

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut merupakan beberapa kumpulan tinjauan pustaka yang dapat mendukung dalam penyelesaian tugas akhir ini:

1. Naufal Zikry Fadhilah (2018), melakukan penelitian dengan menggunakan metode regresi berganda serta penelitian dengan judul “Analisis Pembebanan Transformator Berdasarkan Pertumbuhan Beban di Gardu Induk 150 kV Mrica Banjarnegara”. Pada tahun 2022, transformator I pada gardu induk 150 kV Mrica Banjarnegara mengindikasikan beban optimal hingga mencapai 46,61 MVA atau 77% dari kapasitas transformator. Kemudian pada tahun 2024 diramalkan beban yang ditanggung oleh transformator sudah mencapai 55,49 MVA atau kisaran 92% dari kapasitas transformator. Kemudian transformator akan mengalami *overload* atau kelebihan beban hingga mencapai 60 MVA pada tahun 2025 sehingga pergantian atau penambahan kapasitas transformator I sangat perlu dilakukan. Untuk transformator II gardu induk Mrica Banjarnegara 150 kV hingga tahun 2027, beban yang ditanggung oleh transformator masih cukup ringan yaitu dengan besar beban 34,96 MVA atau 58% dari kapasitas transformator. Pada ramalan tahun 2031 beban yang ditanggung transformator sebesar 46,09 MVA atau 76% dari kapasitas transformator yang mana sudah dalam kategori beban optimal. Transformator II akan mengalami fenomena *overload* atau kelebihan beban yaitu pada tahun 2035 dengan beban sebesar 63,35 MVA atau kisaran 105% dari kapasitas transformator sehingga pada tahun tersebut transformator II sangat perlu diganti atau ditambahkan kapasitasnya.
2. Muhammad Aziz Soleh (2017), dengan judul penelitian “ Analisis Transformator Berdasarkan Pertumbuhan Beban di Gardu Induk 150 kV Klaten”. Pada gardu induk 150 kV klaten transformator 130 MVA di tahun

2017 hingga 2024 beban transformator sudah mengalami kenaikan hingga mencapai 24,07 MVA atau 80% dari total kapasitas transformator yang mana kondisi beban sebesar 80% masih dalam keadaan optimal. Pada tahun 2033 diramalkan beban yang ditanggung transformator telah mengalami kenaikan hingga mencapai 29,44 MVA atau 98% dari total kapasitas transformator yang mana pada kondisi ini transformator diindikasikan sudah mencapai batas beban berat. Kemudian pada tahun 2034 hingga 2036 transformator sudah mengalami *overload* dengan beban sebesar 33,52 MVA atau kisaran 112% dari total kapasitas transformator. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode *time series*.

3. Luqman Hakim Anwar (2017), dengan judul penelitian “Analisis Prakiraan Kemampuan Transformator Berdasarkan Pertumbuhan Beban Berdasarkan Metode Regresi Linier di Gardu Induk 150 kV Mojonegoro Boyolali”. Pada tahun 2017 hingga 2022 diramalkan beban pada transformator I gardu induk mojonegoro menanggung beban sebesar 80% dari total kapasitas transformator yang mana dalam kondisi ini mengindikasikan bahwa transformator masih dalam beban optimal. Sedangkan pada tahun 2023, transformator akan menanggung beban sebesar 48,69 MVA yaitu di atas 80% dari total kapasitas transformator yang mana kondisi ini mengindikasikan transformator mengalami beban berat. Transformator I gardu induk mojonegoro diperkirakan masih sanggup menanggung beban dengan optimal hingga 6 tahun yang akan datang. Pada tahun berikutnya transformator harus segera diganti atau ditambahkan kapasitasnya mengingat prakiraan beban transformator akan mengalami *overload* atau kelebihan beban pada tahun 2036.
4. Muhammad Suyanto, Ridwan Setyowibowo dan Prasetyono Eko Pambudi (2018), dengan judul penelitian “Evaluasi Kemampuan Transformator Daya Pada Gardu Induk 150 kV Wates”. Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah analisis trend. Untuk Transformator daya-I menggunakan trend eksponensial dengan nilai MAPE sebesar 2,91% diperoleh perkiraan beban pada tahun 2019 sebesar 25,74 MVA dimana

pembebanan sudah melebihi 80%. Sedangkan transformator II menggunakan trend kuadratik dengan MAPE sebesar 1,91% diperoleh perkiraan beban pada tahun 2025 sebesar 52,29 MVA, setelah dilakukan penambahan rencana beban khusus, diperoleh perkiraan beban pada tahun 2019 sudah mencapai 80%. Sehingga pada tahun 2019 sudah dilakukan penambahan transformator daya baru, dan pada tahun 2024 dapat dilakukan uprating pada transformator daya-1.

5. Nur Ayu Puspita Indra Pratiwi, I Gede Dyana Arjana, Antonius Ibi Weking (2018), dengan judul penelitian “Studi Analisis Kemampuan Penyediaan Suplai Daya Akibat Peningkatan Beban di Gardu Induk Nusa Dua”. Prakiraan beban menggunakan metode regresi linear untuk memperoleh nilai perkembangan beban transformator dan suplai daya hingga 5 tahun mendatang. Hasil perhitungan laju pertumbuhan beban Transformator Gardu Induk Nusa Dua adalah 8,9% pertahun, dan hasil perhitungan tahun 2018 pada Transformator 1 sebesar 113,38A Transformator 2 sekitar 124,3A, dan Transformator 3 sebesar 137,09A. Hasil perhitungan laju pertumbuhan suplai daya melalui transmisi 150 Kv menuju Gardu Induk Nusa Dua yaitu 179,612A yang disuplai dari GIS bandara, dan 238,32A dari GIS Pesanggaran. Selisih antara beban dan suplai daya pada tahun 2018 sebesar 18,53A (0,430%) dari GIS Bandara dan 24,53A (0,570%) dari GIS Pesanggaran. Transformator 3 pada tahun 2025 tidak mampu mensuplai beban, Transformator 2 tidak mampu mensuplai beban pada tahun 2026, dan Transformator 1 tidak mampu mensuplai beban pada tahun 2027. Sehingga diperlukan penambahan Transformator baru atau pembangunan Gardu Induk baru di sekitar wilayah peningkatan beban.
6. Elias K. Bawan (2013), dengan judul penelitian “Estimasi Pembebanan Transformator Gardu Induk 150 kV”. Peramalan beban pada penelitian ini menggunakan rata-rata harian puncak data beban selama lima tahun dari 2003 hingga 2008. Berdasarkan analisa hasil dari metode pendekatan model eksponensial, diperoleh persamaan $Y = 5,29 e^{0.04057 X}$. dengan

menggunakan model ini, ditemukan bahwa beban prakiraan pertumbuhan transformator selama 2009 hingga 2025, sebesar 50,89 MVA (85% dari beban penuh). Selain itu model $Y = 20,18 + 0,44 X_1 + 0,07 X_2$ ditemukan menggunakan metode polinomial. Pada 2025, transformator, berdasarkan metode polinomial, menyalurkan daya sebesar 80,07 MVA (sekitar 80,07% beban penuh).

7. Fitrizawati, Hartono, Dody Bastian Tumanggor (2017), dengan judul penelitian “Analisis Kelayakan Kapasitas Transformator Berdasarkan Prediksi Beban Tahunan (Studi Kasus Pada PT. PLN (Persero) Rayon Majenang”. Pertumbuhan beban rata-rata pada penyulang Majenang 01 PT. PLN (Persero) Rayon Majenang dari tahun 2011–2014 naik sekitar 7,12%. Dengan menggunakan perhitungan metode eksponensial, diprediksi bahwa sampai tahun 2019, trafo akan mengalami kelebihan kapasitas dengan beban sebesar 33.72 MVA atau lebih dari 80% total persentase pembebanan.
8. Syarif M. Bahtiar (2016), dengan judul penelitian “Peramalan Beban Dengan Menggunakan Metode *Time Series* Untuk Kebutuhan Tenaga Listrik di Gardu Induk Sungai Raya”. Metode yang di gunakan untuk mengetahui kebutuhan energi pada gardu induk sungai raya ini menggunakan metode *Time Series*. Hasil perhitungan dapat diketahui bahwa nilai ramalan untuk beban dari tahun 2016 sampai 2035 mengalami peningkatan setiap tahunnya. Dengan rata-rata setiap tahunnya sebesar 4712 Ampere dari tahun 2016 - 2035. Jumlah beban listrik di Gardu Induk Sungai Raya pada tahun 2016 adalah 3523 Ampere di Perkirakan di tahun 2035 adalah 5901 Ampere. Kapasitas yang dimiliki yaitu sebesar 150 KVA, maka gardu induk sungai raya di perkirakan pada tahun 2023 telah mengalami overload sebesar 146,63 MW.

Tabel 2.1 *State of Art* Penelitian

No.	Penulis	Metode	Hasil
1	Naufal Zikry Fadillah	Regresi Linier Berganda	Pada tahun 2024 transformator I diramalkan mencapai beban berat dengan angka 55,49 MVA (92%). Sedangkan Transformator II mencapai <i>overload</i> dengan angka 63,35 MVA (105%) pada tahun 2035.
2	Muhammad Aziz Soleh	<i>Time Series</i>	Pada tahun 2033 transformator mengalami kenaikan hingga 29,44 MVA (98%). Kemudian pada tahun 2034 hingga 2036 mengalami <i>overload</i> dengan beban sebesar 33,52 MVA (112%).
3	Luqman Hakim Anwar	Regresi Linier	Pada tahun 2023 transformator I menanggung beban sebesar 48,69 MVA (>80%). Pada tahun berikutnya akan mengalami <i>overload</i> pada tahun 2036.
4	Muhammad Suyanto, Ridwan Setyowibowo dan Prasetyono Eko Pambudi	Analisis Trend (eksponensial dan Kuadratik)	Transformator Daya I dengan menggunakan eksponensial diperoleh perkiraan beban pada tahun 2019 sebesar 25,74 MVA (>80%). Sedangkan transformator II menggunakan kudratik diperoleh perkiraan beban pada tahun 2025 sebesar 52,29 MVA.
5	Nur Ayu Puspita Indra Pratiwi, I Gede Dyana Arjana, Antonius Ibi Weking	Regresi Linier	Pertumbuhan beban Transformator sebesar 8,9% pertahun. Transformator 3 pada tahun 2025 tidak mampu mensuplai beban, Transformator 2 tidak mampu mensuplai beban pada tahun 2026, dan Transformator 1 tidak mampu mensuplai beban pada tahun 2027.

Tabel 2.1 *State of Art* Penelitian (lanjutan)

No.	Penulis	Metode	Hasil
6	Elias K. Bawan	Pendekatan Model Eksponensial dan Polinomial	Dengan menggunakan model eksponensial, pertumbuhan transformator selama 2009 hingga 2025 diperkirakan sebesar 50,89 MVA (85% dari beban penuh). Sedangkan dengan metode polinomial, diperkirakan sebesar 80,07 MVA (sekitar 80,07% beban penuh).
7	Fitrizawati, Hartono, Dody Bastian Tumanggor	Eksponensial	Pertumbuhan beban dari tahun 2011–2014 naik sekitar 7,12%. Dengan menggunakan metode eksponensial, diprediksi bahwa sampai tahun 2019, trafo akan mengalami kelebihan kapasitas dengan beban sebesar 33.72 MVA atau lebih dari 80% total persentase pembebanan.
8	Syarif M. Bahtiar	<i>Time Series</i>	Dari tahun 2016 sampai 2035 mengalami peningkatan setiap tahunnya, dengan rata-rata setiap tahunnya sebesar 4712 Ampere dari tahun 2016 - 2035. Jumlah beban listrik di Gardu Induk Sungai Raya pada tahun 2016 sebesar 3523 Ampere di Perkirakan di tahun 2035 sebesar 5901 Ampere.

2.2 Dasar Teori

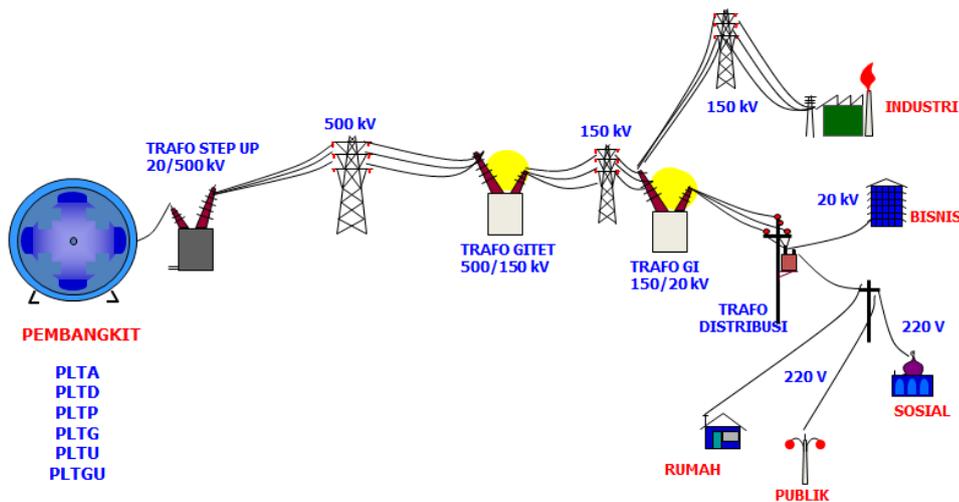
2.2.1 Sistem Pendistribusian Listrik

Dikarenakan berbagai macam persoalan teknis, proses pembangkitan energi listrik hanya dilakukan di tempat-tempat tertentu saja. Energi listrik biasanya dibangkitkan melalui pembangkit-pembangkit listrik di daerah tertentu dengan memanfaatkan sumber yang ada atau yang bisa dimanfaatkan di daerah tersebut, seperti PLTU, PLTA, PLTMH, PLTG, PLTP dan lain-lain. Kemudian setelah energi listrik dibangkitkan melalui pembangkit-pembangkit listrik, selanjutnya tegangan listrik akan dinaikkan dengan menggunakan transformator *step up* agar daya listrik yang kemudian akan disalurkan melalui saluran transmisi.

Untuk saluran transmisi, terdapat dua jenis saluran, yaitu saluran transmisi udara dan saluran transmisi bawah tanah. Di Indonesia sendiri mayoritas menggunakan saluran transmisi udara, dikarenakan harganya yang relatif lebih murah dan pemasangan yang lebih mudah. Selain itu saluran transmisi di Indonesia terdapat Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV.

Setelah energi listrik berhasil disalurkan melalui saluran transmisi, maka energi listrik tersebut akan sampai di Gardu Induk (GI). Pada gardu induk, tegangan akan diturunkan kembali menjadi tegangan menengah dengan menggunakan transformator *step down*, tegangan menengah biasanya sering disebut tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang biasanya digunakan oleh PLN di Indonesia adalah tegangan 20 kV. Setelah energi listrik ditransmisikan melalui jaringan distribusi primer, selanjutnya akan diturunkan kembali menjadi tegangan rendah sebesar 380/220 Volt dengan menggunakan transformator *step down* di gardu-gardu distribusi. Kemudian tegangan rendah tersebut akan langsung disalurkan ke rumah-rumah pelanggan atau konsumen. Untuk menghindari rugi-rugi daya ke rumah pelanggan yang terletak jauh dari gardu-gardu distribusi, maka diperlukan adanya transformator distribusi dalam jumlah yang banyak seperti yang biasa

kita lihat di pinggir-pinggir jalan. Untuk pelanggan yang memiliki kebutuhan listrik yang lebih tinggi seperti kebutuhan industri, maka tidak akan bisa menggunakan jaringan listrik tegangan rendah melainkan akan langsung di salurkan melalui saluran distribusi tegangan menengah atau bahkan mungkin tegangan tinggi sesuai kebutuhan listrik yang akan dibutuhkan oleh pelanggan.



Gambar 2.1 Sistem Pendistribusian Energi Listrik

2.2.2 Gardu Induk

2.2.2.1 Pengertian Gardu Induk

Gardu induk merupakan salah satu bagian yang paling vital pada sistem tenaga listrik. Dengan adanya gardu induk dalam sistem tenaga listrik maka tenaga listrik akan dapat disuplai kepada konsumen. Gardu induk merupakan instansi yang terdiri dari berbagai macam perlengkapan listrik seperti transformator, *lighting arrester*, *current transformer*, pemisah (PMS), pemutus daya (PMT) serta perlengkapan lainnya. Fungsi lain dari gardu induk itu sendiri adalah sebagai penghubung ataupun pemutus arus listrik dan sebagai penyesuai tegangan yang terhubung dengan sistem-sistem sesuai dengan level tegannya.

2.2.2.2 Klasifikasi Gardu Induk

- a) Berdasarkan Isolasi Pada Busbar

Terdapat dua jenis gardu induk yang berdasarkan isolasi pada busbaranya, yaitu :

1. Gardu induk konvensional

Pada tipe gardu induk konvensional, peralatannya berisolasi udara bebas, dikarenakan pada gardu induk konvensional sebagian peralatannya dipasang di luar gedung (*switch yard*), tetapi peralatan dari gardu induk konvensional ada juga yang terletak di dalam gedung. Untuk pembangunan gardu induk konvensional diperlukan areal tanah yang relatif lebih luas.

2. Gardu induk *gas insulated switchgear* (GIS)

Gardu induk GIS ini dikemas dalam bentuk tabung dan terletak di dalam gedung sehingga semua peralatan *switchgear* dari gardu induk GIS terisolasi dengan gas SF-6.

b) Berdasarkan Penggunaannya

Secara umum, gardu induk dapat dibedakan menjadi dua jenis dengan berdasarkan penggunaannya sebagai berikut :

1. Gardu induk tegangan ekstra tinggi

Gardu induk tegangan ekstra tinggi berfungsi menurunkan tegangan ekstra tinggi ke saluran tegangan tinggi pada saluran transmisi

2. Gardu induk tegangan tinggi

Gardu induk tegangan tinggi berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi ketegangan menengah dalam saluran transmisi di jaringan distribusi.

c) Berdasarkan Letak Peralatannya

Terdapat lima jenis gardu induk yang berdasarkan letak peralatannya, yaitu :

1. Gardu induk pasang luar

Gardu induk pasang luar merupakan gardu induk yang sejumlah peralatannya dipasang di luar gedung, seperti transformator dan peralatan-peralatan hubung lainnya, meskipun ada juga sejumlah

peralatan lainnya yang berada di dalam gedung, seperti *switch board*, baterai dan panel kontrol. Areal tanah yang diperlukan untuk membangun gardu induk jenis ini relatif lebih luas namun biayanya cukup murah. Untuk lokasi pembangunan gardu induk jenis pasang luar ini biasanya dibangun di pinggiran kota dikarenakan membutuhkan areal tanah yang cukup luas.

2. Gardu induk pasang dalam

Gardu induk jenis ini merupakan gardu induk yang sebagian besar peralatannya di pasang di dalam gedung atau bangunan meskipun ada juga sebagian yang dipasang di luar bangunan. Untuk peralatan-peralatan yang ada di gardu induk jenis pasang dalam ini sama dengan yang ada di gardu induk pasang luar, seperti transformator, *switch gear*, panel pengontrol, batre dan lain sebagainya. Jenis gardu induk pasang dalam ini biasanya dibangun di pusat-pusat kota, mengingat lahan yang dibutuhkan untuk membangunnya jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan gardu induk pasang luar, namun biaya yang dibutuhkan jauh relatif lebih mahal. Meskipun biaya yang dibutuhkan cukup mahal, gardu induk jenis pasang dalam memiliki keuntungan terhindar dari gangguan cuaca yang buruk.

3. Gardu induk setengah pasang luar

Alasan mengapa gardu induk ini disebut setengah pasang luar yaitu dikarenakan peralatan-peralatan instalasinya dipasang di bagian dalam bangunan dan di luar bangunan. Selain itu, pembangunan gardu induk jenis ini sangat mempertimbangkan kondisi dan situasi lingkungan sekitar.

4. Gardu induk pasangan bawah tanah

Peralatan-peralatan instalasi pada gardu induk jenis ini hampir seluruhnya dipasang di bawah tanah, namun untuk pendingin dan sebagian peralatan yang tidak dimungkinkan untuk dipasang di bawah tanah maka akan dipasang di atas tanah. Jenis gardu induk bawah tanah biasanya dibangun di bawah ruas jalan di pusat-pusat kota yang ramai ataupun di bawah gedung.

2.2.3 Peralatan Gardu Induk

2.2.3.1 Transformator Daya

Transformator daya merupakan salah satu peralatan dari perlengkapan sistem tenaga listrik. Transformator daya digunakan untuk merubah atau mentransformasikan daya listrik dengan cara mengubah besaran tegangannya namun frekuensinya tetap. Selain itu, transformator daya juga digunakan untuk pengatur tegangan. Untuk mendapatkan titik netral dari transformator daya, maka transformator daya dilengkapi dengan transformator pentanahan atau sering disebut *Neutral Current Transformer* (NCT). Kemudian ada juga transformator pentanahan lain yang digunakan yaitu *Neutral Grounding Resistance* (NGR).



Gambar 2.2 Transformator Daya

2.2.3.2 *Neutral Grounding Resistance* (NGR)

Neutral Grounding Resistance (NGR) adalah transformator pentanahan yang terpasang serial dengan titik netral transformator sebelum

dihubungkan ke tanah. *Neutral Grounding Resistance* berfungsi untuk memperkecil arus gangguan yang ada pada transformator.

2.2.3.3 *Circuit Breaker (CB)*

CB atau *Circuit Breaker* adalah alat perlengkapan sistem tenaga listrik yang digunakan untuk memutuskan rangkaian sistem dalam keadaan berbeban atau masih mengalir arus. Ketika CB beroperasi memutuskan rangkaian yang berbeban maka biasanya akan menimbulkan busur api. Oleh karena itu CB dilengkapi dengan pemadam busur api yang berupa gas, minyak dan udara agar busur api tersebut dapat segera dipadamkan. CB biasanya dioperasikan pada saat mengalami gangguan ataupun saat keadaan normal.

2.2.3.4 *Disconnecting Switch (DS)*

Disconnecting switch (DS) merupakan alat pemisah rangkaian listrik yang dioperasikan pada saat rangkaian sedang tidak berbeban atau sedang tidak dialiri arus listrik. Pengoperasian DS dilakukan sesaat setelah CB atau *Circuit Breaker* dioperasikan terlebih dahulu. Letak pemasangan DS pada gardu induk yaitu :

- a. Bus Couple
- b. Transformator Bay (TR Bay)
- c. Transmission Line Bay (TL Bay)
- d. Busbar

2.2.3.5 *Lightning Arrester (LA)*

Lightning Arrester (LA) merupakan alat perlengkapan sistem tenaga listrik yang digunakan sebagai pengaman atau pelindung peralatan listrik dari adanya gangguan atau sambaran petir. LA mulai bekerja pada level tegangan 350V, ketika dalam keadaan gangguan maka LA bersifat konduktif, namun sebaliknya jika dalam keadaan normal maka akan bersifat isolatif.

2.2.3.6 Trafo Bantu (*Auxiliary*)

Trafo bantu sering juga disebut sebagai trafo pemakaian sendiri, yaitu merupakan alat yang digunakan sebagai kebutuhan internal pada gardu induk dengan sumber tegangan AC 3 fasa 220/380 Volt. Peralatan listrik yang membutuhkan trafo bantu ini adalah sebagai berikut :

- a. Penerangan (lampu)
- b. *Air Conditioner* (AC) atau pendingin ruangan
- c. Motor listrik dan pompa air
- d. Peralatan lain yang membutuhkan tegangan listrik rendah

2.2.3.7 Busbar

Untuk menyalurkan dan menerima daya listrik, maka diperlukan busbar. Busbar merupakan titik temu antara transformator, saluran transmisi dan peralatan-peralatan listrik lainnya.

2.2.4 Kebutuhan Beban dan Karakteristik Beban

Hampir di seluruh daerah, pasti memiliki kebutuhan listrik yang berbeda-beda tergantung dari beberapa kondisi dimasing-masing daerah tersebut, seperti kondisi penduduk, pertumbuhan ekonomi serta perencanaan pembangunan di waktu yang akan datang. Dilihat dari kegiatan penggunaan listrik, secara umum konsumen energi listrik dikelompokkan menjadi konsumen komersil, industri, publik dan rumah tangga.

Tiap-tiap konsumen pasti memiliki kebutuhan atau karakteristik beban yang berbeda-beda. Dalam kasus ini yaitu terkait pada pola atau cara penggunaan energi listrik di masing-masing konsumen dengan kondisi yang berbeda-beda pula. Pada penggunaan energi listrik di rumah tangga, pola pembebanan ditunjukkan dengan adanya fluktuasi penggunaan energi listrik yang cukup besar diwaktu malam hari.

Kemudian pada konsumen komersil juga akan terjadi fluktuasi pada waktu malam hari, sedangkan untuk konsumen industri beban puncak yang diterima terjadi pada siang hari dikarenakan pada pabrik-pabrik industri aktif

di siang hari dan pada malam hari hampir tidak ada aktifitas energi listrik yang begitu besar.

2.2.5 Penduduk dan PDRB

Penduduk merupakan semua orang yang tinggal atau berdomisili pada suatu wilayah geografis Republik Indonesia selama kurang lebih 6 bulan dan atau orang yang menetap tidak lebih dari 6 bulan tetapi memiliki tujuan untuk tetap tinggal selama kurang lebih 6 bulan lamanya.

Sedangkan PDRB merupakan satu-satunya indikator yang menginformasikan keadaan atau aktifitas nilai tambah perekonomian dari suatu daerah Republik Indonesia terhadap suatu aktifitas ekonomi tanpa memperhatikan faktor produksinya berasal dari ataupun dimiliki oleh penduduk daerah tersebut.

Dalam memprakirakan pertumbuhan penduduk dan PDRB dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_{(x-1,x)} = \frac{P_x - P_{x-1}}{P_{x-1}} \times 100$$

Setelah mengetahui persentase dari pertumbuhan penduduk/PDRB di setiap tahunnya maka dapat dihitung besar persentase rata-rata pertumbuhan penduduk tersebut, kemudian prakiraan pertumbuhan penduduk/ PDRB dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Penduduk_x = (P_{x-1} \times rata - rata(\%)) + P_{x-1}$$

Keterangan: $R_{(x-1,x)}$: persentase rata-rata penduduk/ PDRB

x : tahun sekarang

P : Penduduk/PDRB

$(x - 1)$: tahun sebelumnya

2.2.6 Forecasting (Peramalan)

Peramalan merupakan perkiraan ataupun dugaan akan terjadinya peristiwa di waktu yang akan datang. Dikarenakan terdapat perbedaan waktu antara kesadaran atas kejadian dengan kebutuhan yang akan datang dengan waktu kejadian itu sendiri, sehingga peramalan ini dibutuhkan. Ketika perbedaan waktunya panjang, terutama dalam peristiwa yang terjadi maka peramalan akan sangat dibutuhkan sehingga berbagai langkah dan antisipasi yang dibutuhkan dalam menghadapi peristiwa tersebut dapat dipersiapkan.

Terdapat dua macam peramalan (assauri,1984) yaitu adalah:

a. Peramalan kualitatif

Peramalan kualitatif merupakan peramalan yang didasarkan dengan data kumulatif di masa lampau. Dikarenakan hasil dari peramalan tersebut berdasarkan intuisi, tanggapan, pengetahuan dan pengalaman penyusun maka orang yang menyusunnya akan menentukan sendiri hasil dari peramalan tersebut.

b. Peramalan kuantitatif

Peramalan kuantitatif merupakan peramalan yang didasarkan dengan metode yang digunakan dalam peramalan. Perbedaan dari hasil peramalan dengan kenyataan yang sebenarnya terjadi menentukan kualitas metode yang digunakan. Ketika selisih antara peramalan dengan kejadian yang sebenarnya semakin kecil maka metode peramalan akan semakin baik. Peramalan dibagi menjadi tiga menurut waktunya dan sesuai dengan topik yang diramalkan. Tiga periode peramalan dalam peramalan beban listrik adalah sebagai berikut:

1. Peramalan jangka pendek

Peramalan ini dilakukan dalam rentang waktu harian atau bahkan dalam rentang setiap jam dengan tujuan studi perbandingan perkiraan beban listrik yang akurat.

2. Peramalan jangka menengah

Peramalan ini dilaksanakan dalam prakiraan waktu mingguan atau bahkan bulanan, yaitu dengan tujuan agar mempersiapkan agenda atau jadwal persiapan operasional pembangkit.

3. Peramalan jangka panjang

Peramalan ini dilakukan agar prakiraan kondisi atau keadaan dalam rentang waktu beberapa tahun yang akan datang yang bertujuan untuk mempersiapkan penggantian sebuah peralatan listrik ataupun tujuan lain.

2.2.6.1 Metode Peramalan

Beberapa metode yang biasanya digunakan oleh perusahaan-perusahaan listrik dalam melaksanakan suatu peramalan beban secara umum adalah sebagai berikut:

a. Metode analisis

Metode ini merupakan penyusunan metode analisis di setiap sektor pemakai dengan didasarkan data analisis pemakaian akhir tenaga listrik.

b. Metode ekonometri

Didasari oleh dua kaidah, yaitu kaidah ekonomi dan statistik disebut dengan metode ekonometri.

c. Metode *time series*

Korelasi (hubungan), data-data masa lampau dan mengabaikan faktor penyebabnya yaitu, pengaruh ekonomi, cuaca/ iklim, teknologi, dan lain-lain merupakan suatu landasan dari metode *time series*.

d. Metode gabungan (analisis dan ekonometri)

Gabungan dari metode analisis dan ekonometri disebut juga dengan metode gabungan. Pada metode ini didapatkan sebuah metode yang tanggap atas beberapa pengaruh, yaitu seperti:

1. Aktifitas ekonomi
2. Harga listrik

3. Pergeseran pola penggunaan
 4. Kemajuan teknologi
 5. Kebijakan pemerintah
 6. Sosio demografi
- e. Metode regresi

Metode yang paling sering digunakan dalam perhitungan statistik adalah metode regresi. Prakiraan regresi beban listrik biasanya digunakan untuk mencari hubungan atau korelasi antara pengkonsumsian (penggunaan) energi listrik dan faktor lain seperti cuaca, hari, konsumen dan pertumbuhan ekonomi. Metode regresi merupakan metode yang sangat memperhitungkan faktor yang diperkirakan dan yang menunjukkan sebab dan akibat antara satu ataupun lebih variabel bebas. Mengetahui bentuk hubungan atau korelasi tersebut serta memprakirakan nilai mendatang dari variable tidak bebas merupakan tujuan dari metode regresi linier.

Berikut ini adalah beberapa metode regresi yang dapat digunakan dalam peramalan beban di gardu induk:

1. Regresi linier

Regresi linier adalah regresi yang variabel bebasnya (variabel X) berpangkat paling tinggi satu. Variabel yang dilibatkan pada regresi linier hanya dua, yaitu variabel X dan Y, persamaan umum dari regresi linier adalah sebagai berikut:

$$y = a + bx \quad (2.1)$$

Dimana:

$$a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{(n)(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{(n)(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{(n)(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (2.2)$$

$$a = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n} \quad (2.3)$$

Keterangan:

x = variabel bebas

y = variabel tak bebas

a = koefisien intersepsi

b = koefisien kemiringan

2. Regresi eksponensial

Regresi eksponensial adalah pengembangan lebih lanjut dari regresi linier menggunakan fungsi logaritmik. Ada beberapa jenis *trend* yang tidak linier di dalam regresi eksponensial ini, akan tetapi dapat diubah linier yaitu dengan melakukan transformasi seperti: $y = e^{a+bx}$ dapat diubah menjadi: $\ln y = \ln e^{(a+bx)}$ karena $\log e = 1$, maka: $\ln y = a + bx$. Jika $\ln y = \ln y'$, maka persamaannya akan menjadi persamaan linier, yaitu $y' = a + bx$. Nilai koefisien a dan b dicari melalui persamaan (2.2) dan (2.3).

3. Regresi linier berganda

Regresi linier berganda merupakan regresi yang menjelaskan korelasi atau hubungan antara peubah respon *variable dependen* (variabel tergantung) pada faktor-faktor yang mempengaruhi lebih dari satu prediktor *variable independen* (variabel bebas). Regresi linier berganda hampir sama dengan regresi linier sederhana, namun memiliki perbedaan yaitu jika pada regresi linier berganda variabelnya lebih dari satu prediktor atau penduga. Mengukur intensitas korelasi antara dua atau banyak variabel serta membuat dugaan prakiraan nilai Y atas X adalah tujuan dari regresi linier berganda. Berikut adalah model umum dari regresi linier berganda:

$$y = b_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

Keterangan:

y = variabel terikat/ tidak bebas

b_1 = konstanta

b_2, b_3 = koefisien regresi linier berganda

x_2, x_3 = variabel bebas

Untuk mendapatkan nilai b_1 , b_2 , dan b_3 dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$b_1 n + b_2 \sum X_2 + b_3 \sum X_3 = \sum Y$$

$$b_1 \sum X_2 + b_2 \sum X_2^2 + b_3 \sum X_2 X_3 = \sum X_2 Y$$

$$b_1 \sum X_3 + b_2 \sum X_2 X_3 + b_3 \sum X_3^2 = \sum X_3 Y$$

Sehingga persamaan di atas dinyatakan pada persamaan matriks berikut ini:

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_2 & \sum X_3 \\ \sum X_2 & \sum X_2^2 & \sum X_2 X_3 \\ \sum X_3 & \sum X_2 X_3 & \sum X_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_2 Y \\ \sum X_3 Y \end{bmatrix}$$

Ketika memiliki 3 persamaan dengan 3 variabel yang belum diketahui nilainya, maka agar lebih mudah dituliskan sebagai berikut:

$$\left. \begin{matrix} a_{11}b_1 & a_{12}b_2 & a_{13}b_3 \\ a_{21}b_1 & a_{22}b_2 & a_{23}b_3 \\ a_{31}b_1 & a_{32}b_2 & a_{33}b_3 \end{matrix} \right\} \rightarrow \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix}$$

$$\det(A) = a_{11}a_{12}a_{13} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{32}a_{21} - a_{31}a_{22}a_{13} - a_{21}a_{12}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32}$$

Maka:

$$b_1 = \frac{\det(A_1)}{\det(A)}; \quad b_2 = \frac{\det(A_2)}{\det(A)}; \quad b_3 = \frac{\det(A_3)}{\det(A)}$$

Dimana:

$$A_1 = \begin{bmatrix} h_1 & a_{12} & a_{13} \\ h_2 & a_{22} & a_{23} \\ h_3 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & h_1 & a_{13} \\ a_{21} & h_2 & a_{23} \\ a_{31} & h_3 & a_{33} \end{bmatrix}; A_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & h_1 \\ a_{21} & a_{22} & h_2 \\ a_{31} & a_{32} & h_3 \end{bmatrix}$$

Keterangan persamaan matriks:

a = matriks (diketahui)

b = vektor kolom (tidak diketahui)

h = vektor kolom (diketahui)

4. Koefisien Korelasi Linier Berganda

Koefisien Korelasi Linier Berganda merupakan perhitungan mengenai seberapa kuatnya hubungan antara variabel X_1 dan X_2 terhadap variabel Y . Perhitungan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$KP = \frac{b_2 \sum x_2 y + b_3 \sum x_3 y}{\sum y^2}$$

Dimana:

$$\sum x_2 y = \sum X_2 Y - \frac{\sum X_2 (\sum Y)}{n}$$

$$\sum x_3 y = \sum X_3 Y - \frac{\sum X_3 (\sum Y)}{n}$$

$$\sum y^2 = \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}$$

2.2.6.2 Faktor Penting Prakiraan

Terdapat berbagai faktor penting dalam sebuah prakiraan trafo, yang butuh diperhatikan yaitu seperti faktor cuaca, kelompok konsumen, perekonomian dan waktu. Pada prakiraan jangka menengah ataupun jangka panjang data yang digunakan adalah data historis beban, konsumen dan ekonomi. Faktor penting yang diperhatikan dalam prakiraan jangka

pendek adalah parameter ramalan cuaca, sehingga bisa diasumsikan bahwa kondisi cuaca dapat mempengaruhi beban listrik.

2.2.7 Evaluasi Kemampuan Transformator

Berikut ini merupakan beberapa definisi kata yang perlu diketahui:

1. Definisi evaluasi

Evaluasi menurut Stark & Thomas, merupakan suatu kegiatan atau proses analisis, pengumpulan, pemilihan serta penyajian informasi yang dapat digunakan untuk dasar keputusan serta penyusunan program-program selanjutnya.

2. Definisi kemampuan

Kemampuan menurut **KBBI**, merupakan suatu kesanggupan dalam melakukan suatu tindakan.

3. Kemampuan transformator

Kemampuan transformator merupakan digunakannya sebuah transformator untuk mengubah daya atau tegangan listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau bisa juga sebaliknya yang tentunya sesuai dari nilai kapasitas transformator yang sudah ditetapkan.

Jika dilihat dari definisi diatas maka dapat diartikan bahwa evaluasi kemampuan transformator merupakan proses suatu analisis, pengumpulan data serta penyajian informasi terhadap kemampuan transformator yang akan digunakan untuk mengubah daya atau tegangan listrik sesuai dengan kapasitas transformator yang telah ditentukan.

Tujuan dari evaluasi kemampuan transformator adalah untuk mengetahui berapa banyak dan berapa besar pertumbuhan beban serta sampai kapan transformator tersebut bisa memnyuplai beban hingga direncanakann adanya penambahan transformator yang baru atau bahkan penambahan gardu induk baru.

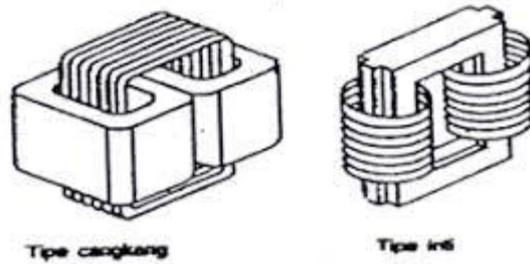
2.2.7.1 Transformator

Transformator adalah suatu peralatan dari sistem tenaga listrik yang digunakan untuk mengubah atau mentransformasikan tegangan listrik dari tegangan rendah ke tegangan tinggi atau sebaliknya dengan melalui suatu magnet dari inti besi yang didasari oleh prinsip induksi elektromagnetik. Prinsip yang digunakan oleh transformator adalah hukum ampere serta hukum faraday yang dimana arus listrik dapat menyebabkan terjadinya medan magnet ataupun sebaliknya yaitu medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Terdapat tiga kelompok penggunaan transformator pada sistem tenaga listrik, yaitu: transformator daya, transformator distribusi, transformator arus dan transformator tegangan. Untuk transformator arus dan tegangan biasanya digunakan untuk suatu pengukuran.

a. Prinsip kerja transformator

Prinsip kerja dari transformator didasari oleh hukum faraday dan hukum ampere, yaitu arus listrik bisa menyebabkan terjadinya medan magnet. Begitu juga sebaliknya, yaitu medan magnet dapat menyebabkan terjadinya arus listrik. Ketika pada sisi primer kumparan terdapat arus bolak balik,, maka besar dan arah magnet akan berubah-ubah sehingga pada sisi primer kumparan akan mengalami induksi, sedangkan pada sisi sekunder kumparan menerima garis gaya magnet dari sisi primer dengan besar dan arah yang berubah-ubah juga yang menyebabkan pada sisi sekunder kumparan mengalami induksi.

Terdapat dua macam cara melilitkan kumparan pada transformator seperti yang terdapat pada gambar di bawah ini.

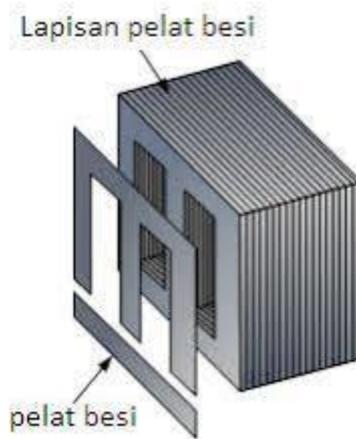


Gambar 2.3 Dua tipe kumparan pada transformator

b. Bagian transformator

1. Inti besi

Untuk memudahkan jalannya fluks magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik menuju dan melewati kumparan maka diperlukan inti besi. Inti besi tersebut tersusun dari lempengan-lempengan besi yang tipis serta berisolasi yang berguna untuk mengurangi panas yang ditimbulkan dari arus listrik agar tidak terjadi rugi-rugi.



Gambar 2.4 Inti Besi Transformator

2. Kumparan transformator

Kumparan transformator merupakan lilitan-lilitan yang mengelilingi inti besi. Lilitan tersebut tersusun dari batang kawat berisolasi. Ketika arus AC (bolak-balik) mengalir dalam lilitan kumparan tersebut, maka inti besi akan terinduksi dan akan terjadi fluks magnetik. Terdapat dua buah kumparan di

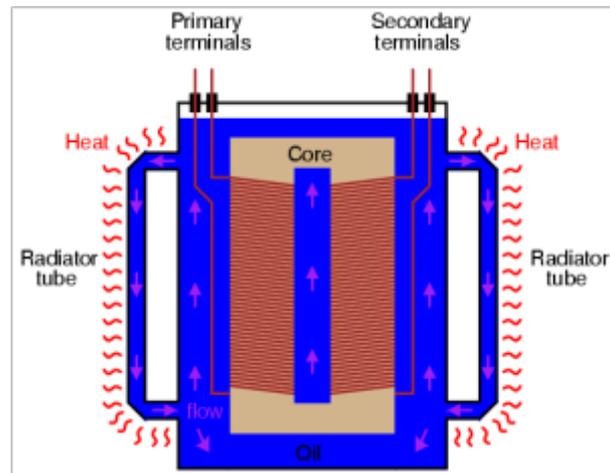
dalam transformator, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder.



Gambar 2.5 Kumparan Transformator

3. Minyak transformator

Minyak yang terdapat di dalam transformator bertujuan untuk mendinginkan transformator dan juga sebagai isolator. Minyak pada transformator yang berfungsi sebagai pendingin bekerja dengan mengambil panas yang ditimbulkan ketika transformator terbebani, kemudian melepaskannya serta memproteksi komponen yang terdapat di dalamnya dari oksidasi dan korosi. Sedangkan minyak transformator yang bekerja sebagai isolasi yaitu mengisolasi kumparan yang terdapat di dalam transformator sehingga loncatan bunga api listrik yang disebabkan oleh tegangan tinggi dapat dihindari dan dipadamkan.



Gambar 2.6 Minyak Transformator

4. Tangki dan konservator

Dikarenakan sebagian komponen yang ada pada transformator terendam oleh minyak, maka bagian-bagian tersebut ditempatkan di dalam sebuah tangki. Sedangkan konservator berfungsi agar cadangan minyak serta uap yang diakibatkan oleh peningkatan suhu pada transformator dapat ditampung.



Gambar 2.7 Konservator

5. Bushing

Bushing merupakan salah satu komponen pada transformator yang berguna sebagai sarana penghubung antara lilitan terhadap jaringan luar. *Bushing* itu sendiri tersusun dari suatu konduktor yang diselubungi dengan isolator. Isolator yang menyelubungi tersebut digunakan sebagai penyekat antara tangki transformator dengan konduktor.



Gambar 2.8 Bushing Transformator

2.2.7.2 Pembebanan Transformator

Pembebanan pada transformator didapatkan melalui hasil prakiraan beban dibagi kapasitas dari transformator. Kapasitas dari transformator didapatkan dari data transformator yang digunakan. Berdasarkan Jurnal Sain dan Teknologi yang berjudul “Analisis Pengoperasian dan Pemeliharaan Trafo Distribusi di PT. PLN (Persero) APJ Surabaya Selatan”, yang merujuk pada SPLN No. 50 Tahun 1997, terdapat empat buah klasifikasi pada pembebanan di transformator, yaitu adalah:

a. Beban optimal

Takaran dari beban optimal yang ditanggung oleh sebuah transformator yaitu berada pada kisaran 50% hingga 80%.

b. Beban Tidak Optimum dan Kurang Optimum (Beban Kecil)

Pada keadaan beban kecil, transformator hanya menanggung beban di kisaran kurang dari 50%. Dalam kondisi tersebut, transformator dapat dikatakan bekerja secara tidak efisien dikarenakan arus yang mengalir melalui transformator tersebut berjumlah sedikit..

c. Beban berat

Kondisi yang mengindikasikan bahwa transformator menanggung beban berat adalah ketika transformator memuat beban hingga diatas 80% sampai dengan 100%. Pada kondisi ini, transformator akan mengalami panas yang berlebih hingga menyebabkan rugi-rugi yang cukup besar.

- d. Berlebihan beban (*overload*)

Overload terjadi pada saat transformator menanggung beban hingga lebih dari 100%, yang mana akan menyebabkan transformator sangat panas dan lebih parahnya akan menyebabkan transformator terbakar.

Berikut ini adalah persamaan dari pembebanan transformator:

$$\%Pembelian = \frac{Y_x}{K_t} \times 100\% \text{ (dalam satuan \%)}.$$

Keterangan:

Y_x = pembebanan di tahun x

K_t = kapasitas transformator

2.2.7.3 Kapasitas Ideal

Ada beberapa syarat dari kapasitas ideal transformator yang ada pada gardu induk serta dikaitkan pada peningkatan kebutuhan energi listrik yang didasari oleh prakiraan. Berikut adalah beberapa syarat suatu gardu induk yang sesuai dengan perencanaan sistem penyaluran dan pusat pendidikan serta pelatihan PT. PLN (persero):

- a. Di dalam sebuah gardu induk 150 kV hanya dibolehkan paling maksimal tiga buah transformator dengan kapasitas masing-masing dari transformator tersebut adalah 60 MVA.
- b. Kapasitas paling maksimal untuk gardu induk 150 kV adalah 3 x 60 MVA, sedangkan untuk gardu induk 70 kV adalah 3 x 30 MVA.
- c. Pembebanan tidak boleh melewati 100% dari kapasitas transformator.
- d. Jika suatu saat beban mendekati 80% ada beberapa hal yang butuh dipersiapkan, yaitu:

1. Menambahkan transformator baru yang sesuai dengan perhitungan prakiraan jika transformator tersebut 60 MVA serta jumlah transformator tersebut masih belum maksimal.
2. Mengganti transformator dengan transformator baru yang kapasitasnya lebih besar apabila kapasitas dari transformator tersebut dibawah 60 MVA.