

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global (*global warming*) merupakan kondisi meningkatnya suhu rata-rata udara, daratan dan perairan akibat dari emisi gas rumah kaca. Gas rumah kaca yang disingkat GRK adalah gas yang berada di atmosfer, baik alami maupun antropogenik (aktivitas manusia)[1]. Akumulasi emisi GRK di atmosfer menyebabkan terperangkapnya panas yang harusnya dipantulkan kembali ke luar angkasa, sehingga mengakibatkan peningkatan suhu bumi dari sebelumnya, atau dikenal dengan efek rumah kaca[2]. Implikasi dari kondisi ini antara lain adalah naiknya permukaan air laut yang sangat berisiko bagi kepulauan seperti Indonesia, karena dapat menyebabkan tenggelamnya pulau-pulau kecil, juga memicu perubahan iklim ekstrem yang dapat menyebabkan bencana hingga menimbulkan kerugian jiwa dan material[3].

Pada tahun 2019, sektor industri produsen energi menyumbang emisi gas rumah kaca sebesar 279.863 Gg CO₂e, yang berasal dari tiga subkategori, yaitu pembangkit listrik, kilang minyak, dan pengolahan batubara. Dari ketiga subkategori tersebut, pembangkit listrik merupakan penyumbang terbesar dengan proporsi mencapai 97,22%, disusul oleh kilang minyak dan pengolahan batubara[4].

Pemerintah Indonesia turut mengambil peran dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Berdasarkan *Conference of the Parties* (COP) 21 yang diselenggarakan di Paris, Pemerintah Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi karbon sebesar 29% secara mandiri dan 41% dengan bantuan internasional sampai tahun 2030[4]. Dengan komitmen tersebut, Pemerintah Indonesia mengeluarkan berbagai kebijakan nasional yang dituangkan dalam peraturan dengan rangka mengurangi emisi gas rumah kaca.

Salah satu upaya yang dilakukan untuk meminimalisasi dampak pemanasan global adalah mengurangi pengoperasian sumber pembangkit listrik yang berasal dari bahan bakar fosil. Kebijakan ini diperkuat melalui Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik, yang secara tegas melarang pembangunan PLTU baru. Selain itu, PLTU yang sudah ada hanya diperbolehkan beroperasi paling lama sampai dengan tahun 2050[5].

Sejalan dengan perpres di atas, percepatan pengakhiran masa operasi pembangkit listrik berbahan bakar fosil perlu diganti dengan pembangkit energi terbarukan[6]. Pembangkit energi terbarukan memiliki peran penting dalam mengatasi pemanasan global dan ketergantungan dengan bahan bakar fosil yang semakin menipis[7]. Dimana pembangkit energi terbarukan menjadi sumber energi bersih dan menjamin ketersediaan energi yang berkelanjutan di masa

mendatang[8]. Di Indonesia, pengembangan pembangkit energi terbarukan semakin berkembang pesat, sehingga berkontribusi dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi dan ketersediaannya yang semakin terbatas[9]. Indonesia sendiri mempunyai potensi energi terbarukan yang cukup besar, total potensi energi terbarukan ekuivalen 442 GW.

Sistem kelistrikan Sumatera Barat terhubung dengan sistem interkoneksi 150 kV Sumatera Bagian Tengah. Total kapasitas terpasang di Sumatera Barat mencapai sekitar 778,65 MW dan beban sistem sebesar 616,10 MW. Terdiri dari beberapa jenis pembangkit, baik energi fosil maupun energi terbarukan. Pembangkit utama dalam sistem ini antara lain PLTU Ombilin, PLTU Teluk Sirih, PLTA Singkarak, PLTA Maninjau, PLTA Batang Agam dan PLTP Muaro Labuh. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tenaga listrik di Sumatera Barat didominasi oleh pembangkit energi fosil seperti PLTU dengan kapasitas total sekitar 418,80 MW, sedangkan pembangkit listrik energi terbarukan berupa PLTP dan PLTA hanya memiliki kapasitas sekitar 359,85 MW.

Dalam hal ini, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) akan masuk menggantikan peran Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Potensi yang ada sangat berpengaruh terhadap optimalnya pembangkit yang akan dibangun. Dalam merencanakan pembangunan suatu pembangkit hal yang perlu diperhatikan adalah potensi-potensi yang ada di daerah tersebut sehingga dapat mengurangi pengiriman daya jumlah besar dalam jarak jauh[10].

Suatu sistem tenaga listrik dianggap baik jika memenuhi beberapa kriteria, meliputi kontinuitas penyaluran daya, kualitas tegangan dan frekuensi, dan kestabilan frekuensi. Pada sistem tenaga listrik yang baik, ketiga kriteria tersebut harus terpenuhi yaitu sistem harus mampu menyediakan pasokan listrik secara terus-menerus dengan standar tegangan dan frekuensi yang sesuai dengan aturan yang berlaku, dan harus dapat segera kembali ke keadaan normal setelah terjadi gangguan[11].

Beralih dari pembangkit energi fosil yang beroperasi ke pembangkit energi terbarukan menyebabkan sistem baru memiliki nilai inersia yang lebih rendah dari nilai inersia pada sistem lama[12]. Inersia sendiri ialah energi kinetik yang tersimpan guna merespons gangguan jaringan dengan menahan perubahan pada frekuensi jaringan[13]. Meningkatnya implementasi pembangkit energi terbarukan secara signifikan, inersia sistem menurun yang akan berpengaruh pada laju perubahan frekuensi dan nadir frekuensi, yang selanjutnya memengaruhi efektivitas skema *load shedding* dengan menggunakan UFR dalam merespons gangguan[14].

Perubahan frekuensi dalam sistem tenaga listrik dapat terjadi akibat ketidakseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan jumlah daya beban yang terhubung dalam sistem[15]. Ketidakseimbangan ini bisa terjadi baik dalam kondisi operasi normal, seperti perubahan pembangkit atau beban secara tiba-tiba, maupun

dalam kondisi operasi abnormal, seperti adanya gangguan. Menurut Peraturan Menteri ESDM No. 18 tahun 2016, nilai frekuensi normal adalah 50 Hz dengan toleransi $\pm 0,2$ Hz. Dalam kondisi darurat atau saat terjadi gangguan, frekuensi sistem masih diizinkan untuk turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52,0 Hz sebelum unit pembangkit diizinkan untuk keluar dari sistem operasi. Frekuensi yang melebihi batas atas disebut *over frequency*, sedangkan yang berada di bawah batas bawah disebut *under frequency*.

Perubahan frekuensi sistem yang diluar batas nominal dan tidak tertangani dengan baik dapat menyebabkan terlepasnya unit-unit pembangkit dari sistem, yang pada akhirnya berisiko mengalami *blackout*[16]. Oleh karena itu, diperlukan suatu skema pertahanan untuk mengembalikan frekuensi sistem ke kondisi normal. Salah satu perangkat proteksi yang digunakan dalam skema ini adalah *under frequency relay*, yang berfungsi untuk mengatur mekanisme pelepasan beban.

Penelitian sebelumnya oleh Andika Muhammad Arif (2024) diketahui bahwa skema *Under Frequency Load Shedding* (UFLS) menggunakan relai ROCOF pada sistem kelistrikan Sumatera Barat. Relai ROCOF merupakan alat yang mendeteksi perubahan laju penurunan frekuensi, sehingga dapat memberikan perintah untuk memicu pelepasan beban saat terjadi penurunan frekuensi. Penelitian ini melakukan analisis sistem kelistrikan Sumatera Barat, pada beban dan pembangkitan serta kondisi operasi normal dan gangguan. Kasus kehilangan suplai pembangkit yang paling besar pada sistem kelistrikan Sumatera Barat yaitu saat PLTU Teluk Sirih 1 mengalami *trip* dengan frekuensi akhir sistem berada pada nilai 47,14 Hz. Kemudian dirancang skema pelepasan beban menggunakan relai ROCOF sehingga didapatkan *setting* yang membantu frekuensi sistem kembali ke batas normal menjadi 49,45 Hz[17].

Dari penelitian sebelumnya oleh Adiyabazar dkk (2020) diketahui bahwa sistem kelistrikan Mongolia telah berubah terutama integrasi pembangkit energi terbarukan secara signifikan memengaruhi kestabilan frekuensi sistem tenaga karena menurunnya nilai inersia sistem. Pentingnya menilai skema pelepasan beban akibat ketidakstabilan frekuensi yang ada di sistem kelistrikan Mongolia. Skema ini memiliki kapasitas pelepasan beban maksimum sebesar 45-55% dari total permintaan, menggunakan sembilan tahap pelepasan beban dengan rentang ambang batas frekuensi 47,2-48,8 Hz dan *time delay* sebesar 0,3 s. Pada penelitian tersebut, kinerja skema UFLS dievaluasi dengan mempertimbangkan dua skenario: kondisi sistem dengan inersia tinggi, dan kondisi sistem dengan inersia rendah akibat dilepasnya dengan sengaja PLTU besar. Hasil penelitian menunjukkan pada skenario pertama yaitu sistem dengan inersia tinggi ($H_{sys} = 5,93$ s), nadir frekuensi saat penurunan frekuensi adalah 48,25 Hz dan maksimum laju penurunan frekuensi (ROCOF) adalah -0,97Hz/s. Tahap 1 dari skema UFLS dimulai ketika frekuensi mencapai nilai 48,8 Hz, melepaskan 90,2 MW, sementara tahap 2 dimulai pada 48,6 Hz, melepaskan 43,7 MW dan tahap 3 dimulai pada 48,4 Hz, melepaskan 40,3 MW. Setelah tindakan skema UFLS, frekuensi mencapai 48,83 Hz dengan total beban

yang dilepas sebesar 174,2 MW dan frekuensi selanjutnya kembali pulih ke rentang operasi normal. Sedangkan pada skenario kedua yaitu sistem dengan inersia rendah ($H_{sys} = 3,66$ s), pada maksimum laju penurunan frekuensi (ROCOF) adalah -1,33 Hz/s dengan nadir frekuensi mencapai 47,09 Hz. Hal ini menyebabkan aktifnya seluruh tahap pelepasan beban, dengan total pelepasan beban sebesar 315,9 MW. Sistem masih tidak stabil sehingga frekuensi sistem tidak pulih ke rentang operasi yang diizinkan. Skema UFLS yang ada sebenarnya tidak cukup untuk mencegah keruntuhan frekuensi dengan inersia rendah. Sistem kelistrikan Mongolia sensitif terhadap gangguan sistem, sehingga skema UFLS perlu dinilai ulang untuk memastikan stabilitas frekuensi dan mencegah keruntuhan sistem tenaga[14].

Berdasarkan penelitian oleh Hossain dkk (2018), membahas permasalahan perubahan karakteristik dinamis sistem tenaga akibat integrasi besar-besaran pembangkit energi terbarukan ke dalam sistem tenaga listrik. Penggantian generator besar yang ada dengan pembangkit listrik tenaga angin, pembangkit listrik tenaga surya, dan sumber energi terbarukan lainnya. Inersia sistem berkurang secara signifikan. Akibatnya, frekuensi sistem menurun lebih cepat dan skema proteksi konvensional seperti *Under Frequency Load Shedding* (UFLS) menjadi kurang efektif. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini mengembangkan metode UFLS baru yang lebih adaptif, dengan mempertimbangkan besarnya perubahan frekuensi (ROCOF) dan faktor redaman total sistem sebagai dasar penghitungan jumlah beban yang perlu dilepaskan. Skema ini diuji pada sistem 13-bus yang mewakili sebagian jaringan listrik Bangladesh dengan penetrasi 27% pembangkit surya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa UFLS yang diusulkan mampu menjaga frekuensi tetap berada di atas batas minimum (47,5 Hz), bahkan saat terjadi gangguan besar (kehilangan 44% kapasitas pembangkit). Selain itu, ini juga menunjukkan efisiensi yang lebih baik dibanding UFLS konvensional terutama dalam meminimalkan jumlah beban yang harus diputus[12].

Berkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan di atas secara berturut-turut membahas mengenai skema UFLS dengan relai ROCOF pada sistem eksisting Sumatera Barat, skema UFLS menggunakan relai UFR dengan integrasi pembangkit energi terbarukan pada sistem Mongolia dan skema UFLS baru yang lebih adaptif. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi pembangkit listrik energi terbarukan dan pengurangan kontribusi pembangkit energi fosil dapat mengubah dinamika sistem[6]. Maka akan dilakukan penelitian dengan judul Analisis Stabilitas Frekuensi Dengan Skema *Under Frequency Load Shedding* Mempertimbangkan Integrasi Pembangkit Listrik Energi Terbarukan Pada Sistem 150kV Sumatera Barat. Skema implementasi pembangkit yang akan dianalisis menggunakan simulasi RMS menggunakan *software Digsilent PowerFactory*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang, permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana respons frekuensi sistem sebelum dan sesudah terlepasnya pembangkit dengan mempertimbangkan integrasi pembangkit listrik energi terbarukan yakni PLTA, PLTM dan PLTP ke dalam sistem untuk menggantikan peran PLTU secara bertahap?
2. Bagaimana skema *load shedding* dengan *Under Frequency Relay* (UFR) yang tepat untuk sistem Sumatera Barat?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijabarkan, tujuan dari dilakukannya penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui respons frekuensi sebelum dan sesudah adanya gangguan *trip* unit pembangkit dengan memperhitungkan substitusi pembangkit energi terbarukan PLTA, PLTM dan PLTP ke dalam sistem untuk menggantikan peran PLTU secara bertahap.
2. Memperoleh skema *load shedding* dengan *Under Frequency Relay* (UFR) yang mampu mengembalikan frekuensi sistem ke nilai rentang operasi yang diizinkan.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian tugas akhir ini lebih terfokus, maka ruang lingkup pembahasan perlu dibatasi. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Berdasarkan pada potensi energi terbarukan di wilayah Sumatera Barat, maka pemilihan pembangkit berfokus pada pemanfaatan energi yang berasal dari panas bumi (PLTP) dan tenaga air (PLTA dan PLTM).
2. Pembangkit energi terbarukan diasumsikan langsung terkoneksi ke jaringan 150 kV.
3. Penelitian ini diasumsikan bahwa tidak terdapat beban prioritas.
4. Penelitian berfokus pada kestabilan frekuensi, tanpa memerhatikan stabilitas sudut rotor dan stabilitas tegangan sistem.
5. Penelitian ini menerapkan tiga tahapan pelepasan beban, masing-masing pada frekuensi 49,41 Hz, 49,08 Hz, dan 48,75 Hz, yang disimulasikan pada sistem kelistrikan wilayah Sumatera Barat.
6. Penelitian ini berfokus pada dinamika kondisi sistem pada suatu titik implementasi pembangkit energi terbarukan secara bertahap tanpa melibatkan dimensi waktu dan pertumbuhan beban.
7. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Digsilent PowerFactory*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini:

1. Pada penelitian dapat digunakan sebagai salah satu cara penggantian pembangkit listrik energi fosil dengan pembangkit listrik energi terbarukan pada jaringan PLN.
2. Memastikan frekuensi sistem pada keadaan normal sesudah adanya gangguan *trip* unit pembangkit dengan mempertimbangkan komposisi pembangkit.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir dilakukan secara sistematis yang setiap babnya memiliki tujuan dalam menyampaikan hal tertentu. Hal ini dilakukan agar pembaca dapat memahaminya dengan mudah. Sistematika penulisan tugas akhir dijelaskan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini berisi teori dasar dan ilmu penunjang yang diperlukan dalam menyelesaikan tugas akhir.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini berisi penjelasan tentang langkah-langkah dan menjelaskan mengenai penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini menyajikan hasil simulasi dan analisis terhadap sistem kelistrikan Sumatera Barat berdasarkan skenario implementasi pembangkit energi terbarukan. Analisis mencakup respons sistem terhadap gangguan berupa *trip* pembangkit, baik sebelum maupun setelah penerapan proteksi *under frequency relay*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan.