

Synthesis and Characterization of Copper Nanoparticles using *Stachytarpheta jamaicensis* Leaf Extract as A Bioreductant and Evaluation of its Antibacterial Activity Against *Pseudomonas aeruginosa*

Neneng Lestari dan Suyatno Sutoyo ✉

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya
Gedung C5-C6 Kampus Ketintang, Surabaya, Jawa Timur, 60231, Indonesia.

Info Artikel

Diterima: 26-05-2026

Disetujui: 29-06-2026

Dipublikasikan: 03-08-2026

Keywords:

Aktivitas antibakteri
bioreduktor
biosintesis,
karakterisasi
nanopartikel tembaga

Abstrak

Nanopartikel tembaga merupakan partikel logam berukuran 1–100 nm yang berpotensi sebagai antibakteri. Penelitian ini bertujuan menentukan karakteristik dan aktivitas antibakteri nanopartikel tembaga hasil sintesis menggunakan bioreduktor ekstrak daun pecut kuda (*Stachytarpheta jamaicensis*). Sintesis dilakukan dengan metode *green synthesis* melalui reduksi larutan CuSO_4 menggunakan ekstrak daun pecut kuda. Optimasi dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan variasi perbandingan CuSO_4 dan ekstrak 1:1–1:4 serta variasi pH 7–11. Karakterisasi nanopartikel dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis, FTIR dan PSA, sedangkan uji antibakteri menggunakan metode difusi sumuran. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum diperoleh pada perbandingan 1:4 dan pH 8. Nanopartikel tembaga yang dihasilkan memiliki ukuran partikel 17,03 nm dengan panjang gelombang serapan maksimum UV-Vis 310 nm. Gugus fungsi Cu–O teridentifikasi pada bilangan gelombang 598,91 cm^{-1} . Nanopartikel tembaga menunjukkan aktivitas antibakteri sangat kuat terhadap *Pseudomonas aeruginosa* dengan zona diameter hambat 21,96 mm sehingga berpotensi sebagai bahan antibakteri.

Abstract

Copper nanoparticles are metal particles with a size range of 1–100 nm that have potential as antibacterial agents. This study aimed to determine the characteristics and antibacterial activity of copper nanoparticles synthesized using *Stachytarpheta jamaicensis* leaf extract as a bioreductor. The synthesis was carried out using a green synthesis method through the reduction of $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ solution with *Stachytarpheta jamaicensis* leaf extract. Optimization was performed using a UV-Vis spectrophotometer with variations in the ratio of CuSO_4 to extract from 1:1 to 1:4 and pH variations from 7 to 11. The nanoparticles were characterized using UV-Vis spectrophotometry, FTIR, and PSA, while the antibacterial activity was evaluated using the well diffusion method. The results showed that the optimum conditions were obtained at a ratio of 1:4 and pH 8. The synthesized copper nanoparticles had a particle size of 17.03 nm with a maximum UV-Vis absorption wavelength at 310 nm. The Cu–O functional group was identified at a wavenumber of 598.91 cm^{-1} . The copper nanoparticles exhibited very strong antibacterial activity against *Pseudomonas aeruginosa* with an inhibition zone diameter of 21.96 mm, indicating their potential as an antibacterial agent.

Pendahuluan

Nanoteknologi merupakan salah satu perkembangan teknologi yang memiliki potensi besar pada abad ke-21 karena material berukuran nano memiliki sifat fisik, kimia, dan biologis yang berbeda dibandingkan material dalam ukuran bulk. Nanopartikel umumnya memiliki ukuran partikel berkisar 1–100 nm sehingga mempunyai luas permukaan yang tinggi, reaktivitas yang lebih baik, serta aktivitas biologis yang meningkat (Bayda *et al.*, 2019). Salah satu jenis nanopartikel logam yang banyak dikembangkan adalah nanopartikel tembaga. Nanopartikel tembaga diketahui memiliki sifat biokompatibel, biaya produksi yang relatif rendah, ketersediaan yang melimpah, serta aktivitas antibakteri yang baik. Aktivitas antibakteri tersebut terjadi melalui pelepasan ion Cu^{2+} dan pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang mampu merusak membran sel, protein, serta DNA bakteri sehingga menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen (Yusof *et al.*, 2019). Dibandingkan nanopartikel logam mulia seperti emas dan perak, nanopartikel tembaga lebih ekonomis sehingga berpotensi lebih luas untuk diaplikasikan sebagai agen antibakteri (Dejene *et al.*, 2024).

Sintesis nanopartikel tembaga dapat dilakukan melalui metode fisika, kimia, maupun biologi. Namun, metode konvensional umumnya memerlukan bahan kimia berbahaya, energi tinggi, serta menghasilkan limbah yang kurang ramah lingkungan. Oleh karena itu, metode *green synthesis* mulai banyak dikembangkan sebagai alternatif sintesis nanopartikel yang lebih aman dan berkelanjutan. Metode *green synthesis* memanfaatkan bahan alami, seperti ekstrak tumbuhan, sebagai agen pereduksi dan penstabil nanopartikel sehingga mampu mengurangi penggunaan bahan toksik serta mendukung konsep kimia hijau (Rizki *et al.*, 2021). Ekstrak tumbuhan diketahui mengandung berbagai metabolit sekunder seperti flavonoid, fenolik, alkaloid, dan tanin yang dapat berperan sebagai bioreduktor dalam proses pembentukan nanopartikel logam (Amin *et al.*, 2022). Selain lebih ramah lingkungan, metode ini juga relatif sederhana, hemat biaya, dan berpotensi menghasilkan nanopartikel yang lebih stabil untuk aplikasi biomedis (Ettadili *et al.*, 2022).

Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan sintesis nanopartikel tembaga menggunakan berbagai ekstrak tumbuhan, seperti daun srikaya (*Annona squamosa*), buah naga (*Hylocereus polyrhizus*), bunga telang (*Clitoria ternatea*), dan biji alpukat (*Persea americana*) sebagai bioreduktor alami (Haruna *et al.*, 2022; Ibrahim *et al.*, 2023; Maulana *et al.*, 2022; Prabhu *et al.*, 2022). Namun, penggunaan ekstrak daun pecut kuda (*Stachytarpheta jamaicensis*) sebagai bioreduktor dalam sintesis nanopartikel tembaga masih belum banyak dilaporkan. Tanaman pecut kuda diketahui mengandung senyawa flavonoid dan fenolik yang memiliki aktivitas antioksidan tinggi sehingga mampu mendonorkan elektron untuk mereduksi ion Cu^{2+} menjadi nanopartikel tembaga sekaligus berfungsi sebagai agen penstabil (Utomo *et al.*, 2020). Senyawa fenolik dengan gugus hidroksil aktif diketahui berperan penting dalam proses reduksi ion logam dan pembentukan nanopartikel yang stabil (Din *et al.*, 2017). Oleh karena itu, ekstrak daun pecut kuda berpotensi digunakan sebagai bioreduktor alami dalam sintesis nanopartikel tembaga melalui metode *green synthesis*.

Meningkatnya kasus resistensi antibiotik menjadi salah satu permasalahan kesehatan global yang serius. Penggunaan antibiotik yang tidak rasional menyebabkan bakteri mampu mengembangkan berbagai mekanisme resistensi, seperti produksi enzim perusak antibiotik, perubahan target kerja antibiotik, penurunan permeabilitas membran, serta pembentukan biofilm (Ventola, 2015). Salah satu bakteri patogen yang banyak dikaitkan dengan resistensi antibiotik adalah *Pseudomonas aeruginosa*. Bakteri Gram negatif ini diketahui dapat menyebabkan berbagai infeksi, seperti infeksi luka, saluran pernapasan, saluran kemih, hingga infeksi nosokomial yang sulit diobati karena memiliki resistensi intrinsik maupun adaptif terhadap berbagai antibiotik (Herdin *et al.*, 2024). Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) juga menetapkan *Pseudomonas aeruginosa* sebagai salah satu bakteri prioritas kritis yang memerlukan pengembangan agen antibakteri baru karena tingginya angka resistensi dan mortalitas yang ditimbulkan (Wulansari *et al.*, 2019). Aktivitas antibakteri nanopartikel tembaga dipengaruhi oleh karakteristik fisiknya, seperti ukuran partikel, distribusi ukuran, dan gugus fungsi. Oleh karena itu, karakterisasi nanopartikel menggunakan instrumen seperti UV-Vis, FTIR, dan PSA sangat diperlukan untuk memastikan keberhasilan sintesis dan mengetahui sifat nanopartikel yang dihasilkan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi nanopartikel tembaga menggunakan ekstrak daun pecut kuda (*Stachytarpheta jamaicensis*) sebagai bioreduktor melalui metode *green synthesis*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi aktivitas antibakteri nanopartikel tembaga terhadap bakteri *Pseudomonas aeruginosa* sehingga diharapkan dapat menjadi alternatif agen antibakteri yang ramah lingkungan.

Metode

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah seperangkat alat maserasi, instrument PSA (Malven), Spektrofotometer FT-IR (Perkin Elmer), Spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu 1800), *hot plate* (BASCO), timbangan analitik (Adventurer Ohaus), *magnetic stirrer* (Heidolph MR Hei-Standard), *freeze dryer* (CHRIST Alpha 1-2 LDplus), corong kaca, cawan petri, jangka sorong, gelas kimia, pipet volume, tabung reaksi, spatula, kertas saring.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu serbuk daun pecut kuda, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,01 M, NaOH 0,1M, akuabides, *ciprofloxacin*, NaCl, kertas Whatmant No.42, Mueller Hinton Agar (MHA), suspensi bakteri *Pseudomonas aeruginosa*.

Ekstraksi Daun Pecut Kuda

Serbuk daun pecut kuda diekstraksi menggunakan metode infusa untuk memperoleh ekstrak daun pecut kuda, dengan aquabides digunakan sebagai pelarut. Ekstraksi tersebut dilakukan dengan cara mengambil 10 gram serbuk daun pecut kuda, kemudian dilakukan metode infusa menggunakan 100 mL aquabides. Larutan tersebut ditutup menggunakan aluminium foil untuk menghindari efek cahaya, kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 90 menit dengan suhu 50°C dengan kecepatan 1000 rpm. Setelah proses tersebut, larutan dibiarkan dingin pada suhu kamar selama 1 jam. Selanjutnya, larutan disaring menggunakan kertas saring Whatman No.42 untuk memisahkan filtrat dan residu. Filtrat hasil penyaringan kemudian disimpan pada suhu 4°C untuk digunakan pada uji lanjutan sebagai larutan induk bioreduktor (Murthy *et al.*, 2020).

Pembuatan Larutan Prekursor CuSO_4

Sebanyak 2,495 gram $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ditimbang menggunakan neraca analitik, kemudian dilarutkan dengan aquadest hingga seluruh kristal larut sempurna. Larutan dipindahkan ke dalam labu ukur, lalu ditambahkan akuades hingga tanda batas dan dihomogenkan dengan membalik labu beberapa kali. Selanjutnya, larutan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga terbentuk larutan homogen berwarna biru bening, kemudian disimpan dalam botol kaca (Rengga *et al.*, 2017).

Sintesis Nanopartikel Tembaga

Larutan ekstrak daun pecut kuda dicampurkan dengan larutan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,1 M pada rasio 1:1, 1:2, 1:3, dan 1:4 dengan total volume 60 mL. Campuran kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 60°C dengan kecepatan 1500 rpm selama 90 menit, lalu didiamkan selama 24 jam hingga sehingga terjadi perubahan warna menjadi hitam kecoklatan. Hasil sintesis selanjutnya dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 200–800 nm (Rengga *et al.*, 2017). Hasil sintesis dengan perbandingan optimum kemudian dioptimasi pada pH 7–12 menggunakan larutan NaOH 0,1 M sambil diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 90 menit. Selanjutnya, panjang gelombang maksimum diukur kembali menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk menentukan pH optimum. Hasil sintesis optimum kemudian disentrifugasi pada kecepatan 5000 rpm selama 30 menit. Endapan CuNps hasil sintesis dipisahkan dengan cara dekantasi, lalu dikeringkan dengan cara *freeze dryer* (Rengga *et al.*, 2017).

Uji Aktivitas Antibakteri

Pengujian aktivitas antibakteri dilakukan dengan metode difusi sumuran menggunakan media Mueller Hinton Agar (MHA) yang telah diinokulasi suspensi bakteri *P. aeruginosa*. Pada sumuran ditambahkan 30 μL koloid nanopartikel tembaga, ekstrak daun pecut kuda, kontrol positif (*Ciprofloxacin*), dan kontrol negatif (akuades), kemudian diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37°C . Aktivitas antibakteri ditentukan berdasarkan diameter zona hambat yang terbentuk di sekitar sumuran menggunakan jangka sorong. Kategori daya hambat antibakteri diklasifikasikan menjadi lemah (≤ 5 mm), sedang (6–10 mm), kuat (11–20 mm), dan sangat kuat (≥ 21 mm) (Muiz *et al.*, 2021).

Hasil dan Pembahasan

Sintesis Nanopartikel Tembaga dengan Metode *Green Synthesis*

1. Penentuan Perbandingan Optimum

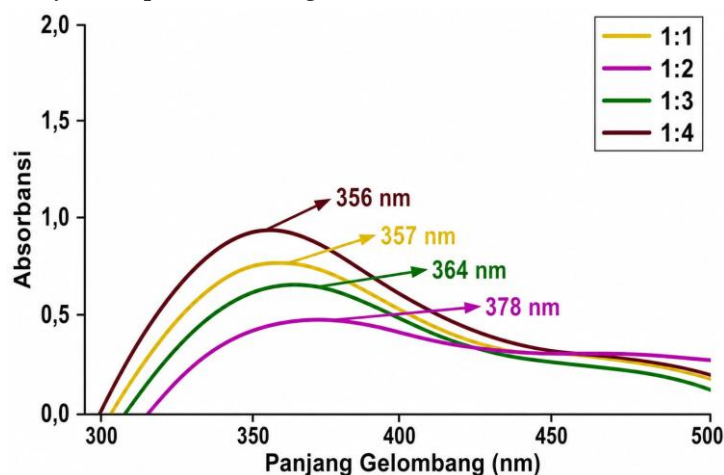
Pada proses sintesis nanopartikel tembaga menggunakan bioreduktor ekstrak daun pecut kuda (*S. jamaicensis*) dilakukan dengan menggunakan prekursor CuSO_4 . Tujuan penggunaan prekursor CuSO_4 karena

merupakan sumber ion Cu^{2+} yang murah, mudah didapat, memiliki kelarutan tinggi dalam air, dan stabil. CuSO_4 mempermudah metode sintesis cepat seperti biosintesis hijau untuk menghasilkan nanokristal dengan struktur yang diinginkan (Rangel *et al.*, 2020).



Gambar 1. Hasil sintesis nanopartikel tembaga

Berdasarkan Gambar 1. larutan hasil sintesis nanopartikel tembaga dan ekstrak daun pecut kuda (*S. jamaicensis*) berwarna hijau kecoklatan. Meskipun tidak terdapat perbedaan fisik yang signifikan pada variasi konsentrasi 1:1 hingga 1:4, pengamatan ini tetap diverifikasi melalui spektrofotometri UV-Vis untuk menentukan perbandingan optimum. Nanopartikel tembaga hasil sintesis dengan variasi volume bioreduktor dan prekursor dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang 200–800 nm untuk menentukan perbandingan volume optimum berdasarkan nilai absorbansi tertinggi serta memverifikasi terbentuknya nanopartikel tembaga.



Gambar 2. Karakterisasi nanopartikel tembaga hasil sintesis pada variasi perbandingan volume menggunakan Spektrofotometer UV-Vis

Berdasarkan Gambar 2. hasil spektrofotometer UV-Vis menunjukkan rentang panjang gelombang maksimum pada 356–378 nm. Hal ini sesuai dengan teori bahwa nanopartikel tembaga memiliki panjang gelombang maksimum UV-Vis pada 300 hingga 400 nm (Arodiya *et al.*, 2025). Hasil pengukuran panjang gelombang maksimum spektrofotometer UV-Vis pada perbandingan 1:1 sampai 1:4 ekstrak daun pecut kuda (*S. jamaicensis*) dengan prekursor disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengukuran spektrofotometer UV-Vis nanopartikel tembaga dengan variasi perbandingan volume prekursor dan bioreduktor ekstrak daun pecut kuda

Perbandingan	Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi
1:1	357	0,77
1:2	378	0,49
1:3	364	0,65
1:4	356	0,94

Berdasarkan data Tabel 1, variasi perbandingan 1:4 terjadi peningkatan absorbansi yang paling tinggi mencapai nilai 0,94 pada panjang gelombang 356 nm. Peningkatan nilai absorbansi ini menunjukkan konsentrasi nanopartikel tembaga yang terbentuk semakin banyak seiring dengan optimalnya jumlah bioreduktor yang tersedia untuk mereduksi ion tembaga (Cu^{2+} atau Cu^+) menjadi atom tembaga (Cu^0).

Pergeseran panjang gelombang yang teramati pada grafik berkaitan dengan perubahan ukuran dan distribusi partikel. Pada perbandingan 1:4, dihasilkan puncak dengan absorbansi tertinggi mengindikasikan pembentukan nanopartikel dengan konsentrasi yang tertinggi. Sebaliknya, pada perbandingan 1:2, dihasilkan nilai absorbansi terendah (0,49) dengan panjang gelombang yang lebih panjang (378 nm). Hal ini dapat diartikan bahwa pada rasio tersebut, reaksi reduksi belum berjalan secara maksimal karena terbatasnya agen pereduksi atau terjadinya aglomerasi yang menyebabkan ukuran partikel menjadi lebih besar, sehingga menurunkan efisiensi penyerapan cahaya UV (Saeb *et al.*, 2014).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Suryani *et al.*, (2021) variasi perbandingan 1:4 menunjukkan kondisi sintesis yang paling optimum karena menghasilkan nilai absorbansi tertinggi sekitar 0,94 pada panjang gelombang 356 nm. Tingginya nilai absorbansi menunjukkan bahwa jumlah nanopartikel tembaga yang terbentuk lebih banyak dan proses reduksi ion Cu^{2+} menjadi Cu^0 berlangsung lebih efektif dibandingkan variasi lainnya. Pada rasio 1:4, konsentrasi ekstrak daun pecut kuda sebagai bioreduktor dan *capping agent* berada pada kondisi yang sesuai sehingga senyawa metabolit sekunder mampu mereduksi ion tembaga secara optimal sekaligus menstabilkan nanopartikel yang terbentuk. Konsentrasi ekstrak yang lebih tinggi menyebabkan jumlah gugus aktif donor elektron meningkat sehingga reaksi reduksi berlangsung lebih cepat dan pembentukan inti nanopartikel menjadi lebih banyak. Selain itu, kestabilan nanopartikel juga meningkat karena senyawa bioaktif dari ekstrak melapisi permukaan partikel sehingga mencegah aglomerasi.

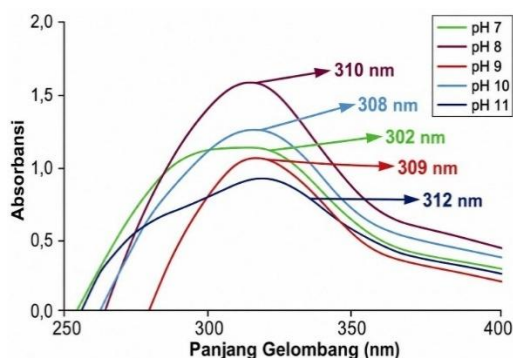
Hal ini menyebabkan puncak *Surface Plasmon Resonance* (SPR) menjadi lebih jelas dan intensitas absorbansi meningkat. Sebaliknya, pada rasio yang lebih rendah, jumlah bioreduktor belum cukup untuk mereduksi seluruh ion Cu^{2+} sehingga pembentukan nanopartikel kurang maksimal. Dengan demikian, rasio 1:4 menunjukkan bahwa reaksi sintesis telah berjalan lebih efektif dan menghasilkan nanopartikel tembaga yang lebih stabil. Hasil ini sejalan dengan penelitian Rengga *et al.*, (2017), sintesis nanopartikel tembaga menggunakan ekstrak bunga cengkeh (*Syzygium aromaticum*) pada rasio 1:4 yang melaporkan bahwa variasi rasio ekstrak memengaruhi intensitas absorbansi dan pembentukan nanopartikel, dimana peningkatan jumlah ekstrak dapat meningkatkan efektivitas reduksi ion logam.

2. Penentuan pH Optimum

Setelah melalui penentuan perbandingan optimum didapatkan perbandingan nanopartikel tembaga dengan perbandingan 1:4 kemudian dilakukan optimasi lebih lanjut melalui variasi nilai pH-nya menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Karakterisasi ini dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi pH yang optimum. Variasi pH dilakukan pada pH 7 sampai 11. Dalam hal ini, penentuan pH optimum didasarkan pada nilai absorbansi tertinggi dalam spektrum UV-Vis. Gambar 3. merupakan nanopartikel tembaga pada perbandingan 1:4 yang divariasi pH-nya pada pH 7-11.



Gambar 3. Nanopartikel tembaga pada variasi pH 7-11



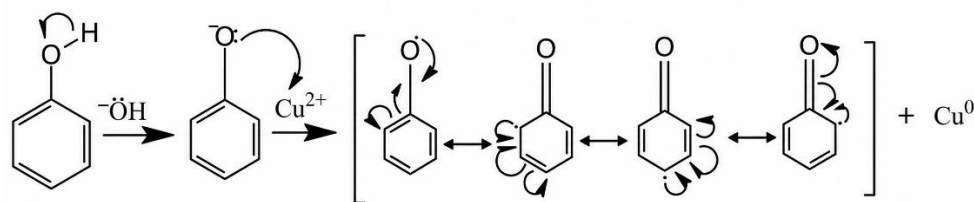
Gambar 4. Karakterisasi nanopartikel tembaga pada variasi pH menggunakan spektrofotometer UV-Vis

Berdasarkan Gambar 4. hasil pengukuran spektrofotometer UV-Vis menunjukkan rentang panjang gelombang maksimum pada 302-312 nm. Hal ini sesuai dengan teori bahwa nanopartikel tembaga memiliki panjang gelombang maksimal UV-Vis pada rentang panjang gelombang 300 hingga 400 nm (Arodiya *et al.*, 2025). Hasil pengukuran panjang gelombang maksimum spektrofotometer UV-Vis pada pH 7 sampai 11 disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran spektrofotometer UV-Vis nanopartikel tembaga dengan variasi pH

Perbandingan	Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi
7	302	1,12
8	310	1,58
9	309	1,05
10	308	1,27
11	312	0,94

Berdasarkan data Tabel 2, pH 8 menunjukkan profil spektrum yang paling optimum dengan nilai absorbansi tertinggi, yaitu 1,58 pada panjang gelombang 310 nm. Hal ini mengindikasikan bahwa pada pH 8, proses reduksi ion tembaga berjalan paling efisien dan menghasilkan nanopartikel dengan konsentrasi tinggi serta distribusi ukuran yang lebih homogen (monodispersi). Terdapat pergeseran panjang gelombang dengan peningkatan nilai pH. Pada pH 7, puncak berada di 302 nm, dan bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih panjang pada pH 8 (310 nm) dan pH 11 (312 nm). Pergeseran ini menunjukkan adanya perubahan lingkungan fisik atau kimia pada permukaan nanopartikel yang dipengaruhi oleh nilai pH larutan (Chatterjee *et al.*, 2020). Gambar 4.12 merupakan mekanisme reduksi Cu^{2+} oleh senyawa fenolik.



Gambar 5. Mekanisme reduksi Cu^{2+} oleh senyawa fenolik
(Sumber: Hong & Ryu, 2021)

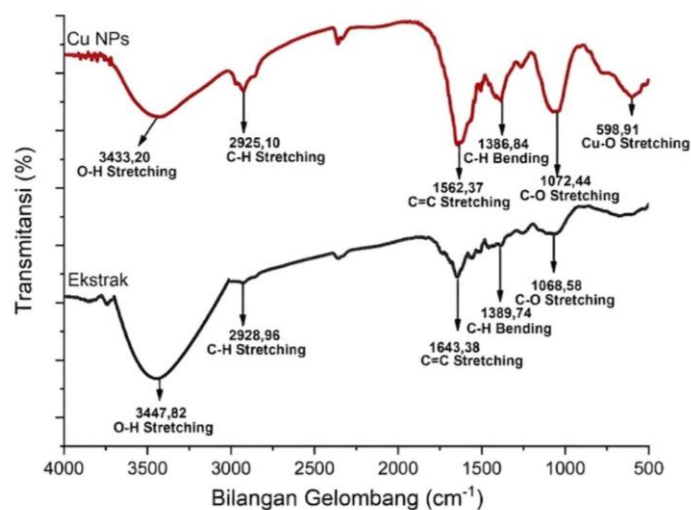
Fakta bahwa kondisi basa cenderung lebih menguntungkan dalam sintesis nanopartikel tembaga ini dapat dijelaskan oleh peran ion hidroksida. Pada kondisi basa, gugus fenolik akan berubah menjadi ion fenoksida yang kemampuan reduksinya lebih tinggi (Hong & Ryu, 2021). Peningkatan konsentrasi ion hidroksida pada pH basa dapat mempengaruhi stabilitas nanopartikel dengan meningkatkan muatan negatif pada permukaan partikel, yang mencegah agregasi (aglomerasi). Kondisi basa juga dapat meningkatkan kemampuan reduksi dari senyawa metabolit sekunder (seperti flavonoid) yang terdapat dalam ekstrak daun pecut kuda. Puncak yang tajam pada pH 8 menunjukkan distribusi partikel yang homogen, mengindikasikan bahwa pH basa tidak hanya memacu reduksi tetapi juga mendukung stabilisasi partikel yang baik (Yunita *et al.*, 2020). Kondisi ini berbeda dengan kondisi asam, absorpsi partikel logam yang bermuatan positif terhadap bahan organik yang bermuatan negatif dari *capping agent* meningkat sehingga menghasilkan tingkat agregasi yang tinggi (Rahayu, 2019).

Penurunan nilai absorbansi pada pH yang sangat basa (pH 9, 10, dan 11) menunjukkan bahwa meskipun reduksi terjadi, intensitas pembentukan nanopartikel menurun, disebabkan oleh kecepatan reaksi yang terlalu tinggi yang justru memicu aglomerasi awal, atau perubahan aktivitas *capping agent* pada pH tersebut. Pada pH lebih dari 8 menyebabkan Cu^{2+} bereaksi dan membentuk $\text{Cu}(\text{OH})_2$, yang kemudian dapat mengalami dehidrasi menjadi tembaga oksida. Dalam *green synthesis* menggunakan ekstrak tanaman, senyawa fitokimia seperti polifenol dan flavonoid bertindak sebagai reduktor. Dalam suasana basa (pH 8), gugus hidroksil (OH) pada senyawa polifenol mengalami deprotonasi, yang meningkatkan aktivitas reduksinya untuk mengubah Cu^{2+} menjadi Cu^0 (Rajesh *et al.*, 2016).

Karakterisasi Spektroskopi FTIR Nanopartikel Tembaga Hasil Sintesis pada Kondisi Optimum

Karakterisasi nanopartikel tembaga hasil sintesis perbandingan 1:4 dengan pH 8 yang telah di *freeze dry* menjadi bentuk padatan dilakukan dengan spektroskopi FTIR pada bilangan gelombang 400-4000 cm^{-1} .

Analisis FTIR pada sampel ini bertujuan untuk mengetahui keberadaan gugus-gugus fungsi, yang dapat diidentifikasi melalui puncak-puncak transmitansi yang muncul dalam spektrum FTIR. Gambar 6. merupakan karakterisasi spektrofotometri FTIR nanopartikel tembaga hasil sintesis pada kondisi optimum.



Gambar 6. Karakterisasi spektrofotometri FTIR nanopartikel tembaga hasil sintesis pada kondisi optimum

Berdasarkan hasil karakterisasi gugus fungsi diukur pergeseran gugus fungsi antara ekstrak daun pecut kuda dengan nanopartikel tembaga hasil *green synthesis*. Spektrum FTIR ekstrak daun pecut kuda dan nanopartikel tembaga dapat diketahui secara kualitatif yang menunjukkan adanya gugus-gugus fungsi yang dimiliki oleh keduanya yaitu O-H, C-H, C=C, C-O, dan Cu-O. Data serapan gugus fungsi ekstrak daun pecut kuda dan nanopartikel tembaga hasil spektrum FTIR disajikan dalam Tabel 3.

Data serapan gugus fungsi ekstrak daun pecut kuda dan nanopartikel tembaga hasil spektrum FTIR.

Tabel 3. Data serapan gugus fungsi ekstrak daun pecut kuda dan nanopartikel tembaga hasil spektrum FTIR

Gugus Fungsional	Ekstrak Daun Pecut Kuda		Nanopartikel Tembaga	
	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	%T	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	%T
O-H stretching	3447,82	48,3	3433,20	71,5
C-H stretching	2928,96	63,8	2925,10	79,2
C=C stretching	1643,38	58,1	1562,37	73,4
C-H bending	1389,74	66,5	1386,84	80,7
C-O stretching	1068,58	61,2	1072,44	76,8
Cu-O stretching	-	-	598,91	72,1

Berdasarkan hasil pengukuran FTIR, spektrum ekstrak daun pecut kuda menunjukkan beberapa puncak serapan utama. Puncak lebar pada bilangan gelombang 3447,82 cm⁻¹ mengindikasikan adanya vibrasi regangan gugus O-H yang berasal dari senyawa fenolik atau flavonoid. Puncak pada 2928,96 cm⁻¹ menunjukkan vibrasi regangan C-H alkil. Keberadaan vibrasi C=C aromatik muncul pada 1643,38 cm⁻¹. Serapan pada daerah 1389,74 cm⁻¹ dan 1068,58 cm⁻¹ masing-masing menunjukkan adanya gugus C-H tekuk dan C-O (Hidayat *et al.*, 2022).

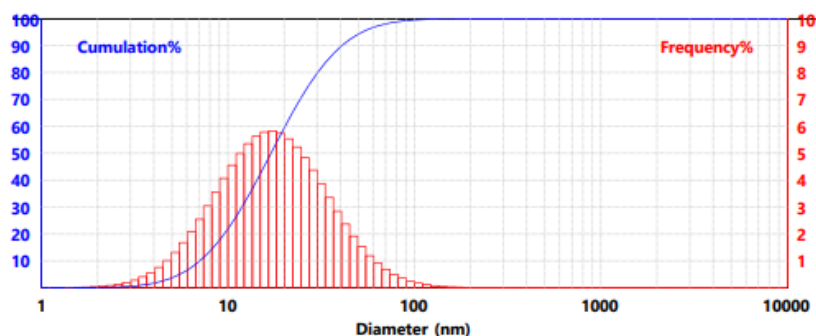
Setelah terbentuk nanopartikel tembaga terjadi pergeseran bilangan gelombang yang signifikan pada gugus O-H menjadi 3433,20 cm⁻¹ dengan kenaikan nilai %T yang drastis (dari 48,3% menjadi 71,5%). Penurunan intensitas ini menandakan bahwa gugus hidroksil dari senyawa metabolit sekunder berperan aktif sebagai bioreduktor dalam mereduksi ion tembaga (Cu²⁺) menjadi tembaga nol valensi (Cu⁰) (Sari & Prajaputra, 2023). Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Nasrollahzadeh *et al.* (2018) pada sintesis nanopartikel tembaga menggunakan ekstrak *Tilia* yang menunjukkan pita serapan gugus O-H pada sekitar 3419 cm⁻¹. Pergeseran pita O-H setelah terbentuknya nanopartikel tembaga menunjukkan

keterlibatan senyawa fenolik dan flavonoid sebagai agen pereduksi serta capping agent dalam proses pembentukan nanopartikel tembaga.

Puncak serapan pada bilangan gelombang $598,91\text{ cm}^{-1}$ pada hasil FTIR nanopartikel tembaga menunjukkan adanya vibrasi regangan ikatan Cu–O (Cu–O stretching) yang menjadi indikator terbentuknya nanopartikel tembaga. Munculnya pita pada daerah $400\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ merupakan karakteristik khas dari ikatan logam-oksigen pada nanopartikel tembaga. Hasil penelitian ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Adewuyi *et al.* (2023) pada biosintesis nanopartikel tembaga menggunakan ekstrak daun *Platanus occidentalis* yang melaporkan adanya pita Cu–O stretching pada 587 cm^{-1} sebagai bukti keberhasilan pembentukan nanopartikel tembaga oksida. Selain itu, penelitian lain oleh Ramesh *et al.*, (2019) mengenai karakterisasi nanopartikel tembaga melaporkan pita Cu–O stretching muncul pada 513 cm^{-1} dan 622 cm^{-1} yang menandakan vibrasi khas ikatan Cu–O pada struktur CuO nanopartikel. Nilai tersebut masih berada dalam rentang yang sama dengan hasil penelitian ini yaitu $598,91\text{ cm}^{-1}$ sehingga semakin memperkuat bahwa nanopartikel tembaga telah berhasil terbentuk melalui proses *green synthesis* menggunakan ekstrak daun pecut kuda.

Karakterisasi PSA Nanopartikel Tembaga Hasil Sintesis pada Kondisi Optimum

Karakterisasi nanopartikel tembaga hasil sintesis pada kondisi optimum yang telah di *freez dry* menjadi bentuk padatan dilakukan dengan *Particle Size Analyzer* (PSA). Gambar 7. merupakan karakterisasi PSA nanopartikel tembaga hasil sintesis pada kondisi optimum.



Gambar 7. Karakterisasi PSA nanopartikel tembaga hasil sintesis pada kondisi optimum

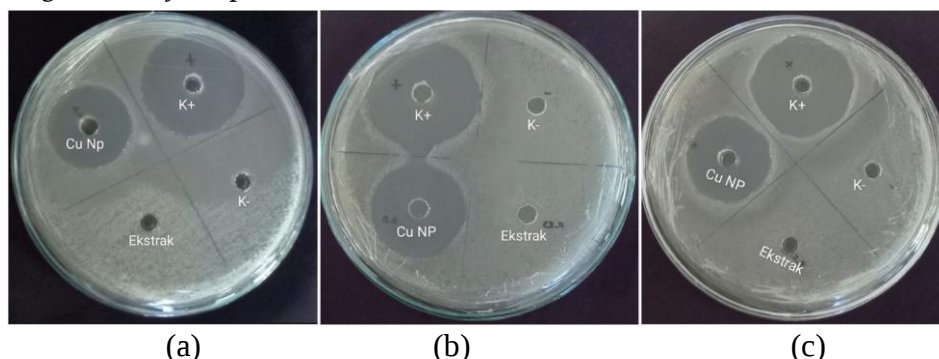
Berdasarkan hasil analisis PSA (*Particle Size Analyzer*), nanopartikel tembaga yang disintesis menggunakan ekstrak daun pecut kuda memiliki rata-rata ukuran partikel sebesar $17,03\text{ nm}$. Ukuran tersebut masih termasuk dalam rentang ukuran nanopartikel, yaitu sekitar $1\text{--}100\text{ nm}$. Hasil pengujian juga menunjukkan nilai *Polydispersity Index* (PI) sebesar $0,5990$. Nilai PI digunakan untuk menggambarkan tingkat penyebaran ukuran partikel dalam suatu sistem koloid nanopartikel. Semakin kecil nilai PI, maka distribusi ukuran partikel semakin seragam dan homogen. Nilai PI di bawah $0,5$ menandakan distribusi partikel yang sempit, sedangkan nilai di atas $0,5$ menunjukkan distribusi ukuran partikel yang lebih luas atau heterogen (Amin & Tengker, 2023).

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Mahmudah (2022) yang melaporkan bahwa nanopartikel tembaga hasil sintesis menggunakan reduktor asam L-askorbat memiliki ukuran partikel rata-rata sebesar $22,48 \pm 0,63\text{ nm}$, sehingga menunjukkan bahwa sintesis nanopartikel tembaga dapat menghasilkan ukuran partikel pada rentang nano ($<100\text{ nm}$) (Mahmudah, 2022). Penelitian lain oleh Aryani & Aprilia (2022) juga menyebutkan bahwa nanopartikel tembaga hasil sintesis hijau menggunakan ekstrak tumbuhan umumnya memiliki ukuran partikel berkisar antara $10\text{--}158\text{ nm}$ tergantung jenis bioreduktor dan kondisi sintesis yang digunakan. Oleh karena itu, ukuran nanopartikel sebesar $17,03\text{ nm}$ pada penelitian ini menunjukkan bahwa proses sintesis telah berhasil menghasilkan nanopartikel tembaga dalam skala nano.

Uji Aktivitas Antibakteri

Langkah terakhir adalah dilakukan uji aktivitas antibakteri pada ekstrak daun pecut kuda dan nanopartikel tembaga hasil sintesis pada kondisi optimum antara prekursor CuSO_4 dan bioreduktor ekstrak daun pecut kuda dengan pH optimum terhadap bakteri gram negatif *Pseudomonas aeruginosa*. Pengujian ini dilakukan menggunakan metode difusi sumuran. Difusi sumuran teknik uji aktivitas antimikroba dengan membuat lubang (sumur) pada agar padat yang telah diinokulasi bakteri, kemudian diisi sampel uji yaitu

ekstrak daun pecut kuda, nanopartikel tembaga hasil sintesis, kontrol positif larutan *Ciprofloxacin*, dan control negatif akuades steril. Media MHA yang telah dilubangi bulat ada akan diisi sampel uji diatas dan telah ditumbuhi oleh bakteri gram negatif *Pseudomonas aeruginosa*. Hasil uji aktivitas antibakteri terhadap bakteri *P. aeruginosa* disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Uji aktivitas antibakteri terhadap bakteri *Pseudomonas aeruginosa* (a) Replikasi pertama; (b) Replikasi kedua; (c) Replikasi ketiga

Berdasarkan hasil uji aktivitas antibakteri ekstrak daun pecut kuda terhadap bakteri *P. aeruginosa* dengan metode difusi sumuran didapatkan hasil pengukuran zona hambat nanopartikel tembaga yang diukur dengan jangka sorong pada replikasi pertama, kedua, dan ketiga berturut-turut sebesar 21,55 mm; 22,87 mm; dan 21,47 mm. Sehingga didapatkan rata-rata diameter zona hambat sebesar 21,96 mm yang memiliki kategori sangat kuat dalam menghambat aktivitas antibakteri. Untuk hasil pengukuran zona hambat ekstrak pada penelitian ini ekstrak daun pecut kuda tidak menghasilkan zona hambat bening, hal ini dikarenakan konsentrasi yang digunakan, senyawa metabolit sekunder dalam ekstrak kasar belum mampu menghentikan pertumbuhan bakteri *P. aeruginosa*. Selain itu, molekul organik dalam ekstrak kasar memiliki laju difusi yang lebih lambat pada media agar dibandingkan nanopartikel tembaga yang memiliki ukuran jauh lebih kecil dan luas permukaan kontak yang lebih besar. Fenomena ini membuktikan bahwa pembentukan nanopartikel tembaga berhasil meningkatkan efektivitas antibakteri secara signifikan dibandingkan dengan hanya menggunakan ekstrak tumbuhan. Hasil pengukuran zona hambat bakteri *P. aeruginosa* disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengukuran zona hambat bakteri *Pseudomonas aeruginosa*

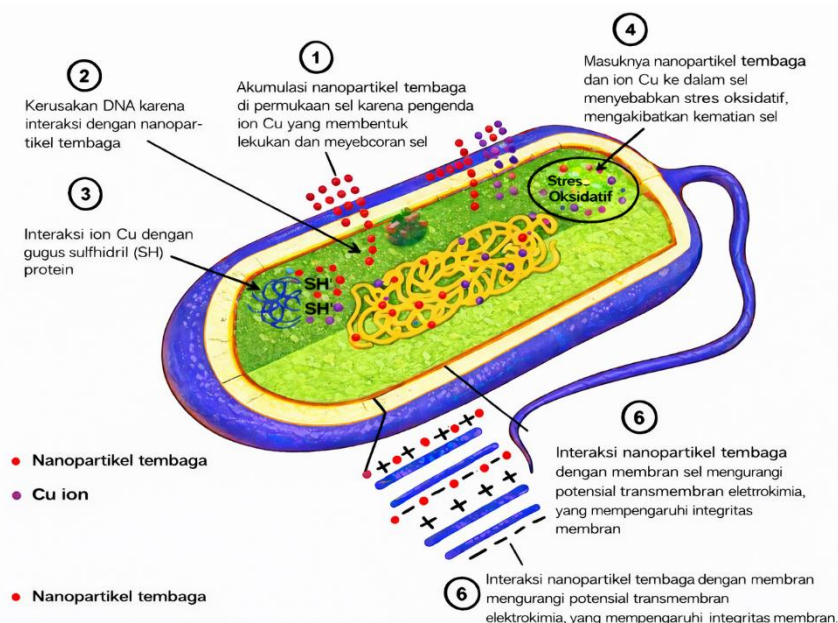
Perlakuan	Diameter Zona Hambat (mm)			Rata-rata Diameter (mm)	Kategori
	1	2	3		
Ekstrak daun pecut kuda	-	-	-	-	-
Nanopartikel tembaga	21,55	22,87	21,47	21,96	Sangat kuat
Kontrol positif (<i>Ciprofloxacin</i>)	29,86	30,97	30,13	30,32	Sangat kuat
Kontrol negatif (akuabides)	-	-	-	-	-

Berdasarkan data pada Tabel 4, aktivitas antibakteri nanopartikel tembaga lebih besar dibandingkan ekstrak daun pecut kuda terhadap bakteri *P. aeruginosa*. Rata-rata diameter zona hambat nanopartikel tembaga pada bakteri *P. aeruginosa* tergolong sangat kuat pada ketiga replikasi. Kontrol negatif yang menggunakan akuabides menunjukkan tidak terbetuknya zona hambat bening, hal ini membuktikan bahwa bahan yang digunakan sebagai kontrol negatif tidak memiliki aktivitas antibakteri terhadap bakteri *P. aeruginosa*. Kontrol positif menghasilkan diameter yang serupa, yang menunjukkan bahwa metode pengujian yang digunakan adalah konsisten. Luas zona hambat nanopartikel tembaga terhadap bakteri *P. aeruginosa* memiliki zona hambat lebih rendah dibandingkan dengan kontrol positif, namun lebih besar daripada zona hambat ekstrak daun pecut kuda.

Hasil pengujian aktivitas antibakteri menunjukkan bahwa nanopartikel tembaga hasil biosintesis ekstrak daun pecut kuda memiliki kemampuan penghambatan yang signifikan terhadap pertumbuhan *P. aeruginosa* (Gram-negatif). Hal ini disebabkan oleh perbedaan struktur dinding sel kedua bakteri tersebut. *P. aeruginosa* memiliki lapisan peptidoglikan yang tipis, sehingga memudahkan nanopartikel tembaga untuk menembus dinding sel dan berinteraksi langsung dengan sitoplasma.

Mekanisme utama kematian bakteri dipicu oleh pelepasan ion tembaga (Cu^{2+}) dan pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS). Nanopartikel tembaga yang menempel pada permukaan sel bakteri akan melepaskan ion logam yang mengganggu stabilitas membran, menyebabkan kebocoran isi intraseluler.

Selain itu, akumulasi ROS seperti radikal hidroksil dan hidrogen peroksida mengakibatkan stres oksidatif yang hebat. Kondisi ini merusak komponen vital bakteri, termasuk denaturasi protein enzim dan fragmentasi DNA, yang pada akhirnya memicu lisis sel. Peran ekstrak daun pecut kuda dalam proses ini sangat krusial, karena senyawa metabolit sekunder seperti flavonoid dan tanin yang terkandung di dalamnya tidak hanya bertindak sebagai agen pereduksi (bioreduktor) dalam pembentukan nanopartikel, tetapi juga memberikan efek sinergis sebagai antibakteri alami sesuai dengan Gambar 9.



Gambar 9. Mekanisme antibakteri nanopartikel tembaga
(Sumber: Din *et al.*, 2017)

Nanopartikel tembaga dan ion tembaga (Cu^{2+}) memiliki aktivitas antibakteri melalui beberapa mekanisme yang saling berkaitan. Mekanisme tersebut diawali dengan interaksi elektrostatis antara ion Cu^{2+} dan permukaan sel bakteri yang bermuatan negatif, sehingga menyebabkan akumulasi nanopartikel pada membran sel. Interaksi ini mengakibatkan kerusakan membran, terbentuknya pori, serta peningkatan permeabilitas membran yang memicu kebocoran komponen intraseluler. Selain itu, ion Cu^{2+} yang masuk ke dalam sel dapat berinteraksi dengan DNA bakteri sehingga menghambat proses replikasi dan transkripsi. Ion Cu^{2+} juga mampu berikatan dengan gugus sulfhidril (-SH) pada protein dan enzim, yang menyebabkan denaturasi protein dan terganggunya aktivitas metabolisme sel bakteri. Di sisi lain, nanopartikel tembaga dapat memicu pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang menyebabkan stres oksidatif dan kerusakan lipid, protein, serta asam nukleat sel bakteri. Kombinasi kerusakan membran, gangguan metabolisme, dan stres oksidatif tersebut menyebabkan kematian sel bakteri secara irreversibel sehingga Cu-NPs berpotensi sebagai agen antibakteri yang efektif (Din *et al.*, 2017).

Aktivitas antibakteri nanopartikel tembaga dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti ukuran partikel, morfologi, muatan permukaan, tingkat oksidasi, serta kondisi lingkungan seperti pH, suhu, dan aerasi. Kondisi sintesis yang optimal dapat menghasilkan nanopartikel berukuran lebih kecil dan lebih stabil sehingga meningkatkan luas permukaan aktif, pelepasan ion Cu^{2+} , dan pembentukan ROS. Hal tersebut berdampak pada meningkatnya efektivitas antibakteri nanopartikel tembaga. Selain itu, perbedaan kondisi sintesis juga dapat memengaruhi karakteristik nanopartikel, seperti distribusi ukuran partikel, gugus fungsional, panjang gelombang maksimum, dan kristalinitas yang berhubungan langsung dengan aktivitas antibakterinya (Makvandi *et al.*, 2020; Rahmawati, 2020).

Penggunaan metode *green synthesis* dengan memanfaatkan ekstrak tumbuhan sebagai bioreduktor menjadi alternatif yang lebih aman dibandingkan metode konvensional, seperti hidrotermal atau sol-gel. Metode konvensional umumnya memerlukan bahan kimia tambahan sebagai penstabil atau surfaktan yang berpotensi toksik bagi tubuh manusia. Sementara itu, metode *green synthesis* dinilai lebih ramah lingkungan karena senyawa metabolit sekunder pada ekstrak tumbuhan dapat berperan sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil nanopartikel. Oleh karena itu, penggunaan ekstrak daun pecut kuda dalam sintesis nanopartikel tembaga diharapkan mampu menghasilkan nanopartikel tembaga yang lebih stabil dan berpotensi sebagai antibakteri terhadap *Staphylococcus aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa*. Namun, penelitian lebih lanjut

mengenai dosis, stabilitas, dan keamanan nanopartikel tembaga masih diperlukan untuk memastikan efektivitasnya sebelum diaplikasikan sebagai kandidat obat infeksi pada manusia.

Simpulan

Nanopartikel tembaga telah berhasil disintesis menggunakan bioreduktor ekstrak daun pecut kuda. Nanopartikel tembaga hasil sintesis memiliki ukuran partikel mencapai 17,03 nm serta menunjukkan panjang gelombang serapan maksimum UV-Vis pada 310 nm. Selain itu, keberadaan gugus fungsi Cu-O yang diidentifikasi dengan FTIR didapatkan hasil pada bilangan gelombang 598,91 cm^{-1} . Nanopartikel tembaga hasil sintesis terbukti memiliki aktivitas antibakteri terhadap bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dengan kategori sangat kuat dengan zona hambat sebesar 21,96 mm.

Daftar Referensi

- Adewuyi, A., Pereira, F. V., & Sousa, A. M. 2023. Efficient Adsorptive Removal of Paracetamol and Thiazolyl Blue from Polluted Water onto Biosynthesized Copper oxide Nanoparticles. *Scientific Reports*, 13, 1482.
- Amin, A., & Tengker, S. (2023). Sintesis dan Karakterisasi Nano ZnO Menggunakan Bioreduktor Ekstrak Daun Kopasanda (*Chromolaena Odorata* L.). *Fullerene Journal of Chemistry*, 7(1), 47–51. <https://doi.org/10.37033/FJC.V7I1.511>
- Arodiya, F., Malik, N., Makvana, C., & Parmar, K. (2025). Green Synthesis of Copper Nanoparticles with Adhatoda Vasica: Antibacterial and Antioxidant Study. *Journal of Chemistry and Environment*, 4(2), 1–10. <https://doi.org/10.56946/JCE.V4I2.660>
- Aryani, A. D., & Wisnuwardhani, H.A., (2022). Studi Literatur Sintesis Nanopartikel Tembaga Menggunakan Bioreduktor Ekstrak Tumbuhan dengan Aktivitas Antioksidan. *Jurnal Riset Farmasi*, 2(1), 39-45.
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2019). The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical–Physical Applications to Nanomedicine. *Molecules*, 25(1), 112, 1–18.
- Chatterjee, S., Mahanty, S., Das, P., Chaudhuri, P., & Das, S. (2020). Green synthesis of copper nanoparticles using plant extract and its application in agriculture. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(2), 1125-1140.
- Dejene, A., Bogale, R. F., Yadeta, L., Gendo, K. M., Kenasa, G., & Berhanu, A. L. (2024). Biogenic Synthesis of Copper Oxide Nanoparticles Using *Clausena anisata* Leaf and *Euphorbia abyssinica* Bark Extracts and Its Comparative Study of Antibacterial Activities. *Results in Chemistry*, 8, 101569, 1–12.
- Din, M. I., Arshad, F., Hussain, Z., & Mukhtar, M. (2017). Green Adeptness in the Synthesis and Stabilization of Copper Nanoparticles: Catalytic, Antibacterial, Cytotoxicity, and Antioxidant Activities. *Nanoscale Research Letters*, 12(1), 638, 1–16. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2399-8>
- Haruna, C. A., Malik, W. A., Rijal, M. Y. S. Watrni, A. H. & Ramadhan, L. O. A. N. (2022). Green Synthesis of Coppe Nanoparticles Using Red Dragon Fruit (*Hylocenen polyrhizus*) Extract and Its Antibacterial Activity for Liquid Disinfectant. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 25(10), 352-361.
- Hidayat, R., Syaiful, S., & Zakir, M. (2022). Karakterisasi gugus fungsi dan morfologi nanopartikel logam hasil sintesis hijau menggunakan spektroskopi FTIR dan SEM. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 25(3), 88-95.
- Hong, H.-J., & Ryu, J. (2021). Synthesis of Copper Nanoparticles from Cu^{2+} -Spiked Wastewater via Adsorptive Separation and Subsequent Chemical Reduction. *Nanomaterials*, 11(8), 2051. <https://doi.org/10.3390/nano11082051>
- Ibrahim, F. M., Najeeb, D. A., & ThamerSadeq, H. (2023), Green Preparation of Cu Nanoparticles of the Avocado Seed Extract as an Adsorbent Surface. *Materials Science for Energy Technologies*, 6(1), 130-136
- Mahmudah, A. (2022). Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Tembaga Menggunakan Reduktur Asam L-Askorbat. *Skripsi*. Universitas Gadjah Mada.

- Makvandi, P., Gu, J. T., Zare, E. N., Ashtari, B., Moeini, A., Tay, F. R., & Niu, L.Na. (2020). Polymeric and Inorganic Nanoscopic Antimicrobial Fillers in Dentistry. *Acta Biomaterialia*, 101(14), 69-101.
- Maulana, I., Fasya, D., Ginting, B., & Efendi, R. (2022). Be Of Copper Nanoparticles Using Methanol Extract Of Supe Apple Leaves (*Annonaceae Squamosa*), And Its Anteonidan Activity. *Journal of Physics: Conference series*, 2193(1), 1-8.
- Muiz, H. A., Wulandari, S., & Primadiamanti, A. (2021). Uji Aktivitas Antibakteri Ekstrak Daun Patikan Kebo (*Euphorbia Hirta* L) Terhadap *Staphylococcus Aureus* dengan Metode Difusi Cakram. *Jurnal Analisis Farmasi*, 6(2), 84-89
- Murthy, H. C. A., Desalegn, T., Kassa, M., Abebe, B., & Assefa, T. (2020). Synthesis of Green Copper Nanoparticles Using Medicinal Plant *Hagenia abyssinica* (Brace) JF. Gmel. Leaf Extract: Antimicrobial Properties. *Journal of Nanomaterials*, 2020(1), 1-12.
- Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Maham, M., & Sajadi, S. M. 2018. Green Synthesis of Copper Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Tilia* Leaves and Their Catalytic Activity. *Journal of Colloid and Interface Science*, 527, 1–10.
- Rahayu, S. (2019). Pengaruh pH dan Konsentrasi Prekursor pada Sintesis Nanopartikel Logam secara *Green Synthesis*. *Skripsi*, Universitas Negeri Semarang.
- Rahmawati, D. (2020). Sintesis dan karakterisasi nanopartikel tembaga oksida (CuO) serta uji aktivitas antibakteri terhadap bakteri patogen. *Skripsi*. Universitas Gadjah Mada.
- Ramesh, P., Anandhan, S., & Maruthamuthu, S. 2019. Influence of Shock Waves on Structural and Morphological Properties of Copper oxide Nanoparticles. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 9(4), 305–315.
- Rangel, L.I., Spanner, R.E., Ebert, M.K., Pethybridge, S.J., Stukenbrock, E.H., de Jonge, R., Secor, G.A., & Bolton, M.D. (2020). *Cercospora beticola*: The intoxicating lifestyle of the leaf spot pathogen of sugar beet. *Molecular Plant Pathology*, 21(8), 1020–1041. <https://doi.org/10.1111/mpp.12962>
- Rengga, W. D. P., Hapsari, W. P., Ardianto, D. W. (2017). Sintesis Nanopartikel Tembaga dari Larutan Cu(NO₃) Menggunakan Ekstrak Cengkeh (*Syzygium aromaticum*), *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 12, 1,15-21
- Rizki, M. A., Sari, D. P., & Prasetyo, E. (2021). *Green synthesis* nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak tumbuhan sebagai agen reduksi ramah lingkungan. *Inovasi Fisika Indonesia*, 10(2), 85–92.
- Saeb, A. T. M., Alshammari, A. S., Al-Brahim, H., & Al-Rubeaan, K. A. (2014). Production of Silver Nanoparticles with Strong Bactericidal Activity using *Piper longum* Leaf Extract. *Nano Biomedicine and Engineering*. 6(3), 197-204.
- Sari, N. M., & Prajaputra, V. (2023). Karakterisasi Gugus Fungsi Nanopartikel Logam Menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR): Review. *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, 7(1), 22-30.
- Suryani, A. , Budiyanto, R., & Satriawan, N. E., (2021). Identifikasi Dan Uji Resistensi *Staphylococcus Aureus* Terhadap Antibiotik (*Chloramphenicol* dan *Cefotaxime Sodium*) Dari Pusat Infeksi Piogenik Di Puskesmas Proppo. *Jurnal Kimia Riset*, 6(2), 154-162.
- Utomo, D. S., Kristiani, E. B. E., & Mahardika, A. (2020). Pengaruh Lokasi Tumbuh terhadap Kadar Flavonoid, Fenolik, Klorofil, Karotenoid dan Aktivitas Antioksidan pada Tumbuhan Pecut Kuda (*Stachytarpheta jamaicensis*). *Bioma*, 22(2), 143–149.
- Ventola, C. L. (2015). The antibiotic resistance crisis: Part 1: Causes and threats. *Pharmacy and Therapeutics*, 40(4), 277–283.
- World Health Organization. (2017). Diarrhoeal disease. Website: <https://www.who.int/en/news-room/factsheets/detail/diarrhoeal-disease> Diakses pada 4 November 2025.
- Wulansari, A., Aqlinia, A., Wijanarka, A., & Raharja, S. J. (2019). Isolasi Bakteri Endofit dari Tanaman Bangle (*Zingiber cassumunar* Roxb.) dan Uji Aktivitas Antibakterinya terhadap Bakteri Penyebab Penyakit Kulit *Staphylococcus epidermidis* dan *Pseudomonas aeruginosa*. *Berkala Bioteknologi*, 2(2), 25–30

- Yunita, A., Ramadhan, M., & Sari, D. K. (2020). Stabilitas dispersi nanopartikel logam dalam media air pada berbagai variasi pH. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 10(2), 70-77.
- Yusof, H. M., Mohamad, R., Zaidan, U. H., & Rahman, N. A. A. (2019). Microbial Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Potential Application as an Antimicrobial Agent and a Feed Supplement in Animal Industry: A review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 10(1), 1-22