



## Pengaruh Variasi Suhu Hidrotermal dan Aktivator Kalium Hidroksida (KOH) terhadap Kemampuan *Hydrochar* sebagai Adsorben pada Proses Adsorpsi Limbah Cair Metilen Biru

Aziz Askaputra<sup>1</sup> dan Ahmad Tawfieurrahman Yuliansyah<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jln. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281

<sup>2</sup>Waste Refinery Center, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jln. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281)

\*Alamat korespondensi: [atawfieq@ugm.ac.id](mailto:atawfieq@ugm.ac.id)

([Submisi](#): 29 Juni 2020; [Revisi](#): 28 September 2020; [Penerimaan](#): 10 Oktober 2020)

### ABSTRACT

*Oil palm shell is one of biomass-wastes which is abundantly found in palm oil industries. Its economical value can be enhanced by converting it into hydrochar using a hydrothermal carbonization process (HTC). In this study, preparation of oil palm shell hydrochar was performed and the material was used as adsorbent to remove methylene blue from waste water. Effects of HTC temperature, KOH activator concentration, and adsorption time were studied. Functional groups of hydrochar were evaluated by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. Meanwhile, the uptake capacity of hydrochar to adsorb methylene blue was measured by using UV-Vis spectrophotometer. The results showed that dehydration and decarboxylation reactions took place more progressively at the higher temperature of HTC. It was also found that activation process resulted higher removal efficiency of methylene blue. The highest adsorption capacity (16.58 mg/g, with removal efficiency 99.51%) was obtained by hydrochar prepared by HTC 270°C, KOH 1.5 N, and carried out for 80 minutes.*

*Keywords: activator; adsorption; hydrothermal carbonization; methylene blue; oil palm shell*

### ABSTRAK

Tempurung kelapa sawit merupakan salah satu limbah biomassa yang jumlahnya cukup melimpah di industri minyak kelapa sawit. Nilai ekonomi tempurung kelapa sawit dapat ditingkatkan, salah satunya melalui *hydrothermal carbonization process* (HTC). Dalam penelitian ini, *hydrochar* dari tempurung kelapa sawit dibuat dan digunakan sebagai adsorben untuk menyerap metilen biru dari limbah cair. Dalam hal ini, akan dipelajari pengaruh suhu HTC, konsentrasi aktivator KOH, dan durasi adsorpsi. Gugus fungsional *hydrochar* dianalisis dengan FT-IR *spectroscopy*, sementara itu kapasitas adsorpsi terhadap metilen biru diukur dengan spektrofotometer UV-Vis. Hasil percobaan menunjukkan bahwa reaksi dehidrasi dan

dekarboksilasi pada kondisi hidrotermal terjadi lebih cepat pada suhu HTC yang lebih tinggi. Selain itu, proses aktivasi dengan KOH terbukti dapat meningkatkan efisiensi penyisihan metilen biru. Kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 16,58 mg/g (dengan efisiensi penyisihan 99,51%) dihasilkan dari adsorpsi dengan menggunakan *hydrochar* yang diperoleh dari HTC suhu 270 °C, diaktivasi dengan KOH 1,5 N dan durasi adsorpsi selama 80 menit.

**Kata kunci:** adsorpsi; aktivator; karbonisasi hidrotermal; metilen biru; tempurung kelapa sawit

## 1. Pendahuluan

Salah satu limbah yang kerap dihasilkan dalam jumlah banyak oleh industri adalah limbah cair sisa pewarnaan. Limbah tersebut umumnya merupakan senyawa organik yang sukar diurai oleh lingkungan. Metilen biru merupakan salah satu pewarna yang sering digunakan pada industri untuk pewarna kertas dan indikator pada laboratorium. Gugus benzena yang dimiliki oleh metilen biru menyebabkan zat warna ini sulit diuraikan (Christina dkk., 2007). Jika keberadaannya cukup tinggi di perairan maka akan mengurangi intensitas cahaya matahari yang masuk ke perairan sehingga mengganggu proses fotosintesis yang dilakukan oleh tumbuhan perairan. Metilen biru memiliki sifat toksik yang dalam konsentrasi tertentu dapat memberikan efek buruk bagi lingkungan dan makhluk hidup, bahkan dapat menyerang susunan syaraf pusat pada manusia. Senyawa ini juga dapat menyebabkan mutasi genetik dan berpengaruh pada sistem reproduksi.

Berbagai cara perlu dilakukan untuk menurunkan kadar metilen biru sebelum dibuang ke lingkungan. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan metode adsorpsi. Pada metode ini, senyawa metilen biru dijerap oleh suatu media yang disebut adsorben. Teknologi adsorpsi dapat digunakan untuk mengurangi polutan dari

limbah cair dengan cara pengoperasian yang mudah. Di sisi lain, permintaan adsorben berkualitas terus meningkat, sehingga diperlukan metode dan bahan alternatif dalam pengembangan adsorben.

Tempurung kelapa sawit adalah salah satu bahan alternatif yang dapat diperoleh dari limbah pabrik pengolahan kelapa sawit. Tempurung kelapa sawit tidak mempunyai nilai ekonomis yang tinggi, namun jika diabaikan dan dibiarkan berserakan akan mengotori lingkungan dan jika dibakar di dalam insinerator akan menyebabkan pencemaran udara (Mulia, 2008). Dengan asumsi kapasitas produksi 30 ton/jam dan waktu operasi 24 jam/hari, maka industri kelapa sawit dapat menghasilkan 50,4 ton tempurung setiap harinya (Purwaningsih dkk., 2000). Dengan memanfaatkan limbah tempurung kelapa sawit sebagai adsorben, maka dua permasalahan lingkungan dapat diselesaikan secara bersamaan.

Dalam penelitian ini tempurung kelapa sawit dijadikan bahan baku *hydrochar* untuk dilihat kemampuannya sebagai adsorben. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh suhu proses hidrotermal, konsentrasi aktivator basa, dan waktu kontak adsorpsi terhadap kemampuan penjerapan metilen biru oleh *hydrochar* tempurung kelapa sawit.

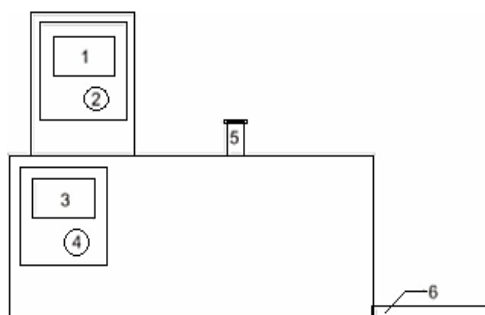
## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah: tempurung kelapa sawit yang diperoleh dari pabrik kelapa sawit PT Socfindo di Sei Liput, Sumatera Utara. Kalium hidroksida (KOH) dan metilen biru diperoleh dalam fase padat dari Merck.

### 2.2 Alat Penelitian

Alat penelitian terdiri dari 2 rangkaian alat utama, yaitu: alat HTC dan alat uji adsorpsi. Skema alat HTC yang digunakan untuk memproduksi *hydrochar* dapat dilihat pada publikasi sebelumnya (Irsan dkk., 2019), sedangkan rangkaian alat uji adsorpsi menggunakan *shaker waterbath* disajikan pada Gambar 1.



Keterangan:

1. Indikator kecepatan pengadukan
2. Knop pengatur kecepatan pengadukan
3. Indikator suhu
4. Knop pengatur suhu
5. Erlenmeyer berisi adsorben dan larutan
6. Selang pengeluaran air

**Gambar 1.** Rangkaian alat uji adsorpsi

## 2.3 Cara Penelitian

### 2.3.1 Preparasi bahan baku

Tempurung kelapa sawit dibersihkan sabutnya kemudian dipotong kecil-kecil dan dihaluskan dengan menggunakan *grinder*. Tempurung kelapa sawit yang telah halus lalu diayak menggunakan ayakan Tyler 32 mesh

dan 48 mesh sehingga diperoleh sampel tempurung kelapa sawit dengan ukuran 0,4 mm.

### 2.3.2 Proses hidrotermal

Tempurung kelapa sawit yang berukuran -32+48 mesh ditimbang sebanyak 15 gram. Ditambahkan akuades sebanyak 150 mL sehingga diperoleh campuran dengan rasio massa tempurung kelapa sawit/volume akuades 1/10. Campuran tersebut dimasukkan ke autoklaf. Rangkaian alat autoklaf ditutup hingga benar-benar rapat. Kemudian gas  $N_2$  dimasukkan ke dalam autoklaf hingga indikator tekanan menunjukkan angka 5 bar *gauge*. Setelah mencapai tekanan 5 bar *gauge*, katup yang mengarah ke tangki  $N_2$  ditutup, sedangkan katup pembersih (*purge valve*) dibuka hingga indikator tekanan menunjukkan angka 0 bar *gauge*. Kemudian *purge valve* ditutup dan autoklaf kembali diisi dengan gas  $N_2$ . Siklus pencucian gas di dalam autoklaf menggunakan  $N_2$  dilakukan sebanyak 3 kali. Setelah 3 kali pencucian, gas  $N_2$  kembali dimasukkan ke dalam autoklaf hingga indikator tekanan menunjukkan angka 10 bar *gauge*. Pengaduk dalam autoklaf kemudian dinyalakan dan pemanas juga dinyalakan sampai diperoleh suhu operasi pada 300 °C. Setelah mencapai suhu yang diinginkan, proses hidrotermal dipertahankan selama 30 menit. Setelah itu pemanas dimatikan hingga suhu slurry mencapai suhu lingkungan. Selanjutnya *slurry* diambil dari dalam autoklaf dan dipisahkan antara produk padat dan cairnya dengan proses filtrasi vakuum menggunakan kertas saring Whatman dan corong Buchner. Padatan yang diperoleh kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 4 jam untuk mendapatkan

produk akhir berupa *hydrochar*. Percobaan diulangi dengan suhu operasi 240 °C dan 270 °C.

### 2.3.3 Aktivasi *hydrochar*

Sebanyak 4 gram *hydrochar* dicampur dengan 100 mL larutan KOH 0,5 N dan diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 1 jam. Larutan kemudian disaring dengan proses filtrasi vakum menggunakan kertas saring Whatman dan corong Buchner. *Hydrochar* yang sudah disaring lalu dicuci menggunakan akuades sambil diaduk hingga pH mendekati netral saat diukur dengan pH meter. Selanjutnya disaring lagi dan hasil padatnya dikeringkan dalam oven 105 °C selama 4 jam. Percobaan diulangi dengan KOH konsentrasi 1 N dan 1,5 N.

### 2.3.4 Adsorpsi metilen biru oleh *hydrochar*

*Hydrochar* sebanyak 0,3 g dicampur dengan 25 mL larutan metilen biru dalam gelas beker sehingga diperoleh campuran dengan rasio massa tempurung kelapa sawit/volume metilen biru 3/250. Campuran tersebut diletakkan di atas pengaduk (*shaker*) penangas air dan diaduk pada suhu ruangan selama 40 menit. Setelah itu campuran disaring dengan 0,45-µm *nylon filter* dan larutan hasil filtrasi dianalisis. Percobaan diulangi untuk waktu kontak selama 60 dan 80 menit. Analisis dengan spektrofotometer UV/Vis dilakukan untuk menentukan konsentrasi metilen biru dalam larutan sebelum dan sesudah adsorpsi. Metode yang digunakan untuk menentukan konsentrasi adalah metode kurva standar.

### 2.3.5 Analisis Bahan Baku

*Hydrochar* yang diperoleh dianalisis dengan FTIR untuk mengevaluasi gugus

fungsi pada permukaan. Perhitungan produk hidrotermal dilakukan dengan menggunakan Persamaan (1-3).

$$\% Yield = \frac{m_i}{m_o} \times 100 \quad (1)$$

$$q = \frac{(C_o - C_e).V}{m} \quad (2)$$

$$\% removal = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \quad (3)$$

dengan,

*% Yield* = *hydrochar* hasil proses hidrotermal, %

*m<sub>o</sub>* = massa awal tempurung kelapa sawit, g

*m<sub>i</sub>* = massa akhir *hydrochar*, g

*q* = massa metilen biru teradsorpsi per massa adsorben, mg/g

*C<sub>o</sub>* = konsentrasi awal larutan metilen biru, mg/L

*C<sub>e</sub>* = konsentrasi akhir larutan metilen biru hasil adsorpsi, mg/L

*V* = volume larutan metilen biru, L

*m* = massa adsorben arang tempurung kelapa sawit, g

*% removal* = persentase metilen biru teradsorpsi, %

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Preparasi *Hydrochar*

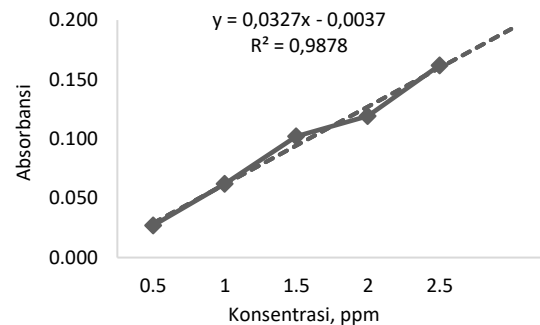
Pada penelitian ini, tempurung kelapa sawit dikonversi menjadi *hydrochar* sebagai adsorben dengan degradasi termal yaitu *hydrothermal treatment*. Kemampuan menyerap polutan oleh *hydrochar* dipengaruhi bentuk pori yang terbentuk hasil dari aktivasinya baik oleh jumlah, bentuk, luas permukaan maupun volume porinya. Hal lain yang juga berpengaruh terhadap daya jerap dari *hydrochar* adalah berat molekul polutan, gugus fungsi, posisi gugus fungsi, ikatan

rangkap dan struktur rantai dari senyawa serapan (Budiman dkk, 2019). Ikatan fisik dan kimia bahan akan putus dan mengubah senyawa rantai panjang menjadi lebih pendek. Selanjutnya, beberapa molekul larut dalam cairan dan beberapa yang lain terdegradasi ke dalam fase gas. Residu padat yang didapat memiliki morfologi yang dapat menunjang pemanfaatannya sebagai adsorben. Dengan proses karbonasi hidrotermal didapatkan *hydrochar* dengan gugus fungsional yang kaya oksigen di permukaannya sehingga memiliki afinitas yang tinggi untuk melakukan adsorpsi. *Biochar* yang dihasilkan dari proses hidrotermal merupakan padatan berpori dan amorf yang memiliki gugus fungsional aktif (hidroksil/fenolik, karboksilat, dan karbonil) (Kumar dkk, 2011). Gugus-gugus fungsi tersebut bersifat polar yang penting dan dapat berperan dalam proses pengikatan senyawa metilen biru. Karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit yang diperoleh dengan aktivasi uap konvensional memiliki luas permukaan BET dan mikropori masing-masing 620,45 m<sup>2</sup>/g dan 550,4 m<sup>2</sup>/g (Affam, 2020).

### 3.2 Kurva Standar Absorbansi Metilen Biru

Absorbansi zat warna metilen biru diukur dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 627,4 nm. Tujuan pembuatan kurva standar adalah menunjukkan hubungan antara absorbansi dengan konsentrasi metilen biru. Semakin besar konsentrasi larutan metilen biru, semakin besar pula nilai absorbansinya. Dari kurva standar yang ditunjukkan pada Gambar 2 diperoleh persamaan regresi linear  $y = 0,0327x - 0,0037$  dengan  $R^2 = 0,9878$ , dengan  $y$  adalah absorbansi dan  $x$  adalah konsentrasi

metilen biru. Persamaan tersebut kemudian digunakan untuk menentukan konsentrasi metilen biru setelah adsorpsi.



**Gambar 2.** Kurva standar larutan metilen biru pada UV-Vis

### 3.3 Pengaruh Suhu Hidrotermal pada Yield *Hydrochar*

Tabel 1 menunjukkan suhu hidrotermal memberikan efek yang signifikan terhadap produk padat yang diinginkan. Peningkatan suhu akan menyebabkan penurunan jumlah produk padat hasil hidrotermal, karena pada suhu yang lebih tinggi molekul dengan rantai karbon panjang yang terputus dan berubah menjadi molekul yang lebih kecil dan sederhana akan bertambah. Molekul sederhana tersebut sebagian larut pada fase cair dan terdegradasi lebih lanjut menjadi fase gas. Hal tersebut sesuai dengan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Pada proses hidrotermal dengan suhu 200-300 °C akan diperoleh *hydrochar* 35-65% massa bahan baku awal. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya (Yuliansyah dkk., 2010).

Kenaikan suhu juga berpengaruh pada keberadaan gugus fungsi. Semakin tinggi suhu hidrotermal akan menyebabkan penurunan jumlah gugus fungsi seperti -OH (~3500 cm<sup>-1</sup>), CH<sub>n</sub> (~2900 cm<sup>-1</sup>), dan C=O (~1700-1740 cm<sup>-1</sup>) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Penurunan gugus -OH dapat

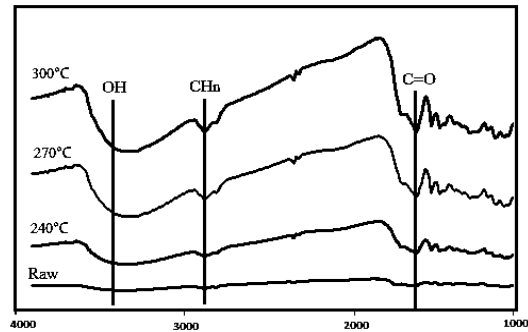
diakibatkan oleh berkurangnya kandungan air pada suhu yang lebih tinggi. Penurunan gugus CH<sub>n</sub> dan C=O membuktikan adanya pemutusan rantai alifatik dan karbonil untuk suhu yang lebih tinggi. Gugus hidroksil dan karbonil yang ada pada tempurung kelapa sawit akan semakin turun jumlahnya bila suhu semakin tinggi, padahal kedua gugus tersebut memegang peran cukup penting dalam proses adsorpsi.

cm<sup>3</sup>/g dan 239,803 Å; 10,9022 m<sup>2</sup>/g; 0,039202 cm<sup>3</sup>/g (Sabzoi dkk, 2015).

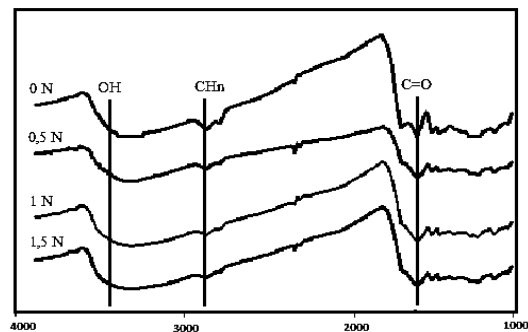
**Tabel 1.** Yield Hydrochar Proses HTC

| Suhu, °C | Massa Awal (gram) | Massa Akhir (gram) | Yield Rata-rata, % |
|----------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 240      | 15,05             | 7,96               | 52,39              |
|          | 15,01             | 7,79               |                    |
| 270      | 15,01             | 7,17               | 43,94              |
|          | 15,01             | 6,02               |                    |
| 300      | 15,02             | 4,82               | 35,55              |

Suhu juga memberikan pengaruh pada morfologi *hydrochar*. Luas permukaan *hydrochar* dipengaruhi oleh perlakuan suhu pada proses pembuatan (Liu dan Zhang, 2010). Semakin tinggi suhu hidrotermal, semakin banyak pula pori-pori yang terbentuk pada permukaan *hydrochar* sehingga permukaannya menjadi lebih luas, karena semakin tinggi suhu akan menyebabkan peningkatan dekomposisi biomassa. Semakin tinggi suhu aktivasi, kristalinitas dan ukuran pori akan meningkat, sebaliknya jumlah senyawa kimia penyusun *hydrochar* aktif semakin berkurang (Lempang dkk., 2011). Pada penelitian sebelumnya, karakteristik ukuran pori (diameter pori rata-rata, luas permukaan BET, total volume pori) pada tempurung kelapa sawit dan *hydrochar* untuk suhu hidrotermal 240 °C berturut-turut adalah 45,1133 Å; 0,3106 m<sup>2</sup>/g; 0,001292



(a)



(b)

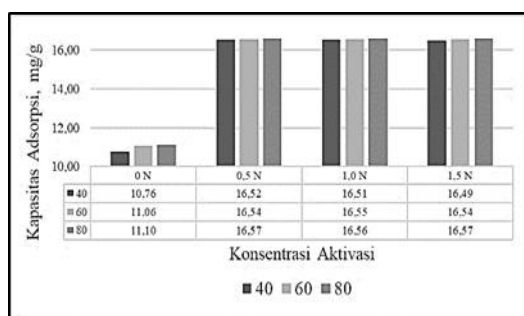
**Gambar 3.** Spektra FT-IR *hydrochar* (a) variasi suhu; (b) variasi aktivator KOH

Gambar 3 merupakan spektra FT-IR yang menunjukkan komposisi gugus fungsi *hydrochar* pada masing-masing suhu hidrotermal. Suhu 270 °C memberikan hasil yang paling optimum karena intensitas gugus OH dan C=O berturut-turut dari yang terbesar adalah *hydrochar* 240 °C > 270 °C > 300 °C, sedangkan permukaan pori berturut-turut dari yang terluas adalah untuk *hydrochar* 300 °C > 270 °C > 240 °C. Dengan demikian diperlukan kompromi dalam menentukan suhu hidrotermal.

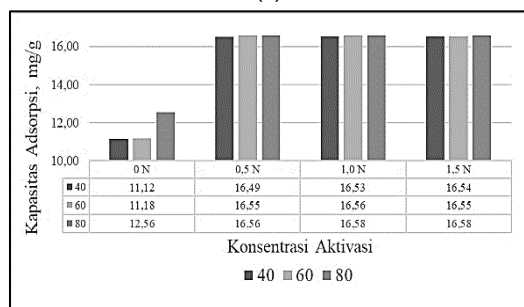
### 3.4. Pengaruh Konsentrasi KOH pada Hydrochar

Aktivasi karbon dilakukan secara kimia dengan penambahan larutan KOH dengan variasi konsentrasi 0 N; 0,5 N; 1 N; dan 1,5 N selama 1 jam. Tahap ini bertujuan untuk

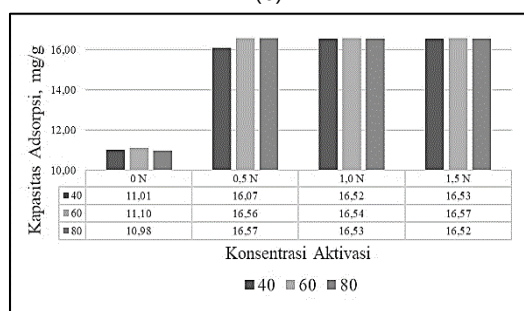
membentuk lebih banyak pori-pori karbon sehingga kualitasnya meningkat. Larutan KOH yang bereaksi dengan atom karbon selama proses aktivasi dapat mengakibatkan pembentukan struktur pori baik itu mikropori, mesopori, maupun pori eksternal (Kaewtrakulchai dkk. 2020). Hal tersebut dapat terjadi karena larutan KOH dapat membersihkan pengotor yang terbentuk saat proses hidrotermal, sehingga struktur karbon akan menjadi lebih baik.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 4.** Kapasitas adsorpsi *hydrochar* (a) 240 °C; (b) 270 °C; (c) 300 °C

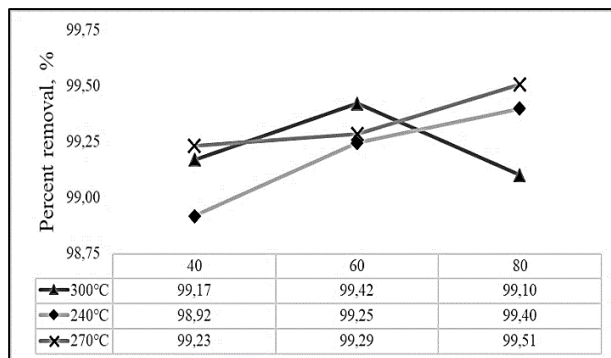
Terdapat perbedaan yang signifikan pada kapasitas adsorpsi *hydrochar* yang tidak diaktivasi dengan *hydrochar* yang sudah

diaktivasi. Untuk waktu adsorpsi 40 menit, *hydrochar* dengan suhu 240 °C, 270 °C, dan 300 °C yang tidak diaktivasi memberikan kapasitas adsorpsi berturut-turut 10,76 mg/g, 11,12 mg/g, dan 11,01 mg/g. Sedangkan *hydrochar* teraktivasi memberikan kapasitas berturut-turut 16,52 mg/g, 16,49 mg/g, dan 16,07 mg/g. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya bahwa dengan penambahan aktivator KOH akan meningkatkan *surface area hydrochar hydrothermal* (Regmi dkk. 2012). Sedangkan kenaikan konsentrasi aktivator KOH tidak memberikan perubahan yang signifikan pada perubahan kapasitas penyerapan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.

### 3.5 Adsorpsi Metilen Biru dengan *Hydrochar*

Pada variasi waktu kontak 40, 60, dan 80 menit dengan perbandingan 0,3 g *hydrochar* dan 25 mL larutan metilen biru 200 ppm menunjukkan kecenderungan yang linear antara waktu kontak adsorpsi dengan penurunan konsentrasi metilen biru. Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak adsorben dengan larutan, maka semakin tinggi pula penurunan konsentrasi metilen biru di dalam larutan tersebut.

Kenaikan persen penyisihan (*percent removal*) akan terus berlangsung hingga tercapainya kondisi setimbang. Namun pada *hydrochar* dengan suhu hidrotermal 300 °C kondisi setimbang dapat tercapai kurang dari 80 menit. Hal tersebut ditandai dengan nilai persen penyisihan yang mulai konstan dan nilainya yang justru lebih rendah untuk waktu kontak 80 menit. Berturut-turut nilai persen penyisihan metilen biru pada 40, 60, dan 80 menit untuk *hydrochar* 300 °C KOH 1,5 N adalah 99,17%; 99,42%; dan 99,10%.



**Gambar 5.** Pengaruh waktu kontak terhadap *percent removal* dengan aktivator KOH 1,5 N

#### 4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah proses hidrotermal mampu meningkatkan luas permukaan tempurung kelapa sawit sehingga dapat digunakan sebagai adsorben. Peningkatan suhu hidrotermal tidak menghasilkan perbedaan signifikan pada proses adsorpsi, karena adanya *trade off* penambahan luas permukaan pori dan penurunan jumlah gugus fungsional. Aktivasi dengan KOH secara signifikan dapat menaikkan kapasitas adsorpsi, yang ditandai dengan semakin meningkatnya nilai *percent removal*, namun penambahan konsentrasi aktivator KOH tidak berpengaruh secara signifikan. Selain itu, semakin lama waktu kontak adsorpsi, semakin besar pula nilai *percent removal*.

#### Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial terhadap penelitian ini dari Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada melalui kegiatan Hibah Penelitian Departemen Teknik Kimia UGM.

#### Daftar Pustaka

Affam, A.C., 2020, Conventional steam activation for conversion of oil palm kernel

shell biomass into activated carbon via biochar product, *Global J. Environ. Sci. Manage.*, 6(1), 15–30.

Budiman, I., Hermawan, D., Febrianto, F., Subyakto, dan Gustan, P., 2019, Optimasi aktivasi arang aktif dari arang hidro tempurung buah kelapa sawit menggunakan metodologi permukaan respon (Optimization of activated carbon from oil palm shell hydrochar using response surface methodology), *J. Ilmu Teknol. Kayu Tropis*, 17, 8–21.

Christina P., Mu'nisatun S., Saptajaji, R., dan Marjanto., D., 2007, Studi pendahuluan mengenai degradasi zat warna azo (metil orange) dalam pelarut air menggunakan berkas elektron 340 keV/10 mA, *Jurnal Forum Nuklir*, 1 (1), 31–44

Irsan, M., Yuliansyah, A.T., and Purwono, S., 2019, Production of solid fuel material from coconut shells with hydrothermal treatment method, *Konversi*, 8(1), 4–9.

Kaewtrakulchai, N., Faungnawakij, K., and Eiad-Ua A., 2020, Parametric study on microwave-assisted pyrolysis combined koh activation of oil palm male flowers derived nanoporous carbons, *Materials*, 13(12), 2876.

Kumar, S., Loganathan, V. A., Gupta, R. B., and Barnett, M. O., 2011, An assessment of U(VI) removal from groundwater using biochar produced from hydrothermal carbonization, *J. Environ. Manage.*, 92 (10), 2504–2512.

Lempang, M., Syafii, W., dan Pari, G., 2011, Struktur dan komponen arang serta arang aktif tempurung kemiri, *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 29 (3), 278–294.

Liu, Z. and Zhang, F., 2009, Removal of lead from water using biochars prepared from



- hydrothermal liquefaction of biomass, *J. Hazard. Mater.*, 167 (1-3): 933–939.
- Mulia, A., 2008, Pemanfaatan tandan kosong dan tempurung kelapa sawit sebagai briket arang, Universitas Sumatera Utara.
- Purwaningsih, S., Arung, E. T., dan Muladi, S., 2000, Pemanfaatan Arang Aktif Tempurung Kelapa Sawit sebagai Adsorben pada Limbah Cair Kayu Lapis, Thesis, Fakultas Kehutanan Universitas Mulawarman Samarinda.
- Regmi, P., Garcia Moscoso, J. L., Kumar, S., Cao, X., Mao, J., and Schafran, G., 2012, Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process, *J. Environ. Manage.*, 109, 61–69.
- Nizamuddin, S., Jayakumar, N. S., Sahu, J. N., Ganesan, P., Bhutto, A. W., and Mubarak, N. M., 2015, Hydrothermal carbonization of oil palm shell, *Korean J. Chem. Eng.*, 32, 1–9.
- Yuliansyah, A. T., Hirajima, T., Kumagai, S., and Sasaki, K., 2010, Production of solid biofuel from agricultural wastes of the palm oil industry by hydrothermal treatment, *Waste Biomass Valorization*, 1 (4), 395–405.
-