

# ANALISIS TEKNO-EKONOMI PENGGUNAAN FUSE RAIL SIZE 2 PADA PHB-TR SEBAGAI UPAYA MENURUNKAN RUGI-RUGI ENERGI DISTRIBUSI

Puput Tri Wijayanto, Dhany Harmeidya Barus dan Ade Gumilar

Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN Jakarta  
Graha YPK PLN, Jl. Lebak Bulus Tengah, Cilandak, Jakarta Selatan, DKI Jakarta 12430, Indonesia

E-mail: [puput2310572@itpln.ac.id](mailto:puput2310572@itpln.ac.id), [dhany@itpln.ac.id](mailto:dhany@itpln.ac.id), [ade2310523@itpln.ac.id](mailto:ade2310523@itpln.ac.id)

## Abstrak

Upaya yang telah dilakukan untuk menurunkan rugi-rugi teknis energi distribusi adalah rekonduktoring, rekonfigurasi jaringan dan penggunaan transformator dengan inti *amorphous*. Selain mengoptimalkan upaya tersebut, penggunaan *fuse rail size 2* pada PHB-TR dirasa akan menjadi solusi alternatif. Analisis tekno-ekonomi dilakukan untuk membuktikan penggunaan *fuse rail size 2* layak diaplikasikan dibanding tetap menggunakan *fuse rail size 1*. Analisis teknis dilakukan dengan melakukan pengujian tahanan kontak, disipasi daya dan kenaikan suhu. Sedangkan analisis ekonomi dilakukan dengan menghitung kapitalisasi biaya menggunakan metode *total cost of ownership* dan perhitungan parameter kelayakan investasi NPV, IRR, DPBP serta B/C. Dari penelitian yang dilakukan, didapatkan hasil bahwa penggunaan *fuse rail size 2* akan menurunkan nilai tahanan kontak, disipasi daya dan kenaikan suhu. Dalam satu tahun, terjadi potensi penurunan nilai rugi-rugi energi sebesar 4.024,5 MWh, emisi karbon sebesar 3.223,6 ton CO<sub>2e</sub> dan biaya produksi energi listrik sebesar Rp6.435.104.913. Sedangkan dari hasil analisis ekonomi diketahui bahwa penggunaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2* layak diaplikasikan ketika beban tinggi. Ketika dibebani 100% perpotongan nilai TCO terjadi pada tahun ke-6, NPV bernilai Rp42.728.157.459, IRR 21%, DPBP 5,93 tahun dan B/C 2,24. Namun ketika beban PHB-TR sebesar 60% atau kurang, secara ekonomi penggunaan *fuse rail size 2* pada PHB-TR tidak layak dilakukan.

*Kata kunci: Fuse rail, PHB-TR, rugi-rugi energi distribusi, total cost of ownership, kelayakan investasi*

## Abstract

*The efforts to reduce technical losses of distribution energy are reductoring, network reconfiguration and amorphous transformer usage. Fuse rail size 2 usage in PHB-TR may be an alternative solution. Techno-economic analysis was conducted to prove fuse rail size 2 usage is feasible compared to size 1. Technical analysis is carried out by testing contact resistance, power dissipation and temperature rise. Economic analysis is carried out by calculating cost capitalization using the total cost of ownership method and calculating investment feasibility parameters (NPV, IRR, DPBP and B/C). From the research conducted, fuse rail size 2 usage will reduce contact resistance, power dissipation and temperature rise. In one year, there is a potential decrease in the value of 4,024.5 MWh energy losses, 3,223.6 tons CO<sub>2e</sub> of carbon emissions and Rp6,435,104,913 electrical energy production costs. The results of the economic analysis show that PHB-TR with fuse rail size 2 is feasible when the load is high. When the load is 100% the intersection of the TCO value occurs in the 6<sup>th</sup> year, NPV is Rp42,728,157,459, IRR 21%, DPBP 5.93 years and B/C 2.24. However, when the PHB-TR load is 60% or less, fuse rail size 2 usage in PHB-TR is not feasible.*

*Keywords: Fuse rail, low voltage switchgear, distribution energy losses, total cost of ownership, investment feasibility*

## 1. Pendahuluan

Salah satu tujuan yang tertuang dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN tahun 2021-2030 adalah menurunkan nilai rugi-rugi jaringan baik transmisi ataupun distribusi [1]. Nilai rugi-rugi energi distribusi lebih besar dibandingkan dengan rugi-rugi energi transmisi yakni sebesar 20.569,14 GWh dibandingkan dengan 6.284,73 GWh [2]. Rugi-rugi energi dapat berupa rugi-rugi teknis dan juga rugi-rugi non-teknis [3]. Rugi-

rugi teknis ditimbulkan oleh beberapa faktor, yakni jenis material penghantar, luas penampang penghantar, konfigurasi beban, serta jenis dan kondisi peralatan yang digunakan. Sedangkan rugi-rugi non teknis ditimbulkan oleh pencurian listrik, kesalahan pembacaan meter dan kesalahan alat pengukuran [4]. Berbagai upaya telah dilakukan untuk menekan nilai rugi-rugi teknis yakni dengan cara uprating konduktor [5], rekonfigurasi jaringan atau penyeimbangan beban [6] dan juga penggunaan transformator distribusi dengan inti *amorphous* [7]. Untuk rugi-rugi non-teknis upaya yang telah dilakukan adalah

program penertiban pemakaian tenaga listrik (P2TL) [8] serta penggunaan *automatic meter reading* (AMR) [9] dan *advance metering infrastructure* (AMI) [10].

Selain mengoptimalkan upaya-upaya yang telah ada, diperlukan upaya lain yang belum menjadi program atau bahkan belum ada penelitian yang mengkaji akan upaya tersebut. Dalam hal ini penulis ingin melakukan penelitian terkait upaya lain yang dapat digunakan untuk menurunkan rugi-rugi energi distribusi yakni pengoptimalan desain Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR). PHB-TR adalah salah satu peralatan sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan-bagikan daya keluaran trafo distribusi [11][12]. Terdapat komponen PHB-TR yang dapat menjadi sumber rugi-rugi energi seperti busbar, *fuse rail* dan NH *fuse link* serta sambungan antar setiap komponen. Spesifikasi PHB-TR yang digunakan dalam sistem kelistrikan yang dikelola oleh PLN diatur dalam standar PLN SPLN D3.016-1 : 2018 untuk PHB-TR pasangan luar dan SPLN D3.016-2 : 2018. Sebagian besar tipe PHB-TR menggunakan *fuse rail size* 1, hanya PHB TR tipe pasangan luar 400 A dengan 2 jurusan, pasangan luar dan dalam 1000 A dengan 5 jurusan dan pasangan dalam 1600 A dengan 8 jurusan yang menggunakan *fuse rail size* 2. Penulis mengambil fokus penelitian terkait pengaruh penggunaan *fuse rail size* 2 pada PHB-TR terhadap penurunan nilai rugi-rugi energi listrik.

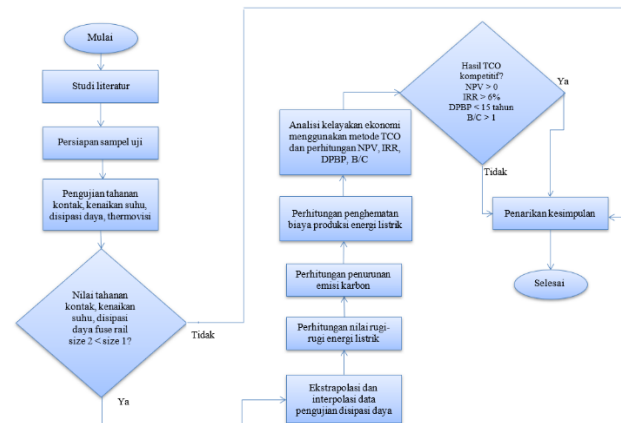
*Fuse rail size* 2 mempunyai arus pengenal 400 A dengan luas penampang penghantar  $5 \times 30 \text{ mm}^2$  sedangkan *fuse rail size* 1 mempunyai arus pengenal 250 A dengan luas penampang penghantar  $3 \times 30 \text{ mm}^2$ . Dengan demikian secara teori nilai tahanan dari *fuse rail size* 2 akan lebih kecil dan tentunya nilai rugi-rugi daya juga akan menurun. Untuk membuktikan hal tersebut maka dapat dilakukan pengujian tahanan kontak dan disipasi daya. Akan dilakukan pula pengujian kenaikan suhu dan thermovisi untuk melihat pengaruh nilai tahanan terhadap nilai temperatur yang dihasilkan. Semakin banyak jumlah PHB-TR yang menggunakan *fuse rail size* 2 diharapkan akan membuat penurunan rugi-rugi energi listrik semakin banyak pula. Hal tersebut akan mengurangi biaya produksi energi listrik dan jumlah emisi karbon dari jumlah energi listrik yang dihemat.

Di PLN, pengadaan PHB-TR baru tiap tahunnya cukup banyak, seperti di tahun 2025 terdapat kontrak pengadaan 19.987 unit dengan 6 varian tipe PHB-TR yang disuplai oleh 16 pabrikan. Dari 6 varian tipe PHB-TR tersebut, hanya ada 1 tipe yang menggunakan *fuse rail size* 2 yakni tipe pasangan luar 400 A 2 jurusan (PL-400-2-LBS) sebanyak 4.150 unit. Penggunaan *fuse rail size* 2 untuk semua varian tipe PHB-TR tentunya tidak dapat serta merta langsung diaplikasikan karena perlu juga dikaji terkait aspek ekonominya. Harga *fuse rail size* 2 tentunya lebih mahal dibandingkan *fuse rail size* 1. NH *fuse-link* yang digunakan pada *fuse rail* juga harus *size* 2, sehingga ada penambahan biaya lain dari penggunaan NH *fuse-link size*

2 tersebut. Analisis kelayakan ekonomi akan dilakukan menggunakan perhitungan kapitalisasi biaya dengan metode *total cost of ownership* (TCO) dan perhitungan parameter kelayakan investasi *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Discounted Payback Period* (DPBP) dan *Benefit Cost Ratio* (B/C).

## 2. Metode

### 2.1. Tahapan Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian analisis tekno-ekonomi penggunaan *fuse rail size* 2 pada PHB-TR sebagai upaya mengurangi rugi-rugi energi distribusi diilustrasikan melalui diagram alir pada Gambar 1. Sampel uji didapatkan dari pabrikan PT Symphos Electric untuk PHB-TR dan PT Elektrindo Sarana Abadi untuk NH *fuse link*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan dan Arus Tinggi PLN Pusat Sertifikasi dengan mata uji pengukuran tahanan kontak, kenaikan suhu, disipasi daya dan thermovisi. Dari hasil pengujian yang didapatkan, kemudian dilakukan perbandingan hasil dari PHB-TR dengan *fuse rail size* 2 dan *fuse rail size* 1.

Untuk hasil pengujian disipasi daya kemudian dilakukan ekstrapolasi dan interpolasi data untuk tipe PHB-TR yang mempunyai kapasitas jurusan yang berbeda. Perhitungan tersebut kemudian digunakan untuk menghitung nilai rugi-rugi energi listrik yang dihasilkan dalam durasi satu tahun. Kemudian dilakukan perhitungan penurunan rugi-rugi energi listrik ketika digunakan *fuse rail size* 2. Dari nilai penurunan rugi-rugi energi tersebut dapat dihitung pula potensi penurunan emisi karbon dan penghematan biaya pokok produksi energi listrik.

Tahapan berikutnya adalah melakukan analisis kelayakan ekonomi menggunakan metode *total cost of ownership* (TCO) dengan membandingkan nilai TCO PHB-TR dengan *fuse rail size* 2 dan *size* 1. Kajian ini memerlukan biaya investasi dan nilai rugi-rugi daya. Selain itu analisis kelayakan ekonomi juga dilakukan dengan melakukan perhitungan NPV, IRR, DPBP dan B/C. Tahapan terakhir

adalah penarikan kesimpulan apakah penggunaan *fuse rail size 2* pada PHB-TR ini layak diaplikasikan secara teknis maupun secara ekonomi.

## 2.2. PHB-TR

PHB-TR adalah perangkat hubung bagi yang digunakan untuk menghubungkan-bagi daya listrik tegangan rendah keluaran dari transformator distribusi. Di Indonesia, trafo distribusi yang digunakan adalah 20 kV/400 V, sehingga tegangan pengenal PHB-TR adalah 400 V. Adapun besaran arus pengenal PHB-TR menyesuaikan nilai kapasitas daya dari trafo distribusi. PHB-TR berdasarkan pemasangannya dibagi menjadi dua yakni pasangan luar (outdoor) dan pasangan dalam (indoor). PHB-TR pasangan luar berfungsi untuk menghubungkan-bagi daya listrik pada gardu tiang dan desainnya menggunakan selungkup seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Sedangkan PHB-TR pasangan dalam berfungsi untuk menghubungkan bagi daya listrik pada gardu tembok dan didesain tanpa menggunakan selungkup [11][12]. Adapun varian tipe PHB-TR sesuai dengan SPLN ditunjukkan pada Tabel 1.



**Gambar 2. PHB-TR Pasangan Luar**

Komponen utama dari PHB-TR adalah sebagai berikut:

- A. Sakelar utama: sakelar yang berfungsi sebagai pemutus aliran daya ke PHB-TR. Sakelar utama dapat berupa *molded case circuit breaker* (MCCB) yang berfungsi sebagai proteksi transformator dan pemutus beban atau hanya sakelar pemutus beban (LBS) yang berfungsi sebagai pemutus beban saja.
- B. *Fuse rail*: komponen PHB-TR yang berfungsi sebagai pembagi daya listrik. Konstruksi *fuse rail* berupa sistem busbar tiga fasa yang dikonstruksikan dalam satu unit, yang setiap unitnya terdiri dari kombinasi NH-Fuse base, terminal dan tutupnya, serta sekat insulasi antar fasa.
- C. *NH fuse-link*: satu kesatuan dengan *fuse rail* sehingga ukuran (*size*) NH fuse link harus sesuai dengan ukuran *fuse rail* yang digunakan. Selain menjadi penghantar daya listrik, *NH fuse link* juga berfungsi sebagai pengaman jurusan jika terjadi *overload*.

D. Busbar hubung: berfungsi untuk menghubungkan sakelar utama dengan *fuse rail*.

Karakteristik dari komponen utama dan komponen lainnya serta ketentuan konstruksi PHB-TR diatur pada butir 7 dan butir 8 SPLN D3. 016-1 : 2018 dan SPLN D3.018.016-2 : 2018.

**Tabel 1. Varian Tipe PHB-TR**

Pasangan Luar	Pasangan Dalam
PL-250-2-LBS/MCCB	PD-630-4-LBS/MCCB
PL2-400-2-LBS/MCCB	PD2-1000-5-LBS/MCCB
PL-400-4-LBS/MCCB	PD-1000-6-LBS/MCCB
PL-630-4-LBS/MCCB	PD-1000-8-LBS/MCCB
PL2-1000-5-LBS/MCCB	PD2-1600-8-LBS/MCCB
PL-1000-6-LBS/MCCB	

Dimana:

- PL/PD : tipe pasangan luar/pasangan dalam dengan pengaman jurusan Fuse NH1  
 PL2/PD2 : tipe pasangan luar/pasangan dalam dengan pengaman jurusan Fuse NH2  
 250/400/630/ : arus pengenal dalam satuan ampere 1000/1600  
 2/4/5/6/8 : jumlah jurusan  
 LBS/MCCB : jenis sakelar utama

## 2.3. Sampel Uji

**Tabel 2. Spesifikasi Sampel Pengujian**

Sampel	PHB-TR	<i>Fuse rail</i>	NH <i>fuse-link</i>
1	Weltraf PL-250-2-LBS	Hefftron Size 1	Onesto NH-1 125 A
2	Weltraf PL-250-2-LBS	Hefftron Size 2	Onesto NH-2 125 A
3	Weltraf PL-400-2-LBS	Hefftron Size 1	Onesto NH-1 200 A
4	Weltraf PL-400-2-LBS	Hefftron Size 2	Onesto NH-2 200 A



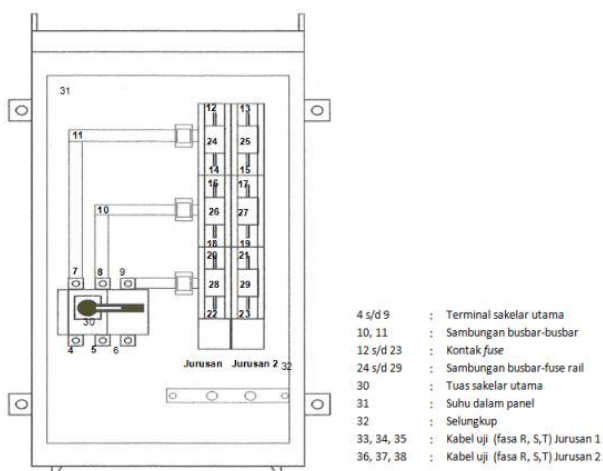
**Gambar 3. Sampel Fuse Rail**

Dalam penelitian ini digunakan sampel uji tipe PHB-TR yang termasuk dalam kontrak pengadaan terpusat PLN. Sampel uji yang digunakan adalah PHB-TR tipe PL-400-2-LBS yang saat ini sudah menggunakan *fuse rail size 2* dan PL-250-2-LBS yang merupakan tipe yang paling banyak diadakan. PHB-TR tipe PL-250-2-LBS saat ini

masih menggunakan *fuse rail size 1*. Dalam penelitian atau pengujian dilakukan kombinasi tipe PHB-TR dan *size fuse rail*, sehingga akan ada empat sampel pengujian dengan ketentuan yang ditunjukkan pada Tabel 2. Untuk sampel *fuse rail* ditunjukkan pada Gambar 3.

## 2.4. Pelaksanaan Pengujian

Sampel uji yang sudah disiapkan kemudian dilakukan pengujian di Laboratorium Tegangan dan Arus Tinggi PLN Pusat Sertifikasi. Adapun pengujian yang dilakukan adalah pengukuran tahanan kontak, pengujian kenaikan suhu, pengukuran termovisi dan pengukuran disipasi daya. Pengujian tahanan kontak dilakukan pada unit individu *fuse rail* menggunakan *micro ohm meter*. Titik pengukuran tahanan kontak dilakukan pada terminal masukan dan terminal keluaran *fuse rail* untuk tiap fasa. Arus uji yang digunakan adalah 100 A. Kemudian dilakukan pengujian kenaikan suhu untuk mengetahui pengaruh perbedaan nilai tahanan yang dimiliki *fuse rail size 1* dan *size 2* terhadap nilai kenaikan suhu yang dihasilkan. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan PHB-TR dengan sumber arus 3 fasa menggunakan kabel uji, kemudian diberikan arus nominal PHB-TR hingga kondisi jenuh atau saturasi. Kondisi jenuh adalah kondisi dimana kenaikan suhu tiap jam-nya sudah kurang dari 1 derajat [13]. Untuk memonitor nilai suhu pada titik-titik pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 4 digunakan *thermocouple* dan *thermo recorder*. Ketika keadaan jenuh tercapai kemudian dilakukan pengukuran termovisi dan pengukuran disipasi daya. Pengukuran termovisi dilakukan menggunakan kamera termovisi sedangkan pengukuran disipasi daya dilakukan dengan cara mengukur nilai drop tegangan pada terminal masukan dan keluaran *fuse rail*, selanjutnya nilai tersebut dikalikan dengan dengan nilai arus yang mengalir. Pengukuran drop tegangan menggunakan multimeter, sedangkan pengukuran arus menggunakan amperemeter.



Gambar 4. Titik Ukur Pengujian Kenaikan Suhu

## 2.5. Ekstrapolasi dan Interpolasi Data

Interpolasi dan ekstrapolasi adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai data lain dengan memanfaatkan nilai data yang telah dimiliki. Interpolasi adalah mencari nilai di antara nilai yang telah diketahui. Sedangkan ekstrapolasi adalah memperkirakan nilai yang berada di luar kumpulan data yang dimiliki [14]. Interpolasi dan ekstrapolasi linier formulasinya ditunjukkan pada persamaan (1).

$$y = y_1 + \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} x (x - x_1) \quad (1)$$

Dimana:

- x : kapasitas *fuse rail* yang akan dicari
- y : rugi-rugi daya *fuse rail* yang akan dicari
- x<sub>1</sub> : kapasitas *fuse rail* yang diketahui 1
- x<sub>2</sub> : kapasitas *fuse rail* yang diketahui 2
- y<sub>1</sub> : rugi-rugi daya *fuse rail* yang diketahui 1
- y<sub>2</sub> : rugi-rugi daya *fuse rail* yang diketahui 2

## 2.6. Kapitalisasi Biaya

Suatu produk yang memiliki nilai rugi-rugi yang lebih rendah cenderung memiliki harga investasi di awal yang lebih tinggi [15]. Metode *total cost of ownership* (TCO) dapat digunakan untuk menghitung biaya kapitalisasi suatu produk tersebut. Merujuk pada IEC TS 60076-20 : 2017 Annex A terkait kapitasasi biaya rugi-rugi produk trafo dan dengan menganggap rugi-rugi tanpa beban PHB-TR sama dengan nol maka formulasi dari TCO PHB-TR adalah sebagai berikut:

$$TCO = \text{Harga beli} + \text{biaya rugi-rugi berbeban} \quad (2)$$

$$TCO = IC + B x (P_k + P_{cs})$$

Dimana:

- IC : biaya awal PHB-TR
- P<sub>k</sub> : rugi-rugi berbeban (kW)
- P<sub>cs</sub> : daya untuk pendinginan saat kondisi berbeban (kW)
- B : ekuivalen biaya kapitasasi rugi-rugi berbeban (biaya per kW)

Biaya kapitalisasi rugi-rugi berbeban diperoleh dari penjumlahan faktor beban dikalikan dengan biaya energi, kemudian dikoreksi dengan peningkatan beban dan peningkatan jumlah transformator yang terpasang. Dalam persamaan dibawah ini, kerugian dibagi menjadi dua bagian, dengan masing-masing bagian dibobotkan berdasarkan waktu penggunaannya.

$$B = \sum_{j=1}^n \mu x C_j x (O_{aj} x T_{aj} + O_{fj} x T_{fj}) x \left( \frac{1+C_{\mu j}}{1+C_{aj}} \right)^{2j} x NPV_j \quad (3)$$

Dimana:

- μ : faktor beban rata-rata
- C<sub>j</sub> : nilai energi pada tahun ke j (Rp per Wh)
- O<sub>aj</sub> : jam operasi PHB-TR dalam kondisi beban variabel pada tahun ke-j

- $O_{fj}$  : jam operasi PHB-TR dalam kondisi beban *fixed* pada tahun ke- $j$
- $T_{aj}$  : faktor beban variabel terhadap seluruh rugi-rugi berbeban pada tahun ke- $j$
- $T_{fj}$  : faktor beban *fixed* terhadap seluruh rugi-rugi berbeban pada tahun ke- $j$
- $T_{aj} + T_{fj} = 1$
- $n$  : ekspektasi umur PHB-TR dalam tahun
- $C_{\mu j}$  : tingkat kenaikan faktor rugi-rugi berbeban pada tahun ke- $j$
- $C_{aj}$  : tingkat kenaikan data terpasang pada tahun ke- $j$
- $NPV_j$  : formula net present value pada tahun ke- $j$

Dengan perumusan *net present value* (NPV) pada tahun ke- $j$  adalah sebagai berikut:

$$NPV_j = \frac{1}{(1+i_j)^j} \quad (4)$$

Dimana:

$i_j$ : Tingkat suku bunga tahun ke- $j$

Perhitungan TCO dapat disimplikasi dengan mengambil asumsi-asumsi umum seperti nilai Tingkat suku bunga/diskonto yang tetap, biaya energi yang kenaikannya konstan, dan beban dianggap selalu fix pada faktor beban tertentu [15]. Dalam perhitungan yang dilakukan nilai faktor beban dianggap bernilai satu, namun untuk nilai rugi-rugi berbeban divariasikan untuk beban 60%, 80% dan 100%.

## 2.7. Investasi Kelayakan Investasi

Untuk mengetahui bahwa pengadaan atau investasi suatu produk layak dilakukan secara ekonomi atau tidak, analisis kelayakan investasi perlu dilakukan [16]. Parameter-parameter utama yang digunakan dalam analisis kelayakan investasi tersebut adalah *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Discounted Payback Period* (DPBP) dan *Benefit Cost Ratio* (B/C) [16], [17]. Adapun penjelasan dari masing-masing parameter tersebut adalah sebagai berikut:

### A. Net Present Value (NPV)

NPV adalah parameter kelayakan investasi yang merepresentasikan nilai saat ini (*present value*) dari seluruh aliran kas (*cash flow*) atau laba bersih dari sebuah investasi [18]. Suatu proyek atau investasi layak dilakukan jika nilai dari  $NPV > 0$  atau NPV yang paling besar jika terdapat alternatif-alternatif yang lain [17]. Nilai NPV dapat dihitung menggunakan persamaan (5).

$$NPV = -A_0 + \sum_{n=0}^i \frac{A_n}{(1+i)^n} \quad (5)$$

Dimana:

$A_0$  : investasi awal

$A_n$  : *cashflow* pada akhir proyek atau produk  $n$

$n$  : masa proyek atau produk

$i$  : suku bunga

### B. Internal Rate of Return (IRR)

IRR adalah parameter kelayakan investasi yang menghitung tingkat bunga (*discount rate*) yang membuat NPV bernilai nol. Investasi dapat dikategorikan layak jika nilai IRR lebih besar dari nilai *minimum acceptable rate of return* (MARR) atau suku bunga yang ditetapkan bank pemberi pinjaman [16], [17]. Untuk menghitung nilai IRR digunakan formula pada persamaan (6).

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{(NPV_1 - NPV_2)} (i_2 - i_1) \quad (6)$$

Dimana:

$i_1$  : suku bunga yang menghasilkan NPV positif

$i_2$  : suku bunga yang menghasilkan NPV negatif

$NPV_1$  : NPV bernilai positif

$NPV_2$  : NPV bernilai negatif

### C. Discounted Payback Period (DPBP)

DPBP adalah periode atau waktu yang dibutuhkan untuk pengembalian modal yang telah diinvestasikan pada *cashflow* tahunan yang dihasilkan dari suatu investasi proyek atau produk dalam bentuk *present value* (PV). Arus kas masuk tahunan dalam bentuk PV dapat mengakomodir perubahan nilai uang di masa depan [16]. Suatu investasi dikatakan layak jika nilai DPBP kurang dari umur proyek atau masa pakai produk. Adapun untuk menghitung nilai DPBP yakni sesuai dengan persamaan (7).

$$DPBP = \text{tahun sebelum masa impas} + \frac{\text{Biaya Investasi}}{\text{NPV kumulatif}} \quad (7)$$

### D. Benefit Cost Ratio (B/C)

B/C adalah parameter kelayakan investasi yang menghitung perbandingan antara keuntungan (*benefit*) dan keseluruhan biaya yang dikeluarkan (*cost*). Apabila suatu investasi proyek atau produk mempunyai nilai  $B/C > 1$ , maka investasi tersebut layak untuk dilakukan [17]. B/C dapat dihitung dengan formula sesuai persamaan (8).

$$\frac{B}{C} = \frac{B}{\text{Modal} + (O+M)} \quad (8)$$

Dimana:

$B$  : keuntungan

Modal : investasi atau modal awal

(O+M) : biaya operasi dan pemeliharaan

## 3. Hasil dan Analisis

### 3.1. Hasil Pengujian

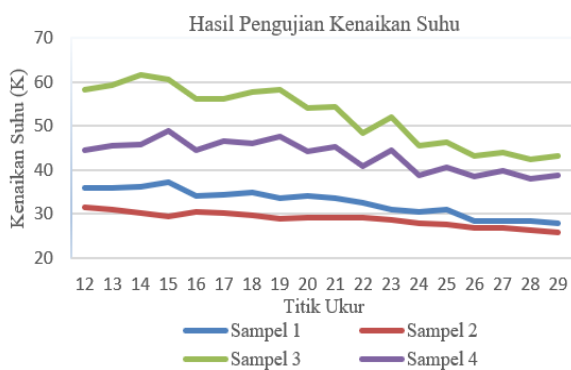
Hasil pengukuran tahanan kontak *fuse rail size* 1 dan *size* 2 yang menjadi sampel uji ditunjukkan pada Tabel 3. Pengukuran dilakukan pada individual *fuse rail* yang telah terpasang NH *fuse-link* dengan kombinasi yang ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil dari pengukuran menunjukkan bahwa nilai tahanan kontak *fuse rail size* 2

lebih kecil dibandingkan *fuse rail size* 1. Hal tersebut dipengaruhi oleh luas penampang penghantar *fuse rail* dan juga dari nilai tahanan NH *fuse-link*. Perbedaan nilai tahanan kontak untuk tipe PL-250-2-LBS (sampel 1 dan 2) sekitar 20 % sedangkan untuk tipe PL-400-2-LBS (sampel 3 dan 4) sebesar 15%. Untuk nilai tahanan kontak fasa T lebih kecil dibanding fasa S dan kemudian fasa S lebih kecil dibanding fasa R ini dikarenakan panjang penghantar yang berbeda mengikuti desain konstruksi pemasangan *fuse rail* pada PHB-TR.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Tahanan Kontak

No. Sampel	Nilai Tahanan Kontak ( $\mu\Omega$ )					
	Jurusan 1			Jurusan 2		
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T
1	731,0	683,4	658,7	698,3	664,7	655,5
2	580,5	552,2	528,9	575,8	554,2	533,0
3	487,5	455,2	449,8	491,5	463,1	441,9
4	409,4	398,9	366,5	419,9	409,3	370,6

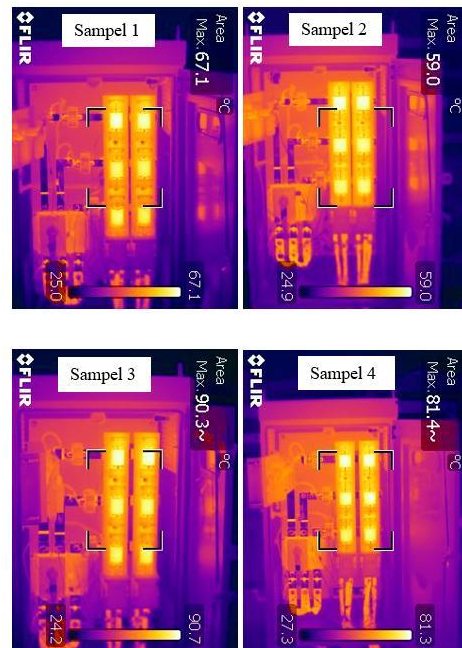
Nilai dari tahanan kontak akan mempengaruhi nilai temperatur pada *fuse rail* PHB-TR. Dari hasil pengujian kenaikan suhu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, *fuse rail* yang mempunyai nilai tahanan kontak yang lebih kecil pada tipe PHB-TR yang sama akan mempunyai temperatur lebih rendah. Nilai kenaikan suhunya pun akan lebih rendah pula. Untuk PHB-TR tipe PL-250-2-LBS penurunan temperature sebesar 1,4°C hingga 7,8°C, sedangkan tipe PL-400-2-LBS sebesar 4°C hingga 15,8°C. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *fuse rail size* 2 akan menurunkan nilai kenaikan suhu.



Gambar 5. Hasil Pengujian Kenaikan Suhu

Adapun hasil pengukuran thermovisi, ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil dari semua sampel menunjukkan bahwa bagian *fuse rail* memiliki warna yang lebih terang dibandingkan bagian lain di PHB-TR. Hal tersebut menunjukkan bahwa suhu di bagian *fuse rail* lebih tinggi dibandingkan bagian PHB-TR yang lain. Nilai suhu maksimal di area *fuse rail* pun muncul pada hasil pengukuran thermovisi. Nilai suhu maksimal di PHB-TR tipe PL-250-2-LBS dengan *fuse rail size* 1 sebesar 67,1°C,

tipe PL-250-2-LBS dengan *fuse rail size* 2 sebesar 59,0°C, tipe PL-400-2-LBS dengan *fuse rail size* 1 sebesar 90,3°C dan tipe PL-400-2-LBS dengan *fuse rail size* 2 sebesar 81,4°C. Hal ini menguatkan hasil dari pengujian kenaikan suhu bahwa *fuse rail* adalah komponen PHB-TR yang menimbulkan disipasi daya yang paling besar dan penggunaan *fuse rail size* 2 akan menurunkan nilai suhu yang ditimbulkan.



Gambar 6. Hasil Pengukuran Thermovisi

Selain menurunkan nilai tahanan kontak dan kenaikan suhu, penggunaan *fuse rail size* 2 juga menurunkan nilai disipasi daya. Hasil dari pengukuran disipasi daya pada sampel uji ditunjukkan pada Tabel 4. Pengukuran disipasi daya dilakukan per fasa untuk tiap jurusan kemudian nilainya dijumlahkan untuk mendapatkan nilai total. Nilai disipasi daya *fuse rail size* 2 lebih kecil dibanding *size* 1 dengan selisih pada PHB-TR tipe PL-250-2-LBS sebesar 16,36 W dan tipe PL-400-2-LBS sebesar 17,82 W.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Disipasi Daya

Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4
79,11 W	62,75 W	140,88 W	123,06 W

Hal ini menunjukkan bahwa secara teknis penggunaan *fuse rail size* 2 lebih baik dibanding *size* 1.

### 3.2. Ekstrapolasi dan Interpolasi Data

Data disipasi daya yang didapat dari hasil pengujian pada sampel uji kemudian dilakukan ekstrapolasi dan interpolasi data menggunakan persamaan (1) untuk mendapatkan nilai disipasi daya semua varian tipe PHB-TR yang diadakan pada kontrak tahun 2025. Perhitungan

ekstrapolasi dilakukan menggunakan acuan arus nominal per jurusan PHB-TR sesuai varian tipenya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Untuk PHB-TR tipe PL-250-2-MCCB nilai disipasi dayanya dianggap sama dengan tipe PL-250-2-LBS karena mempunyai nilai arus nominal per jurusan yang sama. Untuk tipe PL-400-4-LBS, PL-630-4-LBS, dan PD-1000-6-LBS nilai disipasi dayanya didapatkan dengan menggunakan ekstrapolasi dan interpolasi data dari hasil pengukuran disipasi daya pada tipe PL-250-2-LBS dan PL-400-2-LBS.

**Tabel 5. Ekstrapolasi dan Interpolasi Data**

Tipe PHB-TR	Jumlah Jurusan	Arus nominal per jurusan (A)	Disipasi Daya (W)	
			Size 1	Size 2
PL-250-2-LBS	2	125	79,11	62,75
PL-250-2-MCCB	2	125	79,11	62,75
PL-400-2-LBS	2	200	140,88	123,06
PL-400-4-LBS	4	100	117,04	85,29
PL-630-4-LBS	4	160	215,87	181,79
PD-1000-6-LBS	6	160	323,81	272,68

### 3.3. Penghematan Energi Listrik

Setelah mengetahui nilai disipasi daya untuk semua varian tipe PHB-TR yang menggunakan *fuse rail size 1* dan *size 2*, kita dapat menghitung nilai penurunan disipasi daya akibat penggunaan *fuse rail size 2* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6. Tiap varian tipe PHB-TR memiliki penurunan disipasi daya yang berbeda-beda diakibatkan jumlah jurusan yang berbeda. Semakin banyak jumlah jurusan maka jumlah penurunan disipasi daya semakin besar pula. Nilai penurunan disipasi daya per unit PHB-TR kemudian dikalikan dengan jumlah unit sesuai kontrak pengadaan tahun 2025 untuk mengetahui nilai total potensi penurunan disipasi daya.

**Tabel 6. Penurunan Nilai Disipasi Daya**

Tipe PHB-TR	Per Unit (W)	Jumlah PHB-TR (unit)	Total (kW)
PL-250-2-LBS	16,36	6.537	106,95
PL-250-2-MCCB	16,36	2.186	35,76
PL-400-2-LBS	17,82	4.150	73,96
PL-400-4-LBS	31,75	3.682	116,90
PL-630-4-LBS	34,08	2.912	99,25
PD-1000-6-LBS	51,13	520	26,59

Penurunan disipasi daya total akibat pengadaan 19.987 unit PHB-TR adalah 459,41 kW. Dengan adanya penurunan nilai disipasi daya tersebut, tentunya akan menurunkan nilai rugi-rugi energi listrik. Untuk menghitung rugi-rugi energi listrik yakni dengan mengkalikan nilai penurunan disipasi daya dengan periode waktu tertentu (dalam satuan jam). Dalam satu tahun atau 8760 jam, nilai penurunan rugi-rugi energi listrik sebesar 4.024,5 MWh. Hal tersebut menunjukkan penggunaan *fuse rail size* akan menghemat energi listrik yang cukup besar.

### 3.4. Penurunan Emisi Karbon

Salah satu dampak positif dari penurunan rugi-rugi energi listrik adalah potensi penurunan emisi karbon. Pembangkitan energi listrik di Indonesia masih menghasilkan emisi karbon yang cukup tinggi. Berdasarkan laporan keberlanjutan PLN tahun 2023, nilai intensitas emisi gas rumah kaca (GRK) adalah 0,801 ton CO<sub>2</sub>e/MWh [19]. Sehingga dengan adanya penurunan energi listrik yang harus dibangkitkan sebesar 4.024,5 MWh, maka akan menurunkan emisi karbon sebesar 3.223,59 ton CO<sub>2</sub>e. Jika satu pohon dewasa dapat menyerap emisi karbon sekitar 22 kgCO<sub>2</sub> per tahun, maka pengurangan emisi tersebut setara penyerapan 146.527 pohon selama satu tahun. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *fuse rail size 2* pada PHB-TR selain meningkatkan efisiensi, juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca.

### 3.5. Penghematan Biaya Produksi Listrik

Selain akan menurunkan jumlah emisi karbon, penurunan rugi-rugi juga akan menurunkan biaya produksi energi listrik. Nilai biaya pokok produksi (BPP) rata-rata energi listrik berdasarkan laporan statistik PLN tahun 2023 sebesar Rp1.599/kWh [2]. Sehingga dengan adanya penurunan energi listrik sebesar 4.024,5 MWh akibat penggunaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2*, maka akan berpotensi menurunkan biaya produksi energi listrik sebesar Rp6.435.104.914 per tahun-nya. Nilai tersebut menggambarkan penurunan biaya produksi energi listrik sebesar 18,35% akibat penggunaan *fuse rail size 2* jika dibandingkan tetap menggunakan *fuse rail size 1*.

### 3.6. Analisis Kelayakan Ekonomi

Dalam dunia bisnis seperti bisnis penyediaan energi listrik yang dilakukan oleh PLN, aspek ekonomi tentunya menjadi hal yang sangat penting. Penggunaan *fuse rail size 2* dapat menurunkan nilai rugi-rugi energi listrik yang berdampak positif terhadap penurunan emisi karbon dan penurunan biaya pokok produksi. Namun disamping itu diperlukan biaya investasi awal yang lebih besar. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari supplier *fuse rail* diketahui harga satu set *fuse rail size 2* sudah termasuk NH *fuse-link* adalah Rp2.039.000. Sedangkan untuk *fuse rail size 1* sebesar Rp1.323.000. Nilai tersebut digunakan untuk menghitung harga berbagai varian tipe PHB-TR dengan menambahkan atau mengurangi nilai harga unit PHB-TR pada kontrak pengadaan. Harga tiap varian tipe PHB-TR ditunjukkan pada Tabel 7. Dengan mengalikan harga unit PHB-TR dengan jumlah pengadaan tiap tipenya serta menjumlahkannya untuk semua tipe maka didapatkan harga total pengadaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2* sebesar Rp423.637.220.480 dan PHB-TR dengan *fuse rail size 1* sebesar Rp389.055.728.480.

Tabel 7. Harga Satuan PHB-TR

Tipe PHB-TR	Harga PHB-TR (Rp)	
	dengan fuse rail size 1	dengan fuse rail size 2
PL-250-2-LBS	14.255.520	15.507.520
PL-250-2-MCCB	17.975.375	19.227.375
PL-400-2-LBS	17.510.116	18.762.116
PL-400-4-LBS	20.562.745	23.066.745
PL-630-4-LBS	28.219.800	30.723.800
PD-1000-6-LBS	50.034.920	53.790.920

Metode TCO digunakan untuk membandingkan kapasitas biaya PHB-TR dengan *fuse rail size 2* dan PHB-TR dengan *fuse rail size 1*. Perhitungan nilai TCO menggunakan formula yang ditunjukkan pada persamaan (2), (3), dan (4) dengan mengasumsikan harga energi tahun ke-0 sebesar Rp1.599/kWh, tingkat inflasi harga energi listrik 3%, tingkat suku bunga 6%, ekspektasi umur PHB-TR 15 tahun, beban dianggap selalu tetap pada nilai faktor beban rata-rata dan rugi-rugi berbeban dan kapasitas daya terpasang tetap. Adapun untuk faktor beban rata-rata yang digunakan dalam perhitungan adalah 1, dengan nilai rugi-rugi daya yang digunakan adalah variasi nilai total disipasi daya semua PHB-TR untuk pembebanan 60%, 80% dan 100%. Nilai rugi-rugi daya tersebut ditunjukkan pada Tabel 8. Sedangkan hasil dari perhitungan nilai TCO ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 8. Variasi Nilai Rugi-rugi Daya

Besar Pembebanan	Disipasi Daya (W)	
	Fuse rail size 1	Fuse rail size 2
100%	2.502.682,21	2.043.269,44
80%	1.495.381,57	1.133.314,07
60%	761.155,07	606.526,08

Tabel 9. Hasil Perhitungan Nilai TCO PHB-TR

Besar pembebanan	TCO PHB-TR (Rp)		Selisih perbedaan TCO	Perpotongan nilai TCO (tahun ke-)
	Fuse rail size 1	Fuse rail size 2		
100%	810.205.285.33	767.477.127.87	5,3%	6
80%	640.697.460.11	614.350.495.54	4,1%	8
60%	517.142.354.71	525.702.991.81	-1,7%	>15

Di awal pemakaian, nilai TCO PHB-TR dengan *fuse rail size 2* nilainya lebih tinggi karena nilai investasi awal yang lebih besar. Namun seiring tahun berjalan nilai TCO nya akan semakin mengecil jika dibandingkan dengan PHB-TR dengan *fuse rail size 1*. PHB-TR dengan *fuse rail size 2* akan layak digunakan ketika pembebanan pada PHB-TR sebesar 80% atau lebih selama masa operasinya. Dengan melihat hasil perhitungan nilai TCO ketika dibebani 100% dan 80%, dapat diketahui bahwa perpotongan nilai TCO ketika PHB-TR dibebani 100% lebih cepat dibandingkan ketika dibebani 80%. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2* akan semakin optimal di beban tinggi. Sehingga pengoptimalan konfigurasi jaringan diperlukan agar varian tipe PHB-TR yang digunakan pada suatu sistem mendapatkan

pembebanan maksimum. Namun disisi lain, ketika beban hanya 60%, perpotongan nilai TCO terjadi lebih dari 15 tahun, tepatnya 22 tahun. Dengan masa perpotongan nilai TCO yang melewati masa operasional PHB-TR, maka dengan pembebanan sebesar 60% atau lebih kecil menunjukkan bahwa penggunaan *fuse rail size 2* tidak layak diaplikasikan secara ekonomi.

Selain melakukan perhitungan kapitalisasi biaya menggunakan metode TCO, analisis kelayakan ekonomi juga dilakukan dengan perhitungan nilai NPV, IRR, DPBP, dan B/C. Perhitungan nilai-nilai tersebut bertujuan untuk mengetahui apakah investasi penggunaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2* layak dilakukan. Untuk melakukan perhitungan, diperlukan parameter nilai investasi awal, pendapatan tahunan, pengeluaran tahunan, masa operasional PHB-TR, suku bunga bank, dan tingkat inflasi energi listrik. Nilai parameter pendapatan dan pengeluaran ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Parameter Perhitungan Kelayakan Investasi

Parameter	Satuan	Nilai
Nilai investasi	Rp	34.581.492.000
Nilai pendapatan	Rp/tahun	
Beban 100%		6.435.104.913
Beban 80%		4.013.239.623
Beban 60%		1.541.431.603

Nilai investasi awal yang digunakan adalah selisih harga PHB-TR yang menggunakan *fuse rail size 2* dengan yang menggunakan *fuse rail size 1*. Kemudian untuk nilai pendapatan tahunan adalah penghematan energi listrik akibat penurunan rugi-rugi daya dari penggunaan *fuse rail size 2*. Nilai pendapatan tahunan tersebut akan dipengaruhi nilai inflasi harga produksi energi listrik dan juga besar pembebanan pada PHB-TR. Nilai tingkat inflasi dan suku bunga yang digunakan sama dengan nilai yang digunakan pada perhitungan TCO, yakni 3% untuk tingkat inflasi dan 6% untuk nilai suku bunga. Adapun untuk pengeluaran tahunan dianggap nol karena nilai biaya pemeliharaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2* akan sama saja dengan *fuse rail size 1*, sehingga tidak ada selisih kenaikan biaya.

Hasil dari perhitungan NPV, IRR, DPBP dan B/C ditunjukkan pada Tabel 11. NPV didapatkan dengan mengakumulasi *present value* dari arus kas selama 15 tahun. Ketika dibebani 100%, nilai NPV dari investasi PHB-TR dengan *fuse rail size 2* adalah Rp42.728.157.459, IRR 21%, DPBP 5,93 tahun dan B/C 2,24. Nilai pembebanan PHB-TR sangat menentukan nilai parameter kelayakan investasi karena ketika pembebanan semakin kecil, nilai pendapatan akan turun sehingga nilai NPV, IRR dan B/C akan semakin kecil. Selain ini nilai DPBP akan semakin lama. Dengan dibebani 80%, nilai NPV akan menjadi Rp12.228.216.769, IRR 11%, B/C 1,35 dan DPBP 10,42 tahun. Pada beban 80% atau lebih penggunaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2* memenuhi persyaratan kelayakan investasi.

Kemudian ketika beban turun ke 60%, kriteria kelayakan investasi akan tidak terpenuhi. NPV bernilai negatif yaitu -Rp16.063.140.156, sehingga nilai IRR tidak dapat diketahui. Nilai B/C pun akan bernilai kurang dari 1 yakni 0,54 dan DPBP lebih besar 15 tahun. Untuk mendapatkan nilai NPV positif ketika beban hanya 60%, PHB-TR harus dapat beroperasi selama 37 tahun. Dengan kata lain proses balik modal dapat terjadi pada tahun ke 37, lebih tepatnya 36,9 tahun. Ketika PHB-TR dapat beroperasi selama 37 tahun maka nilai IRR pada tahun tersebut sebesar 6% atau sama dengan kriteria *minimum acceptable rate of return* (MARR).

**Tabel 11. Hasil Perhitungan Kelayakan Investasi**

	NPV (Rp)	IRR	DPBP (Tahun)	B/C
<b>Persyaratan</b>	<b>&gt;0</b>	<b>&gt;6%</b>	<b>&lt;15</b>	<b>&gt;1</b>
Beban 100%	42.728.157.459	21%	5,93	2,24
Beban 80%	12.228.216.769	11%	10,42	1,35
Beban 60%	<b>-16.063.140.156</b>	<b>-</b>	<b>36,9</b>	<b>0,54</b>

Dari analisis ekonomi yang telah dilakukan, baik dengan perhitungan nilai TCO ataupun perhitungan nilai parameter kelayakan investasi NPV, IRR, DPBP dan B/C, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *fuse rail size 2* pada PHB-TR layak dilakukan ketika dibebani sebesar 80% atau lebih. Jika beban hanya 60% atau lebih kecil, penggunaan *fuse rail size 2* tidak layak dilakukan secara ekonomi. Hal tersebut berarti penggunaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2* cocok digunakan pada daerah yang kebutuhan energi listriknya tinggi. Pemilihan varian tipe PHB-TR yang tepat dan pengoptimalan konfigurasi jaringan distribusi tentu sangat diperlukan agar penggunaan PHB-TR dengan *fuse rail size 2* sebagai upaya menurunkan rugi-rugi energi distribusi dapat diaplikasikan.

#### 4. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan *fuse rail size 2* akan menurunkan nilai tahanan kontak, kenaikan suhu dan disipasi daya jika dibandingkan tetap menggunakan *fuse rail size 1*. Dengan pengadaan PHB-TR yang menggunakan *fuse rail size 2* sebanyak 19.987 unit maka dalam satu tahun berpotensi menurunkan nilai rugi-rugi energi sebesar 4.024,5 MWh, emisi karbon sebesar 3.223,6 ton CO<sub>2</sub>e dan biaya produksi energi listrik sebesar Rp6.435.104.913. Berdasarkan analisis ekonomi, penggunaan *fuse rail size 2* dinyatakan memenuhi aspek ekonomi apabila dibebani 80% atau lebih dari kapasitas PHB-TR. Nilai kapitalisasi biaya PHB-TR dengan *fuse rail size 2* di awal tinggi namun memberikan penghematan operasional jangka panjang karena rugi-rugi energi yang lebih rendah. Perpotongan nilai TCO PHB-TR dapat terjadi paling cepat pada tahun 6. Sedangkan untuk parameter kelayakan investasi NPV dapat bernilai Rp42.728.157.459, IRR hingga 21%, DPBP paling cepat 5,93 tahun dan B/C hingga 2,24. Namun ketika beban PHB-TR sebesar 60% atau kurang maka secara ekonomi

penggunaan *fuse rail size 2* pada PHB-TR tidak layak dilakukan. Hal-hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *fuse rail size 2* pada PHB-TR secara teknik layak untuk digunakan, namun secara ekonomi akan layak jika PHB-TR dibebani 80% atau lebih. Dengan melakukan pengoptimalan pembebanan pada PHB-TR, maka penggunaan *fuse rail size 2* akan menjadi salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk menurunkan rugi-rugi energi distribusi.

#### Referensi

- [1]. PLN. RUPTL PLN 2021-2030. PT PLN (Persero). 2021.
- [2]. PLN. Statistik PLN 2023. PT PLN (Persero). 2024.
- [3]. Niste DF, Tirmovan R, Pavel S, Beleiu H, Andrei C, Misaroş M. Electricity Losses in Focus: Detection and Reduction Strategies - State of the Art. *Appl. Sci.* 2025; 15(7).
- [4]. Soedjarwanto N, Kines KE, Aulia SA. Analisis Susut Daya (Losses) Pada Penyulang Rayap PT PLN (Persero) UID Lampung Berbasis Aplikasi Etap 19.0.1. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*. 2024; 12(2).
- [5]. Pratama RB, Wibowo P, Anisah S. Analisis Pengaruh Penggantian Konduktor pada Saluran Udara Tegangan Menengah 20kV terhadap Drop Tegangan di PT. PLN (Persero) UP3 Bangkinang. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 2025; 5(2), 803-812.
- [6]. Kurniawan HF, Rahmawati D. Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Untuk Mendukung Perbaikan Susut Teknik di ULP Bangko. *Jurnal Teknik Elektro Raflesia*, 2021;1(1), 8-15.
- [7]. Hudson F. Perbandingan Rugi-Rugi Energi Pada Transformator Dengan Inti Amorphous Dan CRGO. Tesis Program Magister. Bandung: Intitut Teknologi Bandung; 2024.
- [8]. Arieyansyah A, Mukhaiyar R. Penekanan Susut Non-Teknis Dengan Cara Optimalisasi Pelaksanaan P2TL di PT PLN (Persero) ULP Indarung. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 2021; 3(4), 269-278.
- [9]. Surusa FEP, Humena S, Nani FY. Analisa Susut Non Teknis Menggunakan Automatic Meter Reading (AMR) Pada Pelanggan Potensial. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2022; 4(1), 1-7.
- [10]. Munandar AH. Implementasi Advanced Metering Infrastructure (AMI). *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia*, 2024; 2(4).
- [11]. Standar PLN. Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah - Bagian 1: Pasangan Luar. PT PLN (Persero); 2019.
- [12]. Standar PLN. Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah - Bagian 2: Pasangan Dalam. PT PLN (Persero); 2019.
- [13]. IEC Standard. *Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 1 : General rules; IEC Commisison*. 2020.
- [14]. Wahab MA. Interpolation and Extrapolation. *Proc. Topics Syst. Eng. Winter Term*, 2017; 17, 1-6.
- [15]. Kusumadinata A. Perancangan Spesifikasi dan Analisis Tekno-Ekonomi Transformator Distribusi Hijau dengan Minyak Ester Natural dan Inti Besi Amorf untuk Jaringan Tenaga Listrik Ramah Lingkungan. Tesis Program Magister. Depok : Universitas Indonesia ; 2025.

- [16]. Hiswandi MF, Iswahyudi F, and Soeroto WM. Analisis Kelayakan Investasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap dengan Sistem On-Grid di Pabrik Minuman Siap Saji. *Sebatik*, 2023; 27(1).
- [17]. Mardani GHH. Studi Kelayakan Finansial Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) Selat Lantuka, Nusa Tenggara Timur.
- [18]. Pawenary P, Khairunnisyah F, and Pradana AE. Analisa Studi Kelayakan Pembangunan PLTS 10 kWp di Graha YPK PLN. *J. Teknol. Elektro*. 2022; 13(3).
- [19]. PLN. Laporan Keberlanjutan 2023. PT PLN (Persero). 2024.