

Fabrikasi dan Karakterisasi Nanofiber ZnO dengan Ko-Doping Al dan Co untuk Aplikasi Nanogenerator Piezoelektrik Ramah Lingkungan

Fabrication and Characterization of Al and Co Co-Doped ZnO Nanofibers for Eco-Friendly Piezoelectric Nanogenerator Applications

Ade Irvan Tauvana^{1*}, Lukman Nulhakim¹, Elsa Nurfadillah¹

¹Jurusan Teknologi Rekayasa Manufaktur, Politeknik Teknik Indorama, Purwakarta 41152, Indonesia

Abstrak. Permintaan akan energi listrik yang bersih, ramah lingkungan, terbarukan, dan dapat diperoleh dari berbagai sumber energi mekanik terus meningkat seiring berkembangnya kebutuhan teknologi modern. Salah satu solusi potensial adalah penggunaan nanogenerator piezoelektrik, meskipun material yang digunakan masih menghadapi keterbatasan, terutama pada aspek konduktivitas listrik dan kerapatan daya yang relatif rendah. Penelitian ini difokuskan pada sintesis, karakterisasi, serta evaluasi kinerja nanofiber ZnO yang didoping aluminium (Al) dan kobalt (Co) sebagai kandidat material nanogenerator piezoelektrik yang berkelanjutan. Proses penelitian dilakukan secara eksperimental, dimulai dari persiapan larutan prekursor PVA yang dilarutkan dalam air suling, penentuan parameter elektrospinning, pembuatan membran nanofiber, hingga tahap karakterisasi dan uji performa. Proses elektrospinning dilakukan selama 10 jam untuk menghasilkan membran nanofiber ZnO terdoping AlCl₃ dan CoAc. Karakterisasi material meliputi analisis morfologi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), komposisi dengan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), struktur kristal melalui X-ray Diffraction (XRD), serta identifikasi gugus fungsional dengan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Hasil SEM menunjukkan bahwa doping Al dan Co berpengaruh pada morfologi serta mampu menurunkan diameter serat, sehingga menghasilkan struktur yang lebih seragam. Analisis EDX mengonfirmasi keberadaan unsur Al dan Co pada matriks nanofiber, membuktikan keberhasilan proses doping. Pola difraksi XRD memperlihatkan dominasi struktur amorf yang menandakan bahwa dopan berperan dalam menghambat pertumbuhan kristal ZnO. Sementara itu, hasil FTIR memastikan penguapan pelarut secara menyeluruh selama proses elektrospinning, sehingga membran terbentuk dengan kemurnian tinggi. Selain itu, keberadaan ikatan logam-oksigen teridentifikasi sebagai faktor penting dalam pembentukan struktur kristal sekaligus peningkatan sifat piezoelektrik. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa nanofiber ZnO terdoping Al dan Co berpotensi besar untuk dikembangkan sebagai material nanogenerator piezoelektrik ramah lingkungan dengan kinerja yang lebih optimal.

Kata kunci: Electrospinning; ZnO; Aluminium; Kobalt; Piezoelektrik

Abstract. The demand for clean, eco-friendly, and renewable electrical energy that can be harvested from various mechanical sources is steadily increasing. Piezoelectric nanogenerators (PENGs) are considered a promising solution; however, they still face critical limitations such as low electrical conductivity and power density. This study aims to synthesize, characterize, and evaluate the performance of aluminium (Al) and cobalt (Co) doped ZnO nanofibers as sustainable candidates for piezoelectric nanogenerators. The research was conducted experimentally, beginning with the preparation of a polyvinyl alcohol (PVA) precursor solution dissolved in deionized water, followed by electrospinning for 10 h to produce ZnO nanofiber membranes doped with AlCl₃ and CoAc. Material characterization was performed using scanning electron microscopy (SEM) to observe morphology, X-ray diffraction (XRD) to determine crystal structure, and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to confirm functional groups and solvent removal. SEM

* Penulis korespondensi: ade.irvan@pei.ac.id

observations revealed that Al and Co doping influenced the fiber morphology and reduced fiber diameter, resulting in more uniform nanostructures. EDX confirmed the successful incorporation of Al and Co elements within the nanofibers. XRD patterns indicated predominantly amorphous structures, suggesting that the dopants suppressed ZnO crystallite growth under the given synthesis conditions. Meanwhile, FTIR results demonstrated the complete evaporation of solvents during electrospinning, ensuring the purity of the membranes. Furthermore, the presence of metal–oxygen bonds was identified, which plays an essential role in crystal structure formation and contributes to the enhancement of piezoelectric properties. Overall, these findings indicate that Al- and Co-doped ZnO nanofibers synthesized via electrospinning present a promising pathway for the development of eco-friendly and high-performance piezoelectric nanogenerators.

Keywords: Electrospinning; ZnO; Aluminum; Cobalt; Piezoelectri

1. Pendahuluan

Seng oksida (ZnO), yang merupakan semikonduktor golongan II–VI, telah banyak diteliti karena memiliki celah pita langsung (direct bandgap) sebesar 3,37 eV dan energi ikatan eksiton yang tinggi, yaitu 60 meV. Karakteristik tersebut menjadikan ZnO sangat menarik untuk berbagai aplikasi, seperti optoelektronika, sensor, dan sistem piezoelektrik [1]. Di antara berbagai sifat unggulnya, perilaku piezoelektrik ZnO memiliki peranan penting dalam pengembangan nanogenerator (NG) yang mampu mengubah getaran mekanik menjadi keluaran listrik [2]. Beragam struktur nano ZnO, termasuk nanowire, nanobelt, dan nanofiber, menunjukkan respons piezoelektrik yang meningkat karena memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi [3].

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, ZnO murni masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti kekuatan polarisasi yang rendah, mobilitas pembawa muatan yang terbatas, serta rekombinasi muatan akibat cacat kristal, yang secara keseluruhan menurunkan efisiensi konversi energinya [4]. Untuk mengatasi kendala tersebut, pendekatan doping ion logam telah banyak diterapkan. Doping aluminium (Al) umumnya meningkatkan kristalinitas dan kerapatan pembawa muatan, sedangkan doping kobalt (Co) dapat memodifikasi struktur pita elektronik serta menimbulkan regangan kisi, yang keduanya berkontribusi terhadap peningkatan sifat piezoelektrik [5,6].

Penelitian terkini menunjukkan bahwa ko-doping Al dan Co memberikan efek sinergis yang meningkatkan sifat struktural maupun elektronik ZnO, sehingga menghasilkan kinerja piezoelektrik yang lebih tinggi serta ketahanan mekanik yang lebih baik. Metode electrospinning, sebagai teknik fabrikasi yang sederhana dan dapat diskalakan, memungkinkan pembentukan nanofiber ZnO satu dimensi dengan morfologi yang terkontrol dan distribusi dopan yang seragam, sehingga berpotensi besar untuk digunakan pada perangkat pemanen energi yang fleksibel [7].

Penelitian ini difokuskan pada pengaruh ko-doping Al–Co terhadap sifat struktural dan morfologi nanofiber ZnO yang disintesis melalui metode electrospinning. Karakterisasi dilakukan menggunakan X-ray diffraction (XRD) dan scanning electron microscopy (SEM) untuk mengevaluasi kristalinitas, diameter serat, serta keseragaman morfologi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan nanogenerator piezoelektrik berkinerja tinggi berbasis nanofiber ZnO yang didoping.

2. Metode

Seng asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Merck), aluminium klorida heksahidrat ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Merck), kobalt asetat tetrahidrat ($\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich), polivinil alkohol (PVA, Mw 72.000, Merck), dan air deionisasi digunakan sebagai bahan awal tanpa pemurnian lebih lanjut. Larutan PVA 10 wt% disiapkan dengan melarutkan polimer dalam air deionisasi pada suhu 70 °C selama 4 jam, kemudian didiamkan pada suhu ruang selama 8 jam [8–9]. Secara terpisah, larutan AlCl_3 dan CoAc dibuat dengan melarutkan masing-masing 4 g garam dalam 20 g air deionisasi dan diaduk pada suhu 70 °C selama 1 jam. Larutan garam yang telah disiapkan kemudian dicampurkan dengan larutan PVA dengan

perbandingan 1:4 wt%, diaduk kembali pada suhu 70 °C selama 8 jam, dan selanjutnya dibiarkan untuk mencapai kestabilan selama 24 jam. Larutan prekursor dengan rasio Al:Co sebesar 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100 wt% diperoleh dan digunakan dalam proses electrospinning [10-12].

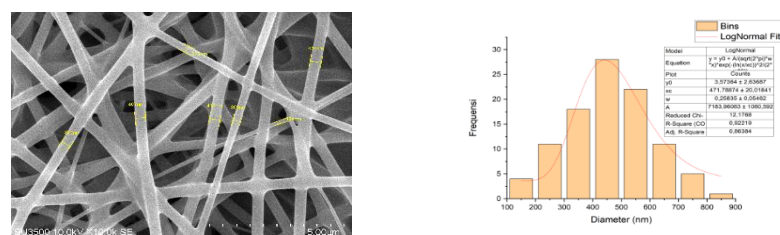
Proses *electrospinning* dilakukan menggunakan spuit berkapasitas 5 mL yang dihubungkan dengan pompa suntik (*syringe pump*) dan dilengkapi dengan jarum baja tahan karat berdiameter 0,65 mm yang terpasang pada sumber tegangan tinggi. Nanofiber diendapkan pada membran nonwoven yang dipasang pada *rotating drum collector*. Parameter operasional dijaga pada kondisi tegangan 13 kV, jarak antara ujung jarum dan kolektor 13 cm, laju aliran larutan 0,5 mL/jam, kecepatan putaran drum 125 rpm, dan kelembapan relatif sebesar 58% [13,14].

Morfologi dan karakteristik permukaan nanofiber diamati menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM), sedangkan diameter serat diukur dari citra SEM menggunakan perangkat lunak ImageJ dan Origin [15]. Analisis *X-ray diffraction* (XRD) dilakukan untuk menentukan fasa kristal, ukuran kristalit, serta derajat kristalinitas material [16].

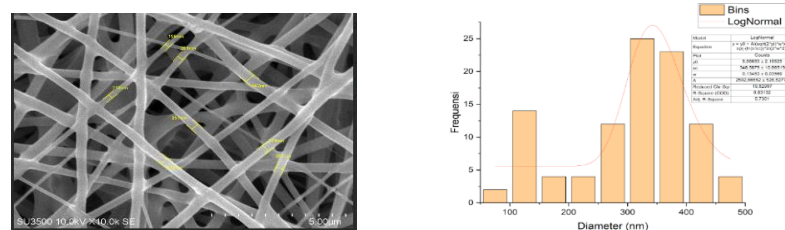
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Morfologi SEM dan Diameter Serat

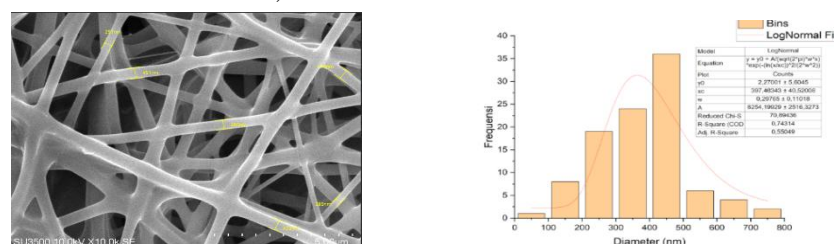
Hasil observasi menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa nanofiber terbentuk dengan baik dan bebas dari cacat berupa *bead*, dengan diameter rata-rata berada pada rentang 341 hingga 365 nm. Dibandingkan dengan ZnO murni, sampel yang diberi ko-doping Al/Co memperlihatkan permukaan yang lebih halus serta struktur yang lebih padat, yang mengindikasikan perkembangan serat yang lebih baik dan kemungkinan peningkatan efisiensi konversi energi mekanik menjadi energi listrik [17–20]. Nilai diameter serat yang terukur untuk nanofiber ZnO dengan ko-doping ditampilkan pada Tabel 1 dan diilustrasikan pada Gambar 1.



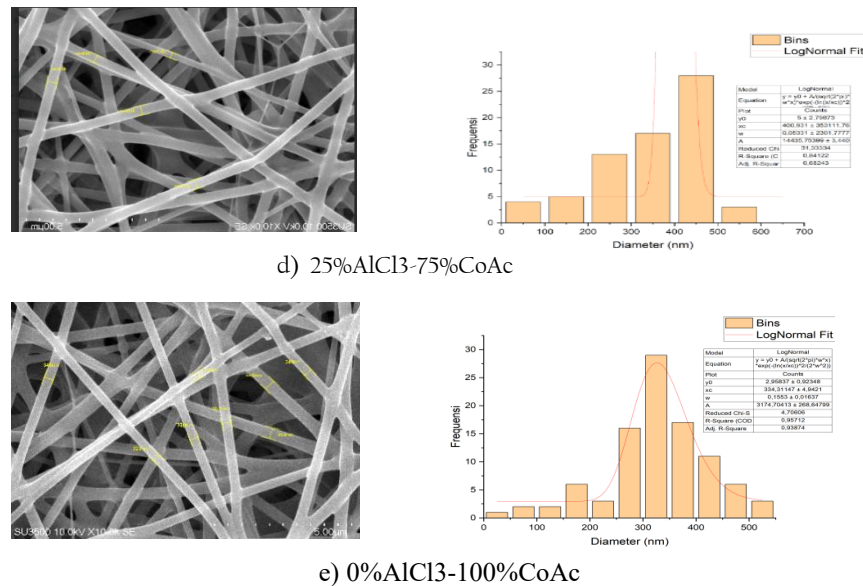
a) 100%AlCl₃-0%CoAc



b) 75%AlCl₃-25%CoAc



c) 50%AlCl₃-50%CoAc



Gambar 1. Analisis morfologi SEM (a) 100%AlCl₃-0%CoAc (b) 75%AlCl₃-25%CoAc (c) 50%AlCl₃ 50%CoAc (d) 25%AlCl₃-75%CoAc (e). 0%AlCl₃-100 %CoAc

Analisis SEM menunjukkan bahwa nanofiber yang dihasilkan memiliki bentuk serat yang seragam tanpa pembentukan bead, dengan diameter rata-rata berkisar antara 341 hingga 365 nm. Nanofiber yang diberi ko-doping memperlihatkan permukaan yang lebih halus dan struktur yang lebih padat dibandingkan ZnO tanpa doping, yang mengindikasikan peningkatan dalam proses pembentukan serat serta potensi peningkatan efisiensi konversi energi mekanik menjadi energi listrik [21–24].

Tabel 1. Diameter Nanofiber ZnO dengan Penambahan Al-Co

Komposisi (AlCl ₃ -CoAc)	Diameter Maksimum (nm)	Diameter Minimum (nm)	Diameter Rata-rata (nm)
100% AlCl ₃ - 0% CoAc	424	138	341
75% AlCl ₃ - 25% CoAc	442	210	344
50% AlCl ₃ - 50% CoAc	451	269	363
25% AlCl ₃ - 75% CoAc	411	257	365
0% AlCl ₃ - 100% CoAc	458	275	361

3.2 Analisis XRD: Ukuran Kristalit dan Kristalinitas

Ukuran kristalit dan tingkat kristalinitas nanofiber ZnO ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ukuran Kristalit dan Kristalinitas Nanofiber ZnO

Sampel (Al:Co)	Ukuran Kristalit (nm)	Kristalinitas (%)
100:0 (Al-ZnO)	13,18	87
75:25	35,91	86
50:50	39,04	100
25:75	13,52	98
0:100 (Co-ZnO)	16,68	76

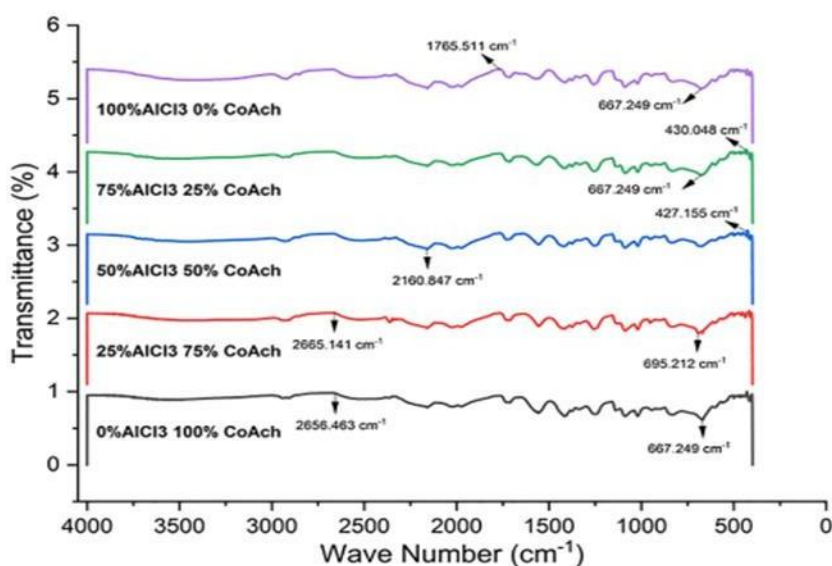
Ukuran kristalit menunjukkan peningkatan pada kondisi ko-doping yang seimbang, terutama pada rasio **50:50**, yang juga menghasilkan tingkat kristalinitas tertinggi. Temuan serupa telah

dilaporkan oleh beberapa peneliti [25–27] yang mengamati peningkatan kristalinitas pada *nanorod* ZnO yang didoping aluminium, serta oleh peneliti lain [28–30] yang menyoroti peran dopan dalam mengatur pertumbuhan kristal. Aluminium berperan dalam meningkatkan keteraturan orientasi kristal melalui penyelarasan struktur kisi yang lebih baik, sedangkan kobalt menimbulkan regangan kisi (*lattice strain*) yang memodifikasi struktur pita energi. Hasil ini sejalan dengan laporan sebelumnya [31,32], yang menunjukkan bahwa kombinasi kedua dopan tersebut dapat memberikan efek sinergis terhadap peningkatan kualitas kristal dan sifat elektronik ZnO.

3.3 Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Gambar 2 menunjukkan spektrum FTIR dari nanofiber ZnAc:AlCl₃:PVA dan ZnAc:CoAc:PVA. Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada nanofiber ZnO yang didoping dengan AlCl₃ dan CoAc dalam rentang bilangan gelombang 500–4000 cm⁻¹.

Metode FTIR ini digunakan untuk mendeteksi interaksi kimia antara prekursor ZnO, dopan (Al dan Co), serta matriks polimer PVA. Puncak-puncak serapan yang muncul pada spektrum memberikan informasi mengenai ikatan kimia seperti Zn–O, O–H, C=O, dan C–H, yang berperan penting dalam proses pembentukan dan struktur akhir nanofiber ZnO yang dihasilkan.



Gambar 2. Analisis Morfologi SEM dari: (a) 100% AlCl₃ – 0% CoAc, (b) 75% AlCl₃ – 25% CoAc, (c) 50% AlCl₃ – 50% CoAc, (d) 25% AlCl₃ – 75% CoAc, dan (e) 0% AlCl₃ – 100% CoAc

Beberapa pita serapan (*absorption bands*) berhasil diidentifikasi dari hasil analisis FTIR. Pita pada rentang 2656–2665 cm⁻¹, yang muncul pada sampel dengan kandungan CoAc lebih tinggi, berhubungan dengan getaran regangan O–H/C–H yang berasal dari pelarut atau senyawa prekursor yang tersisa. Puncak pada 2160 cm⁻¹, yang hanya terdeteksi pada komposisi 50% AlCl₃ – 50% CoAc, dikaitkan dengan getaran C≡N atau C≡C dari gugus molekul kompleks. Sinyal pada 1765 cm⁻¹, yang teramati secara eksklusif pada sampel 100% AlCl₃ – 0% CoAc, dihubungkan dengan regangan C=O dari gugus karbonil.

Selain itu, pita serapan lebar di sekitar 667–695 cm⁻¹ muncul pada semua komposisi dan berkaitan dengan getaran ikatan logam–oksigen (M–O) seperti Zn–O, Al–O, atau Co–O. Pita pada 430–427 cm⁻¹, yang terlihat pada komposisi 75% AlCl₃ – 25% CoAc dan 50% AlCl₃ – 50% CoAc, menunjukkan kemungkinan terbentuknya ikatan antarlogam Al–O atau Co–O.

Dengan meningkatnya konsentrasi CoAc, pita khas pada 2656 cm^{-1} semakin jelas, dan pita pada 667 cm^{-1} menjadi lebih lebar, yang mencerminkan adanya perubahan dalam kristalinitas serta interaksi molekuler. Sebaliknya, pada komposisi dengan fraksi AlCl_3 yang lebih tinggi, muncul getaran khas pada 1765 cm^{-1} yang menandakan terbentuknya jenis ikatan atau fasa tertentu.

Pita serapan di sekitar 667 cm^{-1} berfungsi sebagai indikator penting pembentukan fasa logam–oksigen, yang berhubungan erat dengan struktur kristal dan sifat piezoelektrik nanofiber. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [33,34], yang melaporkan bahwa komposisi dopan berpengaruh signifikan terhadap variasi pita serapan dalam spektrum FTIR.

4. Kesimpulan

Ko-doping dengan Al dan Co terbukti meningkatkan kualitas struktural serta morfologi nanofiber ZnO. Pada rasio optimal 50:50, nanofiber menunjukkan kristalinitas yang meningkat, jumlah cacat yang berkurang, dan diameter serat yang seragam, sekaligus mempertahankan struktur wurtzite. Karakteristik tersebut menunjukkan potensi kuat nanofiber ZnO yang didoping Al/Co untuk aplikasi pemanenan energi piezoelektrik dan perangkat elektronik fleksibel.

Daftar Pustaka

- [1] Rajaboina RK, Khanapuram UK, Vivekananthan V. Crystalline porous material-based nanogenerators: Recent progress, applications, challenges, and opportunities. *Small*. 2024. doi:10.1002/smll.202306209
- [2] Sebastian T, Clemens F. Piezoelectric application of metal oxide nanofibers. In: *Metal oxide-based nanofibers and their applications*. 2022. p. 215-246. doi:10.1016/B978-0-12-820629-4.00002-3
- [3] Padha B, Verma S, Arya S. Piezoelectric nanogenerators. In: *Nanogenerators*. 1st ed. CRC Press; 2022. p. 44. doi:10.1201/9781003187615-6
- [4] Tripathy A, Alluri NR, Balasubramaniam S, Ramadoss A. Functionalized nanofibers for piezoelectric energy harvesting applications. In: Deshmukh A, Ray SS, Gupta SK, editors. *Functionalized nanofibers: synthesis and industrial applications*. Elsevier; 2023. p. 719-751. doi:10.1016/B978-0-323-99461-3.00020-0
- [5] Kim DH, Bhunia R. Piezoelectric materials-based nanogenerators. *Mater Res Proc*. 2023. doi:10.21741/9781644902097
- [6] Oflaz K, Özyaytekin İ. Analysis of electrospinning and additive effect on β phase content of electrospun PVDF nanofiber mats for piezoelectric energy harvester nanogenerators. *Smart Mater Struct*. 2022. doi:10.1088/1361-665X/ac8f78
- [7] Sha Z, Boyer C, Li G, Yu Y, Allieux FM, Kalantar-Zadeh K, et al. Electrospun liquid metal/PVDF-HFP nanofiber membranes with exceptional triboelectric performance. *Nano Energy*. 2021;92:106713. doi:10.1016/j.nanoen.2021.106713
- [8] Bairagi S, Kumar C, Babu A, Aliyana AK, Stylios G, Shahid-ul-Islam, et al. Wearable nanocomposite textile-based piezoelectric and triboelectric nanogenerators: progress and perspectives. *Nano Energy*. 2023;118:108962. doi:10.1016/j.nanoen.2023.108962
- [9] Das NK, Nanda OP, Badhulika S. Piezo/triboelectric nanogenerator from lithium-modified zinc titanium oxide nanofibers to monitor contact in sports. *ACS Appl Nano Mater*. 2023. doi:10.1021/acsanm.2c0473
- [10] Feng Z, Wang K, Liu Y, Han B, Yu D-G. Piezoelectric enhancement of piezoceramic nanoparticle-doped PVDF/PCL core-sheath fibers. *Nanomaterials*. 2023;13(7):1243. doi:10.3390/nano13071243
- [11] Chen YQ, Zheng XJ, Feng X. The fabrication of vanadium-doped ZnO piezoelectric nanofiber by electrospinning. *Nanotechnology*. 2010;21(5):055708. doi:10.1088/0957-4484/21/5/055708
- [12] Choi D, Lee KY, Lee KH, Kim ES, Kim TS, Lee SY, et al. Piezoelectric touch-sensitive flexible hybrid energy harvesting nanoarchitectures. *Nanotechnology*. 2010;21(40):405503. doi:10.1088/0957-4484/21/40/405503
- [13] Chung SY, Kim S, Lee JH, Kim K, Kim SW, Kang CY, et al. All solution processed flexible thin film piezoelectric nanogenerator. *Adv Mater*. 2012;24(45):6022-6027. doi:10.1002/adma.201202708
- [14] Dong Z, Kennedy SJ, Wu Y. Review electrospinning materials for energy-related applications and devices. *J Power Sources*. 2011;196:4886-4904. doi:10.1016/j.jpowsour.2011.01.090
- [15] Fang TH, Kang SH. Physical properties of ZnO:Al nanorods for piezoelectric nanogenerator application. *J Nanoeng Nanomanuf*. 2010;6(5):505-511. doi:10.2174/157341310797574961
- [16] Lee DY, Cho JE, Cho NI, Lee MH, Lee SJ, Kim BY. Characterization of electrospun aluminum-doped zinc oxide nanofibers. *Thin Solid Films*. 2008;517:1262-1267. doi:10.1016/j.tsf.2008.05.027
- [17] Pham QP, Sharma U, Mikos AG. Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue engineering applications: a review. *Tissue Eng*. 2006;12(5):1197-1211. doi:10.1089/ten.2006.12.1197
- [18] Ren H, Ding Y, Jiang Y, Xu F, Long Z, Zhang P. Synthesis and properties of ZnO nanofibers prepared by electrospinning. *J Sol-Gel Sci Technol*. 2009;52(2):287-290. doi:10.1007/s10971-009-2030-2
- [19] Shmueli Y, Shter GE, Assad O, Haick H. Structural and electrical properties of single Ga/ZnO nanofibers synthesized by electrospinning. *J Mater Res*. 2012;27:1672-1679. doi:10.1557/jmr.2012.118
- [20] Sholahuddin I. Fabrikasi nanogenerator ZnO dan AZO berbasis serat nano dengan metode electrospinning. 2013.
- [21] Sigmund W, Yuh J, Park H, Maneeratana V, Pyrgiotakis G, Daga A, et al. Processing and structure relationships in electrospinning of ceramic fiber systems. *J Am Ceram Soc*. 2006;89:395-407. doi:10.1111/j.1551-2916.2005.00807.x

- [22] Suyitno S, Purwanto A, Hidayat RLLG, Sholahudin I, Yusuf M, et al. Fabrication and characterization of zinc oxide-based electrospun nanofibers for mechanical energy harvesting. *J Nanotechnol Eng Med*. 2014. doi:10.1115/1.4027447
- [23] Wang ZL, Wang X, Song J, Liu J, Gao Y. Piezoelectric nanogenerators for self-powered nanodevices. *IEEE Pervasive Comput*. 2008;7:49-55. doi:10.1109/MPRV.2008.14
- [24] Indra A, Gunawarman, Affi J, Mulyadi IH, Wiyanto Y. Physical and mechanical properties of hydroxyapatite ceramics with a mixture of micron and nano-sized powders: optimising the sintering temperatures. *Ceram Silikat*. 2022;65(3):224-234. doi:10.13168/cs.2021.0022
- [25] Yang X, Shao C, Guan H, Li X, Gong J. Preparation and characterization of ZnO nanofibers by using electrospun PVA/zinc acetate composite fiber as precursor. *Inorg Chem Commun*. 2004;7:176-178. doi:10.1016/j.inoche.2003.10.035
- [26] T, Fu Y, Zhao Y, Xing L, Xue X. Ga-doped ZnO nanowire nanogenerator as self-powered/active humidity sensor with high sensitivity and fast response. *J Alloys Compd*. 2015;648:571-576. doi:10.1016/j.jallcom.2015.07.03
- [27] Tauvana, A. I., Gunawarman, Yetri, Y., Wahono, B., & Nulhakim, L. (2025). Synthesis and characterisation of ZnO-based nanofibre membranes doped with aluminium and cobalt using the electrospinning method. *Ceramics-Silikaty*, 69(3), 374-380. <https://doi.org/10.13168/cs.2025.0021>
- [28] Ilhamdi, Gunawarman, Affi J, Susanti O, Juliadmi D, Oktaviana D, Tauhid M. Effect of bilayer nano-micro hydroxyapatite on the surface characteristics of implanted Ti-6Al-4V ELI. *Int J Automot Mech Eng*. 2023;20(3):10758-10766. doi:10.15282/ijame.20.3.2023.19.0833
- [30] Tauvana AI, Subekti MI. Pengaruh matrik resin-epoxy terhadap kekuatan impak dan sifat fisis komposit serat nanas. *J Polimesin*. 2020;18(2):99-104. doi:10.30811/jpl.v18i2.1841
- [31] Wang ZL, et al. ZnO nanofibers for piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*. 2020;66:104944. doi:10.1155/2015/165631
- [32] Liu J, et al. ZnO nanofibers for piezoelectric energy harvesting. *J Mater Chem A*. 2020;8(3):1314-1322. doi:10.1039/C9TA12523A
- [33] Zhang Y, et al. ZnO nanofibers for piezoelectric energy harvesting. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2022;14(10):12434-12443. doi:10.1016/j.nanoen.2019.104944
- [34] Wang ZL, Song J, Liu Y, Chen L. ZnO nanofibers prepared by electrospinning for energy harvesting applications. *J Mater Chem A*. 2020;8(3):1314-1322. doi:10.1039/C9TA11524A