

## Activation of Carbon Using Microwave-Assisted Hydrochloric Acid for Urea Adsorption

Aktivasi Karbon Menggunakan Asam Klorida Berbantu Microwave untuk Penjerapan Urea

Regawa Bayu pamungkas\*, Kiswatul Karimah, Endar puspawiningtiyas

<sup>3</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Science,  
Universitas Muhammadiyah Purwokerto.

Purwokerto, Indonesia, 53182

\*Corresponding author: [rbayup11@gmail.com](mailto:rbayup11@gmail.com)

### ABSTRACT

#### Article Info

Submit:

16 March 2022

Revision:

24 March 2022

Accepted:

5 April 2022

First Online:

7 April 2022

The activation of activated carbon using microwave-assisted hydrochloric acid (HCl) has been carried out. This objective of this study was to investigate the effects of the concentration of HCl (1M to 6 M) and time of microwave irradiation (5 to 25 mins) on the iodine number and urea adsorption. The results showed that the concentration of HCl had a significant effect on the quality of the activated carbon. Activation of carbon using 6 mol/L of HCl resulted the iodine adsorption capacity of 1002 mg/g and urea adsorption of 99 mg/g. Microwave irradiation time also has a significant effect on the quality of activated carbon. The best microwave irradiation time showed at 25 minutes that resulted in iodine adsorption capacity of 1112 mg/g and urea adsorption capacity of 97 mg/g.

**Keywords:** activated carbon, microwave-assisted, hydrochloric acid, urea adsorption

### ABSTRAK

Aktivasi karbon aktif menggunakan asam klorida (HCl) berbantu *microwave* telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh konsentrasi HCl dan waktu iradiasi *microwave* secara terpisah terhadap bilangan iod, dan kapasitas adsorpsi urea. Konsentrasi HCl divariasikan mulai 1M sampai 6 M. Waktu iradiasi divariasikan mulai dari 5 sampai 25 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi HCl berpengaruh signifikan terhadap kualitas karbon aktif. Aktivasi karbon menggunakan HCl pada konsentrasi 6 mol/L menghasilkan karbon yang memiliki daya jerap terhadap iod sebesar 1003 mg/g dan kapasitas adsorpsi urea sebesar 99 mg/g. Waktu iradiasi *microwave* juga berpengaruh signifikan terhadap kualitas karbon aktif. Pada rentang waktu iradiasi *microwave* penelitian, hasil kualitas terbaik diperoleh pada menit ke 25 yang menghasilkan daya jerap terhadap iod sebesar 1112 mg/g dengan kapasitas adsorpsi yakni sebesar 97 mg/gram

**Kata kunci:** karbon aktif, microwave, asam klorida, adsorpsi urea

### 1. Pendahuluan

Urea adalah senyawa nitrogen organik nitrogen yang dominan pada limbah hewan dan manusia. Urea juga merupakan senyawa kimia yang banyak digunakan di bidang pertanian, dan industri kimia seperti melamin, bahan peledak, dan pestisida. Polusi urea di Indonesia berasal dari pabrik pupuk urea, pertanian dan limbah urea [1]. Pembuangan limbah domestik juga merupakan sumber pencemar nitrogen penting di perairan [2]. Lebih dari 50% konsumsi pupuk nitrogen di seluruh dunia merupakan pupuk urea [3]. Namun demikian, aplikasi urea di lahan pertanian memiliki kelemahan

karena nitrogen yang berada didalam tanah mudah hilang karena nitrogen itu sendiri bersifat mobile, mudah tercuci, berubah bentuk dan menguap. Efisiensi penggunaan N pada produksi padi di lahan tak tergenangi (upland) sulit melebihi angka 50% sedangkan di lahan tergenangi irigasi (lowland) hanya berkisar 30-45%. Sejumlah besar urea diproduksi untuk memenuhi kebutuhan dan menghasilkan air limbah sebanyak 0,5 ton dengan kandungan urea sebesar 0,5-1% berat untuk setiap 1 ton urea yang dihasilkan [4]. Oleh karena itu, keberadaan urea di lingkungan sangat berlimpah [5]. Banyaknya kandungan N di perairan menginduksi

maraknya pertumbuhan alga sehingga menyebabkan miskinnya kadar oksigen. Hal ini dapat menimbulkan kematian makhluk hidup yang terdapat di perairan. Selain itu, alga juga dapat menghasilkan senyawa organik biogenik (cyanotoxins) yang bersifat racun sehingga berbahaya bagi makhluk hidup. Masalah polutan urea lainnya adalah keberadaan urea dalam bentuk beracun dan jika terhidrolisis, ia membentuk polutan beracun lainnya (gas amonia). Gas ammonia dapat terurai menjadi polutan tambahan seperti  $\text{NO}_x$  ( $x=1, 2$  dan  $3$ ), yang menyebabkan eutrofikasi. Persoalan diatas menarik perhatian para peneliti untuk mengembangkan metode penghilangan atau degradasi urea untuk meminimalkan risiko lingkungan dan kesehatan.

Beberapa teknologi telah dikembangkan untuk menghilangkan atau meminimalkan urea dalam air. Sebagian besar metode pengambilan urea tersebut masih dalam pengembangan atau diterapkan dalam skala kecil. Teknologi tradisional yang digunakan untuk mendegradasi urea menjadi karbon dioksida ( $\text{CO}$ ) dan amonia adalah hidrolisis termal [6]. Metode dekomposisi enzimatik (hidrolisis oleh urease) dan perlakuan biologis (nitrifikasi dan oksidasi amonium) juga telah diterapkan, tetapi metode ini memiliki kelemahan yaitu adanya inaktivasi enzim dan kondisi pertumbuhan mikroba yang ketat [7]. Metode lain yang dipakai mendegradasi urea adalah dekomposisi non enzimatik (menggunakan katalis, oksidan kuat) dan hidrolisis (tanpa bantuan enzim). Degradasi urea dapat dicapai melalui metode elektrokimia dalam larutan akuatik yang mengandung klorida [2] [8], dan metode oksidasi elektrokimia (EO). Namun, metode elektrokimia memiliki kelemahan, yakni meningkatkan kandungan padatan terlarut total [9]. Metode klasik yang telah banyak diteliti adalah adsorpsi [10][11][12][13][8]. Metode adsorpsi dengan karbon aktif merupakan metode yang efisien untuk mengontrol banyak polutan karena kapasitas adsorpsi tinggi, luas permukaan dan volume pori yang tinggi, persentase pori mikro besar [14], bahan baku adsorben berlimpah, mudah diperoleh, harga murah, mudah diaplikasikan dan dapat diregenerasi.

Karbon aktif diperoleh melalui proses karbonisasi, aktivasi dan modifikasi [15]. Banyak metode yang telah dikembangkan baik menggunakan cara-cara konvensional, yakni proses termal, proses kimia dan berkembang menggunakan proses biologis [16]. Aktivitas kimia lebih disukai karena beberapa alasan, suhu yang lebih rendah, waktu aktivasi yang lebih pendek, hasil yang lebih tinggi, dan pengembangan struktur berpori yang baik [17]. Baru-baru ini, aktivasi

gelombang mikro memiliki potensi untuk menjadi alternatif yang layak. Metode aktivasi berbantu microwave memiliki keuntungan antara lain pemanasan interior yang seragam, tingkat pemanasan yang tinggi, waktu yang lebih rendah, pemanasan selektif, tidak ada kontak langsung antara sumber pemanas dan bahan yang dipanaskan dan mengurangi ukuran peralatan dan limbah [17], [18].

Aktivasi karbon berbantu *microwave* menghasilkan luas permukaan karbon yang tinggi, yakni lebih dari  $900 \text{ m}^2/\text{g}$  [19][20][21][22][23]. Modifikasi permukaan karbon berbantu *microwave* menghasilkan gugus fungsional karboksil, lakton, fenol, karbonil, quinon gugus karbonil, alkane, alkil, alcohol, fenol, amida. Regenerasi karbon berbantu *microwave* juga menghasilkan luas permukaan BET yang cukup tinggi sebesar  $549,9 \text{ m}^2/\text{g}$  [24]. Aktivasi dan modifikasi karbon dengan asam telah dilakukan banyak peneliti [25][26][27][28]. Beberapa asam yang banyak digunakan adalah  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  [29][30][31][15]. Beberapa penelitian aktivasi menggunakan asam klorida telah dilakukan [32][31]. Aktivasi dilakukan menggunakan pemanasan konvensional dengan variasi konsentrasi asam. Karbon aktif yang diperoleh memiliki kualitas baik dengan luas permukaan tinggi, fraksi pori mikro tinggi, gugus fungsional bervariasi.

Aktivasi karbon berbantu *microwave* menunjukkan hasil lebih baik dibanding pemanasan konvensional [19]. Fokus penelitian ini adalah melakukan studi aktivasi karbon menggunakan asam klorida berbantu energi *microwave*. Terdapat dua faktor yang dikaji pada proses aktivasi karbon, yaitu pengaruh konsentrasi asam klorida ( $\text{HCl}$ ) dan waktu iradiasi *microwave*. Karakter karbon yang dihasilkan diselidiki menggunakan analisa iodometri bilangan iod. Kemampuan kerja karbon diuji untuk menyerap urea yang terdapat dalam larutan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Bahan dan alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah karbon aktif yang didapat dari toko kimia Bratachem Purwokerto. Sedangkan bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini adalah asam klorida ( $\text{HCl}$ ) PA, iodium ( $\text{I}_2$ ) PA, kalium iodida ( $\text{KI}$ ) PA, natrium tiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) PA, potasium bromate ( $\text{KBrO}_3$ ) PA, dan metil orange (MO) PA, urea PA dari Merck.

### 2.2 Metode Aktivasi

Penelitian aktivasi karbon dilakukan dengan memasukkan 10 gram karbon ke dalam labu

yang berisi 200 mL larutan HCl konsentrasi tertentu dan dipanaskan dalam ruang yang diberi iradiasi *microwave* (300 W). Penelitian ini dirancang untuk mengkaji pengaruh satu faktor secara terpisah. Rancangan penelitian berupa rancangan OFAT, *one factor at a time* (satu faktor berubah pada faktor lain tetap). Penelitian dilakukan dengan variasi faktor konsentrasi HCl 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 M dan faktor waktu iradiasi *microwave* 0, 5, 10, 12,5, 15, 20, 25 menit. Setelah proses iradiasi selesai, karbon selanjutnya disaring, di cuci dan dikeringkan dengan oven dengan suhu 120°C hingga 4 jam. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi seperangkat alat aktivasi karbon yang digunakan.



Gambar 1. Rangkaian alat untuk aktivasi karbon

### 2.3 Analisa Bilangan Iod

Bilangan iod merupakan nilai yang menunjukkan daya jerap arang aktif terhadap iodium. Nilai bilangan iod menunjukkan kualitas arang aktif dalam menyerap zat dengan ukuran molekul yang kecil. Nilai merupakan parameter penting yang menentukan kualitas arang aktif menurut SNI. Semakin besar angka iod maka semakin besar kemampuan dalam mengadsorpsi adsorbat. Salah satu metode yang digunakan dalam analisis daya serap arang aktif terhadap iod adalah dengan metode titrasi iodometri.

Karakterisasi karbon yang dilakukan adalah analisa angka iod. Analisa dilakukan dengan memasukkan 0.5 gram karbon teraktivasi ke dalam beker gelas berisi 50 ml larutan iodium 0.1 N dan diaduk selama 15 menit. Campuran disaring dan 10 ml filtratnya dititrasi natrium tiosulfat 0.1 N dengan

indikator kanji sampai terjadi perubahan warna. Nilai bilangan iod dihitung menurut persamaan 1.

$$\text{Bilangan Iod} = \frac{V_{fi} - \left( \frac{V_{Na} \times N_{Na}}{N_{iod}} \right)}{M_a} \times W_{iod} \dots (\text{pers. 1})$$

Dalam hubungan ini,  $V_{fi}$  adalah volume iodin,  $M_a$  adalah masa karbon aktif,  $V_a$  adalah volume natrium tiosulfat,  $N_{Na}$  adalah Normalitas natrium tiosulfat,  $N_{iod}$  adalah normalitas iodin dan  $W_{iod}$  adalah berat molekul iodium

### 2.4 Adsorpsi Urea

Uji kapasitas adsorpsi urea dilakukan menggunakan 0,3 gram karbon aktif pada 50 ml larutan urea 0,1 N pada temperatur kamar. Campuran diaduk dengan kecepatan konstan selama 24 jam. Cairan supernatan yang diperoleh selanjutnya dianalisa kadar urea tersisa.

Analisa kadar urea dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis mengikuti prosedur Bojic (2008). Cairan supernatan sebanyak 1 ml ditambahi secara berturut-turut larutan asam klorida (HCl) 2,33 M sebanyak 1 ml, tambah 1 ml metil orange (MO) 0,0006 M, kemudian ditambah 1 ml kalium bromate ( $KBrO_3$ ) 0,001 M. Campuran larutan dimasukkan kedalam cuvet dan dianalisis adsorbansi pada panjang gelombang 505 nm.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Pengaruh Konsentrasi HCl Terhadap Bilangan Iod

Aktivasi karbon dengan asam HCl berbantu energi gelombang mikro dilakukan selama 12,5 menit. Hasil analisa bilangan iod karbon aktif disajikan pada **Tabel 1**. Secara umum, berdasarkan data pada **Tabel 1** dapat disampaikan bahwa peningkatan konsentrasi HCl menghasilkan respon peningkatan bilangan iod.

Tabel 1 Bilangan Iod Karbon teraktivasi pada Variasi Konsentrasi Asam

Konsentrasi (M)	Bilangan Iod (mg/g karbon)
1	937,7
2	959,9
3	950,4
4	972,6
5	906,0
6	1002,7

Hasil analisa varian (ANOVA) pengaruh konsentrasi HCl terhadap bilangan iod pada  $\alpha = 0,05$  menunjukkan nilai signifikansi 0,035. Hal ini berarti  $H_0$  ditolak, sehingga bermakna variasi factor sangat berpengaruh terhadap respon atau konsentrasi HCl berpengaruh secara signifikan terhadap respon bilangan iod. Asam klorida HCl merupakan molekul asam kuat. Mineral yang terdapat di dalam pori terlarut oleh asam klorida. Hal ini membebaskan permukaan dari pengotor dan pori semakin terbuka. Keadaan ini menyebabkan terjadinya peningkatan luas permukaan karbon aktif sehingga aktivitas penjerapan molekul  $I_2$  meningkat.

### 3.2 Pengaruh Konsentrasi HCl Terhadap Kapasitas Adsorpsi Urea

Hasil studi pengaruh konsentrasi HCl terhadap kapasitas adsorpsi urea disajikan pada **Tabel 2**. Secara kualitatif terjadi kenaikan kapasitas adsorpsi seiring dengan meningkatnya konsentrasi HCl. Namun demikian setelah konsentrasi 4 M, cenderung menjadi stagnan. Kapasitas adsorpsi urea relative konstan pada aktivasi HCl menggunakan konsentrasi 5 M dan 6 M. Berdasarkan analisa kuantitatif melalui analisa sidik ragam (ANOVA) pada derajat kepercayaan  $\alpha = 0,05$  diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,001. Hal ini berarti konsentrasi HCl berpengaruh signifikan terhadap kapasitas adsorpsi urea. Penambahan HCl menyebabkan terjadinya kenaikan kapasitas adsorpsi. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Supiati Dkk 2016. Asam klorida tergolong ke dalam zat asam kuat. Aktivasi dengan asam klorida mampu memberikan gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon aktif. Permukaan karbon menjadi lebih bermuatan sehingga mampu mengadsorpsi lebih banyak. Oleh karena itu, penambahan konsentrasi HCl pada proses aktivasi menyebabkan terjadinya peningkatan kapasitas adsorpsi urea.

Tabel 2. Kapasitas Adsorpsi Urea pada berbagai Konsentrasi HCl

Konsentrasi HCl (mol/L)	kapasitas adsorpsi (mg urea/ g karbon)
1	94,6
2	98,4
3	98,5
4	99,3
5	99,3
6	98,9

### 3.3 Pengaruh Waktu Iradiasi Microwave Terhadap Bilangan Iod

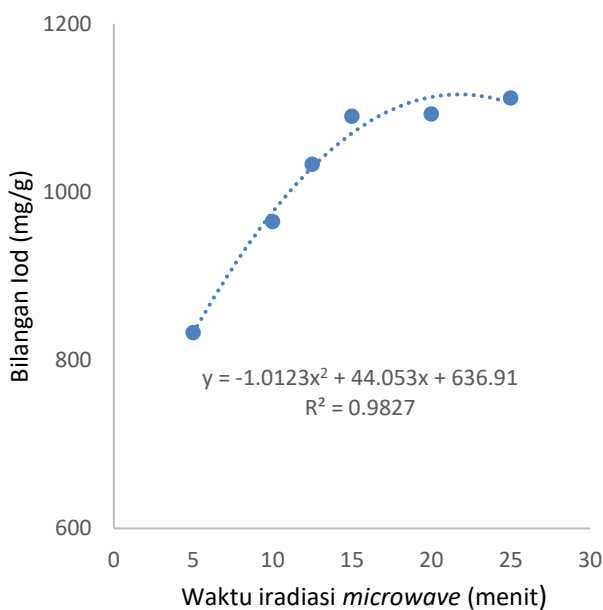
Studi pengaruh waktu iradiasi *microwave* pada proses aktivasi karbon dilakukan dengan menggunakan larutan asam HCl konsentrasi 3 M dan variasi waktu 5, 10, 12,5, 15, 20, 25 menit. Hasil analisa bilangan iod karbon aktif disajikan pada **Tabel 3**. Secara umum, berdasarkan data pada **Tabel 3** dapat disampaikan bahwa peningkatan waktu iradiasi menghasilkan respon peningkatan bilangan iod.

Hasil analisa varian (ANOVA) pengaruh waktu iradiasi *microwave* terhadap bilangan iod pada  $\alpha = 0,05$  menunjukkan nilai signifikansi 0,001. Hal ini berarti  $H_0$  ditolak, sehingga dapat bermakna variasi factor sangat berpengaruh terhadap respon atau waktu iradiasi *microwave* berpengaruh secara signifikan terhadap respon bilangan iod. Pada pemanasan *microwave* terjadi tiga konversi energi, yaitu konversi energi listrik menjadi energi elektromagnetik, konversi energi elektromagnetik menjadi energi kinetik, dan konversi energi kinetik menjadi energi panas. Dua konversi panas terakhir sangat mempengaruhi reaksi molekul yang terkena iradiasi. Pada dasarnya, pemanasan menggunakan *microwave* terjadi melalui interaksi langsung antara molekul dengan gelombang mikro. Energi yang ditransfer oleh *microwave* berpindah secara molekuler menuju campuran bahan yang terdiri dari asam, air dan karbon. Energi *microwave* menyebabkan molekul dipol bergerak cepat menata diri menyesuaikan medan listrik yang ditimbulkan oleh gelombang mikro sehingga terjadi saling tumbukan yang menimbulkan panas. Semakin lama waktu iradiasi berarti proses pergerakan kinetik semakin cepat sehingga mampu mengangkat mineral yang terdapat dalam pori karbon. Akibat peristiwa ini, pori karbon semakin terbuka dan keaktifan karbon terhadap iod meningkat.

Tabel 3. Pengaruh Waktu Iradiasi Microwave terhadap Bilangan Iod

Waktu Irradiasi	Bilangan Iod (mg/g karbon)
5	833,0
10	965,2
12,5	1033,0
15	1090,0
20	1093,1
25	1112,2

Hasil analisa regresi terhadap data Tabel 3, diperoleh hubungan polinomial derajat dua variable independen,  $y = -1,0123x^2 + 44,053x + 6636,91$  dengan nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0.9251$ . Berdasarkan persamaan tersebut, maka nilai maksimum respon sebesar 1116,2 mg/g diperoleh pada waktu radiasi adalah 21,8 menit. Hasil penelitian ini lebih baik dibandingkan dengan banyak penelitian sebelumnya. Dalam penelitian Safariyanti dan Sirimuangjinda [36] [35] masing-masing memperoleh bilangan iod 709 mg/g, 590.50 mg/g. Menurut SNI 06-3730-95 penyerapan iod minimal 750 mg/g, maka karbon aktif yang diperoleh dari penelitian ini sangat memenuhi syarat SNI.



Gambar 2. Pengaruh waktu iradiasi *microwave* terhadap bilangan iod karbon

### 3.4 Pengaruh Waktu Iradiasi Microwave Terhadap Kapasitas Adsorpsi Urea

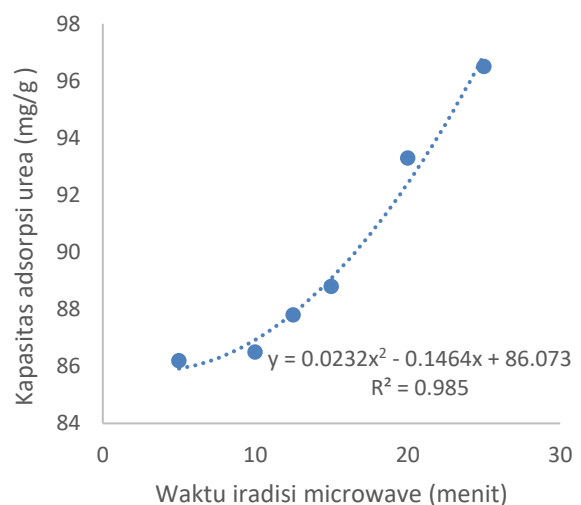
**Tabel 4** menyajikan pengaruh waktu iradiasi *microwave* terhadap kapasitas adsorpsi urea. Secara umum, peningkatan waktu iradiasi menghasilkan peningkatan kapasitas urea. Empat perlakuan pertama memberikan peningkatan kapasitas adsorpsi rata-rata 0,8 mg/g, relatif sedikit dibanding 2 perlakuan berikutnya 3,85 mg/g. Hasil analisa varian (ANOVA) pengaruh waktu iradiasi *microwave* terhadap bilangan iod pada  $\alpha = 0,05$  menunjukkan nilai signifikansi 0,001. Hal ini berarti  $H_0$  ditolak, sehingga dapat bermakna variasi factor sangat berpengaruh terhadap respon atau waktu iradiasi *microwave* berpengaruh secara signifikan terhadap respon bilangan iod.

Tabel 4. Kapasitas Adsorpsi Urea pada berbagai Waktu Iradiasi *Microwave*

waktu irradiasi (menit)	Kapasitas adsorpsi (mg Urea/g karbon)
5	86,2
10	86,5
12,5	87,8
15	88,8
20	93,3
25	96,5

Hasil analisa varian (ANOVA) pengaruh waktu iradiasi *microwave* terhadap bilangan iod pada  $\alpha = 0,05$  menunjukkan nilai signifikansi 0,001. Hal ini berarti  $H_0$  ditolak, sehingga dapat bermakna variasi factor sangat berpengaruh terhadap respon atau waktu iradiasi *microwave* berpengaruh secara signifikan terhadap respon bilangan iod.

Analisa regresi terhadap data Tabel 4. Memperoleh hubungan polinomial derajat dua pada variable independen,  $y = 0,023x^2 - 0,1464x + 86,073$  dengan nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0.985$ . Berdasarkan persamaan tersebut, maka nilai kapasitas adsorpsi akan meningkat terus seiring dengan peningkatan waktu iradiasi. Namun demikian keadaan demikian tidak terjadi berterusan. Proses iradiasi menyebabkan permukaan karbon menjadi semakin aktif ditandai dengan bilangan iod meningkat. Berdasarkan hasil penelitian peningkatan bilangan iod semakin kecil dengan naiknya waktu iradiasi. Keadaan ini berarti bahwa peningkatan waktu iradiasi suatu saat tidak menyebabkan terjadinya peningkatan bilangan iod.



Gambar 3. Pengaruh waktu iradiasi *microwave* terhadap kapasitas adsorpsi urea

#### 4. Kesimpulan

Aktivasi karbon menggunakan asam klorida (HCl) berbantu *microwave* menghasilkan karbon aktif dengan kualitas baik. Karbon aktif memiliki gugus fungsional permukaan dan pori karbon semakin bersih. Berdasarkan hasil analisis penelitian yang sudah dilaksanakan dapat disimpulkan dua hal pokok. Pertama, konsentrasi aktivator asam HCl berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan iod dan kapasitas adsorpsi. Kedua, waktu iradiasi *microwave* juga berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan iod dan kapasitas adsorpsi. Peningkatan konsentrasi HCl, secara umum menyebabkan terjadinya peningkatan bilangan iod dan kapasitas adsorpsi urea. Bilangan iod tertinggi sebesar 1116,2 mg/g diperoleh pada aktivasi menggunakan konsentrasi HCl 3 mol/L dan waktu iradiasi 21,8 menit. Kapasitas adsorpsi urea 99,3 mg/gram diperoleh pada waktu iradiasi dan konsentrasi terbesar terhadap urea.

#### Daftar Pustaka

- [1] K. Triyono, "TELAHAH MASALAH PUPUK UREA, KEAMANAN PANGAN, KESEHATAN DAN LINGKUNGAN Kharis Triyono I. PENDAHULUAN," *J. Inov. Pertan. Vol. 3, No. 1, 2004 (22- 31 )*, vol. 03, pp. 22–31, 2004.
- [2] K. Cho and M. R. Hoffmann, "Urea degradation by electrochemically generated reactive chlorine species: Products and reaction pathways," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 19, pp. 11504–11511, 2014, doi: 10.1021/es5025405.
- [3] P. M. Glibert, J. Harrison, C. Heil, and S. Seitzinger, "Escalating worldwide use of urea - A global change contributing to coastal eutrophication," *Biogeochemistry*, vol. 77, no. 3, pp. 441–463, 2006, doi: 10.1007/s10533-005-3070-5.
- [4] Y. Chen, H. Chen, Z. Chen, H. Hu, C. Deng, and X. Wang, "The benefits of autotrophic nitrogen removal from high concentration of urea wastewater through a process of urea hydrolysis and partial nitrification in sequencing batch reactor," *J. Environ. Manage.*, vol. 292, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112762.
- [5] A. Zaher and N. Shehata, "Recent advances and challenges in management of urea wastewater: A mini review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1046, no. 1, p. 012021, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1046/1/012021.
- [6] M. R. Rahimpour, M. M. Barmaki, and H. R. Mottaghi, "A comparative study for simultaneous removal of urea, ammonia and carbon dioxide from industrial wastewater using a thermal hydrolyser," *Chem. Eng. J.*, vol. 164, no. 1, pp. 155–167, 2010, doi: 10.1016/j.cej.2010.08.046.
- [7] E. Urbańczyk *et al.*, "Electrochemical modification of Ti-13Nb-13Zr alloy surface in phosphate based solutions," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 291, pp. 79–88, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.02.025.
- [8] X. Zhang *et al.*, "Urea removal in reclaimed water used for ultrapure water production by spent coffee biochar/granular activated carbon activating peroxymonosulfate and peroxydisulfate," *Bioresour. Technol.*, vol. 343, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126062.
- [9] Q. Yang *et al.*, "Photolysis of N-chlorourea and its effect on urea removal in a combined pre-chlorination and UV254 process," *J. Hazard. Mater.*, vol. 411, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125111.
- [10] A. N. Chermahini, A. Teimouri, and H. Farrokhpour, "Theoretical studies of urea adsorption on single wall boron-nitride nanotubes," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 320, pp. 231–236, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.09.066.
- [11] C. H. Ooi, W. K. Cheah, Y. L. Sim, S. Y. Pung, and F. Y. Yeoh, "Conversion and characterization of activated carbon fiber derived from palm empty fruit bunch waste and its kinetic study on urea adsorption," *J. Environ. Manage.*, vol. 197, pp. 199–205, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.083.
- [12] H. M. A. El-Lateef, M. A. Al-Omair, A. H. Touny, and M. M. Saleh, "Enhanced adsorption and removal of urea from aqueous solutions using eco-friendly iron phosphate nanoparticles," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 1, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.102939.
- [13] T. Kameda, K. Horikoshi, S. Kumagai, Y. Saito, and T. Yoshioka, "Adsorption of urea, creatinine, and uric acid onto spherical activated carbon," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 237, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.seppur.2019.116367.
- [14] G. G. Stavropoulos, P. Samaras, and G. P. Sakellariopoulos, "Effect of activated

- carbons modification on porosity, surface structure and phenol adsorption," *J. Hazard. Mater.*, vol. 151, no. 2–3, pp. 414–421, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.06.005.
- [15] M. Gayathiri, T. Pulingam, K. T. Lee, and K. Sudesh, "Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism," *Chemosphere*, vol. 294. Elsevier Ltd, May 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133764.
- [16] S. Z. Naji and C. T. Tye, "A review of the synthesis of activated carbon for biodiesel production: Precursor, preparation, and modification," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 13, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100152.
- [17] D. Xin-hui, C. Srinivasakannan, P. Jin-hui, Z. Li-bo, and Z. Zheng-yong, "Comparison of activated carbon prepared from *Jatropha* hull by conventional heating and microwave heating," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 9, pp. 3920–3926, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.06.010.
- [18] Z. Zhang *et al.*, "Comparison between microwave and conventional thermal reactivations of spent activated carbon generated from vinyl acetate synthesis," *Desalination*, vol. 249, no. 1, pp. 247–252, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2009.03.008.
- [19] Q. S. Liu, T. Zheng, N. Li, P. Wang, and G. Abulikemu, "Modification of bamboo-based activated carbon using microwave radiation and its effects on the adsorption of methylene blue," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 256, no. 10, pp. 3309–3315, 2010, doi: 10.1016/j.apsusc.2009.12.025.
- [20] L. Zhang, M. Mi, B. Li, and Y. Dong, "Modification of activated carbon by means of microwave heating and its effects on the pore texture and surface chemistry," *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 5, pp. 1791–1795, 2013.
- [21] J. Kazmierczak-razna, B. Gralak-podemska, P. Nowicki, and R. Pietrzak, "The use of microwave radiation for obtaining activated carbons from sawdust and their potential application in removal of NO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S," *Chem. Eng. J.*, vol. 269, pp. 352–358, 2015, doi: 10.1016/j.cej.2015.01.057.
- [22] X. Liu, Y. Han, Y. Cheng, and G. Xu, "Microwave-assisted ammonia modification of activated carbon for effective removal of phenol from wastewater: DFT and experiment study," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 518, no. November 2019, 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.146258.
- [23] M. Selvam S and B. Paramasivan, "Microwave assisted carbonization and activation of biochar for energy-environment nexus: A review," *Chemosphere*, vol. 286, no. July 2021, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131631.
- [24] K. Y. Foo and B. H. Hameed, "Bioresource Technology Microwave-assisted regeneration of activated carbon," *Bioresour. Technol.*, vol. 119, pp. 234–240, 2012.
- [25] W. Ao *et al.*, "Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. April, pp. 958–979, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.051.
- [26] G. L. Dotto, J. M. Cunha, C. O. Calgaro, E. H. Tanabe, and D. A. Bertuol, "Surface modification of chitin using ultrasound-assisted and supercritical CO<sub>2</sub> technologies for cobalt adsorption," *J. Hazard. Mater.*, vol. 295, pp. 29–36, 2015, doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.04.009.
- [27] D. Ewis and B. H. Hameed, "A review on microwave-assisted synthesis of adsorbents and its application in the removal of water pollutants," *J. Water Process Eng.*, vol. 41, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102006.
- [28] Y. Zhang, S. Fan, T. Liu, W. Fu, and B. Li, "A review of biochar prepared by microwave-assisted pyrolysis of organic wastes," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 50, no. January 2021, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101873.
- [29] M. R. M. Adib *et al.*, "Effect of Phosphoric Acid Concentration on the Characteristics of Sugarcane Bagasse Activated Carbon," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 136, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1757-899X/136/1/012061.
- [30] S. M. Yakout and G. Sharaf El-Deen, "Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones," *Arab. J. Chem.*, vol. 9, pp. S1155–S1162, 2016, doi: 10.1016/j.arabjc.2011.12.002.

- [31] D. Bergna, T. Varila, H. Romar, and U. Lassi, "Activated carbon from hydrolysis lignin: Effect of activation method on carbon properties," *Biomass and Bioenergy*, vol. 159, p. 106387, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106387.
- [32] A. Sirimuangjinda, D. Atong, and C. Pechyen, "Comparison on pore development of activated carbon produced from scrap tire by hydrochloric acid and sulfuric acid," in *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 626, pp. 706–710, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.626.706.