

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan pesat perangkat elektronik telah menyebabkan peningkatan volume limbah elektronik (*e-waste*) di seluruh dunia. *Global E-Waste Monitor 2024* melaporkan bahwa pada tahun 2022 tercatat sekitar 62 juta ton *e-waste*, meningkat 82% sejak 2010 dan diperkirakan mencapai 82 juta ton pada 2030 apabila tren ini terus berlanjut [1]. Sayangnya, hanya sekitar 22% yang berhasil dikumpulkan dan didaur ulang, sementara sisanya berpotensi mencemari lingkungan akibat kandungan logam berat seperti Pb, Cd, Hg, Cr⁶⁺, serta senyawa organik persisten seperti PCB dan dioksin. Proses pembuangan melalui pembakaran terbuka atau pelindian kimia juga melepaskan zat toksik ke udara, tanah, dan air, yang mengancam keberlanjutan ekosistem [2].

Kebanyakan perangkat elektronik masih menggunakan bahan anorganik seperti logam dan semikonduktor karena konduktivitas dan kekuatan mekaniknya tinggi. Namun, bahan ini tidak fleksibel, berat, mudah terkorosi, serta sulit terurai secara alami, sehingga menimbulkan masalah keberlanjutan [3], [4]. Alternatifnya, material biodegradable menjadi pilihan menjanjikan karena dapat terurai oleh mikroorganisme.

Di sisi lain, perkembangan teknologi seperti *wearable devices*, *flexible sensors*, dan sistem komunikasi miniatur meningkatkan permintaan terhadap material konduktif yang fleksibel, ringan, dan kuat secara mekanik [5], [6]. Nilai pasar elektronik fleksibel global bahkan diperkirakan naik dari 29,4 miliar USD pada 2024 menjadi 70,9 miliar USD pada 2032 dengan CAGR 12% [7].

Sebagai solusi, dikembangkan komposit berbasis PVA yang dikombinasikan dengan *filler* fungsional seperti Zinc Oxide (ZnO), MXene (Ti₃C₂Tx), dan Cellulose Nanocrystal (CNC). Komposit adalah kombinasi dari dua atau lebih bahan yang bertujuan untuk memperoleh sifat unggul dari masing-masing bahan tersebut. Secara umum, penyusun komposit terdiri dari penguat dan matriks[8]. Penggabungan sifat-sifat bahan yang berbeda tanpa mengubah sifat aslinya menjadikan komposit sebagai material yang layak untuk penelitian lebih lanjut. PVA berperan sebagai matriks biodegradable, sedangkan ketiga *filler* tersebut meningkatkan sifat konduktivitas dan kekuatan mekanik komposit.

Polivinil alkohol (PVA) telah menarik perhatian sebagai matriks polimer karena sifatnya yang biodegradable, biokompatibel, dan memiliki kemampuan membentuk film yang baik [9]. PVA juga memiliki stabilitas kimia yang tinggi dan kemampuan untuk dimodifikasi dengan berbagai *filler* untuk meningkatkan sifat mekanik dan elektriknya. Hal ini sejalan dengan data pada tabel 1.1, di mana PVA menunjukkan modulus lentur tertinggi (5.2 GPa) dan kekuatan lentur tertinggi

(120.8 MPa) dibandingkan PLA maupun blend PLA–PVA, menandakan struktur film PVA yang kuat dan stabil. Selain itu, PVA juga memiliki elongation at break pada uji tarik yang sangat tinggi (45.9%), jauh melebihi PLA (10.1%), menunjukkan fleksibilitas sekaligus ketangguhan material yang mendukung karakteristiknya sebagai matriks yang baik[10].

Tabel 1.1 Sifat mekanik dari PLA, PVA, dan campurannya.

Kode	<i>Flexural Properties</i>			<i>Tensile Properties</i>		
	Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Displacement (mm)	Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Elongation at Break (%)
PLA	2.7	100.9	10.1	2.9	68.8	10.1
PLA7	2.5	95.7	8.4	3.0	69.5	7.3
PVA	5.2	120.8	9.9	3.0	116.1	45.9
L7V3	2.7	75.9	3.8	2.6	66.1	3.8
L6V4	2.6	73.7	4.1	2.9	67.0	3.9
L5V5	2.7	67.5	3.1	3.1	62.3	3.3

MXene merupakan kelompok material dua dimensi (2D) yang terdiri dari karbida atau nitrida dengan rumus umum $Mn+1XnTx$, di mana nilai n dapat berupa 1, 2, 3, atau 4. Unsur M adalah logam transisi awal, X dapat berupa karbon, nitrogen, atau keduanya, sedangkan T adalah gugus terminasi permukaan yang terikat pada unsur M, seperti OH, O, F, atau Cl. MXene terbukti menjadi pengisi yang efektif untuk matriks PVA, memungkinkan perumusan film komposit dengan peningkatan kinerja multifungsi yang signifikan[11]. Konduktivitas intrinsik MXene yang tinggi, yang pada material murni (100 wt%) mencapai sekitar $2,4 \times 10^5$ S/m, memungkinkan terjadinya transfer sifat listrik secara efektif ke dalam matriks polimer isolator. Hal ini tercermin dari perubahan sifat listrik film komposit yang awalnya bersifat isolatif menjadi konduktif seiring dengan peningkatan kandungan MXene, di mana pada komposisi 40 wt% MXene film telah menunjukkan konduktivitas sebesar $0,04 \pm 0,003$ S/m, yang merupakan peningkatan signifikan dibandingkan PVA murni. Peningkatan ini menjadi aspek penting dalam pengembangan material untuk aplikasi elektronik fleksibel.

Selain berperan dalam peningkatan sifat listrik, dispersi MXene yang optimal di dalam matriks PVA juga berfungsi sebagai agen penguat mekanik. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan signifikan pada sifat tarik dan kekakuan film komposit yang ditunjukan oleh tabel 1.2. Pada komposisi 40 wt% MXene, nilai kuat tarik meningkat hingga 91 ± 10 MPa, sementara nilai Modulus Young mencapai $3,7 \pm 0,02$ GPa, yang jauh lebih tinggi dibandingkan PVA murni dengan kuat tarik sebesar 30 ± 5 MPa dan Modulus Young $1,0 \pm 0,3$ GPa. Hasil ini menegaskan peran MXene dalam membentuk material hibrida dengan keseimbangan sifat listrik dan mekanik yang unggul.

Tabel 1.2 Sifat fisik MXene, MXene/PVA, dan PVA

Kandungan MXene (wt%)	Ketebalan (μm)	Konduktivitas (S/m)	Kuat tarik (MPa)	Modulus Young (GPa)	Strain to Failure (%)
100	3.3	240238±3500	22±2	3.52±0.01	1.0±0.2
90	3.9	22433±1400	30±3	3.0±0.01	1.8±0.3
80	6.1	137±3	25±4	1.7±0.2	2.0±0.4
60	7.2	1.3±0.08	43±8	1.8±0.6	3.0±0.5
40	12.0	0.04±0.003	91±10	3.7±0.02	4.0±0.5
0	13.0	-	30±5	1.0±0.3	15±6.5

Zinc Oxide (ZnO) adalah piezoelektrik[12] dan semikonduktor dengan struktur hexagonal yang memiliki lebar celah pita sekitar 3,3 hingga 3,7 eV dan energi ikat eksiton sekitar 60 milielektronvolt (meV) pada suhu kamar. Ini berarti ZnO adalah material yang menghasilkan energi listrik berdasarkan pengaruh tekanan yang diberikan. ZnO juga dikenal sebagai material host yang ramah lingkungan, ekonomis, dan dapat dimodifikasi dengan berbagai ion logam, termasuk elemen logam transisi seperti Cr, Mn, Ni, dan lainnya [13]. Selain itu, ZnO merupakan senyawa berukuran nanopartikel (1-100 nm) yang memiliki banyak keunggulan, termasuk sifat elektrik, magnetik, kimia, mekanik, dan optik yang sangat baik. Keunggulan lainnya meliputi reaktivitas permukaan yang tinggi, antimikroba, ketahanan terhadap panas, non-toksik, ramah lingkungan, dan harga yang relatif terjangkau[14].

Selain itu, cellulose nanocrystals (CNC) telah menarik perhatian sebagai *filler* alami yang dapat meningkatkan sifat mekanik film komposit. CNC memiliki rasio aspek tinggi, kuat tarik yang luar biasa, dan sifat *biodegradable* yang selaras dengan tren keberlanjutan [16]. Penambahan CNC ke dalam film komposit PVA dapat meningkatkan kekuatan dan stabilitas dimensi material, yang penting untuk aplikasi antena yang membutuhkan ketahanan terhadap berbagai kondisi lingkungan.

Pengembangan film komposit PVA/ZnO/MXene/CNC sebagai material antena menawarkan pendekatan yang menjanjikan. Kombinasi ini tidak hanya bertujuan untuk mencapai keseimbangan optimal antara sifat listrik dan mekanik, tetapi juga mempertimbangkan aspek keberlanjutan dan kemudahan fabrikasi. PVA dan CNC, sebagai komponen berbasis bio, sejalan dengan kebutuhan akan material ramah lingkungan, sementara ZnO dan MXene memberikan peningkatan performa yang dibutuhkan untuk aplikasi teknologi tinggi [15].

Untuk mendapatkan material yang bersifat fleksibel, maka dilakukan pengujian tarik. Uji tarik adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengukur sifat mekanik bahan dengan cara menguji respons bahan terhadap gaya tarik yang diberikan. Uji tarik sering dilakukan untuk mengetahui kekuatan material, fleksibilitas, dan bagaimana bahan tersebut berperilaku di bawah beban tarik. Pada penelitian sebelumnya, material komposit dengan bahan PVA, MXene dan CNC

melakukan uji tarik. Dari hasil uji tarik tersebut didapatkan nilai modulus young sebesar 221 ± 51 Mpa pada PVA murni dan meningkat menjadi 293 ± 59 MPa setelah ditambahkan MXene dan CNC. Kuat tarik juga didapat perubahan dari 19,5 MPa ke 22,01 Mpa dengan metode *dynamic mechanical analysis (DMA)*[16]. Sedangkan pada penelitian ini digunakan metode variasi MXene dalam mengetahui bagaimana pengaruh dari masing-masing variabel tersebut.

Variasi kadar MXene pada film komposit diperlukan untuk mengoptimalkan keseimbangan antara konduktivitas listrik dan kekuatan mekanik. Peningkatan konsentrasi MXene dapat membentuk jalur konduktif yang lebih efektif di dalam matriks polimer, sehingga meningkatkan kemampuan penghantaran listrik film komposit. Namun, kelebihan kandungan MXene berpotensi menimbulkan aglomerasi dan cacat mikro pada struktur film, yang justru dapat menurunkan kekuatan mekanik dan homogenitas material. Oleh karena itu, penelitian mengenai variasi MXene menjadi penting untuk menentukan komposisi optimal yang menghasilkan sifat listrik tinggi tanpa mengorbankan kekuatan mekanik, khususnya dalam pengembangan perangkat elektronik fleksibel yang menuntut kombinasi konduktivitas, fleksibilitas, dan ketahanan struktural.

Dengan penjabaran di atas, maka dilakukan penelitian dengan judul “Pengaruh Variasi MXene terhadap Sifat Mekanik dan Listrik Film Komposit Polivinil Alkohol, Zinc Oxide, MXene, dan Cellulose Nanocrystals untuk Perangkat Elektronik Fleksibel.” Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan film komposit dengan komposisi MXene optimal yang mampu meningkatkan konduktivitas listrik tanpa mengorbankan kekuatan mekanik, serta memiliki karakteristik fleksibel, ringan, *wearable*, dan ramah lingkungan (*biodegradable*), sehingga berpotensi diterapkan dalam pengembangan perangkat elektronik generasi baru yang efisien dan berkelanjutan

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi MXene terhadap sifat listrik, sifat mekanik, serta karakteristik struktur dari film komposit PVA, ZnO, MXene, dan CNC?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan nilai konduktivitas listrik dari film komposit PVA, ZnO, MXene dan CNC pada variasi MXene.
2. Untuk mendapatkan karakterisasi dari film komposit PVA, ZnO, MXene dan CNC pada variasi MXene.
3. Untuk mendapatkan sifat mekanik dari film komposit PVA, ZnO, MXene dan CNC pada variasi MXene

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi MXene terhadap sifat listrik dan sifat mekanik dari film komposit PVA, ZnO, MXene, dan CNC. Selain itu, juga dapat menghasilkan film komposit fleksibel, *wearable*, dan *biodegradable*, yang dapat diaplikasikan dalam material elektronik fleksibel.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan batasan masalah sebagai berikut :

1. Pengukuran sifat listrik yang dilakukan untuk pengukuran nilai konduktivitas menggunakan konduktivitas termal.
2. Variasi MXene yang diterapkan yaitu kadar 20 wt%, 25 wt%, 30 wt%
3. Metode karakteristik yang dilakukan yaitu *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan *Field Scanning Electron Microscope* (FESEM).
4. Metode uji mekanik yang dilakukan yaitu uji tarik.
5. Hanya terbatas pada pembuatan sampel, pengukuran konduktivitas listrik, pengujian karakteristik, dan uji tarik.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini disusun dalam beberapa bab dengan sistematika tertentu, sistematika laporan ini sebagai berikut :

BAB I	PENDAHULUAN Pada bab I ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA Pada bab II ini berisikan tentang tinjauan pustaka yang mencakup landasan teori yang mendukung penulisan dan pustaka-pustaka yang telah dipublikasikan.
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN Pada bab III ini menjelaskan tentang metode penelitian yang mencakup bahan/tempat penelitian, literatur, survei lapangan, jalannya penelitian, diagram alur penelitian dan cara pengolahan data.
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN Pada bab IV ini berisikan hasil dan analisa dari penelitian tugas akhir ini.
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN Pada bab V ini berisikan kesimpulan dan saran berdasarkan data dari penelitian yang telah dilakukan.
DAFTAR PUSTAKA	