

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Dalam penelitian ini, penulis melakukan tinjauan pustaka terhadap sejumlah penelitian yang relevan sebagai bahan acuan. Sumber referensi tersebut dapat berupa jurnal, artikel, skripsi, maupun buku yang sesuai dengan topik penelitian. Beberapa referensi yang berhasil dikumpulkan penulis antara lain sebagai berikut:

1. Menurut E. Ie, “Analisis Akurasi Kwh Meter Analog Pasca Bayar Dan Kwh Meter Digital Prabayar,” in *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)*, 2022, pp. 198–205. yang dipublikasikan dalam Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV), dibahas mengenai perbandingan tingkat akurasi antara kWh meter analog pascabayar dan kWh meter digital prabayar. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kWh meter digital memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan kWh meter analog, serta mampu memberikan data konsumsi energi secara lebih transparan dan real-time. Hasil penelitian ini menjadi dasar penting dalam menilai efektivitas penggantian kWh meter analog ke digital, khususnya dalam meningkatkan akurasi pengukuran dan transparansi pencatatan energi listrik bagi pelanggan. Jika penelitian Ie hanya membandingkan akurasi antara kWh meter analog pascabayar dan kWh meter digital prabayar dalam kondisi pengukuran laboratorium atau uji terkontrol, penelitian ini menganalisis penggantian kWh meter tua secara nyata di lapangan pada PLN ULP Bima Kota. Selain membahas akurasi meter, penelitian ini juga menghitung efektivitas program penggantian, realisasi pelaksanaan penggantian, serta pengaruh hasil perhitungan tersebut terhadap optimalisasi sistem pengukuran energi listrik. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menilai perbedaan akurasi dua jenis meter, tetapi juga mengevaluasi kinerja program penggantian meter tua sebagai bagian dari upaya peningkatan keandalan pengukuran energi oleh PLN.
2. Menurut E. AstutiYanti, “Perbandingan Pengaruh Variasi Tegangan dan Arus Terhadap Tingkat Keakurasian Antara kWh Meter Mekanik 1 Fasa dan kWh Meter Digital 1

Fasa,” Universitas Semarang, Semarang, 2022 dari Universitas Semarang, dibahas tentang pengaruh variasi tegangan dan arus terhadap tingkat akurasi kWh meter pada sistem listrik satu fasa. Penelitian ini menemukan bahwa kWh meter digital memiliki tingkat akurasi yang lebih stabil dibandingkan kWh meter mekanik (analog), terutama saat terjadi fluktuasi tegangan dan arus. Hasil penelitian tersebut mendukung penggunaan kWh meter digital sebagai solusi untuk meningkatkan keandalan pengukuran konsumsi energi listrik, sehingga menjadi acuan penting dalam pengembangan sistem pencatatan energi yang lebih efisien dan akurat. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian Astutyanti (2022) terletak pada objek dan tujuan analisis. Penelitian Astutyanti berfokus pada pengujian akurasi kWh meter mekanik dan digital dengan memvariasikan tegangan dan arus sebagai kondisi uji laboratorium untuk melihat stabilitas akurasi alat ukur. Sementara itu, penelitian ini tidak hanya menilai akurasi, tetapi juga melakukan analisis kuantitatif terhadap program penggantian kWh meter tua yang dilakukan PLN ULP Bima Kota. Penelitian ini mencakup perhitungan error meter tua, perbandingan efektivitas dengan meter digital, realisasi penggantian, serta dampaknya terhadap optimalisasi sistem pengukuran energi di lapangan. Dengan demikian, penelitian ini lebih menekankan evaluasi implementasi program dan dampak operasionalnya, bukan sekadar pengujian akurasi teknis dalam kondisi terkontrol.

3. Menurut L. M. K. Amali, Y. Mohamad, A. I. Tolago, N. Elysiantobuo, and A. Y. Dako, “Analisis konsumsi energi listrik menggunakan metode intensitas konsumsi energi,” *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 103–107, 2024. Yang dipublikasikan dalam *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, dibahas mengenai metode analisis konsumsi energi listrik berbasis intensitas konsumsi energi. Penelitian ini menjelaskan bagaimana pengukuran intensitas konsumsi energi dapat digunakan untuk mengevaluasi pola penggunaan listrik pada berbagai sektor, termasuk rumah tangga dan industri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini efektif untuk mengidentifikasi tingkat efisiensi penggunaan energi listrik, sehingga dapat menjadi dasar dalam upaya konservasi energi dan pengelolaan konsumsi listrik yang lebih optimal. Temuan ini relevan dalam

konteks analisis efektivitas pergantian kWh meter, karena memberikan pendekatan evaluasi terhadap data konsumsi energi yang dihasilkan dari berbagai jenis kWh meter. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian Amali et al. (2024) terletak pada fokus analisis dan objek kajian. Penelitian Amali et al. berfokus pada evaluasi pola konsumsi energi listrik menggunakan metode intensitas konsumsi energi untuk menilai efisiensi pemakaian pada berbagai sektor. Sementara penelitian ini tidak menganalisis intensitas konsumsi energi, melainkan secara spesifik mengevaluasi efektivitas penggantian kWh meter tua di PLN ULP Bima Kota melalui perhitungan error, efektivitas pengukuran, serta realisasi program penggantian. Penelitian ini menitikberatkan pada peningkatan akurasi sistem pengukuran energi listrik dan optimalisasi kinerja pengukuran setelah penggantian meter, sehingga lebih berorientasi pada evaluasi teknis dan implementatif daripada analisis pola konsumsi energi.

4. Menurut F. Rizki, P. Siagian, and D. Lesmana, "Analisis Perbandingan KWH Meter Prabayar dan Pascabayar untuk Meningkatkan Keakuratan Pengukuran Konsumsi Listrik di PT PLN Unit Layanan Pelanggan Kota Langsa," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 9, no. 3, 2024. Yang dipublikasikan dalam *Jurnal Serambi Engineering*, penelitian ini membahas perbedaan tingkat akurasi pengukuran antara kWh meter prabayar dan pascabayar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kWh meter prabayar memiliki tingkat keakuratan yang lebih tinggi dibandingkan kWh meter pascabayar, terutama dalam pencatatan konsumsi energi listrik secara real-time. Penelitian ini memberikan bukti bahwa penggunaan kWh meter digital prabayar dapat meningkatkan transparansi, efisiensi, serta akurasi pencatatan konsumsi energi listrik pada pelanggan PLN, sehingga relevan sebagai acuan dalam evaluasi pergantian kWh meter analog ke digital. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan oleh Rizki, Siagian, dan Lesmana (2024) terletak pada ruang lingkup dan tujuan analisis. Penelitian tersebut hanya membandingkan tingkat akurasi antara kWh meter prabayar dan pascabayar untuk menilai ketepatan pencatatan konsumsi energi. Sementara itu, penelitian ini tidak hanya menilai akurasi dari jenis kWh meter, tetapi juga mengevaluasi efektivitas program penggantian kWh meter tua melalui analisis kuantitatif yang meliputi perhitungan error, efektivitas pengukuran, persentase

realisasi penggantian, serta dampaknya terhadap optimalisasi sistem pengukuran energi listrik di PLN ULP Bima Kota Tahun 2025. Dengan demikian, penelitian ini memiliki cakupan yang lebih luas karena menilai implementasi program di lapangan sekaligus pengaruhnya terhadap peningkatan kualitas pengukuran energi listrik.

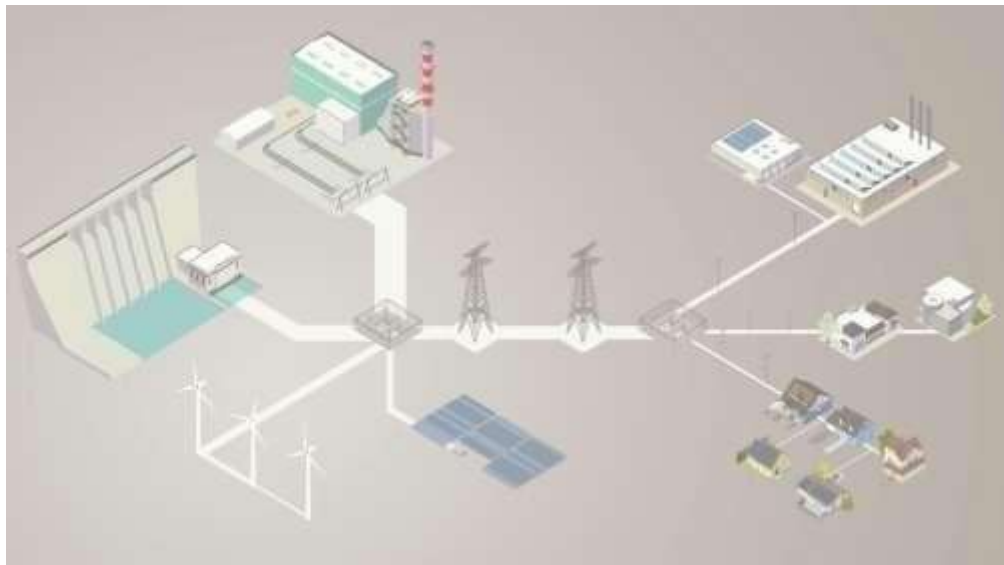
Secara keseluruhan, penelitian-penelitian sebelumnya lebih berfokus pada perbandingan akurasi alat ukur, pengaruh variasi teknis terhadap kinerja meter, serta analisis konsumsi energi berdasarkan metode tertentu. Berbeda dengan itu, penelitian ini tidak hanya membahas akurasi kWh meter digital dan analog, tetapi secara khusus menganalisis efektivitas program penggantian kWh meter tua melalui perhitungan error, perhitungan efektivitas, realisasi penggantian, serta pengaruhnya terhadap optimalisasi sistem pengukuran energi listrik di PLN ULP Bima Kota. Dengan demikian, penelitian ini memberikan sudut pandang baru yang lebih aplikatif dan langsung terkait implementasi kebijakan teknis PLN di lapangan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem teknik berskala besar yang dirancang untuk menyediakan energi listrik secara berkesinambungan dari sumber pembangkitan hingga ke pengguna akhir. Sistem ini tersusun atas berbagai komponen yang saling terhubung dan bekerja secara terkoordinasi, mulai dari pembangkitan, transmisi, distribusi, hingga instalasi pelanggan. Setiap bagian memiliki fungsi spesifik, namun kegagalan pada satu bagian dapat berdampak pada keseluruhan sistem.

Secara teknis, sistem tenaga listrik harus memenuhi tiga kriteria utama, yaitu keandalan (reliability), kualitas daya (power quality), dan efisiensi (efficiency). Keandalan berkaitan dengan kemampuan sistem dalam menyediakan pasokan listrik secara kontinu tanpa gangguan. Kualitas daya mencakup kestabilan tegangan, frekuensi, dan bentuk gelombang yang sesuai standar, sedangkan efisiensi berhubungan dengan upaya meminimalkan rugi-rugi energi selama proses penyaluran.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

(Sumber : <https://www.omazaki.co.id/perencanaan-desain-perancangan-sistem-distribusi-tenaga-listrik-kelistrikan-industri/>)

Dalam sistem tenaga listrik modern, pengukuran energi listrik memegang peranan yang sangat penting. Data pengukuran energi digunakan tidak hanya untuk penagihan pelanggan, tetapi juga sebagai dasar perencanaan operasi sistem, evaluasi rugi-rugi jaringan, serta pengambilan keputusan manajemen energi. Oleh karena itu, keberadaan alat ukur energi listrik yang akurat dan andal menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari sistem tenaga listrik.

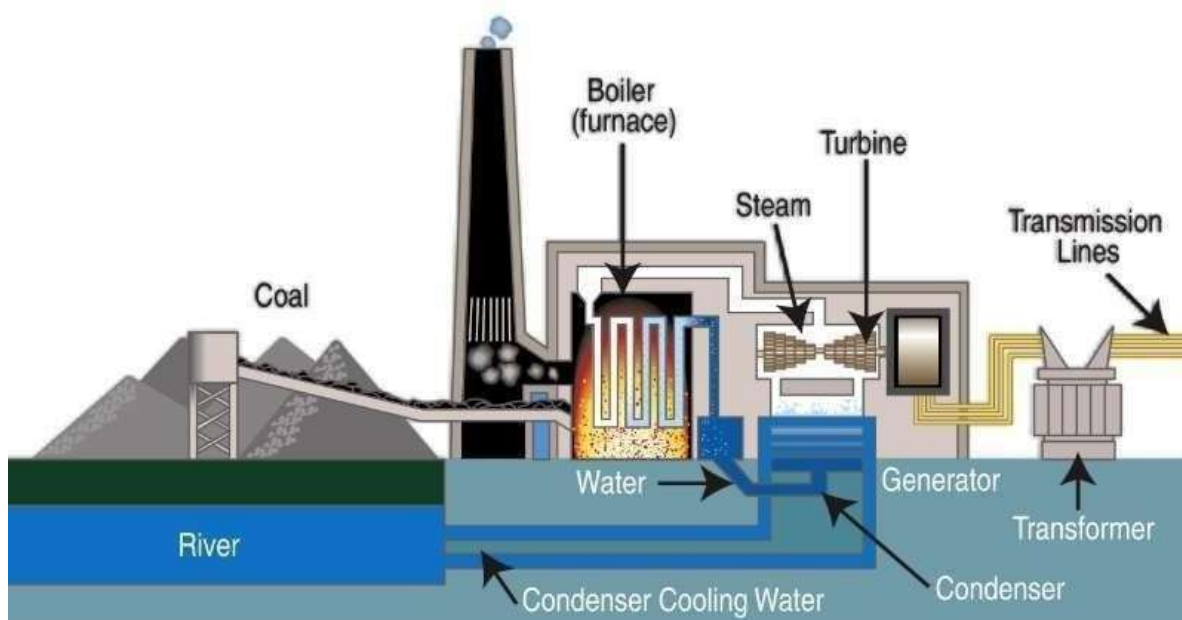
Dalam penelitian ini, kWh meter dipandang sebagai komponen akhir dari sistem tenaga listrik yang memiliki peran strategis. Ketidakakuratan kWh meter akan berdampak langsung pada kualitas data energi listrik, yang selanjutnya dapat memengaruhi aspek teknis dan non-teknis, seperti kesalahan penagihan, potensi losses non-teknis, serta penurunan kepercayaan pelanggan terhadap penyedia listrik.

2.2.2 Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik

Pembangkitan tenaga listrik merupakan tahap awal dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi mengubah energi primer menjadi energi listrik. Energi primer tersebut dapat berasal dari sumber energi konvensional maupun energi terbarukan. Proses pembangkitan dilakukan

dengan memanfaatkan generator listrik yang digerakkan oleh turbin, di mana turbin tersebut digerakkan oleh energi mekanik dari uap, air, angin, atau sumber lainnya.

Prinsip dasar pembangkitan tenaga listrik didasarkan pada hukum induksi elektromagnetik. Ketika kumparan atau konduktor diputar di dalam medan magnet, maka akan timbul gaya gerak listrik yang menghasilkan arus listrik. Besarnya daya listrik yang dihasilkan ditentukan oleh kecepatan putaran, kekuatan medan magnet, serta karakteristik generator yang digunakan.



Gambar 2. 2 Pembangkit Listrik

(Sumber : <https://repository.itpln.ac.id/id/eprint/4624/5/BAB%20II.pdf>)

Kinerja pembangkit listrik harus dijaga agar selalu berada dalam kondisi stabil. Ketidakseimbangan antara daya yang dibangkitkan dan daya yang dikonsumsi dapat menyebabkan gangguan frekuensi dan tegangan. Gangguan ini tidak hanya berdampak pada jaringan transmisi dan distribusi, tetapi juga dapat memengaruhi kinerja alat ukur energi listrik di sisi pelanggan.

Dalam konteks sistem pengukuran energi listrik, kestabilan pembangkitan berpengaruh terhadap kualitas sinyal tegangan dan arus yang diterima kWh meter. Tegangan dan arus yang

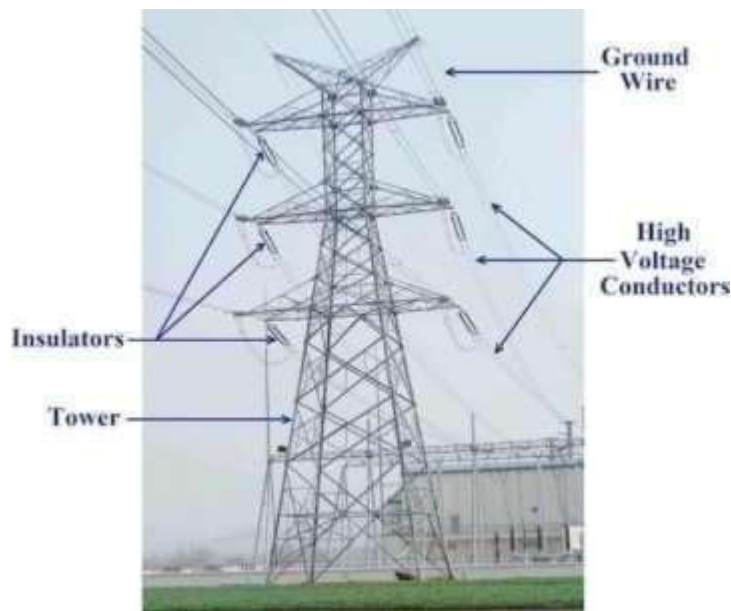
berfluktuasi dapat menyebabkan kesalahan pembacaan energi, terutama pada kWh meter dengan teknologi lama. Oleh karena itu, pembangkitan tenaga listrik yang stabil menjadi faktor pendukung penting bagi akurasi sistem pengukuran energi.

2.2.3 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem transmisi tenaga listrik berfungsi menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkitan ke pusat beban dalam jarak yang jauh. Untuk menekan rugi-rugi daya akibat hambatan penghantar, energi listrik ditransmisikan pada level tegangan tinggi hingga sangat tinggi. Semakin tinggi tegangan transmisi, semakin kecil arus yang mengalir, sehingga rugi-rugi daya dapat diminimalkan.

Jaringan transmisi terdiri dari saluran udara dan peralatan pendukung seperti menara transmisi, isolator, serta sistem proteksi. Perencanaan sistem transmisi harus memperhitungkan kapasitas daya, jarak penyaluran, kondisi geografis, serta aspek keselamatan dan lingkungan.

Walaupun kWh meter tidak dipasang pada sistem transmisi, gangguan pada transmisi akan berdampak langsung pada distribusi dan pelanggan. Pemadaman akibat gangguan transmisi dapat mengubah pola konsumsi energi pelanggan dan memengaruhi kontinuitas data pengukuran energi. Oleh karena itu, sistem transmisi memiliki peran tidak langsung dalam mendukung keandalan sistem pengukuran energi listrik.



Gambar 2. 3 Jaringan Transmisi\

(Sumber : <https://elektro.uma.ac.id/2021/03/21/saluran-transmisi-listrik>)

2.2.4 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk hingga ke pelanggan. Sistem ini menjadi bagian yang paling dekat dengan konsumen dan memiliki kompleksitas tinggi karena harus melayani berbagai jenis pelanggan dengan karakteristik beban yang berbeda-beda.



Gambar 2. 4 Jaringan Distribusi

(Sumber : https://idn.freepik.com/vektor-gratis/ilustrasi-datar-teknisi-memperbaiki-transformator-generator-pekerja-listrik-kartun-membuat-saluran-distribusi-listrik_12291299.htm)

Distribusi tenaga listrik dibedakan menjadi distribusi primer dan distribusi sekunder. Distribusi primer menggunakan tegangan menengah, sedangkan distribusi sekunder menggunakan tegangan rendah. Sistem distribusi harus dirancang agar mampu menjaga tegangan dalam batas toleransi yang diizinkan serta meminimalkan rugi-rugi daya.

Dalam sistem distribusi, pengukuran energi listrik dilakukan di sisi pelanggan menggunakan kWh meter. Oleh karena itu, kualitas sistem distribusi, seperti kestabilan tegangan dan kontinuitas suplai, sangat memengaruhi keakuratan pengukuran energi. Distribusi yang tidak andal dapat menyebabkan kesalahan pencatatan energi dan menurunkan mutu layanan kelistrikan.

2.2.5 Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Jaringan Tegangan Menengah (JTM) merupakan bagian dari sistem distribusi primer yang beroperasi pada tegangan sekitar 20 kV. JTM berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke gardu distribusi yang tersebar di wilayah pelayanan. Jaringan ini memegang peran penting karena menjadi penghubung antara sistem transmisi dan jaringan tegangan rendah.



Gambar 2. 5 Saluran Udara tegangan Menengah

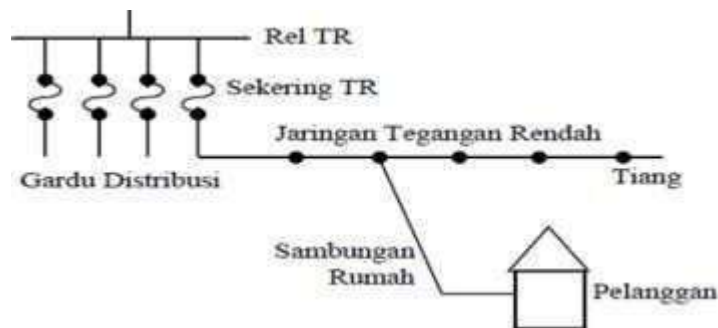
(Sumber : <https://slametumy.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/05/jaringan-distribusi-2019-1.pdf>)

JTM dapat berupa Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) atau Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM). SUTM lebih banyak digunakan karena biaya instalasi dan pemeliharaan yang relatif lebih rendah, sedangkan SKTM digunakan pada daerah perkotaan atau kawasan dengan kebutuhan keandalan tinggi.

Kualitas JTM sangat memengaruhi kestabilan tegangan pada sisi pelanggan. Tegangan yang terlalu rendah atau tidak seimbang dapat memengaruhi kinerja peralatan listrik pelanggan serta menurunkan akurasi pengukuran energi oleh kWh meter.

2.2.6 Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Jaringan Tegangan Rendah (JTR) merupakan bagian akhir dari sistem distribusi tenaga listrik yang langsung terhubung dengan pelanggan. Tegangan yang digunakan pada JTR umumnya adalah 220 V untuk sistem satu fasa dan 380 V untuk sistem tiga fasa. JTR melayani pelanggan rumah tangga, bisnis kecil, dan sebagian industri ringan.



Gambar 2. 6 Jaringan Tegangan Rendah

(Sumber : <https://repository.itpln.ac.id/id/eprint/4152/6/BAB%20II.pdf>)

Karena berada paling dekat dengan pelanggan, JTR sangat rentan terhadap gangguan eksternal seperti cuaca, pohon tumbang, serta aktivitas manusia. Gangguan pada JTR dapat menyebabkan fluktuasi tegangan yang berdampak pada kinerja peralatan listrik pelanggan dan keakuratan kWh meter.

kWh meter dipasang pada sisi pelanggan di jaringan tegangan rendah. Oleh karena itu, kondisi JTR yang baik sangat diperlukan untuk menjamin bahwa kWh meter bekerja pada kondisi tegangan nominal dan menghasilkan pengukuran energi listrik yang akurat dan konsisten.

2.2.7 Metrologi Listrik dalam Sistem Pengukuran Energi

Ketidakpastian pengukuran menunjukkan bahwa tidak ada hasil ukur yang benar-benar bebas dari kesalahan. Setiap alat ukur, termasuk kWh meter, selalu memiliki toleransi kesalahan tertentu yang dipengaruhi oleh keterbatasan teknologi, kondisi lingkungan, dan metode pengukuran. Pada kWh meter tua, ketidakpastian cenderung lebih besar karena degradasi komponen mekanis dan listrik. Sebaliknya, kWh meter digital memiliki ketidakpastian yang lebih kecil karena menggunakan sensor elektronik dan pemrosesan numerik yang lebih stabil.

Dalam konteks penelitian ini, teori metrologi listrik memberikan landasan ilmiah mengapa akurasi pengukuran energi listrik harus terus dijaga melalui penggantian kWh meter tua. Sistem pengukuran yang tidak memenuhi prinsip metrologi akan menurunkan mutu data energi, yang pada akhirnya berdampak pada ketidaktepatan penagihan dan menurunnya keandalan sistem kelistrikan.

2.2.8 Energi Listrik

Energi listrik adalah bentuk energi yang dihasilkan dari pergerakan muatan listrik melalui penghantar akibat adanya perbedaan potensial (tegangan), dan menjadi salah satu kebutuhan utama dalam kehidupan modern karena dapat dengan mudah diubah ke bentuk energi lain seperti panas, cahaya, mekanik, maupun kimia[6]. Energi listrik digunakan dalam berbagai sektor, mulai dari rumah tangga, transportasi, hingga industri, dengan satuan perhitungan kilowatt-hour (kWh) yang menunjukkan jumlah energi yang digunakan ketika daya sebesar 1 kilowatt dipakai selama satu jam. Ketersediaan energi listrik yang andal dan efisien sangat penting, karena konsumsi yang berlebihan tidak hanya meningkatkan biaya, tetapi juga memengaruhi stabilitas pasokan energi nasional. Oleh sebab itu, pengelolaan dan pemanfaatan energi listrik secara tepat menjadi faktor penting dalam mendukung pembangunan ekonomi, sosial, dan teknologi di suatu negara.[7]



Gambar 2. 7 Energi Listrik

(Sumber : [8])

Berdasarkan gambar di atas energi listrik merupakan energi yang timbul akibat adanya aliran elektron dari suatu titik ke titik lain dalam suatu rangkaian listrik. Energi ini menjadi sangat penting karena dapat dimanfaatkan untuk menunjang berbagai aktivitas manusia, baik dalam skala kecil seperti penggunaan peralatan rumah tangga, maupun skala besar seperti industri dan transportasi. Dalam praktiknya, energi listrik dihitung dalam satuan kilowatt-hour (kWh), yang menjadi dasar pengukuran pemakaian listrik pelanggan sekaligus dasar penagihan oleh penyedia listrik. Keunggulan energi listrik terletak pada kemampuannya untuk didistribusikan secara luas melalui jaringan transmisi dan distribusi serta fleksibilitasnya dalam diubah menjadi berbagai bentuk energi lain. Oleh karena itu, energi listrik tidak hanya berperan sebagai kebutuhan pokok masyarakat, tetapi juga sebagai pendorong utama perkembangan teknologi dan pembangunan suatu wilayah.[9]

2.2.9 Energi dalam Sistem Pengukuran

Secara teoritis, energi listrik diperoleh dari proses integrasi daya terhadap waktu. Dalam sistem pengukuran energi, kWh meter bertugas melakukan proses integrasi ini secara kontinu selama beban terhubung ke jaringan listrik.

Pada kWh meter analog, integrasi energi dilakukan secara mekanis melalui putaran piringan aluminium. Kecepatan putaran piringan sebanding dengan daya sesaat, sedangkan jumlah putaran piringan dalam selang waktu tertentu sebanding dengan energi listrik yang

digunakan. Dengan demikian, proses integrasi daya terhadap waktu diwujudkan dalam bentuk fisik.

Pada kWh meter digital, integrasi energi dilakukan secara numerik oleh mikrokontroler. Sensor arus dan tegangan mengukur nilai sesaat, kemudian sistem menghitung daya listrik dan menjumlahkannya dalam interval waktu tertentu (sampling period). Hasil penjumlahan inilah yang membentuk nilai energi listrik total.

Teori integrasi energi ini menjelaskan mengapa perbedaan prinsip kerja antara kWh meter analog dan digital menghasilkan perbedaan tingkat akurasi dan stabilitas pengukuran. Sistem integrasi numerik pada meter digital memungkinkan koreksi kesalahan dan kompensasi non-linearitas yang tidak dapat dilakukan pada sistem mekanis.

2.2.10 Ketidakpastian Pengukuran Energi Listrik

Ketidakpastian pengukuran adalah parameter yang menggambarkan seberapa besar penyimpangan hasil pengukuran dari nilai sebenarnya yang mungkin terjadi. Dalam teori pengukuran modern, ketidakpastian tidak hanya disebabkan oleh alat ukur itu sendiri, tetapi juga oleh metode pengukuran, kondisi lingkungan, serta keterampilan operator.

Dalam konteks kWh meter, ketidakpastian muncul akibat keterbatasan resolusi alat ukur, fluktuasi tegangan dan arus, variasi beban, serta kesalahan pencatatan. Pada kWh meter analog, ketidakpastian relatif lebih besar karena adanya faktor mekanis seperti gesekan piringan dan keterlambatan respon terhadap perubahan beban. Sementara itu, pada kWh meter digital, ketidakpastian relatif lebih kecil karena pengukuran dilakukan secara elektronik dan hasilnya diproses secara numerik dengan algoritma koreksi internal.

Secara teoritis, ketidakpastian pengukuran dinyatakan sebagai interval di sekitar nilai ukur yang diyakini mengandung nilai sebenarnya. Semakin kecil interval ketidakpastian, semakin tinggi tingkat kepercayaan terhadap hasil pengukuran. Dalam sistem penagihan listrik, ketidakpastian yang besar dapat menimbulkan potensi sengketa antara pelanggan dan penyedia listrik karena hasil pengukuran dianggap tidak dapat dipercaya sepenuhnya.

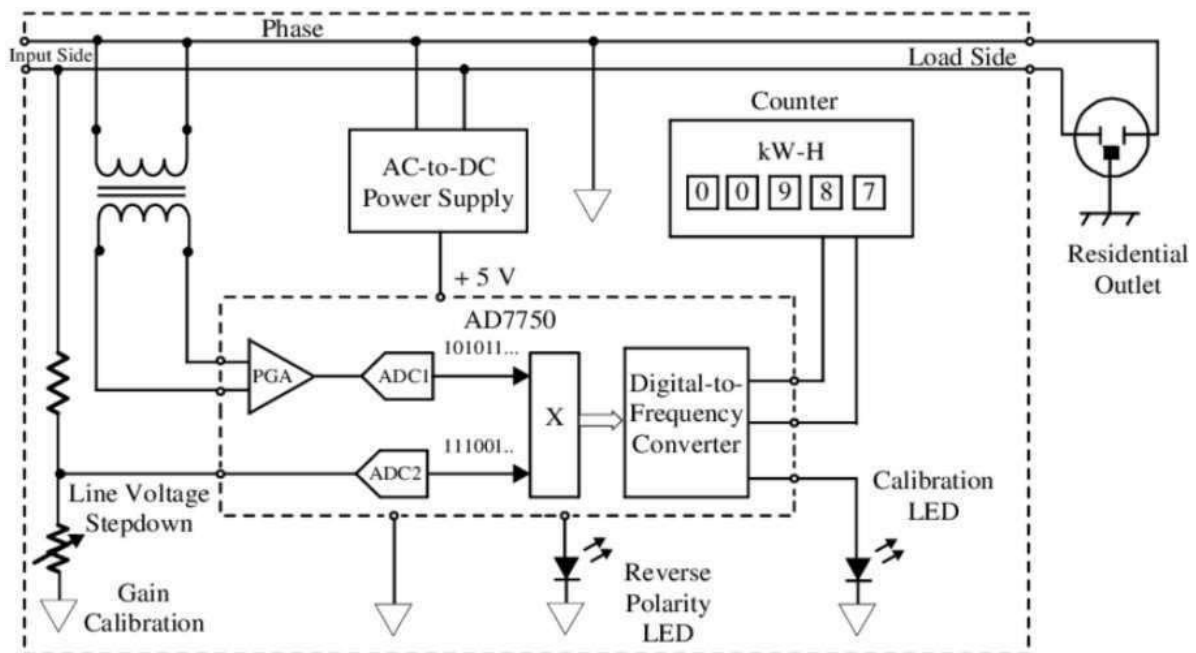
Teori ketidakpastian ini memperkuat argumen bahwa penggantian kWh meter tua dengan meter digital bukan hanya meningkatkan akurasi, tetapi juga memperkecil rentang ketidakpastian pengukuran energi listrik.

2.2.11 Akurasi Pengukuran Energi Listrik

Akurasi pengukuran energi listrik adalah tingkat kedekatan antara nilai energi listrik yang ditunjukkan oleh alat ukur (kWh meter) dengan nilai energi listrik sebenarnya yang digunakan oleh beban. Dalam sistem ketenagalistrikan, akurasi pengukuran merupakan aspek yang sangat krusial karena hasil pengukuran energi listrik digunakan sebagai dasar penagihan kepada pelanggan, evaluasi konsumsi energi, serta perencanaan dan pengendalian sistem distribusi tenaga listrik.

Secara teoritis, suatu sistem pengukuran dikatakan akurat apabila hasil pengukurannya berada dalam batas toleransi yang telah ditentukan oleh standar teknis. Akurasi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain prinsip kerja alat ukur, kualitas komponen internal, kestabilan tegangan dan arus, serta kondisi lingkungan operasi. Pada kWh meter analog, pengukuran energi dilakukan melalui mekanisme elektromagnetik dan mekanis, sehingga akurasi sangat bergantung pada kondisi fisik komponen seperti piringan aluminium, bantalan poros, dan sistem roda gigi.

Seiring dengan bertambahnya usia pemakaian, kWh meter analog cenderung mengalami penurunan akurasi akibat keausan komponen mekanis dan perubahan karakteristik medan magnet. Kondisi ini menyebabkan hasil pencatatan energi listrik tidak lagi mencerminkan nilai energi yang sebenarnya. Sebaliknya, kWh meter digital menggunakan sensor elektronik dan pemrosesan numerik, sehingga mampu menghasilkan pengukuran yang lebih presisi dan stabil dalam jangka waktu yang lebih lama.



Gambar 2. 8 Sistem Pengukuran Energi Listrik

(Sumber : https://www.tneutron.net/elektro/sistem-pengukuran-energi-listrik-tiga-fasa/#google_vignette)

Dalam penelitian ini, akurasi pengukuran energi listrik menjadi parameter utama yang dievaluasi melalui perhitungan persentase error. Tingkat akurasi kWh meter sebelum dan sesudah penggantian digunakan untuk menilai efektivitas program penggantian kWh meter tua dalam meningkatkan kualitas sistem pengukuran energi listrik di PLN ULP Bima Kota.

2.2.12 kWh Meter

kWh Meter adalah alat penghitung pemakaian energi listrik yang bekerja menggunakan metode induksi medan magnet, di mana medan magnet tersebut menggerakkan piringan yang terbuat dari aluminium. Alat ini pada dasarnya merupakan pengukur daya listrik atau wattmeter/kilowattmeter yang disusun sedemikian rupa sehingga kumparan tegangan dapat berputar dengan bebas. Dengan cara tersebut, energi listrik dapat diukur dan ditampilkan dalam satuan Wh (Watt-hour) maupun kWh (kilowatt-hour), yang kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan konsumsi listrik pelanggan[10].

a. kWh Meter 1 Phasa Analog

kWh meter 1 phase analog adalah alat ukur energi listrik yang digunakan untuk mencatat pemakaian daya listrik pada jaringan satu fasa. Alat ini bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus dan tegangan listrik yang mengalir menghasilkan medan magnet yang menggerakkan piringan aluminium di dalam meter. Kecepatan putaran piringan berbanding lurus dengan besarnya daya listrik yang digunakan, dan jumlah putaran tersebut akan diteruskan ke mekanisme penghitung mekanis (angka-angka pada display). Hasil pengukuran kemudian ditampilkan dalam satuan kWh (kilowatt-hour), yang menunjukkan total energi listrik yang dikonsumsi pelanggan. Jenis meter ini banyak digunakan di rumah tangga sebelum digantikan oleh kWh meter digital karena sifatnya sederhana, tahan lama, dan tidak memerlukan sumber listrik tambahan untuk beroperasi[11].

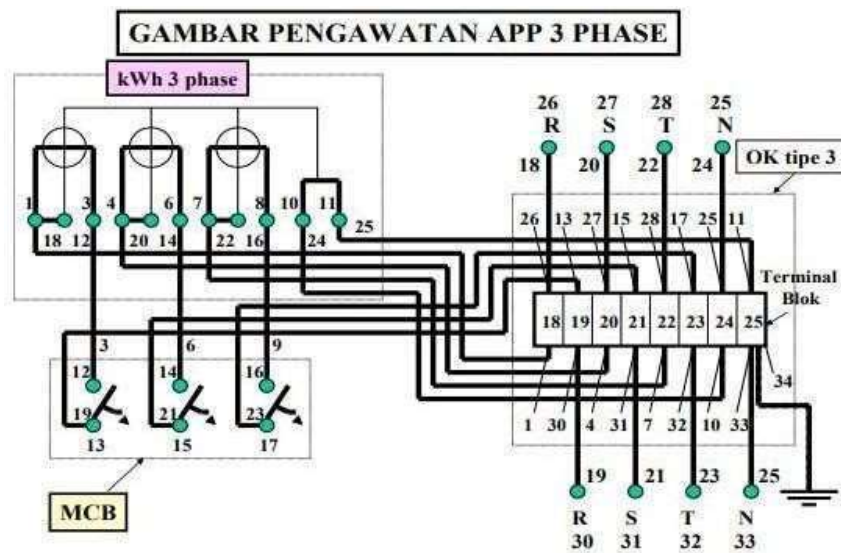


Gambar 2. 9 kWh meter 1 Phase Analog

b. kWh Meter 3 Phase Analog

kWh meter 3 phase analog adalah alat ukur energi listrik yang digunakan untuk mencatat pemakaian daya listrik pada sistem tiga fasa. Prinsip kerjanya mirip dengan kWh meter satu fasa, yaitu menggunakan induksi elektromagnetik, namun memiliki tiga set kumparan arus dan tegangan yang masing-masing mewakili setiap fasanya. Medan magnet yang dihasilkan dari kumparan-kumparan tersebut menggerakkan piringan aluminium, dan kecepatan putaran piringan sebanding dengan daya total yang digunakan oleh beban tiga fasa. Putaran piringan ini kemudian diteruskan ke mekanisme roda gigi mekanis yang menampilkan hasil pengukuran dalam satuan kWh (kilowatt-hour). kWh meter

3 phase analog umumnya digunakan pada instalasi listrik dengan daya menengah hingga besar, seperti industri, gedung perkantoran, pusat perbelanjaan, maupun pelanggan bisnis, karena mampu mengukur energi listrik yang lebih besar dan akurat pada sistem tiga fasa. Meskipun saat ini sebagian besar sudah mulai beralih ke kWh meter digital, tipe analog masih dapat ditemukan karena konstruksinya sederhana, andal, dan tidak membutuhkan suplai daya tambahan untuk beroperasi.



Gambar 2. 10 Wirring kWh 3 Phase Analog

c. kWh Meter Digital

KWH meter digital bekerja berdasarkan sebuah program yang dirancang pada mikroprosesor yang terdapat didalam piranti KWH meter digital tersebut. Pada prinsipnya, sebuah KWH meter digital akan mengkonversi sinyal analog tegangan dan arus yang terukur menjadi sinyal digital atau diskrit dengan mengambil nilai-nilai sampel (menyamplingan) dari sinyal analog tegangan dan arus secara periodik setiap periode sampling (T_s)[12]. Keunggulan kWh meter digital adalah tingkat akurasi yang lebih tinggi, pencatatan yang lebih transparan, serta kemampuannya mendukung fitur tambahan seperti sistem Prabayar (token), integrasi dengan smart grid, monitoring jarak jauh, dan

pendeteksian gangguan kelistrikan. Alat ini juga memudahkan pelanggan dalam memantau pemakaian listrik harian secara langsung melalui layar, sehingga bisa mendorong penggunaan energi secara lebih efisien. Saat ini, kWh meter digital banyak dipasang oleh PLN untuk menggantikan kWh meter analog, baik pada pelanggan rumah tangga, bisnis, maupun industri[13].



Gambar 2. 11 kWh Meter Digital

2.2.13 Error Pengukuran pada kWh Meter

Error pengukuran merupakan selisih antara nilai energi listrik yang diukur oleh kWh meter dengan nilai energi listrik sebenarnya. Error ini menunjukkan tingkat ketidaktepatan hasil pengukuran dan menjadi indikator penting dalam menilai kinerja suatu alat ukur energi listrik. Dalam praktiknya, error pengukuran dapat bersifat positif maupun negatif.

Error positif atau over-register terjadi ketika kWh meter mencatat energi listrik lebih besar dari yang sebenarnya digunakan oleh pelanggan. Sebaliknya, error negatif atau under-register terjadi ketika kWh meter mencatat energi listrik lebih kecil dari nilai sebenarnya. Pada kWh meter tua, khususnya yang berbasis analog, error yang sering terjadi adalah under-register akibat penurunan sensitivitas komponen mekanis.

Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya error pengukuran pada kWh meter antara lain fluktuasi tegangan dan arus, perubahan karakteristik beban, serta degradasi komponen internal meter. Pada kWh meter analog, gesekan mekanis dan keausan poros piringan menyebabkan piringan berputar lebih lambat dari seharusnya, sehingga energi listrik yang tercatat menjadi lebih kecil.

Pada kWh meter digital, error pengukuran relatif lebih kecil karena pengukuran dilakukan secara elektronik dan diproses menggunakan algoritma numerik. Selain itu, kWh meter digital memiliki resolusi pengukuran yang lebih tinggi dan mampu melakukan kompensasi terhadap variasi tegangan dan arus. Oleh karena itu, tingkat error kWh meter digital jauh lebih rendah dibandingkan kWh meter analog.

Dalam penelitian ini, error pengukuran dihitung menggunakan perbandingan antara energi acuan dan energi yang tercatat pada kWh meter. Nilai error ini digunakan untuk menganalisis perbedaan akurasi antara kWh meter analog dan kWh meter digital.

2.2.14 Pengaruh Penuaan (Aging) terhadap Kinerja kWh Meter

Penuaan atau aging merupakan proses penurunan kinerja alat ukur yang terjadi akibat pemakaian dalam jangka waktu yang lama. Pada kWh meter analog, penuaan terutama terjadi pada komponen mekanis yang bergerak, seperti bantalan poros, roda gigi, dan piringan aluminium. Keausan komponen tersebut menyebabkan perubahan konstanta meter dan menurunnya akurasi pengukuran energi listrik.



Gambar 2. 12 kWh Meter Tua

Selain faktor mekanis, penuaan kWh meter juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan operasi, seperti suhu tinggi, kelembapan, debu, dan getaran. Paparan lingkungan yang tidak ideal dalam waktu lama dapat mempercepat degradasi komponen internal meter. Akibatnya, kWh meter tua tidak lagi bekerja sesuai dengan spesifikasi awal pabrikan.

Pada kWh meter digital, proses penuaan relatif lebih lambat karena tidak menggunakan komponen mekanis yang bergerak. Namun demikian, komponen elektronik seperti sensor arus, sensor tegangan, dan catu daya tetap memiliki batas usia pakai. Oleh karena itu, meskipun lebih andal, kWh meter digital tetap memerlukan pengujian dan pemantauan berkala untuk memastikan kinerjanya tetap optimal.

Dalam konteks penelitian ini, penuaan kWh meter tua menjadi dasar teknis dan ilmiah dilaksanakannya program penggantian meter. Meter yang telah mengalami penuaan berpotensi menimbulkan error pengukuran yang signifikan dan berdampak pada ketidakakuratan pencatatan energi listrik pelanggan.

2.2.15 Konsumsi Energi Listrik

Konsumsi energi listrik adalah jumlah energi listrik yang digunakan oleh konsumen dalam suatu periode waktu tertentu untuk memenuhi kebutuhan aktivitas sehari-hari, baik di sektor rumah tangga, industri, transportasi, maupun komersial. Dalam struktur kebutuhan energi nasional, listrik menempati porsi terbesar dibandingkan sumber energi lain, bahkan di sektor

rumah tangga penggunaannya mencapai 55,1% pada tahun 2015 dan diproyeksikan terus meningkat hingga 70,1% pada tahun 2025 serta 84,5% pada tahun 2050. Peningkatan ini menunjukkan bahwa listrik menjadi energi utama yang paling dibutuhkan masyarakat, seiring berkembangnya teknologi dan bertambahnya jumlah peralatan elektronik di rumah tangga maupun sektor lainnya.[14]

Namun, konsumsi energi listrik yang terus meningkat juga menimbulkan permasalahan, khususnya di sektor rumah tangga. Hal ini antara lain disebabkan oleh perilaku sebagian masyarakat yang belum efisien dalam menggunakan peralatan listrik, penggunaan peralatan rumah tangga yang belum berlabel hemat energi, serta minimnya kesadaran akan pentingnya konservasi energi. Oleh karena itu, pemerintah mendorong penerapan kebijakan konservasi energi sebagaimana tercantum dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2012, yaitu upaya sistematis, terencana, dan menyeluruh untuk meningkatkan efisiensi energi tanpa mengurangi kebutuhan energi yang benar-benar diperlukan. Dengan demikian, pemahaman tentang konsumsi energi listrik menjadi hal penting untuk mendukung efisiensi, mengurangi pemborosan, serta mengoptimalkan penggunaan energi listrik dalam kehidupan sehari-hari[15].

2.2.16 Keandalan (Reliability) Sistem Pengukuran Energi

Keandalan sistem pengukuran didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk menjalankan fungsinya secara benar dan konsisten dalam jangka waktu tertentu. Dalam teori keandalan, suatu sistem dikatakan andal jika memiliki tingkat kegagalan yang rendah dan mampu mempertahankan kinerjanya dalam batas toleransi yang diizinkan.

Dalam konteks kWh meter, keandalan mencakup kemampuan meter untuk terus mencatat energi listrik secara akurat tanpa mengalami gangguan fungsional, kesalahan besar, atau kehilangan data. Pada kWh meter analog, tingkat keandalan menurun seiring bertambahnya usia pemakaian akibat degradasi komponen mekanis.

Pada kWh meter digital, keandalan lebih tinggi karena sistem pengukuran bersifat elektronik dan dapat dilengkapi dengan mekanisme pengamanan internal, seperti deteksi gangguan, pencatatan kejadian (event log), dan proteksi terhadap kesalahan pengawatan.

Teori keandalan ini relevan dengan rumusan masalah keempat dalam penelitianmu, yaitu mengenai tingkat keandalan pelaksanaan penggantian kWh meter, karena keandalan alat ukur merupakan prasyarat utama dalam mewujudkan sistem pengukuran energi listrik yang optimal.

2.2.17 Optimalisasi Sistem Pengukuran Energi Listrik

Efektivitas penggantian kWh meter merupakan tingkat keberhasilan program penggantian meter tua dalam meningkatkan akurasi pengukuran energi listrik. Efektivitas dinilai berdasarkan penurunan nilai error pengukuran serta peningkatan kualitas sistem pencatatan energi listrik setelah penggantian kWh meter analog dengan meter digital.

Optimalisasi sistem pengukuran energi listrik merupakan upaya untuk meningkatkan kinerja sistem pengukuran agar mendekati kondisi ideal, yaitu akurat, andal, efisien, dan transparan. Dalam teori sistem, optimalisasi dilakukan dengan cara memperbaiki komponen-komponen utama yang paling berpengaruh terhadap kinerja keseluruhan sistem.

Dalam konteks pengukuran energi listrik, kWh meter merupakan komponen paling kritis. KWh meter yang tidak akurat akan menurunkan mutu seluruh sistem pengukuran, meskipun komponen lain seperti sistem pencatatan dan penagihan sudah baik.

Penggantian kWh meter tua dengan kWh meter digital dapat dipandang sebagai bentuk optimalisasi sistem pengukuran energi listrik. Secara teoritis, tindakan ini meningkatkan akurasi pengukuran, menurunkan ketidakpastian, memperbaiki stabilitas jangka panjang, serta meningkatkan keandalan data energi listrik.

Teori optimalisasi ini memperkuat dasar ilmiah bahwa program penggantian kWh meter tua bukan sekadar kebijakan operasional, tetapi merupakan strategi teknis yang berdampak langsung terhadap peningkatan kinerja sistem pengukuran energi listrik secara keseluruhan.

2.2.18 Rugi-Rugi Energi Listrik (Non-Teknis)

Rugi-rugi energi listrik adalah selisih antara energi listrik yang disalurkan oleh penyedia tenaga listrik dengan energi listrik yang tercatat dan ditagihkan kepada pelanggan. Rugi-rugi energi ini menjadi indikator penting dalam menilai efisiensi sistem tenaga listrik, khususnya pada sisi distribusi.

Secara umum, rugi-rugi energi listrik dibedakan menjadi rugi-rugi teknis dan rugi-rugi non-teknis. Rugi-rugi teknis disebabkan oleh hambatan penghantar, transformator, dan peralatan listrik lainnya yang secara fisik tidak dapat dihindari. Sementara itu, rugi-rugi non-teknis disebabkan oleh faktor administratif dan pengukuran, seperti kesalahan pencatatan, pencurian listrik, serta penggunaan kWh meter yang tidak akurat.

kWh meter tua yang memiliki tingkat error tinggi berkontribusi langsung terhadap meningkatnya rugi-rugi non-teknis. Energi listrik yang sebenarnya digunakan pelanggan tidak tercatat secara penuh, sehingga menimbulkan selisih energi dalam sistem. Kondisi ini dapat menyebabkan kerugian finansial bagi penyedia tenaga listrik serta menurunkan efisiensi operasional sistem distribusi.

Penggantian kWh meter tua dengan kWh meter digital merupakan salah satu upaya strategis untuk menekan rugi-rugi non-teknis. Dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi, kWh meter digital mampu mencatat energi listrik secara lebih tepat dan transparan.

2.2.19 Perbandingan kWh Meter Analog dan Digital

kWh meter analog merupakan alat ukur energi listrik yang bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik. Di dalamnya terdapat kumparan tegangan dan kumparan arus yang menghasilkan medan magnet ketika dialiri listrik. Interaksi medan magnet tersebut menyebabkan piringan aluminium berputar dengan kecepatan yang sebanding dengan daya yang sedang dikonsumsi pelanggan. Putaran piringan kemudian diteruskan ke mekanisme roda gigi yang mencatat jumlah putaran, dan hasil perhitungannya ditampilkan melalui angka pada counter mekanik dalam satuan kWh[16]. Semakin besar energi listrik yang digunakan, semakin cepat pula putaran piringan terjadi. Karena sistemnya masih mekanis, pencatatan pemakaian listrik harus dilakukan secara manual oleh petugas lapangan, sehingga berpotensi terjadi keterlambatan atau kesalahan dalam pencatatan.

Berbeda dengan itu, kWh meter digital bekerja dengan prinsip elektronik modern menggunakan sensor arus dan sensor tegangan untuk mendeteksi parameter kelistrikan. Sinyal yang ditangkap sensor kemudian diolah melalui rangkaian pengkondisi sinyal dan diproses oleh mikrokontroler atau prosesor internal. Hasil pengolahan tersebut memberikan nilai konsumsi

energi yang lebih presisi, yang langsung ditampilkan dalam bentuk angka digital melalui layar LCD atau LED. Selain lebih akurat, kWh meter digital juga dilengkapi berbagai fitur tambahan, seperti sistem Prabayar berbasis token, pencatatan otomatis tanpa perlu pembacaan manual, serta kemampuan integrasi dengan sistem monitoring jarak jauh berbasis teknologi informasi. Hal ini membuat kWh meter digital tidak hanya lebih efisien dalam pengukuran, tetapi juga mendukung transparansi data, pengendalian konsumsi, dan peningkatan kualitas layanan kelistrikan bagi pelanggan.

2.2.20 Keandalan Sistem Pengukuran Energi dan Program Penggantian kWh Meter

Keandalan program penggantian kWh meter adalah kemampuan pelaksanaan program dalam mencapai target penggantian secara konsisten, tepat waktu, dan sesuai dengan standar operasional prosedur (SOP) PLN. Keandalan ini mencerminkan tingkat keberhasilan implementasi kebijakan teknis di lapangan dalam meningkatkan kualitas sistem pengukuran energi listrik.

Realisasi penggantian kWh meter merupakan jumlah meter tua yang berhasil diganti dalam periode tertentu dibandingkan dengan target yang telah ditetapkan. Parameter ini digunakan untuk menilai stabilitas dan konsistensi pelaksanaan program penggantian di PLN.

Keandalan sistem pengukuran energi listrik didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk bekerja secara konsisten dan benar dalam jangka waktu tertentu tanpa mengalami kegagalan fungsi. Keandalan ini mencakup keandalan alat ukur, keandalan prosedur pemasangan, serta keandalan pelaksanaan operasional di lapangan.

kWh meter digital memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan kWh meter analog karena dilengkapi dengan fitur proteksi internal, pencatatan kejadian (event log), serta kemampuan mendeteksi gangguan kelistrikan. Fitur-fitur tersebut membantu memastikan bahwa proses pengukuran energi listrik berjalan dengan baik dan data yang dihasilkan tetap akurat.

Selain keandalan alat ukur, keandalan program penggantian kWh meter juga menjadi faktor penting dalam optimalisasi sistem pengukuran energi. Program penggantian yang

dilaksanakan secara konsisten dan terencana menunjukkan komitmen penyedia tenaga listrik dalam meningkatkan kualitas pelayanan dan efisiensi sistem.

Dalam penelitian ini, keandalan program penggantian kWh meter dievaluasi melalui realisasi penggantian dan konsistensi pelaksanaan setiap bulan. Hal ini menjadi dasar dalam menilai keberhasilan program penggantian kWh meter tua di PLN ULP Bima Kota.

2.2.21 Peralatan Pengujian dan Pengukuran

Dalam kegiatan penelitian yang berkaitan dengan pengujian akurasi kWh meter analog dan kWh meter digital, keberadaan peralatan ukur yang tepat dan andal menjadi faktor yang sangat penting. Alat ukur berfungsi sebagai instrumen utama untuk memperoleh data teknis yang valid, akurat, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Penggunaan peralatan yang sesuai standar juga diperlukan agar hasil pengujian dapat dibandingkan dengan ketentuan teknis yang berlaku di PLN. Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tang amper (clamp meter), multimeter digital, stopwatch/timer, kamera dokumentasi, dan laptop pengolah data. Masing-masing peralatan tersebut memiliki fungsi dan peran yang saling melengkapi dalam mendukung proses pengujian akurasi kWh meter.

a. Tang Amper (Clamp Meter)

Tang amper atau clamp meter merupakan alat ukur listrik yang digunakan untuk mengukur besarnya arus listrik yang mengalir pada suatu penghantar tanpa harus memutus rangkaian listrik. Prinsip kerja alat ini didasarkan pada hukum induksi elektromagnetik, di mana medan magnet yang timbul akibat aliran arus listrik pada konduktor akan dideteksi oleh sensor di dalam rahang penjepit (clamp). Medan magnet tersebut kemudian dikonversikan menjadi nilai arus listrik yang ditampilkan pada layar digital.

Dalam penelitian ini, tang amper digunakan untuk mengukur arus beban selama proses pengujian kWh meter. Pengukuran arus sangat penting untuk memastikan bahwa kondisi pembebanan berada dalam keadaan stabil dan sesuai dengan nilai yang direncanakan. Stabilitas arus merupakan salah satu syarat utama dalam pengujian akurasi kWh meter, karena fluktuasi arus dapat menyebabkan perubahan daya dan energi yang terukur sehingga memengaruhi hasil perhitungan error. Dengan

menggunakan tang amper, peneliti dapat memantau secara langsung besarnya arus yang mengalir dan melakukan penyesuaian beban apabila terjadi penyimpangan dari nilai yang diharapkan. Selain itu, keunggulan tang amper terletak pada kemudahan penggunaannya, tingkat keamanan yang tinggi karena tidak memerlukan kontak langsung dengan penghantar terbuka, serta kemampuannya untuk digunakan pada sistem satu fasa maupun tiga fasa.



Gambar 2. 13 Tang Ampere

b. Multimeter Digital

Multimeter digital merupakan alat ukur listrik serbaguna yang digunakan untuk mengukur berbagai parameter kelistrikan, seperti tegangan (volt), arus (ampere), dan hambatan (ohm). Alat ini bekerja dengan mengonversi sinyal listrik analog menjadi sinyal digital yang kemudian ditampilkan dalam bentuk angka pada layar. Multimeter digital memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan multimeter analog serta dilengkapi dengan fitur pembacaan otomatis (auto-range) dan proteksi internal terhadap kesalahan pengukuran.

Dalam konteks penelitian ini, multimeter digital digunakan untuk mengukur tegangan suplai listrik selama proses pengujian kWh meter. Pengukuran tegangan bertujuan untuk memastikan bahwa tegangan berada pada kondisi normal dan sesuai dengan standar operasional yang ditetapkan oleh PLN. Tegangan yang tidak stabil atau berada di luar batas toleransi dapat memengaruhi kinerja kWh meter dan menyebabkan hasil

pengukuran energi menjadi tidak akurat. Oleh karena itu, multimeter digital berperan sebagai alat verifikasi kondisi kelistrikan sebelum dan selama proses pengujian berlangsung. Selain itu, multimeter juga dapat digunakan untuk melakukan pengecekan kontinuitas rangkaian serta memastikan tidak terdapat gangguan pada instalasi pengujian. Dengan demikian, penggunaan multimeter digital membantu menjamin bahwa data yang diperoleh benar-benar mencerminkan performa kWh meter yang diuji, bukan akibat kesalahan sistem kelistrikan pendukung.



Gambar 2. 14 Multimeter Digital

c. Stopwatch / Timer

Stopwatch atau timer merupakan alat ukur waktu yang digunakan untuk mencatat durasi suatu kejadian dengan tingkat ketelitian tertentu. Alat ini bekerja berdasarkan osilator elektronik yang menghasilkan pulsa waktu secara periodik, sehingga mampu menghitung selang waktu dalam satuan detik, menit, atau jam dengan akurasi yang cukup tinggi.

Dalam penelitian ini, stopwatch digunakan khusus untuk pengujian kWh meter analog yang masih menggunakan piringan berputar sebagai indikator pemakaian energi listrik. Prinsip pengujian kWh meter analog dilakukan dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh piringan untuk melakukan sejumlah putaran tertentu. Jumlah putaran piringan yang dikaitkan dengan konstanta meter (rev/kWh) kemudian digunakan untuk menentukan energi listrik yang tercatat oleh meter. Dengan menggunakan stopwatch, peneliti dapat mengukur waktu putaran piringan secara

presisi sehingga nilai energi yang dihitung dapat dibandingkan dengan energi acuan dari alat uji standar.



Gambar 2. 15 Stopwatch

Ketelitian pengukuran waktu sangat memengaruhi hasil perhitungan error kWh meter analog. Kesalahan dalam mencatat waktu putaran dapat menyebabkan penyimpangan nilai energi yang dihitung dan berujung pada hasil analisis yang tidak akurat. Oleh karena itu, stopwatch menjadi alat bantu yang sangat penting dalam memastikan bahwa perhitungan energi dan persentase error kWh meter analog dilakukan secara tepat dan konsisten.

- d. Kamera Dokumentasi Kamera dokumentasi merupakan perangkat yang digunakan untuk merekam gambar atau video sebagai bukti visual dari suatu kegiatan atau kondisi tertentu. Kamera bekerja dengan menangkap cahaya melalui lensa, kemudian mengonversikannya menjadi sinyal digital yang disimpan dalam bentuk file gambar atau video. Dalam penelitian ini, kamera dokumentasi digunakan untuk mengambil foto kondisi kWh meter sebelum dan sesudah penggantian, nomor seri meter, instalasi kelistrikan, serta proses pengujian di lapangan. Dokumentasi visual ini memiliki peran penting sebagai bukti pendukung keabsahan data yang diperoleh. Dengan adanya foto dan rekaman proses pengujian, peneliti dapat menunjukkan bahwa pengambilan data dilakukan sesuai prosedur dan pada objek yang benar. Selain itu, dokumentasi juga berfungsi sebagai bahan arsip dan referensi apabila di kemudian hari diperlukan verifikasi ulang terhadap hasil penelitian. Dalam konteks

pelaporan ilmiah, dokumentasi visual dapat memperkuat validitas penelitian karena menunjukkan kondisi nyata di lapangan, bukan hanya data numerik semata. Oleh karena itu, penggunaan kamera dokumentasi menjadi bagian integral dalam memastikan transparansi dan akuntabilitas proses penelitian.

- e. Laptop Pengolah Data Laptop pengolah data merupakan perangkat komputer portabel yang digunakan untuk mengolah, menganalisis, dan menyajikan data hasil penelitian. Laptop dilengkapi dengan perangkat lunak pengolah data seperti Microsoft Excel yang memungkinkan pengguna melakukan perhitungan matematis, analisis statistik sederhana, serta penyusunan grafik dan tabel.

Dalam penelitian ini, laptop digunakan untuk menghitung persentase error kWh meter, efektivitas penggantian meter, rata-rata realisasi bulanan, serta menyusun grafik dan tabel yang merepresentasikan hasil pengujian dan analisis data. Penggunaan perangkat lunak spreadsheet mempermudah proses perhitungan karena mampu mengurangi kesalahan manual dan mempercepat pengolahan data dalam jumlah besar. Selain itu, laptop juga digunakan untuk menyimpan data mentah hasil pengukuran, dokumen laporan, serta dokumentasi foto dan video.

Keberadaan laptop sebagai alat bantu pengolah data sangat penting dalam mendukung ketelitian dan efisiensi penelitian. Dengan pengolahan data yang terkomputerisasi, hasil analisis dapat disajikan secara lebih sistematis, rapi, dan mudah dipahami, sehingga mendukung proses interpretasi hasil penelitian serta penyusunan laporan akhir.

2.2.22 Teori Perhitungan Error, Efektivitas, Realisasi, dan Tingkat Kendala Penggantian kWh Meter

Pengukuran energi listrik merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik karena hasil pengukuran digunakan sebagai dasar penagihan, evaluasi konsumsi energi, serta pengendalian rugi-rugi energi listrik. Oleh karena itu, alat ukur energi listrik seperti kWh meter harus memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan sesuai dengan standar metrologi listrik. Salah satu parameter utama dalam menilai kinerja alat ukur adalah persentase error pengukuran. Error pengukuran merupakan selisih antara nilai energi listrik yang diukur oleh kWh meter dengan

nilai energi listrik sebenarnya yang diperoleh dari alat uji standar. Semakin kecil nilai error, maka semakin tinggi tingkat akurasi alat ukur tersebut.

Secara teoritis, error pengukuran dihitung dengan membandingkan energi acuan dengan energi yang terbaca pada kWh meter. Dalam penelitian ini, persentase error pembacaan dirumuskan sebagai berikut:

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Energi acuan} - \text{Energi terbaca}}{\text{Energi acuan}} \times 100\%$$

Dimana:

Error (%) : Persentase kesalahan pengukuran

: Energi listrik dari alat uji standar (Wh atau kWh)

: Energi listrik yang terbaca pada kWh meter analog atau digital

Persamaan tersebut digunakan untuk mengetahui tingkat akurasi kWh meter analog maupun digital. Jika nilai error mendekati nol, maka alat ukur dianggap semakin akurat.

Selain akurasi, efektivitas penggantian kWh meter juga menjadi parameter penting dalam penelitian ini. Efektivitas pengukuran menunjukkan sejauh mana penggantian kWh meter tua dengan meter digital mampu meningkatkan kualitas pengukuran energi listrik. Secara teoritis, meter digital memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi karena menggunakan sensor elektronik dan sistem pengolahan numerik, sehingga dapat mengurangi pengaruh faktor mekanis seperti gesekan dan penuaan. Efektivitas pengukuran dihitung berdasarkan perbandingan error rata-rata meter tua dan meter digital dengan rumus:

$$\text{Efektivitas} = \frac{\text{Error rata-rata kWh meter digital}}{\text{Error rata-rata kWh meter analog}} \times 100\%$$

Dimana:

: Error rata-rata kWh meter analog

: Error rata-rata kWh meter digital

Nilai efektivitas yang tinggi menunjukkan bahwa penggantian kWh meter memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan akurasi pengukuran energi listrik.

Dalam evaluasi program penggantian kWh meter, diperlukan indikator kinerja yang mampu menggambarkan konsistensi pelaksanaan kegiatan di lapangan. Salah satu parameter yang digunakan adalah rata-rata realisasi bulanan. Secara teoritis, indikator ini menunjukkan kemampuan organisasi dalam melaksanakan program sesuai perencanaan dan jadwal yang telah ditetapkan. Rumus rata-rata realisasi bulanan dinyatakan sebagai berikut:

$$- = \frac{JPK}{JBP}$$

Dimana:

JPK : Jumlah penggantian kumulatif kWh meter

JBP : Jumlah bulan pengamatan

Nilai ini digunakan untuk menilai stabilitas dan kontinuitas pelaksanaan program penggantian kWh meter.

Selain itu, tingkat kendala atau pencapaian target penggantian juga menjadi indikator penting dalam menilai keandalan pelaksanaan program. Dalam teori manajemen proyek dan keandalan sistem, tingkat pencapaian target mencerminkan efektivitas perencanaan, kesiapan sumber daya, serta koordinasi teknis di lapangan. Persentase pencapaian target dihitung dengan rumus:

$$(\%) = \frac{PP}{T} \times 100\%$$

Dimana:

PP : Persentase pencapaian program penggantian

: Jumlah kWh meter digital yang telah terpasang

: Target penggantian kWh meter tua

Parameter ini memberikan gambaran mengenai keberhasilan program serta hambatan yang dihadapi, seperti kendala teknis, administratif, maupun sumber daya manusia.

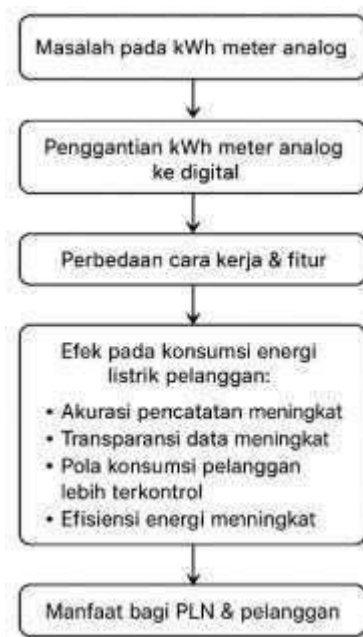
Dengan menggunakan perhitungan persentase error, efektivitas pengukuran, rata-rata realisasi, dan tingkat pencapaian target, penelitian ini dapat memberikan evaluasi yang komprehensif terhadap program penggantian kWh meter tua. Pendekatan ini tidak hanya menilai aspek teknis berupa akurasi alat ukur, tetapi juga menilai aspek operasional dan manajerial dalam pelaksanaan program. Hasil analisis diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan dalam meningkatkan keandalan, efisiensi, dan optimalisasi sistem pengukuran energi listrik di PLN ULP Bima Kota.

2.2.23 Definisi Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini digunakan sebagai parameter untuk menganalisis pengaruh penggantian kWh meter terhadap optimalisasi sistem pengukuran energi listrik. Variabel yang digunakan meliputi:

1. Error Pengukuran (%), Error merupakan selisih antara energi listrik yang terbaca pada kWh meter dengan energi acuan dari alat uji standar.
2. Efektivitas Penggantian (%), Efektivitas menunjukkan tingkat keberhasilan penggantian meter dalam meningkatkan akurasi pengukuran energi listrik.
3. Realisasi Penggantian kWh Meter, Realisasi menunjukkan jumlah meter tua yang berhasil diganti dalam periode penelitian.
4. Keandalan Program Penggantian, Keandalan menggambarkan konsistensi pelaksanaan program penggantian meter sesuai target dan jadwal.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 16 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini berfokus pada peralihan penggunaan kWh meter analog ke digital di PLN ULP Bima Kota. Permasalahan pada meter analog, seperti keterbatasan akurasi pencatatan, potensi kesalahan pembacaan, serta rendahnya transparansi data, mendorong perlunya penggantian ke kWh meter digital. Dengan teknologi yang lebih modern, kWh meter digital mampu mencatat pemakaian energi secara otomatis, akurat, dan terintegrasi dengan sistem monitoring. Perubahan ini memberikan dampak positif berupa peningkatan akurasi pencatatan, transparansi data pemakaian, pola konsumsi pelanggan yang lebih terkontrol, serta efisiensi energi yang lebih tinggi. Bagi PLN ULP Bima Kota, penggantian meter tua ini tidak hanya mengurangi potensi kehilangan energi, tetapi juga mengoptimalkan sistem pengukuran dan meningkatkan mutu pelayanan kepada pelanggan.