KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629

e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174

Analisis Luas Permukaan Dan Struktur Pori Nanokomposit Kitosan Yang Disintesis Dengan Metode Kopresipitasi

Amanda Agustin[1*], Ganesha Antarnusa[1], Rahmat Firman Septiyanto[1]

[1]Program Studi Pendidikan Fisika, Jurusan Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Indonesia
Email Corresponding Author: *2280220001@untirta.ac.id*

ABSTRAK

Nanokomposit Fe_3O_4/kitosan merupakan material yang berpotensi digunakan pada berbagai bidang, termasuk sebagai material pendukung fotokatalis, karena memiliki sifat superparamagnetik, biokompatibilitas, serta kemampuan adsorpsi yang baik. Karakteristik tekstur seperti luas permukaan spesifik, volume pori, dan struktur pori merupakan parameter penting yang memengaruhi interaksi material dengan molekul polutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis luas permukaan dan struktur pori nanokomposit Fe_3O_4/kitosan yang disintesis dengan metode kopresipitasi menggunakan analisis *Brunauer–Emmett–Teller* (BET). Karakterisasi dilakukan melalui analisis adsorpsi–desorpsi gas nitrogen untuk menentukan luas permukaan spesifik, volume pori total, diameter pori rata-rata, tipe isoterm adsorpsi, serta distribusi ukuran pori. Hasil analisis menunjukkan bahwa nanokomposit Fe_3O_4/kitosan memiliki luas permukaan spesifik BET sebesar 21,40 m^2/g, volume pori total 0,1738 cm^3/g, dan diameter pori rata-rata 16,24 nm. Kurva isoterm adsorpsi menunjukkan karakteristik isoterm Tipe IV yang disertai *hysteresis loop*, yang umumnya menandakan struktur mesopori. Analisis distribusi ukuran pori menggunakan metode *Barrett–Joyner–Halenda* (BJH) menunjukkan dominasi pori pada rentang mesopori. Karakteristik tekstur tersebut menunjukkan bahwa nanokomposit Fe_3O_4/kitosan yang disintesis menggunakan metode kopresipitasi memiliki struktur pori yang berpotensi mendukung proses adsorpsi dan pengembangan material untuk aplikasi fotokatalis maupun aplikasi berbasis adsorpsi lainnya. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk menguji aktivitas fotokatalitik nanokomposit secara langsung, membandingkan karakteristik teksturnya dengan Fe_3O_4 murni dan kitosan murni, serta memvariasikan rasio Fe_3O_4:kitosan untuk memperoleh struktur pori yang optimal.

Kata-kata kunci: *Nanokomposit Fe_3O_4/Kitosan; BET; Luas Permukaan Spesifik; Struktur Pori; Mesopori; Kopresipitasi.*

PENDAHULUAN

Nanopartikel magnetik merupakan suatu material yang memiliki perkembangan cukup pesat dalam beberapa tahun terakhir karena memiliki karakteristik fisik dan kimia yang mendukung berbagai aplikasi, seperti biomedis, adsorpsi, dan fotokatalis (Muthukumaran & Philip, 2024). Salah satu nanopartikel magnetik yaitu Fe_3O_4 memiliki sifat magnetik terbaik dengan toksisitas yang relatif rendah, stabilitas kimia yang tinggi, biokompatibilitas yang baik serta luas permukaan yang besar dan mudah dimodifikasi (Kumar, 2026). Fe_3O_4 telah banyak dimanfaatkan sebagai material fungsional. Selain itu, ukuran nano dari Fe_3O_4 menunjukkan sifat superparamagnetik yang memungkinkan material dapat dipisahkan kembali menggunakan medan magnet eksternal tanpa meninggalkan magnetisasi permanen (Novoselova, 2021). Oleh karena itu, pemanfaatan nanomaterial magnetik banyak dikembangkan untuk meningkatkan performa pada proses fotokatalis (Sudarmono et al., 2024).

KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629
e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174

Namun demikian, nanopartikel Fe_3O_4 memiliki kecenderungan mengalami aglomerasi akibat interaksi magnetik antar partikel dan energi permukaan yang tinggi. Fenomena tersebut dapat mengurangi keefektifan pada luas permukaan material. Oleh karena itu, pelapisan Fe_3O_4 menggunakan surfaktan maupun polimer dilakukan untuk meningkatkan stabilitas dispersi, mencegah aglomerasi, serta memperbaiki kemampuan adsorpsi dan aktivitas katalitik pada material (Saadat et al., 2023). Salah satu polimer alami yang sering digunakan sebagai bahan pelapis nanopartikel magnetik adalah kitosan. Kitosan tersusun atas rantai polisakarida dengan gugus amina (NH_2) dan hidroksil (-OH) yang merupakan turunan dari kitin, sehingga memiliki sifat biokompatibel serta kemampuan adsorpsi yang tinggi (Gao & Wu, 2022; Wang et al., 2023). Selain itu, sifat mekanik dan fisik yang dimiliki kitosan sering dimanfaatkan sebagai material pendukung dalam metode sintesis nanokomposit berbasis nanopartikel magnetik (Mashhourzad & Zeynizadeh, 2025). Namun demikian, penggunaan kitosan secara tunggal masih dianggap memiliki keterbatasan karena karakteristik polimer kitosan kurang mendukung proses adsorpsi maupun katalis (Ahmed & Mohamed, 2023). Berdasarkan hasil karakterisasi *Brunauer Emmett Teller* (BET), kitosan memiliki luas permukaan spesifik yang relatif rendah, serta tidak menunjukkan hysteresis tipe H3 pada isotherm adsorpsi-desorpsi nitrogen. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kitosan memiliki porositas yang terbatas sehingga kapasitas adsorpsi relatif rendah apabila digunakan secara tunggal tanpa penggabungan dengan material lain (Mashhourzad & Zeynizadeh, 2025).

Pelapisan Fe_3O_4 dengan kitosan dapat mencegah aglomerasi, meningkatkan stabilitas kimiawi sekaligus menyediakan gugus fungsi spesifik yang mendukung interaksi dengan berbagai molekul serta meningkatkan luas permukaan efektif sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan adsorpsi maupun aktivitas katalitik (Saadat et al., 2023). Sintesis nanokomposit Fe_3O_4/kitosan telah dilakukan dengan berbagai metode, di antaranya metode kopresipitasi, hidrotermal, dan mikroemulsi. Di antara metode tersebut, kopresipitasi merupakan metode yang paling banyak digunakan karena mampu menghasilkan nanokomposit dengan waktu preparasi yang singkat melalui prosedur yang relatif sederhana tanpa memerlukan perlakuan termal yang tinggi dibandingkan dengan metode lain (Al-Hussainawy et al., 2022; Jesus et al., 2020). Metode kopresipitasi yang sederhana juga memiliki efektivitas pada biaya serta kemampuan metode sintesis untuk menghasilkan Fe_3O_4 pada skala nano (Prayoga et al., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, pada penelitian ini dilakukan pelapisan Fe_3O_4 menggunakan kitosan dengan rasio (4:3) yang disintesis menggunakan metode kopresipitasi kemudian dianalisis luas permukaan spesifik, volume pori, ukuran pori serta distribusi pori melalui uji *Brunauer Emmett Teller* (BET) sehingga diperoleh informasi mengenai sifat tekstur nanokomposit Fe_3O_4/kitosan yang berpotensi mendukung aplikasinya sebagai material fotokatalitik.

KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629
e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif deskriptif. Perlakuan eksperimen berupa sintesis nanopartikel Fe_3O_4 dan pelapisannya dengan kitosan menggunakan metode kopresipitasi, sedangkan data kuantitatif diperoleh dari pengukuran adsorpsi–desorpsi gas nitrogen yang selanjutnya dideskripsikan untuk menggambarkan karakteristik tekstur material.

Subjek/Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah nanokomposit Fe_3O_4/kitosan dengan rasio 4:3 yang disintesis melalui dua tahap, yaitu sintesis nanopartikel Fe_3O_4 dan pelapisan Fe_3O_4 dengan kitosan. Variabel yang diamati meliputi luas permukaan spesifik, volume pori total, diameter pori rata-rata, tipe isoterm adsorpsi–desorpsi, serta distribusi ukuran pori material.

Instrumen Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, larutan NH_4OH 10%, kitosan, larutan CH_3COOH 2%, dan akuades. Alat-alat yang digunakan meliputi neraca analitik, gelas kimia, pipet tetes, *magnetic stirrer* dengan *hot plate*, magnet permanen sebagai magnet eksternal, dan ultrasonikator. Karakterisasi tekstur dilakukan menggunakan instrumen *surface area and pore size analyzer* berbasis adsorpsi–desorpsi gas nitrogen.

Prosedur Penelitian

Sintesis Fe_3O_4 dilakukan menggunakan metode kopresipitasi. Sebanyak 4,058 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 2,086 g $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (rasio mol Fe^{3+}:Fe^{2+} = 2:1) masing-masing dilarutkan dalam 7,5 mL akuades dan diaduk selama 15 menit menggunakan *magnetic stirrer*. Kedua larutan kemudian dicampurkan dan diaduk kembali pada suhu 60 °C hingga homogen. Selanjutnya, sebanyak 30 mL larutan NH_4OH 10% ditambahkan secara bertahap menggunakan pipet tetes sambil diaduk dengan kecepatan 600 rpm selama 90 menit pada suhu 60 °C. Endapan Fe_3O_4 yang terbentuk dicuci menggunakan akuades sebanyak 7 kali dengan bantuan magnet eksternal untuk memisahkan partikel dari pelarutnya. Endapan kemudian dikeringkan pada suhu 100 °C selama 2 jam dan dihaluskan sehingga diperoleh serbuk Fe_3O_4.

Pada tahap selanjutnya, dilakukan pelapisan Fe_3O_4 menggunakan kitosan. Sebanyak 0,8 g nanopartikel Fe_3O_4 didispersikan dalam 25 mL akuades, kemudian disonikasi menggunakan ultrasonikator selama 30 menit. Secara bersamaan, sebanyak 0,8 g kitosan dilarutkan dalam 25 mL larutan CH_3COOH 2% sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Larutan kitosan kemudian diteteskan secara bertahap ke dalam dispersi Fe_3O_4 dan campuran diaduk selama 1 jam pada suhu ruang dengan kecepatan 600 rpm. Endapan Fe_3O_4/kitosan yang terbentuk dicuci dengan akuades sebanyak 7 kali dengan bantuan magnet eksternal, kemudian dikeringkan di atas *hot plate* pada suhu 80°C selama 2 jam sehingga diperoleh nanokomposit Fe_3O_4/kitosan.

KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629
e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174

Nanokomposit Fe_3O_4/kitosan yang diperoleh selanjutnya dikarakterisasi melalui analisis adsorpsi–desorpsi gas nitrogen pada suhu nitrogen cair (77 K). Sebelum pengukuran, sampel terlebih dahulu diberi perlakuan *degassing* pada suhu 120°C selama 3 jam untuk menghilangkan uap air dan gas yang teradsorpsi pada permukaan material.

Teknik Analisis Data

Data isoterm adsorpsi–desorpsi nitrogen dianalisis secara kuantitatif. Luas permukaan spesifik ditentukan menggunakan metode BET multi-titik melalui bentuk linear persamaan BET berikut:

$$1/[W((P_0/P) - 1)] = 1/(W_m C) + [(C - 1)/(W_m C)](P/P_0) \qquad (1)$$

dengan W adalah massa gas teradsorpsi pada tekanan relatif P/P_0, W_m adalah massa gas yang membentuk lapisan tunggal (*monolayer*), dan C adalah konstanta BET. Nilai W_m diperoleh dari slope (s) dan intersep (i) plot linear, yaitu $W_m = 1/(s + i)$, sehingga luas permukaan total dihitung menggunakan persamaan:

$$S_t = W_m \, N \, A_{cs} / M \qquad (2)$$

dengan N adalah bilangan Avogadro ($6{,}022 \times 10^{23}$ mol^{-1}), A_{cs} adalah luas penampang molekul nitrogen (0,162 nm^2), dan M adalah massa molar nitrogen (28,0134 g/mol). Luas permukaan spesifik diperoleh dengan membagi S_t dengan massa sampel. Volume pori total ditentukan dari jumlah gas yang teradsorpsi pada tekanan relatif mendekati saturasi ($P/P_0 \approx 0{,}94$). Tipe isoterm dan *hysteresis loop* diklasifikasikan berdasarkan rekomendasi IUPAC (Thommes et al., 2015), sedangkan distribusi ukuran pori ditentukan menggunakan metode *Barrett–Joyner–Halenda* (BJH) berdasarkan cabang adsorpsi.

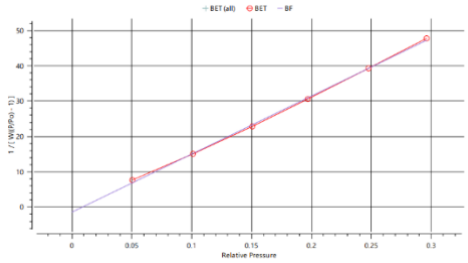
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

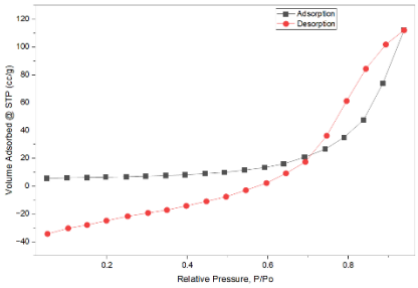
Gambar 1 menunjukkan plot BET multi-titik, yaitu hubungan antara $1/[W((P_0/P) - 1)]$ terhadap tekanan relatif (P/P_0). Dari hasil regresi linear diperoleh nilai slope sebesar 164,069, intersep sebesar −1,34946, dan koefisien korelasi $r = 0{,}999444$, yang menunjukkan linearitas yang sangat baik pada rentang tekanan relatif yang digunakan. Berdasarkan nilai slope dan intersep tersebut, nanokomposit Fe_3O_4/kitosan memiliki luas permukaan spesifik BET sebesar 21,40 m^2/g.

Gambar 2 menunjukkan kurva isoterm adsorpsi dan desorpsi nitrogen yang diplot sebagai volume gas teradsorpsi pada kondisi STP (cc/g) terhadap tekanan relatif (P/P_0). Kurva adsorpsi menunjukkan peningkatan volume adsorpsi yang cukup tajam pada tekanan rendah, kenaikan bertahap pada rentang tekanan menengah, kemudian peningkatan drastis ketika mendekati $P/P_0 \approx 1$. Cabang adsorpsi dan desorpsi tidak berimpit sehingga membentuk *hysteresis loop* yang terlihat jelas pada Gambar 2.

KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629
e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174



Gambar 1. Plot BET multi-titik



Gambar 2. Kurva isoterm adsorpsi dan desorpsi nitrogen

Distribusi ukuran pori dianalisis menggunakan metode *Barrett–Joyner–Halenda* (BJH) berdasarkan data cabang adsorpsi. Hasilnya disajikan pada Tabel 1, yang mencakup radius pori (nm), volume pori kumulatif (cc/g), luas permukaan kumulatif (m^2/g), serta turunan volume dan luas terhadap radius dan log radius.

Tabel 1. Distribusi ukuran pori dari metode BJH adsorpsi.

Radius nm	Pore Volume Cc/g	Pore Surf. Area m^2/g	dV(r) cc/nm/g	dS(r) m^2/nm/g	dV(log r) cc/g	dS(log r) m^2/g
1.512	0	0	0	0	0	0
1.687	0	0	0	0	0	0
1.886	0	0	0	0	0	0
2.119	9.05×10^{-4}	0.855	3.50×10^{-3}	3.31	1.71×10^{-2}	16.1
2.400	2.08×10^{-3}	1.83	3.86×10^{-3}	3.21	2.13×10^{-2}	17.7
2.736	5.40×10^{-3}	4.26	9.03×10^{-3}	6.60	5.68×10^{-2}	41.5
3.181	1.39×10^{-2}	9.63	1.64×10^{-2}	10.3	0.120	75.2
3.795	2.42×10^{-2}	15.1	1.46×10^{-2}	7.69	0.127	67.0
4.600	4.07×10^{-2}	22.2	1.82×10^{-2}	7.92	0.192	83.7
5.792	6.55×10^{-2}	30.8	1.67×10^{-2}	5.78	0.222	76.6
7.859	0.119	44.4	2.02×10^{-2}	5.14	0.362	92.1
12.911	0.192	55.7	9.79×10^{-3}	1.52	0.283	43.8

Berdasarkan Tabel 1, tidak terdeteksi volume pori pada radius 1,512–1,886 nm, dan volume pori kumulatif meningkat seiring dengan bertambahnya radius pori. Pada radius 7,859 nm, volume pori kumulatif mencapai 0,119 cc/g dengan luas permukaan kumulatif 44,4 m^2/g. Nilai dV(r) tertinggi juga terdapat pada radius 7,859 nm sehingga radius tersebut merupakan

KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629
e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174

radius pori dominan (*mode*). Luas permukaan BJH total adalah 55,72 m^2/g dengan volume pori kumulatif BJH 0,192 cc/g pada radius 12,911 nm.

Volume pori total yang ditentukan pada tekanan relatif mendekati saturasi (P/P_0 = 0,93872) adalah $1{,}7382 \times 10^{-1}$ cc/g (0,1738 cc/g) dengan diameter pori rata-rata 16,24 nm. Ringkasan parameter tekstur nanokomposit Fe_3O_4/kitosan disajikan pada Tabel 2.

Parameter	**Nilai**
Luas permukaan spesifik BET	21,40 m^2/g
Koefisien korelasi plot BET (*r*)	0,999444
Volume pori total (P/P_0 = 0,93872)	0,1738 cm^3/g
Diameter pori rata-rata	16,24 nm
Luas permukaan kumulatif BJH	55,72 m^2/g
Volume pori kumulatif BJH	0,192 cm^3/g
Radius pori dominan BJH	7,859 nm
Tipe isoterm (IUPAC)	Tipe IV dengan *hysteresis loop*

Tabel 2. Ringkasan parameter tekstur nanokomposit Fe_3O_4/kitosan

Pembahasan

Luas permukaan spesifik merupakan parameter penting dalam proses adsorpsi dan fotokatalisis. Material berpori dengan luas permukaan yang tinggi mampu meningkatkan aksesibilitas molekul reaktan terhadap permukaan fotokatalis sehingga mendukung efisiensi proses fotokatalitik (Periyasamy et al., 2021). Semakin besar luas permukaan spesifik, semakin banyak molekul zat warna yang dapat teradsorpsi sehingga peluang terjadinya reaksi oksidasi oleh spesies reaktif selama proses fotokatalisis semakin meningkat. Dengan luas permukaan spesifik 21,40 m^2/g, nanokomposit Fe_3O_4/kitosan memiliki area kontak yang cukup untuk mendukung interaksi antara molekul polutan dan permukaan material.

Nilai luas permukaan tersebut relatif lebih rendah dibandingkan dengan Fe_3O_4 murni yang dilaporkan pada penelitian lain. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa pelapisan kitosan menurunkan luas permukaan spesifik Fe_3O_4 dari 76,3 m^2/g menjadi 68,9–72,5 m^2/g (Wilczyńska et al., 2025). Penurunan tersebut diduga terjadi karena lapisan kitosan sebagian menutupi pori-pori Fe_3O_4 sehingga mengurangi luas permukaan yang dapat diakses oleh molekul adsorbat. Proporsi kitosan yang cukup tinggi pada penelitian ini diduga menyebabkan penurunan luas permukaan yang lebih besar, meskipun hal ini masih perlu dikonfirmasi melalui pengukuran Fe_3O_4 murni yang disintesis pada kondisi yang sama.

Berdasarkan klasifikasi IUPAC, bentuk isoterm pada Gambar 2 termasuk Tipe IV, yang umumnya ditunjukkan oleh material berstruktur mesopori (diameter pori 2–50 nm) dengan interaksi adsorbat–adsorben yang kuat (Li et al., 2019). Keberadaan *hysteresis loop* mengonfirmasi terjadinya kondensasi kapiler di dalam mesopori dengan bentuk dan ukuran yang beragam. Peningkatan adsorpsi yang tajam ketika mendekati $P/P_0 \approx 1$ juga mengindikasikan adanya kontribusi pori berukuran besar, yang kemungkinan berasal dari ruang antarpartikel akibat agregasi nanopartikel.

KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629
e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174

Hasil BJH pada Tabel 1 memperkuat dominasi mesopori pada material. Tidak terdeteksinya volume pori pada radius terkecil yang terukur menunjukkan bahwa porositas material didominasi oleh mesopori, dengan radius pori dominan 7,859 nm. Luas permukaan BJH (55,72 m^2/g) lebih besar daripada luas permukaan BET (21,40 m^2/g). Perbedaan ini terjadi karena metode BJH menghitung luas permukaan dari distribusi ukuran pori dengan mempertimbangkan seluruh rentang pori yang terdeteksi, sedangkan metode BET memberikan luas permukaan total berdasarkan pembentukan lapisan tunggal adsorbat (Ari et al., 2024). Hal tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar luas permukaan berasal dari mesopori dengan radius sekitar 2–13 nm. Struktur ini berpotensi mendukung proses adsorpsi dan menyediakan lebih banyak permukaan efektif pada material (Bavnhøj et al., 2019).

Volume pori total dari metode BET (0,1738 cc/g) mendekati volume pori kumulatif dari metode BJH (0,192 cc/g). Kesesuaian kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar volume pori material berasal dari pori dengan radius di bawah sekitar 13 nm, yaitu pada rentang mesopori.

Secara keseluruhan, karakteristik tekstur yang diperoleh dari analisis BET dan BJH menunjukkan bahwa nanokomposit Fe_3O_4/kitosan (4:3) memiliki struktur mesopori dengan diameter pori rata-rata 16,24 nm dan volume pori total 0,1738 cm^3/g. Karakteristik ini berpotensi mendukung adsorpsi molekul polutan serta proses fotodegradasi. Namun demikian, kinerja fotokatalitik material belum diuji secara langsung dalam penelitian ini sehingga potensi tersebut masih perlu dibuktikan melalui pengujian lanjutan.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, nanokomposit Fe_3O_4/kitosan (4:3) telah berhasil disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Hasil karakterisasi menggunakan metode *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) menunjukkan luas permukaan spesifik sebesar 21,40 m^2/g, volume pori total sebesar 0,1738 cm^3/g, dan diameter pori rata-rata sebesar 16,24 nm. Berdasarkan klasifikasi IUPAC, ukuran pori tersebut mengindikasikan bahwa material memiliki struktur mesopori. Kurva isoterm adsorpsi–desorpsi nitrogen menunjukkan karakteristik isoterm Tipe IV yang disertai *hysteresis loop*, sedangkan analisis BJH mengonfirmasi dominasi distribusi pori pada rentang mesopori dengan radius pori dominan 7,859 nm.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, karakterisasi hanya dilakukan pada satu komposisi nanokomposit (Fe_3O_4/kitosan 4:3) tanpa pembanding Fe_3O_4 murni dan kitosan murni yang disintesis pada kondisi yang sama, sehingga pengaruh pelapisan kitosan terhadap parameter tekstur belum dapat dikuantifikasi secara langsung. Kedua, aktivitas fotokatalitik dan kapasitas adsorpsi material belum diuji sehingga potensi aplikasinya masih didasarkan pada karakteristik tekstur. Ketiga, karakterisasi pendukung seperti XRD, FTIR, SEM/TEM, dan VSM belum disajikan untuk mengonfirmasi pembentukan fasa Fe_3O_4, keberadaan lapisan kitosan, morfologi partikel, serta sifat magnetiknya. Keempat, intersep negatif pada plot BET menghasilkan konstanta *C* bernilai negatif yang tidak bermakna secara

KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629
e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174

fisis, sehingga rentang tekanan relatif yang digunakan dalam perhitungan BET perlu dievaluasi kembali, dan keberadaan mikropori belum dikonfirmasi menggunakan metode *t-plot*.

Oleh karena itu, penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk: (1) menguji aktivitas fotokatalitik dan kapasitas adsorpsi nanokomposit terhadap polutan model, misalnya zat warna; (2) memvariasikan rasio Fe_3O_4:kitosan dan membandingkannya dengan Fe_3O_4 murni serta kitosan murni untuk mengkaji pengaruh rasio pelapisan terhadap luas permukaan, volume pori, dan struktur pori; (3) melengkapi karakterisasi dengan XRD, FTIR, SEM/TEM, dan VSM; serta (4) menentukan rentang tekanan relatif perhitungan BET berdasarkan kriteria Rouquerol dan melakukan analisis *t-plot* untuk evaluasi mikropori.

REFERENSI

Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2023). The use of chitosan-based composites for environmental remediation: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *242*(P2), 124787. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124787

Al-Hussainawy, M. K., Sahb Mehdi, Z., Jasim, K. K., Alshamsi, H. A., Saud, H. R., & Kyhoiesh, H. A. K. (2022). A single rapid route synthesis of magnetite/chitosan nanocomposite: Competitive study. *Results in Chemistry*, *4*(September), 100567. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100567

Ari, B., Inger, E., Sunol, A. K., & Sahiner, N. (2024). Optimized Porous Carbon Particles from Sucrose and Their Polyethyleneimine Modifications for Enhanced CO2 Capture. *Journal of Composites Science*, *8*(9), 1–16. https://doi.org/10.3390/jcs8090338

Bavnhøj, C. G., Knopp, M. M., Madsen, C. M., & Löbmann, K. (2019). The role interplay between mesoporous silica pore volume and surface area and their effect on drug loading capacity. *International Journal of Pharmaceutics: X*, *1*(February), 1–5. https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2019.100008

Gao, Y., & Wu, Y. (2022). Recent advances of chitosan-based nanoparticles for biomedical and biotechnological applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, *203*(January), 379–388. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.162

Jesus, A. C. B., Jesus, J. R., Lima, R. J. S., Moura, K. O., Almeida, J. M. A., Duque, J. G. S., & Meneses, C. T. (2020). Synthesis and magnetic interaction on concentrated Fe3O4 nanoparticles obtained by the co-precipitation and hydrothermal chemical methods. *Ceramics International*, *46*(8), 11149–11153. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.135

Kumar, J. (2026). Recent advances in magnetic nanomaterials for clinical applications: A comprehensive review. *Next Nanotechnology*, *9*(June 2025), 100444. https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2026.100444

Li, H., Wu, X., Yang, B., Li, J., Xu, L., Liu, H., Li, S., Xu, J., Yang, M., & Wei, M. (2019). Evaluation of biomimetically synthesized mesoporous silica nanoparticles as drug carriers: Structure, wettability, degradation, biocompatibility and brain distribution. *Materials Science and Engineering C*, *94*(February 2018), 453–464. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.09.053

Mashhourzad, B., & Zeynizadeh, B. (2025). Magnetically recoverable Fe3O4@chitosan@Ni2B: a bio-based catalyst for one-pot green and efficient synthesis of tetrahydrobenzo[b]pyrans. *Nanoscale Advances*, *7*(12), 3701–3721.

KUANTUM
Jurnal Pembelajaran & Sains Fisika
DOI: https://doi.org/10.63976/kuantum.v7i2.1629
e-ISSN: 2774-1966
Volume. 7. Nomor 2. November 2026
Halaman: 166-174

https://doi.org/10.1039/d4na01020e

Muthukumaran, T., & Philip, J. (2024). A review on synthesis, capping and applications of superparamagnetic magnetic nanoparticles. *Advances in Colloid and Interface Science*, *334*(September), 103314. https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103314

Novoselova, L. Y. (2021). Nanoscale magnetite: New synthesis approach, structure and properties. *Applied Surface Science*, *539*(May 2020), 148275. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148275

Periyasamy, M., Sain, S., Sengupta, U., Mandal, M., Mukhopadhyay, S., & Kar, A. (2021). Bandgap tuning of photo Fenton-like Fe3O4/C catalyst through oxygen vacancies for advanced visible light photocatalysis. *Materials Advances*, *2*(14), 4843–4858. https://doi.org/10.1039/d1ma00228g

Prayoga, G. A., Oktarisa, Y., Antarnusa, G., & Fitriani, N. S. (2024). The Effect of Chitosan Addition on Phase Composition and Detection Sensitivity of Fe3O4/Chitosan Magnetic Label Nanoparticles Based on Giant Magnetoresistance Sensor. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, *5*(4). https://doi.org/10.23960/jemit.v5i4.282

Saadat, A., Banaei, A., Sattarifar, M., & Pargolghasemi, P. (2023). Preparation 2-hydroxy-1-naphthaldehyde cross-linked Fe3O4@chitosan-polyacrylamide nanocomposite for removal of everzol black from aqueous solutions. *Scientific Reports*, *13*(1), 1–12. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37243-5

Sudarmono, Istiqomah, N. I., Budianti, S. I., Cuana, R., Puspitarum, D. L., Mahardhika, L. J., Chotimah, & Suharyadi, E. (2024). Magnetically separable and reusable Fe3O4/chitosan nanocomposites green synthesized utilizing Moringa oleifera extract for rapid photocatalytic degradation of methylene blue. *Results in Chemistry*, *7*(December 2023), 101245. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101245

Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, *87*(9–10), 1051–1069. https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117

Wang, K., Zhang, F., Xu, K., Che, Y., Qi, M., & Song, C. (2023). Modified magnetic chitosan materials for heavy metal adsorption: a review. *RSC Advances*, *13*(10), 6713–6736. https://doi.org/10.1039/d2ra07112f

Wilczyńska, A., Ruchomski, L., Łakomski, M., Góral-Kowalczyk, M., Surowiec, Z., & Miaskowski, A. (2025). Chitosan-coated Fe3O4 nanoparticles for magnetic hyperthermia. *Materials*, *18*(24), 5629. https://doi.org/10.3390/ma18245629