



STUDI KAPASITAS ADSORPSI MOLEKUL DIBENZOTIOFEN PADA KARBON MESOPORI DENGAN MODEL GEOMETRI PORI

Study of Adsorption Capacity of Dibenzotiofen Molecules on Mesoporous Carbon with Pore Geometry Model

Maria Ulfa^{1,*} dan Farhah Nayla Fawzia²

¹Prodi Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia 57126

²Program Studi Kedokteran, Fakultas Kedokteran, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia 57126

* Untuk Korespondensi, Tel/fax (0274)545188, e-mail: ulfa.maria2015@gmail.com

Received: June 24, 2017

Accepted: August 31, 2017

Online Published: September 7, 2017

DOI : 10.20961/jkpk.v2i2.11908

ABSTRAK

Model adsorpsi pada yang simpel dan akurat untuk menggambarkan geometri pori telah dikaji dan divalidasi secara eksperimen untuk memprediksi kapasitas adsorpsi molekul dibenzotiofen pada karbon mesopori. Model didesain menurut ukuran saluran pori karbon mesopori dan penataan molekul dibenzotiofen yang masuk ke dalam pori. Untuk menguji akurasi model adsorpsi dilakukan komparasi dengan hasil analisis adsorpsi-desorpsi nitrogen untuk menghitung volume yang terisi. Hasil menunjukkan bahwa hasil eksperimen adsorpsi dbt berada dalam range nilai volume pori karbon mesopori. Hasil ini menunjukkan bahwa model geometri pori molekul dapat secara akurat memprediksi kapasitas adsorpsi suatu molekul dalam material mesopori.

Kata kunci: kapasitas adsorpsi, dibenzotiofen, karbon mesopori, geometri

ABSTRACT

Adsorption models in a simple and accurate way to describe the geometry of the pores have been studied and validated experimentally to predict the adsorption capacity dibenzotiofen molecules on mesoporous carbon. The model is designed according to the size of the pore channels of mesoporous carbon and molecular arrangement dibenzotiofen that goes into the pores. To test the accuracy of the model is done by comparison with results of analysis of nitrogen adsorption-desorption to calculate the volume filled. The results showed that the results of the experimental adsorption data are within the range of values of the pore volume of mesoporous carbon. These results indicate that the pore geometry model molecule can accurately predict the adsorption capacity of a molecule in a mesoporous material.

Keywords: the adsorption capacity, dibenzotiofen, mesoporous carbon, geometry, model

PENDAHULUAN

Perkembangan material anorganik berpori beberapa tahun terakhir ini membuka peluang perkembangan teknologi industri adsorpsi dan lingkungan. Diantara banyak material yang sedang dikembangkan oleh banyak peneliti dunia, karbon mesopori menyerap perhatian yang cukup tinggi karena keunikan sifat-sifatnya seperti sistem kontrol ukuran yang mudah selama sintesis, luas permukaan tinggi dan volume pori besar [1]–[3]. Isu inovasi di bidang energi alternatif membutuhkan material yang mampu melakukan pengolahan bahan bakar minyak ramah lingkungan. Kandungan sulfur dalam bahan bakar minyak yang beredar di pasaran cukup tinggi yang mampu menyebabkan korosi mesin dan pencemaran lingkungan akibat hujan asam[4]–[6].

Teknik adsorpsi sulfur merupakan teknik paling sederhana untuk mengurangi sulfur dalam BBM karena membutuhkan energi rendah[5]–[7]. Salah satu molekul yang mengandung sulfur dalam BBM adalah dibenzotiofen. Peran pori dan volume pori menurut beberapa penelitian sebelumnya sangat menentukan kapasitas adsorpsi suatu molekul terhadap adsorben. Hubungan antara kapasitas adsorpsi dan karakter pori karbon mesopori tidak bisa diprediksi secara akurat [8]. Model adsorpsi terkini yang menunjukkan hubungan kapasitas adsorpsi dan struktur material sangat penting untuk memilih material adsorben yang tepat dalam adsorpsi molekul-molekul bersulfur.

Ada banyak kajian model geometrik yang menjelaskan proses pengisian molekul pada material mesopori dan memprediksi

jumlah yang teradsorpsi[9]–[11]. Namun, model terkini untuk material kecil tidak tepat untuk adsorpsi molekul bersulfur yang besar. Hal ini disebabkan karena molekul bersulfur seperti tiofen, dibenzotiofen dan dimetil tiofen memiliki struktur, ukuran dan sifat molekul yang berbeda dengan molekul berukuran kecil seperti ion logam. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian khusus untuk menentukan model geometrik adsorpsi molekul berukuran besar yang akan bermanfaat dalam aplikasi adsorpsi tingkat lanjut.

Kajian model geometrik telah dilakukan oleh [11]–[13]. Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi ke dalam material adsorben dihitung dengan persamaan berikut:

$$K = \left(\frac{n_{pore} A}{n_s D} \right) \left(\frac{V_t}{S_p} \right)$$

Dimana K adalah jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi pada material adsorben, n_{pore} adalah jumlah molekul adsorbat yang terakumulasi sepanjang area penampang lintang satu pori, A (mg/mol) adalah masa molar adsorbat, n_s adalah bilangan Avogadro, D adalah dimensi terbesar satu molekul adsorbat, V_t adalah volume pori material adsorben, S_p (cm²) adalah area penampang lintang satu pori, n_{pore} dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$n_{mono} = \frac{k_{KM}}{1/2(k_{DBT})}$$

k_{KM} adalah panjang keliling mulut pori material adsorben sedangkan $k_{adsorbat}$ adalah keliling molekul adsorbat dengan asumsi adsorbat masuk ke dalam pori adsorben dengan posisi vertikal atau horisontal. Jumlah molekul adsorbat pada monolayer

dapat ditentukan. Sedangkan pada multilayer jumlah adsorbat yang masuk mengikuti rumus berikut:

$$n_{multi} = \frac{L_{KM}}{(L_{DBT})} - n_{mono}$$

L_{KM} adalah luas alas pori material adsorben sedangkan $L_{adsorbat}$ adalah keliling molekul adsorbat dengan asumsi adsorbat masuk ke dalam adsorban dengan posisi tertentu. Jumlah molekul adsorbat yang ada di multilayer dapat dihitung dengan menggunakan perbandingan tersebut.

Tujuan dari kajian ini adalah mendapatkan model terkini yang mampu memprediksi kapasitas molekul bersulfur pada material mesopori. Model dibangun berdasarkan ukuran adsorbat dan struktur pori karbon mesopori. Karbon mesopori dengan berbagai ukuran pori dipreparasi menggunakan gelatin sebagai sumber karbon dan silika sebagai cetakan. Dibenzotiofen diadsorpsi oleh karbon meso-pori kemudian kapasitas adsorpsi diprediksi. Analisis adsorpsi desorpsi dilakukan untuk memvalidasi keakuratan model.

METODE

1. Bahan

Dibenzotiofen (kemurnian >99%) diperoleh dari Sigma Aldrich, SBA-15 Six-C Factory (Wuhan China dengan luas permukaan 550 m²/g, volume pori 0,999 cc/g dan diameter pori 8,2 nm). Bahan kimia yang digunakan antaralain H₂SO₄, HF, HCl, *deionization water* dan NaOH. Semua bahan kimia yang digunakan dalam penelitian merupakan bahan murni (*analytical grade*).

2. Sintesis karbon mesopori

Karbon mesopori disintesis dengan metode cetakan keras. *Template* heksagonal *p6mm* berupa silika mesopori SBA-15 digunakan sebagai cetakan. Prosedur mengikuti step penelitian sebelumnya[14], [15]. Sebanyak 1 gram silika mesopori diimpregnasikan ke dalam larutan yang mengandung 1 g gelatin, 0,2 g asam sulfat dan 50 ml air. Campuran yang dihasilkan dikeringkan dalam oven selama 6 jam dilanjutkan 160 °C selama 6 jam. Setelah itu campuran ditambahkan dengan 25 ml larutan berisi 0,5 gram gelatin, 0,2 asam sulfat dan 25 ml air. Campuran kemudian dikeringkan lalu dipirolisis pada suhu 900 °C selama 3 jam dalam aliran nitrogen. Kemudian silika mesopori dihilangkan dengan 20% HF pada suhu ruang hingga didapatkan karbon mesopori.

3. Karakterisasi

Analisis adsorpsi-desorpsi dilakukan dengan menggunakan adsorpsi nitrogen analyzer (Quantacrome 2800P, China). Sampel karbon mesopori didegassing pada suhu 120 °C selama 13 jam. Sementara sampel yang mengandung adsorbat molekul dibenzotiofen didegassing pada suhu 50 °C selama 13 jam untuk menghilangkan air yang teradsorbi. Informasi tentang struktur pori karbon mesopori didapatkan dan jumlah adsorbat yang masuk karbon mesopori dapat dihitung. Morfologi sampel diamati dengan TEM Transmission Electron Microscopy (TEM) dioperasikan pada 120 kV dan Spektrofotometer Fourier Transform Infrared (FTIR) merk Shimadzu model 8300. Proses analisa data menggunakan program origin

7.0, Program nova-quantachrome, program scion image dan Microsoft excel.

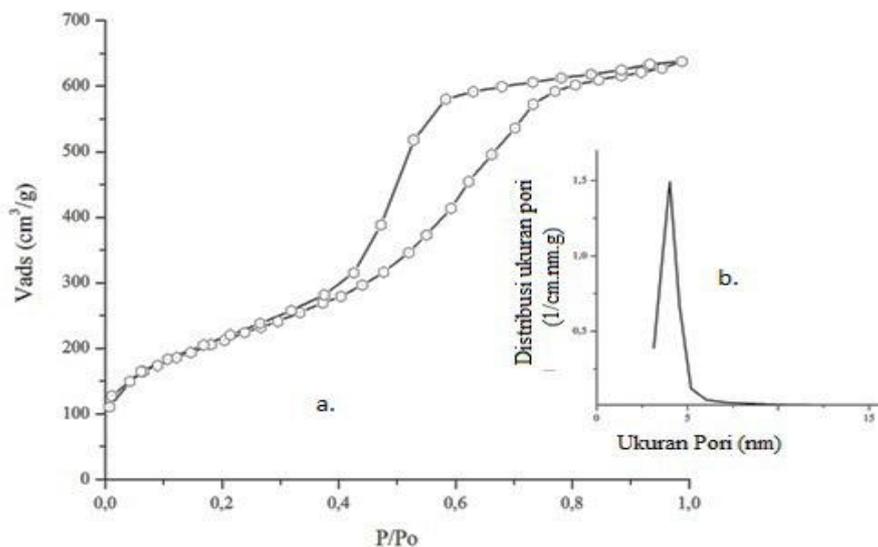
4. Adsorpsi DBT pada karbon mesopori

Larutan DBT dibuat dengan konsentrasi kisaran dari 0,25 hingga 20 mg/ml. Sebanyak 20 mg karbon mesopori dengan ukuran pori 5 nm dan 5 ml larutan DBT dicampurkan dalam tabung plastik dan diaduk dengan laju pengadukan 100 rpm pada suhu kamar selama 48 jam untuk mencapai kesetimbangan. Campuran di-sentrifuge untuk memisahkan padatan dari larutan. Konsentrasi DBT diukur menggunakan spektro UV (UV-2000, Shimadzu, USA) pada bilangan gelombang maksimum di 326 nm. Selanjutnya dilakukan penentuan

kapasitas adsorpsi maksimum. Data tersebut akan dibandingkan dengan hasil kapasitas adsorpsi model geometri.

HASIL DAN PEMBAHASAN

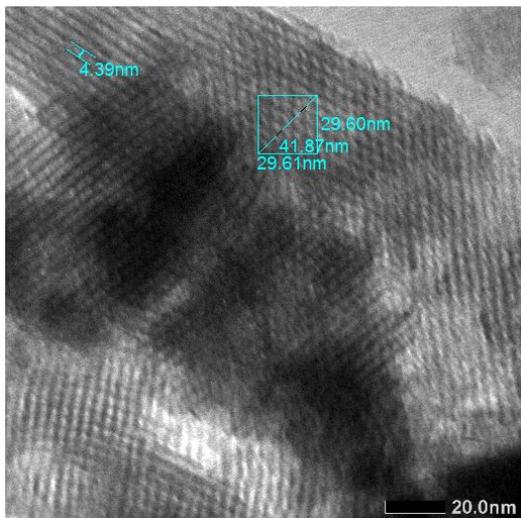
Karbon mesopori disintesis dengan metode *hard template* dengan pertimbangan bahwa dengan metode tersebut ukuran pori dapat lebih mudah dikontrol. Silika mesopori SBA-15 digunakan sebagai cetakan untuk membangun karbon mesopori dengan struktur pori hasil cetakan. Saluran pori karbon mesopori didapatkan dari dinding cetakan sehingga ukuran pori karbon mesopori merupakan ukuran ketebalan dinding cetakan.



Gambar 1. Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen pada karbon mesopori

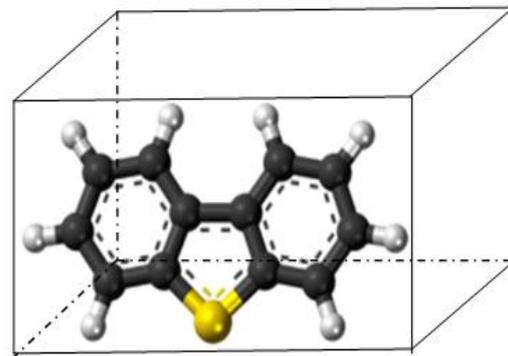
Struktur mesopori dari sampel karbon mesopori dikonfirmasi oleh isoterm tipe IV dengan loop histerisis tipe H2 pada Gambar 1. Tipe isoterm dan loop tersebut menurut klasifikasi IUPAC mengindikasikan bahwa karbon mesopori memiliki struktur pori yang sama. Gambar distribusi ukuran pori pada Gambar 1.b menunjukkan bahwa sampel

karbon memiliki keseragaman ukuran pori. Dari data adsorpsi-desorpsi nitrogen diperoleh informasi bahwa sampel karbon mesopori memiliki rata-rata ukuran pori sekitar 4,9 nm dengan volume pori 0,999 cm^3/g dan luas permukaan $760 \text{ m}^2/\text{g}$.



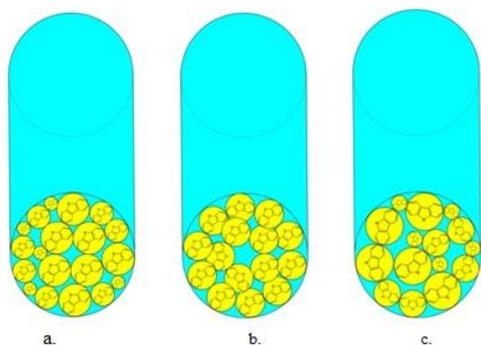
Gambar 2. Pencitraan sampel karbon mesopori menggunakan TEM

Gambar 2 adalah hasil TEM sampel karbon mesopori. Gambar TEM menunjukkan bahwa karbon mesopori memiliki struktur heksagonal dengan diameter pori sekitar 4,4 nm. Hasil pencitraan TEM memiliki kesamaan dengan hasil pengukuran rata-rata pori pada adsorpsi-desorpsi nitrogen. Gambar 2 juga melakukan pengukuran pada satu blok pori heksagonal karbon mesopori dengan tujuan mengetahui ukuran geometri material. Pengukuran difokuskan pada blok sampel yang memiliki keteraturan paling tinggi dibanding bagian lain. Hasil pengukuran pada blok homogen ini menghasilkan kesimpulan bahwa rasio pxl sampel karbon mesopori adalah 4,4 nm x 4,8 nm. Ukuran tersebut menjadi informasi awal dalam kajian model geometrik molekul DBT sebagai adsorbat karbon mesopori.



Gambar 3. Gambar Molekul dibenzotiofen

Dimensi senyawa DBT (Gambar 3) menurut penelitian Mossner (1999) memiliki ukuran $11,58 \times 7,99 \times 4,06 \text{ \AA}$ atau $1,16 \text{ nm} \times 0,79 \text{ nm} \times 0,41 \text{ nm}$. Hasil penelitian ini data gas kromatografi resolusi tinggi. Sedangkan dimensi pori karbon mesopori adalah 5,2 nm dengan volume pori sekitar $0,999 \text{ cm}^3/\text{g}$. Dengan volume pori karbon mesopori sebesar $0,999 \text{ cm}$ dan diasumsikan bentuk pori adalah pipa. Model geometri pori untuk adsorpsi dibenzotiofen pada karbon mesopori model geometri pori telah didesain menurut bentuk saluran pori karbon mesopori dan penataan molekul dibenzotiofen yang teradsorpsi ke dalamnya. Penghitungan yang rumit dapat dihindari dengan mengasumsikan bahwa ukuran molekul dibenzotiofen diasumsikan oval. Molekul dibenzotiofen diasumsikan tersusun pada paking yang padat tapi tidak saling tumpang tindih pada lapis tunggal atau lapis ganda seperti yang digambarkan pada Gambar 3. Jumlah dibenzotiofen yang teradsorbi ke dalam karbon mesopori dihitung dengan perbandingan jumlah multi dan monolayer.



Gambar 4. Model adsorpsi dengan posisi molekul DBT a. horisontal, b. vertikal dan c. Melintang

Gambar 4 adalah model geometri pori yang telah didesain berdasarkan posisi DBT sebagai adsorbat saat memasuki saluran pori karbon mesopori. Pada Gambar 4 terjadi dan penataan molekul DBT posisi horisontal, vertikal dan melintang. Untuk menghindari penghitungan yang rumit, ukuran molekul dibenzotiofen diasumsikan oval. Molekul DBT diasumsikan tersusun pada paking yang padat tapi tidak saling tumpang tindih pada lapis tunggal atau lapis ganda. Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan(1), jumlah molekul DBT pada monolayer sebanyak 9 molekul. Sedangkan pada multilayer jumlah DBT yang masuk adalah 14 molekul. Jumlah masa DBT yang teradsorpsi ke dalam karbon mesopori adalah 226 mg/g. Rasio jumlah pori monolayer terhadap multilayer adalah 0,64. Jumlah DBT yang teradsorpsi ke dalam karbon mesopori ini 3 kali lebih banyak dari hasil eksperimen. Hal ini diperkirakan karena dalam model geometri, penyusunan molekul DBT dianggap masuk ke dalam pori satu persatu, membentuk susunan yang teratur dan kompak sehingga tidak memberikan sisa ruang dalam pori. Berbeda dengan saat adsorpsi secara

eksperimental, molekul DBT kemungkinan tidak masuk satu persatu tapi bisa masuk secara bersamaan dan terjadi kompetisi antar molekul karena adanya gaya elektrostatis antara sulfur pada DBT dengan dinding karbon. Kemungkinan kedua, penataan molekul DBT tidak seragam dalam pori. Jika dalam teori geometri, penataan molekul diasumsikan seperti susunan tabung-tabung sferik yang tertata seragam dengan arah horisontal, maka dalam eksperimen diperkirakan penataan molekul merupakan penggabungan molekul horisontal dan vertikal. Hal ini memungkinkan terjadinya tumpang tindih antar molekul sehingga banyak ruang kosong yang tidak bisa ditempati oleh DBT. Kelemahan ini bisa dikurangi dengan memberikan gaya dorong dari luar melalui vakum nanopori.

Tabel 1. Adsorpsi DBT pada karbon mesopori secara experimental dan model geometri pori

Posisi molekul DBT	Ukuran molekul DBT (nm)	Kapasitas adsorpsi (mg/g)	
		Experimen	Model geometri
Horisontal	0,79 x 0,41	66,7	216,7
Vertikal	1,16 x 0,79	66,7	168,5
Melintang	1,16 x 0,41	66,7	120,7

Tabel 1 menunjukkan perbedaan kapasitas adsorpsi yang dipengaruhi oleh posisi molekul DBT ketika memasuki rongga pori karbon mesopori. Dimensi DBT disimulasikan menjadi 1,16 nm x 0,79 nm x 0,41 nm. Volume molekular DBT hasil hitungan adalah 0,987 nm³ dengan asumsi bahwa molekul berbentuk elips. Tabel 1 menggambarkan bahwa pada posisi

horizontal, jumlah molekul DBT yang bisa masuk ke pori yang tergambar dengan nilai kapasitas adsorpsi yang lebih besar dibanding posisi vertikal. Hal ini diperkirakan terjadi karena pada posisi horizontal, molekul leboh mudah masuk ke mulut pori dan terendap ke dasar pori sehingga mengoptimalkan proses adsorpsi. Sedangkan pada posisi vertikal dan melintang terjadi banyak tumpang tindih molekul DBT dimulut pori yang mengakibatkan penyumbatan selama proses adsorpsi berlangsung. Hal ini didukung ilustrasi pada Gambar 4 menunjukkan data eksperimen dan hasil kalkulasi dari model geometri pori untuk adsorpsi DBT pada karbon mesopori. Nilai yang diprediksi pada adsorpsi monolayer (K_{mono}) dan (K_{multi}) mengindikasikan bahwa model dapat secara akurat berada dalam kisaran kapasitas adsorpsi.

Untuk mengkonfirmasi model yang digunakan, eksperimen adsorpsi desorpsi nitrogen digunakan untuk mengukur volume pori dan menghitung volume yang terisi DBT pada karbon mesopori. Secara teori, volume pori yang berkurang seharusnya terisi oleh molekul DBT di dalam sampel mesopori. Rasio volume pori yang berkurang terhadap total volume pori seharusnya setara dengan rasio jumlah monolayer terhadap jumlah multilayer. Hal ini diberlakukan karena adsorpsi DBT pada karbon mesopori adalah adsorpsi monolayer. Rasio volume pori dari eksperimen yang berkurang terhadap total volume pori (V_{exp}/V_{bet}) adalah 0,999. Dan prosentasi monolayer jika di hitung dari model geometri (n_{mono}/n_{multi}) mencapai 93,5% . Hal ini mengindikasikan adsorpsi DBT pada karbon mesopori berdasarkan

model geometri dominan menghasilkan monolayer.

Konfirmasi kapasitas adsorpsi DBT pada karbon mesopori secara sistematis diinvestigasi menggunakan model adsorpsi Langmuir. Model isotherm Langmuir menunjukkan bahwa adsorpsi pada permukaan karbon mesopori merupakan adsorpsi monolayer dimana satu situs pada permukaan adsorben hanya ditempati satu molekul adsorbat. Hasil adsorpsi memiliki kesamaan dengan hasil prediksi dari proses adsorpsi DBT yang hampir keseluruhan adalah adsorpsi monolayer. Hasil kapasitas adsorpsi model Langmuir sebesar 67 mg/g, sedangkan kapasitas adsorpsi maksimum DBT model geometri sebesar 216 mg/g. Perbedaan ini diperkirakan karena pada Langmuir, posisi DBT melintang sehingga membutuhkan ruang lebih besar. Sedangkan pada model geometri, kapasitas adsorpsi karbon mesopori terhadap DBT besar karena posisi DBT horizontal homogen disemua situs adsorben. Namun kapasitas adsorpsi baik model Langmuir maupun model geometri pori tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan jika penempatan posisi DBT pada posisi melintang. Keseluruhan hasil investigasi adsorpsi DBT pada karbon mesopori dengan model geometri menunjukkan metode geometri memiliki akurasi tinggi dalam memperkirakan kapasitas adsorpsi suatu material.

KESIMPULAN

Model adsorpsi untuk menggambarkan geometri karbon mesopori menghasilkan kapasitas adsorpsi terhadap molekul

dibenzotiofen sebesar 216 mg/g dengan posisi DBT melintang. Hasil analisis adsorpsi DBT metode Langmuir menunjukkan kapasitas adsorpsi karbon mesopori terhadap DBT sebesar 66 mg/g. Perbedaan ini terjadi karena perbedaan cara pandang dalam penempatan posisi DBT ketika memasuki pori karbon mesopori. Kapasitas adsorpsi DBT baik dari eksperimen maupun menggunakan model geometrik berada pada kisaran 65-70 mg/g. Hasil ini menunjukkan bahwa model geometri pori molekul dapat secara akurat memprediksi kapasitas adsorpsi suatu molekul dalam material mesopori.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada para teknisi nitrogen adsorpsi desorpsi serta TEM di UNNES, Perpustakaan Pusat UGM, Perpustakaan Pusat UNS, PNRI (Perpustakaan Negara Republik Indonesia), UPM Library Malaysia dan teman-teman di Queensland University yang telah memberikan bantuan baik berupa karakterisasi dan penyediaan referensi dalam penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. H. Liou, "Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation," *Chem. Eng. J.*, vol. 158, no. 2, pp. 129–142, 2010.
- [2] S. Nagamine, K. ichi Kurumada, M. Tanigaki, and A. Endo, "Effects of catalytic acid and templating surfactant concentrations on mesostructure of submillimeter-thick mesoporous silica by solvent evaporation synthesis," *Micro-porous Mesoporous Mater.*, vol. 49, no. 1–3, pp. 57–64, 2001.
- [3] L. Calvillo, R. Moliner, and M. J. Lázaro, "Modification of the surface chemistry of mesoporous carbons obtained through colloidal silica templates," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 118, no. 1, pp. 249–253, 2009.
- [4] A. Zhou, X. Ma, and C. Song, "Effects of oxidative modification of carbon surface on the adsorption of sulfur compounds in diesel fuel," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 87, no. 3–4, pp. 190–199, 2009.
- [5] C. Song and X. Ma, "New design approaches to ultra-clean diesel fuels by deep desulfurization and deep dearomatization," vol. 41, pp. 207–238, 2003.
- [6] J. Bu, G. Loh, C. G. Gwie, S. Dewiyanti, M. Tasrif, and A. Borgna, "Desulfurization of diesel fuels by selective adsorption on activated carbons: Competitive adsorption of polycyclic aromatic sulfur heterocycles and polycyclic aromatic hydrocarbons," vol. 166, pp. 207–217, 2011.
- [7] C. Song, "An overview of new approaches to deep desulfurization for ultra-clean gasoline, diesel fuel and jet fuel &," vol. 86, pp. 211–263, 2003.
- [8] N. Farzin Nejad, E. Shams, M. K. Amini, and J. C. Bennett, "239-246 Ordered mesoporous carbon CMK-5 as a potential sorbent for fuel desulfurization: Application to the removal of dibenzothiophene and comparison with CMK-3," *Micro-porous Mesoporous Mater.*, 2013.
- [9] J. Lee, S. H. Joo, and R. Ryoo, "Synthesis of mesoporous carbons with various pore diameters via control of pore wall thickness of mesoporous silicas," pp. 33–36, 2003.
- [10] J. Ramı and P. Castillo-villalo, "Transformation of thiophene, benzo-thiophene and dibenzothiophene over Pt / HMF1, Pt / HMOR and Pt / HFAU: Effect of reactant molecular dimensions and zeolite pore diameter over catalyst activity," vol. 130, pp. 320–326, 2008.

- [11] Y. Gao *et al.*, "A geometric pore adsorption model for predicting the drug loading capacity of insoluble drugs in mesoporous carbon," *Int. J. Pharm.*, vol. 485, no. 1–2, pp. 25–30, 2015.
- [12] K. Ariga, A. Vinu, J. P. Hill, and T. Mori, "Coordination chemistry and supramolecular chemistry in mesoporous nanospace," *Coord. Chem. Rev.*, vol. 251, no. 21–24, pp. 2562–2591, 2007.
- [13] G. Tzvetkov, B. Tsyntsarski, and K. Balashev, "Microstructural investigations of carbon foams derived from modified coal-tar pitch," *Micron*, vol. 89, pp. 34–42, 2016.
- [14] M. Ulfa, W. Trisunaryanti, I. Falah, and I. Kartini, "Synthesis of Mesoporous Carbon using Gelatin as A Carbon Source and SBA-15 as A Template for Dibenzothiophene Adsorption," vol. 9, no. 9, p. 9555, 2016.
- [15] M. Ulfa, W. Trisunaryanti, I. I. Falah, and I. Kartini, "Wormhole-Like Mesoporous Carbons from Gelatine as Multistep Infiltration Effect," *Indones. J. Chem.*, vol. 16, no. 3, pp. 239–242, 2016.