

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama dalam mendukung aktivitas masyarakat dan perkembangan berbagai sektor, seperti industri, pendidikan, perdagangan, dan pelayanan publik. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik, sistem tenaga listrik dituntut untuk mampu menyediakan pasokan yang andal, aman, dan berkesinambungan. Dalam sistem ketenagalistrikan, jaringan distribusi memiliki peranan penting karena menjadi bagian yang menyalurkan energi listrik dari sistem tenaga listrik kepada pelanggan. Oleh karena itu, keandalan jaringan distribusi menjadi salah satu aspek yang perlu diperhatikan untuk menjaga kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Salah satu indikator yang digunakan untuk menggambarkan tingkat keandalan sistem distribusi adalah *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) dan *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI). Berdasarkan Laporan Tahunan PT PLN (Persero) Tahun 2024, nilai SAIDI pada tahun 2024 tercatat sebesar 320,24 menit per pelanggan, menurun dari 338,13 menit per pelanggan pada tahun 2023. Sementara itu, nilai SAIFI mengalami penurunan dari 4,27 kali per pelanggan pada tahun 2023 menjadi 3,23 kali per pelanggan pada tahun 2024. Data tersebut menunjukkan adanya peningkatan kinerja keandalan sistem distribusi, namun upaya untuk mempertahankan dan meningkatkan keandalan jaringan tetap diperlukan karena gangguan pada komponen jaringan dapat memengaruhi kontinuitas penyaluran tenaga listrik.

Keandalan sistem distribusi tenaga listrik tidak terlepas dari kondisi komponen jaringan yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik. Salah satu komponen yang memiliki peranan penting adalah penghantar atau kabel yang harus mampu mempertahankan karakteristik listrik dan mekanis selama proses instalasi, pengujian, maupun pengoperasian. Pada sistem distribusi tegangan menengah, kondisi kabel dan sistem isolasinya menjadi salah satu aspek yang perlu diperhatikan karena penurunan kualitas isolasi dapat

meningkatkan risiko terjadinya arus bocor dan dalam kondisi tertentu dapat berkembang menjadi kegagalan isolasi. Kabel tenaga berisolasi XLPE yang telah digunakan dalam jangka waktu tertentu dapat mengalami degradasi sehingga diperlukan evaluasi kondisi isolasi untuk mendukung penentuan pemeliharaan dan penggantian kabel (Kim et al., 2024). Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi kabel dan sistem isolasi perlu diperhatikan sebagai bagian dari upaya menjaga keandalan sistem tenaga listrik.

Sistem isolasi pada kabel tenaga berfungsi untuk memisahkan bagian penghantar yang bertegangan dari lingkungan di sekitarnya serta mencegah terjadinya aliran arus listrik yang tidak diinginkan. Salah satu material isolasi yang banyak digunakan pada kabel tenaga adalah *cross-linked polyethylene* (XLPE) karena memiliki karakteristik listrik, termal, dan mekanis yang baik. Namun, kondisi isolasi dapat mengalami perubahan akibat berbagai faktor, seperti penuaan termal, tekanan listrik, kelembapan, *water treeing*, *electrical treeing*, dan *partial discharge*. Proses penuaan termal pada kabel XLPE dapat menyebabkan perubahan karakteristik arus bocor, yang ditunjukkan dengan peningkatan amplitudo arus bocor seiring bertambahnya waktu penuaan (Zhang et al., 2022). Kondisi temperatur dapat memengaruhi aktivitas *partial discharge* dan perkembangan *electrical tree* pada isolasi XLPE (Li et al., 2024). Temuan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi isolasi dapat memengaruhi karakteristik kelistrikan kabel, sehingga parameter kelistrikan seperti arus bocor dapat digunakan sebagai salah satu indikator dalam mengevaluasi kondisi kabel.

Arus bocor (*leakage current*) merupakan arus listrik yang mengalir melalui atau melewati sistem isolasi akibat adanya beda potensial antara bagian yang bertegangan dengan bagian lain yang memiliki potensial berbeda. Pada kondisi ideal, sistem isolasi memiliki resistansi yang sangat tinggi sehingga arus yang mengalir melalui isolasi memiliki nilai yang sangat kecil. Namun, perubahan kondisi isolasi dapat menyebabkan perubahan karakteristik arus bocor. Oleh karena itu, pengukuran nilai arus bocor dapat memberikan informasi kuantitatif mengenai respons kelistrikan suatu sistem isolasi ketika diberikan tegangan pengujian tertentu. Amplitudo arus bocor kabel XLPE mengalami peningkatan

sebesar 9,09% setelah 12 hari, 16,36% setelah 24 hari, dan 38,18% setelah 48 hari proses penuaan dibandingkan dengan kondisi awal (Zhang et al., 2022). Hasil tersebut menunjukkan bahwa arus bocor merupakan parameter yang dapat diamati secara kuantitatif untuk mengetahui perubahan karakteristik kelistrikan sistem isolasi.

Selain faktor penuaan dan kondisi elektris, kondisi mekanis kabel juga menjadi aspek yang perlu diperhatikan. Dalam proses instalasi, pengujian, maupun pengoperasian, kabel dapat mengalami pembengkokan atau lekukan dengan sudut tertentu. Perlakuan mekanis tersebut dapat menyebabkan perubahan bentuk fisik dan kondisi mekanis pada struktur kabel. Perubahan geometri akibat pembengkokan secara teoritis dapat memengaruhi kondisi distribusi medan listrik pada sistem isolasi dan selanjutnya berpotensi memengaruhi karakteristik kelistrikan kabel. Melalui penelitian eksperimental menunjukkan bahwa pembengkokan transversal pada kabel tenaga dapat memengaruhi karakteristik dielektrik yang diamati melalui perubahan *partial discharge* dan *dielectric loss* (Florkowski et al., 2024). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pembebanan mekanis berupa pembengkokan merupakan salah satu faktor yang relevan untuk dipertimbangkan dalam evaluasi kondisi kabel tenaga.

Permasalahan yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah belum diketahui secara empiris bagaimana variasi sudut lekukan memengaruhi nilai arus bocor pada kabel SUTM tipe AAAC-S. Variasi sudut lekukan dapat memberikan kondisi mekanis yang berbeda pada kabel sehingga berpotensi menghasilkan respons kelistrikan yang berbeda pula. Selain sudut lekukan, luas penampang kabel juga merupakan karakteristik geometris yang perlu diperhatikan. Kabel dengan luas penampang yang berbeda memiliki dimensi dan struktur penghantar yang berbeda sehingga memungkinkan adanya perbedaan respons terhadap kondisi pengujian yang sama. Oleh karena itu, perbedaan luas penampang perlu dikaji untuk mengetahui apakah faktor tersebut memiliki pengaruh terhadap nilai arus bocor kabel. Dengan demikian, permasalahan penelitian tidak hanya terletak pada pengaruh variasi sudut

lekukan secara individual, tetapi juga pada bagaimana variasi sudut lekukan dan luas penampang secara bersama-sama dapat memengaruhi nilai arus bocor kabel SUTM tipe AAAC-S.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, diperlukan penelitian dengan pendekatan kuantitatif eksperimen yang memungkinkan peneliti memberikan perlakuan secara terkontrol terhadap objek penelitian. Dalam penelitian ini, kabel SUTM tipe AAAC-S diberikan variasi sudut lekukan dan menggunakan beberapa variasi luas penampang. Selanjutnya, setiap sampel kabel diberikan kondisi pengujian yang sama dan dilakukan pengukuran nilai arus bocor. Data hasil pengujian tersebut kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui pengaruh variasi sudut lekukan dan luas penampang terhadap nilai arus bocor. Pendekatan eksperimental ini diharapkan dapat menghasilkan data empiris yang objektif mengenai respons kelistrikan kabel terhadap variasi kondisi mekanis dan karakteristik geometrisnya.

Penelitian terdahulu telah banyak mengkaji kondisi isolasi kabel melalui berbagai pendekatan. (Zhang et al., 2022) mengkaji karakteristik arus bocor sebagai indikator penuaan termal kabel XLPE, sedangkan (Kim et al., 2024) membahas karakteristik degradasi kabel XLPE yang telah digunakan. Sementara itu, (Florkowski et al., 2024) mengkaji pengaruh pembengkokan mekanis terhadap *partial discharge* dan *dielectric loss*. Penelitian lainnya juga membahas degradasi isolasi melalui fenomena *electrical treeing*, *water treeing*, dan *partial discharge*. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut cenderung berfokus pada penuaan isolasi, degradasi material, atau pengaruh pembengkokan terhadap parameter dielektrik tertentu. Masih terbatas penelitian yang secara khusus menguji pengaruh variasi sudut lekukan dan luas penampang secara bersamaan terhadap nilai arus bocor pada kabel SUTM tipe AAAC-S melalui metode eksperimen kuantitatif. Kesenjangan tersebut menjadi dasar penting untuk dilakukan penelitian lebih lanjut.

Berdasarkan *research gap* tersebut, kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengujian secara eksperimental terhadap dua faktor, yaitu variasi sudut lekukan sebagai faktor mekanis dan luas penampang sebagai faktor geometris,

terhadap nilai arus bocor kabel SUTM tipe AAAC-S. Penelitian ini tidak hanya mengamati pengaruh pembengkokan kabel, tetapi juga mempertimbangkan perbedaan luas penampang dan menguji kedua faktor tersebut dalam satu rancangan eksperimen. Data nilai arus bocor yang diperoleh dari setiap kombinasi perlakuan akan memberikan informasi empiris mengenai respons kelistrikan kabel SUTM tipe AAAC-S terhadap variasi sudut lekukan dan luas penampang. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memperluas kajian mengenai hubungan antara kondisi mekanis, karakteristik geometris, dan respons kelistrikan kabel.

Penelitian ini penting dilakukan karena kondisi kabel sebagai salah satu komponen sistem distribusi tenaga listrik perlu diperhatikan untuk mendukung keandalan dan kontinuitas penyaluran energi listrik. Meskipun indikator keandalan sistem distribusi PT PLN (Persero) pada tahun 2024 menunjukkan perbaikan, gangguan pada komponen jaringan tetap perlu diminimalkan. Pemahaman mengenai pengaruh variasi sudut lekukan dan luas penampang terhadap nilai arus bocor dapat memberikan informasi empiris yang bermanfaat dalam kegiatan pengujian dan evaluasi kabel. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi akademik dalam pengembangan penelitian mengenai karakteristik kelistrikan kabel SUTM serta menjadi informasi pendukung bagi kegiatan pengujian kabel, pemeliharaan preventif, dan upaya peningkatan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian dengan judul “Pengaruh Variasi Sudut Lekukan dan Luas Penampang terhadap Nilai Arus Bocor Kabel SUTM Tipe AAAC-S” penting dilakukan dengan metode kuantitatif eksperimen untuk memperoleh bukti empiris mengenai pengaruh variasi sudut lekukan dan luas penampang terhadap nilai arus bocor. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih spesifik mengenai respons arus bocor kabel SUTM tipe AAAC-S terhadap variasi kondisi mekanis dan ukuran kabel, sekaligus mengisi keterbatasan penelitian terdahulu yang belum secara khusus menguji kedua faktor tersebut secara bersamaan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka dapat teridentifikasi beberapa masalah diantaranya yaitu:

1. Kondisi kabel pada sistem distribusi tenaga listrik perlu diperhatikan untuk menjaga keandalan dan kontinuitas penyaluran energi listrik.
2. Adanya variasi lekukan kabel SUTM tipe AAAC-S.
3. Kemungkinan terjadinya peningkatan bocor arus akibat lekukan yang terlalu tajam.
4. Kabel SUTM dengan luas penampang yang berbeda memiliki karakteristik geometris dan konstruksi yang berbeda sehingga diduga dapat menghasilkan respons nilai arus bocor yang berbeda.
5. Belum adanya data pengujian nilai arus bocor di laboratorium mengenai lekukan kabel AAAC-S.

1.3 Pembatasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini digunakan untuk mempersempit pembahasan serta mencegah penyimpangan ataupun pelebaran pokok permasalahan, sehingga memudahkan penulis dalam mencapai tujuan penelitian. Adapun pembatasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Objek penelitian yang digunakan adalah kabel Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) tipe AAAC-S.
2. Variabel bebas pertama (X_1) dalam penelitian ini adalah variasi sudut lekukan kabel.
3. Variabel bebas kedua (X_2) adalah luas penampang kabel, yang terdiri atas beberapa ukuran sesuai dengan spesifikasi sampel yang digunakan dalam penelitian.
4. Variabel terikat (Y) yang diamati adalah nilai arus bocor kabel yang dinyatakan dalam satuan miliampere (mA).
5. Pengujian dilakukan pada kondisi laboratorium dengan parameter pengujian yang dikendalikan agar pengaruh faktor lain di luar variabel penelitian dapat diminimalkan.
6. Variasi sudut lekukan kabel yang diuji, yaitu 140° , 150° , 160° , dan 170° .

7. Luas penampang kabel yang digunakan dalam penelitian adalah 70 mm², 150 mm², dan 240 mm².
8. Panjang kabel yang diuji sepanjang 1 meter.
9. Tegangan uji yang digunakan yaitu 13 kV.
10. Analisis data difokuskan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut lekukan dan luas penampang terhadap nilai arus bocor berdasarkan data hasil eksperimen.

1.4 Rumusan Masalah

Untuk memperjelas fokus dari permasalahan yang akan diteliti, maka rumusan masalah dalam penelitian ini disusun sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi sudut lekukan kabel terhadap nilai arus bocor pada kabel SUTM tipe AAAC-S berdasarkan hasil pengujian laboratorium?
2. Bagaimana pengaruh luas penampang terhadap nilai arus bocor pada kabel SUTM tipe AAAC-S berdasarkan hasil pengujian laboratorium?
3. Apakah variasi sudut lekukan dan luas penampang secara simultan berpengaruh terhadap nilai arus bocor pada kabel SUTM tipe AAAC-S?

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pada perumusan masalah tersebut, adapun tujuan dari penelitian ini meliputi:

A. Tujuan Umum

Mengetahui pengaruh variasi sudut lekukan dan luas penampang terhadap nilai arus bocor kabel SUTM tipe AAAC-S melalui pengujian kuantitatif eksperimen.

B. Tujuan Khusus

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi sudut lekukan terhadap nilai arus bocor kabel SUTM tipe AAAC-S.
2. Untuk mengetahui pengaruh luas penampang terhadap nilai arus bocor kabel SUTM tipe AAAC-S.

3. Untuk mengetahui pengaruh variasi sudut lekukan dan luas penampang secara simultan terhadap nilai arus bocor pada kabel SUTM tipe AAAC-S.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang berjudul "Pengaruh Variasi Sudut Lekukan dan Luas Penampang terhadap Nilai Arus Bocor Kabel SUTM Tipe AAAC-S" adalah sebagai berikut:

A. Secara Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik elektro, khususnya pada bidang sistem tenaga listrik, kabel tegangan menengah, dan pengujian kondisi isolasi kabel. Selain itu, hasil penelitian dapat memperkaya kajian mengenai hubungan antara faktor mekanis berupa variasi sudut lekukan dan faktor geometris berupa luas penampang terhadap nilai arus bocor kabel SUTM tipe AAAC-S, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan karakteristik kelistrikan kabel dan evaluasi kondisi kabel tenaga melalui parameter arus bocor.

B. Secara Praktis

1. Bagi Teknisi dan Praktisi Ketenagalistrikan

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pentingnya memperhatikan kondisi mekanis kabel, khususnya perlakuan berupa lekukan, serta karakteristik luas penampang kabel dalam kegiatan instalasi dan pemeliharaan jaringan distribusi tegangan menengah.

2. Bagi Laboratorium

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi data empiris tambahan bagi laboratorium pengujian kabel dalam memahami respons arus bocor kabel SUTM tipe AAAC-S terhadap variasi kondisi mekanis dan ukuran luas penampang. Penelitian ini juga dapat menjadi referensi dalam pengembangan kajian atau metode pengujian kabel tenaga.

3. Bagi Peneliti

Penelitian ini memberikan pengalaman dalam melaksanakan penelitian kuantitatif eksperimen, khususnya dalam melakukan pengujian kabel SUTM tipe AAAC-S, mengukur nilai arus bocor, mengolah data hasil pengujian, serta menganalisis pengaruh variasi sudut lekukan dan luas penampang terhadap nilai arus bocor.

4. Peneliti Selanjutnya

Penelitian ini dapat menjadi referensi dan dasar pengembangan penelitian selanjutnya mengenai arus bocor dan kondisi isolasi kabel. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan penelitian dengan menambahkan variabel lain, seperti variasi tegangan uji, temperatur, kelembapan, radius lekukan, jenis kabel, jumlah sampel, atau merek kabel yang berbeda.

