BAB 6

Karbon Aktif Berbasis Eceng Gondok

Widi Astuti[1], Triastuti Sulistyaningsih[2],
Ririn Hanifah[1], Iffat Ganjar Fadhila[1],
Ahmad Rosadi[1]
[1]Program Studi Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia FT,
Universitas Negeri Semarang
[2]Program Studi Kimia, Jurusan Kimia FMIPA,
Universitas Negeri Semarang

email: widi_astuti@mail.unnes.ac.id

Doi: https://doi.org/10.15294/.v0i0.18

Abstrak

Limbah zat warna sintetis yang dihasilkan dari industri batik, tekstil, tinta, dan cat memberikan dampak negatif bagi lingkungan perairan karena bersifat toksik, mutagenik, karsinogenik, dan sulit terdegradasi. Adsorpsi menggunakan karbon aktif berbasis limbah biomassa merupakan metode yang efektif dalam pengolahan limbah cair mengandung zat warna. Salah satu limbah biomassa yang dapat digunakan sebagai prekursor dalam sintesis karbon aktif adalah eceng gondok karena kandungan lignoselulosanya yang tinggi. Untuk menurunkan penggunaan energi dan memperbaiki karakteristik karbon aktif, proses aktivasi kimia dilakukan dengan bantuan gelombang mikro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivasi dengan NaOH menggunakan pemanasan gelombang mikro menghasilkan karbon aktif dengan ukuran pori yang lebih besar dan seragam (12,4-16,2 μm) daripada penggunaan pemanasan konvensional menggunakan *tubular furnace* yang pada umumnya digunakan pada sintesis karbon aktif (4,95-14 μm). Sementara, karbon tanpa aktivasi mempunyai ukuran pori 3,4-5,3 μm. Uji adsorpsi terhadap zat warna *brilliant blue* menunjukkan 92,3% zat warna dapat teradsorpsi pada pH 2. Dalam hal ini, kesetimbangan dicapai setelah 150 menit. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa model *isotherm* Langmuir lebih sesuai daripada model *isotherm* Freundlich dengan nilai kapasitas adsorpsi 140,55 mg/g.

Kata Kunci: *brilliant blue*, eceng gondok, *isotherm*, karbon aktif.

A. Pendahuluan

Sektor industri di Indonesia mengalami perkembangan pesat dalam sepuluh tahun terakhir. Bahkan, World Bank menempatkan industri manufaktur Indonesia pada peringkat kelima negara-negara G-20. Secara langsung, hal ini mengakibatkan semakin parahnya tingkat pencemaran lingkungan, terutama jika limbah industri tidak dikelola secara baik. Limbah industri merupakan bahan buangan dari suatu kegiatan atau proses produksi yang mengandung bahan berbahaya atau beracun, yang dapat membahayakan lingkungan. Salah satu limbah industri yang perlu mendapat perhatian adalah limbah cair yang pada umumnya banyak dihasilkan oleh pabrik yang menggunakan air dalam sistem prosesnya atau menggunakan bahan baku yang mengandung air. Limbah cair yang tidak diolah dengan baik dapat menimbulkan dampak besar bagi pencemaran lingkungan dan menjadi sumber penyakit. Salah satu industri yang menghasilkan limbah cair dengan kontaminan zat warna berbahaya adalah industri tinta, cat, tekstil, dan batik. Kontaminan dalam limbah ini pada umumnya berasal dari proses pewarnaan yang menggunakan berbagai pewarna sintesis seperti *brilliant blue*, naphthol, methyl violet, remasol, dan indigosol. Pewarna sintesis ini tergolong tidak ramah lingkungan karena tidak dapat terdegradasi oleh bakteri tanah. Selain itu, bahan kimia yang toksik, mutagenik, dan karsinogenik ini sangat membahayakan kesehatan manusia (Astuti, dkk., 2019).

Berbagai metode untuk menurunkan kadar zat warna dalam limbah cair telah dikembangkan, di antaranya adalah koagulasi, flokulasi, ultrafiltrasi, serta *electrochemical advanced oxidation* (Camargo, dkk., 2019; Khumalo, dkk., 2019; Nidheesh, dkk., 2018). Meskipun demikian, metode tersebut memiliki kelemahan, yaitu prosesnya yang rumit dan mahal (Astuti, dkk., 2019). Dewasa ini, adsorpsi menggunakan karbon aktif dianggap cukup efektif karena prosesnya sederhana, murah,

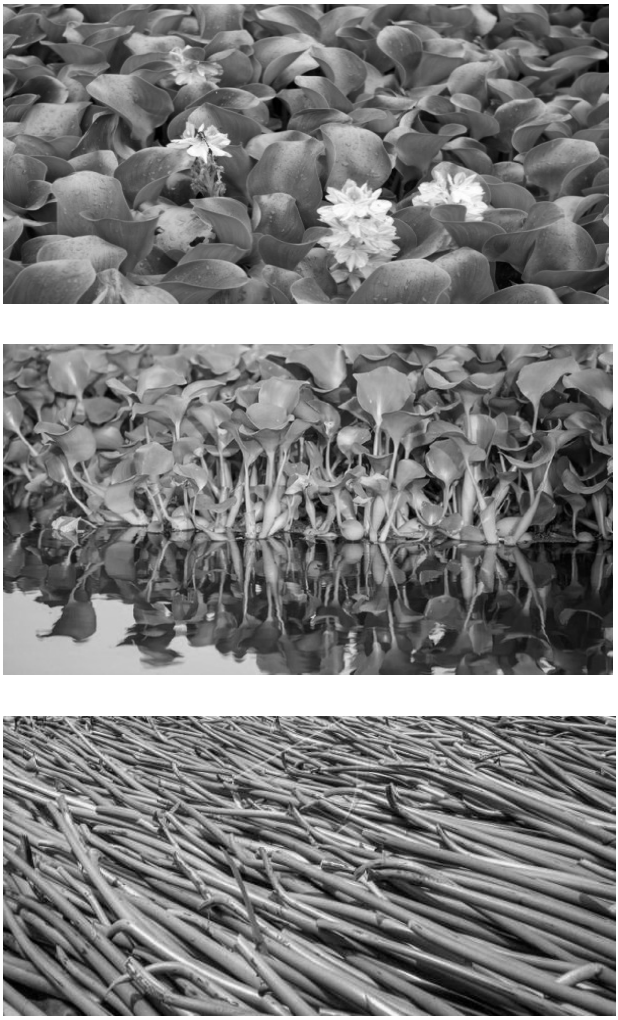
mudah dioperasikan, dan dapat digunakan pada konsentrasi rendah (Erto, dkk., 2018; Sabarish dan Unnikrishnan, 2018). Meskipun demikian, aplikasi pada industri kecil dan menengah sering kali terkendala oleh harga karbon aktif yang relatif mahal. Untuk mengatasi hal ini, penggunaan limbah biomassa seperti eceng gondok merupakan alternatif menjanjikan.

Secara umum, sintesis karbon aktif meliputi proses pirolisis dan aktivasi yang dapat berupa aktivasi fisika menggunakan *steam* atau CO_2, maupun aktivasi kimia menggunakan activator, seperti H_2SO_4, $CaCl_2$, NaCl, KCl, dan NaOH (Aljeboree, dkk., 2017). Aktivasi kimia pada umumnya lebih disukai karena lebih simpel, membutuhkan waktu aktivasi lebih singkat, suhu lebih rendah, menghasilkan *yield* lebih tinggi, dan pengembangan struktur pori yang lebih baik. Dalam hal ini, penggunaan NaOH dapat menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan yang lebih besar. Teknik pemanasan pada proses aktivasi diduga sangat berpengaruh terhadap karakteristik karbon aktif yang dihasilkan (Astuti, dkk., 2019; Ahmed, dkk., 2015). Pada pemanasan konvensional yang pada umumnya digunakan pada sintesis karbon aktif, transfer panas dari permukaan ke dalam bahan terjadi secara konduksi, konveksi, dan radiasi (Baytar, dkk., 2018). Hal ini menyebabkan terjadinya gradien suhu antara permukaan dan bagian dalam bahan (Ahmed, dkk., 2015). Akibatnya, proses pemanasan berjalan lambat, memerlukan energi yang besar, serta pori yang dihasilkan tidak seragam (Xiao, dkk., 2015). Penggunaan gelombang mikro untuk menggantikan pemanasan konvensional telah dilakukan oleh Astuti, dkk. (2019). Pemanasan dengan gelombang mikro memiliki beberapa keuntungan, yaitu pemanasan bersifat selektif, bahan menerima energi melalui rotasi dipole, dan konduksi ionik sehingga waktu pemanasan menjadi lebih singkat dan merata, serta energi yang dibutuhkan lebih rendah (Ahmed, 2015; Ao, dkk., 2018; Chase, 2017; Astuti, dkk., 2019). Hal ini dapat menghasilkan karbon aktif dengan struktur dan ukuran

pori yang lebih seragam (Thue, dkk., 2016). Meskipun demikian, tidak semua material mempunyai interaksi yang baik dengan gelombang mikro. Oleh karena itu, perbandingan struktur mikro dan karakteristik adsorpsi zat warna pada karbon aktif berbasis eceng gondok, di mana aktivasinya menggunakan pemanasan gelombang mikro dan konvensional akan dibahas lebih lanjut pada *chapter* ini.

B. Eceng Gondok

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*), sebagaimana tersaji pada gambar 6.1, merupakan salah satu jenis tumbuhan air mengapung. Selain dikenal dengan nama eceng gondok, di beberapa daerah di Indonesia, eceng gondok memiliki nama lain, seperti kelipuk (Palembang), ringgak (Lampung), ilung-ilung (Dayak), dan tumpe (Manado). Eceng gondok tumbuh di kolam-kolam dangkal, tanah basah dan rawa, aliran air yang lambat, danau, tempat penampungan air, serta sungai. Tumbuhan ini dapat beradaptasi dengan perubahan ekstrem dari ketinggian air, arus air, ketersediaan nutrien, pH, suhu, serta racun-racun dalam air. Karena memiliki kecepatan tumbuh yang sangat tinggi dan memiliki daun yang lebar, maka eceng gondok dianggap sebagai gulma yang dapat merusak lingkungan perairan karena dapat meningkatkan evapotranspirasi dan menghalangi jumlah cahaya yang masuk ke perairan sehingga tingkat kelarutan oksigen dalam air menurun. Pertumbuhan eceng gondok yang cepat disebabkan oleh tingginya kandungan nutrient, seperti nitrogen, fosfat, dan kalium di air. Eceng gondok mengandung 40–60% selulosa, 20–40% hemiselulosa, dan 15–30% lignin (Priya dan Selvan, 2014) sehingga dapat digunakan sebagai prekursor dalam sintesis karbon aktif.



Gambar 6.1. Eceng gondok

Sebelum digunakan sebagai prekursor dalam sintesis karbon aktif, eceng gondok dibersihkan dan dikeringkan di bawah sinar matahari selama 24 jam untuk proses dehidrasi. Pengeringan selanjutnya dilakukan dalam oven (Model UN55 Memmert, Germany) pada suhu 105°C selama 8 jam. Eceng gondok kering (gambar 6.2) selanjutnya dipotong-potong dan dihancurkan dengan blender hingga berbentuk serbuk dan dimasukkan ke dalam *electric furnace* (Model FB1310M-33

Thermolyne, Thermo Scientific, USA) pada suhu 500^{o}C selama 30 menit untuk proses pirolisis (gambar 6.3). Proses ini dilakukan pada kondisi atmosfer udara terbatas dan dapat menghasilkan arang dengan *yield* sebesar 39,4%. Untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi arang eceng gondok, maka dapat dilakukan proses aktivasi kimia sehingga menghasilkan karbon aktif yang mempunyai luas permukaan lebih tinggi dan jumlah gugus fungsi lebih banyak di mana gugus fungsi inilah yang akan berperan sebagai situs aktif pada proses adsorpsi.

Gambar 6.2. Eceng gondok kering

Gambar 6.3. *Electric furnace*

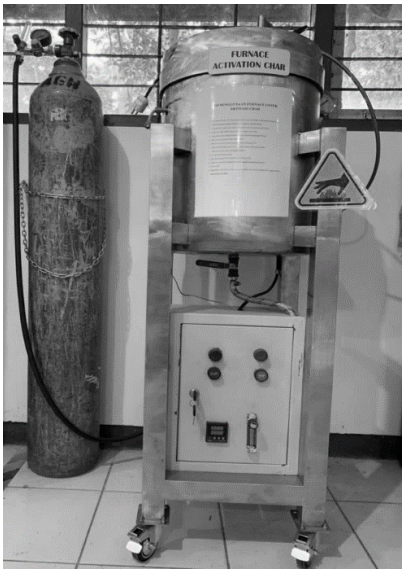
C. Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan suatu jenis karbon yang memiliki luas permukaan sangat besar dan dapat diperoleh dengan cara melakukan aktivasi terhadap arang. Secara umum, proses pembuatan karbon aktif terdiri atas tiga tahap, yaitu dehidrasi, pirolisis, dan aktivasi. Dehidrasi merupakan proses penghilangan air yang terkandung dalam prekursor atau bahan baku utama dalam sintesis karbon aktif. Tahap dehidrasi dapat dilakukan dengan cara menjemur bahan baku di bawah sinar matahari atau memanaskannya di dalam oven pada suhu 110–120^{o}C hingga berat konstan. Pirolisis merupakan proses termokimia suatu bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau dengan sedikit oksigen atau reagen lainnya, sehingga terjadi peningkatan kandungan karbon dan penurunan jumlah heteroatom. Pirolisis ekstrim yang hanya meninggalkan karbon sebagai residu sering kali disebut sebagai karbonisasi. Pada karbonisasi fase padat, prekursor yang merupakan makromolekul, terurai seiring dengan meningkatnya suhu, disertai evolusi gas dan cairan dengan berat molekul rendah sebagai hasil dekomposisi pada proses pirolisis.

Karbon aktif yang baik harus mempunyai sejumlah mikropori sebagai tempat terjadinya proses adsorpsi serta makropori sebagai sarana transportasi molekul adsorbat dari larutan ke dalam interior padatan. Atas dasar inilah, beberapa penelitian telah dikembangkan untuk memperoleh distribusi ukuran pori yang optimum. Struktur mikropori sebenarnya dapat dikembangkan melalui proses aktivasi termal menggunakan *gasifying agents* CO_2 dan *steam*, yang pada umumnya dikenal sebagai aktivasi fisika. Namun, beberapa variabel

pada proses aktivasi tersebut, seperti suhu, tekanan, dan laju pemanasan ternyata tidak mempunyai pengaruh signifikan terhadap distribusi ukuran mikropori, yang artinya distribusi ukuran pori masih mempunyai kisaran yang cukup lebar dari mikropori, mesopore, hingga makropori. Alternatif yang dapat diambil untuk mengatasi masalah ini adalah aktivasi kimia dengan bantuan reagen kimia, seperti H_3PO_4, $ZnCl_2$, KOH, NaOH, K_2CO_3 diikuti dengan pemanasan, di mana pengembangan pori dapat dimodifikasi dan disesuaikan. Sebagaimana telah dikemukakan sebelumnya, aktivasi dengan NaOH dapat menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan dan ukuran pori yang lebih besar. Mengingat karbon aktif akan digunakan untuk menjerap zat warna yang berukuran besar, maka arang eceng gondok yang dihasilkan dari proses pirolisis harus diaktivasi dengan cara mencampur arang dengan larutan NaOH 5M dan diaduk selama 24 jam (dikenal sebagai proses impregnasi), kemudian disaring dan dikeringkan menggunakan oven (Model UN55 Memmert, Germany) pada suhu 110^oC hingga berat konstan. Arang terimpregnasi ini selanjutnya dipanaskan pada aplikator gelombang mikro (gambar 6.4) selama 8 menit dengan daya 600W disertai pengaliran gas N_2 dengan laju alir 200 cm^3/menit. Sementara, pada proses konvensional, pemanasan dilakukan pada *tubular furnace* (gambar 6.5) pada suhu 500^oC selama 1 jam, dalam kondisi atmosfer nitrogen (laju alir gas nitrogen 200 cm^3/menit). Karbon aktif selanjutnya didinginkan pada suhu ruang dan dicuci dengan HCl 0,1M serta aquades hingga pH netral dan dikeringkan dengan oven pada suhu 110^oC hingga berat konstan, lalu dihaluskan dan diayak dengan ayakan 500 mikron.

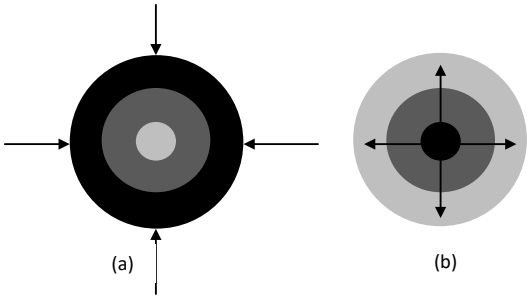
Gambar 6.4. Aplikator gelombang mikro



Gambar 6.5. Tubular furnace

D. Teknik Pemanasan pada Aktivasi Karbon Aktif

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, teknik pemanasan pada proses aktivasi sangat penting karena dapat berpengaruh terhadap struktur karbon aktif yang dihasilkan. Bahan karbon dengan kandungan oksigen rendah dan karakter hidrofobik tinggi pada umumnya dapat diperoleh melalui perlakuan termal pada lingkungan atmosfer yang sesuai, yang pada umumnya melibatkan proses konveksi, konduksi dan radiasi pada unggun tetap (misalnya reaktor tabung), unggun bergerak (misalnya tungku putar), atau reaktor unggun terfluidisasi. Dalam hal ini, suhu, waktu reaksi, dan rasio impregnasi merupakan variabel penting yang dapat mempengaruhi tekstur dan karakter karbon aktif. Namun, karena sumber panas berada di luar *bed* karbon, dan panas ditransfer ke bagian interior *bed* melalui tiga mekanisme perpindahan panas tersebut, maka terjadi perbedaan atau distribusi suhu pada partikel karbon yang dipengaruhi oleh perbedaan bentuk, ukuran partikel dan *moisture content*, di mana pada bagian permukaan dan sudut *bed* lebih panas. Pemanasan yang tidak merata ini menyebabkan ukuran pori yang terbentuk sangat bervariasi. Untuk menghindari hal ini, pada umumnya laju pemanasan diperlambat. Namun, hal ini mengakibatkan tingginya konsumsi energi sehingga harga karbon aktif menjadi mahal. Pemanasan dengan gelombang mikro merupakan suatu alternatif yang menjanjikan untuk dapat mengatasi permasalahan tersebut.

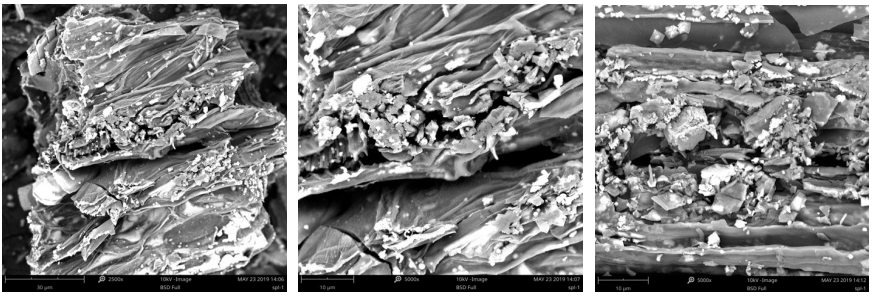


Gambar 6.6. Skema profil suhu dan perpindahan panas untuk (a) pemanasan konvensional dan (b) pemanasan gelombang mikro (warna hitam melambangkan suhu paling tinggi, abu-abu muda melambangkan suhu paling rendah) (sumber: Ao, dkk., 2018)

Pemanasan dengan gelombang mikro adalah suatu proses ketika energi elektromagnetik masuk ke dalam produk yang dipanaskan sebagai gelombang elektromagnetik dan diubah menjadi panas ketika di dalam produk (Astuti, dkk., 2019). Pemanasan dengan gelombang mikro berbeda dengan pemanasan konvensional dalam hal bahwa panas dapat secara langsung diarahkan ke material tanpa memanaskan udara di sekitarnya. Energi gelombang mikro dikirim secara langsung ke material melalui interaksi molekul dengan medan elektromagnetik. Akibatnya, pemanasan dengan gelombang mikro memerlukan waktu sepuluh kali lebih cepat dibanding pemanasan konvensional sehingga konsumsi energi berkurang. Perbedaan profil suhu dan mekanisme perpindahan panas pada pemanasan dengan gelombang mikro dan konvensional tersaji pada gambar 6.6.

E. Karakter Karbon Aktif Eceng Gondok

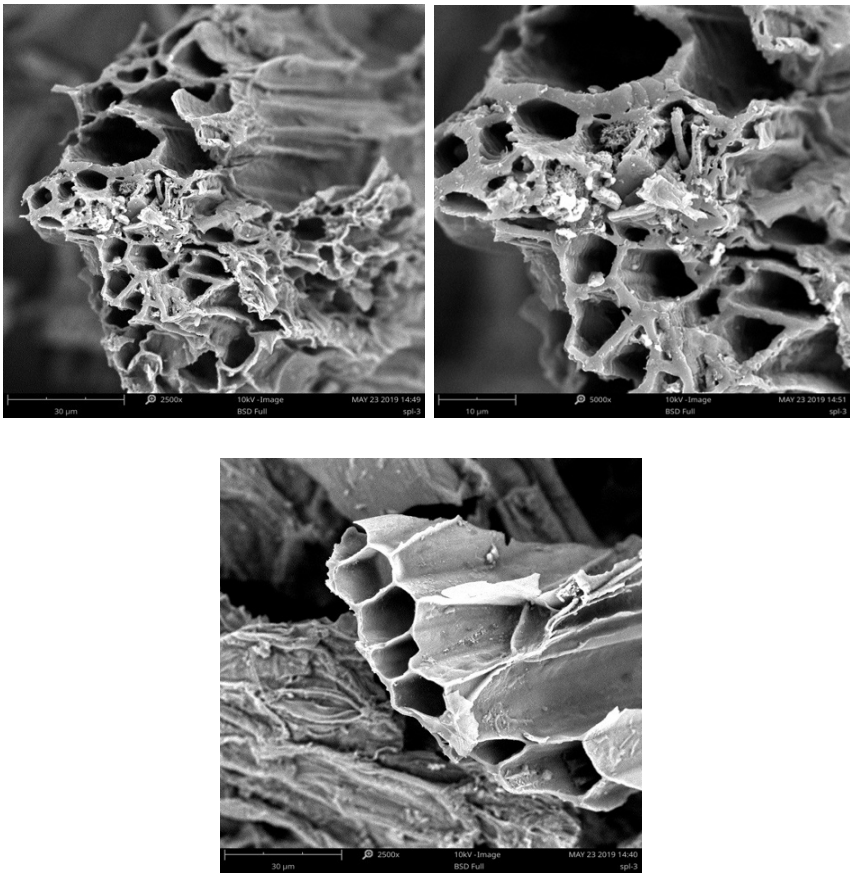
Proses aktivasi menggunakan NaOH memberikan perubahan signifikan terhadap struktur morfologi permukaan karbon aktif. Hasil analisis morfologi permukaan menggunakan SEM (*scanning electron microscope*) tersaji pada gambar 6.7, 6.8, dan 6.9.



Gambar 6.7. Morfologi permukaan arang eceng gondok

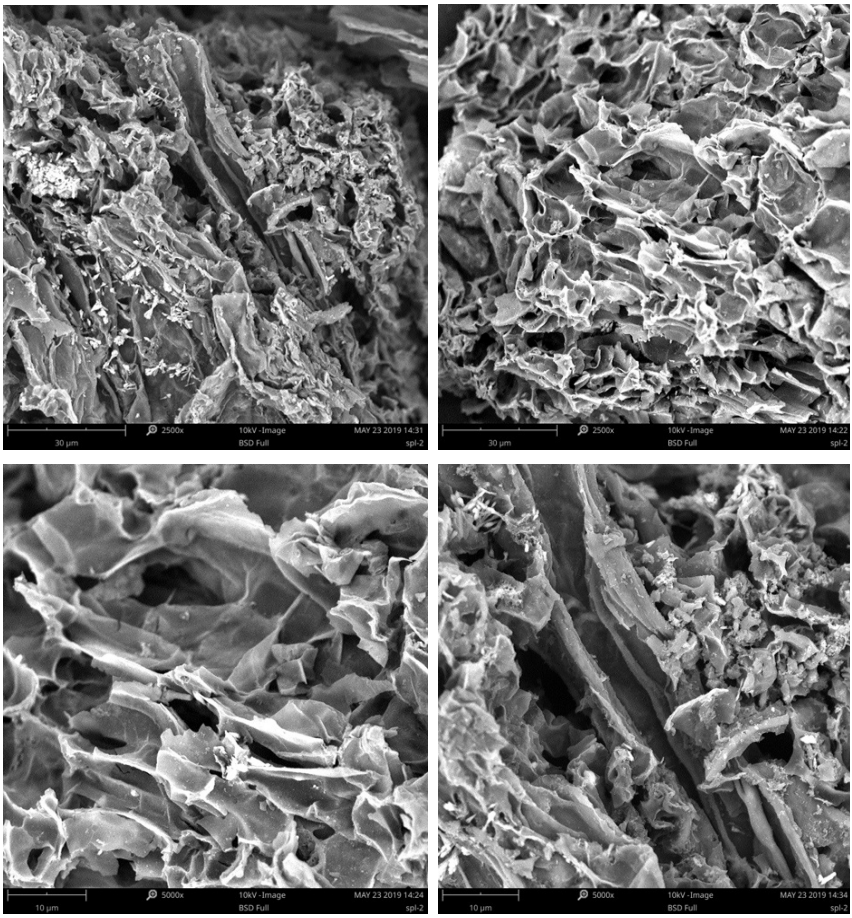
Pada gambar 6.7 terlihat bahwa karbon tanpa aktivasi (arang) memiliki pori dengan ukuran yang sangat kecil dengan ukuran pori terbanyak berada pada kisaran antara 3,4–5,33 μm dan permukaan

terlihat masih tertutup dengan senyawa tar hasil proses pirolisis. Sementara, setelah proses aktivasi NaOH dengan pemanasan konvensional terlihat ukuran pori semakin besar dengan *range* yang lebih lebar (gambar 6.8), di mana ukuran pori terbanyak berkisar 4,95–14 μm. Hasil berbeda ditunjukkan oleh karbon dengan aktivasi NaOH dan pemanasan gelombang mikro di mana pori terlihat memiliki distribusi ukuran yang lebih seragam (gambar 6.9), dengan ukuran pori terbanyak 12,4–16,2 μm.



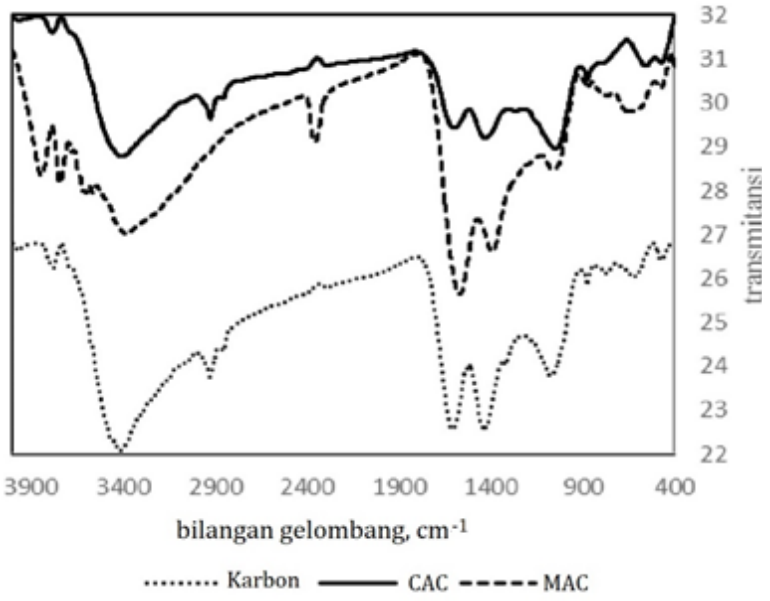
Gambar 6.8. Morfologi permukaan karbon aktif eceng gondok dengan pemanasan konvensional (CAC)

Untuk mengetahui gugus fungsi yang nantinya akan berperan sebagai situs aktif pada proses adsorpsi, dilakukan analisis menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectrophotometer*) pada panjang gelombang 4.000–400 cm^{-1}. Hasil analisis arang (karbon tanpa aktivasi), karbon aktif dengan pemanasan konvensional (CAC), dan karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro (MAC) tersaji pada gambar 6.10. Data pada gambar 6.10 menunjukkan jika arang dan karbon aktif dengan pemanasan konvensional mempunyai pola difraksi serupa.



Gambar 6.9. Morfologi karbon aktif eceng gondok dengan pemanasan gelombang mikro (MAC)

Keberadaan gugus fungsi O-H dari hidroksil, fenol, alkohol, dan asam karboksilat terlihat dengan adanya puncak pada bilangan gelombang 3.407,82 cm^{-1} dan 3.404,79 cm^{-1}, keberadaan gugus fungsi C-H alifatik teridentifikasi pada panjang gelombang 2.925,23 cm^{-1} dan 2.923,5 cm^{-1}, sementara keberadaan gugus fungsi C=C aromatik atau C=O teridentifikasi dengan adanya puncak pada panjang gelombang 1.609,38 cm^{-1} dan 1.436,38 cm^{-1} untuk arang dan pada bilangan gelombang 1.598,7 cm^{-1} dan 1.431.60 cm^{-1} untuk karbon aktif dengan pemanasan konvensional (CAC). Keberadaan gugus fungsi C-O teridentifikasi pada panjang gelombang 1076,39 cm^{-1} untuk arang dan 1047,41 cm^{-1} untuk CAC (Ahmed, dkk., 2019; Van, dkk., 2014; Stavrinou, dkk., 2018). Sementara, pada MAC (karbon teraktivasi NaOH dengan pemanasan gelombang mikro) terlihat adanya gugus fungsi O-H yang ditunjukkan dengan adanya puncak pada bilangan gelombang 3843,98 cm^{-1}, 3741,15 cm^{-1} dan 3367,41 cm^{-1}. Keberadaan gugus fungsi O-C=O teridentifikasi pada bilangan gelombang 2.356,56 cm^{-1}, gugus fungsi C=C atau C=O teridentifikasi pada bilangan gelombang 1.568,63 cm^{-1} dan 1.393,36 cm^{-1}, sementara keberadaan gugus fungsi C-O terlihat dengan adanya puncak pada bilangan gelombang 1.058,5 cm^{-1}. Adanya perubahan dan pergeseran puncak tersebut disebabkan oleh adanya erosi dalam pembentukan pori yang menandakan bahwa karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro memiliki pori yang lebih besar. Selain itu, pergeseran puncak juga memperlihatkan adanya penambahan jumlah gugus fungsi.



Gambar 6.10. Hasil uji FTIR

F. Uji Adsorpsi Karbon Aktif Eceng Gondok

Uji kemampuan adsorpsi karbon aktif eceng gondok dilakukan terhadap zat warna *brilliant-blue* yang sering digunakan sebagai pewarna batik di Kampung Batik Semarang. Larutan induk *brilliant-blue* 1.000 ppm diperoleh dengan cara melarutkan 0,5 gram *brilliant-blue* dengan 500 mL aquades. Sementara, larutan *brilliant-blue* dengan konsentrasi tertentu yang diinginkan diperoleh dengan cara melarutkan larutan induk dengan aquades. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan shaker Unimax 2010, dengan kecepatan konstan 210 rpm, pada suhu 30^{o}C dengan variabel pH, waktu, dan konsentrasi awal larutan. Filtrat hasil proses adsorpsi selanjutnya diuji kadar *brilliant-blue* yang tersisa menggunakan spektrofotometer Uv-Vis (Model Genesys 10 uv, Thermo Scientific, USA) pada panjang gelombang 630 nm. Jumlah *brilliant blue* yang teradsorpsi, q_e (mg/g), dinyatakan sebagai:

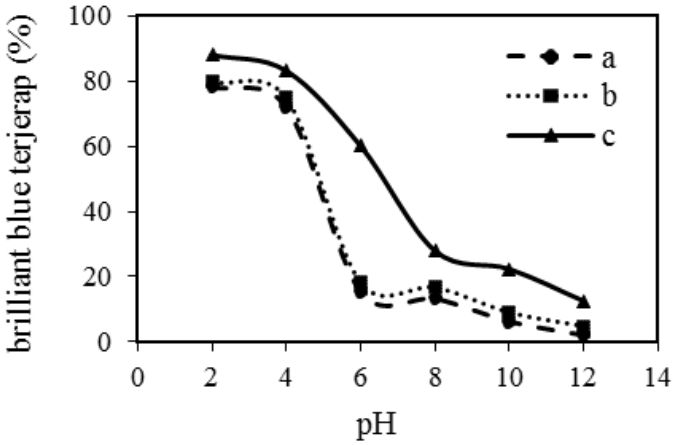
$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (6.1)$$

dengan C_0 dan C_e berturut-turut adalah konsentrasi awal *brilliant blue* dan konsentrasi *brilliant blue* saat kesetimbangan (mg/L), *V* adalah volume larutan (L), sedangkan *m* adalah massa karbon aktif. Sementara, *brilliant blue* teradsorpsi (%) dinyatakan sebagai:

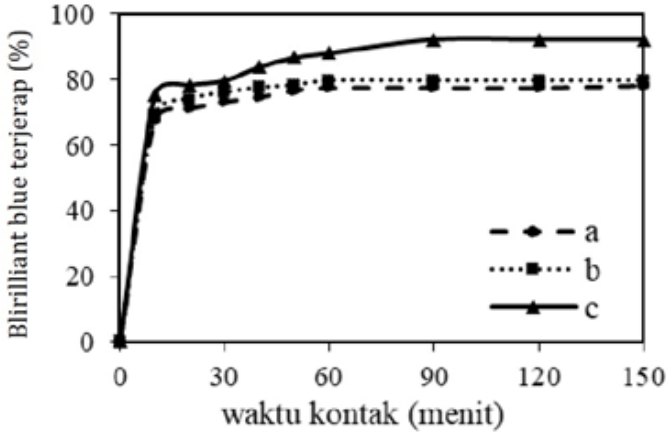
$$\textit{brilliant blue}\ \text{teradsorpsi}\ (\%) = \frac{(C_o - C_t)}{C_o}\ x\ 100 \quad (6.2)$$

dengan C_t adalah konsentrasi zat warna *brilliant blue* pada fasa larutan pada waktu tertentu (mg/L).

Pengaruh pH dalam proses adsorpsi dipelajari pada rentang pH 2–12 dengan konsentrasi awal *brilliant blue* 10 ppm dan waktu kontak 180 menit seperti ditunjukkan oleh gambar 6.11. Secara umum, jumlah *brilliant blue* yang terjerap akan menurun seiring dengan peningkatan pH. Hal ini dikarenakan pada pH rendah, permukaan karbon aktif akan terprotonasi sehingga situs aktif memiliki muatan positif yang berlawanan dengan muatan negatif dari zat warna *brilliant blue* yang merupakan zat warna anionik, sehingga terjadi gaya tarik menarik antara permukaan adsorben dengan molekul adsorbat yang menyebabkan adsorbat terikat pada adsorben (Tahir, dkk., 2016). Peningkatan pH akan meningkatkan keberadaan ion OH^- yang menyebabkan persaingan antara ion OH^- dan muatan negatif dari molekul zat warna anionik dalam mencapai situsi aktif dari adsorben, sehingga jumlah *brilliant blue* yang terjerap menurun. Jumlah *brilliant blue* terjerap yang tertinggi diperoleh pada karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro, yaitu sebesar 88%, sementara jumlah *brilliant blue* yang pada karbon tanpa aktivasi dan karbon aktif dengan pemanasan konvensional berturut-turut 78,25% dan 79,65%.



Gambar 6.11. Pengaruh pH terhadap jumlah *brilliant blue* terjerap
(a = Karbon Tanpa Aktivasi, b = CAC, c = MAC)

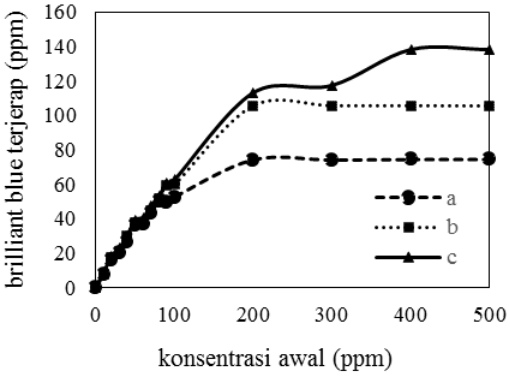


Gambar 6.12. Pengaruh waktu kontak terhadap persentase *brilliant blue* terjerap
(a = Karbon Tanpa Aktivasi, b = CAC, c = MAC)

Pengaruh waktu kontak terhadap proses adsorpsi dipelajari pada pH larutan 2 dengan konsentrasi awal 10 ppm dan variasi waktu kontak 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, dan 150 menit, di mana hasilnya tersaji pada gambar 6.12. Jumlah zat warna yang terjerap meningkat seiring dengan kenaikan waktu kontak, dan setelah terjadi kesetimbangan,

jumlah zat warna yang terjerap cenderung konstan (Pathania, dkk., 2017). Berdasarkan gambar 6.12 juga terlihat bahwa kesetimbangan terjadi setelah 150 menit. Jumlah *brilliant blue* terjerap tertinggi diperoleh pada karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro, yaitu sebesar 88%, sementara jumlah *brilliant blue* terjerap oleh karbon tanpa aktivasi dan karbon aktif dengan pemanasan konvensional adalah 78,25% dan 79,65%.

Pengaruh konsentrasi awal *brilliant blue* pada proses adsorpsi dipelajari pada pH 2 dengan waktu kontak 150 menit dan variasi konsentrasi 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, dan 500 mg/L dengan hasil seperti ditunjukkan oleh gambar 6.13. Jumlah *brilliant blue* yang terjerap meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi awal *brilliant blue*, dan pada saat kesetimbangan tercapai, jumlah *brilliant blue* yang terjerap cenderung konstan. Kemampuan adsorpsi karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro sebesar 138,31 ppm. Nilai ini lebih tinggi dibanding dengan karbon tanpa aktivasi dan karbon aktif dengan pemanasan konvensional, yaitu sebesar 74,39 dan 105,58 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro lebih efektif dalam menjerap *brilliant blue*.



Gambar 6.13. Pengaruh konsentrasi awal terhadap jumlah *brilliant blue* terjerap (a = Karbon Tanpa Aktivasi, b = CAC, c = MAC)

G. Model Kesetimbangan Adsorpsi Brilliant Blue oleh Karbon Aktif

Model kesetimbangan adsorpsi atau yang dikenal sebagai *adsorption isotherm* digunakan untuk menggambarkan interaksi antarmolekul adsorbat dengan adsorben. Proses adsorpsi zat warna *brilliant blue* pada karbon aktif eceng gondok digambarkan menggunakan tiga model, yaitu Langmuir, Freundlich, dan Redlich-Peterson. Model isotermis Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi secara lapis tunggal atau *monolayer* dan tidak ada interaksi di antara molekul-molekul adsorbat (Astuti dkk., 2019). Model isotherm Langmuir dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$q_e = q_m \frac{K_L C_e}{1+K_L C_e} \tag{6.3}$$

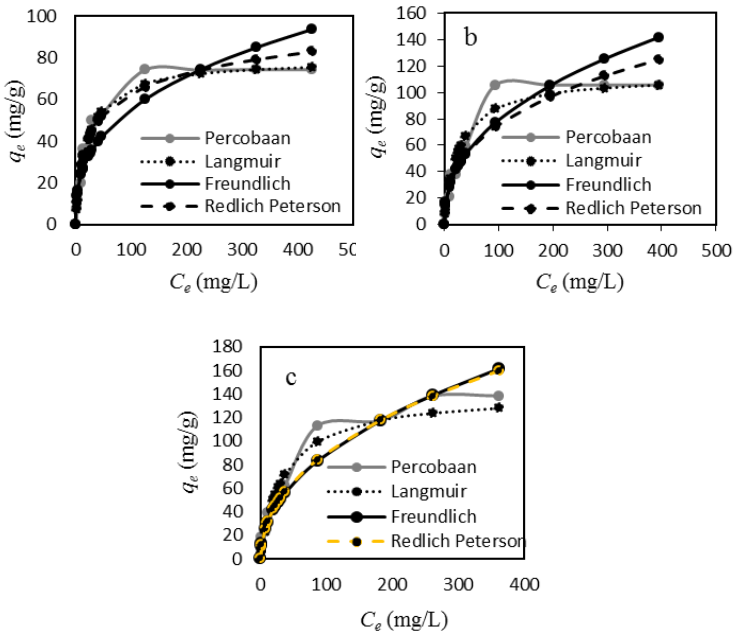
dengan C_e adalah konsentrasi *brilliant blue* di larutan saat kesetimbangan (mg/L), q_m adalah kapasitas adsorpsi (mg/g), dan k_L (L/mg) adalah konstanta Langmuir (Astuti dkk., 2019). Sementara, model isotherm Freundlich lebih menggambarkan adsorpsi yang terjadi pada permukaan heterogen. Model isotherm Freundlich dinyatakan sebagai persamaan:

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \tag{6.4}$$

dengan K_F (L/g) adalah konstanta Freundlich, yang berhubungan dengan kapasitas adsorpsi, dan *1/n* adalah intensitas adsorpsi (Astuti, dkk., 2019). Sementara, model isotherm Redlich-Peterson menggabungkan antara model isotherm Langmuir dan Freundlich. Model ini menggunakan pendekatan model isotherm Freundlich pada konsentrasi tinggi dan model isotherm Langmuir pada konsentrasi yang rendah (Astuti, dkk., 2019). Model isotherm Redlich Peterson dinyatakan sebagai persamaan:

$$q_e = \frac{K_R C_e}{1+\alpha_R C_e^{\beta}} \quad (6.5)$$

dengan K_R (L/g) dan α_R (L/mg) adalah konstanta isotherm Redlich-Peterson, dan β adalah eksponen isotherm Redlich-Peterson (Astuti, dkk., 2019). Grafik isoterm adsorpsi pada arang, karbon aktif dengan pemanasan konvensional, dan karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro ditunjukkan oleh gambar 6.14, sementara nilai konstanta pada model isoterm Langmuir, Freundlich, dan Redlich-Peterson tersaji pada tabel 6.1. Data pada tabel 6.1 menunjukkan bahwa model kesetimbangan yang paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi adalah model kesetimbangan Langmuir karena memiliki nilai R^2 yang paling tinggi, dengan nilai kapasitas adsorpsi untuk arang, karbon aktif dengan pemanasan konvensional, dan karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro berturut turut adalah 79,42 mg/g, 112,95 mg/g, dan 140,51 mg/g.



Gambar 6.14. Model isoterm adsorpsi pada (a) karbon tanpa aktivasi, (b) karbon aktif dengan pemanasan konvensional (CAC), dan (c) karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro (MAC)

Tabel 6.1. Nilai konstanta model kesetimbangan adsorpsi

Adsorben	Isotermis Langmuir	Isotermis Freundlich	Isotermis Redlich Peterson
Karbon tanpa aktivasi	q_m = 79,42 K_L = 0,04 R^2 = 0,98	n = 0,36 K_F = 10,34 R^2 = 0,97	a_R = 0,18 K_R = 6,44 R^2 = 0,92
CAC	q_m = 112,95 K_L = 0,04 R^2 = 0,99	n = 0,42 K_F = 11,28 R^2 = 0,98	a_R = 1,36 K_R = 21,05 R^2 = 0,96
MAC	q_m = 140,51 K_L = 0,03 R^2 = 0,96	n = 0,46 K_F = 10,47 R^2 = 0,94	a_R = 2,72 K_R = 33,79 R^2 = 0,92

Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi tertinggi diperoleh pada karbon aktif dengan pemanasan gelombang mikro karena memiliki gugus fungsi yang lebih banyak dan ukuran pori yang lebih besar.

H. Simpulan

Karbon aktif eceng gondok yang disintesis menggunakan pemanasan gelombang mikro (MAC) berpotensi digunakan untuk menjerap zat warna *brilliant blue* yang dihasilkan oleh industri batik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa MAC memiliki gugus fungsi yang lebih beragam, ukuran pori lebih besar, serta kapasitas adsorpsi yang lebih besar, yaitu sebesar 140,51 mg/g dibandingkan karbon tanpa aktivasi dan karbon aktif dengan pemanasan konvensional (CAC).

Daftar Pustaka

Aljeboree, A.M., Alshirifi, A.N., Alkaim, A.F. 2017. Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon, *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3381–S3393.

Ahmed, M.B., Johir, Md. A.H., Zhou, J.L., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Richardson, C., Moni, M.A., Bryant, M.R. 2019. Activated carbon preparation from biomass feedstock: Clean production and carbon dioxide adsorption, *Journal of Cleaner Production*, 225, 405-413.

Ao, W., Fu, J., Mao, X., Kang, Q., Ran, C., Liu, Y., Zhang, H., Gao, Z., Li, J., Liu, G., Dai, J. 2018. Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass : A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 958–979.

Astuti, W., Sulistyaningsih, T., Kusumastuti, E., Thomas, G.Y.R.S., Kusnadi, R.Y. 2019. Thermal conversion of pineapple crown leaf waste to magnetized activated carbon for dye removal, *Bioresource Technology*, 287, 121426.

Baytar, O., Şahin, Ö., Saka, C. 2018. Sequential application of microwave and conventional heating methods for preparation of activated carbon from biomass and its methylene blue adsorption, *Applied Thermal Engineering*, 138, 542-551.

Beluci, N.C.L., Mateus, G.A.P., Miyashiro, C.S, Hamem, N.C., CGomes, R.G., Fagundes-Klen, M.R., bergamasco, R., Viera, A.M.S. 2019. Hybrid treatment of coagulation / flocculation process followed by ultrafiltration in TiO_2 - modified membranes to improve the removal of reactive black 5 dye, *Science of the Total Environment*, 664, 222–229.

Bergaoui, M., Nakhli, A., Benguerba, Y., Khalfaoui, M., Erto, A., Soetaredjo, F.E, Ismadji, S., Ernst, B. 2018. Novel insights into the adsorption mechanism of methylene blue onto organo-bentonite: Adsorption isotherms modeling and molecular simulation, *Journal of Molecular Liquids*, 272,697-707

Khumalo, M.B.B., Khumalo, N. P., Nthunya, L. N., De Canck, E., Deres, S., Verliefde, A.R.D., Kuvarega, A.T., Mhlanga, S.D., Dlamini, D.S. 2019. Congo red dye removal by direct membrane distillation using PVDF/ PTFE membrane. *Separation and Purification Technology*, 211, 578–586.

Nidheesh, P.V, Zhou, M., Oturan, M.A. 2018. An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes, *Chemosphere*, 197, 210–227.

Pathania, D., Sharma, S., Singh, P. 2017. Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from Ficus carica bast, *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1445–S1451.

Priya, E.S., Selvan, P.S. 2017. Water hyacinth (Eichhornia crassipes)–An efficient and economic adsorbent for textile effluent treatment – A review, *Arabian journal of chemistry*, 10(2), S3548-S3558.

Sabarish, R., Unnikrishnan, G. 2018. PVA/PDADMAC/ZSM-5 zeolite hybrid matrix membranes for dye adsorption: fabrication, characterization, adsorption, kinetics and antimicrobial properties. *Biochemical Pharmacology*, 6(4), 3860-3873.

Stavrinou, A., Aggelopoulos, C. A., Tsakiroglou, C. D. 2018. Exploring the adsorption mechanisms of cationic and anionic dyes onto agricultural waste peels of banana , cucumber and potato : Adsorption kinetics and equilibrium isotherms as a tool. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 6958–6970.

Tahir, M. A., Bhatti, H. N., Iqbal, M. 2016. Solar red and brittle blue direct dyes adsorption onto Eucalyptus angophoroides bark: Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2), 2431-2439.

Thue, P. S., Adebayo, M. A., Lima, E. C., Sieliechi, J. M., Machado, F. M., Dotto, G. L., Vaghetti, J.C.P., Dias, S. L. P. 2016. Preparation , characterization and application of microwave-assisted activated carbons from wood chips for removal of phenol from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, 223, 1067–1080.

Van, K. L., Thi, T.T.L. 2014. Activated carbon derived from rice husk by NaOH activation and its application in supercapacitor. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(2), 1–8.

Xiao, X., Liu, D., Yan, Y., Wu, Z., Wu, Z., Cravotto, G. 2015. Preparation of activated carbon from Xinjiang region coal by microwave activation and its application in naphthalene, phenanthrene and pyrene adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 53, 160-167.