

Modifikasi Material Komposit Berpori ZIF-67/Kitosan sebagai Penyerap Zat Warna Metil Jingga

Modification of Porous Composite Material ZIF-67/Chitosan as Methyl Orange Dye Absorbent

Dety Oktavia Sulistiono ^{1*}, Jumiatusun ², Badrut Tamam Ibnu Ali ³

¹ Automotive Engineering, Engineering Department, Politeknik Negeri

² Department of Agricultural Production, Politeknik Negeri Jember

³ National Research and Innovation Agency, B.J. Habibie Building, Central Jakarta, Indonesia

* dety.oktavia@polije.ac.id

ABSTRAK

Sintesis material komposit berpori ZIF-67/Kitosan telah berhasil dilakukan melalui metode in-situ dengan penambahan sebanyak 0,5 g kitosan dalam prekursor ZIF-67. Hasil analisa XRD menunjukkan tidak ada perubahan struktur kristal ZIF-67 setelah penambahan kitosan. Selain itu, spektra FTIR telah mengkonfirmasi adanya pembentukan puncak serapan gabungan dari kedua penusun material komposit, ZIF-67 dan kitosan yang menunjukkan keberhasilan sintesis komposit ZIF-67/Kitosan. Hasil kinerja adsorpsi zat warna metil jingga menunjukkan komposit ZIF-67/Kitosan memiliki kapasitas adsorpsi tertinggi sebesar 58,62 mg/g dengan persen penyerapan zat warna sebesar 29,31%. Hasil tersebut telah meningkat sebesar 381,67% dibandingkan dengan kitosan murni yang hanya sebesar 12,17 mg/g dengan persen penyerapan zat warna sebesar 6,08%. Modifikasi kitosan dengan ZIF-67 melalui metode sintesis sederhana telah mampu meningkatkan kinerja kitosan sebagai adsorben konvensional yang sangat signifikan.

Kata kunci — Komposit, adsorpsi, kitosan, ZIF-67

ABSTRACT

Synthesis of porous composite material ZIF-67/Chitosan has been successfully performed via in-situ method by adding 0.5 g of chitosan to ZIF-67 precursors. XRD analysis shows no crystal structure changes in ZIF-67 after chitosan addition. FTIR spectra confirm the formation of combined absorption peaks from both ZIF-67 and chitosan, indicating successful ZIF-67/Chitosan composite synthesis. The methylene blue adsorption performance shows that ZIF-67/Chitosan composite has the highest adsorption capacity of 58.62 mg/g with 29.31% dye removal. This result represents a 381.67% increase compared to pure chitosan (12.17 mg/g, 6.08% dye removal). Modifying chitosan with ZIF-67 through simple synthesis significantly enhances its performance as a conventional adsorbent.

Keywords — Composite, adsorption, chitosan, ZIF-67

 OPEN ACCESS

© 2025. Dety Oktavia Sulistiono, Jumiatusun, Badrut Tamam Ibnu Ali



Creative Commons
Attribution 4.0 International License

1. Pendahuluan

Perkembangan sektor industri memberikan dampak yang signifikan terhadap penggunaan zat warna. Berbagai industri seperti industri tekstil, plastik, kertas dan farmasi menggunakan zat warna dalam jumlah besar dan beraneka ragam jenisnya (Chen dkk., 2013). Salah satu contoh zat warna yang sering digunakan adalah *methyl orange* (MO). *Methyl orange* merupakan zat warna anionik yang tergolong dalam pewarna azo [1]. Senyawa azo bersifat karsinogenik dan sulit didegradasi, sehingga apabila dibuang ke sistem perairan akan merusak ekosistem di dalamnya [2].

Saat ini telah diteliti berbagai metode untuk mengatasi kontaminan organik dari limbah zat warna. Metode konvensional yang umum digunakan adalah presipitasi, koagulasi, dan flokulasi, namun metode tersebut tidak efektif dan efisien dalam menghilangkan kontaminan berupa zat warna, terutama yang larut dalam air. *Photo-oxidation* ditawarkan menjadi metode alternatif untuk mengatasi masalah ini, namun metode ini relatif mahal serta tidak sesuai jika diaplikasikan dalam skala besar. Metode yang paling memungkinkan dan efektif untuk mengatasi masalah ini adalah adsorpsi [3]. Dalam metode adsorpsi diperlukan material adsorben dengan karakteristik luas permukaan yang besar dan berpori untuk dapat mengakomodir kontaminan limbah pewarna dalam jumlah yang banyak. Oleh karena itu, pengembangan material adsorben terus dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan ini.

Kitosan merupakan polimer alami banyak digunakan sebagai adsorben dibandingkan dengan karbon aktif karena harganya yang murah, keberadaannya yang melimpah dan proses pembuatannya yang mudah. Keberadaan gugus amino (-NH₂) dan hidroksi (-OH) dalam strukturnya dapat bertindak sebagai sisi aktif yang dapat mengikat molekul kontaminan air limbah [4]. Namun, kapasitas adsorpsi MO pada kitosan murni tergolong cukup rendah (12,46 mg/g) [5], karena karakteristik luas permukaannya yang kecil [6].

Metal Organic Framework (MOF) merupakan salah satu jenis material mikropori yang tersusun atas ion logam dengan penghubung ligan organik untuk membentuk kerangka tiga dimensi dengan karakteristik luas

permukaan tinggi dan struktur pori yang teratur [7]. *Zeolitic imidazolate frameworks-67* (ZIF-67) merupakan subkelas dari MOF yang tersusun atas ion logam kobalt dan ligan 2-metilimidazol. Dengan metode sintesis sederhana, dapat diperoleh material dengan luas permukaan yang tinggi dan sisi aktif yang melimpah, yang membuat ZIF-67 dapat diaplikasikan dalam bidang adsorpsi [8]. Penelitian sebelumnya telah melaporkan bahwa kapasitas adsorpsi dari ZIF-67 pada MO mencapai 164,8 mg/g [8]. Penggabungan ZIF-67 dengan kitosan untuk membentuk material komposit berpori mampu menghasilkan material dengan karakteristik yang unggul dari kedua sifat penyusunnya. Berdasarkan uraian diatas pada penelitian ini dilakukan modifikasi material komposit ZIF-67/Kitosan dengan cara menggabungkan kitosan dengan ZIF-67 melalui metode *in-situ* untuk mendapatkan material komposit dengan karakteristik luas permukaan tinggi, struktur pori teratur dan kaya sisi aktif sebagai adsorben yang berkinerja baik terhadap MO.

2. Metodologi

2.1. Alat dan Bahan

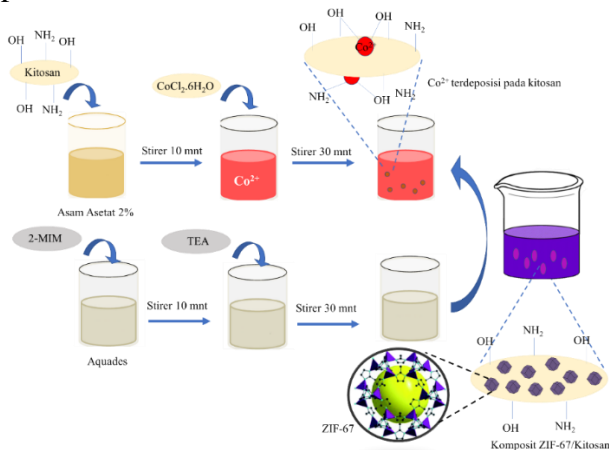
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah botol pereaksi, pipet ukur, gelas beker, *hot plate*, sentrifuge. Peralatan instrumentasi untuk karakterisasi hasil sintesis adalah *X-Ray Diffraction* (XRD, XPert MPD), Spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR, 8400S Shimadzu), dan Spektrofotometer UV-Vis (Thermo Scientific GENESIS 10S). Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah padatan kobalt klorida heksahidrat (CoCl₂·6H₂O, Sigma Aldrich, 99%), 2-metilimidazol (C₄H₆N₂, Sigma Aldrich, 99%), aqua DM, trietilamina (TEA), metanol (MeOH, Merck 99,8%), Kitosan (Cv. ChiMultiguna, Pharmaceutical Grade, Ukuran partikel 300 mesh, derajat deasetilasi 94%) dan *methyl orange* (MO, Sigma Aldrich 85%)

2.2. Sintesis Komposit ZIF-67/Kitosan

Sintesis komposit ZIF-67/Kitosan diawali dengan melarutkan 6,0912 g 2-metilimidazol (MeIM) dalam 10 mL aqua DM. Larutan ligan tersebut kemudian ditambahkan 1 mL trietilamina (TEA) dan diaduk selama 30 menit. Dalam wadah lain, larutan kitosan dibuat dengan



melarutkan sebanyak 0,5 g kitosan dalam 15 mL asam asetat 2%. Kemudian sebanyak 1,5228 g $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dilarutkan dalam 5 mL asam asetat 2%, untuk selanjutnya kedua larutan tersebut dicampur dan diaduk kembali selama 30 menit. Setelah homogen, larutan ligan ditambahkan dalam campuran logam dan kitosan secara perlahan dan diaduk selama 2 jam. Proses selanjutnya mengikuti prosedur sintesis ZIF-67 yang telah dilaporkan pada penelitian sebelumnya [9]. Padatan hasil sintesis dinotasikan sebagai ZIF-67/Kit. Secara skematis metode sintesis komposit ZIF-67/kit ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema sintesis komposit ZIF-67/Kit

2.3. Pengujian Adsorpsi Zat Warna Metil Jingga

Sebelum proses adsorpsi material hasil sintesis dipanaskan terlebih dahulu pada suhu $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam untuk menghilangkan pengotor dalam adsorben. Proses adsorpsi dilakukan dalam botol duran tertutup dengan dosis adsorben $10\text{mg}/20\text{mL}$ dan konsentrasi awal adsorbat sebesar 100 mg/L . Variasi waktu kontak dilakukan selama 5 hingga 60 menit. Setelah proses adsorpsi dalam waktu yang telah ditentukan, larutan disentrifugasi pada kecepatan 1500 rpm selama 10 menit untuk memisahkan adsorben dengan adsorbat. Konsentrasi dari larutan kemudian diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Data yang didapatkan diplot antara Q_t (Kapasitas adsorpsi pada saat t) dan waktu (menit). Waktu optimum yang didapatkan digunakan sebagai waktu kontak dalam adsorpsi variasi konsentrasi. Q_t dapat dihitung menggunakan rumus [10]:

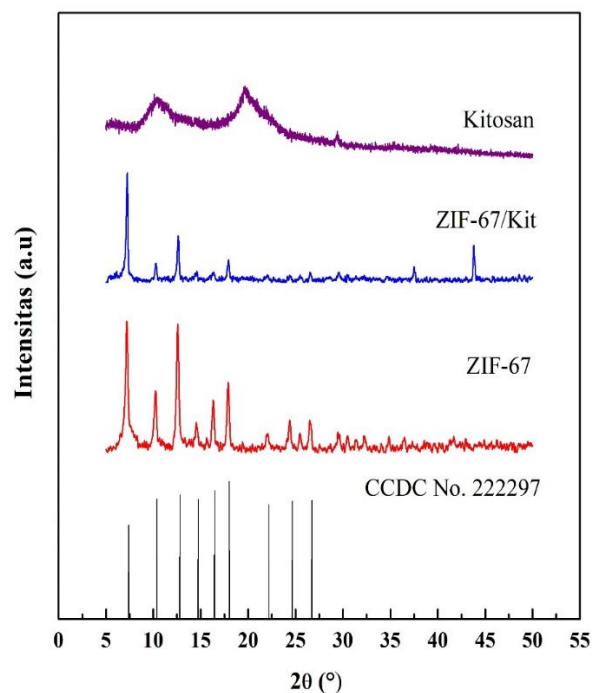
$$Q_t = \frac{(C_o - C_t) \times V}{W} \quad (2.1)$$

dengan Q_t dan C_t merupakan kapasitas adsorpsi (mg/L) dan konsentrasi akhir adsorpsi pada saat t tertentu.

3. Pembahasan

3.1. Karakterisasi material hasil sintesis

Analisa XRD dilakukan untuk mengetahui puncak karakteristik pembentukan fasa kristal material dan mengamati ada atau tidaknya fasa-fasa lain yang terbentuk. Kesesuaian bentuk kristal material hasil sintesis dibandingkan dengan ZIF-67 standar. Seperti yang digambarkan dalam Gambar 2, difraktogram XRD ZIF-67 menunjukkan puncak karakteristik yang identik dengan ZIF-67 standar (CCDC No. 7222297) dan ZIF-67 yang telah disintesis pada penelitian sebelumnya, pada nilai 2θ $7,27^{\circ}$, $10,34^{\circ}$, $12,65^{\circ}$, dan $17,96^{\circ}$ [11], [12]. Selain itu, puncak karakteristik CuO tidak terdeteksi pada difraktogram XRD yang mengkonfirmasi bahwa tidak adanya hasil samping atau pengotor pada material yang disintesis [13].



Gambar 2. Difraktogram XRD material hasil sintesis

Kitosan memiliki puncak karakteristik yang lebar pada daerah 2θ $9,7$ dan $20,4^{\circ}$, yang menunjukkan fasa amorf [14], [15]. Pola difraktogram komposit ZIF-67/Kit menunjukkan

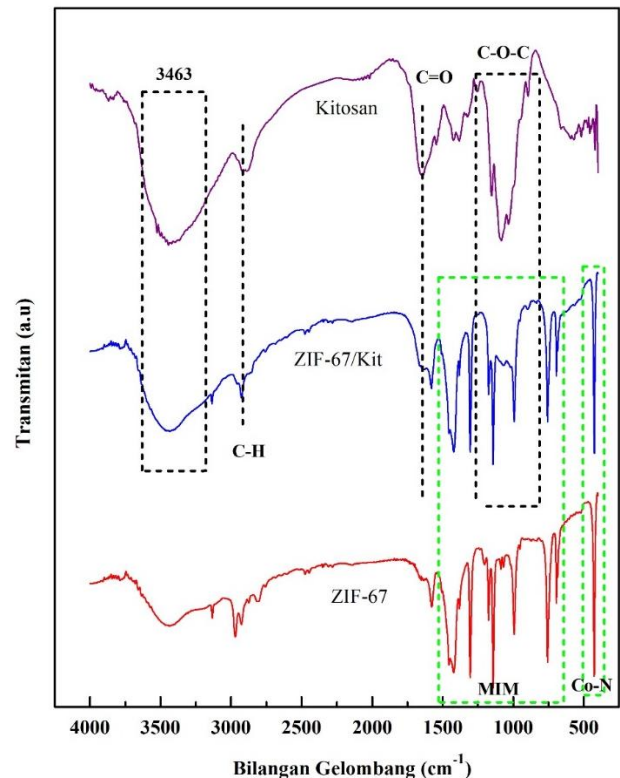
tidak adanya puncak khas dari kitosan yang terdeteksi. Hal tersebut dikarenakan kitosan adalah material yang bersifat amorf sehingga akan hanya menurunkan kristanilitas ZIF-67. Dapat dilihat pada difragtogram XRD komposit ZIF-67/Kit, penambahan kitosan dapat menurunkan kristanilitas material hingga 45%. Selain itu, tidak adanya puncak baru pada komposit ZIF-67/Kitosan menandakan ZIF-67 telah terdispersi seragam pada permukaan kitosan. Hal serupa telah dikonfirmasi pada hasil penelitian yang telah dilaporkan Wang dkk., (2016) dimana kristalinitas komposit UiO-66/Kitosan menurun penambahan pendukung kitosan [1], [4]. Kesesuaian puncak karakteristik ZIF-67 dan komposit ZIF-67/Kitosan menunjukkan ZIF-67 dan komposit ZIF-67/Kitosan telah berhasil disintesis.

Analisa FTIR dilakukan untuk mengkonfirmasi pembentukan ikatan pada struktur molekul material dan jenis gugus fungsi dari senyawa. Spektra FTIR ZIF-67 memiliki pita serapan tajam pada bilangan gelombang 423 cm^{-1} karena adanya vibrasi ulur Co-N yang menunjukkan telah terbentuk ikatan antara Co dengan N pada ligan 2-metilimidazol. Tidak adanya puncak pada daerah 1849 cm^{-1} yang berasal dari vibrasi tekuk dan vibrasi ulur N-H mengindikasikan ligan MIM telah berhasil terdeprotonasi selama proses sintesis dalam pelarut aquades maupun asam asetat dengan penambahan TEA [16]. Selain itu, terdapat puncak khas pada daerah 995 dan 1145 cm^{-1} yang berasal dari vibrasi tekuk dan ulur gugus C-N. Puncak lain yang berasal dari vibrasi tekuk dan ulur gugus C=N pada cincin imidazol muncul pada daerah panjang gelombang 755 dan 1584 cm^{-1} [17].

Kitosan memiliki daerah pita serapan pada bilangan gelombang 3390-3460 cm^{-1} yang menandakan serapan ulur gabungan dari NH dan OH, sedangkan pada daerah 1653 cm^{-1} menandakan vibrasi C=O dan vibrasi tekuk NH. Pada bilangan gelombang 2910 cm^{-1} , 1568 cm^{-1} dan 1076 cm^{-1} berturut-turut menunjukkan adanya vibrasi ulur dari C-H, vibrasi ulur amida, dan vibrasi dari C-O-C [14], [15].

Material komposit ZIF-67/Kitosan memiliki spektra IR yang identik dengan ZIF-67, namun ada beberapa puncak karakteristik dari kitosan seperti pada daerah pita serapan 3421 cm^{-1}

¹ yang menunjukkan adanya vibrasi ulur dari puncak gabungan NH dan OH. Puncak baru muncul pada material ZIF-67/Kitosan pada bilangan gelombang sekitar 1074 cm^{-1} yang menunjukkan adanya vibrasi C-O-C dan pada bilangan gelombang 2910 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi ulur dari C-H dari kitosan. Dengan demikian, hasil spektra FTIR dari ZIF-67/Kit mengkonfirmasi pembentukan ikatan antara material pendukung kitosan dan ZIF-67.



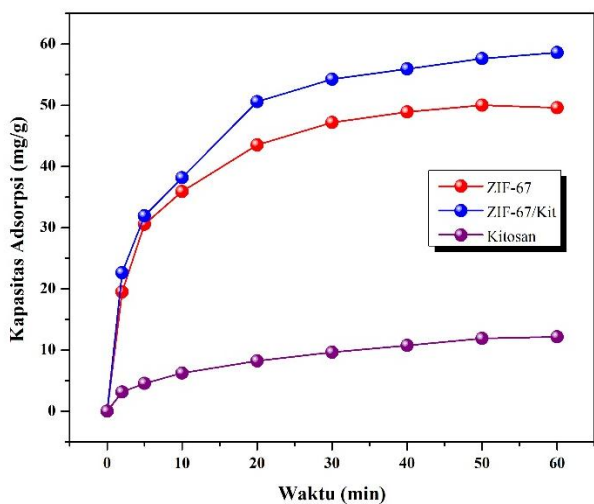
Gambar 3. Spektra FTIR material hasil sintesis

3.2. Uji kinerja material

Gambar 4 menunjukkan kapasitas adsorpsi semua jenis adsorben memiliki tren kemiripan pada zat warna MO. Pada kondisi awal, kapasitas adsorpsi masih mengalami kenaikan yang cukup signifikan ketika waktu kontak kurang dari 30 menit. Hal tersebut mengindikasikan bahwa sisi aktif pada permukaan adsorben yang digunakan masih belum sepenuhnya berinteraksi dengan adsorbat sehingga dimungkinkan masih mampu mengadsorpsi molekul zat warna dalam larutan. Namun nilainya mulai stabil ketika waktu kontak mencapai 40 menit yang mengindikasikan adsorben mulai jenuh dengan adanya molekul

metil orange yang teradsorp pada permukaan. Kinerja ZIF-67 mencapai optimum pada menit 50 sebesar 50,01 mg/g.

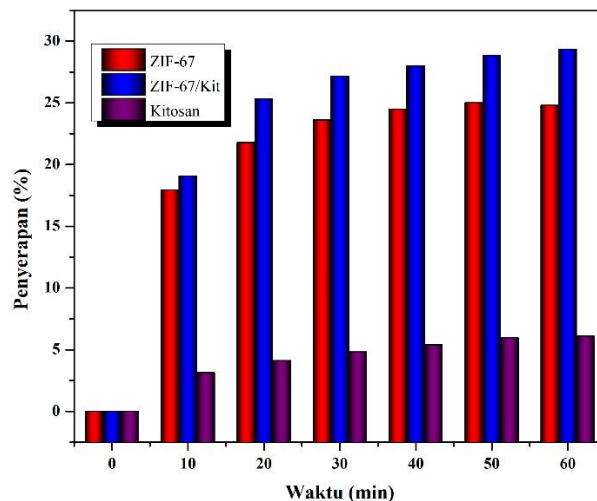
Setelah penambahan kitosan pada sintesis ZIF-67 (komposit ZIF-67/Kit), kapasitas adsorpsi mengalami kenaikan yang signifikan. Komposit ZIF-67/Kit memiliki kapasitas adsorpsi paling tinggi mencapai 58,62 mg/g. Peningkatan kapasitas adsorpsi dimungkinkan karena adanya kontribusi dari gugus aktif nitrogen yang berasal dari kitosan. Jika ditinjau lebih lanjut, kinerja kitosan sebagai adsorben metil jingga hanya memiliki kapasitas adsorpsi sebesar 12,17 mg/g. Rendahnya nilai kapasitas adsorpsi ini dikarenakan kitosan memiliki karakteristik luas permukaan yang kecil sebesar 15,94 m²/g, sehingga penggabungan kitosan dengan ZIF-67 yang memiliki luas permukaan tinggi (1079 m²/g) mampu membentuk material dengan sifat baru. Fenomena yang sama juga telah dilaporkan oleh Wang dkk (2019). Pada penelitiannya, Wang dkk (2019) melakukan penambahan kitosan pada ZIF-8 sebagai adsorben zat warna *cong red*. Hasil penelian menunjukkan komposit ZIF-8/Kitosan memiliki kinerja yang paling baik dibanding ZIF-8 dan kitosan dengan kapasitas adsorpsi *congo red* mencapai 922 mg/g [15].



Gambar 4. Kapasitas adsorpsi beberapa jenis adsorben terhadap zat warna MO

Jika ditinjau dari %penghilangan zat warna, komposit ZIF-67/Kit mampu menghilangkan kontaminan zat warna hingga 29,31%, nilai tersebut telah meningkat hampir 5 kali lipat dari adsorben kitosan murni yang hanya mencapai 6,08%. Sedangkan %penghilangan zat

warna ZIF-67 pada menit 50 mencapai 25%. Peningkatan kinerja pada komposit ZIF-67/Kit didukung dari karakteristik luas permukaan yang tinggi pada ZIF-67 dan kelimpahan sisi aktif pada kitosan untuk mengikat molekul MO dalam jumlah yang lebih banyak.

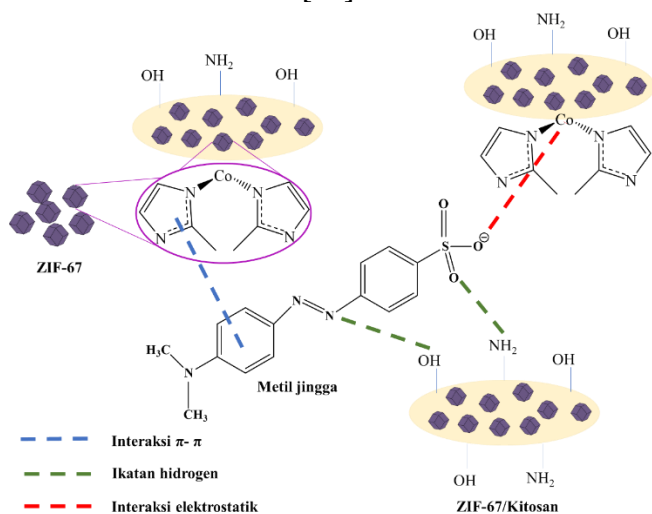


Gambar 5. %penghilangan zat warna MO pada berbagai jenis adsorben

3.3. Mekanisme adsorpsi MO

Penambahan kitosan terhadap ZIF-67 telah menunjukkan peningkatan pada kinerja adsorpsi MO. Hal ini dimungkinkan adanya kontribusi dari gugus aktif yang ada pada kitosan selama proses adsorpsi. Interaksi antara ZIF-67/Kitosan dengan metil jingga dapat dilihat pada Gambar 6. Dalam kondisi asam, gugus -NH₂ bebas pada kitosan dirubah menjadi -NH₃⁺, yang dapat dengan mudah menarik gugus -SO₃ pada molekul metil jingga. Disisi lain, ZIF-67 dengan karakteristik luas permukaan besar memastikan ruang yang cukup antara polimer kitosan yang menyediakan lebih banyak sisi aktif selama proses adsorpsi [18]. Berdasarkan studi literatur, zeta potensial ZIF-67 berada pada pH 8,7 yang mengindikasikan bahwa kondisi dibawah zeta potensial permukaan ZIF-67 kecenderungan bermuatan positif. Pada proses adsorpsi pada penelitian ini dilakukan pada pH netral sekitar 7, sehingga metil jingga yang bermuatan negatif akan memiliki interaksi elektrostatis dengan muatan positif pada adsorben ZIF-67 [19], [20]. ZIF-67 terdiri dari ion kobalt dan 2-methylimidazolate. Imidazol mengandung dua ikatan rangkap dan sepasang elektron dari nitrogen yang terprotonasi. Cincin aromatik pada

imidazol dapat menghasilkan interaksi π - π dengan cincin benzen yang ada pada molekul metil jingga. Secara umum, interaksi π - π antara adsorben dan adsorbat lebih lemah daripada interaksi elektrostatik [20].



Gambar 6. Mekanisme adsorpsi metil jingga pada material sebelum karbonisasi

4. Kesimpulan

Material komposit berpori ZIF-67/Kitosan telah berhasil disintesis melalui metode *in-situ*. Hasil spektra FTIR menunjukkan adanya ikatan baru yang terbentuk antara Kitosan dan ZIF-67 yang mengkonfirmasi keberhasilan pembentukan komposit ZIF-67/Kitosan. Hasil kinerja adsorpsi menunjukkan peningkatan kapasitas adsorpsi MO sebesar 381,67% (58,62 mg/g) terhadap adsorben kitosan yang hanya sebesar 12,17 mg/g. Penggunaan komposit ZIF-67/Kitosan telah berhasil meningkatkan kontaminan zat warna 5 kali lebih banyak dibanding kitosan murni.

5. Ucapan Terima Kasih (Optional)

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium Kimia Material dan Energi ITS atas penyedia fasilitas, Badan Riset dan Inovasi Nasional melalui hibah dana penelitian skema Barista 2024.

6. Daftar Pustaka

[1] R. Ediati *et al.*, "Chitosan/Uio-66 composites as high-performance adsorbents for the removal of methyl orange in aqueous solution," *Mater. Today Chem.*, vol. 21, hal. 100533, 2021, doi: 10.1016/j.mtchem.2021.100533.

[2] A. Dajic, M. Mihajlovic, S. Mandic-Rajcevic, D. Mijin, M. Jovanovic, dan J. Jovanovic, "Improvement of the Textile Industry Wastewater Decolorization Process Using Capillary Microreactor Technology," *Int. J. Environ. Res.*, vol. 13, no. 1, hal. 213–222, 2019, doi: 10.1007/s41742-018-0162-3.

[3] M. S. Derakhshan dan O. Moradi, "The study of thermodynamics and kinetics methyl orange and malachite green by SWCNTs, SWCNT-COOH and SWCNT-NH₂ as adsorbents from aqueous solution," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 20, no. 5, hal. 3186–3194, Sep 2014, doi: 10.1016/j.jiec.2013.11.064.

[4] K. Wang, X. Tao, J. Xu, dan N. Yin, "Novel chitosan-MOF composite adsorbent for the removal of heavy metal ions," *Chem. Lett.*, vol. 45, no. 12, hal. 1365–1368, 2016, doi: 10.1246/cl.160718.

[5] H. Alyasi, H. Mackey, dan G. McKay, "Adsorption of Methyl Orange from Water Using Chitosan Bead-like Materials," *Molecules*, vol. 28, no. 18, 2023, doi: 10.3390/molecules28186561.

[6] X. X. Liang, N. Wang, Y. Le Qu, L. Y. Yang, Y. G. Wang, dan X. K. Ouyang, "Facile preparation of metal-organic framework (MIL-125)/chitosan beads for adsorption of Pb(II) from aqueous solutions," *Molecules*, vol. 23, no. 7, 2018, doi: 10.3390/molecules23071524.

[7] S. Kaskel, *The Chemistry of Metal-Organic Frameworks*, Volume 1. Germany: Wiley-VCH, 2016.

[8] R. Ediati, P. Elfianuar, E. Santoso, D. Oktavia Sulistiono, dan M. Nadjib, "Synthesis of MCM-41/ZIF-67 Composite for Enhanced Adsorptive Removal of Methyl Orange in Aqueous Solution," in *Mesoporous Materials - Properties and Applications*, P. Elfianuar, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2019, hal. Ch. 3.

[9] D. O. Sulistiono dan R. Ediati, "Synthesis of ZIF-67 in the presence of acetic acid as methyl orange adsorbent," *4Th Int. Semin. Chem.*, vol. 2349, hal. 020067, 2021, doi: 10.1063/5.0052106.

[10] N. L. Torad *et al.*, "Direct synthesis of MOF-derived nanoporous carbon with magnetic Co nanoparticles toward efficient water treatment," *Small*, vol. 10, no. 10, hal. 2096–2107, 2014.

[11] K. Zhou, B. Mousavi, Z. Luo, S. Phatanasri, S. Chaemchuen, dan F. Verpoort, "Characterization and properties of Zn/Co zeolitic imidazolate frameworks vs. ZIF-8 and ZIF-67," *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 3, hal. 952–957, 2017, doi: 10.1039/C6TA07860E.

- [12] R. Banerjee, "High-Throughput Synthesis of Zeolitic," *ReVision*, vol. 939, no. February, hal. 939–944, 2008.
- [13] H. Yan *et al.*, "Solution growth of NiO nanosheets supported on Ni foam as high-performance electrodes for supercapacitors," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 9, no. 1, hal. 1–7, 2014, doi: 10.1186/1556-276X-9-424.
- [14] R. Zhao, T. Ma, S. Zhao, H. Rong, Y. Tian, dan G. Zhu, "Uniform and stable immobilization of metal-organic frameworks into chitosan matrix for enhanced tetracycline removal from water," *Chem. Eng. J.*, vol. 382, no. September, hal. 122893, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.122893.
- [15] Y. Wang, X. Dai, Y. Zhan, X. Ding, M. Wang, dan X. Wang, "In situ growth of ZIF-8 nanoparticles on chitosan to form the hybrid nanocomposites for high-efficiency removal of Congo Red," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 137, hal. 77–86, 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.06.195.
- [16] X. Li, X. Gao, L. Ai, dan J. Jiang, "Mechanistic insight into the interaction and adsorption of Cr(VI) with zeolitic imidazolate framework-67 microcrystals from aqueous solution," *Chem. Eng. J.*, vol. 274, no. Vi, hal. 238–246, 2015, doi: 10.1016/j.cej.2015.03.127.
- [17] Q. Li, J. Guo, H. Zhu, dan F. Yan, "Space-Confined Synthesis of ZIF-67 Nanoparticles in Hollow Carbon Nanospheres for CO₂ Adsorption," *Small*, vol. 15, no. 8, hal. 1–8, 2019, doi: 10.1002/sml.201804874.
- [18] Y. Jiang *et al.*, "Cross-linked chitosan/ β -cyclodextrin composite for selective removal of methyl orange: Adsorption performance and mechanism," *Carbohydr. Polym.*, vol. 182, hal. 106–114, Feb 2018, doi: 10.1016/j.carbpol.2017.10.097.
- [19] Z. Hasan dan S. H. Jhung, "Removal of hazardous organics from water using metal-organic frameworks (MOFs): Plausible mechanisms for selective adsorptions," *J. Hazard. Mater.*, vol. 283, hal. 329–339, Feb 2015, doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.09.046.
- [20] Z. Zhang, J. Zhang, J. Liu, Z. Xiong, dan X. Chen, "Selective and Competitive Adsorption of Azo Dyes on the Metal–Organic Framework ZIF-67," *Water, Air, Soil Pollut.*, vol. 227, no. 12, hal. 471, Des 2016, doi: 10.1007/s11270-016-3166-7.

