

ANALISIS MORFOLOGI DAN DISTRIBUSI DIAMETER NANOFIBER ZnO TERAKTIVASI DOPAN AL-CO MELALUI PENCITRAAN SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM)

¹Ade Irvan Tauvana, ²Syafrizal, ³Lukman Nulhakim, ⁴Elsa Nurfadillah
^{1,2,3,4}Politeknik Enjineri Indorama,
1e-mail: ade.irvan@pei.ac.id

Abstrak

Doping ZnO menggunakan aluminium (Al) dan kobalt (Co) diketahui dapat memengaruhi struktur kristal akibat perbedaan jari-jari ion dan valensi dibandingkan Zn^{2+} , yang berpotensi menimbulkan regangan kisi serta perubahan parameter kisi dan ukuran kristalit. Perubahan struktur tersebut dapat berdampak pada mekanisme pertumbuhan dan morfologi nanofiber yang dihasilkan melalui proses electrospinning. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi komposisi dopan Al dan Co terhadap morfologi nanofiber ZnO. Nanofiber disintesis menggunakan metode electrospinning, diikuti proses kalsinasi dalam furnace, kemudian dikarakterisasi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM JEOL JSM-IT300). Analisis diameter serat dilakukan sebanyak 50 kali pengukuran menggunakan perangkat lunak ImageJ dan Origin. Hasil menunjukkan bahwa variasi komposisi dopan memengaruhi ukuran dan keseragaman diameter serat. Variasi A (100% $AlCl_3$) menghasilkan diameter rata-rata terkecil sebesar 92,163 nm, sedangkan variasi E (100% $CoAc_2$) menghasilkan diameter rata-rata terbesar sebesar 155,067 nm dengan rentang ukuran lebih lebar. Variasi B dan C menunjukkan peningkatan diameter rata-rata hingga 139,984 nm dan 134,264 nm, sementara variasi D menurun menjadi 103,443 nm. Perubahan diameter tidak menunjukkan kecenderungan linier terhadap fraksi dopan, sehingga komposisi Al dan Co berperan dalam memodifikasi distribusi dan morfologi serat, namun bukan sebagai pengendali tunggal ukuran serat.

Kata kunci: ZnO, doping Al-Co, nanofiber, electrospinning, morfologi SEM

Abstract

Doping ZnO with aluminum (Al) and cobalt (Co) can alter its crystal structure due to differences in ionic radius and valence compared to Zn^{2+} , potentially inducing lattice strain, lattice parameter modification, and crystallite size variation. These structural changes may influence nanofiber growth mechanisms and resulting morphology during electrospinning. This study aims to analyze the effect of Al and Co dopant composition on the morphology and crystal structure of ZnO nanofibers. The nanofibers were synthesized via electrospinning followed by calcination in a furnace, and characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM JEOL JSM-IT300). Fiber diameter was measured 50 times using ImageJ and Origin software. The results indicate that dopant composition significantly affects fiber size and uniformity. Variation A (100% $AlCl_3$) produced the smallest average diameter of 92.163 nm, whereas variation E (100% $CoAc_2$) showed the largest average diameter of 155.067 nm with a broader distribution range. Variations B and C exhibited increased average diameters of 139.984 nm and 134.264 nm, respectively, while variation D decreased to 103.443 nm. No linear trend was observed between dopant fraction and fiber diameter, indicating that Al and Co compositions influence diameter distribution and morphology but are not the sole controlling factors of fiber size.

Keywords: ZnO, Al-Co doping, nanofiber, electrospinning, SEM morphology

Analisis Morfologi Dan Distribusi Diameter Nanofiber Zno Teraktivasi Dopan Al-Co Melalui Pencitraan
Scanning Electron Microscopy (Sem)
Ade Irvan Tauvana, Syafrizal, Lukman Nulhakim, Elsa Nurfadillah)

1. PENDAHULUAN

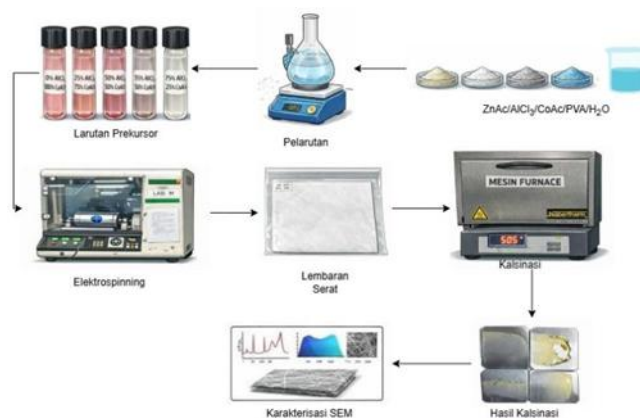
Seng oksida (ZnO) merupakan material semikonduktor tipe-n dengan struktur kristal wurtzite yang banyak dikaji karena stabilitas termal yang baik, celah pita lebar (~3,37 eV), serta potensi aplikasinya pada perangkat optoelektronik, sensor, dan sistem energi berbasis nanomaterial [1]. Dalam skala nanostruktur, khususnya dalam bentuk nanofiber, ZnO memiliki luas permukaan tinggi dan rasio panjang terhadap diameter yang besar, sehingga karakteristik morfologi menjadi parameter penting yang menentukan performa material pada berbagai aplikasi lanjutan [2]. Salah satu pendekatan untuk memodifikasi sifat ZnO adalah melalui proses doping. Substitusi ion dopan ke dalam kisi kristal ZnO dapat menimbulkan perubahan parameter kisi akibat perbedaan jari-jari ion dan valensi dibandingkan ion Zn^{2+} [3]. Perubahan tersebut berpotensi menyebabkan regangan kisi (lattice strain), variasi ukuran kristalit, serta modifikasi mekanisme pertumbuhan selama proses pembentukan serat. Dalam konteks ini, aluminium (Al) dan kobalt (Co) merupakan dua unsur yang umum digunakan sebagai dopan ZnO karena kemampuannya menggantikan posisi ion Zn dalam struktur kristal [4]. Perbedaan karakteristik ionik dan konfigurasi elektron kedua dopan tersebut berpotensi menghasilkan respons morfologi yang berbeda ketika diaplikasikan pada sistem nanofiber ZnO [5].

Dalam sintesis nanofiber, metode electrospinning banyak digunakan karena mampu menghasilkan serat kontinu berdiameter mikro hingga nano melalui pemanfaatan gaya elektrostatis [6]. Parameter larutan, komposisi prekursor, dan kondisi proses memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi diameter, homogenitas, dan kekasaran permukaan serat [7]. Dengan demikian, variasi komposisi dopan Al dan Co berpotensi memengaruhi mekanisme pertumbuhan serat selama proses electrospinning, yang pada akhirnya tercermin dalam morfologi nanofiber yang dihasilkan [8]. Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan penggunaan dopan tunggal Al atau Co pada ZnO, kajian mengenai pengaruh variasi komposisi campuran Al–Co terhadap morfologi nanofiber ZnO secara sistematis masih terbatas, khususnya pada pendekatan perbandingan fraksi dopan yang dikontrol secara bertahap. Pemahaman fundamental mengenai hubungan komposisi dopan dan distribusi diameter serat menjadi penting sebagai dasar sebelum material dikembangkan lebih lanjut menuju kajian sifat fungsional.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis morfologi nanofiber ZnO terdopan Al dan Co yang disintesis melalui metode electrospinning dan proses kalsinasi. Karakterisasi morfologi dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), dengan analisis diameter serat sebanyak 50 kali pengukuran untuk memperoleh representasi distribusi yang memadai secara statistik. Jumlah pengukuran tersebut dipilih untuk memastikan sebaran data mencerminkan variasi morfologi aktual dan meminimalkan bias pengambilan sampel lokal pada citra SEM. Penelitian ini diharapkan memberikan pemahaman dasar mengenai pengaruh variasi komposisi dopan terhadap distribusi diameter dan keseragaman nanofiber ZnO.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan fokus pada analisis morfologi nanofiber ZnO terdopan aluminium (Al) dan kobalt (Co). Tahapan penelitian meliputi sintesis larutan prekursor, proses fabrikasi nanofiber menggunakan metode electrospinning, proses kalsinasi, serta karakterisasi morfologi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Alur penelitian secara umum ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Penelitian

Bahan yang digunakan meliputi aluminium klorida heksahidrat ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), seng asetat dihidrat [$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$], kobalt(II) asetat tetrahidrat [$\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$], polivinil alkohol (PVA) sebagai matriks polimer pembentuk serat, serta akuades sebagai pelarut. PVA berperan sebagai media pembentuk jet selama proses electrospinning dan akan terdegradasi selama proses kalsinasi [9]. Larutan prekursor disiapkan dengan melarutkan PVA dalam akuades hingga diperoleh larutan homogen berkonsentrasi 10% (w/v). Konsentrasi ini dipilih untuk memastikan viskositas larutan berada pada rentang yang memungkinkan terbentuknya jet kontinu selama electrospinning. Prekursor logam Zn^{2+} , Al^{3+} , dan Co^{2+} kemudian ditambahkan sesuai variasi komposisi 100%, 75%, 50%, 25%, dan 0% (v/v). Campuran diaduk hingga diperoleh larutan homogen dan stabil guna menghindari pengendapan partikel yang dapat mengganggu pembentukan serat [10].

Proses fabrikasi nanofiber dilakukan menggunakan metode electrospinning dengan parameter tetap berupa tegangan 13 kV, laju alir 0,5 mL/jam, dan jarak nozzle–kolektor 10 cm. Tegangan listrik berfungsi menghasilkan gaya elektrostatis yang menarik larutan keluar dari ujung nozzle membentuk jet bermuatan. Laju alir dikontrol untuk menjaga kestabilan pembentukan Taylor cone, sedangkan jarak nozzle–kolektor diatur untuk memberikan waktu yang cukup bagi pelarut menguap sebelum serat mencapai kolektor [11]. Parameter tersebut dipertahankan konstan pada seluruh variasi guna memastikan konsistensi proses.

Serat hasil electrospinning kemudian mengalami proses kalsinasi pada suhu 500°C selama 3 jam. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan matriks polimer PVA serta mendorong pembentukan struktur kristalin ZnO terdopan Al dan Co [12].

Karakterisasi morfologi dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) pada pembesaran 10.000×. Untuk setiap variasi komposisi, citra diambil dari beberapa area berbeda secara acak guna meminimalkan bias pengamatan lokal dan memperoleh representasi morfologi yang lebih akurat. Pengukuran diameter serat dilakukan sebanyak 50 kali untuk setiap sampel menggunakan perangkat lunak ImageJ. Data diameter yang diperoleh dihitung nilai rata-rata dan standar deviasi menggunakan persamaan statistik standar. Nilai tersebut kemudian dibandingkan antar variasi untuk mengevaluasi pengaruh komposisi dopan terhadap ukuran dan keseragaman nanofiber ZnO [13].

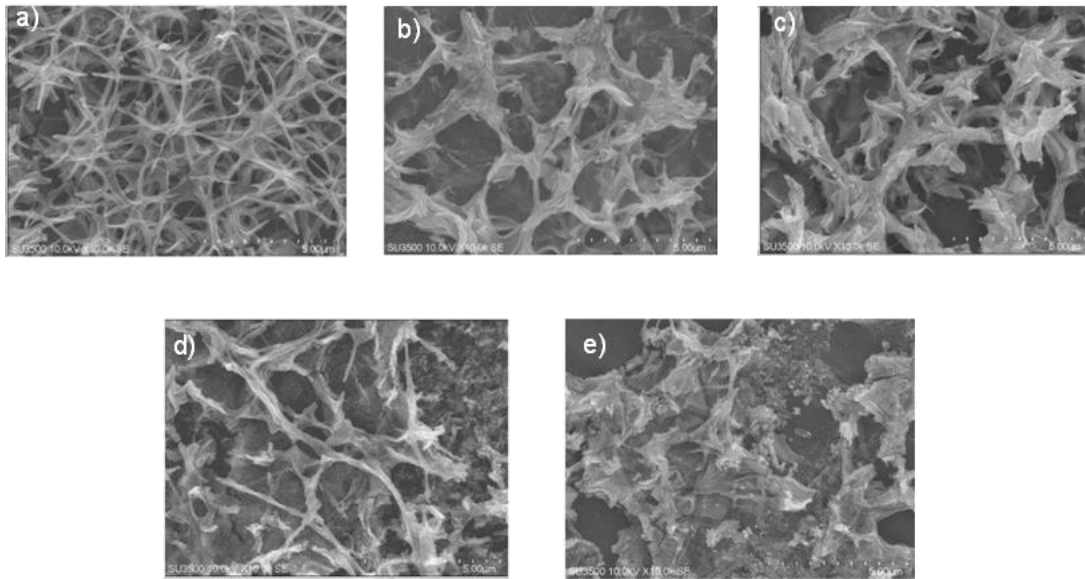
3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil karakterisasi morfologi nanofiber ZnO terdopan Al dan Co yang diperoleh melalui pengamatan SEM. Pembahasan difokuskan pada pengaruh variasi komposisi dopan terhadap perubahan diameter serat dan distribusi ukurannya. Untuk menilai tingkat keseragaman nanofiber pada setiap variasi komposisi.

3.1 Morfologi Permukaan Nanofiber Berdasarkan Citra SEM

Analisis Morfologi Dan Distribusi Diameter Nanofiber ZnO Teraktivasi Dopan Al-Co Melalui Pencitraan Scanning Electron Microscopy (Sem)

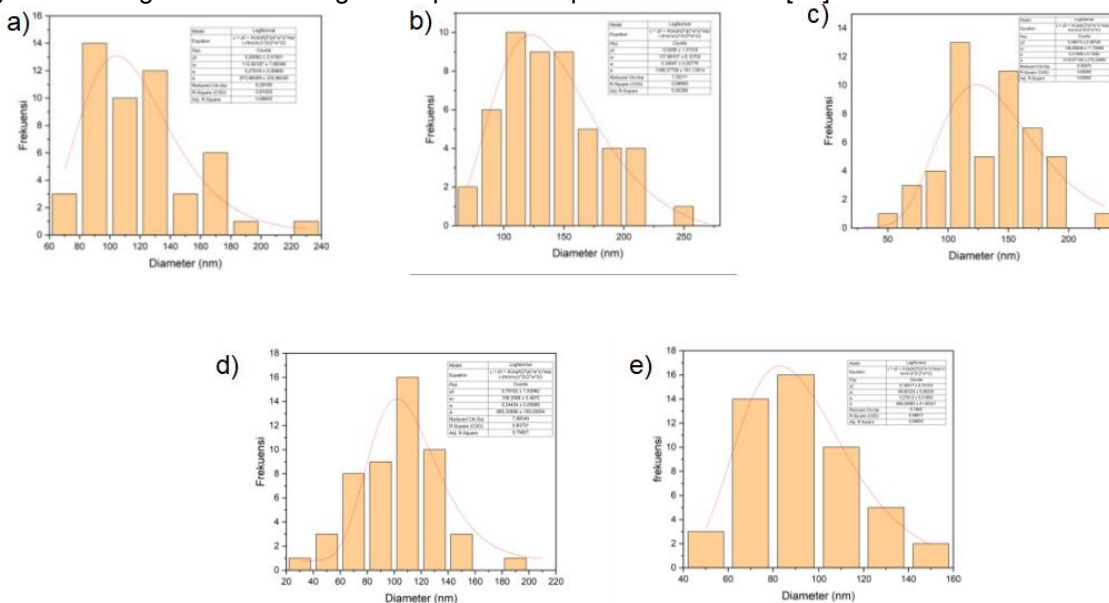
Ade Irvan Tauvana, Syafrizal, Lukman Nulhakim, Elsa Nurfadillah)



Gambar 2. Variasi citra SEM

3.2 Distribusi Statistik Diameter Serat

Analisis distribusi diameter dilakukan berdasarkan histogram hasil pengukuran menggunakan perangkat lunak ImageJ. Variasi A menunjukkan distribusi yang relatif sempit dengan puncak frekuensi pada rentang diameter rendah, yang mengindikasikan tingkat keseragaman serat yang lebih baik. Pada variasi B dan C terjadi pergeseran puncak distribusi menuju diameter yang lebih besar serta peningkatan lebar kurva distribusi, yang menunjukkan meningkatnya heterogenitas ukuran serat. Variasi D memperlihatkan distribusi yang kembali cenderung menyempit meskipun masih terdapat rentang ukuran yang cukup lebar. Sementara itu, variasi E menunjukkan dominasi diameter pada rentang yang lebih tinggi. Perbandingan bentuk histogram dapat diamati pada Gambar 4.3 [14].



Gambar 3. Histogram masing-masing variasi

Berdasarkan hasil pengamatan, sampel (a), (b), dan (c) menunjukkan rentang distribusi yang relatif lebar, dengan diameter partikel yang tersebar hingga di atas 200 nm. Sampel (b) secara khusus menunjukkan polidispersitas yang paling tinggi dengan puncak frekuensi berada pada rentang 100–120 nm, namun memiliki ekor distribusi yang memanjang hingga 260 nm. Hal ini mengindikasikan adanya kecenderungan aglomerasi partikel yang lebih besar pada kondisi sintesis tersebut. Sebaliknya, terjadi pergeseran distribusi ukuran ke arah yang lebih kecil dan lebih seragam pada sampel (d) dan (e). Sampel (d) mulai menunjukkan kurva yang lebih simetris dengan konsentrasi partikel dominan pada diameter 110 nm.

Puncak keseragaman ukuran (monodispers) terbaik ditemukan pada sampel (e), di mana rentang diameter partikel menyempit secara signifikan antara 40 nm hingga 160 nm pada seluruh sampel berada pada rentang yang tinggi (mendekati 0,98), yang menunjukkan bahwa model distribusi Log-normal sangat representatif dalam menggambarkan populasi partikel yang terbentuk. Penurunan ukuran rata-rata dari sampel (a) ke sampel (e) menunjukkan bahwa [masukkan faktor variabel penelitian Anda, misal: peningkatan konsentrasi surfaktan atau waktu sonikasi] efektif dalam mengontrol pertumbuhan kristal dan mencegah penggabungan antar partikel selama proses pembentukan.

3.3 Analisis Kuantitatif Diameter dan Tren Perubahan

Data kuantitatif diameter minimum, rata-rata, dan maksimum *nanofiber* ZnO terdopan Al dan Co disajikan pada tabel 1. Penyajian data ini bertujuan untuk memberikan gambaran numerik mengenai perubahan ukuran serat akibat variasi komposisi dopan.

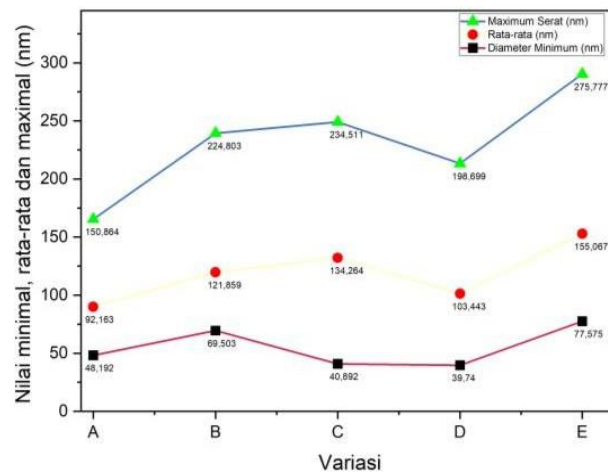
Tabel 1 Nilai diameter serat nanofiber masing-masing variasi

Ukuran Diameter Serat	Variasi ukuran diameter serat dalam ZnO Dopan Al dan Co				
	A (nm)	B (nm)	C (nm)	D (nm)	E (nm)
Rata-rata (nm)	92,163	139,984	134,264	103,443	155,067
Minimum (nm)	48,192	74,156	40,892	39,740	77,575
Maksimum (nm)	150,864	257,689	234,511	198,699	275,777

Berdasarkan tabel 1, variasi A memiliki diameter rata-rata terkecil sebesar 92,163 nm dengan rentang 48,192–150,864 nm, yang menunjukkan distribusi ukuran relatif lebih sempit dibandingkan variasi lainnya. Variasi B dan C mengalami peningkatan diameter rata-rata menjadi 139,984 nm dan 134,264 nm, disertai kenaikan diameter maksimum yang cukup signifikan. Pada variasi D terjadi penurunan diameter rata-rata menjadi 103,443 nm, mengindikasikan perubahan respons sistem terhadap komposisi dopan. Sementara itu, variasi E menunjukkan diameter rata-rata terbesar yaitu 155,067 nm dengan diameter maksimum mencapai 275,777 nm, yang mencerminkan kecenderungan pembentukan serat berukuran lebih besar serta rentang distribusi yang lebih lebar [15]. Secara keseluruhan, perubahan diameter antar variasi tidak menunjukkan pola linier, sehingga dapat diasumsikan bahwa pengaruh dopan terhadap pembentukan serat dipengaruhi oleh interaksi beberapa parameter fisik larutan dan proses *electrospinning* secara simultan.

3.4 Distribusi dan Tren Digital

Grafik hubungan diameter minimum, rata-rata, dan maksimum terhadap variasi komposisi dopan ditunjukkan pada Gambar 4. Visualisasi ini digunakan untuk mengidentifikasi tren perubahan ukuran serat serta mengevaluasi tingkat variasi diameter pada setiap sampel secara komparatif.



Gambar 4 Grafik hubungan ukuran diameter serat

Berdasarkan Gambar 4, diameter rata-rata menunjukkan kecenderungan meningkat dari variasi A ke B dan C, kemudian menurun pada variasi D, dan kembali meningkat signifikan pada variasi E. Pola serupa juga terlihat pada diameter maksimum, dengan nilai tertinggi pada variasi E. Sementara itu, diameter minimum mengalami fluktuasi yang cukup jelas, dengan nilai terendah pada variasi D. Perbedaan rentang antara diameter minimum dan maksimum pada setiap variasi mencerminkan tingkat keseragaman serat.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis diameter nanofiber Seng Oksida (ZnO) terdopan Aluminium dan Kobalt, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa seluruh variasi komposisi dopan berhasil membentuk struktur nanofiber ZnO yang kontinu dan membentuk jaringan acak tanpa diskontinuitas signifikan, menandakan proses electrospinning berlangsung stabil pada semua sampel.
2. Analisis morfologi permukaan menunjukkan bahwa variasi komposisi dopan memengaruhi kerapatan, ukuran, dan keseragaman serat, di mana variasi A cenderung menghasilkan diameter lebih kecil dan lebih homogen, sedangkan variasi E menunjukkan diameter terbesar dengan kecenderungan aglomerasi lokal.
3. Analisis statistik diameter serat menunjukkan bahwa variasi A memiliki diameter rata-rata terkecil (92,163 nm), sedangkan variasi E memiliki diameter rata-rata terbesar (155,067 nm) dengan rentang distribusi yang lebih lebar. Perubahan diameter antar variasi tidak menunjukkan pola linier terhadap komposisi dopan.
4. Tren diameter minimum, rata-rata, dan maksimum menunjukkan fluktuasi yang mencerminkan pengaruh komposisi dopan terhadap stabilitas jet dan regangan serat selama proses electrospinning, sehingga komposisi dopan menjadi parameter penting dalam pengendalian ukuran dan keseragaman nanofiber ZnO.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. W. Prasetyo, "Aplikasi Nanoteknologi Dalam Industri Hasil Hutan (Application Of Nanotechnology In Forest Products Industry)," J. Akar, Vol. 9, No. 1, Pp. 13–24, 2020, Doi: 10.36985/Jar.V9i1.189.
- [2] N. Bhadwal, R. Ben Mrad, And K. Behdian, "Review Of Zinc Oxide Piezoelectric Nanogenerators: Piezoelectric Properties, Composite Structures And Power Output," Sensors, Vol. 23, No. 8, 2023, Doi: 10.3390/S23083859.
- [3] Y. Yao Et Al., "Enhanced Photoluminescence And Electrical Properties Of N-Al-Doped ZnO Nanorods/P-B-Doped Diamond Heterojunction," Int. J. Mol. Sci., Vol. 23, No. 7, 2022, Doi: 10.3390/Ijms23073831.
- [4] A. I. Tauvana, G. Gunawarman, Y. Yetri, B. Wahono, And L. Nulhakim, "Synthesis And Characterisation Of ZnO-Based Nanofibre Membranes Doped With Aluminium And Cobalt Using The Electrospinning Method," Ceram. - Silikaty, Vol. 69, No. 3, Pp. 374– 380, 2025, Doi: 10.13168/Cs.2025.0021.
- [5] L. Nulhakim, "Pengaruh Variasi Material Aluminium Terhadap Unjuk Kerja Nanogenerator Piezoelektrik Dengan Material Seng Oksida," Simetris J. Tek. Mesin, Elektro Dan Ilmu Komput., Vol. 7, No. 1, P. 99, 2016, Doi: 10.24176/Simet.V7i1.492.
- [6] P. Marwoto And E. Wibowo, "Variasi Suhu Deposisi Pada Struktur , Sifat Optik Dan Listrik Film Tipis Seng Oksida Dengan Dopan Galium (Zn : Ga) Deposition Temperature Variations On The Structure , Optical And Electrical Properties Of Zinc Oxide Thin Films Doped Gallium (Zn : Ga)," Vol. 11, No. 1, Pp. 93–99, 2015, Doi: 10.15294/Jpfi.V11i1.4007.
- [7] R. Medhi, M. D. Marquez, And T. R. Lee, "Visible-Light-Active Doped Metal Oxide Nanoparticles: Review Of Their Synthesis, Properties, And Applications," Acs Appl. Nano Mater., Vol. 3, No. 7, Pp. 6156–6185, 2020, Doi: 10.1021/Acsanm.0c01035.
- [8] R. Hutajulu, J. Jubaidah, And N. Siregar, "Fabrikasi Dan Karakterisasi Film Tipis ZnO Terhadap Arus Deposisi Menggunakan Metode Elektroplating," J. Fis. Unand, Vol. 13, No. 3, Pp. 445–451, 2024, Doi: 10.25077/Jfu.13.3.445-451.2024.
- [9] Z. Helga, L. Wibowo, N. Syakir, F. Faizal, And L. Safriani, "Karakteristik Serat Nano Pva Yang Dibuat Menggunakan Electrospinning Dengan Kolektor Statik," Vol. 12, No. 01, Pp. 26–33, 2023.

- [10] N. F. R. Tang, D. Tahir, And H. Heryanto, "Sintesis Komposit $ZnO / Ca_3 (PO_4)_2$ Menggunakan Metode Sol-Gel Sebagai Material Fotokatalis Limbah Cair Industri (Metilen Biru)," Vol. 19, Pp. 31–42, 2022.
- [11] K. V. N. Istiqomah And D. H. Kusumawati, "Sintesis Nanofiber Kitosan/Pva Sebagai Wound Dressing Dengan Metode Electrospinning," *Inov. Fis. Indones.*, Vol. 11, No. 1, Pp. 1–7, 2022, Doi: 10.26740/ifi.V11n1.P1-7.
- [12] J. I. Lingkungan, Y. Rumbino, L. Caetano, And M. De Tita, "Strategi Pengkonversian Batu Gamping Nusa Tenggara Timur Menjadi Kalsium Oksida : Pengaruh Suhu Dan Waktu Kalsinasi," Vol. 23, No. 4, Pp. 1123–1130, 2025, Doi: 10.14710/Jil.23.4.1123-1130.
- [13] Olga Leonev Vasdazara, Hosta Ardhyanta, And Sigit Tri Wicaksono, "Pengaruh Penambahan Serat Cangkang Kelapa Sawit (Palm Kernel Fiber) Terhadap Sifat Mekanik Dan Stabilitas Termal Komposit Epoksi/Serat Cangkang Kelapa Sawit," *J. Tek. Its*, Vol. 7, No. 1, Pp. 2337–3520, 2018.
- [14] A. I. Tauvana, L. Nulhakim, and E. Nurfadillah, "Synthesis and Characterization of Dual-doped (Al, Co) ZnO Nanofibers for Sustainable Piezoelectric Nanogenerator Applications," *Piston: J. Tech. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 125-131, Jan. 2026.
- [15] Tauvana, A.I., Gunawarman, G., Yetri, Y. and Wahono, B., 2026. Effect of calcination temperature on the structure of evolution of Al-Co co-doped ZnO nanofibers for high performance piezoelectric energy harvesting. *Advanced Journal of Chemistry, Section A*, 9(7), pp. 1297-1308. DOI: 10.48309/AJCA.2026.568339.2012