

Karakterisasi Sinyal Sensor Piezoelektrik Komposit Nano Serat akibat Tumbukan Balistik

Ananda Maulana Putra Sanjaya^{1*}, Sovian Aritonang²

^{1,2)} Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Science,
Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, Indonesia

*Email: asanjayamaulana24@gmail.com

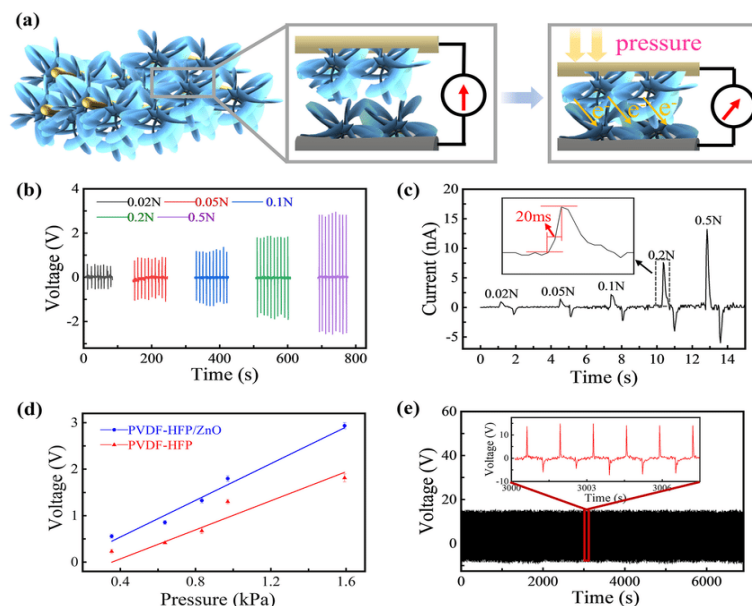
ABSTRACT

This study investigates the characterization and operational mechanism of piezoelectric sensors based on nanofiber composites under high-velocity impact conditions. These sensors utilize the direct piezoelectric effect of PVDF and its copolymer P(VDF-TrFE), enhanced with inorganic nanofillers such as ZnO, BaTiO₃, and CNTs. Through the electrospinning process, nanoscale fibers with molecular chains aligned to the electric field are produced, promoting the formation of the β -phase and enhancing spontaneous polarization. A systematic literature analysis reveals that the addition of nanofillers significantly increases the piezoelectric coefficient (d_{33}), signal amplitude, and overall sensor sensitivity to dynamic deformation. However, variations in electrode configuration, fiber orientation, filler concentration, and testing methodology lead to discrepancies in quantitative results across studies. Furthermore, explicit Finite Element Method (FEM) modeling is employed to understand the stress-wave propagation and the time-resolved conversion of mechanical to electrical energy. The integration of experimental and numerical approaches proves effective for reconstructing sensor responses under ballistic impact, paving the way for the development of faster, more sensitive, and adaptive impact detection systems in future smart structural applications.

Keywords: Piezoelectric sensor, nanofiber composite, PVDF, P(VDF-TrFE), ZnO, Finite Element Method (FEM), β -phase, ballistic impact, sensitivity, electrospinning

PENDAHULUAN

Sensor piezoelektrik adalah perangkat yang memanfaatkan efek piezoelektrik langsung, yaitu kemampuan bahan untuk menghasilkan muatan listrik/tegangan ketika dikenai deformasi mekanik (tekanan, getaran, impak). Prinsip dasar ini memungkinkan transduksi langsung dari energi mekanik ke sinyal listrik tanpa sumber daya eksternal, sehingga sensor piezoelektrik sering digunakan sebagai elemen self-powered untuk deteksi dinamik [11].



Gambar 1. (a) Diagram skema sifat piezoelektrik serat komposit PVDF-HFP/ZnO. (b) Tegangan rangkaian terbuka sensor sensitif tinggi. (c) Arus hubung singkat sensor sensitif tinggi. (d) Kurva hubungan tegangan rangkaian terbuka dan tekanan sensor sensitif tinggi dan membran serat PVDF-HFP. (e) Lebih dari 5000 siklus uji ketahanan untuk sensor sensitif tinggi. [14]

Bahan piezoelektrik yang umum dipakai terbagi menjadi dua kelompok besar: keramik (mis. PZT, BaTiO₃, KNN) yang umumnya memiliki koefisien piezoelektrik tinggi tetapi rapuh, dan polimer/komposit (mis. PVDF, P(VDF-TrFE) dan kompositnya dengan nano-filler seperti ZnO, BaTiO₃, CNT) yang lebih fleksibel, ringan, dan cocok untuk aplikasi wearable atau permukaan lengkung. Pengembangan dekade terakhir menekankan material nanostruktur dan komposit untuk meningkatkan fraksi fase β (pada PVDF) dan meningkatkan respons listrik pada deformasi [12], [13].

Komposit nano-serat adalah material berbentuk anyaman atau membran tipis yang tersusun dari serat berdiameter nanometre hingga mikrometre, di mana serat tersebut merupakan kombinasi (komposit) dari polimer dan satu atau lebih fasa nanomaterial (mis. nanopartikel keramik, *nanotube*, graphene, atau partikel semikonduktor). Struktur berpori dan rasio luas permukaan-terhadap-volume yang sangat tinggi pada nanoserat memungkinkan pengaturan sifat mekanik, listrik, termal, dan permukaan melalui modifikasi komposisi serta arsitektur mikroskala/ nanoskala [6], [15-16].

Di banyak aplikasi rekayasa struktural dan pertahanan, terjadi fenomena tumbukan atau dampak berkecepatan tinggi (*high-strain-rate impact*) yang dapat menyebabkan kerusakan mendadak atau degradasi material. Untuk mendeteksi dan memantau kejadian dampak tersebut secara cepat dan andal, diperlukan sistem sensor yang mampu merespon deformasi ekstrem dengan kecepatan tinggi dan menghasilkan sinyal elektrik yang dapat dianalisis. Sensor piezoelektrik berbasis material komposit nano-serat (misalnya polimer piezoelektrik yang diperkuat dengan nanopartikel atau nanofiller) menjadi kandidat menarik karena kombinasi fleksibilitas, ukuran kecil dan kemampuan konversi mekanik-elektrik yang tinggi. Sebagai contoh, membran nanofiber polimer piezoelektrik telah digunakan untuk aplikasi sensing tekanan dan deformasi ringan [1].

Namun, ketika diaplikasikan pada kondisi dampak balistik, tumbukan sangat cepat maka tantangan meningkat: gelombang tegangan (*stress-wave*) merambat sangat cepat, interaksi material sangat kompleks, dan sinyal piezoelektrik yang dihasilkan bersifat sangat transient dan mungkin nonlinear. Dengan demikian, karakterisasi sinyal yang dihasilkan sensor piezoelektrik komposit nano-serat dalam konteks tumbukan balistik menjadi sangat penting secara ilmiah dan praktis untuk pengembangan sistem deteksi dampak, proteksi struktural dan sensor cerdas. Rasionalnya adalah: dengan memahami hubungan kuantitatif antara parameter tumbukan (energi, kecepatan, lokasi) dan sinyal keluaran sensor, maka desain sensor bisa dioptimalkan untuk meningkatkan sensitivitas, kecepatan respon, daya tahan dan keandalan operasional.

Berdasarkan urgensi di atas, kajian literatur ini bertujuan untuk:

1. Mengukur dan menganalisis sinyal listrik yang dihasilkan sensor tersebut ketika dikenai tumbukan balistik terkontrol (bervariasi massa/kecepatan proyektil).
2. Mengembangkan hubungan kuantitatif antara parameter tumbukan (energi dampak, durasi, lokasi) dan fitur sinyal (amplitudo puncak, durasi sinyal, spektrum frekuensi, waktu datang gelombang) serta memvalidasi melalui pemodelan numerik (FEM) untuk menjelaskan mekanisme transfer energi-gelombang ke sinyal piezo.

Dalam dekade terakhir terdapat kemajuan signifikan dalam material sensor piezoelektrik berbasis nanofiber. Sebagai contoh, kajian review oleh Zhang et al. menyimpulkan bahwa nanofiber elektrospun dari PVDF-based dengan filler doping telah digunakan untuk meningkatkan respons piezo melalui rekayasa struktur dan material. Selanjutnya, Han et al. melaporkan sensor dampak berbasis film tipis komposit PVDF-TrFE dengan nano-ZnO, yang menunjukkan peningkatan sensitivitas hingga ~5,5 kali dibanding film murni dalam penggunaan dampak ringan. Xiong et al. melakukan fabrikasi membran nanofiber PVDF/DA dengan struktur dua-dimensi jaringan dan menunjukkan respons sangat baik pada beban 1,5–40 N [1], [2], [3].

Material piezoelektrik komposit juga diaplikasikan ke struktur logam: penelitian pada paduan aluminium AA7075 yang diberi partikel piezo PZT menunjukkan bahwa material ini dapat berfungsi sebagai “smart composite” sensor beban/dampak. Dari sisi aplikasi sensing dampak atau monitoring struktur, meskipun banyak digunakan sensor optik seperti FBG untuk dampak kecepatan rendah, namun untuk dampak kecepatan tinggi (balistik) dan menggunakan sensor piezoelektrik komposit nano-serat, literatur masih terbatas. Sebagai contoh, monitoring dampak kecepatan rendah pada pipa komposit menggunakan FBG sensor telah dipublikasikan [4], [5].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode analisis literatur sistematis (*systematic literature review*) untuk mengkaji perkembangan penelitian terkini mengenai karakterisasi sinyal sensor piezoelektrik berbasis komposit nano serat terhadap fenomena tumbukan atau dampak balistik. Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai tren, pendekatan eksperimental, serta hasil-hasil pengukuran yang telah dilaporkan dalam satu dekade terakhir. Proses pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran artikel ilmiah dari basis data MDPI, RSC, SpringerOpen, Elsevier *open access*, dan AIP dengan rentang waktu publikasi antara tahun 2015 hingga 2025. Kata kunci yang digunakan meliputi “*piezoelectric sensor*”, “*nanofiber composite*”, “*impact response*”, “*ballistic testing*”, dan “*signal characterization*”.

Seleksi literatur dilakukan berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat, di mana artikel yang dipilih harus merupakan hasil penelitian eksperimental atau simulasi yang relevan dengan topik komposit nano serat piezoelektrik untuk deteksi dampak. Setiap artikel yang memenuhi kriteria kemudian dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi variabel yang digunakan, material penyusun, metode fabrikasi, konfigurasi sensor, jenis pembebanan balistik, serta karakteristik sinyal yang dihasilkan. Selanjutnya, data yang diperoleh dari berbagai literatur dibandingkan secara kritis untuk menemukan pola umum, perbedaan hasil, serta keterbatasan penelitian terdahulu. Tahap ini bertujuan mengidentifikasi *research gap* yang masih terbuka, khususnya dalam hal hubungan antara parameter mikrostruktural nano serat dengan performa piezoelektrik pada kondisi tumbukan berenergi tinggi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Material dan Fabrikasi

Electrospinning PVDF/P(VDF-TrFE) tetap menjadi metode yang paling dominan dan efektif dalam pembuatan nanofiber piezoelektrik dibandingkan teknik lain seperti *solvent casting*, *melt pressing*, maupun *phase inversion*. Proses *electrospinning* memungkinkan pembentukan serat dengan diameter dalam orde ratusan nanometer hingga beberapa mikrometer, yang menghasilkan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi serta orientasi rantai molekul yang sejajar dengan arah medan listrik selama proses penarikan. Hal ini secara langsung meningkatkan pembentukan fase β (β -phase), yaitu fase kristalin dengan orientasi dipol polar sejajar yang bertanggung jawab atas sifat piezoelektrik tertinggi pada PVDF dan kopolimer turunannya. Dengan meningkatnya fraksi β -fase, kemampuan material untuk mengubah deformasi mekanik menjadi sinyal listrik juga meningkat signifikan [1].

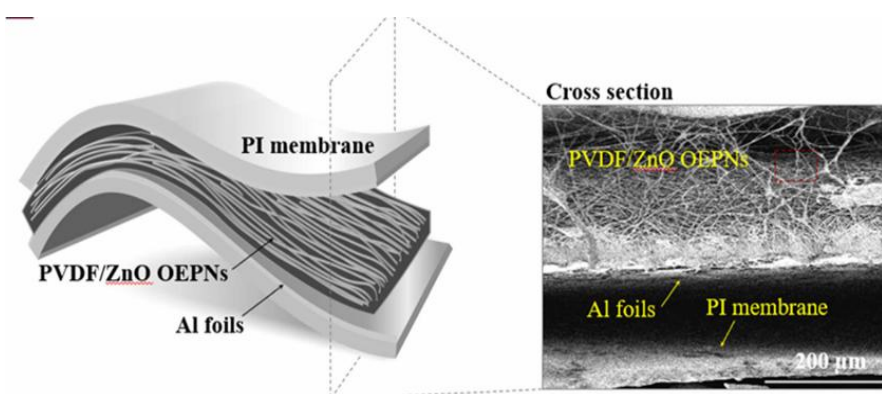
Tabel 1. Nanomaterial umum yang digunakan untuk meningkatkan kandungan fase β

	Nama Nanomaterial	Cara Meningkatkan Fase β
Nanomaterial anorganik	LiCl	Peningkatan konduktivitas larutan
	AgNWs	Peningkatan konduktivitas larutan
	ZnO	Peningkatan konduktivitas larutan
	BaTiO ₃	Medan dipol lokal di permukaan
	KNN	Agen beta-nukleasi dalam PVDF
Nanomaterial organik	Graphene	Interaksi elektro
	CNTs	Polarisasi antarmuka
	[BMIM][PF6]	Interaksi yang kuat
	[OMD]Br	Interaksi yang kuat
	2,3-dihydrodecafluoropentane	Ikatan hidrogen

Selain itu, kombinasi antara PVDF dan P(VDF-TrFE) dalam komposisi tertentu memberikan stabilitas termal dan polarisasi spontan yang lebih baik dibandingkan PVDF murni, menjadikannya ideal untuk aplikasi sensor yang beroperasi pada kondisi dinamik tinggi seperti tumbukan balistik atau getaran impulsif. Berbagai studi eksperimental dan tinjauan literatur dalam sepuluh tahun terakhir melaporkan bahwa elektrospon nanofiber menunjukkan *output* tegangan dan sensitivitas

yang lebih tinggi hingga beberapa kali lipat dibandingkan film hasil *solution casting* konvensional. Peningkatan ini disebabkan oleh orientasi molekul yang lebih baik, kristalinitas β yang dominan, serta distribusi tegangan yang lebih homogen dalam struktur serat berukuran nano [6].

Penambahan nanofiller anorganik seperti *zinc oxide* (ZnO), barium titanate (BaTiO_3), carbon nanotube (CNT), dan aluminum nitride (AlN) ke dalam matriks polimer piezoelektrik seperti PVDF atau kopolimernya P(VDF-TrFE) telah dilaporkan secara konsisten mampu meningkatkan koefisien piezoelektrik (d_{33}) dan output tegangan respons sensor. Peningkatan ini terutama berasal dari dua mekanisme utama, yaitu peningkatan polarisasi lokal dan perbaikan transfer tegangan antar fase dalam struktur komposit. Secara mikroskopik, partikel nanofiller berfungsi sebagai nucleation center bagi pembentukan fase β PVDF yang memiliki orientasi dipol sejajar, sekaligus meningkatkan perataan rantai molekul akibat interaksi elektrostatik di antarmuka polimer–filler. Selain itu, nanofiller yang memiliki sifat dielektrik tinggi seperti ZnO dan BaTiO_3 menciptakan daerah dengan medan listrik lokal yang kuat, yang mempercepat proses *dipole alignment* selama polarisasi atau elektrospinning, sehingga menghasilkan respons piezoelektrik yang lebih besar [7], [8].



Gambar 2. Pengaruh nano ZnO terhadap sifat piezoelektrik PVDF/ZnO OPENs.

Karakteristik Elektromekanik dan Sensitivitas

Berbagai artikel penelitian melaporkan adanya peningkatan signifikan pada amplitudo sinyal dan energi total keluaran sensor piezoelektrik ketika material matriks PVDF atau P(VDF-TrFE) dimodifikasi dengan nanofiller piezoelektrik atau semikonduktor seperti ZnO, BaTiO_3 , dan CNT. Penambahan filler tersebut tidak hanya memperkuat medan internal dan meningkatkan polarisasi lokal, tetapi juga memperbaiki *transfer stres* antar fase saat terjadi deformasi akibat tumbukan atau tekanan dinamik. Akibatnya, sinyal listrik yang dihasilkan memiliki amplitudo puncak yang lebih tinggi serta distribusi energi yang lebih stabil dibandingkan sensor tanpa filler. Peningkatan ini telah diamati baik pada uji *dynamic impact* berkecepatan rendah hingga sedang maupun pada uji *ballistic drop-weight*, di mana sensitivitas sensor meningkat seiring dengan meningkatnya fraksi filler konduktif atau piezoelektrik [6], [9].

Namun, meskipun tren peningkatan performa ini konsisten secara kualitatif, nilai numerik dari parameter piezoelektrik utama seperti koefisien d_{33} , tegangan puncak per gaya (V/N), atau kepadatan energi sinyal menunjukkan variasi yang sangat besar antar studi. Variabilitas ini terutama disebabkan oleh perbedaan dalam konfigurasi elektroda, orientasi serat, konsentrasi filler, serta metodologi pengukuran yang digunakan oleh masing-masing peneliti. Misalnya, konfigurasi elektroda planar menghasilkan distribusi medan listrik yang berbeda dibandingkan elektroda *interdigitated* (IDE), sehingga mempengaruhi hasil pengukuran d_{33} secara langsung. Demikian pula, orientasi serat terhadap arah gaya impak menentukan arah dominan polarisasi dan efisiensi konversi energi mekanik menjadi listrik [6], [9].

Selain itu, konsentrasi filler yang digunakan dalam berbagai penelitian bervariasi luas, dari kurang dari 0,5 wt% hingga lebih dari 10 wt%, menghasilkan perilaku piezoelektrik yang berbeda karena perubahan sifat dielektrik dan viskoelastis material. Pada konsentrasi tinggi, aglomerasi filler dapat menurunkan homogenitas medan lokal, sementara pada konsentrasi rendah efek

penguatan polarisasi menjadi minimal. Faktor lain yang turut memengaruhi hasil adalah metode polarisasi (poling) dan kondisi lingkungan seperti kelembapan serta suhu saat pengukuran [8].

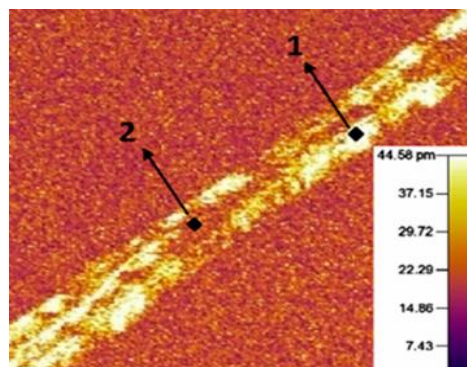
Tabel 2. $F(\beta)$ dan permitivitas relatif serat nano ZnO/PVDF dengan berbagai konsentrasi berat ZnO, diukur pada 1 kHz. [8]

Kandungan ZnO (wt%)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
$F(\beta)$ (%)	83.9	85.6	84.2	84.5	85.5
Permitivitas Relatif (ϵ_r)	23.3	35.8	26.7	28.9	35.3

Tabel 3. Tegangan keluaran rata-rata dan deviasi standar relatif dari nanogenerator ZnO/PVDF/PDMS pada berbagai konsentrasi ZnO, dievaluasi di bawah stimulasi mekanis periodik. [8]

Kandungan ZnO (wt%)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
Tegangan Rata-rata (V)	5.45	7.30	5.06	4.50	5.65
Deviasi Standar Relatif (%)	12.2	10.8	14.3	23.3	43.4

Ketiadaan standar pengujian dan kalibrasi universal menyebabkan perbandingan kuantitatif antar penelitian menjadi sulit dilakukan. Beberapa studi menggunakan uji tekan statis dengan sensor d33 meter, sementara yang lain mengandalkan pengujian dinamis berbasis osiloskop dan sistem akuisisi data berkecepatan tinggi. Akibatnya, hasil yang dilaporkan dapat berbeda hingga satu orde magnitudo, meskipun komposisi materialnya serupa. Oleh karena itu, dalam konteks analisis literatur ini, evaluasi dilakukan lebih menekankan pada tren peningkatan performa dan hubungan antar variabel material–struktur–respon sinyal, dibandingkan pada angka absolut dari setiap parameter. Standarisasi metode pengukuran dan kalibrasi menjadi aspek penting yang perlu dikembangkan di masa depan agar karakterisasi sinyal piezoelektrik komposit nano serat dapat dibandingkan secara lebih akurat dan reproducible [6].



Gambar 3. Gambar amplitudo mikroskop gaya piezoelektrik (PFM). (Titik 1 terletak di wilayah yang menunjukkan kontras terang, sementara Titik 2 berada di wilayah yang memiliki kontras gelap pada gambar amplitudo PFM).

Pemodelan dan rekonstruksi stress-wave

Sejumlah studi terkini telah berhasil mengaitkan propagasi gelombang tegangan (*stress-wave propagation*) dengan keluaran sinyal piezoelektrik menggunakan pendekatan pemodelan numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) eksplisit serta metode analisis sinyal seperti *arrival-time analysis* dan *deconvolution*. Melalui pendekatan ini, peneliti mampu merekonstruksi profil beban temporer yang dialami sensor, sehingga memungkinkan estimasi hubungan kuantitatif antara energi dampak, distribusi tegangan transien, dan respons piezoelektrik secara waktu-nyata (*time-resolved*). Pendekatan ini sangat berguna untuk memahami dinamika konversi energi pada skala mikrodetik hingga milidetik, di mana deformasi material berlangsung dalam laju regangan tinggi (*high strain-rate regime*) yang tidak dapat dijelaskan dengan analisis statis konvensional [3].

Dalam simulasi numerik tersebut, FEM eksplisit sering digunakan karena kemampuannya

menangkap fenomena dinamis non-linier dengan resolusi temporal tinggi. Beberapa model bahkan mengombinasikan *explicit dynamic solver* dengan material constitutive model berbasis *strain-rate dependent* untuk menggambarkan perilaku PVDF dan komposisinya secara realistis di bawah tumbukan balistik. Misalnya, ketika peluru mikro atau partikel logam menumbuk lapisan sensor pada kecepatan lebih dari 100 m/s, muncul gelombang tegangan yang sangat singkat (orde mikrodetik) dan merambat secara kompleks akibat interaksi antara lapisan polimer, filler, dan elektroda. Studi numerik dengan model ini mampu memprediksi distribusi regangan lokal dan medan listrik terinduksi dalam serat, serta menjelaskan fenomena seperti refleksi gelombang, attenuasi energi, dan resonansi lokal yang memengaruhi amplitudo sinyal keluaran [3].

Namun demikian, kompleksitas simulasi meningkat tajam ketika gelombang yang dianalisis memiliki durasi sangat singkat atau ketika material memperlihatkan dispersivitas dan non-linearitas mekanik. PVDF dan turunannya dikenal memiliki sifat viskoelastik yang bergantung pada laju regangan, sehingga responnya tidak sepenuhnya linier terhadap tekanan impulsif. Dalam kondisi demikian, gelombang tegangan tidak hanya mengalami peredaman tetapi juga distorsi bentuk akibat perbedaan kecepatan rambat antar mode gelombang (longitudinal dan shear). Untuk menangani fenomena ini, simulasi FEM eksplisit harus dijalankan dengan ukuran elemen (mesh size) yang sangat kecil dan interval waktu (time step) yang juga sangat singkat, umumnya dalam orde nanodetik, agar stabilitas numerik dan akurasi prediksi dapat dipertahankan [10].

Selain itu, tantangan lain muncul pada proses validasi eksperimental, karena pengukuran langsung gelombang tegangan berkecepatan tinggi dan sinyal piezoelektrik simultan memerlukan sistem data acquisition berfrekuensi sampling tinggi (≥ 10 MHz) dan penempatan sensor referensi yang presisi. Keterbatasan ini menyebabkan banyak studi menggunakan semi-empirical correlation atau hasil simulasi terkalibrasi untuk menduga karakteristik gelombang berdasarkan sinyal keluaran piezoelektrik yang telah di-*deconvolve*. Walaupun kompleksitas analisis ini cukup tinggi, integrasi antara eksperimen dan simulasi berbasis FEM eksplisit terbukti efektif dalam memahami mekanisme dasar interaksi antara gelombang tegangan dan respon piezoelektrik pada material komposit nano serat, serta membuka peluang pengembangan algoritma deteksi dampak berbasis signal reconstruction di masa depan [10].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis terhadap proses fabrikasi, karakterisasi elektromekanik, serta pemodelan numerik material komposit piezoelektrik berbasis PVDF dan P(VDF-TrFE), dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Proses Fabrikasi dan Struktur Material

Metode electrospinning terbukti menjadi teknik paling efektif dalam menghasilkan nanofiber PVDF dan kopolimernya dengan kandungan fase β yang tinggi. Orientasi molekul sejajar medan listrik selama proses penarikan menghasilkan peningkatan signifikan pada sifat piezoelektrik. Kombinasi PVDF dengan P(VDF-TrFE) mampu meningkatkan stabilitas termal serta polarisasi spontan, menjadikannya lebih unggul dibandingkan PVDF murni. Penambahan nanofiller anorganik seperti ZnO, BaTiO₃, CNT, dan AlN berperan penting sebagai pusat nukleasi fase β dan memperkuat transfer tegangan antar fase, sehingga meningkatkan respons piezoelektrik secara keseluruhan.

2. Karakteristik Elektromekanik dan Sensitivitas Sensor

Hasil tinjauan menunjukkan bahwa modifikasi komposit PVDF/P(VDF-TrFE) dengan filler piezoelektrik maupun konduktif menghasilkan peningkatan signifikan pada amplitudo dan kestabilan sinyal keluaran. Hal ini disebabkan oleh peningkatan polarisasi lokal, homogenitas medan listrik, serta efisiensi transfer energi mekanik menjadi listrik. Meskipun demikian, nilai parameter piezoelektrik seperti koefisien d_{33} dan tegangan keluaran masih bervariasi antar penelitian karena perbedaan konfigurasi elektroda, orientasi serat, serta konsentrasi filler. Oleh sebab itu, diperlukan standarisasi metode pengujian dan kalibrasi untuk memperoleh data yang dapat dibandingkan secara kuantitatif antar studi.

3. Pemodelan Numerik dan Rekonstruksi Gelombang Tegangan

Pendekatan pemodelan berbasis *Finite Element Method* (FEM) eksplisit terbukti mampu

menjelaskan hubungan antara propagasi gelombang tegangan (*stress-wave propagation*) dengan keluaran sinyal piezoelektrik secara waktu-nyata (*time-resolved*). Melalui simulasi ini, distribusi regangan lokal, medan listrik terinduksi, serta fenomena refleksi dan attenuasi gelombang dapat diprediksi dengan akurasi tinggi. Tantangan utama terletak pada validasi eksperimental karena keterbatasan sistem pengukuran berkecepatan tinggi. Integrasi antara eksperimen dan simulasi memberikan pemahaman lebih dalam mengenai dinamika deformasi transien dan membuka peluang pengembangan sensor piezoelektrik nanokomposit yang lebih sensitif, stabil, dan responsif di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Zhang, M., Liu, C., Li, B., Shen, Y., Wang, H., Ji, K., Mao, X., Wei, L., Sun, R. & Zhou, F., "Electrospun PVDF-based piezoelectric nanofibers: materials, structures, and applications," *Nanoscale Advances*, vol. 5, pp. 1043-1059, Jan. 2023, doi: 10.1039/D2NA00773H.
- [2]. Han J., Li D., Zhao C., Wang X., Li J. & Wu X., "Highly Sensitive Impact Sensor Based on PVDF-TrFE/Nano-ZnO Composite Thin Film," *Sensors*, vol. 19, no. 4, art. 830, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19040830.
- [3]. Xiong, J., Wang, L., Liang, F., Li, M., Yabuta, Y., Iqbal, M. A., Mayakrishnan, G., Shi, J., & Kim, I. S., "Flexible Piezoelectric Sensor Based on Two-Dimensional Topological Network of PVDF/DA Composite Nanofiber Membrane," *Advanced Fiber Materials*, vol. 6, no. 4, pp. 1212–1228, May 2024, doi: 10.1007/s42765-024-00415-7.
- [4]. Ferreira, P. M., Caçador, D., Machado, M. A., Carvalho, M. S., Vilaça, P., Sorger, G., Farias, F. W. C., Figueiredo, A. R. & Vidal, C., "Smart piezoelectric composite: impact of piezoelectric ceramic microparticles embedded in heat-treated 7075-T651 aluminium alloy," *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, vol. 21, pp. 155-180, Nov. 2024, doi: 10.1007/s10999-024-09731-7.
- [5]. Huan, S., Lu, L., Shen, T., & Du, J., "Low Velocity Impact Monitoring of Composite Tubes Based on FBG Sensors," *Sensors*, vol. 24, no. 4, art. 1279, Feb. 2024. doi: 10.3390/s24041279.
- [6]. He, Z., Rault, F., Lewandowski, M., Mohsenzadeh, E., & Salaün, F., "Electrospun PVDF Nanofibers for Piezoelectric Applications: A Review of the Influence of Electrospinning Parameters on the β Phase and Crystallinity Enhancement," *Polymers*, vol. 13, no. 2, art. 174, 2021, doi: 10.3390/polym13020174.
- [7]. Chang, G.; Pan, X.; Hao, Y.; Du, W.; Wang, S.; Zhou, Y.; Yang, J.; He, Y., "PVDF/ZnO piezoelectric nanofibers designed for monitoring of internal micro-pressure," *RSC Advances*, vol. 14, pp. 11775-11783, Apr. 2024, doi: 10.1039/D3RA08713A.
- [8]. Song, K. and Shin, K-Y., "ZnO/PVDF Nanogenerators with Hemisphere-Patterned PDMS for Enhanced Piezoelectric Performance," *Polymers*, vol. 17, no. 15, art. 2041, Jul. 2025, doi: 10.3390/polym17152041.
- [9]. Ren K., Shen Y., & Wang Z. L., "Piezoelectric Properties of Electrospun Polymer Nanofibers and Related Energy Harvesting Applications," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 309, no. 1, 2024, Art. e2300307, doi: 10.1002/mame.202300307.
- [10]. Liu, J., Hei, C., Luo, M., *et al.*, "A Study on Impact Force Detection Method Based on Piezoelectric Sensing," *Sensors*, vol. 22, no. 14, art. 5167, 2022, doi: 10.3390/s22145167.
- [11]. C. Covaci and A. Gontean, "Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review," *Sensors*, vol. 20, no. 12, p. 3512, 2020, doi: 10.3390/s20123512.
- [12]. N. Bhadwal, R. Ben Mrad, and K. Behdinan, "Review of Piezoelectric Properties and Power Output of PVDF and Copolymer-Based Piezoelectric Nanogenerators," *Nanomaterials*, vol. 13, no. 24, p. 3170, 2023, doi: 10.3390/nano13243170.
- [13]. Y. Chen, X. Zhang, and C. Lu, "Flexible piezoelectric materials and strain sensors for wearable electronics and artificial intelligence applications," *Chem. Sci.*, vol. 15, no. 40, pp. 16436–16463, 2024, doi: 10.1039/D4SC05166A.
- [14]. Li, G.-Y., Li, J., Li, Z.-J., Zhang, Y.-P., Zhang, X., Wang, Z.-J., Han, W.-P., Sun, B., Long, Y.-Z. & Zhang, H.-D., "Hierarchical PVDF-HFP/ZnO composite nanofiber-based highly

- ◆ sensitive piezoelectric sensor for wireless workout monitoring,” *Advanced Composites & Hybrid Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 766-775, 2021, doi: 10.1007/s42114-021-00331-z.
- [15]. Suprpto et al., “Multilayer PZT/PVDF Composite Films for High-Performance Force Sensor and Energy Harvesting Applications,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2908, no. 1, p. 012029, 2024.
- [16]. Ullah, S., et al., “Electrospun Composite Nanofibers for Functional Applications,” *Polymers*, vol. 14, no. 2, art. 290, 2022, doi: 10.3390/polym14020290.