

FABRIKASI ELEKTRODA KARBON NANOPORI UNTUK CAPACITIVE DEIONIZATION

FABRICATION OF NANOPOROUS CARBON ELECTRODES FOR CAPACITIVE DEIONIZATION

Dwi Hany Eryati¹, Memoria Rosi², Ismudiati Puri Handayani³^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom¹dwihanyeryati@telkomuniversity.ac.id, ²memoriarosi@telkomuniversity.ac.id,³iphandayani@telkomuniversity.ac.id**Abstrak**

Capacitive Deionization (CDI) merupakan salah satu metoda desalinasi dengan mengalirkan air laut melewati celah di antara dua elektroda berdasarkan prinsip kapasitor. Salah satu elektroda yang banyak dimanfaatkan pada sistem CDI adalah karbon nanopori karena memiliki luas permukaan dan porositas yang besar. Pada penelitian ini, karbon nanopori dibuat dari tempurung kelapa dengan variasi perbandingan karbon nanopori terhadap aktivator yaitu C:KOH:NaOH = 1:3:0, 1:3:1, 1:1:3, 1:0:3. Karakterisasi pori pada karbon nanopori dilakukan dengan menggunakan metoda nitrogen isotherm physisorption menghasilkan nilai luas permukaan maksimum karbon nanopori sebesar 1657,1 m²/g, volume mikropori 0,86 cc/g, volume mesopori 0,06 cc/g, dan volume total 0,92 cc/g. Elektroda CDI dibuat dengan menggunakan campuran karbon nanopori, grafit, PVA dengan perbandingan massa masing-masing sebesar 8 : 1 : 1. Pengukuran desalinasi pada sel CDI dilakukan dengan menggunakan larutan NaCl dengan konsentrasi sebesar 0.9%, 2%, dan 3% pada debit 10 ml/menit. Pengurangan kadar NaCl maksimal pada konsentrasi NaCl 3% diperoleh sebesar 22,6% yang bersesuaian dengan luas permukaan 1657,1 m²/g dan kapasitansi 5,428 F/g.

Kata kunci: Desalinasi, Capacitive Deionization, NaCl, Karbon nanopori, Kapasitansi.

Abstract

Capacitive Deionization (CDI) is one of desalination method by flowing seawater through the gap between two electrodes based on the capacitor mechanism. Nanoporous carbon is one of electrodes used in CDI system due to its high surface area and porosity. In this present study, nanoporous carbon are synthesized from coconut shell with ratio of nanoporous carbon/activator varied by C:KOH:NaOH = 1:3:0, 1:3:1, 1:1:3, 1:0:3. Nanoporous carbon were then characterized using nitrogen isotherm physisorption with a highest surface area about 1657.1 m²/g, micropore volume of 0.86 cc/g, mesopore volume of 0.06 cc/g, and total volume of 0.92 cc/g. CDI electrodes produced using a mixture of nanoporous carbon, graphite, PVA with mass ratio of 8:1:1. Desalination of those CDI cells were measured by NaCl solvents with concentration of 0.9%; 2%; 3% at flow rate of 10 ml/min. At NaCl concentration of 3%, the percentage reduction of salt level was 22.6% which is appropriate to the nanoporous carbon with surface area of 1657.1 m²/g and capacitance of 5.428 F/g.

Keywords: Desalination, Capacitive Deionization, NaCl, Nanoporous carbon, Capacitance

1. Pendahuluan

Indonesia dikenal sebagai negara maritim karena memiliki luas area perairan lebih besar dari daratan dengan perbandingan 3:1. Melimpahnya air laut di Indonesia belum dimanfaatkan secara maksimal untuk kebutuhan air bersih. Air laut mengandung garam NaCl sekitar 3% sehingga tidak dapat digunakan secara langsung. Pemanfaatan air laut pada awalnya dilakukan dengan menggunakan teknologi *Multi-Stage Flash* (MSF), *Multi-Effect Distillation* (MED), dan *Reverse Osmosis* (RO) [2]. Akan tetapi metoda-metoda tersebut memiliki kelemahan dari efisiensi kemampuan desalinasi air laut dan biaya operasi yang relatif mahal. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah teknologi *Capacitive Deionization* (CDI). Teknik CDI dikembangkan karena ramah lingkungan, biaya perawatan yang murah, dan hemat energi [3].

Salah satu material yang baik digunakan sebagai elektroda CDI adalah karbon nanopori karena memiliki luas permukaan dan porositas yang besar [1]. Karbon nanopori dapat dibuat dari bahan alam seperti tempurung kelapa. Proses desalinasi dengan CDI akan efektif dan efisien jika elektroda yang digunakan mempunyai permukaan pori yang luas agar daya adsorpsi ion semakin besar [1]. Peneliti mengembangkan struktur karbon nanopori menggunakan bahan dasar tempurung kelapa dengan memvariasikan senyawa aktivator kimia pada pembuatan karbon nanopori. Karbon nanopori ini selanjutnya akan digunakan sebagai elektroda pada sistem

desalinasi dengan teknik CDI. Sehingga hasil dari penelitian ini akan mendapatkan porositas yang besar dan luas permukaan spesifik yang besar.

Desalinasi menggunakan CDI dilakukan dengan mengalirkan air laut melewati celah di antara elektroda berdasarkan prinsip kapasitor dengan penyerapan ion secara elektrostatis pada permukaan elektroda bermuatan. Prinsip kerja CDI adalah menarik ion-ion yang terkandung pada air laut menuju elektroda berpori akibat pemberian medan listrik. Jika air laut dengan kandungan garam dialirkan di antara sepasang elektroda yang diberikan beda potensial tertentu maka elektroda akan menyerap ion-ion yang berlawanan pada air tersebut. Elektroda negatif akan menarik ion bermuatan positif (kation) seperti Natrium (Na), sedangkan elektroda positif akan menarik ion negatif (anion) seperti klorida (Cl) [4]. Skema dasar CDI terdiri dari aliran air laut melalui sepasang elektroda yang dilapisi oleh karbon nanopori. Elektroda berfungsi untuk melewatkan potensial listrik. Selama proses pengisian yaitu saat potensial listrik diberikan pada elektroda maka ion-ion akan terpolarisasi pada elektroda. Dan saat pengosongan maka elektroda menjadi tidak bermuatan sehingga ion-ion yang terakumulasi pada elektroda akan kembali ke aliran air laut. Dalam sistem *Capacitive Deionization (CDI)* karakteristik fisik dan kimia dari elektroda menjadi faktor paling penting untuk meningkatkan kinerja CDI dan optimasi efisiensi desalinasi [5]. Desalinasi dengan CDI akan efektif dan efisien jika elektroda yang digunakan mempunyai permukaan pori yang luas agar daya adsorpsi ion semakin besar [1]. Bahan elektroda yang ideal untuk CDI adalah bahan yang memiliki konduktivitas yang tinggi dan luas permukaan spesifik sebesar mungkin untuk penyerapan yang optimal [3].

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap diantaranya pembuatan karbon nanopori, karakterisasi karbon nanopori, perancangan sel CDI, perancangan sel CDI, dan pengukuran desalinasi. Sintesis karbon nanopori dilakukan dengan dua proses utama yaitu proses karbonisasi dan aktivasi kimia. Proses karbonisasi dilakukan pada temperatur 500 °C selama 60 menit. Sedangkan proses aktivasi kimia dilakukan dengan mencampur arang karbon dan aktivator KOH atau/dan NaOH yang diaduk selama 6 jam. Serbuk arang dan aktivator yang telah tercampur dipanaskan pada temperatur 800 °C selama 30 menit. Sampel kemudian dicuci secara bergantian kedalam larutan HCl dan aquades selama 90 menit sebanyak 3 kali dan dikeringkan untuk menghilangkan residu yang masih tersisa.

Karbon nanopori yang telah disintesis selanjutnya dikarakterisasi dengan menggunakan metoda Nitrogen Isoterm Physisorption dengan alat Quantachrome Instrument. Dari hasil karakterisasi Nitrogen Isoterm Physisorption dilakukan perhitungan luas permukaan, volum mikropori, volum mesopori dan volum total. Selain itu juga dilakukan pengukuran kapasitansi menggunakan metode cyclic voltammetry dengan alat Gamry 3000 Instruments.

Pembuatan elektroda menggunakan komposisi 80% karbon nanopori, 10% grafit, 10% PVA dengan ditambahkan alkohol sebesar 5 ml dan distirrer selama 60 menit untuk menghasilkan *slurry*. Campuran kemudian dicetak dengan ukuran 3 cm × 3 cm × 0.1 cm dan dipanaskan pada suhu 70 °C selama 2 jam. Sel CDI dibuat menggunakan elektroda yang diposisikan berhadapan dengan jarak antara elektroda sebesar 7 mm. di antara kedua elektroda diberi spacer setebal 1 mm.

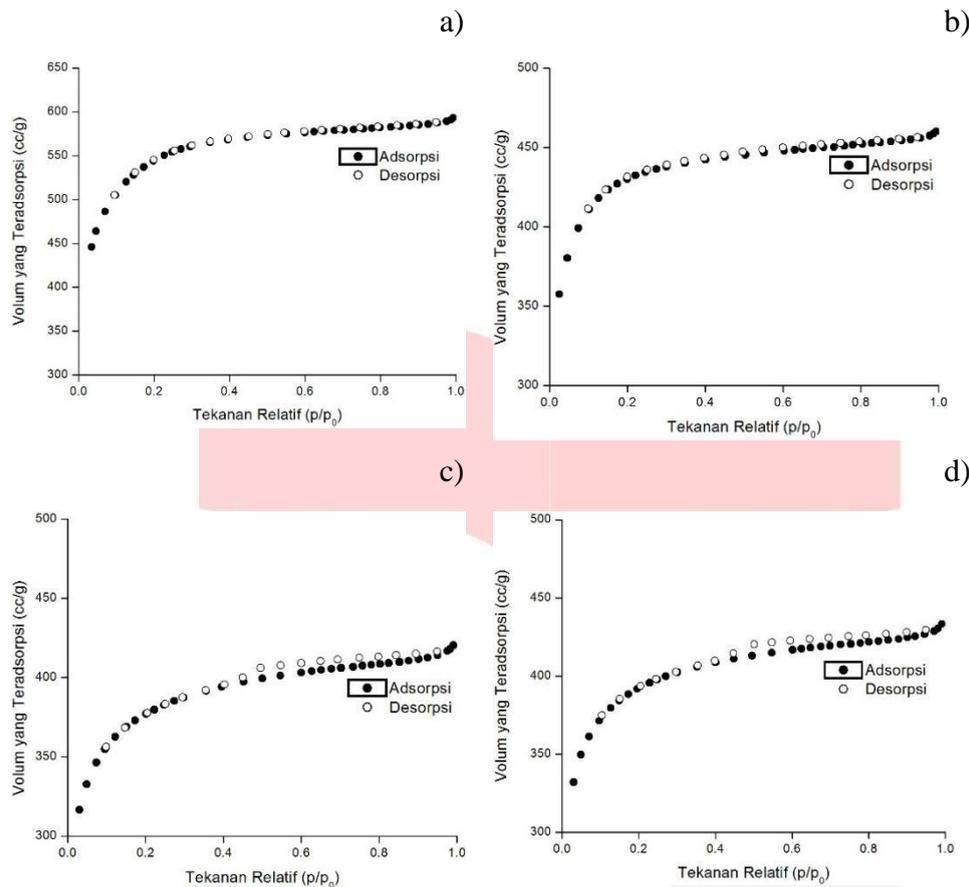
Pengukuran desalinasi dilakukan pada sel CDI dengan menggunakan metoda konduktometer dengan menghitung pengurangan kadar garam berdasarkan perubahan konduktivitas listrik sebelum dan sesudah desalinasi.

3. Hasil Penelitian

Karbon nanopori yang telah disintesis menghasilkan empat jenis sampel yaitu sampel A (NPC : KOH = 1 : 3), sampel B (NPC : KOH : NaOH = 1 : 3 : 1), sampel C (NPC : KOH : NaOH = 1 : 1 : 3), dan sampel D (NPC : NaOH = 1 : 3). Dari masing-masing sampel dilakukan karakterisasi pori dan desalinasi seperti yang akan dibahas berikut ini:

a) Karakterisasi Pori

Karakterisasi pori pada keempat sampel karbon nanopori dilakukan dengan menggunakan *nitrogen isotherm physisorption* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Karakterisasi pori dilakukan dengan mengukur volume nitrogen yang mengalami adsorpsi/desorpsi pada pori karbon nanopori.



Gambar 3.1. Kurva nitrogen isotherm physisorption

Gambar 3.1 (a-d) merupakan kurva adsorpsi dan desorpsi isotherm dari karbon nanopori pada sampel A-D secara berurutan. Keempat kurva menunjukkan tipe I adsorpsi isotherm physisorption yang merupakan material yang memiliki mayoritas ukuran mikropori (<2nm) [6]. Terlihat perbedaan tipe kurva adsorpsi-desorpsi pada sampel C dan D yaitu pada tekanan relatif (p/p₀) di atas 0.4. Hal ini mengindikasikan adanya histeris loop tipe H3 yang menunjukkan adanya mesopori [7].

Dari kurva nitrogen isotherm physisorption di atas, dapat dihitung luas permukaan (S_{BET}), volum pori total(V_T), volum mikropori(V_μ), dan volum mesopori(V_m). Untuk menghitung luas permukaan dari molekul adsorban, dapat dilakukan dengan menggunakan metoda BET. BET merupakan singkatan dari nama-nama ilmuwan Brunauer-Emmet-Teller [8].

$$\frac{1}{\frac{w}{m} - c} = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{p/p_0} \right) + \frac{1}{c} \quad (3.1)$$

$$\frac{w}{m} = \frac{c}{1 - \frac{p}{p_0}}$$

dengan w adalah volume gas yang teradsorpsi, w_m adalah volum gas yang teradsorpsi monolayer dan c adalah konstanta BET yang memenuhi:

$$c = \frac{E_1}{R(T - E_L)} \quad (3.2)$$

Dengan E₁ adalah kalor adsorpsi lapisan pertama dan E_L adalah kalor lebur, R adalah konstanta gas dan T adalah temperatur adsorpsi nitrogen.

Untuk menghitung luas permukaan digunakan persamaan (3.1) dan (3.2)

$$S = \frac{w_m N_A}{m} \quad (3.3)$$

$$w_m = \frac{w}{c} \quad (3.4)$$

dengan S adalah luas permukaan total adsorban, N adalah konstanta Avogadro (6,02 x 10²³ molekul/mol), A_{cs} adalah luas penampang lintang nitrogen (16,2 Å), M adalah berat molekul gas, S_(BET) adalah luas permukaan spesifik dan m adalah massa adsorban.

Volume pori total diukur sebagai volume adsorpsi nitrogen pada tekanan relatif 0,099. Volume mikropori dapat diturunkan dari persamaan Dubinin Radushkevich (DR) yang diberikan oleh persamaan

$$V = V_0 \exp\left(-\frac{K}{p} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$V = \int_0^1 e^{-\lambda t} [-C_0] dt \quad (3.5)$$

Dengan V adalah fraksi adsorpsi, V adalah volume mikropori, β adalah koefisien afinitas dan A adalah energi bebas adsorpsi. Sedangkan volume mesopori diperoleh dari selisih volume total terhadap volume mikropori.

Tabel 3.1. Karakteristik fisika karbon nanopori

Material	Kandungan Karbon (%)	S_{BET} (m^2/g)	V_T (cc/g)	V_μ (cc/g)	V_m (cc/g)
A	22	1657,1	0,92	0,86	0,06
B	18	1266,9	0,71	0,69	0,02
C	11	1137,1	0,65	0,6	0,05
D	16	1171,3	0,67	0,63	0,04

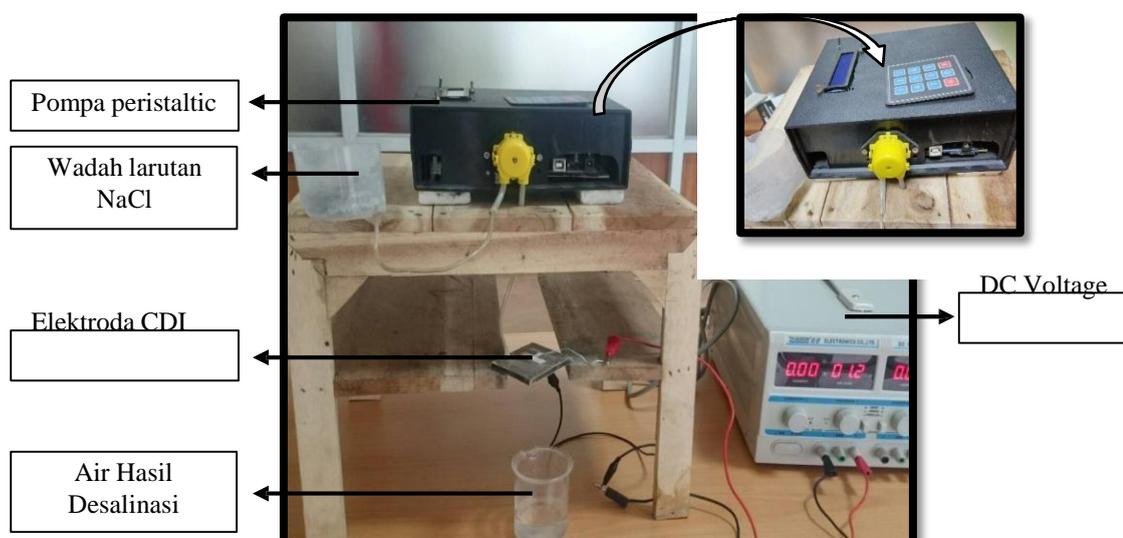
Tabel 4.1 menunjukkan bahwa sampel dengan luas permukaan (S_{BET}) dan volume total tertinggi sampai terendah ditunjukkan oleh sampel A yaitu sebesar $1.657,1 m^2/g$; $0,92 cc/g$, sampel B sebesar $1.266,9 m^2/g$; $0,71 cc/g$, sampel sebesar $1.171,3 m^2/g$; $0,67 cc/g$ dan sampel C sebesar $1.137,1 m^2/g$; $0,65 cc/g$. Berdasarkan data-data pengukuran di atas, terlihat bahwa kenaikan luas permukaan spesifik sebanding dengan kenaikan volume pori total. Hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi telah berlangsung dengan baik pada permukaan karbon maupun di dalam kerangka karbon.

Volume total merupakan kontribusi dari volume mesopori dan volume mikropori. Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa secara keseluruhan volume total merupakan kontribusi dominan dari volume mikropori. Berdasarkan Gambar 4.1 terlihat bahwa sample A yang menggunakan aktivator KOH saja menghasilkan nilai serapan lebih baik plateau terjadi pada nilai $550 cc/g$. Penambahan NaOH terlihat menurunkan volum yang terserap. Dari Tabel 4.1 penambahan NaOH juga menyisakan karbon yang lebih sedikit. Hal ini bisa dijelaskan berdasarkan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa KOH merupakan aktivator yang baik dalam menghasilkan mikropori [9]. Karbon nanopori dengan aktivator NaOH akan menghasilkan pori yang mayoritas dalam rentang mesopori [10]. Akan tetapi, pada penelitian ini, sampel D dengan aktivator NaOH tidak menunjukkan kondisi yang sama dengan hasil yang diperoleh pada penelitian [10].

Tabel 4.1 menunjukkan aktivasi dengan NaOH (sampel D) menyisakan sampel sebesar 16% saja sedangkan aktivasi dengan KOH (sampel A) menghasilkan sampel sebesar 22%. Kondisi ini mengindikasikan telah terjadi pembakaran lebih lanjut pada sampel D, sebelum NaOH berhasil mengaktivasi mesopori. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh proses oksidasi yang berlangsung cepat pada furnace dengan sistem yang terbuka yang tidak dilengkapi dengan sistem vakum yang baik dan gas *carrier* (N_2).

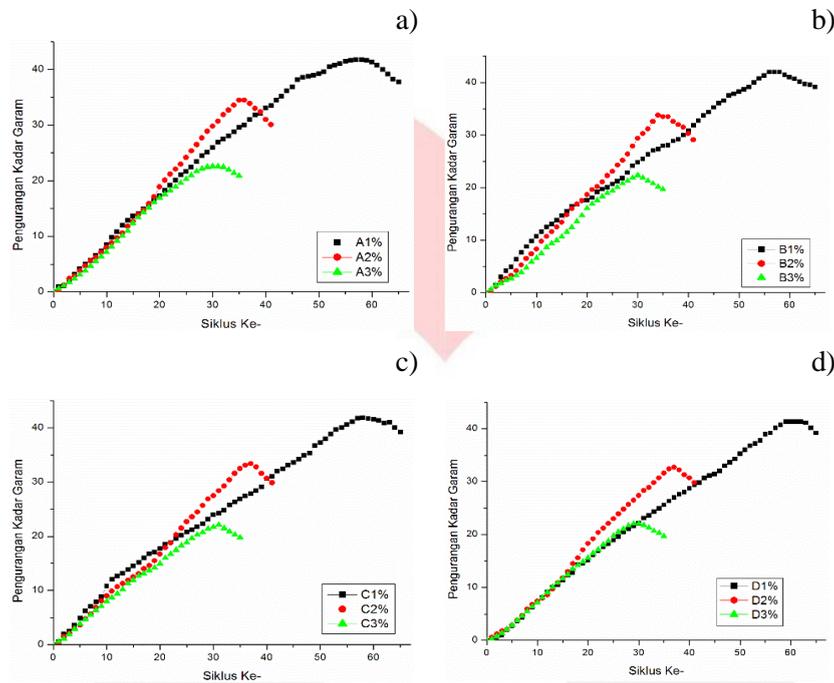
b) Hasil Uji Desalinasi

Pengujian desalinasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan sampel karbon nanopori dalam mengadsorpsi garam NaCl dengan cara menghitung perubahan konduktivitas listrik sebelum dan sesudah proses desalinasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konduktivitas listrik sebanding dengan konsentrasi garam NaCl [11].

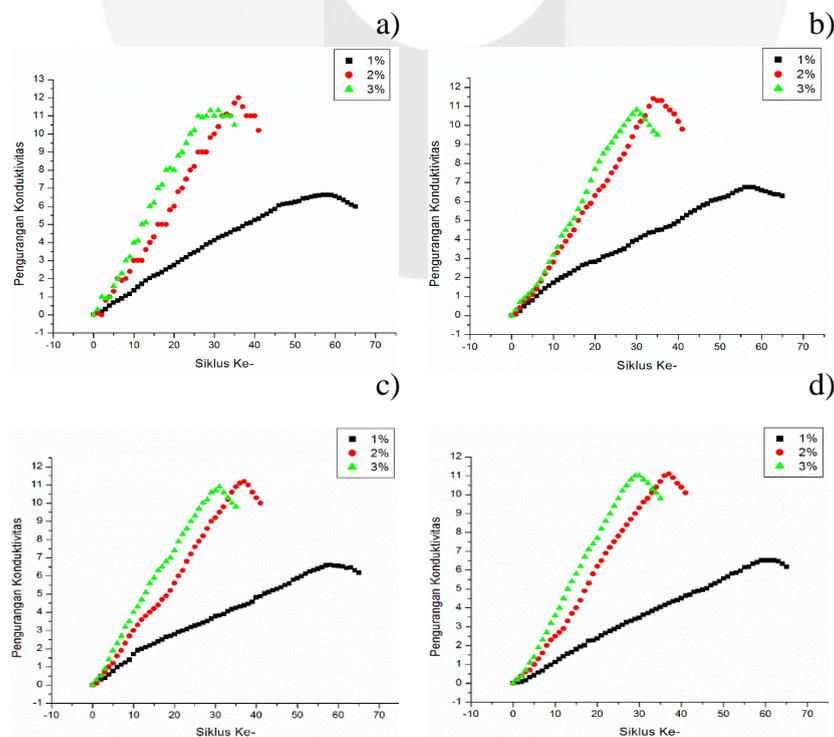


Gambar 3.2 Pengukuran Desalinasi.

Sistem pengukuran desalinasi dilakukan dengan menggunakan rancang bangun CDI yang terdiri dari sensor photodiode, pompa peristaltik dengan tegangan 1.2 volt, sel CDI dan selang infus yang diatur untuk mengalirkan larutan NaCl dengan debit 10 ml/menit [11]. Pengambilan data dilakukan beberapa siklus dengan 1 siklus selama 5 menit. Ion pada larutan NaCl yang masuk pada sel CDI akan diadsorbsi oleh permukaan elektroda dengan pemberian beda potensial yang akan menyebabkan konduktivitas larutan air garam akan berkurang.



Gambar 3.3. Kurva persentase pengurangan kadar garam pada a) A, b) B, c) C, dan d) D untuk berbagai variasi konsentrasi awal NaCl



Gambar 4.3. Grafik Pengurangan Nilai Konduktivitas

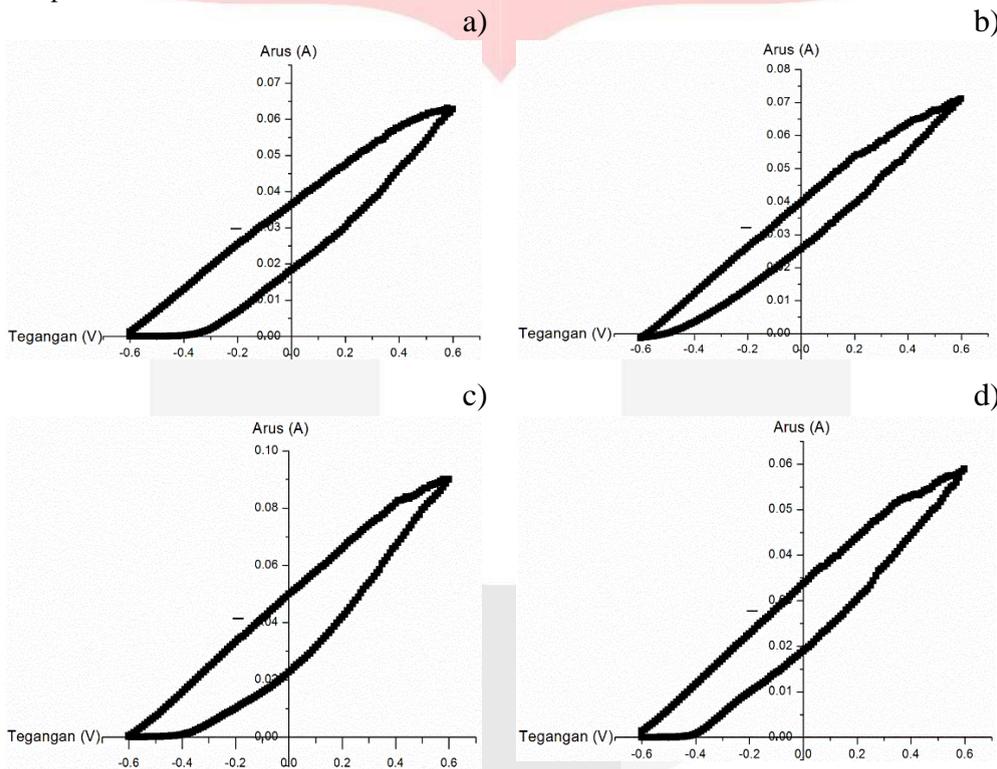
Tabel 3.2. Persentase Pengurangan Kadar Garam dan Siklus

Material	Pengurangan Kadar Garam					
	1 %	Siklus	2 %	Siklus	3 %	Siklus
A	41,8%	57	34,5%	35	22,6%	30
B	42%	56	33,8%	34	22,4%	30
C	41,9%	58	33,4%	37	22,1%	31
D	41,3%	59	32,7%	37	22,1%	29

Kurva yang diberikan pada gambar 4.3 menunjukkan pengurangan kadar garam pada beberapa konsentrasi seperti pada Tabel 4.3 Persentase pengurangan kadar garam yang maksimal untuk konsentrasi 1%, 2%, dan 3% dimiliki oleh sampel B (42%) dalam 56 siklus pengisian, sampel A (34,5%), 35 siklus pengisian dan sampel A (22,6%) untuk 30 siklus pengisian. Secara umum semakin rendah konsentrasi larutan garam NaCl yang digunakan maka proses sel menjadi jenuh dan persentase pengurangan kadar garam semakin besar. Hal ini disebabkan karena pada konsentrasi garam NaCl yang rendah, pori-pori karbon yang terisi akan lebih sedikit sehingga kurva pengurangan kadar garam mengalami saturasi yang lebih lama dibandingkan dengan sampel yang diberikan konsentrasi garam yang tinggi. Disamping itu, konsentrasi garam NaCl dapat mempengaruhi konduktivitas listrik sel CDI. Semakin besar konsentrasi garam NaCl maka konduktivitas listrik sel CDI akan semakin tinggi, akibatnya waktu adsorpsi semakin cepat sehingga siklus adsorpsi garam akan semakin singkat. Hal ini analogi dengan prinsip pengisian muatan pada kapasitor.

c) Hasil Uji Cyclic Voltammetry

Cyclic voltammetry dapat menganalisa sifat reversibel material. Sifat reversibel dapat dilihat seperti pencerminan kurva terhadap titik asalnya [8]. Dalam aplikasinya, cyclic voltammetry biasa digunakan untuk pengukuran kapasitansi.



Gambar 3.4. (a-d) Kurva Cyclic Voltammetry pada sampel A, B, C, D

Berdasarkan kurva cyclic voltammetry (Gambar 3.5), nilai kapasitansi dapat dihitung dengan Persamaan (3.6) dan (3.7)

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\int i dt}{\Delta V} \tag{3.6}$$

$$C = \frac{2 \times Q}{\Delta V} \tag{3.7}$$

sehingga diperoleh nilai kapasitansi untuk sampel A, B, C, dan D secara berurutan adalah 5,428 F/g, 3,934 F/g, 7,039 F/g, dan 4,170 F/g.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- a) Telah dihasilkan karbon nanopori dengan luas permukaan dan volume pori total yang maksimal pada sampel A dengan perbandingan karbon : KOH = 1:3. Secara umum dapat dilihat bahwa KOH merupakan aktivator yang baik untuk menghasilkan karbon nanopori dengan karakteristik pori yang optimal.
- b) Berdasarkan karakterisasi sampel karbon nanopori dan uji desalinasi dapat dilihat bahwa persentase pengurangan kadar garam dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik, volume pori total dan volume mesopori.

Daftar Pustaka

- [1] Johnson, A.M. dan J. Newman. 1971. Desalting by Means of Porous Carbon Electrodes. *J. Electrochem. Soc.*
- [2] AlMarzooqi, Faisal., Amal A. Al Ghaferi, Irfan Saadat, Nida Hilal. 2014. Application of Capacitive Deionisation in Water Desalination (a review). *Elsevier*.
- [3] Oren, Y. 2008. Capacitive deionization (CDI) for Desalination and Water Treatment-past, present, and future (a review), *Desalination*.
- [4] Dietz, Steven. 2004. Improved Electrodes for Capacitive Deionization. *Proceedings of the 2004 NSF Design, Service, and Research Conference*, Birmingham. January..
- [5] Lee, J,K, dkk. 2012. Comparable mono and bipolar connection of capacitive deionization stack in NaCl treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Vol 18: hal 763-766.
- [6] Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquerol, J., dan Siemieniewska, T. 1985. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems, *Pure Appl. Chem., IUPAC*, Great Britain, Vol 57. hal 603-619.
- [7] Yang, J., Liu, Y., Chen, X., Hu, Z., dan Zhao, G. 2008. Carbon Electrode Material with High Densities of Energy and Power, *Acta. Phys.-Chim. Sin.* Vol 24: hal 1, 13-19.
- [8] Rosi, M. 2014. Superkapasitor Berbasis Karbon Nanopori Dari Tempurung Kelapa Sebagai Penyimpan Energi. *Disertasi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [9] Romanos, J., Beckner, M., Rash, T., Firlej, L., Kuchta, B., Suppes, G., Wexler, C., dan Pfeifer, P. 2011. Nanospace engineering of KOH activated carbon. *IOP Science*. Columbia.
- [10] Roldan, S., Villar, I., Ruiz, V., Blanco, C., Granda, M., Menendez, R., Santamaria, R. 2010. *Comparison between Electrochemical Capacitors Based on NaOH- and KOH-Activated Carbon*. Oviedo, Spain: Consejo Superior de. Instituto Nacional del Carbon Investigaciones Cientificas (CSIC).
- [11] Januardi, Y. 2016. Studi Perancangan dan Realisasi Sistem Desalinasi Air Laut Menggunakan Prinsip Capacitive Deionization (CDI). Tidak dipublikasikan. Bandung, Universitas Telkom.
- [12] Himmaty, Ikhfina dan Endarko. 2013. Pembuatan Elektroda dan Perancangan *Capacitive Deionization* untuk mengurangi Kadar Garam pada Larutan Sodium Chlorida (NaCl). *Berkala Fisika*. Vol 16: hal 67-74.