

Pengaruh Variasi Rasio Prekursor terhadap Kristalinitas Nanopartikel ZnO Hasil Sintesis Hijau Berbasis Ekstrak *Parthenium hysterophorus* L.

**Nahzim Rahmat^{*1}, Prisca Caesa Moneteringtyas¹, Pina Budiarti Pratiwi¹,
Trisno Afandi²**

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan

²Program Studi Teknik Kimia, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Medan
Jl. Almamater No.1 Kampus USU, Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

Telp. +62 87780598252, Fax. (061) 8215845

*Email: nahzimrahmat@polmed.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mensintesis nanopartikel ZnO melalui metode green synthesis menggunakan ekstrak daun Parthenium hysterophorus L. dengan dua variasi rasio bahan. Proses dilakukan pada suhu 65–85 °C dan dikalsinasi pada 600 °C selama 2 jam. Hasil FTIR menunjukkan pita kuat pada 840 cm⁻¹ (vibrasi Zn–O) dan beberapa pita gugus organik (C–O, C=O, C=C) yang berperan sebagai agen penstabil. Pola XRD menegaskan fase wurtzite ZnO tanpa pengotor, dengan ukuran kristalit berdasarkan persamaan Scherrer sebesar 0,87 nm (Sampel A) dan 0,94 nm (Sampel B). Puncak yang lebih tajam pada Sampel B menunjukkan kristalinitas lebih tinggi. Hasil ini membuktikan efektivitas ekstrak P. hysterophorus L. sebagai bioreduktor alami dalam sintesis ramah lingkungan ZnO nanopartikel.

Kata Kunci: ZnO, kristalinitas, prekursor.

PENDAHULUAN

Nanoteknologi telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir dan memberikan kontribusi signifikan terhadap kemajuan di bidang katalisis, biomedis, energi, serta lingkungan. Salah satu material semikonduktor yang banyak diteliti dalam bidang ini adalah *zinc oxide* (ZnO), karena memiliki bandgap lebar (sekitar 3,3 eV), energi eksiton tinggi (60 meV), serta stabilitas kimia dan termal yang baik. Nanopartikel ZnO menunjukkan berbagai aplikasi potensial seperti fotokatalis degradasi polutan organik, agen antimikroba, sensor gas, hingga bahan aktif sel surya berbasis dye [1].

Metode sintesis ZnO nanopartikel secara konvensional umumnya menggunakan bahan kimia pereduksi dan penstabil sintetis yang berpotensi toksik, seperti sodium borohidrat, hydrazine, atau surfaktan organik. Pendekatan tersebut tidak ramah lingkungan dan berisiko terhadap kesehatan serta lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan *green synthesis* yang memanfaatkan senyawa bioaktif dari ekstrak tumbuhan menjadi alternatif yang semakin

populer. Fitokimia seperti flavonoid, fenol, tanin, dan terpenoid dalam ekstrak tumbuhan berperan ganda sebagai agen pereduksi ion logam dan penstabil nanopartikel [2].

Salah satu tumbuhan yang berpotensi sebagai sumber bioreduktor alami adalah *Parthenium hysterophorus* L. (gulma *parthenium*), yang banyak ditemukan di wilayah tropis termasuk Indonesia. Tanaman ini diketahui mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti parthenin, alkaloid, flavonoid, dan senyawa fenolik yang mampu mereduksi ion logam menjadi bentuk nanopartikel [3]. Pemanfaatan gulma invasif ini sebagai agen bioreduktor tidak hanya mendukung prinsip ekonomi sirkular dan ramah lingkungan, tetapi juga memberikan nilai tambah bagi pengelolaan biomassa liar yang umumnya merugikan ekosistem pertanian.

Beberapa studi sebelumnya telah melaporkan keberhasilan sintesis ZnO nanopartikel menggunakan ekstrak daun berbagai spesies tanaman, namun pengaruh rasio antara prekursor Zn dan ekstrak tumbuhan terhadap karakteristik ZnO yang dihasilkan belum banyak dikaji secara sistematis. Rasio ini berperan penting dalam menentukan mekanisme nukleasi dan pertumbuhan partikel, serta memengaruhi ukuran kristalit, morfologi, luas permukaan, dan kristalinitas ZnO yang terbentuk setelah proses kalsinasi [4-6].

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi rasio Zn-asetat dan ekstrak daun *Parthenium hysterophorus* L. terhadap karakteristik ZnO nanopartikel yang disintesis melalui metode green synthesis. Dua sampel disiapkan dengan perbedaan rasio bahan, yaitu Sampel A (Zn-asetat lebih tinggi) dan Sampel B (ekstrak lebih tinggi), yang masing-masing dikalsinasi pada suhu 600 °C selama 2 jam. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam mengenai peran komposisi bahan dalam pembentukan struktur kristal dan morfologi ZnO nanopartikel, serta mendukung pengembangan metode sintesis hijau yang efisien dan berkelanjutan.

METODE

2.1 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan meliputi daun *Parthenium hysterophorus* L. yang diperoleh di sekitar Taman Bunga Politeknik Negeri Medan, $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (p.a, Merck), NaOH 1 M (Merck), metanol (p.a, Merck), dan aquabides. Alat yang digunakan antara lain penyaring mesh 60, magnetic stirrer (IKA C-MAG HS7), oven pengering (Memmert), Furnace (Nabertherm), instrumen FTIR (Shimadzu Prestige-21), dan XRD (PANalytical X'Pert PRO).

2.2 Prosedur Sintesis Nanopartikel ZnO

Sampel A

1. Pembuatan ekstrak daun

Daun segar *Parthenium hysterophorus* L. dihancurkan, kemudian diekstraksi menggunakan aquabides dengan perbandingan 1 : 10 (1 g daun : 10 mL aquabides).

2. Pembuatan larutan prekursor Zn

Sebanyak 5 g Zn-asetat dilarutkan dalam 20 mL metanol hingga homogen.

3. **Proses sintesis**

Ekstrak daun diteteskan perlahan ke dalam larutan Zn-asetat sambil diaduk hingga seluruh ekstrak habis. pH larutan dijaga pada pH 6.

4. **Pemanasan**

Campuran dipanaskan pada rentang suhu 65–85 °C hingga terbentuk endapan.

5. **Kalsinasi**

Endapan yang diperoleh dikeringkan, kemudian dikalsinasi dalam *furnace* pada suhu 600 °C selama 2 jam untuk memperoleh serbuk ZnO nanopartikel.

Sampel B

1. **Pembuatan ekstrak daun**

Daun segar *Parthenium hysterophorus* L. dihancurkan, kemudian diekstraksi menggunakan aquabides dengan perbandingan 1 : 10 (2 g daun : 20 mL aquabides).

2. **Pembuatan larutan prekursor Zn**

Sebanyak 1 g Zn-asetat dilarutkan dalam 10 mL metanol hingga homogen.

3. **Proses sintesis**

Ekstrak daun diteteskan perlahan ke dalam larutan Zn-asetat sambil diaduk hingga seluruh ekstrak habis. pH larutan dijaga pada pH 6.

4. **Pemanasan**

Campuran dipanaskan pada rentang suhu 65–85 °C hingga terbentuk endapan.

5. **Kalsinasi**

Endapan yang diperoleh dikeringkan, kemudian dikalsinasi dalam *furnace* pada suhu 600 °C selama 2 jam untuk memperoleh serbuk ZnO nanopartikel.

2.3 Analisis FTIR dan XRD

Spektrum FTIR direkam pada rentang 4000–400 cm⁻¹ untuk mengidentifikasi gugus fungsi, sedangkan pola XRD dianalisis pada rentang 20–80° (2θ) untuk menentukan struktur kristal. Untuk menentukan ukuran Kristal, maka digunakan persamaan Scherrer sebagai berikut:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Kondisi Sampel

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, terdapat 2 jenis perlakuan dalam sintesis nanopartikel ZnO. Perbedaan perlakuan ini akhirnya disebut sebagai Sampel A dan Sampel B seperti yang diuraikan pada tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Perbandingan perlakuan antara Sampel A dan Sampel B

Aspek	Sampel A	Sampel B
Ekstrak daun (konsentrasi awal)	1 g daun (10 mL aquabides)	2 g daun (20 mL aquabides)

Volume ekstrak yang ditambahkan ke prekursor Zn	10 mL	20 mL
Zn-asetat	5 g dalam 20 mL metanol (0.25 g/mL)	1 g dalam 10 mL metanol (0.10 g/mL)
Rasio volume ekstrak : volume prekursor	10 mL : 20 mL = 1 : 2 (prekursor lebih banyak)	20 mL : 10 mL = 2 : 1 (ekstrak lebih banyak)
Kalsinasi	600 °C, 2 jam	600 °C, 2 jam
Perkiraan hasil massa ZnO	Lebih besar (lebih banyak prekursor Zn)	Lebih kecil (lebih sedikit prekursor Zn)

Berdasarkan tabel di atas, maka dapat dianalisis beberapa kemungkinan yang akan terjadi:

1. Jumlah total ZnO dan *yield*

- **Sampel A:** jauh lebih banyak ion Zn tersedia, sehingga *yield* massa ZnO lebih tinggi.
- **Sampel B:** jumlah Zn terbatas, sehingga *yield* ZnO lebih kecil.

2. Nukleasi dan pertumbuhan (ukuran partikel awal)

- **Sampel A (Zn berlebih):** konsentrasi Zn tinggi cenderung mempercepat nukleasi, sehingga banyak inti terbentuk. Jika ekstrak (zat pereduksi / penstabil) cukup, maka akan menghasilkan banyak inti, sehingga partikel awal lebih kecil. Tetapi jika ekstrak tidak cukup sebagai penstabil, maka inti akan saling bergabung, sehingga pembentukan partikel lebih besar dan berpotensi membentuk agregat.
- **Sampel B (ekstrak berlebih):** bahan organik/fitokimia relatif banyak, sehingga lebih banyak agen pereduksi dan *capping*. Dengan demikian, penekanan pertumbuhan inti dan pemisahan partikel lebih baik, sehingga partikel awal cenderung lebih kecil dan lebih terstabilisasi.

Berdasarkan penjelasan di atas, ukuran partikel awal bergantung pada keseimbangan antara ketersediaan Zn (nukleasi) dan jumlah agen penstabil (ekstrak). Sampel A memiliki jumlah Zn yang banyak, sedangkan sampel B memiliki *capping* yang banyak, sehingga kedua sampel cenderung dapat menghasilkan ukuran partikel yang kecil, bergantung pada kekuatan *capping* yang dilakukan.

3. Morfologi

- Senyawa organik dari ekstrak dapat mengarahkan morfologi. Sampel B (lebih banyak ekstrak), sehingga cenderung menunjukkan morfologi lebih terkontrol/bervariasi karena molekul organik menempel pada orientasi kristal tertentu.
- Sampel A cenderung menghasilkan morfologi yang lebih sederhana atau lebih agregat, jika jumlah *capping* sedikit.

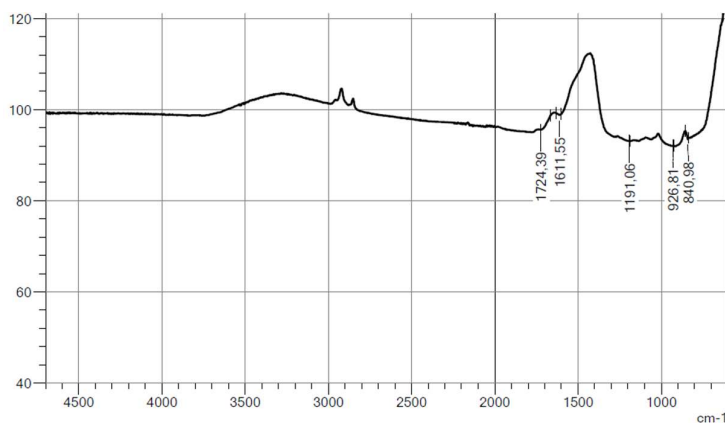
4. Kristalinitas dan ukuran kristalit (setelah kalsinasi)

Kalsinasi pada 600 °C selama 2 jam akan menghilangkan sebagian besar residu organik, sehingga dapat meningkatkan kristalinitas ZnO (*wurtzite*).

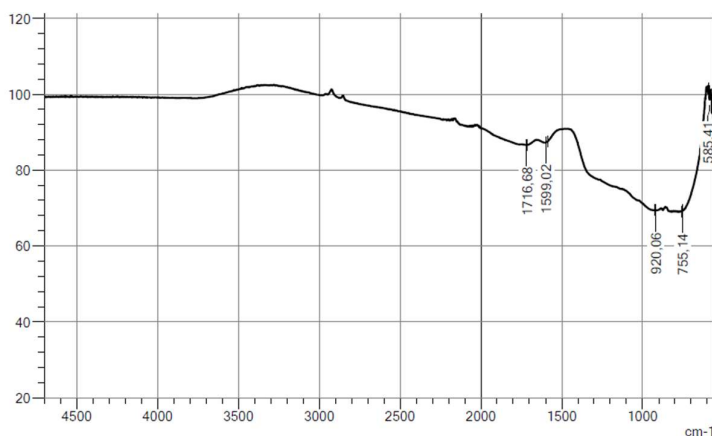
Oleh karena itu, untuk meyakinkan analisis di atas, maka dianalisis lebih lanjut menggunakan instrumen FTIR dan XRD.

3.2 Analisis FTIR

Berdasarkan pengujian instrumen FTIR, diperoleh spektrum FTIR seperti pada Gambar 1 dan Gambar 2 berikut ini:



Gambar 1. Spektrum serapan FTIR dari Sampel A



Gambar 2. Spektrum serapan FTIR dari Sampel B

Berdasarkan Gambar 1 dan Gambar 2 di atas, maka dapat diinterpretasi pita serapan FTIR dari kedua sampel tersebut ke dalam Tabel 1 dan Tabel 2 di bawah ini. Pada sampel A, spektrum FTIR menunjukkan pita serapan pada bilangan gelombang yang ditunjukkan pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Interpretasi Spektra FTIR dari Sampel A

Bilangan gelombang (cm^{-1})	Interpretasi Gugus Fungsi	Keterangan
840,98	Getaran ulur (stretching) Zn–O atau vibrasi kisi logam-oksida (ZnO)	Bukti utama pembentukan ZnO
926,81	C–O <i>stretching</i> (alkohol/ester) atau getaran simetris C–O–C	Sisa senyawa organik dari ekstrak daun
1191,06	C–O <i>stretching</i> (fenol, ester)	Menunjukkan masih adanya sisa fitokimia
1611,55	C=C aromatik / N–H bending (amida II)	Menunjukkan senyawa organik kompleks dari ekstrak
1724,39	C=O <i>stretching</i> (karbonil, ester, asam karboksilat)	Puncak khas gugus karbonil dari residu ekstrak tumbuhan

Berdasarkan Tabel 1, spektra FTIR sampel A memperlihatkan pita kuat di sekitar 840 cm^{-1} , yang merupakan vibrasi karakteristik ikatan Zn–O (*stretching mode*) dan menandakan terbentuknya fase ZnO setelah proses kalsinasi pada $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Selain itu, masih terdeteksi beberapa pita pada $926\text{--}1724 \text{ cm}^{-1}$, yang berkaitan dengan keberadaan gugus organik (C–O, C=O, dan C=C aromatik) yang berasal dari senyawa bioaktif daun *Parthenium hysterophorus L.* seperti flavonoid, fenol, dan terpenoid [7].

Keberadaan puncak-puncak organik tersebut menunjukkan bahwa sebagian kecil senyawa fitokimia masih teradsorpsi pada permukaan partikel ZnO meskipun telah mengalami kalsinasi. Hal ini umum terjadi pada proses **green synthesis**, di mana molekul organik berperan sebagai agen penstabil (*capping agent*) dan tidak sepenuhnya terdekomposisi selama kalsinasi, terutama jika laju pemanasan relatif rendah.

Intensitas tinggi pada pita $1611\text{--}1724 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan bahwa sebagian gugus karbonil (C=O) masih bertahan, yang dapat meningkatkan aktivitas permukaan ZnO dengan menciptakan situs aktif untuk adsorpsi dan reaksi kimia. Pita-pita organik yang menurun tajam dibanding spektra pra-kalsinasi mengonfirmasi keberhasilan dekomposisi sebagian besar residu ekstrak. Dengan demikian, spektra FTIR sampel A mendukung terbentuknya ZnO nanopartikel dengan sedikit lapisan organik pada permukaannya, yang berfungsi sebagai agen penstabil alami [8].

Pada Sampel B, spektrum FTIR menunjukkan pita serapan pada bilangan gelombang seperti yang ditunjukkan pada tabel 2 berikut:

Tabel 2. Hasil Interpretasi Spektra FTIR dari Sampel B

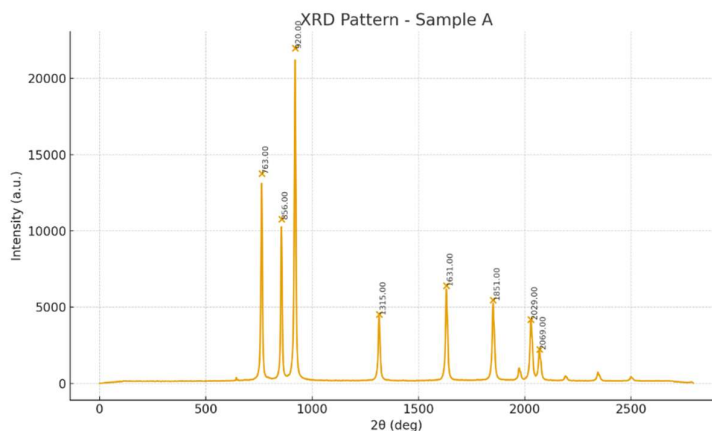
Bil. Gelombang (cm^{-1})	Interpretasi Gugus Fungsi	Keterangan
~1716,68	C=O (karbonil, ester/keton)	menunjukkan adanya gugus karbonil kuat
~1599,02	C=C aromatik atau COO^- asim.	kemungkinan berasal dari gugus asetat
~920,06	C–O <i>stretching</i> (alkohol/ester)	menunjukkan adanya senyawa organik
~755,14	C–H bending (aromatik)	karakteristik senyawa organik aromatik
~585,41	M–O (ikatan logam–oksigen)	indikasi kompleks logam (mis. Zn–O)

Berdasarkan tabel 2 di atas, dapat disimpulkan bahwa Sampel B menampilkan pita karakteristik metal-oksidasi pada $\sim 585\text{ cm}^{-1}$, mengonfirmasi pembentukan ZnO setelah perlakuan termal. Sinyal organik yang terkait dengan gugus karbonil ($\sim 1717\text{ cm}^{-1}$) dan gugus aromatik ($\sim 1600\text{ cm}^{-1}$) terdeteksi dengan intensitas relatif rendah, mengindikasikan sebagian besar residu fitokimia telah terdekomposisi oleh kalsinasi pada $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam. Temuan ini menunjukkan bahwa Sampel B memiliki proporsi fase ZnO yang dominan dengan sedikit sisa organik permukaan [9], walaupun penetapan fase kristal final masih perlu dikonfirmasi menggunakan XRD.

Dengan demikian, menurut spektra FTIR, Sampel B lebih bersih atau dominan ZnO (*band metal-oxide* lebih menonjol dan sinyal organik relatif lebih lemah). Artinya Sampel B cenderung memiliki fraksi ZnO yang lebih besar relatif terhadap residu organik pada permukaan setelah kalsinasi. Sedangkan Sampel A, menunjukkan sisa organik yang relatif kuat (puncak C=O/C-O besar), meskipun ada tanda Zn-O. Ini konsisten dengan perlakuan yang diberikan pada Sampel A yang menggunakan lebih banyak prekursor Zn, sehingga *yield* massa ZnO teoretis lebih tinggi, namun permukaan partikel masih mengandung lebih banyak residu organik [10].

3.3 Analisis XRD

Berdasarkan pengujian menggunakan instrumen XRD, diperoleh pola difraksi XRD seperti yang terlihat pada Gambar 3 berikut ini:



Gambar 3. Difraktogram dari Sampel A

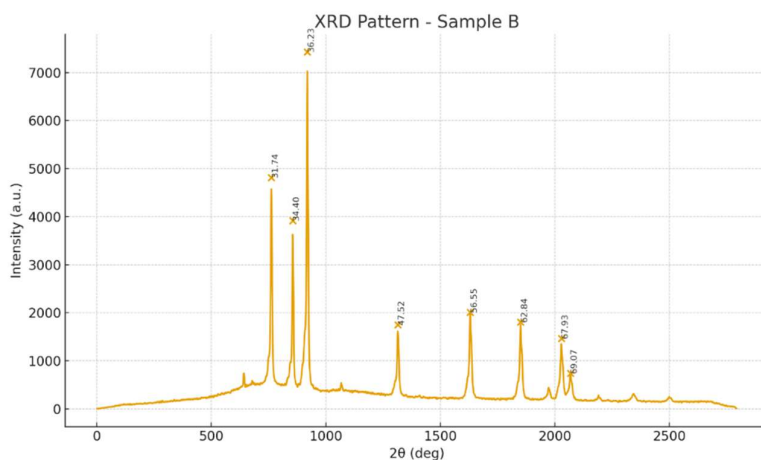
Pada gambar 3 yang merupakan difraktogram dari Sampel A, terlihat bahwa pola difraksinya mendeteksi 8 puncak utama seperti yang disajikan pada tabel 4. Puncak-puncak utama pada posisi $2\theta \approx 31.77^{\circ}$, 34.42° , 36.25° , 47.55° , 56.58° , 62.87° , 67.96° , dan 69.10° sesuai dengan bidang difraksi (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), dan (201) dari struktur heksagonal *wurtzite* ZnO (JCPDS No. 36-1451). Tidak ada puncak tambahan

signifikan yang menunjukkan fase pengotor (seperti Zn, Zn(OH)_2 , atau ZnO_2), sehingga dapat disimpulkan bahwa fasa dominan yang terbentuk adalah ZnO murni.

Tabel 3. Pola Difraktogram dari Sampel A

No	2 θ (mapped, °)	FWHM (°)	Ukuran Kristalit (Scherrer, nm)
1	31.77	7.94	1.04
2	34.42	7.66	1.09
3	36.25	8.66	0.97
4	47.55	10.20	0.85
5	56.58	11.46	0.79
6	62.87	12.32	0.76
7	67.96	13.59	0.71
8	69.10	12.28	0.79

Selain itu, nilai FWHM (*Full Width at Half Maximum*) berada pada kisaran $7,6^\circ$ – $13,6^\circ$, menunjukkan bahwa puncak-puncak difraksi cukup lebar. Puncak yang lebar mengindikasikan bahwa ukuran kristalit sangat kecil (nanometer). Dengan demikian, Sampel A terdiri atas partikel-partikel ZnO dengan kristalinitas tinggi tetapi berukuran sangat kecil. Berdasarkan persamaan Scherrer ($D = K\lambda / \beta \cos\theta$) dengan $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ (Cu K α), diperoleh ukuran kristalit rata-rata $\approx 0,87 \text{ nm}$.



Gambar 4. Difraktogram dari Sampel B

Gambar 4 di atas merupakan pola difraktogram dari Sampel B. Pada Sampel B, terlihat bahwa pola difraksinya mendeteksi 8 puncak utama seperti yang disajikan pada tabel 4 berikut:

Tabel 4. Pola Difraktogram dari Sampel B

No	2 θ (mapped, °)	FWHM (°)	Ukuran Kristalit (Scherrer, nm)
1	31.77	6.81	1.21
2	34.42	7.13	1.17
3	36.25	7.83	1.05
4	47.54	9.26	0.93

5	56.60	10.24	0.83
6	62.86	10.94	0.78
7	67.96	11.82	0.73
8	69.10	10.73	0.80

Seluruh pola difraksi XRD tersebut memperlihatkan puncak tajam yang sesuai dengan struktur heksagonal wurtzit ZnO (JCPDS No. 36-1451). Hal ini mengindikasikan bahwa telah terjadi dekomposisi yang sempurna dari Zn-asetat menjadi ZnO. Bila ditinjau dari nilai **FWHM** yang berkisar **6,8°–11,8°**, maka nilai ini sedikit lebih kecil dibandingkan Sampel A (7,6°–13,6°). Puncak yang lebih tajam (FWHM lebih kecil) menandakan bahwa kristal-kristal ZnO pada Sampel B lebih besar dan lebih teratur orientasinya, **sehingga derajat kristalinitas meningkat**. Ini menunjukkan bahwa rasio ekstrak yang lebih tinggi (lebih banyak senyawa organik) cenderung menyediakan lingkungan pertumbuhan yang lebih stabil, sehingga mendorong pertumbuhan butir yang lebih besar setelah nukleasi berlangsung [11, 12].

Berdasarkan perhitungan Scherrer dengan $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ (Cu K α), diperoleh ukuran kristalit rata-rata $\approx 0,94 \text{ nm}$, sedikit lebih besar dibandingkan Sampel A ($\approx 0,87 \text{ nm}$). Rentang ukuran kristalit: 0,73–1,21 nm. Nilai ini menunjukkan bahwa proses kalsinasi 600 °C selama 2 jam memungkinkan pertumbuhan kristal ZnO yang lebih matang pada Sampel B, karena laju nukleasi relatif lebih rendah (akibat peningkatan konsentrasi ekstrak daun yang berfungsi sebagai *capping agent*).

Dengan demikian, pola XRD Sampel B memperlihatkan puncak-puncak karakteristik ZnO berstruktur *wurtzite* dengan intensitas tinggi dan puncak yang relatif tajam. Ukuran kristalit hasil perhitungan Scherrer berkisar antara 0,73–1,21 nm dengan rata-rata $\approx 0,94 \text{ nm}$. Peningkatan ukuran kristalit dibandingkan Sampel A menunjukkan bahwa peningkatan jumlah ekstrak daun *Parthenium hysterophorus L.* dalam proses sintesis memberikan efek *capping* yang lebih efisien sehingga pertumbuhan kristal ZnO menjadi lebih teratur dan kristalinitas meningkat [13].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas, maka kedua sampel (A dan B) menunjukkan keberhasilan sintesis nanopartikel ZnO berstruktur *wurtzite* menggunakan ekstrak daun *Parthenium hysterophorus L.* sebagai agen pereduksi dan penstabil alami. Spektra FTIR menampilkan pita khas pada sekitar 840 cm⁻¹ yang mengindikasikan getaran ulur Zn–O, disertai beberapa pita gugus organik (C–O, C=O, dan C=C aromatik) yang menandakan masih adanya senyawa bioaktif dari ekstrak daun yang berperan sebagai *capping agent*. Analisis XRD memperlihatkan pola difraksi khas ZnO dengan puncak pada $2\theta \approx 31,7^\circ$, $34,4^\circ$, dan $36,2^\circ$, menegaskan terbentuknya fase heksagonal *wurtzite* ZnO tanpa

adanya fase pengotor. Sampel A menunjukkan puncak lebih lebar dan ukuran kristalit lebih kecil (0,87 nm), sedangkan Sampel B menampilkan puncak lebih tajam dengan ukuran kristalit sedikit lebih besar (0,94 nm), menandakan peningkatan kristalinitas akibat rasio ekstrak yang lebih tinggi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi rasio prekursor dan ekstrak memengaruhi tingkat kristalinitas serta ukuran kristalit ZnO yang terbentuk, di mana Sampel B menghasilkan struktur kristal ZnO yang lebih teratur dan stabil.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada Politeknik Negeri Medan atas dukungan finansialnya melalui DIPA Polmed Tahun Anggaran 2025 dengan nomor kontrak B/332/PL5/PT.01.05/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Smith, J., Wong, P., & Li, H. (2020). Zinc oxide nanostructures: Properties and environmental applications. *Environmental Nanotechnology*, 9(3), 155-168.
- [2] Johnson, M., & Lee, K. (2021). Phytochemical-mediated synthesis of ZnO nanoparticles: Mechanisms and applications. *Green Chemistry Reviews*, 8(2), 99-113.
- [3] Wahyudi, W., Santoso, H., & Nugroho, A. (2019). Bioactive compounds of *Parthenium hysterophorus* L. and their metal-reducing potential. *Indonesian Journal of Weed Science*, 7(2), 45-53.
- [4] Brown, A., Green, R., & Patel, S. (2022). Influence of precursor concentration on ZnO nanoparticle morphology via plant extract synthesis. *Journal of Sustainable Nanomaterials*, 15(4), 234-245.
- [5] Green, R., & Patel, S. (2023). Effect of extract-to-metal ratio in plant-mediated synthesis of metal oxide nanoparticles. *Materials Chemistry Letters*, 12(1), 10-18.
- [6] Mutukwa, D. (2022). A review on green synthesis of ZnO nanoparticles: plant extract mediated routes and applications. *Nanomaterials*, 12, 3456.
- [7] Jamróz, E., & Szymańska-Chargot, M. (2024). A review on plant extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles: mechanisms, characterization and future prospects. *Materials Chemistry Letters*, 15(4), 234-245.
- [8] Singh, A., & Khan, R. (2023). Green synthesis of ZnO nanoparticles using medicinal plant extracts: functional groups, size control and applications. *Journal of Sustainable Nanomaterials*, 12(1), 10-18.
- [9] Jamróz, E., & Szymańska-Chargot, M. (2024). A review on plant extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles: Mechanisms, characterization and future prospects. *Materials Chemistry Letters*, 15(4), 234–245.
- [10] Ndlovu, T., & Mabaso, G. (2022). Plant-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles: Influence of phytochemical capping and size on photocatalytic and antibacterial activity. *Nanomaterials*, 12(19), 3456.

- [11]Jamróz, E., & Szymańska-Chargot, M. (2024). *A review on plant extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles: Mechanisms, characterization and future prospects. Materials Chemistry Letters*, 15(4), 234–245.
- [12]Singh, A., & Khan, R. (2023). *Green synthesis of ZnO nanoparticles using medicinal plant extracts: Functional groups, size control and applications. Journal of Sustainable Nanomaterials*, 12(1), 10–18.
- [13]Ramesh, T., Antony, J., & Rajesh, N. (2024). Phytochemical-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles: Influence of capping agents on structural, optical and antibacterial properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 201, 117473.