

ANALISA KEBUTUHAN KAPASITAS DAYA GARDU INDUK WONOGIRI BERDASARKAN PERTUMBUHAN BEBAN 10 TAHUN MENDATANG

Sekarmaji Marjan¹, Diah Suwarti Widyastuti², Dulhadi³
Institut Teknologi Nasional Ygyakarta, Fakultas Teknologi Industri
Program Studi Teknik Elektro

ABSTRAK

Pertumbuhan beban GI. Wonogiri rata – rata 6,2 %, kondisi di tahun 2020 bulan oktober pembebanan GI. Wonogiri mencapai 79,7778 % terhadap kapasitas Gardu Induk khususnya pada trafo 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi pembebanan telah mencapai optimal. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kemampuan dan kebutuhan GI. Wonogiri 10 tahun mendatang.

Metodologi yang dilakukan pengolahan data beban tahun 2016 sampai 2020. Metode pertumbuhan beban regresi eksponensial untuk mencari nilai konstanta α dan menyelesaikan pertumbuhan beban berdasarkan metode eksponensial. Metode ini didasarkan dari tren data beban.

Hasilnya bahwa Trafo I dengan nilai $\alpha = 0,129285$ beban siang hari dan $\alpha = 0,126425$ beban malam hari, Trafo I hanya dapat memenuhi kebutuhan beban sampai tahun 2023, sehingga perlu tambahan 2 x 60 MVA agar mencapai tahun 2030. Trafo II dengan nilai $\alpha = 0,0474$ beban siang hari dan $\alpha = 0,050935$ beban malam hari, hanya mampu memenuhi kebutuhan beban sampai tahun 2026, sehingga perlu penambahan kapasitas daya sebesar 30 MVA. Adapun hasil evaluasi kemampuan hantar arus penampang A3C 240 mm² dan pada tahun 2030 arus tertinggi yang mengalir pada penyulang 3 phasa sebesar 587,04 A, sehingga per phasanya sebesar 195,68 A, maka penyulang wonogiri secara keseluruhan masih memenuhi persyaratan dalam kuat hantar arusnya.

Kata kunci : Gardu Induk dan Kapasitas daya

POWER CAPACITY REQUIREMENT ANALYSIS OF WONOGIRI SUBSTANCE BASED ON LOAD GROWTH IN THE NEXT 10 YEARS

ABSTRACT

The growth of the load on the Wonogiri Substation an average of 6.2%, October 2020 the loading reached 79.7778 % of the capacity, especially transformer 1. This indicates that the loading conditions have reached optimal. Therefore, the purpose to analyze the capabilities and needs of the Wonogiri Substation in the next 10 years.

The methodology used load data from 2016 to 2020 using the exponential regression load growth method to find constant α values and complete load growth based on the exponential method. This method is based on the trend of load.

The results Transformer I with a value of $\alpha = 0,129285$ daytime loads and $\alpha = 0,126425$ nighttime to the load needs until 2023, so it needs an additional 2 x 60 MVA to reach 2030. Transformer II with a value of $\alpha = 0,0474$ daytime loads and $\alpha = 0,050935$ loads at night to meet the load needs until 2026, so it is necessary to increase the power capacity of 30 MVA. The evaluation of the current carrying capacity with an A3C , 240 mm² and in 2030 the highest current flowing in the 3-phase feeder is 587.04 A, so each phase is 195.68 A, then the Wonogiri feeder still meets the requirements.

Keywords: Power Station and Power Capacity

1. PENDAHULUAN

Transformator daya adalah salah satu peralatan yang terdapat di dalam gardu induk. Peralatan ini berfungsi yang untuk mentransfer energi listrik dibagian sistem transmisi ataupun distribusi listrik. Gardu Induk akan mengalami saturasi kemampuannya setelah dibebani lebih dari 80% kapasitasnya, sehingga secara umum pembebanan Gardu Induk dibatasi maksimal mencapai 90% dari kapasitasnya. Oleh karenanya pertumbuhan beban setiap tahunnya selalu terpantau dengan tujuan agar Gardu Induk dapat menyalurkan energi listrik ke beban dapat kontinyu dan aman.

Hasil penelitian Bayu Jati Prabowo (2019) dari Universitas Muhammadiyah Surakarta memberikan data bahwa pada kebutuhan energi listrik Rayon Wonogiri terdiri atas jumlah pelanggan tiap sektor mengalami kenaikan setiap tahunnya. Rata-rata laju pertumbuhan sektor bisnis sebesar 30.86%, sektor industri sebesar 25.05 %, sektor publik sebesar 23.43% dan sektor rumah tangga sebesar 5%. Prosentase sektor bisnis tertinggi karena dipengaruhi besarnya pertumbuhan PDRB sektor bisnis dengan angka 6,35 %.

Kondisi saat ini pembebanan penyulang gardu induk (GI) Wonogiri dari tahun ke tahun selalu meningkat mencapai rata rata mencapai 6.2 % per tahunnya dan dalam kondisi tahun 2020 bulan oktober pembebanan GI. Wonogiri mencapai 79,7778 % terhadap kapasitas Gardu Induk tersebut. Oleh karena tingkat pembebanan gardu induk yang cukup tinggi mencapai titik optimalnya (80%) perlu dilakukan kajian pemenuhan kapasitas GI. Wonogiri untuk 10 tahun mendatang.

1.1. Kajian Pustaka

Peramalan beban didefinisikan sebagai dasarnya ilmu seni memprediksi beban masa depan pada sistem untuk jangka waktu tertentu (Soliman, 2010). Pada umumnya merupakan ramalan Demand (kebutuhan energi elektrik/watt jam) dan *Load Forecasting* (beban tenaga elektrik/watt). Peramalan beban sangat penting untuk perencanaan dan keputusan operasional bagi industri listrik, selain itu untuk membantu utilitas listrik dalam mengambil keputusan penting termasuk keputusan pembelian dan menghasilkan tenaga listrik, pemindahan muatan, dan pengembangan infrastruktur (Bayu jati Prabowo, 2019).

Karena adanya peningkatan beban yang semakin bertambah, maka gardu induk sebagai salah satu komponen sistem tenaga listrik perlu dikembangkan kapasitasnya agar dapat melayani beban secara kontinyu. Dalam pengembangan kapasitas suatu gardu induk perlu dilakukan optimasi dengan dasar data ramalan beban. Jika beban suatu gardu induk sudah melebihi batas optimum dari kapasitas terpasang, maka gardu induk tersebut perlu ditambah suatu transformator. Dan apabila kapasitas gardu induk sudah mencapai batas maksimum, sementara masih ada kelebihan beban maka untuk mengatasinya perlu dibangun gardu induk baru (Dian Sefulloh, 2003, " Perencanaan Gardu Induk Untuk 10 Tahun ke Depan " Makalah Seminar Tugas Akhir, Universitas Diponegoro, Semarang).

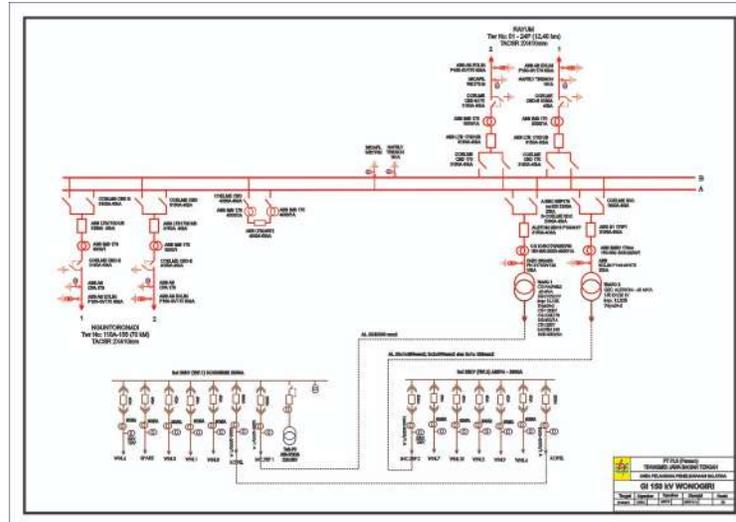
Pemenuhan kebutuhan tenaga listrik tersebut membutuhkan perencanaan dengan baik untuk mengetahui besarnya ukuran kapasitas gardu induk tersebut. Pendistribusian untuk pembagian beban yang pada awalnya merata tetapi karena ketidakserempakan waktu pelayanan beban-beban tersebut maka menimbulkan ketidakseimbangan beban juga berdampak pada penyediaan tenaga listrik. Selain ketidakserempakan pemakaian beban, pengkoneksian yang tidak seimbang pada fasa R, S dan T juga merupakan faktor lain yang mempengaruhi (Syarif M. Bahtiar, 2016)

Prediksi beban pada gardu induk bertujuan untuk memperhitungkan tingkat keakuratan dalam meramalkan kebutuhan energi listrik dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan metode regresi linier dan regresi berganda. Kemudian melihat ketepatan akurasi dengan menggunakan persamaan *root mean square error* (RSME) dan *mean absolute percentage error* (MAPE) (Andyka Pratama, 2020)

1.2. Dasar Teori

1.2.1. Gardu Induk Wonogiri

Gardu Induk (GI) Wonogiri 150 kV adalah Gardu Induk step down 150kV/20kV dan memiliki dua buah transformator yaitu Trafo I dan trafo II masing - masing berkapasitas 60 MVA menyuplai daya listrik ke beban melalui penyulang Wonogiri 01 (WNI 01) sampai dengan penyulang Wonogiri 10 (WNI 10) dengan sistem kelistrikan tiga fase dan 1 netral. Tegangan masing – masing penyulang adalah tegangan menengah 20 kV dengan konduktor fase menggunakan A3C (*All Aluminium Alloy*) ukuran 240 mm², sedangkan untuk kawat netralnya menggunakan A3C ukuran 150 mm². Adapun rangkaian single line diagram GI. Wonogiri diberikan pada gambar 1.



Gambar 1. *Single line diagram* GI. Wonogiri
Sumber : PT. PLN (Persero) Area Surakarta

1.2.2. Komponen Utama Gardu Induk

Gardu induk dilengkapi komponen utama sebagai fasilitas yang diperlukan sesuai dengan tujuannya serta mempunyai fasilitas untuk operasi dan pemeliharaan, komponen tersebut antara lain :

a. Transformator daya

Transformator daya merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari tegangan tinggi (150 KV) ke tegangan menengah (20 KV) atau sebaliknya

b. Pemisah

Pemisah (PMS) adalah alat yang dipergunakan untuk menyatakan secara visual bahwa suatu peralatan listrik sudah bebas dari tegangan kerja. Oleh karena itu pemisah tidak boleh dihubungkan atau dikeluarkan dari rangkaian listrik dalam keadaan berbeban. Adapun fungsi pemisah adalah menghubungkan atau memutuskan rangkaian dalam keadaan tidak berbeban. Cara pemasangan PMS dibedakan atas pemasangan dalam dan pasangan luar. Tenaga penggerak dari PMS adalah secara manual, motor, *pneumatic* atau angin dan hidrolis.

Sesuai dengan fungsi dan kegunaannya maka pemisah dapat dibagi menjadi:

1. Pemisah peralatan

Sebagai pengamanan peralatan atau instalasi yang bertegangan saat dihubungkan dan melepaskan pemutus arus dalam keadaan tanpa beban.

2. Pemisah tanah

Berfungsi untuk mengamankan peralatan dari sisa tegangan yang timbul sesudah SUTT / SUTM diputuskan.

c. Pemutus tenaga (*Circuit Breaker*)

Pemutus tenaga, PMT (gambar 2) adalah peralatan atau saklar untuk menghubungkan atau memutuskan suatu rangkaian/jaringan listrik sesuai dengan ratingnya. PMT memutuskan hubungan daya listrik bila terjadi gangguan, baik dalam keadaan berbeban maupun tidak berbeban dan proses ini dilakukan dengan cepat. Pada saat PMT dalam keadaan gangguan menimbulkan arus yang relatif besar, PMT dibedakan menjadi tiga, yaitu :

1. PMT dengan menggunakan udara sebagai pemadam busur api
2. PMT dengan menggunakan minyak sebagai pemadam busur api
3. PMT dengan menggunakan gas sebagai pemadam busur api



(a) PMT media Hembus udara



(b) PMT media Minyak



(c) PMT media Gas SF6

Gambar 2. Bentuk fisik PMT, Sumber : Foto GI. Wonogiri

d. Trafo tegangan

Trafo tegangan (gambar 3) disebut juga potensial transformator adalah trafo yang berfungsi menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan menengah dan tegangan rendah, untuk sumber tegangan alat-alat ukur dan alat-alat proteksi. Fungsi trafo tegangan (potensial transformer) :

1. Memperkecil besaran tegangan pada system tenaga listrik menjadi besaran tegangan untuk system pengukuran atau proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer.
3. Memungkinkan standarisasi rating tegangan untuk peralatan sisi sekunder.



Gambar 3. Large Power Transformers.

Sumber: Curtis, Bob. *Electric Power eTool: Illustrated Glossary*. U.S.

Department of Labor Occupational Safety & Health Administration 10 Desember 2006

Penggunaan/pemakaian tegangan sekunder potensial transformer antara lain:

1. Metering atau pengukuran

Alat ukur yang sering digunakan pada Gardu induk adalah KV meter, MW meter, MVar meter dan KWH meter.

2. Proteksi atau pengaman

Pengaman yang terdapat pada gardu induk secara umum berupa relai yaitu Relai jarak (*distance relay*), Relai sinkron (*synchron relay*), Relai berarah (*directional relay*), Relai frekuensi (*frequency relay*), Relai tegangan (*voltage relay*).

Prinsip kerja trafo tegangan hampir sama dengan trafo-trafo pada umumnya arus bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka kedua ujung tersebut akan terjadi beda tegangan yang membedakan hanya dalam trafo tegangan arus dan daya nya kecil.

Klasifikasi transformator tegangan dibedakan menurut tipe konstruksinya yaitu :

1. Trafo tegangan induktif (*inductive voltage transformer* atau *electromagnetic voltage transformer*) yang terdiri dari lilitan primer dan lilitan sekunder, dan tegangan pada lilitan primer akan menginduksikannya ke lilitan sekunder.
2. Trafo tegangan kapasitif (*capacitor voltage transformer*) terdiri dari rangkaian kondensator yang berfungsi sebagai pembagi tegangan pada sisi tegangan tinggi dari trafo pada tegangan menengah yang menginduksikan tegangan ke lilitan sekunder.
3. Trafo tegangan trafo tegangan satu fase, dua fase dan tiga fase.

e. Trafo arus (*current transformer (CT)*)

Berfungsi untuk menurunkan arus besar pada tegangan tinggi menjadi arus kecil pada tegangan rendah untuk keperluan pengukuran dan pengaman. Menurut tipe konstruksinya :

1. Tipe Cincin (*ring/window tipe*)
2. Tipe Tangki Minyak
3. Tipe cor-coran Cast Resin (*mounded cast resin tipe*)

f. Arrester

Berfungsi sebagai alat untuk melindungi isolasi atau mengamankan instalasi (peralatan listrik pada instalasi) dari gangguan tegangan lebih yang diakibatkan oleh sambaran petir atau tegangan transient yang tinggi dari suatu penyambungan atau pemutusan rangkaian, alat ini bersifat sebagai *by-pass* disekitar isolasi yang membentuk jalan yang mudah dilalui oleh arus kilat sistem pentanahan sehingga akan menimbulkan tegangan lebih yang tinggi dan tidak merusak isolasi peralatan listrik. *By pass* ini harus sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran daya ke konsumen. Jadi pada keadaan normal arrester berlaku sebagai isolator, bila timbul tegangan surla maka alat ini bersifat konduktor yang tahanannya lebih rendah, sehingga dapat menyalurkan arus yang tinggi ketanah. Setelah surla hilang, arrester harus dapat dengan cepat kembali menjadi isolasi. Sesuai dengan fungsinya, maka arrester dipasang pada setiap ujung saluran udara tegangan tinggi yang memasuki gardu induk. Bentuk umum arrester yang digunakan pada Gardu Induk terlihat pada gambar 4.



Gambar 4. Bentuk fisik arrester pada gardu induk

Sumber: Curtis, Bob. *Electric Power eTool: Illustrated Glossary*. U.S.

Department of Labor Occupational Safety & Health Administration 10 Desember 2006

g. Panel kontrol.

Jenis-jenis panel kontrol yang ada dalam suatu gardu induk terdiri dari panel kontrol utama, panel relai.

1. Panel kontrol utama.

Terdiri dari panel instrumen dan panel operasi (gambar 5). Pada panel instrumen terpasang alat-alat ukur dan indikator gangguan, dari panel ini alat-alat tersebut dapat diawasi dalam keadaan sedang beroperasi. Indikator-indikator yang ada pada rel kontrol antara lain: 400 V AC fault, 24 V DC charger, 110 V DC charger, Low pressure, Distance protective trip, Isolating switch on load control, Auto recloser, PLC equipment fault, Breaker failure protection trip, Motor over run, 150 KV apparatus motor fault, Busbar protection fault, Busbar VT secondary MCB fault dan Busbar breaker failure protection trip.



Gambar 5. Bentuk fisik panel kontrol gardu induk

Sumber: Curtis, Bob. *Electric Power eTool: Illustrated Glossary*. U.S.

Department of Labor Occupational Safety & Health Administration 10 Desember 2006

Pada panel operasi terpasang saklar operasi pemutus tenaga, pemisah serta lampu indikator posisi saklar dan diagram ril. Diagram ril (*mimic bus*), saklar dan lampu indikator diatur letak dan hubungannya sesuai dengan rangkaian yang sesungguhnya sehingga keadaan dapat dilihat dengan mudah.

2. Panel relay

Pada panel ini terdapat relay pengaman untuk trafo dan sebagainya. Relay pengaman differensial trafo dan sebagainya. Bekerjanya relay dapat diketahui dari penunjukkan pada relay itu sendiri dan pada indikator gangguan dipanel kontrol utama. Pada gardu induk ada yang memanfaatkan sisi depan dari panel dipakai sebagai panel utama dengan instrument dan saklar, kemudian sisi belakangnya dipakai sebagai panel relay. Pada gardu induk yang rangkaiannya rumit, maka panel relay terpasang pada panel tersendiri.

h. Baterai

Sumber tenaga untuk sistem kontrol dan proteksi selalu mempunyai keandalan dan stabilitas yang tinggi, maka batere dipakai sebagai sumber tenaga kontrol dan proteksi pada gardu induk. Peranan dari battery sangat penting karena pada saat gangguan terjadi, battery sebagai sumber tenaga untuk menggerakkan alat-alat kontrol dan proteksi. Bentuk fisik baterai yang digunakan pada gardu induk :

Menurut bahan elektrolit yang digunakan maka baterai dapat dibedakan atas dua, yaitu:

1. Baterai timah hitam (*lead acid storage battery*)

Bahan elektrolitnya adalah larutan asam belerang. Baterai timah hitam ada dua macam yaitu: *Lead-antimony* dan *Lead-calcium*

2. Baterai alkali (*alkali storage battery*)

Bahan elektrolitnya adalah larutan alkali (*potassium hydroxide*). Battery alkali ada dua macam yaitu:

a. *Nickel-iron-alkaline storage battery (NI-Fe battery)*.

b. *Nickel-cadmium battery (Ni-Cd battery)*.

i. Busbar

Busbar atau rel berfungsi sebagai titik pertemuan atau hubungan trafo-trafo tenaga saluran udara tegangan tinggi (SUTT) dan peralatan listrik lainnya untuk menerima dan menyalurkan tenaga dan daya listrik. Bahan dari rel terbuat dari bahan tembaga (*bar copper* atau *hollow*

conductor). Pada dasarnya sistem rel/busbar dapat dibagi, yaitu (petunjuk pengoperasian dan pemeliharaan peralatan instalasi gardu induk PT. PLN. 1995) :

a. Rel tunggal

Rel tunggal adalah sistem rel yang paling sederhana, karena hanya memerlukan sedikit peralatan dan ruang, maka dari segi ekonomis sistem ini sangat menuntungkan. Sistem ini dapat dipakai pada gardu induk berskala kecil yang hanya mempunyai sedikit saluran keluar. Namun jika terjadi gangguan sehingga pelayanan aliran listrik akan terputus sama sekali.

b. Rel ganda

Rel ganda adalah tipe gardu induk dengan dua rel pengumpul daya. Biasanya daya yang terkumpul dan daya yang disalurkan lebih besar dari pada sistem rel tunggal. Apabila terjadi gangguan pada salah satu rel, maka dapat memindahkan beban ke rel lain yang tidak terganggu.

c. Rel gelang (ring)

Ring gelang memerlukan ruang kecil dan baik untuk pemutusan bagian dari pelayanan dan pemeriksa pemutus beban. Sistem ini jarang dipakai karena mempunyai kerugian disisi operasi dan sistem ini tidak begitu leluasa seperti rel ganda.

j. Sistem pentanahan titik netral

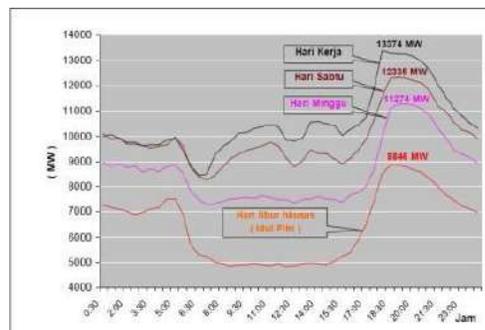
Pentanahan titik netral atau disebut juga *Netral Ground Resistant* (NGR) adalah suatu sistem yang melalui kumparan petersen, tahanan (resistor) atau langsung (*sollydy*) yang berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan fasa pada sistem. Arus yang melalui pentanahan merupakan besaran ukur alat proteksi. Pada trafo yang sisi primernya ditanahkan dan sisi sekundernya juga ditanahkan, maka gangguan fasa ketanah disisi primer selalu dirasakan pada sisi sekunder dan sebaliknya.

1.2.3. Peramalan Beban Listrik Gardu Induk

1.2.3.1. Karakteristik beban

Karakteristik beban merupakan perilaku beban yang dinyatakan dalam besarnya beban (ampere, KW, atau MW) sebagai fungsi dari waktu (menit atau jam) dalam suatu kurun waktu tertentu. Untuk mengetahui karakteristik beban pada suatu hari, biasanya secara manual selama 24 jam yang kemudian digambarkan dalam bentuk grafik yang dinamakan " kurva Beban ". Sistem pencatatan beban secara manual biasanya kurang presisi, sehingga untuk keperluan analisa (sistem aliran daya, gangguan, dll) digunakan *ampere recording* yang berfungsi untuk merekam karakteristik beban secara *real time*.

Kurva beban ini manfaatnya untuk membantu dalam memperkirakan perkembangan atau pertumbuhan beban dari waktu ke waktu sebagai bahan masukan dalam membuat suatu perencanaan dan pengembangan sistem dimasa – masa mendatang, sebagai contoh bentuk karakteristik beban sistem Jawa-Madura -Bali tahun 2009 terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. Tipikal Kurva Beban Sistem Jawa-Madura-Bali
Sumber : Kafahri Arya Hamidie, 2009

Pola beban adalah pola konsumsi tenaga listrik dalam kurun harian, bulanan maupun tahunan. Secara umum, pola beban harian sistem tenaga listrik Jawa-Madura-Bali menunjukkan model-model yang berbeda, yaitu pola untuk hari kerja, hari Sabtu, hari Minggu dan hari libur (Gambar 2.6). Menarik untuk diamati bahwa pada berbagai pola beban yang ada, pemakaian daya listrik tertinggi hanya terjadi selama kurang lebih 4 jam setiap harinya. Periode ini dikenal dengan sebutan periode Waktu Beban Puncak (WBP). Meskipun beban puncak terjadi dalam waktu yang relatif singkat, sistem harus mampu menyediakan kapasitas pembangkitan untuk memasok kebutuhan beban puncak tersebut. Oleh karena itu, operasi sistem tenaga listrik membutuhkan tersedianya pembangkit yang selalu *stand-by* dan hanya difungsikan pada saat beban puncak.

a. Faktor kebutuhan (Demand Factor)

Faktor kebutuhan didefinisikan sebagai perbandingan antara beban maksimum suatu sistem dengan beban terpasang dari sistem tersebut, yang dirumuskan pada persamaan 1.

$$F_{dm} = \frac{\text{beban puncak}}{\text{beban terpasang}} \leq 1 \quad (1)$$

b. Faktor perbedaan (Diversity Factor)

Faktor perbedaan didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah beban maksimum dari masing – masing unit beban pada suatu sistem yang terjadi sebagai satu kesatuan dan dirumuskan pada persamaan 2.

$$F_{dv} = \frac{\sum \text{beban puncak masing – masing}}{\text{Beban puncak total}} \quad (2)$$

c. Faktor keserempakan (coincidence faktor)

Faktor keserempakan didefinisikan sebagai perbandingan antara beban maksimum suatu sistem dengan jumlah beban maksimum dari masing – masing unit beban yang dirumuskan pada persamaan 3.

$$F_c = \frac{\text{Beban puncak total}}{\sum \text{Beban puncak masing – masing}} \leq 1 \quad (3)$$

d. Faktor beban (load Factor)

Faktor beban atau *Load Factor* adalah perbandingan antara beban pada suatu kurun waktu tertentu dengan beban maksimum yang terjadi pada periode tersebut dirumuskan persamaan 4.

$$F_l = \frac{\text{Beban rata – rata}}{\text{Beban puncak}} \leq 1 \quad (4)$$

1.2.3.2. Metode Prakiraan Kebutuhan Energi Listrik

Prakiraan kebutuhan beban listrik menggunakan metode *time series* secara umum memiliki model kurva kecenderungan trend eksponensial. Metode *time series* adalah metode yang disusun berdasarkan hubungan data-data masa lalu tanpa memperhatikan faktor-faktor penyebab (pengaruh ekonomi, iklim, teknologi dan sebagainya). Kurva kecenderungan *trend* merupakan suatu gerakan kecenderungan naik atau turun dalam jangka panjang yang diperoleh dari rata-rata perubahan dari waktu ke waktu dan nilainya cukup rata (*smooth*). Dalam perhitungan nilai *trend* dengan metode *trend* eksponensial (*exponential trend*) menggunakan persamaan 5.

$$Y = a(1+b)^x \quad (5)$$

dengan,

Y adalah data time series periode X

X adalah waktu (hari, minggu, bulan, triwulan, tahun)

a dan b adalah bilangan konstan

Analisis metode *time series* adalah cara mempelajari tata laku deret waktu atau merupakan suatu proses diwaktu yang lalu dengan model matematikanya sehingga tata laku yang akan datang dapat diketahui dari sekarang.

Kecenderungan *trend* eksponensial data yang lalu digambar dengan grafik logaritmik untuk memberikan proyeksi perkiraan dalam bentuk garis lurus mengacu pada persamaan 2.5, maka untuk mempermudah mendapatkan nilai pertumbuhan beban tahunan sesuai dengan data beban dalam satuan MVA dibuat rumus persamaan 5 menjadi persamaan 6 dan untuk menghitung pertumbuhan beban tahun mendatang diberikan pada persamaan 7.

$$S_n = S_0 (1 + \alpha)^t \quad (6)$$

$$\alpha_n = \frac{MVA_n - MVA_{n-1}}{MVA_n} \times 100\% \quad (7)$$

dengan,

- S_n : Kecepatan pertumbuhan rata - rata tahunan yang diamati selama n tahun
- S_0 : Pemakaian beban pada perhitungan tahun pertama
- t : Waktu tahun ke t
- α : Rata - rata pertumbuhan beban dalam prosentase
- α_n : Pertumbuhan beban tahun n dalam prosentase
- MVA_n : Data beban tahun n

1.2.3.3. Efisiensi gardu induk

Salah satu indikator keterandalan Gardu Induk apabila gardu induk memiliki efisiensi gardu induk rendah, artinya gardu induk memikul beban masih ringan, sehingga keberlangsungan penyaluran energi listrik terus menerus hingga mencapai maksimum kapasitas kemampuannya. Besarnya efisiensi gardu induk berdasarkan perhitungan perbandingan *output* dan *input*. Output gardu induk ditentukan dari besarnya beban konsumen dan rugi daya pada penghantar, atau dapat dirumuskan seperti persamaan 8.

$$\eta_{GI} = \frac{P_{Beban} + P_{Losses}}{P_{KGI}} \times 100\% \quad (8)$$

dengan,

- η_{GI} : Efisiensi gardu induk (%)
- P_{Beban} : Daya yang terserap konsumen (kW)
- P_{Losses} : Rugi daya penghantar (kW)
- P_{KGI} : Daya mampu gardu induk (kW)

1.2.4. Penghantar Jaringan Distribusi

Kawat penghantar dapat dikatakan ekonomis apabila penghantar tersebut mampu melayani beban yang besar dan mempunyai rugi daya yang kecil. Jenis - jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah jenis tembaga dengan konduktivitas 100% , tembaga dengan konduktivitas 97,5% atau aluminium dengan konduktivitas 61%.

Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut :

1. AAC (*All Aluminium Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
2. AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
3. ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*), yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
4. ACAR (*Aluminium Conductor, Alloy Reinforced*), yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Penghantar tembaga mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan dengan penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Sedangkan kelemahan penghantar tembaga adalah dengan besar tahanan yang sama, lebih berat dari aluminium dan juga lebih mahal. Oleh karena itu, kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga.

Panjang penghantar dan luas penampang penghantar pada saluran distribusi dapat mempengaruhi resistansi. Resistansi dari suatu penghantar dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 9.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{ohm} \quad (9)$$

dengan,

- R : Resistans penghantar (Ω)
- l : panjang suatu penghantar (km)
- A : Luas penampang penghantar (mm^2)
- ρ : Resistivitas penghantar ($\Omega \text{ mm}^2/\text{km}$)

Nilai reaktansi induktif pada saluran distribusi dapat dicari dengan menggunakan persamaan 10.

$$X_L = 0,1447 \log \frac{GMD}{GMR} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (10)$$

Radius rata – rata geometris (GMR) dari suatu luas (area) adalah limit dari jarak rata – rata geometris (GMD) antara pasangan – pasangan elemen dalam luas itu sendiri bila jumlah elemen diperbesar sampai tak terhingga. Jika d merupakan jarak pemisah antar fasa – fasa penghantar maka nilai GMD dipengaruhi oleh jarak pemisah antar fasa – fasa pada konfigurasi penghantar. Untuk saluran tiga fasa nilai GMD dapat ditulis dalam persamaan 11.

$$GMD = \sqrt{d_{1,2} \cdot d_{2,3} \cdot d_{3,1}} \quad (\text{mm}) \quad (11)$$

Jumlah urat kawat penghantar sangat menentukan adanya nilai jumlah unit kawat di dalam penghantar yang dinyatakan dalam (a). Nilai GMD tergantung dari luas penampang (A) dan faktor jumlah unit kawat dalam penghantar (a) yang termuat dalam persamaan 12.

$$GMR = a \cdot \frac{\sqrt{A}}{\pi} \quad (\text{cm}) \quad (12)$$

Besaran GMR dan GMD merupakan suatu bagian dalam perhitungan dinlai reaktansi indutif pada suatu penghantar dan persamaan 2.9 digunakan untuk menghitung besaran resistansi penghantar. Oleh karena panjangnya perhitungan dalam menentukan impedans urutan positif dan negatif, maka untuk mempermudah dalam analisis, nilai tersebut diambil dari referensi buku ” Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur Pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah ”, SPLN 64 : 1985, Departemen Pertambangan & Energi PULN, Jakarta, seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Nilai resistan dan reaktans penghantar AAAC

Penampang nominal (mm^2)	GMR (mm)	Impedans urutan positif (Ω / km)	Impedans urutan nol (Ω / km)
16	1,6380	2,0161+j 0,4036	2,1641+j1,6911
25	2,0475	1,2903+j0,3895	1,4384+j1,6770
35	2,4227	0,9217+j0,3790	1,0697+j1,665
50	2,8957	0,6452+j0,3678	0,7932+j1,6553
70	3,4262	0,4608+j0,3572	0,6088+j1,6447
95	4,1674	0,3396+j0,3499	0,4876+j1,6324
120	4,6837	0,2688+j0,3376	0,4168+_j1,6251
150	5,2365	0,2162+j0,3305	0,3631+j1,6188
185	5,8155	0,1744+j0,3239	0,3224+j1,6114
240	6,6238	0,1344+j0,3158	0,2824+j1,6033

Sumber : SPLN 64 : 1985

1.2.5. Kuat Hantar Arus (KHA)

Definisi kuat hantar arus adalah kemampuan suatu penghantar untuk menyalurkan arus listrik ke beban. Suatu penghantar mampu menghantarkan arus listrik ke beban berdasarkan luas penampang suatu penghantar dan jenis bahan yang digunakan, semakin luas penampang penghantar, maka penghantar tersebut mampu mengalirkan arus listrik yang besar pula. Seperti diberikan pada tabel 2 yang disadur dari PUIL 2000 hal 350.

Tabel 2. KHA terus menerus dari penghantar campuran aluminium paduan telanjang (AAAC).

Luas penampang (mm ²)	KHA terus menerus (A)	Luas penampang (mm ²)	KHA terus menerus (A)
16	105	185	490
25	135	240	585
35	170	300	670
50 (7 kawat)	210	400	810
50 (19 kawat)	210	500	930
70	255	630	1075
95	320	800	1255
120	365	1000	1450
150	425		

Sumber : PUIL 2000 hal. 350

Tabel 2 memberikan penjelasan bahwa kemampuan penghantar terhadap arus beban yang mengalir. Untuk menghitung besarnya arus beban pada penyulang digunakan persamaan dasar kelistrikan seperti diberikan pada persamaan 13.

$$I = \frac{P_{1\phi}}{V_{1\phi} \times \cos \phi} \quad (13)$$

dengan,

$P_{1\phi}$: Daya satu fase (Watt)

$V_{1\phi}$: Tegangan satu fase (Volt)

$\cos \phi$: faktor daya

1.3. Hipotesis

Berdasarkan latar belakang, tinjauan pustaka dan dasar teori, maka dapat diambil praduga sementara bahwa dengan pertumbuhan beban Gardu Induk sebesar 6,2 % per tahunnya, maka diprediksi untuk 10 tahun mendatang perlu penambahan kapasitas daya baru cukup besar.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan diantaranya adalah :

1. Ukuran dan panjang penghantar penyulang Wonogiri pada gardu induk Wonogiri.
Bahan penelitian ini digunakan untuk mengetahui kemampuan penghantar dalam penyaluran energi listrik ke beban.
2. Data spesifikasi gardu induk Wonogiri.
Data kapasitas daya gardu induk tersebut digunakan untuk perbandingan dengan daya yang terserap pada beban, sehingga efisiensi gardu induk dapat diketahui.
3. Data beban tahun 2016 sampai dengan tahun 2020
Data beban tersebut dipergunakan untuk menghitung peramalan beban sepuluh tahun (10) mendatang, sehingga kemampuan gardu induk sebagai penyalur energi listrik dapat diketahui.

Alat penelitian yang digunakan dalam penyelesaian skripsi ini diantaranya adalah :

1. Program *microsoft word*, program ini digunakan untuk pengetikan skripsi.
2. Program *excell*, program ini digunakan untuk menghitung data yang didapatkan, sehingga dapat membantu dalam analisa dan pembahasan skripsi.

3. Metode regresi untuk menghitung pertumbuhan beban seperti regresi linier, eksponensial, polinomial maupun kuadratis, dari beberapa metode dilakukan uji coba perhitungan pertumbuhan beban 10 tahun mendatang, selanjutnya diambil yang sesuai dengan kondisi beban eksisting tersebut.

2.2. Jalannya Penelitian

Langkah penelitian yang dilakukan diantaranya adalah :

1. Pengajuan surat penelitian di PT. PLN (Persero), khususnya pada GI. Wonogiri
2. Melakukan penelitian dokumentasi, hal ini karena tidak memungkinkan untuk melakukan pengukuran sendiri.
3. Pengambilan data penelitian seperti yang disebutkan dalam sub bab 3.1 yaitu bahan penelitian yang digunakan.
4. Melakukan pemrosesan data
5. Melakukan pembimbingan dengan dosen
6. Pengajuan untuk pengujian skripsi setelah mendapatkan pengesahan dan direkomendasi oleh dosen pembimbing.

Cara pemrosesan data yang dilakukan terdiri dari beberapa tahapan sebagai berikut :

Tahap pertama : Pemilahan data

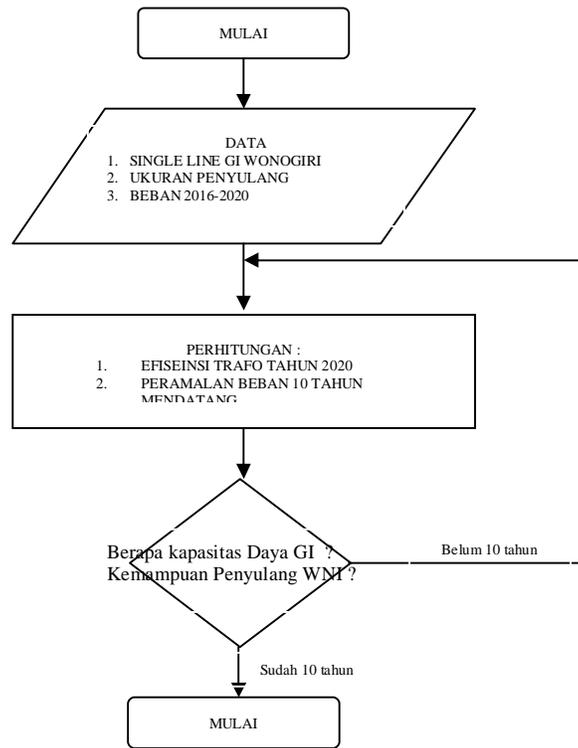
Data yang didapat dari PT. PLN (Persero) GI. Wonogiri disortir sesuai dengan kebutuhan penelitian.

Tahap kedua : Pemrosesan data

Langkah pemrosesan data diantaranya :

1. Menghitung pertumbuhan beban
Data beban tahun 2016 sampai dengan tahun 2020 dirangkum dalam program excell dan dilakukan perhitungan secara statistik.
2. Menghitung peramalan beban
Untuk menghitung peramalan beban digunakan dengan pemulaian dari persamaan (2.6) dan (2.7).
3. Menghitung efisiensi gardu induk
Setelah didapatkan peramalan beban sepuluh tahun mendatang, selanjutnya dihitung efisiensi gardu induk menggunakan persamaan (2.8).
4. Menghitung arus penyulang untuk sepuluh tahun mendatang.
Setelah dilakukan perhitungan peramalan beban, selanjutnya dihitung besarnya arus yang dialirkan ke beban melalui beberapa penyulang. Besarnya arus pada penyulang berdasarkan peramalan dan dengan kondisi ukuran luas penampang penyulang saat ini, maka dapat diketahui kemampuan hantar arus penyulang tersebut dengan mengacu tabel 2.2.
5. Melakukan analisa dan pembahasan
Hasil perhitungan seperti pada poin 1 sampai dengan 4, selanjutnya dilakukan pembahasan keandalan sistem distribusi energi listrik gardu induk.
6. Kesimpulan

Langkah pemrosesan data tersebut dapat disederhanakan dalam bentuk diagram alir seperti diberikan pada gambar 3.1.



Gambar 7. Diagram alir proses perhitungan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Data Penghantar

Gardu Induk Wonogiri terdiri atas 2 trafo yakni trafo I berkapasitas 60 MVA dan trafo II berkapasitas 60 MVA seperti terlihat pada *single line diagram* gambar 1. Sedangkan data penghantar penyulang Wonogiri 01 (WNI 01) sampai dengan penyulang Wonogiri 10 (WNI 10) diberikan pada tabel 3. Selain itu juga diberikan data pembagian penyaluran beban trafo I dan trafo II masing – masing 5 penyulang seperti terlihat pada tabel 4.

Tabel 3. Data ukuran penghantar penyulang Wonogiri

Penyulang	Ukuran Penghantar <i>Outgoing</i>		Ukuran Penghantar Penyulang		Jumlah panjang penghantar <i>l</i> (km)
	SKUTM <i>l</i> (km)	A (mm ²)	AAAC <i>l</i> (km)	A (mm ²)	
WNI 01	0.2	240	16.35	240	16.55
WNI 02	-		23.05	240	23.05
WNI 03	-		11.55	240	11.55
WNI 04	-		13.95	240	13.95
WNI 05	-		23.05	240	23.05
WNI 06	-		10	240	10
WNI 07	-		10.5	240	10.5
WNI 08	-		4.2	240	4.2
WNI 09	-		8.5	240	8.5
WNI 10	-		6.05	240	6.05

Sumber : PT. PLN (Persero) ULP Wonogiri

Tabel 4. Data pembagian penyaluran beban trafo pada penyulang WNI

G.I	TRAFO	PENYU LANG	TEG (KV)	SETT PMT	Penghantar AAAC
WONOGIRI	I	WNI 01	20.6	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
		WNI 03	20.6	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
		WNI 05	20.6	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
		WNI 06	20.6	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
		WNI 08	20.6	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
	II	WNI 02	20	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
		WNI 04	20	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
		WNI 07	20	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
		WNI 09	20	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²
		WNI 10	20	420A	3 x 240 mm ² +N 150 mm ²

Sumber : PT. PLN (Persero) ULP Wonogiri

3.2. Data Beban Puncak

Data beban puncak pada trafo I dan trafo II diperoleh dari GI. Wonogiri yaitu data beban puncak tahun 2016 sampai dengan tahun 2020. Hasil rangkuman data tersebut diberikan pada tabel 5 sebagai berikut :

Table 5. Rangkuman beban listrik siang hari dan malam hari trafo I dan II

Tahun	Trafo I		Trafo II	
	Beban (MW)		Beban (MW)	
	Siang hari	Malam hari	Siang hari	Malam hari
2016	15	19.5	25.4	31
2017	17.858	29.442	24.192	33.1
2018	21.267	30.017	24.867	34.5
2019	34.216	33.107	24.962	33.156
2020	28.957	35.386	31.54	38.563

3.3. Perhitungan Efisiensi Gardu Induk Tahun 2020

Besarnya efisiensi GI. Wonogiri saat ini berdasarkan pembebanan siang hari dan malam hari dihitung menggunakan persamaan 8. Dalam persamaan 8 tertera adanya rugi daya, untuk itu rugi daya sudah termasuk kedalam data beban listrik yang terukur di GI. Wonogiri, maka dengan mengacu beban listrik pada tahun 2020 efisiensi gardu induk sebagai berikut :

Trafo I (beban siang hari) :

$$\eta_{GI} = \frac{28.957 \text{ MW}}{60 \text{ MW}} \times 100\% = 48,26 \%$$

Trafo I (beban malam hari) :

$$\eta_{GI} = \frac{35.386 \text{ MW}}{60 \text{ MW}} \times 100\% = 58,9767 \%$$

Trafo II (beban siang hari) :

$$\eta_{GI} = \frac{31.54 \text{ MW}}{60 \text{ MW}} \times 100\% = 52,567 \%$$

Trafo II (beban malam hari) :

$$\eta_{GI} = \frac{38.563 \text{ MW}}{60 \text{ MW}} \times 100\% = 64,272 \%$$

3.4. Faktor Pertumbuhan Beban

Berdasarkan data pada tabel 5 digunakan sebagai dasar untuk menentukan faktor pertumbuhan beban pada tahun 2016 sampai dengan 2020 pada kondisi beban sesuai dengan data tersebut sebagai berikut :

Trafo I (beban siang hari)

$$\alpha_{1617} = \frac{MW_{2017} - MW_{2016}}{MW_{2017}} \times 100\% = \frac{17.858 - 15}{17.858} \times 100\% = 16\%$$
$$\alpha_{1718} = \frac{MW_{2018} - MW_{2017}}{MW_{2018}} \times 100\% = \frac{21.267 - 17.858}{21.267} \times 100\% = 16,03\%$$
$$\alpha_{1819} = \frac{MW_{2019} - MW_{2018}}{MW_{2019}} \times 100\% = \frac{34.216 - 21,267}{34.216} \times 100\% = 37.845\%$$
$$\alpha_{1920} = \frac{MW_{2020} - MW_{2019}}{MW_{2020}} \times 100\% = \frac{28.957 - 34.216}{28.957} \times 100\% = -18,161\%$$

Trafo I (beban malam hari)

$$\alpha_{1617} = \frac{MW_{2017} - MW_{2016}}{MW_{2017}} \times 100\% = \frac{29.442 - 19.5}{29.442} \times 100\% = 33,768\%$$
$$\alpha_{1718} = \frac{MW_{2018} - MW_{2017}}{MW_{2018}} \times 100\% = \frac{30.017 - 29.442}{30.017} \times 100\% = 1,916\%$$
$$\alpha_{1819} = \frac{MW_{2019} - MW_{2018}}{MW_{2019}} \times 100\% = \frac{33.107 - 30.017}{33.107} \times 100\% = 9,333\%$$
$$\alpha_{1920} = \frac{MW_{2020} - MW_{2019}}{MW_{2020}} \times 100\% = \frac{35.386 - 33.107}{35.386} \times 100\% = 6,44\%$$

Trafo II (beban siang hari)

$$\alpha_{1617} = \frac{MW_{2017} - MW_{2016}}{MW_{2017}} \times 100\% = \frac{24.192 - 25.4}{24.192} \times 100\% = -4,993\%$$
$$\alpha_{1718} = \frac{MW_{2018} - MW_{2017}}{MW_{2018}} \times 100\% = \frac{24.867 - 24.192}{24.867} \times 100\% = 2,714\%$$
$$\alpha_{1819} = \frac{MW_{2019} - MW_{2018}}{MW_{2019}} \times 100\% = \frac{24.962 - 24.867}{24.962} \times 100\% = 0,38\%$$
$$\alpha_{1920} = \frac{MW_{2020} - MW_{2019}}{MW_{2020}} \times 100\% = \frac{31.54 - 24.962}{31.54} \times 100\% = 20,856\%$$

Trafo II (beban malam hari)

$$\alpha_{1617} = \frac{MW_{2017} - MW_{2016}}{MW_{2017}} \times 100\% = \frac{33.1 - 31}{33.1} \times 100\% = 6,344\%$$
$$\alpha_{1718} = \frac{MW_{2018} - MW_{2017}}{MW_{2018}} \times 100\% = \frac{34.5 - 33.1}{34.5} \times 100\% = 4,06\%$$
$$\alpha_{1819} = \frac{MW_{2019} - MW_{2018}}{MW_{2019}} \times 100\% = \frac{33.156 - 34.5}{33.156} \times 100\% = -4,05\%$$
$$\alpha_{1920} = \frac{MW_{2020} - MW_{2019}}{MW_{2020}} \times 100\% = \frac{38.563 - 33.156}{38.563} \times 100\% = 14,02\%$$

Nilai pertumbuhan beban rata - rata didapatkan seperti yang tercantum dalam tabel 6 dan table 7.

Tabel 6. Faktor pertumbuhan beban tahunan Trafo I GI. Wonogiri

Tahun	Beban siang hari				Beban malam hari					
	Daya (MW)	α_{1617}	α_{1718}	α_{1819}	α_{2021}	Daya (MW)	α_{1617}	α_{1718}	α_{1819}	α_{2021}
2016	15	16	16,03	37,845	-18,161	19.5	33,768	1,916	9,333	6,44
2017	17.858					29.442				
2018	21,267					30.017				
2019	34.216					33.107				
2020	28.957					35.386				
Jumlah		51,714 %				51,457 %				
Rata - rata		12,9285 % (0,129285)				12,86425 % (0,1286425)				

Tabel 7. Faktor pertumbuhan beban tahunan Trafo II GI. Wonogiri

Tahun	Beban siang hari				Beban malam hari					
	Daya (MW)	α_{1617}	α_{1718}	α_{1819}	α_{2021}	Daya (MW)	α_{1617}	α_{1718}	α_{1819}	α_{2021}
2016	25.4	-4,993	2,714	0,38	20,856	31	6,344	4,06	-4,05	14,02
2017	24.192					33.1				
2018	24.867					34.5				
2019	24.962					33.156				
2020	31.54					38.563				
Jumlah		18,957 %				20,374 %				
Rata - rata		4,74 % (0,0474)				5,0935 % (0,050935)				

3.5. Prediksi kebutuhan beban 10 tahun mendatang (tahun 2030)

Berdasarkan nilai faktor pertumbuhan beban tahunan pada tabel 6 dan 7 maka prediksi beban tahunan PT. PLN (Persero) Rayon Wonogiri untuk periode sepuluh (10) tahun mendatang (2021 sampai tahun 2030) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 6. Beban awal (S_0) rata-rata dan tertinggi pada awal tahun tinjauan pertumbuhan beban tahun 2020.

Pertumbuhan beban tahunan yang dilayani oleh GI. Wonogiri dari tahun 2021 sampai tahun 2030 dapat ditentukan sebagai berikut :

Untuk Trafo I (beban siang hari) :

Peramalan beban pada tahun ke 1 :

$$S_{2021} = S_{2020}(1 + \alpha)^1 = 28.957(1 + 0,129285)^1 = 32,7 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 2 :

$$S_{2022} = S_{2020}(1 + \alpha)^2 = 28.957(1 + 0,129285)^2 = 36,9 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 3 :

$$S_{2023} = S_{2020}(1 + \alpha)^3 = 28.957(1 + 0,129285)^3 = 41,7 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 4 :

$$S_{2024} = S_{2020}(1 + \alpha)^4 = 28.957(1 + 0,129285)^4 = 47,1 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 5 :

$$S_{2025} = S_{2020}(1 + \alpha)^5 = 28.957(1 + 0,129285)^5 = 53,2 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 6 :

$$S_{2026} = S_{2020}(1 + \alpha)^6 = 28.957(1 + 0,129285)^6 = 60,1 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 7 :

$$S_{2027} = S_{2020}(1+\alpha)^7 = 28.957(1+0,129285)^7 = 67,8 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 8 :

$$S_{2028} = S_{2020}(1+\alpha)^8 = 28.957(1+0,129285)^8 = 76,6 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 9 :

$$S_{2029} = S_{2020}(1+\alpha)^9 = 28.957(1+0,129285)^9 = 86,5 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 10 :

$$S_{2030} = S_{2020}(1+\alpha)^{10} = 28.957(1+0,129285)^{10} = 97,7 \text{ MW}$$

Untuk Trafo I (beban malam hari) :

Peramalan beban pada tahun ke 1 :

$$S_{2021} = S_{2020}(1+\alpha)^1 = 35.386(1+0,1286425)^1 = 39,9 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 2 :

$$S_{2022} = S_{2020}(1+\alpha)^2 = 35.386(1+0,1286425)^2 = 45,1 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 3 :

$$S_{2023} = S_{2020}(1+\alpha)^3 = 35.386(1+0,1286425)^3 = 50,9 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 4 :

$$S_{2024} = S_{2020}(1+\alpha)^4 = 35.386(1+0,1286425)^4 = 57,4 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 5 :

$$S_{2025} = S_{2020}(1+\alpha)^5 = 35.386(1+0,1286425)^5 = 64,8 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 6 :

$$S_{2026} = S_{2020}(1+\alpha)^6 = 35.386(1+0,1286425)^6 = 73,1 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 7 :

$$S_{2027} = S_{2020}(1+\alpha)^7 = 35.386(1+0,1286425)^7 = 82,6 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 8 :

$$S_{2028} = S_{2020}(1+\alpha)^8 = 35.386(1+0,1286425)^8 = 93,2 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 9 :

$$S_{2029} = S_{2020}(1+\alpha)^9 = 35.386(1+0,1286425)^9 = 105,2 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 10 :

$$S_{2030} = S_{2020}(1+\alpha)^{10} = 35.386(1+0,1286425)^{10} = 118,7 \text{ MW}$$

Oleh karena kapasitas Gardu Induk trafo I dalam satuan MVA dengan daya 60 MVA dan dengan faktor daya rata-rata 0,9, maka pertumbuhan beban diubah menjadi satuan MVA seperti tertera dalam tabel 4.23. Dalam perhitungan prosentase pembebanan digunakan rumus sebagai berikut :

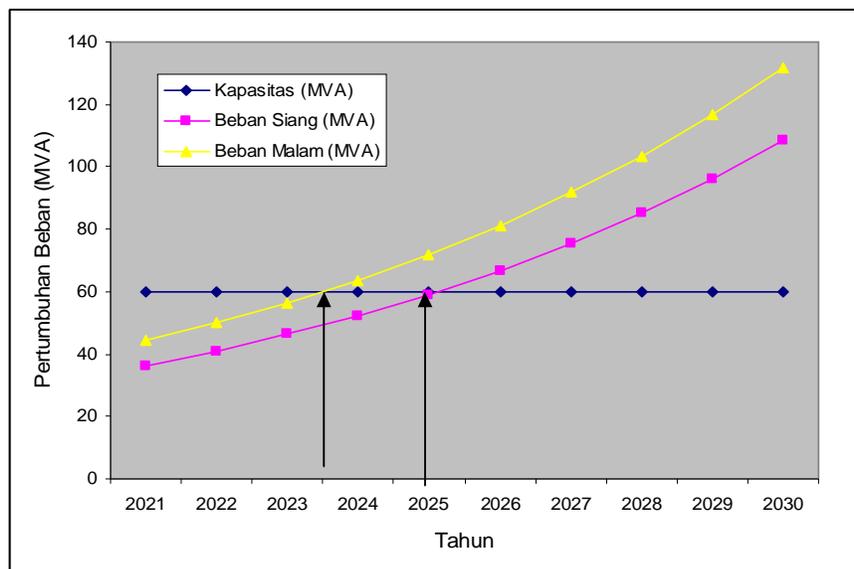
$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{\text{Daya Pembebanan (MVA)}}{\text{Kapasitas Tarfo (MVA)}} \times 100 \%$$

Hasil perhitungan untuk pembebanan trafo I diberikan pada tabel 8 sebagai berikut :

Tabel 8. Hasil perhitungan pertumbuhan beban 10 tahun mendatang trafo I Gardu Induk Wonogiri

Beban Siang Hari		Persen Pembebanan	Beban Malam Hari		Persen Pembebanan
Tahun	Daya (MVA)	(%)	Tahun	Daya (MVA)	(%)
2021	36.3	60.6	2021	44.4	74.0
2022	41.0	68.4	2022	50.1	83.5
2023	46.3	77.2	2023	56.5	94.2
2024	52.3	87.2	2024	63.8	106.3
2025	59.1	98.5	2025	72.0	120.0
2026	66.7	111.2	2026	81.3	135.4
2027	75.4	125.6	2027	91.7	152.9
2028	85.1	141.8	2028	103.5	172.5
2029	96.1	160.2	2029	116.8	194.7
2030	108.5	180.9	2030	131.9	219.8

Secara grafik pertumbuhan beban untuk trafo I diberikan pada gambar 8 laju pertumbuhan beban dari tahun 2021 sampai dengan tahun 2030.



Gambar 8. Laju pertumbuhan beban trafo I GI. Wonogiri

Untuk Trafo II (beban siang hari) :

Peramalan beban pada tahun ke 1 :

$$S_{2021} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54 (1 + 0,0474)^1 = 33 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 2 :

$$S_{2022} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54 (1 + 0,0474)^2 = 34.6 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 3 :

$$S_{2023} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54 (1 + 0,0474)^3 = 36.2 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 4 :

$$S_{2024} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54(1 + 0,0474)^4 = 38 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 5 :

$$S_{2025} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54(1 + 0,0474)^5 = 39.8 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 6 :

$$S_{2026} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54(1 + 0,0474)^6 = 41.6 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 7 :

$$S_{2027} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54(1 + 0,0474)^7 = 43.6 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 8 :

$$S_{2028} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54(1 + 0,0474)^8 = 45.7 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 9 :

$$S_{2029} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54(1 + 0,0474)^9 = 47.8 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 10 :

$$S_{2030} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 31.54(1 + 0,0474)^{10} = 50.1 \text{ MW}$$

Untuk Trafo II (beban malam hari) :

Peramalan beban pada tahun ke 1 :

$$S_{2021} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^1 = 40.5 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 2 :

$$S_{2022} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^2 = 42.6 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 3 :

$$S_{2023} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^3 = 44.8 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 4 :

$$S_{2024} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^4 = 47 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 5 :

$$S_{2025} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^5 = 49.4 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 6 :

$$S_{2026} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^6 = 52 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 7 :

$$S_{2027} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^7 = 54.6 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 8 :

$$S_{2028} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^8 = 57.4 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 9 :

$$S_{2029} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^9 = 60.3 \text{ MW}$$

Peramalan beban pada tahun ke 10 :

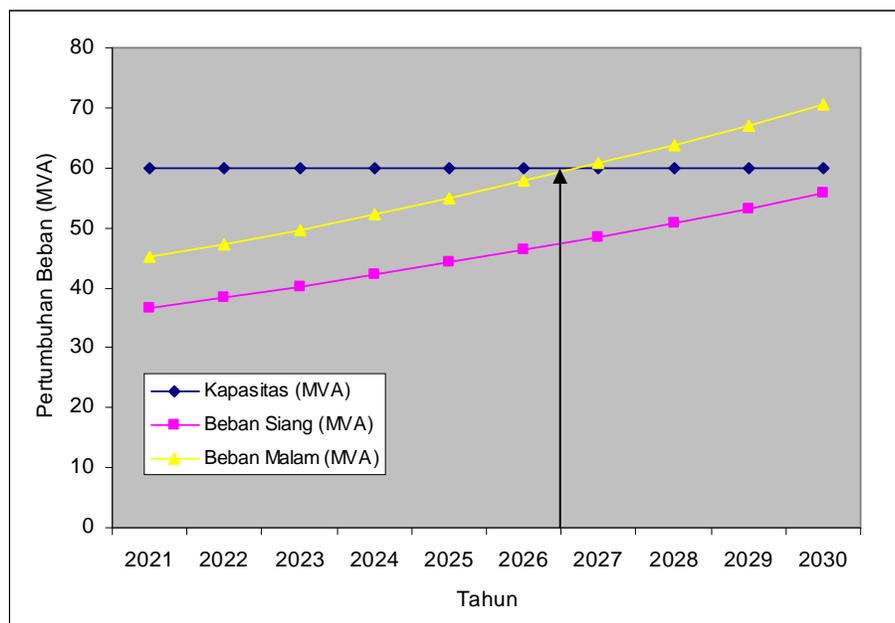
$$S_{2030} = S_{2020} (1 + \alpha)^t = 38.563(1 + 0,050935)^{10} = 63.4 \text{ MW}$$

Seperti telah dijelaskan pada perhitungan pertumbuhan pada trafo I, maka pertumbuhan beban pada trafo II satuan daya dijadikan dalam bentuk MVA, dengan faktor pembagi faktor daya sebesar rata – rata 0,9. Hasil perhitungan untuk pembebanan trafo II diberikan pada tabel 9 sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil perhitungan pertumbuhan beban 10 tahun mendatang trafo II Gardu Induk Wonogiri

Beban Siang Hari		Persen Pembebanan (%)	Beban Malam Hari		Persen Pembebanan (%)
Tahun	Daya (MVA)		Tahun	Daya (MVA)	
2021	36.7	61.2	2021	45.0	75.1
2022	38.4	64.1	2022	47.3	78.9
2023	40.3	67.1	2023	49.7	82.9
2024	42.2	70.3	2024	52.3	87.1
2025	44.2	73.6	2025	54.9	91.5
2026	46.3	77.1	2026	57.7	96.2
2027	48.5	80.8	2027	60.7	101.1
2028	50.8	84.6	2028	63.8	106.3
2029	53.2	88.6	2029	67.0	111.7
2030	55.7	92.8	2030	70.4	117.4

Secara grafik pertumbuhan beban untuk trafo II diberikan pada gambar 9 laju pertumbuhan beban dari tahun 2021 sampai dengan tahun 2030.



Gambar 9. Laju pertumbuhan beban trafo II GI. Wonogiri

3.6. Kemampuan Penyulang

3.6.1. Penyulang Wonogiri 01 (WNI 01), WNI 03, WNI 06 dan WNI 08

Prediksi peningkatan arus beban 10 tahun mendatang diperlukan untuk mengetahui kemampuan penghantar penyulang yang ada saat ini. Mengacu hasil perhitungan prediksi kebutuhan daya 10 tahun mendatang, maka besarnya arus penyulang dihitung dengan menggunakan persamaan 2.13. Dengan maksimum beban daya pada tahun 2030 sebesar 118,7 MW yang pada 4 penyulang, maka arus yang mengalir pada penyulang adalah :

$$I = \frac{P_{1\phi}}{V_{1\phi} \times \cos \phi} = \frac{118,7 \times 10^3}{20 \times 0,9} = 6594,44 \text{ A}$$

Arus per penyulang sebesar : $I_{Penyulang} = \frac{6594,44}{4} = 1648,61 \text{ A}$

Arus penyulang terbagi menjadi 3 fase R, S dan T, sehingga per penghantar penyulang dialiri arus sebesar : $I_{Per \text{ fase}} = \frac{I_{Penyulang}}{3} = \frac{1648,61}{3} = 549,54 \text{ A}$

Mengacu pada tabel 2.2 ukuran penghantar 240 mm² memiliki kemampuan hantar arus terus menerus 585 A. Berdasarkan hasil perhitungan teraliri arus untuk sampai tahun 2030 sebesar 549,54 ampere masih mampu, akan tetapi pembebanan penyulang sudah diambang kritis kemampuannya.

3.6.2. Penyulang Wonogiri 02 (WNI 02), WNI 04, WNI 05, WNI 07, WNI 09 dan WNI 10

Seperti yang dijelaskan pada sub bab 4.2.4.1 bahwa penyulang yang terkait dengan trafo II terdiri atas 6 penyulang, sedangkan beban maksimum pada tahun 2030 sebesar 63,4 MW. Oleh karena itu besaran arusnya adalah :

$$I = \frac{P_{1\phi}}{V_{1\phi} \times \cos \phi} = \frac{63,4 \times 10^3}{20 \times 0,9} = 3522,22 \text{ A}$$

Arus per penyulang sebesar : $I_{Penyulang} = \frac{3522,22}{6} = 587,04 \text{ A}$

Arus penyulang terbagi menjadi 3 fase R, S dan T, sehingga per penghantar penyulang dialiri arus sebesar : $I_{Per \text{ fase}} = \frac{I_{Penyulang}}{3} = \frac{587,04}{3} = 195,68 \text{ A}$

Mengacu pada tabel 2.2 ukuran penghantar 240 mm² memiliki kemampuan hantar arus terus menerus 585 A. Berdasarkan hasil perhitungan teraliri arus untuk sampai tahun 2030 sebesar 195,68 ampere masih sangat mampu untuk mengatasi terjadinya pertumbuhan beban mendatang setelah tahun 2030.

3.7. Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan pembebanan trafo I GI. Wonogiri dalam kondisi beban siang hari tahun 2020 sebesar 48,26 % dan beban malam hari sebesar 58,9767 %. Dengan laju pertumbuhan beban sebesar 0,129285 (beban siang hari) dan 0,1286425 (malam hari) per tahun menghasilkan pada tahun 2025 pembebanan trafo siang hari mencapai 98,5 % dan pada tahun 2023 pembebanan trafo malam hari mencapai 94,2%. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa trafo I di tahun 2023 perlu diperhatikan pembebanannya.

Hasil perhitungan pembebanan trafo II GI. Wonogiri dalam kondisi beban siang hari tahun 2020 sebesar 52,567 % dan beban malam hari sebesar 64,272 %. Dengan laju pertumbuhan beban sebesar 0,0474 (beban siang hari) dan 0,050935 (malam hari) per tahun menghasilkan pada tahun 2030 pembebanan trafo siang

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan dijelaskan bahwa perhitungan tentang pertumbuhan pembebanan untuk 10 tahun mendatang. Dengan hasil perhitungan dan pembahasan tersebut dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Kapasitas trafo I pada tahun 2023 sudah mencapai titik kritis dengan pembebanan trafo sebesar 94,2%.

- b. Kapasitas trafo II pada tahun 2026 sudah mencapai titik kritis dengan pembebanan trafo sebesar 96,2%.
- c. Penyulang Wonogiri 01 (WNI 01), WNI 03, WNI 06 dan WNI 08 sampai dengan tahun 2030 menggunakan penghantar ukuran 3 x 240 mm² dengan KHA sebesar 585 ampere, maka di tahun 2030 masih mampu dialiri arus per fase sebesar 549,54 ampere.
- d. Penyulang Wonogiri 02 (WNI 02), WNI 04, WNI 05, WNI 07, WNI 09 dan WNI 10 sampai dengan tahun 2030 menggunakan penghantar ukuran 3 x 240 mm² dengan KHA sebesar 585 ampere, maka di tahun 2030 masih mampu dialiri arus per fase sebesar 195,68 ampere

5. SARAN

Berdasarkan hasil perhitungan pembebanan GI. Wonogiri, maka dapat diberikan saran bahwa dengan kondisi pembebanan GI. Wonogiri mencapai 88,62 %, maka perlu dilakukan penambahan trafo sebesar 60 MVA agar mampu memikul beban di tahun 2030. Selain itu perlu penambahan penyulang baru untuk sarana pendistribusian beban trafo

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. PLN (Persero) GI. Wonogiri yang telah banyak membantu dalam hal pendataan maupun kemudahan dalam pelaksanaan penelitian ini, sehingga penelitian ini berjalan sesuai rencana.

DAFTAR PUSTAKA

- Bayu Jati Prabowo, 2019, Analisis Peramalan Kebutuhan Energi Listrik Rayon Wonogiri Menggunakan Metode DKL 3.2, Naskah Publikasi Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2019
- Dian Sefulloh, 2003, "Perencanaan Gardu Induk Untuk 10 Tahun ke Depan " Makalah Seminar Tugas Akhir, Universitas Diponegoro, Semarang
- I Made Sudirawan, 2009, "Evaluasi Ketersediaan Pembangkitan Tenaga Listrik Terhadap Pertumbuhan Beban (Studi Kasus Di PT. PLN (Persero) Wilayah VI Cabang Balikpapan), Skripsi STTNAS, Yogyakarta
- Muhammad Hasan Basri Paleba, 2017, Analisis Peramalan Beban Transformator Tenaga Dengan Metode Regresi Linear Berganda Di Gardu Induk Bandar Srihawono Lampung Timur, Tugas Akhir, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
- Muhammad Suyanto, Ridwan Setyowibowo, Prasetyono Eko Pambudi, 2018, Evaluasi Kemampuan Transformator Daya Pada Gardu Induk 150 kV Wates, Jurnal Teknologi Technoscintia, Vol. 10 No. 2 Februari 2018, ISSN: 1979-8415
- Pujiono, Prastyono Eko Pambudi, Mujiman, 2016, Analisis Pembebanan Terhadap Usia Pakai Transformator Tenaga Di Gardu Induk 150 kV, Jurnal Elektrikal, Volume 3 No. 1, Juni 2016, 11-20
- Syafriyudin, 2011, "Perhitungan Lama Waktu Transformator Jaringan Distribusi 20 KV di APJ. Yogyakarta, Jurnal Teknologi, Vol. 4 No. 1, Juni 2011, hal 88 – 95.
- Syarif M. Bahtiar, 2016, Peramalan Beban Dengan Menggunakan Metode Time Series Untuk Kebutuhan Tenaga Listrik Di Gardu Induk Sungai Raya, Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura, Vol. 2, No. 1, 2016