

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan salah satu kebutuhan vital bagi masyarakat modern, baik untuk sektor rumah tangga, industri, maupun layanan publik. Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai penyedia listrik utama di Indonesia memiliki tanggung jawab besar untuk memastikan pasokan listrik yang andal, stabil, dan berkesinambungan. Namun, dalam praktiknya, sistem distribusi listrik PLN kerap mengalami gangguan yang menyebabkan pemadaman (*blackout*) atau penurunan kualitas pelayanan (*voltage dip*, *flicker*), sehingga menimbulkan ketidakpuasan pelanggan dan potensi kerugian ekonomi.

PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) atau biasa disingkat menjadi PLN, adalah sebuah badan usaha milik negara Indonesia yang bergerak di bidang ketenagalistrikan. Pemerintah Indonesia memegang mayoritas saham perusahaan ini melalui Danantara. Untuk mendukung kegiatan bisnisnya, hingga akhir tahun 2021, perusahaan ini mengelola sejumlah pembangkit listrik dengan total kapasitas terpasang mencapai 64.553MW. Dalam pelayanan pendistribusian kelistrikan PLN membagi-bagi fungsi unit induknya kedalam beberapa unit induk berdasarkan pada sistem tenaga listrik yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Selain itu ada juga unit induk atau pusat-pusat lain sebagai penunjang berlangsungnya perusahaan. Karena luasnya cakupan wilayah kerja PLN, maka PLN memiliki unit-unit di seluruh wilayah Indonesia yang mempunyai fungsi masing-masing sesuai dengan unit induknya.

PT. PLN (Persero) UP3 Pinrang sebagai penyedia utama listrik Kabupaten Pinrang & Kabupaten Enrekang memiliki tanggung jawab untuk menyediakan energi listrik yang andal dan berkualitas kepada seluruh masyarakat di wilayah tersebut. Salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik adalah sistem distribusi, karena berada di ujung rantai pasok dan berhubungan langsung dengan konsumen. Namun, dalam praktiknya, sistem distribusi sering menghadapi permasalahan seperti gangguan listrik yang sering terjadi, waktu pemulihan gangguan yang lama, serta kehilangan energi yang tinggi (*losses*). Pada sistem distribusi tenaga listrik, tingkat keandalan merupakan salah satu faktor yang sangat penting agar mutu, kontinuitas dan ketersediaan pelayanan daya listrik terhadap pelanggan dapat dilakukan secara kontinu dalam satu tahun. Jika gangguan pada jaringan distribusi tenaga listrik ini diabaikan terus menerus maka akan mengakibatkan pemadaman listrik, gangguan tersebut dapat diatasi agar komponen yang bekerja dapat berjalan dengan lancar dan efisien dengan melakukan pemeliharaan. Dengan melakukan pemeliharaan jaringan distribusi yang rutin dan ekstra supaya mengatasi penurunan efisiensi dan kerusakan agar komponen tersebut dapat bekerja dengan baik sesuai fungsinya. Pemeliharaan pada jaringan distribusi tenaga listrik dilakukan optimasi untuk meningkatkan efektivitas pemeliharaan preventif sehingga berpengaruh terhadap keandalan jaringan distribusi secara signifikan. Hal ini dikarenakan, pemeliharaan peralatan listrik (*preventif*) merupakan serangkaian tindakan atau proses kegiatan untuk mempertahankan kondisi dan meyakinkan bahwa peralatan dapat berfungsi sebagaimana mestinya sehingga dapat dicegah terjadinya gangguan yang menyebabkan kerusakan (Krishananto dan Iwa., 2025)



Gambar 1. Jumlah Gangguan Distribusi Listrik Tahun 2024

Sistem distribusi listrik PLN sering mengalami gangguan akibat trafo *overload*, kabel bawah tanah rusak, dan isolator retak. Berdasarkan grafik diatas terdapat 723 jenis gangguan selama Tahun 2024. Gangguan distribusi listrik yang disebabkan oleh berbagai faktor, seperti kerusakan peralatan seperti transformator dan isolator, gangguan cuaca (petir, angin kencang, hujan lebat), kesalahan manusia, hingga kondisi jaringan yang sudah tua. Salah satu penyebab tingginya frekuensi gangguan adalah pemeliharaan reaktif (*corrective maintenance*) yang dilakukan setelah kegagalan terjadi. Hal ini menyebabkan biaya tinggi, padam luas, dan menurunnya indikator keandalan. Oleh karena itu, untuk mencegah terjadinya kembali masalah-masalah tersebut perlu dilakukan upaya menganalisis dan meminimasi risiko-risiko yang ada dan membuat usulan penjadwalan pemeliharaan preventif agar tidak terjadi gangguan seperti itu lagi kedepannya untuk menghindari potensi kerugian perusahaan dan kepercayaan pelanggan. Upaya peningkatan keandalan sistem distribusi listrik memerlukan pendekatan yang mampu mengidentifikasi sumber gangguan secara akurat serta memprioritaskan tindakan perbaikan berdasarkan tingkat risikonya. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah **Reliability Centered Maintenance (RCM)** untuk menganalisis mode kegagalan komponen, menghitung *Risk Priority Number (RPN)*, serta memberikan rekomendasi strategi pemeliharaan preventif. Namun, keterbatasan sumber daya teknis dan biaya membuat jadwal pemeliharaan perlu dioptimalkan. Oleh karena itu, penelitian ini mengombinasikan RCM dengan optimasi penjadwalan menggunakan **Integer Linear Programming (ILP)**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah dijabarkan, berikut merupakan rumusan masalah yang akan diteliti dalam penelitian ini:

- a. Bagaimana menganalisis tingkat kerusakan dan tingkat keandalan komponen-komponen jaringan distribusi listrik PLN UP3 Pinrang dengan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM)?
- b. Bagaimana mengidentifikasi penyulang distribusi listrik untuk menentukan prioritas pemeliharaan menggunakan metode *Technique For Others Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS)?
- c. Bagaimana menganalisis biaya pemeliharaan komponen jaringan distribusi listrik yang optimal selama periode waktu yang ditentukan menggunakan metode *Integer Linear Programming* (ILP)?
- d. Bagaimana membuat usulan penjadwalan pemeliharaan komponen distribusi menggunakan metode *Integer Linear Programming* (ILP)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, adapun tujuan penelitian berikut ini:

- a. Menganalisis tingkat kerusakan dan tingkat keandalan komponen-komponen jaringan distribusi listrik PLN UP3 Pinrang dengan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM).
- b. Mengidentifikasi penyulang distribusi listrik untuk menentukan prioritas pemeliharaan menggunakan metode *Technique For Others Reference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS).
- c. Menganalisis biaya pemeliharaan komponen jaringan distribusi listrik yang optimal selama periode waktu yang ditentukan menggunakan metode *Integer Linear Programming* (ILP).
- d. Membuat usulan penjadwalan pemeliharaan komponen distribusi menggunakan metode *Integer Linear Programming* (ILP).

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak, diantaranya:

- a. Bagi Perusahaan, penelitian ini dapat dijadikan pertimbangan perusahaan untuk menangani permasalahan yang terjadi, agar perusahaan dapat mempertimbangkan usulan penjadwalan pemeliharaan komponen distribusi jaringan listrik.
- b. Bagi Lembaga Pendidikan, memberikan ilmu pengetahuan dalam menangani pemeliharaan yang tepat bagi perusahaan PLN.
- c. Bagi penulis sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana pada Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, dan menambah pengetahuan dan pengalaman penulis agar dapat mengembangkan ilmu yang diperoleh selama mengikuti perkuliahan di jurusan Teknik Industri serta peneliti dapat mengetahui lebih dalam tentang manajemen distribusi listrik khususnya pada bagian pemeliharaan teknis (PLN UP3 Pinrang).

1.5 Batasan Masalah

Untuk mencapai tujuan penelitian dengan baik, penulis memberikan batasan ruang lingkup permasalahan. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- a. Objek penelitian ini difokuskan pada analisis sistem distribusi listrik PLN UP3 Pinrang khususnya pada bagian pemeliharaan aset.
- b. Pengambilan data dilakukan pada PLN UP3 Pinrang berkaitan dengan aktivitas proses bisnis.
- c. Hasil dari penelitian yang dilakukan adalah model optimasi penjadwalan pemeliharaan berbasis ILP dan rekomendasi jadwal pemeliharaan optimal bagi perusahaan.

1.6 Tinjauan Pustaka

1.6.1 Pemeliharaan (*Maintenance*)

Salah satu tujuan manajemen aset adalah memanfaatkan masa pakai peralatan yang ada secara efektif. Sesungguhnya, manajemen aset didefinisikan sebagai proses memaksimalkan laba atas investasi peralatan selama seluruh siklus hidupnya dengan memaksimalkan kinerja dan meminimalkan biaya. Menyusun kerangka kerja manajemen aset berdasarkan tiga fungsi. Fungsi - fungsi ini adalah pemilik aset, pengelola aset, dan penyedia layanan aset.

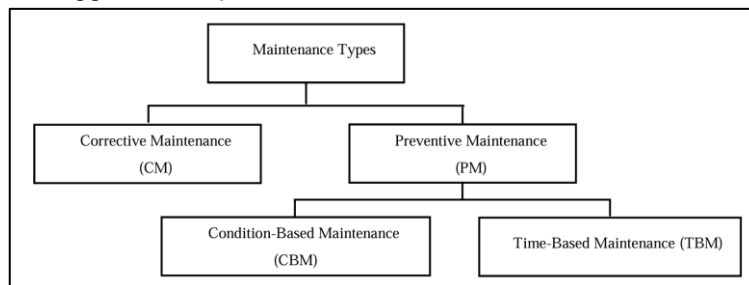
Pemeliharaan (*maintenance*) merupakan bagian penting dari kerangka kerja manajemen aset, secara signifikan memengaruhi kondisi aset dan juga keandalan sistem. Pemeliharaan didefinisikan sebagai suatu aktivitas dimana suatu perangkat yang tidak rusak, dari waktu ke waktu, kerusakannya dihentikan, dikurangi, atau dihilangkan. Tujuan utama dari pemeliharaan adalah untuk memperpanjang umur peralatan dan/atau mengurangi kemungkinan kegagalannya. Permasalahan teknis dan anggaran merupakan faktor yang paling berpengaruh dalam menetapkan aktivitas pemeliharaan (Aldhubaib, 2013).

Perusahaan utilitas perlu mencegah potensi kegagalan dengan melakukan pemeliharaan preventif sebelum kegagalan terjadi atau pemeliharaan korektif jika terjadi kegagalan. Dengan demikian, kegiatan pemeliharaan tradisional dapat dibagi menjadi dua kategori utama *Preventive Maintenance* (PM) dan *Corrective Maintenance* (CM).

Corrective Maintenance (CM) adalah jenis perawatan yang paling sederhana. Strateginya sederhana, yaitu memperbaiki/mengganti peralatan setelah rusak. Meskipun demikian, CM tidak dapat diterapkan pada peralatan yang kegagalannya dapat mengakibatkan konsekuensi yang fatal; CM diterapkan pada peralatan yang beroperasi berdasarkan *Run-To Failure* (RTF).

Di sisi lain, *Preventive Maintenance* (PM) dilakukan untuk mencegah kegagalan sebelum terjadi. Pemeliharaan ini dapat dibagi lagi menjadi dua jenis. Jenis pertama disebut *Time-Based Maintenance* (TBM). Jenis PM ini sering dilakukan pada interval waktu terjadwal yang teratur, terlepas dari kondisi peralatan, dan berdasarkan rekomendasi produsen peralatan atau pengalaman personel yang menggunakan peralatan serupa. Meskipun jenis pemeliharaan ini dapat memperbaiki kondisi dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan,

pemeliharaan ini tidak dapat mencegah kegagalan yang terjadi sebelum waktunya atau selama periode kerusakan, kecuali interval yang telah ditentukan dikurangi. Oleh karena itu, diperkenalkanlah Pemeliharaan Berbasis Kondisi (*Condition-Based Maintenance*/CBM), jenis PM kedua. CBM melibatkan pengukuran, pemantauan, dan analisis kondisi peralatan. Inti dari CBM adalah bahwa pemeliharaan harus dilakukan jika kondisi peralatan memerlukannya. Oleh karena itu, CBM memerlukan beberapa alat pengukuran, komunikasi, dan penyimpanan untuk mendapatkan dan memanfaatkan informasi yang diperlukan guna menentukan kondisi kerusakan dan memelihara peralatan sebelum kondisinya memburuk hingga tidak dapat diterima.



Gambar 2. Jenis Maintenance

Namun demikian, baik TBM maupun CBM tidak mempertimbangkan probabilitas kegagalan dan konsekuensinya. Dengan kata lain, kedua jenis ini tidak mempertimbangkan nilai peralatan bagi keseluruhan sistem karena semua peralatan memiliki tingkat keandalan yang sama. Oleh karena itu, jenis pemeliharaan yang ada harus dikembangkan dan ditingkatkan untuk melibatkan konsep keandalan yang diperlukan dalam pemeliharaan.

1.6.2 Reliability Centered Maintenance (RCM)

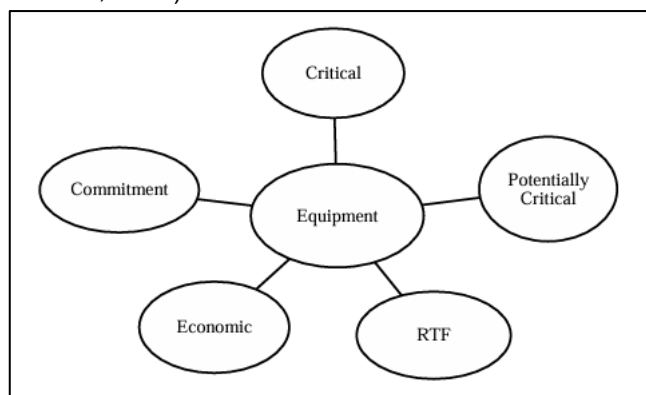
Konsep RCM harus difokuskan pada aktivitas yang paling memberikan dampak terhadap performance dari sistem yang diukur berdasarkan *availability* dan keselamatan operasional sistem. *Reliability Centered Maintenance* adalah suatu proses yang digunakan untuk menentukan apa yang harus dilakukan untuk menjamin beberapa asset fisik secara terus menerus mengerjakan sesuai dengan apa yang pemakai inginkan dalam kondisi pengoperasiannya. RCM adalah suatu teknik yang dipakai untuk mengembangkan *preventive maintenance* yang terjadwal. Perawatan dilakukan untuk mempertahankan fungsi dari sistem serta memastikan bahwa sistem dan peralatannya dapat melakukan fungsinya pada berbagai mode pengoperasian (Alwi, 2016).

Tujuan akhir *Reliability Centered Maintenance* (RCM) adalah untuk mengidentifikasi secara tepat mode kegagalan untuk setiap sistem dan/atau peralatan dan tingkat keparahan konsekuensi kegagalan guna menentukan teknik perawatan yang berlaku dengan cara yang hemat biaya. Mengidentifikasi mode kegagalan dan konsekuensinya dapat dilakukan dengan salah satu dari dua analisis: *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) atau *Consequence of Failure Analysis* (COFA). Pendekatan RCM memiliki kemampuan untuk membedakan peralatan berdasarkan pentingnya keandalan. RCM bukanlah jenis pemeliharaan

baru, melainkan metode yang telah disempurnakan untuk melakukan aktivitas pemeliharaan (Aldhubaib, 2013).

RCM merupakan penyempurnaan dari TBM dan CBM karena mempertimbangkan probabilitas kegagalan dan konsekuensinya. Dalam RCM, aktivitas pemeliharaan diprioritaskan berdasarkan kepentingan peralatan terhadap keseluruhan sistem. Kepentingan ini dapat ditunjukkan oleh beberapa indeks atau kriteria keandalan yang ditetapkan oleh utilitas. RCM pada dasarnya memaksimalkan keandalan sistem sambil meminimalkan biaya pemeliharaan terkait. Hal ini menjadikan RCM sebagai pendekatan pemeliharaan yang paling hemat biaya. Fitur baru utama yang terlibat dalam RCM adalah fokus pada mempelajari mode kegagalan selain potensi konsekuensi kegagalan; lebih lanjut, penyebab eksternal kegagalan seperti cuaca, hewan, dan kesalahan manusia juga dipertimbangkan dalam sebagian besar implikasi RCM. RCM selanjutnya mempertimbangkan probabilitas, konsekuensi, dan biaya terkait kegagalan (Aldhubaib, 2013).

Kendala utama yang muncul dalam implementasi RCM adalah kebutuhan akan keahlian dalam mengidentifikasi fungsi, mode kegagalan, dan konsekuensi kegagalan secara akurat dan tepat. Dengan demikian, pendekatan ini hampir empiris. RCM telah secara efektif meningkatkan strategi pemeliharaan tradisional dari dua perspektif. Pertama, jenis pemeliharaan baru diperkenalkan. Kedua, klasifikasi peralatan dimodifikasi, yang pada gilirannya memberikan metodologi baru dalam memprioritaskan aktivitas pemeliharaan berdasarkan kepentingan peralatan (Aldhubaib, 2013).



Gambar 3. Klasifikasi Peralatan RCM

Total Annual Cost (TAC) transformator terdiri dari tiga biaya : *Customer Interruption Cost* (CIC), *Maintenance Cost* (MC), dan *Operating Cost* (OC). Pendekatan sudut pandang non-pemilik diterapkan saat menghitung total biaya tahunan transformator yang sudah terpasang. Pendekatan sudut pandang non-pemilik hanya mempertimbangkan biaya masa depan, sementara biaya sebelumnya dianggap sebagai biaya hangus dan tidak relevan dengan studi penggantian (Aldhubaib, 2013).

1.6.3 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Mode kegagalan adalah keadaan yang dapat menyebabkan kegagalan fungsional. Ketika mode kegagalan diketahui, itu memungkinkan untuk mengetahui dampak kegagalan, yang menunjukkan apa yang akan terjadi ketika mode kegagalan terjadi, dan kemudian digunakan untuk menentukan konsekuensi dan memutuskan cara untuk mengantisipasi, mencegah, mendeteksi, atau memperbaikinya.

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) diperkenalkan ke dunia penerbangan pada tahun 1960. Sejak saat itu, FMEA telah digunakan di berbagai industri. FMEA mencoba mencapai peningkatan dengan:

- 1) Menentukan mode kegagalan pada komponen, peralatan, dan sistem.
- 2) Menentukan dampak peralatan dan sistem untuk setiap model kegagalan.
- 3) Membuat rekomendasi untuk meningkatkan keandalan komponen dan sistem.

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) memiliki empat langkah sebagai berikut:

- a) Mendefinisikan sistem dan komponennya,
 - b) Mengidentifikasi sumber kerusakan komponen,
 - c) Mempelajari konsekuensi dari kerusakan komponen,
 - d) Menarik kesimpulan dan membuat saran
- (Pranowo, 2019).

1.6.4 Logic Tree Analysis (LTA)

Logic tree analysis merupakan pengukuran kualitatif yang berfungsi mengklasifikasikan mode kegagalan. Berikut klasifikasi mode kegagalan berdasarkan LTA:

a) *Safety problem*

Mode kegagalan memiliki konsekuensi dapat melukai atau mengancam jiwa seseorang.

b) *Outage problem*

Mode kegagalan dapat mematikan sistem.

c) *Minor to investigation economic problem*

Mode kegagalan tidak berdampak pada keamanan maupun mematikan sistem. Dampaknya tergolong kecil dan dapat diabaikan.

d) *Hidden failure*

Kegagalan yang terjadi karena tidak dapat diketahui oleh operator.

e) *Task selection*

Seleksi tugas dilakukan untuk menentukan kebijakan-kebijakan yang dapat digunakan dan memilih tugas yang paling efektif untuk setiap mode kegagalan. Kebijakan perawatan yang ekonomis jika dibandingkan dengan total biaya perawatan, dimaksudkan sebagai efektif, sementara kebijakan perawatan yang dapat mencegah, mendeteksi, atau menemukan kegagalan yang tersembunyi dimaksudkan sebagai efisien.

1.6.5 Fungsi Distribusi Kerusakan

Menurut Ebeling (1997), data mendasar mengenai masa pakai peralatan dalam suatu populasi adalah distribusi kerusakan. Ada beberapa cara peralatan dapat mengalami kerusakan. Distribusi weibull, normal, dan lognormal adalah distribusi kerusakan yang sering digunakan yang dapat memenuhi fase kerusakan yang berbeda.

a. Distribusi Weibull

Distribusi weibull dapat memenuhi beberapa periode kerusakan yang terjadi, yaitu periode awal (*early failure*), periode normal, dan periode pengausan, yang masing-masing tergantung pada nilai parameter bentuk fungsi distribusi weibull, distribusi ini merupakan distribusi yang paling sering digunakan untuk menganalisa data kerusakan. Distribusi weibull memiliki laju kerusakan menurun untuk nilai $\beta < 1$, laju kerusakan konstan untuk nilai $\beta = 1$ dan laju kerusakan naik untuk nilai $\beta > 1$. Beberapa fungsi yang digunakan dalam distribusi weibull dapat dilihat sebagai berikut:

1) Fungsi kepadatan probabilitas $f(t)$

Merupakan probabilitas terjadinya kerusakan pada setiap satuan waktu.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

2) Fungsi keandalan distribusi weibull adalah:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (2)$$

3) Laju kegagalan distribusi weibull adalah:

$$r(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

b. Distribusi Lognormal

Dua parameter digunakan oleh distribusi lognormal: s sebagai parameter bentuk (*shape parameter*) dan $tmed$ sebagai parameter lokasi (*location parameter*). Nilai tengah distribusi kerusakan adalah $tmed$. Karena distribusi ini dapat bervariasi, data yang sesuai dengan distribusi weibull juga sesuai dengan distribusi lognormal. Fungsi reliabilitas distribusi lognormal adalah:

Karakteristik distribusi lognormal memiliki dua parameter, yaitu parameter lokasi (μ) dan parameter skala (σ), sama dengan standar deviasi. Jika distribusi waktu antar kegagalan mengikuti distribusi lognormal, maka :

1) Fungsi kepadatan probabilitas $f(t)$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (4)$$

2) Fungsi keandalan distribusi lognormal adalah :

$$R(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt \quad (5)$$

3) Laju kegagalan distribusi lognormal adalah :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6)$$

(Soesetyo., 2014)

c. Distribusi Eksponensial

Menurut Walpole, dkk (2003), baik dalam teori antrian maupun masalah keandalan, distribusi eksponensial sangat penting. Komponen atau sistem dengan laju kerusakan konstan menggunakan distribusi ini. Jika ada peralatan dengan laju kerusakan konstan, maka komponen atau sistem tersebut mungkin termasuk dalam distribusi eksponensial. Parameter distribusi eksponensial didefinisikan sebagai λ , yang nilainya tidak berubah seiring berjalannya waktu. Dalam kasus di mana distribusi waktu antar kegagalan sistem mengikuti distribusi eksponensial, maka:

- 1) Fungsi kepadatan probabilitas $f(t)$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)}, t > 0, \lambda > 0, t \geq \gamma \quad (7)$$

- 2) Fungsi keandalan distribusi eksponensial adalah :

$$R(t) = e^{-\lambda(t\gamma)} \quad (8)$$

- 3) Laju kegagalan distribusi eksponensial adalah :

$$\lambda(t) = \lambda \quad (9)$$

d. Distribusi Normal

Salah satu jenis distribusi yang paling sering digunakan untuk menjelaskan penyebaran data adalah distribusi normal, juga dikenal sebagai distribusi Gaussian. *Probability Density Function* (PDF) distribusi normal simetris terhadap nilai rata-rata (mean). Dispersi terhadap nilai rata-rata distribusi normal dihitung dengan menggunakan nilai standar deviasi. Jika pengaruh kerandoman disebabkan oleh sejumlah besar variasi random yang tidak bergantung (saling bebas/independent) yang kecil atau sedikit, kontribusi ini digunakan. Variable acak T diwakili sebagai distribusi normal dengan rata-rata μ dan varian standar deviasi σ . Dengan kata lain parameter distribusi normal adalah *mean* dan standar deviasi. Jika distribusi waktu antar kegagalan suatu sistem mengikuti distribusi normal, maka menurut D.K. dan T.D. (2014):

- 1) Fungsi kepadatan probabilitas $f(t)$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (10)$$

- 2) Fungsi keandalan distribusi normal adalah :

$$R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right) \quad (11)$$

- 3) Laju kegagalan distribusi normal adalah :

$$\lambda(t) = \frac{\exp \left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]}{\int_t^{\infty} \exp[-(t-\mu)^2 2\sigma^2] dt} \quad (12)$$

1.6.6 Mean Time To Failure (MTTF)

Menurut IR. Ating Sudrajat (2011), *Mean Time To Failure* (MTTF) adalah waktu rata-rata sebuah mesin atau peralatan mengalami kerusakan, atau dengan kata lain, jumlah waktu mesin atau peralatan tersebut dapat berfungsi. *Mean Time To Failure* (MTTF) mesin biasanya digunakan untuk menghitung berapa lama mesin dapat bekerja sebelum rusak. Dengan menghitung waktu surplus tipikal yang terus menerus digunakan untuk penjadwalan produksi :

$$MTTF = \frac{\text{waktu total} - \text{downtime} - \text{waktu yang tidak dimanfaatkan}}{\text{jumlah kerusakan}} \quad (13)$$

Berikut ini adalah perhitungan MTTF berdasarkan masing-masing distribusi, yaitu :

- a. Distribusi Weibull

$$MTTF = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (14)$$

Nilai $\theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ dapat dilihat pada tabel dari fungsi Gamma.

- b. Distribusi Normal

$$MTTF = \mu \quad (15)$$

- c. Distribusi Lognormal

$$MTTF = t_{med} \cdot e^{\frac{s^2}{2}} \quad (16)$$

- d. Distribusi Eksponensial

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (17)$$

1.6.7 Integer Linear Programming (ILP)

Integer Linear Programming adalah sebuah model matematis yang memungkinkan hasil penyelesaian kasus pada pemrograman linier yang berupa bilangan bulat. Metode untuk menyelesaikan persoalan *Integer Programming* diantaranya adalah Metode *Branch and Bound* & Metode *Gomory Cutting Plane*. Kedua metode ini memiliki aturan tertentu dalam menambahkan fungsi batasan baru hingga diperoleh solusi optimal bilangan bulat. Dalam masalah program linier solusi optimal yang diperoleh mungkin saja bilangan pecahan. Untuk beberapa situasi, solusi berbentuk pecahan dapat diterima. Tetapi dalam situasi tertentu solusi optimal haruslah bilangan bulat, misalnya jumlah barang dan jumlah orang. Persoalan program linier menggunakan solusi variabel keputusannya harus merupakan bilangan bulat disebut program linier integer (*integer linear programming*). Program linier integer adalah program linier dengan penambahan fungsi batasan bahwa beberapa atau semua variabelnya harus bernilai bulat (Putri et al., 2024).

Integer Linear Programming (ILP) merupakan suatu *linear programming* dengan variabel keputusannya berupa bilangan bulat (*integer*), sehingga pada bentuk umum linear programming terdapat tambahan syarat bahwa variabel

keputusannya harus bilangan bulat. Bentuk umum dari *Integer Linear Programming* menurut Safitri, et al (2021) adalah :

$$\text{Maks/Min } Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (18)$$

Kendala

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j (\leq / = / \geq) b_i, \text{ untuk } i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (19)$$

$$X_j \geq 0, \text{ untuk } j = 1, 2, 3, \dots, n$$

X_j bernilai *integer* untuk semua j

1.6.8 TOPSIS (*Technique For Others Preference by Similarity to Ideal Solution*)

Teknik TOPSIS adalah pendekatan MCDM yang digunakan untuk memprioritaskan pengumpulan distribusi berdasarkan kriteria yang diberikan. Matriks keputusan didefinisikan di sini sebagaimana disajikan dalam rumus berikut :

$$\begin{matrix} a_1 & (x_{11} & \cdots & x_{1n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_m & (x_{m1} & \cdots & x_{mn}) \end{matrix} \quad \begin{matrix} c_1 & \cdots & c_n \end{matrix} \quad (20)$$

Dimana $\{a_1, \dots, a_m\}$ adalah satu set *feeders* dan $\{c_1, \dots, c_n\}$ adalah satuan kriteria. x_{ij} menunjukkan skor yang sesuai untuk penyulang i dengan mempertimbangkan kriteria j . Metode TOPSIS terdiri dari enam langkah menurut Bahrami et al (2020) yang diuraikan sebagai berikut:

- Membuat matriks keputusan
- Normalisasikan matriks keputusan melalui :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \text{ dengan } i = 1, m \text{ dan } j = 1, \dots, n \quad (21)$$

- Tetapkan matriks keputusan ternormalisasi terbobot dengan mengalikan bobot yang diperoleh dari BWM atau FBWM dengan matriks ternormalisasi yang dicapai pada Langkah 2.

$$p_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (22)$$

- Tentukan solusi ideal positif dan negatif.

Jenis kriteria harus ditentukan terlebih dahulu, kemudian solusi ideal ditentukan. Sementara kriteria benefit (J_1) mengacu pada mereka yang para ahli ingin meningkatkan (misalnya, kualitas), kriteria biaya (J_2) mengacu pada kriteria yang para ahli ingin tolak (misalnya, biaya). Jika p_j^+ dan p_j^- adalah, masing-masing, solusi ideal positif dan negatif, oleh karena itu :

$$p_j^+ = (\max p_{ij} \text{ jika } j \in J_1; \min p_{ij} \text{ jika } j \in J_2) \quad (23)$$

$$p_j^- = (\min p_{ij} \text{ jika } j \in J_1; \max p_{ij} \text{ jika } j \in J_2) \quad (24)$$

e) Evaluasi euclidean dan jarak sebagai berikut :

$$\begin{cases} S_i^+ = (\sum (p_{ij} - p_j^+)^2)^{0.5} \\ S_i^- = (\sum (p_{ij} - p_j^-)^2)^{0.5} \end{cases} \quad (25)$$

Dimana S_i^+ adalah jarak *feeders* dari solusi ideal positif dan S_i^- adalah dari solusi ideal negatif. Oleh karena itu, pengumpulan dengan jarak terpendek dari ideal positif dan jarak terpanjang dari ideal negatif akan memiliki kualifikasi terbaik. Untuk menentukan pengumpulan kritis, prosesnya dibalik.

f) Evaluasi kedekatan relatif untuk setiap feeder ide juga solusi dan memprioritaskannya berdasarkan :

$$d_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ - S_i^-} \quad (26)$$

Pada langkah ini, nilai kedekatan dengan solusi ideal positif diukur. Nilai d_i tertinggi berkaitan dengan pengumpulan dengan kondisi terbaik, sedangkan nilai terendah berkaitan dengan pengumpulan paling kritis yang awalnya memerlukan inspeksi. Dengan demikian, daftar kekritisian diperoleh dengan mengurutkan pengumpulan dari nilai d_i terendah ke tertinggi.

1.7 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan tugas akhir dibutuhkan sistematika penulisan yang benar agar pembaca dapat memahami isi dari tugas akhir tersebut. Penulisan tugas akhir ini terdiri dari beberapa bab, yaitu sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah, tinjauan pustaka, sistematika penulisan serta penelitian terdahulu.

BAB II : METODE PENELITIAN

Bab ini berisi waktu dan tempat penelitian, sumber data, prosedur penelitian, dan kerangka pikir hingga diagram alir penelitian.

BAB III : HASIL

Bab ini berisi tentang hasil pengumpulan dan pengolahan data. Data yang sudah dikumpulkan kemudian diolah untuk memperoleh hasil yang digunakan untuk analisis sesuai dengan latar belakang permasalahan dan tujuan penelitian yang telah ditetapkan pada awal penelitian.

BAB VI : PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang analisis dari hasil pengumpulan dan pengolahan data yang diperoleh dimana analisis tersebut akan menjawab pertanyaan dari rumusan masalah.

BAB V : KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan memberikan saran sebagai pertimbangan, baik untuk perbaikan maupun penelitian selanjutnya.

1.8 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian telah dilakukan sebelumnya dengan topik yang relevan dengan penelitian ini. Penelitian terdahulu ini digunakan sebagai referensi yang memiliki metode ataupun permasalahan sejenis yang diangkat dalam penelitian ini. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan optimasi pemeliharaan dan penjadwalan dengan Metode *Reliability Centered Maintenance* dan *Integer Linear Programming*:

Tabel 1. Penelitian terdahulu

No	Peneliti	Judul	Metode	Hasil	Objek
1.	Very Fernando, Hernadewita, dan Humiras Hardi Purba (2021)	Interval Waktu Pemeliharaan Berdasarkan Reliability Centered Maintenance (RCM) Pada Kinerja Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) Perusahaan Listrik Negara	Reliabilitas y Centered Maintenance (RCM)	Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dengan menggunakan metode RCM maka didapat interval waktu pemeliharaan jenis Predictive Maintenance dengan mengukur pada 3 komponen kritis berdasarkan nilai RPN. Yaitu Equipment Konduktor Putus dengan distribusi data Weibull dilakukan Inspeksi setiap 2 hari, Jumper dengan distribusi data Lognormal dilakukan inspeksi setiap 12 Hari dan Isolator dengan distribusi data Lognormal dilakukan inspeksi setiap 16 hari.	Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)
2.	Muhammad Fachrendy Noval Attalla dan Abduh Sayid Albana (2024)	Penjadwalan Preventive Maintenance Pada Mesin Coding Printer (Studi Kasus PT. XYZ)	Metode Empiris dan Failure Distribution	Variabel jam kerja mesin saat beroperasi sangat berpengaruh terhadap reliability mesin. Penjadwalan perawatan mesin yang optimal untuk mesin Bag coding UXD-150 telah diperoleh. Hasil penjadwalan ini dapat menjadi usulan untuk penjadwalan preventive mesin Bag coding pada PT. XYZ. Penjadwalan ini merupakan rekomendasi proses penjadwalan untuk 6 bulan kedepan.	Mesin Bag-Coding
3.	Ismail dan Ayik	Manajemen Perawatan Panel	RCM, FMEA, LTA	Hasil pengecekan menunjukkan penurunan nilai RPN dari 540 menjadi 126.	Panel <i>Distribution Control</i>

No	Peneliti	Judul	Metode	Hasil	Objek
	Pusakaning wati (2023)	Distribution Control Dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) di PT. Tung Cia Teknologi Indonesia		Penurunan ini mengindikasikan bahwa tindakan perbaikan dan penggantian komponen telah berhasil mengurangi risiko kegagalan secara signifikan. Dengan nilai RPN yang lebih rendah, perawatan panel <i>Distribution Control</i> dapat difokuskan pada pemeliharaan preventif yang terjadwal dan pengawasan yang lebih intensif pada komponen yang masih memiliki tingkat risiko yang lebih tinggi.	
4.	I Wayan Sukadana, Putu Edy Dahliawan, I Made Asna, dan I Wayan Utama (2024)	<i>Optimization of Maintenance Budget Using Condition Base Maintenance (CBM) Method based on Asset Management Principles</i>	<i>Condition Base Maintenance (CBM)</i>	Dari hasil analisis Optimasi Anggaran Pemeliharaan Menggunakan Metode Condition Base Maintenance Berbasis Asset Management Rules dapat disimpulkan sebagai berikut: Penerapan metode pemeliharaan Health Index di lingkungan kerja PT PLN (Persero) Hasil optimalisasi penggunaan metode pemeliharaan Indeks Kesehatan menghasilkan penurunan penggunaan anggaran sebesar 7% (dari 10,1 juta menjadi 9,4 juta) dan penurunan volume inspeksi sebesar 0,75%/63,27 km (dari 5.248,14 menjadi 5.184,87 km).	PLN
5.	Fauzan Muhammad, Faizah Suryani, Tolu Tamalika, R.A. Nurul	<i>Aplikasi Failure Mode and Effect Analysis dan Reliability Centered Maintenance Pada</i>	<i>Failure Mode and Effect Analysis dan Reliability</i>	Komponen yang diprioritaskan dalam tindakan perbaikan sistem bahan bakar berdasarkan nilai RPN tertinggi adalah pompa distribusi dan penyaring bahan bakar. <i>Reliability</i>	Sistem bahan bakar kendaraan

No	Peneliti	Judul	Metode	Hasil	Objek
	Moulita, dan Deri Maryadi	<i>Preventive Maintenance Kendaraan</i>	<i>y Centered Maintenance</i>	<i>Centered Maintenance</i> (RCM) dapat digunakan untuk mengetahui apa saja yang harus dilakukan tindakan perawatan pencegahan secara berkala terhadap komponen kritis sistem bahan bakar mobil. Tindakan perawatan yang tepat terhadap komponen kritis sistem bahan bakar mobil adalah dengan melakukan tindakan pencegahan kerusakan melalui identifikasi sistem bahan bakar dan langsung melakukan perbaikan atau penggantian komponen jika ditemukan sebuah kerusakan.	
6.	Thomas Puri Krishananto dan Iwa Garniwa (2025)	Optimasi Pemeliharaan Jaringan Distribusi Dengan Metode Identifikasi Kondisi Jaringan, Penyulang dan Prioritas Penyulang Pada PT PLN (Persero) Wilayah Nusa Tenggara Timur Unit Layanan Pelanggan Kefamefanu	<i>Multi-criteria decision making</i> (MCDM), <i>Best-Worst Method</i> (BWM), dan <i>Mixed Linear Integer Programming</i> (MILP)	Hasil optimasi metode MILP pada metode BWM-TOPSIS dalam jaringan distribusi di PT PLN Wilayah Nusa Tenggara Timur Unit Layanan Pelanggan Kefamenanu mendapatkan nilai evaluasi RMSE 2.614, MAE 2.167 dan R2 Score 0.975 serta berhasil mendapatkan perankingan mode kegagalan. Sedangkan, hasil prioritas ranking pertama terdapat pada REC MANUFUI dengan skor TOPSIS 0.896115. Hasil perankingan metode TOPSIS ini dapat digunakan pihak terkait dalam melakukan penjadwalan pemeliharaan jaringan distribusi daya.	Tenaga Listrik
7.	Nurweni Putri, Maya Sari Syahrul,	<i>Integer Linear Programming</i> Dalam	<i>Integer Linear Program</i>	Berdasarkan perhitungan menggunakan metode Branch and Bound dan	Produk Sendal

No	Peneliti	Judul	Metode	Hasil	Objek
	dan Rosi Ramayanti	Masalah Optimasi Keuntungan Produksi Menggunakan Metode <i>Branch And Bound & Gomory Cutting Plane</i>	<i>ming, Branch and Bound, dan Gomory Cutting Plane</i>	Gumory Cutting Plane, kedua metode menghasilkan keuntungan optimal penjualan dari UMKM Capal Classic Shoes Kab. Agam yang sama yaitu sebesar Rp. 664.000. Jika produksi ditingkatkan untuk sandal laki-laki sebanyak 15 pcs, dan sandal perempuan sebanyak 13 pcs, lebih banyak dari produksi sebelumnya sehingga terjadi peningkatan keuntungan dari keuntungan awal sebesar Rp. 60.000 mencapai keuntungan optimal sebesar Rp.664.000. Akibatnya didapat selisih keuntungan dari sebelumnya dan setelah dilakukan optimasi menjadi Rp. 596.000. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penjualan yang telah didapatkan oleh UMKM Capal Classic Shoes Kab. Agam saat ini sudah mendekati keuntungan optimal.	

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT PLN (Persero) UP3 Pinrang yang berlokasi di Jl. Jend. Sukawati No.24, Macorawalie, Kec. Watang Sawitto, Kabupaten Pinrang, Sulawesi Selatan. Fokus penelitian ini adalah mengidentifikasi dan menganalisis risiko yang terjadi dalam aktivitas rantai pasok pada penyediaan tenaga listrik kepada pelanggan PLN UP3 Pinrang serta memberikan usulan tindakan mitigasi risiko untuk penyebab risiko prioritas yang ada demi mencapai tujuan kinerja rantai pasok yang lebih baik. Pengambilan data penelitian ini dilakukan pada bulan Juli dan Agustus 2025.

2.2 Sumber Data

Sumber-sumber data yang digunakan pada penelitian ini adalah:

a. Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh secara langsung dari sumbernya. Data primer pada penelitian ini dikumpulkan langsung dari objek penelitian yaitu data yang diperoleh dari responden melalui hasil wawancara, kuesioner, dan *brainstorming* yang diajukan oleh peneliti. Adapun data primer yang digunakan dalam penelitian ini ialah aset-aset distribusi, jadwal pemeliharaan, dan sumber daya dari PLN UP3 Pinrang.

b. Data Sekunder

Data sekunder adalah berbagai informasi yang sudah ada sebelumnya dan sengaja dikumpulkan oleh peneliti sebagai pelengkap kebutuhan data penelitian. Contohnya seperti literatur, buku, dan lainnya. Data sekunder memiliki manfaat untuk mendukung keperluan data primer dan memperoleh informasi lain.

2.3 Metode Pengumpulan Data

Metode yang dapat dilakukan dalam pengumpulan data adalah:

a. Studi Pustaka

Studi pustaka merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan informasi berupa landasan teoritis dalam menganalisis data sebagai perbandingan dalam penulisan tugas akhir ini. Informasi bisa didapatkan dengan mencari melalui internet, buku serta penelitian terdahulu yang dilakukan dengan cara mengutip teori atau butir pemikiran pada penelitian sebelumnya untuk mendukung penelitian ini.

b. Observasi

Observasi merupakan suatu metode pengambilan data dengan melakukan pengamatan terhadap objek penelitian secara langsung. Observasi yang dilakukan adalah pengamatan langsung ke lokasi penelitian. Observasi ini dilakukan untuk melakukan pemantauan pemeliharaan (*maintenance*) yang terjadi di lokasi penelitian.

c. Wawancara

Wawancara merupakan kegiatan untuk mendapatkan informasi dari narasumber dalam bentuk pertanyaan yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan. Wawancara dilakukan dengan melalui diskusi tanya jawab secara langsung dengan

expert yang berkaitan dengan aktivitas *maintenance* komponen distribusi listrik di PT PLN (Persero) UP3 Pinrang.

d. Kuesioner

Kuesioner adalah instrumen penelitian yang terdiri dari serangkaian pertanyaan (atau jenis permintaan lainnya) untuk tujuan mengumpulkan informasi dari responden. Penyebaran kuesioner dilakukan untuk memperoleh kebutuhan data mengenai metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) meliputi *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Logic Tree Analysis* (LTA), dan *Task Selection*.

2.4 Metode Analisis Data

2.4.1 *Reliability Centered Maintenance* (RCM)

a) Identifikasi aset-aset distribusi

b) Analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

FMEA digunakan untuk mengetahui resiko yang mungkin terjadi pada proses *maintenance*. Tiga parameter FMEA yang digunakan adalah frekuensi (*occurrence*), tingkat kerusakan (*severity*), dan tingkat deteksi (*detection*). Tahapan yang dilakukan meliputi :

1. Analisa tingkat frekuensi (*occurrence*)

Frekuensi menunjukkan jumlah kerusakan yang terjadi pada komponen sistem bahan bakar sebagai hasil dari potensi resiko yang diukur dengan skala 1-10.

2. Analisa tingkat keparahan (*severity*)

Tingkat keparahan menunjukkan seberapa besar efek yang ditimbulkan oleh suatu kerusakan. Nilai *severity* ditentukan oleh tingkat keseriusan suatu kerusakan fungsi pada komponen sistem bahan bakar kendaraan. Tingkat keseriusan diukur dengan skala 1-10.

3. Analisa tingkat deteksi (*detection*)

Seberapa cepat kerusakan sistem bahan bakar dapat dideteksi dengan menentukan tingkat deteksi. Tingkat deteksi kerusakan proses yang tinggi memungkinkan perusahaan untuk mendeteksi kerusakan dengan cepat karena ada banyak kontrol dan prosedur yang mengatur sistem perawatan kendaraan.

Risk Priority Number (RPN) harus ditetapkan untuk menentukan tingkat prioritas suatu kerusakan. Nilai RPN akan menghasilkan urutan prioritas proses perawatan. Semakin tinggi RPN akan menunjukkan bahwa ada masalah kerusakan yang serius. Di bawah ini adalah rumus yang digunakan untuk mendapatkan RPN :

$$RPN = S \times O \times D \quad (27)$$

Keterangan :

S = frekuensi

O = tingkat kerusakan

D = tingkat deteksi

c) *Logic Tree Analysis* (LTA)

Membuat analisis *Logic Tree Analysis* (LTA) tujuan dari LTA adalah untuk mengkategorikan mode kegagalan sehingga aktivitas pemeliharaan dapat dipilih yang sesuai dan efisien. Analisis kekritisitas ada empat kategori sebagai berikut :

- 1) *Evident*, yaitu apakah operator mengetahui dalam kondisi normal, telah terjadi gangguan dalam sistem?

- 2) *Safety*, yaitu apakah mode kerusakan ini menyebabkan masalah keselamatan?
- 3) *Outage*, yaitu apakah mode kerusakan ini mengakibatkan seluruh atau sebagian mesin terhenti?
- 4) *Category*, yaitu pengkategorian yang diperoleh setelah menjawab pertanyaan-pertanyaan yang diajukan. Pada bagian ini komponen terbagi kedalam 4 kategori, yaitu :
 - a) Kategori A (*Safety Problem*)
 - b) Kategori B (*Outage Problem*)
 - c) Kategori C (*Economic Problem*)
 - d) Kategori D (*Hidden Failure*)
- d) Menganalisa *task selection* untuk melakukan pemilihan tindakan terhadap analisis sebelumnya. Daftar tindakan yang dapat dilakukan sebagai berikut :
 - 1) *Time Direct* (TD) adalah tindakan yang ditujukan untuk menghindari langsung sumber kerusakan peralatan berdasarkan waktu komponen
 - 2) *Conditional Instructions* (CD) adalah tindakan untuk mendeteksi kerusakan dengan memeriksa alat.
 - 3) *Failure Finding* (FF) adalah tindakan untuk menemukan malfungsi perangkat tersembunyi melalui inspeksi rutin.
 - 4) *Run to Failure* (RTF) adalah tindakan untuk digunakan sampai peralatan rusak karena tidak ada tindakan finansial yang diambil untuk mencegah kerusakan.
- e) Metode Empiris
 Metode empiris (*empirical method*) disebut juga *nonparametric methods* atau *distribution-free method*. Metode ini bertujuan untuk memperoleh nilai langsung dari *failure times*, *failure distribution*, *reliability function*, dan *hazard rate function*. Rumus persamaan keandalan dan *failure rate* terdapat pada persamaan dibawah ini :

$$R(t_i) = \frac{n + 1 - i}{n + 1} \quad (28)$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{(t_{i+1} - t_i)(n + 1 - i)} \quad (29)$$

$R(t_i)$ = Reliability pada TTF ke i ,
 n = Jumlah kerusakan
 $\lambda(t)$ = Failure rate pada TTF ke i ,
 t_i = Nilai TTF ke i .
- f) Menghitung tingkat keandalan (*reliability*) berdasarkan pada kemampuan perawatan (*maintainability*) dengan menggunakan perhitungan *Time to Failure* (TTF), *Time to Repair* (TTR), dan *Mean Time to Failure* (MTTF)
 - 1) *Time to Repair* (TTR) adalah lamanya waktu perbaikan hingga mesin dapat berfungsi kembali.
 - 2) *Time to Failure* (TTF) adalah interval waktu antar kerusakan yang dihitung dari selisih waktu saat komponen/mesin yang telah selesai diperbaiki dengan waktu kerusakan komponen berikutnya.
 - 3) *Mean Time to Failure* (MTTF) adalah jumlah rata-rata waktu sebuah mesin atau peralatan mengalami kerusakan.

2.4.2 Integer Linear Programming (ILP)

Integer Linear Programming (ILP) merupakan suatu *linear programming* dengan variabel keputusannya berupa bilangan bulat (*integer*), sehingga pada bentuk umum *linear programming* terdapat tambahan syarat bahwa variabel keputusannya harus bilangan bulat. Bentuk umum dari *Integer Linear Programming* adalah :

$$\text{Maks/Min } Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (30)$$

Kendala

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j (\leq / = / \geq) b_i, \text{ untuk } i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (31)$$

$$X_j \geq 0, \text{ untuk } j = 1, 2, 3, \dots, n$$

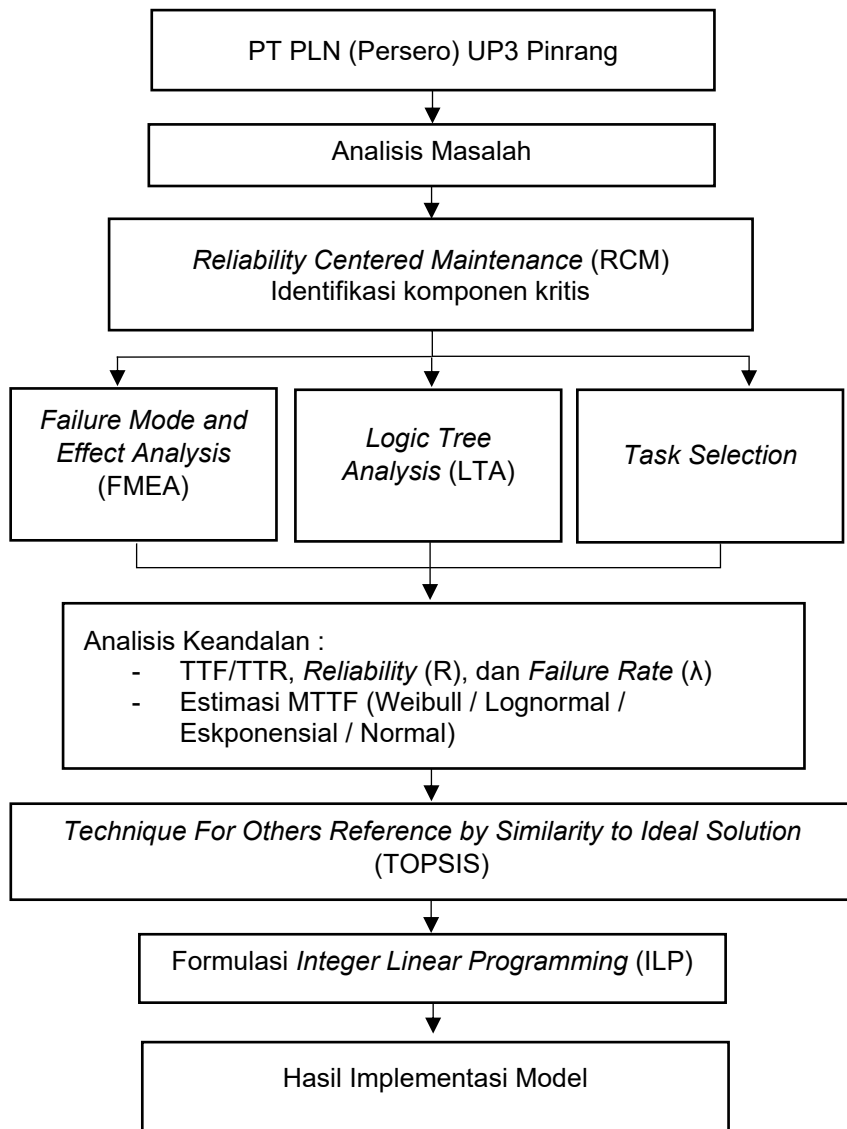
X_j bernilai *integer* untuk semua j

Langkah - langkah membuat optimasi penjadwalan menggunakan *Integer Linear Programming* :

- a) Definisi masalah
- b) Variabel Keputusan
- c) Fungsi Objektif
- d) Kendala (*Constraints*)

2.5 Kerangka Pikir

Kerangka pemikiran menjelaskan hubungan antara variabel dan memudahkan penulis untuk menyelesaikan karya tulis dengan lebih terarah dan mudah diselesaikan. Adapun kerangka berpikir pada penelitian ini ialah sebagai berikut:



Gambar 4. Kerangka Pikir Penelitian

Berikut merupakan penjelasan kerangka pikir penelitian pada gambar 1:

PT PLN (Persero) UP3 Pinrang merupakan sebuah badan usaha milik negara yang bergerak di bidang ketenagalistrikan yang mulai beroperasi sejak tahun 1945. Pada perusahaan ini akan dilakukan analisis pemeliharaan (*maintenance*) untuk menentukan strategi pemeliharaan dan optimasi penjadwalan agar tercapainya strategi pemeliharaan yang efisien. Penelitian ini disusun untuk menghasilkan penjadwalan *preventive maintenance* (PM) yang secara sistematis meminimalkan total biaya pemeliharaan dan biaya *downtime* pada aset distribusi listrik, dengan tetap menjaga kontinuitas layanan beban per penyulang. Kerangka pikir memetakan alur logika dari hulu ke hilir penelitian. Pertama, penelitian dimulai dengan mengambil data lapangan yang representatif. Data kemudian dihimpun melalui observasi, wawancara, dan kuesioner pada unit operasi distribusi yang menjadi studi kasus. Kedua, setelah dilakukan tahapan pengumpulan data selanjutnya data diolah menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) sebagai kerangka pemilihan tugas perawatan yang berbasis risiko dan fungsi. Melalui metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), mode kegagalan diidentifikasi dan dinilai menggunakan bobot keparahan, peluang kejadian, dan kemampuan deteksi untuk memperoleh *Risk Priority Number* (RPN). Hasil FMEA kemudian disaring melalui *Logic Tree Analysis* (LTA) untuk menilai konsekuensi terhadap keselamatan, regulasi, dan kontinuitas layanan. Kombinasi FMEA–LTA memastikan bahwa keputusan perawatan tidak sekadar mengikuti frekuensi kegagalan historis, tetapi juga mempertimbangkan dampaknya terhadap misi layanan. Dari sini, *task selection* dirumuskan apakah *time-directed* (TD), *condition-directed* (CD), *failure-finding* (FF), atau *run-to-failure* (RTF) per komponen dan per konteks operasi.

Selanjutnya, dilakukan analisis keandalan guna mengaitkan kebijakan perawatan dengan perilaku kegagalan aktual. Parameter-parameter seperti *time to failure* (TTF), *time to repair* (TTR), fungsi keandalan $R(t)$, serta laju kegagalan $\lambda(t)$ diestimasi dari data historis. Distribusi statistik yang sesuai seperti Distribusi Weibull, Lognormal, atau Normal dipilih melalui *goodness-of-fit* sehingga *mean time to failure* (MTTF) dan/atau kuantil relevan dapat digunakan sebagai rujukan teknis untuk penentuan interval PM. Dengan demikian, interval perawatan tidak ditetapkan secara begitu saja, melainkan ditopang oleh evidensi probabilistik mengenai risiko kegagalan seiring waktu.

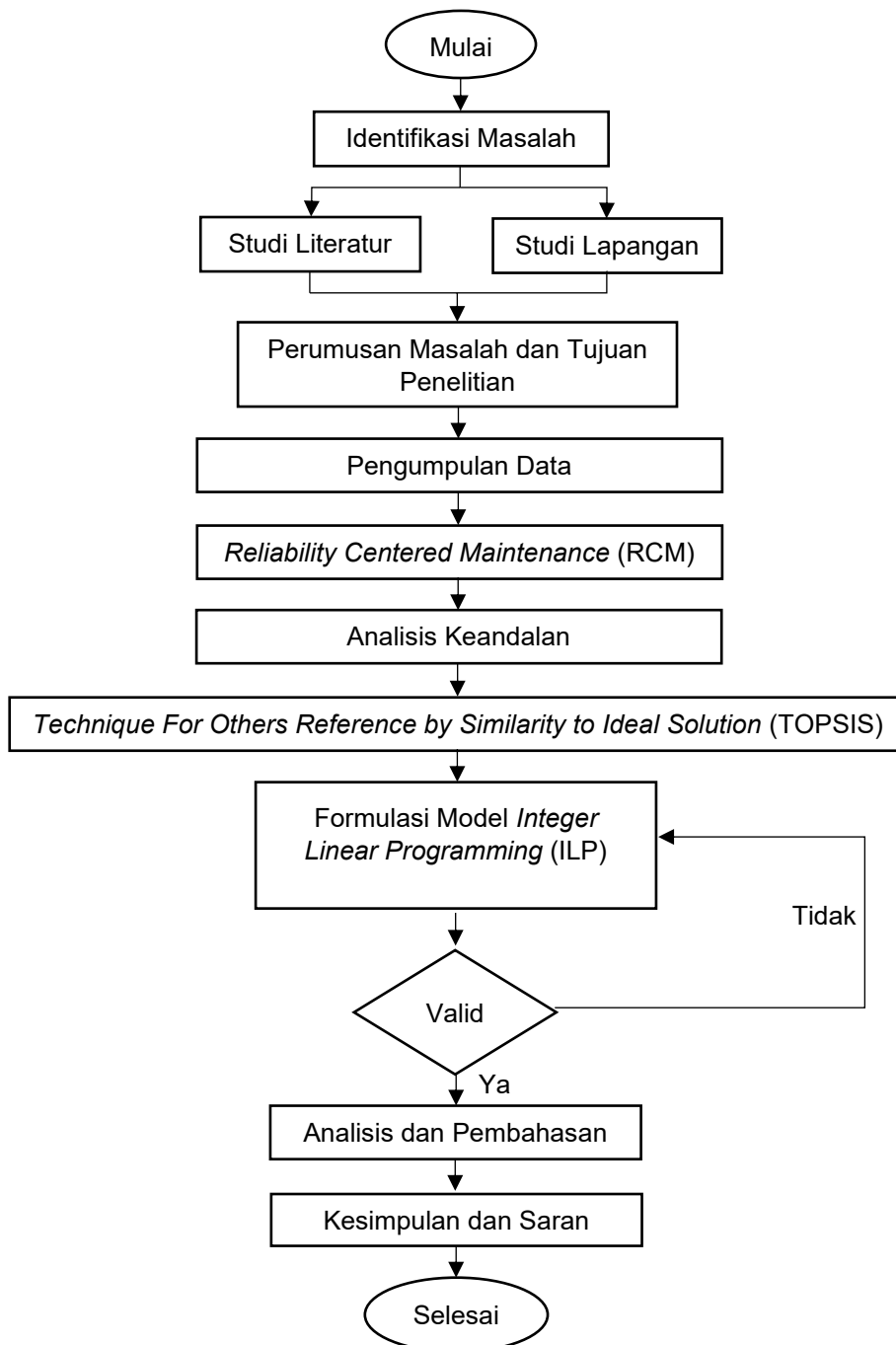
Selanjutnya, untuk memilih penyulang yang akan dijadikan bahan pengujian dan dioptimasi akan diseleksi (pemeringkatan prioritas) menggunakan metode *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). Variabel penilaian mencakup aspek teknis (gangguan, temuan, dan kondisi aset), operasional (beban padam), serta layanan (proporsi pelanggan prioritas). TOPSIS menghasilkan nilai solusi ideal positif dan solusi ideal negatif dari setiap penyulang yang akan diuji dan kemudian dilakukan pemeringkatan. Hasil pemeringkatan ini menjadi jembatan antara analisis risiko-keandalan dan tahap optimasi.

Selanjutnya, dilakukan analisis biaya preventive maintenance dengan memperhitungkan biaya *maintenance* dan biaya *downtime* masing-masing komponen Biaya PM biasanya sebanding dengan jenis tugas, durasi, dan kapasitas daya yang terdampak selama pekerjaan, sedangkan biaya *downtime* diturunkan dari energi tak tersalurkan dan dampak layanan. Penyusunan model biaya yang transparan memungkinkan fungsi tujuan optimasi menangkap pertukaran yang realistis yaitu PM yang terlalu sering

menaikkan biaya perawatan; PM yang terlalu jarang meningkatkan risiko *downtime* yang lebih mahal. seluruh komponen sebelumnya diintegrasikan dalam model optimasi penjadwalan yang dirumuskan sebagai *integer/linear programming* (ILP). Fungsi tujuan meminimalkan total biaya (PM + *downtime*). Kendala disusun untuk mencerminkan realitas operasi: (a) kapasitas kru dan jendela kerja per periode; (b) relasi antara aktivitas PM dan *outage* terencana (durasi aset *down*); (c) interval PM yang diturunkan dari MTTF dan kebijakan RCM; serta (d) pemenuhan layanan beban per penyulang, termasuk batas transfer beban jika tersedia konfigurasi *backfeeding*. Formulasi ini membuat proses penjadwalan bukan sekadar daftar pekerjaan, tetapi solusi optimal yang mempertimbangkan batasan teknis dan layanan.

2.6 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini merupakan tahapan penelitian yang dibuat dalam bentuk diagram alir:



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan penjelasan dari alur penelitian pada gambar 2:

a. Identifikasi masalah

Pada tahap awal penelitian dimulai dengan identifikasi masalah pada aktivitas pemeliharaan aset jaringan distribusi listrik untuk mengetahui masalah yang terjadi pada PLN UP3 Pinrang. Proses pengidentifikasian masalah dilakukan dengan observasi ke lokasi penelitian yang selanjutnya memberikan solusi yang tepat untuk mengatasi masalah tersebut.

b. Studi literatur dan studi lapangan

Pada tahap ini dilakukan pencarian referensi sebagai acuan dalam penyusunan laporan yang memuat informasi-informasi yang dibutuhkan dalam penelitian. Adapun referensi yang digunakan berupa buku, jurnal, penelitian tugas akhir, dan referensi-referensi lainnya. Sedangkan studi lapangan dilakukan dengan mendatangi lokasi penelitian untuk mendapatkan informasi secara langsung.

c. Perumusan masalah dan tujuan penelitian

Perumusan masalah dan tujuan penelitian dilakukan untuk mengetahui arah penelitian dan garis besar keseluruhan aktivitas penelitian yang akan dilakukan. Keduanya berfungsi sebagai panduan fundamental untuk seluruh proses penelitian, mulai dari merancang metode hingga menarik kesimpulan.

d. Pengumpulan data

Data dikumpulkan melalui observasi, wawancara, dan telaah catatan operasi. Variabel yang dihimpun mencakup: riwayat gangguan/TTF–TTR, karakteristik aset (jenis, usia, lingkungan), beban padam, klasifikasi pelanggan, serta biaya langsung (tenaga kerja, material) dan biaya implisit *downtime*. Kualitas data dijaga lewat pemeriksaan konsistensi, penanganan data hilang, dan pencatatan asumsi.

e. Reliability Centered Maintenance (RCM)

Reliability Centered Maintenance (RCM) digunakan untuk menentukan tugas pemeliharaan yang tepat sasaran dan berbasis risiko. Alurnya adalah Analisis FMEA mengidentifikasi *failure mode*, penyebab, dan dampaknya; menilai *Severity–Occurrence–Detection* untuk memperoleh RPN. Logic Tree Analysis (LTA) mengklasifikasikan konsekuensi (keselamatan, regulasi, kontinuitas layanan) guna memprioritaskan fungsi kritis. Task Selection menetapkan jenis tindakan: *time-directed* (TD), *condition-directed* (CD), *failure-finding* (FF), atau *run-to-failure* (RTF).

f. Analisis keandalan

Tahap ini menautkan kebijakan PM dengan perilaku kegagalan aset. Langkahnya: menyusun data TTF/TTR, memilih model statistik (Weibull/Lognormal/Normal) melalui *goodness-of-fit*, lalu menurunkan $R(t)$, $\lambda(t)$, MTTF/MTBF atau kuantil waktu kegagalan. Interval PM ditetapkan agar probabilitas kegagalan sebelum perawatan berada di tingkat yang dapat diterima, sekaligus mempertimbangkan durasi perawatan dan dampak layanan.

g. *Technique For Others Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS)

TOPSIS memeringkat penyulang/segmen berdasarkan kedekatannya ke solusi ideal. Prosedurnya adalah Menyusun matriks keputusan dari kriteria (mis. riwayat gangguan/temuan, beban padam, proporsi pelanggan prioritas, kondisi lingkungan). Normalisasi dan pembobotan kriteria sesuai kepentingan operasional. Menentukan solusi ideal-positif dan ideal-negatif. Menghitung jarak setiap alternatif ke kedua solusi dan *closeness coefficient* (C_i). Mengurutkan prioritas, nilai C_i terbesar memperoleh prioritas tertinggi untuk dioptimasi pada model ILP.

h. Formulasi model *Integer Linear Programming* (ILP)

Model *Integer Linear Programming* (ILP) mengintegrasikan hasil *Reliability Centered Maintenance* (RCM), keandalan, dan TOPSIS menjadi penjadwalan operasional. Komponen pokok dari model ini adalah variabel keputusan, fungsi tujuan, dan fungsi kendala.

i. Analisis dan pembahasan

Dalam tahapan analisis dilakukan proses mengolah, menyederhanakan, dan menyajikan data secara sistematis untuk mencari pola dan temuan awal, sedangkan pembahasan adalah interpretasi mendalam terhadap temuan tersebut untuk menjelaskan makna, menghubungkannya dengan pertanyaan penelitian, serta membandingkannya dengan teori yang ada.

j. Kesimpulan dan saran

Tahapan ini merupakan penarikan kesimpulan berdasarkan tujuan penelitian yang telah ditetapkan pada tahap awal. Selain kesimpulan, peneliti juga memberikan saran kepada pihak perusahaan untuk memberikan rekomendasi hasil optimasi penjadwalan pemeliharaan aset distribusi jaringan listrik.