai material elektroda EDLC dengan volum pori dan dengan kapasitansi spesifik

Pada gambar tersebut terlihat bahwa dengan meningkatnya mesoporositas akan menyebabkan makin baiknya performa elektrokimia dari karbon yang digunakan sebagai material elektroda.

Ketika proses pemberian muatan maka *collector* akan bermuatan listrik dan kemudian akan menginduksi elektroda. Aksesibilitas dari ion-ion ke dalam permukaan elektroda akan sangat dipengaruhi oleh diameter pori, atau secara tidak langsung berupa volum pori. Semakin besar mesoporositas maka aksesibilitas ion akan lebih cepat dan akan meningkatkan efisiensi dari luas permukaan elektroda EDLC.

Hubungan struktur pori dengan kapasitansi spesifik superkapasitor menunjukkan bahwa tidak hanya tersedia luas permukaan spesifik yang tinggi sebagai tempat anion ataupun kation tetapi juga tersedianya akses bagi ion-ion menuju kedalam pori yang baik. Oleh karena itu, menyiapkan karbon berpori yang memiliki luas permukaan tinggi dan memiliki mesoporositas yang tinggi pula menjadi hal yang penting dalam menyiapkan material elektroda superkapasitor yang berasal dari karbon berpori.

KESIMPULAN

Karbon nanopori dengan kapasitansi spesifik yang tinggi dapat dibuat dengan mengatur perbandingan reaktan pada saat proses polimerisasi. Hasil karakterisasi berbagai karbon berpori (luas permukaan spesifik antara 400-2200 m²/g) menunjukkan bahwa meningkatnya mesoporositas akan meningkatkan kapasitansi spesifik dari superkapasitor. Luas permukaan tertinggi dalam penelitian ini sebesar 2174 m²/g didapatkan dari C-RPF hasil pirolisis prekursor pada suhu 750°C, 2 jam sedangkan prosentase mesoporositas tertinggi sekitar 92% didapatkan pada material C-RPFEG2 dengan luas permukaan spesifik sebesar 1194 m²/g. Kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 336 F/g diperoleh jika

menggunakan C-RPFEG2 sebagai material elektroda superkapasitor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada WCRU *project* Teknik Kimia UGM yang telah membiayai jalannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- An, K. H., Kim, W. S., Park, Y. S., Choi, Y. C., Lee, S. M., Chung, D. C., Bae, D. J., Lim, S. C., and Lee, Y. H., (2001), Supercapacitors Using Single-Walled Carbon Nanotube Electrodes, *Adv. Mater.* vol. 13, no. 7, pp. 497-500.
- Ariyanto, T., Prasetyo, I., and Rochmadi, (2010), Phenolic Resin-Based Nanoporous Carbon as an Electrode Material for Supercapacitor, *RSCE 2010 Symposium*, Bangkok, Thailand
- Dietz, S.D. and Nguyen, (2002), Mesoporous Carbon Electrodes for Double Layer Capacitors, *Proceedings of the 2002 NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference*, Tampa.
- Do, D.D., (1998), *Adsorption analysis : Equilibria and Kinetics*, Imperial College, London.
- Hu, C.C, Chang, K.H., and Lin, M.C., (2006), Design and Tailoring of the Nanotubular Arrayed Architecture of Hydrous RuO₂ for next Generation Supercapacitors, *Nano Letters*, Vol. 6, No. 12, pp. 2690-2695.
- Hulicova, D., Kodama, M., Yamashita J., Soneda, Y., and Hatori, H., (2004), *Electrochemical Properties of Melamine-Based Carbon*, Energy Storage Material Research Group, AIST West, Japan.

- Izadi, N.A., Yamada, T., Futaba, D.H., Yudasaka, M., Takagi, H., Hatori, H., Iijima S., and Hata, K., (2011), High-Power Supercapacitor Electrodes from Single-Walled Carbon Nanohorn/ Nanotube Composite, *ACS Nano*, Vol. 5, No. 2, pp. 811-819.
- Khalili, N.R., Campbell, M., Sandi, G., and Golas, J., (2000), Production of Micro- and Mesoporous Activated Carbon from Paper Mill Sludge; Effect of Zinc Chloride Activation, *Carbon*, vol. 38, pp. 1905-1915.
- Lenghaus, K., Qiao, G.G., Solomon, D.H., Gomez, C., Reinoso, F.R., and Escribano, A.S., (2001), *Controlling Carbon Microporosity: The Structure of Carbons Obtained from Different Phenolic Resin Precursors*, Polymer Science Group, pp. 743-749.
- Macia, J.A., Moore, B.C., Cazorla, D., and Linares A., (2004), Activation of Coal Tar Pitch Carbon Fibres: Physical Activation vs. Chemical Activation, *Carbon*, vol. 42, pp. 1367-1370.
- Miller, J.R. and Simon, P., (2008), *Supercapacitors: Fundamentals of Electrochemical Capacitor Design and Operation*, The Electrochemical Society Interface .
- Park, J.H. and Park, O.O., (2002), Hybrid Electrochemical Capacitors Based on Polyaniline and Activated Carbon Electrodes, *Journal of Power Sources*, vol. 111, pp. 185-190
- Prasetyo, I., Rochmadi, and Wahyono, E., (2009), Preparation of Carbon Molecular Sieve for CO₂/CH₄ Separation by Pyrolysis of Phenol Formaldehyde Resin, *RSCE journal*.
- Shukla, A.K., Sampath, S., and Vijayamohan, K., (2000), Electrochemical Supercapacitors: Energy Storage Beyond Batteries, *Current Science*, vol. 79, no. 12.
- Simon, P. and Burke A., (2008), *Nanostructured Carbons: Double-Layer Capacitance and More*, The Electrochemical Society Interface, pp. 38-43.
- Sing, K.S.W., Everett, D.H., Haul, R.A.W., Moscou, L., Pierotti, R.A., Rouquerol, J., and Siemieniewska, T., (1985), Reporting Physisorption Data for Gas Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity, *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 57, No. 4, pp. 603-619.
- Stoller, M.D., Park, S., Zhu, Y., An, J., and Ruoff, R.S., (2008), Graphene-Based Ultracapacitors, *Nano Letters*, vol. 8, no. 10, pp. 3498-3502
- Tangjuank, S., Insuk, N., Tontrakoon, J., and Udeye, V., (2009), Adsorption of Lead(II) and Cadmium(II) Ions from Aqueous Solutions by Adsorption on Activated Carbon Prepared from Cashew Nut Shells, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 52, pp. 110-116.
- Zhang, F.M.H., Chen, J., Li, G.D., Zhang, Y., and Chen, J.S., (2008), Preparation and Gas Storage of High Surface Area Microporous Carbon Derived from Biomass Source Cornstalks, *Bioresource Technology*, vol. 99, pp. 4803-4808.
- Zhang, L., Liu, H., Wang, M., and Chen L., (2007), Structure and Electrochemical Properties of Resorcinol-Formaldehyde Polymer-Based Carbon for Electric Double-Layer Capacitors, *Carbon*, vol. 45, pp. 1439-1445.
- Zhu, Z., Hu, H., Li, W., and Zhang, X., (2007), Resorcinol Formaldehyde Based Porous Carbon as an Electrode Material for Supercapacitors, *Carbon*, vol.45, pp. 160-165.