

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Relevan

Berdasarkan hasil studi literatur yang telah dilakukan, berikut kajian relevan dalam penelitian ini yang terangkum dalam tabel berikut.

Tabel 2. 1 Kajian Relevan

No	Nama Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian
1	Lutfi dkk., (2025)	Analisa Efisiensi Daya Dan Rugi Transformator Pada Gardu Induk PLN Mangkunegaran 150 Kv	Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan perhitungan Losses transformator pada GI Mangkunegaran 150 KVA menggunakan Metode Nilai Tahunan (Annual Worth Method) yang berfokus pada kerugian energi daya transformator dengan mempertimbangkan kerugian daya yang dikonversi menjadi nilai tahunan pada transformator GI Mangkunegaran 150 KVA.	Hasil penelitian menunjukkan nilai rugi daya pada transformator GI Mangkunegaran 150 kV adalah 7.295 Kw yang menunjukkan total daya yang hilang sepanjang tahun akibat rugi-rugi dalam transformator, mencakup rugi arus (I^2R losses) dan rugi tegangan, yang merupakan akibat dari resistansi dan penurunan tegangan dalam transformator. Tindakan yang harus dilakukan adalah melakukan inspeksi

No	Nama Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian
				dan pemeliharaan secara berkala untuk memastikan bahwa semua komponen transformator berfungsi dengan baik, termasuk sistem pendinginan, sambungan, dan isolasi dan menggunakan material dengan resistansi rendah untuk kumparan dan inti transformator, sehingga dapat mengurangi rugi arus (I^2R losses).
2	Zulkhulaifah dkk., (2021)	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 Kv Terhadap Rugi- Rugi Daya dan Efisiensi pada Penyulang Hertasning Baru PT PLN (Persero) ULP	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban trafo distribusi 20 kV terhadap rugi-rugi daya dan efisiensi pada penyulang hertasning baru PT	Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa terdapat 4 gardu yang mengalami penyeimbangan beban yaitu GT.PHB010, GT.PHB017, GT.PHB021 dan

No	Nama Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian
	Panakukkang Makassar	PLN Pnakukkang Makassar.	ULP	GT.PHB050. Dengan rata-rata persentase ketidakseimbangan beban yaitu 32,75%, besar rugi-rugi daya jaringan adalah sebesar 79,35 kW dan efisiensi pada trafo sebesar 98.03% pada kondisi sebelum penyeimbang. Setelah penyeimbangan beban dilakukan, persentase ketidakseimbangan beban menurun sebesar 29,02% yaitu 3,73%, rugi-rugi daya mengalami penurunan sebesar 7,12 kW yaitu 72,29 kW dan efisiensi sebesar 99,17% , terjadi perselisihan sebesar 1,14%. Hasil perhitungan ini

No	Nama Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian
				menunjukkan bahwa pada saat transformator diberi beban tak seimbang maka efisiensinya akan menurun dibandingkan dengan saat transformator diberi beban yang seimbang.
3	Kisworo dkk., (2025)	Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Penyulang Sukamulya Di Pt Pln (Persero) Up3 Purwakarta Dengan Menggunakan Software ETAP	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis rugi-rugi daya pada penyulang Sukamulya yang dikelola oleh PT PLN (Persero) UP3 Purwakarta.	Hasil analisis menunjukkan rugi tegangan rata-rata sebesar 2,07% dan rugi daya sebesar 75,46 kVA, yang masih berada dalam batas toleransi standar PLN. Kesimpulan dari penelitian ini menegaskan bahwa sistem distribusi pada penyulang Sukamulya efisien, namun optimalisasi lebih lanjut diperlukan untuk

No	Nama Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian
				meningkatkan kinerja sistem. Metode simulasi menggunakan ETAP terbukti efektif dalam menganalisis dan mengidentifikasi peluang perbaikan sistem distribusi listrik.
4	Samsurizal Dan Benyamin Hadinoto(2020)	Studi Analisis Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya Di PT PLN (Persero) UP3 Pondok Gede	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak overload (pembebanan lebih) pada transformator terhadap kualitas daya listrik, khususnya pada Gardu Distribusi JS 190 milik PT PLN (Persero) UP3 Pondok Gede, serta mengevaluasi efektivitas metode uprating transformator	Hasil analisis menunjukkan Transformator mempunyai batasan-batasan dalam operasinya. Dengan presentase pembebanan yang tinggi sebesar 95,75% dari kapasitas yang dipakai sebesar 191.84 kVA dan dari total kapasitas daya transformatorsebesar 200 kVA. Apabila transformator

No	Nama Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian
			sebagai solusi untuk mengatasi kondisi overload tersebut	digunakan secara terus-menerus dalam kondisi overload, maka akan mengalami peningkatan pada suhu dan panas pada transformator pun bertambah. Sehingga akan merusak isolasi, material dan transformator akan rusak. Selain itu, mempengaruhi kualitas daya transformator, drop tegangan pada ujung jaringan dan berakibat susut umur pada transformator.

Berdasarkan analisis terhadap keempat jurnal yang menjadi referensi, terdapat perbedaan mendasar antara penelitian " Analisis Pengaruh Penambahan Transformator Terhadap Penurunan Rugi Daya" dengan penelitian-penelitian sebelumnya dalam berbagai aspek. Berkaitan dengan perbedaan mengenai lokasi

dan objek penelitian, penelitian pertama oleh peneliti pada Gardu Induk PLN Mangkunegaran 150 kV berfokus pada transformator gardu induk level transmisi dengan kapasitas besar, sedangkan penelitian kedua di Penyulang Hertasning Baru ULP Panakukkang Makassar menganalisis ketidakseimbangan beban transformator distribusi 20 kV. Penelitian ketiga pada Penyulang Sukamulya UP3 Purwakarta mengkaji rugi daya pada jaringan distribusi secara keseluruhan. Berbeda dengan ketiga penelitian tersebut, penelitian ini secara khusus berfokus pada ULP Enrekang yang memiliki karakteristik unik sebagai wilayah yang baru saja mengalami pembangunan Gardu Induk Sisipan untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi. Lokasi penelitian di Enrekang juga memberikan konteks geografis yang berbeda dengan daerah perkotaan seperti Solo, Makassar, dan Purwakarta.

Berdasarkan perbedaan mengenai fokus dan ruang lingkup analisis, penelitian di GI Mangkunegaran 150 kV menggunakan *Annual Worth Method* untuk menghitung kerugian finansial akibat rugi daya sebesar 7.295 kW pada level transmisi, sementara penelitian di Makassar lebih menekankan pada dampak ketidakseimbangan beban terhadap efisiensi transformator dengan tingkat ketidakseimbangan mencapai 32,75%. Penelitian di Purwakarta fokus pada analisis rugi tegangan 2,07% dan rugi daya 75,46 kVA pada satu penyulang saja. Sebaliknya, penelitian ini memiliki pendekatan yang lebih komprehensif dengan menggabungkan tiga aspek utama: evaluasi kondisi eksisting rugi daya, analisis dampak penambahan transformator baru, dan pengembangan strategi pemeliharaan preventif berbasis waktu. Penelitian ini tidak hanya menganalisis kondisi saat ini tetapi juga memberikan solusi proaktif melalui penambahan transformator dan optimalisasi pemeliharaan.

Berdasarkan perbedaan metodologi dan pendekatan teknis, keempat penelitian sebelumnya menggunakan pendekatan yang berbeda-beda. Penelitian GI Mangkunegaran menggunakan metode *Annual Worth* untuk aspek ekonomi, penelitian Makassar menggunakan kombinasi perhitungan manual dan simulasi ETAP 12.6.0 untuk menganalisis ketidakseimbangan beban, sedangkan penelitian Purwakarta menggunakan software ETAP untuk analisis aliran daya pada Single Line Diagram. Penelitian ini mengadopsi metodologi yang lebih terintegrasi dengan

menggabungkan pengukuran lapangan, simulasi ETAP, perhitungan manual untuk validasi, dan pengembangan *time-based maintenance strategy*. Pendekatan ini lebih holistik karena tidak hanya menganalisis masalah tetapi juga menyediakan *framework* untuk pencegahan dan optimalisasi jangka panjang.

Berdasarkan perbedaan permasalahan yang diidentifikasi, permasalahan yang diangkat dalam keempat penelitian sebelumnya relatif spesifik. Penelitian GI Mangkunegaran mengidentifikasi masalah efisiensi transformator yang berada di bawah standar SPLN No 50 Tahun 1997 (98,53%) dengan power factor hanya 0,97-0,98. Penelitian Makassar fokus pada ketidakseimbangan beban yang melebihi 15% dan dampaknya terhadap arus netral. Penelitian Purwakarta menganalisis rugi daya yang masih dalam batas toleransi standar PLN. Berbeda dengan itu, penelitian ini mengidentifikasi permasalahan yang lebih kompleks yaitu optimalisasi sistem distribusi pasca pembangunan infrastruktur baru (GI Sisipan Enrekang) dan kebutuhan untuk mengembangkan strategi pemeliharaan yang tepat untuk mencegah degradasi kinerja transformator di masa mendatang.

Berdasarkan perbedaan kontribusi dan solusi yang ditawarkan, kontribusi ketiga penelitian sebelumnya terbatas pada identifikasi masalah dan rekomendasi umum. Penelitian GI Mangkunegaran merekomendasikan inspeksi berkala dan penggunaan material resistansi rendah. Penelitian Makassar menunjukkan bahwa penyeimbangan beban dapat menurunkan rugi daya dari 79,35 kW menjadi 72,29 kW dan meningkatkan efisiensi dari 98,03% menjadi 99,17%. Penelitian Purwakarta menyimpulkan sistem sudah efisien tetapi memerlukan optimalisasi lebih lanjut. Sebaliknya, penelitian ini menawarkan kontribusi yang lebih strategis dengan mengembangkan *framework* komprehensif yang mencakup: (1) *baseline assessment* kondisi eksisting, (2) strategi penambahan transformator berdasarkan analisis kuantitatif, dan (3) sistem pemeliharaan preventif yang terstruktur dan dapat diimplementasikan secara praktis di lapangan.

Berdasarkan perbedaan implikasi praktis dan aplikabilitas, penelitian-penelitian sebelumnya menghasilkan temuan yang bersifat deskriptif dan rekomendasi yang relatif umum. Penelitian ini dirancang untuk menghasilkan output yang langsung dapat diaplikasikan oleh ULP Enrekang dalam bentuk

panduan operasional untuk penambahan transformator dan jadwal pemeliharaan yang spesifik berdasarkan time-based maintenance. Penelitian ini juga mempertimbangkan kondisi spesifik ULP Enrekang sebagai wilayah yang telah berinvestasi dalam infrastruktur baru, sehingga hasilnya dapat menjadi model untuk ULP lain yang menghadapi situasi serupa. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan analisis tetapi juga menyediakan roadmap implementasi yang dapat digunakan untuk optimalisasi sistem distribusi secara berkelanjutan.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori ini menguraikan secara komprehensif konsep-konsep fundamental yang menjadi basis analisis dalam penelitian. Pembahasan mencakup karakteristik sistem distribusi tenaga listrik, prinsip kerja dan manajemen pembebanan transformator, fenomena degradasi tegangan dan disipasi energi, karakteristik material penghantar terhadap suhu, simulasi aliran daya, serta manajemen pemeliharaan aset berbasis keandalan.

2.2.1 Karakteristik dan Konfigurasi Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian integral dari infrastruktur kelistrikan yang berfungsi sebagai rantai penghubung vital antara sistem transmisi dengan konsumen akhir. Secara fungsional, sistem ini bertugas menyalurkan energi listrik dari Gardu Induk (GI) distribusi hingga ke titik pemakaian pelanggan dengan mutu yang terjamin. Suhadi (2008) mendefinisikan gardu distribusi sebagai komponen sistem yang menghubungkan jaringan ke konsumen, berfungsi mendistribusikan tenaga listrik baik pada tegangan menengah maupun tegangan rendah. Efisiensi dan kualitas penyaluran pada segmen ini sangat ditentukan oleh klasifikasi tegangan, jenis konstruksi, dan topologi jaringan yang diterapkan.

1. Hierarki Tegangan dan Konstruksi Jaringan

Sistem distribusi diklasifikasikan menjadi dua tingkatan utama berdasarkan level tegangannya, yang masing-masing memiliki peran spesifik:

- a. Jaringan Distribusi Primer (JTM): Dikenal sebagai Jaringan Tegangan Menengah (JTM), sistem ini beroperasi pada tegangan nominal 20 kV. Fungsinya adalah menyalurkan daya dari Gardu Induk ke gardu-gardu

distribusi yang tersebar di pusat beban. Jaringan ini menghubungkan sisi primer transformator distribusi dan menjadi tulang punggung penyaluran daya jarak menengah.

- b. Jaringan Distribusi Sekunder (JTR): Dikenal sebagai Jaringan Tegangan Rendah (JTR), sistem ini beroperasi pada tegangan 380/220 Volt (sistem tiga fasa empat kawat). JTR berfungsi menyalurkan energi dari sisi sekunder transformator distribusi langsung ke Sambungan Rumah (SR) pelanggan. Mengingat posisinya yang berhubungan langsung dengan konsumen, kualitas tegangan pada JTR diatur ketat dengan toleransi maksimum +5% dan minimum -10%.

Dari sisi konstruksi fisik, penyaluran daya pada JTR dapat menggunakan Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) dengan penghantar telanjang (seperti AAAC) atau Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) dengan kabel berisolasi (seperti LVTC). Penggunaan kabel berisolasi seperti LVTC sering menjadi pilihan di daerah padat penduduk atau bervegetasi tinggi untuk meningkatkan aspek keamanan dan meminimalisir gangguan eksternal.

2. Analisis Topologi Jaringan Radial

Pemilihan konfigurasi jaringan sangat mempengaruhi keandalan dan kualitas daya. Berdasarkan susunan rangkaiannya, jaringan distribusi dapat diklasifikasikan menjadi model radial, loop, tie-line, dan spindel. Namun, konfigurasi yang diterapkan pada lokasi penelitian di ULP Enrekang adalah tipe radial.

Menurut Sarimun (2019), sistem radial merupakan topologi yang paling sederhana, di mana penyaluran tenaga listrik dilakukan secara satu arah dari sumber ke beban tanpa adanya jalur alternatif atau *loop*. Karakteristik utama sistem radial meliputi:

- a. Keunggulan: Biaya investasi yang rendah dan desain proteksi yang sederhana karena arus gangguan hanya mengalir dari satu arah.
- b. Kelemahan Fundamental: Kelemahan utama terletak pada mutu tegangan di ujung jaringan. Karena arus beban mengalir sepanjang saluran tunggal, terjadi akumulasi jatuh tegangan (*voltage drop*) yang berbanding lurus dengan

impedansi seri total saluran. Akibatnya, pelanggan di ujung saluran (*receiving end*) sering mengalami tegangan pelayanan yang paling rendah. Selain itu, keandalan sistem ini relatif rendah; gangguan pada pangkal penyulang akan menyebabkan pemadaman total pada seluruh beban di hilirnya.

3. Strategi Segmentasi Penyulang (*Feeder Segmentation*) dan Gardu Sisip

Kondisi jaringan radial yang panjang dengan beban yang terus bertumbuh sering kali menyebabkan voltage drop melebihi standar dan rugi-rugi daya yang tinggi. Untuk mengatasi keterbatasan ini, diterapkan strategi segmentasi beban melalui penambahan Transformator Sisip (*Insert Trafo*).

Gardu sisip merupakan solusi teknis untuk memecah beban pada jaringan yang terlalu panjang atau mengalami beban lebih (*overload*). Dengan menyisipkan transformator baru di antara beban-beban yang ada, panjang efektif jaringan tegangan rendah dapat diperpendek secara signifikan. Yasa dkk. (2023) menjelaskan bahwa pemasangan gardu sisip bertujuan mengoptimalkan pembebanan transformator agar kembali ke rentang efisien dan mencegah kondisi *overload*.

Secara teoritis, pendekatan ini memberikan dampak ganda terhadap kinerja sistem:

- a. Perbaikan Profil Tegangan: Dengan mendekatkan sumber tegangan (trafo baru) ke pusat beban, impedansi saluran berkurang drastis, sehingga jatuh tegangan dapat diminimalisir.
- b. Reduksi Rugi Daya: Pemecahan beban menurunkan arus yang mengalir pada jaringan induk. Mengingat rugi daya berbanding lurus dengan kuadrat arus (I^2R), penurunan arus ini akan menekan rugi-rugi daya secara signifikan.

2.2.2 Transformator Distribusi: Prinsip Kerja, Efisiensi, dan Degradasi

Transformator distribusi merupakan elemen infrastruktur paling strategis dalam jaringan distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai antarmuka (*interface*) antara sistem tegangan menengah dan konsumen. Secara prinsip, perangkat ini bekerja berdasarkan hukum induksi elektromagnetik Faraday untuk menurunkan tegangan (*step-down*) dari level distribusi primer (20 kV) menjadi level distribusi sekunder (380/220 V). Proses transformasi energi ini terjadi melalui

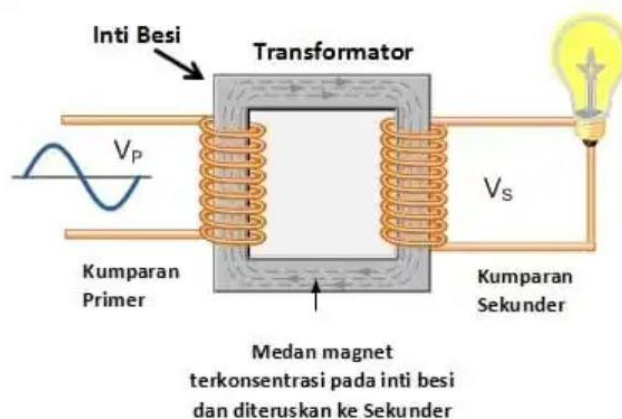
kopling magnetik antara kumparan primer dan sekunder tanpa adanya kontak listrik langsung, yang memungkinkan penyaluran daya dilakukan secara efisien namun tetap terisolasi secara galvanis.

1. Komponen Utama Transformator

Sebelum menganalisis kinerja operasional, penting untuk memahami konstruksi anatomi transformator guna mengetahui fungsi spesifik setiap bagian dalam proses konversi energi. Komponen utama transformator distribusi terdiri dari tiga bagian fundamental yang saling berinteraksi, yaitu:

1. Kumparan Primer (N_p): Merupakan belitan yang terhubung langsung dengan sumber tegangan masukan (sisi Tegangan Menengah 20 kV). Ketika dialiri arus bolak-balik, kumparan ini bertugas membangkitkan fluks magnetik.
2. Kumparan Sekunder (N_s): Merupakan belitan yang terhubung dengan beban atau konsumen (sisi Tegangan Rendah 380/220 V). Tegangan induksi dihasilkan pada kumparan ini akibat perubahan fluks magnetik dari sisi primer.
3. Inti Besi (*Magnetic Core*): Berfungsi sebagai media jalan bagi fluks magnetik agar dapat mengalir dengan reluktansi (tahanan magnetik) yang rendah dari kumparan primer ke sekunder, sehingga transfer energi terjadi secara efisien.

Interaksi antar komponen tersebut divisualisasikan dalam diagram berikut:



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja dan Komponen Transformator

Sumber: www.pln.co.id

2. Manajemen Kapasitas dan Batas Pembebanan

Efisiensi dan keandalan transformator sangat ditentukan oleh manajemen kapasitasnya. Kapasitas nominal transformator (kVA) merepresentasikan kemampuan termalnya dalam mendisipasikan panas yang timbul akibat rugi-rugi internal, yaitu rugi inti (*core losses*) yang bersifat konstan dan rugi tembaga (*copper losses*) yang berbanding lurus dengan kuadrat arus beban.

Mengacu pada standar SPLN 50:1997, transformator distribusi didesain untuk beroperasi pada efisiensi maksimum dan umur teknis yang panjang apabila pembebanan dipertahankan di bawah 80% dari kapasitas nominalnya secara kontinyu. Pengoperasian di luar batas desain ini, khususnya kondisi beban lebih (*overload*) yang melampaui 90% atau bahkan 110% dalam durasi lama, dikategorikan sebagai kondisi operasi kritis. Kondisi ini tidak hanya menyebabkan inefisiensi energi akibat lonjakan rugi-rugi I^2R , tetapi juga memicu saturasi fluks magnetik pada inti besi dan akumulasi panas yang melebihi kapasitas pendinginan alami (ONAN).

3. Mekanisme Degradasi Termal (Hukum Arrhenius)

Panas berlebih (*overheating*) merupakan musuh utama bagi sistem isolasi transformator yang umumnya terdiri dari kertas selulosa dan minyak dielektrik. Suhadi (2008) menjelaskan mekanisme kerusakan ini menggunakan pendekatan kinetika kimia Hukum Arrhenius. Hukum ini mempostulatkan bahwa laju reaksi degradasi kimiawi pada polimer isolasi sangat sensitif terhadap suhu.

Secara spesifik, laju penuaan termal (*thermal aging*) akan meningkat dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu operasi sebesar 6°C di atas batas termal desainnya. Implikasi praktis dari hukum ini sangat serius: sebuah transformator yang dipaksa bekerja dalam kondisi *overload* dengan suhu belitan yang tinggi akan mengalami penyusutan umur teknis (*loss of life*) yang akseleratif. Degradasi ini menyebabkan kertas isolasi menjadi rapuh dan minyak mengalami oksidasi, yang pada akhirnya menurunkan kekuatan dielektrik dan meningkatkan risiko terjadinya kegagalan isolasi mendadak (*flashover*) atau hubung singkat internal.

4. Optimasi Penempatan (Optimal Siting)

Selain manajemen internal, lokasi fisik penempatan transformator dalam topologi jaringan sangat menentukan kualitas tegangan yang diterima konsumen. Short (2004) menekankan prinsip fundamental bahwa transformator distribusi harus ditempatkan sedekat mungkin dengan pusat beban (*load center*).

Strategi penempatan ini bertujuan meminimalisir panjang fisik Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Dengan memperpendek jarak penyaluran sekunder, impedansi longitudinal saluran dapat ditekan sekecil mungkin. Hal ini krusial karena jatuh tegangan berbanding lurus dengan jarak; sehingga penempatan trafo yang optimal akan menjamin stabilitas tegangan pelayanan tetap berada dalam toleransi standar meskipun beban puncak terjadi.

2.2.3 Analisis Jatuh Tegangan (*Voltage Drop*)

Jatuh tegangan atau *voltage drop* merupakan fenomena fundamental dalam sistem distribusi tenaga listrik yang mendefinisikan selisih potensial vektoris antara tegangan pada sisi pengirim (*sending end*) dengan tegangan pada sisi penerima (*receiving end*). Parameter ini menjadi indikator utama kualitas daya (*power quality*) yang diterima konsumen, karena tegangan yang stabil adalah syarat mutlak bagi kinerja optimal peralatan listrik.

1. Formulasi Matematis dan Ketergantungan Variabel

Pada sistem distribusi tiga fasa yang seimbang, besarnya jatuh tegangan (ΔV) yang terjadi di sepanjang penghantar tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya arus, tetapi juga oleh karakteristik impedansi saluran (Z) yang terdiri dari komponen resistif (R) dan induktif (X). Gonen (2014) merumuskan persamaan pendekatan skalar untuk menghitung jatuh tegangan fasa-ke-netral sebagai berikut:

$$\Delta V = I \cdot L(R \cos \phi + X \sin \phi) \quad (2.1)$$

Dimana:

I : Magnitudo arus beban (Ampere).

L : Panjang saluran distribusi (km).

R : Resistansi AC penghantar (Ω/km).

X : Reaktansi induktif penghantar (Ω/km).

$\cos \phi$: Faktor daya beban (*Power Factor*).

Persamaan di atas secara matematis menegaskan bahwa jatuh tegangan berbanding lurus dengan panjang saluran (L) dan besarnya arus beban (I). Hal ini memberikan landasan teoritis yang kuat mengapa pelanggan yang berada di ujung jaringan radial dengan radius pelayanan yang panjang seperti pada kasus SMPN 1 Enrekang sangat rentan mengalami kondisi tegangan kritis jika tidak dilakukan segmentasi penyulang atau penambahan trafo sisip.

2. Standar Regulasi Tegangan (SPLN)

Untuk menjamin keseragaman dan kualitas layanan, PT PLN (Persero) menetapkan standar regulasi yang ketat melalui SPLN 1:1995 tentang Tegangan-Tegangan Standar. Standar ini mengatur bahwa variasi tegangan pelayanan di titik pemakai (konsumen) dibatasi maksimum +5% dan minimum -10% dari tegangan nominal sistem.

Untuk mengevaluasi kepatuhan terhadap standar ini, besaran jatuh tegangan sering dikonversi menjadi nilai persentase (%VD) menggunakan rumus:

$$\%VD = (V_s - V_r)/V_n \times 100\% \quad (2.2)$$

Dimana V_s adalah tegangan kirim, V_r adalah tegangan terima, dan V_n adalah tegangan nominal (220/380 V). Jika hasil perhitungan menunjukkan penyimpangan melebihi 10% (tegangan terima < 198 Volt), maka sistem dinyatakan dalam kondisi undervoltage kritis yang memerlukan perbaikan segera.

3. Implikasi Teknis Undervoltage

Kondisi tegangan yang berada di bawah ambang batas toleransi memiliki dampak destruktif yang signifikan. Secara teknis, penurunan tegangan menyebabkan penurunan torsi pada beban motor listrik (sebanding dengan kuadrat tegangan) dan kegagalan fungsi pada peralatan elektronik digital. Short (2014) menjelaskan bahwa power supply pada perangkat elektronik modern akan mengalami tekanan tegangan rendah (undervoltage stress) yang dapat memicu kerusakan komponen atau menyebabkan perangkat sering mengalami restart mendadak, sebagaimana yang dikeluhkan oleh pihak sekolah dalam studi kasus ini.

2.2.4 Analisis Rugi-Rugi Daya (*Power Losses*)

Dalam operasi sistem distribusi tenaga listrik, rugi-rugi daya (*power losses*) merupakan parameter inefisiensi yang tidak terhindarkan namun wajib dikendalikan. Rugi daya merepresentasikan selisih antara jumlah energi listrik yang diinjeksikan ke dalam jaringan distribusi dari gardu induk dengan jumlah energi yang secara aktual terukur dan terjual pada kWh meter konsumen. Energi yang "hilang" ini secara teknis tidak musnah, melainkan terkonversi menjadi bentuk energi lain yang tidak produktif, utamanya adalah energi panas (*heat*) sepanjang saluran penyaluran.

1. Mekanisme Disipasi Panas dan Hubungan Kuadratik (I^2R)

Komponen terbesar dari rugi-rugi teknis (*technical losses*) pada jaringan distribusi adalah rugi daya aktif yang timbul pada penghantar. Stevenson (2012) menjelaskan mekanisme fisika di balik fenomena ini sebagai akibat dari resistivitas material konduktor. Ketika arus listrik mengalir, elektron-elektron pembawa muatan mengalami tumbukan inelastis dengan atom-atom kisi kristal logam konduktor. Tumbukan ini menyebabkan transfer energi kinetik elektron menjadi energi getaran atomik, yang bermanifestasi sebagai kenaikan suhu atau panas (*heat dissipation*).

Secara matematis, besarnya rugi daya aktif total (P_{loss}) pada sistem distribusi tiga fasa yang seimbang diformulasikan sebagai:

$$P_{loss} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \quad (2.3)$$

Dimana:

I : Arus beban yang mengalir (Ampere)

R : Resistansi AC penghantar per satuan panjang (Ω/km)

L : Panjang total penghantar (km)

Persamaan di atas mengungkapkan karakteristik fundamental yang sangat krusial: rugi daya memiliki hubungan kuadratik terhadap arus beban (I), namun hanya memiliki hubungan linier terhadap resistansi (R) dan panjang saluran (L). Implikasi teknis dari hubungan ini sangat signifikan. Jika arus beban meningkat dua kali lipat ($2I$), maka rugi daya tidak naik dua kali lipat, melainkan melonjak

sebesar empat kali lipat ($((2I)^2 = 4I^2)$). Sebaliknya, jika arus dapat diturunkan menjadi setengahnya, rugi daya akan turun drastis menjadi seperempatnya.

Oleh karena itu, dalam rekayasa jaringan distribusi, strategi menurunkan magnitude arus yang mengalir pada penghantar utama misalnya melalui teknik pemecahan beban (*load splitting*) dengan penyisipan transformator baru dianggap sebagai metode yang jauh lebih efektif dan *impactful* untuk mereduksi rugi daya dibandingkan sekadar memendekkan jarak atau mengganti ukuran kabel.

2. Ambang Batas Efisiensi Energi dan Dampak Operasional

Tingginya rugi daya memiliki dampak ganda: kerugian finansial langsung bagi perusahaan utilitas dan penurunan kapasitas layanan sistem. Energi yang hilang sebagai panas adalah energi yang telah memakan biaya pembangkitan namun tidak menghasilkan pendapatan (*revenue*).

Pabla (2013) dalam literatur standar distribusi menyatakan bahwa meskipun rugi daya tidak dapat dihilangkan sepenuhnya, terdapat ambang batas kewajaran efisiensi. Untuk sistem distribusi yang sehat, rugi daya teknis idealnya harus dipertahankan di bawah rentang 5-10% dari total daya yang disalurkan. Angka kerugian yang melampaui ambang batas ini mengindikasikan adanya inefisiensi sistem yang parah, yang sering kali disebabkan oleh konfigurasi jaringan yang terlalu panjang, penampang penghantar yang *undersized*, atau ketidakseimbangan beban yang ekstrem. Kondisi ini memerlukan intervensi infrastruktur segera untuk mencegah pemborosan kapasitas pembangkit dan memperpanjang umur teknis peralatan yang sering terpapar panas berlebih.

2.2.5 Karakteristik Material Konduktor dan Koreksi Suhu

Konduktor atau penghantar merupakan komponen fisik paling fundamental dalam infrastruktur distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai media penyaluran arus dari sumber ke beban. Kinerja operasional konduktor tidak bersifat statis, melainkan sangat dinamis dan dipengaruhi oleh dua variabel utama: dimensi fisik (geometri) dan kondisi termal lingkungan operasionalnya.

1. Hubungan Invers antara Resistansi dan Dimensi Fisik

Secara fisika, resistansi (R) adalah ukuran hambatan yang diberikan material terhadap aliran elektron. Nilai resistansi ohmik suatu penghantar

berbanding terbalik dengan luas penampangnya (A). Hubungan ini dijelaskan oleh Stevenson (1982) melalui persamaan resistivitas:

$$R = \rho L/A \quad (2.4)$$

Dimana:

ρ adalah resistivitas material dan

L adalah panjang konduktor.

Prinsip dasar ini menjadi landasan teoritis bagi strategi peningkatan kapasitas penghantar atau *uprating*. Dalam konteks perbaikan jaringan distribusi yang mengalami jatuh tegangan kritis, penambahan penghantar baru secara paralel (sirkuit ganda) pada penghantar lama berpenampang $4 \times 70 \text{ mm}^2$ akan memperluas "jalan raya" bagi elektron. Peningkatan total luas penampang efektif (A) melalui konfigurasi sirkuit ganda ini secara matematis akan menurunkan nilai resistansi ekuivalen per kilometer secara signifikan, sehingga impedansi total saluran berkurang dan jatuh tegangan dapat diminimalisir.

2. Fenomena Agitasi Termal pada Struktur Logam

Dalam analisis aliran daya yang presisi, asumsi bahwa nilai resistansi konduktor adalah konstan merupakan kesalahan fatal. Stevenson (1982) menjelaskan mekanisme fisika di tingkat atomik, di mana resistansi konduktor logam akan meningkat seiring kenaikan suhu.

Fenomena ini disebabkan oleh agitasi termal. Ketika suhu konduktor meningkat, baik akibat paparan panas matahari (suhu ambien) maupun akibat panas internal yang dihasilkan oleh arus beban ($I^2 R$) atom-atom logam penyusun konduktor akan bergetar lebih hebat. Peningkatan vibrasi atau agitasi atomik ini memperbesar kemungkinan tumbukan antara elektron pembawa muatan dengan atom kisi logam, yang secara efektif "menghambat" laju aliran elektron. Akibatnya, nilai resistansi efektif material meningkat.

3. Formulasi Koreksi Suhu dan Dampak Operasional

Untuk mengakomodasi fenomena agitasi termal tersebut dalam perhitungan teknis, diperlukan faktor koreksi suhu. Rumus standar untuk menghitung resistansi pada suhu kerja operasional (T_2) adalah:

$$R_{(T_2)} = R_{(20)}[1 + \alpha(T_2 - 20)] \quad (2.5)$$

Dimana:

R_{20} : Resistansi pada suhu standar 20°C.

α : Koefisien suhu material (misalnya Aluminium).

T_2 : Suhu kerja konduktor saat berbeban.

Pada kondisi beban puncak (*peak load*), suhu inti kabel tidak lagi sama dengan suhu lingkungan, melainkan dapat meningkat signifikan (misalnya hingga 70°C pada kabel jenis XLPE). Data validasi menunjukkan bahwa kenaikan suhu ini dapat menyebabkan lonjakan nilai resistansi yang substansial, sebagai contoh dari 0.443 Ω/km menjadi 0.532 Ω/km . Mengabaikan faktor koreksi ini akan menyebabkan hasil perhitungan jatuh tegangan menjadi bias (terlihat lebih rendah/optimis dari kenyataan). Oleh karena itu, validasi perhitungan manual harus selalu menggunakan nilai resistansi yang telah terkoreksi suhu untuk merepresentasikan kondisi "terburuk" yang mungkin terjadi di lapangan.

2.2.6 Analisis Aliran Daya (*Load Flow Analysis*) Metode Newton-Raphson

Studi aliran daya atau *load flow analysis* merupakan analisis numerik fundamental dalam teknik tenaga listrik yang bertujuan untuk menentukan kondisi operasi tunak (*steady-state*) dari suatu sistem yang saling terkoneksi. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk menghitung parameter-parameter yang tidak diketahui, yaitu magnitudo tegangan ($|V|$) dan sudut fasa tegangan δ pada setiap *bus*, serta aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada setiap saluran transmisi atau distribusi. Analisis ini menjadi prasyarat krusial sebelum melakukan perencanaan pengembangan jaringan, seperti penambahan transformator sisip, karena memberikan gambaran akurat mengenai kemampuan sistem dalam melayani beban tanpa melanggar batasan termal dan regulasi tegangan.

1. Kompleksitas Matematis dan Kebutuhan Metode Numerik

Secara matematis, hubungan antara daya injeksi, tegangan, dan impedansi dalam sistem tenaga listrik direpresentasikan oleh persamaan aljabar non-linier. Hal ini disebabkan karena daya ($S = VI^*$) merupakan fungsi perkalian antara tegangan dan arus, di mana arus sendiri merupakan fungsi dari tegangan dan admintansi sistem. Akibat sifat non-linieritas ini, solusi analitis langsung tidak

dapat digunakan. Oleh karena itu, diperlukan metode numerik berbasis iterasi untuk mendekati solusi sejati. Faruq dkk. (2021) menyebutkan bahwa terdapat beberapa metode iterasi yang umum digunakan, seperti Gauss-Seidel, Newton-Raphson, dan Fast Decoupled, di mana masing-masing memiliki karakteristik konvergensi yang berbeda.

2. Algoritma Newton-Raphson

Di antara berbagai metode yang ada, metode Newton-Raphson menjadi standar industri yang paling luas digunakan dalam perangkat lunak simulasi modern, termasuk ETAP 19.0.1, khususnya untuk sistem jaringan yang kompleks. Keunggulan utama metode ini terletak pada teknik linearisasi persamaan aliran daya menggunakan deret Taylor.

- a. Matriks Jacobian: Inti dari metode Newton-Raphson adalah pembentukan Matriks Jacobian, yang berisi turunan parsial dari persamaan daya aktif dan reaktif terhadap sudut fasa dan magnitudo tegangan. Matriks ini berfungsi untuk mengoreksi tebakan awal nilai tegangan pada setiap langkah iterasi, sehingga arah pencarian solusi menjadi sangat presisi.
- b. Konvergensi Kuadratik: Saadat (2010) menjelaskan bahwa metode Newton-Raphson memiliki karakteristik konvergensi kuadratik. Artinya, jika nilai tebakan awal berada cukup dekat dengan solusi, tingkat kesalahan (*error*) akan berkurang secara kuadratik pada setiap iterasi (misalnya dari 10^{-2} menjadi 10^{-4} , lalu 10^{-8}). Hal ini menjadikan metode Newton-Raphson sangat cepat dan efisien secara komputasi, serta sangat andal (*robust*) untuk menyelesaikan kasus sistem yang "sakit" (*ill-conditioned*) sekalipun.

3. Kriteria Penghentian Iterasi (*Mismatch Power*)

Proses simulasi aliran daya dimulai dengan mengasumsikan nilai awal tegangan (biasanya *flat start*: $1.0 \angle 0^\circ$ pu). Algoritma kemudian menghitung daya injeksi pada setiap bus berdasarkan asumsi tersebut dan membandingkannya dengan daya beban atau pembangkitan yang sebenarnya dijadwalkan. Selisih antara daya hitung dan daya jadwal ini disebut sebagai *mismatch power* ΔP dan ΔQ . Iterasi akan terus berlangsung berulang kali untuk memperbarui nilai tegangan hingga nilai *mismatch power* pada seluruh bus lebih kecil dari toleransi

presisi yang ditetapkan. Dalam standar simulasi ETAP, batas toleransi konvergensi ini biasanya ditetapkan sangat ketat, yaitu ≤ 0.001 (0.001 MW/Mvar). Ketelitian ini memastikan bahwa hasil simulasi yang berupa profil tegangan dan rugi-rugi daya merepresentasikan kondisi fisik sistem yang sangat akurat, sehingga valid digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis, seperti evaluasi *undervoltage* dan *overload*.

2.2.7 Manajemen Pemeliharaan Preventif (*Preventive Maintenance*)

Dalam manajemen aset sistem distribusi tenaga listrik modern, paradigma pemeliharaan telah mengalami evolusi fundamental. Pendekatan tradisional yang bersifat reaktif atau *corrective maintenance* (perbaikan setelah kerusakan terjadi) dinilai tidak lagi efisien karena tingginya biaya pemulihan dan dampak kerugian akibat energi tak tersalurkan (*Energy Not Served*). Sebaliknya, strategi Pemeliharaan Preventif (*Preventive Maintenance*) didefinisikan sebagai rangkaian tindakan pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal dan sistematis untuk mendeteksi, mencegah, atau memitigasi degradasi fungsi suatu aset sebelum kegagalan total terjadi.

Syukri dkk. (2022) mengklasifikasikan pemeliharaan ini ke dalam tindakan berbasis waktu (*Time-Based Maintenance*) dan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance*). Filosofi ini selaras dengan konsep Reliability Centered Maintenance (RCM) yang dijelaskan oleh Sari & Irwanto (2025), di mana fokus utama adalah menjamin fungsi sistem tetap berjalan sesuai standar kinerja yang diinginkan melalui kombinasi inspeksi visual, pengukuran terjadwal, dan pengujian diagnostik. Untuk kasus spesifik transformator distribusi dan jaringan tegangan rendah, tiga pilar utama pemeliharaan preventif yang krusial adalah Inspeksi Termal, Penyeimbangan Beban, dan Monitoring Isolasi.

1. Inspeksi Termal (Infrared Thermography)

Salah satu ancaman terbesar bagi keandalan jaringan distribusi adalah kegagalan koneksi mekanis dan elektrik pada titik sambungan (*joint*), terminasi kabel, konektor *bushing*, dan *fuse holder* yang rentan mengalami pelonggaran akibat siklus termal dan getaran mekanis. Dugan et al. (2012) menjelaskan bahwa ketika sambungan menjadi longgar (*loose connection*), luas penampang kontak

efektif akan berkurang sehingga menyebabkan peningkatan nilai resistansi kontak ($R_{contact}$). Berdasarkan hukum Joule ($P = I^2 R$), arus beban tinggi yang melewati resistansi kontak tersebut akan menghasilkan disipasi panas berlebih (*hotspot*) yang memicu oksidasi pada permukaan logam. Proses ini menciptakan siklus umpan balik positif yang dikenal sebagai *thermal runaway*, di mana resistansi yang naik menyebabkan panas bertambah, yang kemudian memperparah oksidasi dan menaikkan resistansi kembali hingga berpotensi menyebabkan putusnya koneksi atau percikan api (*arcing*). Oleh karena itu, metode termografi inframerah menjadi krusial untuk mendeteksi radiasi panas abnormal ini secara *non-contact* dan *real-time* sebelum kerusakan permanen terjadi.

2. Penyeimbangan Beban (*Load Balancing*)

Ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat (3-ph 4-wire) memiliki implikasi teknis yang signifikan terhadap efisiensi energi. Hartono (2025) menekankan bahwa ketidakseimbangan beban antar fasa akan menghasilkan resultan vektor arus yang tidak nol, yang kemudian mengalir kembali ke trafo melalui penghantar netral (I_N). Mengingat penghantar netral memiliki impedansi internal (Z_N), aliran arus ini menimbulkan rugi daya parasitik sebesar $P_{loss_N} = I_N^2 \cdot R_N$ yang terbuang sia-sia. Selain kerugian daya, fenomena ini juga menyebabkan jatuh tegangan pada kawat netral $V_N = I_N \cdot Z_N$ yang memicu pergeseran titik netral (*floating neutral*). Akibatnya, tegangan fasa-netral pada fasa yang berbeban ringan akan mengalami kenaikan (*overvoltage*), sementara pada fasa berbeban berat akan turun (*undervoltage*), sehingga penyeimbangan beban secara rutin melalui pemindahan sambungan pelanggan antar fasa menjadi intervensi teknis yang wajib dilakukan.

3. Monitoring Kesehatan Sistem Isolasi

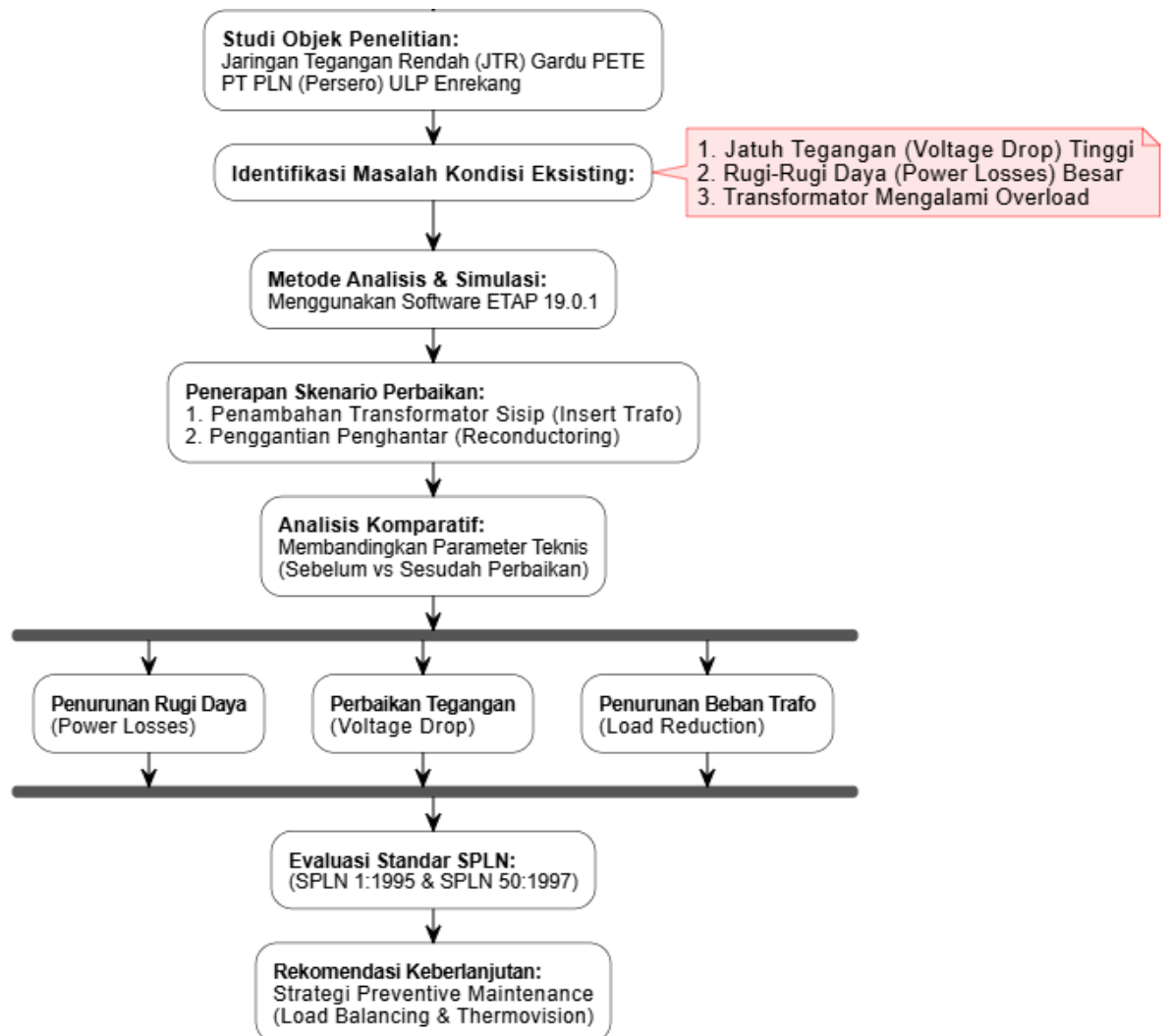
Integritas transformator distribusi sangat ditentukan oleh kondisi sistem isolasinya, yang terdiri dari kertas selulosa dan minyak dielektrik. Heathcote (2007) menguraikan bahwa isolasi transformator terus-menerus terpapar stres termal, elektrik, dan kimiawi, di mana kontaminan seperti partikel konduktif, produk oksidasi (lumpur), dan terutama kelembaban (air) dapat menurunkan kekuatan dielektrik (*dielectric strength*) minyak secara drastis. Untuk memantau

laju degradasi ini, diperlukan pengujian diagnostik rutin yang mencakup uji tahanan isolasi (*Megger Test*) untuk mengukur resistansi ohmik antar belitan dan ke tanah, serta uji tegangan tembus (*Breakdown Voltage/BDV Test*) untuk mengetahui kemampuan isolasi minyak. Pemantauan tren parameter ini memungkinkan operator melakukan tindakan perawatan preventif, seperti purifikasi minyak (*oil treatment*) atau penggantian *gasket*, guna mencegah terjadinya hubung singkat internal (*short circuit*) yang fatal.

2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran ini menggambarkan alur logika penelitian yang dimulai dari permasalahan pada kondisi eksisting di Gardu PETE ULP Enrekang, yaitu tingginya jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi daya (*power losses*) yang tidak sesuai standar SPLN.

Untuk mengatasi masalah tersebut, dilakukan simulasi perbaikan menggunakan *software* ETAP 19.0.1 dengan skenario penambahan Transformator Sisip (*Insert Trafo*). Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk melihat seberapa besar penurunan rugi daya dan kenaikan tegangan yang terjadi, serta penyusunan strategi pemeliharaan (*preventive maintenance*) untuk menjaga hasil tersebut. Berikut adalah diagram kerangka pemikiran penelitian:



Gambar 2. 2 Kerangka Pemikiran