

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Relevan

Untuk memperkuat dasar metodologi, penelitian ini mengacu pada beberapa studi terdahulu yang relevan dengan penerapan Automatic Meter Reading (AMR), analisis anomali pemakaian energi listrik, serta pengendalian susut non-teknis di lingkungan PLN. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut:

1. Penelitian oleh [3] berjudul “Analisis Penggunaan Sistem AMR untuk Deteksi Pemakaian Energi Tidak Normal pada Pelanggan Tegangan Menengah” menunjukkan bahwa sistem AMR mampu mendeteksi penurunan konsumsi energi akibat gangguan pada current transformer (CT) dengan tingkat akurasi mencapai 96%. Hasil penelitian ini menjadi dasar penting bagi penelitian ini dalam menggunakan data AMR sebagai alat deteksi dini terhadap anomali kWh pada pelanggan industri.
2. [4] dalam penelitiannya yang berjudul “Evaluasi Efektivitas P2TL dalam Pengendalian Susut Non-Teknis” mengemukakan bahwa penerapan sistem AMR yang diintegrasikan dengan kegiatan penertiban lapangan mampu menurunkan tingkat susut non-teknis hingga 0,35%. Temuan ini sejalan dengan pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini, di mana hasil deteksi anomali akan diverifikasi melalui pemeriksaan lapangan untuk memastikan keakuratannya.
3. [5] dalam penelitiannya “Analisis Load Factor dan Jam Nyala sebagai Indikator Kinerja Pelanggan Tegangan Menengah” menunjukkan bahwa nilai load factor dan jam nyala dapat digunakan sebagai indikator utama efisiensi penggunaan energi dan juga sebagai sinyal awal terhadap potensi anomali pemakaian. Penelitian ini relevan dengan pendekatan analisis beban yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi penyimpangan pola konsumsi energi.
4. Penelitian oleh [6] berjudul “Pemanfaatan Data AMR untuk Deteksi Dini Susut Energi Listrik pada Pelanggan Industri” berhasil mengembangkan model deteksi dini susut energi berbasis perbandingan profil daya antar hari. Pendekatan ini

menjadi referensi bagi penelitian ini dalam melakukan analisis pola konsumsi energi pelanggan.

5. [7] melakukan penelitian berjudul “Analisa Implementasi Anomaly Early Warning System pada Pelanggan” yang berfokus pada penerapan sistem deteksi dini terhadap anomali pemakaian energi berbasis data AMR (Automatic Meter Reading). Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efektivitas pengawasan konsumsi energi pelanggan dengan memanfaatkan algoritma early warning system untuk mendeteksi perubahan pola konsumsi secara real-time.
6. [8] dalam penelitiannya berjudul “Analisis Penggunaan Data AMR untuk Optimalisasi Faktor Daya Pelanggan Industri di PLN UP3 Serang” membahas pemanfaatan data Automatic Meter Reading (AMR) untuk menganalisis dan meningkatkan faktor daya pelanggan industri. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif-kuantitatif dengan memanfaatkan data pembacaan energi aktif dan reaktif dari sistem AMR untuk mengidentifikasi pelanggan dengan efisiensi daya rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan data AMR dapat mempercepat proses deteksi penurunan faktor daya hingga 85% dibandingkan metode konvensional yang mengandalkan pencatatan manual.
7. [9] dalam penelitiannya berjudul “Evaluasi Akurasi Data AMR terhadap Tagihan Energi Pelanggan Prioritas di PLN UP3 Bekasi” meneliti tingkat akurasi data hasil pembacaan sistem Automatic Meter Reading (AMR) dibandingkan dengan pencatatan manual pada pelanggan prioritas. Metode yang digunakan adalah analisis perbandingan kuantitatif antara data AMR dengan data billing meter selama periode tiga bulan pengamatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem AMR memiliki tingkat akurasi sebesar 99,8%.

Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	Rahman (2022) – Analisis Penggunaan Sistem AMR untuk Deteksi Pemakaian Energi Tidak Normal pada Pelanggan Tegangan Menengah	Tingginya kasus anomali pembacaan energi akibat gangguan pada CT dan koneksi meter pelanggan TM	Deskriptif kuantitatif dengan analisis data AMR harian dan verifikasi lapangan	AMR mampu mendeteksi penurunan konsumsi akibat gangguan CT	Penelitian ini hanya fokus pada deteksi anomali, belum mengkaji estimasi energi hilang; penelitian ini memperluasny a dengan menghitung potensi kerugian energi
2.	Setiawan (2021) – Evaluasi Efektivitas P2TL dalam Pengendalian Susut Non-Teknis	Susut non-teknis masih tinggi akibat keterlambatan deteksi dan tindak lanjut lapangan	Analisis deskriptif dan evaluatif terhadap data P2TL dan AMR	Integrasi AMR dengan kegiatan P2TL menurunkan susut non-teknis	Penelitian ini memperluas pada analisis real-time AMR dengan studi kasus pelanggan prioritas individu
3.	Suryana (2020) – Analisis	Penurunan efisiensi dan anomali	Analisis data AMR dan simulasi	Load factor dan jam nyala efektif untuk menilai	Penelitian ini memperluas ke konteks AMR

	Load Factor dan Jam Nyala sebagai Indikator Kinerja Pelanggan Tegangan Menengah	konsumsi energi tidak terdeteksi dari laporan rutin	perhitungan LF dan JH	efisiensi serta indikasi anomali konsumsi	real-time dan integrasi dengan estimasi energi hilang
4.	Hidayat & Nurdiansyah (2024) – Pemanfaatan Data AMR untuk Deteksi Dini Susut Energi Listrik pada Pelanggan Industri	Belum ada sistem deteksi dini berbasis AMR yang terintegrasi dengan pemantauan pelanggan industri	Studi kasus dan analisis time-series data AMR	Dihasilkan model deteksi dini berbasis profil daya antar hari	Penelitian ini memperdalam dengan analisis multi pelanggan dan konfirmasi lapangan untuk validasi hasil AMR

2.2 Landasan Teori

Landasan teori dalam penelitian ini digunakan sebagai dasar konseptual untuk menganalisis pemakaian energi listrik pelanggan daya di atas 197 kVA yang terpasang sistem Automatic Meter Reading (AMR) pada PT PLN (Persero) UP3 Cikokol. Landasan teori mencakup sistem distribusi tenaga listrik, susut energi listrik, sistem pengukuran energi, Current Transformer (CT), serta parameter analisis beban seperti energi listrik, daya aktif, jam nyala, dan load factor.

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik untuk memenuhi kebutuhan konsumen. Ketiga subsistem tersebut saling terintegrasi agar pasokan listrik tetap andal, efisien, dan stabil.

Menurut [10], sistem tenaga listrik bekerja dengan prinsip konversi energi dari pembangkit menjadi energi listrik, kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi bertegangan tinggi menuju gardu induk distribusi, dan akhirnya didistribusikan kepada pelanggan.

Kinerja sistem tenaga listrik yang baik ditandai oleh keandalan (reliability), kualitas daya (power quality), serta efisiensi penyaluran energi. Setiap gangguan pada salah satu subsistem dapat memengaruhi kontinuitas pasokan listrik secara keseluruhan [11].

Dalam konteks penelitian ini, fokus berada pada subsistem distribusi, khususnya pemantauan pemakaian energi pelanggan daya besar menggunakan Automatic Meter Reading (AMR) sebagai bagian dari upaya meningkatkan efisiensi dan menekan susut non-teknis di PLN UP3 Cikokol.

2.2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian akhir dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi dari gardu induk ke konsumen dengan tingkat tegangan yang sesuai. Sistem ini terbagi menjadi jaringan distribusi primer (tegangan menengah, biasanya 20 kV) dan jaringan distribusi sekunder (tegangan rendah, 220/380 V) [12].

Komponen utama sistem distribusi meliputi transformator distribusi, saluran penghantar, peralatan proteksi dan pengendalian, serta peralatan pengukuran seperti *Current Transformer (CT)*, *Voltage Transformer (VT)*, dan kWh meter. Peralatan tersebut berperan penting untuk menjaga kontinuitas penyaluran energi dan meminimalkan rugi daya [11].

Menurut [13], sistem distribusi modern kini banyak dilengkapi teknologi Automatic Meter Reading (AMR) untuk memantau konsumsi energi secara real-time, mendeteksi anomali pemakaian, dan membantu pengendalian susut non-teknis.

Dalam penelitian ini, fokus utama berada pada sistem distribusi pelanggan daya di atas 197 KVA di PLN UP3 Cikokol, yang menggunakan metode pengukuran tidak langsung dengan CT–VT serta sistem AMR guna meningkatkan akurasi pemantauan dan efisiensi pengawasan energi.

2.2.3 Susut Energi (Losses)

2.2.3.1 Pengertian Susut Energi

Susut energi (energy losses) adalah selisih antara energi listrik yang disalurkan dari sisi sumber dengan energi yang tercatat atau diterima oleh pelanggan. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, susut energi merupakan indikator penting dalam menilai efisiensi jaringan.

Secara umum:

$$\text{Susut Energi} = \text{Energi Kirim} - \text{Energi Terima} \dots\dots\dots (2.1)$$

Sedangkan dalam persentase:

$$\%Susut = \frac{Energi Kirim - Energi Terima}{Energi Kirim} \times 100\% \dots\dots\dots (2.2)$$

Susut energi yang tinggi menunjukkan adanya ketidakefisienan dalam sistem distribusi.

Menurut [1], pemanfaatan sistem AMR membantu dalam mengidentifikasi potensi ketidaksesuaian pencatatan energi yang dapat berkontribusi terhadap peningkatan susut non-teknis.

2.2.3.2 Jenis-Jenis Susut Energi

Secara umum, susut energi dibagi menjadi dua kategori utama:

a) Susut Teknis

Susut teknis terjadi akibat karakteristik fisik sistem tenaga listrik, seperti:

- Rugi-rugi tahanan konduktor (I^2R losses)
- Rugi inti transformator
- Rugi akibat pemanasan peralatan
- Ketidakseimbangan beban

Rugi-rugi daya pada penghantar dapat dihitung dengan:

$$P_{loss} = I^2 \times R \dots\dots\dots (2.3)$$

Semakin besar arus dan tahanan penghantar, semakin besar rugi-rugi yang terjadi.

b) Susut Non-Teknis

Susut non-teknis terjadi akibat faktor administrasi atau kesalahan pencatatan, seperti:

- Kesalahan instalasi CT/PT
- Error rasio CT
- Kesalahan konfigurasi meter

- Gangguan komunikasi AMR
- Ketidaksesuaian pencatatan energi

Menurut [14], error pada Current Transformer dapat menyebabkan penyimpangan pencatatan energi yang berdampak langsung terhadap nilai tagihan pelanggan.

2.2.3.3 Faktor Yang Mempengaruhi Susut Energi

Beberapa faktor utama yang mempengaruhi susut energi antara lain:

1. Panjang dan ukuran penghantar
2. Besar arus beban
3. Faktor daya ($\cos \phi$)
4. Akurasi CT dan PT
5. Sistem pengukuran energi

Faktor daya rendah menyebabkan arus meningkat, sehingga rugi-rugi I^2R juga meningkat.

2.2.3.4 Peran AMR Dalam Pengendalian Susut Energi

Sistem AMR memungkinkan monitoring konsumsi energi secara real-time, sehingga:

- Ketidaksesuaian pencatatan dapat segera terdeteksi
- Anomali beban dapat dianalisis
- Perubahan pola konsumsi dapat dibandingkan

Menurut [2], sistem monitoring berbasis AMR memberikan transparansi data konsumsi energi sehingga membantu pengendalian susut energi pada pelanggan tegangan menengah.

Dalam konteks penelitian ini, data dari AMR digunakan untuk menganalisis kemungkinan ketidaksesuaian pencatatan energi sebelum dan sesudah periode tertentu.

2.2.3.5 Hubungan Susut Energi Dengan Studi Penelitian

Penelitian ini tidak secara langsung menghitung susut jaringan distribusi secara keseluruhan, namun fokus pada:

- Evaluasi kesesuaian pencatatan energi pelanggan
- Analisis perubahan konsumsi energi
- Identifikasi kemungkinan deviasi akibat sistem pengukuran

Dengan adanya data real-time dari AMR, evaluasi dapat dilakukan secara lebih akurat dibandingkan metode konvensional.

Sebagai mahasiswa D3 Teknologi Listrik, pemahaman tentang susut energi penting karena berkaitan dengan efisiensi sistem distribusi dan akurasi pencatatan energi pelanggan daya besar.

2.2.4 Sistem Pengukuran Energi Listrik

Sistem pengukuran energi listrik merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mencatat besarnya energi yang digunakan oleh pelanggan. Energi listrik diukur dalam satuan kilowatt-hour (kWh), yang menunjukkan jumlah energi yang dikonsumsi dalam periode waktu tertentu.

Menurut [1], akurasi sistem pengukuran sangat menentukan ketepatan pencatatan energi dan berpengaruh langsung terhadap besarnya energi yang ditagihkan kepada pelanggan. Kesalahan dalam sistem pengukuran dapat menyebabkan terjadinya selisih energi tercatat dan berpotensi menimbulkan susut non-teknis.

Secara umum, sistem pengukuran energi listrik dibedakan menjadi dua metode, yaitu pengukuran langsung dan pengukuran tidak langsung.

2.2.4.1 Pengukuran Langsung

Pengukuran langsung adalah metode pengukuran energi listrik di mana arus dan tegangan dari jaringan langsung masuk ke meter energi tanpa menggunakan transformator ukur. Metode ini umumnya digunakan pada pelanggan rumah tangga atau pelanggan dengan daya kecil.

Pada sistem ini, meter energi langsung menerima arus dan tegangan sesuai kapasitas nominal alat ukur. Pengukuran langsung memiliki keunggulan berupa instalasi yang sederhana dan biaya yang relatif rendah. Namun, metode ini memiliki keterbatasan karena tidak dapat digunakan pada pelanggan dengan arus besar atau tegangan menengah.

Energi listrik pada sistem ini dihitung berdasarkan persamaan:

$$E = P \times t \dots\dots\dots (2.4)$$

di mana:

- E = energi listrik (kWh)
- P = daya aktif (kW)
- t = waktu (jam)

Daya aktif dalam sistem tiga fasa dapat dihitung dengan persamaan:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \dots\dots\dots (2.5)$$

di mana:

- P = daya aktif (kW)
- V = tegangan (Volt)
- I = arus (Ampere)
- $\cos\phi$ = faktor daya

Persamaan ini menunjukkan bahwa besarnya energi sangat dipengaruhi oleh arus, tegangan, dan faktor daya.

2.2.4.2 Pengukuran Tidak Langsung

Pengukuran tidak langsung adalah metode pengukuran energi listrik yang menggunakan transformator ukur berupa Current Transformer (CT) dan Voltage Transformer (VT) untuk menurunkan arus dan tegangan sebelum masuk ke meter energi.

Metode ini digunakan pada pelanggan daya besar dan pelanggan tegangan menengah karena arus dan tegangan pada sisi primer terlalu besar untuk diukur secara langsung oleh meter energi. Dengan menggunakan CT dan VT, arus dan tegangan diturunkan ke nilai standar (biasanya 5 A dan 110 V) agar aman dan sesuai dengan spesifikasi meter.

Menurut [14], kesalahan pemasangan atau error pada Current Transformer dapat berpengaruh signifikan terhadap akurasi pencatatan energi listrik pelanggan, bahkan dapat berdampak pada penagihan dan perhitungan konsumsi energi yang tidak sesuai.

Prinsip kerja pengukuran tidak langsung adalah sebagai berikut:

1. Arus primer dari jaringan mengalir melalui CT.
2. CT menurunkan arus sesuai rasio transformasi.
3. Tegangan diturunkan melalui VT.
4. Meter energi menerima arus dan tegangan sekunder.
5. Energi dihitung berdasarkan nilai sekunder yang telah dikalibrasi dengan rasio CT dan VT.

Hubungan rasio CT dinyatakan sebagai:

$$\text{Rasio CT} = \frac{I_{\text{primer}}}{I_{\text{sekunder}}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Energi aktual pada sisi primer dihitung dengan memperhitungkan rasio transformasi, yaitu:

$$E_{\text{primer}} = E_{\text{meter}} \times \text{Rasio CT} \times \text{Rasio VT} \dots\dots\dots (2.7)$$

Metode pengukuran tidak langsung memiliki keunggulan dalam pengukuran daya besar, namun lebih sensitif terhadap kesalahan instalasi. Gangguan seperti koneksi CT longgar, polaritas terbalik, atau rasio tidak sesuai dapat menyebabkan energi tidak tercatat secara akurat [15].

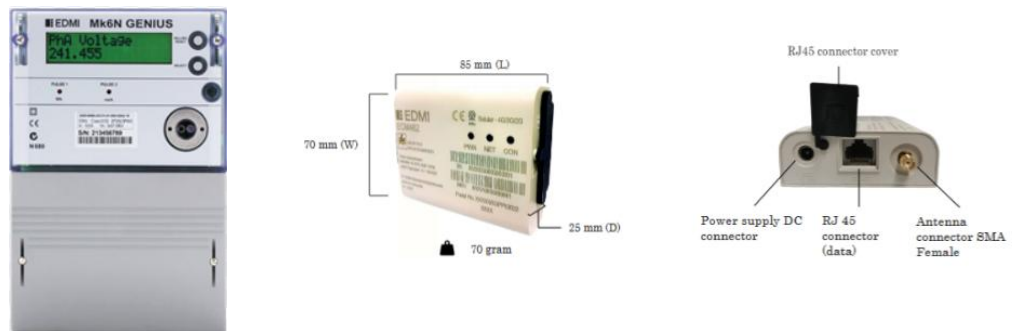
Menurut [16] menyatakan bahwa ketidaktepatan rasio CT/VT memberikan error sistematis yang dapat mempengaruhi akurasi energi tercatat hingga 15–20%, sehingga pemeriksaan berkala terhadap rasio transformator menjadi prosedur penting dalam pengukuran pelanggan menengah.

Dalam penelitian ini, metode pengukuran yang digunakan adalah pengukuran tidak langsung karena pelanggan memiliki daya tersambung di atas 197 kVA dan terhubung pada sistem tegangan menengah 20 kV. Anomali yang terjadi pada studi kasus disebabkan oleh gangguan koneksi CT, sehingga salah satu fasa tidak terbaca dan mengakibatkan energi tercatat lebih rendah dari kondisi sebenarnya.

Penggunaan pengukuran tak langsung ini juga memungkinkan sistem Automatic Meter Reading (AMR) mengakses data tegangan, arus, dan daya pelanggan secara real-time tanpa risiko keselamatan tinggi. Menurut penelitian [17] dalam Jurnal Elektro dan Energi Listrik, metode ini sangat efektif digunakan pada pelanggan industri karena meningkatkan akurasi data pemakaian energi sekaligus memudahkan pemantauan beban secara berkelanjutan.



Gambar 2. 1 Current Transformer (CT) & Voltage Transformer (VT)



Gambar 2. 2 kWh Meter Digital & Sistem AMR (Modem AMR)

2.2.5 Current Transformer (CT)

2.2.5.1 Pengertian Current Transformer (CT)

Current Transformer (CT) merupakan transformator instrumen yang digunakan untuk menurunkan arus primer yang besar menjadi arus sekunder yang lebih kecil dan terstandarisasi (umumnya 5 A atau 1 A), sehingga dapat diukur oleh alat ukur seperti kWh meter, ammeter, dan sistem Automatic Meter Reading (AMR).

Pada sistem distribusi tenaga listrik, khususnya pelanggan dengan daya di atas 197 kVA, arus beban tidak memungkinkan diukur secara langsung karena nilai arus yang tinggi. Oleh karena itu, pengukuran dilakukan secara tidak langsung menggunakan CT sebagai perantara [14].

CT berfungsi untuk:

1. Menyesuaikan besaran arus agar sesuai dengan rating alat ukur
2. Memberikan isolasi antara sistem tegangan menengah dengan alat ukur
3. Menjaga keselamatan peralatan dan personel

2.2.5.2 Prinsip Kerja CT

Prinsip kerja CT sama seperti transformator pada umumnya, yaitu berdasarkan hukum induksi elektromagnetik Faraday. Arus primer yang mengalir pada sisi primer akan menghasilkan fluks magnet pada inti besi, yang kemudian menginduksi arus pada sisi sekunder.

Secara ideal berlaku hubungan:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan:

- I_p = Arus primer (A)
- I_s = Arus sekunder (A)
- N_p = Jumlah lilitan primer
- N_s = Jumlah lilitan sekunder

Dalam praktiknya, lilitan primer biasanya hanya satu lilitan (konduktor melewati inti), sedangkan lilitan sekunder banyak.

Menurut [18], penyimpangan rasio aktual terhadap rasio nominal dapat menyebabkan kesalahan pencatatan energi yang signifikan apabila tidak dikalibrasi secara berkala.

2.2.5.3 Rasio CT

Rasio CT menyatakan perbandingan antara arus primer dan arus sekunder. Contoh:

- CT 200/5 A
- CT 400/5 A
- CT 600/5 A

Contoh perhitungan:

Jika digunakan CT 400/5 A dan arus sekunder terbaca 4 A, maka arus primer sebenarnya:

$$I_p = (400/5) \times 4$$

$$I_p = 80 \times 4$$

$$I_p = 320 \text{ A}$$

Nilai inilah yang digunakan untuk perhitungan daya dan energi.

Kesalahan dalam pemilihan rasio CT dapat menyebabkan under-billing atau over-billing energi listrik [16].

2.2.5.4 Kelas akurasi CT

CT memiliki kelas akurasi yang menunjukkan batas toleransi kesalahan pengukuran, antara lain:

- Kelas 0.2
- Kelas 0.5
- Kelas 1.0

Semakin kecil angka kelas, semakin tinggi akurasinya.

Sebagai contoh:

- Kelas 0.5 berarti kesalahan maksimum $\pm 0.5\%$ dari nilai sebenarnya.

Untuk pelanggan daya besar, biasanya digunakan CT kelas 0.5 atau lebih baik agar pencatatan energi akurat.

2.2.5.5 Error Pada CT

Dalam praktiknya, CT tidak ideal dan memiliki dua jenis error utama:

1. Ratio Error

$$\%Error = \frac{KnIs - Ip}{Ip} \times 100\% \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan:

- Kn = Rasio nominal CT
- Is = Arus sekunder
- Ip = Arus primer sebenarnya

2. Phase Angle Error

Terjadi akibat pergeseran sudut antara arus primer dan sekunder, yang dapat mempengaruhi pengukuran daya (kW) dan energi (kWh).

Menurut [14], error CT dapat berdampak langsung pada ketidaksesuaian pencatatan energi pelanggan tegangan menengah apabila tidak dilakukan pengujian dan kalibrasi berkala.

2.2.5.6 Pengaruh CT Terhadap Pencatatan Energi

Energi listrik dihitung berdasarkan:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \dots\dots\dots (2.10)$$

Karena arus diperoleh dari CT, maka setiap kesalahan pada CT akan langsung memengaruhi nilai daya (P) dan energi (kWh) yang tercatat.

Kesalahan rasio, koneksi terbalik, atau beban berlebih dapat menyebabkan energi tercatat lebih kecil atau lebih besar dari kondisi sebenarnya [18].

Dalam konteks penelitian ini, akurasi CT sangat berpengaruh terhadap validitas data energi yang terbaca melalui sistem AMR.

2.2.6 Diagram Pengawatan

Dalam sistem pengukuran tenaga listrik pada pelanggan berdaya besar (≥ 197 KVA), metode yang digunakan umumnya adalah pengukuran tak langsung. Pada sistem ini, arus dan tegangan tidak diukur langsung oleh kWh meter, melainkan melalui Current Transformer (CT) dan Voltage Transformer (VT). Kedua komponen ini berfungsi menurunkan besaran listrik dari jaringan utama ke level yang aman dan sesuai dengan kapasitas alat ukur.

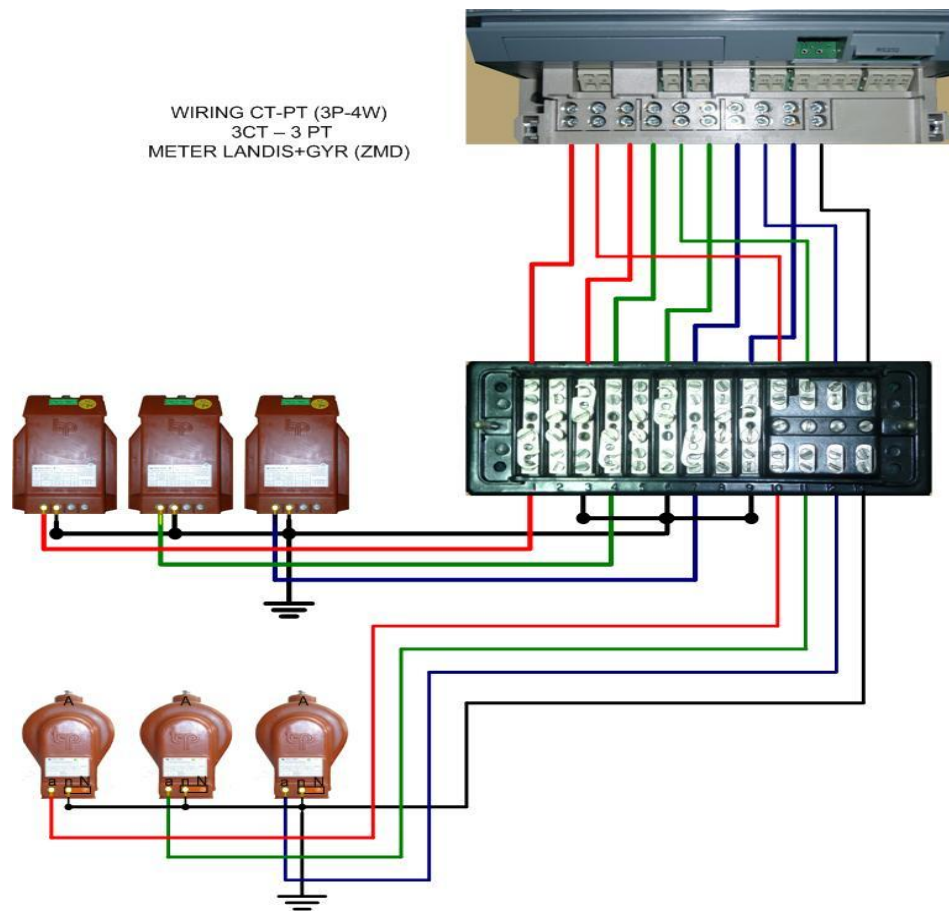
Diagram pengawatan sistem AMR pada pengukuran tak langsung secara umum terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

- Sumber tegangan dan arus dari jaringan distribusi pelanggan,
- CT dan VT sebagai alat bantu pengukuran,
- kWh meter digital sebagai alat pencatat energi, dan
- modul komunikasi AMR yang mengirimkan data pengukuran secara otomatis ke server pusat PLN.

Prinsip kerja sistem ini adalah arus dan tegangan yang telah diturunkan oleh CT dan VT masuk ke terminal pengukuran pada kWh meter digital. Selanjutnya, data hasil pengukuran (arus, tegangan, faktor daya, dan energi) dikirim melalui modul komunikasi seperti GSM/GPRS, PLC (Power Line Carrier), atau jaringan internet ke server AMR di unit PLN. Dengan demikian, petugas tidak perlu membaca meter secara manual karena seluruh data dapat dimonitor secara real-time dari pusat pengendali.

Menurut [15] dalam Jurnal Energi dan Sistem Kelistrikan, pengawatan CT dan VT yang sesuai standar sangat penting untuk menjamin akurasi pembacaan energi listrik, terutama dalam sistem pengukuran tak langsung yang terhubung ke AMR. Kesalahan dalam pemasangan CT atau polaritas kabel dapat menyebabkan ketidaksesuaian data konsumsi energi yang tercatat di sistem [15].

Oleh karena itu, pemahaman terhadap diagram pengawatan dan arah arus pada CT serta polaritas VT sangat penting dalam memastikan sistem AMR bekerja optimal. Selain itu, pemeliharaan berkala pada terminal pengukuran dan pengecekan rasio CT/VT juga menjadi bagian dari upaya menjaga keandalan sistem monitoring energi listrik di PLN UP3 Cikokol.



Gambar 2. 3 Diagram Pengawatan Pengukuran Tak Langsung

2.2.7 Diagram Fasor

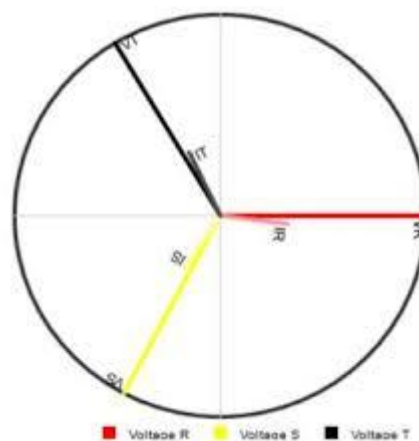
Diagram fasor merupakan representasi grafis dari hubungan antara arus dan tegangan dalam bentuk vektor pada sistem listrik bolak-balik (AC). Diagram ini digunakan untuk mempermudah analisis fase, besar, dan arah arus pada setiap fasa, khususnya pada sistem tiga fasa yang umum digunakan oleh pelanggan dengan daya besar di atas 197 KVA.

Dalam sistem pengukuran tak langsung, diagram fasor berperan penting untuk memastikan bahwa koneksi CT (*Current Transformer*) dan VT (*Voltage Transformer*) telah terpasang dengan benar. Posisi dan arah fasor arus harus sesuai dengan fasor tegangannya agar pembacaan energi aktif (kWh) dan reaktif (kVARh) pada kWh meter digital sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan.

Jika arah hubungan fasor tidak tepat (misalnya CT terbalik polaritas atau salah fasa), maka nilai energi yang tercatat oleh meter dapat berkurang, bahkan menunjukkan pembacaan negatif. Hal ini sering menjadi salah satu penyebab anomali pemakaian energi pada pelanggan besar, yang berdampak langsung terhadap susut non-teknis pada sistem distribusi.

Menurut [19] dalam Jurnal Keteknikan Energi dan Listrik Indonesia, penggunaan diagram fasor sangat membantu dalam proses komisioning dan inspeksi sistem pengukuran. Dengan analisis fasor, teknisi dapat memastikan bahwa sudut fasa antara arus dan tegangan sesuai dengan konfigurasi sistem (baik star maupun delta), sehingga pembacaan energi pada meter menjadi akurat dan stabil.

Selain itu, dalam penerapan AMR (Automatic Meter Reading), data tegangan dan arus dari setiap fasa yang dikirim ke server dapat divisualisasikan dalam bentuk fasor digital. Hal ini memungkinkan petugas PLN untuk mendeteksi adanya ketidakseimbangan beban atau kesalahan sambungan tanpa perlu melakukan pemeriksaan fisik secara langsung.



Gambar 2. 4 Diagram Fasor

2.2.8 Meter Elektronik (kWh Meter Digital)

Meter elektronik atau kWh meter digital adalah alat ukur energi listrik yang bekerja secara digital untuk menghitung dan merekam pemakaian energi pelanggan secara akurat dan real-time. Berbeda dengan meter analog, meter ini menggunakan sensor arus dan tegangan, serta mikrokontroler untuk mengolah data listrik dan menampilkannya melalui LCD display [20]

Meter elektronik umumnya digunakan pada pelanggan daya besar dengan daya di atas 197 KVA, karena mampu membaca parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya aktif, faktor daya, serta total energi secara detail.

Meter jenis ini dilengkapi dengan modul komunikasi (GSM/GPRS/RS485) yang memungkinkan integrasi dengan sistem AMR (Automatic Meter Reading), sehingga data pemakaian dapat dipantau dari jarak jauh tanpa pembacaan manual.

Keunggulannya antara lain :

- Akurasi pengukuran tinggi.
- Mampu mendeteksi anomali seperti kehilangan fasa atau arus balik.
- Merekam histori pemakaian secara otomatis.
- Efisien dalam pencatatan dan pengawasan konsumsi energi.

Penerapan meter elektronik di PLN UP3 Cikokol digunakan untuk memonitor pelanggan besar secara real-time, mendukung efisiensi operasional, serta mendeteksi dini kebocoran energi.

2.2.9 Automatic Meter Reading (AMR)

Automatic Meter Reading (AMR) merupakan sistem pembacaan dan pengumpulan data energi listrik secara otomatis dari kWh meter pelanggan tanpa perlu kunjungan petugas ke lapangan. Sistem ini memungkinkan pengambilan data konsumsi energi, profil beban, tegangan, arus, faktor daya, serta parameter kelistrikan lainnya secara real-time atau periodik melalui media komunikasi tertentu.

Menurut [2], sistem AMR meningkatkan efisiensi pencatatan energi listrik karena mampu meminimalkan kesalahan pembacaan manual dan mempercepat proses pengolahan data pelanggan tegangan menengah.

Pada pelanggan dengan daya di atas 197 kVA, penggunaan AMR menjadi penting karena konsumsi energi yang besar memerlukan pemantauan kontinu untuk menjaga keakuratan pencatatan dan pengendalian susut energi.

a. Prinsip Kerja AMR

Sistem AMR bekerja dengan mengirimkan data hasil pengukuran dari meter elektronik ke server pusat PLN melalui media komunikasi seperti GSM, GPRS, atau jaringan data RS485. Data yang dikirim mencakup tegangan, arus, daya, faktor daya, serta energi aktif dan reaktif pelanggan.

b. Komponen Utama AMR

- Meter Elektronik – Mengukur dan mencatat data kelistrikan.
- Modem Komunikasi – Mengirimkan data dari meter ke server.
- Server AMR / Database – Menyimpan dan mengelola data pelanggan.
- Dashboard Monitoring – Menampilkan data konsumsi energi secara visual bagi operator.

c. Parameter Yang Dapat Dimonitor Melalui AMR

Sistem AMR mampu merekam berbagai parameter kelistrikan, antara lain:

- Energi aktif (kWh)
- Energi reaktif (kVARh)
- Daya maksimum (kW max demand)
- Arus per fasa
- Tegangan per fasa
- Faktor daya ($\cos \phi$)
- Profil beban (load profile)

Load profile biasanya direkam dalam interval 15 menit atau 30 menit. Data ini sangat penting untuk analisis pemakaian energi dan evaluasi pola beban pelanggan.

Dalam penelitian ini, data real-time dari AMR digunakan sebagai dasar analisis konsumsi energi pelanggan daya di atas 197 kVA.

d. Keunggulan Sistem AMR

Beberapa keunggulan AMR dibandingkan pencatatan manual:

1. Mengurangi human error dalam pencatatan
2. Mempercepat proses penagihan
3. Memungkinkan pemantauan jarak jauh
4. Mendukung analisis beban secara real-time
5. Membantu identifikasi potensi kehilangan energi (losses)

Menurut [2], implementasi AMR pada pelanggan tegangan menengah dapat meningkatkan akurasi pencatatan energi serta membantu pengendalian susut non-teknis.

e. Keterbatasan Sistem AMR

Meskipun memiliki banyak keunggulan, sistem AMR juga memiliki beberapa keterbatasan:

- Ketergantungan pada jaringan komunikasi
- Potensi gangguan sinyal
- Biaya instalasi awal yang relatif tinggi
- Memerlukan integrasi sistem IT yang baik

Gangguan komunikasi dapat menyebabkan keterlambatan pengiriman data, namun data tetap tersimpan di memori meter dan dapat diunduh kembali setelah koneksi pulih.

f. Peran AMR Dalam Studi Pemakaian Energi

Dalam konteks penelitian ini, sistem AMR berperan sebagai sumber data utama untuk menganalisis:

- Pola konsumsi energi pelanggan
- Perbandingan pemakaian sebelum dan sesudah periode tertentu
- Evaluasi beban maksimum

- Monitoring faktor daya

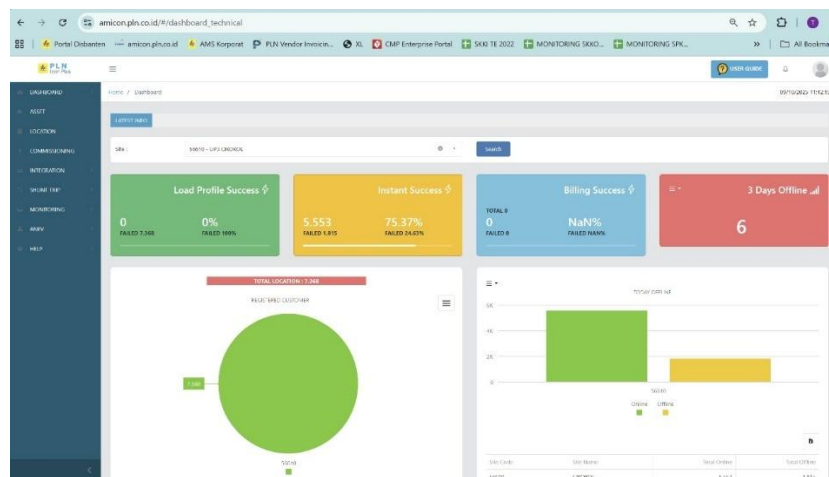
Data real-time yang diperoleh dari sistem AMR memberikan gambaran yang lebih akurat dibandingkan pencatatan manual, sehingga hasil analisis lebih valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis.

Sebagai mahasiswa D3 Teknologi Listrik, pemahaman terhadap sistem AMR sangat penting karena sistem ini merupakan bagian dari modernisasi sistem distribusi tenaga listrik dan digitalisasi layanan pelanggan di PLN.

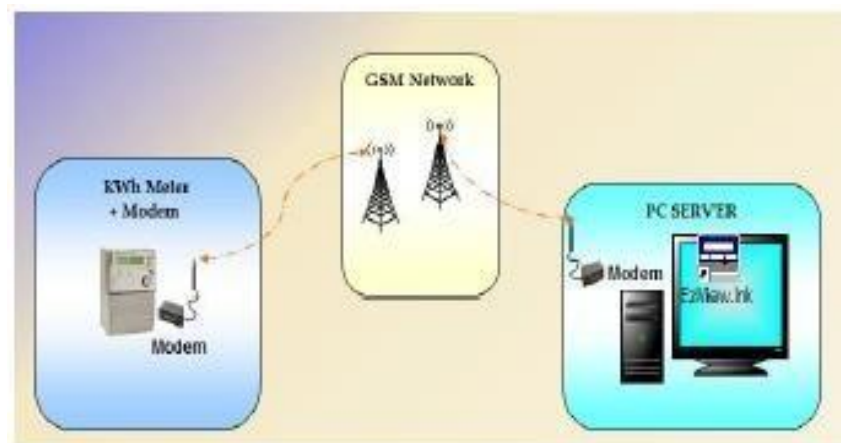
g. Manfaat Penerapan AMR

- Pemantauan real-time terhadap pemakaian energi pelanggan daya besar.
- Deteksi cepat terhadap anomali seperti kehilangan arus, beban tidak seimbang, atau indikasi kebocoran energi.
- Efisiensi operasional karena pembacaan meter dilakukan otomatis.
- Dasar analisis energi untuk evaluasi penurunan tagihan atau gangguan sistem.

PLN UP3 Cikokol menerapkan sistem AMR menggunakan aplikasi AMICON untuk pelanggan dengan daya di atas 197 KVA. Data penggunaan energi dapat dipantau langsung melalui dashboard AMR, yang menampilkan parameter utama (V, I, P, PF, kWh). Dengan sistem ini, petugas dapat melakukan monitoring dan analisis secara cepat apabila terjadi penurunan konsumsi yang tidak wajar, sehingga potensi susut non-teknis dapat ditekan.



Gambar 2. 5 Dashboard AMR dengan Aplikasi AMICON



Gambar 2. 6 Proses Sistem Pembacaan AMR

2.2.10 Parameter Analisis Beban

a. Jam Nyala

Jam nyala merupakan salah satu parameter penting dalam menganalisis pemakaian energi listrik pelanggan, khususnya pelanggan dengan daya besar. Istilah jam nyala menggambarkan berapa lama beban listrik digunakan pada kapasitas tertentu untuk menghasilkan jumlah energi listrik yang tercatat dalam satu periode tertentu (biasanya per bulan).

Secara matematis, jam nyala dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$\text{Jam Nyala (h)} = \frac{\text{Energi (kWh)}}{\text{Daya Maksimum (kW)}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dari persamaan tersebut, dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai jam nyala, semakin besar tingkat pemanfaatan daya tersambung oleh pelanggan. Sebaliknya, nilai jam nyala yang rendah dapat mengindikasikan adanya penurunan pemakaian energi yang tidak wajar, yang bisa disebabkan oleh anomali pemakaian, gangguan pada sistem pengukuran, atau bahkan potensi kehilangan energi (susut non-teknis).

Dalam konteks sistem AMR (Automatic Meter Reading), perhitungan jam nyala dapat dilakukan secara otomatis berdasarkan data energi yang dikirim dari kWh meter ke server PLN. Data ini memungkinkan petugas untuk menganalisis pola konsumsi energi pelanggan secara real-time dan mendeteksi perubahan signifikan dalam pola beban. Misalnya, apabila terdapat penurunan jam nyala secara drastis dari bulan ke bulan, hal tersebut dapat menjadi indikasi adanya ketidaksesuaian dalam pengukuran energi.

Menurut [21] dalam Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan Nasional, jam nyala merupakan indikator efektif untuk menilai tingkat efisiensi penggunaan energi listrik pelanggan industri dan bisnis besar. Dengan memantau jam nyala melalui sistem AMR, PLN dapat lebih cepat mengidentifikasi pelanggan yang mengalami anomali pemakaian serta meningkatkan keakuratan dalam perhitungan tagihan energi Listrik.

Dengan demikian, analisis jam nyala menjadi bagian penting dalam sistem monitoring berbasis AMR karena memberikan gambaran nyata mengenai efektivitas pemakaian energi listrik pelanggan besar di wilayah kerja PLN UP3 Cikokol.

b. Load Factor

Load factor menunjukkan tingkat pemanfaatan daya terhadap daya maksimum.

$$LF = \frac{\text{Energi}}{\text{Daya Maksimum} \times \text{Waktu}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.12)$$

Atau:

$$LF = \frac{\text{Average Load}}{\text{Peak Load}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Nilai load factor berkisar antara 0 sampai 1.

Interpretasi:

- LF mendekati 1 → penggunaan daya stabil dan efisien
- LF rendah → beban tidak stabil dan terdapat lonjakan beban puncak

Menurut [16], load factor yang rendah dapat mengindikasikan pemanfaatan daya yang kurang optimal serta potensi pemborosan energi.

Nilai load factor yang stabil menunjukkan sistem berjalan normal. Penurunan load factor secara signifikan dapat mengindikasikan gangguan sistem pengukuran atau perubahan pola konsumsi [22].

c. Load Profile

Load profile (profil beban) adalah grafik atau data yang menunjukkan variasi penggunaan daya listrik dalam periode waktu tertentu, biasanya dalam interval 15 menit, 30 menit, atau 1 jam. Data ini menggambarkan pola konsumsi energi pelanggan dari waktu ke waktu.

Pada sistem AMR, load profile direkam secara otomatis dan disimpan dalam database sehingga dapat dianalisis untuk mengetahui karakteristik pemakaian energi pelanggan.

Menurut [1], analisis load profile memungkinkan identifikasi pola beban puncak (peak load), beban dasar (base load), serta fluktuasi konsumsi energi yang dapat memengaruhi efisiensi sistem distribusi.

Dalam penelitian ini, load profile menjadi dasar utama untuk menganalisis pola pemakaian energi pelanggan daya di atas 197 kVA secara real-time.

- **Komponen Dalam Load Profile**

Beberapa parameter utama dalam load profile meliputi:

1. **Base Load (Beban Dasar)**

Beban minimum yang tetap digunakan pelanggan dalam periode tertentu.

2. **Peak Load (Beban Puncak)**

Beban maksimum yang terjadi pada waktu tertentu.

3. **Average Load (Beban Rata-rata)**

Nilai rata-rata daya selama periode pengamatan.

4. **Maximum Demand (MD)**

Daya maksimum tertinggi yang tercatat dalam periode tertentu (biasanya bulanan).

Data tersebut digunakan untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan energi dan kapasitas sistem.

d. Analisis Pola Beban Harian

Secara umum, pola beban pelanggan industri atau pelanggan daya besar dapat dibedakan menjadi:

1. Pola Beban Stabil

Daya relatif konstan sepanjang hari.

2. Pola Beban Fluktuatif

Terjadi variasi signifikan antara jam kerja dan non-jam kerja.

3. Pola Beban Puncak Tertentu

Lonjakan daya pada jam tertentu (misalnya jam produksi).

Dengan data AMR, analisis dapat dilakukan untuk mengetahui:

- Waktu terjadinya beban puncak
- Selisih antara beban dasar dan beban puncak
- Potensi perbaikan manajemen energi

Menurut [2], analisis pola beban berbasis AMR membantu dalam evaluasi efisiensi energi serta pengambilan keputusan pengelolaan daya pelanggan.

e. Hubungan Load Profile Dengan Studi Pemakaian Energi

Dalam penelitian ini, load profile digunakan untuk:

1. Membandingkan pola pemakaian sebelum dan sesudah periode tertentu
2. Mengidentifikasi perubahan karakteristik beban
3. Mengevaluasi kestabilan konsumsi energi
4. Menghitung load factor sebagai indikator efisiensi

Data load profile yang diperoleh dari AMR memungkinkan analisis yang lebih akurat dibandingkan metode pencatatan manual karena bersifat real-time dan terekam secara digital.

Sebagai mahasiswa D3 Teknologi Listrik, pemahaman terhadap analisis load profile penting karena berkaitan langsung dengan evaluasi pemakaian energi dan optimalisasi sistem distribusi tenaga listrik.

2.2.11 Faktor Daya ($\cos \phi$) dan Pengaruhnya terhadap Konsumsi Energi

2.2.11.1 Pengertian Faktor Daya

Faktor daya ($\cos \phi$) adalah perbandingan antara daya aktif (kW) dengan daya semu (kVA) dalam suatu sistem tenaga listrik.

Secara matematis:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \dots \dots \dots (2.14)$$

Keterangan:

- P = Daya aktif (kW)
- S = Daya semu (kVA)

Nilai faktor daya berkisar antara 0 sampai 1.

- $\cos \phi$ mendekati 1 $\rightarrow$ sistem efisien
- $\cos \phi$ rendah $\rightarrow$ sistem kurang efisien

Menurut [1], faktor daya yang rendah menyebabkan arus sistem meningkat sehingga menimbulkan rugi-rugi daya yang lebih besar pada jaringan distribusi.

2.2.11.2 Hubungan Daya Aktif, Reaktif, dan Semu

Dalam sistem tiga fasa berlaku:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \dots\dots\dots (2.15)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin\phi \dots\dots\dots (2.16)$$

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots (2.17)$$

Keterangan:

- P = Daya aktif (kW)
- Q = Daya reaktif (kVAR)
- S = Daya semu (kVA)
- V = Tegangan (Volt)
- I = Arus (Ampere)

Hubungan ketiganya dapat digambarkan dalam segitiga daya.

Jika faktor daya rendah:

- Arus meningkat
- Rugi-rugi I^2R meningkat
- Beban pada CT dan sistem distribusi bertambah

2.2.11.3 Dampak Faktor Daya Rendah

Beberapa dampak faktor daya rendah antara lain:

1. Arus sistem lebih besar
2. Rugi-rugi daya meningkat
3. Penurunan tegangan
4. Kapasitas trafo tidak optimal

5. Potensi denda kVARh pada pelanggan industry

Menurut [2], monitoring faktor daya melalui sistem AMR memungkinkan evaluasi efisiensi penggunaan energi dan deteksi beban reaktif berlebih.

2.2.11.4 Hubungan Faktor Daya Dengan Studi Penelitian

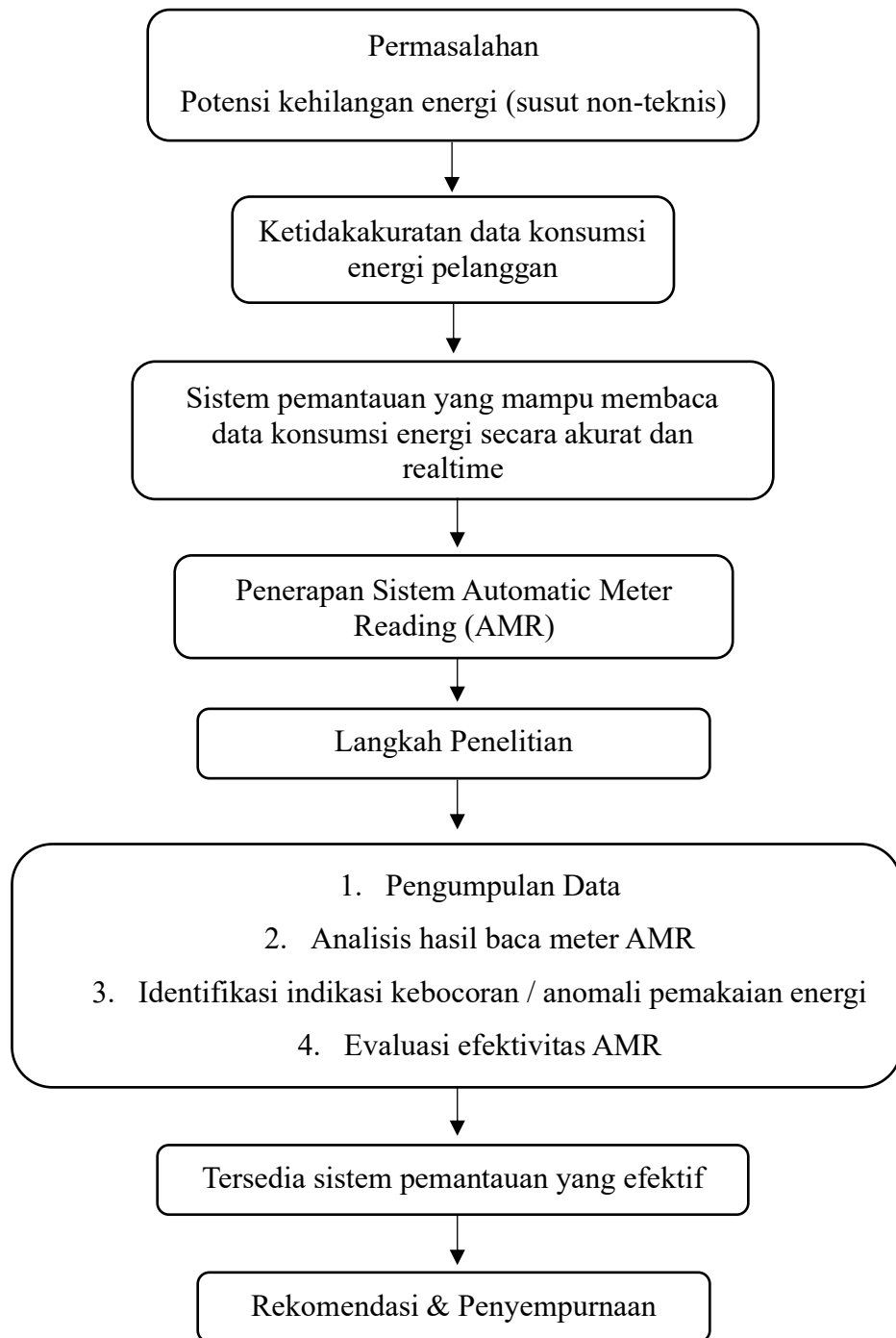
Dalam penelitian ini, data faktor daya diperoleh dari sistem AMR. Analisis dilakukan untuk:

- Mengetahui stabilitas $\cos \phi$ pelanggan
- Mengidentifikasi potensi pemborosan energi
- Mengevaluasi kebutuhan perbaikan faktor daya

Faktor daya yang stabil dan mendekati 1 menunjukkan pemanfaatan energi yang efisien dan sistem distribusi yang optimal.

Sebagai mahasiswa D3 Teknologi Listrik, pemahaman mengenai faktor daya penting karena berkaitan langsung dengan efisiensi energi, perhitungan daya, dan analisis beban pelanggan daya besar.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 7 Kerangka Pemikiran

Berdasarkan kerangka pemikiran yang telah diuraikan sebelumnya, terdapat beberapa hal yang perlu dipersiapkan agar penelitian mengenai “Monitoring Pemakaian Energi Pelanggan Daya di Atas 197 KVA Secara Realtime dengan Menggunakan AMR

(Automatic Meter Reading) di PT PLN (Persero) UP3 Cikokol” dapat dilaksanakan secara sistematis, terukur, dan terarah. Persiapan ini meliputi aspek data, perangkat analisis, serta dukungan metodologis sebagai berikut:

1. Studi Literatur dan Referensi

- Mengumpulkan referensi dari jurnal, buku, serta dokumen teknis PLN yang terkait dengan Automatic Meter Reading (AMR), sistem monitoring energi listrik, dan pengelolaan pelanggan besar.
- Mempelajari standar dan pedoman seperti SPLN, IEEE, IEC, serta SOP PLN tentang implementasi sistem AMR di jaringan distribusi menengah.
- Melakukan telaah literatur untuk memahami teori dasar mengenai monitoring energi, integrasi sistem komunikasi meter ke server pusat, serta analisis data pemakaian energi secara realtime.

2. Data Teknis dan Lapangan

- Data pelanggan daya di atas 197 KVA (I3 dan B3) di wilayah kerja PT PLN (Persero) UP3 Cikokol.
- Data pelanggan pembanding sebagai sampel implementasi sistem AMR.
- Data teknis kWh meter pelanggan besar, termasuk tipe meter AMR, protokol komunikasi (GPRS, RF, PLC), serta data pembacaan energi (kWh, kVARh, demand).
- Data dari server AMR PLN UP3 Cikokol yang mencakup hasil pembacaan otomatis harian, status komunikasi, serta alarm ketidaknormalan beban.

3. Peralatan analisis dan perhitungan

- Dashboard AMR (Automatic Meter Reading) untuk memantau data konsumsi energi secara realtime.
- Database historis AMR untuk menganalisis pola beban pelanggan, faktor daya, dan tren konsumsi energi per waktu (harian, mingguan, bulanan).
- Penggunaan parameter efisiensi seperti:
 - Load Factor (LF) untuk melihat kestabilan beban pelanggan,

- Demand Factor (DF) untuk mengetahui tingkat pemanfaatan daya terpasang,
- Power Factor ($\cos \phi$) untuk menganalisis kualitas daya pelanggan besar.
- Analisis gangguan komunikasi AMR, tingkat keberhasilan pembacaan otomatis, dan efektivitas sistem dalam menekan kebutuhan pembacaan manual.

4. Metodologi Analisis

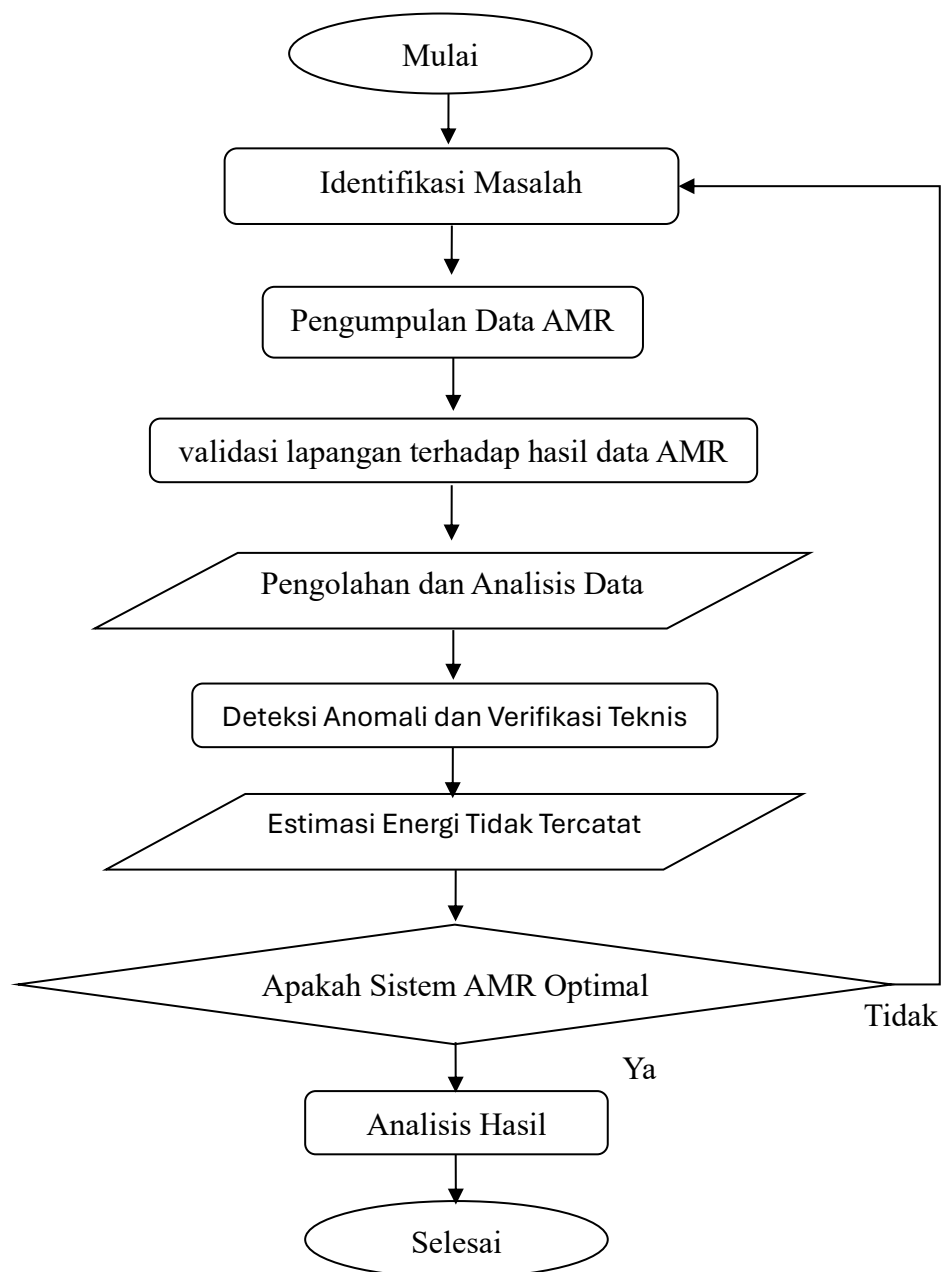
- Pendekatan deskriptif–kuantitatif dengan menampilkan hasil monitoring energi melalui data AMR pelanggan besar secara realtime dan historis.
- Melakukan analisis perbandingan antara hasil pembacaan AMR dengan pembacaan manual (cross-check lapangan) untuk mengukur akurasi dan efektivitas sistem.
- Mengidentifikasi pelanggan dengan pola konsumsi abnormal (lonjakan daya, PF rendah, konsumsi tidak stabil) untuk mengetahui potensi inefisiensi energi.
- Menganalisis tingkat keandalan sistem AMR, meliputi availability server, data loss rate, dan delay waktu pengiriman data.
- Mengevaluasi manfaat implementasi AMR terhadap efisiensi kerja PLN, kecepatan deteksi anomali beban, serta transparansi pemakaian energi pelanggan besar.

5. Sumber daya pendukung

- Akses terhadap server AMR dan dashboard monitoring pelanggan besar di PLN UP3 Cikokol.
- Bimbingan teknis dan wawancara dengan Petugas AMR, Supervisor Transaksi Energi, dan Bagian Teknik Distribusi untuk validasi data.
- Dukungan perangkat keras seperti modem AMR, kWh meter digital berprotokol RS485/GSM, serta jaringan komunikasi data PLN.
- Penggunaan literatur dan data internal PLN sebagai dasar evaluasi penerapan AMR terhadap sistem monitoring pelanggan besar.

Dengan adanya persiapan berupa data teknis pelanggan, perangkat AMR, sistem komunikasi, serta kajian literatur, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan analisis yang akurat dan komprehensif mengenai efektivitas implementasi AMR di PLN UP3 Cikokol.

Penelitian ini juga diharapkan memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan efisiensi, akurasi, dan transparansi monitoring energi listrik pelanggan besar, sekaligus mendukung transformasi digital PLN menuju sistem distribusi yang lebih andal dan modern.



Gambar 2. 8 Flowchat Penelitian

Berdasarkan diagram alur penelitian pada Gambar di atas, proses penelitian mengenai Monitoring Pemakaian Energi Pelanggan Daya di Atas 197 kVA Secara Realtime dengan Menggunakan AMR (Automatic Meter Reading) di PLN UP3 Cikokol dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang terstruktur. Penelitian diawali dengan identifikasi masalah, yaitu mengkaji kondisi aktual sistem pemantauan energi pelanggan dengan daya di atas 197 kVA serta potensi ketidaktepatan pencatatan energi listrik akibat faktor teknis maupun non-teknis. Tahapan ini bertujuan untuk menentukan fokus penelitian dan batasan permasalahan yang akan dikaji.

Selanjutnya dilakukan pengumpulan data AMR dalam hal ini menggunakan aplikasi AMICON, yaitu pengambilan data hasil pembacaan meter elektronik pelanggan melalui sistem Automatic Meter Reading. Data ini mencakup parameter tegangan, arus, daya aktif (kW), serta energi (kWh) dengan interval tertentu (misalnya setiap 15–30 menit). Setelah data terkumpul, dilakukan validasi lapangan terhadap hasil data AMR untuk memastikan kesesuaian antara hasil pembacaan sistem dengan kondisi aktual instalasi pelanggan. Validasi ini mencakup pemeriksaan Current Transformer (CT), Voltage Transformer (VT), konektor, serta kondisi meter pelanggan.

Tahap berikutnya adalah pengolahan dan analisis data, di mana data AMR diolah menggunakan pendekatan kuantitatif untuk memperoleh nilai jam nyala (*hours use*), load faktor, dan tren konsumsi energi. Analisis ini berfungsi untuk mengidentifikasi penyimpangan pola konsumsi yang dapat mengindikasikan adanya anomali.

Apabila ditemukan ketidakwajaran data, dilakukan tahap deteksi anomali dan verifikasi teknis guna memastikan penyebabnya, apakah berasal dari kesalahan alat ukur, gangguan teknis, atau indikasi kehilangan energi (*energy loss*).

Selanjutnya dilakukan estimasi energi tidak tercatat, yaitu menghitung besarnya energi yang hilang akibat anomali menggunakan perbandingan antara konsumsi energi normal dan konsumsi energi pada periode gangguan. Perhitungan ini memberikan gambaran kuantitatif tentang dampak kehilangan energi terhadap pendapatan PLN.

Tahapan terakhir adalah evaluasi optimasi sistem AMR, untuk menilai apakah sistem AMR telah berfungsi optimal dalam mendeteksi dan mencegah potensi kehilangan energi. Apabila hasil analisis menunjukkan sistem belum optimal, maka dilakukan pengkajian ulang terhadap konfigurasi sistem dan perangkat lapangan. Sebaliknya,

apabila sistem dinilai optimal, dilakukan analisis hasil secara menyeluruh untuk menarik kesimpulan penelitian.