Terbit online pada laman web jurnal : https://ppjp.ulm.ac.id/journals/index.php/jns/index

JNS JURNAL Natural Scientiae

Vol. 5 No. 25 Mei 2025

Halaman : 34 – 48

e-ISSN : 2809 - 9796

Karakterisasi Struktural dan Fungsional Komposit Fe_3O_4@C dari Bahan Alam dengan Variasi Rasio untuk Aplikasi Adsorpsi Zat Warna

Zahratunnisa Zahratunnisa, Nurul Azizah, Sadang Husain*), Ninis Hadi Haryanti

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lambung Mangkurat

*Email korespodensi : sadanghusain@ulm.ac.id
Submited: 16 Mei 2025; *Accepted*: 24 Mei 2025

ABSTRACT− Composite Fe_3O_4@C from Tanah Laut iron ore and active carbon as a source of carbon is a material that can be used as an adsorbent for textile dyes on Methylene Blue (MB). This study aims to obtain the characteristics of Fe_3O_4@C, including crystal structure, crystal size, and functional groups, and to obtain the optimal time for the adsorption process in each variation of Fe_3O_4@C, 1:1, 1:2, and 1:3, on variations in the mass of the material, 0.0075 g, 0.0150 g, and 0.0225 g. Composite synthesis using the coprecipitation method made from Tanah Laut iron ore and 250 mesh activated carbon, $FeCl_3$, and $FeCl_2$, and then applied as adsorbents to 10 ppm Methylene Blue (MB) dye. Based on the research, obtained a cubic crystal structure with the average crystal size at each variation of Fe_3O_4@C 1:1, Fe_3O_4@C 1:2, and Fe_3O_4@C 1:3 are 8.63 nm, 46.84 nm, and 15.05 nm, The types found in Fe_3O_4@C composites are Fe-O, CO, C=O, and C=N, and the optimum times obtained are 150 min (1:1), 180 min (1:2), and 150 min (1:3) on Methylene Blue (MB).

KEYWORDS: Iron ore; activated carbon; composite Fe3O4@C; adsorbent; methylene blue.

PENDAHULUAN

Material partikel magnetit (Fe_3O_4) telah banyak dikembangkan karena potensi dan sifatnya (Wei et al., 2011). Magnetit (Fe_3O_4) sering digunakan karena sifat kemagnetannya yang kuat. Sifat ini sebagian besar dipengaruhi oleh morfologi, ukuran, interaksi antarmuka dan karakteristik fisika dari partikel tunggal. Selain itu luas permukaan yang besar menjadi satu di antara keunggulan material magnetit sehingga memiliki potensi untuk mengadsorpsi logam berat. Sifat material yang bergantung dari ukurannya ini menunjukkan responsibilitas magnetiknya, semakin kecil ukuran butir maka semakin tinggi responsibilitas magnetiknya (Riyanto, 2012). Aplikasi dari material magnetit cukup banyak, diantaranya biosensor, *localizer* dalam terapi *hyperthermia*, *magnetic targeted-drug delivery system* (Wei et al., 2011) pelindung korosi pembuatan baja dan sebagai adsorben logam-logam berat (Astuti, 2012). Penelitian material magnetit telah banyak dilakukan seperti pada penelitian Trisnawati et al. (2013) dengan hasil berukuran rata-rata 10 nm dengan menggunakan metode hidrotermal. Penelitian material magnetit juga dilakukan oleh

Sholihah (2010) menggunakan pasir besi alam dengan metode kopresipitasi dan mendapatkan ukuran sebesar 10,9+3,5 nm. Berdasarkan penelitian Mira (2018) menggunakan pasir besi yang juga menggunakan metode kopresipitasi menunjukkan keseragaman ukuran material yang terbentuk sangat tinggi yaitu rata-rata 1,2+0,2 nm. Rampengan (2019) mengatakan keunggulan yang berupa ukuran partikel, sifat permukaan dan sifat kemagnetan dari material magnetit inilah yang membuatnya mudah termodifikasi dengan material lain. Trisnawati et al. (2013) mengatakan selain kelebihan di atas, nanopartikel magnetit memiliki kekurangan yaitu laju penyerapan rendah yang dikarenakan terbatasnya difusi material Fe_3O_4 dalam larutan air. Sehingga untuk meningkatkan kinerja adsorpsinya maka dilakukan pelapisan dengan karbon.

Karbon telah banyak diteliti dikarenakan karbon berlimpah di alam, stabil, dan mudah dikompositkan. (Rahman et al., 2015). Berlimpahnya karbon maka mengakibatkan banyak penelitian tentang mensintesis karbon dari material yang mengandung karbon yang besar. Sumber karbon yang paling banyak digunakan adalah gula, glukosa, selulosa, dan sukrosa (Hu et al., 2008) berpori memiliki luas permukaan yang tinggi, volume pori yang besar, serta mekanis dan termal stabil (Zhang and Kong, 2011). Namun, karbon dapat mengendap menjadi endapan baru sehingga sulit dibersihkan dalam larutan air. Oleh karena itu, maka diperlukan perlakuan pada karbon dengan mengkompositkan dengan material magnetit (Fe_3O_4) untuk meningkatkan kinerja adsorpsi. Magnetit (Fe_3O_4) yang dikompositkan dengan karbon membentuk komposit Fe_3O_4@C.

Penelitian komposit Fe_3O_4@C telah banyak dilakukan. Komposit Fe_3O_4@C berpotensi sebagai adsorben magnetik untuk pengolahan air limbah (Ianoş, Păcurariu and Mihoc, 2014) adsorben pewarna organik (Zhang and Kong, 2011), adsorben pewarna tekstil (Trisnawati et al., 2013) dan adsorben logam berat (Co dan Fe) dalam larutan (Sartika, 2016). Material magnetit yang dimodifikasi dengan karbon juga diketahui memiliki sifat adsorpsi-desorpsi yang baik sehingga bisa diaplikasikan sebagai *drug delivery* (Ríos-hurtado et al., 2016;Alegret et al., 2017), berpotensi untuk adsoprsi CO_2 (Alfe et al., 2015) untuk adsorpsi Phenol dan p-chlorophenol (Ianoş, Păcurariu and Mihoc, 2014), untuk menghilangkan anilin pada larutan air (Kakavandi et al., 2013) untuk menghilangkan logam kromium (Zhou et al., 2017). Penelitian yang dilakukan oleh Husain (2019) menggunakan bijih besi dan glukosa sebagai sumber karbon. Proses penggabungan Fe_3O_4 dilakukan dengan metode hidrotermal. Sifat magnetik yang dihasilkan dari material Fe_3O_4@C memiliki nilai magnetisasi (Ms) sebesar 24,82 emu/g. Material ini bersifat superparamagnet dan tergolong *soft magnetic*. Distribusi ukuran partikel dari komposit Fe_3O_4@C ini dalam rentang 5 nm – 20 nm dengan rata-rata ukuran partikel 12 nm. Penelitian Sobirin et al. (2017) material magnetit dari pasir besi dengan penambahan karbon aktif dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi yang diketahui dengan menggunakan metode titrasi kompleksiometri.

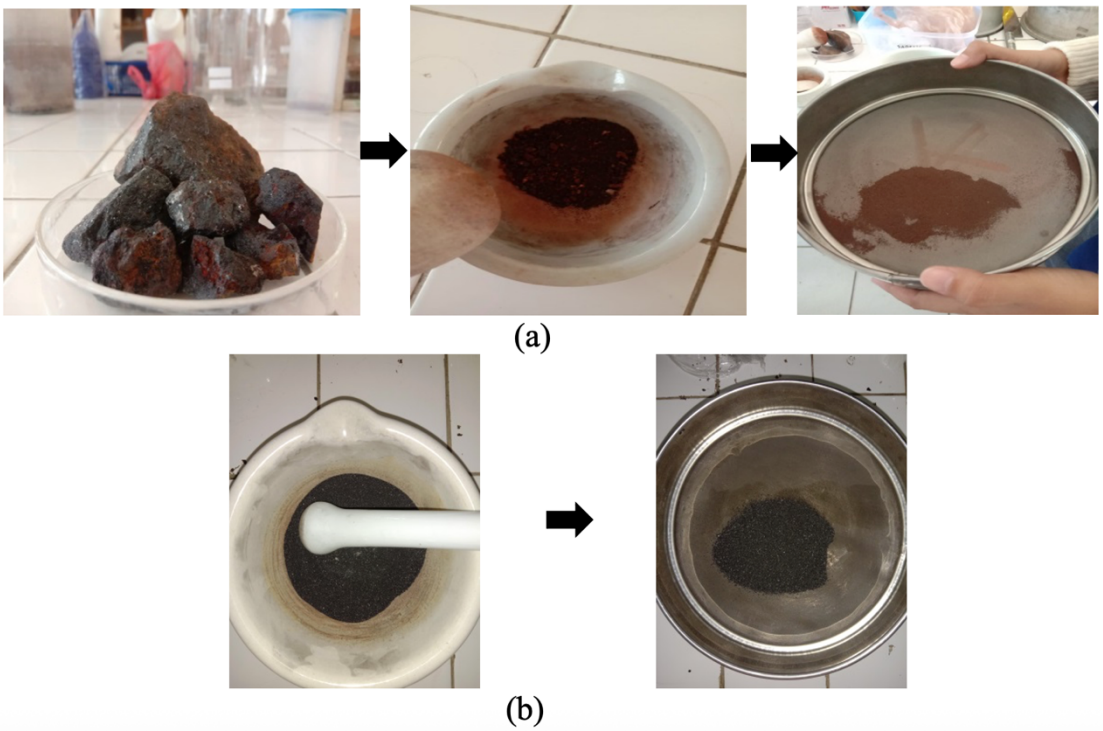
Pada penelitian ini dilakukan karakterisasi dari hasil sintesis material magnetit Fe_3O_4 dari bijih besi asal Kabupaten Tanah Laut Provinsi Kalimantan Selatan yang dikompositkan dengan karbon aktif komersil menggunakan metode kopresipitasi dan diaplikasikan pada zat warna tekstil Methylene Blue (MB). Trisnawati et al. (2013) mengatakan pelapisan karbon dapat meningkatkan daya serap Fe_3O_4. Hal ini dikarenakan karbon memiliki sifat sebagai adsorben sehingga komposit Fe_3O_4@C memiliki kelebihan selain berdaya serap tinggi juga lebih stabil. Merdekani (2013) menyatakan bahwa metode kopresipitasi merupakan metode yang lebih baik untuk membuat partikel nano dikarenakan keserbagunaan dan kesederhanaan. Penggunaan zat warna Rodhamin B dan MB cukup mewakili untuk dapat diaplikasikan oleh adsorben. Rodhamin B merupakan zat warna yang sering digunakan karena harga yang ekonomis dan mudah didapat dan termasuk warna dasar yang penting dalam proses pewarnaan dalam industri tekstil dan kertas (Cahyadi, 2006). Dalam industri tekstil, sutra, wool, dan kosmetik zat warna MB juga merupakan zat warna yang paling sering dipakai dan merupakan satu diantara warna dasar dan harganya terbilang murah dibandingkan dengan warna lainnya (Hamdaoui, 2007). Pada penelitian ini menggunakan metode kopresipitasi dan uji yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan Spektroskopi Ultraviolet-Visible (UV-Vis).

METODE PENELITIAN

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya yaitu bijih besi, larutan HCl 37%, $FeCl_2$, karbon aktif komersial, aquades, etanol, zat warna Methylene Blue (MB). Alat-alat yang digunakan yaitu *magnetic stirrer bar, hotplate*, ayakan/ saringan 250 mesh, gelas beker, mortar, gelas ukur, oven, FTIR, XRD, dan UV-Vis.

Preparasi Sampel Bijih Besi dan Karbon Aktif

Bijih besi diambil di desa sumber mulia Kabupaten Tanah Laut. Preparasi sampel dilakukan di Laboratorium Fisika Dasar III dengan menggunakan martil dan magnet permanen. Bijih besi dicuci dahulu kemudian setelah kering dihancurkan menggunakan martil untuk membentuk serbuk agar dalam proses sintesis bahan dapat larut dengan mudah. Serbuk yang dihasilkan kemudian dipisahkan dari pengotornya menggunakan magnet permanen dan dilakukan pengayakan menggunakan mesh/saringan 250 mesh untuk menyeragamkan ukuran serbuk. Karbon aktif juga diberikan perlakuan yang sama yaitu karbon aktif digerus dan dilakukan pengayakan menggunakan mesh/saringan 250 mesh. Proses ini dapat dillihat pada Gambar 1.



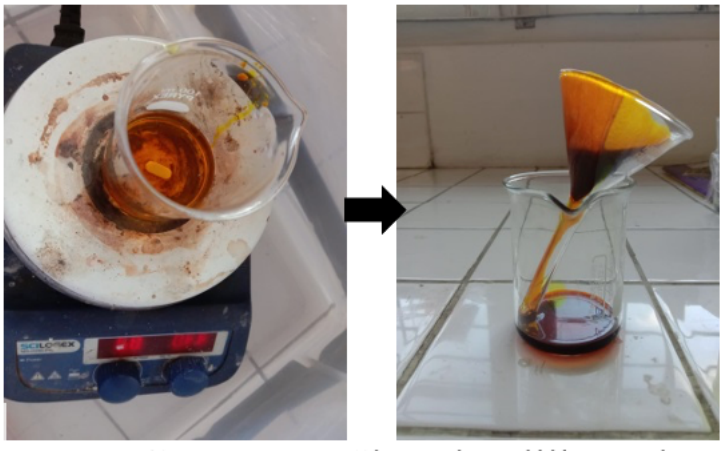
Gambar 1 Sampel bijih besi (a) Sampel karbon aktif (b)

Sintesis Nanopartikel Fe_3O_4

Sintesis nanopartikel magnetit akan dilakukan di Laboratorium Fisika Material/ Laboratorium Fisika Dasar III FMIPA ULM Banjarbaru. Sintesis nanopartikel magnetit dalam penelitian ini menggunakan metode kopresipitasi seperti yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya oleh Sholihah (2010), Trisnawati, et. al. (2013), dan Husain, et. al. (2019). Bijih besi yang telah digerus dan diayak pada proses preparasi bijih besi ditimbang sebanyak 6 g dan dilarutkan dalam HCl 37% 20 ml kemudian dipanaskan dengan suhu 70°C selama 30 menit (Husain, 2016). Proses pemanasan diikuti dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer bar* dengan kecepatan 450 rpm. Selanjutnya larutan yang dihasilkan disaring menggunakan kertas

saring untuk memisahkan larutan garam besi Fe^{3+} dengan endapan besi yang tidak ikut terlarut. Proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Larutan garam besi Fe^{3+} sebanyak 10 ml dan diberi penambahan akuades sehingga mencapai 20 ml. kemudian ditambahkan 1,988 g $FeCl_2.4H_2O$ sebagai sumber ion Fe^{2+} dan distirer selama 30 menit dengan suhu 70℃ dengan kecepatan 450 rpm dan sambil ditetesi dengan larutan NaOH 15% secara perlahan sampai larutan berwarna hitam pekat, yang menandakan bahwa Fe_3O_4 telah terbentuk.



Gambar 2 Sintesis bijih besi

Sintesis Komposit Fe_3O_4@C

Proses penggabungan Fe_3O_4 dengan karbon akan dilakukan dengan metode kopresipitasi. Larutan hasil Fe_3O_4 ditambahkan dengan karbon aktif yang sudah digerus dan diayak dengan ukuran 250 mesh. Kemudian distirer kembali selama 30 menit dengan suhu 150℃ dengan kecepatan 450 rpm. Variasi komposisi magnetit dan karbon aktif adalah 1:1; 1:2; dan 1:3. Hasil larutan kemudian dicuci dengan akuades dan etanol sampai pH netral sambil disaring dan endapannya diambil dengan menempatkan magnet permanen di bawahnya. Hasil endapan tersebut dikeringkan sampai menjadi serbuk di dalam oven pada suhu 100℃ selama 3 jam (Husain et al., 2016) yang dapat dilihat pada Gambar 3. Sampel yang sudah dikeringkan kemudian digerus dan dapat diaplikasikan langsung sebagai adsorben.

Gambar 3 Pengeringan sampel Fe_3O_4@C

Karakterisasi Komposit Fe_3O_4@C

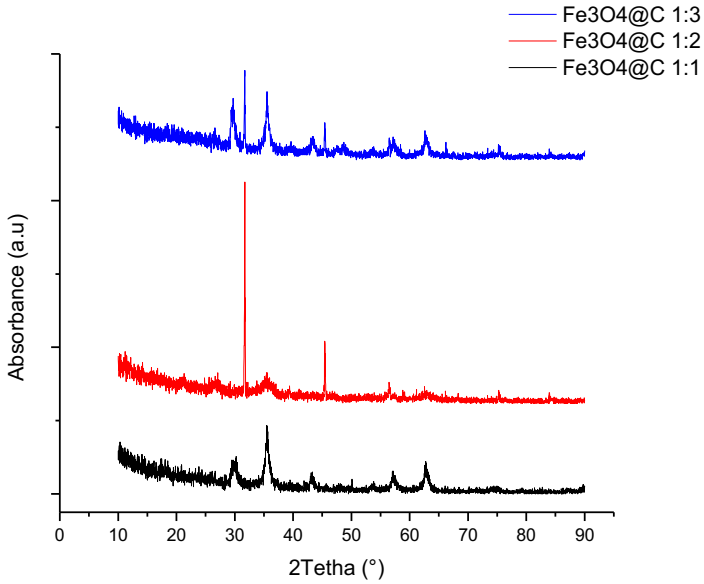
Proses pengujian yaitu uji FTIR, XRD dan UV-Vis dikarakterisasi di Laboratorium Kimia FMIPA ULM dan Universitas Negeri Malang. Adsorpsi zat warna MB menggunakan adsorben

komposit Fe_3O_4@C dengan metode statis (*batch*). Metode ini terbilang sedehana, efektif, efesien, dan murah (Notodarmojo, 2005). Parameter adsorpsi yang diperoleh adalah waktu optimum, perubahan konsentrasi zat warna MB pada Fe_3O_4@C varisasi 1:1, 1:2, dan 1:3. Setiap variasi Fe_3O_4@C diambil beberapa variasi massa yaitu 0,0075 g (A), 0,0150 g (B), dan 0,0225 g (C). Sejumlah 0,0075 g (A) nanokomposit Fe_3O_4@C 1:1 ke dalam 30 ml larutan warna MB 10 ppm kemudian diaduk dengan kecepatan 400 rpm (tanpa suhu) selama 3 jam dan setiap setengah jam 2,5 ml larutan warna diambil untuk pengujian UV-Vis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD)

Hasil karakterisasi pada material Fe_3O_4@C 1:1, 1:2, dan 1:3 yang dianalisa menggunakan instrumen XRD dapat ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil sintesis oksida besi memiliki kemiripan pola difraksi dengan data base XRD dari Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS) dengan nomor katalog 11-0614 yaitu 18,277; 30,105; 35,451; 43,123; 53,478; 57,012; 62,585; 70,967; dan 74,063; yang merupakan jenis mineral magnetit (Fe_3O_4). Difraktogram XRD Fe_3O_4@C 1:1 menunjukkan lima puncak difraksi pada 2θ = 30,108˚; 35,534˚; 43,169˚; 57,107˚; dan 62,764˚. Difraktogram XRD Fe_3O_4@C 1:2 menunjukkan enam puncak difraksi pada 2θ = 26,8445˚; 31,7137˚; 35,4107˚; 45,4308˚; 56,4824˚; dan 75,3068˚. Difraktogram XRD Fe_3O_4@C 1:3 menunjukkan tujuh puncak difraksi pada 2θ = 26,636˚; 29,739˚; 31,705˚; 35,545˚; 43,291˚; 45,454˚; dan 57,168˚. Puncak pada 2θ menunjukkan material magnetit yaitu sebuah kristal yang terbentuk dari alam (Juang et al., 2018) dan berdasarkan hal ini, dapat dikatakan sebagian besar membentuk oksida besi fasa magnetit Fe_3O_4 dengan kata lain mengindikasikan bahwa material Fe_3O_4@C telah berhasil disintesis. Sementara puncak pola difraksi yang dimiliki karbon aktif adalah lebar dan hal ini menunjukkan fasa amorf dari struktur karbon aktif dan semakin banyak fraksi oksida besi Fe_3O_4 pada suatu komposit maka puncak yang berasal dari oksida besi ini akan semakin tinggi pula (Fisli et al., 2012). Struktur kristal yang didapatkan adalah kubik dengan unit sel a= 8,3985 Å berdasarkan software match yang bersesuaian dengan data literasi bahwa magnetit mempunyai struktur kristal spinel dengan sel unit kubik (Hook dan Hall, 1991).



Gambar 4 Difraktogram XRD perbandingan material komposit Fe_3O_4@C 1:1 dengan Fe_3O_4@C 1:2, dan Fe_3O_4@C 1:3

Berdasarkan hasil karakterisasi XRD di atas, didapatkan ukuran kristal dari masing-masing sampel Fe_3O_4@C di setiap puncak pola difraksinya menggunakan persamaan rumus Scherrer (1):

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (1)$$

di mana λ = panjang gelombang sinar-X yang digunakan, dan θ = sudut difraksi, K = adalah konstanta yang besarnya tergantung pada faktor bentuk kristal, bidang (hkl) difraksi, dan definisi besaran β yang digunakan, apakah sebagai *Full Width at Half Maximum* (FWHM) atau Integral Breadth dari puncak. Nilai K sebenarnya bervariasi dari 0,62 sampai 2,08. Nilai yang umumnya digunakan untuk K adalah: 0,9 (Sumadiyasa dan Manuaba, 2018). Berdasarkan persamaan di atas diperoleh ukuran kristal pada setiap puncak dari material Fe_3O_4@C 1:1 memiliki rata-rata sebesar 8,63 nm. Ukuran kristal pada material Fe_3O_4@C 1:2 memiliki rata-rata sebesar 46,84 nm. Ukuran kristal pada material Fe_3O_4@C 1:3 memiliki rata-rata kristal adalah 15,05 nm. Tabel 1 menunjukkan hasil analisis gugus fungsi pada material komposit Fe_3O_4@C 1:1, Fe_3O_4@C 1:2, dan Fe_3O_4@C 1:3 dari beberapa literatur.

Karakterisasi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

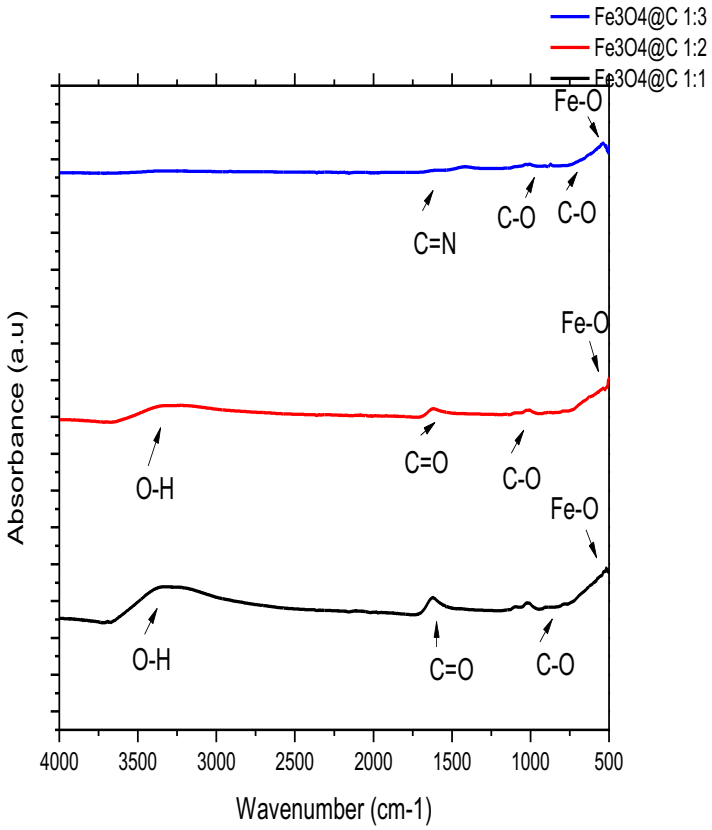
Uji FTIR bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi pada suatu senyawa. Hasil karakterisasi pada material Fe_3O_4@C 1:1, 1:2, dan 1:3 menggunakan (FTIR) dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 5.

Tabel 1 Hasil analisis gugus fungsi pada material komposit Fe_3O_4@C 1:1, Fe_3O_4@C 1:2, dan Fe_3O_4@C 1:3

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang			Referensi
	Fe_3O_4@C 1:1	Fe_3O_4@C 1:2	Fe_3O_4@C 1:3	
Fe-O	516,82	499.65	538,58	Lakay, 2009
C-O	1020,89	1005,87	1027,39	Dachriyanus, 2004
C=O	1621,99	1619,32		Dachriyanus, 2004
O-H	3321,34	3279,33		Dachriyanus, 2004
C=N			1421,24	Dachriyanus, 2004

Spektrum FTIR menggunakan bilangan gelombang 500 cm^{-1} – 4000 cm^{-1}. Berdasarkan hasil karakterisasi di atas, daerah serapan pada material Fe_3O_4@C 1:1 ditunjukkan dengan adanya puncak-puncak vibrasi pada daerah 516,82 cm^{-1}. Serapan pada daerah ini menunjukkan bahwa terdapat ikatan gugus logam dengan oksigen yaitu ikatan Fe-O dari Fe_3O_4 yang terbentuk pada bilangan gelombang 500 cm^{-1} -600 cm^{-1} (Ihsani et al. 2015) daerah serapan pada 1020,89 cm^{-1} dan 1621,99 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus C-O pada bilangan gelombang 1000 cm^{-1}-1300 cm^{-1} dan adanya gugus C=O pada bilangan gelombang 1680 cm^{-1}-1750 cm^{-1} (Dachriyanus, 2004). Gugus C=O merupakan gugus khas dari karbon aktif (Reknosari et al., 2020), selain itu terdapat serapan pada daerah 3321,34 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus hidroksil yaitu O-H pada bilangan gelombang 3000 cm^{-1}-3750 cm^{-1} (Dachriyanus, 2004). Material Fe_3O_4@C 1:2 juga muncul serapan pada daerah 499,65 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus Fe-O berdasarkan literatur Lakay (2009) pada bilangan gelombang 474 cm^{-1}-636 cm^{-1}, selain itu muncul serapan pada daerah 1005,87 cm^{-1} yang mengindikasikan gugus C-O dan serapan pada daerah 3279,33 cm^{-1} yang mengindikasikan gugus O-H (Dachriyanus, 2004) yang terbentuk pada Fe_3O_4@C 1:2. Menurut Reknosari et al. (2020) komposit Fe_3O_4-arang aktif dari ampas kopi muncul serapan pada bilangan gelombang 1604,77 cm^{-1} menunjukan adanya serapan C=O yang menyatakan bahwa masih terdapat gugus yang berasal dari karbon aktif dan gugus fungsi ini juga terbentuk dari serapan yang terdapat pada bilangan gelombang 1619,32 cm^{-1} pada material Fe_3O_4@C 1:2. Kehadiran Fe_3O_4 ditandai dengan adanya serapan pada bilangan gelombang 538,58 cm^{-1} pada material Fe_3O_4@C 1:3 . Hal ini diketahui gugus fungsi yang terbentuk adalah Fe-O pada bilangan gelombang 500 cm^{-1}-600 cm^{-1}. (Ihsani et al., 2015). Serapan pada bilangan gelombang 872,61 cm^{-1} dan 1027,39 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi dari C-O yang terbentuk pada material (ikatan C-O sangat bervariasi antara 1000-1300, tergantung pada jenis senyawanya) (Dachriyanus, 2004). Gugus fungsi C=N juga terindikasi pada serapan bilangan

gelombang 1421,24 cm^{-1} dan gugus fungsi ini muncul pada daerah serapan 1500 cm^{-1} -1675 cm^{-1} (Dachriyanus, 2004). Gugus fungsi C=N yang terbentuk diduga berasal dari bijih besi yang digunakan saat mensintesis sehingga muncul gugus fungsi karbon dan nitrogen. Keberadaan gugus ini dikarenakan merupakan bahan yang berasal dari alam seperti pada beberapa penelitian lainnya yang juga menggunakan bahan alam (Dachriyanus, 2004).



Gambar 5 Gabungan spektrum FTIR material komposit Fe_3O_4@C 1:1; Fe_3O_4@C 1:2; dan Fe_3O_4@C 1:3

Berdasarkan gabungan spektrum FTIR material Fe_3O_4@C 1:1; Fe_3O_4@C 1:2; dan Fe_3O_4@C 1:3 di atas dapat diperoleh bahwa perbedaan komposisi material karbon aktif yang terlihat pada ketiga spektrum terdapat gugus fungsi Fe-O; C-O; C=O; O-H; dan C=N yang menunjukkan material Fe_3O_4@C telah terbentuk.

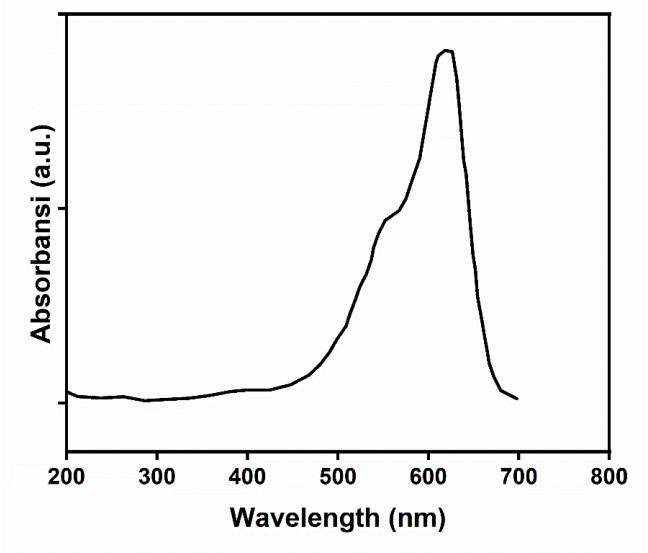
Adsorpsi *Methylene Blue* (MB)

Spektrum serapan UV-Vis dari larutan MB menunjukkan puncak karakteristik pada panjang gelombang sekitar 664 nm, yang merupakan serapan maksimum (λ_max) akibat transisi π→π* dari gugus aromatik dalam struktur MB. Selain itu, puncak kecil di sekitar 610 nm biasanya dikaitkan dengan bentuk agregat dimer dari MB dalam larutan berair (Mahmoodi et al., 2011).

Dalam penelitian ini, perubahan intensitas absorbansi pada λ_max digunakan sebagai indikator konsentrasi MB yang tersisa dalam larutan. Penurunan intensitas absorbansi setelah perlakuan (misalnya penambahan material fotokatalis, adsorben, atau iradiasi cahaya) menunjukkan penurunan konsentrasi MB akibat proses degradasi fotokatalitik atau adsorpsi. Proses ini umumnya dimanfaatkan untuk menilai efisiensi material dalam menghilangkan kontaminan organik dari air (Zhou et al., 2020).

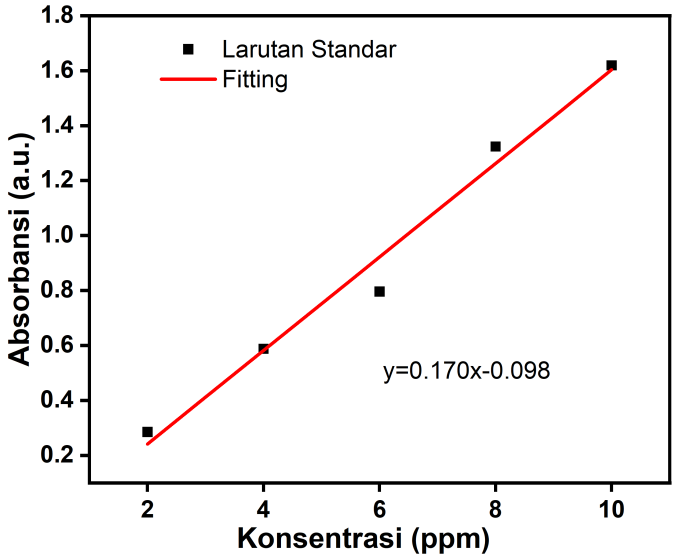
Selain penurunan absorbansi, pergeseran posisi puncak serapan (*bathochromic* atau *hypsochromic shift*) dapat terjadi sebagai akibat interaksi spesifik antara MB dan permukaan material yang digunakan, perubahan pH, atau kondisi lingkungan lainnya. Pergeseran ini dapat memberikan informasi tambahan mengenai mekanisme interaksi yang terjadi (Liu et al., 2018).

Dengan demikian, spektrum UV-Vis memberikan bukti kuat bahwa material yang diuji dapat mempengaruhi stabilitas dan konsentrasi MB melalui mekanisme degradasi atau adsorpsi, dan metode ini terbukti efektif dalam mengevaluasi efisiensi penghilangan zat pewarna dari larutan. Absorbansi MB ditunjukkan pada Gambar 6. Absorbansi maksimal untuk MB yaitu pada panjang gelombang 665 nm.



Gambar 6 Spektrum UV-Vis methylene blue

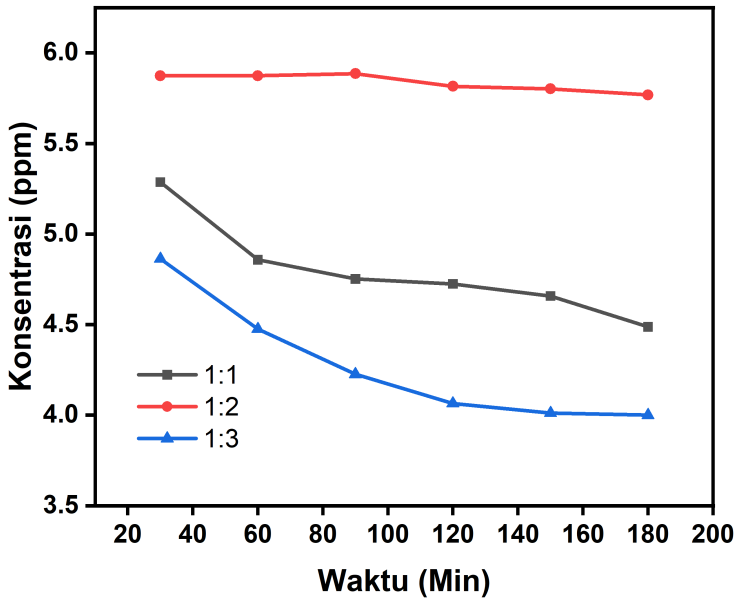
Berdasarkan panjang gelombang yang diperoleh dapat dilakukan pembuatan kurva kalibrasi dengan konsentrasi MB yang digunakan adalah 2, 4, 6, 8, dan 10 ppm. Pembuatan kurva kalibrasi dilakukan dengan pengukuran masing-masing larutan MB dalam panjang maksimum (**Gambar 7**). Berdasarkan hasil kurva di atas dapat diketahui nilai R^2 sebesar 0,9815. Nilai ini mmenunjukkan hubungan yang linier antara absorbansi dan konsentrasi larutan yang diukur. Persamaan regresi linier yang diperoleh adalah y=0,170x-0,098.



Gambar 7 Kurva kalibrasi *Methylene Blue*

Waktu Optimum Absorpsi *Methylene Blue* oleh Fe_3O_4@C

Gambar 8 menunjukkan waktu optimum yang diperlukan oleh adsorben 0,25 mg/mL Fe_3O_4@C 1:1 untuk menyerap zat warna adalah 180 menit dengan perubahan konsentrasi awal yaitu 10 ppm menjadi 4,49 ppm. Kondisi ini adsorben dengan massa tersebut dapat mengikat zat warna secara maksimal dibandingkan waktu lainnya. Berdasarkan Gambar 8 dapat diketahui bahwa 180 menit adalah waktu optimum material 0,25 mg/mL Fe_3O_4@C 1:2 untuk menyerap zat warna MB. Sebelum waktu tersebut yaitu menit 120 ke 150 terjadi kenaikan konsentrasi. Meskipun demikian, jika dilihat dari nilai konsentrasi yang terukur tidak begitu signifikan yaitu dari konsentrasi 5,81 ppm ke 5,86 ppm, kemudian optimum pada waktu 180 menit dengan nilai konsentrasi sebesar 5,76 ppm. Perubahan konsentrasi pada kondisi ini dengan rentang waktu 3 jam, nilai konsentrasinya tidak berubah banyak. Hal ini menunjukkan bahwa komposit tersebut telah mencapai batas kemampuan untuk mengadsorpsi zat warna.



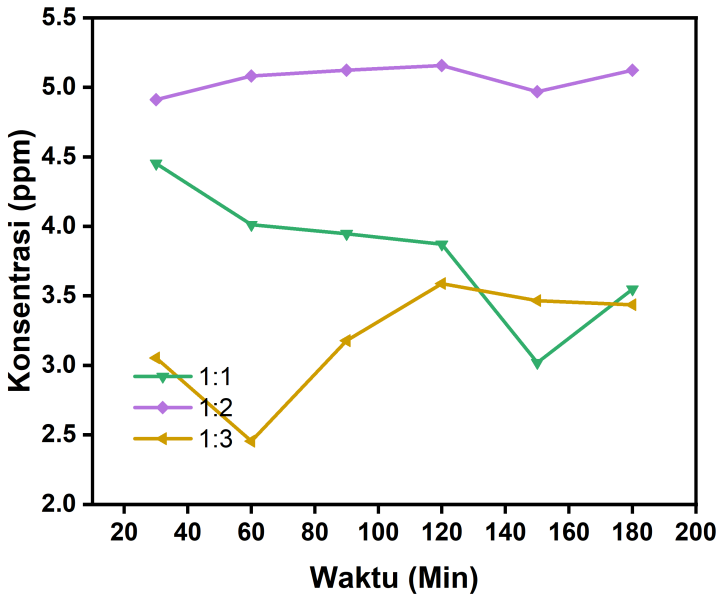
Gambar 8 Kurva 0,25 mg/mL Fe_3O_4@C terhadap waktu adsorpsi MB dengan variasi komposisi dalam massa Fe_3O_4 dan C (1:1; 1:2; 1:3)

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada Gambar 8 dapat diketahui waktu optimum yang didapat dari material komposit 0,25 mg/mL Fe_3O_4@C 1:3 adalah pada menit ke 120 dengan nilai konsentrasi 3,75 ppm. Zat warna yang terserap oleh adsorben lebih banyak dibandingkan pada waktu yang lainnya jika dilihat dari perubahan konsentrasi yang terukur. Namun, setelah waktu tersebut terjadi peningkatan nilai konsentrasi dan ini menandakan terjadinya desorpsi atau pelepasan kembali molekul-molekul yang telah berikatan. Meskipun terjadi peningkatan, perubahannya tidak signifikan yaitu dari 3,87 ppm di menit 120 dan 4 ppm di menit 180. Reknosari *et al*., (2020) mengatakan penurunan adsorpsi atau terindikasinya kenaikan konsentrasi dapat terjadi jika waktu kontak adsorben dengan adsorbat terlalu lama maka akan terjadi pelepasan kembali adsorbat atau adsorben yang telah mencapai titik jenuh (kesetimbangan) sehingga terjadi penurunan daya adsorpsi atau terjadinya peningkatan konsentrasi. Nilai konsentrasi pada komposit Fe_3O_4@C 1:3 dengan variasi massa adsorben paling sedikit (0,25 mg/mL) yang didapat pada waktu optimum yang sebesar 3,75 ppm merupakan nilai konsentrasi terendah jika dibandingkan dengan variasi Fe_3O_4@C yang lainnya yaitu 1:1 dan 1:2. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif dapat meningkatan kemampuan adsorben dapat

menyerap zat warna atau terjadi penurunan konsentrasi. Semakin banyak fraksi gugus karbon aktif pada komposit dapat maka kapasitasnya semakin baik. Fisli et al., (2012).

Berdasarkan Gambar 9, dapat diketahui bahwa waktu optimum pada 0,50 mg/mL Fe_3O_4@C 1:1 mengikat adsorbat yaitu pada waktu 150 menit dengan perubahan nilai konsentrasi dari 10 ppm menjadi 3,02 ppm. Nafi'ah (2018) mengatakan semakin lama waktu yang interaksi antara adsorben dan adsorbat maka semakin banyak pula adsorbat yang teradsorpsi karena memiliki semakin banyak kesempatan partikel dari adsorben dapat bersinggungan dengan adsorbat sehingga jumlah adsorbat semakin banyak yang teradsorpsi. Namun, setelah waktu 150 menit terjadi peningkatan konsentrasi pada menit ke 180 yaitu sebesar 3,54 ppm. Meski perubahan konsentrasi terbilang tidak begitu signifikan, pada penelitian Reknosari et al. (2020) mengatakan peningkatan suatu konsentrasi menandakan terjadinya pelepasan kembali adsorben atau adsorbat telah mencapai titik jenuh jika terlalu lama waktu kontak yang digunakan selama pengadukan.

Berdasarkan Gambar 9 dapat disimpulkan bahwa waktu optimum adsorpsi MB oleh 0,50 mg/mL Fe_3O_4@C 1:2 yang dapat dilihat dari perubahan konsentrasi adalah pada waktu 30 menit dengan nilai konsentrasi sebesar 4,91 ppm. Setelah mencapai titik optimum terjadi peningkatan konsentrasi seiring bertambahnya waktu atau telah tercapai titik jenuh dan mengalami desorpsi. Peristiwa tercapainya titik jenuh mengakibatkan adsorben tidak dapat lagi menyerap zat warna dan peristiwa desorpsi yang mengakibatkan zat warna MB lama-kelamaan akan terlepas kembali ke larutan sehingga nilai konsentrasi yang terukur semakin besar.



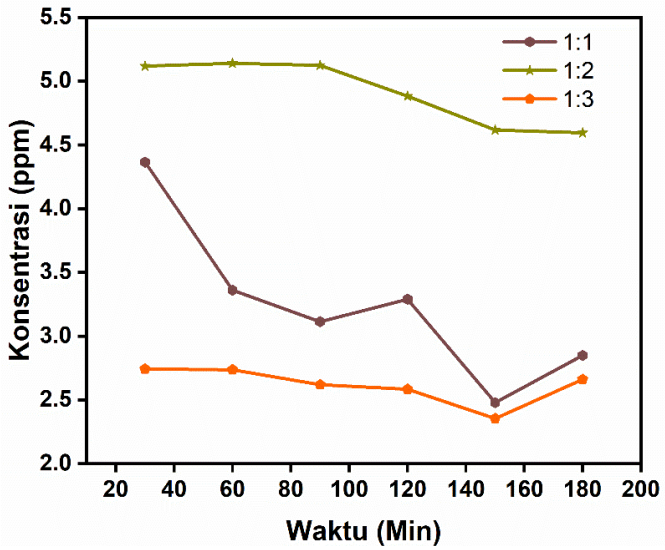
Gambar 9 Kurva 0,50 mg/mL Fe3O4@C terhadap waktu adsorpsi MB dengan variasi komposisi dalam massa Fe3O4 dan C (1:1; 1:2; 1:3)

Berdasarkan Gambar 9, diperoleh bahwa material kommposit 0,50 mg/mL Fe_3O_4@C 1:3 memiliki waktu optimum 60 menit dengan nilai konsentrasi sebesar 2,45 ppm. Adsorben pada waktu optimum terjadi pengadukan secara sempurna sehingga adsorben dapat mengikat zat warna MB lebih banyak dibandingkan dengan waktu yang lainnya. Waktu kontak kurang dari 60 menit, adsorpsi belum optimum. Hal ini dimungkinkan karena gugus adsorben belum mencapai kejenuhan untuk mengikat adsorbat dengan kata lain masih banyak gugus adsorben yang belum berikatan untuk mengadsorpsi zat warna. Setelah waktu optimum tercapai, konsentrasi semakin meningkat dengan perubahan konsentrasi yang tidak cukup besar berturut-turut dari 2,45 ppm (kondisi optimum) menjadi 3,18; 3,59; 3,47; 3,44 dalam satuan ppm. Hal ini dikarekan adsorben

telah mencapai titik jenuh dan mengalami desorpsi sehingga konsentrasi zat yang terukur lebih besar daripada saat kondisi waktu optimum.

Hasil kurva pada Gambar 10, menunjukkan bahwa waktu optimum adsorpsi zat warna MB adalah pada waktu 150 menit dengan nilai konsentrasi sebesar 2,48 ppm dan kembali naik pada waktu 180 menit dengan nilai konsentrasi sebesar 2,85 ppm. Adsorben pada waktu sebelum mencapai optimum gugus aktif masih belum banyak berikatan dengan zat warna, namun dari waktu kontak 30 menit terus menerus mengalami penurunan hingga waktu kontak 90 menit. Kemudian konsentrasi naik dengan perubahan konsentrasi yang terukur dari 3,11 ppm 3,89 ppm dan setelahnya mencapai optimum. Meskipun terjadi kenaikan yang dimungkinkan pada saat pengukuran konsentrasi masih terhapat adsorben yang masih melayang dalam larutan dan belum turun, pada waktu 180 menit terjadi peningkatan konsentrasi dengan nilai 2,48 ppm menjadi 2,85 ppm, yang mana kondisi ini diindikasikan bahwa adsorpsi larutan warna MB telah optimum pada waktu 150 menit dan tidak dapat kembali menyerap zat warna dan telah mengalami desorpsi. Rizki et al. (2019) mengatakan bahwa lama waktu kontak dan perubahan konsentrasi terserap (kapasitas) akan berlangsung semakin lambat sampai mencapai kesetimbangan pada waktu tertentu Pencapaian waktu optimum juga dipengaruhi oleh banyak massa adsorben yang digunakan. Penelitian Siburian et al. (2014) mengatakan sejumlah adsorbat yang terjerap meningkat seiring dengan bertambahnya massa adsorben karena semakin banyak massa adsorben maka pori-pori aktif untuk menjerap juga semakin banyak.

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada Gambar 10 dapat diketahui bahwa waktu optimum yang didapat dari material komposit 0,75 mg/mL Fe_3O_4@C 1:2 terjadi pada waktu 180 menit dengan nilai konsentrasi sebesar 4,59 ppm. Berdasarkan kurva tersebut terlihat mengalami kenaikan konsentrasi sebelum mencapai waktu optimum. Namun, berdasarkan data perubahan kenaikan konsentrasi tersebut tidak begitu signifikan yaitu berturut-turut dari waktu 30 menit, 60 menit , dan 90 menit sebesar 5,12; 5,14 dan 5,12 dalam satun ppm dan keadaan tersebut adsorpsi belum mencapai optimum karena setelahnya pada waktu 180 menit mencapai optimum. Kondisi ini menandakan adsorben menyerah lebih banyak zat warna dibandingkan waktu yang lainnya. Penelitian pada skripsi Mutiara (2018) mengatakan bahwa pada waktu tertentu proses adsorpsi cendenrung berlangsung lambat, tetapi sebaliknya laju desorpsi cenderung meningkat. Keadaan setimbang didapat saat laju adsorpsi sama dengan laju desorpsi sehingga waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan ini pun berbeda-beda. Hal ini juga dipengaruhi oleh jenis interaksi yang terjadi antara adsorben dan adsorbat.secara umum, waktu tercapainya keadaan setimbang pada adsorbs secara fisika lebih cepat jika dibandingkan dengan adsorpsi mekanisme kimia.



Gambar 10 Kurva 0,75 mg/mL Fe3O4@C terhadap waktu adsorpsi dengan variasi komposisi dalam massa Fe3O4 dan C (1:1; 1:2; 1:3)

Material komposit 0,75 mg/mL Fe_3O_4@C 1:3 dapat menyerap zat warna MB dalam rentang waktu 30-150 menit semakin meningkat yang dapat terlihat dari perubahan konsentrasinya yang semakin menurun dan mencapai waktu optimum pada menit ke 150 dengan nilai konsentrasi sebesar 2,35 ppm. Konsentrasi yang mengalami perubahan bisa dikatakan sangat rendah dari konsentrasi awal yaitu 10 ppm jika dibandingkan dengan sampel material komposit yang lain. Hal ini dikarenakan massa yang digunakan pada kondisi ini lebih banyak dibandingkan dengan yang lain dan juga memiliki komposisi karbon aktif lebih banyak yaitu 1:3. Sejalan dengan penelitian Anggriawan et al. (2015) dan Fisli et al. (2012) yang menyatakan semakin banyak massa adsorben yang digunakan maka semakin banyak tinggi pula efisiensinya dan semakin banyak fraksi gugus karbon aktif yang digunakan maka kapasitas adsorpsinya semakin baik, yang mana efisiensi dan kapasitas ini berkaitan dengan nilai konsentrasi yang terukur. Massa adsorben yang meningkat mengakibatkan meningkat pula luas permukaan adsorben sehingga lebih banyak tersedia ruang dalam mengikat zat warna. Waktu kontak juga mempengaruhi adsorpsi zat warna. Seiring bertambahnya waktu kontak maka semakin banyak pula adsorben dapat mengikat zat warna (Gultom et al., 2014). Berdasarkan data tersebut, perubahan konsentrasi yang terjadi dari selang waktu 30 sampai 180 menit berturut-turut adalah sebesar 2,74; 2,74; 2,62; 2,58; 2,35; 2,66 dalam satuan ppm. Konsentrasi dari waktu ke waktu mengalami penurunan sampai mencapai optimum. Setelah mencapai waktu optimum pada menit ke 150, konsentrasi mengalami kenaikan menjadi 2,66 ppm pada menit ke 180. Hal ini menandakan adsorben telah mencapai titik jenuh dan mengalami desorpsi sehingga konsentrasi yang terukur semakin besar. Menurut Yoseva et al. (2015) efesiensi adsorpsi yang menurun dikarenakan terlepasnya kembali adsorbat selama pengadukan atau terjadi proses desorpsi. Kondisi ini terjadi akibat permukaan adsorben yang telah jenuh dan laju adsorpsi menjadi berkurang sehingga waktu kontak tidak lagi berpengaruh pada keadaan jenuh. Mutiara (2018) mengatakan peristiwa adsorpsi cenderung berlangsung lambat pada waktu tertentu, namun sebaliknya laju desorpsi semakin meningkat. Keadaan setimbang ialah saat laju adsopsi sama dengan laju desorpsi. Namun, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan ini berbeda-beda. Hal ini dipengaruhi oleh jenis interaksi yang terjadi antara adsorben dan adsorbat.

Penentuan waktu optimum bertujuan untuk mengetahui berapa lama waktu yang diperlukan oleh adsorben untuk menyerap adsorbat secara maksimum sampai terjadi kesetimbangan (Irawan, 2015). Waktu kontak yang diperlukan untuk mencapai kesetimbangan, menyebabkan laju reaksi adsorpsi semakin besar, di mana hal ini dapat dilihat juga berdasarkan perubahan nilai konsentrasi zat warna yang terukur. Kesetimbangan tercapai apabila penambahan waktu interaksi tidak lagi menambah jumlah adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben magnetit karbon aktif. (Sobirin, Yulianto dan Aji, 2017). Hal ini dapat dilihat pada Lampiran Gabungan Kurva di bawah yang mana waktu optimum terlihat dari penurunan konsentrasi yang terbesar dibandingkan dengan waktu lainnya. Penurunan konsentrasi terbesar terlihat pada material Fe_3O_4@C (1:3) jika dibandingkan dengan material Fe_3O_4@C (1:1) dan Fe_3O_4@C (1:2) pada Absorpsi larutan zat warna MB dengan waktu optimum yang berbeda-beda pada setiap variasi massanya yaitu 180 menit (0,25 mg/mL), 60 menit (0,50 mg/mL) dan 150 menit (0,75 mg/mL). Hal ini dikarenakan penambahan karbon aktif dapat meningkatan kemampuan adsorben dapat menyerap zat warna atau terjadi penurunan konsentrasi (Fisli et al., 2012). Material Fe_3O_4@C yang memiliki massa yang besar yaitu 0,75 mg/mL juga mempengaruhi dalam penentuan waktu optimum yaitu pada waktu 120 menit, 150 menit, dan 180 menit. Waktu tersebut terbilang relatif lama dan hal ini dikarenakan massa adsorben yang besar membuat waktu tercapainya kesetimbangan lebih lama (Gultom et al., 2014). Namun, penambahan waktu ini tidak berlaku jika adsorben tersebut telah mencapai titik jenuh (Sahara, Gayatri dan Suarya, 2018) seperti pada sampel material Fe_3O_4@C lainnya dalam beberapa variasi massa.

Kesimpulan

Struktur kristal dari material Fe_3O_4@C adalah berbentuk kubik dengan rata-rata ukuran kristal pada masing-masing variasi Fe_3O_4@C 1:1, Fe_3O_4@C 1:2 , dan Fe_3O_4@C 1:3 yaitu 8,634 nm, 46,838 nm, dan 15,045 nm. Gugus fungsi komposit Fe_3O_4@C pada semua variasi dalam spektum FTIR yang dihasilkan terdapat ikatan Fe-O yang menunjukkan keberadaan Fe_3O_4, serta ikatan C-O, C=O, dan C=N yang mengindikasikan adanya karbon. Waktu optimum komposit Fe_3O_4@C untuk mengadsorpsi zat warna tekstil *methylene blue* adalah 150 menit (Fe_3O_4@C 1:1), 180 menit (Fe_3O_4@C 1:2), dan 150 menit (Fe_3O_4@C 1:3) untuk variasi massa 0,75 mg/mL.

DAFTAR PUSTAKA

Alegret, N., Criado, A., dan Prato, M., 2017. Recent Advances of Graphene-based Hybrids with Nanoparticles for Biomedical Applications. *Current Medicinal Chemistry*, 24 (5), 529–536.

Alfe, M., Ammendola, P., Gargiuloa, V., Raganatib, F., dan Chironea, R., 2015. Assessment of Magnetite/Carbon Compos ites Capacity in CO2 Adsorption under Sound Assisted Fluidization Conditions. *Chemical Engineering Transactions*, 43, 1081-1086.

Anggriawan, A., Saputra, E. dan Olivia, M. 2015. Penyisihan Kadar Logam Fe dan Mn pada Air Gambut dengan Pemanfaatan Geopolimer dari Kaolin sebagai Adsorben. *Skripsi*, 2(1), 1–6.

Astuti, Usna, S. R. A., dan Mayestika, N. 2021. Pengembangan material Komposit Magneto-Elastik Ferogel dengan *Filler* Magnetik Fe_3O_4 Berbasis Batuan besi. *Prosiding.* SINASIS.

Cahyadi, W. 2006. *Analisis dan Aspek Kesehatan Bahan Tambahan Pangan.* Jakarta: PT Bumi Aksara.

Dachriyanus, P.D., 2004. *Analisis Struktur Senyawa Organik Secara Spektroskopi*. Padang: LPTIK Universitas Andalas.

Fisli, A., Aryani, A., Wardiyati, S., dan Yusuf, S. 2012. Adsorben Magnetik Nanokomposit Fe_3O_4-Karbon Aktif Untuk Menyerap Thorium. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 13(3), 192–197.

Gultom, E. M. dan Lubis, M. T. 2014. Aplikasi Karbon Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit dengan Aktivator H_3PO_4 untuk Penyerapan Logam Berat Cd Dan Pb. *Jurnal Teknik Kimia*, 3(1), 5–10.

Hamdaoui, O. dan Chiha, M. 2007. *Removal of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Wheat Bran*. Acta Chim Slov. 54, 407–418

Hook, J, R. dan Hall, H, E., 1991. *Solid State Physics*. 2nd edition. England/Chichester.

Hu, B., Hong Yu, S., Kan, W., Lei, L., dan Xue-Wei, X., 2008. Functional Carbonaceous Materials from Hydrothermal Carbonization of Biomass: An Effective Chemical Process. *International Journal of Inorganic Chemistry*, 40, 5414–5423.

Husain, S., Suarso, E., Maddu, A., dan Sugianto. 2016. Karakterisasi Kandungan Bijih Besi Alam sebagai Bahan Baku Magnetit Nanopartikel. *Simposium Fisika Nasional*. (November 2016).

Husain, S., Suryajaya, Haryanti, N.H., Manik, T.N., Sudarningsih, Rodiansono, Hutasoit, S.M., dan Riyanto, A. 2019. Potensi Nanokomposit Fe_3O_4@C dari Bijih Besi Sebagai Pendeteksi Kadar Glukosa. 9(2), pp. 44–52. doi: 10.26418/positron.v9i2.32771.

Ianoș R., Păcurariu, C., dan Mihoc, G. 2014. Magnetite/carbon nanocomposites prepared by aninnovative combustion synthesis technique—Excellent adsorbent materials. *Ceramics International,* 4, 1-9.

Ihsani, S.I., Ekaputra, P.A., Asri, L.A.T.W., dan Purwasasmita, B.S., 2015. Enkapsulasi Nanopartikel Superparamagnetik Fe_3O_4 Menggunakan Kitosan Dan Alginat Yang Diimpregnasi Mangosteen Serta Modifikasi Morfologi Menggunakan Kitosan Dan Tapioka. *Research and Development on Nanotechnology in Indonesia*, 2 (2), 91–98.

Irawan, H. 2015. Studi Identifikasi Siput Gonggong Di Zona Litoral Pesisir Timur Pulau Bintan. *Dinamika Maritim*, 5(1), pp. 38–45.

Juang, R., Yei, Y., Liao, C., Lin, K., dan Lu, H. 2018. Synthesis Of Magnetic Fe_3O_4/Activated Carbon Nanocomposites With High Surface Area As Recoverable Adsorbents. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Elsevier B.V., 0,1–10.

Kakavandi, B., Jafari, A.J., Kalantary, R.R., Nasseri, S., Ameri, A., dan Esrafily, A. 2013. Synthesis and properties of Fe3O4-activated carbon magnetic nanoparticles for removal of aniline from aqueous solution: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering*, 10, 1-9.

Lakay, E.M., 2009. Superparamagnetic Iron-Oxide Based Nanoparticles For The Separation And Recovery Of Precious Metals From Solution. University of Stellenbosch.

Liu, Y., Yang, J., Wang, W., dan Sun, C. (2018). Adsorption and photodegradation of methylene blue by $NiFe_2O_4$–graphene hybrid. Materials Research Bulletin, 101, 56–62. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.01.005.

Mahmoodi, N. M., Arami, M., dan Limaee, N. Y. 2011. Photocatalytic degradation of dyes using polyacrylonitrile fiber coated with TiO_2 nanoparticles. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 217(2-3), 170–176. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2010.09.007.

Merdekani, Sera. 2013. Sintesis Partikel Nanokomposit dengan Metode Kopresipitasi. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir.*

Mira, P. V., Mahmudin, L. dan Iqbal 2018. Sintesis dan Analisis Sifat Magnetik Nanopartikel Magnetit (Fe3o4) Berbasis Pasir Besi. 17(2), 0–4.

Mutiara, A. D. 2018. Sintesis Hibrida Alga Porphyridium Sp. dengan Teknik Pelapisan Silika Magnetit (Fe_3O_4) Sebagai Adsorben Zat Warna Kristal Violet. *Skripsi.*

Nafi'ah, R. 2018. Kinetika Adsorpsi Pb (II) Dengan Adsorben Arang Aktif Dari Sabut Siwalan Kinetics Adsorption Of Pb (II) By Siwalan Fiber. *Jurnal Farmasi Sains dan Praktis*. 1(2), 28–37.

Notodarmojo S. 2005. *Pencemaran Tanah dan Air Tanah*. Bandung: ITB Press.

Rahman, T., Fadhlulloh, M.A., Nandiyanto, A.B.D., dan Mudzakir, A., 2015. Sintesis Karbon Nanopartikel. *Integrasi Proses Review*, 5, 61–74.

Rampengan, A. M. dan Polii, J. 2019. Analisis Struktur Kristal Polyetilen Glicol (PEG-4000) Coated Nanopartikel Magnetite (Fe_3O_4). *Fullerene Journ*, 4(2), 82–85.

Reknosari, E., Wirawan, T. dan Koesnarpadi, S. 2020. Adsorpsi Fenolmenggunakan Adsorben Komposit Fe3o4-Arang Aktif Ampas Kopi Phenol Adsorption Using Composite Adsorbent Fe3o4-Activated Charcoal Coffee Grounds. *Jurnal Kimia Mulawarman*, 18(1).

Rizki, A., Syahputra, E., Pandia, S., dan Halimatuddahliana. 2019. Pengaruh Waktu Kontak dan Massa Adsorben Biji Asam Jawa (Tamarindus Indica) dengan Aktivator H_3PO_4 terhadap Kapasitas Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue. *Jurnal Teknik Kimia*, 8(2), 54–60.

Riyanto, A. 2012. Sintesis Nanopartikel Fe_3O_4 (Magnetit) Dan Potensinya Sebagai Bahan Material Aktif Pada Permukaan Sensing Biosensor Berbasis Surface Plasmon Resonance (SPR). *Tesis*, Universitas Gadjah Madha, Yogyakarta.

Ríos-Hurtado, J.C., Múzquiz-Ramos, E.M., Zugasti-Cruz, A., dan Cortés-Hernández, D.A., 2016. Mechanosynthesis as a Simple Method to Obtain a Magnetic Composite (Activated Carbon/ Fe_3O_4) for Hyperthermia Treatment. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, (7), 19–28.

Sahara, E., Gayatri, P.S., dan Suarya, P. 2018. Adsorpsi Zat Warna Rhodamin-B Dalam Larutan Oleh Arang Aktif Batang Tanaman Gumitir Teraktivasi Asam Fosfat. *Cakra Kimia (Indonesian E-Journal of Applied Chemistry)*, 6(1), 37–45.

Sartika, D., 2016. Sifat Magnetik Adsorben Nanopartikan Fe_3O_4 Terhadap Adsorpsi Logam Berat (Co dan Fe) Dalam Larutan. *Seminar Nasional Pendidikan*. Banyuwangi, 631–641.

Siburian, A. M., Pardede, A. S. D., dan Pandia, S. 2014. Pemanfaatan Adsorben dari Biji Asam Jawa Untuk Menurunkan Bilangan Peroksida Pada Cpo (Crude Palm Oil. *Jurnal Teknik*

Kimia, 3(4).

Sobirin, M., Yulianto, A., dan Aji, M. P. 2017. Efek Penambahan Karbon Aktif pada Magnetit dari Pasir Besi Sebagai Adsorpsi Ion Kalsium dalam Air. *Unnes Physics Journal*, 5(2), 42–50.

Sholihah, L.K., 2010. Sintesis Dan Karakterisasi Partikel Nano Fe_3O_4 Yang Berasal Dari Pasir Besi Dan Fe_3O_4 Bahan Komersial (Aldrich). *Skripsi*, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.

Sumadiyasa, M. dan Manuaba, I. B. S. 2018. Penentuan Ukuran Kristal Menggunakan Formula Scherrer, Williamson-Hull Plot, dan Ukuran Partikel dengan SEM. *Buletin Fisika*, 19(1), 28–35.

Trisnawati, L.P., Nandang, Mufti, dan Zulaikah, S., 2013. Synthesizing And Characterising Carbon Encapsulated Nano Particle Fe_3O_4 By Using Hydrothermal Method As Textile Dye Waste Absorber Rodhamin B. *Skripsi*, FMIPA Universitas Negeri Malang.

Wei, Yan., Han, H., Hu, X., Lin, Y., Wang, X., dan Deng, X. 2011. Synthesis of Fe_3O_4 Nanoparticles And Their Magnetic Properties. *Procedia Engineering*, Vol. 27, 632-637.

Yoseva, P. L., Muchtar, A. dan Sophia, H. 2015. Pemanfaatan Limbah Ampas Tebu Sebagai Adsorben untuk Peningkatan Kualitas Air Gambut. *Jurnal JOM FMIPA*, 2(1), 56–63.

Zhang, Z. dan Kong, J., 2011. Novel Magnetic Fe_3O_4@C Nanoparticles as Adsorbents for Removal of Organic Dyes from Aqueous Solution. *Journal of Hazardous Materials*, (193), 325–329.

Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., dan Liu, Y. 2020. Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. Environmental Pollution, 258, 113448. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113448.