

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era modern, kemajuan teknologi telah membuka peluang baru melalui nanomaterial, yaitu material yang berukuran 1-100 nm dan memiliki luas permukaan yang sangat tinggi (Mazari et al., 2021). Material ini, yang juga dikenal sebagai nanopartikel, membawa perubahan besar dalam ilmu pengetahuan dan industri dengan memungkinkan inovasi seperti, penyimpanan dan konversi energi yang efisien, sistem pengobatan yang lebih akurat, nano-sorben, sensor, dan aplikasi lainnya (Izzah et al., 2024). Nanomaterial oksida logam transisi telah menjadi area penelitian aktif dalam pengembangan material pintar dan fungsional sejak zaman kuno (Chen et al., 2012). Sifat khas material ini berasal dari berbagai valensi campuran yang dimiliki oleh unsur transisi (Chen et al., 2012).

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian telah berfokus pada sifat-sifat oksida logam transisi yang bergantung pada bentuk dan ukuran (*shape- and size-dependent properties*), dengan tujuan menyesuaikan morfologi serta mengontrol ukuran dan struktur material (Ahmed, 2016). Oleh karena itu, ada dorongan kuat bagi para peneliti untuk menemukan teknik yang sederhana, efektif, dan murah untuk menyiapkan nanopartikel oksida logam (Yadav et al., 2023). Nanopartikel oksida logam menjadi fokus utama penelitian karena beberapa keunggulannya, termasuk biaya produksi yang rendah. Ketahanan terhadap tegangan tinggi. Mobilitas pembawa muatan listrik dan aktivitas elektrokimia yang tinggi, selektivitas dan stabilitas sebagai katalis (Kimura, 2019). Salah satu nanopartikel oksida logam yang sangat penting dalam teknologi saat ini adalah mangan (IV) oksida (MnO_2) (Izzah et al., 2024).

Sintesis nanopartikel mangan dioksida (MnO_2) umumnya dilakukan melalui metode redoks yang melibatkan reaksi antara senyawa mangan (II) dengan agen pengoksidasi dalam medium cair. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah reduksi kalium permanganat (KMnO_4) dengan agen pereduksi alami seperti ekstrak tumbuhan yang mengandung senyawa polifenol, flavonoid, atau asam askorbat. Dalam metode ini, KMnO_4 bertindak sebagai sumber Mn dan juga sebagai oksidator, sedangkan senyawa bioaktif dalam ekstrak tanaman bertindak sebagai pereduksi dan penstabil partikel. Reaksi ini berlangsung pada suhu kamar atau dengan sedikit pemanasan, dan menghasilkan endapan MnO_2 yang kemudian dikumpulkan, dicuci, dan dikeringkan untuk memperoleh nanopartikel yang siap dikarakterisasi (Zhang et al., 2017).

Proses sintesis nanopartikel dapat berlangsung dalam fasa cair, padat, dan gas. Proses pembuatan dapat terjadi secara kimia maupun fisika. Pada sintesis secara fisika hanya terjadi pemecahan material besar menjadi material sangat kecil (ukuran nanometer) tanpa mengubah sifat bahan. Proses sintesis secara kimia, terjadi reaksi kimia dari Pembentukan sejumlah material nanopartikel awal. dengan keteraturan yang tinggi dapat menghasilkan pola yang lebih seragam dan ukuran yang seragam (Kasim et al., 2020).

Mekanisme pembentukan nanopartikel dalam fase cair secara dominan dikendalikan oleh dua tahapan utama, yaitu nukleasi (pembentukan inti) dan pertumbuhan kristal (*growth*) (Ahsan et al., 2023). Proses ini diawali dengan fase induksi di mana konsentrasi prekursor terus meningkat hingga mencapai titik supersaturasi kritis (Naseem et al.,

2022). Berdasarkan model kinetika *LaMer*, ketika ambang batas ini terlampaui, terjadi nukleasi *burst* atau pembentukan inti atom secara simultan dalam jumlah besar untuk meminimalkan energi bebas permukaan (Santhosh et al., 2022). Keberadaan senyawa metabolit dari ekstrak tanaman bertindak sebagai ligan yang menstabilkan inti-inti awal ini agar tidak bergabung kembali secara prematur (Hanoon et al., 2023).

Setelah fase nukleasi selesai, sistem memasuki tahap pertumbuhan di mana atom-atom yang tersisa di dalam larutan berdifusi menuju permukaan inti yang sudah terbentuk (Siddiqui et al., 2024). Laju pertumbuhan ini sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti temperatur dan pH larutan, pH yang terlalu rendah seringkali mempercepat laju pertumbuhan secara tidak terkendali (Yusuf et al., 2024). Mengarah pada fenomena *Ostwald Ripening*, di mana partikel yang lebih kecil larut kembali dan mengendap pada permukaan partikel yang lebih besar (Al-Zahrani et al., 2022). Sebaliknya, pada kondisi pH yang optimal, biomolekul dari ekstrak akan membentuk lapisan pelindung (*capping layer*) yang membatasi difusi monomer, sehingga menghasilkan nanopartikel dengan distribusi ukuran yang monodispers (Basnet et al., 2021).

Pengendalian yang ketat antara laju nukleasi dan laju pertumbuhan merupakan kunci utama dalam memanipulasi morfologi nanopartikel logam oksida (Arshad et al., 2022). Proses penstabilan oleh gugus fungsi polifenol dan flavonoid memastikan bahwa energi permukaan partikel tetap rendah, mencegah terjadinya aglomerasi masif selama fase pematangan (Shinde et al., 2021). Dengan demikian, keteraturan pola dan keseragaman ukuran nanopartikel yang terbentuk sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam memisahkan waktu terjadinya nukleasi dan pertumbuhan secara efisien (Khan et al., 2025).

Prinsip kimia hijau telah menjadi pertimbangan utama dalam pengembangan nanopartikel karena prinsip ini menekankan penggunaan bahan ramah lingkungan dan kondisi reaksi yang lebih menguntungkan. Dalam sintesis nanopartikel, penggunaan ekstrak tumbuhan sebagai reagen menawarkan beberapa keuntungan utama reagen multifungsi. Tumbuhan mengandung senyawa yang dapat bertindak sebagai agen pereduksi atau agen penstabil dalam proses sintesis (Hamouda et al., 2019). Penggunaan tumbuhan sebagai bahan baku lebih ramah lingkungan dan lebih mudah diperoleh dibandingkan dengan mikroorganisme lain, seperti bakteri atau jamur (Izzah et al., 2024).

Fitokimia yang ditemukan dalam tumbuhan seperti senyawa fenolik, flavonoid, protein, alkaloid, terpenoid, asam, dan gula memiliki dua peran penting (Sridevi et al., 2023). Bertindak sebagai agen pereduksi untuk ion logam prekursor. Mendorong stabilisasi melalui pelapisan nanopartikel yang terbentuk, yang mencegah aglomerasi dan membantu dalam pengendalian ukuran, bentuk, dan sifat permukaan (Oliveira da Silva et al., 2024). Salah satu tumbuhan yang potensial digunakan adalah daun ketapang (*Terminalia catappa*). Daun ini mengandung senyawa bioaktif seperti flavonoid, tanin, dan fenol. Senyawa tersebut dapat mereduksi ion logam menjadi bentuk nanopartikel dan mencegah aglomerasi (Lu et al., 2021). Daun ketapang juga dikenal memiliki sifat antibakteri yang kuat terhadap berbagai mikroorganisme. Kandungan fitokimia dalam daun ketapang mampu merusak dinding sel bakteri. Mekanisme antibakterinya melibatkan peningkatan permeabilitas membran dan gangguan metabolisme bakteri.

Aktivitas ini menjadikan daun ketapang sebagai agen antibakteri alami yang menjanjikan. (Mawardani et al., 2023).

Ekstraksi senyawa aktif dari daun ketapang umumnya dilakukan melalui metode maserasi menggunakan pelarut polar seperti air atau etanol. Metode ini memungkinkan senyawa flavonoid dan tanin larut secara efisien dari jaringan tanaman. Flavonoid dan senyawa fenolik yang terlarut kemudian dapat berfungsi sebagai agen pereduksi dalam reaksi redoks untuk membentuk nanopartikel logam atau logam oksida. Selain itu, senyawa-senyawa ini juga bertindak sebagai agen penstabil (*capping agent*) yang mencegah aglomerasi partikel nano selama sintesis berlangsung. Keunggulan ini menjadikan daun ketapang sebagai alternatif bahan alam dalam teknologi green synthesis (Hapsari dan Kusuma, 2020).

Dalam sintesis nanopartikel MnO_2 , buffer asam digunakan untuk menjaga kestabilan pH larutan sehingga ion prekursor MnO_4^- dapat bereaksi secara konsisten. Penelitian oleh Wang et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan kondisi asam yang terkontrol mempercepat pembentukan MnO_2 nanopartikel dengan ukuran lebih seragam. Stabilitas pH yang dijaga oleh buffer mencegah fluktuasi reaksi oksidasi-reduksi yang dapat menghasilkan partikel berukuran besar atau tidak stabil (Wang et al., 2025).

Jenis buffer asam yang digunakan buffer asetat dapat mempengaruhi morfologi dan struktur kristal MnO_2 . Baral et al, (2020) menekankan bahwa variasi kondisi asam menghasilkan perbedaan bentuk nano- MnO_2 , mulai dari nanorods hingga nanosheets. Hal ini terjadi karena ion dalam buffer berinteraksi dengan permukaan partikel, sehingga memodifikasi pertumbuhan kristal. Selain mengontrol pH, buffer asam juga berfungsi sebagai agen stabilisasi yang mencegah agregasi nanopartikel. Patil et al. (2023) melaporkan bahwa sintesis MnO_2 dengan bantuan larutan asam sulfat menghasilkan partikel lebih stabil dibandingkan tanpa buffer. Ion H^+ dari buffer berperan dalam menjaga muatan permukaan nanopartikel sehingga partikel tetap terdispersi dengan baik di dalam medium (Suryawanshi et al., 2023)

Penggunaan buffer asam dalam sintesis MnO_2 tidak hanya berpengaruh pada proses pembentukan, tetapi juga pada aplikasi akhir. Nanopartikel MnO_2 yang disintesis dalam kondisi asam lebih efektif dalam aplikasi biomedis, seperti oksidasi glutathione (GSH) untuk deteksi penyakit. Stabilitas yang diberikan oleh buffer asam meningkatkan biokompatibilitas dan memperluas potensi aplikasi dalam bidang lingkungan, misalnya untuk degradasi polutan (Wang et al., 2025).

Dalam kimia redoks modern, tingkat oksidasi mangan (Mn) dipahami sebagai fungsi dari pH dan potensial elektroda, di mana suasana asam kuat memberikan kestabilan termodinamika tertinggi pada bentuk Mn^{2+} (tingkat oksidasi +2). Hal ini dikarenakan pada pH rendah (<2), ion permanganat (MnO_4^-) memiliki gaya pengoksidasi yang sangat kuat ($E^\circ = 1,51 \text{ V}$) yang mampu melewati tahap oksidasi antara dan langsung tereduksi menjadi ion mangan (II) yang larut dan stabil. Sebaliknya, pada suasana asam lemah atau kondisi mendekati netral (pH 4–6), kekuatan oksidasi permanganat menurun dan seringkali menghasilkan endapan cokelat MnO_2 (tingkat oksidasi +4) (Morgan et al., 2021). Dalam bidang katalis dan geokimia menunjukkan bahwa stabilitas tingkat oksidasi ini dapat dimanipulasi melalui teknik *defect engineering* dan penggunaan ligan organik untuk menstabilkan spesies antara seperti Mn^{3+} yang biasanya tidak stabil dalam media asam tanpa kompleksasi (Lee et al., 2025).

Nanopartikel MnO_2 bekerja dengan cara menghasilkan *reactive oxygen species* (ROS) yang dapat merusak membran sel bakteri, protein, dan DNA. Fitriannisa et al. (2025) dalam melaporkan bahwa MnO_2 nanopartikel mampu menimbulkan stres oksidatif pada bakteri patogen, sehingga menghambat pertumbuhan dan menyebabkan kematian sel. Mekanisme ini menjadikan MnO_2 sebagai kandidat kuat untuk aplikasi antibakteri modern. Studi menunjukkan bahwa MnO_2 nanopartikel efektif melawan bakteri Gram-positif (misalnya *Staphylococcus aureus*) dan Gram-negatif (misalnya *Escherichia coli*). Modifikasi struktur MnO_2 , seperti doping ion Mg atau Na, meningkatkan aktivitas antibakteri terhadap *Streptococcus mutans*. Hal ini menunjukkan bahwa sifat permukaan dan morfologi nanopartikel berperan penting dalam efektivitas antibakteri (Yan et al., 2022)

Penggunaan MnO_2 nanopartikel dalam bidang biomedis sangat menjanjikan, terutama untuk pengobatan infeksi yang resisten terhadap antibiotik. MnO_2 dapat dikombinasikan dengan terapi lain, seperti fotodinamik atau pengiriman obat, untuk meningkatkan efektivitas antibakteri. Dengan sifat biokompatibilitas yang baik, MnO_2 nanopartikel dapat digunakan dalam sistem penghantaran obat atau sebagai lapisan antibakteri pada implan medis (Fitriannisa et al., 2025).

Beberapa penelitian mengenai sintesis nanopartikel mangan dioksida dengan bioreduktor dari ekstrak tumbuhan dan pemanfaatannya sebagai antibakteri, seperti penelitian yang dilakukan oleh pole et al. (2025), yang mensintesis nanopartikel mangan dioksida dengan ekstrak daun *Justicia adhatoda* (dan diperoleh nanopartikel dengan ukuran partikel 49 nm. Penelitian lain oleh Manjula et al., (2019), juga berhasil mensintesis nanopartikel mangan dioksida dengan menggunakan ekstrak *Gardenia resinifera* dengan ukuran partikel 17-35 nm. Ramesh dan Rajendran, (2024), juga telah melakukan penelitian terkait sintesis nanopartikel mangan dioksida dengan menggunakan ekstrak *alga Lyngbya majuscula* dan diperoleh nanopartikel dengan ukuran kristal 80 nm. Oleh karena itu, dengan menggunakan prekursor KMnO_4 dan ekstrak daun ketapang untuk mereduksi nanopartikel MnO_2 serta penambahan buffer asam untuk mengontrol pH, proses sintesis MnO_2 dapat dilakukan secara lebih ramah lingkungan dan efisien. Kombinasi ketiganya diharapkan menghasilkan nanopartikel dengan morfologi optimal dan aktivitas antibakteri tinggi. Berdasarkan informasi latar belakang, penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh buffer asam dalam sintesis dan karakterisasi nanopartikel MnO_2 dengan menggunakan ekstrak daun ketapang serta uji aktivitasnya sebagai anti bakteri.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. bagaimana pengaruh buffer asam dalam sintesis nanopartikel MnO_2 menggunakan ekstrak daun ketapang (*Terminalia catappa*)?
2. bagaimana karakteristik nanopartikel MnO_2 hasil reduksi KMnO_4 menggunakan ekstrak daun ketapang (*Terminalia catappa*)?
3. bagaimana hasil uji aktivitas antibakteri nanopartikel MnO_2 yang disintesis dari KMnO_4 dengan menggunakan ekstrak daun ketapang (*Terminalia catappa*)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. menentukan penambahan buffer asam dalam sintesis nanopartikel MnO_2 menggunakan ekstrak daun ketapang (*Terminalia catappa*)
2. mengkarakterisasi nanopartikel MnO_2 hasil reduksi KMnO_4 dengan ekstrak daun ketapang (*Terminalia catappa*)
3. menguji aktivitas antibakteri nanopartikel MnO_2 yang disintesis dari KMnO_4 dengan menggunakan ekstrak daun ketapang (*Terminalia catappa*).

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi terbaru mengenai pengaruh buffer asam asetat dalam sintesis dan karakterisasi nanopartikel MnO_2 dan mengetahui ekstrak air daun ketapang sebagai agen pereduksi, serta penerapannya untuk menjadi bahan antibakteri, khususnya bakteri *E. coli* dan *S. aureus*. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif produksi nanopartikel MnO_2 yang ramah lingkungan karena mampu meminimalisir bahan-bahan kimia yang berbahaya sekaligus limbahnya.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah daun ketapang, KMnO_4 (*Merck*), etanol teknis, asam asetat glasial (*Merck*), natrium asetat (*Merck*), akuabides, FeCl_3 (*Merck*), reagen Dragendorff, reagen Lieberman-Burchard, bakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*, kertas saring *Whatmann* no. 42, plastik *wrap*, aluminium foil, *tissue roll*, *Muller Hinton Agar* (MHA), Kbr dan ampisilin.

2.2 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah alat gelas yang biasa digunakan di laboratorium, botol semprot, *magnetic stirrer* Model 04802-02, *magnetic bar*, neraca analitik Ohaus Analytical Plus, *hot plate* Taffware DLD-101B, tabung *centrifuge*, semtrigugasi, oven SPN 150 SFD, *sonicator* Elmasonic S 40 H, spektrofotometer UV-Vis Shimadzu UV-2600, *Scanning Electron Microscope* (SEM) JCM-7000, dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR) (*Shimadzu IR Prestige 21*), dan *Particle Size Analyzer* (PSA).

2.3 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli sampai November 2025. Penelitian dilakukan di Laboratorium Kimia Fisika, Laboratorium Terpadu Departemen Kimia, Laboratorium Penelitian dan Pengembangan Sains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin; Laboratorium Mikrostruktur, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia.

2.4 Prosedur Penelitian

2.4.1 Preparasi Sampel

Daun ketapang dicuci menggunakan akuades dan dikeringkan pada suhu ruang. Daun kering dipotong kecil-kecil dan dihaluskan menggunakan blender. Bubuk daun ketapang ditimbang sebanyak 6 g ke dalam gelas kimia 250 mL, lalu dilarutkan dengan 200 mL akuabides dan distirer pada suhu 60°C selama 1 jam. Setelah itu, ekstrak air daun ketapang yang diperoleh didinginkan pada suhu ruang dan disaring (Lu et al., 2021).

2.4.2 Uji Fitokimia

Tanin. Ekstrak daun ketapang dipipet sebanyak 2 mL dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi. Ekstrak tersebut ditambahkan beberapa tetes FeCl_3 10%. Uji positif tanin ditandai dengan terbentuknya warna hitam kehijauan atau biru kehitaman (Sulistyoningdyah dan Ramayani, 2017).

Flavonoid. Ekstrak air daun ketapang dipipet sebanyak 2 mL ke dalam tabung reaksi dan ditambahkan beberapa tetes NaOH 10%. Uji positif ditandai dengan adanya perubahan warna menjadi kuning kecoklatan (Kurnianto et al., 2023).

Saponin. Ekstrak air daun ketapang dipipet sebanyak 2 mL dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi. Ekstrak tersebut ditambahkan beberapa tetes akuades dan dikocok hingga terbentuk buih stabil (Sulistyoningdyah dan Ramayani, 2017).

Steroid. Ekstrak daun ketapang dipipet sebanyak 2 mL ke dalam tabung reaksi dan ditambahkan 0,1 mL reagen Lieberman-Burchard. Uji positif ditandai dengan perubahan warna menjadi hijau biru (Abriyani et al., 2021).

Terpenoid. Ekstrak daun kelor dipipet sebanyak 2 mL ke dalam tabung reaksi dan ditambahkan 0,1 mL reagen Lieberman-Burchard. Uji positif ditandai dengan perubahan warna menjadi merah ungu (Abriyani et al., 2021).

Alkaloid. Ekstrak air daun kelor dipipet sebanyak 2 mL ke dalam tabung reaksi dan ditambahkan 3 tetes reagen Dragendorff. Uji positif ditandai dengan pembentukan endapan merah kecoklatan (Eridawati dan Zharina, 2023).

2.4.3 Pembuatan Larutan KMnO_4

Padatan KMnO_4 ditimbang sebanyak 0,0395 g ke dalam gelas kimia 50 mL, kemudian dilarutkan dengan sedikit akuades. Larutan tersebut dimasukkan ke dalam labu ukur 250 mL, lalu dihomogenkan dan dihomogenkan untuk membuat larutan KMnO_4 1 mM.

2.4.3 Pembuatan Larutan Asam Asetat

Asam asetat glasial dipipet sebanyak 0,572 mL ke dalam gelas kimia, kemudian ditambahkan akuades hingga mencapai 100 mL.

2.4.3 Pembuatan Larutan Natrium Asetat

Padatan Natrium Asetat ditimbang sebanyak 0,82 gr menggunakan neraca analitik, kemudian dilarutkan dengan sedikit akuades dan di aduk. Setelah itu, ditambahkan akuades hingga mencapai 100 mL.

2.4.3 Pembuatan Larutan Buffer Asetat

pH 3. Larutan asam asetat 0,1 M dipipet sebanyak 19,65 mL ke dalam gelas kimia, kemudian ditambahkan Natrium Asetat sebanyak 0,3 mL, lalu pH diukur dengan menggunakan pH meter dengan menambahkan tetes demi tetes natrium asetat hingga diperoleh pH yang sesuai.

pH 4. Larutan asam asetat 0,1 M dipipet sebanyak 17,04 mL ke dalam gelas kimia, kemudian ditambahkan Natrium Asetat sebanyak 2,96 mL. lalu pH diukur dengan menggunakan pH meter dengan menambahkan tetes demi tetes natrium asetat hingga diperoleh pH yang sesuai.

pH 5. Larutan asam asetat 0,1 M dipipet sebanyak 7,31 mL ke dalam gelas kimia, kemudian ditambahkan Natrium Asetat sebanyak 12,69 mL. lalu pH diukur dengan menggunakan pH meter dengan menambahkan tetes demi tetes natrium asetat hingga diperoleh pH yang sesuai.

pH 6. Larutan asam asetat 0,1 M dipipet sebanyak 1,09 mL ke dalam gelas kimia, kemudian ditambahkan Natrium Asetat sebanyak 18,91 mL. lalu pH diukur dengan menggunakan pH meter dengan menambahkan tetes demi tetes natrium asetat hingga diperoleh pH yang sesuai.

2.4.3 Pengaruh Variasi pH Buffer Asetat

Larutan KMnO_4 dimasukkan ke dalam 4 erlenmeyer berbeda dan ditambahkan masing-masing larutan buffer asetat sesuai dengan pH 3, 4, 5 dan 6. lalu ditambahkan dengan 1 mL ekstrak air daun ketapang. Campuran dihomogenkan menggunakan stirrer magnetik selama 10 menit pada suhu ruang, lalu dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis.

2.4.4 Sintesis Nanopartikel MnO_2

Larutan KMnO_4 (pH buffer optimum) dimasukkan ke dalam erlenmeyer dan ditambahkan 1 mL ekstrak air daun ketapang. Campuran dihomogenkan lalu disentrifugasi pada kecepatan 10000 rpm selama 20 menit. Endapan yang dihasilkan dicuci menggunakan etanol dan akuabides. Endapan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 90°C selama 4 jam. Nanopartikel MnO_2 dikalsinasi selama 2 jam pada suhu 300°C (Joshi et al, 2020). Endapan dikarakterisasi dengan FTIR, SEM dan PSA.

2.4.5 Karakterisasi Nanopartikel

Karakterisasi Menggunakan FTIR Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan *fourier transform infrared* (FTIR) untuk menentukan gugus fungsi yang terdapat pada nanopartikel MnO_2 . Padatan nanopartikel MnO_2 diambil dan dikeringkan terlebih dahulu, kemudian dengan dicampurkan Kalium Bromida (KBr) dalam rasio 1:100 dan dipres menjadi bentuk *pellet*. Analisis FTIR dilakukan pada rentang panjang gelombang $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. (Saleh et al, 2023).

Karakterisasi Menggunakan SEM. Karakterisasi dengan menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) dilakukan untuk menentukan morfologi permukaan nanopartikel MnO_2 . Sampel nanopartikel dipasang pada penyangga untuk menahan spesimen. Spesimen yang sudah dipasang kemudian diperiksa menggunakan SEM pada tegangan percepatan 20 kV (Tamimi and Othman, 2023)

Karakterisasi Menggunakan PSA. Analisis distribusi ukuran nanopartikel dilakukan menggunakan Particle Size Analyzer (PSA) berbasis *dynamic light scattering* (DLS) (Wang et al., 2021). Sebanyak 3 mL suspensi nanopartikel dimasukkan ke dalam kuvet kuarsa bersih, kemudian diaduk hingga homogen dan bebas gelembung udara sebelum pengukuran (Utami et al., 2021). Kuvet selanjutnya dimasukkan ke dalam instrumen PSA untuk mengukur fluktuasi intensitas cahaya yang dihamburkan oleh partikel akibat gerak Brownian (Wang et al., 2021). Parameter yang diperoleh meliputi rata rata ukuran partikel, distribusi ukuran, dan indeks polidispersitas (PDI) sebagai indikator homogenitas dan stabilitas nanopartikel (Utami et al., 2021).

2.4.6 Uji Antibakteri

Sterilisasi Alat. Alat-alat yang akan digunakan dicuci bersih kemudain dikeringkan. Alat yang terbuat dari gelas tidak berskala disterilkan dengan menggunakan oven pada suhu 180°C selama 2 jam. Sedangkan alat-alat gelas yang tidak tahan terhadap suhu tinggi dan berskala disterilkan di autoklaf pada suhu 121°C tekanan 2 atm selama 15 menit (Wahyuni, 2018).

Pembuatan Media Mueller Hinton Agar (MHA). Sebanyak 15 g MHA dimasukkan ke dalam erlenmeyer, kemudian ditambahkan akuades sebanyak 250 mL dan dipanaskan hingga homogen. Media MHA di dalam erlenmeyer disterilkan di dalam autoklaf pada suhu 121°C dengan tekanan 2 atm selama 15 menit. Setelah disterilkan, media tersebut dituangkan ke dalam cawan petri sebanyak 15 mL. Media yang telah dituangkan di dalam cawan petri dipadatkan selama beberapa menit pada suhu kamar (Nurhayati et al., 2020).

Persiapan Suspensi Bakteri Uji. Isolat bakteri uji yaitu *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* diambil masing-masing sebanyak 1-2 ose dari biakan murni, kemudian dimasukkan ke dalam tabung reaksi yang berisi 5 mL NaCl 0,9% dan dihomogenkan. Kekeruhan suspensi disamakan standar 0,5 McFarland. Sebanyak 0,5 mL suspensi bakteri dicampurkan dengan 15 mL media MHA, kemudian diratakan dan didiamkan hingga media memadat (Nurhayati et al., 2020).

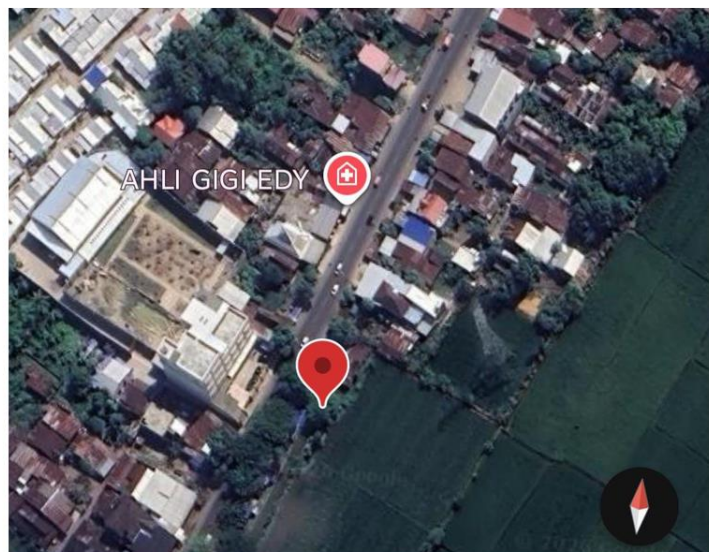
Uji Aktivitas Antibakteri. Pengujian aktivitas antibakteri nanopartikel MnO₂ terhadap bakteri *E. coli* dan *S. aureus* dilakukan menggunakan metode difusi agar dengan media *Mueller Hinton Agar* (MHA) dan *paper disc*. Sebanyak 6 *paper disc* berdiameter 6 mm direndam ke dalam 100 µL larutan nanopartikel MnO₂ 5%, kontrol positif (ampisilin 5%), kontrol negatif (akuades), dan DMSO 5% lalu didiamkan hingga larutan berdifusi ke dalam *paper disc*. *Paper disc* diletakkan secara aseptis pada permukaan media dan diberi jarak agar tidak terjadi *overlapping*. Media kemudian diinkubasi pada suhu 37° C selama 1 x 24 jam. Setelah inkubasi, diameter zona hambat antibakteri yang terbentuk diukur menggunakan jangka sorong (Nurhayati et al., 2020).

BAB III

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Preparasi Sampel Daun Ketapang

Daun ketapang diambil di pinggir jalan dari Jl. Poros Limbung, Desa Panciro, Kecamatan Bajeng, Kabupaten Gowa yang dapat dilihat pada Gambar 1. Daun ketapang dicuci bersih menggunakan akuades untuk menghilangkan kotoran yang masih menempel pada daun. Daun ketapang dikeringkan di bawah sinar matahari guna menghilangkan air setelah pencucian. Daun yang telah kering dipotong-potong kecil dan dihaluskan menggunakan blender. Bubuk daun ketapang ditimbang sebanyak 6 g ke dalam gelas kimia 250 mL, lalu dilarutkan dengan akuabides dan distirer pada suhu 60°C selama satu jam yang bertujuan untuk memperoleh ekstrak daun. Ekstrak air daun ketapang yang diperoleh didinginkan pada suhu ruang dan disaring sehingga ekstrak air daun ketapang didapatkan seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Titik Koordinat : 5°14'41"S 119°25'51"E

Gambar 1. Titik lokasi pengambilan sampel daun ketapang



Gambar 2. Ekstrak air daun ketapang

3.1 Uji Fitokimia

Uji fitokimia pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui dan mengidentifikasi senyawa metabolit sekunder yang ada dalam ekstrak air daun ketapang yang bertindak sebagai bioreduktor dalam mereduksi logam pada sintesis nanopartikel MnO_2 . Ekstrak air daun ketapang diperoleh dengan melarutkan daun ketapang dalam akuabides pada suhu 60°C selama 1 jam kemudian disaring. Hasil uji fitokimia ekstrak daun ketapang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji fitokimia pada ekstrak air daun ketapang

Uji	Pereaksi	Hasil Pengamatan	Hasil
Alkaloid	Dragendorff	Endapan merah kecoklatan	+
Flavanoid	NaOH 10%	Warna kuning kecoklatan	+
Tanin	FeCl_3 10%	Endapan warna hijau kehitaman	+
Saponin	Akuades	Busa	+
Terpenoid	Lieberman Burchard	Tidak terjadi perubahan	-
steroid	Lieberman Burchard	Tidak terjadi perubahan	-

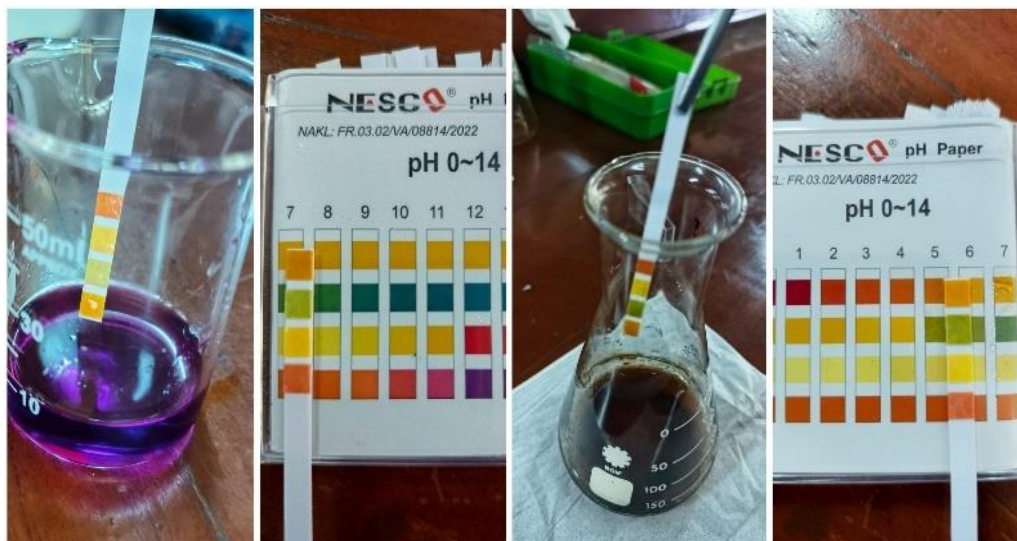
Berdasarkan Tabel 1 ekstrak daun ketapang mengandung alkaloid, flavanoid, tanin dan saponin. Uji alkaloid dilakukan dengan penambahan reagen Dragendorff dan menunjukkan hasil positif dengan terbentuknya endapa merah kecoklatan. Pengendapan ini terjadi karena pembentukan kompleks kalium-alkaloid. Alkaloid memiliki pasangan elektron bebas pada atom nitrogen yang akan berikatan dengan ion K^+ dalam pereaksi alkaloid (Oktavia dan Sutoyo, 2021). Uji flavanoid dilakukan dengan penambahan larutan NaOH 10% dengan hasil positif berupa perubahan warna menjadi kuning kecoklatan. Salah satu turunan senyawa flavon adalah senyawa kirstin yang akan mengalami penguraian ketika ditambahkan NaOH atau basa lainnya membentuk molekul asetofenon ang berwarna kuning akibat pemutusan ikatan pada struktur isoprena (Kurnianto et al., 2023).

Uji tanin dilakukan dengan penambahan larutan FeCl_3 pada ekstrak daun dan menunjukkan hasil positif dengan terbentuknya warna hijau kehitaman. Terjadinya pembentukan warna hijau karena terbentuknya senyawa kompleks antara logam Fe^{3+} dan tanin. Senyawa kompleks terbentuk karena adanya ikatan kovalen koordinasi antara ion atom logam atau non logam (Novianty et al., 2020). Uji saponin dilakukan dengan penambahan air atau akuades lalu dikocok kuat dengan hasil positif berupa busa yang tiddak hilang. busa terbentuk karena saponin merupakan senyawa yang mempunyai gugus hidrofilik (polar) dan hidrofobik (nonpolar). Pada saat dikocok gugus hidrofilik akan berikatan dengan air sedangkan gugus hidrofobik akan berikatan dengan oksigen sehingga membentuk buih (Suleman et al., 2022).

3.2 Sintesis Nanopartikel MnO_2

Pembentukan nanopartikel MnO_2 dilakukan melalui proses reduksi KMnO_4 dengan memanfaatkan ekstrak daun ketapang sebagai bioreduktor, serta penambahan buffer asam untuk menjaga kestabilan pH dan mengontrol morfologi selama sintesis. Sebelum proses pencampuran, larutan KMnO_4 memiliki nilai pH awal 8. Namun, segera setelah

ekstrak daun ketapang dan buffer asam ditambahkan, terjadi reaksi reduksi yang menyebabkan nilai pH sistem turun dan stabil pada pH 5 sesuai dengan rentang buffer yang digunakan. Penurunan pH ini mengindikasikan adanya konsumsi ion atau pelepasan proton selama transformasi kimia dari ion permanganat (MnO_4^-) menjadi mangan dioksida (MnO_2).

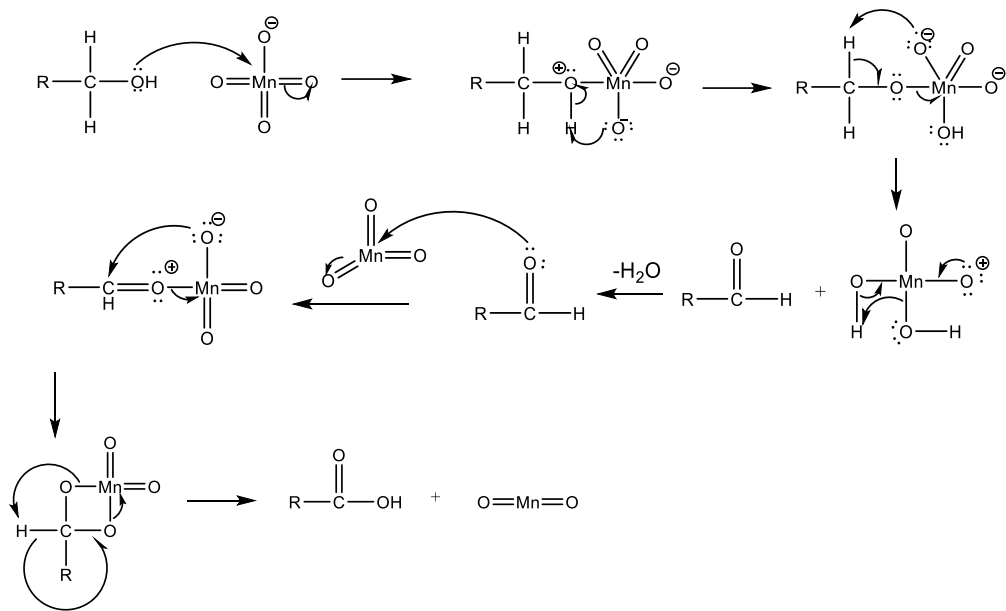


Gambar 3. Pengukuran pH sebelum dan sesudah reduksi

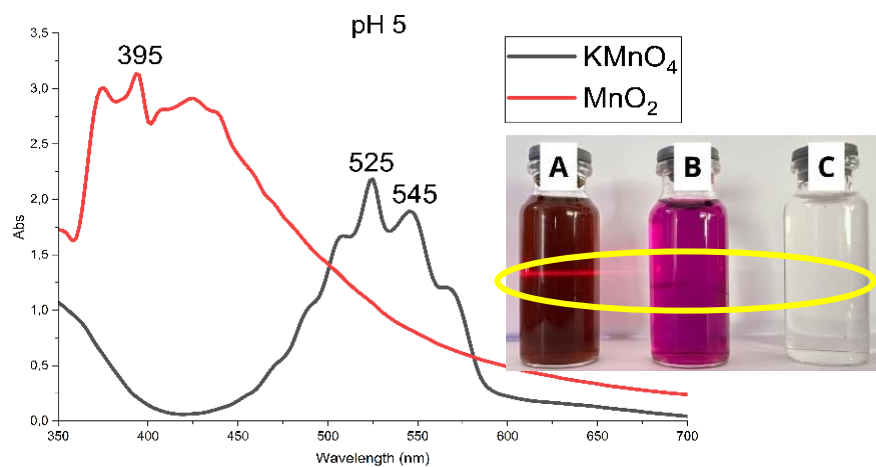
Perubahan ini ditandai dengan perubahan warna larutan dari ungu pekat menjadi kuning kecoklatan (Moon et al., 2015). Larutan KMnO_4 awalnya berwarna ungu karena menyerap warna komplementernya hijau-kuning pada panjang gelombang 500–550 nm. Secara teknis, ion Mn dalam KMnO_4 memiliki bilangan oksidasi +7 dengan konfigurasi orbital d^0 , di mana intensitas warnanya dihasilkan dari transisi *Ligand-to-Metal Charge Transfer* (LMCT) antara orbital oksigen dan mangan (Saba et al., 2021). Ketika larutan berubah menjadi kuning kecoklatan, hal tersebut menunjukkan bahwa MnO_4^- telah sepenuhnya tereduksi menjadi MnO_2 . Nanopartikel MnO_2 yang terbentuk memiliki serapan pada panjang gelombang sekitar 395 nm (Awad dan Hadia, 2018). Proses reduksi KMnO_4 menjadi MnO_2 dipicu oleh senyawa metabolit dalam daun ketapang, terutama kelompok fenolik seperti flavonoid dan tanin. Kandungan tanin dalam daun ketapang mencapai 21,8 g/L, dan senyawa ini terbukti efektif sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil dalam pembentukan nanopartikel (Eriani, 2017).

Mekanisme ini melibatkan donor elektron dari gugus hidroksil ($-\text{OH}$) pada senyawa fenolik yang kemudian teroksidasi menjadi bentuk kinon, secara simultan mengubah Mn(VII) menjadi Mn(IV) yang mengendap sebagai inti nanopartikel (Naseem et al., 2022). Selain itu, residu organik dari ekstrak daun ketapang berperan sebagai *capping agent* yang menyelimuti permukaan nanopartikel. Hal ini menciptakan gaya tolak-menolak sterik yang mencegah pertumbuhan partikel lebih lanjut dan menjaga stabilitas koloid dari fenomena agregasi (Sundaresh et al., 2022). Keberadaan tanin berperan ganda, selain mereduksi ion MnO_4^- menjadi MnO_2 , juga menjaga kestabilan partikel yang terbentuk agar tetap dalam skala nanometer. Mekanisme reduksi MnO_4^- dapat

divisualisasikan melalui skema reaksi yang ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema reduksi MnO_4^- menjadi MnO_2 (Zakir et al., 2025)



Gambar 5. Spektrum serapan UV-Vis dari larutan KMnO_4 dan nanopartikel MnO_2 (Ph5)

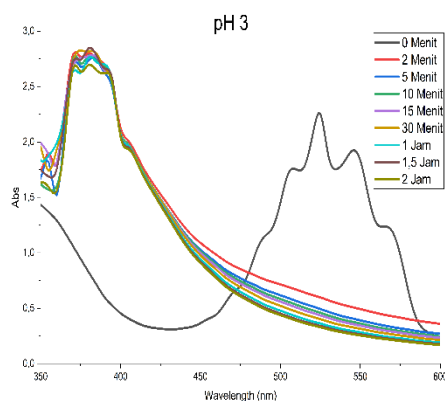
Gambar 5 memperlihatkan spektrum sebelum dan sesudah proses reduksi. Pada larutan KMnO_4 , terlihat adanya puncak serapan pada panjang gelombang 545 nm dan 525 nm yang menunjukkan bahwa reduksi belum berlangsung. Setelah reaksi reduksi terjadi, kedua puncak tersebut menghilang dan muncul serapan baru di sekitar 395 nm, yang menandakan terbentuknya nanopartikel MnO_2 . Keberadaan nanopartikel MnO_2 dapat dibuktikan melalui fenomena Tyndall, yaitu peristiwa hamburan cahaya ketika seberkas cahaya dilewatkan melalui medium koloid. Hamburan ini terjadi karena partikel koloid berukuran cukup besar untuk memantulkan cahaya, sedangkan larutan sejati

tidak menampilkan efek Tyndall karena ion atau molekul terlarut terlalu kecil untuk menghamburkan cahaya (Sulistiana dan Tarini Darijanto, 2021). Dalam gambar, sinar laser yang diarahkan tidak terlihat pada akuades maupun larutan KMnO_4 , karena keduanya tidak memiliki partikel berukuran cukup besar untuk menghamburkan cahaya. Sebaliknya, pada larutan yang mengandung nanopartikel MnO_2 , sinar laser tampak jelas akibat adanya hamburan cahaya oleh partikel yang terbentuk. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran partikel pada larutan MnO_2 (larutan A) lebih besar dibandingkan dengan larutan biasa (akuades dan KMnO_4), sehingga efek Tyndall dapat diamati dengan jelas.

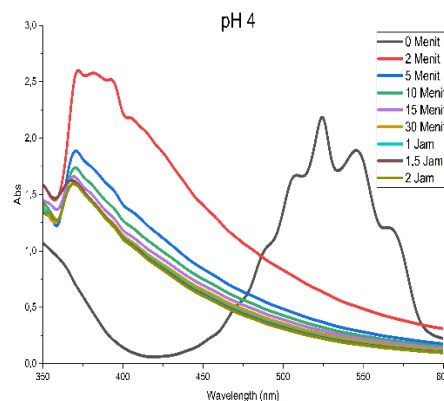
3.3 Pengaruh Variasi pH Buffer Terhadap Pembentukan Nanopartikel MnO_2

Pada penelitian ini digunakan variasi pH 3, 4, 5, dan 6 dengan pH awal tanpa penambahan buffer asetat adalah 8. Pembentukan nanopartikel MnO_2 dengan variasi pH memberikan pengaruh yang besar. Proses reduksi MnO_4^- dapat diamati dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Spektrum UV-Vis yang menunjukkan proses reduksi berdasarkan variasi pH buffer dapat dilihat pada Gambar 6.

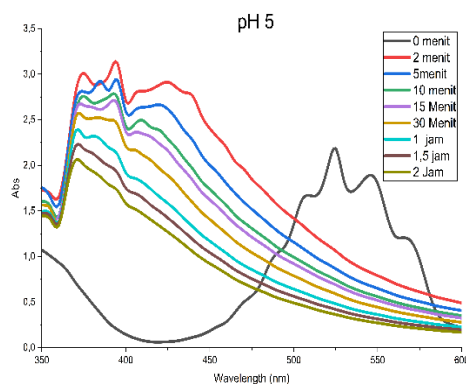
a. pH 3



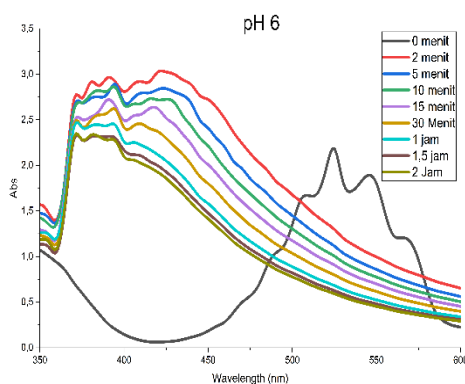
b. pH 4



c. pH 5



d. pH 6



Gambar 6. Spektrum UV-Vis hasil reduksi KMnO_4 oleh EADK pada variasi pH buffer a) pH 3, b) pH 4, c) pH 5 dan d) pH 6

Pada Gambar 6 dapat dilihat proses reduksi MnO_4^- menjadi MnO_2 . Proses sintesis dievaluasi secara spektroskopi untuk menentukan kondisi optimum pada pH buffer pendiaman selama 2 jam. Pengukuran pertama (0 menit) pada pH 3 menunjukkan puncak serapan khas KMnO_4 masih terdeteksi pada 545 nm dan 525 nm, yang mengindikasikan sistem masih berada dalam fase induksi. Berdasarkan teori pembentukan nanopartikel, fase ini merupakan tahap akumulasi monomer sebelum mencapai konsentrasi kritis untuk nukleasi (Siddiqui et al., 2024). Pengukuran pada menit ke-2 menunjukkan hilangnya puncak khas tersebut, menandakan bahwa proses nukleasi homogen telah terjadi secara cepat. Pengukuran pada pH 4 menunjukkan penurunan absorbansi yang sangat tajam setelah 5 menit. Fenomena ini dipicu oleh konsentrasi ion H^+ yang tinggi, yang mempercepat kinetika reduksi namun sekaligus meningkatkan laju pertumbuhan (*growth rate*) partikel melalui mekanisme penggabungan (*coalescence*). Laju pertumbuhan yang tidak terkontrol pada pH rendah cenderung mengabaikan peran hambatan sterik dari ligan penstabil, sehingga memicu aglomerasi masif yang menyebabkan partikel keluar dari fase koloid (Ahsan et al., 2023). Sebaliknya, pada pH 5 dan 6, penurunan absorbansi berlangsung lebih bertahap. Hal ini menunjukkan terjadinya pemisahan yang jelas antara fase nukleasi eksplosif dan fase pertumbuhan terkendali. Pada kondisi pH yang lebih mendekati netral, laju difusi prekursor ke permukaan inti atom berlangsung lebih lambat, memungkinkan molekul penstabil dari ekstrak daun ketapang untuk menyelimuti permukaan partikel secara sempurna (Santhosh et al., 2022). Perubahan warna larutan menjadi kuning kecoklatan dan munculnya puncak baru sekitar 395 nm mengonfirmasi keberadaan nanopartikel MnO_2 (Kai et al., 2008). Perbandingan nilai absorbansi untuk nanopartikel MnO_2 dari masing-masing pH dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data UV-Vis reduksi larutan KMnO_4 oleh EADK pada variasi pH Buffer

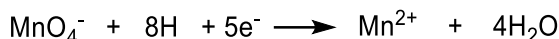
pH	Waktu (Menit)	Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi
3	2 menit	395	2,510
4	2 menit	395	2,516
5	2 menit	395	3,122
6	2 menit	395	2,912

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran bahwa variasi pH buffer berpengaruh signifikan terhadap pembentukan nanopartikel MnO_2 . Pada pH 3 dan 4, reaksi reduksi berlangsung sangat cepat, namun absorbansi yang dihasilkan rendah. Hal ini disebabkan oleh kondisi lingkungan yang terlalu asam sehingga memicu aglomerasi partikel secara instan. Kondisi paling optimal ditemukan pada pH 5 dengan nilai absorbansi tertinggi 3,122 yang mengindikasikan keseimbangan antara laju reduksi dan stabilitas partikel. Pada pH 6, absorbansi menurun sedikit, penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh efektivitas reduksi yang berkurang atau adanya perubahan struktur permukaan pada partikel MnO_2 yang terbentuk.

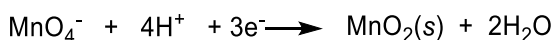
Hasil pengamatan menunjukkan bahwa nilai pH memiliki peran krusial dalam menentukan spesies akhir dari reduksi mangan. Secara termodinamika, kecenderungan pembentukan ion Mn^{2+} jauh lebih dominan pada kondisi pH yang sangat rendah dibandingkan pembentukan nanopartikel MnO_2 . Hal ini dikarenakan ion hidrogen (H^+)

bertindak sebagai reaktan utama yang menstabilkan fasa cair mangan dan mencegah terjadinya presipitasi oksidasi pada tingkat keasaman tinggi (Nurrahmianti et al., 2023). Pada pH sangat asam, potensi oksidasi-reduksi sistem bergeser sehingga MnO_4^- lebih cenderung tereduksi sepenuhnya menjadi Mn^{2+} yang memiliki tingkat energi lebih rendah dan stabil dalam bentuk ion bebas terhidrasi. Sebaliknya, seiring dengan meningkatnya pH (suasana asam lemah), konsentrasi (H^+) yang berkurang menyebabkan jalur reduksi terhenti pada pembentukan padatan MnO_2 (Rosalina et al., 2015).

Reduksi KMnO_4 dalam suasana asam kuat (H^+) pada pH 3 dan 4:



Reduksi KMnO_4 dalam suasana asam lemah pada pH 5 dan pH 6:

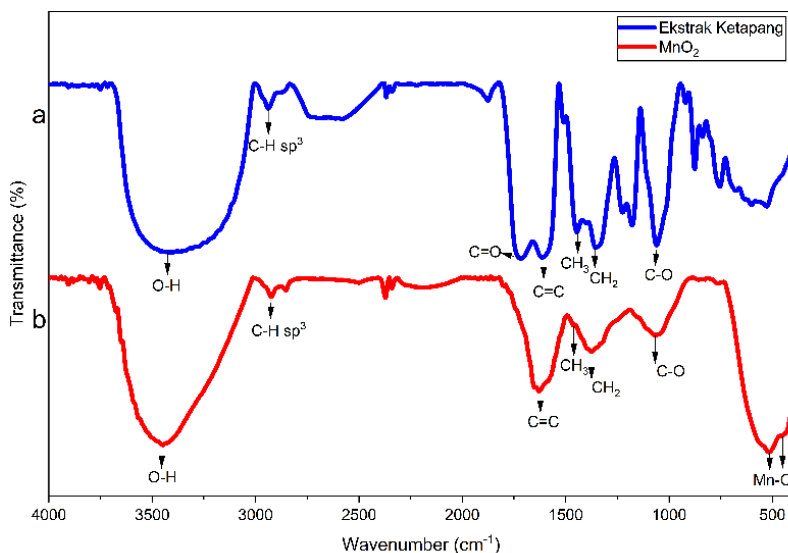


Dalam suasana asam kuat, KMnO_4 direduksi menjadi Mn^{2+} , sedangkan dalam suasana asam lemah dapat menghasilkan MnO_2 .

3.3 Karakterisasi Nanopartikel

3.3.1 Karakterisasi Menggunakan FTIR

Karakterisasi menggunakan FTIR pada penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi gugus-gugus fungsi dari nanopartikel MnO_2 yang telah disintesis. Analisis gugus fungsi dilakukan dengan melihat serapan yang terbentuk pada bilangan gelombang tertentu sebagai satu jenis gugus fungsi. Hasil spektrum FTIR nanopartikel MnO_2 ditunjukkan pada Gambar 6 dengan hasil interpretasi spektrum dideskripsikan pada Tabel 3.



Gambar 7. Spektrum FTIR daun ketapang dan MnO_2

Tabel 3. Bilangan gelombang pita serapan daun ketapang dan nanopartikel MnO₂

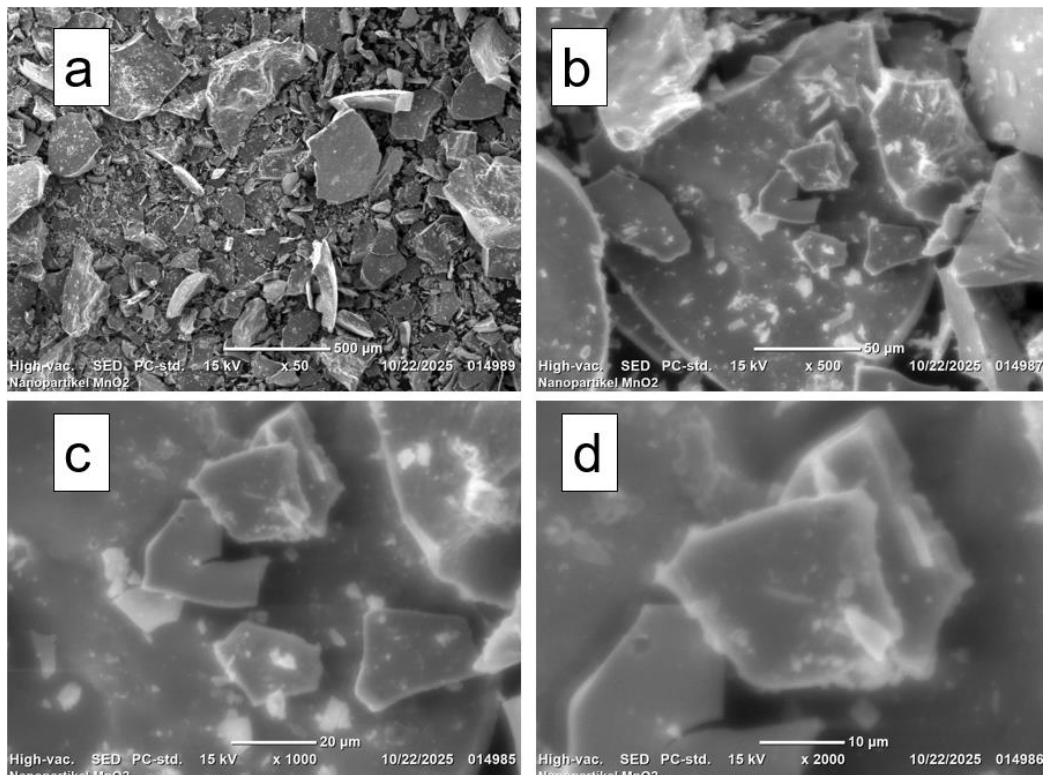
Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)		
	Daun Ketapang	Nanopartikel MnO ₂	Moeen et al., (2022)
O-H	3400	3448	3200 – 3600
C-H sp ³	2939	2924	2850 – 2970
CH ₃	1446	1458	1350 – 1470
CH ₂	1354	1375	1350 – 1470
C=O	1716	-	1600 – 1750
C=C	1612	1627	1600 – 1750
C-O	1060	1066	1000 – 1300
Mn-O	-	416 dan 516	400 - 800

Pada Gambar 7:a memperlihatkan adanya pita serapan pada daerah 3400 cm⁻¹ menunjukkan adanya gugus hidroksil (O-H). Serapan pada 2939 cm⁻¹ menunjukkan karakteristik dari gugus C-H sp³ yang diperkuat dengan adanya pita serapan pada 1446 cm⁻¹ dan 1354 cm⁻¹ yang mengindikasikan gugus CH₃ dan CH₂. Karakteristik kelompok karbonil (C=O) ditandai dengan munculnya pita serapan pada 1716 cm⁻¹. Pita serapan pada 1060 cm⁻¹ menunjukkan adanya gugus C-O. Adanya gugus C=O dan gugus C-O menegaskan terdapat gugus karboksilat pada spektrum. Bilangan gelombang 1612 cm⁻¹ mengindikasikan adanya gugus C=C terkonjugasi. Nanopartikel oksida logam dan hidroksida logam biasanya menunjukkan puncak serapan di daerah fingerprint, yaitu di bawah panjang gelombang 1000 nm yang disebabkan oleh getaran antar atom (Patra et al., 2022). Gambar 7:b memperlihatkan adanya pita serapan baru pada 516 cm⁻¹ dan 416 cm⁻¹ yang merupakan vibrasi ikatan Mn-O dari nanopartikel MnO₂. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Moeen et al, (2022), dimana pita serapan MnO₂ berada pada rentang 400-800 cm⁻¹.

3.3.2 Karakterisasi Menggunakan SEM

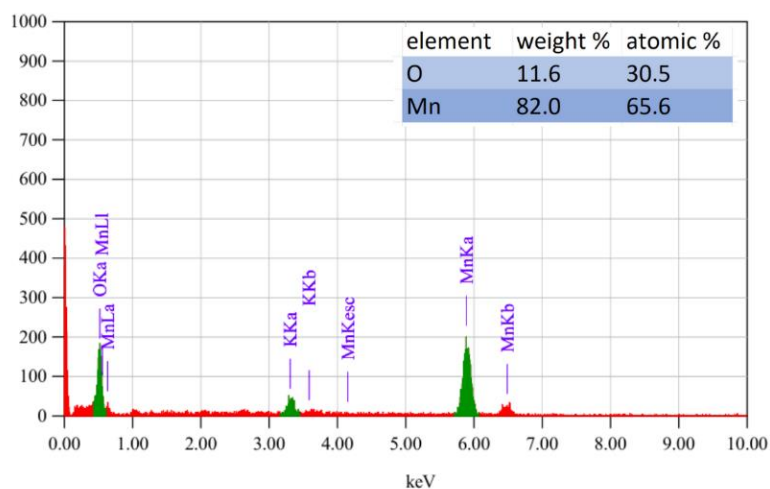
Hasil analisis SEM-EDX memperlihatkan morfologi dan tekstur dan permukaan nanopartikel serta komposisi unsur yang diinginkan. Gambar 8 memperlihatkan hasil pengamatan morfologi nanopartikel MnO₂ pada perbesaran 50x, 100x, 1000x dan 2000x. nanopartikel MnO₂ yang disintesis memperlihatkan kemungkinan terjadi agregasi karena partikel yang cenderung menggumpal. Peningkatan ukuran nanopartikel MnO₂ terjadi akibat penggumpalan dan aglomerasi nanopartikel karena luas permukaan yang lebih besar dan jumlah yang lebih banyak (Manjula et al., 2019). Berdasarkan data dari hasil SEM terlihat bahwa nanopartikel MnO₂ yang disintesis adalah bulat yang tidak beraturan dengan ukuran yang bervariasi sebagai akibat adanya agregasi nanopartikel.

Fenomena agregasi ini juga dapat dikaitkan dengan konsentrasi senyawa *capping agent* dari ekstrak daun ketapang yang mungkin belum sepenuhnya mampu menutupi seluruh permukaan partikel, sehingga gaya tarik *van der Waals* antar partikel mendominasi dibandingkan gaya tolak elektrostatis (Naseem et al., 2022). Menurut Malik et al. (2024), morfologi bulat yang tidak beraturan sering kali muncul pada metode *green synthesis* karena laju nukleasi yang cepat tidak diikuti dengan laju pertumbuhan yang seragam di seluruh sumbu kristal.



Gambar 8. Morfologi nanopartikel MnO_2 (a) 50x, (b) 500x, (c) 1000x, dan (d) 2000x

Analisis EDX digunakan untuk mengetahui komposisi dan unsur dalam nanopartikel MnO_2 yang telah disintesis. Untuk menghitung secara kuantitatif unsur penyusun suatu partikel maka digunakan matrix ZAF, dimana Z adalah nomor atom, A adalah absorbansi sinar-X, dan F adalah *fluorescence*. Persentase komposisi kimia nanopartikel dapat dilihat pada Gambar 9.

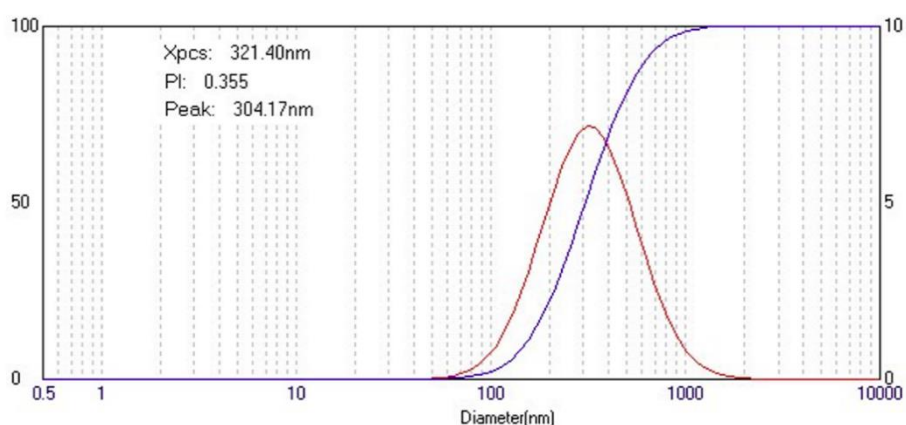


Gambar 9. Spektrum EDX nanopartikel MnO_2

Pada Gambar 9 dikonfirmasi adanya Unsur Mn dan O dalam sampel nanopartikel. Kumari et al, (2024) menemukan kandungan Mn dan O dalam partikel MnO_2 sebesar 22,5% dan 77,5%. Kandungan Mn dan O berdasarkan analisis EDX diperoleh 82,1% dan 11,7%.

3.3.3 Karakterisasi Menggunakan PSA

Pengukuran dengan PSA digunakan untuk menentukan distribusi ukuran partikel dalam skala nanometer. Prinsip pengukuran alat PSA ini didasarkan pada hamburan cahaya laser oleh partikel-partikel dalam sampel.

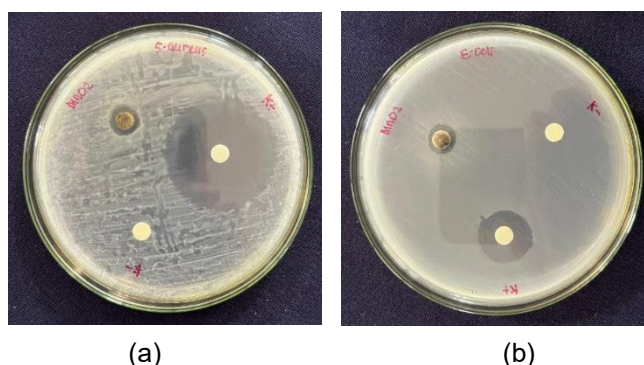


Gambar 10. Spektrum distribusi ukuran nanopartikel MnO_2

Gambar 10 menunjukkan hasil distribusi ukuran nanopartikel MnO_2 menggunakan PSA. Hasil karakterisasi menggunakan PSA memberikan rata-rata ukuran nanopartikel yang telah disintesis sebesar 304,17 nm yang dapat dilihat pada lampiran. Berdasarkan standar ISO/TS 80004-2, suatu material secara ideal didefinisikan sebagai nanopartikel jika memiliki dimensi dalam rentang 1–100 nm. Meskipun rata-rata ukuran yang terdeteksi melebihi ambang batas tersebut, hal ini disebabkan oleh karakteristik MnO_2 yang sangat sensitif terhadap kondisi lingkungan dan memiliki energi permukaan tinggi sehingga cenderung mengalami aglomerasi (Pan et al., 2023). PSA mengukur diameter hidrodinamik dari gumpalan partikel tersebut, bukan partikel tunggalnya. Namun, keberadaan populasi partikel di bawah 100 nm sebesar 8,41% membuktikan bahwa sistem koloid ini tetap mengandung partikel dalam fase nano.

3.4 Uji Antibakteri

Uji antibakteri dilakukan untuk mengetahui aktivitas antibakteri dari nanopartikel MnO_2 yang telah disintesis terhadap bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli* dengan mengamati zona hambat pada media bakteri yang telah diinkubasi selama 24 jam. Pada penelitian ini uji antibakteri dilakukan dengan metode difusi agar menggunakan kertas cakram (*paper disc*). Nanopartikel MnO_2 memiliki potensi sebagai agen antibakteri, karena mampu menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (ROS) dan menyebabkan kerusakan DNA pada bakteri..



Gambar 11. Aktivitas antibakteri MnO_2 terhadap bakteri *S. aureus* (a) dan *E. coli* (b)

Aktivitas antibakteri dari nanopartikel MnO_2 yang telah disintesis dapat dilihat berdasarkan zona bening yang terbentuk disekitar *paper disc* pada media agar. Berdasarkan diameter zona hambat, kekuatan antibakteri dapat dibagi menjadi empat kategori, yaitu daya hambat lemah ≤ 5 mm, 5-10 mm daya hambat sedang, 10-20 mm daya hambat kuat, dan ≥ 20 mm daya hambat sangat kuat (Luntungan et al., 2021). Data aktivitas antibakteri nanopartikel MnO_2 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji antibakteri pada bakteri *S. aureus* dan *E. coli*

No	Larutan Uji	Diameter Zona Hambat (mm)	
		Bakteri <i>S. aureus</i>	Bakteri <i>E. coli</i>
1.	Ekstrak Ketapang	6,90	6,50
2.	Nanopartikel MnO_2	9,70	9,45
3.	Kontrol positif (ampisilin)	36,40	17,80
4.	Kontrol negatif (akuades)	0	0

Pada Tabel 4, dapat dilihat bahwa MnO_2 dengan konsentrasi 1% memiliki daya hambat sedang terhadap bakteri *S. aureus* dan *E. coli*, dengan diameter zona hambat masing-masing 9,70 mm dan 9,45 mm. Berdasarkan hasil uji antibakteri tersebut, dapat diketahui bahwa nanopartikel MnO_2 memiliki aktivitas antibakteri yang lebih besar pada bakteri *S. aureus* (Gram positif) dibandingkan *E. coli* (Gram negatif). Hal ini disebabkan perbedaan dinding sel patogen. *S. aureus* adalah bakteri Gram positif memiliki dinding sel berupa peptidoglikan yang tipis sedangkan *E. coli* adalah bakteri Gram negatif memiliki dinding berupa membran lipid yang tebal. Peptidoglikan bakteri memiliki sifat polar sehingga mudah ditembus sedangkan membran lipid bersifat nonpolar sehingga sulit ditembus. Berdasarkan hal tersebut *S. aureus* lebih mudah lisis oleh senyawa pigmen fukosantin mengakibatkan zona hambat yang terbentuk lebih besar dari uji dengan *E. coli* (Pasaribu et al., 2025). *S. aureus* dipilih sebagai perwakilan bakteri Gram positif yang umum menyebabkan berbagai infeksi dengan dinding selnya yang tebal mengandung lapisan peptidoglikan yang tinggi (Nasrollahzadeh et al., 2020).

Mekanisme antibakteri nanopartikel MnO_2 berlangsung melalui beberapa proses yang saling melengkapi. Pertama, pelepasan ion Mn^{2+} memungkinkan interaksi dengan

gugus sulfhidril/tiol pada protein, sehingga enzim menjadi tidak aktif dan fungsi membran terganggu. Kedua, terbentuknya *reactive oxygen species* (ROS) yang mengacaukan metabolisme sel, menghambat kerja enzim respirasi, serta memicu stres oksidatif. Selain itu, nanopartikel ini juga menyebabkan kerusakan membran yang berujung pada kebocoran isi sel. Nanopartikel MnO_2 berikatan dengan membran bakteri melalui gaya non-kovalen, seperti interaksi elektrostatik, hidrofobik, gaya van der Waals, serta ikatan reseptor-ligan. Ukuran partikel yang lebih kecil dengan luas permukaan lebih besar memudahkan penetrasi ke dalam sel bakteri, sehingga menimbulkan kerusakan komponen intraseluler, gangguan integritas membran, dan akhirnya kehilangan isi sel (Fitriannisa et al., 2025).

Efektivitas daya hambat MnO_2 terhadap kedua jenis bakteri tersebut juga sangat dipengaruhi oleh rasio luas permukaan terhadap volume (*surface-to-volume ratio*) yang tinggi pada skala nanometer. Menurut Al-Zahrani et al., (2022), luas permukaan yang besar memungkinkan penetrasi nanopartikel ke dalam pori-pori dinding sel peptidoglikan *S. aureus* yang berpori, sehingga mempercepat kerusakan struktural pada sitoplasma. Pada bakteri *E. coli*, interaksi ini sedikit terhambat oleh adanya membran luar lipid yang bersifat selektif, namun gaya tarik elektrostatik antara permukaan nanopartikel MnO_2 yang bermuatan dengan ligan pada membran bakteri tetap mampu menginduksi stres oksidatif yang signifikan (Ghotaslou et al., 2023). Integrasi antara luas permukaan yang optimal dan kemampuan menembus barisan pertahanan peptidoglikan inilah yang menjadikan nanopartikel MnO_2 sebagai agen antimikroba yang menjanjikan dalam melawan patogen Gram positif maupun Gram negatif (Zhao et al., 2023).

Meskipun nanopartikel MnO_2 yang dihasilkan memiliki ukuran rata-rata sebesar 304,17 nm, aktivitas antibakterinya tetap signifikan karena morfologi permukaannya yang menyediakan area kontak yang luas bagi interaksi seluler. Pada skala 304,17 nm, mekanisme utama tidak lagi didominasi oleh penetrasi langsung ke dalam sitoplasma melalui pori-pori kecil, melainkan melalui adhesi permukaan yang kuat pada dinding sel bakteri. Partikel sub-mikron logam oksida cenderung membentuk jembatan kontak dengan membran lipid bakteri, yang memicu gangguan pada gradien potensial membran. Ukuran ini cukup besar untuk menyebabkan stres mekanis pada dinding sel peptidoglikan *S. aureus* yang kaku, namun tetap cukup aktif untuk menginduksi reaksi redoks di permukaan sel (Malik et al., 2024).

Berdasarkan hasil pengujian antibakteri MnO_2 memiliki zona hambat yang lebih besar dibandingkan. Hal ini terjadi karena pada sampel mengalami aglomerasi sesuai dengan hasil dari karakterisasi menggunakan instrumen SEM dan PSA. Aglomerasi dapat menyebabkan luas permukaan efektif partikel mengalami pengurangan, sehingga dapat mengurangi interaksi dengan mikroorganisme target dan menghambat efektivitasnya dalam menghambat atau membunuh bakteri.

BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa ekstrak daun ketapang (*Terminalia catappa*) mengandung saponin, tanin, flavonoid, steroid, dan fenol. Nanopartikel MnO_2 berhasil disintesis dengan memanfaatkan KMnO_4 dan ekstrak daun ketapang bioreduksi serta penambahan buffer asam yang menghasilkan serbuk nanopartikel MnO_2 berwarna hitam. Variasi pH buffer asam dapat mempengaruhi hasil dan kekuatan dari nanopartikel, tetapi nanopartikel MnO_2 akan cenderung mengalami aglomerasi. Hasil karakterisasi MnO_2 memiliki panjang gelombang maksimum 395 nm dengan absorbansi 3,122 yang diamati dengan spektrofotometer UV-Vis. Hasil pengukuran PSA menunjukkan bahwa nanopartikel terdistribusi homogen dalam larutan dengan diameter rata-rata sebesar 304,17 nm. Analisis FTIR mengidentifikasi gugus fungsi O-H, C-H, C-O, dan C=C, yang menegaskan peran ekstrak sebagai bioreduktor serta terdapat gugus fungsi Mn-O yang menandakan nanopartikel MnO_2 . Hasil SEM-EDX menunjukkan morfologi nanopartikel yang tidak beraturan dengan permukaan halus dan tidak berpori, serta distribusi logam Mn yang merata dengan kehadiran unsur O yang menunjukkan nanopartikel oksida. Uji antibakteri membuktikan bahwa nanopartikel MnO_2 memiliki aktivitas antibakteri terhadap strain Gram-positif *Staphylococcus aureus* dan strain Gram-negatif *Escherichia coli* masing-masing dengan kategori zona 5-10 mm daya hambat sedang.

4.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, disarankan agar penelitian selanjutnya sebaiknya dikarakterisasi dengan menggunakan instrumen *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fase kristal, struktur nanopartikel MnO_2 yang disintesis secara lebih detail. Selain itu, sebaiknya dilakukan pengujian lebih lanjut seperti pada uji antijamur.