

Analisis Karakteristik Karbon Aktif PET dan Pengaruh Konsentrasi Aktivator Serta Waktu Kontak Dalam Adsorpsi Ion Logam Besi (Fe)

Siti Kayyisa Nakhwa Endjani, Aussie Amalia*

Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: aussieamalia.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 12 Mei 2026

Disetujui: 16 Mei 2026

Abstract

The continuous increase in plastic usage has led to uncontrolled environmental pollution. One strategy to minimize the negative impacts of plastic waste is to convert it into activated carbon. This study investigates the effects of activator concentration and contact time of PET activated carbon on the adsorption of iron (Fe) metal ions. Characterization of PET activated carbon was conducted using BET and FT-IR analyses. Activated carbon was produced using acid and base activators with specific concentration variations: HCl at 0.5, 1, and 2 M, and KOH at 3, 4, and 5 M, with adsorption contact times of 15, 30, 45, and 60 minutes. The research results confirm that higher activator concentrations and longer contact times enhance the adsorption capacity of activated carbon for heavy metal iron (Fe) ions. The highest removal efficiencies were 95% for PET activated carbon with KOH 5 M and 70% for PET activated carbon with HCl 2 M, both at a 60-minute contact time. BET test results indicate that activated carbon treated with HCl 2 M and KOH 5 M has surface areas of 112,77 m² / g 112,77m² /g and 96,91 m² / g 96,91m² /g, respectively, with larger pore diameters for KOH 5 M at 28,14 nm 28,14nm. Meanwhile, FT-IR analysis reveals the presence of functional groups such as O-H, aromatic C=C, C-H, and C=O, which play key roles in the adsorption mechanism.

Keywords: *activated carbon, PET, activator concentration, Fe adsorption*

Abstrak

Penggunaan plastik yang terus meningkat telah menimbulkan pencemaran lingkungan secara tidak terkendali. Salah satu bentuk upaya dalam meminimalisir dampak negatif dari limbah plastik yaitu mengubah sampah plastik menjadi karbon aktif. Studi ini mengkaji pengaruh konsentrasi aktivator serta waktu kontak karbon aktif PET terhadap penyerapan ion logam besi (Fe). Karakterisasi karbon aktif PET menggunakan pengujian BET dan FT-IR. Pembuatan karbon aktif menggunakan aktivator asam dan basa dengan variasi konsentrasi tertentu yaitu HCl 0,5; 1, dan 2 M, dan KOH 3, 4, dan 5 M pada waktu kontak adsorpsi 15, 30, 45, dan 60 menit. Hasil penelitian membuktikan bahwa peningkatan konsentrasi aktivator dan waktu kontak yang lebih lama mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif terhadap ion logam berat besi (Fe). Efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 95% pada karbon aktif PET teraktivasi KOH 5 M dan 70% pada karbon aktif PET teraktivasi HCl 2 M dengan waktu kontak 60 menit. Hasil uji BET menunjukkan bahwa karbon aktif teraktivasi HCl 2 M dan KOH 5M memiliki luas permukaan sebesar 112,77 m²/g dan 96,91 m²/g dengan diameter pori yang lebih besar pada KOH 5M yaitu 28,14 nm. Sementara itu, analisis FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsi O-H, C=C aromatik, C-H, serta C=O yang berperan dalam mekanisme adsorpsi.

Kata kunci: *karbon aktif, PET, konsentrasi aktivator, adsorpsi Fe*

1. Pendahuluan

Plastik dapat menjadi pilihan utama dalam berbagai kebutuhan karena praktis, harga yang relatif murah, dan ketersediaannya yang mudah. Penggunaan plastik dalam kehidupan sehari-hari menghasilkan akumulasi sampah plastik yang terus meningkat. Fenomena ini menyebabkan pencemaran lingkungan karena sifatnya yang non-biodegradable dan sulit terurai secara alami. Plastik terurai menjadi partikel mikroplastik serta melepaskan zat kimia berbahaya yang mengkontaminasi tanah, air, dan udara. Pengelolaan sampah plastik perlu dilakukan untuk meminimalisir dampak negatifnya. Salah satu solusi pengelolaan plastik adalah pemanfaatan sampah plastik sebagai karbon aktif untuk adsorpsi logam berat.

Plastik tergolong limbah anorganik berbasis karbon, contohnya *polietilen*, *polipropilen*, dan *polivinil klorida*. Jenis plastik tertentu yang melalui proses pembakaran dengan suhu tinggi dapat berubah menjadi karbon yang memiliki pori-pori, sehingga berpotensi untuk menjadi adsorben. Jenis plastik tertentu yang melalui proses pembakaran di *furnace* bisa berubah menjadi arang berciri pori-pori, sehingga ideal untuk aplikasi adsorpsi. PET atau *Polyethylene terephthalate*, polyester termoplastik yang kuat dengan densitas rendah dan biasa dimanfaatkan untuk botol minuman transparan seperti botol air mineral atau wadah minuman

lainnya. Botol PET disarankan untuk penggunaan sekali pakai dan PET termasuk polimer yang paling sering dipakai dalam produksi plastik[1]. Karbon aktif yang dihasilkan melalui pirolisis limbah plastik terus mengalami perkembangan sebagai teknologi berkelanjutan. Pendekatan ini ditujukan untuk menghasilkan karbon berbiaya rendah sebagai substitusi karbon aktif komersial. Beragam prekursor telah dieksplorasi dalam sintesis karbon aktif, termasuk limbah agroindustri, kayu, resin sintetis, dan limbah industri lainnya. Produksi karbon aktif dari limbah plastik merupakan strategi berkelanjutan untuk mengatasi polusi lingkungan akibat peningkatan konsumsi polimer [2].

Menurut penelitian, plastik PET mengandung cincin benzena dalam jumlah tinggi yang terletak pada rantai polimer utama. Cincin benzena dalam rantai utama ini menjadikan PET lebih stabil secara termal dan kimiawi, sekaligus mampu menghasilkan karbon aktif yang memiliki luas permukaan tinggi[3]. Selain itu plastik PET mengandung karbon sebesar 60% sehingga dapat berpotensi untuk menjadi bahan baku karbon aktif [4]. Hasil sejumlah penelitian membuktikan bahwa karbon aktif PET dapat mengadsorpsi logam berat secara efektif, yakni Fe 94%, Mn 94% dan, kekeruhan 89% [5], serta COD sebesar 36,7% [6].

Pembuatan karbon aktif umumnya harus dilakukan aktivasi untuk menghilangkan pengotor, meningkatkan luas permukaan dan kemampuan adsorpsi dari bahan atau zat yang dihasilkan[7]. Proses aktivasi umumnya dibagi menjadi dua jenis yaitu secara fisika dengan cara pemanasan suhu tinggi dan secara kimia dengan perendaman menggunakan larutan kimia[8]. Proses aktivasi kimia yaitu menggunakan larutan aktivator baik asam maupun basa. Agen pengaktif kimia yang diperkenalkan pada permukaan karbon berfungsi sebagai agen dehidrasi sekaligus oksidasi, sehingga membantu pembentukan gugus fungsi yang mengandung oksigen, seperti gugus karbonil [9].

Dalam penelitian ini, pengujian adsorpsi logam berat Fe dilakukan dengan karbon aktif PET yang diaktivasi asam dan basa pada konsentrasi tertentu yaitu HCl 0,5 M; 1 M; 2 M serta KOH 3 M; 4 M; 5 M. Dalam penelitian ini, proses adsorpsi dilakukan dengan waktu kontak 15, 30, 45, dan 60 menit. Selanjutnya, karakteristik fisik dan kimia karbon aktif PET paling optimal dianalisis melalui FT-IR dan BET untuk mengetahui luas permukaan dan gugus fungsi yang terbentuk dari proses aktivasi tersebut.

2. Metode penelitian

Bahan yang diperlukan untuk membuat karbon aktif PET terdiri dari botol kemasan plastik, aquades, aktivator KOH konsentrasi 3 M, 4 M, 5 M, serta HCl konsentrasi 0,5 M, 1 M, 2 M. Peralatan yang dipakai mencakup beaker glass, cawan porselen, ayakan 100 mesh, kertas saring Whatman 42, furnace, dan oven. Metode penelitian dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu pembuatan karbon aktif PET, proses adsorpsi, pengujian kadar Fe, serta karakterisasi karbon aktif PET.

2.1 Preparasi dan Aktivasi Karbon Aktif

Proses pembuatan karbon aktif diawali dengan mencuci botol kemasan hingga bersih dan dipotong menjadi potongan kecil lalu dikarbonisasi dengan menggunakan furnace selama 2 jam pada suhu tinggi yaitu 400°C. Kemudian dilakukan aktivasi yaitu merendam adsorben menggunakan KOH dengan konsentrasi 3 M, 4 M, 5 M dan HCl dengan konsentrasi 0,5 M; 1 M; 2 M selama 2jam. Karbon aktif disaring dengan kertas saring sambil dicuci dengan aquades hingga pH netral. Langkah terakhir yaitu karbon aktif dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 3 jam.

2.2 Proses Adsorpsi dan Analisis Karbon Aktif PET

Penelitian ini menerapkan sistem batch menggunakan jarrest. Adsorbat berupa limbah artifisial besi (Fe^{2+}) yang dibuat dengan mencampurkan senyawa besi(II) sulfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) dalam aquades hingga homogen dan mencapai konsentrasi 10 mg/L. Proses adsorpsi dimulai dengan memasukkan 3gram karbon aktif ke dalam beaker glass berisi adsorbat, kemudian diaduk menggunakan jarrest pada kecepatan 100 rpm selama 15 menit. Prosedur yang sama dilakukan pada konsentrasi dan waktu kontak lainnya.

Filtrat dari hasil proses adsorpsi diuji untuk mengetahui kadar besi yang terkandung dalam air limbah artifisial dengan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) menggunakan teknik nyala (flame) berdasarkan SNI 06-6989.17:2009.

2.3 Karakterisasi Karbon Aktif PET

Karakterisasi sifat fisik-kimia karbon aktif dilakukan melalui dua teknik analisis utama, yakni *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR). Analisis BET memberikan data kuantitatif mengenai luas permukaan spesifik, volume total pori, serta rata-rata jari-jari pori pada sampel adsorben yang diteliti. Secara teoritis, model *Brunauer-Emmett-Teller* dikenal melalui persamaan yang digunakan untuk menggambarkan kondisi kesetimbangan pada proses adsorpsi. Analisis gugus fungsi pada

karbon aktif dilaksanakan dengan metode *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), yaitu spektroskopi inframerah yang dilengkapi transformasi Fourier guna interpretasi spektrum. Teknik spektroskopi FTIR ini memungkinkan identifikasi struktur rantai karbon dalam memahami karbon aktif tersebut.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Pengaruh Konsentrasi Aktivator

Konsentrasi aktivator asam dan basa divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya dalam mengurangi kadar besi (Fe). Karbon aktif dibuat dari sampah plastik PET dengan aktivator HCl pada konsentrasi 0,5 M; 1 M; 2 M; serta aktivator KOH pada konsentrasi 3 M, 4 M, 5 M, untuk menganalisis efektivitas penyerapan ion logam berat besi (Fe). Pengukuran kadar Fe dilakukan setelah proses adsorpsi dengan waktu kontak 15, 30, 45, dan 60 menit. Data hasil pengukuran kadar besi (Fe) setelah adsorpsi menggunakan karbon aktif PET disajikan pada **Tabel 1** berikut:

Tabel 1. Hasil Uji Adsorpsi

Jenis Aktivator	Konsentrasi Aktivator (M)	Kadar Awal Fe (mg/L)	Kadar Akhir Fe (mg/L)			
			15*	30*	45*	60*
HCl	0,5	10	4,05	3,85	3,66	3,45
	1	10	3,81	3,47	3,5	3,22
	2	10	3,51	3,48	3,33	2,97
KOH	3	10	2,25	1,89	1,32	0,95
	4	10	1,39	1,32	0,94	0,71
	5	10	1,2	0,7	0,62	0,47

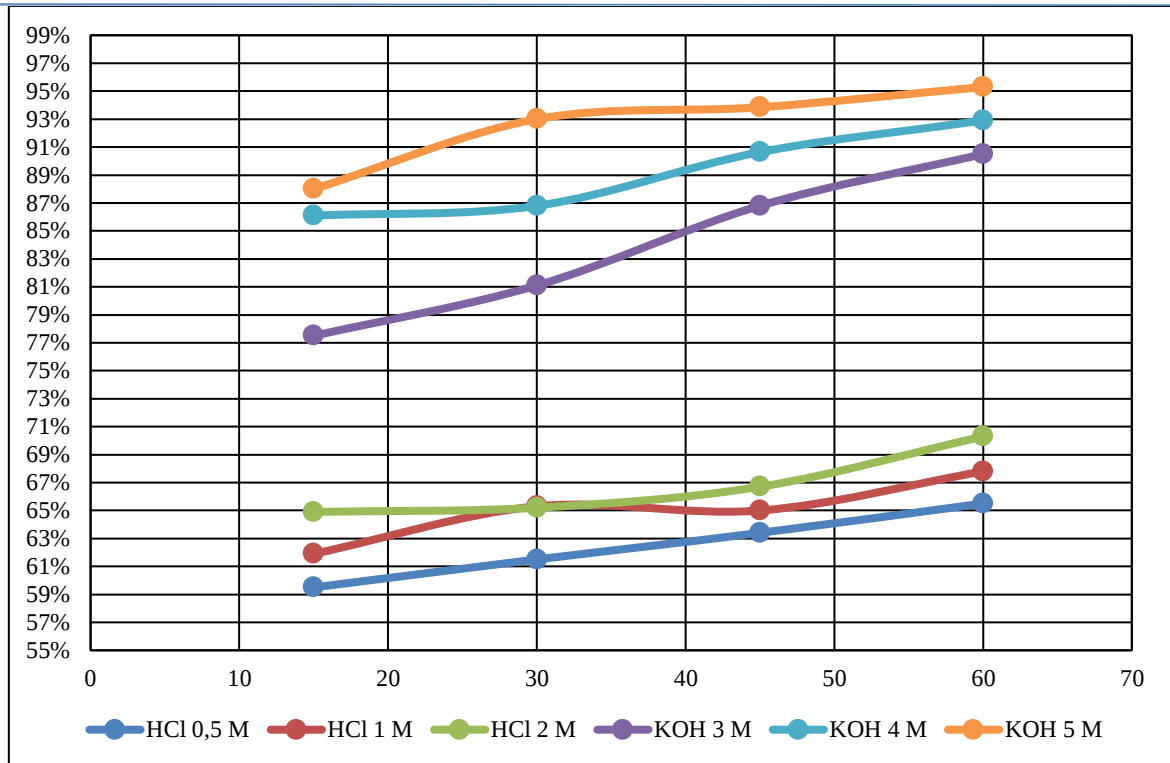
*waktu kontak (menit)

Sumber: Hasil penelitian, 2025

Hasil pengujian yang tercantum dalam **Tabel 1** diplotkan ke dalam grafik untuk memudahkan analisis efektivitas proses penyisihan kadar besi (Fe). Dengan adanya grafik memungkinkan perbandingan yang lebih jelas terhadap variasi konsentrasi aktivator dan waktu kontak. **Gambar 1** adalah hasil pengujian kadar Fe dalam bentuk grafik.

Hasil uji adsorpsi ion Fe oleh karbon aktif PET yang teraktivasi HCl dan KOH pada berbagai konsentrasi diplot pada **Gambar 1** yang menunjukkan peningkatan efisiensi adsorpsi seiring bertambahnya konsentrasi aktivator. Menurut gambar 1 dapat diketahui karbon aktif PET yang diaktivasi dengan KOH 5 M memiliki efisiensi adsorpsi tertinggi sebesar 95%, diikuti oleh HCl 2 M dengan 70%. Keduanya berada di waktu kontak 60 menit. Sedangkan efisiensi adsorpsi terendah terletak pada HCl 0,5M sebesar 66% dan KOH 3M sebesar 91% dengan waktu kontak 15 menit. Pada penelitian sebelumnya menyatakan bahwa ikatan karbon yang terbentuk meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi [10].

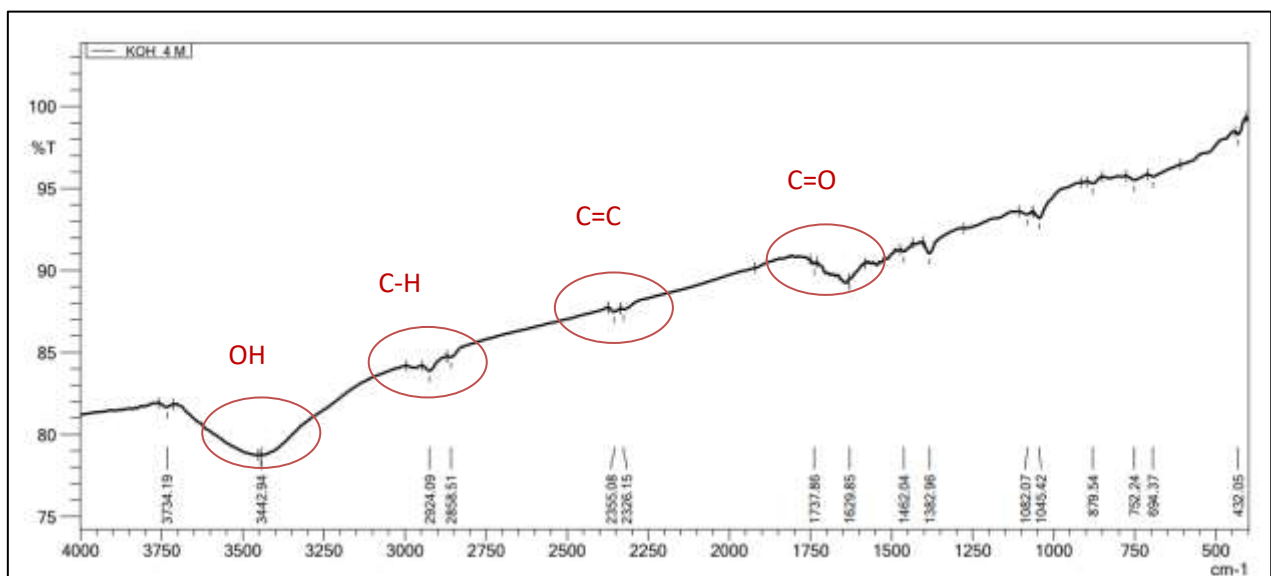
Semakin besar konsentrasi yang digunakan maka akan menghasilkan luas permukaan karbon aktif yang lebih besar dan meningkatkan kemampuan untuk adsorpsi zat yang terlarut. Besarnya konsentrasi berbanding lurus dengan ukuran pori yang terbentuk sehingga kapasitas adsorpsi juga semakin meningkat. Selain itu, penambahan aktivator berpengaruh signifikan dalam mengeluarkan senyawa tar melalui mikropori karbon aktif. Hal ini menyebabkan perluasan luas permukaan karbon aktif, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsinya. [11]. Pada **Gambar 1** menunjukkan Peningkatan waktu kontak menyebabkan penyerapan logam besi (Fe) semakin tinggi sehingga mekanisme adsorpsi berlangsung lebih lama. Interaksi yang lebih panjang antara ion Fe yang terikat dalam pori-pori karbon aktif dengan situs aktif pada permukaan karbon aktif sehingga menyebabkan difusi dan pembentukan ikatan yang lebih efektif [12].



Gambar 1. Kadar Penyisihan Fe pada Karbon Aktif PET
Sumber: Hasil Penelitian, 2025

3.2 Karakterisasi Karbon Aktif PET

Dilakukan pengujian *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR) dan *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) pada karbon aktif PET untuk mengetahui luas permukaan dan gugus fungsi yang terbentuk. Pengujian BET dan FTIR dilakukan pada adsorben karbon aktif dengan penyisihan terbaik yaitu HCl 2 M dan KOH 5 M. Berikut merupakan grafik hasil pengujian FTIR pada karbon aktif KOH 5 M:

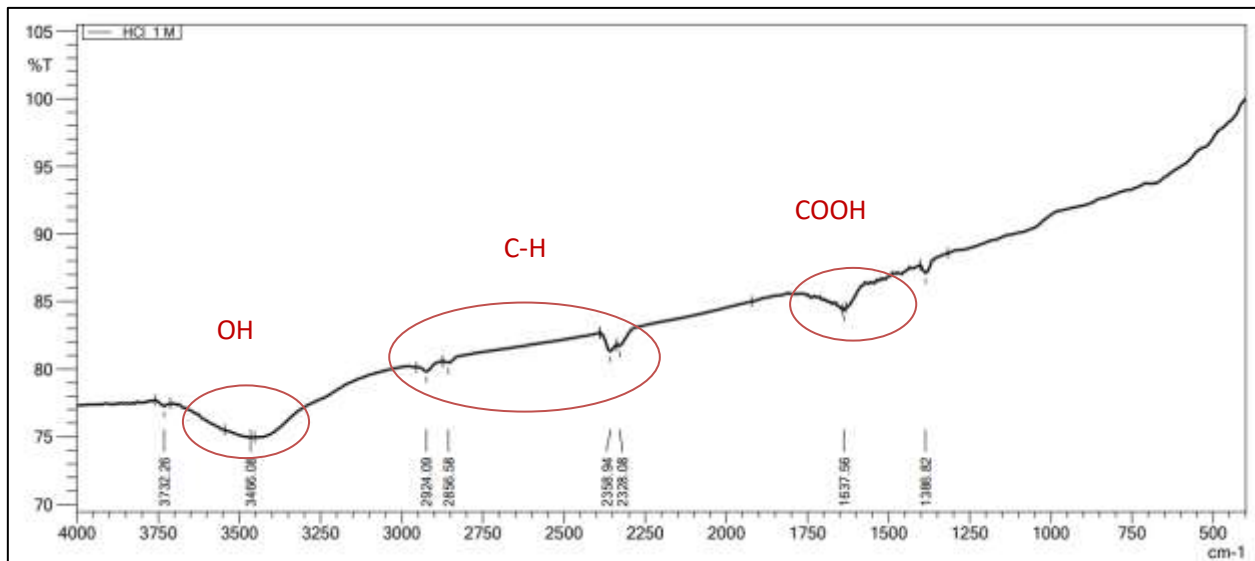


Gambar 2. Hasil Uji FTIR Karbon Aktif PET Aktivator KOH

Gambar 2 menunjukkan spektrum FT-IR karbon aktif dengan tiga puncak serapan yang teramati pada bilangan gelombang 3100-3500 cm^{-1} , 2800-3000 cm^{-1} , dan 1600-1700 cm^{-1} . **Gambar 2** membuktikan terdapat 3 puncak dengan tingkat intensitas yang tinggi. Pada daerah 3442.94 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan gugus OH yang dapat menyebabkan interaksi antara permukaan karbon aktif dengan logam Fe melalui ikatan kompleks koordinasi. Kemudian terdapat gugus karbonil (C=O) pada area serapan 1737.86 cm^{-1} . Terdapat serapan pada rentang 2924.09 – 2858.51 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya ikatan C-H alifatik. Penyerapan

yang terdeteksi pada panjang gelombang 1629.85 cm^{-1} mengindikasikan keberadaan gugus senyawa aromatik. Gambar tersebut menunjukkan adanya gugus senyawa aromatik ($\text{C}=\text{C}$) yang dibuktikan dengan serapan pada panjang gelombang 1629.85 dan diverifikasi oleh puncak serapan kecil pada panjang gelombang $2326.15\text{--}2355.08\text{ cm}^{-1}$ yang mendukung pengikatan dengan logam Fe. Faktor yang mempengaruhi kemampuan adsorpsi dari karbon aktif adalah gugus-gugus fungsi yang ada pada permukaan suatu karbon aktif. Gugus fungsi tersebut akan mempengaruhi interaksi dengan kepolaran adsorbat. Gugus fungsi tersebut juga akan menentukan sifat kimia permukaan karbon aktif [13].

Pengujian FT-IR yang telah dilakukan pada penelitian ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yaitu keberadaan gugus OH yang berperan untuk menyerap logam berat melalui ikatan kimia [14] serta adanya gugus karboksilat [15]. Sedangkan hasil pengujian FTIR karbon aktif plastik PET dengan aktivator HCl 2 M disajikan dalam grafik berikut:



Gambar 3. Hasil Uji FTIR Karbon Aktif PET Aktivator HCl
Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Gambar 3 memperlihatkan terdapat pita-pita serapan gelombang pada spektrum karbon aktif yang dihasilkan melalui proses aktivasi. Pita-pita ini muncul pada berbagai bilangan gelombang tertentu yang menggambarkan gugus fungsi pada karbon aktif PET yaitu $3100\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$, $2300\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, dan $1300\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$. Pada daerah 3466.08 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus OH (hidroksil) dan adanya gugus karboksilat (COOH) pada daerah serapan 1637.56 cm^{-1} . Diikuti adanya serapan pada daerah $2924.09\text{--}2856.58\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya ikatan C-H alifatik. Pada gambar tersebut juga menunjukkan adanya gugus senyawa aromatik yang dibuktikan adanya serapan pada panjang gelombang 1629.85 cm^{-1} sehingga dapat membantu dalam pengikatan dengan logam Fe.

Kemudian dilakukan pengujian BET untuk mengetahui besarnya luas permukaan karbon aktif karena hal tersebut berhubungan dengan kapasitas adsorpsi terhadap zat terlarut. Berikut merupakan hasil pengujian BET yang disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Pengujian BET

Jenis karbon aktif	Luas permukaan (m^2)	Diameter pori (nm)
PET teraktivasi KOH 5M	96,91	28,14
PET teraktivasi HCl 2 M	112,77	24,18

Sumber: Hasil penelitian, 2025

Karbon aktif dari PET yang diaktivasi menggunakan HCl 2 M menunjukkan luas permukaan lebih unggul mencapai $112,77\text{ m}^2/\text{g}$, dibandingkan aktivasi dengan KOH 5 M yang hanya $96,91\text{ m}^2/\text{g}$. Selain itu, diameter pori yang terbentuk pada masing-masing aktivator HCl 2 M dan KOH 5 M adalah $24,18\text{ nm}$ dan $28,14\text{ nm}$. Perbedaan ini mencerminkan mekanisme aktivasi yang berbeda, di mana HCl sebagai aktivator asam cenderung menghasilkan struktur pori mesopori yang lebih luas secara permukaan sedangkan KOH sebagai basa kuat membentuk pori lebih besar. Meskipun luas permukaan HCl lebih tinggi tetapi kadar penyisihan ion logam berat besi (Fe) lebih unggul pada KOH yaitu 95% dibandingkan dengan HCl sebesar

70%. Hal ini mengindikasikan bahwa diameter pori yang lebih besar pada aktivasi KOH mempermudah difusi serta akses molekul adsorbat menuju pori-pori adsorben. Karbon aktif dengan aktivator HCl menghasilkan adsorben dengan diameter pori lebih kecil dibandingkan aktivator KOH. Luas permukaan karbon aktif yang diaktivasi HCl lebih tinggi daripada yang menggunakan KOH tetapi kapasitas adsorpsinya lebih rendah akibat diameter pori yang lebih kecil [16]. Hal ini terbukti pada efektivitas penyisihan kadar ion logam besi (Fe) yang dimana aktivator KOH menghasilkan karbon aktif yang lebih optimal.

4. Kesimpulan

Penyisihan logam berat Fe berbanding lurus dengan konsentrasi aktivator dan waktu kontak adsorpsi. Efisiensi tertinggi dicapai pada karbon aktif PET KOH 5M sebesar 95% dan PET HCl 2M sebesar 70% dengan waktu kontak 60 menit. Aktivator basa terbukti paling optimal untuk adsorpsi Fe dalam penelitian ini.

Pengujian FTIR dilakukan pada adsorben karbon aktif dengan penyisihan terbaik yaitu HCl 2 M dan KOH 5 M. Pada karbon aktif PET KOH 5 M diketahui terdapat gugus fungsi O-H, C=C aromatik, C-H, dan gugus C=O sedangkan karbon aktif PET HCl 2 M mengandung gugus fungsi O-H, C=C aromatik, C-H, dan gugus C=O.

Hasil pengujian BET pada karbon aktif PET dengan aktivator HCl memiliki luas permukaan dan diameter pori sebesar 112,77 m² dan 24,18 nm. Sedangkan karbon aktif PET dengan aktivator KOH menghasilkan luas permukaan dan diameter pori sebesar 96,91 m² dan 28,14 nm.

5. Daftar Pustaka

- [1] Fiki Rahmah. *Potensi Isolat Bakteri Bacillus DAN Pseudomonas Dalam Mendegradasi Plastik Dengan Metode Kolom Winogradsky*. 2015.
- [2] Khotimah N, Martin A, Taer E, et al. Synthesis and Characterization of a Novel Microporous Material from Polyethylene Terephthalate Plastic Waste. *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering* 2025; 33: 112–122.
- [3] Lian F, Xing B, Zhu L. Comparative study on composition, structure, and adsorption behavior of activated carbons derived from different synthetic waste polymers. *J Colloid Interface Sci* 2011; 360: 725–730.
- [4] Smeaton C. Augmentation of global marine sedimentary carbon storage in the age of plastic. *Limnology And Oceanography Letters* 2021; 6: 113–118.
- [5] Hendrasarie N, Prihantini R. Pemanfaatan Karbon Aktif Sampah Plastik Untuk Menurunkan Besi Dan Mangan Terlarut Pada Air Sumur. *Jawa Timur, Jl Raya Rungkut Madya-Gunung Anyar Surabaya* 2020; 6: 136–146.
- [6] Ruhayyah A, Muhammad Ashari T. Investigasi Karakteristik Karbon Aktif Pada Sampah Plastik Jenis Polyethylene. *Jurnal Inovasi Pendidikan dan Sains* 2023; 4: 73–77.
- [7] Pratomo SW, Mahatmanti FW, Sulistyaningsih T, et al. Pemanfaatan Zeolit Alam Teraktivasi H₃PO₄ sebagai Adsorben Ion Logam Cd(II) dalam Larutan. *J Chem Sci*; 6, <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs> (2017).
- [8] Gia Yulandani. *Pengaruh Aktivasi Dan Dosis Adsorben Sekam Padi Untuk Mengurangi Konsentrasi Methylene Blue Pada Limbah Cair Industri Tekstil*. 2015.
- [9] Alabi-Babalola O, Aransiola E, Asuquo E, et al. Production of Highly Efficient Activated Carbons for Wastewater Treatment from Post-Consumer PET Plastic Bottle Waste. *Chempluschem*; 89. Epub ahead of print 1 May 2024. DOI: 10.1002/cplu.202300484.
- [10] Lestari J, Nurlaila R, Ulfa Fibarzi W, et al. Pengaruh Konsentrasi Aktivator HCl Dan Ukuran Partikel Terhadap Kemampuan Daya Serap Karbon Aktif Dari Ampas Bubuk Kopi. *Chemical Engineering Journal Storage* 2024; 4: 596–605.
- [11] Artiyani A, W, Sasmito Djati M, et al. Effect of Chemical Activator Concentration on the Quality of Activated Carbon from Polypropylene Plastic. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*; 55. Epub ahead of print 2024. DOI: 10.62321/issn.1000-1298.2024.08.05.
- [12] Aprilianti R, Aldila H, Kurniawan WB. Kajian Variasi Massa Karbon Aktif dan Waktu Kontak terhadap Kinetika Adsorpsi Ion Logam Besi (Fe) pada Limbah Cair Batik Cual. *Jurnal Riset Fisika Indonesia*; 4, <https://journal.ubb.ac.id/jrfi/article/view/4416>Halaman|92 (2024).
- [13] Dianisari Sofia. *Sintesis Karbon Aktif Terfungsionalisasi dari Buah Palem Putri (Veitchia merillii) dengan Oksidator H₂SO₄ untuk Adsorpsi Cr(VI)*. 2018.
- [14] Lin JY, Shi JR, Liu FC, et al. Sustainable Conversion of Waste PET into Porous Activated Carbon for Efficient Cu²⁺ Elimination from Aqueous Solution. *ACS Omega* 2025; 10: 14994–15008.

-
- [15] Ahangar FA, Rashid U, Ahmad J, et al. Conversion of waste polyethylene terephthalate (PET) polymer into activated carbon and its feasibility to produce green fuel. *Polymers (Basel)*; 13. Epub ahead of print 1 November 2021. DOI: 10.3390/polym13223952.
- [16] Irawan NI, Afifah R, Nadira A, et al. Optimalisasi Karbon Aktif Berbasis Bonggol Jagung untuk Pengelolaan Limbah Logam Berat Pb dan Mn. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 2025; 23: 1029–1036.