

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan latar belakang tugas akhir yang telah dijabarkan, peneliti terlebih dahulu melakukan pengumpulan referensi penelitian sebelumnya dan jurnal-jurnal yang terkait dalam mendukung penyelesaian penelitian. Referensi digunakan sebagai penentuan batasan-batasan permasalahan sesuai dengan topik penelitian. Beberapa sumber pustaka yang digunakan sebagai referensi adalah sebagai berikut :

1. Peneliti Yoakim Simamora (2014) melakukan penelitian tentang analisis ketidakseimbangan beban transformator distribusi untuk identifikasi beban lebih dan estimasi rugi-rugi pada jaringan tegangan rendah. Analisa yang dilakukan pada waktu luar beban puncak yaitu siang hari dan waktu beban puncak pada malam hari dengan menentukan rugi-rugi daya (*losses*) pada tiga transformator berbeda kapasitas. Hasil yang didapat peneliti bahwa adanya rugi rugi daya (*losses*) disebabkan ketidakseimbangan beban lebih pada transformator.
2. Peneliti Gama Ayu Kartika (2018) melakukan penelitian mengenai analisa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan *losses* pada trafo distribusi studi kasus pada PT.PLN (Persero) Rayon Blora. Analisa yang diperoleh dimana terdapat arus mengalir di netral transformator akibat ketidakseimbangan beban yang menyebabkan *losses*. *Losses* dihasilkan dari adanya arus pada penghantar netral transformator dan arus netral yang mengalir ke tanah. Semakin besar ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi maka *losses* arus netral pada penghantar netral dan yang mengalir ke tanah akan besar pula.

3. Peneliti dari Tim CoP Distribusi PT.PLN (Persero) Cabang Parepare (2009) melakukan penelitian tentang cara penyeimbangan beban gardu distribusi dengan metode “*All Reconnecting*”. Penyeimbangan beban gardu distribusi yang sederhana dengan merencanakan gambar rayon card penentuan pelanggan-pelanggan listrik dan menetapkan fasa titik sadapan pada pelanggan.

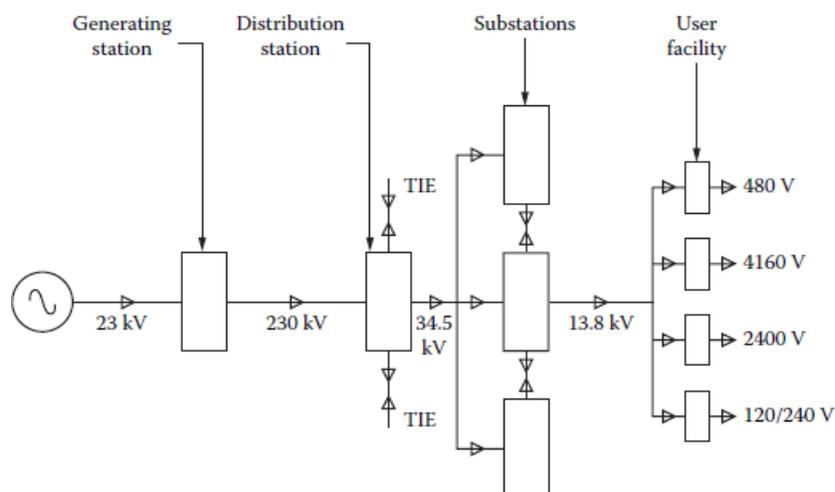
2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sebuah kesatuan interkoneksi komponen-komponen atau alat-alat listrik dengan sistem berskala besar berfungsi sebagai pusat terhubung sistem penyediaan tenaga listrik untuk menyalurkan listrik dari produsen menuju konsumen.

Terdapat tiga komponen utama pada sistem tenaga listrik (Whittaker, 2007):

- a. Pembangkitan
- b. Transmisi
- c. Distribusi

Penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit sampai ke pemakaian energi listrik (beban) dapat digambarkan pada skema berikut



Gambar 2.1 Skema Umum Sistem Tenaga Listrik

Sumber : AC Power System Handbook

Dalam pembangkitan energi listrik komponen yang utama dibutuhkan adalah generator. Generator menjadi sub-sistem yang mengubah energi non listrik menjadi energi listrik. Generator yang umum digunakan adalah generator sinkron pada pusat pembangkit yang menghasilkan tenaga listrik mencapai tegangan antara 6 – 24 kV tegangan. Transformator membantu menaikkan tegangan menjadi 150-500 kV hasil produksi energi generator. Setelah tegangan telah dinaikkan kemudian ditransmisikan ke gardu induk dengan saluran transmisi yang umum digunakan di Indonesia memiliki tegangan sebesar 500 kV (TET), 150 kV (TT). Tenaga listrik yang di terima gardu induk akan dilepas menuju gardu transformator distribusi (TD) dalam bentuk tegangan menengah 20 kV. Melalui trafo distribusi berbagai pusat beban, tegangan distribusi primer dapat disalurkan menuju beban besar seperti industri kecil atau perusahaan bisnis dan disisi lain dapat diturunkan menjadi tegangan rendah 220/380 V yang akhirnya diterima pihak pemakai.

2.2.1 Pembangkitan

Definisi pembangkit adalah suatu bagian alat sistem yang dapat membangkitkan dan memproduksi tegangan listrik . Listrik dihasilkan oleh pembangkit dari berbagai sumber energi seperti PLTA, PLTN, PLTU, PLTS dan lain-lain. Berbagai macam cara untuk listrik dapat dibangkitkan di dunia saat ini menggunakan *hidroelektrik*, nuklir, dan bahan bakar fosil. *Hidroelektrik* mengandalkan energi potensial kinetik dan air untuk menghasilkan energi listrik. Melihat kelangkaan bahan bakar fosil mendorong para ilmuwan untuk mencari alternatif sumber energi baru, yaitu biasa digunakan geothermal, air, dan angin. Pada prinsipnya cara kerja semua pembangkit listrik adalah sama, yaitu menggunakan sumber-sumber energi tersebut untuk memutar turbin yang akan menghasilkan listrik.

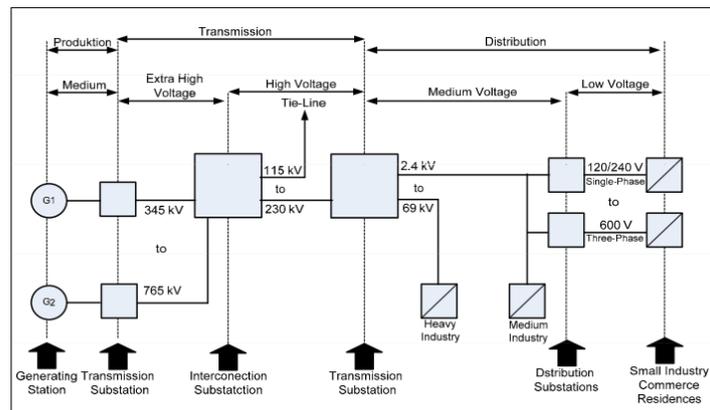
Pengoperasian pembangkit listrik disesuaikan dengan beban yang beroperasi sesuai dengan keadaan sedang beban normal atau beban puncak. Umumnya beban normal cukup menggunakan pembangkit - pembangkit besar yang membutuhkan waktu lama untuk *starting* dan pembangkit listrik

tambahan yang membutuhkan waktu cepat untuk *starting* akan beroperasi bila mendekati beban puncak. Rasio yang biasa digunakan untuk menyatakan utilitas dari pembangkit adalah *load factor* dan *capacity factor*. *Load factor* merupakan beban rata-rata yang dibandingkan dengan beban puncak pada periode yang sama, sementara *capacity factor* merupakan perbandingan antara beban rata-rata dengan output kapasitas dari pembangkit.

2.2.2 Transmisi

Transmisi tenaga listrik merupakan komponen vital dalam proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik menuju gardu distribusi dengan bahan konduktor agar dapat digunakan konsumen. Bahan konduktor paling umum digunakan sebagai penghantar yaitu baja, tembaga, aluminium dengan bahan yang dipilih memiliki karakteristik kekuatan fisik dan daya hantar yang baik serta biaya yang memadai. Faktor yang mempengaruhi besar kecilnya nilai resistansi penghantar dan kemampuan daya hantar dari konduktor berdasar pada perbedaan nilai luas penampang dan jenis inti material.

Dengan penyaluran melalui transmisi digunakan jarak jauh dapat mengalami rugi-rugi tenaga sehingga dari pusat pembangkit menuju ke pusat beban harus ditransmisikan dengan tegangan tinggi. Diperlukan proteksi sistem seperti rele arus lebih, rele hubung tanah, pemutus tenaga untuk meminimalisir kerusakan dari faktor teknis dan faktor alam.



Gambar 2.2 Diagram Umum Sistem Transmisi

Sumber : Transmission of Electrical Energy

Berdasarkan blok diagram dasar sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik terdiri dari pembangkit, transmisi gardu induk dan hubungan antar gardu. Transmisi gardu induk menyediakan pelayanan mengubah tegangan untuk dinaikkan dan diturunkan pada saluran tegangan yang ditransmisikan. Menurut standar tegangan internasional untuk Saluran tegangan Ekstra Tinggi berkisar 345 kV hingga 765 kV sementara Saluran tegangan tinggi berkisar 115 kV hingga 230 kV.

Dua jenis penghantar dalam mentransmisikan listrik yang biasa digunakan yaitu *overhead lines* dan *underground cables*. *Overhead lines* merupakan saluran transmisi yang menyalurkan tenaga listrik melalui kawat yang digantung antar menara transmisi dengan udara sebagai isolasi kawat. Segi biaya penggunaan lebih murah namun harus diadakannya proteksi yang lebih karena rentan terhadap gangguan dari luar atau alam seperti burung, pesawat, petir atau pohon. Adanya gangguan diikuti dengan kemudahan dalam mengetahui letak titik gangguan dengan metode hasil pengukuran arus dan tegangan frekuensi sistem pada terminal yang terhubung dengan saluran transmisi yang mengalami gangguan (Ramadoni,2014).



Gambar 2.3 *Overhead Lines*

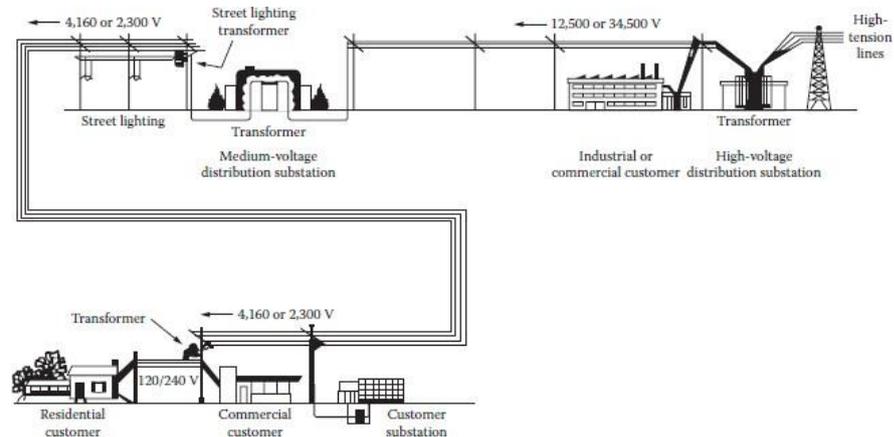
Sumber : *Electrical Engineers Guide*

Underground Lines merupakan kabel jalur transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui dalam tanah atau bawah laut. Kategori kabel jenis ini lazim digunakan pada daerah perkotaan karena berada di dalam tanah dan tidak mengganggu estetika keindahan kota dan tidak mudah mendapat gangguan dari kondisi alam maupun cuaca. Keuntungan lain dari kabel ini dimana nilai rugi-rugi daya lebih kecil dari kabel saluran udara dan tidak adanya korona disebabkan minimalnya ionisasi udara atmosfer yang mengelilingi kabel. Namun disisi lain terdapat kekurangan, antara lain sulitnya menentukan letak titik gangguannya sehingga tahap perbaikan yang cukup lama dan biaya yang mahal untuk investasi serta pemasangan instalasinya karena isolasi yang dibutuhkan harus tahan terhadap tekanan tanah ataupun airlaut.

2.2.3 Distribusi

Distribusi merupakan bagian penghubung antara transmisi dengan konsumen dengan tujuan mendistribusikan energi listrik dengan menggunakan tegangan rendah. Proses distribusi dimulai dari PMT *outgoing* pada gardu induk 20 kV sampai alat penghitung dan pembatas (APP) di konsumen. Topologi dalam distribusi yang umum digunakan ring, radial,

spindle ataupun mesh. Banyaknya komponen sistem tenaga listrik yang terpasang mengindikasikan meningkatnya penggunaan beban dengan semakin besarnya suatu kota maka jaringan yang terhubung akan meningkat.



Gambar 2.4 Skema Umum Distribusi

Sumber : AC Power System Handbook

Sistem distribusi dapat dikategorikan dalam dua tingkatan yaitu:

- a. Jaringan Distribusi Primer (Distribusi Tegangan Menengah)
- b. Jaringan Distribusi Sekunder (Distribusi Tegangan Rendah)

Jaringan distribusi primer berposisi jaringan yang berada sebelum gardu distribusi memiliki fungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan 6 kV atau 20 kV (tegangan menengah) pada incoming. Hantaran keluaran berupa tenaga listrik bertegangan 220V atau 380V (tegangan rendah). Frekuensi yang biasa digunakan untuk proses sistem tenaga listrik adalah 50 Hz.

Di beberapa negara terutama negara tetangga terdapat tegangan distribusi (nominal) dan Frekuensi yang digunakan sebagai berikut

Tabel 2.1 Tegangan Distribusi Dan Frekuensi Berbagai Negara

Negara	Frekuensi (Hz)	Tingkat Pasokan Tenaga
Burma	50	11 kV;11,2 kV 127/220 V;220/380 V

India	50 & 25	22 kV;11 kV 250/440 V;230/400 V;230/460 V
Indonesia	50	6 kV;20kV 127/220 V; 220/380 V
Philiphina	60	13,8 kV;4,16 kV;2,4kV 110/220 V
Singapura	50	20 kV;6,6 kV 230/440 V;230 V
Perancis	50	20 kV;15 kV 230/380 V;127/220 V
Jerman	50	20 kV;10 kV;6 kV 220/380 V;220 V

Baik buruknya suatu sistem distribusi dinilai dari bermacam-macam faktor, diantaranya menyangkut hal-hal sebagai berikut :

a. Kontinuitas pelayanan

Yaitu meminimalkan jumlah dan lama padam daerah konsumen yang terjadi akibat adanya gangguan ataupun sedang terjadi pemeliharaan.

b. Efisiensi

Efisiensi yang dimaksud adalah mengurangi rugi-rugi daya atau losses yang terjadi pada jaringan distribusi dengan meningkatkan keandalan alat-alat jaringan distribusi.

c. Fleksibilitas

Diharapkan agar sistem jaringan distribusi dapat berkembang sesuai kemajuan teknologi yang berdampak pada meningkatnya kualitas penyaluran tenaga listrik untuk konsumen.

d. Regulasi Tegangan

Pengaturan tegangan baik dari Gardu Induk, saluran transmisi ataupun pada pembangkit sangat penting agar kontinuitas tenaga listrik terjaga.

e. Harga Sistem

Dalam pembangunan jaringan distribusi perlu diperhatikan kualitas komponen-komponen yang digunakan agar keandalan jaringan distribusi tetap terjaga.

2.3 Komponen Sistem Distribusi

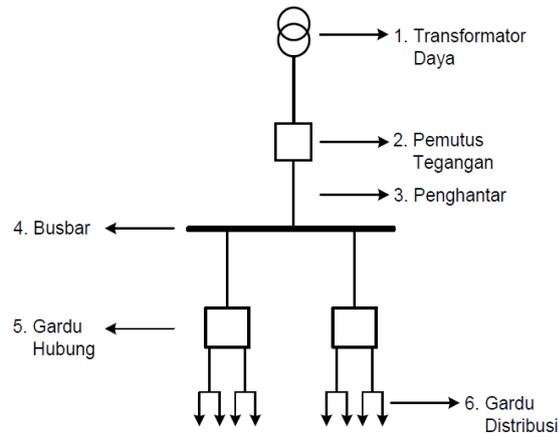
Komponen sistem distribusi menjadi peran vital dalam kelangsungan penyaluran tenaga listrik berkesinambungan antara sumber listrik berdaya besar (gardu transmisi) menuju dengan pemakai tenaga listrik. Secara umum komponen utama yang termasuk dalam distribusi listrik diantaranya:

2.3.1 Gardu Induk

Pada pendistribusian listrik, gardu induk merupakan sub satu kesatuan sistem penyaluran dengan menerima daya listrik transmisi dari pembangkitan untuk disalurkan menuju sistem distribusi. Klasifikasi tegangan yang diubah dari sistem transmisi pada gardu induk diantaranya tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi (500kV/150kV), tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah (150kV/70kV), dan tegangan tinggi ke tegangan menengah (150kV/20kV, 70kV/20kV) dengan frekuensi tetap 50 Hz.

2.3.2 Jaringan Sistem Distribusi Primer

Jaringan Sistem Distribusi Primer merupakan saluran yang digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dimulai dari gardu induk hingga gardu distribusi. Jaringan ini menggunakan kabel udara, saluran udara ataupun kabel tanah disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan tingkatan keandalan sistem. Tegangan nominal yang digunakan dalam saluran distribusi primer ini sebesar 20 kV hasil penurunan transformator gardu induk 150 kV atau 70 kV. Pengguna listrik berdaya besar dapat langsung berlangganan dari saluran ini seperti industri, mall, hotel, dll.



Gambar 2.5 Bagian-Bagian Sistem Distribusi Primer

Sumber : Suhadi dkk, Teknik Distribusi Tenaga Listrik

Berikut gambar dari bagian-bagian distribusi primer secara umum.

a. Transformator daya

Peralatan tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik untuk menurunkan tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam pengoperasiannya transformator daya ditanahkan pada titik netralnya untuk sistem pengamanan seperti transformator daya 150 kV/70 kV ditanahkan di sisi netral 150 kV.

b. Pemutus tegangan

Peralatan pemutus rangkaian listrik dalam sistem tenaga listrik bertugas membuka dan menutup rangkaian listrik dalam setiap kondisi ketika dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menciptakan kehilangan kestabilan sistem dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

c. Penghantar

Penghantar digunakan sebagai bahan menghantarkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban melalui saluran udara baik melewati jaringan distribusi atau terlebih dahulu dengan jaringan transmisi.

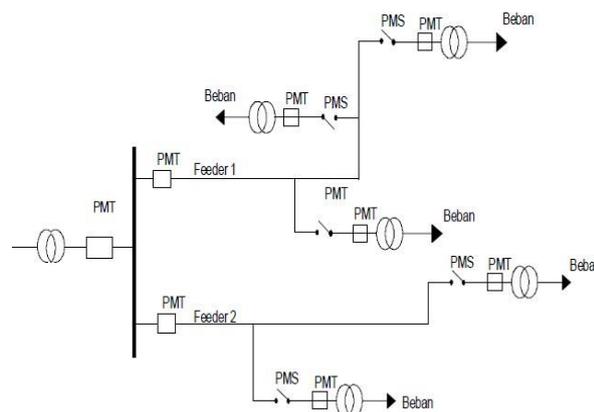
d. Busbar

Alat ini memiliki fungsi sebagai titik pertemuan antara transformator daya dengan peralatan lainnya. Dikarenakan busbar bekerja pada arus yang besar tentu memerlukan kecepatan yang tinggi dalam perlingungannya untuk membatasi kerusakan fatal peralatan lain.

Pada jaringan sistem distribusi primer tegangan menengah 20 kV dikategorikan dalam 5 pola atau model berdasarkan susunan rangkaiannya sebagai berikut:

a. Pola *Radial*

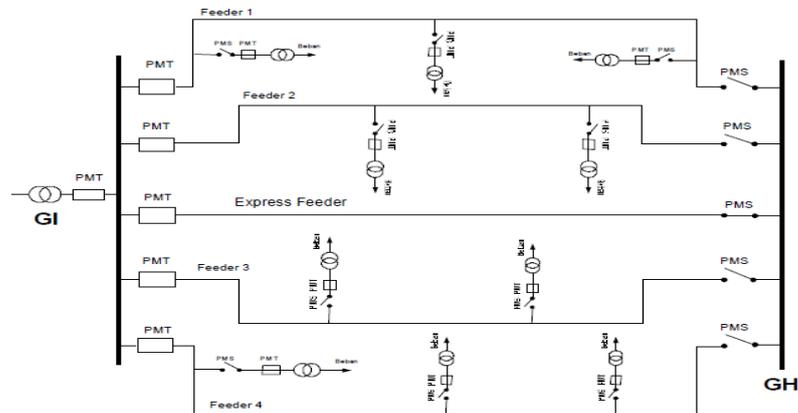
Pola ini paling umum digunakan di daerah pedesaan atau kawasan sistem yang kecil karena bersifat sederhana dan ekonomis. Saluran yang mengalir pada pola Radial biasanya Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Di balik kesederhanaannya pola ini sangat rendah dari segi keandalan sistem. Rendahnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama dalam menyuplai daya listrik menuju gardu distribusi. Jika mengalami gangguan pada jalur utama maka seluruh gardu distribusi yang mengikutinya akan padam. Segi mutu tegangan gardu distribusi paling ujung akan memiliki jatuh tegangan terbesar.



Gambar 2.6 Skema Pola Sistem *Radial*

Sumber : Suhadi dkk, Teknik Distribusi Tenaga Listrik

tegangan pada sistem distribusi. Dengan demikian tingkat kontinuitas akan terjaga. Terdapat gardu tengah pada setiap penyulang sebagai titik manufer bila terjadi gangguan pada jaringan.

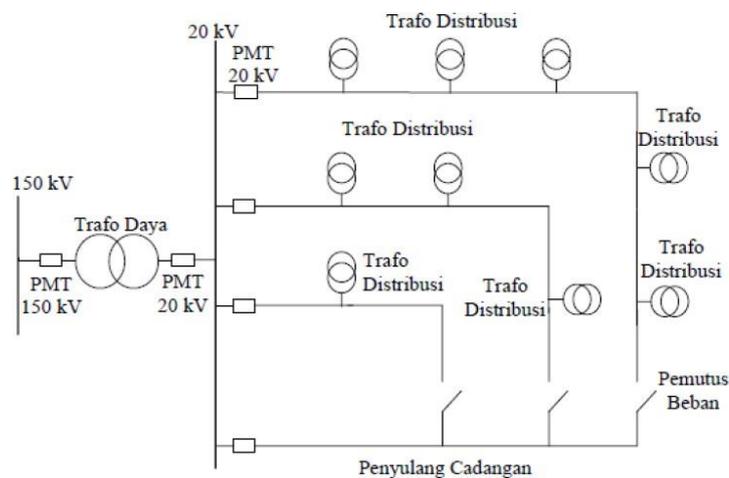


Gambar 2.8 Skema Pola Sistem *Spindle*

Sumber : Suhadi dkk, Teknik Distribusi Tenaga Listrik

d. Pola Sistem Cluster

Sistem Cluster mirip dengan pola *spindle* namun bedanya tidak digunakannya gardu hubung. *Express Feeder* langsung terhubung pada setiap penyulang aktif sehingga bila terjadi gangguan pada salah satu penyulang maka penyulang cadangan akan menggantikan fungsi suplai listriknya. Pola ini banyak digunakan pada kota-kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi.



Gambar 2.9 Skema Pola Sistem Cluster

Sumber : Suhadi dkk, Teknik Distribusi Tenaga listrik

2.3.3 Gardu Distribusi

Gardu Distribusi bagian dari tempat instalasi listrik dari suatu sistem distribusi berfungsi menghubungkan jaringan tegangan menengah (JTM) dengan jaringan tegangan rendah (JTR) untuk mendistribusikan tenaga listrik sesuai kebutuhan tegangan konsumen. Di dalam gardu distribusi terdapat alat-alat listrik pendukung seperti transformator distribusi, pemutus, pengaman, dan penghubung. Nilai tegangan system diubah dari 20 kV menjadi tegangan pemakaian pelanggan 380 V atau 220 V dengan kapasitas transformator yang biasa digunakan adalah 400 KVA, 630 KVA, dan 1000 KVA lebih rendah dari gardu induk.



Gambar 2.10 Gardu Distribusi

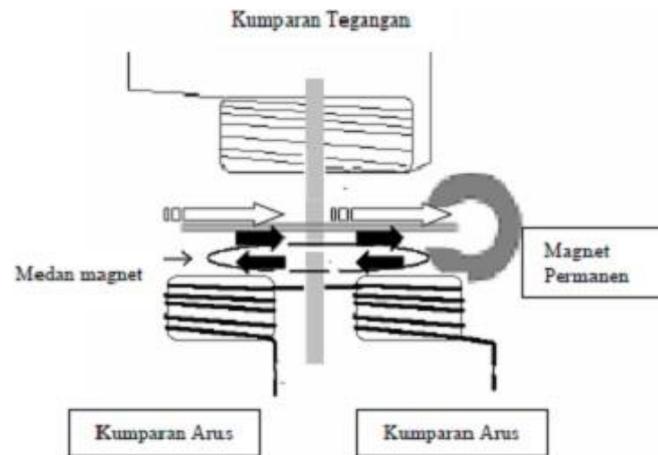
Sumber : Ezkhelenergy.com

2.4 Kwh Meter

Menurut pasurono (2013) kWh-meter merupakan suatu alat yang digunakan oleh pihak PLN untuk mengukur dan menghitung jumlah pemakaian energi listrik yang dikonsumsi oleh pelanggan (konsumen listrik). Ada dua jenis kWh meter yang pada umumnya dipakai pada konsumen PLN yaitu kWh meter *Analog* dan *Digital*.

2.4.1 KWh Meter Analog (Pascabayar)

KWh-meter *Analog* adalah alat yang digunakan untuk mengukur energi listrik. Bagian-bagian utama dari sebuah kWh-meter adalah kumparan tegangan, kumparan arus, sebuah piringan aluminium, sebuah magnet tetap, dan sebuah gir mekanik yang menggerakkan *counter* untuk menghitung jumlah energi listrik yang dikonsumsi.



Gambar 2.11 Medan magnet pada kWh meter *analog*

Sumber : Pasurono, Perancangan kWh Meter Digital Menggunakan kWh Meter Konvensional

Arus listrik yang melalui kumparan arus menimbulkan adanya medan di permukaan kawat tembaga pada koil kumparan arus. Sebuah piringan aluminium yang berada pada medan kumparan arus menyebabkan adanya arus pusar (*eddy current*) pada piringan tersebut. Reaksi arus pusar dan medan kumparan tegangan membangkitkan torsi terhadap piringan dan menyebabkannya berputar. Kecepatan putar piringan dipengaruhi oleh besar kecilnya arus listrik yang melalui kumparan arus (pasurono, 2013).

Poros yang menopang piringan aluminium dihubungkan melalui susunan roda gigi untuk menggerakkan counter penghitung pemakaian energi listrik.

2.4.2 kWh Meter *Digital* (Prabayar)

kWh-meter digital PLN menggunakan system prabayar. Ketika pelanggan resmi menjadi pengguna kWh-meter digital maka pelanggan akan mendapat sebuah kartu prabayar (ID Card). Kartu prabayar selain sebagai nomor identitas pelanggan prabayar, juga berfungsi sebagai alat transaksi pembelian energi listrik (token stroom). Pembelian token stroom dapat dilakukan di kantor pelayanan PLN terdekat dan di bank yang telah bekerjasama dengan pihak PLN.

Pengisian ulang pulsa dilakukan dengan cara memasukkan 20 digit angka yang terdapat pada struk token stroom. Apabila proses pengisian berhasil maka sisa pulsa kWh-meter yang masih ada sebelumnya akan segera ditambahkan dengan jumlah pulsa kWh yang baru saja diisikan. Dengan menggunakan kWh meter prabayar penggunaan listrik jadi lebih bisa terkontrol karena jumlah kWh tersisa akan langsung ditampilkan. Menurut Pasurono (2013) konsumen listrik prabayar dapat langsung mengetahui presentase rata-rata penggunaan beban dengan 5 *sample* pelanggan dengan rumus berikut

$$\% \text{Presentase beban tiap pelanggan} = \frac{S_{\text{pelanggan}}}{S_{\text{daya kontrak}}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$\% \text{Presentase rata-rata beban} = \frac{\% \text{pel1} + \% \text{pel2} + \% \text{pel3} + \% \text{pel4} + \% \text{pel5}}{5} \quad (2.2)$$

Keterangan :

$S_{\text{Pelanggan}}$: Daya listrik yang digunakan pelanggan (VA)

$S_{\text{daya kontrak}}$: Daya kontrak listrik pelanggan (VA)

$\% \text{pel}$: Presentase beban tiap pelanggan (%)

Hasil susut daya total dari rugi-rugi daya arus netral, arus yang mengalir menuju pembumian dan penghantar fasa dapat dihitung *Losses* dalam waktu WBP (4 jam/hari) dan LWBP (20 jam/hari) sesuai aturan PLN dengan rumusan berikut.

$$W = P \times t \quad (2.3)$$

$$\text{Kerugian tiap bulan} = W_{\text{loss}} \times 30 \times \text{harga produksi listrik} \quad (2.4)$$

Menurut detik finance pada artikelnya tanggal 28 maret 2017 harga produksi listrik PLN adalah Rp.983/kWh.

Keterangan :

W : Energi listrik (kWh)

W_{loss} : Energi yang hilang saat WBP dan LWBP (kWh/hari)

P : Rugi-rugi daya (Watt)

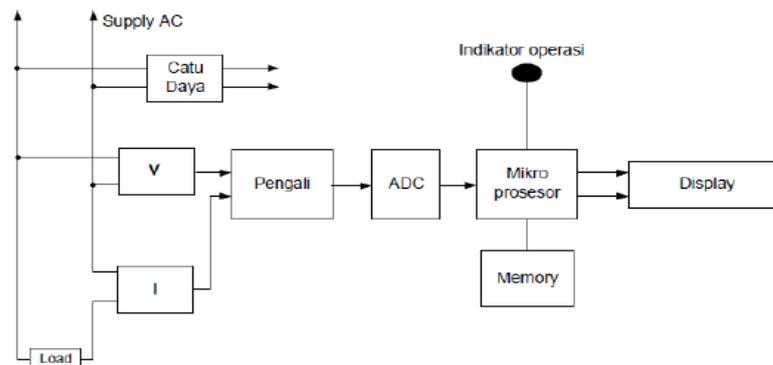
t : Waktu (jam)

kWh meter *digital* (prabayar) mempunyai fungsi lain diantaranya adalah pelanggan dapat mengetahui nilai Arus, tegangan, dan daya sesaat yang dipakai, kWh meter *digital* (prabayar) dilengkapi *alarm* sebagai pengingat untuk segera mengisi token listrik. Bagian- bagian pada kWh meter *digital* (prabayar) dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 KWh meter *digital* (prabayar)

Sumber : izaal.files.wordpress.com



Gambar 2.13 Diagram blok kWh-meter digital PLN

Sumber : Pasurono, Perancangan KWh Meter Digital Menggunakan KWh Meter Konvensional

Keluaran dari sensor tegangan dan sensor arus akan diintegrasikan oleh komponen pengali (multiplier). Sebelum masuk ADC, keluaran dari rangkaian pengali akan disearahkan oleh rangkaian penyearah. Sebuah Analog to Digital Converter (ADC) berfungsi untuk mengubah sinyal kontinu (analog) menjadi keluaran diskrit/digital. Komponen memori berfungsi untuk menyimpan informasi digital berupa bilangan-bilangan biner, sedangkan indikator operasi akan memberikan sinyal kasat mata, yang menunjukkan bahwa alat ukur sedang beroperasi. *Output* dari rangkaian ADC akan diproses oleh mikroprosesor dan hasil akhir dari seluruh proses kWh-meter elektronik yaitu berupa energi listrik yang sedang dipakai dan informasi sisa pulsa kWh akan ditampilkan pada *display* (Pasurono,2013).

2.5 Tegangan Distribusi

Tegangan untuk jaringan distribusi dapat dibagi menjadi beberapa jenis, antara lain :

2.5.1 Tegangan Menengah (TM)

Tegangan menengah adalah tegangan dengan rentang nilai 1 kV sampai dengan 30 kV. Untuk di Indonesia menggunakan tegangan menengah sebesar 20 kV. Tegangan menengah dipakai untuk penyaluran tenaga listrik dari GI menuju gardu gardu distribusi atau langsung menuju pelanggan tegangan menengah.

2.5.2 Tegangan Rendah (TR)

Tegangan rendah adalah tegangan dengan nilai dibawah 1 kV yang digunakan untuk penyaluran daya dari gardu gardu distribusi menuju pelanggan tegangan rendah. Penyalurannya dilakukan dengan menggunakan sistem tiga fasa empat kawat yang dilengkapi netral. Di Indonesia menggunakan tegangan rendah 380/220 V. Dengan 380 V merupakan besar tegangan antar fasa dan tegangan 220 V merupakan tegangan fasa-netral.

2.5.3 Tegangan Pelayanan

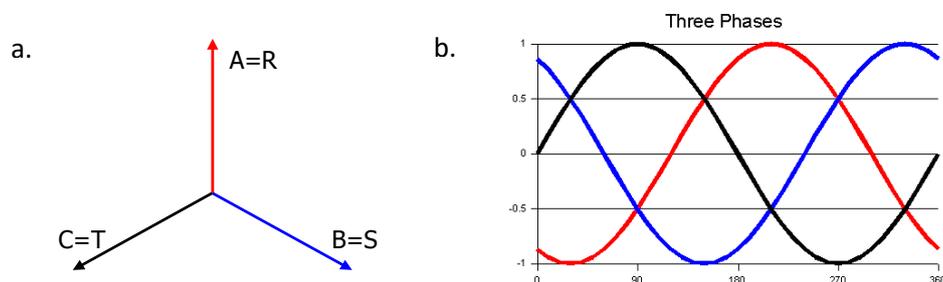
Tegangan pelayanan merupakan ketetapan dari penyedia tenaga listrik untuk pelanggan pelanggannya. Di Indonesia besarnya tegangan pelayanan pada umumnya antara lain :

- a. 20 kV tiga fasa tiga kawat
- b. 12 kV tiga fasa tiga kawat
- c. 6 kV tiga fasa tiga kawat
- d. 400/380/220 V tiga fasa empat kawat
- a. 220 V satu fasa dua kawat

Selama beberapa tahun terakhir ini sistem distribusi mengarah kepada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi. Dengan tegangan sistem distribusi yang lebih tinggi, maka sistem dapat membawa daya lebih besar dengan nilai arus yang sama. Arus yang lebih kecil berarti jatuh tegangan yang lebih kecil, rugi rugi yang lebih sedikit dan kapasitas membawa daya yang lebih besar (Ramadhianto, 2008).

2.6 Sistem Tiga Fasa

Sistem 3 fasa adalah metode umum yang dipakai untuk menyalurkan tenaga listrik yang merupakan salah satu tipe dari sistem polifasa (fasa Banyak). Pada sistem 3 fasa bisa menggunakan kawat netral maupun tanpa kawat netral atau lebih dikenal dengan istilah 3 fasa 4 kawat untuk yang menggunakan kawat netral dan 3 fasa 3 kawat yang tanpa kawat netral.



Gambar 2.14 Sistem 3 Fasa Umum dengan Urutan ABC

Sumber : Tim CoP Distribusi, Penyeimbangan beban gardu distribusi dengan metode *all reconnecting* dan satu titik waktu

Pada gambar diatas tampak bahwa terdapat perbedaan sudut sebesar $2/3$ radians atau sebesar 120° antar phasanya. Secara mendasar persamaan sudut untuk gelombang seperti yang tampak pada gambar 2.14-(b) adalah sebagai berikut :

$$\text{Misal : besar sudut adalah } = x \quad (2.5)$$

$$\text{Maka } x = 2 \times \text{ft}$$

$$\text{Dimana } f \text{ adalah frekuensi dan } t \text{ adalah waktu} \quad (2.6)$$

Apabila kita memasukkan persamaan (2) ke dalam persamaan tegangan maka akan dihasilkan rumus dasar untuk tegangan perphasa adalah sebagai berikut :

$$V_{L1} = A \sin x \quad (2.7)$$

$$V_{L2} = A \sin \left(x - \frac{2}{3} \pi \right) \quad (2.8)$$

$$V_{L3} = A \sin \left(x - \frac{4}{3} \pi \right) \quad (2.9)$$

Dimana nilai A adalah amplitudo atau tegangan tertinggi pada Phasa 1, 2 dan 3.

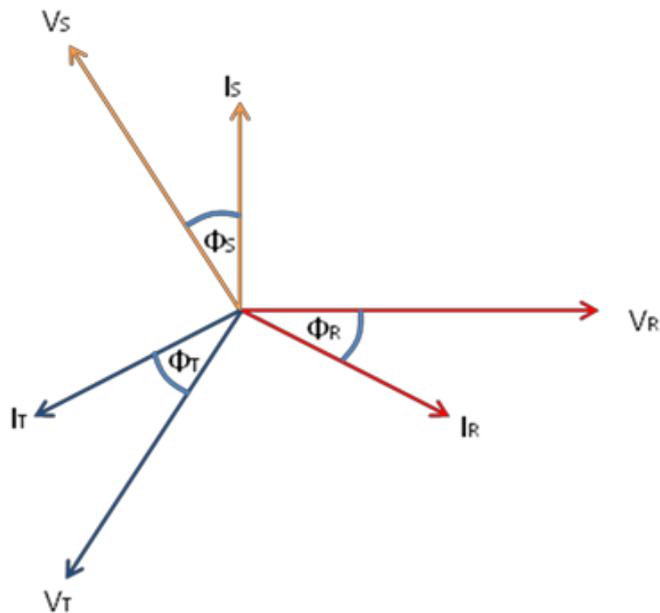
2.6.1 Ketidakseimbangan Beban pada Sistem Distribusi Tegangan Rendah

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan di mana :

- a. Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Menurut Tim cop distribusi (2009) untuk beban seimbang maka arus netral dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (2.10)$$



Gambar 2.15 Diagram Phasor Sistem Tiga Fasa Beban Seimbang

Sumber : Tim CoP Distribusi, Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi dengan Metode *All reconnecting* dan satu titik waktu

Gambar 2.15 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N).

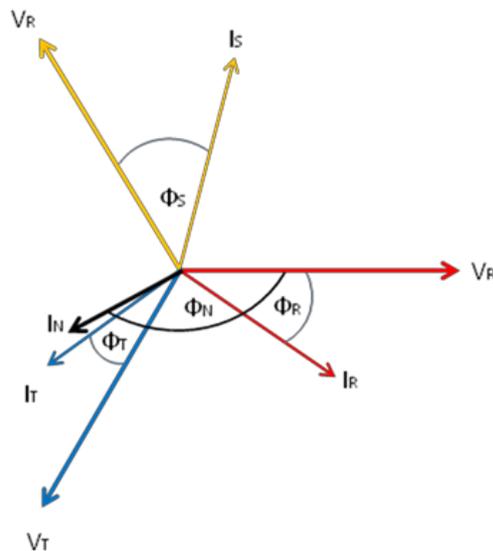
Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu:

- a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Menurut Tim cop distribusi (2009) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I_N + I_R + I_S + I_T = 0 \quad (2.11)$$

$$-I_N = I_R + I_S + I_T \quad (2.12)$$



Gambar 2.16 Diagram Phasor Sistem 3 Fasa Beban Tidak Seimbang

Sumber : Tim CoP Distribusi, Penyeimbangan Beban Gardu distribusi dengan Metode *All Reconnecting* dan satu titik waktu

Pada Gambar 2.16 menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya (Setiadji, 2006).

Menurut Tim cop distribusi (2009) karena pada beban tidak seimbang akan muncul arus netral maka persamaan untuk vector diatas adalah :

$$I_N = I_R + I_S + I_T \neq 0 \quad (2.13)$$

Nilai arus netral adalah hasil penjumlahan vektor dari ketiga arus phase dalam komponen simetris. Arus netral akan bernilai nol saat beban ketiga phase dalam keadaan seimbang. Sedangkan pada saat kondisi beban tidak

seimbang, arus netral akan mengalir yang nilainya dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$I_N = I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos (\theta-120^\circ) + j \sin(\theta-120^\circ)) + I_T (\cos (\theta+120^\circ) + j \sin(\theta+120^\circ)) \quad (2.14)$$

2.6.2 Arus Beban Penuh Transformator

Arus beban penuh transformator adalah kemampuan transformator untuk menghantarkan arus baik pada sisi primer dan sekundernya, besarnya arus beban penuh transformator tergantung dari kapasitas transformator tersebut.

Menurut Susongko, (2016) daya transformator apabila ditinjau dari sisi tegangan tinggi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$S = V.I \quad (2.15)$$

Keterangan :

S adalah daya transformator (kVA)

V adalah tegangan sisi primer trafo (kV)

I adalah arus jala-jala (A)

Sehingga menurut Rohit Mehta (2001) dan Susongko (2016) tegangan antara fasa dan netral disebut tegangan 1 fasa (V_{ph}) sementara tegangan antara 2 fasa disebut tegangan antar fasa/ 3 fasa (V_L) untuk menghitung arus beban penuh transformator (*full load*) dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} S &= 3 \times V_{ph} \times I_{ph} \\ V_{ph} &= V_L / \sqrt{3} ; I_{ph} = I_L \\ S &= 3 \times \frac{V_L}{\sqrt{3}} \times I_L \\ S &= \sqrt{3} \times V_L \times I_L \\ I_{FL} &= \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Keterangan :

I_{FL} adalah arus beban penuh (A)

S adalah daya trafo (kVA)

V adalah tegangan sisi sekunder trafo (kV)

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.17)$$

Keterangan :

$I_{rata-rata}$ adalah arus ketiga fasa (A)

I_R adalah arus fasa R (A)

I_S adalah arus fasa S (A)

I_T adalah arus fasa T (A)

2.6.3 Persentase Pembebanan Setiap Phase

Persentase pembebanan transformator sangat berhubungan dengan besarnya nilai pembebanan transformator, didaerah pedesaan pembebanan transformator relatif kecil.

Setelah diketahui nilai arus beban penuh transformator, maka dapat dicari presentase pembebanan transformator pada masing-masing phase :

$$\begin{aligned} \% r &= \frac{I_R}{I_{fl}} \times 100\% \\ \% s &= \frac{I_S}{I_{fl}} \times 100\% \\ \% t &= \frac{I_T}{I_{fl}} \times 100\% \end{aligned} \quad (2.18)$$

Selanjutnya dapat dicari presentase rata-rata pembebanan transformator dengan menggunakan persamaan :

$$\% x = \frac{\% r + \% s + \% t}{3} \quad (2.19)$$

Dengan :

% r = presentase pembebanan phase R (%)

% s = presentase pembebanan phase S (%)

% t = presentase pembebanan phase T (%)

% x = presentase pembebanan rata-rata transformator (%)

I_r = arus phase R (A)

I_s = arus phase S (A)

I_t = arus phase T (A)

I_{fl} = Arus beban penuh (A)

2.6.4 Persentase Ketidakseimbangan Beban

Pemakaian beban pada tiap fasa yang tidak seimbang sangat mempengaruhi persentase tingkat ketidakseimbangan beban ketidakserempakan pemakaian daya listrik tiap fasa adalah salah satu sebab mengapa ketidakseimbangan beban terjadi.

Pada penyaluran daya dengan keadaan tidak seimbang, besarnya arus tiap fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b, dan c sebagai berikut.

$$[IR] = a [I]$$

$$[IS] = a [I]$$

$$[IT] = a [I]$$

Arus IR , IS , dan IT berturut-turut adalah arus difasa R , S , dan T .

Menurut Susongko, (2016) koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang sama dengan besarnya arus rata-rata (I_{rata}) dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$I_R = a. I_{rata-rata} \text{ maka : } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (2.20)$$

$$I_S = b. I_{rata-rata} \text{ maka : } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (2.21)$$

$$I_T = c. I_{rata-rata} \text{ maka : } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (2.22)$$

Sebuah transformator dalam keadaan seimbang, jika nilai koefisiensi a, b, dan c =1. Jadi rata-rata ketidakseimbangan beban (%k) adalah :

$$\%k = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\% \quad (2.23)$$

2.6.5 Losses (susut) Energi pada Sistem Tiga Phasa Beban Tidak Seimbang

Menurut Tim cop distribusi (2009) Dengan munculnya arus pada kawat netral maka akan mengakibatkan susut energi yang terbuang di sepanjang penghantar pembumian (earthing road) dan tahanan antara penghantar pembumian dan bumi. Besarnya energi yang terbuang merupakan perkalian antara besarnya arus yang mengalir dengan tegangan antara penghantar pembumian dan tanah referensi serta faktor beban ;

$$P = E \times I \times t \times \text{Cos}\Phi \text{ (wh)} \quad (2.24)$$

Keterangan :

E = Beda potensial antara penghantar pembumian dengan tanah referensi (Volt)

I = Besarnya Arus yang mengalir (Amp)

t = waktu (jam)

CosΦ = Faktor beban pada penghantar pembumian

Maka

$$P = I^2 \times R \times t \times \text{Cos}\Phi \text{ (wh)} \quad (2.25)$$

2.6.6 Rugi-rugi Daya pada Jaringan Distribusi Tegangan Rendah

Menurut Susongko, (2016) rugi-rugi daya merupakan besarnya daya yang hilang pada suatu jaringan. Besarnya rugi-rugi daya satu fasa dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\Delta P = I^2 R \quad (2.26)$$

Keterangan :

ΔP adalah rugi-rugi daya pada jaringan (W)

I adalah arus beban pada jaringan (A)

R adalah tahanan murni (Ω)

Besarnya rugi-rugi daya tiga fasa dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\Delta P = 3 I^2 R \quad (2.27)$$

Akibat pembebanan di tiap – tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad (2.28)$$

Dengan :

P_N = rugi – rugi yang timbul pada penghantar netral (watt)

I_N = arus yang mengalir melalui kawat netral (A)

R_N = tahanan pada kawat netral (Ω)

Rugi – rugi ini terjadi karena adanya arus netral yang mengalir ke tanah. Besarnya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \times R_G \quad (2.29)$$

Dengan :

P_G = rugi – rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G = arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G = tahanan pembumian netral trafo (Ω)

Jika suatu arus mengalir pada suatu penghantar, maka pada penghantar tersebut akan terjadi rugi-rugi energi menjadi panas karena pada penghantar tersebut terdapat resistansi. Rugi-rugi dengan beban terpusat di ujung dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I (R \times \cos \varphi + X \times \sin \varphi) \cdot l \quad (2.30)$$

$$\Delta P_{3\varphi} = 3 \times I^2 \times R \times l \quad (2.31)$$

Dengan :

I = arus per fasa (A)

R = tahanan pada penghantar (Ω / km)

X = reaktansi pada penghantar (Ω / km)

$\cos \varphi$ = faktor daya beban

l = panjang penghantar (km)

Setiap fasa pada transformator distribusi 3 phase memiliki nilai pembebanan yang berbeda sehingga rugi-rugi daya yang dihasilkan akan berbeda. Besar rugi-rugi daya setiap fasa antara R, S, dan T dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{R \text{ Sal}} = I_R^2 \times R_R$$

$$P_{S \text{ Sal}} = I_S^2 \times R_S \quad (2.32)$$

$$P_{T \text{ Sal}} = I_T^2 \times R_T$$

Dengan :

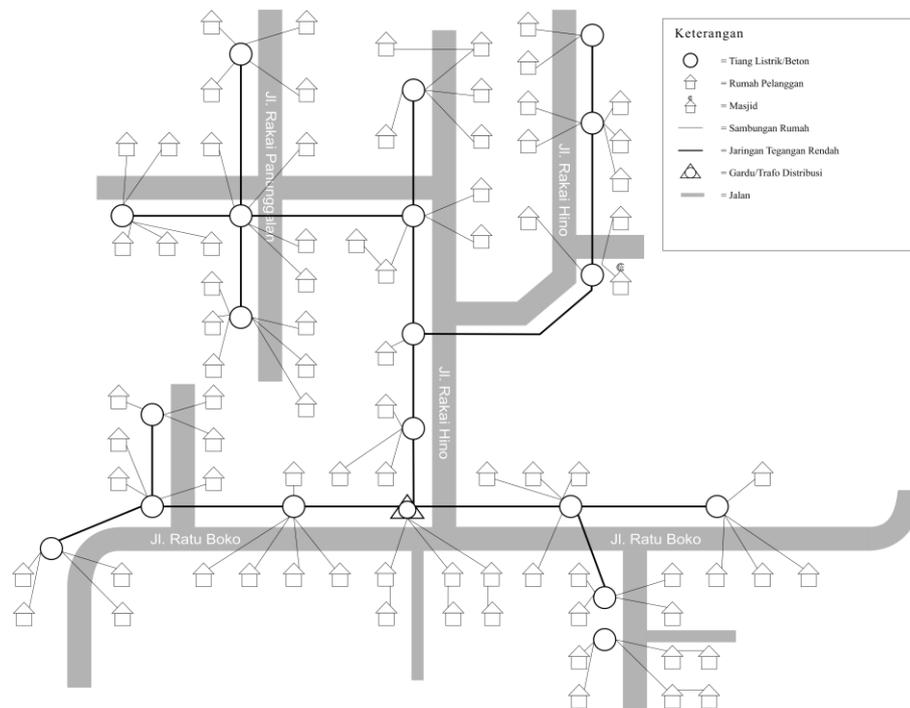
P = rugi – rugi daya setiap fasa (watt)

I = arus yang mengalir pada penghantar fasa (Ω / km)

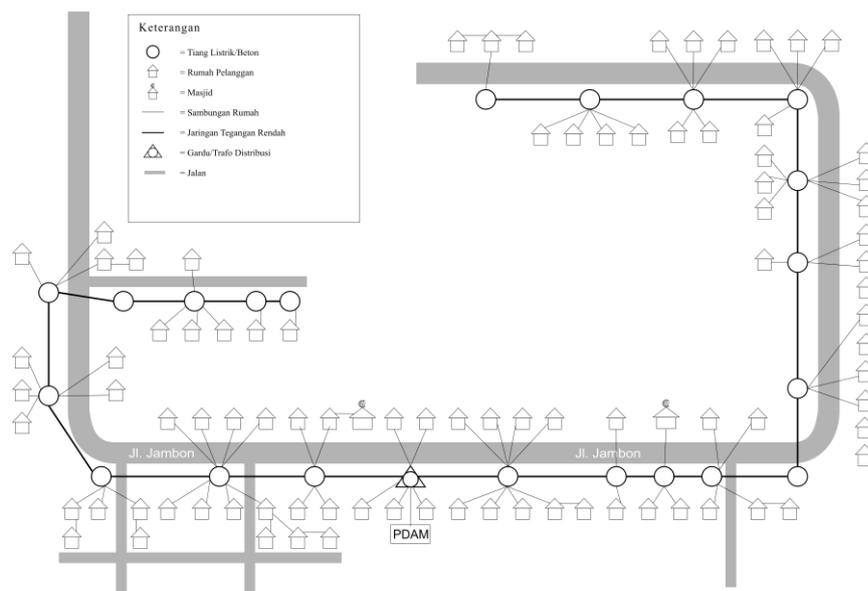
R = tahanan penghantar fasa (Ω / km)

2.6.7 Rencana denah perhitungan arus netral.

Berdasarkan *asset management* PT. PLN (Persero) Area Yogyakarta, berikut adalah gambar yang menunjukkan tentang peta pelanggan di gardu distribusi 1503115 dan peta pelanggan di gardu distribusi 1411671019.



Gambar 2.17 Peta pelanggan di gardu distribusi 1503115 Gunung Sempu



Gambar 2.18 Peta pelanggan di gardu distribusi 1411671019 Baturan