

Analytical Study of 20 kV Circuit Breakers Performance at the Substation

Analisa Performa Circuit Breaker 20 kV di Gardu Induk

Putra Maulana Firmansyah, Maickel Tuegeh, Hans Tumaliang

Dept. of Electrical Engineering, Sam Ratulangi University Manado, Kampus Bahu St., 95115, Indonesia

e-mails : putrafirmansyah023@student.unsrat.ac.id, maickel_tuegeh@unsrat.ac.id,
hanstumaliang@unsrat.ac.id

Received: [date]; Revised: [date]; Accepted: [date]

Abstract — This study aims to analyze the performance of a 20 kV vacuum-type Circuit Breaker (CB) installed in cubicle SR 7 at the Ranomuut Substation. The primary focus is to evaluate the operational reliability of the CB based on five technical parameters: insulation value, leakage current, contact resistance, contact synchronization, and vacuum level. Measurements were conducted directly in the field using standardized testing methods with a current injection of 100 A. Initial testing results indicated a performance decline in phase T, evidenced by a vacuum leakage current of 374.4 mA and a contact resistance of 69.2 $\mu\Omega$ —both exceeding the technical threshold limits. After corrective actions and replacement of the vacuum interrupter, all parameters returned to standard levels. The contact synchronization value also improved to below 1 ms, indicating that the CB's mechanical response had returned to optimal condition. These findings confirm that vacuum degradation and insulator contamination are the main causes of CB performance deterioration. This research highlights the importance of condition-based maintenance programs in enabling early detection of component performance degradation, thereby ensuring the overall reliability of the electrical distribution system.

Keywords: Circuit Breaker; Contact resistance; Distribution system; Leakage current; Reliability; Substation; Vacuum level.

Abstrak — Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa Circuit Breaker (CB) tipe vakum bertegangan 20 kV yang terpasang pada kubikel SR 7 di Gardu Induk Ranomuut. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi keandalan operasional CB berdasarkan lima parameter teknis, meliputi nilai isolasi, kebocoran arus, resistansi kontak, sinkronisasi antar kontak, serta tingkat kevakuman. Pengukuran dilakukan secara langsung di lapangan dengan memanfaatkan metode pengujian standar dan injeksi arus sebesar 100 A. Hasil pengujian awal menunjukkan indikasi penurunan performa pada fasa T, ditandai oleh nilai arus bocor kevakuman sebesar 374,4 mA dan tahanan kontak 69,2 $\mu\Omega$ —keduanya melebihi ambang batas teknis. Setelah dilakukan tindakan perbaikan dan penggantian vacuum interrupter, seluruh parameter kembali dalam batas standar. Nilai keserempakan kontak juga membaik hingga di bawah 1 ms, yang mengindikasikan bahwa respons mekanis CB telah kembali optimal. Temuan ini mengonfirmasi bahwa degradasi kevakuman dan kontaminasi isolator merupakan penyebab utama penurunan kinerja CB. Penelitian ini menekankan pentingnya program pemeliharaan berbasis kondisi (condition-based maintenance) dalam mendeteksi dini degradasi performa komponen, guna menjamin keandalan sistem distribusi tenaga listrik secara keseluruhan.

Kata kunci: Arus bocor; Circuit Breaker; Gardu Induk; Kevakuman; Keandalan; Sistem distribusi; Tahanan kontak

I. PENDAHULUAN

Keberlangsungan dan keandalan sistem distribusi listrik sangat ditentukan oleh kinerja optimal dari setiap peralatan di dalamnya, khususnya perangkat yang beroperasi di gardu induk. Salah satu perangkat penting yang berfungsi sebagai pengaman utama dalam jaringan distribusi adalah Circuit Breaker (CB). Peralatan ini memiliki fungsi vital, yaitu untuk mengalirkan dan menghentikan arus listrik baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan, seperti arus hubung singkat. Oleh karena itu, menjaga keandalan dan kondisi teknis CB melalui evaluasi dan pemeliharaan berkala menjadi suatu keharusan. Circuit Breaker merupakan alat pemutus arus listrik yang bekerja secara otomatis maupun manual, dan dirancang untuk merespons gangguan sistem dalam waktu singkat guna mencegah kerusakan lanjutan pada komponen lainnya. Keandalannya sangat mempengaruhi stabilitas pasokan energi, sehingga setiap penurunan performa pada CB harus segera ditindaklanjuti melalui pemeriksaan teknis. Pada Gardu Induk Ranomuut, yang berperan penting dalam sistem distribusi di wilayah Kota Manado, ditemukan gejala abnormal pada salah satu CB 20 kV tipe vakum yang terpasang di kubikel SR 7, ditandai dengan munculnya suara desis padat yang umumnya menjadi indikasi adanya kebocoran arus. Permasalahan ini mendorong dilakukannya investigasi lebih lanjut untuk menganalisis performa CB tersebut secara komprehensif. Evaluasi dilakukan dengan mengukur lima parameter utama yang menjadi indikator performa CB, yaitu: nilai tahanan isolasi, arus bocor, tahanan kontak, keserempakan kontak antar fasa, serta tingkat kevakuman. Seluruh pengujian dilakukan di lapangan menggunakan metode uji standar dan arus injeksi sebesar 100 A. Hasil pengujian ini nantinya akan dibandingkan dengan standar teknis operasional yang berlaku untuk menentukan apakah CB masih dapat dioperasikan secara aman dan andal. Penelitian ini bertujuan tidak hanya untuk mengevaluasi kondisi aktual CB, tetapi juga untuk mengidentifikasi penyebab utama terjadinya degradasi performa, serta untuk mendukung implementasi strategi pemeliharaan berbasis kondisi (condition-based maintenance). Strategi ini menekankan pada pemantauan langsung kondisi komponen sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan, sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan peralatan secara mendadak. Dengan pendekatan ini, diharapkan sistem distribusi tenaga listrik, khususnya yang berada di bawah kendali Gardu Induk Ranomuut, dapat beroperasi secara lebih andal dan efisien, serta memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap potensi gangguan operasional di masa mendatang.

A. Sistem Tenaga Listrik

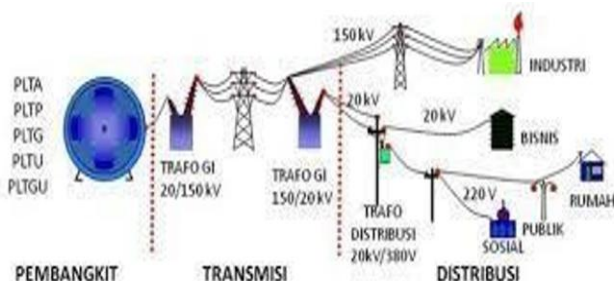
Sistem kelistrikan merupakan suatu jaringan terpadu yang mencakup tahap pembangkitan energi listrik, penyalurannya melalui saluran transmisi, dan pendistribusiannya kepada konsumen melalui sistem distribusi. Listrik yang dihasilkan oleh pembangkit seperti PLTA, PLTU, PLTG, dan PLTGU perlu dinaikkan ke tegangan tinggi guna mendukung efisiensi dalam proses penyaluran melalui sistem transmisi. Selanjutnya, energi tersebut diturunkan ke tegangan menengah dan rendah untuk kemudian disalurkan ke konsumen akhir melalui sistem distribusi [11].

Dalam sistem tenaga listrik skala besar, tegangan keluaran dari generator biasanya dinaikkan terlebih dahulu menjadi tegangan tinggi (TT) atau bahkan tegangan ekstra tinggi (TET) dengan bantuan transformator step-up. Tujuannya adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya selama proses penyaluran energi melalui jaringan transmisi. Setelah mencapai Gardu Induk (GI), tegangan tersebut kemudian diturunkan ke tingkat tegangan menengah (TM) menggunakan transformator step-down. Selanjutnya, energi listrik dialirkan melalui jaringan distribusi primer pada tegangan menengah, lalu kembali diturunkan di gardu distribusi menjadi tegangan rendah sebelum akhirnya disalurkan ke konsumen melalui jaringan distribusi sekunder.

B. Gardu Induk

Gardu induk berperan sebagai bagian vital dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menurunkan atau menaikkan tegangan serta melakukan pengamanan dan pengendalian distribusi energi. Dalam operasionalnya, gardu induk berfungsi sebagai tempat transformasi tegangan serta titik kontrol dan monitoring sistem [11].

Gardu Induk Ranomuut merupakan salah satu fasilitas penting dalam jaringan tenaga listrik di wilayah Sulawesi Utara yang berfungsi sebagai titik penghubung antara jaringan transmisi dan sistem distribusi. Beroperasi pada tegangan 70/20 kV dan berlokasi di Kecamatan Tikala, Kota Manado, gardu ini dilengkapi dengan transformator step-down, Circuit Breaker tipe vakum, serta sistem kontrol berbasis digital untuk memastikan keandalan pasokan listrik ke wilayah sekitarnya. Gardu Induk Ranomuut memiliki rating tegangan 70 kV dan 20 kV, dan menjadi penghubung strategis antara sistem transmisi dan jaringan distribusi. Saat ini, GI Ranomuut terinterkoneksi dengan beberapa gardu induk lainnya di jaringan kelistrikan Sulawesi Utara, termasuk GI Teling, GI Paniki, dan GI Bitung, serta berperan sebagai titik suplai utama ke jaringan distribusi primer kota.



Gambar 1 Sistem Tenaga Listrik

Gardu induk memiliki beberapa macam yang dapat dijumpai, serta bisa dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu:

1) Berdasarkan Besar Tegangan

Berdasarkan klasifikasi tingkat tegangannya, gardu induk dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) yang beroperasi pada tegangan 500 kV dan 275 kV, serta Gardu Induk Tegangan Tinggi (GI) yang beroperasi pada tegangan 150 kV dan 70 kV. Secara umum, kedua jenis gardu ini memiliki komponen yang hampir serupa

2) Berdasarkan Pemasangan Peralatan

Ditinjau dari letak pemasangan peralatannya, gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu:

a. Gardu Induk Pemasangan Luar

Jenis gardu induk ini menempatkan sebagian besar peralatannya di area luar gedung. Namun, beberapa komponen seperti sistem kendali, proteksi, kontrol, dan peralatan bantu lainnya tetap diletakkan di dalam ruangan.

b. Gardu Induk Pemasangan Dalam

Gardu induk jenis ini menempatkan hampir seluruh peralatannya, seperti switchgear, busbar, isolator, sistem kontrol dan proteksi, serta cubicle, di dalam bangunan. Hanya transformator daya yang biasanya tetap berada di luar gedung. Gardu induk tipe ini dikenal dengan istilah Gas Insulated Substation (GIS). GIS merupakan inovasi dari sistem gardu induk konvensional, dan umumnya dibangun di kawasan perkotaan atau daerah dengan kepadatan tinggi.

c. Gardu Induk Kombinasi Pasangan Luar dan Pasangan Dalam

Gardu induk ini mengatur penempatan peralatan switchgear baik di dalam maupun di luar bangunan. Contohnya adalah komponen seperti tie line dan saluran udara tegangan tinggi (SUTT) yang berada di luar sebelum terhubung ke switchgear di dalam.

C. Kubikel Tegangan Menengah

Kubikel tegangan menengah merupakan unit peralatan listrik yang dipasang di fasilitas seperti Gardu Induk, Gardu Distribusi, maupun Gardu Hubung, yang memiliki fungsi utama dalam proses pengaturan, pemutusan, penghubungan, perlindungan, serta pendistribusian daya listrik pada jaringan dengan level tegangan menengah [6]. Kubikel dibagi berdasarkan fungsinya dalam sistem distribusi listrik, yaitu:

1) Kubikel Incoming (Kubikel Masuk)

Kubikel Incoming berfungsi sebagai titik sambung antara sisi sekunder dari transformator daya dan busbar bertegangan 20 kV. Tegangan yang dihasilkan dari sisi sekunder trafo sebesar 20 kV akan diteruskan secara langsung ke busbar yang berada di dalam sistem kubikel tersebut.

2) Kubikel Outgoing (Kubikel Keluar)

Kubikel Outgoing berfungsi sebagai penghubung antara busbar 20 kV yang terletak di dalam sistem kubikel dengan jaringan distribusi tegangan menengah. Pada bagian ini umumnya dilengkapi dengan perangkat Circuit Breaker (CB) sebagai pemutus arus.

3) Kubikel Kopel (Penghubung)

Kubikel Kopel adalah salah satu tipe kubikel yang berfungsi untuk menghubungkan antara dua sistem rel, yaitu rel 1 dan

rel 2, guna menjaga kontinuitas dan fleksibilitas dalam sistem distribusi.

4) Kubikel PT (Potential Transformer)

Kubikel Potensial Transformer (PT) berfungsi sebagai unit pengukuran, yang dilengkapi dengan sakelar pemisah (PMS) dan transformator tegangan. Transformator ini berperan dalam menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 100 V, yang kemudian digunakan untuk menyuplai tegangan pada perangkat pengukur energi listrik (kWh meter) dalam sistem kubikel.

5) Kubikel Pemakaian Sendiri

Kubikel Pemakaian Sendiri (trafo PS) berperan sebagai penghubung antara busbar dan beban yang digunakan untuk kebutuhan internal atau pemakaian sendiri di Gardu Induk.

D. Circuit Breaker (CB)

Circuit Breaker merupakan alat proteksi otomatis yang dioperasikan untuk membuka atau menutup aliran listrik dalam suatu rangkaian, baik saat sistem beroperasi normal maupun ketika terjadi gangguan seperti short circuit (hubung singkat). Jenis CB yang menggunakan media vakum dan gas SF₆ sering digunakan pada sistem tegangan menengah hingga tinggi karena kemampuannya yang cepat dan efisien dalam menghentikan aliran arus listrik [3].

Perangkat ini digunakan untuk memutus atau menyambung aliran listrik saat sistem bekerja dalam kondisi berbeban, serta tetap dapat beroperasi ketika terjadi gangguan seperti hubung singkat pada jaringan atau peralatan lain. Berdasarkan jenis isolator dan media dielektrik yang digunakan, Circuit Breaker diklasifikasikan menjadi empat tipe utama, yaitu yang menggunakan minyak, udara bertekanan (air blast), vakum, dan gas SF₆ sebagai media pemadam busur apinya.

Circuit Breaker tegangan menengah yang digunakan di Gardu Induk umumnya dirancang agar bisa dilepas dari ruang (chamber) dengan cara ditarik keluar, sehingga proses perawatan atau penggantian menjadi lebih mudah. CB yang diproduksi dengan spesifikasi dan rating yang sama biasanya memiliki desain dan susunan komponen yang seragam, sehingga bisa saling ditukar antar posisi (booth) tanpa memerlukan banyak cadangan unit. Selain itu, selama beroperasi, bagian aktif CB dilindungi oleh penutup logam yang dihubungkan ke tanah untuk menjamin keselamatan operator.

E. Pemeliharaan

Pemeliharaan Peralatan dibagi menjadi dua jenis, yaitu pemeliharaan preventif dan korektif. Pemeliharaan preventif dilakukan secara berkala sebagai langkah pencegahan agar kerusakan tidak terjadi, sedangkan pemeliharaan korektif dilakukan setelah munculnya kerusakan dengan tujuan untuk memperbaiki dan memulihkan fungsi peralatan. Saat ini, pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi dianggap lebih efektif karena mampu mengidentifikasi tanda-tanda awal kerusakan, sehingga tindakan dapat diambil sebelum kegagalan benar-benar terjadi [5].

1) Perawatan Preventive

- Perawatan Berkala (Periodic Maintenance).
- Perawatan Prediktif (Predictive Maintenance)

2) Perawatan Korektif

- Shutdown Maintenance
- Breakdown Maintenance

F. Pengukuran dan Pengujian Tahanan Isolasi

TABEL 1

Standar Acuan Tahanan Isolasi

Pengukuran	Hasil Ukur Uji
Tahanan Isolasi	1 kv = 1 MΩ

Mengacu pada pedoman Pemeliharaan Peralatan SE.032/PST/1984 serta standar VDE (Verband der Elektrotechnik) dalam katalog 228/4, nilai minimum tahanan isolasi pada suhu operasi normal ditetapkan sebesar 1 Mega Ohm untuk setiap 1 kilo Volt (1 kV = 1 MΩ) [1]. Untuk menghitung tahanan isolasi minimal, dapat menggunakan persamaan:

$$R = \left(\frac{1000 \cdot U}{Q} \right) U. 2,5 \dots \dots \dots (1)$$

R = Tahanan Isolasi Minimal

U = Tegangan Kerja

Q = Tegangan Megger

1000 = Bilangan tetap

2,5 = Faktor Keamanan

G. Pengukuran dan Pengujian Arus Bocor

Mengacu pada Buku Pemeliharaan Peralatan SE.032/PST/1984 serta standar VDE (Verband der Elektrotechnik) dalam katalog 228/4, nilai minimum tahanan isolasi saat kondisi operasi ditentukan sebesar 1 Mega Ohm untuk setiap 1 kilo Volt [2]. Perlu dicatat bahwa 1 kV merujuk pada tegangan antar fasa terhadap tanah, dan arus bocor yang masih diperbolehkan adalah sebesar 1 mA untuk setiap kV. Perhitungan arus bocor dapat dilakukan menggunakan persamaan:

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots (2)$$

I = Arus Bocor

V = Tegangan

R = Tahanan

H. Pengukuran dan Pengujian Tahanan Kontak

Nilai ambang untuk pengujian tahanan kontak mengacu pada standar IEC 60694, yaitu sebesar $R \leq 50$ mikro Ohm atau maksimal 120% dari nilai FAT (Factory Acceptance Test), dengan arus pengujian sebesar 100 Ampere [1].

$$R = \frac{V}{I} \dots \dots \dots (3)$$

R = Tahanan

V = Tegangan

I = Arus

I. Kecerampakan Kontak

Proses pengujian kecerampakan dilakukan guna mengukur waktu kerja masing-masing breaker dan memastikan bahwa seluruh fasa circuit breaker beroperasi secara konsisten dan serentak dalam menjalankan fungsi pemutusan maupun penyambungan arus [2]. Kecerampakan kontak diukur dengan membandingkan perbedaan antara nilai waktu maksimum dan minimum. Sesuai dengan standar yang telah ditetapkan,

perbedaan waktu tersebut tidak boleh melebihi 10 ms. [7]. Batasan nilai selisih waktu keserempakan yaitu $\Delta t \leq 10$ ms berdasarkan referensi dari pabrikan ABB (ASEA Brown Boveri).

$$\Delta t = t_{\text{maks}} - t_{\text{min}} \dots\dots\dots(4)$$

Δt = Selisih waktu

t_{maks} = Waktu tertinggi

t_{min} = Waktu terendah

J. Pengukuran Kevakuman Circuit Breaker model Vacuum (arus bocor)

Pengujian karakteristik media vakum pada pemutus sirkuit bertujuan untuk memastikan bahwa ruang kontak utama (breaking chamber) tetap dalam kondisi hampa udara, sehingga tetap efektif dalam memadamkan busur api listrik. Circuit Breaker tipe vakum umumnya digunakan pada sistem tegangan menengah dan hingga saat ini masih terus dikembangkan untuk aplikasi hingga level tegangan 36 kV. [6].

Media vakum diketahui memiliki kemampuan isolasi yang lebih baik dibandingkan udara biasa. Meskipun demikian, performa Circuit Breaker vakum dapat menurun apabila terjadi infiltrasi udara ke dalam ruang pemutus, yang umumnya disebabkan oleh kerusakan pada seal atau retak pada isolator housing dari interrupter. Kebocoran ini dapat dideteksi melalui kenaikan arus bocor saat pengujian. Semakin rendah nilai tahanan isolasi pada ruang vakum, maka semakin besar arus bocor yang terukur. Prinsip kerja alat uji Circuit Breaker vakum adalah dengan mengukur arus bocor yang mengalir antara kontak tetap (fixed contact) dan kontak bergerak (moving contact) saat pemutus dalam kondisi terbuka (open). Jika arus bocor saat pengujian kevakuman VCB melebihi 100 mA, maka interrupter dianggap mengalami kebocoran dan harus diganti, berdasarkan standar SE.032/PST/1984 PLN dan pedoman alat penguji vakum seperti Vanguard VBT-75P.

II. DATA DAN PERHITUNGAN

A. Spesifikasi Circuit Breaker



Gambar 2 Circuit Breaker 20 kV di GI Ranomuut

TABEL 2

Spesifikasi Circuit Breaker

SPESIFIKASI CIRCUIT BREAKER	
Merek	SIEMENS
Type	3AH5274-2
Tegangan	24.0 kV
Rated current	1250 A
Breaking Capacity	25.0 kA
Mekanik Penggerak	Motor Spring
Media Pemadam	Vacuum

Data yang diambil untuk penelitian ini berlokasi di Gardu Induk Ranomuut, yang mempunyai level tegangan 20-24 kV Dan Circuit Breaker yang di gunakan adalah tipe three pole dan media pemadam Vacuum.

Untuk jenis pemeliharaan circuit breaker 20 kV biasanya dilaksanakan setiap 1 tahun. Pengujian untuk circuit breaker yang dilakukan adalah mengukur tahanan isolasi, mengukur tahanan kontak, mengukur keserempakan, dan mengukur hasil uji kevakuman.

B. Data Pengukuran Tahanan Isolasi

Pengukuran tahanan isolasi pada Circuit Breaker dilakukan menggunakan alat Insulation Tester untuk mengetahui seberapa besar nilai tahanan antara bagian yang bertegangan (fasa) dengan bagian yang dihubungkan ke tanah (casing), serta antara terminal input dan output dalam fasa yang sama. Berdasarkan pemeliharaan pengukuran tahanan isolasi pada tanggal 23 April 2024 dengan menggunakan tegangann peralatan magger 5kV, dapat diperoleh hasil pengukuran sebagai berikut.

TABEL 3

Tahanan Isolasi kondisi awal

Titik Ukur	Standar	Hasil Pengukuran (M Ω)		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
Atas-Bawah	1 KV = 1M Ω	737 M Ω	540 M Ω	512 M Ω
Atas-Tanah		49.6 G Ω	34.7 G Ω	61 G Ω
Bawah-Tanah		46.9 G Ω	50.7 G Ω	47.3 G Ω
Fasa-Tanah		47.3 G Ω	46 G Ω	47.5 G Ω

TABEL 4

Tahanan Isolasi kondisi akhir

Titik Ukur	Standar	Hasil Pengukuran (MΩ)		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
Atas-Bawah	1 KV = 1MΩ	65.6	58.5	47.3
		GΩ	GΩ	GΩ
Atas-Tanah		56.2	63.9	50.8
		GΩ	GΩ	GΩ
Bawah-Tanah		57	52.9	47.3
		GΩ	GΩ	GΩ
Fasa-Tanah		58.4	46.5	47.5
		GΩ	GΩ	GΩ

1) Perhitungan Tahanan Isolasi

$$R = \left(\frac{1000 \cdot U}{Q} \right) U. 2,5$$

Diketahui:

U: 20000

Q: 5000

$$R = \left(\frac{1000 \times 20000}{5000} \right) \cdot 20000 \cdot 2,5$$

$$R = 4000 \times 50000$$

$$R = 200.000.000 \Omega$$

$$R = 200 \text{ M}\Omega$$

2) Perhitungan Arus Bocor .

a. Perhitungan Arus Bocor berdasarkan data tabel 3

Hasil hitung Arus Bocor titik Ukur antara atas dan Bawah:

- Fasa R

$$I = \frac{5000V}{737} = 6,7 \text{ mA}$$

- Fasa S

$$I = \frac{5000V}{540} = 9,2 \text{ mA}$$

- Fasa T

$$I = \frac{5000V}{512} = 9,7 \text{ mA}$$

Hasil Hitung arus Bocor titik Ukur antara atas dan tanah:

- Fasa R

$$I = \frac{5000V}{49600} = 0,06 \text{ mA}$$

- Fasa S

$$I = \frac{5000V}{61000} = 0,076 \text{ mA}$$

- Fasa T

$$I = \frac{5000V}{61000} = 0,076 \text{ mA}$$

Hasil hitung arus Bocor titik ukur antara bawah dan tanah:

- Fasa R

$$I = \frac{5000V}{46900} = 0,08 \text{ mA}$$

- Fasa S

$$I = \frac{5000V}{50700} = 0,09 \text{ mA}$$

- Fasa T

$$I = \frac{5000V}{47300} = 0,10 \text{ mA}$$

Hasil hitung arus bocor titik ukur antara fasa dan tanah:

- Fasa R

$$I = \frac{5000V}{47300} = 0,10 \text{ mA}$$

- Fasa S

$$I = \frac{5000V}{46000} = 0,09 \text{ mA}$$

- Fasa T

$$I = \frac{5000V}{47500} = 0,09 \text{ mA}$$

b. Perhitungan Arus Bocor berdasarkan data tabel 4

Hasil hitung Arus Bocor titik Ukur antara atas dan Bawah:

- Fasa R

$$I = \frac{5000V}{65600} = 0,07 \text{ mA}$$

- Fasa S

$$I = \frac{5000V}{58500} = 0,08 \text{ mA}$$

- Fasa T

$$I = \frac{5000V}{47300} = 0,10 \text{ mA}$$

Hasil Hitung arus Bocor titik Ukur antara atas dan tanah:

- Fasa R

$$I = \frac{5000V}{56200} = 0,08 \text{ mA}$$

- Fasa S

$$I = \frac{5000V}{63900} = 0,07 \text{ mA}$$

- Fasa T

$$I = \frac{5000V}{50800} = 0,09 \text{ mA}$$

Hasil hitung arus Bocor titik ukur antara bawah dan tanah:

- Fasa R

$$I = \frac{5000V}{57000} = 0,08 \text{ mA}$$

- Fasa S

$$I = \frac{5000V}{52900} = 0,09 \text{ mA}$$

- Fasa T

$$I = \frac{5000V}{47300} = 0,10 \text{ mA}$$

Hasil hitung arus bocor titik ukur antara fasa dan tanah:

- Fasa R

$$I = \frac{5000V}{58400} = 0,08 \text{ mA}$$

- Fasa S

$$I = \frac{5000V}{46500} = 0,10 \text{ mA}$$

- Fasa T

$$I = \frac{5000V}{47500} = 0,10 \text{ mA}$$

C. Data Pengukuran Tahanan Kontak

Pengukuran tahanan kontak bertujuan untuk mengetahui seberapa besar hambatan listrik yang terjadi pada titik sambungan antara kontak tetap dan kontak bergerak saat Circuit Breaker berada dalam posisi tertutup. Pada perhitungan ini hanya menghitung berdasarkan data tahanan kontak titik ukur Atas-Bawah saja.

- 1) Untuk menghitung Tahanan Kontak berdasarkan data pada tabel 5 dengan injeksi arus peralatan 100 A

- Fasa R

$$V = 65,8 \text{ mV}$$

$$I = 100 \text{ A}$$

$$R = \frac{658 \times 10^{-3}}{100}$$

$$R = 6,58 \times 10^{-6}$$

$$R = 65,8 \mu\Omega$$

- Fasa S

$$V = 65,4 \text{ mV}$$

$$I = 100 \text{ A}$$

$$R = \frac{654 \times 10^{-3}}{100}$$

$$R = 6,54 \times 10^{-6}$$

$$R = 65,4 \mu\Omega$$

- Fasa T

$$V = 69,2 \text{ mV}$$

$$I = 100 \text{ A}$$

$$R = \frac{692 \times 10^{-3}}{100}$$

$$R = 6,92 \times 10^{-6}$$

$$R = 69,2 \mu\Omega$$

- 2) Untuk menghitung Tahanan Kontak berdasarkan data pada tabel 6 dengan injeksi arus peralatan 100 A

- Fasa R

$$V = 40,8 \text{ mV}$$

$$I = 100 \text{ A}$$

$$R = \frac{408 \times 10^{-3}}{100}$$

$$R = 4,08 \times 10^{-6}$$

$$R = 40,8 \mu\Omega$$

- Fasa S

$$V = 39,5 \text{ mV}$$

$$I = 100 \text{ A}$$

$$R = \frac{395 \times 10^{-3}}{100}$$

$$R = 3,95 \times 10^{-6}$$

$$R = 39,5 \mu\Omega$$

- Fasa T

$$V = 42,3 \text{ mV}$$

$$I = 100 \text{ A}$$

$$R = \frac{423 \times 10^{-3}}{100}$$

$$R = 4,23 \times 10^{-6}$$

$$R = 42,3 \mu\Omega$$

TABEL 5

Pengukuran Tahanan Kontak Kondisi Awal

Titik Ukur	Standar	Hasil Pengukuran ($\mu\Omega$)		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
Atas-Bawah (PMT posisi ON)	$R \leq 50 \mu\Omega / 120 \%$	65,8	65,4	69,2
Atas $\mu\Omega$	Nilai FAT	59,6	58,8	60,4
Bawah $\mu\Omega$		59,6	59,1	60,7

TABEL 6

Pengukuran Tahanan Kontak Kondisi Akhir

Titik Ukur	Standar	Hasil Pengukuran ($\mu\Omega$)		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
Atas-Bawah (PMT posisi ON)	$R \leq 50 \mu\Omega / 120 \%$	40,8	39,5	42,3
Atas $\mu\Omega$	Nilai FAT	36,6	35,4	34,25
Bawah $\mu\Omega$		36,7	36,3	34,23

D. Data Pengujian Kecerampakan Kontak

TABEL 7

Pengukuran Kecerampakan Kondisi Awal

Titik Ukur	Standar	Hasil Pengukuran (ms)		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
Open	$\Delta t < 10 \text{ ms}$	40,3	41	40,1
Close		41,6	42,5	42,3
Close-Open		90,3	91,5	90,6

TABEL 8

Pengukuran Keserampakan Kondisi Akhir

Titik Ukur	Standar	Hasil Pengukuran (ms)		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
Open	$\Delta t < 10 \text{ ms}$	37.80	37.40	37.60
Close		44.40	44.60	44.60
Close-Open		87	86.10	86.70

Pengujian keserampakan pada Circuit Breaker bertujuan untuk mengetahui waktu respon dari masing-masing fasa secara individu, serta menilai sejauh mana keserampakan kerja antar fasa saat melakukan proses penutupan maupun pembukaan rangkaian listrik.

1) Menghitung Keserampakan Kontak dengan data pada tabel 7

- Δt Open = waktu tertinggi–waktu terendah

$$\Delta t \text{ Open} = 41 \text{ ms} - 40.1 \text{ ms}$$

$$\Delta t \text{ Open} = 0,9 \text{ ms}$$

- Δt Close = waktu tertinggi–waktu terendah

$$\Delta t \text{ Close} = 42,5 \text{ ms} - 41.6 \text{ ms}$$

$$\Delta t \text{ Close} = 0,9 \text{ ms}$$

- Δt Close-Open = waktu tertinggi–waktu terendah

$$\Delta t \text{ Close-Open} = 91.5 \text{ ms} - 90.3 \text{ ms}$$

$$\Delta t \text{ Close-Open} = 1,2 \text{ ms}$$

2) Menghitung Keserampakan Kontak dengan data pada tabel 8

- Δt Open = waktu tertinggi–waktu terendah

$$\Delta t \text{ Open} = 37,80 \text{ ms} - 37,60 \text{ ms}$$

$$\Delta t \text{ Open} = 0,2 \text{ ms}$$

- Δt Close = waktu tertinggi–waktu terendah

$$\Delta t \text{ Close} = 44,60 \text{ ms} - 44,40 \text{ ms}$$

$$\Delta t \text{ Close} = 0,2 \text{ ms}$$

- Δt Close-Open = waktu tertinggi–waktu terendah

$$\Delta t \text{ Close-Open} = 87 \text{ ms} - 86,10 \text{ ms}$$

$$\Delta t \text{ Close-Open} = 0,9 \text{ ms}$$

E. Data Pengujian Nilai Vakum

Pengujian media pemutus vakum dilakukan untuk mengevaluasi apakah kondisi hampa di ruang kontak utama (breaking chamber) masih terjaga, karena kevakuman tersebut berperan penting dalam menghentikan busur api saat Circuit Breaker bekerja.

TABEL 9

Pengujian Nilai Vakum Kondisi Awal

	Standar	Hasil Pengukuran (mA)		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
<u>Uji Vacuum</u>	$< 100 \text{ mA}$	53,7	58,4	374.4

TABEL 10

Pengujian Nilai Vakum Kondisi Akhir

	Standar	Hasil Pengukuran (mA)		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
<u>Uji Vacuum</u>	$< 100 \text{ mA}$	39.8	48.9	72

III. HASIL DAN ANALISA

A. Analisa Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi

TABEL 11

Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi

Titik Ukur	Fasa	Hasil Pengukuran	
		Kondisi Awal	Kondisi Akhir
Atas-Bawah	R	737	65.600
	S	540	58.500
	T	512	47.300
Ata-Tanah	R	49.600	56.200
	S	34.700	63.900
	T	61.000	50.800
Bawah-Tanah	R	46.900	57.000
	S	50.700	52.900
	T	47.300	47.300
Fasa-Tanah	R	47.300	58.400
	S	46.000	46.500
	T	47.500	47.500

Dari data pengujian Tahanan Isolasi berdasarkan data pengujian pada tabel 3 dan 4 Analisis Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi Tahanan isolasi merupakan indikator utama dalam menilai sejauh mana kemampuan sistem insulasi Circuit Breaker dalam menghambat terjadinya aliran arus bocor yang tidak diinginkan. Berdasarkan hasil pengujian awal yang dilakukan, diketahui bahwa nilai tahanan isolasi pada seluruh fasa—baik antara terminal atas-bawah maupun terhadap tanah,

masih berada di atas ambang batas minimal yang ditetapkan sebesar 200 M Ω . Meskipun demikian, terdapat variasi antar fasa yang cukup signifikan, terutama pada fasa T yang menunjukkan nilai paling rendah, yaitu sebesar 512 M Ω . Nilai ini meskipun belum berada di bawah standar, namun mengindikasikan adanya degradasi performa insulasi yang perlu mendapatkan perhatian khusus. Setelah dilakukan proses pemeliharaan berupa pembersihan permukaan isolator dan pengujian ulang, terjadi peningkatan yang sangat signifikan pada seluruh fasa. Nilai akhir pengujian berada di kisaran 47.300M Ω atau 47,3 G Ω hingga 65.600 M Ω , menunjukkan bahwa sistem isolasi telah pulih dan kembali ke kondisi optimal sesuai ekspektasi teknis.

B. Analisa Hasil Perhitungan Arus Bocor

Dari hasil perhitungan nilai kebocoran arus yang diizinkan sesuai standar yaitu 1 KV = 1 mA. Meskipun hasil pengukuran tahanan isolasi pada Circuit Breaker 20 kV menunjukkan nilai di atas standar minimum yang ditentukan (≥ 200 M Ω), namun ditemukan bahwa nilai arus bocor pada beberapa titik ukur, khususnya antara terminal atas dan bawah pada kondisi awal melebihi batas maksimum 5 mA (dengan tegangan uji 5 kV). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tahanan isolasi secara nominal memenuhi batas minimum, tidak cukup tinggi untuk menekan arus bocor sesuai standar. Setelah dilakukan pemeliharaan, semua nilai arus bocor turun drastis dan kembali berada di bawah standar yang ada, membuktikan perbaikan sistem isolasi berhasil.

TABEL 12

Hasil Perhitungan Arus Bocor

Titik Ukur	Fasa	Hasil Perhitumgan	
		Kondisi Awal	Kondisi Akhir
Atas-Bawah	R	6,7 mA	0,07 mA
	S	9,2 mA	0,08 mA
	T	9,7 mA	0,10 mA
Atas-Tanah	R	0,06 mA	0,08 mA
	S	0,06 mA	0,07 mA
	T	0,076 mA	0,09mA
Bawah-Tanah	R	0,08 mA	0,08 mA
	S	0,09 mA	0,09 mA
	T	0,10 mA	0,10 mA
Fasa-Tanah	R	0,10 mA	0,08 mA
	S	0,09 mA	0,10 mA
	T	0,09 mA	0,10 mA

C. Hasil dan Analisa Perhitungan Tahanan Kontak

TABEL 13

Hasil Perhitungan Tahanan Kontak

Titik Ukur	Injeksi Arus	Fasa	Hasil Perhitungan ($\mu\Omega$)	
			Kondisi awal	Kondisi akhir
Atas-Bawah	100 A	R	65,8	40,8
		S	65,4	39,5
		T	69,2	42,3

Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan tahanan kontak pada kondisi awal, didapatkan nilai masing-masing fasa yaitu 65,8 $\mu\Omega$ untuk fasa R, 65,4 $\mu\Omega$ untuk fasa S, dan 69,2 $\mu\Omega$ untuk fasa T. Nilai-nilai ini telah melebihi ambang batas standar sebesar 50 $\mu\Omega$ atau 120% dari nilai FAT, meskipun selisihnya belum terlalu signifikan. Kenaikan tahanan ini kemungkinan disebabkan oleh kebocoran pada ruang vakum, yang memungkinkan udara atau kelembaban masuk ke dalam interrupter. Kondisi tersebut dapat menyebabkan oksidasi pada permukaan kontak sehingga meningkatkan resistansi sambungan. Setelah dilakukan penggantian Vacuum Circuit Breaker (VCB), pengujian kembali menunjukkan penurunan nilai tahanan kontak ke angka yang memenuhi standar, yaitu 40,8 $\mu\Omega$ untuk fasa R, 39,5 $\mu\Omega$ untuk fasa S, dan 42,3 $\mu\Omega$ untuk fasa T. Dengan demikian, perbaikan yang dilakukan terbukti berhasil mengembalikan kualitas koneksi internal pada Circuit Breaker.

D. Hasil dan Analisa Perhitungan Keserampakan Kontak

Berdasarkan hasil pengujian Circuit Breaker pada kondisi awal, diperoleh nilai selisih waktu (Δt) saat dalam posisi tertutup (close) sebesar 0,9 ms dan dalam posisi terbuka (open) juga sebesar 0,9 ms. Sementara itu, saat pengujian dalam mode open-close-open, nilai Δt yang tercatat adalah 1,2 ms. Pada pengujian ulang setelah perbaikan (kondisi akhir), nilai Δt saat CB dalam posisi close dan open menurun menjadi 0,2 ms, dan pada mode open-close-open tercatat sebesar 0,9 ms. Nilai-nilai tersebut berada dalam batas toleransi yang diizinkan, sehingga dapat disimpulkan bahwa Circuit Breaker mampu melakukan operasi pemutusan (trip) secara andal ketika terjadi gangguan. Namun, jika nilai Δt melebihi ambang batas 10 ms, maka keserampakan kerja antar fasa dianggap tidak andal. Selisih waktu yang terlalu besar dapat menyebabkan ketidakseimbangan arus atau tegangan antar fasa, yang berpotensi merusak peralatan lain yang terhubung ke CB. Oleh karena itu, bila nilai yang diperoleh melebihi standar, maka perlu dilakukan perbaikan diikuti dengan pengujian ulang untuk memastikan kembali keandalan keserampakan CB.

TABEL 14

Hasil Perhitungan Kecerempakan Kontak

Perhitungan	Fasa	Hasil Perhitungan	
		Kondisi Awal	Kondisi Akhir
Open	R,S,T	0,9 ms	0,2 ms
Close	R,S,T	0,9 ms	0,2 ms
Close-Open	R,S,T	1,2 ms	0,9 ms

E. Analisa Hasil Uji Kevakuman

TABEL 15

Hasil Uji Nilai Vakum

Fasa	Nilai Vacuum awal (mA)	Nilai Vacuum Akhir (mA)	Standar
R	53,7	39,8	< 100 mA
S	58,4	48,9	
T	374,4	72	

Pada data hasil kevakuman yang diperoleh pada kondisi awal Fasa T menunjukkan nilai abnormal (374,4 mA) dimana hal ini yang kemungkinan menjadi penyebab adanya bunyi desis padat pada circuit breaker yang mengidentifikasi adanya kebocoran arus pada vacuum chamber. Sehingga hal ini dapat mempengaruhi keandalan sebuah circuit breaker di karenakan vacuum berguna sebagai media pemadam terhadap busur api dan harus dilakukan penanganan sehingga dilakukan penggantian Circuit Breaker.

Setelah dilakukan penggantian dan penanganan pemeliharaan nilainya kembali normal. Ini menunjukkan indikasi adanya kontaminasi atau kebocoran vacuum chamber yang berhasil ditangani.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, perhitungan, serta analisa terhadap performa Circuit Breaker 20 kV tipe vacuum di kubikel SR 7 Gardu Induk Ranomuut, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Dari pengujian terhadap sejumlah parameter seperti isolasi, kontak, kevakuman, kecerempakan, dan arus bocor, ditemukan bahwa kondisi awal Circuit Breaker 20 kV di Gardu Induk Ranomuut belum memenuhi standar teknis, dengan ketidaksesuaian paling menonjol terjadi pada fasa T. Namun, setelah dilakukan tindakan perbaikan dan penggantian komponen, seluruh parameter kembali berada

dalam rentang yang ditetapkan oleh standar, sehingga Circuit Breaker dapat dinyatakan layak dan andal untuk dioperasikan.

- 2) Beberapa faktor yang memengaruhi tingkat keandalan performa Circuit Breaker antara lain adalah kebersihan isolator, kualitas kevakuman dalam ruang pemutus (vacuum chamber), kondisi fisik pada permukaan kontak, serta kecerempakan kinerja mekanisme buka-tutup. Ditemukannya kebocoran pada sistem vakum terbukti sebagai penyebab utama peningkatan tahanan kontak dan munculnya arus bocor, yang dapat berdampak negatif terhadap kinerja pemutus.
- 3) Setelah hasil pengujian dibandingkan dengan acuan standar teknis operasional — yaitu tahanan isolasi >200 M Ω , arus bocor <1 mA, tahanan kontak <50 $\mu\Omega$, dan selisih waktu kecerempakan (Δt) <10 ms — serta setelah dilakukan pemeliharaan, seluruh parameter terbukti telah memenuhi ketentuan. Dengan demikian, Circuit Breaker telah memenuhi persyaratan teknis dan operasional sesuai standar PLN dan standar internasional yang berlaku.

Secara keseluruhan, kondisi awal Circuit Breaker menunjukkan adanya degradasi performa, terutama pada sisi kevakuman dan kontak, namun setelah dilakukan tindakan pemeliharaan dan penggantian, semua parameter kembali memenuhi standar kelayakan operasi. Hal ini menunjukkan pentingnya pengujian berkala untuk menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

B. Saran

Sebagai bentuk lanjutan dari hasil analisis dan penelitian yang diperoleh, berikut beberapa saran yang disampaikan oleh penulis:

- 1) Lakukan pemeliharaan rutin dan terjadwal terhadap Circuit Breaker, termasuk pengujian tahanan isolasi, tahanan kontak, kecerempakan, dan kevakuman, agar potensi kerusakan atau gangguan dapat terdeteksi sejak dini sebelum menimbulkan gangguan sistem.
- 2) Segera tangani setiap indikasi abnormalitas, seperti bunyi desis atau lonjakan nilai pengukuran, karena hal tersebut dapat menjadi pertanda awal kebocoran vakum atau kerusakan pada komponen internal CB.
- 3) Tingkatkan pencatatan histori pengujian dan pemeliharaan, sehingga setiap perubahan kecil pada performa CB dapat dilacak dan dievaluasi lebih akurat sebagai dasar pengambilan keputusan teknis.
- 4) Gunakan alat ukur yang modern dan berkualitas tinggi, seperti CB Analyzer dan Vacuum Tester, untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih presisi dan mempermudah proses evaluasi teknis.
- 5) Berikan pelatihan berkelanjutan kepada teknisi yang menangani pemeliharaan di gardu induk, agar mereka memahami pentingnya parameter pengujian dan dapat mengambil tindakan cepat saat ditemukan anomali.

V. REFERENSI

- [1] A. A. R. Saghawari, H. Tumaliang, dan N. Tulung, Analisa Kinerja Circuit Breaker Saat Gangguan pada Sisi 70 KV di Gardu Induk Teling, Skripsi, Univ. Sam Ratulangi, Manado, 2021.
- [2] Aramana, F. (2022). Analisa unjuk kerja circuit breaker 150

- kV di Gardu Induk Lopana (Skripsi Sarjana, Universitas Sam Ratulangi, Manado).
- [3] Firdaus, A. G. (2021). Analisa Pengujian Kelayakan Operasi Pemutus Tenaga (PMT) 150 kV Bay Penghantar Mandirancan I Berdasarkan Parameter Breaker Analyzer di Gardu Induk Sunyaragi. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 15(3), 252-267.
 - [4] G. M. Saroinsong, L. S. Patras, dan N. M. Tulung, Analisa Unjuk Kerja Circuit Breaker di Gardu Induk Sawangan, Skripsi Sarjana, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sam Ratulangi, Manado, 2021.
 - [5] Prakoso, M. A., & Joko, J. (2024). Analisis pengujian dan pemeliharaan dua tahunan pemutus tenaga (pmt) di gardu induk runkut 150 kv. *Jurnal Teknik elektro*, 13(2), 144-151.
 - [6] PT.PLN (Persero). (2014). Buku Pedoman Kubikel Tegangan Menengah amandemen/revisi Kepdir No 0520 K/DIR/2014.
 - [7] PT.PLN (Persero). (2014). Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT) amandemen/revisi Kepdir No 0520 K/DIR/2014.
 - [8] S. S. Akhmad dan A. S. Jamin, "Pengujian Tahanan Isolasi pada Pemutus Tenaga (PMT) 20 kV di Gardu Induk Tello 150 kV," *Prosiding SNTEI*, Makassar, 21 Sept. 2021
 - [9] Sri Hartanto, S. R. I., Reza Pahlavi, R. E. Z. A., & Tri Ongko Priyono, T. R. I. (2023). Pengujian Kinerja PMT 20 kV Pada Kubikel Netto Gardu Induk PLTMG Senayan. *Pengujian Kinerja PMT 20 kV Pada Kubikel Netto Gardu Induk PLTMG Senayan*, 26(1), 45-53.
 - [10] Wicaksono, A. (2020). Pengujian Tahanan Isolasi pada Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT) Kubikel Outgoing 20 kV Menggunakan Insulation Tester di Gardu Induk Bantul PT. PLN (Persero) UP2D JTY DCC 2 Yogyakarta. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta.
 - [11] Wulandari, P. R. A., & Agus Supardi, S. T. (2022). Analisis Kinerja PMT Dan Recloser Di Jaringan Distribusi 20 KV Pada PT PLN (Persero) UP3 Klaten (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
 - [12] Analisis Hasil Uji PMT 150 kV pada Gardu Induk Cilegon – didukung penelitian Vacuum CB (Gilang Hartama, 2022).
 - [13] Pratama, V. A. A., Supriyatna, S., & Sultan, S. (2024). Analisis kinerja circuit breaker pada medium voltage switchgear 20 kV. *Dielektrika – Jurnal Ilmiah Kajian Teori dan Aplikasi Teknik Elektro*, 11(2), xx–xx. Universitas Mataram.
 - [14] Firdaus, F., Mappedasse, M. Y., Mangesa, R. T., Yantahin, M., & Miru, A. S. (2023). Analisis hasil pengukuran tahanan isolasi pada pemutus tenaga (PMT) kubikel 20 kV di Gardu Induk Jeneponto.
 - [15] IEC 62271-100:2021 – High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: AC circuit-breakers. International Electrotechnical Commission, 2021.
 - [16] Purnomo, R. A., & Haryanto, F. (2022). Evaluasi Keserempakan Kontak dan Tahanan Kontak Vacuum Circuit Breaker menggunakan CB Analyzer. *Jurnal Rekayasa Energi*
 - [17] Irawan, B., & Febriansyah, F. (2018). Penerapan CB Analyzer untuk Menentukan Kelayakan Operasi Circuit Breaker 20 kV di Gardu Induk. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*.
 - [18] Arya, R. R., & Sari, D. K. (2020). Kinerja Circuit Breaker pada Gardu Induk 150/20 kV dengan Parameter Resistansi Kontak dan Vacuum Interrupter. *Jurnal Listrik dan Otomasi*
 - [19] Trisnawan, D. A., & Prasetyo, S. (2020). Studi Evaluasi Tahanan Kontak dan Kevakuman Circuit Breaker 20 kV pada Gardu Induk X. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*,
 - [20] Gustavsson, D., & Smith, J. (2023). Variation of high voltage circuit breaker performance parameters for condition monitoring. *Power Systems Research Journal*.

TENTANG PENULIS



Putra M. Firmansyah, penulis adalah anak bungsu dari dua bersaudara, lahir di Manado, Sulawesi Utara, pada tanggal 18 Desember 2003. Penulis menempuh Pendidikan pertama di TK Nururrahman, Dolog pada tahun 2008 sampai 2009, kemudian melanjutkan pendidikan ke SDN 121 Manado pada tahun 2009 sampai 2015, setelah itu pada tahun 2015 melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP N 8 Manado sampai tahun 2018. Kemudian Penulis melanjutkan Pendidikan di SMA N 9 Manado, pada tahun 2018 hingga lulus pada tahun 2021. Penulis memulai Pendidikan di Universitas Sam Ratulangi pada tahun 2021, di Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro dengan mengambil konsentrasi minat Teknik Tenaga Listrik (Tegangan Tinggi, Arus Kuat) pada tahun 2023. Dalam menempuh Pendidikan, Penulis telah melaksanakan Kerja Praktek di PT. PLN (Persero) Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) Sawangan, pada bulan Juli sampai Oktober 2024 yang berlokasi di Jl. Tololiu Supit, Tingkulu, Kec. Wanea, Kota Manado, Sulawesi Utara, dan mengikuti Kuliah Kerja Terpadu (KKT) pada bulan November sampai Desember 2024, pada KKT 141 yang berlokasi di Kelurahan Taratara 2, Kecamatan Tomohon Barat, Kota Tomohon. Kemudian pada bulan Maret sampai Mei tahun 2025 melakukan penelitian dan pengambilan data di PT PLN (Persero) Gardu Induk Ranomuut dan ULTG Sawangan, Manado. Penulis juga mengikuti organisasi baik didalam kampus maupun di luar kampus.