

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat secara global menuntut adanya inovasi berkesinambungan, baik dalam pengembangan sistem kelistrikan maupun pada material pendukungnya. Salah satu aspek penting adalah material isolasi listrik, karena kualitas, ketahanan dan keandalannya sangat berpengaruh terhadap keseluruhan kinerja jaringan tenaga listrik [1]. Oleh karena itu, integritas, ketahanan dan kinerja material isolator berbanding lurus dengan keandalan operasional, keamanan dan efisiensi seluruh infrastruktur kelistrikan.

Selama ini, berbagai material konvensional telah digunakan, seperti polietilen tervulkanisasi silang (XLPE) untuk kabel daya, porselen atau kaca untuk isolator saluran udara, serta polivinil klorida (PVC) untuk kabel umum. Meskipun terbukti efektif, material tersebut tetap memiliki keterbatasan, khususnya ketika menghadapi kondisi lingkungan ekstrem dan tuntutan operasi yang semakin tinggi [2]. Degradasi akibat tegangan tinggi, variasi suhu, kelembapan, paparan sinar ultraviolet, maupun kontaminasi lingkungan dapat memicu perubahan sifat fisik maupun kimia material. Perubahan ini berdampak pada penurunan kemampuan dielektrik, meningkatnya rugi-rugi, menurunnya sifat mekanik, hingga munculnya arus bocor yang berpotensi menyebabkan kegagalan isolasi [3][4].

Pendekatan baru yang banyak dikembangkan adalah material komposit, yaitu penggabungan beberapa bahan untuk memperoleh sifat yang lebih unggul dibandingkan material Tunggal [5]. Kemajuan teknologi nano semakin memperkuat pendekatan ini, karena pada skala nanometer (1–100 nm), suatu bahan dapat menampilkan karakteristik unik yang berbeda dari bentuk massalnya [6]. Integrasi partikel nano (*nanofiller*) ke dalam polimer menghasilkan nanokomposit yang terbukti mampu meningkatkan sifat mekanis, termal dan terutama performa dielektrik [7]. Keunggulan nanokomposit polimer dalam aplikasi isolasi listrik terletak pada kemampuannya untuk mendistribusikan stres listrik secara lebih merata di dalam material, menghambat pergerakan muatan bebas dan membatasi pertumbuhan jalur degradasi atau saluran tembus, bahkan dengan penambahan nanofiller dalam jumlah yang relatif kecil. Dalam pengembangannya, perpaduan polimer sintesis dengan bahan terbarukan menjadi salah satu fokus, misalnya kombinasi *Linear Low-Density Polyethylene* (LLDPE) dan karet alam (*Natural Rubber*/NR). Karet alam dipilih karena elastis, fleksibel, ketersediaannya melimpah di Indonesia, serta potensinya mendukung keberlanjutan dengan jejak karbon yang lebih rendah [8].

Studi-studi sebelumnya melaporkan bahwa penambahan nanoalumina ke dalam LLDPE–NR mampu meningkatkan sifat hidrofobisitas dan memperbaiki ketahanan terhadap arus bocor [9]. Penelitian lain menunjukkan kombinasi partikel

ZnO skala mikro dan nano pada LDPE dapat memperkuat kekuatan tembus listrik sekaligus menurunkan konduktivitas akibat efek perangkat muatan [10]. Kajian lain juga menggarisbawahi bahwa degradasi permukaan akibat polusi sangat memengaruhi terjadinya arus bocor dan *flashover*, meski belum ada penelitian yang menggunakan sistem LLDPE–NR dengan nanofiller nanoalumina [11]. Penelitian tambahan memperlihatkan bahwa penambahan partikel TiO₂ pada LDPE dapat meningkatkan konstanta dielektrik meski belum mempertimbangkan kondisi polusi atau metode pengujian bertahap [12]. Lebih jauh, studi lain menekankan pentingnya antarmuka partikel-matriks yang memengaruhi kekuatan tembus dan distribusi medan listrik melalui mekanisme perangkat muatan [13]. Selain itu, beberapa penelitian menganalisis arus bocor pada isolator polimerik di luar ruang dalam kondisi polusi dan kelembapan tinggi, tetapi masih berfokus pada bahan konvensional seperti silikon karet [14], [15].

Meskipun memberikan kontribusi besar, penelitian-penelitian sebelumnya umumnya terbatas pada pengujian jangka pendek atau hanya dalam satu kondisi tegangan. Faktanya, polutan industri berupa debu semen telah terbukti mampu menurunkan tegangan *flashover* hingga 23% pada kondisi basah dan memengaruhi karakteristik pelepasan muatan sebagian [16]. Simulasi polusi menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi debu semen, semakin cepat terjadi arus bocor dan semakin rendah tegangan *flashover*, terutama pada kondisi kabut atau embun [17]. Debu semen juga dilaporkan menurunkan tegangan tembus serta meningkatkan arus bocor, meskipun dampaknya lebih dominan pada isolator porselen dibandingkan polimer [18]. Namun, studi-studi tersebut umumnya menggunakan material isolator konvensional seperti kaca, porselen, atau polimer silikon, serta pengujian pada kondisi tegangan konstan sesuai prosedur IEC, tanpa mengeksplorasi performa material bionanokomposit berbasis LLDPE–NR yang difungsikan dengan nanoalumina di bawah pembebanan tegangan naik bertahap. Selain itu, belum ada kajian yang secara spesifik mengamati interaksi antara variasi konsentrasi nanoalumina dan paparan polutan debu semen terhadap karakteristik arus bocor. Hal ini menjadi celah penelitian yang ingin diisi melalui studi ini, dengan fokus pada pengujian performa isolator bionanokomposit LLDPE–NR yang difungsikan dengan nanoalumina dalam berbagai konsentrasi, baik dalam kondisi bersih maupun tercemar debu semen, terhadap pembebanan tegangan naik bertahap dengan interval waktu 5 menit.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, dapat dirumuskan permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini, yakni:

1. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi nanoalumina terhadap karakteristik arus bocor pada isolator bionanokomposit LLDPE-NR dalam kondisi bersih?

2. Bagaimana pengaruh adanya polutan debu terhadap karakteristik arus bocor pada isolator bionanokomposit LLDPE-NR yang difungsikan dengan nanoalumina?
3. Bagaimana kinerja isolator bionanokomposit LLDPE-NR dengan variasi konsentrasi nanoalumina dalam menahan arus bocor ketika diuji dengan pembebanan tegangan naik bertahap dengan interval waktu tertentu, baik dalam kondisi bersih maupun tercemar debu?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka didapatkan tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik dasar arus bocor isolator LLDPE–NR pada kondisi permukaan bersih melalui pengujian tegangan naik bertahap.
2. Mengevaluasi pengaruh polutan debu semen terhadap arus bocor isolator.
3. Menentukan konsentrasi nanoalumina yang paling efektif.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan data empiris dan rekomendasi praktis bagi industri ketenagalistrikan dalam memilih dan mengembangkan material isolator yang tangguh, andal, dan ramah lingkungan. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu material dan ketenagalistrikan, khususnya dalam memahami perilaku material isolator bionanokomposit berbasis LLDPE-NR dengan penambahan nanoalumina. Temuan ini dapat menjadi dasar untuk penelitian lebih lanjut tentang mekanisme degradasi dan peningkatan kinerja isolator. Selain itu, dengan menggunakan bahan dasar yang lebih berkelanjutan seperti karet alam, penelitian ini mendukung inovasi material yang ramah lingkungan dan berpotensi mengurangi dampak limbah pascapakai dari isolator konvensional.

1.5. Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan bahan polimer Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) dan karet alam, yang dikombinasikan dengan *filler* nanoalumina, sulfur, CBS, *zinc oxide* (ZnO), dan asam stearat. Fokus penelitian terbatas pada kombinasi material ini, sehingga tidak mencakup jenis polimer atau *filler* lainnya.
2. Tidak membahas struktur kimia pada bahan isolator.

1.6. Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas tentang teori pendukung yang melandasi tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini terdiri dari tahapan penelitian dan langkah-langkah yang diperlukan dalam melakukan rekonfigurasi sistem proteksi.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil perhitungan setting relai arus lebih dan relai arus lebih berarah dan analisa koordinasi relai proteksi ketika diberi gangguan hubung singkat.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari penulis setelah melakukan penelitian tugas akhir.

