BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di antara berbagai sumber energi, tenaga listrik memainkan peran utama karena kemudahannya dalam proses produksi dan distribusi [1]. Dengan meningkatnya kesadaran akan keberlanjutan dan efisiensi biaya, konsumen kini semakin menuntut pasokan daya yang lebih andal dengan biaya yang lebih rendah. Hal ini menciptakan tantangan bagi utilitas listrik yang diharapkan dapat meningkatkan kualitas layanan dengan tetap mempertahankan biaya yang minim [2]. Untuk memenuhi tuntutan tersebut, perusahaan utilitas berfokus pada pengurangan biaya operasional dan pemeliharaan, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, serta meminimalkan kerugian dalam sistem distribusi tenaga listrik [3]. Pendekatan ini mendukung transisi ke sistem tenaga listrik yang lebih efisien, termasuk dengan pemanfaatan pembangkit terdistribusi yang dapat meningkatkan keandalan dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya sentral.

Bagi utilitas listrik, proses penyaluran tenaga listrik ke konsumen melalui beberapa tahap yang terstruktur dengan baik. Tahap pertama adalah pembangkitan, di mana listrik dihasilkan di stasiun pembangkit besar yang terletak jauh dari pemukiman untuk mengoptimalkan keekonomisan ukuran dan mengatasi masalah lingkungan [4]. Tahap kedua adalah transmisi, yang melibatkan penggunaan berbagai peralatan seperti transformator, transmisi saluran udara tegangan tinggi atau saluran udara tegangan ekstra tinggi, dan kabel bawah tanah untuk mentransmisikan energi listrik dalam jarak jauh. Sistem transmisi ini memainkan peran yang sangat penting, meskipun membutuhkan biaya yang tinggi untuk membangun dan memelihara, guna memastikan pasokan energi listrik sampai ke konsumen secara efisien [1]. Proses ini dilengkapi dengan tahap distribusi, yang merupakan tahapan terakhir dalam pengaliran energi listrik ke konsumen akhir. Dengan meningkatnya permintaan terhadap sistem tenaga yang lebih andal, pembangkit terdistribusi menawarkan solusi untuk mengurangi

ketergantungan pada pembangkit pusat dan mengoptimalkan keandalan serta efisiensi keseluruhan sistem [5].

Sistem distribusi listrik adalah penghubung utama antara pengguna akhir dan sistem utilitas, menjadikannya bagian yang paling penting dalam infrastruktur tenaga listrik. Meskipun krusial, sistem distribusi sering kali menghadapi berbagai ancaman yang menyebabkan gangguan pada pasokan listrik, dengan sebagian besar pemadaman listrik pada pengguna akhir disebabkan oleh masalah pada jaringan distribusi [5]. Masalah ini sering kali diperburuk oleh ketidakberfungsian peralatan proteksi jaringan yang diakibatkan oleh integrasi pembangkit terdistribusi (DG). DG, yang merupakan unit pembangkit listrik alternatif dengan kapasitas kecil, ditambahkan ke jaringan distribusi untuk memenuhi sebagian kebutuhan pasokan beban listrik. Teknologi DG termasuk sistem fotovoltaik (PV), turbin angin, turbin mikro, sel bahan bakar, dan mesin berputar. PV dan turbin angin adalah contoh pembangkit terbarukan yang tidak memerlukan bahan bakar fosil untuk beroperasi, di mana PV mengandalkan energi matahari dan turbin angin memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik [1]. Meskipun DG berpotensi meningkatkan keandalan sistem distribusi dengan mendekatkan sumber daya ke pengguna, penambahannya menambah kompleksitas dalam proteksi dan pengelolaan sistem, yang dapat mengarah pada gangguan lebih lanjut jika tidak dikelola dengan hati-hati [3]

Memanfaatkan sumber daya terbarukan, seperti energi matahari dan angin menjadi tren utama dalam produksi tenaga listrik yang diperlukan di dunia modern ini [1]. Sumber daya terbarukan ini memiliki keunggulan karena tidak akan pernah habis, dengan matahari yang terus bersinar dan angin yang terus berhembus [4]. Namun, meskipun energi terbarukan menawarkan potensi tak terbatas, ada beberapa tantangan yang perlu diperhatikan, seperti efisiensi, ekonomi, dan pengaruh lingkungan. Dari sudut pandang efisiensi, pembangkit yang menggunakan bahan bakar fosil sering kali lebih unggul karena sumber energi fosil ini tersedia secara kontinu, sementara energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, bergantung pada kondisi cuaca dan waktu tertentu [5]. Salah satu kendala lainnya adalah terbatasnya teknologi penyimpanan energi yang

murah dan efisien, yang membuat integrasi sumber daya terbarukan dalam sistem tenaga menjadi lebih kompleks. Secara ekonomi, pembangkit energi tradisional masih lebih dominan karena biayanya yang lebih rendah, meskipun upaya terus dilakukan untuk mengembangkan teknologi penyimpanan dan peningkatan efisiensi pembangkit energi terbarukan [3]. Dalam hal ini, pembangkit fotovoltaik (PV) dan turbin angin merupakan teknologi utama yang harus dipertimbangkan karena keduanya termasuk dalam kategori energi terbarukan yang dapat memenuhi kebutuhan listrik dengan cara yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan [2].

Sistem fotovoltaik (PV) merupakan salah satu teknologi utama dalam pemanfaatan energi terbarukan, di mana sistem ini terdiri dari susunan besar sel surya yang dirangkai untuk mengubah energi matahari menjadi tenaga listrik [1]. Sel surya terbuat dari bahan semikonduktor, seperti silikon, yang memiliki kemampuan untuk menghasilkan listrik dengan bantuan foton yang dipasok oleh matahari. Setiap sel surya terdiri dari lapisan positif dan negatif yang menciptakan medan listrik, yang bertugas untuk mengalirkan muatan yang dihasilkan dari interaksi foton dengan bahan semikonduktor tersebut [4]. Muatan ini kemudian dipindahkan ke bagian bawah sel dan mengalir melalui kabel yang menghubungkan antar sel untuk menghasilkan listrik. Jumlah listrik yang dihasilkan bergantung pada intensitas cahaya yang diterima dan jumlah sel yang terhubung dalam sistem [5]. Meskipun teknologi PV menawarkan solusi ramah lingkungan dengan mengandalkan energi matahari, efisiensi sistem ini tetap bergantung pada ketersediaan cahaya matahari, yang menjadi salah satu tantangan dalam penerapan energi terbarukan dalam skala besar [2].

Untuk meningkatkan kinerja sistem fotovoltaik (PV), array harus diposisikan tegak lurus terhadap matahari sepanjang hari, yang memungkinkan konversi energi matahari menjadi listrik dengan efisiensi optimal [1]. Oleh karena itu, beberapa sistem PV dilengkapi dengan motor pelacak matahari (solar tracking) yang memungkinkan array bergerak mengikuti pergerakan matahari, meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem secara keseluruhan [4]. Output dari sistem PV selalu berupa arus searah (DC), yang perlu diubah menjadi arus bolak-

balik (AC) agar dapat digunakan pada sebagian besar aplikasi listrik. Proses ini dilakukan oleh inverter, salah satu komponen kunci dalam sistem PV, yang sangat penting ketika PV diterapkan sebagai pembangkit terdistribusi [5]. Meskipun menawarkan solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan, pembangkit PV memiliki beberapa kekurangan, seperti biaya awal yang tinggi untuk pembangunan sistem, kebutuhan lahan yang luas untuk pemasangan sistem dengan kapasitas daya yang memadai, serta efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit energi fosil [2]. Namun, meskipun ada tantangan ini, teknologi PV terus berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya, serta mempermudah integrasi sistem ini dalam jaringan distribusi listrik.

Turbin angin merupakan salah satu teknologi energi terbarukan yang berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, dengan aplikasinya yang semakin meluas seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sumber energi yang ramah lingkungan [1]. Berbeda dengan pembangkit berbasis bahan bakar fosil, turbin angin tidak menghasilkan emisi berbahaya, menjadikannya pilihan yang ramah lingkungan; satu-satunya polusi yang dihasilkan adalah kebisingan yang timbul dari perputaran baling-baling turbin [2]. Dari perspektif ekonomi, banyak turbin angin dibangun dalam jumlah besar di lokasi yang sama dan saling terhubung ke sistem pengumpulan daya dengan tegangan menengah, yang dikenal dengan sebutan ladang angin. Salah satu pengembangan terbaru dalam industri turbin angin adalah ladang angin lepas pantai, yang memanfaatkan kecepatan angin yang lebih tinggi di lautan untuk menghasilkan energi dalam jumlah besar [5]. Turbin angin yang digunakan di ladang angin lepas pantai umumnya berukuran lebih besar daripada turbin angin darat karena kapasitas pembangkit tergantung pada ukuran dan kecepatan angin rata-rata di lokasi turbin. Pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai ini memberikan potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi terbarukan, namun juga menghadapi tantangan teknis dan biaya yang tinggi untuk instalasi dan pemeliharaannya [4].

Turbin angin terdiri dari tiga komponen utama: baling-baling (yang berfungsi sebagai rotor mesin), generator (biasanya jenis generator induksi yang

diumpankan dua kali), dan peralatan elektronika daya [1]. Sebagai teknologi Pembangkit Terdistribusi (DG), turbin angin dan sistem fotovoltaik (PV) keduanya terhubung ke jaringan distribusi, dengan kelebihan masing-masing dalam konteks kinerja dan ekonomi. Dari perspektif ekonomi, turbin angin sering kali mengungguli sistem PV karena biaya awal yang lebih rendah dan kapasitas yang lebih besar dalam mengonversi energi angin menjadi listrik [5]. Namun, ketika membandingkan kedua teknologi ini dari sudut pandang kinerja, sistem PV memiliki keunggulan, terutama jika dibandingkan dengan turbin angin yang bukan tipe inverter, karena DG berbasis inverter cenderung memberikan pengaruh yang lebih kecil terhadap stabilitas dan kualitas jaringan distribusi [3]. Meskipun penetrasi pembangkit terdistribusi ke dalam jaringan distribusi dapat mempengaruhi stabilitas jaringan, keuntungannya yang signifikan termasuk peningkatan keandalan dan pengurangan ketergantungan pada pembangkit pusat, membuat penggunaan teknologi DG menjadi esensial dalam upaya mengoptimalkan sistem tenaga listrik yang lebih efisien dan ramah lingkungan [4].

Pembangkit Terdistribusi (DG) dapat dimiliki oleh pelanggan individu dan terhubung langsung ke jaringan utilitas, memberikan berbagai keuntungan seperti meningkatkan keandalan sistem, mengurangi ketergantungan pada pembangkit pusat, serta membantu menutupi beban puncak dengan mengonsumsi lebih sedikit daya dari utilitas, yang pada gilirannya mengurangi tagihan listrik dan menyesuaikan dengan kenaikan permintaan daya [1]. Namun, meskipun memberikan manfaat ekonomi dan keandalan, penetrasi DG ke dalam jaringan distribusi juga membawa tantangan teknis, terutama dalam hal proteksi sistem. Salah satu masalah utama adalah gangguan koordinasi antara perangkat proteksi dan simpul trip, yang disebabkan oleh kontribusi arus gangguan dari DG yang tidak diperhitungkan dalam desain awal dan perhitungan gangguan pada sistem distribusi [3]. Selain itu, DG dapat mengurangi jangkauan proteksi yang ada, meningkatkan kompleksitas koordinasi perangkat proteksi, dan mempengaruhi stabilitas sistem secara keseluruhan [2]. Meskipun demikian, keberadaan DG juga dapat memberikan pengaruh positif terhadap umur peralatan gardu induk utilitas,

karena berkurangnya kontribusi gardu induk terhadap arus gangguan selama kejadian gangguan [5]. Oleh karena itu, penetrasi DG pada jaringan distribusi tidak hanya memengaruhi arus hubung singkat, tetapi juga skema proteksi yang ada dalam sistem tenaga listrik, yang perlu diadaptasi untuk memastikan keselamatan dan keandalan pasokan listrik [4].

Dengan meningkatnya kebutuhan pasokan daya yang lebih andal dan ramah lingkungan, Pembangkit Terdistribusi (DG), termasuk sistem fotovoltaik (PV) dan turbin angin, telah menjadi pilihan utama dalam menyediakan energi terbarukan. DG menawarkan solusi yang lebih efisien dengan mendekatkan sumber daya energi ke konsumen, mengurangi ketergantungan pada pembangkit pusat, serta meningkatkan keandalan pasokan listrik. Namun, meskipun menawarkan berbagai keuntungan, penetrasi DG yang semakin luas dapat membawa pengaruh signifikan terhadap sistem proteksi yang ada dalam jaringan distribusi tenaga listrik. Sebagian besar sistem proteksi ini dirancang untuk menangani gangguan dalam sistem yang lebih sederhana dan terpusat, di mana arus gangguan dan distribusi daya lebih mudah dikelola. Penambahan DG, terutama yang berbasis energi terbarukan seperti PV dan turbin angin, menambah kompleksitas pada koordinasi proteksi, karena arus gangguan yang dihasilkan oleh DG berbeda dari pembangkit konvensional, yang dapat memengaruhi keandalan dan respons sistem proteksi terhadap gangguan. Oleh karena itu, penting untuk menganalisis dan mengevaluasi bagaimana penetrasi DG ini mempengaruhi kinerja sistem proteksi yang ada, serta bagaimana merancang skema proteksi yang dapat mengakomodasi integrasi DG secara efektif tanpa mengurangi stabilitas dan keandalan sistem distribusi.

Mengkaji pengaruh penetrasi DG, terutama yang berbasis PV dan turbin angin, terhadap sistem proteksi yang ada merupakan fokus utama dalam tesis ini, mengingat semakin meluasnya penggunaan energi terbarukan dalam sistem distribusi listrik. Penambahan unit pembangkit terdistribusi ke dalam jaringan distribusi dapat memperkenalkan sejumlah tantangan baru, khususnya dalam hal pengelolaan gangguan yang sebelumnya lebih mudah diatasi dalam sistem yang lebih terpusat. Seiring bertambahnya unit DG, muncul masalah seperti mis-

koordinasi antara perangkat proteksi yang ada, penurunan jangkauan proteksi, serta arus gangguan yang tidak dapat ditangani dengan baik oleh sistem yang sudah dirancang untuk jaringan yang lebih sederhana dan terpusat [3]. Pengaruh dari permasalahan ini dapat berpengaruh pada keandalan sistem distribusi listrik secara keseluruhan, yang memerlukan perhatian khusus untuk memastikan proteksi yang memadai terhadap gangguan. Oleh karena itu, tesis ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah sistem proteksi yang ada masih dapat berfungsi dengan efektif dalam mengelola gangguan yang ditimbulkan oleh penetrasi DG. Selain itu, tesis ini juga akan mencari solusi konkret untuk mengatasi masalah yang muncul, seperti pengembangan sistem proteksi yang lebih adaptif atau pembaruan skema proteksi yang sudah ada. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai bagaimana merancang sistem proteksi yang baru atau memperbarui skema proteksi yang ada untuk mengakomodasi penetrasi DG yang lebih besar, tanpa mengorbankan keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik secara keseluruhan [5].

Sebagian besar penelitian yang telah dilakukan sebelumnya lebih berfokus pada pengaruh Pembangkit Terdistribusi (DG) terhadap aspek keandalan sistem tenaga listrik atau upaya pengoptimalan biaya operasional. Beberapa studi secara khusus membahas bagaimana DG dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi dengan mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik pusat, serta mengoptimalkan efisiensi biaya yang dikeluarkan oleh utilitas. Penelitian lainnya menyoroti bagaimana integrasi DG dalam jaringan distribusi dapat menambah fleksibilitas sistem tenaga listrik, dengan memberikan alternatif pasokan energi yang lebih dekat ke konsumen akhir, serta mendukung pemenuhan beban puncak. Selain itu, beberapa kajian juga mengeksplorasi bagaimana berbagai jenis DG, seperti fotovoltaik (PV), turbin angin, dan sistem berbasis bahan bakar, dapat bekerja bersama dalam sistem distribusi, serta pengaruhnya terhadap kinerja proteksi jaringan distribusi. Hal ini penting karena keberadaan beberapa jenis DG dengan karakteristik yang berbeda dapat menambah kompleksitas dalam koordinasi proteksi, yang perlu diperhatikan agar sistem proteksi dapat tetap bekerja dengan baik [3-5]. Masih sedikit penelitian yang membahas secara

mendalam mengenai proteksi sistem terhadap arus gangguan yang disebabkan oleh penetrasi Pembangkit Terdistribusi (DG). Meskipun banyak studi sebelumnya telah memberikan wawasan penting mengenai pengaruh penetrasi DG terhadap sistem distribusi, sebagian besar dari penelitian tersebut belum mengkaji secara komprehensif masalah koordinasi proteksi dalam jaringan distribusi. Kesenjangan ini menunjukkan bahwa meskipun ada banyak penelitian tentang integrasi DG dalam sistem distribusi, belum ada yang secara menyeluruh mengevaluasi pengaruh penetrasi DG pada kinerja sistem proteksi, terutama dalam skala besar. Hal ini menjadi lebih kompleks ketika berbagai sumber energi terbarukan, seperti fotovoltaik (PV) dan turbin angin, digabungkan dalam sistem distribusi yang sama, yang dapat mempengaruhi koordinasi dan efektivitas proteksi jaringan distribusi secara keseluruhan. Fokus utama dari tesis ini adalah untuk memberikan perhatian lebih mendalam pada masalah proteksi yang muncul akibat penetrasi Pembangkit Terdistribusi (DG) dalam jaringan distribusi skala besar, yang hingga saat ini belum banyak dibahas secara komprehensif. Dengan mempertimbangkan perkembangan pesat DG, terutama yang berbasis energi terbarukan, tesis ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi tantangan dalam sistem proteksi yang timbul akibat integrasi DG dalam jumlah besar. Selain itu, tesis ini juga akan menawarkan solusi teknis yang relevan, baik melalui pembaruan atau perancangan ulang skema proteksi yang lebih efisien, agar sistem proteksi yang ada dapat lebih baik mengakomodasi penetrasi DG yang semakin meningkat tanpa mengurangi keandalan dan kestabilan jaringan distribusi tenaga listrik. Oleh karena itu pada tesis ini diharapkan dapat memberikan panduan dalam merancang atau memperbarui sistem proteksi yang ada agar dapat mengakomodasi integrasi DG secara efektif. Tesis ini juga akan berkontribusi untuk memastikan bahwa dengan bertambahnya pasokan daya melalui DG yang bersumber dari PV dan turbin angin, keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik tetap terjaga, bahkan dengan peningkatan kompleksitas dalam pengelolaan gangguan.

Berdasarkan permasalahan dan fenomenologi yang telah diuraikan diatas, maka peneliti tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul "**Studi Pengaruh Pembangkit Terdistribusi pada Kinerja Proteksi Sistem Tenaga Listrik".**

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, maka yang menjadi rumusan masalah di dalam tesis ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh dari penetrasi pembangkit terdistribusi terhadap gangguan arus hubung singkat jaringan melalui simulasi sistem menggunakan aplikasi ETAP?
2. Bagaimana pengaruh pembangkit terdistribusi terhadap sistem proteksi dan perangkat proteksi dalam koordinasi ketika terjadi gangguan hubung singkat?
3. Bagaimana pengaruh penetrasi pembangkit terdistribusi terhadap keandalan sistem?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka yang menjadi tujuan tesis ini adalah:

1. Menunjukkan pengaruh dari penetrasi pembangkit terdistribusi terhadap gangguan arus hubung singkat jaringan melalui simulasi sistem menggunakan aplikasi ETAP.
2. Melihat pengaruh pembangkit terdistribusi terhadap sistem proteksi dan perangkat proteksi dalam koordinasi ketika terjadi gangguan hubung singkat.
3. Menganalisis pengaruh penetrasi pembangkit terdistribusi terhadap keandalan sistem.

1.4 Manfaat Penelitian

Tesis ini bertujuan untuk memberikan wawasan mengenai pengaruh penetrasi Pembangkit Terdistribusi pada sistem proteksi feeder distribusi dan

masalah kesalahan proteksi yang dapat muncul akibat interkoneksi Pembangkit Terdistribusi. Berikut adalah manfaat dari tesis ini:

1. **Manfaat Akademis**

   Memberikan sumbangan pengetahuan dalam bidang sistem tenaga listrik, khususnya dalam memahami pengaruh integrasi Pembangkit Listrik Energi Terbarukan terhadap hubung singkat dan sistem proteksi. Tesis ini bisa menjadi dasar untuk studi lebih lanjut tentang analisis sistem proteksi dan penggabungan energi terbarukan ke dalam jaringan distribusi.

2. **Manfaat Teknis**

   Menyediakan pemahaman yang lebih jelas tentang bagaimana berbagai konfigurasi dan penetrasi Pembangkit Listrik Energi Terbarukan mempengaruhi arus hubung singkat, yang akan berguna dalam merencanakan dan menyesuaikan sistem proteksi agar lebih handal dan responsif pada jaringan listrik berbasis energi terbarukan.

3. **Manfaat Praktis**

   Memberikan referensi bagi praktisi dan perancang sistem tenaga listrik untuk mengantisipasi perubahan pada karakteristik gangguan yang disebabkan oleh penetrasi energi terbarukan, sehingga dapat meningkatkan keandalan, selektivitas proteksi, serta mengoptimalkan integrasi energi terbarukan pada jaringan distribusi.

4. **Manfaat Kebijakan dan Regulasi**

   Membantu penyusunan kebijakan atau pedoman teknis untuk mengintegrasikan pembangkit energi terbarukan pada sistem distribusi listrik, dengan memastikan kesesuaian terhadap standar keselamatan, keandalan proteksi, serta mendukung transisi menuju sistem tenaga yang lebih ramah lingkungan.