

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Pengukuran Alat Pengukur dan Pembatas Tenaga Listrik

Sistem Pengukuran pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP) merupakan integrasi perangkat teknis yang berfungsi sebagai gerbang transaksi energi antara penyedia tenaga listrik dan konsumen. Sistem ini tidak hanya bertugas menghitung jumlah energi yang digunakan, tetapi juga berperan sebagai pengaman dan pembatas beban agar sesuai dengan kontrak daya yang disepakati.

Sistem Pengukuran pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP) merupakan kesatuan teknis yang dirancang untuk mengintegrasikan fungsi pengawasan energi dengan pembatasan beban secara akurat. Komponen utamanya adalah kWh meter elektronik yang bekerja dengan prinsip pengolahan data digital dari hasil penginderaan arus dan tegangan secara real-time. Di dalam perangkat ini, sensor shunt atau current transformer serta pembagi tegangan menangkap parameter fisik listrik untuk dikonversi menjadi unit energi aktif (kWh). Sesuai dengan standar IEC 62053-21, sistem ini memiliki klasifikasi akurasi Kelas 1 yang menuntut batas kesalahan pengukuran tidak melebihi kurang lebih 1%. Hal ini sangat krusial karena setiap deviasi kecil pada akurasi akan berakumulasi menjadi kerugian pendapatan yang signifikan bagi perusahaan atau ketidakadilan bagi pelanggan.

Selain aspek pengukuran, sistem APP mengandalkan Miniature Circuit Breaker (MCB) sebagai instrumen pembatas sekaligus pengaman sirkuit. MCB dipasang secara seri pada jalur fasa untuk memastikan bahwa daya yang dikonsumsi pelanggan tidak melampaui batas kontrak yang telah ditentukan oleh penyedia listrik. Jika terjadi beban berlebih atau

hubungan singkat, MCB akan memutuskan aliran secara otomatis guna mencegah kerusakan pada instalasi bangunan. Pengaturan seluruh jalur distribusi ini dilakukan melalui sebuah Terminal Blok yang menjadi titik temu yang aman bagi kabel fasa dan netral dari jaringan PLN sebelum diteruskan menuju instalasi dalam rumah pelanggan.

Aspek penting lainnya dalam sistem ini adalah mekanisme keamanan melalui sistem Pentanahan (Arde) yang terintegrasi. Kabel arde tidak hanya berfungsi membuang arus bocor ke bumi demi keselamatan penghuni, tetapi juga berperan sebagai referensi bagi fitur anti-tamper pada kWh meter. Melalui konfigurasi ini, meteran dapat mendeteksi adanya ketidakseimbangan arus antara jalur fasa dan netral yang sering kali menjadi indikasi adanya upaya manipulasi atau kerusakan isolasi.

2.1.2 Pengertian kWh Meter

KWh meter adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur dan mencatat jumlah energi listrik yang dikonsumsi oleh pelanggan dalam satuan kilowatt-jam (kWh). Energi listrik yang terukur merupakan hasil perkalian antara besarnya daya listrik yang digunakan (kilowatt) dengan lamanya waktu pemakaian (jam). Dengan demikian, kWh meter mampu merekam total pemakaian energi listrik secara akumulatif selama periode tertentu, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan biaya pemakaian listrik. Keberadaan kWh meter menjadi komponen utama dalam sistem pelayanan tenaga listrik.



SMI-810 V3
SPLN D3.009-1: 2020

Gambar 2.1 KWh Meter Satu Fasa Prabayar

Dalam operasinya, kWh meter bekerja dengan prinsip pengukuran arus dan tegangan listrik yang mengalir ke beban pelanggan. Pada kWh meter konvensional atau analog, pengukuran dilakukan melalui perputaran piringan aluminium yang kecepataannya sebanding dengan besar daya yang digunakan. Sementara itu, pada kWh meter digital dan Prabayar, pengukuran dilakukan secara elektronik dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi serta dilengkapi dengan sistem pencatatan dan pengolahan data yang lebih modern. Perkembangan teknologi kWh meter ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan pengukuran, mengurangi kesalahan pencatatan, serta meminimalkan potensi kecuran

KWh meter juga memiliki peran penting dalam sistem transaksi energi listrik antara pelanggan dan penyedia tenaga listrik, khususnya PT PLN (Persero). Data pemakaian energi yang dicatat oleh kWh meter menjadi dasar dalam penagihan listrik pada sistem pascabayar maupun pengurangan saldo energi pada sistem Prabayar. Oleh karena itu, tingkat akurasi kWh meter sangat mempengaruhi keadilan transaksi, baik bagi pelanggan maupun bagi perusahaan. kWh meter yang tidak akurat, terutama yang telah melewati usia teknis pemakaian, berpotensi menyebabkan kerugian, baik berupa kelebihan tagihan bagi pelanggan maupun kehilangan

Selain sebagai alat ukur dan transaksi, kWh meter juga berfungsi sebagai sarana pengendalian dan evaluasi pemakaian energi listrik. Melalui data yang dihasilkan, penyedia tenaga listrik dapat menganalisis pola konsumsi pelanggan, mendeteksi pemakaian tidak normal, serta merencanakan kebijakan peremajaan atau penertiban alat ukur. Dengan demikian, kWh meter tidak hanya berfungsi sebagai alat pencatat pemakaian energi, tetapi juga sebagai instrumen strategis dalam pengelolaan sistem kelistrikan yang efisien, andal, dan berkelanjutan.

Tabel 2.1 Merek / Type KWh Meter Satu Phasa Prabayar

Merk / Tipe	
Cannet	DDSY832
Glomet	GX-600
	GX-669
Hexing	HXE-116
Hexing	HXE-118 KP
Itron	EM-512 JAVA
Itron	EM-512
Itron	EM-513
Melcoinda	MTS-101
	MTS-125
Sanxing	CSI11
Smart Meter	SMI-810
Star	DDSY23S

Secara umum, perangkat-perangkat ukur seperti Cannet DDSY832, Glomet (GX-600 dan GX-669), serta Hexing (HXE-116 dan HXE-118 KP) merupakan jenis kWh meter elektronik satu phasa yang menggunakan teknologi Standard Transfer Specification (STS). Perangkat-perangkat ini dirancang khusus untuk sistem prabayar, di mana pelanggan melakukan input energi melalui kode token 20 digit. Merk seperti Hexing dan Glomet telah lama menjadi mitra utama PT PLN (Persero) karena kemampuannya dalam menyediakan fitur anti-tamper (anti-manipulasi) yang cukup handal untuk mencegah kehilangan energi akibat faktor non-teknis. Secara teknis, seri-seri ini memiliki tingkat presisi yang stabil, namun tetap memerlukan pengawasan berkala terkait performa komponen elektroniknya seiring dengan bertambahnya masa pakai.

Selanjutnya, merk Itron (EM-512, EM-512 JAVA, dan EM-513) serta Melcoinda (MTS-101 dan MTS-125) dikenal di industri ketenagalistrikan sebagai perangkat dengan durabilitas tinggi dan standar manufaktur yang ketat. Itron, sebagai pemain global, menghadirkan seri EM yang memiliki manajemen memori data yang baik untuk menyimpan riwayat penggunaan energi, sementara Melcoinda yang mengadopsi teknologi Mitsubishi menawarkan keunggulan pada akurasi pengukuran di berbagai kondisi beban listrik. Penggunaan merk-merk ini dalam sistem distribusi bertujuan untuk menjamin bahwa setiap unit energi yang dikonsumsi oleh pelanggan tercatat secara akurat, sehingga meminimalisir potensi kerugian pendapatan yang disebabkan oleh deviasi alat ukur.

Di sisi lain, varian dari Sanxing (CSI11), Smart Meter (SMI-810), dan Star (DDSY23S) melengkapi keberagaman jenis alat ukur yang digunakan di lapangan dengan keunggulan pada sisi antarmuka pengguna dan kecepatan respons relay. Smart Meter SMI-810, misalnya, menekankan pada integrasi komunikasi data yang memudahkan identifikasi status meter secara mandiri, sedangkan Star DDSY23S dikenal karena ketangguhan saklar internalnya dalam melakukan pemutusan dan penyambungan arus (trip) secara presisi. Keberagaman merk dan tipe ini menjadi variabel yang sangat penting dalam penelitian, karena masing-masing tipe memiliki karakteristik teknis dan sensitivitas yang berbeda-beda dalam menghadapi beban listrik yang berfluktuasi di lingkungan pelanggan.

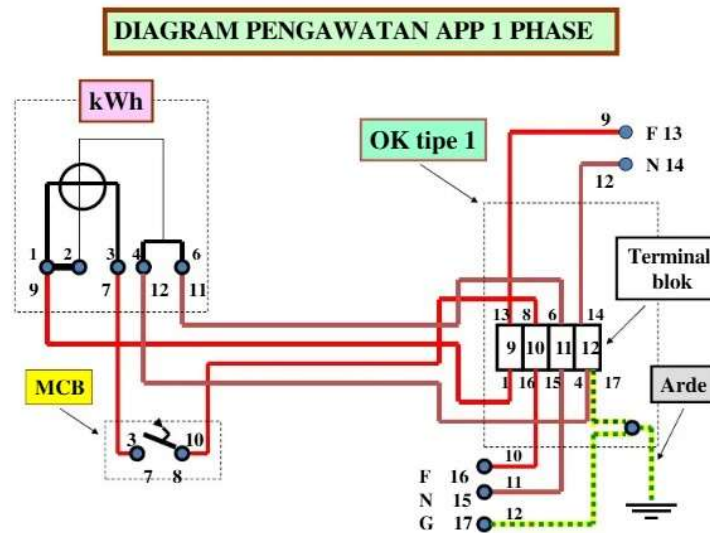
2.1.3 Prinsip Kerja kWh Meter Prabayar Satu Phasa

KWh meter prabayar satu phasa bekerja sebagai perangkat elektronik statis yang mengintegrasikan parameter kelistrikan secara real-time. Secara teknis, alat ini melakukan penginderaan (sensing) terhadap dua parameter utama, yaitu tegangan melalui pembagi tegangan (potential divider) dan arus melalui sensor arus (biasanya berupa shunt atau current transformer). Hasil penginderaan ini berupa sinyal analog yang kemudian diproses oleh chip Analog-to-Digital Converter (ADC) menjadi data digital. Data tersebut dikalikan untuk mendapatkan nilai daya aktif sesuai dengan rumus:

$$E=V \times I \times \cos\phi \times t \dots\dots\dots(1)$$

Nilai daya ini kemudian diintegrasikan terhadap waktu (t) untuk menghasilkan nilai energi listrik (E) dalam satuan Joule, yang kemudian dikonversi ke dalam satuan kiloWatt-hour (kWh). Akurasi pada tahap ini sangat krusial; jika sensor mengalami degradasi atau terdapat gangguan pada komponen kapasitor pembagi tegangan, maka nilai V atau I yang terbaca menjadi tidak presisi, yang secara langsung akan memengaruhi nilai pendapatan energi yang tercatat.

Berbeda dengan meteran pascabayar, kWh meter prabayar dilengkapi dengan unit manajemen memori dan sistem kendali beban. Inti dari sistem ini adalah protokol STS (Standard Transfer Specification), sebuah standar global yang memungkinkan pengiriman data token secara aman melalui 20 digit angka terenkripsi. Ketika pelanggan memasukkan token, mikrokontroler di dalam meteran akan melakukan dekripsi kode untuk memvalidasi jumlah kWh yang dibeli. Saldo energi ini disimpan dalam memori non-volatil (EEPROM) agar data tetap terjaga meskipun terjadi mati lampu. Selama penggunaan, mikrokontroler akan secara kontinu melakukan pengurangan (decrement) pada saldo energi yang tersimpan berdasarkan akumulasi konsumsi daya yang terukur oleh sensor.



Gambar 2.2 Diagram Pengawatan APP 1 Phase

Sistem pengawatan ini menggambarkan integrasi antara jaringan distribusi PLN dengan instalasi pelanggan melalui perangkat Alat Pembatas dan Pengukur (APP). Komponen pertama yang menjadi inti sistem adalah kWh Meter Elektronik Prabayar, yang berfungsi sebagai titik transaksi energi. Berdasarkan diagram, kabel fasa dari jaringan PLN masuk ke terminal 1 dan keluar melalui terminal 2, sedangkan kabel netral masuk ke terminal 4 dan keluar di terminal 6. Di dalam perangkat ini, terdapat rangkaian sensor yang secara kontinu menghitung perkalian tegangan, arus, dan faktor daya untuk menentukan konsumsi energi dalam satuan kWh. Selain itu, kWh meter ini dilengkapi dengan latching relay internal yang bertindak sebagai sakelar pemutus otomatis apabila saldo token habis atau terdeteksi adanya pelanggaran keamanan.

Setelah melewati proses pengukuran di kWh meter, kabel fasa diteruskan menuju MCB (Miniature Circuit Breaker). Komponen ini dipasang secara seri pada jalur fasa (melalui terminal 3 dan keluar di terminal 10 pada diagram) untuk menjalankan fungsi ganda sebagai pembatas arus sesuai kontrak daya pelanggan dan sebagai pelindung beban lebih. Penempatan MCB setelah kWh meter memastikan bahwa setiap lonjakan arus yang

melebihi kapasitas akan diputus secara mekanis sebelum merusak komponen elektronik meteran atau kabel instalasi di dalam rumah. Hal ini menjadi krusial dalam menjaga keandalan sistem kelistrikan serta mencegah terjadinya kebakaran akibat overheating pada penghantar.

Komponen pendukung lainnya adalah Terminal Blok dan sistem Arde (Pentanahan). Terminal blok berfungsi sebagai pusat distribusi kabel yang memastikan seluruh koneksi antara kabel input dari jaringan luar dan kabel output menuju beban tersambung secara kokoh dan terisolasi dengan baik. Sementara itu, sistem Arde (kabel hijau-kuning) dihubungkan pada terminal 17 dan ditanam ke bumi melalui batang tembaga. Keberadaan arde dalam sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai proteksi terhadap tegangan sentuh pada bodi alat listrik, tetapi juga menjadi referensi bagi kWh meter prabayar untuk mendeteksi adanya ketidakseimbangan arus (arus bocor) yang bisa mengindikasikan adanya upaya manipulasi atau kerusakan isolasi pada instalasi pelanggan.

2.1.4 Akurasi Pengukuran Energi

Akurasi pengukuran menunjukkan tingkat ketepatan hasil pengukuran suatu alat ukur terhadap nilai sebenarnya. Dalam konteks kWh meter, akurasi pengukuran dinyatakan sebagai selisih atau penyimpangan antara energi listrik yang tercatat oleh kWh meter dengan energi listrik aktual yang sebenarnya digunakan oleh beban. Besarnya penyimpangan tersebut umumnya dinyatakan dalam bentuk persentase error, yang diperoleh dari perbandingan antara nilai energi terukur dan nilai energi acuan atau standar. Semakin kecil nilai error yang dihasilkan, maka semakin tinggi tingkat akurasi kWh meter tersebut.

Akurasi pengukuran kWh meter dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang berasal dari kondisi internal alat ukur maupun dari faktor eksternal lingkungan dan sistem kelistrikan. Salah satu faktor utama adalah usia kWh meter. kWh meter yang telah beroperasi dalam jangka waktu lama cenderung mengalami penurunan kinerja akibat

keausan komponen, baik pada jenis elektromekanis maupun elektronik. Komponen yang menua dapat menyebabkan respons pengukuran menjadi tidak stabil sehingga hasil pencatatan energi menjadi menyimpang dari nilai sebenarnya. Faktor berikutnya adalah kualitas kalibrasi. Kesalahan dalam proses kalibrasi atau kalibrasi yang tidak dilakukan secara berkala dapat mengakibatkan penyimpangan hasil pengukuran, sehingga kWh meter tidak lagi bekerja sesuai dengan standar yang ditetapkan.

Selain itu, kondisi tegangan dan arus listrik yang tidak stabil juga dapat memengaruhi akurasi pengukuran. Fluktuasi tegangan, beban yang berubah-ubah, serta adanya gangguan harmonisa dapat menyebabkan kesalahan dalam proses pengukuran energi listrik. Faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan turut berpengaruh terhadap kinerja kWh meter, khususnya pada meter berbasis elektronik. Suhu yang terlalu tinggi atau kelembapan yang berlebihan dapat memengaruhi sensitivitas sensor dan rangkaian elektronik di dalam meter, sehingga berdampak pada ketepatan hasil ukur.

Berdasarkan standar internasional IEC 62053-21:2003, kWh meter kelas 1 memiliki batas toleransi kesalahan pengukuran sebesar $\pm 1\%$ pada kondisi beban nominal. Standar ini menjadi acuan dalam menilai apakah kWh meter masih layak digunakan atau perlu dilakukan penggantian. Apabila nilai persentase error pengukuran melebihi batas toleransi yang ditetapkan, maka kWh meter tersebut dikategorikan tidak akurat dan berpotensi menimbulkan kerugian, baik bagi penyedia tenaga listrik maupun pelanggan.

Dalam penelitian ini, tingkat akurasi kWh meter dianalisis dengan cara menghitung persentase error pengukuran untuk masing-masing kWh meter sebelum dan sesudah dilakukan penggantian. Perhitungan error dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran kWh meter terhadap nilai energi acuan yang diperoleh dari alat ukur standar. Selanjutnya, hasil persentase error tersebut dibandingkan dengan ketentuan standar IEC 62053-21 untuk menentukan tingkat akurasi kWh meter. Melalui metode ini, dapat

diketahui sejauh mana penggantian kWh meter berpengaruh terhadap peningkatan akurasi pengukuran energi listrik serta dampaknya terhadap keandalan sistem transaksi energi.

2.1.5 Penggantian KWh Meter

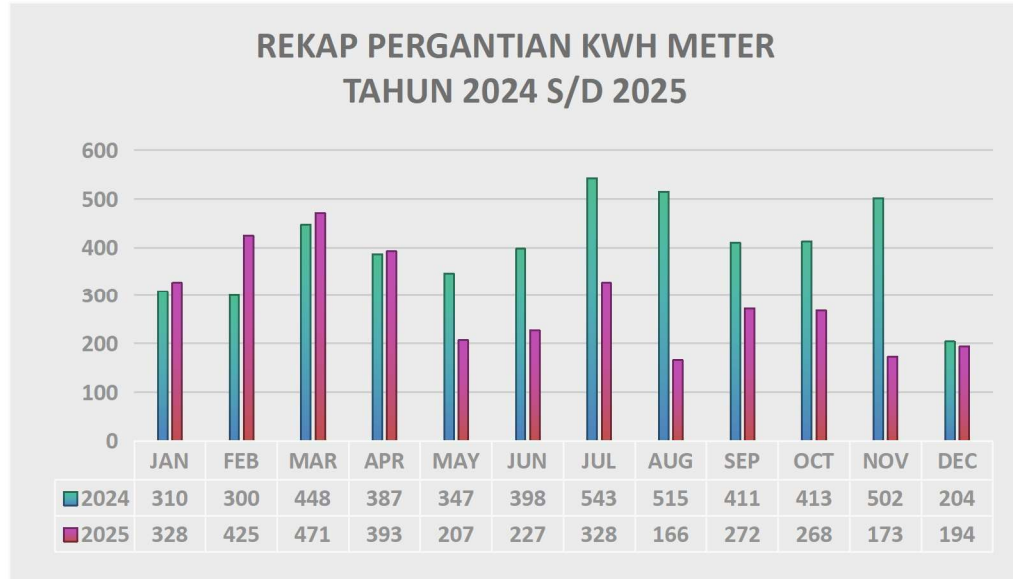
Penggantian kWh meter merupakan suatu proses penggantian alat ukur energi listrik yang lama dengan kWh meter baru yang dilakukan oleh PT PLN (Persero) dengan tujuan untuk menjaga keandalan dan akurasi pengukuran energi listrik. Penggantian ini dapat dilakukan karena berbagai faktor, baik faktor teknis, administratif, maupun dalam rangka peningkatan kualitas pelayanan kepada pelanggan. Secara teknis, kWh meter yang telah beroperasi dalam jangka waktu lama berpotensi mengalami penurunan akurasi akibat keausan komponen internal, kerusakan mekanis atau elektronik, serta pengaruh kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Selain itu, perkembangan teknologi dan penerapan standar pengukuran terbaru juga menjadi alasan penting dilakukannya penggantian kWh meter agar sistem pengukuran energi listrik tetap sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

KWh meter memiliki fungsi utama sebagai alat ukur untuk mencatat jumlah energi listrik yang digunakan oleh pelanggan dalam satuan kilowatt-jam (kWh). Data hasil pengukuran tersebut menjadi dasar dalam proses transaksi energi listrik antara pelanggan dan PT PLN (Persero), baik pada sistem pascabayar maupun prabayar. Apabila kWh meter tidak bekerja secara akurat, maka akan terjadi ketidaksesuaian antara energi listrik yang tercatat dengan energi yang sebenarnya dikonsumsi. Kondisi ini dapat menimbulkan kerugian, baik bagi perusahaan berupa menurunnya pendapatan energi akibat under-registration, maupun bagi pelanggan akibat terjadinya over-registration yang menyebabkan beban biaya listrik menjadi tidak wajar.



Gambar 2.3 Pergantian kWh meter

Dari gambar diatas di Unit Layanan Pelanggan (ULP) Toboali, kegiatan penggantian kWh meter merupakan bagian dari upaya berkelanjutan dalam meningkatkan keandalan sistem pengukuran dan pelayanan kelistrikan. Penggantian kWh meter di ULP Toboali umumnya dilakukan terhadap meter yang telah melewati usia teknis pemakaian, terindikasi mengalami penyimpangan akurasi, rusak secara fisik, atau tidak lagi sesuai dengan standar teknis yang ditetapkan oleh PLN dan regulasi ketenagalistrikan. Selain itu, penggantian juga dilakukan dalam rangka mendukung program modernisasi sistem kelistrikan, seperti migrasi dari kWh meter pascabayar ke kWh meter prabayar guna meningkatkan transparansi dan kemudahan bagi pelanggan..



Gambar 2.4 Rekap Pergantian KWH Meter Tahun 2024 s/d 2025

Dari grafik diatas menyajikan perbandingan data volume pemeliharaan alat ukur melalui "Rekap Pergantian kWh Meter Tahun 2024 s/d 2025". Berdasarkan tren yang terlihat, aktivitas pergantian kWh meter pada tahun 2024 menunjukkan intensitas yang sangat tinggi, terutama pada semester kedua, dengan puncak tertinggi terjadi pada bulan Juli sebanyak 543 unit dan Agustus sebanyak 515 unit. Secara akumulatif, volume pergantian pada tahun 2024 terlihat jauh lebih dominan dan stabil di angka tinggi dibandingkan dengan tahun berikutnya. Memasuki tahun 2025, pola pergantian mengalami pergeseran yang cukup signifikan di mana aktivitas lebih terkonsentrasi pada awal tahun. Jumlah pergantian tertinggi di tahun 2025 tercatat pada bulan Maret dengan 471 unit, yang juga melampaui pencapaian pada bulan yang sama di tahun sebelumnya. Namun, setelah melewati bulan April, angka pergantian pada tahun 2025 mengalami tren penurunan yang tajam, dengan titik terendah terjadi pada bulan Agustus yang hanya mencapai 166 unit. Perbedaan pola antara kedua tahun ini mengindikasikan adanya perubahan kebijakan atau target operasional dalam program peremajaan kWh meter di lapangan. Bila dilihat pada penghujung tahun, kedua periode tersebut menunjukkan kecenderungan yang serupa, yakni terjadinya penurunan aktivitas pada bulan Desember. Pada bulan tersebut, angka pergantian

tercatat sebesar 204 unit untuk tahun 2024 dan 194 unit untuk tahun 2025. Secara keseluruhan, data ini memberikan gambaran bahwa program peremajaan kWh meter sebagai upaya menjaga akurasi pengukuran energi dan mengoptimalkan pendapatan perusahaan terus dilakukan secara fluktuatif setiap bulannya selama periode dua tahun tersebut.

Melalui pelaksanaan penggantian kWh meter di ULP Toboali, diharapkan tingkat akurasi pengukuran energi listrik dapat ditingkatkan sehingga potensi susut energi non-teknis dapat diminimalkan. Selain berdampak pada peningkatan pendapatan energi perusahaan, kegiatan ini juga memberikan manfaat langsung bagi pelanggan berupa kepastian dan keadilan dalam pencatatan pemakaian listrik. Dengan kWh meter yang baru dan lebih andal, pelanggan dapat memantau konsumsi energi secara lebih akurat, sementara PT PLN (Persero) dapat menjaga kualitas layanan serta kepercayaan masyarakat terhadap sistem pengelolaan energi listrik di wilayah kerja ULP Toboali.

2.1.6 Peremajaan kWh Meter.

Peremajaan kWh meter merupakan langkah strategis yang dilakukan oleh penyedia layanan listrik untuk mengganti alat pengukur energi lama yang sudah mengalami degradasi performa atau melampaui usia teknisnya dengan perangkat baru yang lebih akurat dan modern. Proses ini bukan sekadar pergantian fisik, melainkan upaya sistematis untuk menjaga integritas data pengukuran dan kesehatan finansial perusahaan.

Secara teknis, proses ini bertujuan untuk mengembalikan tingkat ketelitian pengukuran ke dalam standar Kelas 1 sesuai regulasi IEC 62053-21, yang menetapkan batas kesalahan maksimum sebesar kurang lebih 1%. Seiring bertambahnya usia peralatan, komponen internal seperti sensor arus dan pembagi tegangan cenderung mengalami degradasi akibat pengaruh suhu, kelembapan, dan beban non-linear, yang menyebabkan deviasi. Melalui peremajaan, ketidaksesuaian antara energi yang dikonsumsi secara riil dengan energi yang tercatat dapat diminimalisir, sehingga setiap unit listrik yang disalurkan kembali terukur secara presisi. Implementasi program ini di lapangan melibatkan

penggantian fisik dari meteran pascabayar atau meteran digital lama ke tipe prabayar berbasis protokol STS (Standard Transfer Specification). Langkah ini mencakup penataan ulang sistem pengawatan pada terminal blok, termasuk integrasi MCB sebagai pembatas daya dan penguatan jalur Arde (pentanahan) untuk mengaktifkan fitur keamanan anti-manipulasi. Berdasarkan data rekapitulasi tahun 2024 dan 2025, fluktuasi intensitas pergantian meteran menunjukkan komitmen perusahaan dalam mengoptimalkan pendapatan melalui pembersihan susut non-teknis yang disebabkan oleh kerusakan atau kelemahan alat ukur lama. Dengan demikian, peremajaan kWh meter tidak hanya berfungsi sebagai pembaruan infrastruktur, tetapi juga sebagai instrumen vital dalam menjaga integritas sistem transaksi energi dan transparansi layanan kepada pelanggan.

2.1.7 Analisa Pengukuran terhadap Pendapatan Energi.

Pengukuran merupakan pilar utama dalam integritas sistem transaksi energi listrik, mengingat fungsinya sebagai penentu validitas data konsumsi yang berkorelasi langsung dengan pendapatan finansial perusahaan penyedia listrik. Tingkat ketelitian ini merepresentasikan kemampuan teknis kWh meter dalam merekam setiap unit energi yang digunakan pelanggan agar sesuai dengan nilai fisik yang sebenarnya mengalir dalam jaringan. Berdasarkan standar internasional IEC 62053-21, perangkat ukur statis kelas 1 diwajibkan memiliki batas toleransi kesalahan (error) maksimum sebesar kurang lebih 1% dalam kondisi operasi normal. Jika performa alat ukur bergeser di luar batas standarisasi tersebut, maka akan terjadi distorsi data yang memicu ketidakadilan komersial; baik berupa kerugian pendapatan bagi pihak PLN jika meteran cenderung melambat (under-registration), maupun kerugian di sisi pelanggan jika meteran mencatat lebih cepat dari konsumsi riil (over-registration).

Dalam jangka panjang, penurunan akurasi ini tidak terjadi secara instan melainkan melalui proses degradasi teknis yang dipengaruhi oleh berbagai variabel kompleks. Faktor usia peralatan atau technical aging menjadi penyebab utama, di mana komponen elektronik internal seperti kapasitor pembagi tegangan, resistor sensor, dan chip pengolah data mengalami penurunan karakteristik elektrik. Kondisi ini diperburuk oleh kualitas

daya yang buruk, seperti fluktuasi tegangan dan arus yang tidak stabil, serta paparan beban non-linear dari perangkat elektronik modern yang menghasilkan harmonisa. Selain itu, faktor lingkungan ekstrim seperti suhu udara yang tinggi dan kelembapan yang berlebih dapat mempercepat korosi pada terminal atau gangguan pada sirkuit terintegrasi meteran. Pengaruh faktor daya yang rendah juga memegang peranan kritis; tanpa adanya kompensasi daya reaktif yang memadai, pengukuran energi aktif menjadi rentan terhadap deviasi yang signifikan.

Akumulasi dari berbagai gangguan teknis tersebut pada akhirnya menciptakan selisih yang lebar antara energi yang tersalurkan (energy delivered) dengan energi yang tertagih (energy billed). Ketidaksesuaian ini secara sistemik akan meningkatkan angka susut energi (losses) non-teknis yang sangat dihindari oleh perusahaan penyedia listrik. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai variabel-variabel yang memengaruhi akurasi sangat diperlukan untuk merancang strategi pemeliharaan preventif, seperti program peremajaan kWh meter secara berkala. Dengan memastikan setiap alat ukur beroperasi dalam kelas akurasi yang ditetapkan, perusahaan tidak hanya mengamankan aliran pendapatan, tetapi juga meningkatkan kepercayaan pelanggan melalui transparansi pengukuran energi yang akurat dan akuntabel.

Pergeseran akurasi pada kWh meter, meskipun hanya sebesar 1% hingga 3%, memiliki implikasi finansial yang sangat signifikan apabila diakumulasikan dalam skala populasi pelanggan yang besar. Secara matematis, jika sebuah kWh meter mengalami deviasi negatif (melambat) sebesar 2%, maka terdapat 2% dari total energi yang dikonsumsi pelanggan yang tidak tercatat dan tidak tertagih, yang secara langsung menjadi kerugian pendapatan bagi perusahaan. Sebagai gambaran, pada kelompok pelanggan rumah tangga dengan rata-rata konsumsi harian yang stabil, akumulasi kesalahan ini dalam satu siklus penagihan dapat menyebabkan selisih nilai rupiah yang cukup besar. Kerugian ini dikategorikan sebagai susut non-teknis, di mana energi telah diproduksi dan didistribusikan, namun gagal dikonversi menjadi pendapatan karena kegagalan alat ukur dalam menjalankan fungsinya secara presisi.

Dampak ekonomi dari penurunan akurasi ini sering kali bersifat "silent loss" atau kerugian yang tidak terlihat secara langsung namun bersifat permanen selama alat ukur tersebut belum dikalibrasi atau diganti. Misalnya, pada daerah dengan ribuan titik pelanggan, pergeseran akurasi rata-rata sebesar 3% dapat menyebabkan hilangnya potensi pendapatan hingga puluhan juta rupiah setiap bulannya. Sebaliknya, jika meteran mengalami deviasi positif (terlalu cepat), hal ini akan menimbulkan ketidakpuasan pelanggan dan potensi sengketa hukum karena pelanggan membayar lebih mahal dari energi yang sebenarnya mereka gunakan. Oleh karena itu, investasi pada program peremajaan kWh meter secara berkala bukan hanya sekadar langkah pemeliharaan teknis, melainkan sebuah strategi perlindungan aset finansial untuk memastikan efisiensi operasi dan keberlanjutan arus kas perusahaan penyedia listrik serta efektivitas terhadap kWh.

Efektivitas kWh meter dapat diukur dengan rata-rata pemakaian sebelum diganti dikurangi dengan rata-rata pemakaian setelah diganti, sedangkan untuk menghitung jumlah rata-rata pemakaian dapat kita lakukan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Rata - rata pemakaian} = \frac{\text{bulan ke 1} + \text{bulan ke 2} + \text{bulan ke 3}}{3} \dots\dots\dots (2.1)$$

Setelah dilakukan perhitungan rata-rata bulanan pemakaian kWh meter, langkah selanjutnya adalah menghitung jumlah kWh tersimpan / kWh Saving. kWh saving merupakan selisih perhitungan dari rata-rata pemakaian sebelum dilakukan pergantian kWh meter dengan perhitungan dari rata-rata pemakaian setelah dilakukan pergantian kWh meter, dapat kita aplikasikan dalam perhitungan sebagai berikut :

$$\text{Kwh Saving} = \text{Rata-rata pemakaian sesudah} - \text{Rata-rata pemakaian sebelum} \dots\dots\dots (2.2)$$

Setelah mendapatkan angka kWh Saving / kWh tersimpan, langkah terakhir adalah mengukur seberapa besar efektivitas dari pergantian kWh meter.

Perhitungan efektivitas kWh meter dapat dilakukan sebagai berikut:

$$Efektifitas kWh = \frac{kWh Saving}{Rata-rata pemakaian sebelum diganti} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.3)$$

Sehingga hasil akhir yang didapatkan dari pergantian kWh meter adalah seberapa besar persentase (%) kwh meter bisa mengukur dengan maksimal.

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Menurut Sari, D. & Nugroho, A. (2018) yang berjudul: Analisis Akurasi Pengukuran Energi Listrik pada KWh Meter Digital dan Elektromekanis Satu Fasa Sumber: Jurnal Energi dan Kelistrikan, Vol. 10 No. 2, 2018. Hasil Penelitian: Penelitian ini membandingkan hasil ukur antara meter elektromekanis (analog) dan meter digital pada berbagai beban. Hasil menunjukkan bahwa KWh meter digital memiliki akurasi lebih baik ($error < \pm 0,8\%$), sedangkan meter analog menunjukkan penurunan akurasi pada beban rendah.
2. Menurut Simanjuntak, R. (2019) Judul: Evaluasi Dampak Penggantian KWh Meter Terhadap Pendapatan Energi di PLN UP3 Medan Sumber: Tugas Akhir Politeknik Negeri Medan. Hasil Penelitian: Setelah dilakukan penggantian meter lama yang tidak akurat dengan meter baru, terjadi peningkatan pendapatan energi sebesar 4,6% di wilayah uji.
3. Handayani, M., dkk. (2020) Judul: Analisis Kinerja KWh Meter Prabayar pada Pelanggan Rumah Tangga Satu Fasa Sumber: Jurnal Keteknikan Energi, Vol. 4 No.

- 1, 2020. Hasil Penelitian: KWh meter prabayar tipe digital menunjukkan stabilitas pengukuran yang tinggi, mampu mengukur konsumsi energi dengan error rata-rata 0,5%. Sistem prabayar juga menurunkan angka tunggakan dan meningkatkan transparansi penggunaan listrik.
4. Menurut Pratama, I. & Lestari, T. (2021) Judul: Analisis Pengaruh Pergantian KWh Meter Analog ke Digital terhadap Kehilangan Energi Non Teknis di PLN Rayon Sleman Sumber: Jurnal Elektro dan Otomasi, Universitas Negeri Yogyakarta. Hasil Penelitian: Penggantian 1.500 unit KWh meter analog ke digital menurunkan losses non-teknis sebesar 3,2% dan meningkatkan keandalan pembacaan energi.
5. Fadhillah, N. (2022) Judul: Analisis Pengaruh Keandalan KWh Meter Prabayar terhadap Kepuasan Pelanggan dan Pendapatan PLN Sumber: Jurnal Sistem Energi & Utilitas, Vol. 5 No. 2, 2022. Hasil Penelitian: Keandalan dan akurasi meter prabayar berdampak positif terhadap kepuasan pelanggan dan ketepatan pendapatan PLN. Pelanggan merasa lebih mudah memantau penggunaan energi.
6. Rachman, D. & Putra, E. (2023) Judul: Evaluasi Pengukuran Energi Listrik Berdasarkan Standar IEC 62053-21 pada KWh Meter Kelas 1 dan 2 Sumber: Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi, 2023. Hasil Penelitian: KWh meter kelas 1 memiliki batas toleransi $\pm 1\%$ dan performa lebih stabil dibanding kelas 2. Penggunaan meter kelas lebih tinggi meningkatkan validitas data energi.

Tabel 2.2 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1	Analisis Akurasi Pengukuran Energi Listrik pada KWh Meter Digital dan Elektromekanis Satu Fasa (Sari & Nugroho, 2018)	Akurasi KWh meter analog menurun seiring usia alat sehingga hasil ukur tidak presisi.	Eksperimen laboratorium membandingkan hasil pengukuran antara meter digital dan elektromekanis dengan beban variatif.	Meter digital menunjukkan error $< \pm 0,8\%$, sedangkan elektromekanis mencapai $> \pm 2\%$ pada beban rendah.	Belum meneliti dampak ekonomi atau pendapatan energi PLN akibat penggantian meter.
2	Evaluasi Dampak Penggantian KWh Meter Terhadap Pendapatan Energi di PLN UP3 Medan (Simanjuntak, 2019)	Pendapatan energi menurun akibat akurasi meter lama yang tidak stabil.	Analisis data sebelum dan sesudah penggantian meter di beberapa unit layanan pelanggan.	Pendapatan energi meningkat 4,6% setelah penggantian meter dilakukan.	Hanya fokus pada pendapatan energi, belum menilai akurasi teknis pengukuran.

3	Analisis Kinerja KWh Meter Prabayar pada Pelanggan Rumah Tangga Satu Phasa (Handayani dkk., 2020)	Evaluasi kinerja sistem prabayar terhadap konsumsi energi pelanggan.	Pengujian lapangan dan analisis data pemakaian listrik pelanggan prabayar.	Error rata-rata KWh meter prabayar sebesar 0,5% dan menekan tunggakan pelanggan.	Tidak membahas perbandingan sebelum dan sesudah penggantian meter.
4	Pengaruh Pergantian KWh Meter Analog ke Digital terhadap Kehilangan Energi Non Teknis di PLN Rayon Sleman (Pratama & Lestari, 2021)	Kehilangan energi non-teknis tinggi akibat meter lama tidak akurat.	Studi kasus dan analisis data losses PLN sebelum dan sesudah pergantian meter.	Kehilangan energi non-teknis turun 3,2% setelah penggantian 1.500 meter analog ke digital.	Tidak menyoroti hubungan antara akurasi teknis dan pendapatan energi pelanggan secara kuantitatif.
