

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Analisis Pengurangan Non Teknikal Menggunakan Pembacaan Meter Otomatis (AMR) Pada Pelanggan Potensial. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan sumber pengurangan non-teknikal, seperti kehilangan energi, kesalahan dalam pembacaan meter, atau kemungkinan penyalahgunaan. Dengan memanfaatkan informasi dari sistem AMR, penelitian ini mengungkapkan bahwa sistem ini ampuh dalam mendeteksi anomali pada penggunaan energi, mengurangi kesalahan dari faktor manusia, serta mengurangi kerugian non-teknikal. Temuan dari penelitian ini memberikan saran untuk memperbaiki pengawasan dan pengoptimalan AMR dalam rangka menekan tingkat kehilangan energi di kalangan pelanggan potensi.

Studi Kasus Kinerja AMR (Pembacaan Meter Otomatis) Pada Pelanggan Potensial Dengan Daya 41.5 KVA – 200 KVA Di Situbondo. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai seberapa efektif AMR dalam meningkatkan ketepatan pembacaan meteran, mengurangi kemungkinan kesalahan manusia, dan meminimalisir kerugian baik yang teknis maupun non- teknis. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan AMR dapat meningkatkan efisiensi pemantauan penggunaan energi, mengurangi perbedaan dalam pembacaan, serta mendukung proses penagihan yang lebih akurat. Namun demikian, ada beberapa tantangan teknis dan non- teknis yang harus diperbaiki untuk optimalisasi sistem. Penelitian ini menyajikan saran perbaikan yang dapat meningkatkan kinerja AMR di masa depan.

Analisa Penurunan Susut Non Teknis Dengan AMR PLN (Studi Kasus PT. Tjokro Bersaudara Bontang Kaltim”. Kajian ini mengevaluasi seberapa efektif sistem Pembacaan Meter Otomatis (AMR) dalam menekan susut non-teknis di PT. Tjokro Bersaudara yang terletak di Bontang, Kalimantan Timur, melalui pendekatan studi kasus yang menganalisis data penggunaan energi sebelum dan sesudah penerapan AMR. Temuan dari riset ini menunjukkan bahwa AMR berhasil secara luas mengurangi susut non-teknis dengan cara melakukan pembacaan meter yang tepat dan langsung, menghilangkan kesalahan yang disebabkan oleh manusia, serta mengidentifikasi

ketidakwajaran dalam konsumsi, sehingga memberikan saran untuk penerapan AMR yang lebih menyeluruh demi meningkatkan efisiensi dan menekan kerugian energi di sektor industri.

A Review Paper on Automatic Meter Reading and Instant Billing, Jurnal ini membahas tinjauan (review) berbagai teknologi dan metodologi yang digunakan dalam sistem Automatic Meter Reading (AMR) atau pembacaan meter listrik otomatis serta instant billing. Artikel ini mengulas perkembangan dari meter konvensional menuju sistem berbasis komunikasi seperti PLC, GSM/GPRS, Wireless Sensor Network (WSN), dan smart meter, serta membandingkan kelebihan dan kekurangannya dalam meningkatkan akurasi, efisiensi, dan kecepatan proses pencatatan serta penagihan listrik. Fokus utama jurnal adalah implementasi sistem AMR berbasis GSM/GPRS yang terintegrasi dengan web portal menggunakan framework .NET untuk memungkinkan pengiriman data konsumsi listrik secara real-time, pembuatan tagihan otomatis, pengurangan kesalahan manusia, serta peningkatan transparansi dan kemudahan akses bagi pelanggan dan penyedia listrik.

Designing Automatic Meter Reading System Using Open Source Hardware and Software. Jurnal ini membahas perancangan dan implementasi sistem Automatic Meter Reading (AMR) menggunakan perangkat keras dan perangkat lunak open source, seperti Arduino, sensor arus dan tegangan, modul jaringan, serta aplikasi berbasis Java dan Linux. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan komunikasi Wi-Fi untuk mengirimkan data pengukuran tegangan, arus, dan daya listrik secara real-time ke server, di mana data disimpan dan dapat dipantau melalui browser. Penelitian ini bertujuan menghasilkan solusi AMR berbiaya rendah namun tetap memenuhi standar kinerja smart meter komersial, dengan hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja dengan akurasi yang cukup baik dan performa yang mendekati sistem modern, sehingga layak digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, laboratorium, maupun institusi pendidikan.

2.2 Tinjauan Pustaka

2.2.1 Sistem Distribusi Energi Listrik

Sistem distribusi energi listrik merupakan komponen dari jaringan tenaga yang dimulai dari PMT masuk yang terletak di substation hingga batas yang dipasang oleh

pelanggan (APP), bertujuan untuk menyalurkan listrik dari substation sebagai titik pusat beban pengguna melalui gardu distribusi dengan memenuhi standar kualitas yang sesuai dengan ketentuan operasional yang berlaku. Saat ini, sistem distribusi energi listrik dapat dibedakan menjadi dua tipe, yaitu jaringan distribusi primer yang sering disebut sebagai jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan jaringan distribusi sekunder yang dikenal sebagai Sistem Jaringan Tegangan Rendah (LVNS).

a. Jaringan Distribusi Primer

Sistem distribusi primer berfungsi sebagai penghubung krusial dalam struktur kelistrikan, yang mengalirkan energi dari Gardu Induk (GI) ke gardu distribusi sebelum disalurkan ke pengguna. Konfigurasi jaringan ini dibuat dengan format tiga fasa untuk meningkatkan efisiensi pengiriman daya, dengan menggunakan tiga atau empat kabel sebagai media penghantaran. Tegangan operasional berada pada level menengah, umumnya antara 6 kV, 12 kV, atau 20 kV, sesuai dengan kapasitas dan jarak distribusi yang dibutuhkan. Desain ini memberikan jaminan stabilitas dan keandalan dalam pendistribusian listrik sebelum menurunkan ke kadar rendah untuk pemakaian akhir.

Jenis - Jenis Penghantar Pada Sistem Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi SUTM 20 KV pada umumnya menggunakan jenis kawat yaitu saluran yang konduktornya tidak dilapisi isolasi sebagai pelindung luar (telanjang). Tipe demikian dipergunakan pada pasangan luar yang diharapkan terbebas dari sentuhan misalnya untuk jenis kabel yaitu saluran yang konduktornya dilindungi (dibungkus) lapisan isolasi.

Bahan konduktor yang paling populer digunakan adalah tembaga (*copper*) dan aluminium. Tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya ialah untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium, dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*aluminium alloy*). Berbagai macam jenis penghantar aluminium yang ada yaitu sebagai berikut:

1. AAC "*all-aluminium conductors*", seluruhnya terbuat dari aluminium.

2. AAAC "*all-aluminium-alloy conductors*", seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
3. ACSR "*Aluminium conductor, steel-reinforced*", penghantar aluminium yang diperkuat dengan baja.
4. ACAR "*aluminium conductor, alloy-reinforced*", penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran

b. Jaringan Distribusi Sekunder

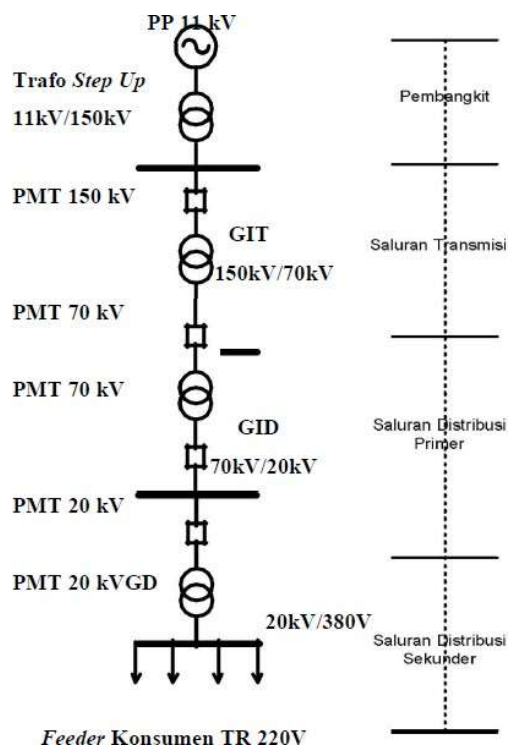
Sistem distribusi sekunder adalah tahap akhir dari jaringan tenaga listrik yang bertugas mengedarkan listrik secara langsung kepada pengguna. Jaringan ini dimulai dari sisi sekunder transformator distribusi, yang mereduksi tegangan menengah dari jaringan primer jadi tegangan rendah, lalu melanjutkan distribusi tersebut melalui kabel atau saluran udara sampai ke sambungan rumah pelanggan. Tugas utamanya adalah memastikan pengiriman listrik yang aman dan efisien kepada berbagai kelompok konsumen, termasuk rumah tangga, usaha kecil, hingga fasilitas komersial ringan. Sistem ini beroperasi pada tingkat tegangan rendah standar, yaitu 380V untuk jaringan tiga fase dan 220V untuk satu fase, yang merupakan level aman bagi penggunaan perangkat elektronik sehari-hari. Desain jaringan distribusi sekunder perlu memperhitungkan aspek keandalan, keselamatan, dan efisiensi guna menjamin kualitas daya yang optimal hingga ke tangan konsumen.

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk menggunakan transformator *step-up* menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula.

Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 Kv menggunakan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi yang kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi menurunkan tegangannya menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220V/380V. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen.

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh digunakan tegangan setinggi mungkin dengan menggunakan trafo *step-up*. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapan-perlengkapannya, selain itu menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Oleh karena itu, pada daerah-daerah pusat beban, tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo *step-down*.

Dalam hal ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Keterangan :

TR = Tegangan Rendah

GIT = Gardu Induk Transmisi

GD = Gardu Distribusi

PP = Power Plan

GID = Gardu Induk Distribusi

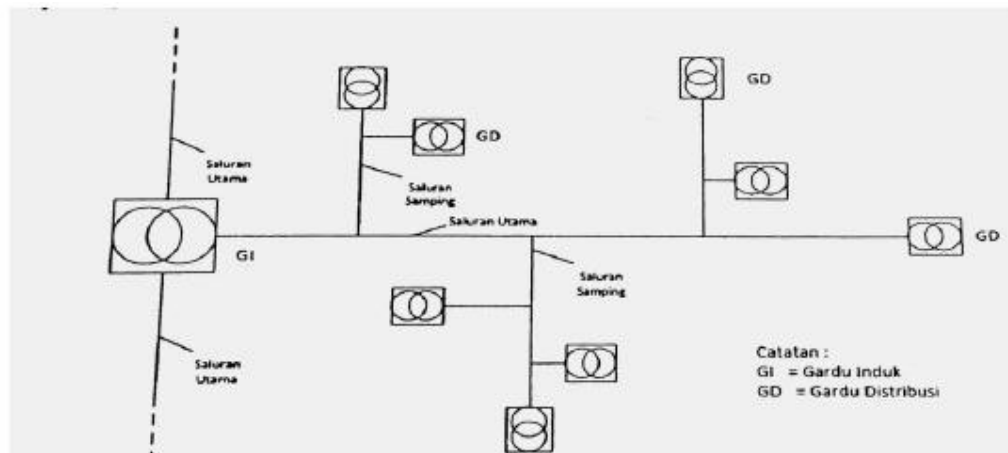
Baik atau tidaknya sesuatu sistem distribusi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah regulasi tegangan, kontinuitas penyaluran, efisiensi, dan harga sistem. Oleh karena itu, suatu sistem distribusi harus memiliki regulasi tegangan yang tidak terlalu besar, gangguan pada pelayanan yang tidak terlalu lama, serta biaya sistem yang tidak terlalu mahal.

c. Konfigurasi Sistem Distribusi

Secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep

1. Jaringan radial

Yaitu jaringan yang hanya mempunyai satu pasokan tenaga listrik, jika terjadi gangguan akan terjadi "*black-out*" atau padam pada bagian yang tidak dapat dipasok.

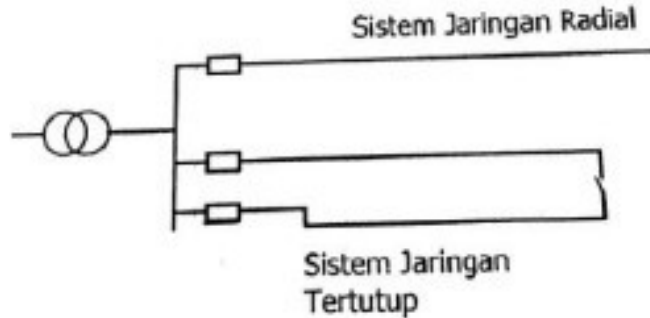


Gambar 2. 2 Pola Jaringan Radial

2. Jaringan bentuk tertutup

Yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi

gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (*black-out*) dapat dikurangi atau bahkan dihindari

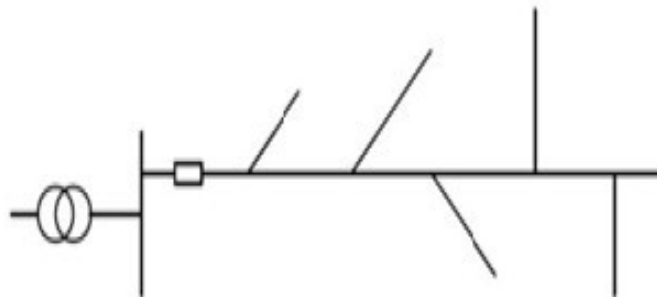


Gambar 2. 3 Pola Jaringan Distribusi Dasar

Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat konfigurasi-konfigurasi jaringan sesuai dengan maksud perencanaannya sebagai berikut :

a) Konfigurasi Tulang Ikan (*FishBone*)

Konfigurasi *Fishbone* ini adalah tipikal konfigurasi dari Saluran Udara Tegangan Menengah beroperasi radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah [*Pole Top Switch* (PTS), *Air Break Switch* (ABSW)] dengan koordinasi relai atau dengan *system SCADA*. Pemutus balik otomatis PBO (*Automatic Recloser*) dipasang pada saluran utama dan saklar seksi otomatis SSO (*Automatic Sectionalizer*) pada pencabangan.

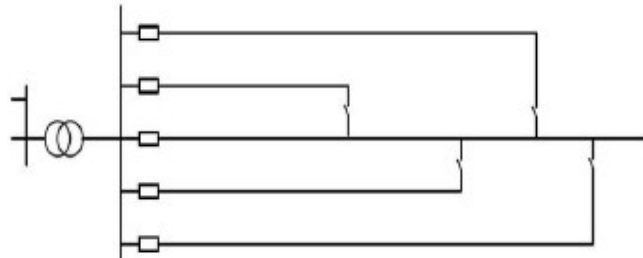


Gambar 2. 4 Konfigurasi Tulang Ikan (fishbone)

b) Konfigurasi Kluster (*Cluster / Leap Frog*)

Konfigurasi Saluran Udara Tegangan Menengah yang sudah bertipikal sistem

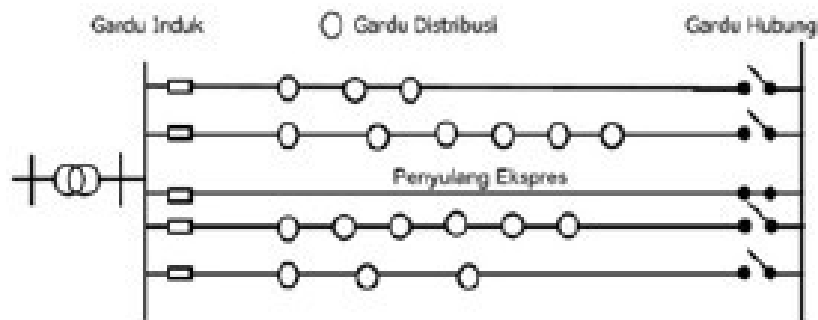
tertutup, namun beroperasi radial (*Radial Open Loop*). Saluran bagian tengah merupakan penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar besar.



Gambar 2. 5 Konfigurasi Kluster (leap frog)

c) Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)

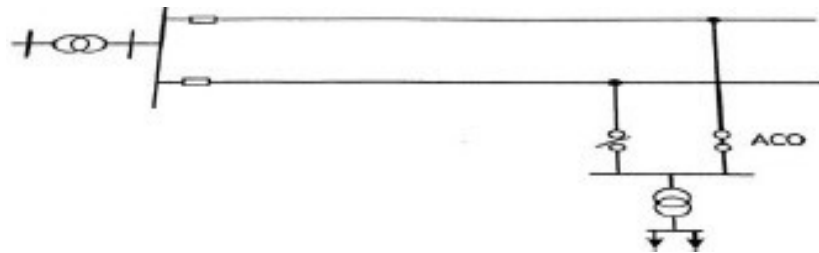
Konfigurasi spindel umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal 2 jenis penyulang yaitu penyulang cadangan (*standby* atau *express feeder*) dan penyulang operasi (*working feeder*). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai *backup* suplai jika terjadi gangguan pada penyulang operasi. Untuk konfigurasi 2 penyulang, maka faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsep spindel jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (*Normally Close*).



Gambar 2. 6 Konfigurasi Spindel (spindle configuration)

d) Konfigurasi *Fork*

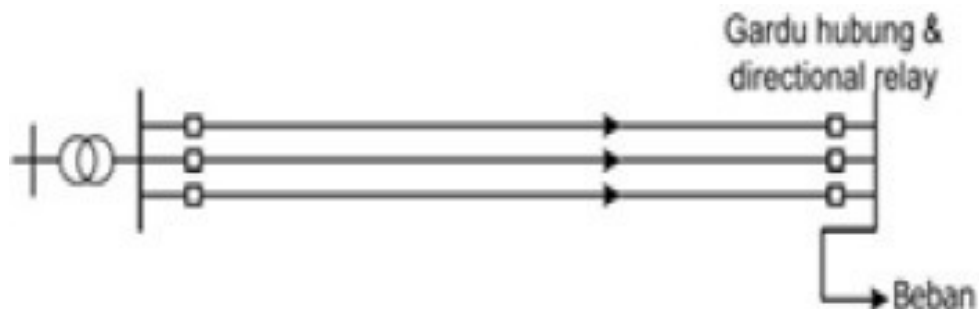
Konfigurasi ini memungkinkan 1 (satu) Gardu Distribusi dipasok dari 2 penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman sangat singkat (Short Break operasi mengalami gangguan, dapat dipasok dari Time) Jika penyulang waktu sangat singkat dengan penyulang cadangan secara efektif dalam menggunakan fasilitas Automatic Change Over Switch (ACOS), Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan Tee-Off (TO) dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi.



Gambar 2. 7 Konfigurasi fork

e) **Konfigurasi *Spot load* (*Parallel Spot Configuration*)**

Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan kontinuitas penyaluran. Sistem harus dilengkapi dengan rele arah (*Directional Relay*) pada Gardu Hilir (Gardu Hubung).

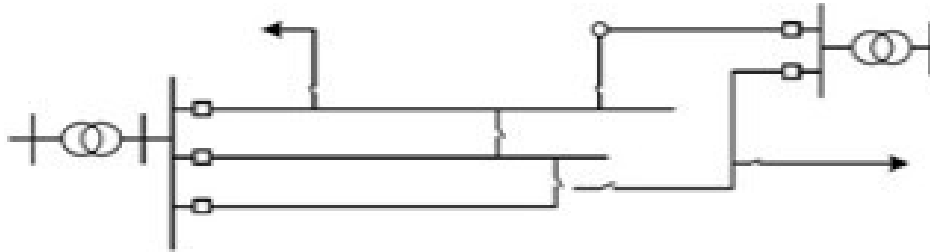


Gambar 2. 8 Konfigurasi Spotload (parallel spot configuration)

f) Konfigurasi Jala-Jala (Grid, Mesh)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke

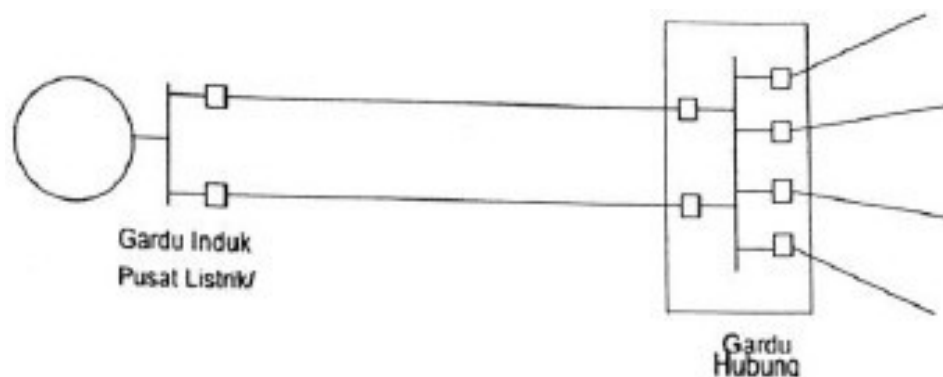
titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan-pelanggan pemakaian khusus.



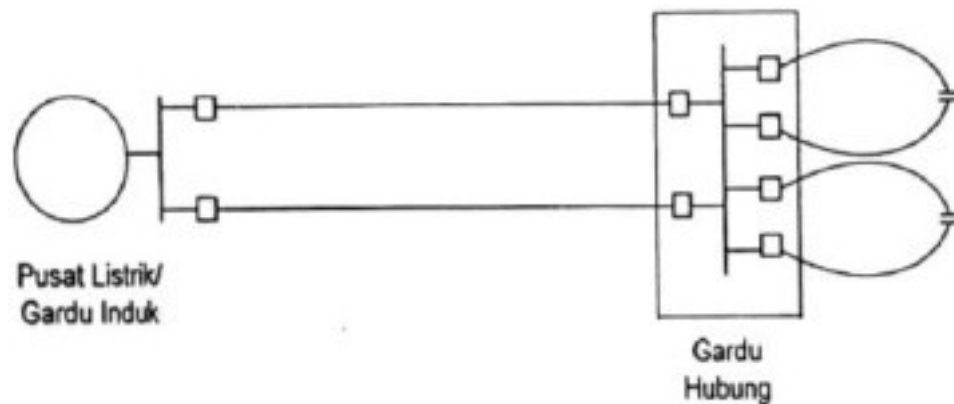
Gambar 2. 9 Konfigurasi Jala - jala (grid, mesh)

g) Konfigurasi lain-lain

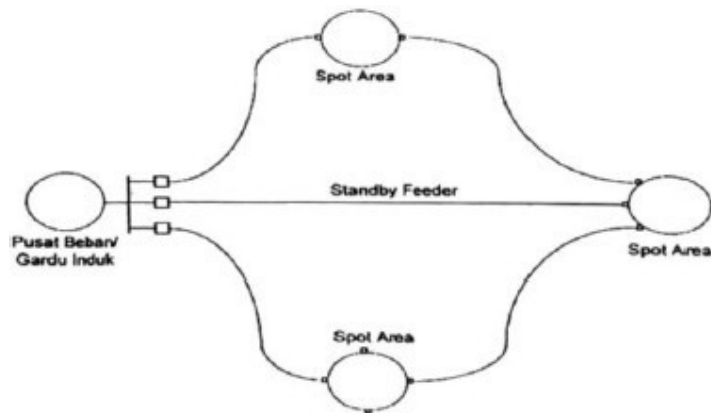
Selain dari model konfigurasi jaringan yang umum dikenal sebagaimana diatas, terdapat beberapa model struktur jaringan yang dapat dipergunakan sebagai alternatif model model struktur jaringan. Struktur Garpu dan Bunga dipakai jika pusat beban berada jauh dari pusat listrik/Gardu Induk. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) berfungsi sebagai pemasok, Gardu Hubung sebagai Gardu Pembagi, Pemutus Tenaga sebagai pengaman dengan rele proteksi gangguan fasa-fasa dan fasa-tanah pada JTM yang berawal dari Gardu Hubung.



Gambar 2. 10 Konfigurasi Struktur Garpu



Gambar 2. 11 Konfigurasi Struktur Bunga



Gambar 2. 12 Konfigurasi Struktur Rantai

Struktur rantai pada gambar 2.12 dipakai pada suatu kawasan yang luas dengan pusat-pusat beban yang berjauhan satu sama lain.

2.2.2 Klasifikasi Beban Listrik

Secara umum beban yang dilayani oleh sistem distribusi tenaga listrik dibagi menjadi beberapa sektor, yaitu : sektor perumahan, sektor industri, sektor komersial dan sektor usaha. Masing-masing sektor beban tersebut mempunyai karakteristik karakteristik beban yang berbeda, sebab hal ini berkaitan dengan pola konsumsi energi pada masingmasing konsumen di sektor tersebut. Karakteristik beban yang banyak disebut dengan pola pembebanan pada sektor perumahan ditunjukkan oleh adanya fluktuasi

konsumsi energi elektrik yang sangat besar. Hal ini disebabkan konsumsi energi elektrik tersebut lebih dominan di malam hari. Sedangkan pada sektor industri, fluktuasi konsumsi energi sepanjang hari akan hampir sama, sehingga perbandingan beban puncak dengan beban rata-rata hampir mendekati satu. Beban pada sektor komersial dan usaha mempunyai karakteristik yang hampir sama, hanya pada sektor komersial akan mempunyai beban puncak yang lebih tinggi pada waktu malam hari.

Berdasarkan jenis konsumsi energi listrik, secara garis besar, beban listrik dapat diklasifikasikan ke dalam :

a. Beban Rumah Tangga

Beban listrik rumah tangga pada umumnya berupa lampu untuk penerangan, alat-alat rumah tangga, seperti : kipas angin, pemanas air, lemari es, dan lain-lain.

b. Beban Komersial

Beban komersial (bisnis) pada umumnya terdiri atas penerangan untuk reklame, kipas angin, penyejuk udara, dan alat-alat listrik lainnya yang diperlukan untuk restoran, hotel dan juga perkantoran. Beban ini secara drastis naik di siang hari untuk beban perkantoran dan pertokoan, dan akan menurun di sore hari.

c. Beban Industri

Beban Industri dibedakan dalam skala kecil dan skala besar, untuk skala kecil banyak beroperasi pada siang hari sedangkan industri skala besar sekarang ini banyak yang beroperasi sampai dengan 24 jam.

d. Beban Fasilitas Umum

Pengklasifikasian beban ini sangat penting, artinya bila kita akan melakukan analisa karakteristik beban untuk suatu sistem yang sangat besar. Perbedaan yang paling prinsip dari empat jenis beban diatas, selain dari daya yang digunakan dan juga waktu pembebanannya. Pemakaian daya pada beban rumah tangga akan lebih dominan pada pagi dan malam hari, sedangkan pada beban komersial lebih dominan pada siang dan sore hari. Konsumsi energi listrik pada sektor industri akan lebih merata karena banyaknya industri yang bekerja siang dan malam. Dilihat dari sisi ini, jelas pemakaian daya pada industri akan lebih menguntungkan karena kurva bebannya akan lebih merata, sedangkan pada beban fasilitas umum lain lebih dominan pada siang dan malam hari. Namun pada hal ini penulis akan mencoba membahas permasalahan yang

timbul pada karakteristik beban pada sektor komersial, tepatnya pengaruh yang ditimbulkan dari jenis beban pada peralatan elektrik. Di sini penulis mencoba menganalisa karakteristik beban listrik pada salah satu gedung perkantoran di daerah Jakarta Selatan tepatnya adalah Gedung Cyber.

2.2.3 Karakteristik Beban Listrik

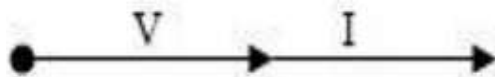
Pada studi mengenai sistem kelistrikan, beban listrik bisa diklasifikasikan berdasarkan sifat vektornya, yang menunjukkan cara arus dan tegangan berkolaborasi. Klasifikasi ini sangat penting untuk mengenali perilaku daya serta efektivitas sistem. Secara umum, beban listrik terbagi menjadi tiga kategori: induktif, kapasitif, dan resistif, yang masing-masing memiliki ciri-ciri unik yang berpengaruh pada faktor daya.

1. Beban Resistif

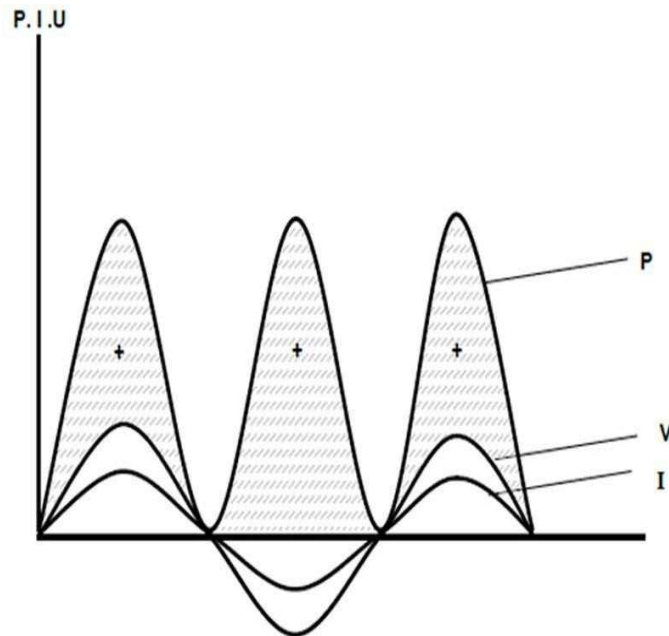
Beban Resistif Beban resistif, yaitu beban yang terdiri dari komponen tahanan ohm saja (resistance), seperti elemen pemanas (heating element) dan lampu pijar. Beban jenis ini hanya mengkonsumsi beban aktif saja dan mempunyai faktor daya sama dengan satu. Tegangan dan arus sefasa.

Persamaan daya sebagai berikut :

$$P = V.I \dots\dots\dots (2.1)$$



Gambar 2. 13 Arus dan Tegangan Pada



Gambar 2. 14 Gelombang Beban Resistif

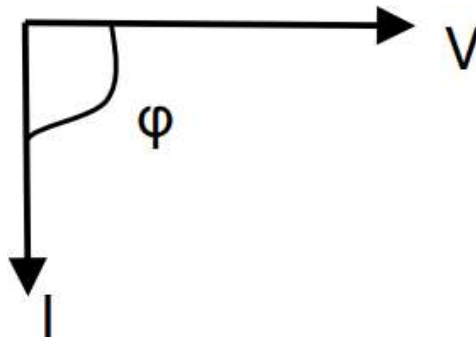
Vektor pada beban ini bergerak pada $\pm 90^\circ$ terhadap tegangan pada fasa yang sama dan memiliki beda sudut tegangan antar fasanya sebesar 120° .

2. Beban Induktif

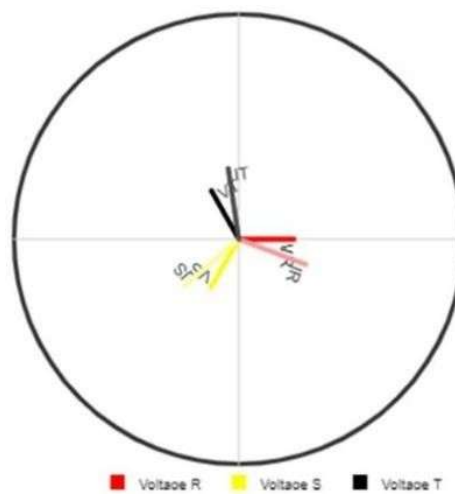
Beban induktif, yaitu beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti : (coil), transformator, dan solenoida. Beban ini dapat mengakibatkan pergeseran fasa (phase shift) pada arus sehingga bersifat tertinggal sebesar 90° terhadap tegangan (lagging). Hal ini disebabkan oleh energi yang tersimpan berupa medan magnetis yang akan mengakibatkan fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut:

$$P = V.I.\cos \varphi \dots\dots\dots (2.2)$$

φ = Sudut antara arus dan tegangan



Gambar 2. 15 Arus dan tegangan pada



Gambar 2. 16 Vektor Fasor Beban Induktif

Karena adanya beban induktif, maka $\cos \phi$ menunjukkan power faktor yang lagging. Nilai power faktor untuk setiap fase dapat dihitung sebagai berikut:

- Fase R, sudut arus berkenaan dengan tegangan = $0^\circ - 20,7^\circ = -20,7^\circ$. $\cos Q (20,7^\circ) = 0,935$ (lag)
- Fase S, sudut arus berkenaan dengan tegangan = $120^\circ - 139,4^\circ = -19,3^\circ$. $\cos Q (19,3^\circ) = 0,943$ (lag)
- Fase T, sudut arus berkenaan dengan tegangan = $(-120)^\circ + (-98,4)^\circ = -21,6^\circ$. $\cos Q (21,6^\circ) = 0,929$ (lag)

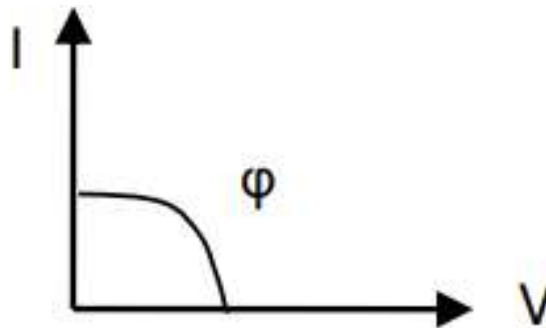
3. Beban Kapasitif

Beban kapasitif, yaitu beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan

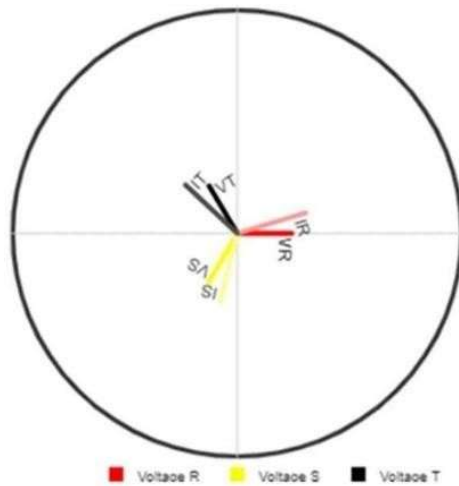
untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (electrical discharge) pada suatu sirkuit. Komponen ini dapat menyebabkan arus terdahulu terhadap tegangan (leading). Beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut :

$$P = V.I.\cos \varphi \quad (2.3)$$

φ = Sudut antara arus dan tegangan



Gambar 2. 17 Arus dan tegangan pada



Gambar 2. 18 Vektor Fasor Beban Kapasitif

Karena adanya kapasitif load, maka $\cos \phi$ atau faktor daya bersifat leading. Nilai faktor daya untuk masing-masing fase dapat dihitung sebagai berikut:

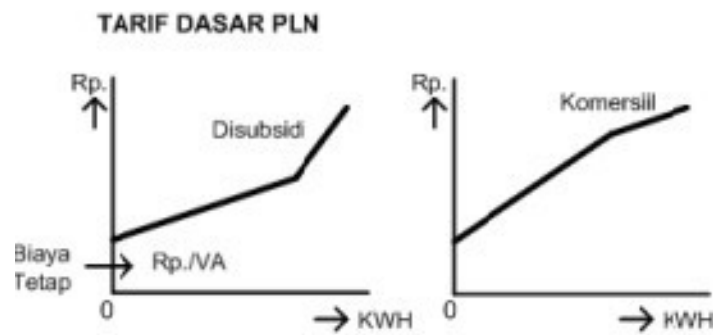
a. Fase R, sudut arus dibandingkan tegangan = $286.00^\circ - 0.00^\circ = 286.00^\circ$. $\cos \phi$

$$(286.00) = 0.27(\text{lead})$$

- b. Fase S, sudut arus dibandingkan tegangan = $30.00^\circ - 120.00^\circ = -60.00^\circ$. $\cos Q (-60^\circ) = 0.5(\text{lead})$
- c. Fase T, sudut arus dibandingkan tegangan = $142.00^\circ - 240.00^\circ = -98^\circ$. $\cos Q (-98^\circ) = -0.14(\text{lead})$

2.2.4 Pengukuran Besaran Listrik

Pengukuran besaran listrik merupakan dasar utama dalam sistem penagihan dan pengelolaan energi listrik oleh penyedia tenaga listrik. Dalam sistem Automatic Meter Reading (AMR), pengukuran dilakukan secara otomatis dan jarak jauh menggunakan kWh meter elektronik. Besaran listrik yang diukur meliputi energi aktif (kWh), energi reaktif (kVARh), tegangan (Volt), arus (Ampere), serta faktor daya ($\cos \phi$). Data-data tersebut merepresentasikan kondisi pemakaian energi listrik pelanggan secara menyeluruh dan akurat.



Gambar 2. 19 Tarif Dasar Listrik PT PLN (Persero)

Besaran energi listrik menjadi parameter utama dalam transaksi jual beli tenaga listrik antara PT PLN (Persero) dan pelanggan. Energi yang tercatat akan menjadi dasar penentuan biaya pemakaian listrik berdasarkan tarif yang berlaku. Selain itu, data daya dan faktor daya berperan penting dalam menentukan kualitas pemakaian energi serta efisiensi sistem distribusi, khususnya pada pelanggan dengan daya tersambung besar

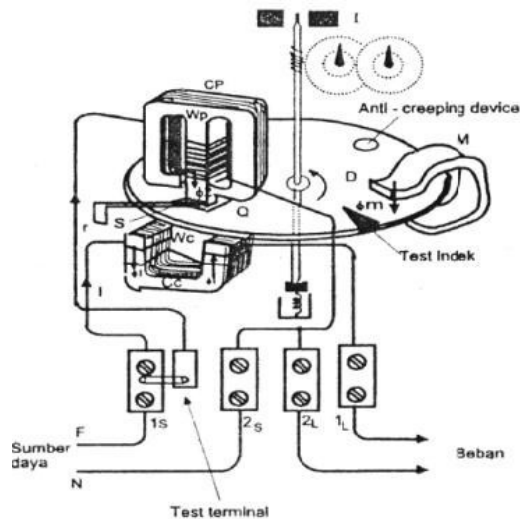
2.2.5 Pengukuran Energi dan Daya Listrik

Pengukuran energi listrik dilakukan dengan mencatat hasil perkalian antara daya listrik dan waktu pemakaian. Secara umum, energi listrik dirumuskan sebagai hasil kali daya dengan durasi pemakaian, sehingga semakin besar daya yang digunakan dan semakin lama waktu pemakaian, maka energi yang terpakai akan semakin besar. Dalam konteks sistem distribusi, pengukuran ini sangat berkaitan dengan perhitungan beban dan evaluasi konsumsi energi pelanggan

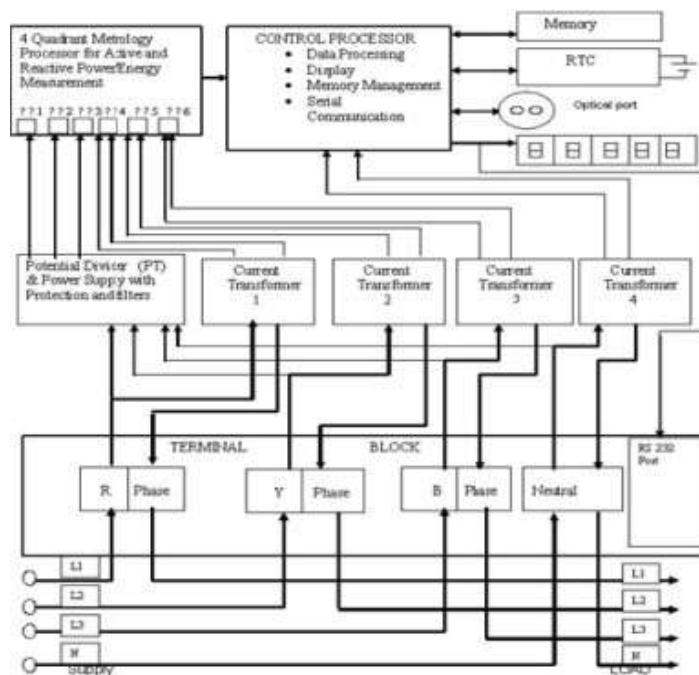
Pengukuran daya listrik sendiri dipengaruhi oleh besarnya tegangan, arus, dan faktor daya. Pada pelanggan industri dan bisnis, faktor daya memiliki peranan penting karena nilai $\cos \phi$ yang rendah dapat menyebabkan meningkatnya beban reaktif, sehingga berdampak pada tambahan biaya dan penurunan efisiensi sistem. Oleh karena itu, kWh meter AMR dirancang untuk mampu mencatat parameter-parameter tersebut secara simultan dan real time.

1. Pengukuran Energi Secara Elektromekanik dan Elektronik

Pengukuran energi listrik secara konvensional dilakukan menggunakan kWh meter elektromekanik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Putaran piringan aluminium pada meter ini sebanding dengan energi listrik yang digunakan oleh pelanggan. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam akurasi, kecepatan pencatatan, serta tidak mendukung pengiriman data jarak jauh



Gambar 2. 20 kWh Meter Analog



Gambar 2. 21 Diagram Blok kWh Meter Elektronik

Sebagai pengembangan, kWh meter elektronik menggunakan sensor arus dan tegangan yang diproses oleh mikroprosesor. Hasil pengukuran ditampilkan melalui layar digital dan disimpan dalam memori internal. Keunggulan utama kWh meter elektronik adalah tingkat akurasi yang lebih tinggi, kemampuan menyimpan data historis, serta kompatibilitas dengan sistem komunikasi seperti AMR

2.2.6 Automatic Meter Reading (AMR)

Automatic Meter Reading (AMR) merupakan sistem pembacaan meter energi listrik yang dilakukan secara otomatis dan jarak jauh dengan memanfaatkan jaringan komunikasi. Sistem ini memungkinkan pengambilan data pemakaian energi, tegangan, arus, faktor daya, dan profil beban pelanggan tanpa perlu pencatatan manual di lokasi pelanggan



Gambar 2. 22 Konfigurasi Sistem AMR Komunikasi Langsung

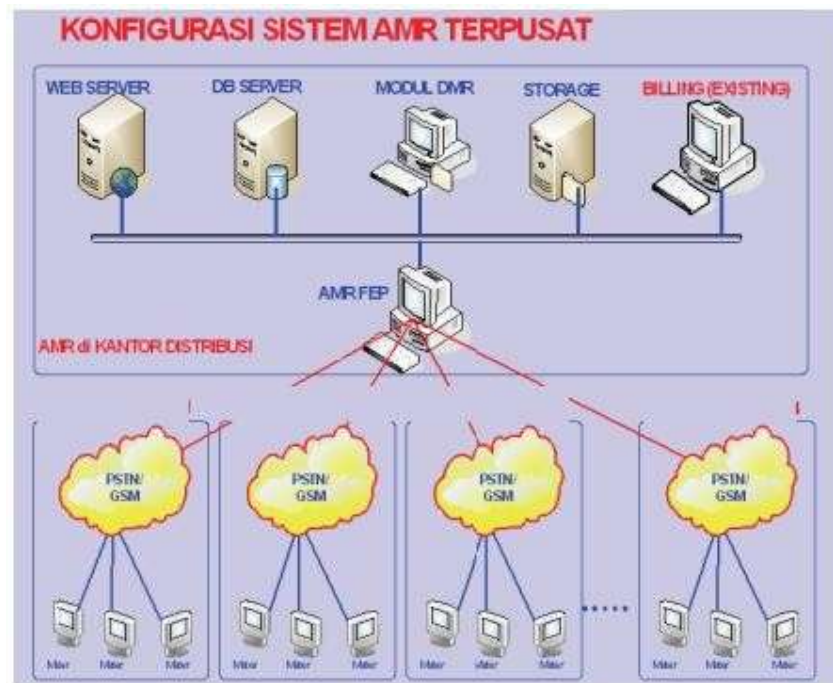


Gambar 2. 23 Konfigurasi Sistem AMR Dengan Konsentrator

Penerapan AMR memberikan berbagai keuntungan, antara lain peningkatan akurasi pencatatan, efisiensi biaya operasional, percepatan proses penagihan, serta kemudahan dalam pemantauan jaringan distribusi. Selain itu, data AMR dapat dimanfaatkan untuk analisis kualitas daya, manajemen beban, serta deteksi ketidaknormalan sistem distribusi seperti susut energi dan gangguan jaringan

a. Sistem Komunikasi pada AMR

Sistem AMR memerlukan jaringan komunikasi sebagai media transmisi data dari kWh meter pelanggan ke pusat kontrol. Media komunikasi yang digunakan dapat berupa jaringan selular (SMS, GPRS, LTE), power line communication (PLC), maupun jaringan kabel dan serat optik. Pada implementasinya di PT PLN (Persero), komunikasi berbasis SMS banyak digunakan karena kemudahan implementasi dan cakupan jaringan yang luas



Gambar 2. 24 Konfigurasi Aplikasi AMR dan Manajemen Data

Namun demikian, komunikasi berbasis SMS memiliki keterbatasan berupa ketidakstabilan sinyal dan potensi kegagalan penarikan data. Oleh karena itu, pengembangan sistem AMR diarahkan pada penggunaan teknologi komunikasi yang lebih andal seperti GPRS/LTE serta alternatif PLC untuk mengurangi ketergantungan terhadap jaringan selular

b. Peran AMR dalam Manajemen Jaringan Distribusi

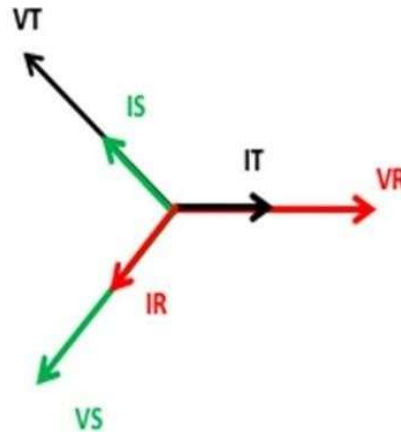
Data yang dihasilkan oleh sistem AMR menjadi input penting dalam distribution network management (DNM). Informasi pemakaian energi pelanggan secara real time memungkinkan pihak utilitas melakukan perencanaan jaringan yang lebih akurat, pengendalian beban, serta evaluasi kinerja sistem distribusi. Dengan demikian, AMR tidak hanya berfungsi sebagai alat pencatat energi, tetapi juga sebagai instrumen pendukung pengambilan keputusan operasional dan strategis

2.2.7 Faktor Penyebab Kelainan Pada Fasor

Terdapat beberapa penyebab kelainan pada fasor, berikut merupakan penyebab kelainan pada fasor :

1. Kesalahan Pemasangan Kabel

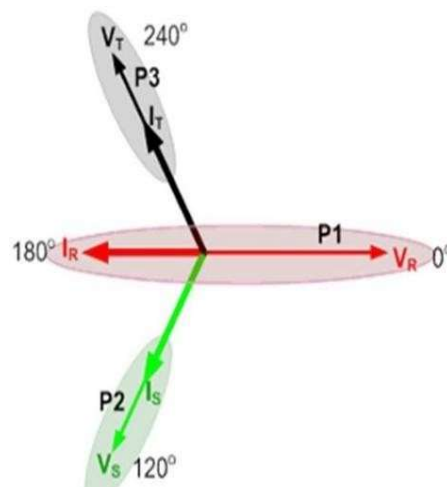
Ketidaksesuaian dalam arus dan tegangan yang tidak sejalan dapat memunculkan pergeseran fasa, yang dapat mengakibatkan serangkaian isu seperti pembacaan meter yang salah, ketidakseimbangan energi, hingga kerusakan pada peralatan.



Gambar 2. 25 Pemasangan arus dan tegangan tidak sefasa

Pemasangan arus yang terbalik polaritas, pemasangan arus yang terbalik polaritas, disebabkan oleh:

- Kesalahan penandaan oleh pabrik dalam menetapkan polaritas
- Kesalahan sambungan oleh pabrik di kubikel
- Kesalahan sambungan oleh teknisi saat melakukan pemasangan
- Kesengajaan dari pengguna untuk mengurangi penggunaan



Gambar 2. 26 Gambar Pemasangan arus terbalik polaritas

2.2.8 Tujuan Pembacaan Meter Secara Otomatis

Sistem Pembacaan Meter Secara Otomatis (*Automatic Meter Reading/AMR*) merupakan salah satu teknologi yang diterapkan dalam sistem kelistrikan untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan energi serta keandalan penyaluran listrik kepada pelanggan. Penerapan AMR tidak hanya berfungsi sebagai alat pencatatan pemakaian energi, tetapi juga sebagai sarana pemantauan kondisi kelistrikan secara berkelanjutan. Adapun tujuan utama dari penerapan sistem pembacaan meter secara otomatis adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran Konsumsi Energi dari Jarak Jauh

Sistem AMR memungkinkan pengambilan data pemakaian energi listrik pelanggan secara otomatis dan jarak jauh tanpa harus melakukan kunjungan langsung ke lokasi pelanggan. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi potensi kesalahan pencatatan akibat faktor manusia, serta mempercepat proses pengumpulan data pemakaian energi. Selain itu, pembacaan meter secara otomatis juga mendukung ketepatan waktu penagihan dan meningkatkan akurasi perhitungan energi listrik yang dikonsumsi pelanggan.

2. Identifikasi Saluran Tegangan (R–S–T)

AMR mampu mengidentifikasi dan memantau kondisi setiap fasa tegangan, yaitu fasa R, S, dan T, yang digunakan oleh pelanggan. Informasi ini penting untuk mengevaluasi keseimbangan beban antar fasa pada sistem distribusi. Ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, arus netral yang besar, serta mempercepat penurunan umur peralatan listrik. Dengan adanya data fasa secara real-time, operator dapat melakukan tindakan korektif untuk menjaga kestabilan dan keandalan sistem.

3. Pemantauan Parameter Elektris

Sistem AMR menyediakan data parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, frekuensi, faktor daya, serta daya aktif dan reaktif di sisi pelanggan. Pemantauan parameter-parameter ini sangat penting untuk mendeteksi kondisi abnormal, seperti penurunan tegangan (*undervoltage*), tegangan lebih (*overvoltage*), atau arus berlebih (*overcurrent*). Dengan pemantauan yang kontinu, potensi gangguan dapat diidentifikasi

lebih dini sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan peralatan atau gangguan pasokan listrik.

4. Analisis Beban dan Penggunaan Energi

Data yang dihasilkan oleh AMR dapat disajikan dalam bentuk grafik profil beban harian, mingguan, atau bulanan yang menunjukkan variasi penggunaan energi listrik pelanggan. Informasi ini berguna untuk menganalisis pola konsumsi energi, mengidentifikasi beban puncak, serta mendeteksi anomali penggunaan listrik yang tidak wajar. Hasil analisis tersebut dapat dimanfaatkan sebagai dasar perencanaan pengembangan jaringan, pengaturan kapasitas transformator, serta evaluasi efisiensi penggunaan energi listrik.

5. Penetapan Tarif Dinamis

Sistem AMR mendukung penerapan skema tarif berbasis waktu, seperti pemisahan penggunaan energi listrik pada periode Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) dan Waktu Beban Puncak (WBP). Dengan adanya pencatatan energi yang terpisah berdasarkan interval waktu tertentu, pelanggan dapat dikenakan tarif yang lebih sesuai dengan pola pemakaian listriknya. Penerapan tarif dinamis ini mendorong pelanggan untuk mengalihkan penggunaan energi ke luar jam beban puncak, sehingga dapat membantu mengurangi beban sistem dan meningkatkan efisiensi operasional jaringan listrik.

6. Deteksi Gangguan dan Evaluasi Kualitas Daya

AMR berperan dalam mendeteksi gangguan dan menilai kualitas daya listrik yang diterima pelanggan, seperti fluktuasi tegangan, ketidakseimbangan fasa, dan penurunan kualitas daya lainnya. Informasi ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem distribusi serta menjadi dasar dalam pengambilan keputusan terkait pemeliharaan jaringan dan peningkatan kualitas pelayanan. Dengan demikian, penerapan AMR turut mendukung terciptanya sistem distribusi listrik yang lebih andal, efisien, dan berorientasi pada kualitas pelayanan kepada pelanggan.

2.2.9 Standar Teknis (SPLN D3.006: 2021)

Standar ini menetapkan spesifikasi teknis, fitur, dan persyaratan meter statik energi listrik pascabayar fase tiga yang mengukur energi aktif dengan akurasi/ketelitian kelas 0,2S, 0,5S, dan 1 dan mengukur energi reaktif dengan akurasi/ketelitian kelas 2 yang tersambung langsung atau melalui transformator pengukuran, berlaku untuk meter pasangan luar dengan frekuensi acuan 50 Hz.

A. Istilah Umum

1. Meter statik energi aktif

Meter yang arus dan tegangannya menimbulkan suatu proses pada elemen-elemen elektronik untuk menghasilkan frekuensi pulsa keluaran yang proporsional dengan besaran energi aktif yang diukur.

2. Meter statik energi reaktif

Meter yang arus dan tegangannya menimbulkan suatu proses pada elemen-elemen elektronik untuk menghasilkan frekuensi pulsa keluaran yang proporsional dengan besaran energi reaktif yang diukur.

3. Tipe meter

- Suatu rancangan/desain meter yang karakteristiknya ditentukan oleh:
- Bentuk dan tata letak dari konstruksi, serta fungsi jenis pengukuran;
- Rasio arus dasar terhadap arus maksimum (I_b/I_m);
- Versi *firmware*;
- Tegangan pengenalan dan tegangan operasi;
- Merek, jenis, dan tipe komponen utama;
- Diproduksi satu pabrikan.

Tipe meter harus bersifat unik (tunggal), tidak boleh ada duplikasi.

4. Komponen utama

Komponen pada sirkuit meter listrik yang terkait langsung dengan akurasi pengukuran, yaitu: sensor arus, pencacah (ADC/DAC), kristal, prosesor (MCU), sistem memori, dan komponen untuk sistem pengukuran; serta komponen lain berupa: superkapasitor, baterai,

layar tampilan (*display*), *watchdog unit*, relai/kontaktor, komponen kontrol bantu, varistor, dan komponen catu daya.

5. Meter tersambung langsung

Meter yang penggunaannya terkoneksi secara langsung ke sirkit yang diukur tanpa perangkat bantu ukur eksternal seperti transformator ukur.

6. Meter tersambung tidak langsung

Meter yang penggunaannya terkoneksi secara tidak langsung ke sirkit yang diukur, lewat transformator ukur.

7. Pusat data (*data center*)

Suatu sistem yang dapat berisi *meter data management system* (MDMS), *head-end system* (HES), dan/atau *enterprise system*. Dalam sistem PLN dapat merujuk juga pada aplikasi *automatic meter data reading* terpusat (A2MRT).

B. Istilah elemen mekanis

1. Tutup meter

Penutup pada bagian muka meter, dibuat dari bahan yang seluruhnya tembus pandang atau bahan yang tidak tembus pandang yang dilengkapi jendela untuk membaca penunjuk operasi (bila terpasang) dan tampilan.

2. Kotak meter

Bagian yang terdiri dari dasar dan tutup.

CATATAN: Kotak dapat untuk sebuah meter atau lebih.

3. Tutup terminal

Penutup yang menutupi terminal-terminal meter dan pada umumnya termasuk juga bagian ujung kawat atau kabel luar yang dihubungkan ke terminal.

C. Istilah besaran meter

1. Arus dasar (*I_b*)

Nilai arus yang dijadikan dasar untuk menetapkan kinerja yang relevan dari suatu meter.

2. Arus maksimum (I_m)

Nilai arus tertinggi yang diizinkan mengalir secara kontinu dimana persyaratan ketelitian masih terpenuhi.

3. Arus mula (I_{st})

Nilai arus terendah meter untuk mulai bekerja dan menjalankan registernya.

4. Arus minimum (I_{min})

Nilai arus terendah meter dimana persyaratan ketelitian masih terpenuhi.

5. Arus transisi (I_{tr})

Nilai arus pada dan di atasnya telah ditentukan dimana berada dalam kesalahan maksimum terkecil yang diizinkan sesuai kelas akurasi meter.

6. Tegangan acuan (U_n)

Nilai tegangan yang dijadikan dasar untuk menetapkan kinerja meter yang relevan.

7. Frekuensi pengenalan

Nilai frekuensi yang dijadikan dasar untuk menetapkan kinerja meter statik yang relevan.

8. Kelas ketelitian

Sebuah angka yang merupakan batas kesalahan yang diizinkan, dalam persen, untuk semua nilai arus antara $0,1 I_b$ dan I_m , faktor kerja satu, bilamana meter diuji dalam kondisi acuan (termasuk toleransi yang diizinkan untuk nilai acuan) sebagaimana ditentukan dalam standar ini.

9. Pengukuran energi aktif dengan algoritma pengukuran fundamental

Pengukuran energi aktif yang hanya menjumlahkan besaran fundamental.

10. Pengukuran energi aktif dengan algoritma pengukuran total harmonik

Pengukuran energi aktif yang sudah menjumlahkan besaran fundamental dan (+/-) harmonik dalam satu kesatuan nilai.

11. Pengukuran energi aktif dengan algoritma pengukuran total harmonik absolut

Pengukuran energi aktif yang menjumlahkan besaran fundamental dan nilai absolut harmonik dalam satu kesatuan nilai. Besaran harmonik dijumlahkan untuk seluruh orde yang terukur untuk kemudian diabsolutkan.

12. Energi reaktif

Nilai pengukuran energi reaktif yang sudah menjumlahkan besaran fundamental dan harmonik dalam satu kesatuan nilai.

13. Energi reaktif *billing* (kompensasi)

Nilai pengukuran energi reaktif secara *real time* berdasarkan profil beban tertentu saat itu.

D. Istilah Besaran Berpengaruh

1. Besaran berpengaruh

Setiap besaran, umumnya dari luar meter, yang dapat mempengaruhi kinerja meter.

2. Kondisi acuan

Perangkat besaran-besaran berpengaruh dan karakteristik kinerja yang bersesuaian, dengan nilai-nilai acuan, julat-julat toleransi dan acuannya, yang dijadikan dasar untuk menentukan kesalahan hakikinya.

Istilah "tegangan" dan "arus" menunjukkan nilai r.m.s, kecuali bila ditentukan lain.

3. Variasi kesalahan yang disebabkan oleh satu besaran berpengaruh

Variasi kesalahan yang disebabkan oleh satu besaran berpengaruh adalah perbedaan antara dua nilai kesalahan dalam persen suatu meter, salah satu diantaranya merupakan nilai acuan dan nilai yang lain diperoleh dari satu besaran berpengaruh, yang berbeda dari acuannya.

4. Faktor distorsi

Rasio antara nilai-nilai r.m.s kandungan harmonik (diperoleh dengan cara mengurangi besaran bolak-balik non sinusoida dengan besaran fundamentalnya), dengan nilai r.m.s besaran sinusoida. Faktor distorsi biasanya dinyatakan dalam persen.

5. Gangguan elektromagnetis

Interferensi elektromagnetis terhantarkan atau teradiasikan yang dapat mempengaruhi operasi meter secara fungsional atau secara metrologik.

6. Suhu acuan

Suhu sekitar yang ditentukan sebagai kondisi acuan.

7. Koefisien suhu rata-rata

Rasio antara variasi kesalahan dalam persen dengan perubahan suhu yang menyebabkan variasi tersebut.