

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini pertumbuhan perangkat elektronik telah mempercepat akumulasi limbah elektronik (*e-waste*) secara global. Data dari Global E-Waste Monitor 2024 mencatat sekitar 62 juta ton *e-waste* dihasilkan pada tahun 2022. Angka ini meningkat 82% sejak 2010 dan diprediksi mencapai 82 juta ton pada 2030 jika tren saat ini terus berlanjut [1]. Kurangnya infrastruktur pengelolaan di banyak negara berkembang menyebabkan hanya sekitar 22% limbah elektronik yang tercatat dikumpulkan dan didaur ulang. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa volume *e-waste* terus tumbuh dua kali lebih cepat dibanding praktik daur ulangnya. Selain permasalahan volume, *e-waste* juga mengandung berbagai bahan berbahaya yang berdampak serius terhadap lingkungan. Pada perangkat elektronik, terdapat logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), kromium heksavalen (Cr^{6+}), serta senyawa organik persisten seperti PCB dan dioksin, yang dapat mencemari tanah, air, dan udara. Laporan WHO tahun 2021 menyebutkan bahwa sebagian besar *e-waste* yang tidak terkelola sering kali dibakar di area terbuka atau direndam dalam larutan kimia. Aktivitas ini melepaskan zat toksik ke lingkungan sekitar, dalam jangka panjang akan mengancam keberlangsungan ekosistem [2].

Sebagian besar perangkat elektronik saat ini dibangun menggunakan bahan anorganik seperti logam dan semikonduktor yang menawarkan konduktivitas tinggi dan ketahanan mekanik. Di sisi lain, material ini memiliki kelemahan seperti, kurang fleksibel, berat, rentan terhadap korosi, dan mencemari lingkungan karena sulit terurai secara alami. Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan material alternatif yang tidak hanya memiliki performa konduktivitas yang baik, tetapi juga lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan [3, 4].

Salah satu solusi yang kini banyak dikembangkan adalah penggunaan material *biodegradable*, yaitu material yang dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme dalam kondisi lingkungan tertentu. Material ini dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan material anorganik konvensional. Dalam pengembangan material konduktif yang *biodegradable* terdapat tantangan utama dalam sifat kelistrikannya. Material *biodegradable* bersifat hidrofilik sehingga mudah menyerap kelembapan dari lingkungan. Kelembapan adalah jumlah uap air di atmosfer yang mempengaruhi semua proses biologis dan kimia lingkungan [5, 6]. Kelembapan ini dapat memicu degradasi struktural, gangguan aliran arus listrik, dan penurunan kinerja [7]. Menurut studi dari *Frontiers in Chemistry* pada tahun 2019, kelembapan rendah menyebabkan penurunan konduktivitas dan penyusutan ukuran pada film berbasis Polyvinyl Alcohol (PVA) yang diuji dalam berbagai tingkat kelembapan relatif [8]. Sehingga diperlukan formulasi komposit yang

mampu mengatasi tantangan ini agar tetap dapat mempertahankan performa konduktivitas dan ukuran dalam kondisi kelembapan yang bervariasi.

Di sisi lain, perkembangan pesat teknologi modern seperti *wearable devices*, *flexible sensors*, dan sistem komunikasi miniatur, telah mendorong kebutuhan material konduktif yang tidak hanya unggul dalam sifat kelistrikan, tetapi juga ringan, fleksibel, dan kuat secara mekanik [9, 10]. Fleksibilitas menjadi parameter penting, terutama pada aplikasi yang membutuhkan kelengkungan di permukaan tubuh atau kontur tidak rata. Pasar elektronik fleksibel global mencapai 29,4 miliar USD pada 2024 dan diprediksi tumbuh hingga 70,9 miliar USD pada 2032 dengan CAGR hingga 12% [11]. Angka ini menunjukkan potensi pertumbuhan yang signifikan dan menjadi peluang besar dalam pengembangan bahan konduktor fleksibel yang *biodegradable*.

Untuk menjawab tantangan tersebut, dikembangkan material komposit berbasis PVA yang dikombinasikan dengan penguat fungsional seperti Zinc Oxide (ZnO), MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$), dan Cellulose Nanocrystal (CNC). Komposit didefinisikan sebagai material yang terdiri atas dua atau lebih fase dengan sifat berbeda, yang digabungkan untuk menghasilkan material baru dengan perpaduan sifat unggul dari masing-masing komponennya [12]. Dalam hal ini, PVA digunakan sebagai *matrix biodegradable*, sedangkan ZnO, MXene, dan CNC sebagai *filler* untuk meningkatkan sifat fungsional komposit.

ZnO dikenal karena stabilitas tinggi, band gap lebar hingga 3,3 eV, dan kemampuan menghasilkan ion Zn^{2+} yang bersifat antibakteri. Ketika terpapar cahaya atau berada di lingkungan lembab, ZnO akan terbentuk ion Zn^{2+} dan spesies oksigen reaktif (*Reactive Oxygen Species*/ROS) seperti H_2O_2 , O_2^- , dan $\cdot\text{OH}$. Ion Zn^{2+} mampu berinteraksi dengan dinding sel bakteri dan mengganggu keseimbangan ionik intraseluler, sementara ROS menyebabkan stres oksidatif yang merusak membran sel, protein, serta DNA bakteri. Selain itu, ZnO juga memiliki konduktivitas listrik yang cukup tinggi, mendukung perannya dalam meningkatkan konduktivitas komposit berbasis PVA [13–15]. MXene memiliki struktur berlapis dengan konduktivitas sangat tinggi, hingga $2,4 \times 10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Untuk MXene *mono-layer* konduktivitas bahkan dapat mencapai $4600 \pm 1100 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ jika ketebalan dan *tunneling* sebesar 1 nm [16–19]. Tetapi, MXene memiliki kelemahan pada fleksibilitas dan kestabilannya dalam larutan koloid, sehingga perlu penambahan material yang fleksibel dan memiliki stabilitas koloid yang baik [20]. Salah satunya adalah CNC, yang memiliki kestabilan tinggi dalam koloid, menyumbang kekuatan tarik besar sebesar 7500 MPa, kekakuan yang tinggi (modulus Young hingga 140 GPa), luas permukaan sangat lebar ($\sim 250 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), dan membantu mencegah aglomerasi MXene [21, 22]. Kombinasi keempat material ini diharapkan mampu menghasilkan film komposit yang tidak hanya konduktif, tetapi juga stabil secara mekanik, fleksibel, dan *biodegradable* untuk pengembangan perangkat elektronik masa depan.

Metode efektif yang digunakan untuk memperoleh dispersi partikel yang homogen adalah proses sonikasi berbasis gelombang *ultrasound* [23]. Ultrasonikasi adalah proses mekanis yang menghasilkan kavitasi, yaitu pembentukan gelembung mikroskopik yang berkembang dan meledak dalam cairan [24]. Semakin lama proses sonikasi, maka semakin baik tingkat dispersi dan semakin halus ukuran partikel yang dihasilkan bahkan mendekati skala nano. Efek ini secara langsung dapat meningkatkan konduktivitas listrik dan kekuatan mekanik dari komposit. Kelebihan lain dari metode sonikasi adalah prosesnya yang mudah, efisiensi waktu, dan dapat meningkatkan kualitas produk akhir secara signifikan [25].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO ke dalam film PVA terbukti mampu meningkatkan sifat kelistrikan dan amorfisitas membran komposit, sekaligus mengurangi rugi rugi dielektrik [26]. Selain itu, komposit MXene/PVA menghasilkan konduktivitas listrik hingga $2,2 \pm 0,14 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ dan peningkatan kekuatan tarik dari 22 ± 2 menjadi $91 \pm 10 \text{ MPa}$, dengan fleksibilitas yang lebih baik dibandingkan $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ murni [19]. Pada penelitian lain, kombinasi MXene/CNC meningkatkan sifat mekanik film, dengan kekuatan tarik meningkat dari 18 MPa menjadi 57 MPa, sambil tetap mempertahankan konduktivitas listrik tinggi hingga $1 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ [27]. Penelitian terkait serat nano PVA/MXene/CNC melalui metode *electrospinning* juga menunjukkan hasil signifikan. Keberadaan MXene meningkatkan konduktivitas listrik serat nano hingga $0,8 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, sementara penambahan CNC memperbaiki modulus elastisitas dari 392 MPa menjadi 855 MPa pada suhu 25°C [28]. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi PVA, MXene, CNC, dan ZnO berpotensi menghasilkan film komposit dengan sifat mekanik yang kuat serta konduktivitas listrik yang baik.

Berangkat dari latar belakang tersebut, penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji *pengaruh kelembapan terhadap konduktivitas film komposit PVA/ZnO/MXene/CNC untuk aplikasi konduktor elektronik yang biodegradable*. Penelitian ini berfokus pada pembuatan film komposit berbasis PVA/ZnO/MXene/CNC yang memiliki konduktivitas listrik baik, sekaligus kuat secara mekanik, ringan, fleksibel, dan *biodegradable*. Variasi kelembapan relatif sebesar 50%, 75%, dan 95% RH, digunakan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap nilai teoritis konduktivitas listrik dari komposit yang dihasilkan. Uji konduktivitas listrik dilakukan menggunakan metode *thermal conductivity tester*, dengan mengukur laju perpindahan panas melalui bahan uji akibat perbedaan suhu pada permukaannya. Hasil pengukuran berupa konduktivitas termal yang kemudian dikonversi menjadi konduktivitas listrik. Selain itu, karakteristik gugus fungsi dan morfologi film komposit dianalisis melalui uji FTIR (*Fourier Transform Infrared*) dan FE-SEM (*Field Emission-Scanning Electron Microscope*). Melalui penelitian ini diharapkan menghasilkan material komposit konduktif yang fleksibel, *biodegradable*, dan *wearable*, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai alternatif konduktor elektronik yang ramah lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini, rumusan masalah yang dikaji sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi kelembapan 50%, 75%, dan 95% RH, terhadap nilai konduktivitas film komposit PVA/ZnO/MXene/CNC?
2. Bagaimana pengaruh variasi kelembapan 50%, 75%, dan 95% RH, terhadap karakteristik film komposit PVA/ZnO/MXene/CNC?

1.3 Tujuan Penelitian

Sebagai tindak lanjut dari rumusan masalah, penelitian ini ditujukan untuk:

1. Mengetahui pengaruh variasi kelembapan 50%, 75%, dan 95% RH, terhadap nilai konduktivitas film komposit PVA/ZnO/MXene/CNC.
2. Menganalisis pengaruh variasi kelembapan 50%, 75%, dan 95% RH, terhadap karakteristik film komposit PVA/ZnO/MXene/CNC.

1.4 Batasan Masalah

Agar ruang lingkup penelitian tetap konsisten, maka penelitian ini dibatasi oleh beberapa aspek berikut:

1. Variasi kelembapan yang digunakan dalam pengujian dibatasi pada tiga nilai, yaitu 50%, 75%, dan 95% RH.
2. Pengujian sifat kelistrikan dalam penelitian ini terbatas pada perhitungan konduktivitas listrik yang diperoleh melalui konversi hasil pengukuran konduktivitas termal menggunakan metode *thermal conductivity tester*.
3. Karakterisasi material yang dilakukan mencakup uji FTIR untuk identifikasi gugus fungsi dan uji FE-SEM untuk analisis morfologi film komposit.
4. Penelitian ini hanya mencakup proses pembuatan film komposit, pengujian konduktivitas, dan karakterisasi material, tanpa melibatkan penerapan langsung pada konduktor elektronik.

1.5 Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat:

1. Mengetahui pengaruh variasi kelembapan terhadap sifat konduktivitas listrik material komposit PVA/ZnO/MXene/CNC.
2. Menghasilkan film komposit yang memiliki konduktivitas tinggi, sifat mekanik yang kuat, ringan, fleksibel, *wearable*, dan *biodegradable*.
3. Memberikan kontribusi dalam pengembangan material konduktor alternatif yang ramah lingkungan dan berpotensi diterapkan pada perangkat elektronik masa depan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini disusun sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi penjelasan latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi landasan teori yang mendukung penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menguraikan desain perancangan material dan metode yang digunakan dalam penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Menyajikan hasil penelitian, disertai dengan analisis dan pembahasan material yang dirancang.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Memuat kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian lebih lanjut dengan topik terkait.

