

**ANALISA KETELITIAN CURRENT TRANSFORMER
TERHADAP KESALAHAN RASIO ARUS PADA
PENGUKURAN ENERGI LISTRIK**

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR SARJANA STRATA SATU (S1) PADA PROGRAM
STUDI TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG



DISUSUN OLEH :

GILANG MAULANA

30602000080

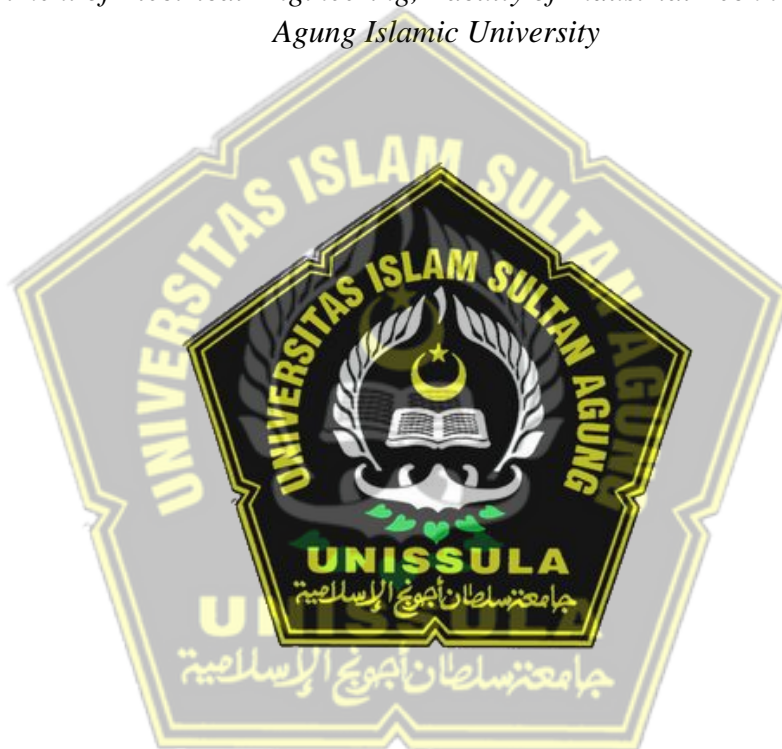
**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2024

FINAL PROJECT

**ANALYSIS OF ACCURACY OF CURRENT
TRANSFORMERS ON CURRENT RATIO ERROR IN
ELECTRIC ENERGY MEASUREMENT**

*Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1) at
Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Sultan
Agung Islamic University*



Arranged By :

GILANG MAULANA

30602000080

**MAJORING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2024

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISA KETELITIAN CURRENT TRANSFORMER TERHADAP KESALAHAN RASIO ARUS PADA PENGUKURAN ENERGI LISTRIK” ini disusun oleh :

Nama : Gilang Maulana

NIM : 30602000080

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan oleh dosen pembimbing pada :

Hari : Kamis

Tanggal : 29 Februari 2024

Pembimbing I



Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT

NIDN. 0628086501

Pembimbing II



Ir. Ida Widiastuti, MT

NIDN. 0005036501

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, ST, MT

NIDN. 0607018501


LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**ANALISA KETELITIAN CURRENT TRANSFORMER TERHADAP KESALAHAN RASIO ARUS PADA PENGUKURAN ENERGI LISTRIK**” ini telah dipertahankan di depan Dosen Penguji Tugas Akhir pada :


Hari : Kamis
Tanggal : 29 Februari 2024

TIM PENGUJI


Anggota I


Dr. Gunawan, S.T.,M.T.
NIDN. 0607117101

Anggota II


Dedi Nugroho, S.T.,M.T.
NIDN. 0617126602

Ketua Penguji


Dr. Ir. H. Sukarno Budi Utomo, M.T.
NIDN. 0619076401

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Gilang Maulana
NIM : 30602000080
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) **Teknik Elektro di Fakultas Teknologi UNISSULA Semarang** dengan judul “**Analisa Ketelitian Current Transformer Terhadap Kesalahan Rasio Arus Pada Pengukuran Energi Listrik**”, adalah asli dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Karya Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Semarang, 29 Januari 2023

Yang Menyatakan



Gilang Maulana

NIM. 30602000080

HALAMAN PERSEMBAHAN DAN MOTO

Persembahan :

Pertama,

Tugas akhir ini saya persembahkan untuk Keluarga saya, yaitu Orang tua yang telah merawat, menjaga dan membesarkan saya dan Istri saya yang telah memberikan motivasi dan mendukung penuh sampai dengan tugas akhir ini selesai.

Kedua,

Dosen pembimbing dan dosen program studi Teknik Elektro Unissula yang telah memberikan ilmu, bimbingan dan arahan tugas akhir sampai dengan selesai.

Ketiga,

Rekan kerja serta atasan di kantor PLN UP3 Salatiga yang memberikan dukungan semangat dan memberikan izin untuk menjalani kegiatan pendukung penyelesaian Tugas Akhir.

Motto :

"Dan janganlah kamu merasa lemah dan janganlah pula bersedih hati, sebab kamulah yang paling tinggi derajatnya jika kamu orang-orang yang beriman."

-QS. Ali Imran: 139

"Ketahuilah bahwa kemenangan bersama kesabaran, kelapangan bersama kesempitan, dan kesulitan bersama kemudahan." -HR Tirmidzi

"Dunia adalah perhiasan, dan sebaik-baik perhiasan dunia adalah istri yang sholehah." -HR Muslim

"Raihlah ilmu, dan untuk meraih ilmu belajarlah tenang dan sabar." - Umar bin Khattab

"Angin tidak berembus untuk menggoyangkan pepohonan, melainkan menguji kekuatan akarnya." - Ali bin Abi Thalib

"Kemarin saya pintar, jadi saya ingin mengubah dunia. Hari ini saya bijaksana, jadi saya mengubah diri saya sendiri." - Jalaluddin Rumi

"Pada dasarnya manusia itu makhluk yang memiliki sifat lemah lembut dan cerdas, hanya saja dalam perjalanannya nafsu yang tidak baik telah mengotorinya." - Jefri Al Buchori

"Tugas kita bukanlah untuk berhasil. Tugas kita adalah untuk mencoba, karena di dalam mencoba itulah kita menemukan dan belajar membangun kesempatan untuk berhasil." – Buya Hamka

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat serta anugerah Iman dan Islam sehingga berkesempatan untuk menimba ilmu dan menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Penyusunan Laporan Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Fakultas Teknologi Industri serta dimaksudkan untuk menambah ilmu di bidang kelistrikan khususnya di bagian Trafo Arus. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan salam hormat kepada pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan sehingga Laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan, yaitu kepada :

1. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, ST, MT selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Bapak Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT selaku Dosen Pembimbing I atas ilmu dan bimbingannya dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir.
4. Ibu Dr. Ida Widiastuti, MT selaku Dosen Pembimbing II atas ilmu dan bimbingannya dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir.
5. Bapak Khosyiiiin selaku Koordinator Tugas Akhir
6. Bapak dan Ibu Dosen Penguji yang telah menguji serta mengarahkan selama penyelesaian Laporan Tugas Akhir.
7. Admin kelas mitra Teknik Elektro yang selalu mengingatkan dan memberikan informasi seputar perkuliahan.
8. Keluarga saya di Tegal, dan Istri tercinta yang selalu mendoakan, mendukung dan memberikan semangat.
9. Rekan – rekan di kantor PLN UP3 Salatiga yang telah memberikan dukungan dan pengertian selama menjalani perkuliahan.

10. Serta teman teman kuliah di Universitas Islam Sultan Agung yang mendukung dan bertukar ilmunya selama penyusunan Tugas Akhir.

Dalam laporan Tugas akhir ini masih terdapat kekurangan dan kekhilafan karena keterbatasan dari penulis, untuk itu mohon maaf sebesar – besarnya dan penulis membutuhkan saran dan kritik yang membangun dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Penulis mengucapkan terima kasih dan salam hormat, semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat baik bagi penulis sendiri maupun bagi yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Semarang, Januari 2024

Penulis



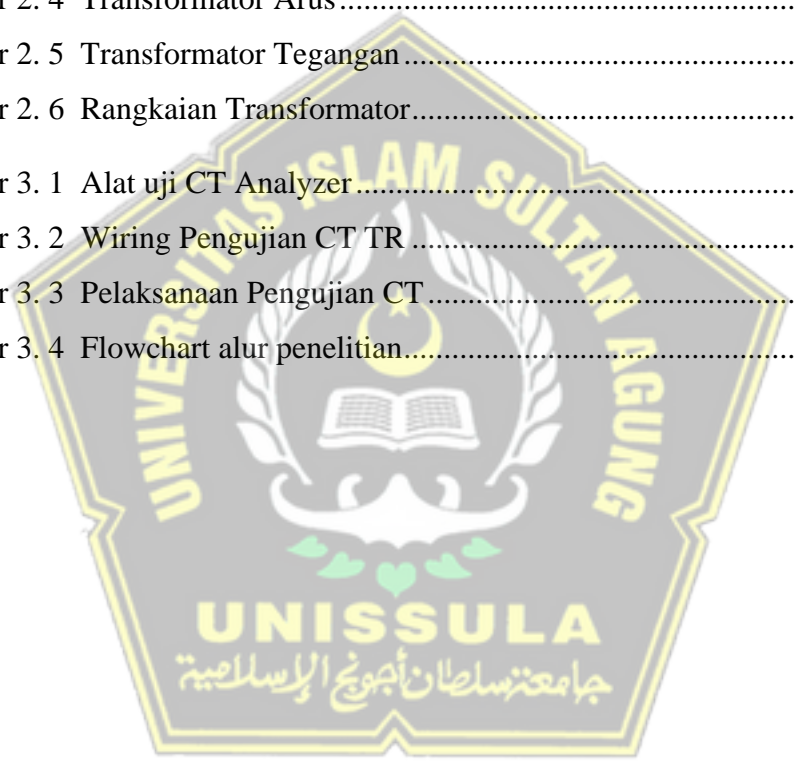
DAFTAR ISI

FINAL PROJECT	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN DAN MOTO	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Pembatasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Definisi Energi Listrik	7
2.2.2 Definisi Arus	8
2.2.3 Definisi Tegangan	8
2.2.4 Definisi Daya Listrik	9
2.2.5 Daya Aktif (P)	10
2.2.6 Daya Reaktif (Q)	11
2.2.7 Daya Semu (S)	12
2.2.8 Segitiga Daya	12

2.2.9	Faktor Daya.....	13
2.2.10	Transformator.....	15
2.2.11	Prinsip Kerja Transformator	18
2.2.12	Kesalahan Transformator Arus	19
2.2.13	Karakteristik Transformator Arus.....	30
2.2.14	Kelas akurasi transformator arus.....	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		35
3.1	Model Penelitian	35
3.2	Alat dan Bahan	37
3.3	Metode Penelitian.....	37
3.3.1	Jenis Penelitian.....	37
3.3.2	Jenis Data.....	37
3.3.3	Teknik Analisa Data	38
3.4	Tahapan Penelitian.....	39
3.4.1	Pemetaan Data Pelanggan TR.....	40
3.4.2	Data Pelanggan Dengan CT Rasio 200/5A.....	40
3.4.3	Menghitung potensi susut CT kelas 0,5 dan 0,5S.....	40
3.4.4	Pengujian CT metode offline dengan CT Analyzer.....	40
3.4.5	Analisa Pengujian	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Hasil perhitungan teori	41
4.1.1	Perhitungan ketelitian CT kelas 0,5.....	42
4.1.2	Perhitungan ketelitian kelas 0,5S	44
4.2	Hasil pengujian menggunakan CT Analyzer.....	47
4.2.1	Hasil Pengujian CT kelas 0.5.....	48
4.2.2	Hasil Pengujian CT kelas 0.5S.....	49
4.3	Analisa	50
4.3.1	Analisa Perhitungan	50
4.3.2	Analisa Pengujian	51
BAB V KESIMPULAN		53
DAFTAR PUSTAKA		55
LAMPIRAN.....		57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Segitiga Daya	13
Gambar 2. 2 Gelombang Sinus Faktor Daya Lagging	14
Gambar 2. 3 Gelombang Sinus Faktor Daya Leading	15
Gambar 2. 4 Transformator Arus	17
Gambar 2. 5 Transformator Tegangan.....	18
Gambar 2. 6 Rangkaian Transformator.....	19
Gambar 3. 1 Alat uji CT Analyzer.....	35
Gambar 3. 2 Wiring Pengujian CT TR.....	36
Gambar 3. 3 Pelaksanaan Pengujian CT.....	36
Gambar 3. 4 Flowchart alur penelitian.....	39



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Batas kesalahan transformator arus pengukuran.....	34
Tabel 4. 1	Batas Kesalahan kelas 0,5.....	42
Tabel 4. 2	Perhitungan Energi Primer kelas 0,5.... Error! Bookmark not defined.	
Tabel 4. 3	Perhitungan Energi Sekunder kesalahan positif kelas 0,5	43
Tabel 4. 4	Perhitungan Energi Sekunder Kesalahan Negatif Kelas 0,5.....	44
Tabel 4. 5	Tabel Batas Kesalahan kelas 0,5S.....	45
Tabel 4. 6	Perhitungan Energi Sekunder Kesalahan Positif Kelas 0,5S	45
Tabel 4. 7	Perhitungan Energi Sekunder Kesalahan Negatif Kelas 0,5S.....	46



ABSTRAK

Salah satu penyebab terjadinya susut pada pengukuran energi listrik yaitu dikarenakan tingginya kesalahan arus yang ditransformasikan oleh current transformer (CT) pada alat pengukur dan pembatas (APP) pengukuran tidak langsung milik PT.PLN (Persero). Diperlukan analisis terhadap karakteristik CT yang terpasang dan memastikan kesalahan arus sesuai dengan standar.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketelitian CT kelas 0,5 dan 0,5S dengan fokus pada dampak kesalahan rasio arus terhadap pengukuran energi listrik pada pelanggan tegangan rendah di PT.PLN (Persero). Metode penelitian dilakukan melalui pengujian material CT secara offline menggunakan alat CT Analyzer dengan rasio 200/5A.

Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan karakteristik antara CT kelas 0,5 dan kelas 0,5S. Pada beban rendah, tingkat kesalahan arus lebih rendah pada CT kelas 0,5S dibandingkan dengan CT kelas 0,5. Misalnya, pada CT kelas 0,5, kesalahan positif mencapai 2,96%, sedangkan pada CT kelas 0,5S, kesalahan positif hanya sebesar 0,96%. Pengujian dinilai lebih valid daripada hasil perhitungan teori.

Kerugian energi listrik akibat kesalahan arus CT juga dianalisis. Pada CT kelas 0,5, kerugian mencapai 472,61 kWh atau senilai Rp. 682.786,76 per tahun, sedangkan pada kelas 0,5S, kerugian lebih sedikit yaitu sebesar 406,14 kWh atau senilai Rp. 586.750,46 per tahun untuk satu pelanggan. Hasil ini dapat menjadi dasar untuk pemilihan jenis kelas ketelitian CT yang lebih optimal dalam mendukung akurasi pengukuran energi listrik pada sistem distribusi tegangan rendah.

Kata kunci : Susut, Current Transformer, Akurasi

ABSTRACT

One of the causes of energy loss in electricity measurement is the high current error transformed by the current transformer (CT) in the measuring and limiting device (APP) owned by PT.PLN (Persero). An analysis of the characteristics of the installed CT is required to ensure that current errors comply with standards.

This research aims to analyze the accuracy of Class 0.5 and 0.5S CTs, focusing on the impact of current ratio errors on electricity measurement for low-voltage customers of PT.PLN (Persero). The research method involves offline material testing of CT using a CT Analyzer with a 200/5A ratio.

Based on the results indicate differences in characteristics between Class 0.5 and 0.5S CTs. At low loads, the error rate of Class 0.5S CT is lower compared to Class 0.5. For instance, in Class 0.5, the positive error reaches 2.96%, while in Class 0.5S, the positive error is only 0.96%. The testing is considered more valid than theoretical calculations.

The analysis also includes the examination of electric energy losses due to CT current errors. For Class 0.5, the losses amount to 472.61 kWh or equivalent to Rp. 682,786.76 per year, while for Class 0.5S, the losses are less, totaling 406.14 kWh or equivalent to Rp. 586,750.46 per year for one customer. These findings can serve as a basis for selecting the optimal class of CT accuracy to enhance the accuracy of electricity measurement in low-voltage distribution systems.

Keywords: Losses, Current Transformer, Accuracy

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan distribusi tenaga listrik adalah jaringan tenaga listrik yang memasok kelistrikan ke beban (pelanggan) mempergunakan tegangan menengah 20kV dan tegangan rendah 220 – 380 V atau 231 – 400 V. Pada proses penyaluran energi listrik akan mengalami *losses* atau susut energi. Besarnya susut energi perlu dianalisa dan dilaksanakan perbaikan agar nilainya dalam batas wajar.

Susut energi perlu diperhatikan karena dapat menyebabkan kerugian dari segi penjualan PT.PLN (Persero) sebagai penyedia energi listrik. Kerugian disebabkan karena adanya selisih antara energi listrik yang didistribusikan dengan energi yang diterima atau terbaca pada alat ukur yaitu kWh meter.

Salah satu penyebab terjadinya susut yaitu karena tidak akuratnya pembacaan energi yang disebabkan kesalahan arus (*error*) yang ditransformasikan oleh Current Transformer (CT) pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP) pengukuran tidak langsung (Yuliansyah, et al., 2019). Penggunaan Current Transformer pada layanan tegangan rendah yaitu pada pengukuran tidak langsung rentang daya kontrak 17.600 VA sampai dengan daya 197.000 VA.

Kesalahan arus transformer adalah kesalahan suatu transformator pada pengukuran arus yang muncul dari kenyataan bahwa rasio transformasi actual tidak sama dengan rasio transformasi pengenal. Suatu alat semakin teliti jika kesalahan arusnya kecil (Devita & Eko, 2014). Jika nilai error Current Transformer negatif, maka jumlah energi yang terukur pada APP lebih kecil dari penggunaan energi sesungguhnya, dimana kondisi ini menyebabkan kerugian bagi PLN. Jika nilai error Current Transformer positif, maka jumlah energi yang terukur pada APP lebih besar dari

penggunaan energi sesungguhnya, kondisi ini merugikan pelanggan karena membayar tagihan listrik melebihi penggunaan sesungguhnya. Batas kesalahan arus dipengaruhi oleh kelas akurasi CT dan prosentase arus beban yang mengacu pada batas standar IEC 60044-1.

Dalam penelitian ini penulis akan membahas mengenai pengukuran Current Transformer tegangan rendah rasio 200/5A yang digunakan dalam pengukuran pelanggan daya 105 kVa dan 131 kVA. Terdapat total 91 pelanggan di UP3 Salatiga yang menggunakan Material Current transformer tegangan rendah rasio 200/5A namun tidak diketahui kelas akurasi pada material CT yang terpasang menggunakan kelas 0,5 atau kelas 0,5S. Diasumsikan 50% pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP) pelanggan masih menggunakan Current Transformer dengan kelas 0,5 yang memiliki prosentase kesalahan arus tinggi pada beban rendah 1% hingga 20% dari arus pengenal berdasarkan ketentuan pada SPLN D3.014-1:2009, maka perkiraan kerugian pada pelanggan daya 105 kVa dan 131 kVA selama tahun 2022 sebesar 78.560 kWh atau senilai Rp. 113.495.169,-.

Analisa yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode perhitungan dan pembuktian dengan pengujian offline menggunakan alat uji CT Analyzer dan material Current Transformer milik PT.PLN (Persero) UP3 Salatiga untuk mengetahui batas kesalahan arus yang diatur oleh Standar PLN. Tingginya kesalahan rasio arus menimbulkan kesalahan dalam pengukuran yang menimbulkan kerugian bagi perusahaan sehingga pemilihan kelas akurasi Current Transformer perlu diperhatikan.

1.2 Perumusan Masalah

Dari uraian latar belakang di atas, rumusan masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana kelas akurasi CT dapat mempengaruhi tingkat kesalahan rasio arus dan bagaimana standar PLN mengatur batasan tersebut

2. Bagaimana hasil analisis metode perhitungan dan pengujian secara offline dengan CT analyzer untuk mengidentifikasi kesalahan rasio arus pada CT kelas 0,5 dan kelas 0,5S
3. Bagaimana rekomendasi yang dapat diterapkan untuk mengurangi tingkat kesalahan arus dan susut energy pada pengukuran energy listrik.

1.3 Pembatasan Masalah

Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir, telah ditentukan batasan-batasan masalah yang akan diteliti sebagai berikut :

1. Perhitungan dan pengujian Current Transformer secara offline
2. Material yang digunakan dalam penelitian yaitu Current Transformer (CT) Tegangan Rendah Rasio 200/5A kelas 0,5 dan 200/5A kelas 0,5S.
3. Pengujian menggunakan alat uji CT Analyzer

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari penulisan yang berjudul “ANALISA KETELITIAN CURRENT TRANSFORMER TERHADAP KESALAHAN RASIO ARUS PADA PENGUKURAN ENERGI LISTRIK” adalah sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi dampak pemilihan kelas ketelitian terhadap tingkat kesalahan rasio arus CT kelas 0,5 dan 0,5S
2. Mengevaluasi dampak perkiraan kerugian energi listrik akibat penggunaan CT kelas 0,5 dengan prosentasi kesalahan arus tinggi pada beban rendah dan melakukan perbandingan dengan CT kelas 0,5S
3. Memberikan panduan untuk memilih kelas akurasi CT yang lebih optimal berdasarkan hasil analisis metode perhitungan dan pengujian dengan CT analyzer

1.5 Manfaat

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini yaitu diharapkan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat untuk PT.PLN (Persero) UP3 Salatiga sebagai bahan pertimbangan dalam proses menentukan maupun penggantian material Current Transformer yang digunakan dalam pengukuran tidak langsung sehingga dapat menekan susut dan juga untuk referensi pembaca yang sedang melaksanakan penelitian terkait ketelitian Current Transformer atau penelitian serupa lainnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada penulisan penelitian ini sistematika penulisannya adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, sampai dengan batasan permasalahan. Selanjutnya tujuan dan manfaat dari penelitian serta menuliskan sistematika dalam penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA & LANDASAN TEORI

Pada bab ini berisi referensi dari beberapa penelitian yang memiliki tema yang berhubungan dan dasar teori yang diperlukan untuk perhitungan yang berhubungan dalam pembahasan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan tentang model penelitian, material dan peralatan yang diperlukan dalam penelitian, metode penelitian dan tahapan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi data yang merupakan hasil penelitian yang dilakukan serta dari hasil pengujian dan berisi analisa berdasarkan hasil pengujian

dan dibandingkan dengan teori yang digunakan, serta sebagai dasar untuk lembar kesimpulan pada bab selanjutnya.

BAB V PENUTUP

Pada bab ini berisi kesimpulan serta saran dalam arah pengembangan dan berbagai kemungkinan ke arah penelitian berikutnya juga pencegahan hal-hal yang tidak diinginkan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian tentang Analisa Ketelitian Current Transformer telah dilakukan sebelumnya antara lain :

1. Optimalisasi Pengukuran Arus Oleh Current Transformer untuk Meminimalisir Susut Energi Pada Pabrik Baja PT.Inti General Yaja Steel Daerah Semarang Barat (Amalia & Ariyanto, 2014). Penelitian tentang perbandingan penggunaan trafo arus rasio 300/5 dibandingkan dengan rasio 200/5 pada daya kontrak 6.000 kVA dengan pemakaian beban yang sama yaitu 65%. Dengan metode perhitungan. Didapatkan hasil selisi kerugian atau error CT -0,019% atau kerugian energi 4.824 kWh / bulan. Berdasarkan data tersebut maka perlu dilaksanan penggantian CT di pelanggan tersebut dari rasio 300/5 menjadi 200/5 untuk mengurangi kerugian energi.
2. Analisis Pengaruh Error Transformator Arus Terhadap Selisih Pengukuran Energi Listrik Pelanggan TR 3 Fasa di PT.PLN (Persero) UP3 Bali Timur (Laksana, 2022). Pengukuran error CT menggunakan alat ukur CALMET pada pelanggan Tegangan Rendah (TR) 3 Fasa

Gardu UB0151, UB0353, dan SI0031 di PT.PLN (Persero) UP3 Bali Timur. Hasil perhitungan menunjukkan energi listrik pada gardu tersebut saat kondisi error CT berada diluar batas kelasnya secara berturut-turut sebesar 11.588.471,500 WH, 7.348.819,894 WH, 11.729.022,348 WH, sedangkan saat kondisi error CT diasumsikan 0% secara berturut-turut sebesar 11.844.084,781 WH, 7.591.261,469 WH, 11.928.644,063 WH. Dari hasil penelitian menunjukkan nilai error CT berada diluar spesifikasinya sehingga nilai energi yang terbaca lebih kecil dibandingkan saat nilai error CT diasumsikan 0%. Semakin besar error CT maka semakin besar juga selisih energi listrik.

3. Kajian Ketelitian Current Transformer (CT) Terhadap Kesalahan Rasio Arus pada Pelanggan 197 kVA (Koerniawan, et al., 2019). Pengujian dengan metode perhitungan nilai kesalahan rasio arus CT kelas 0.5 dan kelas 0.5S dengan hasil kesalahan rasio arus pada kelas 0.5 lebih besar dibandingkan kelas 0.5S dan batas kelas ketelitian untuk CT kelas 0,5 adalah $\pm 0,5\%$ saat beban arus sebesar 100% sampai 120% dan pada CT kelas 0,5S bernilai $\pm 0,5\%$ saat beban arus sebesar 20% sampai 120%. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa material CT yang digunakan sesuai dengan standar PLN.
4. Manfaat Penggantian CT Kelas 0.5 dengan Kelas 0.5S di Pelanggan Besar Pada Pemakaian Beban Rendah (Maurits A Paath). Penelitian ini difokuskan pada implikasi perbedaan kelas ketelitian CT 0.5S dibandingkan kelas CT 0.5 dan manfaatnya terhadap kenaikan pemakaian energi listrik khususnya pada beban rendah dari arus pengenalnya. Dari hasil Analisa studi kasus 1 dan 2 menggambarkan adanya kenaikan pemakaian energi bila menggunakan CT 0.5S, yaitu untuk kesalahan positif sebesar 37.23 kWh dan batas kesalahan negatif sebesar 37.3 kWh. Dari penelitian ini disimpulkan perbandingan tingkat kelas ketelitian untuk CT 0.5S mampu mengukur beban rendah sampai 1%, sedangkan kelas 0.5 tidak dapat mengukur.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Definisi Energi Listrik

Energi listrik merupakan energi yang berkaitan dengan akumulasi arus elektron yang dinyatakan dalam bentuk Watt-jam atau kilo Watt-jam. Bentuk transisinya adalah aliran elektron melalui konduktor jenis tertentu. Energi listrik dapat disimpan sebagai energi medan elektrostatis yang merupakan energi yang berkaitan dengan medan listrik yang dihasilkan oleh terakumulasinya muatan elektron pada pelat-pelat kapasitor.

Energi listrik juga dapat dijelaskan sebagai energi utama yang diperlukan bagi peralatan listrik atau disebut energi yang tersimpan dalam arus listrik dengan satuan Amper (A), tegangan satuan Volt (V) dan ketentuan kebutuhan konsumsi daya listrik dengan satuan Watt (W) untuk menggerakkan motor, penerangan lampu, memanaskan dan mendinginkan sesuatu atau menggerakkan kembali suatu peralatan mekanik untuk menghasilkan bentuk energi lain.

Energi yang digunakan pada alat elektronik untuk menghasilkan energi listrik merupakan laju konsumsi energi (daya) dikali dengan waktu pada saat alat tersebut digunakan. Sebagai hasil energi dari daya yang dipakai dalam suatu waktu (Kadir, 1995) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$E = P \times t \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

E = Energi (Joule)

P = Daya Listrik (Watt)

t = Waktu (Detik)

2.2.2 Definisi Arus

Arus berasal dari kata Bahasa Prancis yaitu *intensité* yang memiliki arti intensitas. Arus didefinisikan sebagai perubahan kecepatan muatan terhadap waktu. Definisi lainnya mengenai arus adalah muatan yang mengalir dalam satuan waktu. Dimana muatan merupakan satuan paling kecil dari sebuah atom atau sub bagian dari atom. Sehingga arus merupakan muatan yang dapat bergerak. Selama muatan tersebut bergerak maka akan muncul arus, namun apabila muatan tersebut diam maka arus pun akan hilang (Kadir, 2000).

Arus dengan simbol I yang memiliki satuan Ampere (A). Secara sistematis, arus didefinisikan sebagai berikut :

$$I = \frac{Q}{t} \quad I = \frac{P}{v} \quad I = \frac{V}{R} \quad I = \frac{P}{\sqrt{R \cos \varphi}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

I = Kuat arus listrik (Ampere)

Q = Muatan listrik (Coulomb)

t = Waktu (Sekon)

V = Tegangan listrik (Volt)

P = Daya listrik (Watt)

R = Hambatan (Ohm)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.2.3 Definisi Tegangan

Tegangan (voltage) atau yang sering disebut dengan beda potensial adalah kerja yang dilakukan untuk menggerakkan muatan sebesar satu Coulomb dari satu terminal ke terminal lainnya. Dengan kata lain, jika suatu muatan sebesar satu Coulomb digerakkan atau dipindahkan, maka akan

terdapat beda potensial pada kedua terminalnya. Kerja yang dilakukan sebenarnya adalah energi yang dikeluarkan. Jadi, berdasarkan penjabaran diatas, tegangan adalah energi per satuan muatan (Kadir, 2000). Secara sistematis, tegangan didefinisikan sebagai berikut:

$$V = \frac{W}{Q} \quad V = I \cdot R \quad V = \frac{P}{I \cos \varphi} \quad V = \frac{\sqrt{P \cdot R}}{\cos \varphi} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

V = Tegangan listrik (Volt)

W = Usaha (Joule)

I = Kuat arus listrik (Ampere)

Q = Muatan listrik (Coulomb)

P = Daya listrik (Watt)

R = Hambatan (Ohm)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.2.4 Definisi Daya Listrik

Daya listrik atau dalam bahasa Inggris Electrical Power adalah jumlah energi yang diserap atau yang dihasilkan dalam sebuah sirkuit/rangkaian. Sumber energi seperti tegangan listrik akan menghasilkan daya listrik, sedangkan beban yang terhubung dengannya akan menyerap daya listrik tersebut.

Menurut Ramdhani (2008), daya adalah hasil kali antara tegangan yang diberikan dengan arus yang mengalir. Secara sistematis: $P = VI$ (sumber arus searah atau dc). Daya dikatakan positif ketika arus yang mengalir bernilai positif, artinya arus mengalir dari sumber tegangan menuju rangkaian (transfer energi dari sumber ke rangkaian). Daya dikatakan negatif ketika arus yang mengalir bernilai negatif, artinya arus mengalir dari rangkaian menuju sumber tegangan (transfer energi dari sumber ke sumber).

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad P = I^2 \cdot R \cdot \cos \varphi \quad P = \frac{V^2}{R} \cos \varphi \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

- P = Daya listrik (Watt)
- V = Tegangan listrik (Volt)
- I = Arus listrik (Ampere)
- R = Hambatan (Ohm)
- $\cos \varphi$ = Faktor daya

Adapun daya listrik terbagi menjadi tiga macam, yaitu:

1. Daya aktif
2. Daya reaktif
3. Daya semu

2.2.5 Daya Aktif (P)

Daya aktif adalah daya listrik yang dibangkitkan di sisi keluaran generator, kemudian dapat dimanfaatkan oleh konsumen, dapat dikonversi ke bentuk energi lainnya seperti energi gerak pada motor, bisa juga menjadi energi panas pada heater ataupun dapat diubah ke bentuk energi listrik lainnya (Sigit, 2015).

Untuk satu fasa :

$$P = V_n \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.5)$$

Untuk tiga fasa:

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

- P = Daya aktif (Watt)
- I = Arus (Ampere)
- V_N = Tegangan fasa netral (Volt)
- V_L = Tegangan fasa (Volt)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.2.6 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif yaitu suatu besaran yang digunakan untuk menggambarkan adanya fluktuasi daya pada saluran transmisi dan distribusi akibat dibangkitkannya medan / daya magnetic atau beban yang bersifat induktif (seperti : motor listrik, trafo, dan las listrik). Daya reaktif ini tidak nyata dan tidak bisa dimanfaatkan (Sigit, 2015).

Daya reaktif ini adalah hasil kali besarnya arus dikalikan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor-faktor kerja ($\sin \varphi$) yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet. Atau dapat didefinisikan sebagai daya rugi atau daya yang hilang sehingga semakin besar sudutnya atau semakin kecil faktor dayanya maka ruginya semakin besar. Satuannya adalah VAR, kVAR, MVAR.

Daya reaktif ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

Untuk satu fasa:

$$Q = V_n \times I \times \sin \varphi \dots \dots \dots (2.7)$$

Untuk tiga fasa:

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I \times \sin \varphi \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

- Q = Daya reaktif (VAR)
- I = Arus (Ampere)
- VN = Tegangan fasa netral (Volt)
- VL = Tegangan fasa (Volt)
- $\sin \varphi$ = Faktor kerja

2.2.7 Daya Semu (S)

Daya semu merupakan jumlah daya total yang terdiri dari daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). (Sigit, 2015).

Selain itu, daya semu merupakan daya yang terukur atau terbaca pada alat ukur yang dibangkitkan oleh generator pada sistem pembangkit listrik. Daya semu terdiri dari daya aktif dan daya reaktif. Dimana satuan besarnya adalah VA, KVA atau MVA.

Untuk satu fasa:

$$S = V_n \times I \dots\dots\dots (2.9)$$

Untuk tiga fasa:

$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I \dots\dots\dots (2.10)$$

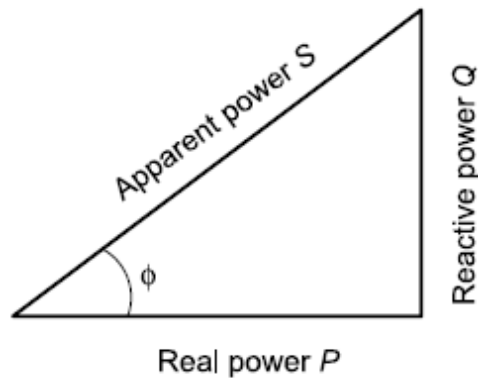
Keterangan:

- S = Daya semu (VA)
- I = Arus (Ampere)
- V_N = Tegangan fasa netral (Volt)
- V_L = Tegangan fasa (Volt)

Dari ketiga macam daya di atas, hubungan antara daya tersebut selanjutnya dikenal dengan istilah segitiga daya.

2.2.8 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah suatu hubungan antara daya aktif, daya semu dan daya reaktif dengan merepresentasikan daya-daya tersebut sebagai vektor. Daya aktif direpresentasikan sebagai vektor horizontal, daya reaktif direpresentasikan sebagai vektor vertikal sedangkan daya semu adalah hipotenusa (sisi miring) dari segitiga siku-siku yang terbentuk dengan menghubungkan vektor-vektor daya aktif dan reaktif. Bentuk segitiga daya dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2. 1 Segitiga Daya

Perbandingan antara besarnya daya aktif dengan daya semu disebut faktor daya ($\cos \varphi$). Besarnya φ adalah sudut yang dibentuk antara daya aktif dan daya semu. Sudut φ merupakan sudut pergeseran fasa, semakin besar sudutnya maka semakin besar daya reaktifnya. Sehingga, faktor daya ini terjadi karena adanya pergeseran fasa yang disebabkan oleh adanya beban kapasitif dan atau beban induktif/kumparan. Dalam teori listrik arus bolak-balik penjumlahan daya dilakukan secara vektoris, yang vektornya membentuk segitiga siku-siku, yang dikenal dengan sebutan segitiga daya.

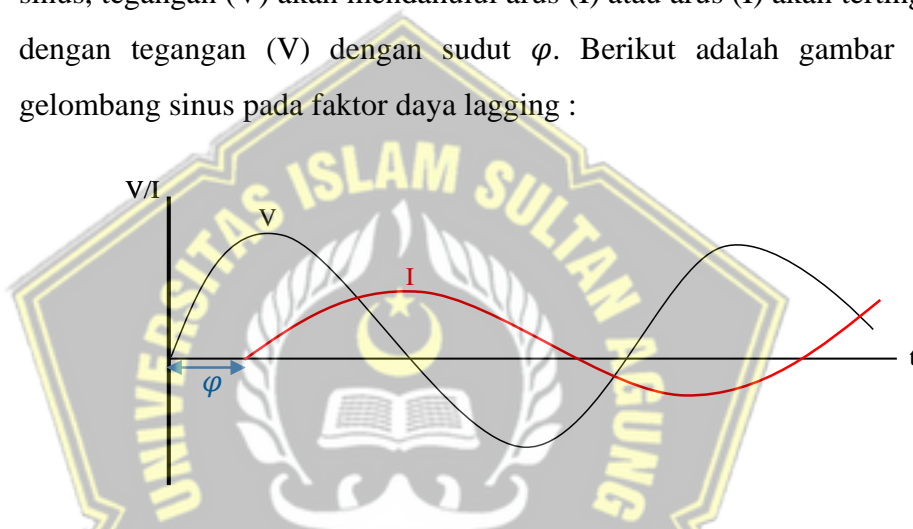
2.2.9 Faktor Daya

Faktor daya atau power factor (pf) adalah cosinus dari beda sudut fasa antara arus dengan tegangan. Faktor daya mempunyai rentang nilai antara 0 (nol) sampai 1 (satu) yang disimbolkan dengan " $\cos \varphi$ ". Bila nilainya semakin mendekati 1 (satu) maka nilai faktor daya akan semakin baik dan sebaliknya bila semakin mendekati 0 (nol) maka nilai faktor dayannya buruk. Kemudian untuk mencari nilai faktor daya dapat dilakukan dengan membagi daya aktif (P) dengan daya semu (S). Faktor daya akan membesar atau meningkat ketika nilai $\cos \varphi$ mendekati nilai 1 atau sudut φ akan mendekati sudut 0. Faktor daya dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{V_{eff}.I_{eff}.\cos \varphi}{V_{eff}.I_{eff}} = \cos \varphi \dots \dots \dots (2.11)$$

1. Faktor Daya Tertinggal (*lagging*)

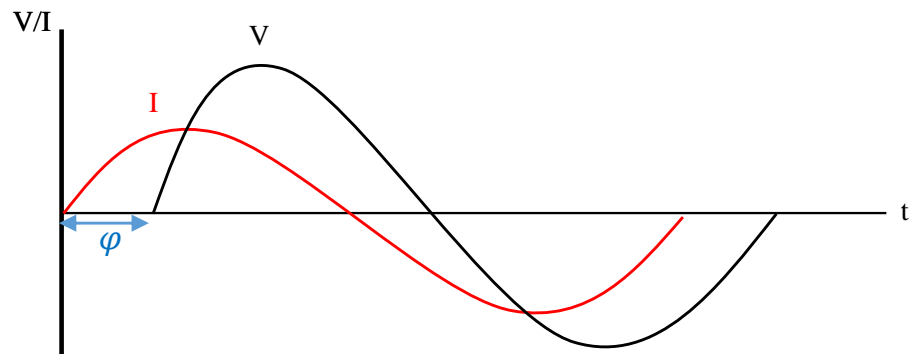
Faktor daya tertinggal (*lagging*) menunjukkan kondisi disaat beban bersifat induktif dan memerlukan daya reaktif dari jaringan. Nilai $\cos \varphi$ pada saat kondisi *lagging* akan bernilai positif. Kemudian pada gelombang sinus, tegangan (V) akan mendahului arus (I) atau arus (I) akan tertinggal dengan tegangan (V) dengan sudut φ . Berikut adalah gambar dari gelombang sinus pada faktor daya *lagging* :



Gambar 2. 2 Gelombang Sinus Faktor Daya Lagging

2. Faktor Daya Mendahului (*leading*)

Faktor daya mendahului (*leading*) menunjukkan kondisi disaat beban bersifat kapasitif dan memberikan daya reaktif ke jaringan. Nilai $\cos \varphi$ pada saat kondisi *leading* akan bernilai negatif. Kemudian pada gelombang sinus, tegangan (V) akan tertinggal terhadap arus (I) atau arus (I) akan mendahului tegangan (V) sebesar sudut φ . Berikut adalah gambar dari gelombang sinus pada faktor daya *leading* :



Gambar 2. 3 Gelombang Sinus Faktor Daya Leading

Bila nilai pf lebih kecil dari 0,85 ($< 0,85$) maka kapasitas daya aktif (kW) yang digunakan akan berkurang. Akibat penurunan nilai pf, maka akan timbul beberapa persoalan diantaranya: (Kadir, 2000)

1. Membesarnya konsumsi daya aktif (kWH) karena rugi-rugi
2. Membesarnya konsumsi daya reaktif (kVAR)
3. Mutu listrik menjadi rendah akibat tegangan jatuh (voltage drops)

2.2.10 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban, untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain untuk menghambat arus searah sambil tetap melalukan arus bolak balik antara rangkaian.

Berdasarkan fungsinya transformator dibagi menjadi tiga yaitu :

1. Transformator daya

Transformator daya adalah transformator yang digunakan untuk pemasok daya. Transformator daya mempunyai dua fungsi yaitu menaikkan tegangan listrik (step-up) pada sistem dimana tegangan keluarannya lebih tinggi dari pada tegangan masukannya misalnya pada saat pengiriman atau penyaluran daya.

Ciri-ciri transformator penaik tegangan (step-up transformator) yaitu :

- a. Jumlah lilitan primer lebih sedikit dari pada jumlah lilitan sekunder ($N_p < N_s$).
- b. Tegangan primer lebih kecil dari pada tegangan sekunder ($V_p < V_s$).
- c. Kuat arus primer lebih besar dari pada kuat arus sekunder ($I_p > I_s$).

Fungsi kedua adalah menurunkan tegangan listrik (step-down) pada sistem dimana tegangan keluarannya lebih rendah dari pada tegangan masukannya misalnya menerima atau memerlukan daya.

Ciri-ciri transformator penurun tegangan (step-down transformator) yaitu :

- a. jumlah lilitan primer lebih banyak dari pada jumlah lilitan sekunder ($N_p > N_s$)
- b. tegangan primer lebih besar dari pada tegangan sekunder ($V_p > V_s$)
- c. kuat arus primer lebih kecil dari pada kuat arus sekunder ($I_p < I_s$)

Transformator daya tidak dapat digunakan langsung digunakan untuk menyuplai beban, karena sisi tegangan rendahnya masih lebih tinggi dari tegangan beban, sedangkan sisi tegangan tingginya merupakan tegangan transmisi.

2. Transformator distribusi

Transformator distribusi digunakan mendistribusikan energi listrik sehingga bisa langsung digunakan oleh konsumen. Transformator distribusi yang digunakan adalah transformator step-down dari 20kV/400V.

3. Transformator pengukuran

Transformator jenis ini digunakan untuk mengukur arus (I) dan tegangan (V) yang tidak mungkin harus diukur secara langsung oleh ampere meter atau voltmeter. Transformator pengukuran terdiri dari :

a. Transformator arus

Trafo yang digunakan untuk mengukur arus beban yang besar pada suatu rangkaian maka digunakan trafo arus sehingga dapat diukur dengan Amperemeter yang tidak terlalu besar.



Gambar 2. 4 Transformator Arus

Transformator dianggap ideal jika arus beban yang mengalir adalah

$I_p = (N_s/N_p) \times I_s$ dan bila $N_s/N_p = k$, maka didapat persamaan :

$$I_p = k \times I_s$$

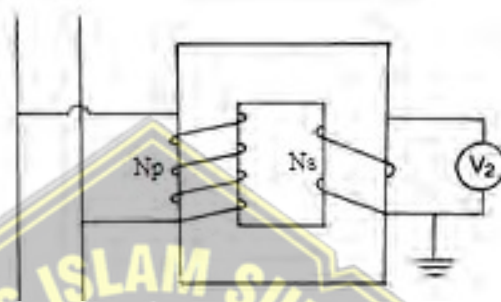
I_p adalah besar arus yang diukur, dapat dibaca pada Ammeter (I_s) dengan faktor pengali N_s/N_p yang diketahui.

Gaya gerak magnet ($N_s I_s$) akan sama dengan nol jika rangkaian sekunder pada transformator terbuka karena $I_s=0$, fluksi normal akan

terganggu dengan adanya ggm ($NpIp$) maka transformator arus rangkaian sekunder harus selalu dalam keadaan tertutup.

b. Transformator tegangan

Tegangan yang tidak bisa diukur langsung oleh voltmeter dapat diukur langsung dengan menggunakan transformator tegangan.

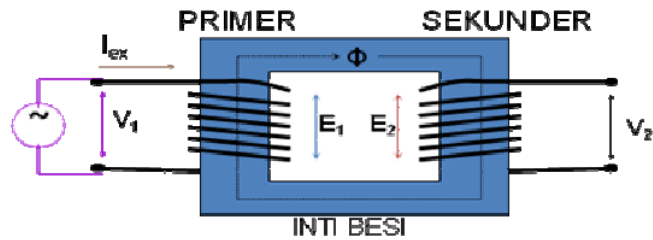


Gambar 2.5 Transformator Tegangan

Konstruksi transformator tegangan dengan lilitan primer (Np), lilitan sekunder (Ns), dan Tegangan sekunder ($V2$).

2.2.11 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja suatu transformator adalah induksi bersama (mutual induction) antara dua rangkaian yang dihubungkan oleh fluks magnet. Dalam bentuk yang sederhana, transformator terdiri dari dua buah kumparan yang secara listrik terpisah tetapi secara magnet dihubungkan oleh suatu alur induksi. Kedua kumparan tersebut mempunyai mutual induction yang tinggi. Jika salah satu kumparan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, fluks bolak-balik timbul di dalam inti besi yang dihubungkan dengan kumparan yang lain menyebabkan atau menimbulkan ggl (gaya gerak listrik) induksi (sesuai dengan induksi elektromagnet) dari hukum Faraday.



Gambar 2. 6 Rangkaian Transformator

Berdasarkan hukum Faraday yang menyatakan magnitude dari electromotive force (emf) proporsional terhadap perubahan fluks terhubung dan hukum Lenz yang menyatakan arah dari emf berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks tersebut didapatkan persamaan :

$$e = - \left(\frac{d\psi}{dt} \right)$$

Dimana : e = emf sesaat (instantaneous emf)

ψ = fluks terhubung (linked flux)

Dan pada transformer ideal yang dieksitasi dengan sumber sinusoidal berlaku persamaan :

$$\frac{E^1}{E^2} = \frac{N^1}{N^2}$$

Dikarenakan pada transformer ideal seluruh mutual flux yang dihasilkan salah satu kumparan akan diterima seutuhnya oleh kumparan yang lainnya tanpa adanya leakage flux maupun loss lain misalnya berubah menjadi panas. Atas dasar inilah didapatkan pula persamaan :

$$P1 = P2$$

$$V1.I1 = V2.I2$$

$$N1.I1 = N2.I2$$

2.2.12 Fungsi Trafo arus

Fungsi dari trafo arus adalah sebagai berikut :

1. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran
3. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 dan 5 Ampere

Berdasarkan fungsinya trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu :

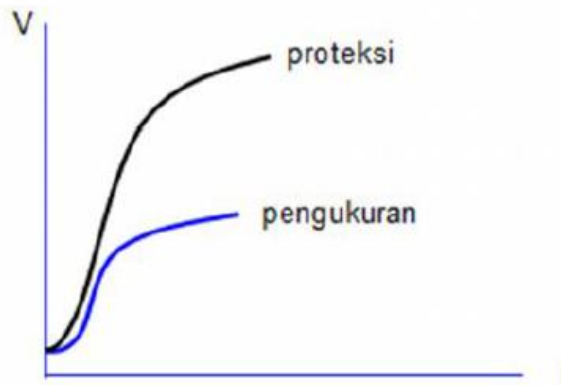
1. Trafo arus pengukuran

Trafo arus pengukuran untuk *metering* memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) yaitu 5% -120% arus nominalnya tergantung dari kelas dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi. Penggunaan trafo arus pengukuran yaitu untuk rangkaian Amperemeter, Watt-meter, VARh meter dan $\cos \varphi$ meter.

2. Trafo arus proteksi

Trafo arus untuk proteksi memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi. Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.

Perbedaan mendasar trafo arus pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya seperti pada kurva saturasi dibawah ini :



Gambar 2. 7 Kurva kejenuhan trafo arus

Trafo arus untuk pengukuran dirancang sedemikian rupa agar lebih cepat jenuh dibandingkan trafo arus proteksi, sehingga konstruksi trafo arus pengukuran mempunyai luas penampang inti yang lebih kecil yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 8 Luas penampang inti trafo arus

2.2.13 Jenis Trafo arus

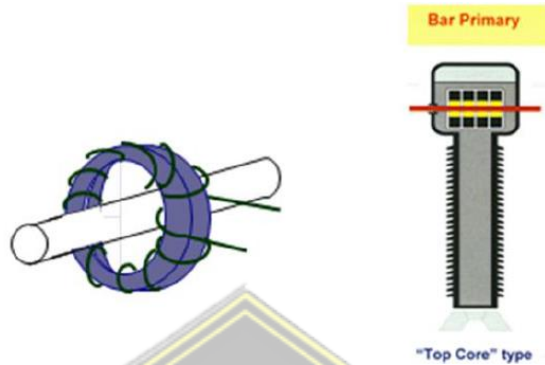
Jenis trafo arus berdasarkan tipe konstruksi dan pemasangannya yaitu sebagai berikut :

1. Tipe Konstruksi
 - a. Tipe cincin (*ring / window type*)
 - b. Tipe cor coran cast resin (*mounded cast resin type*)
 - c. Tipe tangki minyak (*oil tank type*)
 - d. Tipe trafo arus bushing
2. Tipe Pasangan
 - a. Pasangan dalam (*indoor*)

b. Pasangan luar (*outdoor*)

Jenis trafo arus berdasarkan konstruksi belitan primer yaitu :

1. Sisi primer batang (*bar primary*)



Gambar 2. 9 Bar Primary

2. Sisi tipe lilitan (*wound primary*)



Gambar 2. 10 Wound Primary

Jenis trafo arus berdasarkan konstruksi jenis inti yaitu :

1. Trafo arus dengan inti besi

Trafo arus dengan inti besi adalah trafo arus yang umum digunakan pada arus yang kecil (jauh dibawah nilai nominal) terdapat kecenderungan kesalahan dan pada arus yang besar (beberapa kali nilai nominal) trafo arus akan mengalami saturasi.

2. Trafo arus tanpa inti besi

Trafo arus tanpa inti besi tidak memiliki saturasi dan rugi histerisis, transformasi dari besaran primer ke besaran sekunder adalah linier di seluruh jangkauan pengukuran, contohnya adalah koil rogowski.

Berdasarkan konstruksi jenis inti trafo arus terbagi menjadi empat yaitu :

1. Trafo arus kering

Trafo arus kering digunakan pada tegangan rendah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (*indoor*).

2. Trafo arus *cast resin*

Trafo arus ini digunakan pada tegangan menengah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (*indoor*), misalnya trafo arus tipe cincin yang digunakan pada kubikel penyulang 20 kV.

3. Trafo arus isolasi minyak

Digunakan umumnya pada pasangan luar (*outdoor*) misalkan trafo arus tipe bushing yang digunakan pada pengukuran arus penghantar tegangan 70 kV dan 150 kV.

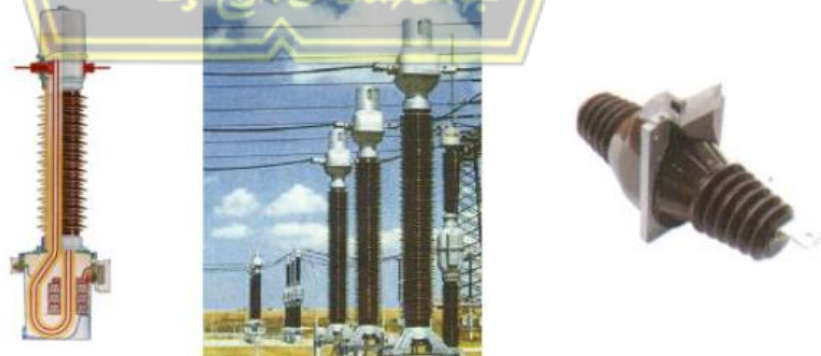
4. Trafo arus isolasi SF6 / *compound*

Digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya pada pasangan luar ruangan (*outdoor*) misalkan trafo arus tipe top-core.

Berdasarkan penempatannya trafo arus dibagi menjadi dua yaitu :

1. Trafo arus pemasangan luar (*outdoor*)

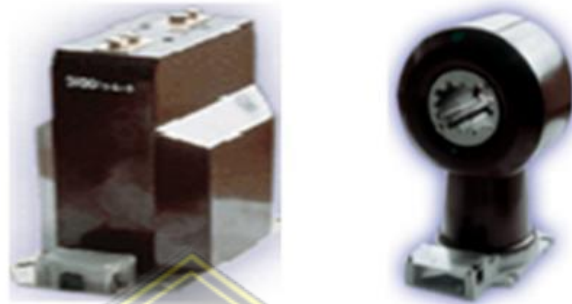
Memiliki konstruksi fisik yang kokoh, isolasi yang baik, menggunakan isolasi minyak untuk rangkaian elektrik internal dan bahan keramik/porcelain untuk isolator eksternal.



Gambar 2. 11 Trafo arus *Outdoor*

2. Trafo arus pemasangan dalam (*indoor*)

Trafo arus pemasangan dalam ruangan biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil dari pada trafo arus pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.



Gambar 2. 12 Trafo arus Indoor

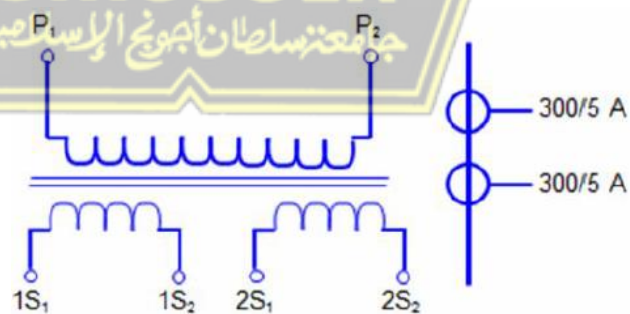
Berdasarkan jumlah inti sisi sekunder trafo arus terbagi dua yaitu :

1. Trafo arus dengan inti tunggal

Contoh : Trafo arus dengan rating arus 150-300/5A, 200-400/5A atau 300-600/1A.

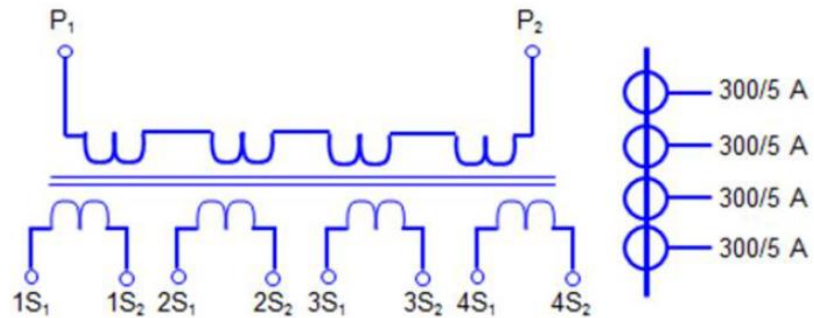
2. Trafo arus dengan inti banyak

Trafo arus dengan inti banyak dirancang untuk bermacam peruntukkan yang memiliki sifat penggunaan yang berbeda dan untuk menghemat tempat.



Gambar 2. 13 Trafo arus dua inti

P2 – P2 berfungsi sebagai penandaan sisi primer dari trafo arus. 1S₁ – 1S₂ menandakan sisi sekunder dari trafo arus dan berfungsi sebagai pengukuran. 2S₁ – 2S₂ menandakan sisi sekunder dari trafo arus dan berfungsi sebagai relai arus lebih.



Gambar 2. 14 Trafo arus empat inti

P₁ – P₂ berfungsi sebagai penandaan sisi primer dari trafo arus. Penandaan sekunder inti ke 1 ditandai dengan 1S₁ – 1S₂ berfungsi sebagai pengukuran. Penandaan sekunder inti ke 2 ditandai dengan 2S₁ – 2S₂ berfungsi untuk relai arus lebih. Penandaan sekunder inti ke 3 yaitu 3S₁ – 3S₂ berfungsi untuk relai jarak. Penandaan sekunder inti ke 4 yaitu 4S₁ – 4S₂ sebagai proteksi rel.

Berdasarkan arus pengenalnya trafo arus dibagi menjadi dua jenis yaitu :

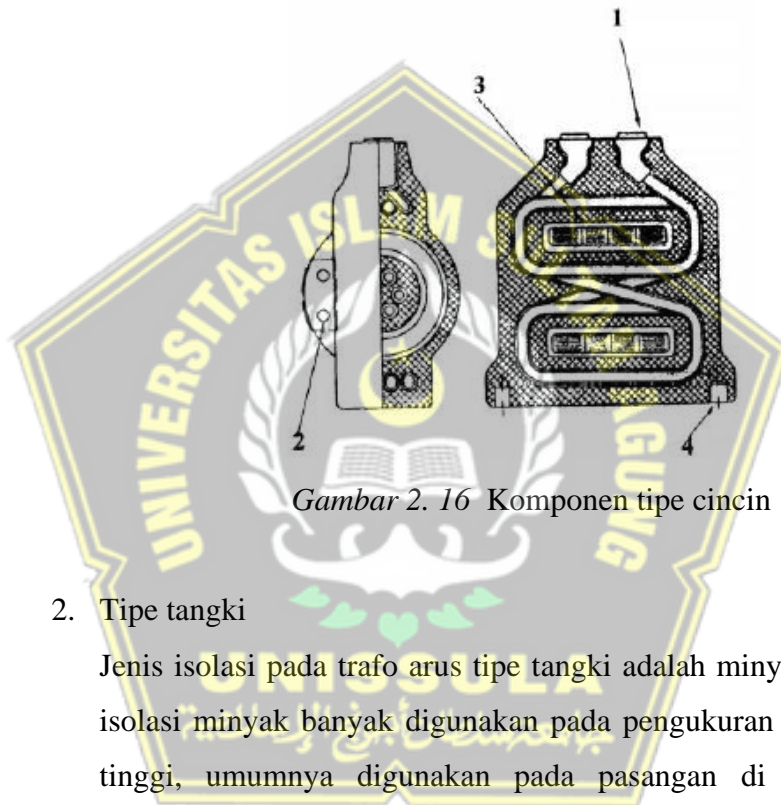
1. Arus pengenal primer
Arus pengenal primer yang sering digunakan yaitu 150A, 200A, 300A, 400A, 600A, 800A, 900A, 1000A, 1200A, 1600A, 1800A, 2000A, 2500A, 3000A, dan 3600A.
2. Arus pengenal sekunder
Arus pengenal sekunder yang sering digunakan yaitu 1A dan 5A

2.2.14 Komponen Trafo Arus

1. Tipe Cincin (*window*) dan tipe cor-coran (*moulded cast resin type*)
Trafo arus tipe cincin digunakan pada kubikel tegangan 20kV dan digunakan pada pemasangan indoor. Tipe ini menggunakan isolasi jenis cast resin.



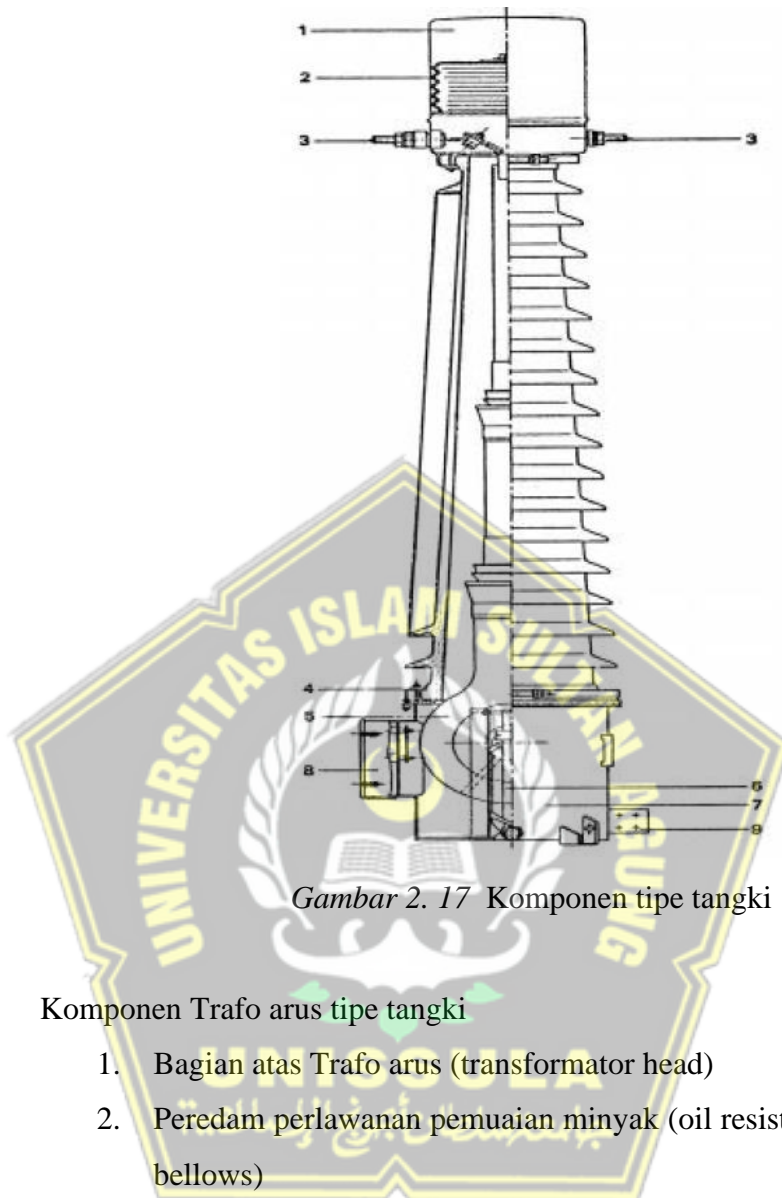
Gambar 2. 15 Trafo Arus tipe cincin



Gambar 2. 16 Komponen tipe cincin

2. Tipe tangki

Jenis isolasi pada trafo arus tipe tangki adalah minyak. Trafo arus isolasi minyak banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (outdoor) misalkan trafo arus tipe bushing yang digunakan pada pengukuran arus penghantar tegangan 70 kV, 150 kV dan 500 kV.



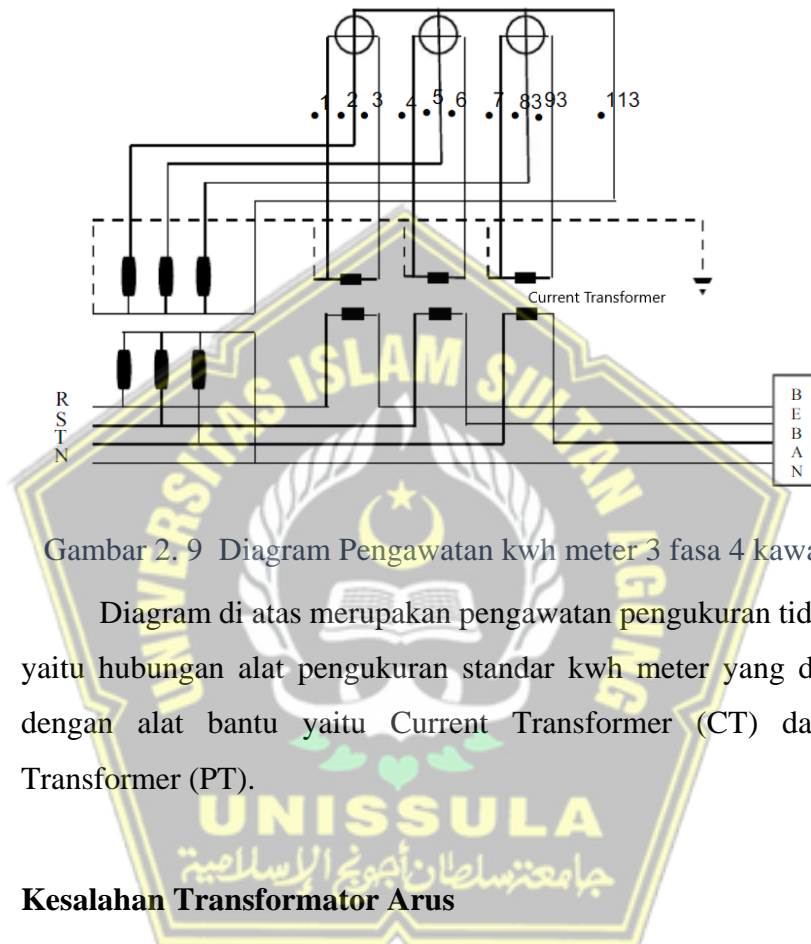
Gambar 2. 17 Komponen tipe tangki

Komponen Trafo arus tipe tangki

1. Bagian atas Trafo arus (transformator head)
2. Peredam perlawanan pemuaiian minyak (oil resistant expansion bellows)
3. Terminal utama (primary terminal)
4. Penjepit (clamps)
5. Inti kumparan dengan belitan berisolasi utama (core and coil assembly with primary winding and main insulation)
6. Inti dengan kumparan sekunder (core with secondary windings)
7. Tangki (tank)
8. Tempat terminal (terminal box)
9. Plat untuk pentanahan (earthing plate)

2.2.15 Single Line Diagram kWh Meter dengan Trafo Arus

Pada pengukuran energi listrik 3 fasa 4 kawat, kWh meter dilengkapi dengan trafo tegangan dan transformator arus yang terhubung parallel dengan kWh meter. Dapat dilihat pada gambar 2.7 di bawah ini :



Gambar 2. 9 Diagram Pengawatan kWh meter 3 fasa 4 kawat

Diagram di atas merupakan pengawatan pengukuran tidak langsung yaitu hubungan alat pengukuran standar kWh meter yang dihubungkan dengan alat bantu yaitu Current Transformer (CT) dan Potential Transformer (PT).

2.2.14 Kesalahan Transformator Arus

Kesalahan suatu transformator pada pengukuran arus yang muncul dari kenyataan bahwa rasio transformasi aktual tidak sama dengan rasio transformasi pengenal. Kesalahan arus yang dinyatakan dalam persen diberikan dengan formula :

$$\% \text{ Kesalahan arus} = \frac{(K_n I_s - I_p) \times 100}{I_p} \dots\dots\dots (2.12)$$

- Dimana :
- K_n = rasio transformasi pengenal
 - I_p = arus primer actual (Ampere)
 - I_s = arus sekunder aktual (Ampere)

Pada kondisi-kondisi pengukuran keadaan beban seimbang maka :

$$\text{Arus primer } I_p = k_i I_s \left(1 - \frac{e_i}{100}\right)$$

$$\text{Tegangan primer } V_p = k_v V_s \left(1 - \frac{e_v}{100}\right)$$

$$\emptyset = \theta - \gamma + \beta = \theta - \Phi \text{ bila vektor } I_p \text{ tertinggal vektor } V_p$$

$$\Phi = (\gamma - \beta) \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\emptyset = \theta - \beta + \gamma = \theta + \Phi \text{ bila vektor } I_p \text{ mendahului vektor } V_p$$

Dimana :

E_p = Energi primer;

E_s = Energi sekunder;

V_p = Tegangan primer;

V_s = Tegangan sekunder;

I_p = Arus primer;

I_s = Arus sekunder;

\emptyset = sudut antara vector arus primer dan tegangan primer;

θ = sudut antara vector arus sekunder dan tegangan sekunder;

e_v = kesalahan tegangan dalam % dari trafo tegangan;

e_i = kesalahan arus dalam % dari trafo tegangan;

e_m = kesalahan kWh meter dalam %;

β = kesalahan sudut fasa dari trafo arus;

γ = kesalahan sudut fasa dari trafo tegangan;

Φ = kombinasi kesalahan sudut fasa dari trafo arus dan tegangan;

t = Waktu;

k_v = rasio nominal trafo tegangan;

k_i = rasio nominal trafo arus;

Pembacaan kWh meter yang telah dikoreksi sebagai berikut :

$$E_s \left(1 - \frac{e_m}{100}\right) = 3 I_s V_s \text{Cos}\theta . t$$

$$I_s V_s = E_s \frac{(1 - e_m)}{3 . \text{Cos}\theta . t}$$

Energi yang sebenarnya pada sisi primer adalah $3 . I_p . V_p . \text{Cos}\theta . t$

$$\begin{aligned}
E_p &= 3 I_p V_p \cos\theta . t \\
&= 3. k_i I_s \left(1 - \frac{e_i}{100}\right) . k_v V_s \left(1 - \frac{e_v}{100}\right) . \cos(\theta - \Phi) . t \\
E_p &= 3. k_i . k_v . t . I_s . V_s \left(1 - \frac{e_i}{100}\right) \left(1 - \frac{e_v}{100}\right) (\cos\theta . \cos\Phi + \sin\theta . \sin\Phi) \\
&= 3. k_i . k_v . t . \left[E_s \left(1 - \frac{e_i}{100}\right) : (3. \cos\theta . t) \right] . \left(1 - \frac{e_i}{100}\right) . \left(1 - \frac{e_v}{100}\right) \\
&\quad (\cos\theta . \cos\Phi + \sin\theta . \sin\Phi) \\
&= k_i . k_v . E_s \left(1 - \frac{em}{100}\right) \left(1 - \frac{e_i}{100}\right) \left(1 - \frac{e_v}{100}\right) (\cos\Phi + \sin\Phi . \tan\theta) \\
\Phi &\ll \cos\Phi = 1; \Phi \text{ dalam menit} \\
E_p &= k_i . k_v . E_s \left(1 - \frac{em+ei+ev}{100}\right) \left(1 + \frac{\Phi}{3438} \tan\theta\right) \dots\dots\dots (2.14) \\
E_p &= k_i . k_v . E_s \left(1 - \frac{em + ei + ev}{100} + \frac{\Phi}{3438} \tan\theta\right)
\end{aligned}$$

2.2.15 Kesalahan Sudut Fasa

Kesalahan sudut fasa adalah kesalahan akibat pergeseran fasa antara arus sisi primer dengan arus sisi sekunder. Kesalahan sudut fasa akan memberikan pengaruh pada pengukuran berhubungan dengan besaran arus dan tegangan, misalnya pada pengukuran daya aktif maupun daya reaktif, pengukuran energi dan relai arah. Pemeriksaan ini umumnya dilakukan pada saat komisioning atau saat investigasi. Batasan maksimum nilai kesalahan sudut fasa berdasarkan persentase pembebanan dan kelas CT pengukuran dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Kesalahan sudut fasa dibagi menjadi dua nilai yaitu :

1. Bernilai positif (+) jika sudut fasa IS mendahului IP
2. Bernilai negatif (-) jika sudut fasa IS tertinggal IP

2.2.16 Burden Trafo Arus

Burden yaitu batasan maksimum Current Transformer (CT) menampung beban dalam satuan VA pada sisi sekunder CT dimana beban tersebut sesuai batasan beban yang dapat ditampung pada sisi sekunder.

Burden dinyatakan dalam impedansi dan faktor daya atau daya dalam VA. Burden nominal suatu trafo arus ditetapkan lebih besar daripada burden total yang akan terdapat pada rangkaian sekunder trafo arus tersebut. Jumlah semua impedansi pada rangkaian sekunder adalah :

$$\text{Burden total} = Z_s + Z_b + Z_k \dots \dots \dots (2.15)$$

Dalam hal ini Z_s adalah impedansi kumparan sekunder, Z_b adalah impedansi alat ukur, relay atau peralatan lainnya yang terhubung pada terminal sekunder, dan Z_k adalah impedansi kabel penghubung peralatan dengan terminal trafo arus.

Impedansi kabel penghubung dapat dianggap hanya berupa resistansi (R_k). Nilai tahanannya bergantung pada penggunaan trafo arus. Jika jarak antara terminal trafo arus dengan peralatan adalah l (meter), resistivitas kabel adalah ρ (ohm . mm²/m) dan luas penampang kabel adalah A (mm²), maka nilai resistansi kabel penghubung adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 di bawah ini :

Tabel 2. 1 Nilai resistansi kabel penghubung

Penggunaan CT	Nilai Resistansi Kabel Penghubung (ohm)
Meter satu fasa	$R_k = \frac{2\rho l}{A}$
Meter tiga fasa beban seimbang	$R_k = \frac{\rho l}{A}$
Meter tiga fasa beban tidak seimbang	$R_k = \frac{2\rho l}{A}$
Relay gangguan fasa ke tanah Netral sistem pembumian	$R_k = \frac{2\rho l}{A}$
Relai gangguan fasa ke tanah Netral sistem tidak dibumikan	$R_k = \frac{\rho l}{A}$

Relay gangguan tiga fasa	$R_k = \frac{\rho l}{A}$
--------------------------	--------------------------

Jika S_n (VA) adalah beban satu peralatan pada rangkaian sekunder trafo nurus dan arus nominal peralatan tersebut dalam ampere adalah I_n , maka impedansi peralatan tersebut dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini:

$$Z_b = \frac{S_n}{I_n^2} \dots \dots \dots (2.16)$$

Burden nominal yang tercantum pada papan nama suatu trafo arus adalah total burden tertinggi pada rangkaian sekunder trafo arus, yang membuat kesalahan pengukuran sama dengan ketelitian yang tercantum pada papan nama trafo arus tersebut. Burden nominal trafo arus yang sudah distandarisasi antara lain adalah: 2,5; 5; 7,5; 10; 15; dan 30 VA.

Tabel 2. 2 Burden alat ukur pada 5A/50 Hz

Alat Ukur	Burden (VA)
Ammeter	3
Wattmeter	5
Faktor daya meter	5
Perekam arus	3
Perekam daya	5
Perekan factor daya	5
kWH dan KVar meter	5

2.2.17 Karakteristik Transformator Arus

1. Arus primer pengenalan
Arus primer pengenalan adalah : 10 – 15 – 20 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75A, dan perkaliannya dengan 10 atau 100.
2. Arus sekunder pengenalan
Arus sekunder pengenalan adalah 5A.
3. Arus termal kontinu pengenalan (I_{cth})

Arus termal kontinu pengenalan adalah 120% arus primer pengenalan.

4. Tingkat Insulasi

Tingkat insulasi adalah :

a. Transformator arus tegangan rendah

Tegangan tertinggi (rms) : 0,72 kV

Ketahanan tegangan frekuensi daya (rms) : 3 kV

b. Transformator arus tegangan menengah

Tegangan tertinggi (rms) : 0,72 kV

Ketahanan tegangan frekuensi daya (rms)

- Belitan primer : 50 kV

- Belitan sekunder : 3 kV

Ketahanan tegangan impuls petir (peak)

- Belitan primer : 125 kV

- Belitan sekunder : -

5. Burden pengenalan

Burden pengenalan adalah : 2,5 – 5 – 7,5 – 10 dan 30 VA.

6. Frekuensi pengenalan

Frekuensi pengenalan adalah 50 Hz.

2.2.18 Kelas akurasi transformator arus

Kelas akurasi standar adalah : 0,2 – 0,2S – 0,5 – 0,5S – 1

Kesalahan arus dan pergeseran fase harus tidak melebihi nilai pada tabel

di bawah pada frekuensi pengenalan dan nilai burden :

- 25% sampai 100% burden pengenalan, atau
- 1 VA sampai 100% burden pengenalan untuk transformator arus kelas 0,2 dan 0,2S yang mempunyai burden pengenalan ≤ 15 VA.

Tabel 2. 3 Batas kesalahan transformator arus pengukuran

Parameter Uji		Kelas akurasi	% arus pengenal				
			1	5	20	100	120
Kesalahan arus (±)	(%)	0,2	-	0.75	0.35	0.2	0.2
		0,2S	0.75	0.35	0.2	0.2	0.2
		0,5	-	1.5	0.75	0.5	0.5
		0,5S	1.5	0.75	0.5	0.5	0.5
		1	-	3	1.5	1.01	1
Pergeseran fase (±)	(menit)	0,2	-	30	15	10	10
		0,2S	30	15	10	10	10
		0,5	-	90	45	30	30
		0,5S	90	45	30	30	30
		1	-	180	90	60	60
	(sentiradian)	0,2	-	0.9	0.45	0.3	0.3
		0,2S	0.9	0.45	0.3	0.3	0.3
		0,5	-	2.7	1.35	0.9	0.9
		0,5S	2.7	1.35	0.9	0.9	0.9
		1	-	5.4	2.7	2.8	2.8

Merujuk pada SPLN D3.014-1:2009 tentang transformator arus, tabel 2.1 menjelaskan terkait batasan standar kelas akurasi CT 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1 dengan kategori arus pengenal 1%; 5%; 20; 100%; 120% didapatkan standar Kesalahan arus dalam satuan % dan Pergeseran fase satuan menit.

Contoh pembacaan tabel di atas adalah sebagai berikut :

Pada trafo arus dengan spesifikasi Rasio 200/5A, kelas 0,5 dan dibebani arus sebesar 60 Ampere (20% dari Arus nominal), maka kesalahan rasio arus maksimum yang diijinkan adalah $\pm 0,75\%$ dan pergeseran fase maksimum sebesar $\pm 45/60$ derajat atau 0,75 derajat.

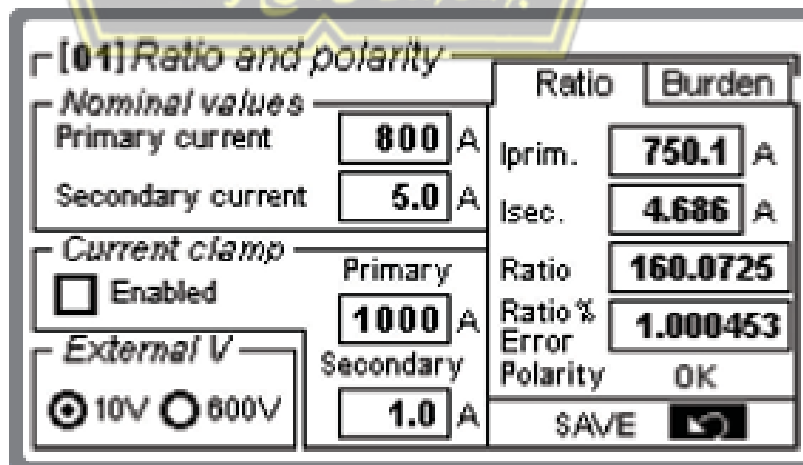
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

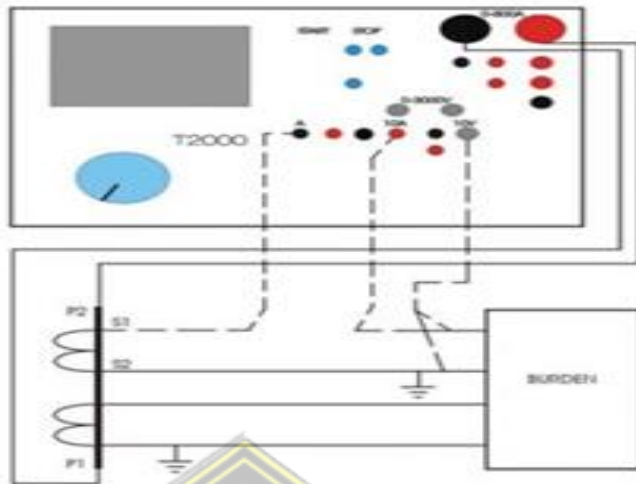
Metode penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah :

- a. Studi Literatur, dengan cara mempelajari dan menelaah beberapa teori yang mendukung dalam pemecahan masalah yang akan diselesaikan didapat dari buku referensi, jurnal dan hasil penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya.
- b. Observasi, dengan cara mencari data di lapangan yang dibutuhkan dan data histori serta melaksanakan sampling di wilayah kerja PT.PLN (Persero) UP3 Salatiga.
- c. Pengujian material *Current Transformer* secara *offline* rasio 200/5A kelas 0,5 dan kelas 0,5S menggunakan alat *CT Analyzer* milik PT.PLN (Persero) UP3 Salatiga.

Model pengujian dengan alat *CT Analyzer* dengan metode *offline* yaitu material CT yang belum terpasang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3. 1 Alat uji CT Analyzer



Gambar 3. 2 Wiring Pengujian CT TR



Gambar 3. 3 Pelaksanaan Pengujian CT

Lokasi penelitian yaitu di wilayah kerja PT.PLN (Persero) UP3 Salatiga. Lokasi pelaksanaan pengujian dengan CT analyzer yaitu di ruang Tera,Gudang Bawen Desa Lemahireng Kecamatan Bawen Kabupaten Semarang seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3. yaitu pelaksanaan pengujian CT TR dengan alat CT Analyzer merk ISA T2000.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Material CT TR yang akan diuji (kelas 0,5 dan 0,5S)
2. CT Analyzer merk ISA T2000
3. Plat Tembaga / busbar
4. Kabel penghubung

3.3 Metode Penelitian

3.3.1 Jenis Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada Penelitian mengenai Analisa Ketelitian Current Transformer Terhadap Kesalahan Rasio Arus Pada Pengukuran Energi Listrik ini adalah dengan metode kuantitatif deskriptif.

Metode kuantitatif deskriptif adalah metode penelitian dengan mengumpulkan data secara langsung untuk selanjutnya dilakukan Analisa, serta pengambilan kesimpulan sesuai dengan data dan hasil analisis (Fadillah, 2019).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kesalahan rasio arus CT TR pada kelas 0,5 dan kelas 0,5S serta kerugian kWh yang dihasilkan dari masing masing kelas.

3.3.2 Jenis Data

Dalam penelitian ini menggunakan perhitungan yang didapat dan diobservasi di PLN UP3 Salatiga. Terdapat data primer dan data sekunder yang digunakan untuk menyelesaikan perhitungan sebagai berikut :

Data primer dalam penelitian ini adalah :

- Hasil pengujian CT TR kelas 0,5
- Hasil pengujian CT TR kelas 0,5S
- Data pelanggan pengukuran tidak langsung

- Hasil perhitungan teoritis

Sedangkan data sekunder dalam penelitian ini adalah :

- Standarisasi terkait sistem tenaga listrik yang telah ditetapkan/ diatur dalam SPLN maupun IEC
- Jurnal atau hasil kajian penelitian lain yang terkait
- Spesifikasi CT TR rasio 200/5A

3.3.3 Teknik Analisa Data

a. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dimulai dari pengamatan kondisi di lapangan dan mencari standar / ketentuan yang berlaku serta mengumpulkan referensi dari buku, jurnal serta penelitian yang terkait.

b. Pengujian

Melaksanakan pengujian kesalahan rasio arus trafo. Hasil pengujian ditulis, dipetakan dan ditunjukkan dalam bentuk data.

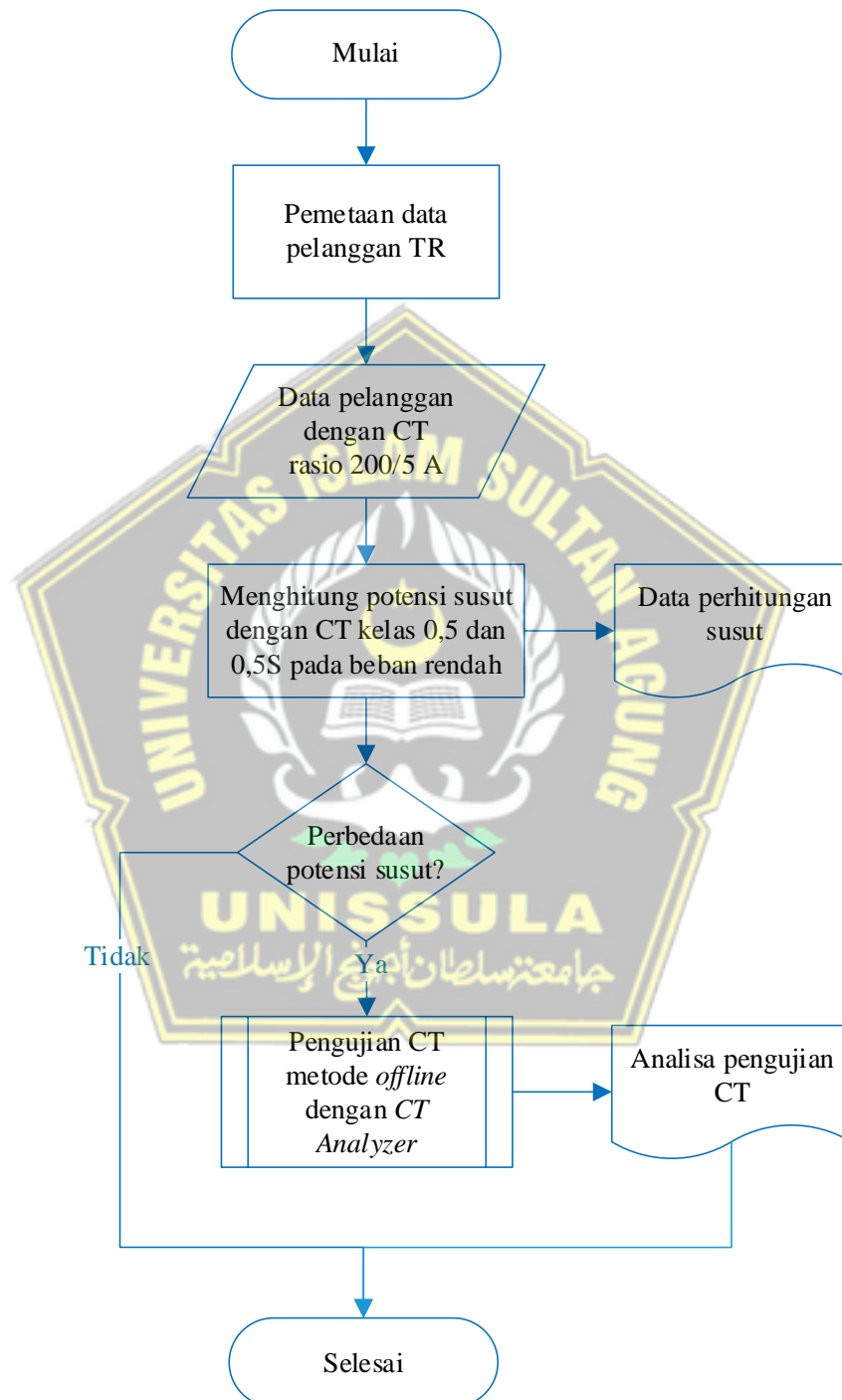
c. Analisa Data

Melaksanakan Analisa data yang diperoleh dari hasil pengujian kesalahan rasio arus dibandingkan dengan standar yang berlaku. Setelah dilakukan pengkajian data, akan diketahui parameter kondisi kesalahan rasio CT dan tindak lanjut perbaikan apabila berdasarkan hasil kesalahan rasio arus tidak baik atau diluar batas.

d. Kesimpulan

Proses pembuatan kesimpulan berdasarkan hasil Analisa data pengujian sebagai bagian akhir dari penelitian dan memberikan saran yang berdasarkan hasil penelitian.

3.4 Tahapan Penelitian



Gambar 3. 4 Flowchart alur penelitian

3.4.1 Pemetaan Data Pelanggan TR

Langkah pertama dari penelitian ini yaitu memetakan data pelanggan yang didapat dari PT.PLN (Persero) UP3 Salatiga. Sesuai dengan batasan masalah yang akan diteliti yaitu pelanggan Tegangan Rendah atau TR dengan pengukuran tidak langsung yang menggunakan material CT dengan rentang daya kontrak 17.600 VA sampai dengan daya 197.000 VA.

3.4.2 Data Pelanggan Dengan CT Rasio 200/5A

Langkah berikutnya yaitu memilih data pelanggan Tegangan Rendah yang lebih spesifik pada kategori daya 105.000 VA dan daya 131.000 VA yang menggunakan material CT rasio 200/5A. Langkah ini masih dalam tahapan pengolahan data seperti pada langkah sebelumnya.

3.4.3 Menghitung potensi susut CT kelas 0,5 dan 0,5S

Setelah didapat data pelanggan dengan CT Rasio 200/5A maka langkah selanjutnya yaitu menghitung potensi susut CT kelas 0,5 dan 0,5S. Dengan langkah ini nantinya didapatkan selisih energi antara sisi primer atau energi yang sesungguhnya dan energi yang terukur pada material CT kelas 0,5 dan kelas 0,5S.

3.4.4 Pengujian CT metode offline dengan CT Analyzer

Langkah berikutnya yaitu melaksanakan pengujian material CT dengan alat CT Analyzer dengan metode offline. Pada langkah ini CT kelas 0,5 dan kelas 0,5S akan diuji dengan memberikan arus primer secara bertahap mulai dari 1% sampai dengan 50% atau diibaratkan beban pelanggan pada saat terpasang.

3.4.5 Analisa Pengujian

Langkah terakhir yaitu Analisa pengujian, berdasarkan hasil perhitungan ketelitian pada beban rendah dan membandingkan hasil antara material kelas 0,5 dan kelas 0,5S serta menganalisa hasil pengujian material CT dengan alat CT Analyzer.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil perhitungan teori

Menghitung ketelitian CT dengan urutan mencari nilai Energi Primer (E_p), kemudian menghitung batas kesalahan positif dan kesalahan negatif, selanjutnya menghitung Energi Sekunder (E_s), langkah terakhir menghitung selisih daya dan kerugian.

Data yang digunakan pada perhitungan sebagai berikut :

- Pelanggan TR dengan daya kontrak 105.000VA dan 131.000VA
- Menggunakan material CT TR rasio 200/5A
- Menggunakan kWh meter $V_n : 3 \times 220/380V ; I_n 5A$
- Beban rendah / untuk penerangan Gedung R,S,T 3,5A
- Tegangan 220V, $\cos \Phi : 0,8$
- Waktu 1 tahun : 8.640 jam

Energi Primer (E_p) atau energi sesungguhnya. Dari formula (2.4) ditunjukkan pada tabel 4.1 di bawah ini :

Tabel 4. 1 Perhitungan Energi Primer kelas 0,5

Fasa	Tegangan	Arus	$\cos \phi$	Waktu (t)	E_p (kwh)
R	220	3,5	0,8	8.640	5.322,2
S	220	3,5	0,8	8.640	5.322,2
T	220	3,5	0,8	8.640	5.322,2
kWH total					15.966,7

Pada Tegangan 220 Volt, Arus 3,5 Ampere, $\cos \phi 0,8$ dan periode Satu tahun atau waktu 8.640 jam, maka didapatkan Total energi primer sebesar 15.966,7 kwh. Nilai energi primer ini akan menjadi patokan dalam menghitung kesalahan arus pada CT dan menghitung kerugian energi dengan cara

membandingkan nilai Energi Primer dan nilai Energi Sekunder di setiap material CT dengan nilai Faktor Kesalahan yang berbeda.

4.1.1 Perhitungan ketelitian CT kelas 0,5

Mengacu pada ketentuan tabel (2.1) kategori CT kelas 0,5 kemudian disederhanakan menjadi tabel 4.1 seperti di bawah ini :

Tabel 4. 2 Batas Kesalahan kelas 0,5

Material CT 200/5A	Batas kesalahan beban rendah	Batas kesalahan beban sedang
Kelas 0,5		
- Rasio	$\pm 1.5 \%$	$\pm 0.75 \%$
- Sudut Fasa (β)	90°	45°

Batas kesalahan atau error pada beban rendah yaitu beban antara 1% sampai dengan 5% dari arus pengenal berdasarkan SPLN D3.014-1. 2009 yang ditunjukkan pada tabel (4.1) yaitu $\pm 1.5\%$ dan pergeseran sudut fasa 90° sedangkan pada beban sedang yaitu beban antara 20% sampai dengan 50% didapatkan error $\pm 0.75 \%$ dan pergeseran sudut fasa 45° .

1. Batas kesalahan positif

Merujuk pada formula (2.12) didapatkan : $\Phi = \Upsilon - \beta = 0 - 90 = -90$

Merujuk pada formula (2.14) didapatkan :

$$\begin{aligned}
 E_p &= K_i . E_s \left(1 - \frac{em + ei}{100} + \frac{\Phi}{3438} \tan 0.75 \right) \\
 &= K_i . E_s \left(1 - \frac{0.5 + 0.5}{100} + \frac{-90}{3438} \tan 0.75 \right) = 0.9704 . k_i . E_s
 \end{aligned}$$

Maka didapat Faktor Kesalahan positif : 0,9704

Setelah didapatkan faktor kesalahan positif, tahapan selanjutnya yaitu menghitung Energi Sekunder (Es) atau energi yang terukur di kWh meter yang ditunjukkan pada tabel 4.3 berikut.

Tabel 4. 1 Perhitungan Energi Sekunder kesalahan positif kelas 0,5

Fasa	Tegangan	Arus	Cos ϕ	Waktu (t)	Faktor Kesalahan	Es (kwh)
R	220	3,5	0,8	8.640	0,9704	5.164,7
S	220	3,5	0,8	8.640	0,9704	5.164,7
T	220	3,5	0,8	8.640	0,9704	5.164,7
kWH total						15.494,11

Pada kesalahan positif, dengan Faktor Kesalahan positif 0,9704 maka total Energi Sekunder didapatkan sebesar 15.494,11 kwh, kemudian dihitung kesalahan pengukuran positif dengan cara sebagai berikut:

$$(E_p - E_s) / E_p \times 100\%$$

$$(15.966,7 - 15.494,11) / 15.966,7 \times 100\% = 2,96\%$$

2. Batas kesalahan negatif

Merujuk pada formula (2.12 dan 2.14) didapatkan : $\Phi = \gamma - \beta = 0 - 90 = -90$

$$E_p = K_i . E_s \left(1 - \frac{e_m + e_i}{100} + \frac{\Phi}{3438} \tan 0.75 \right)$$

$$= K_i . E_s \left(1 - \frac{-0.5 - 0.5}{100} + \frac{-90}{3438} \tan 0.75 \right) = 0,9904 . k_i . E_s$$

Maka didapat Faktor Kesalahan negatif : 0,9904

Setelah didapatkan faktor kesalahan negatif, tahapan selanjutnya yaitu menghitung Energi Sekunder (Es) atau energi yang terukur di kWh meter yang ditunjukkan pada tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 2 Perhitungan Energi Sekunder Kesalahan Negatif Kelas 0,5

Fasa	Tegangan	Arus	Cos ϕ	Waktu (t)	Faktor Kesalahan	Es (kwh)
R	220	3,5	0,8	8.640	0,9904	5.271,15
S	220	3,5	0,8	8.640	0,9904	5.271,15
T	220	3,5	0,8	8.640	0,9904	5.271,15
kWH total						15.813,44

Pada kesalahan negatif, dengan faktor kesalahan negative 0,9904 maka total Energi sekunder didapatkan sebesar 15.813,44 kwh, kemudian dihitung kesalahan pengukuran negatif dengan cara sebagai berikut:

$$(E_p - E_s) / E_p \times 100\%$$

$$(15.966,7 - 15.813,44) / 15.966,7 \times 100\% = 0,96\%$$

Berdasarkan data tabel 4.2 Energi Primer (E_p) dan tabel 4.3 Energi Sekunder (E_s) maka didapat selisih antara energi yang sesungguhnya dan energi yang terukur.

$$\text{Selisih energi} = 15.966,7 - 15.494,11 = 472.59 \text{ kWh}$$

Biaya pemakaian pada pelanggan tersebut sesuai dengan tarif dasar listrik yaitu Rp 1.444,7 per kWh. Maka kerugian PLN sesuai dengan perhitungan di atas yaitu :

$$\text{Kerugian} = \text{selisih energi} \times \text{tarif}$$

$$= 472.61 \times 1.444,7$$

$$= \text{Rp. 682.786,76}$$

4.1.2 Perhitungan ketelitian kelas 0,5S

Mengacu pada ketentuan tabel (2.1) kategori CT kelas 0,5S kemudian disederhanakan menjadi tabel 4.5 seperti di bawah ini :

Tabel 4. 3 Tabel Batas Kesalahan kelas 0,5S

Material CT 200/5A	Batas kesalahan beban rendah	Batas kesalahan beban penuh
Kelas 0,5S		
- Rasio	$\pm 0.75 \%$	$\pm 0.5 \%$
- Sudut Fasa (β)	45°	30°

Batas kesalahan atau error pada beban rendah yaitu beban antara 1% sampai dengan 5% dari arus pengenal secara teori yaitu $\pm 0.75\%$ dan pergeseran sudut fasa 45° sedangkan pada beban sedang yaitu beban antara 20% sampai dengan 50% didapatkan error $\pm 0.5 \%$ dan pergeseran sudut fasa 30° .

1. Batas kesalahan positif

Merujuk pada formula (2.12) didapatkan : $\Phi = \Upsilon - \beta = 0 - 45 = -45$

$$E_p = K_i \cdot E_s \left(1 - \frac{em + ei}{100} + \frac{\Phi}{3438} \tan 0.75 \right)$$

$$= K_i \cdot E_s \left(1 - \frac{0.5 + 0.5}{100} + \frac{-45}{3438} \tan 0.75 \right) = 0.9802 \cdot k_i \cdot E_s$$

Maka didapat Faktor Kesalahan : 0,9802

Energi Sekunder (E_s) atau energi yang terukur di kWh meter didapatkan :

Tabel 4. 4 Perhitungan Energi Sekunder Kesalahan Positif Kelas 0,5S

Fasa	Tegangan	Arus	Cos ϕ	Waktu (t)	Faktor Kesalahan	Ep (kwh)
R	220	3,5	0,8	8.640	0,9802	5.216,86
S	220	3,5	0,8	8.640	0,9802	5.216,86
T	220	3,5	0,8	8.640	0,9802	5.216,86
kWH total						15.560,58

Pada kesalahan positif, Energi sekunder yang terdapat pada tabel 4.6 sebesar 15.560,58 kwh, kemudian dihitung kesalahan pengukuran positif dengan cara sebagai berikut:

Kesalahan pengukuran positif yaitu :

$$(E_p - E_s) / E_p \times 100\%$$

$$(15.966,7 - 15.560,58) / 15.966,7 \times 100\% = 2,54\%$$

2. Batas kesalahan negatif

Merujuk pada formula (2.12 dan 2.14) didapatkan :

$$\Phi = \gamma - \beta = 0 - 45 = -45$$

$$E_p = K_i \cdot E_s \left(1 - \frac{em + ei}{100} + \frac{\Phi}{3438} \tan 0.75 \right)$$

$$= K_i \cdot E_s \left(1 - \frac{-0.5 - 0.5}{100} + \frac{-45}{3438} \tan 0.75 \right) = 1,0002 \text{ ki. Es}$$

Untuk mengetahui batas kesalahan negatif E_p dibanding E_s pada beban rendah (Isek=5%).

Tabel 4. 5 Perhitungan Energi Sekunder Kesalahan Negatif Kelas 0,5S

Fasa	Tegangan	Arus	Cos ϕ	Waktu (t)	Faktor Kesalahan	Es (kwh)
R	220	3,5	0,8	8.640	1,0002	5.323,3
S	220	3,5	0,8	8.640	1,0002	5.323,3
T	220	3,5	0,8	8.640	1,0002	5.323,3
kWH total						15.969,91

Pada kesalahan negatif dengan Faktor Kesalahan 1,0002 maka total Energi sekunder yaitu sebesar 15.969,91 kwh, kemudian dihitung kesalahan pengukuran positif dengan cara sebagai berikut:

Kesalahan pengukuran negatif yaitu :

$$(E_p - E_s) / E_p \times 100\%$$

$$(15.966,7 - 15.969,91) / 15.966,7 \times 100\% = -0,02\%$$

Berdasarkan data tabel 4.2 Energi Primer (E_p) dan tabel 4.6 Energi Sekunder (E_s) maka didapat selisih antara energi yang sesungguhnya dan energi yang terukur.

$$\text{Selisih energi} = 15.966,7 - 15.560,58 = 406.14 \text{ kWh}$$

Biaya pemakaian pada pelanggan tersebut sesuai dengan tarif dasar listrik yaitu Rp 1.444,7 per kWh. Maka kerugian PLN sesuai dengan perhitungan di atas yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Kerugian} &= \text{selisih energi} \times \text{tarif} \\ &= 406.14 \times 1.444,7 \\ &= \text{Rp. } \mathbf{586.750,46} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan secara teori menunjukkan bahwa pada material CT kelas 0,5 selisih energi sebesar 472,59 kWh senilai Rp. 682.786,76 sedangkan pada material CT kelas 0,5S selisih energi hanya sebesar 406,14 kWh senilai Rp. 586.750,46.

4.2 Hasil pengujian menggunakan CT Analyzer

Setelah dilaksanakan perhitungan berdasarkan teori, tahapan selanjutnya yaitu pengujian material. Material CT kelas 0,5 dan 0,5S diuji dengan alat uji CT Analyzer. Pengujian dilakukan di ruang Tera, Gudang PT.PLN (Persero) UP3 Salatiga dengan metode offline yaitu material CT yang belum terpasang di kWh meter salah satu keuntungannya yaitu arus yang *diinject* atau bisa dibilang beban yang bervariasi jika dibandingkan pengujian secara online. *Wiring* dan pelaksanaan pengujian ditunjukkan pada gambar 3.2 dan 3.3. Pemberian arus / *inject* arus atau bertahap mulai beban rendah ke beban tinggi yaitu dari 1% sampai dengan 50% dari arus pengenal dengan rasio 200 / 5 A atau faktor kali 40, dengan waktu sekitar 1 menit setiap

tahapan. Hasil dari Pengujian berupa Kesalahan rasio arus (%) yang muncul kemudian dicatat setiap arus yang diinject untuk dianalisa.

4.2.1 Hasil Pengujian CT kelas 0.5

Hasil pengujian menggunakan CT Analyzer pada material CT Kelas 0,5 dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian CT Kelas 0,5

Arus Pengenal / Inject (%)	Iprim	Isec	Rasio	kesalahan rasio arus (%)	FK
1%	1.46				
5%	10.61	263.9	40.21	0.53	0.995
13%	25.71	641.9	40.04	0.12	0.999
26%	52.57	1.312	40.09	0.23	0.998
38%	76	1.909	39.82	-0.422	1.004
51%	101.2	2.544	39.79	-0.505	1.005
2%	3.505	86.04	40.74	1.85	0.982
13%	25.28	633.6	40.37	0.95	0.991
25%	50.97	1.261	40.4	1	0.990
38%	75.4	1.885	40.04	0.11	0.999
50%	100.9	2.529	39.94	-0.122	1.001

Kesalahan rasio arus pada saat CT diberikan arus rendah / inject 2% yaitu Arus Primer 3,5 Ampere didapatkan kesalahan positif 1,85% sedangkan jika melihat hasil perhitungan pada parameter arus yang serupa didapatkan kesalahan arus positif 2,96% dan kesalahan arus negatif 0,96%.

Jika dilihat Hasil Pengujian CT Kelas 0,5 pada tabel 4.8 pada Arus Pengenal / Inject 1% pada arus 1,46A alat uji tidak bekerja atau

tidak muncul Arus Sekunder, Rasio, Kesalahan rasio arus serta Faktor Kesalahan yang berarti bahwa CT tidak bisa mentransformasikan jika arus primer hanya sebesar 1,46 Ampere atau dibawah nilai tersebut.

Pada Arus Pengenal / Inject beban 51% atau Arus primer 101,2 A didapatkan arus sekunder 2.544 A, Rasio 39,79 kali, kesalahan rasio arus -0,505% dan Faktor kali 1.005 yang berarti bahwa pada beban tersebut Kesalahan rasio arus relatif tinggi dan bernilai minus (-) dimana jika telah terpasang pada kwh meter, maka pengukuran arus di kwh meter lebih kecil dibandingkan arus sebenarnya.

3.2.2 Hasil Pengujian CT kelas 0.5S

Hasil pengujian menggunakan CT Analyzer pada material CT Kelas 0,5S dapat dilihat pada tabel 4.9 berikut.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian CT Kelas 0,5S

Arus Pengenal / Inject (%)	Iprim	Isec	Rasio	kesalahan rasio arus (%)	FK
26%	51.99	1.3	39.99	-0.002	1.000
26%	51.99	1.297	40	0.02	1.000
38%	76.3	1.92	39.84	-0.392	1.004
51%	101.2	2.547	39.76	-0.572	1.006
6%	11.07	275.4	40.22	0.57	0.994
1%	1.663	41.67	39.92	0.66	0.993
2%	3.479	81.59	40.32	0.81	0.992
7%	13.66	339.9	40.22	0.56	0.994
25%	50.65	1.264	40.05	0.13	0.999
38%	76.8	1.929	39.83	-0.439	1.004
50%	100.8	2.535	39.8	-0.484	1.005

Presentase kesalahan rasio arus pada saat CT diberikan arus rendah / inject 2% yaitu 3,5 Ampere didapatkan kesalahan positif 0,81% sedangkan jika melihat hasil perhitungan pada parameter arus yang serupa didapatkan kesalahan arus positif 2,54% dan kesalahan arus negatif -0,02%.

Jika dilihat Hasil Pengujian CT Kelas 0,5S pada tabel 4.9 pada Arus Pengenal / Inject 1% pada arus 1,663 A didapatkan arus sekunder 41,67 A, Rasio 39,92 kali, kesalahan rasio arus sebesar 0,81% dan Faktor kali 0,993 yang berarti pada beban tersebut kelas 0,5S masih membaca arus sekunder yang mengalir sedangkan Hasil pengujian CT Kelas 0,5 pada pada tabel 4.8 pada beban tersebut alat uji tidak bekerja atau arus sekunder tidak terbaca.

Pada Arus Pengenal / Inject beban 51% atau Arus primer 101,2 A didapatkan arus sekunder 2.547 A, Rasio 39,76 kali, kesalahan rasio arus -0,572% dan Faktor kali 1.006 yang berarti bahwa pada beban tersebut Kesalahan rasio arus relatif tinggi dan bernilai minus (-) dimana jika telah terpasang pada kwh meter, maka pengukuran arus di kwh meter lebih kecil dibandingkan arus sebenarnya.

Perbedaan data antara perhitungan dan pengujian tidak terlalu signifikan dan masih dalam ambang batas kesalahan transformator arus pengukuran pada tabel 1. Kesalahan rasio arus material CT kelas 0,5S lebih kecil dibandingkan pada CT kelas 0,5 pada beban rendah.

4.3 Analisa

4.3.1 Analisa Perhitungan

Berdasarkan hasil perhitungan ketelitian material CT kelas 0,5 dan kelas 0,5S dengan rasio 200/5A pada beban rendah (5% arus pengenal) yaitu 3,5 A adalah sebagai berikut :

Material CT 0,5

Error / Kesalahan Positif : 0,9704 (2,96%)

Error / Kesalahan Negatif : 0,9802 (2,54%)

Material CT 0,5S

Error / Kesalahan Positif : 0,9904 (0,96%)

Error / Kesalahan Negatif : 1,0002 (-0,02%)

Hasil perhitungan pada Kelas 0,5 dimana dibebani 5% arus pengenal dengan hasil kesalahan positif 2,96% dan kesalahan negatif 2,54% sedangkan jika mengacu pedoman SPLN D3.014-1:2009 tabel Batas kesalahan transformator arus pengukuran kesalahan arus $\pm 1,5\%$. Dan perhitungan pada kelas 0,5S hasil kesalahan positif 0,96% dan kesalahan negatif -0,02% cenderung mendekati acuan batas kesalahan yaitu 0,75%.

Selisih energi antara arus primer yang sesungguhnya dengan arus sekunder atau yang terbaca pada kwh meter pada CT kelas 0,5 lebih besar dibandingkan kelas 0,5S, dimana pada kelas 0,5 selisih energi sebesar 472,61 kWh dan selisih energi pada kelas 0,5S sebesar 406,14 kWh.

4.3.2 Analisa Pengujian

Hasil Pengujian yang ditunjukkan tabel 4.8 dan 4.9 menunjukkan adanya perbedaan dengan data hasil perhitungan namun kesalahan rasio arus pada kelas 0,5 lebih besar jika dibandingkan kelas 0,5S.

Kesalahan rasio suatu trafo arus disebabkan adanya perubahan rasio arus aktual dari rasio putaran. Kita tahu bahwa untuk trafo arus rasio arus harus sama dengan rasio putaran yaitu $I_1/I_2 = N_2/N_1$. Namun karena adanya magnetisasi dan kehilangan silang komponen-komponen belitan primer, arus dan faktor daya belitan sekunder. Rasio arus I_1/I_2 akan berbeda dengan rasio putaran N_2/N_1 .

Dengan demikian rasio arus sebenarnya tidak akan konstan dan bergantung pada arus beban, dan faktor daya beban atau beban yang dihubungkan ke sekunder. Akibat perubahan rasio arus aktual ini, arus pada primer tidak dapat ditentukan secara pasti dan menimbulkan kesalahan yang disebut kesalahan rasio seperti yang ditunjukkan pada formula (2.12).



BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Adanya perbedaan karakteristik antara CT kelas 0,5 dan kelas 0,5S. Pada beban rendah, tingkat *error* atau kesalahan arus lebih rendah jika menggunakan CT kelas 0,5S.
 - a. CT Kelas 0,5 : Kesalahan positif 0,9704 (2,96%) dan Kesalahan negatif 0,9802 (2,54%)
 - b. CT Kelas 0,5S : Kesalahan positif 0,9904 (0,96%) dan Kesalahan negatif 1,0002 (-0,02%)
2. Hasil pengujian dinilai lebih valid daripada hasil perhitungan secara teori. Hasil perhitungan pada Kelas 0,5 yang dibebani 5% arus pengenal dengan hasil kesalahan positif 2,96% dan kesalahan negatif 2,54% sedangkan jika mengacu pedoman SPLN D3.014-1:2009 tabel Batas kesalahan transformator arus pengukuran kesalahan arus $\pm 1,5\%$. Namun hasil pengujian pada Kelas 0,5 dengan parameter yang sama didapat kesalahan arus 1,8%.
3. Kerugian yang ditimbulkan akibat *error* atau kesalahan arus CT dari selisih energi antara energi primer yang sesungguhnya dibandingkan energi sekunder atau yang terbaca pada kwh meter lebih besar pada material kelas 0,5 yaitu sebesar 472,61 kWh atau senilai Rp. 682.786,76 dan pada kelas 0,5S yaitu sebesar 406,14 kWh atau senilai Rp. 586.750,46 pada satu pelanggan selama periode satu tahun.

5.2 Saran

1. Diperlukan pengecekan lanjutan pada saat pemeliharaan meter pada 91 pelanggan di wilayah kerja UP3 Salatiga serta penggantian material CT dari kelas 0,5 menjadi kelas 0,5S untuk menekan losses atau hilangnya potensi penjualan.
2. Diusulkan alur proses pengujian material CT menggunakan alat CT Analyzer di UP3 sebagai filter jika ditemukan kesalahan arus yang melebihi batas sesuai SPLN pada SPLN D3.014-1:2009 tentang transformator arus.



DAFTAR PUSTAKA

1. Kadir,A. 1995. Energi Sumber Daya, Inovasi, Tenaga Listrik dan Potensi Ekonomi. Jakarta: UI Press.
2. Kadir, A. 2000. Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik. Jakarta: UI Press.
3. Meier, Alexander Von. 2006. Electric power systems: a conceptual introduction. United States of America: A Wiley-Interscience publication.
4. Kadarisman, Pribadi dan Wahyudi Sarimun, 2009, Current Transformer,[Online]
<http://gikotapinang.files.wordpress.com/2011/11/ct.ppt>.
5. Amalia Devita & Ariyanto Eko. 2014. Optimalisasi Pengukuran Arus Oleh Current Transformer Untuk Meminimalisir Susut Energi Pada Pabrik Baja PT.Inti General Yaja Steel Daerah Semarang Barat.
6. Paath A. Maurits. Manfaat Penggantian CT Kelas 0,5 Dengan Kelas 0,5S Di Pelanggan Besar Pada Pemakaian Beban Rendah. Indonesia: Jayapura.
7. Aas Wasri Hasanah, Tony Koerniawan, Yuliansyah. 2019. Kajian Ketelitian Current Transformer (CT) Terhadap Kesalahan Rasio Arus pada Pelanggan 197 kVA.
8. Bonggas L. Tobing, Peralatan Tegangan Tinggi, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003
9. GAE Website Home <http://www.gae.co.id/>
10. Tambunan, J. M. (2019) “PENGUJIAN RUTIN TRAF0 ARUS 24 KV DI LABORATORIUM HUBUNG SINGKAT PT. PLN (PERSERO) PUSLITBANG KETENAGALISTRIKAN”, SUTET, 8(1), pp. 34–43. doi: 10.33322/sutet.v8i1.714.
11. PT. PLN (Persero). Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Arus, 2014
12. Zuhail, 2000, Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, Jakarta, PT.Gramedia Pustaka Utama.

13. Zuhail, 2004, Prinsip Dasar Elektroteknik, Jakarta, PT.Gramedia Pustaka Utama.
14. SPLN 72. 1987. Spesifikasi Desain Untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR).
15. SPLN D3.014-1. 2009. Trafo Arus, Jakarta, PT.PLN (Persero).
16. SPLN D5.001. 2008. Pedoman Pemilihan Meter Energi, Jakarta, PT.PLN (Persero).
17. SPLN D3.015-2. 2012. Alat Pengukur, Pembatas Dan Perlengkapannya (APP TR Pengukuran Tidak Langsung Fasa Tiga untuk Pelanggan 53 kVA s/d 197 kVA).
18. E. Agustina and A. Amalia, "Pernurunan Susut Non Teknis Pada Jaringan Distribusi Menggunakan Sistem Automatic Meter Reading di PT.PLN (Persero)," J. Tek. Mesin, vol.5 p. 37, Mar. 2017
19. Desmira, D. (2020). Pengaruh Susut Energi (Losses) Pada Jaringan Distribusi (Studi Kasus: di PT.Krakatau Daya listrik). ENERGI & KELISTRIKAN, 12(2), 80–89.

