

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik dan Gardu Induk

Transmisi, distribusi, dan pembangkitan merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Salah satu bagian penting dari sistem transmisi adalah Gardu Induk. Gardu induk berperan vital untuk pengoperasiannya. Maka dari itu gardu induk ini tidak dapat dipisahkan dengan sistem penyaluran (transmisi). Gardu Induk merupakan tempat dimana saluran distribusi dan transmisi terhubung dengan rel daya (transformator daya) secara bersamaan. Gardu induk juga merupakan elemen penting dalam sistem distribusi listrik dan saluran transmisi. Lokasi ini berfungsi sebagai pusat distribusi dan transmisi, lengkap dengan perlengkapan seperti transformator, perangkat kontrol dan proteksi.

2.1.2 Transformator

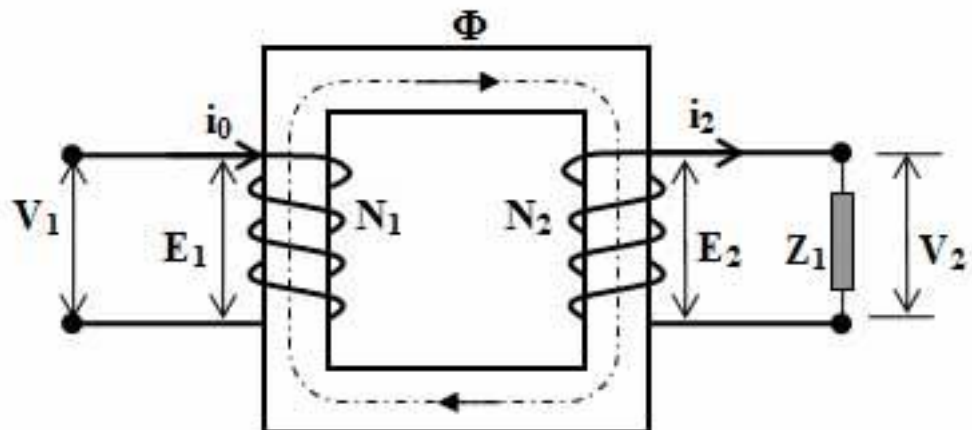
Transformator adalah perangkat yang berfungsi untuk mengalihkan energi listrik arus bolak-balik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya. Transformator memiliki kemampuan untuk meningkatkan atau menurunkan tegangan. Prinsip operasi transformator didasarkan pada dan belitan yang terdiri dari beberapa lilitan. Melalui proses induksi elektromagnetik, transformator mengubah daya (arus dan tegangan) dari 12 sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain dengan frekuensi yang sama¹. Secara fisik, dasar dari transformator memungkinkan terjadinya induksi antara dua sirkuit yang dihubungkan melalui fluks magnet bersama. Dalam bentuk paling sederhana, transformator terdiri dari dua inti induktif yang secara elektrik terpisah tetapi terhubung secara magnetis melalui jalur dengan reluktansi rendah (resistensi terhadap fluks medan magnet dalam ruang atau bahan tertentu). Kedua inti ini memiliki induktansi yang saling terkait. Ketika salah satu koil dihubungkan dengan sumber tegangan AC, maka akan dihasilkan fluks AC pada inti coil tersebut. Sebagian besar fluks AC ini juga akan dialami oleh inti koil yang lainnya, sehingga terjadi GGL induksi bersamaan. Berdasarkan hukum Faraday, rumus untuk induksi elektromagnetik adalah :

$$\varepsilon_1 = -M \frac{dI_1}{dt} \quad \text{dan} \quad \varepsilon_2 = -M \frac{dI_2}{dt} \quad (2.1)$$

Apabila kedua lilitan membentuk rangkaian tertutup, maka suatu arus akan mengalir melalui rangkaian tersebut, yang menyebabkan transfer energi dari lilitan pertama ke lilitan kedua. Lilitan pertama yang menerima pasokan dari sumber tegangan ac dikenal sebagai kumparan sekunder.¹² Secara ringkas:

1. Transformator adalah alat yang memindahkan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian yang lain.
2. Transformator berfungsi tanpa mengubah nilai frekuensi.
3. Prinsip kerja transformator adalah melalui induksi elektromagnetik.
4. Di mana dua rangkaian listrik saling mempengaruhi melalui induksi

Berikut adalah ilustrasi sederhana dari sebuah transformator:



Gambar 2.1 Rangkaian Transformator Sederhana²

Dimana:

V_1 = Tegangan primer

I_0 = Arus primer

N_1 = Jumlah lilitan primer

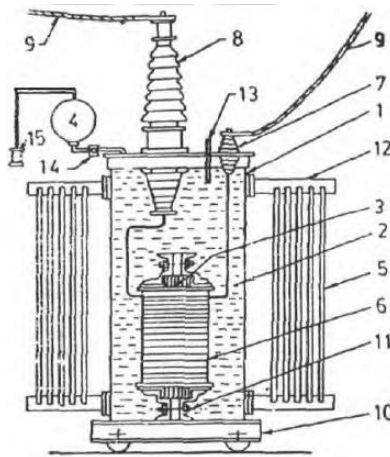
V_2 = Tegangan sekunder

I_2 = Arus sekunder

N_2 = Jumlah belitan sekunder

Tegangan pada sistem penyaluran tenaga listrik harus bertegangan tinggi supaya rugi daya dalam proses transmisi menjadi minimal. Ini sebabnya diperlukan transformator daya untuk mengalirkan energi listrik dari generator bertegangan menengah ke transmisi bertegangan tinggi dan untuk mengalirkan daya dari jalur transmisi bertegangan tinggi ke jaringan distribusi bertegangan rendah.²

Di bawah ini terdapat gambar transformator daya:



Gambar 2.2 Transformator Daya²

Keterangan:

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| 1. Mounting flange | 9. Terminal connection |
| 2. Tangki transformator | 10. Carriage |
| 3. Core | 11. Baut pad core |
| 4. Konservator | 12. Header |
| 5. Sirip radiator | 13. Termometer |
| 6. Winding | 14. Relai Bucholz |
| 7. LV bushing | 15. Breather ² |
| 8. HV bushing | |

2.1.3 Sistem Pendingin

Bekerjanya trafo pada saat itu akan dipengaruhi oleh tegangan jaringan, yaitu kerugian pada trafo itu sendiri dan suhu dilingkungannya. Kemudian pada saat suhu kerja yang sangat tinggi akan menyebabkan kerusakan pada isolasi kertas, maka dari itu

pendinginan pada trafo yang sangat efektif harus atau sangat diperlukan. Sehingga minyak yang bersifat isolasi juga dapat difungsikan sebagai pendinginan terhadap trafo. Saat oli bersirkulasi, panas dari belitan dibawa oleh oli sepanjang jalur sirkulasinya dan didinginkan di sirip radiator. Dengan adanya kipas maka proses pendinginan dapat terbantu dan pompa sirkulasi untuk meningkatkan efisiensi pendinginan. Minyak pendingin berfungsi untuk mentransfer panas yang dihasilkan pada inti dan kumparan transformator ke udara. Terdapat dua jenis bahan pendingin yang dipakai pada transformator daya, yaitu minyak mineral dan minyak sintetik.³

Identifikasi transformator yang terendam minyak berdasarkan metode pendinginan yang diterapkan dinyatakan dengan kode empat huruf seperti yang dijelaskan di bawah ini. Ketentuan ini sesuai dengan IEEE Std C57. 12.00-2000 sebagai berikut:

Huruf pertama: media pendinginan internal berinteraksi dengan kumparan

O: Cairan isolasi (minyak mineral atau sintetis) yang memiliki titik api $\leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

K: Cairan isolasi yang titik apinya $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$

L: Cairan titik api yang titik api tidak dapat diukur

Huruf Kedua: cara sirkulasi media pendinginan internal

N: Proses konveksi berlangsung secara alami. Cairan isolasi mengalir dengan sendirinya melalui alat pendingin dan kumparan dalam transformator.

F: Sirkulasi cairan isolasi dengan cara “dipaksakan” menggunakan pompa, namun proses aliran konveksi pada kumparan terjadi secara alami.

D: Sirkulasi cairan isolasi dilakukan melalui metode “dipaksakan” dengan bantuan pomp. Cairan isolasi diarahkan melalui saluran tertentu menuju kumparan utama

Huruf Ketiga: media pendingin eksternal (di luar transformator)

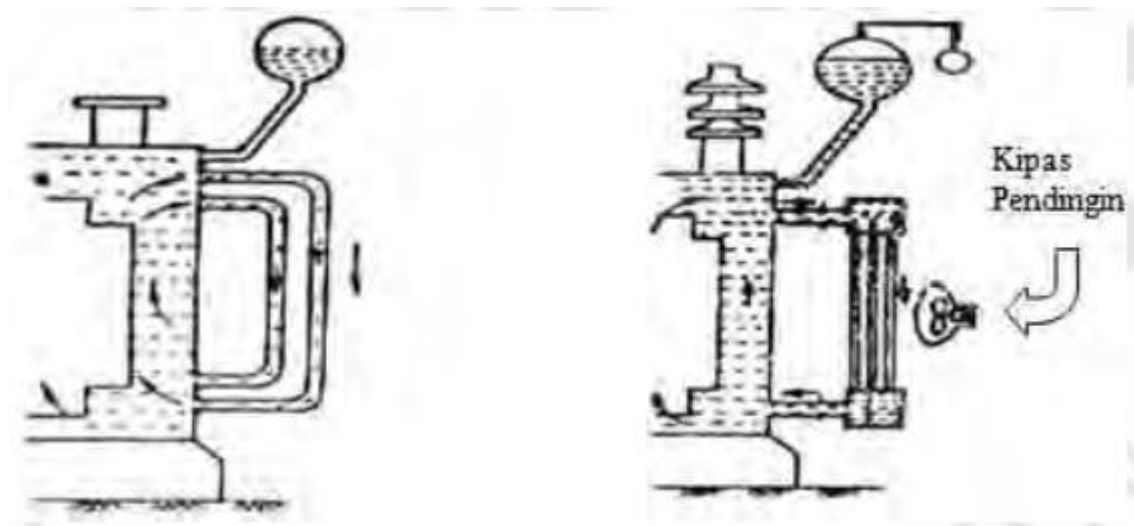
A: Udara

W: Air

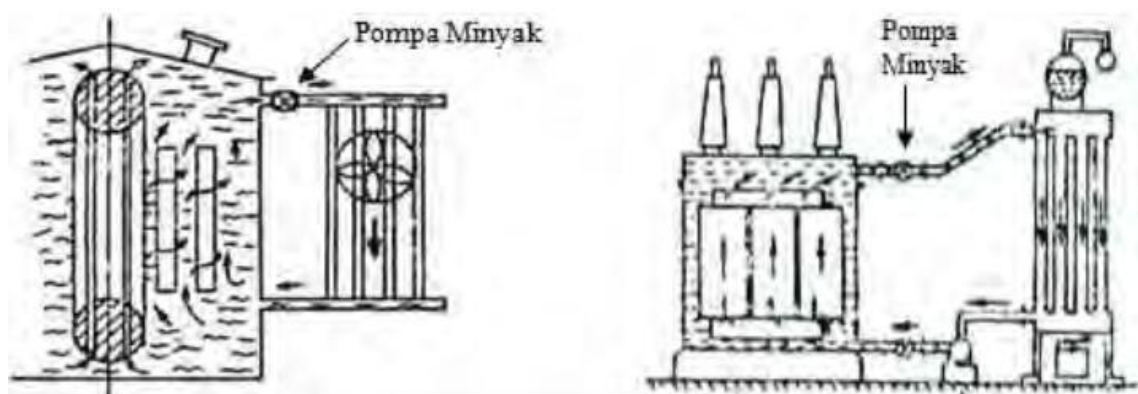
Huruf Keempat: cara sirkulasi media pendingin eksternal

N: Konveksi alami

F: Sirkulasi yang “dipaksakan” (*forced*), menggunakan kipas atau pompa.²



Gambar 2.3 Contoh Konfigurasi Sistem Pendingin ONAN dan ONAF²



Gambar 2.4 Contoh Konfigurasi Sistem Pendingin OFAF dan OFAF dengan Pendingin Terpisah ²

Tabel 2.1 Sistem Pendingin pada Transformator²

No.	Singkatan	Maksud	Penjabaran
1.	ONAN	Oil Natural Air Natural	Ini adalah sistem pendinginan untuk transformator yang sederhana. Minyak panas mengalir secara konveksi alami untuk tujuan pendinginan. Dalam proses sirkulasi konveksi minyak, minyak yang lebih panas mengalir ke

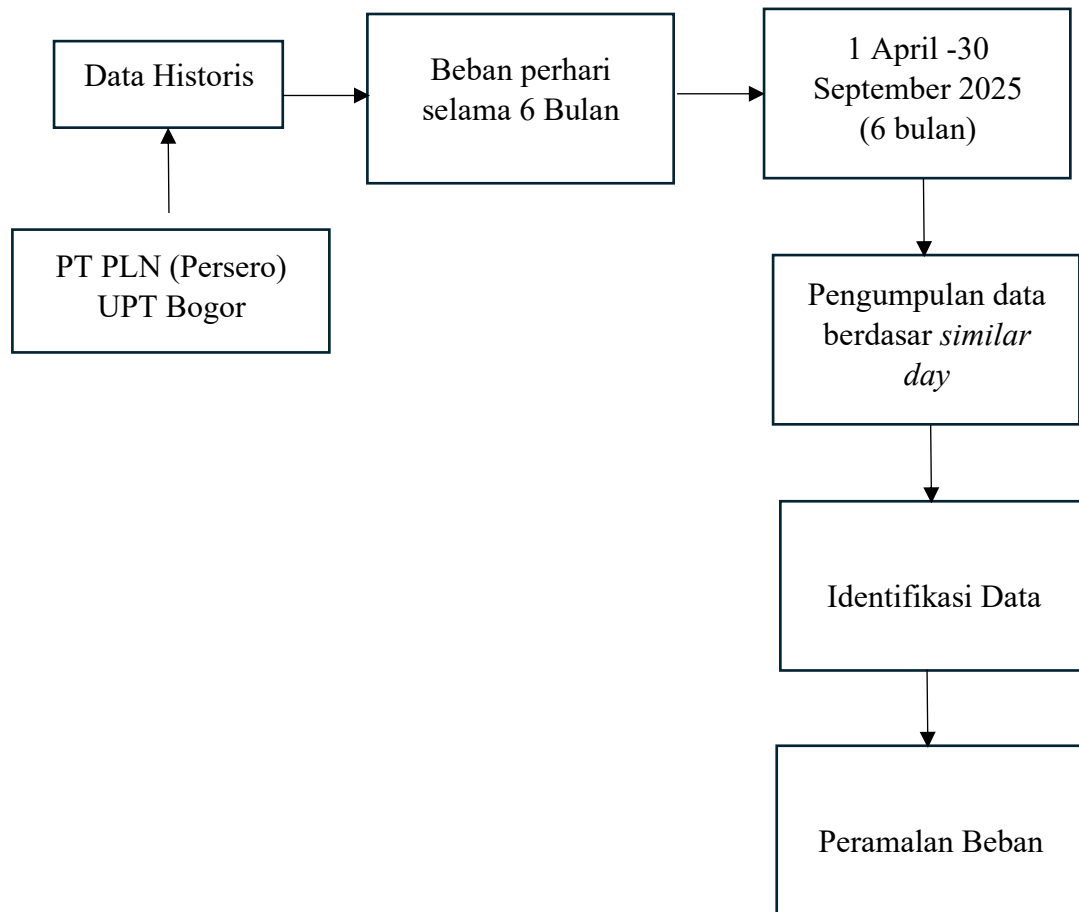
No.	Singkatan	Maksud	Penjabaran
			bagian atas tangki transformator, dan area yang kosong diisi oleh minyak yang lebih dingin. Minyak yang panas ini yang sampai di bagian atas akan melepaskan panas ke lingkungan melalui proses konduksi, konveksi, dan radiasi. Dengan metode ini, minyak dalam tangki transformator akan terus bergerak saat transformator mengalami pembebanan. Kecepatan pengeluaran panas di udara dipengaruhi oleh area permukaan tangki minyak, sehingga penting untuk meningkatkan luas permukaan efektif tangki agar laju pengeluaran panas ke udara dapat ditingkatkan, yaitu dengan cara menambahkan radiator berjenis sirip untuk sirkulasi minyak secara alami atau natural.
2.	ONAF	Oil Natural Air Force	Dalam metode ini, pengeluaran panas dapat ditingkatkan dengan cara menggunakan aliran udara yang dipaksa di atas permukaan radiator transformator. Kipas-kipas menghembuskan udara ke permukaan radiator transformator. Aliran udara paksa ini menghilangkan panas dari permukaan radiator. Kipas-kipas tersebut diaktifkan saat transformator mengalami beban yang tinggi.
3.	OFAF	Oil Force Air Force	Dalam sistem pendinginan OFAF, minyak dipaksa bergerak dalam sirkuit tertutup di dalam tangki transformator melalui pompa. Setiap radiator dilengkapi dengan kipas untuk

No.	Singkatan	Maksud	Penjabaran
4.	OFWF	Oil Force Water Force	mentransfer panas dari minyak ke udara. Dalam sistem OFAF, minyak yang panas dipompa dari tangki dan panasnya langsung disalurkan ke lingkungan melalui radiator, sehingga proses pendinginan berlangsung lebih cepat. Kita menyadari bahwa suhu lingkungan air jauh lebih rendah dibandingkan suhu udara pada kondisi cuaca yang serupa. Oleh karena itu, air menjadi media yang lebih efektif untuk transfer panas daripada udara. Dalam sistem pendingin OFWF, panas dipindahkan melalui minyak serta air yang dialirkan melalui saluran pembuangan panas dengan bantuan pompa. Sistem ini digunakan pada kondisi lingkungan tertentu seperti suhu tinggi, di pabrik besi, ruang bawah tanah, dan sebagainya.
5.	ODAF	Oil Directed Air Force	ODAF dianggap sebagai versi yang lebih baik dari OFAF. Sirkulasi paksa minyak ini diarahkan mengalir melalui rute yang telah ditentukan dalam lilitan transformator. Minyak dingin masuk ke dalam tangki transformator dari pendingin atau radiator, kemudian melintas melalui celah-celah lilitan di mana minyak dialirkan di antara konduktor yang terisolasi untuk memastikan perpindahan panas yang lebih cepat. ODAF, atau minyak yang diarahkan untuk pendinginan paksa dengan udara, biasanya digunakan dalam

No.	Singkatan	Maksud	Penjabaran
6.	ODWF	Oil Directed Water Force	transformator dengan kapasitas yang sangat tinggi. Sistem ODWF mirip dengan sistem ODAF, perbedaannya adalah bahwa di sini minyak panas didinginkan melalui pendingin dengan menggunakan air yang dipaksa, bukan udara.

Transformator daya dengan rating daya yang besar dan memiliki rentang penggunaan daya yang lebar pada umumnya menggunakan gabungan dari tiga jenis sistem pendingin, yaitu ONAN, ONAF, dan OFAF. Biasanya transformator tersebut dilengkapi oleh sensor temperatur analog. Sensor ini biasanya sudah diatur agar sistem pendingin dapat diubah konfigurasinya ketika temperature transformator mencapai batasan tertentu. Misal ketika temperatur 0°C – 50°C digunakan sistem ONAN, antara 50°C – 60°C digunakan sistem ONAF (kipas angin menyala), dan $\geq 60^{\circ}\text{C}$ digunakan sistem OFAF (pompa minyak menyala).²

2.2 Diagram Blok Penelitian



Gambar 2.5 Kerangka Penelitian

2.3 Penelitian Yang Relevan

Dalam studi ini, penulis mengadakan kajian pustaka terhadap beberapa penelitian yang berkaitan untuk dijadikan acuan. Acuan tersebut bisa berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Berikut adalah sejumlah acuan yang berhasil diperoleh oleh penulis:

1. Menurut Rohmanita Duanaputri, Sulistyowati dan Putri Aulia Insani, 2022, dalam jurnal yang berjudul Analisa Peramalan kebutuhan energi listrik sektor Industri di Jawa Timur dengan Metode Regresi Linier. Dalam tulisannya disebutkan Perhitungan peramalan menggunakan metode regresi linear pada pelanggan listrik, daya tersambung, energi listrik terjual, dan pendapatan penjualan energi listrik pada

sektor industri di Jawa Timur (2023-2027). Pertama menghitung persamaan (2) dan (3) untuk menentukan nilai konstanta (a) dan koefisien regresi (b). Setelah itu, menghitung persamaan (1) untuk mencari persamaan regresi linearnya. Kemudian didapatkan hasil perhitungan peramalan kebutuhan energi listrik secara keseluruhan Menurut hasil perhitungan peramalan kebutuhan energi listrik dengan metode regresi linear pada sektor industri di Jawa Timur (2023-2027) akan terjadi kenaikan per tahunnya. Untuk pelanggan listrik sebesar 5.264 pelanggan, daya tersambung sebesar 328,49 MVA, energi listrik terjual sebesar 580,64 GWh, dan pendapatan penjualan energi listrik sebesar 1.065.266,21 Juta Rupiah. Maka pasokan energi listrik harus tercukupi dengan merencanakan pengembangan atau penambahan kapasitas pembangkit listrik.⁴

2. Dalam skripsinya yang berjudul Analisa Peramalan Kebutuhan Energi Listrik PLN Area Batam Menggunakan Metode Regresi Linier, 2018 Ryan Septyawan melakukan penelitian menggunakan data statistic Perusahaan Listrik Negara Area Batam dari tahun 2004 sampai dengan 2015. Beliau melakukan analisis regresi linear untuk menentukan nilai konstanta a dan koefisien regresi b pada persamaan linear dengan melakukan perhitungan data. Perhitungan untuk mendapatkan konstanta a dan koefisien regresi b energi yang terjual pada beban industri adalah sesuai gambar tabel berikut:⁵

Tabel 2.2 Energi yang Terjual pada Beban Industri⁵

Tahun	Variabel x: Periode Tahun	Variabel y:	x^2	$x \cdot y$
		Energi yang Terjual (GWh)		
2004	1	188,608	1	188,608
2005	2	225,707	2	451,416
2006	3	316,741	9	950,233
2007	4	369,931	16	1.479,724
2008	5	417,623	25	2.088,115
2009	6	419,889	36	2.519,334

Tahun	Variabel x: Periode Tahun	Variabel y:	x^2	$x.y$
		Energi yang Terjual (GWh)		
2010	7	469,042	49	3.283,294
2011	8	464,078	64	3.712,624
2012	9	514,255	81	4.628,295
2013	10	580,540	100	5.805,4
2014	11	582,470	121	6.407,17
2015	12	518,860	144	6.226,32
Total	78	5.067,745	650	37.740,52

Dilakukan perhitungan untuk memprediksi pertumbuhan jumlah energi yang terjual pada beban industri selama 6 tahun mendatang (tahun 2016 sampai dengan 2021). Hasil perhitungan untuk prediksi jumlah energi yang terjual adalah sebagai berikut⁵

Tabel 2.3 Perhitungan Jumlah Energi yang Terjual⁵

Tahun	Periode Tahun	Energi yang Terjual (GWh)	Selisih	Kenaikan per Tahun (%)
2016	13	640,502	121,642	18,99
2017	14	674,070	33,568	4,98
2018	15	707,637	33,568	4,74
2019	16	741,205	33,568	4,53
2020	17	774,773	33,568	4,33
2021	18	808,341	33,568	4,15
Total Kenaikan Energi yang Terjual (GWh)			289,481	
Rata-rata Kenaikan per Tahun			6,95	

Dari hasil prediksi di atas didapatkan bahwa jumlah energi yang terjual pada beban industri selama 6 tahun mendatang sebesar 289,481 GWh dengan rata-rata kenaikan 6,95% setiap tahunnya serta cenderung meningkat secara linear seiring pertambahan periode tahun

3. Wisnu Adi Suryo, Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D, Teguh Utomo, Ir., MT dalam jurnalnya yang berjudul Studi Perkiraan Beban Pda Gardu Induk Manisrejo Tahun 2014-2025 melakukan perhitungan untuk memperkirakan beban di kota Madiun dengan metode regresi linier berganda. Didapatkan hasil perhitungan bahwa beban pada GI Manisrejo terus meningkat hingga tahun 2025 dan masih berada di bawah kapasitas GI yakni sebesar 70 MVA. Namun perkiraan beban pada tahun 2024 telah melampaui 80% dari kapasitas GI Manisrejo dan disarankan dilakukan uprating trafo VI dari 20 MVA menjadi 30 MVA. Jika dilakukan uprating pembebanan yang sebelumnya 81,76% turun menjadi 63,59% pada tahun 2024.⁶

2.4 Konsep Peramalan Beban

Peramalan beban listrik (load forecasting) adalah proses memperkirakan kebutuhan daya listrik pada periode waktu tertentu berdasarkan data historis beban dan faktor faktor yang mempengaruhi, seperti cuaca, hari kerja/libur dan tren ekonomi.

Menurut Nasution (2005), peramalan dalam hubungannya dengan horizon waktu, dapat diklasifikasikan kedalam 3 kelompok, yaitu:

1. Peramalan beban jangka pendek, yaitu peramalan beban untuk jangka waktu beberapa jam sampai satu minggu kedepan, yang biasanya digunakan untuk menentukan batas beban maksimum dan beban minimum.
2. Peramalan beban jangka menengah, yaitu peramalan beban untuk jangka waktu satu bulan sampai satu tahun, yang biasa digunakan untuk perencanaan perluasan jaringan transmisi, jaringan distribusi, dan penambahan pembangkit listrik baru.
3. Peramalan beban jangka panjang, yaitu peramalan beban untuk jangka waktu diatas satu tahun, yang digunakan untuk perencanaan produk dan sumber daya.⁷

Dalam konteks GI 150 kV Cibinong, peramalan jangka pendek sangat penting karena dapat digunakan untuk mengatur pembebanan transformator 2, 3, 5 dan 6 agar tidak melebihi kapasitas nominalnya dan menjaga kontinuitas pelayanan listrik.

2.5 Metode Peramalan

Terdapat berbagai metode peramalan yang dapat digunakan untuk memprediksi beban listrik, antara lain:

1. Metode Statistik Klasik, seperti regresi linier, moving average, exponential smoothing, ARIMA, dan time series analysis.
2. Metode kecerdasan buatan (Artificial Intelligence), seperti Artificial Neural Network (ANN), Fuzzy Logic dan Support Vector Machine (SVM).
3. Metode Hibrida, yaitu kombinasi antara pendekatan statistik dan kecerdasan buatan.

Pemilihan metode bergantung pada ketersediaan data, tujuan analisis, dan kompleksitas system beban. Dalam penelitian ini digunakan metode regresi linier, karena sederhana, mudah diterapkan, dan mampu memberikan hasil yang cukup baik untuk peramalan jangka pendek.

2.6 Teori Regresi Linier

Merupakan metode peramalan yang digunakan untuk mendeteksi ada atau tidaknya hubungan sebab akibat antara variable penyebab (X) terhadap variabel akibat (Y) untuk memproyeksikan kejadian di masa depan. Metode ini digunakan untuk melakukan peramalan atau prediksi tentang karakteristik kualitas maupun kuantitas. Pada umumnya variabel penyebab disebut *predictor* sedangkan variabel akibat disebut *response*.⁴

Adapun persamaannya ditunjukkan sebagai berikut:

$$Y = a + bX \quad (2.2)$$

Keterangan:

Y = variabel akibat (beban listrik yang akan diramalkan)

X = variabel penyebab (periode waktu)

a = nilai konstanta regresi

b = nilai koefisien regresi

Koefisien a dan b didapatkan melalui metode kuadrat terkecil yang bertujuan untuk mengurangi jumlah kuadrat dari perbedaan antara nilai yang sebenarnya dan nilai yang diperkirakan.

Model regresi linier dapat diperluas menjadi regresi linier berganda apabila terdapat lebih dari satu variable bebas:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \dots + b_nX_n + \varepsilon \quad (2.3)$$

Metode regresi linier memiliki kelebihan dalam kemudahan interpretasi, stabilitas model, serta kemampuan analisis tren jangka pendek berdasarkan data historis yang cukup stabil.¹¹

2.7 Evaluasi Kinerja Model Peramalan

Untuk menilai keakuratan hasil peramalan, digunakan beberapa parameter statistik seperti:

1. Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) merupakan perbedaan absolut nilai rata – rata yang ada pada diantara hasil persentase dari prediksi dan nilai realisasi. Saat mengevaluasi hasil dari prediksi beban dapat menggunakan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) untuk dapat melihat tingkat akurasi terhadap angka realisasi dan angka prediksi.⁸

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{T=1}^N \left| \frac{Y_t - \hat{Y}_t}{Y_t} \right| \quad (2.4)$$

Keterangan:

n = jumlah data

Y_t = nilai aktual

$\hat{Y}_t$ = nilai prediksi

2. Mean Squared Error (MSE)

Mean Squared Error (MSE) adalah metrik evaluasi yang digunakan untuk mengukur seberapa dekat hasil prediksi suatu model terhadap nilai aktual. MSE dihitung dengan mengambil rata-rata dari kuadrat selisih antara nilai aktual dan nilai prediksi. Metrik ini sering digunakan dalam analisis regresi dan pembelajaran mesin untuk menilai kinerja model prediktif⁹

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2 \quad (2.5)$$

Keterangan:

n = jumlah data

Y_t = nilai aktual

$\hat{Y}_t$ = nilai prediksi

3. Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error (RMSE) digunakan untuk menghitung jumlah kesalahan dalam memprediksi data. RMSE menghitung selisih antara nilai sebenarnya dan nilai yang diharapkan dan membagi jumlah yang diperoleh dengan jumlah waktu perkiraan dan mengambil akar kuadratnya. Perhitungan Root Mean Square Error (RMSE) dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.6)$$

Semakin kecil MAPE, MSE, atau RMSE, maka semakin baik akurasi model peramalan yang digunakan.¹⁰

2.8 Penerapan Regresi Linier dalam Peramalan Beban

Dalam konteks peramalan beban transformator di GI 150 kV Cibinong metode regresi linier digunakan untuk:

- Mengidentifikasi tren kenaikan atau penurunan beban berdasarkan data historis harian atau per jam.
- Memperkirakan beban puncak (peak load) pada periode mendatang.
- Menentukan hubungan antara waktu dan variasi beban yang terjadi pada masing-masing transformator (T2, T3, T5 dan T6)

Dengan pendekatan ini, diharapkan model regresi linier dapat memberikan hasil peramalan yang akurat dan membantu pihak pengelola GI dalam menjaga keandalan operasi system tenaga listrik.