TUGAS AKHIR

ANALISIS EFEKTIVITAS *SURGE PROTECTIVE DEVICE* (SPD) PADA PANEL KONTROL GARDU INDUK BINJAI BERDASARKAN IEC 61643-11 DAN IEC 62305-4

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat-Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik (ST) Pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Disusun oleh:

DAFA RIZKY NURVIANTORO
2202722008

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama	: Dafa Rizky Nurviantoro
NPM	: 2207220088
Program Studi	: Teknik Elektro
Judul Skripsi	: Analisis Efektivitas *Surge Protective Device* (SPD) Pada Panel Kontrol Gardu Induk Binjai Berdasarkan IEC 61643-11 Dan IEC 62305-4
Bidang ilmu	: Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, Agustus 2026

Mengetahui dan menyetujui:
Dosen Pembimbing

Dr. Rohana, S.T., M.T.

Dosen Pembanding I/Penguji	Dosen Pembanding II/Penguji
Dr. Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T.	Noorly Evalina, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Elektro

Ketua,

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

SURAT PERNYATAAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap	: Dafa Rizky Nurviantoro
Tempat/Tgl Lahir	: Medan, 11 Januari 2005
NPM	: 2207220088
Fakultas	: Teknik
Program Studi	: Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

"ANALISIS EFEKTIVITAS *SURGE PROTECTIVE DEVICE* (SPD) PADA PANEL KONTROL GARDU INDUK BINJAI BERDASARKAN IEC 61643-11 DAN IEC 62305-4"

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, Agustus 2026
Saya yang menyatakan,



Dafa Rizky Nurviantoro

ABSTRAK

Gangguan tegangan lebih transien akibat sambaran petir dan switching dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan kontrol gardu induk sehingga diperlukan sistem proteksi internal yang mampu membatasi tegangan lebih. Salah satu perangkat yang digunakan adalah *Surge Protective Device* (SPD), yang efektivitasnya dipengaruhi oleh kesesuaian spesifikasi, instalasi, koordinasi proteksi, dan sistem pentanahan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kesesuaian instalasi dan spesifikasi SPD berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, mengevaluasi efektivitas SPD menggunakan simulasi *Alternative Transients Program Draw* (ATPDraw), serta menyusun rekomendasi teknis untuk optimalisasi proteksi panel kontrol Gardu Induk Binjai. Metode penelitian meliputi observasi kondisi eksisting, evaluasi berdasarkan konsep *Lightning Protection Zone* (LPZ), pemodelan sistem pada ATPDraw, dan simulasi arus surja sebesar 40 kA, 70 kA, dan 110 kA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa instalasi dan spesifikasi SPD telah memenuhi kriteria berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4. Tegangan puncak pada Titik Pengukuran 1 (TP1) sebesar 1700,6 V, 1847,3 V, dan 1974,5 V berhasil direduksi menjadi 335,5 V, 338,0 V, dan 339,8 V pada TP4, dengan persentase reduksi masing-masing 80,27%, 81,70%, dan 82,79%. Seluruh tegangan TP1 masih berada di bawah Up SPD LVMDP sebesar ≤2 kV, namun arus 110 kA telah melampaui Imax sebesar 100 kA. Berdasarkan hasil tersebut, rekomendasi teknis yang diberikan meliputi verifikasi kebutuhan rating arus SPD LVMDP melalui kajian risiko serta pemeriksaan kondisi dan karakteristik SPD secara berkala, terutama pada titik dengan margin Up relatif tipis, sehingga efektivitas sistem proteksi dapat dipertahankan selama operasi.

Kata kunci: ATPDraw, Gardu Induk Binjai, IEC 61643-11, IEC 62305-4, *Surge Protective Device* (SPD), Tegangan Lebih Transien.

ABSTRACT

Transient overvoltage disturbances caused by lightning strikes and switching events can damage control equipment in substations, necessitating an internal protection system capable of limiting overvoltage. One of the devices used for this purpose is a Surge Protective Device (SPD), whose effectiveness is influenced by the suitability of its specifications, installation, protection coordination, and grounding system. This study aims to analyze the compliance of SPD installation and specifications based on IEC 61643-11 and IEC 62305-4, evaluate SPD effectiveness using Alternative Transients Program Draw (ATPDraw) simulations, and develop technical recommendations for optimizing protection of the control panel at Binjai Substation. The research methods included observation of existing conditions, evaluation based on the Lightning Protection Zone (LPZ) concept, system modeling using ATPDraw, and simulation of surge currents of 40 kA, 70 kA, and 110 kA. The results show that the installation and specifications of the SPD comply with the criteria of IEC 61643-11 and IEC 62305-4. The peak voltages at Measurement Point 1 (TP1) of 1700.6 V, 1847.3 V, and 1974.5 V were reduced to 335.5 V, 338.0 V, and 339.8 V at Measurement Point 4 (TP4), corresponding to reduction percentages of 80.27%, 81.70%, and 82.79%, respectively. All TP1 voltage values remained below the SPD protection level (Up) of the LVMDP, which is ≤2 kV; however, the 110 kA surge current exceeded the maximum discharge current (Imax) of 100 kA. Based on these results, the technical recommendations include verifying the required current rating of the LVMDP SPD through a risk assessment and conducting periodic inspections of the SPD condition and characteristics, particularly at points where the Up margin is relatively narrow, in order to maintain the effectiveness of the protection system during operation.

Keywords: *ATPDraw, Binjai Substation, IEC 61643-11, IEC 62305-4, Surge Protective Device* (SPD), *Transient Overvoltage*.

KATA PENGANTAR



Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia serta hidayah-Nya kepada umat-Nya. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah menuntun umatnya beserta keluarga, sahabat dan umat Islam di seluruh dunia ini. Amiin.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat dalam meraih gelar Sarjana Teknik (S.T) pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Adapun judul Tugas Akhir ini adalah "**Analisis Efektivitas Surge Protective Device (SPD) Pada Panel Kontrol Gardu Induk Binjai Berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4**"

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak akan terwujud tanpa adanya bantuan, bimbingan dan motivasi dari berbagai pihak. Dari itu penulis haturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua Orang Tua tercinta yang telah memberikan dukungan bagi penulis secara moril maupun materil sehingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universita s Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Ibu Dr. Ir. Elvy Sahnur, S.T., M.Pd selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Beny Oktarialdi, S.T.,M.T selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Ibu Dr. Ir. Rohana, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing yang telah membantu menyelesaikan serta memberikan ide-ide dan masukan dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.

7. Bapak Arie Yudho Baskoro selaku pembimbing lapangan di PT PLN (Persero) ULTG Binjai, yang telah membantu memberikan data, informasi, serta arahan selama proses pengambilan data.
8. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat penulis.
9. Bapak dan Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
10. Teman-teman mahasiswa terutama stambuk '22 Teknik Elektro yang selalu memberi dukungan dan motivasi kepada penulis

Penulis telah berusaha untuk menyampaikan yang terbaik dalam tesis ini, namun penulis menyadari masih banyak terdapat kekurangan di dalamnya. Oleh karena itu penulis senantiasa mengharapkan kritik dan saran membangun dari pembaca untuk kesempurnaan tesis ini. Akhir kata, semoga tesis ini bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Medan, Juli 2026

Penulis

Dafa Rizky Nurviantoro

22027220088

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ..... **i**
SURAT PERNYATAAN TUGAS AKHIR ..... **ii**
ABSTRAK ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
KATA PENGANTAR ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**
DAFTAR TABEL ..... **xi**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **xii**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar belakang 1
1.2 Identifikasi masalah 4
1.3 Rumusan masalah 5
1.4 Ruang lingkup penelitian 5
1.5 Tujuan penelitian 6
1.6 Manfaat penelitian 7
1.7 Sistematika penulisan 7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA **9**
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan 9
2.1.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu 9
2.1.2 Gap analisis dan kontribusi penelitian 13
2.2 Gardu Induk 16
2.3 Sistem Tenaga Listrik 17
2.4 Panel kontrol 18
2.5 Tegangan Lebih (*Overvoltage*) 19
2.6 Surja Petir (*Lightning Surge*) 20
2.7 Surja Hubung (*Switching Transient*) 21
2.8 Sistem Proteksi Petir 22
2.8.1 Sistem Proteksi Eksternal 23
2.8.2 Sistem Proteksi Internal 24

2.9 *Surge Protective Device* (SPD) 25
2.9.1 Klasifikasi *Surge Protective Device* (SPD) 26
2.10 Standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4 29
2.10.1 Standar IEC 61643-11 29
2.10.2 Parameter SPD Menurut IEC 61643-11 30
2.10.3 Standar IEC 62305-4 32
2.11 Software ATP (*Alternative Transients Program*) 35
2.11.1 Komponen Pemodelan Sistem Proteksi Surja pada ATPDraw 36
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 38
3.1 Metode Penelitian 38
3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian 38
3.3 Data Penelitian 38
3.3.1 Data teknis sistem dan kontrol panel 39
3.3.2 Data spesifikasi dan instalasi SPD 41
3.3.3 Data pendukung pemodelan simulasi ATP 42
3.4 Diagram Blok Penelitian 42
3.5 Prosedur Penelitian 44
3.6 Diagram Alir Penelitian 49
3.6.1 Penjelasan Diagram Alir 51
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 55
4.1 Analisis Kondisi Eksisting dan Kesesuaian SPD Pada Panel Kontrol 55
4.1.1 Gambaran Jalur Proteksi Dan Pembagian LPZ 56
4.1.2 Kondisi Eksisting Pemasangan SPD Pada Panel Kontrol 58
4.1.3 Data Spesifikasi SPD Berdasarkan Lokasi Terpasang 59
4.1.4 Evaluasi kesesuaian penempatan spd terhadap konsep LPZ Berdasarkan IEC 62305-4 60
4.1.5 Evaluasi kesesuaian instalasi SPD berdasarkan IEC 62305-4 61
4.1.6 Evaluasi kesesuaian parameter teknis SPD berdasarkan IEC 61643-11 62
4.1.7 Ringkasan hasil evaluasi Tujuan Penelitian 1 65
4.2 Analisis Kinerja dan Efektifitas SPD Berdasarkan Simulasi ATPDraw 66
4.2.1 Skenario Simulasi Surja Petir pada ATPDraw 66

4.2.2 Pemodelan Sistem Proteksi Surja pada ATPDraw 67
4.2.3 Hasil Skenario Simulasi Surja Petir pada ATPDraw..... 71
4.2.4 Analisis Efektivitas SPD 77
4.2.5 Analisis Persentase Reduksi Tegangan Efektivitas SPD..... 81
4.2.6 Ringkasan Hasil Tujuan Penelitian 2 83
4.3 Rekomendasi Teknis untuk Optimasi Proteksi Surja pada Panel Kontrol Gardu Induk Binjai..... 84
4.3.1 Dasar Penyusuanan Rekomendasi..... 85
4.3.2 Rekomendasi Penguatan Proteksi pada titik LVMDP..... 86
4.3.3 Rekomendasi Verifikasi dan Pemeliharaan Berkala pada Seluruh Titik SPD 87
4.3.4 Ringkasan Rekomendasi Teknis..... 88
BAB 5 PENUTUP..... 90
5.1 Kesimpulan 90
5.2 Saran..... 91
DAFTAR PUSTAKA..... 93
LAMPIRAN..... 96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Transmisi dan Gardu Induk Binjai 16
Gambar 2. 2 Sistem Penyaluran Tenaga Listrik 18
Gambar 2. 3 Panel kontrol Gardu Induk 19
Gambar 2. 4 *Air Terminal* 23
Gambar 2. 5 Kabel d*own conductor* 24
Gambar 2. 6 *Metal Oxide Varistor* (MOV) 25
Gambar 2. 7 *Gas Discharge Tube* (GDT 26
Gambar 2. 8 *Transient Voltage Suppression diode* (TVS) 26
Gambar 2. 9 Lokasi pemasangan SPD sesuai IEC 61643-11 27
Gambar 2. 10 SPD Tipe 1 + 2 27
Gambar 2. 11 SPD Tipe 2 28
Gambar 2. 12 SPD Tipe 3 29
Gambar 2. 13 Gelombang tegangan 1,2/50 µs 32
Gambar 2. 14 Gelombang arus petir 10/350 µs. 32
Gambar 2. 15 Gelombang arus 8/20 µs 32
Gambar 2. 16 Konsep dasar LPZ – IEC/BS EN 62305-4 34
Gambar 2. 17 Aplikasi ATPDraw 35

Gambar 3. 1 PT. PLN (Persero) ULTG Binjai 38
Gambar 3. 2 Diagram satu garis SPD di LVMDP 39
Gambar 3. 3 Diagram satu garis SPD di SDP 40
Gambar 3. 4 Diagram satu garis SPD di Sub SDP 40
Gambar 3. 5 Diagram Blok Penelitian 42
Gambar 3. 6 Diagram Alir Penelitian 50

Gambar 4. 1 Pembagian Zona proteksi 56
Gambar 4. 2 Simulasi ATPDraw 68
Gambar 4. 3 Gelombang Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 40 kA 72
Gambar 4. 4 Gelombang Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 70 kA 74
Gambar 4. 5 Gelombang Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 110 kA 76
Gambar 4. 6 Perbandingan Tegangan Puncak pada Setiap Titik Pengukuran 79

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Gap Analistis dan Kontribusi Penelitian 13

Tabel 3. 1 Data Spesifikasi dan Istalasi SPD 41

Tabel 4. 1 Jalur proteksi dan pembagian LPZ 57
Tabel 4. 2 Pemasangan SPD Pada Panel 58
Tabel 4. 3 Data Spesifikasi SPD berdasarkan lokasi terpasang 59
Tabel 4. 4 Kesesuaian penempatan SPD terhadap LPZ 60
Tabel 4. 5 Evaluasi kesesuaian instalasi SPD terhadap IEC 62305-4 61
Tabel 4. 6 Kesesuaian SPD berdasarkan IEC 61643 – 11 63
Tabel 4. 7 Kesesuaian SPD berdasarkan IEC 61643 – 11 64
Tabel 4. 8 Titik Pengukuran Tegangan pada Simulasi ATPDraw 70
Tabel 4. 9 Komponen Pemodelan Sistem Proteksi Surja pada ATPDraw 70
Tabel 4. 10 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 40 kA 73
Tabel 4. 11 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 70 kA 75
Tabel 4. 12 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 110 kA 76
Tabel 4. 13 Rekapitulasi Tegangan Puncak Hasil Simulasi 78
Tabel 4. 14 Rekapitulasi Efektifitas SPD 82
Tabel 4. 15 Rangkuman Penelitian 1 dan 2 sebagai Dasar Rekomendasi 85
Tabel 4. 16 Rekomendasi Teknis pada Titik LVMDP 86
Tabel 4. 17 Rekomendasi Verifikasi dan Pemeliharaan Berkala SPD 87
Tabel 4. 18 Ringkasan Rekomendasi Teknis Optimalisasi Proteksi Surja 88

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Permohonan Izin Pengambilan Data dari Universitas 96
Lampiran 2 Surat Izin Pengambilan Data dari PT. PLN (Persero) 97
Lampiran 3 Data Pendukung Penelitian..... 98
Lampiran 4 Data Pendukung Penelitian..... 99
Lampiran 5 Lembar Asistensi Seminar Proposal..... 100
Lampiran 6 Lembar Asistensi Seminar Hasil..... 101
Lampiran 7 Lembar Asistensi Sidang 102

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur strategis yang berperan penting dalam mendukung aktivitas industri, perdagangan, pemerintahan, pelayanan publik, serta kehidupan masyarakat. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik dan berkembangnya teknologi otomasi, sistem tenaga listrik dituntut memiliki tingkat keandalan (*reliability*), keamanan (*security*), dan kontinuitas pelayanan (*continuity of service*) yang semakin tinggi. Gangguan pada sistem tenaga listrik, baik yang disebabkan oleh faktor internal maupun eksternal, dapat mengakibatkan terhentinya proses produksi, terganggunya pelayanan publik, kerusakan peralatan, hingga menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, upaya menjaga keandalan sistem tenaga listrik menjadi salah satu aspek utama dalam pengoperasian jaringan transmisi dan distribusi.Salah satu komponen penting dalam sistem transmisi tenaga listrik adalah gardu induk yang berfungsi sebagai pusat transformasi tegangan, pengaturan aliran daya, sistem proteksi, pengendalian operasi, pengukuran, serta penghubung antara jaringan transmisi dan distribusi.

Seiring berkembangnya teknologi menuju *digital substation*, gardu induk modern tidak lagi hanya mengandalkan peralatan elektromekanis, tetapi telah memanfaatkan berbagai perangkat elektronik berbasis mikroprosesor seperti Numerical Protection Relay, Remote Terminal Unit (RTU), Programmable Logic Controller (PLC), Human Machine Interface (HMI), Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), serta berbagai sistem komunikasi digital [1]. Penggunaan perangkat elektronik tersebut mampu meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, dan kecepatan pengoperasian sistem tenaga listrik. Namun demikian, perangkat-perangkat tersebut memiliki tingkat ketahanan terhadap tegangan impuls yang lebih rendah dibandingkan peralatan primer sehingga menjadi lebih rentan terhadap gangguan tegangan lebih transien (*transient overvoltage*).

Salah satu penyebab utama terjadinya tegangan lebih transien pada sistem tenaga listrik adalah sambaran petir. Indonesia merupakan negara beriklim tropis yang berada pada kawasan dengan aktivitas konveksi atmosfer tinggi sehingga

memiliki frekuensi sambaran petir yang relatif besar sepanjang tahun [2]. Gelombang impuls akibat sambaran petir dapat merambat melalui saluran transmisi, sistem pembumian, kawat tanah, maupun melalui induksi elektromagnetik sehingga mencapai sistem sekunder gardu induk. Selain sambaran petir, operasi pemutus tenaga (*circuit breaker switching*), pelepasan beban, gangguan hubung singkat, maupun proses energisasi transformator juga dapat menghasilkan switching transient yang memiliki karakteristik tegangan lebih sesaat. Apabila tegangan impuls tersebut tidak dikendalikan dengan baik, maka dapat menyebabkan penurunan umur isolasi, kerusakan perangkat elektronik, kegagalan sistem proteksi, bahkan mengganggu kontinuitas penyaluran tenaga listrik.

Urgensi penelitian ini semakin diperkuat oleh kondisi objektif aktivitas petir di Provinsi Sumatera Utara. Berdasarkan data resmi Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kelas I Deli Serdang, jumlah kejadian sambaran petir selama periode Januari–Desember 2025 menunjukkan bahwa beberapa wilayah di sekitar koridor sistem transmisi memiliki intensitas sambaran petir yang sangat tinggi. Kabupaten Deli Serdang tercatat mengalami 2.196.043 sambaran petir, Kabupaten Simalungun 1.358.898 sambaran, Kabupaten Serdang Bedagai 1.228.398 sambaran, dan Kabupaten Langkat 1.066.172 sambaran, sedangkan Kota Binjai tercatat 33.313 sambaran petir selama tahun 2025 [3]. Meskipun jumlah sambaran di Kota Binjai lebih rendah dibandingkan beberapa kabupaten di sekitarnya, Gardu Induk Binjai merupakan bagian dari sistem transmisi yang saling terhubung dengan wilayah-wilayah tersebut sehingga tetap berpotensi menerima pengaruh gelombang surja akibat sambaran petir yang merambat melalui jaringan transmisi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem proteksi terhadap tegangan lebih transien menjadi kebutuhan yang sangat penting dalam menjaga keandalan operasi gardu induk.

Selain data aktivitas petir, kondisi operasional jaringan transmisi di wilayah kerja ULTG Medan juga menunjukkan bahwa berbagai jenis gangguan masih terjadi pada sistem, baik yang disebabkan oleh faktor lingkungan, peralatan, maupun kondisi operasi. Rekapitulasi gangguan yang terdokumentasi menjadi indikasi bahwa sistem transmisi beroperasi pada lingkungan yang dinamis dan

memerlukan sistem proteksi yang andal untuk meminimalkan potensi gangguan lanjutan terhadap peralatan primer maupun sistem kontrol. Meskipun tidak seluruh gangguan tersebut disebabkan oleh sambaran petir, keberadaan fenomena gangguan operasional tersebut semakin menegaskan pentingnya evaluasi terhadap sistem proteksi internal, khususnya pada panel kontrol yang berisi perangkat elektronik sensitif.

Salah satu perangkat yang memiliki peran penting dalam melindungi sistem kontrol dari tegangan lebih transien adalah Surge Protective Device (SPD). SPD dirancang untuk membatasi besarnya tegangan impuls dengan cara mengalihkan energi surja menuju sistem pembumian sehingga tegangan yang diterima oleh peralatan elektronik tetap berada pada tingkat yang aman [4]. Efektivitas SPD dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain pemilihan tipe SPD, nilai Maximum Continuous Operating Voltage (Uc), Voltage Protection Level (Up), Nominal Discharge Current (In), Impulse Current (Iimp), koordinasi antar-SPD, sistem pembumian, panjang penghantar, serta lokasi pemasangan sesuai konsep Lightning Protection Zone (LPZ) [4]. Oleh karena itu, keberadaan SPD saja tidak dapat menjamin efektivitas perlindungan apabila spesifikasi, pemasangan, maupun koordinasinya tidak sesuai dengan standar yang berlaku.

Dalam praktik ketenagalistrikan internasional, evaluasi kinerja SPD mengacu pada IEC 61643-11, sedangkan perancangan sistem proteksi petir internal mengacu pada IEC 62305-4 [5]. IEC 61643-11 mengatur persyaratan teknis, klasifikasi, karakteristik, dan metode pengujian SPD pada sistem tenaga listrik tegangan rendah. Sementara itu, IEC 62305-4 memberikan pedoman mengenai pembagian Lightning Protection Zone (LPZ), koordinasi SPD, sistem *equipotential bonding*, sistem pembumian, serta langkah-langkah mitigasi terhadap gangguan elektromagnetik akibat sambaran petir. Penerapan kedua standar tersebut secara terpadu memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap efektivitas sistem proteksi internal pada gardu induk.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas proteksi terhadap sambaran petir melalui analisis lightning arrester, sistem pembumian, koordinasi isolasi, analisis risiko petir, maupun simulasi gelombang impuls menggunakan perangkat lunak seperti ATPDraw dan ETAP. Penelitian lain juga membahas pemilihan SPD

berdasarkan karakteristik sistem tegangan rendah atau bangunan gedung. Namun demikian, berdasarkan hasil kajian pustaka, masih terdapat keterbatasan penelitian yang secara khusus mengevaluasi efektivitas SPD pada panel kontrol gardu induk melalui pendekatan yang mengintegrasikan evaluasi kondisi eksisting, analisis kesesuaian terhadap IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, serta simulasi transien menggunakan ATPDraw. Sebagian besar penelitian terdahulu hanya berfokus pada salah satu aspek tersebut sehingga belum memberikan gambaran menyeluruh mengenai tingkat efektivitas SPD sebagai sistem proteksi internal pada panel kontrol gardu induk.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan **(*novelty*)** berupa integrasi antara hasil inspeksi kondisi eksisting pemasangan SPD pada panel kontrol Gardu Induk Binjai, evaluasi kesesuaian terhadap persyaratan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, serta pemodelan sistem menggunakan Alternative Transients Program (ATPDraw) untuk menganalisis kemampuan SPD dalam membatasi tegangan lebih akibat surja petir maupun switching transient. Pendekatan terpadu tersebut diharapkan mampu menghasilkan evaluasi yang lebih komprehensif dibandingkan penelitian-penelitian sebelumnya yang hanya mengkaji salah satu aspek proteksi secara terpisah.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian mengenai "Analisis Efektivitas Surge Protective Device (SPD) pada Panel Kontrol Gardu Induk Binjai Berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4" menjadi penting untuk dilakukan. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan kajian sistem proteksi tegangan lebih pada gardu induk, tetapi juga menghasilkan rekomendasi teknis yang dapat digunakan oleh PT PLN (Persero) sebagai bahan evaluasi dalam meningkatkan keandalan sistem kontrol, keamanan operasi, serta kontinuitas penyaluran tenaga listrik.

1.2 Identifikasi masalah

Identifikasi masalah dari penelitian ini adalah:

1. Masih terdapat potensi tegangan lebih transien (akibat petir maupun switching) yang dapat merusak peralatan kontrol dan proteksi pada panel kontrol gardu

induk, sehingga diperlukan sistem proteksi internal yang lebih terukur dan mengacu pada standar.

2. Belum ada kajian yang membandingkan kondisi eksisting SPD pada panel kontrol dengan persyaratan teknis dan rekomendasi desain dalam standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4.
3. Belum dilakukan evaluasi sistematis terhadap efektivitas SPD dalam membatasi tegangan lebih pada panel kontrol, khususnya terkait level tegangan sisa yang diterima peralatan dan pengaruh konfigurasi instalasi terhadap kinerja proteksi.

1.3 Rumusan masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana tingkat kesesuaian spesifikasi dan pemasangan *Surge Protective Device* (SPD) pada panel kontrol Gardu Induk Binjai berdasarkan persyaratan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4?
2. Bagaimana efektivitas *Surge Protective Device* (SPD) dalam mereduksi tegangan lebih transien akibat surja petir dan *switching transient* pada panel kontrol Gardu Induk Binjai berdasarkan hasil simulasi menggunakan Alternative Transients Program (ATPDraw)?
3. Bagaimana rekomendasi teknis untuk meningkatkan efektivitas sistem proteksi surja pada panel kontrol Gardu Induk Binjai berdasarkan hasil evaluasi standar internasional dan simulasi ATPDraw

1.4 Ruang lingkup penelitian

Agar penelitian lebih terarah, sistematis, dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, maka ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada beberapa aspek sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada panel kontrol Gardu Induk Binjai sebagai objek penelitian yang berfungsi melindungi sistem kontrol, proteksi, dan peralatan elektronik terhadap gangguan tegangan lebih transien.
2. Sistem proteksi yang dianalisis dalam penelitian ini dibatasi pada Surge Protective Device (SPD) yang terpasang pada panel kontrol, tanpa membahas

sistem proteksi petir eksternal seperti *air terminal*, *down conductor*, dan sistem terminasi udara.

3. Analisis dilakukan terhadap spesifikasi teknis, pemasangan, dan karakteristik SPD berdasarkan persyaratan yang tercantum dalam IEC 61643-11 dan IEC 62305-4.
4. Evaluasi kinerja SPD dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak Alternative Transients Program (ATPDraw) untuk menganalisis respon sistem terhadap gangguan tegangan lebih akibat surja petir (*lightning surge*) dan surja hubung (*switching transient*).
5. Parameter yang dianalisis dalam penelitian meliputi besar tegangan transien sebelum dan sesudah pemasangan SPD, tegangan sisa (*residual voltage*), serta kemampuan SPD dalam mereduksi tegangan lebih pada panel kontrol.
6. Penelitian ini tidak membahas analisis ekonomi, umur pakai (*lifetime*) SPD, koordinasi proteksi rele tenaga, maupun analisis keandalan sistem tenaga secara keseluruhan.
7. Hasil penelitian berupa evaluasi efektivitas SPD dan rekomendasi teknis untuk meningkatkan sistem proteksi surja pada panel kontrol Gardu Induk Binjai sesuai dengan standar internasional yang digunakan

1.5 Tujuan penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis tingkat kesesuaian spesifikasi dan pemasangan *Surge Protective Device* (SPD) pada panel kontrol Gardu Induk Binjai berdasarkan persyaratan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4.
2. Mengevaluasi efektivitas *Surge Protective Device* (SPD) dalam membatasi tegangan lebih transien akibat surja petir dan *switching transient* pada panel kontrol Gardu Induk Binjai melalui simulasi menggunakan Alternative Transients Program (ATPDraw).
3. Menyusun rekomendasi teknis untuk meningkatkan efektivitas sistem proteksi surja pada panel kontrol Gardu Induk Binjai berdasarkan hasil evaluasi standar internasional dan simulasi ATPDraw

1.6 Manfaat penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi universitas

   Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah bagi civitas akademika, khususnya Program Studi Teknik Elektro, dalam pengembangan penelitian mengenai sistem proteksi petir, proteksi tegangan lebih transien, serta penerapan standar IEC pada sistem tenaga listrik.

2. Bagi perusahaan / PT. PLN (Persero)

   Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi teknis dalam menilai efektivitas SPD yang terpasang pada panel kontrol Gardu Induk Binjai, sehingga dapat digunakan sebagai salah satu masukan dalam upaya meningkatkan keandalan sistem kontrol, mengurangi risiko kerusakan peralatan akibat surja, serta mendukung kontinuitas penyaluran tenaga listrik..

3. Bagi penulis

   Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan, pengetahuan, dan pengalaman dalam menganalisis efektivitas *Surge Protective Device* (SPD) pada panel kontrol gardu induk berdasarkan standar internasional serta meningkatkan kemampuan dalam menggunakan perangkat lunak ATPDraw untuk analisis transien pada sistem tenaga listrik.

1.7 Sistematika penulisan

Untuk mempermudah pembahasan dan pemahaman maka sistematika penulisan tugas akhir ini di uraikan secara singkat sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, identifikasi masalah, rumusan masalah, ruang lingkup penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi uraian mengenai penelitian terdahulu yang relevan, sistem tenaga listrik, gardu induk, panel kontrol, fenomena petir, sistem proteksi petir eksternal dan internal, konsep zona proteksi petir (LPZ), *Surge Protective*

Device (SPD) beserta klasifikasi dan parameternya, standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, serta pengenalan perangkat lunak ATP.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Berisi lokasi dan waktu penelitian, data yang digunakan, langkah-langkah pengumpulan data, serta metode analisis yang meliputi evaluasi kesesuaian instalasi dan spesifikasi SPD terhadap standar, pemodelan sederhana pada perangkat lunak ATP, dan penilaian efektivitas proteksi SPD.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi penyajian data kondisi eksisting SPD pada panel kontrol, hasil evaluasi kesesuaian dengan standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, hasil simulasi atau perhitungan, serta pembahasan mengenai kinerja dan efektivitas SPD dalam membatasi tegangan lebih transien.

BAB 5 PENUTUP

Berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan saran-saran yang dapat digunakan untuk pengembangan atau penelitian lebih lanjut.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Tinjauan pustaka relevan merupakan bagian yang memuat kajian terhadap berbagai penelitian, teori, standar, serta publikasi ilmiah yang berkaitan langsung dengan topik penelitian mengenai efektivitas Surge Protective Device (SPD) pada panel kontrol gardu induk. Hasil kajian digunakan untuk menunjukkan posisi penelitian yang dilakukan, menemukan kesenjangan (research gap), serta memperkuat landasan teoritis dan metodologis sehingga penelitian memiliki dasar ilmiah yang jelas dan terarah.

2.1.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu

1. Mahadi Septian (2017) meneliti desain sistem proteksi petir internal pada PLTS terpusat di Dusun Permit, Kecamatan Kuala Behe. Penelitian ini menganalisis efisiensi sistem proteksi petir, tegangan langkah, dan tegangan induksi akibat sambaran petir, kemudian merancang penempatan arrester pada sisi panel surya–solar charge controller dan panel distribusi tegangan rendah. Hasilnya menunjukkan efisiensi proteksi mencapai sekitar 0,95 (kategori proteksi II), serta bahwa kombinasi arrester internal dan sistem pentanahan yang baik mampu menurunkan risiko kerusakan peralatan secara signifikan [6].
2. Rohana dkk. (2020) meneliti analisis pengaruh sambaran petir terhadap sistem proteksi pada tower telekomunikasi menggunakan simulasi *Alternative Transients Program* (ATPDraw). Penelitian ini memodelkan karakteristik surja petir dan respon sistem terhadap tegangan lebih transien, sehingga dapat diketahui efektivitas sistem proteksi dalam meredam tegangan yang diterima peralatan. Hasilnya menunjukkan bahwa simulasi ATP mampu menggambarkan fenomena transien secara akurat serta menegaskan bahwa konfigurasi proteksi dan sistem pembumian sangat memengaruhi tegangan sisa. Meskipun objek penelitian berbeda, pendekatan ini relevan dengan penelitian yang dilakukan, namun belum secara khusus mengevaluasi kinerja *Surge Protective Device* (SPD) pada panel kontrol gardu induk maupun kesesuaiannya terhadap standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4 [7].

3. Sinaga dkk. (2025) mengembangkan sistem proteksi sambaran petir pada kandang ternak Koperasi Yufeed Berkah Mulia di Desa Rukti Endah, Lampung Tengah. Fokus penelitian adalah perancangan sistem proteksi eksternal dan internal yang menggabungkan penangkal petir, SPD tegangan rendah, dan sistem pentanahan batang tunggal berdasarkan standar IEC 62305. Studi ini menegaskan pentingnya penerapan SPD dan grounding yang tepat untuk melindungi bangunan kandang, peralatan listrik, serta ternak dari risiko sambaran petir langsung maupun tidak langsung [8].
4. Widagdo dkk. (2024) melakukan analisis penentuan jarak protektif surge arrester terhadap transformator daya 60 MVA pada Gardu Induk 150 kV Surabaya Barat. Penelitian ini menghitung tegangan maksimum sistem, tegangan nominal arrester, impedansi surja saluran, kecepatan rambat gelombang, serta tegangan datang ke transformator untuk memperoleh jarak maksimum arrester yang masih aman terhadap BIL trafo. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jarak proteksi yang diperoleh masih menjaga tegangan di bawah BIL sehingga kinerja arrester dalam melindungi peralatan tegangan tinggi dinilai memadai [9].
5. Liu dkk. (2018) mengkaji analisis risiko petir pada struktur tenaga listrik dengan mengacu pada IEC 62305 dan mengembangkan program perhitungan risiko berbasis Visual Basic dengan antarmuka grafis. Program ini mengolah data lingkungan, struktur, saluran, zona, dan parameter ekonomi untuk menghitung risiko kehilangan jiwa dan kerugian ekonomi, sekaligus mengevaluasi efektivitas langkah proteksi seperti LPS dan SPD. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan sistem proteksi yang sesuai standar dapat menurunkan nilai risiko hingga di bawah batas toleransi yang diizinkan [10].
6. Borecki dan Ciuba (2023) meneliti kinerja perangkat multi-chamber arrester (MCA) dan long flashover arrester (LFA) sebagai perlindungan tegangan lebih pada jaringan tegangan menengah dan tinggi. Melalui pengujian laboratorium menggunakan generator impuls petir dan switching, penelitian ini menganalisis proses pembentukan dan pemadaman busur, serta membandingkan bentuk gelombang tegangan dan arus setelah terjadi pelepasan pada kedua jenis arrester. Hasilnya menunjukkan bahwa karakteristik MCA dan LFA tertentu

dapat meningkatkan efektivitas proteksi overvoltage dan berpotensi mengurangi kebutuhan pemasangan kawat tanah, sehingga berdampak positif pada keandalan dan biaya sistem [11].

7. Djulihenanto dkk. (2022) meneliti implementasi sistem proteksi arus lebih dan tegangan lebih pada PLTS 10 × 100 Wp di PPYD Al-Ikhlas, Singosari, Malang. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen dengan pengujian MCB menggunakan injection current tester, pengujian SPD menggunakan multimeter, serta pengukuran resistansi pembumian sebelum dan sesudah penerapan konfigurasi elektroda paralel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MCB bekerja sesuai standar IEC 60898-1, SPD efektif meredam surja transien, dan resistansi pembumian dapat diturunkan di bawah 5 Ω sesuai PUIL 2020 sehingga meningkatkan keselamatan dan keandalan PLTS skala kecil [12].
8. Muhtari dkk. (2025) menganalisis penggunaan arrester sebagai proteksi tegangan lebih di Gardu Induk 150 kV Mantang, Lombok. Kajian ini meliputi penentuan jarak maksimum penempatan arrester terhadap transformator, perhitungan tegangan datang, tegangan maksimum trafo, tegangan nominal arrester, impedansi surja, arus lepas arrester, dan tahanan arrester, yang kemudian divalidasi melalui simulasi ETAP. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan jarak pemasangan arrester di lapangan sekitar 5 m—lebih kecil dari jarak maksimum 28,5 m—tegangan lebih akibat petir dapat dibatasi dengan baik dan proteksi terhadap transformator dinilai andal [13].
9. Danang Aprili Anwar Jaya dkk. (2025) meneliti perhitungan sistem penangkal petir internal pada Gedung Apartemen Uttara The Icon yang berada di wilayah dengan kerapatan sambaran petir tinggi. Berdasarkan IEC 62305-2, nilai risiko gedung melebihi batas aman sehingga diperlukan sistem proteksi internal yang mengacu pada konsep Lightning Protection Zones (LPZ) dan penggunaan SPD Tipe 1, 2, dan 3 pada berbagai level panel distribusi. Penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi SPD berlapis dengan spesifikasi arus impuls dan tegangan residu yang sesuai mampu melindungi peralatan elektronik sensitif dari surja petir dan switching pada sistem distribusi gedung [5].
10. Redy Tri Santoso (2023) dalam penelitiannya “Analisis Pemilihan dan Penerapan Peralatan Pengaman Surja Petir pada Sistem Kelistrikan Arus Bolak

Balik Tegangan Rendah" membahas prinsip pemilihan dan penerapan SPD pada sistem LV. Kajian ini menjelaskan cara memilih Uc, kelas SPD, dan konfigurasi pemasangan pada berbagai jenis sistem pembumian (TNC, TT, dan IT), serta peran SPD Tipe 1, 2, dan 3 menurut standar NEC/ANSI/UL 1449. Hasilnya menegaskan bahwa SPD merupakan solusi ekonomis untuk mencegah downtime, meningkatkan keandalan sistem, dan mencegah kerusakan peralatan, dengan syarat sistem pentanahan dirancang dan diimplementasikan secara benar [4].

11. Amicucci dkk. (2007) melalui makalah "Surge Protective Devices for Low Voltage Systems: Practical Approach for the Protection Distance Evaluation" membahas konsep jarak proteksi SPD pada sistem tegangan rendah. Penelitian ini menganalisis fenomena rambatan gelombang dan osilasi akibat operasi SPD serta menunjukkan bahwa tegangan di terminal peralatan dapat meningkat hingga sekitar dua kali level proteksi SPD (2Up) ketika jarak kabel terlalu panjang. Berdasarkan pemodelan matematis, disusun persamaan dan kriteria sederhana untuk menentukan panjang maksimum kabel antara SPD dan peralatan yang masih menjamin tegangan di peralatan tetap di bawah batas isolasi yang diizinkan [14].
12. Channe dan Mohale (2020) dalam artikel "Surge Protective Device Failure Modes, Impact and Corrective Actions" mengidentifikasi berbagai mode kegagalan SPD serta dampaknya terhadap sistem proteksi. Penelitian ini menjelaskan penyebab kegagalan seperti degradasi MOV akibat impuls berulang, kesalahan instalasi, dan koordinasi yang tidak tepat, serta mengusulkan tindakan korektif termasuk penggunaan Thermally Protected MOV (TPMOV) dan strategi pemeliharaan yang sesuai. Studi tersebut menekankan bahwa kegagalan SPD dapat menyebabkan hilangnya fungsi proteksi dan meningkatkan risiko kerusakan peralatan, sehingga manajemen keandalan SPD menjadi aspek penting dalam sistem proteksi surja [15].
13. He dkk. (2016) meneliti karakteristik dinamis dan koordinasi bertingkat perangkat pembatas tegangan tipe limiting (MOV-based SPD) di sistem tegangan rendah dengan simulasi dan pengujian arus impuls curam. Penelitian ini menunjukkan bahwa tegangan sisa pada SPD dapat meningkat sekitar 6,8–

18,7% ketika dikenai arus impuls sangat curam dibanding gelombang standar 8/20 μs, dan bahwa kombinasi SPD bertingkat (tegangan proteksi hulu sedikit lebih tinggi dari hilir) memberikan koordinasi energi terbaik. Studi ini juga mengkaji pengaruh jarak pemisah dan jenis beban (resistif, induktif, kapasitif) terhadap distribusi energi antara SPD hulu dan hilir, serta memberikan rekomendasi konfigurasi untuk memastikan proteksi yang efektif terhadap surja petir berulang [16].

2.1.2 Gap analisis dan kontribusi penelitian

Berdasarkan ringkasan penelitian terdahulu maka diperoleh Gap analisis dan kontribusi penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Gap Analistis dan Kontribusi Penelitian

No	Peneliti dan Tahun	Fokus penelitian terdahulu	GAP (kesenjangan penelitian)	Kebaruan Penelitian
1	Mahadi Septian, 2017	Desain proteksi petir internal pada PLTS (arrester/SPD + pentanahan) sesuai standar, fokus PLTS.	Objek PLTS, tidak membahas panel kontrol gardu induk dan tidak menilai efektivitas SPD terhadap tegangan lebih transien berdasar IEC 61643-11 & IEC 62305-4.	Analisis efektivitas SPD yang sudah terpasang pada panel kontrol gardu induk UIP3B dengan acuan IEC 61643-11 & IEC 62305-4.
2	Rohana dkk, 2020	Analisis pengaruh sambaran petir terhadap sistem proteksi tower telekomunikasi menggunakan simulasi ATPDraw	Objek penelitian pada tower telekomunikasi, belum membahas SPD pada panel kontrol gardu induk serta belum mengacu pada IEC 61643-11 dan IEC 62305-4	Menganalisis SPD pada panel kontrol gardu induk berbasis standar IEC dengan menggunakan simulasi ATP untuk mengevaluasi tegangan lebih.
3	Sinaga dkk., 2025	Implementasi sistem proteksi petir (LPS eksternal, SPD, grounding) pada kandang ternak berdasarkan IEC 62305.	Lingkup bangunan kandang; SPD dibahas umum, tanpa analisis kinerja detail; tidak menyentuh sistem kontrol gardu induk.	Menerapkan konsep proteksi internal ke panel kontrol gardu induk dan menganalisisnya secara kuantitatif.

No	Peneliti dan Tahun	Fokus penelitian terdahulu	GAP (kesenjangan penelitian)	Kebaruan Penelitian
4	Widagdo dkk. 2024	Analisis jarak protektif surge arrester terhadap trafo 60 MVA di GI 150 kV, koordinasi isolasi arrester–trafo.	Hanya fokus pada arrester HV dan trafo, tidak membahas SPD LV dan panel kontrol.	Mengalihkan fokus ke proteksi surja pada panel kontrol LV gardu induk dengan SPD.
5	Liu dkk., 2018	Analisis risiko petir dan peran LPS/SPD pada instalasi energi listrik berdasarkan IEC 62305.	Level analisis risiko sistem, tidak mengevaluasi konfigurasi dan kinerja SPD nyata di panel kontrol gardu induk.	Menggunakan kerangka risiko IEC sebagai dasar, lalu mengevaluasi langsung SPD eksisting pada panel kontrol UIP3B.
6	Ciuba dkk., 2023	Pengujian laboratorium beberapa SPD dan dampaknya terhadap keandalan jaringan tenaga.	Objek SPD di laboratorium, tidak dikaitkan dengan kondisi instalasi SPD di panel kontrol GI.	Menilai SPD dalam kondisi terpasang di panel kontrol gardu induk (instalasi, spesifikasi, efektivitas terhadap surja).
7	Djulihenanto dkk., 2022	Penerapan proteksi arus/tegangan lebih pada PLTS kecil dan pengaruhnya ke kinerja sistem.	Konteks PLTS kecil, bukan sistem kontrol gardu induk; tidak fokus pada SPD terhadap surja petir/switching.	Mengaplikasikan prinsip proteksi tegangan lebih ke sistem kontrol gardu induk yang lebih kompleks.
8	Muhtari dkk. (2025)	Analisis penggunaan arrester sebagai proteksi overvoltage di GI 150 kV (HV equipment vs BIL).	Hanya peralatan HV; panel kontrol LV dan SPD tidak dibahas.	Menambah perspektif proteksi surja pada sisi panel kontrol dan peralatan kontrol gardu induk.
9	Danang Aprili Anwar Jaya dkk. (2025)	Desain sistem penangkal petir internal (LPS internal, SPD, grounding) untuk gedung apartemen.	Objek gedung apartemen; tidak mengevaluasi kinerja SPD eksisting pada sistem kontrol gardu induk.	Mengadaptasi konsep proteksi internal bangunan ke lingkungan gardu induk dengan fokus panel kontrol.

No	Peneliti dan Tahun	Fokus penelitian terdahulu	GAP (kesenjangan penelitian)	Kebaruan Penelitian
10	Redy Tri Santoso (2023)	Prinsip pemilihan dan penerapan arrester/SPD pada sistem LV AC secara umum.	Cakupan LV umum, tidak spesifik ke panel kontrol gardu induk dan tanpa analisis efektivitas SPD terpasang.	Mempersempit objek ke panel kontrol gardu induk UIP3B dan mengaitkan evaluasi SPD dengan IEC 61643-11 & IEC 62305-4.
11	Fiamingo dkk., 2007	Metode praktis evaluasi jarak proteksi SPD di sistem LV, konsep tegangan proteksi efektif (Up + efek kabel) dan protection distance.	Analisis untuk sistem LV umum, tanpa studi kasus panel kontrol gardu induk atau SPD lapangan di GI.	Menggunakan konsep jarak proteksi dan tegangan proteksi efektif untuk menilai perlindungan SPD pada peralatan kontrol panel GI UIP3B.
12	Channe dan Mohale, 2020	Mengkaji mode kegagalan SPD, dampaknya pada proteksi sistem, dan langkah korektif.	Fokus ke keandalan SPD secara umum, tidak spesifik ke gardu induk/panel kontrol.	Mengaitkan aspek keandalan SPD (indikator, pemeliharaan) dengan evaluasi efektivitas proteksi surja di panel kontrol UIP3B.
13	Y. He dkk., 2016	Analisis karakteristik dinamis dan koordinasi bertingkat (cascaded) perangkat pembatas tegangan di sistem LV, termasuk SPD.	Hanya membahas koordinasi SPD LV secara umum, tanpa studi kasus panel kontrol gardu induk dan SPD eksisting.	Menilai apakah konfigurasi SPD di gardu induk (dari LV utama sampai panel kontrol) sudah terkoordinasi dan efektif sesuai prinsip IEC 62305-4.

Pada Tabel 2.1, terlihat bahwa sebagian besar studi masih berfokus pada arrester sisi tegangan tinggi, sistem proteksi petir bangunan atau PLTS, analisis risiko petir, serta SPD pada sistem tegangan rendah secara umum. Sampai saat ini belum ditemukan kajian yang secara khusus mengevaluasi SPD yang terpasang

pada panel kontrol gardu induk dengan mengacu langsung pada standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4.

Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya penelitian yang menganalisis kesesuaian instalasi dan spesifikasi SPD pada panel kontrol gardu induk serta menilai efektivitasnya dalam membatasi tegangan lebih transien berdasarkan data eksisting dan simulasi. Oleh karena itu, penelitian ini berkontribusi dengan menyediakan evaluasi menyeluruh terhadap SPD pada panel kontrol Gardu Induk Binjai dan menyusun rekomendasi teknis untuk optimalisasi proteksi surja

2.2 Gardu Induk

Gardu induk merupakan salah satu komponen vital dalam sistem tenaga listrik, tanpa adanya gardu induk maka tenaga listrik tidak dapat disalurkan [17]. Gardu induk juga berfungsi sebagai titik penghubung antara jaringan transmisi dan jaringan distribusi, sekaligus sebagai lokasi transformasi tegangan, pengendalian aliran daya, serta pusat pengoperasian dan proteksi sistem [17]. Keberadaan gardu induk tidak hanya berperan dalam menurunkan atau menaikkan tegangan melalui transformator daya, tetapi juga menjadi titik strategis untuk pengamanan peralatan, pembatasan dampak gangguan, dan pemeliharaan kontinuitas pelayanan kepada konsumen. Dalam konteks keandalan sistem, gardu induk harus mampu menahan berbagai jenis gangguan, termasuk gangguan tegangan lebih akibat surja petir maupun switching, yang berpotensi merusak peralatan primer dan merambat ke instalasi sekunder seperti panel kontrol dan perangkat elektronik sensitif.



Gambar 2. 1 Transmisi dan Gardu Induk Binjai

2.3 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik berperan penting dalam menyediakan dan menyalurkan energi listrik yang stabil dan secara terus menerus memenuhi kebutuhan konsumen. [18]. Sistem tenaga listrik juga harus dipelihara agar mampu memenuhi kebutuhan konsumen akan energi listrik. Salah satu aspek penting untuk menjamin ketersediaan listrik tersebut adalah tingkat keamanannya, yang diharapkan dapat mengurangi kemungkinan terjadinya gangguan. Aspek keamanan ini perlu mendapat perhatian serius, baik terkait keandalan peralatan yang digunakan maupun dalam proses penyaluran energi listrik itu sendiri [19]. Sistem tenaga Listrik merupakan gabungan dari beberapa sistem yaitu:

1. Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik

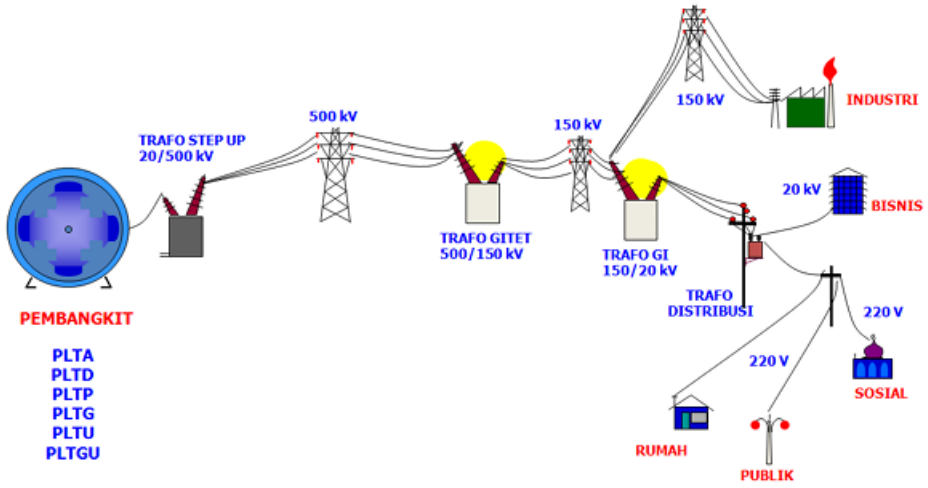
   Sistem pembangkitan tenaga listrik merupakan tahap awal dalam di sistem tenaga lisrik, di mana energi mekanik dikonversi menjadi energi listrik. Energi mekanik ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator sinkron yang bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik.

2. Transmisi Tenaga Listrik

   Transmisi tenaga listrik merupakan bagian sistem yang bertugas menyalurkan daya listrik dari pusat-pusat pembangkit ke gardu-gardu induk di daerah beban pada level tegangan tinggi atau ekstra tinggi. Penggunaan tegangan tinggi bertujuan menurunkan arus yang mengalir pada konduktor, sehingga rugi-rugi tembaga yang sebanding dengan kuadrat arus dapat diperkecil dan penyaluran daya menjadi lebih efisien.

3. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

   Sistem distribusi tenaga listrik merupakan tahap akhir penyaluran daya dari gardu induk menuju konsumen pada level tegangan menengah dan tegangan rendah. Pada umumnya, tegangan tinggi dari sistem transmisi diturunkan terlebih dahulu menjadi tegangan menengah di gardu induk, kemudian disalurkan melalui jaringan distribusi primer ke gardu distribusi yang lebih dekat dengan pusat-pusat beban. Di gardu distribusi, tegangan kembali diturunkan menjadi tegangan rendah agar dapat digunakan secara aman oleh pelanggan rumah tangga, komersial, maupun industri kecil.



Gambar 2. 2 Sistem Penyaluran Tenaga Listrik

2.4 Panel kontrol

Panel kontrol merupakan peralatan yang berfungsi untuk mengatur, mengendalikan, memonitor, serta melindungi peralatan yang berada di Gardu Induk agar bekerja sesuai kondisi yang diinginkan [20]. Secara operasional, panel kontrol termasuk ke dalam sistem sekunder gardu induk karena di dalamnya terpasang peralatan ukur, rangkaian kontrol, serta perangkat proteksi yang terhubung dengan peralatan primer melalui sinyal dan perintah dari sistem. Peran panel kontrol sangat menentukan kelangsungan operasi gardu induk, gangguan pada panel baik berupa malfungsi maupun kerusakan komponen dapat mengakibatkan berkurangnya kemampuan penyaluran tenaga listrik.

Selain itu, panel kontrol umumnya berisi perangkat yang relatif sensitif terhadap gangguan transien, sehingga tegangan lebih sesaat dapat memicu kesalahan operasi maupun kerusakan pada modul elektronik tertentu. Oleh karena itu, diperlukan penerapan proteksi petir internal dengan pemasangan *Surge Protective Device* (SPD) yang terkoordinasi dan sistem pentanahan yang baik, untuk membatasi tegangan sisa yang sampai ke rangkaian kontrol dan proteksi.



Gambar 2. 3 Panel kontrol Gardu Induk

2.5 Tegangan Lebih (*Overvoltage*)

Dalam sistem tenaga listrik, kontinuitas operasi dan keandalan peralatan sangat dipengaruhi oleh kualitas tegangan yang diterima oleh setiap komponen. Salah satu gangguan kualitas daya yang paling berbahaya adalah tegangan lebih (overvoltage)**,** yaitu kondisi ketika nilai tegangan pada suatu sistem melebihi batas tegangan nominal yang diizinkan sehingga berpotensi menyebabkan penurunan umur isolasi, kerusakan peralatan, bahkan kegagalan operasi sistem proteksi [21].

Fenomena tegangan lebih dapat terjadi akibat berbagai faktor, baik yang berasal dari luar sistem maupun dari dalam sistem itu sendiri. Gangguan eksternal umumnya disebabkan oleh sambaran petir (*lightning surge*), sedangkan gangguan internal dapat terjadi akibat proses pensaklaran (*switching operation*), pelepasan beban secara tiba-tiba, proses energisasi transformator, maupun gangguan hubung singkat. Besarnya tegangan lebih yang terjadi sangat dipengaruhi oleh karakteristik sistem tenaga listrik, impedansi saluran, konfigurasi jaringan, lokasi gangguan, serta karakteristik sumber gangguan.

Pada gardu induk modern, tegangan lebih menjadi perhatian khusus karena selain mengancam peralatan primer, fenomena ini juga dapat merusak perangkat elektronik yang terdapat pada panel kontrol. Relay digital, *Intelligent Electronic Device* (IED), *Remote Terminal Unit* (RTU), PLC, dan perangkat komunikasi memiliki tingkat ketahanan isolasi yang relatif rendah dibandingkan peralatan tegangan tinggi. Oleh karena itu, pengendalian tegangan lebih melalui sistem

proteksi internal, khususnya penggunaan *Surge Protective Device* (SPD), merupakan bagian penting dalam menjaga keandalan sistem otomasi gardu induk.

2.6 Surja Petir (*Lightning Surge*)

Petir merupakan salah satu fenomena alam yang paling sering menyebabkan gangguan pada sistem tenaga listrik, terutama di negara beriklim tropis seperti Indonesia yang memiliki tingkat aktivitas petir relatif tinggi sepanjang tahun. Sambaran petir dapat menghasilkan arus dengan amplitudo puluhan hingga ratusan kiloampere dalam waktu yang sangat singkat sehingga menimbulkan gelombang tegangan lebih (*lightning surge*) yang mampu merambat melalui saluran transmisi, sistem pentanahan, maupun induksi elektromagnetik menuju peralatan listrik [22]. *Lightning surge* adalah gelombang tegangan lebih transien yang dihasilkan akibat sambaran petir, baik secara langsung (*direct lightning strike*) maupun tidak langsung (*indirect lightning strike*).

1. Sambaran langsung (*direct lightning strike*)

   Sambaran petir langsung terjadi ketika petir mengenai objek secara tepat, seperti bangunan, jaringan listrik, pohon, atau manusia yang berada di area terbuka. Dalam kondisi ini, arus petir mengalir langsung melalui struktur yang terkena sehingga dapat menimbulkan kerusakan mekanis, termal, dan elektrik sekaligus. Pada bangunan, sambaran langsung dapat menyebabkan retak atau hancurnya bagian konstruksi, kebakaran akibat pemanasan mendadak pada material yang mudah terbakar, serta kerusakan berat pada instalasi listrik dan peralatan elektronik yang terhubung. Pada sistem tenaga listrik, sambaran langsung ke konduktor atau peralatan dapat mengakibatkan flashover isolasi, kerusakan permanen pada transformator, pemutusan sirkit, hingga padamnya suplai dalam skala luas.

2. Sambaran tidak langsung (*indirect lightning strike*).

   Sambaran tidak langsung terjadi ketika petir menyambar titik lain di sekitar objek (misalnya tanah di dekat bangunan, saluran udara , atau struktur tinggi di sekitarnya), tetapi menimbulkan efek induksi terhadap instalasi yang dilindungi. Medan listrik dan medan magnet yang kuat dari sambaran tersebut dapat menginduksi tegangan lebih pada konduktor, kabel daya, maupun kabel

kontrol sehingga memicu surja tegangan di dalam sistem. Akibatnya, meskipun tidak terkena sambaran fisik, peralatan elektronik dan sistem kontrol dapat mengalami kerusakan komponen, gangguan operasi, reset tak terduga, atau bahkan kegagalan total.

Pada gardu induk, gelombang surja petir tidak hanya mengancam peralatan primer seperti transformator daya, *Circuit Breaker*, dan isolator, tetapi juga dapat merambat menuju panel kontrol yang berisi berbagai perangkat elektronik sensitif. Apabila amplitudo tegangan surja melebihi kemampuan isolasi peralatan, maka dapat terjadi kegagalan fungsi, kerusakan permanen, bahkan penghentian operasi sistem proteksi dan otomasi gardu induk.

Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik *lightning surge*, mekanisme propagasi, serta metode mitigasinya menjadi dasar penting dalam merancang sistem proteksi internal. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah pemasangan *Surge Protective Device* (SPD) yang dirancang untuk membatasi tegangan lebih transien sehingga energi surja tidak mencapai perangkat elektronik dengan nilai yang membahayakan.

2.7 Surja Hubung (*Switching Transient*)

Selain sambaran petir, salah satu penyebab utama terjadinya tegangan lebih transien pada sistem tenaga listrik adalah proses pensaklaran (*switching operation*). Tegangan lebih yang timbul akibat proses ini dikenal sebagai switching transient atau surja hubung, yaitu lonjakan tegangan yang muncul akibat perubahan kondisi operasi sistem secara tiba-tiba [23]. Meskipun amplitudo *switching transient* umumnya lebih rendah dibandingkan *lightning surge*, fenomena ini tetap berpotensi menimbulkan gangguan serius terhadap peralatan listrik, khususnya perangkat elektronik yang memiliki tingkat ketahanan isolasi relatif rendah.

Switching transient adalah tegangan lebih transien yang timbul akibat perubahan kondisi operasi sistem tenaga listrik dalam waktu yang sangat singkat, seperti pembukaan atau penutupan peralatan hubung, energisasi maupun de-energisasi transformator, pelepasan beban, serta pengoperasian peralatan kompensasi daya. Pada saat Circuit Breaker (CB) membuka atau menutup, arus yang mengalir pada elemen induktif dan kapasitif berubah secara tiba-tiba sehingga

energi yang tersimpan pada medan listrik maupun medan magnet dilepaskan kembali ke sistem dalam bentuk gelombang transien. Fenomena ini terjadi karena adanya perubahan arus dan medan magnet secara mendadak sehingga menghasilkan osilasi tegangan pada sistem.

Berbeda dengan *lightning surge* yang berasal dari fenomena alam, *switching transient* merupakan bagian dari dinamika operasi normal sistem tenaga listrik. Meskipun demikian, apabila tidak dikendalikan dengan baik, tegangan transien yang dihasilkan tetap dapat mempercepat degradasi isolasi dan merusak perangkat elektronik.

Pada gardu induk, operasi pembukaan maupun penutupan Circuit Breaker (CB)**,** pengoperasian Disconnecting Switch (DS)**,** energisasi transformator daya, pengoperasian bank kapasitor, serta perubahan konfigurasi jaringan dapat menghasilkan gelombang transien yang merambat ke berbagai bagian sistem. Gelombang tersebut dapat mencapai panel kontrol melalui kabel daya, kabel kontrol, maupun sistem pentanahan sehingga meningkatkan risiko kerusakan pada relay digital, *Intelligent Electronic Device* (IED), *Remote Terminal Unit* (RTU), dan perangkat komunikasi.

Oleh karena itu, analisis terhadap *switching transient* menjadi bagian penting dalam penelitian ini. Selain mengevaluasi kemampuan SPD dalam mereduksi surja akibat petir, penelitian ini juga mempertimbangkan efektivitas SPD terhadap tegangan lebih yang berasal dari proses operasi normal sistem tenaga listrik sehingga diperoleh gambaran perlindungan yang lebih menyeluruh.

Dalam penelitian ini, *switching transient* akan dimodelkan menggunakan ATPDraw untuk mengevaluasi respons sistem sebelum dan sesudah pemasangan SPD. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk mengetahui kemampuan SPD dalam membatasi tegangan transien akibat operasi pensaklaran sehingga tegangan yang diterima oleh panel kontrol tetap berada pada batas aman sesuai dengan persyaratan IEC 61643-11 dan konsep proteksi internal pada IEC 62305-4.

2.8 Sistem Proteksi Petir

Sistem proteksi petir adalah suatu rangkaian metode, perangkat, dan instalasi yang dirancang untuk melindungi manusia, bangunan, serta peralatan di dalamnya

dari sambaran petir langsung maupun tidak langsung. Sistem ini bekerja dengan cara menangkap arus petir melalui komponen penangkal, menyalurkannya secara aman ke tanah melalui konduktor penurun, serta menyebarkan energi tersebut ke bumi melalui sistem pembumian sehingga tidak menimbulkan kerusakan struktural, kebakaran, maupun bahaya keselamatan.

2.8.1 Sistem Proteksi Eksternal

Sistem proteksi petir eksternal (sambaran petir langsung) adalah rangkaian perangkat yang dipasang pada bagian luar bangunan untuk melindungi struktur dari bahaya sambaran petir langsung maupun pelepasan energi utama petir yang mengenai bangunan. Komponen sistem proteksi petir eksternal umumnya terdiri dari:

1. Terminasi udara (*Air Terminal*)

   Terminasi udara (*air terminal*) merupakan salah satu komponen utama dalam sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi sebagai titik penerima sambaran petir. Perangkat ini dipasang pada bagian tertinggi bangunan serta ditempatkan pada posisi yang strategis, umumnya di titik pusat atau area tertentu yang paling berpotensi tersambar, sehingga bangunan yang dilindungi dapat terhindar dari dampak langsung sambaran petir.



Gambar 2. 4 *Air Terminal*

2. Konduktor penyalur (*Down Conductor*)

   Konduktor penyalur (*down conductor*) merupakan komponen sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi menyalurkan arus sambaran petir dari bagian terminasi udara menuju sistem pentanahan.



Gambar 2. 5 Kabel d*own conductor*

3. Sistem Pentanahan (*Grounding System*)

   Sistem pentanahan (*grounding*) merupakan bagian dari sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi menyediakan jalur penghantar bagi arus sambaran petir untuk dialirkan dengan aman ke dalam tanah. Grounding umumnya menggunakan elektroda yang ditanam di dalam tanah dengan target tahanan pentanahan dibuat serendah mungkin, dan pada banyak referensi praktis nilainya dianjurkan ≤ 5 Ω [24].

2.8.2 Sistem Proteksi Internal

Sistem proteksi petir internal (petir tidak langsung) merupakan seperangkat komponen yang dirancang untuk mengurangi efek gelombang elektromagnetik dan tegangan lebih akibat arus petir yang dapat masuk ke dalam peralatan. Karena sambaran tidak langsung tetap berbahaya, digunakan arrester sebagai perangkat utama untuk membatasi surja tegangan lebih yang masuk ke instalasi dan menyalurkannya ke tanah. Arrester harus mampu menahan tegangan kerja sistem secara terus-menerus, mengalirkan arus surja petir ke tanah tanpa rusak, serta kembali bersifat isolatif setelah kondisi surja berakhir sehingga tidak menimbulkan arus bocor yang dapat mengganggu operasi peralatan.

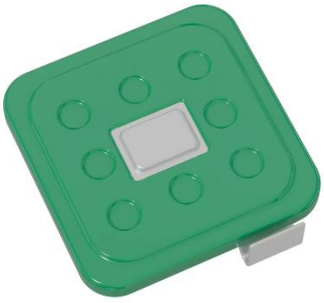
2.9 *Surge Protective Device* (SPD)

Pada panel kontrol terdapat *Surge Protective Device* (SPD) yang berfungsi melindungi peralatan kontrol dengan membatasi tegangan lebih transien akibat sambaran petir dengan mengalihkan atau membatasi arus lonjakan pada rangkaian listrik [4]. Lonjakan tegangan tersebut dapat merusak komponen elektronik sensitif seperti relay proteksi, modul komunikasi, serta perangkat kendali berbasis mikroprosesor apabila tidak diredam dengan baik.

SPD bekerja jika tegangan melebihi nilai yang ditentukan, perangkat tersebut dengan cepat menghantarkan listrik dan mengubah tegangan berlebih menjadi kebocoran arus ke tanah, sehingga membatasi puncak tegangan di ujung perangkat. Desain ini memungkinkan perangkat pelindung lonjakan tegangan untuk mengalihkan lonjakan tegangan dalam waktu yang sangat singkat dan menghindari kerusakan pada perangkat lain di dalam rangkaian. Secara umum, di dalam *Surge Protective Device* (SPD) digunakan beberapa jenis elemen utama yang masing-masing memiliki karakteristik dan peran berbeda, yaitu:

1. *Metal Oxide Varistors* (MOV)

   Metal Oxide Varistor (MOV) merupakan elemen proteksi tegangan lebih yang bersifat nonlinier, di mana impedansinya sangat tinggi pada kondisi tegangan kerja normal dan menurun tajam ketika tegangan melampaui nilai ambang tertentu, sehingga mampu menjepit tegangan dan menyerap energi surja.



Gambar 2. 6 *Metal Oxide Varistor* (MOV)

2. *Gas Discharge Tubes* (GDT)

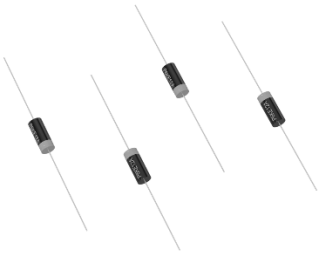
   Gas Discharge Tube (GDT) adalah komponen proteksi berbentuk tabung berisi gas yang pada kondisi normal bersifat isolatif, namun akan mengalami ionisasi dan menjadi sangat konduktif ketika tegangan mencapai tegangan nyala, sehingga arus surja dapat dialirkan ke sistem pentanahan melalui impedansi yang rendah.



Gambar 2. 7 *Gas Discharge Tube* (GDT

3. *Transient Voltage Suppression Diode* (TVS)

   Transient Voltage Suppression (TVS) diode merupakan dioda khusus berkarakteristik respon sangat cepat terhadap tegangan lebih transien, bekerja dengan cara berpindah ke keadaan breakdown terkendali pada saat tegangan melebihi tegangan desainnya sehingga tegangan pada terminal rangkaian elektronik tetap terbatasi pada level yang aman.

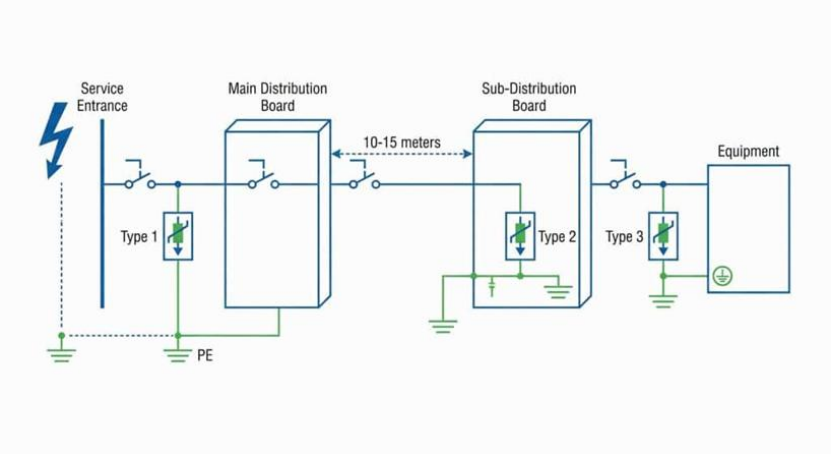


Gambar 2. 8 *Transient Voltage Suppression diode* (TVS)

2.9.1 Klasifikasi *Surge Protective Device* (SPD)

Menurut standar IEC 61643-11 *Surge Protective Device* (SPD) diklasifikasikan berdasarkan kemampuan menahan energi surja dan lokasi

pemasangannya dalam sistem tenaga tegangan rendah. Klasifikasi ini umumnya dinyatakan sebagai



Gambar 2. 9 Lokasi pemasangan SPD sesuai IEC 61643-11

1. SPD Tipe 1 (Kelas 1)

   Merupakan SPD yang dirancang untuk menahan arus petir berenergi tinggi, termasuk efek sambaran langsung atau sangat dekat yang masuk dari sisi jaringan. SPD jenis ini diuji dengan gelombang arus 10/350 µs dan dipasang pada sisi masuk utama instalasi (main distribution board/service entrance), sehingga berfungsi sebagai garis pertahanan pertama terhadap surja dari luar.



Gambar 2. 10 SPD Tipe 1 + 2

2. SPD Tipe 2 (Kelas 2)

   SPD yang digunakan untuk membatasi tegangan lebih transien akibat surja induksi petir maupun switching yang sudah tereduksi oleh proteksi di hulu. SPD

tipe ini diuji dengan gelombang arus 8/20 µs dan umumnya dipasang pada panel distribusi atau sub-distribution board di dalam instalasi, termasuk panel kontrol dan panel beban penting. Peran utamanya adalah meredam sisa energi surja yang lolos dari SPD Tipe 1 dan surja internal akibat operasi peralatan.



Gambar 2. 11 SPD Tipe 2

3. SPD Tipe 3 (Kelas 3)

   Tipe yang digunakan sebagai tingkat proteksi terakhir yang dipasang dekat dengan peralatan elektronik sensitif, misalnya di stop kontak, rak PLC, atau peralatan instrumentasi. SPD ini memiliki kapasitas arus lebih kecil dibanding Type 1 dan Type 2, namun menyediakan level tegangan proteksi yang lebih rendah (protection level kecil) sehingga cocok untuk melindungi peralatan dengan tingkat ketahanan isolasi terbatas. Penerapannya umumnya direkomendasikan bila jarak antara SPD Type 2 dan peralatan cukup jauh sehingga memungkinkan terjadinya kenaikan kembali tegangan transien. SPD tipe 3 dicirikan oleh kombinasi gelombang tegangan (1,2/50 µs) dan gelombang arus (8/20 µs).



Gambar 2. 12 SPD Tipe 3

Memilih jenis SPD yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa sistem kelistrikan dan perangkat sensitif terlindungi dari efek berbahaya dari lonjakan tegangan. Baik itu sambaran petir, peralihan internal, atau variasi tegangan kecil, SPD memberikan perlindungan lonjakan arus kritis dalam berbagai skenario.

2.10 Standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4

Dalam penelitian ini, standart yang digunakan untuk menganalisis sistem proteksi surja pada panel kontrol adalah standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4. IEC 61643-11 menyediakan ketentuan teknis terkait perangkat *Surge Protective Device* (SPD) tegangan rendah, sedangkan IEC 62305-4 memberikan kerangka perancangan sistem proteksi internal terhadap Lightning Electromagnetic Impulse (LEMP) di dalam bangunan. Keduanya saling melengkapi, di mana IEC 61643-11 berfokus pada karakteristik dan pengujian SPD sebagai perangkat, sementara IEC 62305-4 berfokus pada penataan lingkungan elektromagnetik dan penempatan SPD dalam konteks zona proteksi petir.

2.10.1 Standar IEC 61643-11

IEC 61643-11 merupakan standar internasional yang diterbitkan oleh *International Electrotechnical Commission* (IEC) yang menetapkan persyaratan, karakteristik, klasifikasi, serta metode pengujian *Surge Protective Device* (SPD) yang digunakan pada sistem tenaga listrik tegangan rendah hingga 1 kV AC. Standar ini digunakan sebagai acuan dalam memastikan bahwa SPD memiliki

kemampuan yang sesuai untuk membatasi tegangan lebih transien dan menyalurkan arus surja yang timbul akibat gangguan petir maupun proses switching pada sistem tenaga listrik.

IEC 61643-11 mengatur karakteristik dan parameter utama SPD, antara lain tegangan maksimum kontinu (*Maximum Continuous Operating Voltage*, Uc), tingkat tegangan proteksi (*Voltage Protection Level*, Up), arus lepas nominal (*Nominal Discharge Current*, In), arus lepas maksimum (*Maximum Discharge Current*, Imax), serta arus impuls (*Impulse Current*, Iimp). Standar ini juga menetapkan metode pengujian SPD menggunakan bentuk gelombang surja tertentu, seperti 8/20 μs untuk pengujian arus surja dan 10/350 μs untuk pengujian yang berkaitan dengan arus impuls petir.

Dalam penerapannya, IEC 61643-11 menjadi salah satu acuan penting dalam pemilihan dan evaluasi SPD berdasarkan karakteristik sistem yang akan dilindungi. Kesesuaian nilai Uc terhadap tegangan sistem, kemampuan arus pelepasan melalui In dan Imax, serta nilai Up terhadap tingkat ketahanan peralatan merupakan aspek penting untuk menentukan apakah suatu SPD dapat memberikan perlindungan yang memadai.

Pada penelitian ini, IEC 61643-11 digunakan sebagai standar acuan untuk mengevaluasi kesesuaian spesifikasi teknis SPD yang terpasang pada panel kontrol Gardu Induk Binjai. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan parameter teknis SPD eksisting terhadap karakteristik dan kondisi sistem yang dilindungi, sehingga dapat diketahui tingkat kesesuaian SPD serta kemampuan spesifikasinya dalam memberikan perlindungan terhadap tegangan lebih transien.

2.10.2 Parameter SPD Menurut IEC 61643-11

Dalam pemilihan dan evaluasi kinerja *Surge Protective Device* (SPD), terdapat beberapa parameter utama yang harus diperhatikan agar proteksi terhadap tegangan lebih transien dapat bekerja secara efektif. Parameter yang umum digunakan menurut standar IEC 61643-11 seperti tegangan kerja kontinu maksimum (Uc), tingkat tegangan proteksi (Up), arus lepas nominal (In), arus lepas maksimum (Imax), serta arus impuls (Iimp) , yang masing-masing menggambarkan batas kemampuan listrik dan performa proteksi dari sebuah SPD.

1. *Maximum continuous operating voltage* (U_C)

   Merupakan nilai tegangan maksimum yang dapat diterapkan secara terus-menerus pada terminal SPD tanpa menyebabkan perangkat tersebut beroperasi (konduksi) atau mengalami degradasi kinerja. Dalam praktik, nilai Uc ditetapkan sedikit di atas tegangan nominal sistem agar SPD tetap tidak aktif pada kondisi normal, namun tetap cukup sensitif untuk merespons ketika terjadi kenaikan tegangan yang signifikan akibat surja.

2. *Voltage protection level* (U_p)

   Adalah nilai tegangan puncak yang muncul pada terminal SPD ketika perangkat tersebut dialiri arus surja pada kondisi pengujian tertentu. Besaran ini menggambarkan tegangan sisa yang dialami oleh peralatan yang dilindungi selama kejadian surja, sehingga nilai Up harus lebih rendah daripada tegangan tahan impuls peralatan agar isolasi peralatan tidak terlampaui dan tidak terjadi kerusakan dielektrik.

3. *Impulse discharge current* (I_{imp}) - kelas I (Tipe 1)

   Yaitu arus impuls dengan bentuk gelombang 10/350 µs yang digunakan untuk mensimulasikan karakteristik arus petir langsung. Nilai Iimp yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan SPD untuk menyalurkan muatan dan energi petir yang besar pada sisi masuk instalasi tanpa mengalami kerusakan yang mengganggu fungsi proteksi. nilai puncak arus pelepasan melalui SPD dengan transfer muatan yang ditentukan Q dan energi yang ditentukan W/R dalam waktu yang ditentukan.

4. *Nominal Discharge Current* (I_n) - kelas II (Tipe 2)

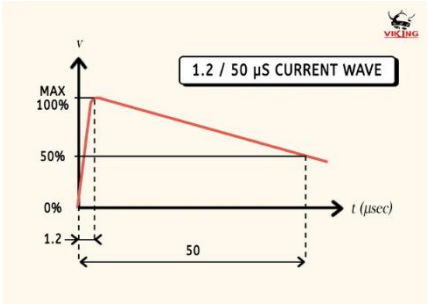
   Menyatakan nilai puncak arus impuls dengan bentuk gelombang 8/20 µs yang dapat dialirkan oleh SPD secara berulang tanpa menimbulkan kerusakan yang tidak dapat diterima. Parameter ini mencerminkan kemampuan SPD untuk menahan paparan surja berulang sepanjang umur layanannya, sehingga menjadi acuan penting pada instalasi yang berpotensi sering mengalami gangguan petir atau switching.

5. *Maximum Discharge Current* (I_{max}) - kelas II (Tipe 2)

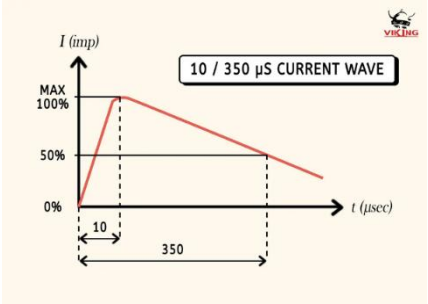
   Adalah nilai puncak arus impuls 8/20 µs terbesar yang masih dapat ditangani SPD untuk satu kejadian surja ekstrem tanpa menyebabkan kegagalan

menyeluruh pada perangkat. Jika In menggambarkan ketahanan terhadap surja berulang, maka Imax lebih merepresentasikan batas kemampuan SPD menghadapi satu kejadian surja dengan energi sangat tinggi.

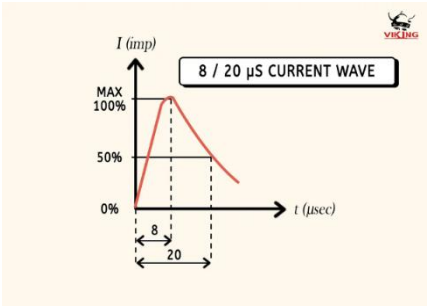
Jenis – Jenis gelombang tegangan dan arus petir yang di maksud antara lain.



Gambar 2. 13 Gelombang tegangan 1,2/50 µs



Gambar 2. 14 Gelombang arus petir 10/350 µs.



Gambar 2. 15 Gelombang arus 8/20 µs

2.10.3 Standar IEC 62305-4

IEC 62305-4 merupakan bagian dari seri standar IEC 62305 yang membahas perlindungan sistem kelistrikan dan elektronik di dalam struktur terhadap pengaruh *Lightning Electromagnetic Impulse* (LEMP). Standar ini memberikan pedoman mengenai perancangan, pemasangan, pemeriksaan, pemeliharaan, dan pengujian

Surge Protection Measures (SPM) yang bertujuan mengurangi risiko kerusakan permanen pada sistem kelistrikan dan elektronik akibat pengaruh surja yang berkaitan dengan sambaran petir.

IEC 62305-4 menitikberatkan pada penerapan sistem proteksi internal secara menyeluruh, sehingga perlindungan terhadap peralatan elektronik tidak hanya bergantung pada karakteristik SPD, tetapi juga pada penerapan *equipotential bonding*, sistem pembumian, *shielding*, serta pembagian instalasi berdasarkan konsep *Lightning Protection Zone* (LPZ). Batas antara zona ditentukan oleh tindakan proteksi yang diterapkan, sehingga tingkat ancaman LEMP pada zona yang lebih terlindungi dapat dikurangi secara bertahap.

Konsep LPZ digunakan untuk membagi ruang atau bagian instalasi berdasarkan tingkat paparan terhadap medan elektromagnetik petir dan arus surja yang mungkin terjadi. Pada batas antar-zona dapat diterapkan tindakan proteksi seperti *equipotential bonding*, *shielding*, dan SPD yang sesuai. Penerapan tersebut memungkinkan tingkat ancaman terhadap sistem kelistrikan dan elektronik dikurangi sehingga sesuai dengan kemampuan ketahanan peralatan yang dilindungi.

Dalam penelitian ini, IEC 62305-4 digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi penerapan sistem proteksi internal pada panel kontrol Gardu Induk Binjai. Evaluasi dilakukan dengan memperhatikan pembagian zona proteksi, penempatan SPD pada jalur instalasi, koordinasi proteksi, serta keterkaitan SPD dengan sistem pembumian dan *equipotential bonding*. Dengan demikian, efektivitas SPD tidak hanya ditinjau berdasarkan karakteristik teknis perangkat, tetapi juga berdasarkan kesesuaiannya sebagai bagian dari sistem proteksi internal terhadap pengaruh LEMP.

Jenis zona dalam konsep *Lightning Protection Zone* (LPZ) menurut IEC 62305 :

1. LPZ 0A (Kelas 1)

   Area luar yang masih bisa terkena sambaran langsung dan mengalami penuh arus petir serta medan elektromagnetik tanpa redaman. seperti kabel udara sebelum masuk bangunan, atap tanpa proteksi
2. LPZ 0B (Kelas 1)

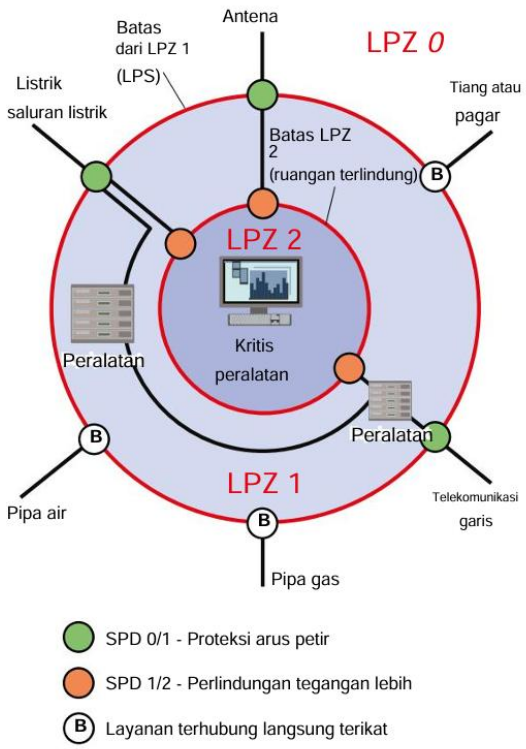
Masih di luar, sudah terlindung dari sambaran langsung oleh sistem penangkal petir eksternal, tetapi masih merasakan medan elektromagnetik penuh dan sebagian arus petir pada konduktor.

3. LPZ 1 (Kelas 2)

   Merupakan zona di dalam bangunan setelah titik masuk (entry point), di mana arus petir yang masuk telah dibatasi melalui pembagian arus dan penggunaan SPD pada batas zona. Di zona ini, medan elektromagnetik petir sudah mengalami peredaman tertentu, sehingga kondisi elektromagnetik lebih ringan dibanding LPZ 0A/0B. LPZ 1 umumnya mencakup area masuknya kabel daya dan sinyal ke dalam bangunan.

4. LPZ 2 (Kelas 3)

   LPZ 2 adalah zona internal yang tingkat proteksinya lebih tinggi dari LPZ 1, dengan arus surja dan medan elektromagnetik yang telah direduksi lebih lanjut. Reduksi ini diperoleh melalui SPD tambahan, equipotential bonding, dan/atau shielding lokal. Untuk penempatan peralatan elektronik yang lebih sensitif, seperti panel kontrol, ruang kontrol, atau peralatan telekomunikasi.



Gambar 2. 16 Konsep dasar LPZ – IEC/BS EN 62305-4

2.11 Software ATP (*Alternative Transients Program*)

Alternative Transients Program (ATP) merupakan perangkat lunak berbasis EMTP yang banyak digunakan secara luas untuk simulasi digital fenomena transien elektromagnetik dan elektromekanik pada sistem tenaga listrik. ATP memungkinkan pemodelan jaringan tenaga listrik yang kompleks, termasuk saluran transmisi, transformator, peralatan proteksi, serta sistem kontrol, dan menganalisis respons waktu nyata akibat gangguan seperti switching, hubung singkat, maupun impuls petir. Dengan kemampuan pemodelan yang luas dan dukungan berbagai elemen jaringan, ATP menjadi salah satu alat utama dalam kajian kinerja sistem proteksi terhadap tegangan lebih transien.



Gambar 2. 17 Aplikasi ATPDraw

Dalam konteks proteksi petir dan surja, ATP banyak dimanfaatkan untuk mensimulasikan rambatan impuls petir pada saluran dan peralatan, mengevaluasi tegangan lebih yang muncul pada titik-titik kritis, serta menilai efektivitas peralatan proteksi seperti surge arrester dan *Surge Protective Device* (SPD). Melalui representasi model saluran terdistribusi, komponen nonlinier, dan sumber impuls, ATP dapat memberikan gambaran kuantitatif mengenai bentuk gelombang tegangan dan arus transien yang terjadi pada instalasi yang dikaji. Hal ini menjadikannya sangat relevan untuk analisis kinerja SPD dan sistem proteksi internal terhadap LEMP.

Pada skripsi ini, ATP digunakan sebagai alat bantu utama untuk mensimulasikan respon transien panel kontrol terhadap impuls petir, dengan memasukkan model SPD sesuai parameter standar IEC 61643-11 dan kondisi sistem yang dirumuskan berdasarkan konsep zona proteksi petir (LPZ) dari IEC

62305-4. Penggunaan ATP memungkinkan penulis untuk membandingkan kondisi tegangan lebih pada panel kontrol dengan dan tanpa penerapan SPD, menilai apakah level tegangan sisa yang terjadi masih berada di bawah kemampuan tahan isolasi peralatan, serta mengevaluasi kesesuaian penempatan dan rating SPD terhadap tujuan proteksi yang diinginkan.

2.11.1 Komponen Pemodelan Sistem Proteksi Surja pada ATPDraw

Pemodelan sistem proteksi surja pada penelitian ini menggunakan beberapa komponen utama pada ATPDraw untuk merepresentasikan sumber surja, saluran, perangkat *Surge Protective Device* (SPD), *rectifier*, dan beban panel kontrol. Pemilihan komponen disesuaikan dengan konfigurasi sistem proteksi berdasarkan kondisi eksisting Gardu Induk Binjai. Komponen yang digunakan dalam pemodelan ATPDraw adalah sebagai berikut.

1. Surge Source – Heidler Type 15

   Surge Source digunakan sebagai sumber pembangkit arus surja pada rangkaian simulasi. Pada penelitian ini digunakan model *Heidler Type 15* untuk merepresentasikan karakteristik impuls arus petir. Model tersebut digunakan sebagai sumber arus surja pada sisi awal sistem sehingga respons tegangan pada setiap titik pengukuran dapat diamati setelah gelombang surja melewati rangkaian proteksi SPD. Besarnya arus surja yang digunakan dalam simulasi divariasikan sesuai dengan skenario penelitian, yaitu 40 kA, 70 kA, dan 110 kA.

2. MOV Type 92

   MOV Type 92 digunakan untuk memodelkan karakteristik nonlinier *Metal Oxide Varistor* (MOV) pada *Surge Protective Device* (SPD) dalam ATPDraw. Model ini digunakan pada seluruh SPD yang terdapat dalam rangkaian penelitian, yaitu OBO LVMDP, Phoenix SDP, FunElec SDP, dan OBO Sub SDP. Karakteristik MOV direpresentasikan melalui hubungan tegangan dan arus yang bersifat nonlinier, sehingga perubahan respons SPD terhadap tegangan lebih akibat surja dapat diamati melalui hasil simulasi. Pemodelan tersebut digunakan untuk merepresentasikan fungsi SPD sebagai pembatas tegangan pada setiap tahapan proteksi.

3. RLC Branch

   RLC Branch digunakan untuk merepresentasikan impedansi bagian penghantar atau penghubung antarbagian sistem dalam model ATPDraw. Komponen ini menyediakan parameter resistif, induktif, dan kapasitif sesuai konfigurasi model yang digunakan, sehingga pengaruh karakteristik rangkaian terhadap perambatan transien dapat diperhitungkan dalam simulasi. Dalam penelitian ini, *RLC Branch* ditempatkan pada bagian penghubung antarbagian sistem sebelum gelombang surja mencapai perangkat proteksi dan beban.

4. Resistor Branch

   Resistor Branch digunakan untuk merepresentasikan bagian sistem yang dimodelkan sebagai elemen resistif. Pada penelitian ini, komponen tersebut digunakan untuk merepresentasikan bagian *rectifier* dan beban panel kontrol pada rangkaian simulasi. *Resistor Branch* pada bagian *rectifier* digunakan sebagai representasi rangkaian setelah proses konversi, sedangkan *Resistor Branch* pada sisi akhir digunakan untuk merepresentasikan beban Panel Relay Defense Scheme (RDS).

Berdasarkan komponen tersebut, model ATPDraw pada penelitian ini membentuk rangkaian yang terdiri atas sumber arus surja, rangkaian penghubung, SPD pada beberapa titik proteksi, *rectifier*, dan beban. Setiap komponen digunakan sesuai fungsi pemodelannya untuk merepresentasikan jalur proteksi surja menuju Panel Relay Defense Scheme (RDS). Model tersebut selanjutnya menjadi dasar untuk melakukan simulasi injeksi arus surja dan mengamati perubahan tegangan transien pada setiap titik pengukuran.

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

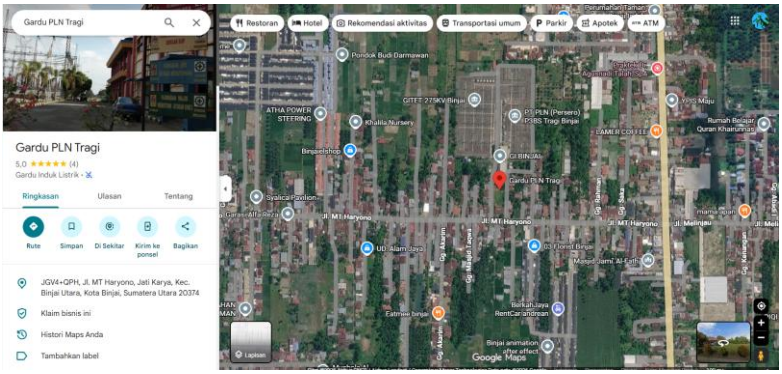
3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif-kuantitatif, yaitu dengan menggambarkan kondisi eksisting instalasi dan spesifikasi *Surge Protective Device* (SPD) pada panel kontrol Gardu Induk Binjai, kemudian mengevaluasi kesesuaian dan efektivitasnya berdasarkan standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4. Pendekatan kuantitatif dilakukan melalui analisis parameter *Surge Protective Device* (SPD), perbandingan dengan ketentuan standar, serta simulasi tegangan lebih transien menggunakan perangkat lunak *Alternative Transients Program* (ATP) untuk melihat respon sistem dan level tegangan sisa pada peralatan kontrol.

3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian

1. Tempat Penelitian

   Penelitian ini dilaksanakan pada PT. PLN (Persero) UIP3B Sumatera Utara Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Binjai, yang beralamat di Jl. MT Haryono, Jati Karya, Kec. Binjai Utara, Kota Binjai, Sumatera Utara 20374.



Gambar 3. 1 PT. PLN (Persero) ULTG Binjai

2. Waktu Penelitian

   Kegiatan penelitian dimulai dari bulan Maret hingga April tahun 2026.

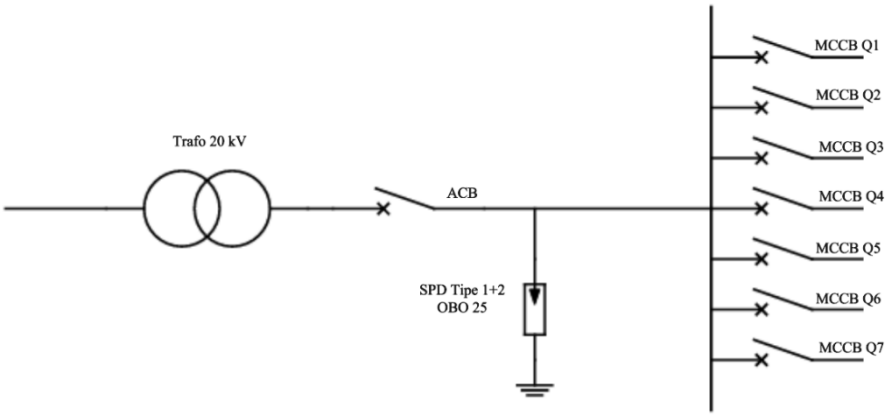
3.3 Data Penelitian

Data penelitian merupakan komponen utama yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian, yaitu menganalisis kesesuaian instalasi dan spesifikasi SPD

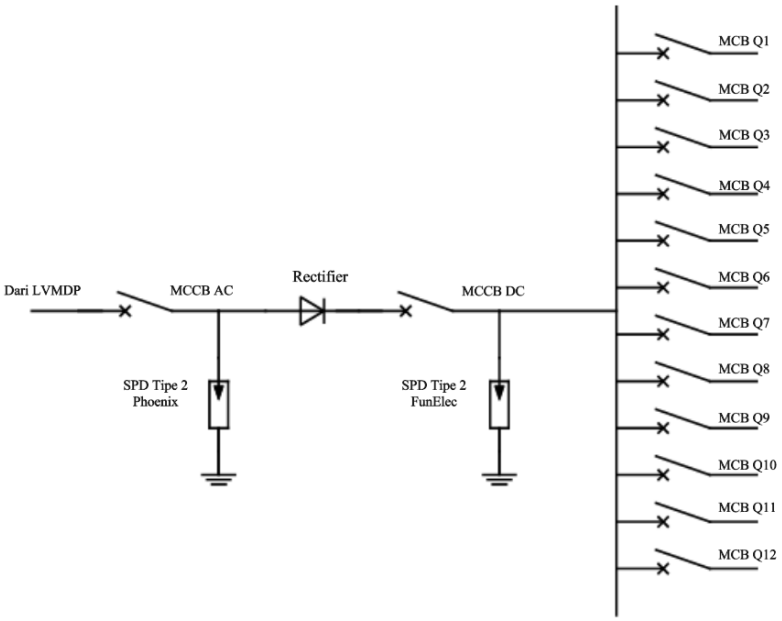
terhadap standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, menilai efektivitasnya dalam meredam tegangan lebih transien dengan simulasi ATP, serta menyusun rekomendasi teknis bagi panel kontrol Gardu Induk Binjai. Secara umum, data yang digunakan dikelompokkan menjadi data teknis sistem, data instalasi SPD, data lingkungan gangguan, dan data pendukung simulasi.

3.3.1 Data teknis sistem dan kontrol panel

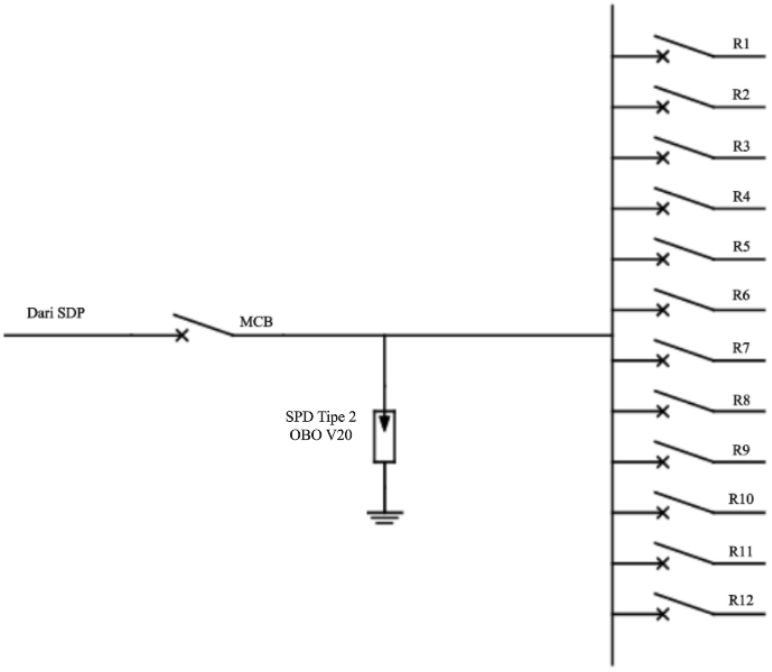
Data teknis sistem dan panel kontrol diperoleh melalui observasi langsung di Gardu Induk Binjai serta dokumentasi teknis yang tersedia. Data ini digunakan untuk mengetahui konfigurasi sistem distribusi tenaga listrik, jalur penyaluran daya, serta posisi pemasangan *Surge Protective Device* (SPD) pada setiap panel. Informasi tersebut menjadi dasar dalam penyusunan model sistem yang akan disimulasikan menggunakan ATPDraw.



Gambar 3. 2 Diagram satu garis SPD di LVMDP



Gambar 3. 3 Diagram satu garis SPD di SDP



Gambar 3. 4 Diagram satu garis SPD di Sub SDP

Diagram satu garis yang digunakan dalam penelitian ini meliputi konfigurasi LVMDP, SDP, dan Sub SDP, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3 sampai dengan Gambar 3.5. Diagram tersebut memberikan informasi mengenai jalur

penyaluran daya dan posisi pemasangan perangkat proteksi yang menjadi objek penelitian.

3.3.2 Data spesifikasi dan instalasi SPD

Data spesifikasi dan instalasi *Surge Protective Device* (SPD) diperoleh melalui observasi langsung di Gardu Induk Binjai serta dokumentasi teknis perangkat yang terpasang pada sistem panel kontrol. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kesesuaian spesifikasi dan instalasi SPD terhadap ketentuan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, sekaligus sebagai acuan dalam penyusunan model simulasi menggunakan ATPDraw. Ringkasan spesifikasi teknis dan instalasi SPD yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Data Spesifikasi dan Istalasi SPD

Parameter	OBO V25	Phoenix	FunElec	OBO V20
Tipe	Tipe 1+2	Tipe 2	Tipe 2	Tipe 2
Tegangan Nominal (Un)	230 V	240/415 V	100 V	130 V
Tegangan Maksimal Berkelanjutan (Uc)	280 V	275 V	110 V	150/200 V
Tegangan Proteksi (Up)	2 kV	1,35 kV	0,6 kV	0,8 kV
Arus Nominal (In) 8/20	30 kA	20 kA	20 kA	20 kA
Arus Maksimum (Imax) 8/20	50 kA	40 kA	40 kA	40 kA
Arus Impuls (Iimp) 10/350	25 kA	-	-	-
Waktu Respon	25	25	25	25

Berdasarkan Tabel 3.1, sistem proteksi pada panel kontrol Gardu Induk Binjai menggunakan empat SPD yang terdiri atas OBO V25 sebagai SPD Tipe 1+2 pada sisi masuk sistem, Phoenix Contact sebagai SPD Tipe 2 pada sisi AC panel *rectifier*, FunElec DC SPD sebagai SPD Tipe 2 pada sisi keluaran 48 VDC, serta OBO V20 sebagai SPD Tipe 2 pada Sub SDP (Panel RDS). Data spesifikasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kesesuaian SPD terhadap standar IEC

61643-11 dan IEC 62305-4 serta sebagai acuan dalam penyusunan model simulasi ATPDraw.

3.3.3 Data pendukung pemodelan simulasi ATP

Data pendukung simulasi digunakan untuk merepresentasikan fenomena tegangan lebih transien (surja petir dan switching) secara realistis dalam perangkat lunak ATP pada sistem panel kontrol.

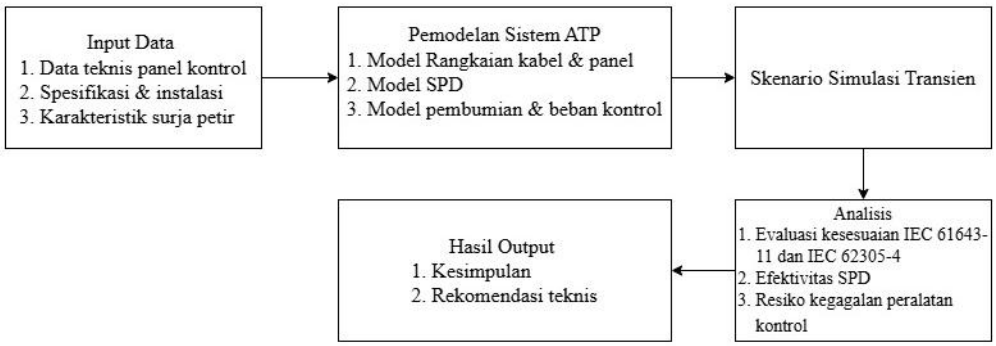
Data yang digunakan dalam simulasi ATP meliputi:

1. Model sumber petir
2. Parameter gelombang petir
3. Rangkaian kabel dan panel kontrol
4. Model SPD
5. Beban panel kontrol

Hasil simulasi ATP berupa tegangan lebih (overvoltage) sebelum dan sesudah SPD digunakan untuk:

1. Mengevaluasi kinerja SPD
2. Menilai efektivitas SPD dalam membatasi tegangan sisa pada peralatan kontrol
3. Memberikan rekomendasi teknis yang optimal

3.4 Diagram Blok Penelitian



Gambar 3. 5 Diagram Blok Penelitian

1. Input Data

   Tahap awal pada diagram blok ini adalah pengumpulan dan penentuan data input yang digunakan sebagai parameter utama dalam pemodelan dan

simulasi transient SPD. Data input berfungsi untuk memvalidasi kondisi eksisting lapangan Gardu Induk Binjai sebelum analisis lebih lanjut

a. Data teknis sistem dan kontrol panel
b. Data spesifikasi dan instalasi SPD
c. Data karakteristik surja

2. Pemodelan Sistem ATP

   Setelah data input diperoleh, tahap selanjutnya adalah pemodelan sistem panel kontrol menggunakan ATPDraw untuk merepresentasikan kondisi eksisting secara akurat. Pemodelan dilakukan detail agar mendekati realitas gardu induk UIP3B, meliputi:

   a. Rangkaian kabel dan panel kontrol
   b. Model SPD
   c. Beban panel kontrol
   d. Sistem pembumian

3. Skenario Simulasi Transien

   penetapan bentuk gangguan yang akan diuji pada model ATP. Skenario disusun berdasarkan karakteristik surja petir dan switching, termasuk penentuan titik masuk surja pada sisi incoming panel kontrol, sehingga simulasi menggambarkan kondisi tegangan lebih yang mungkin terjadi pada panel

4. Analisis

   Hasil simulasi transient dari tahap sebelumnya dievaluasi terhadap persyaratan standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4 untuk menilai kesesuaian instalasi serta efektivitas SPD, termasuk identifikasi risiko kegagalan SPD yang dapat membahayakan sistem panel kontrol

5. Hasil Output

   Berdasarkan hasil analisis standar IEC, tahap terakhir adalah penyusunan rekomendasi teknis untuk optimalisasi sistem proteksi SPD dan panel kontrol secara umum. Output rekomendasi ini memenuhi tujuan penelitian ketiga berupa penyusunan saran perbaikan sistem proteksi secara menyeluruh.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian disusun untuk memastikan bahwa setiap tujuan penelitian dapat dicapai secara terukur dan sistematis. prosedur penelitian dikelompokkan berdasarkan tujuan penelitian sebagai berikut.

A. Menganalisis kesesuaian instalasi dan spesifikasi SPD pada panel kontrol berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4

1. Pengumpulan data teknis sistem dan panel kontrol

   Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data teknis sistem dan panel kontrol sebagai dasar evaluasi kesesuaian SPD

   Data yang digunakan berupa:

   a) Diagram satu garis panel kontrol dan informasi konfigurasi sistem yang terkait dengan suplai panel kontrol.
   b) Tegangan nominal sistem (20 kV/400–230 V/50 Hz)
   c) Jenis sistem pembumian (TN-S), resistansi pembumian gardu induk, serta konfigurasi konduktor PE (titik pengikatan SPD).
   d) Jenis peralatan kontrol atau proteksi yang dilindungi dan informasi panjang kabel suplai menuju panel.

   Hasil dari tahap ini adalah tersusunnya data input teknis panel kontrol dan pembumian yang akan digunakan pada tahap evaluasi spesifikasi serta instalasi SPD.

2. Pengumpulan data spesifikasi SPD

   Tahap selanjutnya adalah mengumpulkan data spesifikasi SPD yang terpasang pada panel kontrol.

   Data yang digunakan berupa:

   a) Tipe SPD (Tipe 1, Tipe 2, atau Tipe 3)
   b) Tegangan nominal (Un)
   c) Tegangan maksimum berkelanjutan (Uc)
   d) Arus pelepasan nominal (In)
   e) Arus impuls maksimum (Imax)
   f) Tingkat perlindungan tegangan (Up)
   g) Mode proteksi (L–N, L–PE, N–PE)

Hasil dari tahap ini adalah tabel spesifikasi SPD eksisting yang siap dibandingkan dengan kriteria standar pada tahap evaluasi.

3. Pengumpulan data eksisting instalasi SPD

   Pada tahap ini dilakukan pendataan kondisi instalasi SPD pada panel kontrol.

   Data yang digunakan berupa:

   a) Lokasi pemasangan SPD pada panel kontrol dan titik pengkabelan SPD pada rangkaian panel.
   b) Jalur pengkabelan SPD ke PE/ground bar dan catatan panjang jalur kabel koneksi sebagai data evaluasi instalasi.
   c) Informasi koordinasi proteksi (koordinasi pemasangan SPD pada level panel).

   Hasil dari tahap ini adalah dokumentasi instalasi SPD (skema koneksi dan data jalur pemasangan) sebagai dasar penilaian kesesuaian instalasi.

4. Identifikasi zona proteksi petir (LPZ)

   Tahap ini bertujuan mengkaji penempatan SPD berdasarkan konsep zona proteksi petir (LPZ) untuk proteksi internal.

   Penentuan LPZ dilakukan dengan mengidentifikasi posisi panel kontrol sebagai bagian dari sistem internal yang memerlukan pembatasan tegangan lebih transien agar tidak mencapai peralatan sensitif.

   Hasil dari tahap ini adalah pemetaan posisi pemasangan SPD terhadap batas zona LPZ yang menjadi dasar keputusan “sesuai/tidak sesuai” pada aspek penempatan.

5. Evaluasi kesesuaian spesifikasi SPD (IEC 61643-11)

   Pada tahap ini dilakukan perbandingan spesifikasi SPD eksisting terhadap kriteria IEC 61643-11 yang mengatur parameter performa utama SPD, yaitu tegangan operasi (Uc), tingkat perlindungan (Up), dan kapasitas arus (In, Imax, Iimp).

   Kriteria tegangan operasi:

   $U_c \geq 1{,}15 \times U_n$

   Keterangan:

   U_c = *Maximum Continuous Operating Voltage*

U_n = Tegangan nominal SPD

Jika:

$U_c < 1{,}15 \times U_n \rightarrow$ SPD berisiko gagal

$U_c \geq 1{,}15 \times U_n \rightarrow$ SPD aman secara operasional

Kriteria tingkat perlindungan:

$U_p < U_w$

Keterangan:

U_p = Residual voltage SPD (kV)

U_w = Impulse withstand voltage peralatan (kV)

Jika $U_p \geq U_w$, maka peralatan panel tetap berisiko rusak walaupun SPD terpasang.

Kriteria kapasitas arus:

$I_{max,SPD} \geq I_{surja_{estimasi}}$

$I_{max,SPD}$ = Maximum discharge current (kA)

$I_{surja_{estimasi}}$ = Perkiraan arus surja puncak yang mengalir di SPD (kA)

Jika nilai Imax terlalu kecil, SPD berpotensi gagal saat terjadi surja besar

B. Menilai kinerja dan efektivitas SPD dalam meredam tegangan lebih transien akibat surja petir dan switching pada sistem kontrol Gardu Induk

1. Penetapan skenario uji dan titik ukur (measurement point)

   Tahap awal dilakukan dengan menetapkan skenario gangguan yang dianalisis, yaitu surja petir dan surja switching yang berpotensi masuk ke sistem kontrol/panel.

   Titik ukur ditetapkan pada:

   a) Parameter karakteristik surja
   b) Kondisi operasi sistem panel kontrol

   Hasil dari tahap ini adalah daftar skenario simulasi dan parameter uji yang akan digunakan pada tahap pemodelan

2. Pengumpulan dan penyiapan data input simulasi ATP

   Tahap selanjutnya dilakukan dengan mengumpulkan dan menyiapkan data input yang dibutuhkan untuk pemodelan rangkaian pada software ATP.

   Data yang digunakan berupa:

a) Data teknis panel kontrol
b) Data sistem pembumian
c) Data spesifikasi SPD
d) Data pendukung pemodelan simulasi ATP

Hasil dari tahap ini adalah rekap input simulasi ATP yang siap dimasukkan ke model rangkaian

3. Pemodelan rangkaian panel kontrol dan SPD pada ATP

   Tahap selanjutnya dilakukan pemodelan rangkaian sederhana panel kontrol pada ATP untuk merepresentasikan jalur masuk surja, posisi pemasangan SPD, jalur ke PE/ground bar, serta beban/peralatan yang dilindungi. Pemodelan dilakukan dengan kondisi SPD eksisting, sesuai spesifikasi dan instalasi lapangan.

   Hasil tahap ini adalah file model ATP yang siap dijalankan untuk skenario petir dan switching.

4. Simulasi respons sistem terhadap surja petir dan switching

   Tahap ini menjalankan simulasi ATP untuk memperoleh bentuk gelombang tegangan/arus pada sisi masuk panel, pada terminal SPD, dan pada terminal peralatan kontrol yang dilindungi.

   Data yang diambil berupa:

   U_{surja} = Tegangan datang/sebelum SPD (kV)

   U_P = Tegangan sisa SPD (kV)

   $U_{equipment}$ = Tegangan yang diterima peralatan (kV)

   Hasil tahap ini adalah data numerik dan kurva gelombang yang menjadi dasar penilaian kinerja dan efektivitas.

5. Perhitungan efektivitas reduksi tegangan oleh SPD

   Tahap ini menghitung tingkat efektivitas SPD dalam menurunkan tegangan surja yang masuk ke panel kontrol

   persamaan efisiensi reduksi tegangan:

   $\eta = \frac{U_{surja} - U_p}{U_{surja}} \times 100\%.$

   Keterangan:

   η = Efisiensi reduksi (%)

U_{surja} = Tegangan surja masuk (kV)

U_p = Tegangan sisa SPD (kV)

6. Evaluasi batas aman peralatan

   Tahap ini menilai apakah proteksi SPD sudah cukup aman bagi peralatan kontrol dengan membandingkan tegangan yang diterima peralatan terhadap tegangan tahan impuls peralatan.

   Kriteria yang digunakan:

   $U_{equipment} < U_w$

   U_w = Tegangan tahan impuls peralatan (kV)

   $U_{equipment}$ = Tegangan yang diterima peralatan (kV)

   Jika perhitungan/hasil simulasi menunjukkan

   $U_{equipment} \geq U_w$

   maka SPD dinilai belum efektif melindungi peralatan pada skenario tersebut walaupun SPD terpasang.

C. Menyusun rekomendasi teknis untuk optimalisasi proteksi surja pada panel kontrol agar lebih efektif dan sesuai standar internasional

1. Rekomendasi spesifikasi SPD

   Analisis ini menghasilkan rekomendasi teknis terkait penyesuaian atau penggantian *Surge Protective Device* (SPD) ketika parameter karakteristik SPD eksisting tidak memenuhi persyaratan perlindungan pada lokasi panel. Data dasar analisis mencakup parameter spesifikasi SPD eksisting

   a) Hasil evaluasi efektivitas proteksi dari simulasi ATP
   b) Klasifikasi zona proteksi petir (LPZ)
   c) Karakteristik tegangan sistem.

   Rekomendasi spesifikasi SPD yang dioptimalkan untuk setiap tingkatan panel distribusi, dengan perbandingan parameter eksisting terhadap persyaratan standar.

2. Perancangan rekomendasi pemasangan dan pembumian

   Analisis ini menghasilkan strategi perbaikan konfigurasi instalasi SPD yang secara langsung memengaruhi efektivitas proteksi, dengan fokus utama

pada optimalisasi jalur konduktor SPD ke sistem PE/ground bar, kualitas equipotential bonding, serta minimisasi impedansi koneksi

Data dasar analisis meliputi;

a) Karakteristik sistem pembumian Gardu Induk
b) Pengaruh instalasi terhadap tegangan residual SPD dari simulasi ATP.

3. Perancangan rekomendasi koordinasi SPD bertingkat

   Pada bagian ini dirumuskan rekomendasi koordinasi proteksi berjenjang agar pembagian energi surja terjadi secara bertahap antara proteksi di sisi hulu dan sisi hilir.

   Data yang digunakan berupa:

   a) Konfigurasi SPD antar level panel
   b) Konsep zona proteksi petir (LPZ)
   c) Hasil evaluasi koordinasi pada kondisi eksisting.

4. Verifikasi Rekomendasi melalui Simulasi Transien ATP

   Pada bagian ini dilakukan verifikasi rekomendasi menggunakan pemodelan transien ATP melalui skenario uji yang konsisten dengan kondisi eksisting.

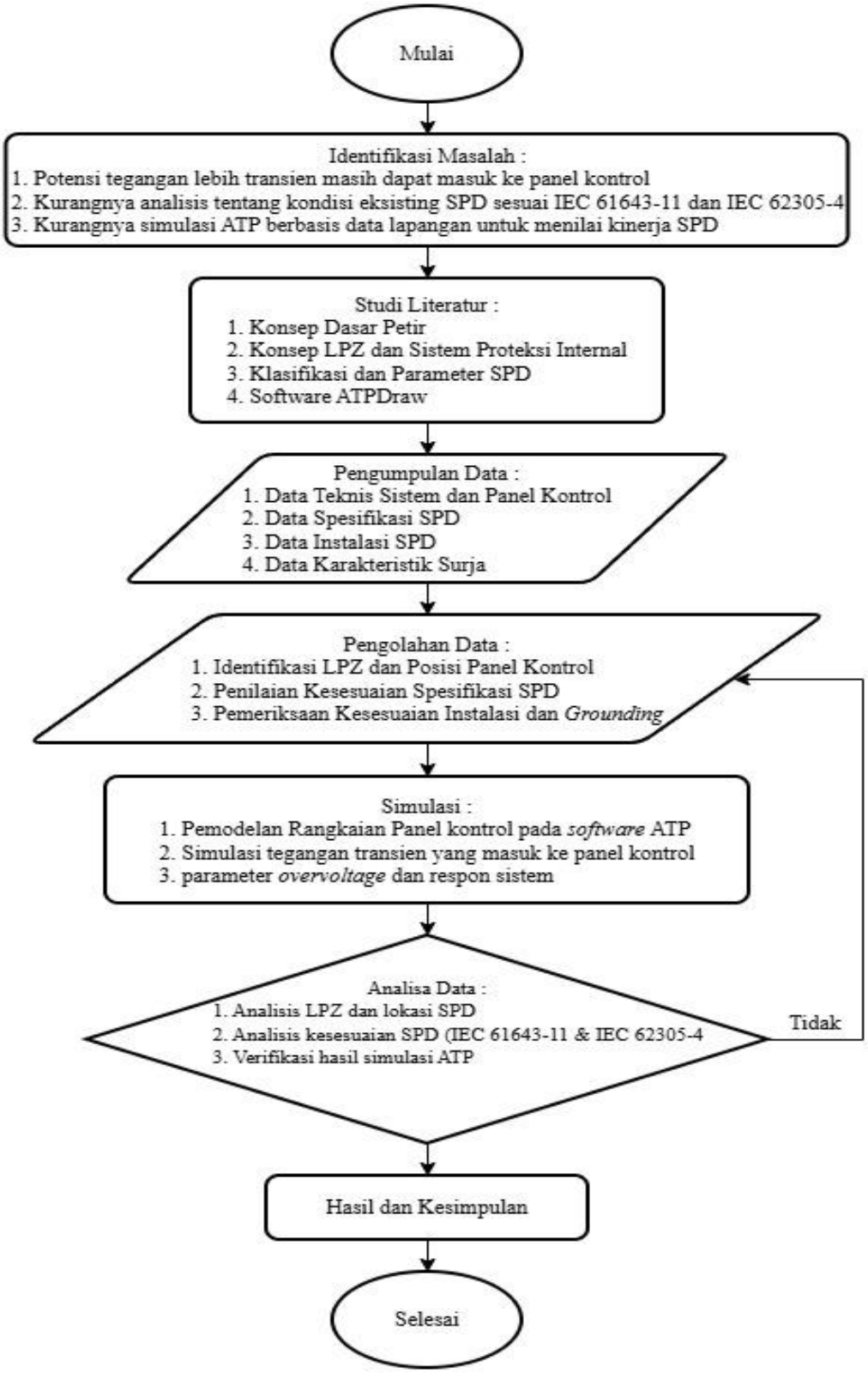
   Data yang digunakan meliputi:

   a) Model ATP eksisting
   b) Model ATP setelah modifikasi sesuai rekomendasi

   Diperoleh berupa perbandingan parameter kinerja proteksi pada kondisi eksisting dan kondisi perbaikan sebagai dasar pengambilan keputusan rekomendasi.

3.6 Diagram Alir Penelitian

Penelitian secara sistematis mulai dari identifikasi masalah, studi literatur, pengumpulan data, hingga proses pemodelan dan simulasi menggunakan software ATP/EMTP. Tahapan ini dilanjutkan dengan analisis hasil simulasi untuk mengevaluasi efektivitas Surge Protective Device (SPD) dalam mereduksi tegangan lebih sesuai standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, kemudian diakhiri dengan penarikan kesimpulan. Diagram alir ini berfungsi sebagai panduan agar penelitian dapat dilakukan secara terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan.



Gambar 3. 6 Diagram Alir Penelitian

3.6.1 Penjelasan Diagram Alir

Berikut adalah penjelasan dari diagram alir di atas dalam bentuk poin-poin, antaranya:

1. Mulai

   Tahap awal penelitian ditandai dengan penentuan ruang lingkup dan arah penelitian. Pada tahap ini, peneliti mempersiapkan tujuan penelitian yaitu analisis efektivitas Surge Protective Device (SPD) pada panel kontrol Gardu Induk Binjai berdasarkan standar IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, serta memastikan fokus kajian pada evaluasi kondisi eksisting dan simulasi menggunakan software ATP.

2. Identifikasi Masalah

   Tahap ini bertujuan untuk merumuskan permasalahan utama yang menjadi dasar penelitian. Identifikasi masalah meliputi:

   a. Potensi tegangan lebih transien masih dapat masuk ke panel kontrol

      Menjelaskan bahwa surja petir maupun switching masih berpeluang mencapai panel kontrol dan berisiko mengganggu peralatan kontrol dan proteksi.

   b. Kurangnya analisis tentang kondisi eksisting SPD sesuai IEC 61643-11 dan IEC 62305-4

      Menunjukkan bahwa spesifikasi dan pemasangan SPD yang ada belum dievaluasi secara sistematis menggunakan standar.

   c. Kurangnya simulasi ATP berbasis data lapangan untuk menilai kinerja SPD

      Belum banyak dilakukan evaluasi kuantitatif melalui simulasi ATP yang memodelkan kondisi eksisting lapangan.

      Hasil dari tahap ini adalah rumusan masalah yang jelas dan terarah sebagai dasar penyusunan tahapan pengumpulan data, pengolahan data, simulasi, dan analisa pada penelitian.

3. Studi Literatur :

   a. Konsep Dasar Petir

      Mempelajari mekanisme terjadinya petir, parameter petir, bentuk gelombang surja, serta dampaknya terhadap timbulnya tegangan lebih transien pada sistem tenaga listrik dan peralatan kontrol.

b. Konsep LPZ dan Sistem Proteksi Internal

Membahas konsep *Lightning Protection Zone* (LPZ), proteksi internal, serta prinsip *equipotential bonding* dan grounding sebagai dasar penentuan zona proteksi dan penempatan SPD pada instalasi panel kontrol.

c. Klasifikasi dan Parameter SPD

Mengkaji klasifikasi SPD (tipe/kelas) dan parameter utama SPD (Uc, Up, In, Imax/Iimp) serta prinsip kerja SPD dalam membatasi tegangan lebih dan menyalurkan arus surja ke sistem pembumian sebagai dasar evaluasi kesesuaian SPD.

d. Software ATPDraw

Memahami prinsip kerja, kemampuan, serta metode pemodelan dan simulasi transien menggunakan ATP/ATPDraw untuk merepresentasikan kondisi eksisting panel kontrol dan menguji respons SPD terhadap surja petir maupun switching.

4. Pengumpulan Data

Tahap ini bertujuan untuk memperoleh data teknis yang dibutuhkan sebagai dasar evaluasi kesesuaian SPD dan penyusunan model simulasi ATP.

a. Data Teknis Sistem dan Panel Kontrol

Mengumpulkan informasi konfigurasi panel, jalur masuk, serta kondisi sistem yang diperlukan untuk analisis dan pemodelan.

b. Data Spesifikasi SPD

Mengumpulkan data nameplate atau datasheet SPD untuk penilaian kesesuaian parameter berdasarkan standar.

c. Data Instalasi SPD

Mengumpulkan data lokasi pemasangan, wiring, bonding, dan grounding SPD untuk menilai kesesuaian penerapannya.

d. Data Karakteristik Surja

Mengumpulkan parameter surja petir maupun switching sebagai input skenario gangguan pada simulasi.

5. Pengolahan Data

   Tahap ini dilakukan untuk menyiapkan data agar siap digunakan pada evaluasi standar dan simulasi ATP, serta memastikan keterkaitan antara kondisi instalasi, lokasi panel, dan kebutuhan proteksi.

   a. Identifikasi LPZ dan Posisi Panel Kontrol

      Menentukan zona LPZ terkait panel kontrol untuk menetapkan kebutuhan proteksi dan lokasi SPD yang relevan.

   b. Penilaian Kesesuaian Spesifikasi SPD

      Membandingkan parameter SPD dengan kebutuhan proteksi dan standar yang digunakan.

   c. Pemeriksaan Kesesuaian Instalasi dan Grounding

      Mengevaluasi instalasi yang memengaruhi efektivitas proteksi.

6. Simulasi

   Tahap simulasi dilakukan untuk menganalisis respons panel kontrol terhadap tegangan lebih transien secara dinamis, serta menilai kinerja SPD dalam membatasi surja yang masuk ke panel.

   a. Pemodelan Rangkaian Panel kontrol pada software ATP

      Rangkaian panel kontrol dimodelkan pada ATP sesuai kondisi eksisting.

   b. Simulasi tegangan transien yang masuk ke panel kontrol

      Gangguan dimodelkan sebagai surja petir dan transien switching yang merambat masuk ke panel kontrol.

   c. Parameter overvoltage dan respon sistem

      Hasil simulasi yang dianalisis dalam bentuk parameter utama pada SPD yang diterima peralatan, SPD sebagai indikator efektivitas proteksi

7. Analisa Data

   Hasil evaluasi standar dan hasil simulasi ATP dianalisis lebih lanjut untuk menarik kesimpulan teknis mengenai kesesuaian dan efektivitas SPD pada panel kontrol.

   a. Analisis LPZ dan lokasi SPD

      Menganalisis pembagian zona proteksi petir (LPZ) dan posisi panel kontrol untuk memastikan bahwa penempatan SPD sudah sesuai dengan konsep proteksi internal.

Analisis ini digunakan untuk menilai ketepatan lokasi SPD terhadap jalur masuk surja, serta keterkaitannya dengan bonding dan jalur pembumian yang tersedia.

b. Analisis kesesuaian SPD

Mengevaluasi kesesuaian SPD eksisting berdasarkan parameter teknis SPD serta kesesuaian penerapannya pada panel kontrol berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4

c. Verifikasi hasil simulasi ATP

Menganalisis hasil simulasi ATP berupa tegangan surja sebelum SPD, tegangan sisa (Up), serta tegangan yang diterima peralatan ($U_{equipment}$), untuk menilai kemampuan SPD meredam tegangan lebih transien

Apabila hasil analisis menunjukkan ketidaksesuaian terhadap standar, maka dilakukan penyesuaian, kemudian simulasi ATP dijalankan kembali hingga diperoleh kondisi proteksi yang lebih optimal.

8. Hasil dan Kesimpulan

Pada tahap ini dirangkum seluruh hasil penelitian sebagai dasar penarikan kesimpulan akhir dan penyusunan rekomendasi teknis terkait efektivitas SPD pada panel kontrol.

a. Kesesuaian instalasi dan spesifikasi SPD terhadap standar
b. Respons panel kontrol terhadap surja (hasil simulasi ATP)
c. Efektivitas SPD dalam membatasi tegangan lebih transien
d. Rekomendasi perbaikan sistem proteksi petir

9. Selesai

Tahap akhir penelitian yang menandai bahwa seluruh rangkaian pengumpulan data, evaluasi kesesuaian standar, simulasi ATP, analisis hasil, serta penyusunan rekomendasi telah diselesaikan sesuai ruang lingkup penelitian.

BAB 4
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil penelitian dan pembahasan mengenai efektivitas Surge Protective Device (SPD) pada panel kontrol Gardu Induk Binjai berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4. Hasil penelitian diperoleh melalui tahapan observasi kondisi eksisting, evaluasi kesesuaian instalasi dan spesifikasi SPD terhadap standar internasional, pemodelan sistem menggunakan Alternative Transients Program Draw (ATPDraw), serta simulasi gangguan surja petir dengan variasi arus impuls sebesar 40 kA, 70 kA, dan 110 kA. Seluruh hasil simulasi kemudian dianalisis untuk mengetahui kemampuan SPD dalam mereduksi tegangan lebih transien pada setiap titik pengukuran di panel kontrol.

Pembahasan pada bab ini tidak hanya menyajikan hasil simulasi secara kuantitatif, tetapi juga menginterpretasikan hubungan antara karakteristik surja petir, mekanisme kerja SPD, dan tingkat efektivitas sistem proteksi internal berdasarkan parameter tegangan sisa (*residual voltage*) serta persentase reduksi tegangan. Hasil yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan ketentuan yang tercantum dalam IEC 61643-11 dan IEC 62305-4 guna mengevaluasi tingkat kesesuaian sistem proteksi yang diterapkan pada Gardu Induk Binjai.

Selain itu, bab ini mengidentifikasi kontribusi penelitian melalui analisis terhadap perubahan karakteristik proteksi SPD pada berbagai tingkat arus impuls. Pembahasan difokuskan pada kemampuan SPD dalam mempertahankan kinerja proteksi terhadap peningkatan gangguan surja, sehingga diperoleh gambaran mengenai efektivitas sistem proteksi internal secara menyeluruh. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan validasi terhadap kondisi eksisting, tetapi juga menjadi dasar dalam penyusunan rekomendasi teknis untuk optimalisasi sistem proteksi internal pada gardu induk yang memiliki karakteristik serupa.

4.1 Analisis Kondisi Eksisting dan Kesesuaian SPD Pada Panel Kontrol

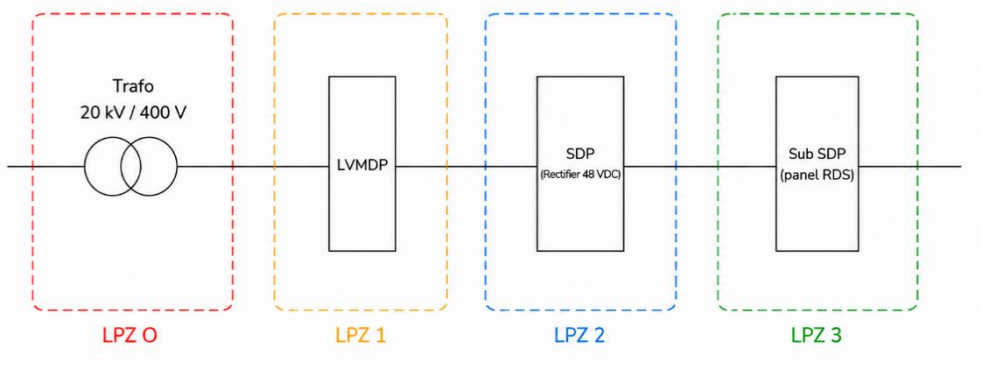
Pada penelitian ini, analisis kondisi eksisting dilakukan pada satu jalur sistem panel kontrol yang terhubung dari sisi transformator hingga panel RDS. Analisis difokuskan pada konfigurasi pemasangan Surge Protective Device (SPD),

pembagian Lightning Protection Zone (LPZ), spesifikasi teknis perangkat, serta keterhubungan SPD terhadap sistem pembumian.

Evaluasi dilakukan melalui perbandingan data spesifikasi SPD eksisting dengan parameter teknis yang relevan berdasarkan IEC 61643-11 dan konsep perlindungan terhadap Lightning Electromagnetic Impulse (LEMP) berdasarkan IEC 62305-4. IEC 61643-11 digunakan sebagai dasar identifikasi karakteristik dan klasifikasi SPD pada sistem tegangan rendah AC, sedangkan IEC 62305-4 digunakan untuk mengevaluasi pembagian LPZ, pemasangan SPD secara bertingkat, koordinasi proteksi, serta prinsip grounding dan bonding.

4.1.1 Gambaran Jalur Proteksi Dan Pembagian LPZ

Penelitian ini difokuskan pada satu jalur distribusi tenaga yang mensuplai Panel Relay Defense Scheme (RDS) di Gardu Induk Binjai. Jalur tersebut dipilih karena mewakili sistem proteksi panel kontrol yang dilengkapi dengan beberapa Surge Protective Device (SPD) yang dipasang secara bertingkat mulai dari sisi masuk instalasi hingga panel beban. Dengan membatasi objek penelitian pada satu jalur distribusi, analisis dapat dilakukan secara lebih rinci terhadap kesesuaian instalasi, spesifikasi, dan koordinasi SPD berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4.



Gambar 4. 1 Pembagian Zona proteksi

Berdasarkan hasil observasi lapangan, jalur distribusi tenaga dimulai dari transformator distribusi 20 kV/400 V yang kemudian menyalurkan daya menuju Low Voltage Main Distribution Panel (LVMDP). Selanjutnya energi listrik diteruskan menuju Secondary Distribution Panel (SDP), kemudian menuju Sub Secondary Distribution Panel (Sub SDP) yang merupakan Panel Relay Defense

Scheme (RDS). Jalur inilah yang menjadi fokus penelitian karena seluruh SPD yang dianalisis berada pada lintasan distribusi tersebut.

Pembagian Lightning Protection Zone (LPZ) pada jalur penelitian dilakukan berdasarkan konsep yang dijelaskan dalam IEC 62305-4. LPZ digunakan untuk membagi sistem instalasi menjadi beberapa zona dengan tingkat paparan surja yang berbeda sehingga penempatan SPD dapat dilakukan secara bertahap sesuai tingkat perlindungan yang dibutuhkan.

Pada penelitian ini, sisi transformator 20 kV/400 V dikategorikan sebagai LPZ 0 karena merupakan titik awal masuknya energi surja ke sistem distribusi. Setelah memasuki LVMDP, sistem berada pada LPZ 1 yang merupakan zona pertama setelah proteksi awal. Selanjutnya SDP dikategorikan sebagai LPZ 2 karena berada setelah panel distribusi utama dan telah memperoleh perlindungan tambahan. Panel Relay Defense Scheme (RDS) berada pada LPZ 3 sebagai zona yang melindungi peralatan kontrol dan proteksi yang memiliki tingkat sensitivitas lebih tinggi terhadap tegangan lebih transien. Ringkasan pembagian LPZ pada objek penelitian disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Jalur proteksi dan pembagian LPZ

No	Peralatan / Panel	Zona LPZ	Keterangan
1	Trafo 20 kV / 400 V	LPZ 0	Sumber suplai tenaga listrik menuju sistem distribusi tegangan rendah.
2	LVMDP	LPZ 1	Panel distribusi utama yang menjadi batas awal sistem proteksi internal.
3	SDP	LPZ 2	Panel distribusi sekunder yang menyuplai sistem kontrol dan proteksi.
4	Sub SDP (Panel RDS)	LPZ 3	Panel yang menyuplai peralatan Relay Defense Scheme (RDS).

Berdasarkan Tabel 4.1, jalur distribusi tenaga dan pembagian LPZ tersebut menunjukkan bahwa sistem proteksi pada jalur menuju Panel RDS menerapkan konsep proteksi berlapis (*layered protection*). Pembagian zona ini menjadi dasar dalam menganalisis kesesuaian penempatan, spesifikasi, serta koordinasi SPD terhadap ketentuan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4.

4.1.2 Kondisi Eksisting Pemasangan SPD Pada Panel Kontrol

Berdasarkan hasil observasi lapangan pada jalur distribusi menuju Panel Relay Defense Scheme (RDS), sistem proteksi surja menggunakan empat Surge Protective Device (SPD) yang dipasang secara bertingkat mengikuti alur distribusi tenaga dari sisi sumber hingga panel kontrol.

Pada Low Voltage Main Distribution Panel (LVMDP) yang berada pada LPZ 1 terpasang SPD OBO V25-B+C 3+NPE+AS yang berfungsi sebagai proteksi awal terhadap tegangan lebih transien yang berasal dari sisi sumber. SPD ini merupakan kombinasi Type 1+2 sehingga mampu meredam energi surja berarus besar sekaligus memberikan perlindungan lanjutan terhadap sistem distribusi tegangan rendah.

Selanjutnya pada Secondary Distribution Panel (SDP) yang berada pada LPZ 2 ditemukan dua SPD dengan fungsi yang berbeda. SPD Phoenix VAL-MS 230/3+1 FM dipasang pada sisi AC sebagai proteksi terhadap tegangan lebih transien sebelum energi listrik memasuki sistem penyearah (*rectifier*). Pada sisi keluaran DC dipasang FunElec DC SPD 2P 100 V untuk melindungi sistem distribusi 48 VDC dari gangguan tegangan lebih transien.

Pada Sub Secondary Distribution Panel (Sub SDP) atau Panel Relay Defense Scheme (RDS) yang berada pada LPZ 3 dipasang OBO V20-C 0-150 sebagai proteksi tambahan sebelum tegangan didistribusikan ke peralatan kontrol dan proteksi. Pemasangan SPD pada panel ini bertujuan mengurangi tegangan sisa (*residual voltage*) yang masih mungkin diteruskan dari zona proteksi sebelumnya sehingga peralatan elektronik yang lebih sensitif memperoleh tingkat perlindungan yang lebih baik.

Tabel 4. 2 Pemasangan SPD Pada Panel

Lokasi	Zona LPZ	Tipe SPD	Model / Merk
LVMDP	LPZ 1	Tipe 1 + 2	OBO V25 -B+C 3+NPE+AS
SDP	LPZ 2	Tipe 2	Phoenix VAL-MS 230/3+1 FM
			FunElec DC SPD 2P 100 V
Sub SDP (RDS)	LPZ 3	Tipe 2	OBO V20-C 0-150

Berdasarkan Tabel 4.2, sistem pembumian yang digunakan pada seluruh titik pemasangan SPD pada sisi AC adalah sistem TN-S, dengan skema koneksi proteksi

L-N, L-PE, dan N-PE. Pada sisi DC (SDP dan Sub SDP), SPD terpasang pada konfigurasi DC+, DC-, dan PE sesuai rekomendasi pabrikan masing-masing perangkat. Hasil observasi visual terhadap kondisi fisik keempat SPD menunjukkan seluruh perangkat terpasang dengan sambungan yang rapi menggunakan sepatu kabel/ferrule, tanpa indikasi korosi maupun kerusakan pada housing, sehingga secara umum berada dalam kondisi baik dan layak operasi.

4.1.3 Data Spesifikasi SPD Berdasarkan Lokasi Terpasang

Data spesifikasi teknis pada setiap titik pemasangan diperoleh dari nameplate dan datasheet resmi pabrikan untuk masing-masing SPD. Data ini menjadi acuan utama pada tahap evaluasi kesesuaian parameter teknis terhadap IEC 61643-11 pada sub-bab berikutnya. Rekapitulasi data spesifikasi teknis disajikan pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Data Spesifikasi SPD berdasarkan lokasi terpasang

No	Lokasi pemasangan	Zona LPZ	Tipe/Kelas SPD	Spesifikasi SPD
1	LVMDP	LPZ 1	Tipe 1+2	OBO V25-B+C 3+NPE+AS I_{imp}= 25 kA I_n = 30 kA I_{max} = 100 kA U_n = 230 V U_c = 280 V $U_p \leq$ 2 kV
2	SDP	LPZ 2	Tipe 2	Phoenix VAL-MS 230/3+1 FM I_n = 20 kA I_{max} = 40 kA U_n = 240/415 V U_c = 275 V $U_p \leq$ 1,35 kV
				FunElec DC SPD 2P 100 V I_n = 20 kA I_{max} = 40 kA U_n = 100 V U_c = 110 V $U_p \leq$ 0,6 kV

No	Lokasi pemasangan	Zona LPZ	Tipe/Kelas SPD	Spesifikasi SPD
3	Sub SDP	LPZ 3	Tipe 2	OBO V20-C 0-150 I_n = 20 kA I_{max} = 40 kA U_n = 130 V U_c = 150/200 V $U_p \leq$ 0,8 kV

Tegangan sistem operasional aktual pada SDP sisi DC adalah 48 VDC (hasil konversi rectifier), sedangkan pada Sub SDP adalah 110 VDC untuk kontrol proteksi dan 48 VDC untuk telekomunikasi/SCADA, sebagaimana dikonfirmasi dari single line diagram rectifier 48 V 80 A pada objek penelitian. Perbedaan ini menjadi dasar perhitungan pada evaluasi kesesuaian Uc pada sub-bab 4.1.5.

4.1.4 Evaluasi kesesuaian penempatan spd terhadap konsep LPZ Berdasarkan IEC 62305-4

Evaluasi penempatan dilakukan dengan membandingkan titik pemasangan SPD eksisting terhadap ketentuan IEC 62305-4, yang mensyaratkan pemasangan SPD pada setiap titik transisi LPZ agar arus surja dan tegangan lebih dapat direduksi secara bertahap sebelum mencapai peralatan yang dilindungi. Hasil evaluasi disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Kesesuaian penempatan SPD terhadap LPZ

Titik Transisi LPZ	Ketentuan IEC 62305-4	Kondis Eksisting	Status
LPZ 0 – 1 (LVMDP)	Wajib SPD Tipe 1 (Kombinasi 1 + 2)	Terpasang OBO V25-B+C 3+NPE+AS, Tipe 1+2	Sesuai
LPZ 1 – 2 (SDP)	Wajib SPD Tipe 2	Terpasang Phoenix VAL-MS 230/3+1 FM (AC), Tipe 2	Sesuai
		Terpasang FunElec DC SPD 2P 100V (DC), Tipe 2	Sesuai
LPZ 2 – 3 (Sub SDP)	Direkomendasikan SPD Tipe 2/3	Terpasang OBO V20-C 0-150, Tipe 2	Sesuai

Berdasarkan Tabel 4.4, seluruh titik transisi LPZ pada jalur penelitian telah dilengkapi SPD dengan tipe yang sesuai ketentuan. Penempatan SPD kombinasi Tipe 1+2 pada LVMDP memberikan proteksi awal yang lebih optimal, sementara pemasangan SPD terpisah pada sisi AC dan sisi DC di SDP merupakan praktik yang baik, mengingat proses konversi AC-DC pada rectifier menciptakan jalur distribusi baru yang tetap berpotensi dilalui surja sisa maupun surja induksi internal panel.

4.1.5 Evaluasi kesesuaian instalasi SPD berdasarkan IEC 62305-4

Evaluasi instalasi mencakup kualitas sambungan, kondisi fisik, penampang konduktor pembumian, dan resistansi pembumian pada seluruh titik pemasangan SPD. Hasil evaluasi disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 5 Evaluasi kesesuaian instalasi SPD terhadap IEC 62305-4

Teknis Instalasi	Kondisi Eksisting	Status
Kualitas sambungan/terminasi	Terpasang rapi menggunakan sepatu kabel/ferrule, tidak ada indikasi korosi	Sesuai
Kondisi fisik SPD	Housing seluruh SPD tidak menunjukkan keretakan atau tanda kerusakan	Sesuai
Penampang konduktor terpasang	LVMDP: 16 mm²; SDP-AC, SDP-DC, dan Sub SDP: 10 mm²	Sesuai
Resistansi pembumian gedung (syarat umum ≤1 Ω)	0,56 Ω	Sesuai

Berdasarkan Tabel 4.7, seluruh aspek instalasi yang dievaluasi telah memenuhi ketentuan IEC 62305-4. Penampang konduktor pembumian pada LVMDP (16 mm²) memenuhi persyaratan minimum untuk SPD Tipe 1 (16 mm² Cu), sedangkan pada SDP-AC, SDP-DC, dan Sub SDP (10 mm²) memenuhi pe00rsyaratan minimum untuk SPD Tipe 2 (sekitar 6 mm² Cu) dengan margin tambahan. Resistansi pembumian gedung sebesar 0,56 Ω juga jauh berada di bawah batas umum resistansi pembumian gardu induk (≤1 Ω), menunjukkan kualitas sistem pembumian yang sangat baik.

4.1.6 Evaluasi kesesuaian parameter teknis SPD berdasarkan IEC 61643-11

Evaluasi parameter teknis Surge Protective Device (SPD) dilakukan untuk mengetahui kesesuaian karakteristik SPD yang terpasang terhadap kondisi tegangan pada sistem panel kontrol. Parameter yang dievaluasi meliputi Maximum Continuous Operating Voltage (Uc) dan Voltage Protection Level (Up). Uc digunakan untuk menilai kemampuan SPD dalam beroperasi secara kontinu pada tegangan sistem, sedangkan Up digunakan untuk menilai tingkat tegangan yang masih dapat muncul pada terminal SPD ketika terjadi tegangan lebih transien. Data parameter SPD yang digunakan dalam evaluasi diperoleh dari data spesifikasi perangkat yang telah direkap berdasarkan lokasi pemasangannya. Data tersebut meliputi nilai Un, Uc, Up, In, Imax, dan Iimp pada masing-masing SPD.

Penentuan status kesesuaian tidak dilakukan hanya berdasarkan nilai spesifikasi SPD, tetapi melalui perbandingan antara nilai aktual SPD dengan kriteria teknis yang digunakan sebagai dasar evaluasi. IEC 61643-11 digunakan sebagai standar utama dalam penelitian karena mengatur karakteristik dan parameter teknis Surge Protective Device. Untuk memperjelas penerapan kriteria numerik dalam pemilihan Uc, digunakan panduan teknis TrilPeak sebagai sumber sekunder yang merujuk pada IEC 61643-11. Dengan demikian, TrilPeak digunakan sebagai sumber pendukung dalam menerapkan kriteria perhitungan, sedangkan IEC 61643-11 tetap menjadi dasar standar dalam evaluasi parameter SPD [25].

A. Evaluasi Maximum Continuous Operating Voltage (Uc)

Evaluasi Uc dilakukan dengan membandingkan nilai Uc SPD terhadap tegangan operasi kontinu sistem pada lokasi pemasangannya. Pada sistem AC 380/220 V, tegangan fasa-netral sebesar 220 V digunakan sebagai tegangan acuan. Panduan teknis TrilPeak mencantumkan kriteria pemilihan Uc untuk sistem TN dengan hubungan:

$U_c \geq 1{,}15 \times U_n$

Keterangan:

U_c = *Maximum Continuous Operating Voltage*

U_n = Tegangan nominal SPD atau fasa-netral sistem

Dengan demikian, dasar penentuan status kesesuaian dapat ditelusuri dari tegangan sistem, kriteria pemilihan Uc, hasil perhitungan, dan nilai Uc aktual SPD disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 6 Kesesuaian SPD berdasarkan IEC 61643 – 11

Lokasi	Tegangan Sistem	Uc	Syarat Minimum Uc	Status
LVMDP	AC 380/220 V	280 V	1,15×220 = 253 V	Sesuai
SDP	AC 380/220 V	275 V	1,15×220 = 253 V	Sesuai
	DC 48 V	110 V	1,2×48 = 57,6 V	Sesuai
Sub SDP	DC 48 dan 110	200 V	1,2×48 = 57,6 V 1,2×110 = 132 V	Sesuai

Berdasarkan Tabel 4.5, SPD OBO V25-B+C pada LVMDP memiliki nilai Uc sebesar 280 V, sedangkan batas minimum Uc hasil perhitungan sebesar 253 V. Karena nilai Uc aktual lebih besar daripada nilai minimum yang digunakan sebagai kriteria, yaitu 280 > 253 V, maka SPD pada LVMDP memenuhi kriteria tegangan operasi kontinu.

Pada SDP sisi AC, SPD Phoenix VAL-MS 230/3+1 FM memiliki Uc sebesar 275 V. Nilai tersebut juga lebih besar daripada batas minimum 253 V, sehingga diperoleh 275 > 253 V dan SPD dinyatakan memenuhi kriteria Uc untuk sistem AC. Pada sisi DC, tegangan operasi aktual sistem yang teridentifikasi pada SDP adalah 48 VDC, sedangkan nilai Uc SPD FunElec adalah 110 V. Pada Sub SDP terdapat tegangan operasi 48 V dan 110 V, sedangkan SPD OBO V20-C memiliki nilai Uc 150/200 V. Data tegangan sistem tersebut menjadi dasar pembandingan nilai Uc terhadap tegangan operasi kontinu sistem.

Untuk sistem DC, penilaian dilakukan dengan memastikan bahwa nilai Uc SPD berada di atas tegangan operasi kontinu sistem. Faktor 1,2 yang sebelumnya digunakan dalam perhitungan 1,2 × 48 V dan 1,2 × 110 V tidak digunakan sebagai persyaratan umum IEC 61643-11, karena pada sumber TrilPeak faktor tersebut ditampilkan dalam konteks pemilihan SPD DC untuk sistem fotovoltaik [25]. Oleh karena itu, untuk sistem DC 48 V dan 110 V pada panel kontrol, kriteria yang

digunakan adalah nilai Uc SPD harus lebih tinggi daripada tegangan operasi kontinu sistem.

Dengan pendekatan tersebut, Uc FunElec sebesar 110 V lebih tinggi daripada tegangan operasi 48 V. Demikian pula, nilai Uc OBO V20-C sebesar 150/200 V lebih tinggi daripada tegangan operasi 48 V maupun 110 V. Dengan demikian, SPD pada sisi DC memenuhi kriteria tegangan operasi kontinu berdasarkan kondisi sistem yang dilindungi.

B. Evaluasi Voltage Protection Level (Up)

Selain Uc, evaluasi dilakukan terhadap parameter Up. Nilai Up merupakan parameter yang menunjukkan tingkat perlindungan tegangan SPD dan digunakan untuk menilai besarnya tegangan yang masih dapat diteruskan ke sisi peralatan ketika SPD bekerja. Oleh karena itu, nilai Up aktual dari masing-masing SPD dibandingkan dengan batas tingkat perlindungan yang digunakan pada tahapan zona proteksi atau LPZ tempat SPD dipasang.

Penentuan batas pembanding Up dilakukan berdasarkan tahapan proteksi pada sistem. Pada batas LPZ 0–1 digunakan batas Up ≤ 2,5 kV, pada batas LPZ 1–2 digunakan batas Up ≤ 1,5 kV, sedangkan pada batas LPZ 2–3 digunakan batas Up ≤ 1 kV [26]. Kriteria tersebut digunakan sebagai batas evaluasi tingkat perlindungan pada masing-masing tahapan proteksi.

Tabel 4. 7 Kesesuaian SPD berdasarkan IEC 61643 – 11

Lokasi	Batas LPZ	Up	Syarat Up	Status
LVMDP	0 - 1	≤ 2 kV	≤ 2,5 kV	Sesuai
SDP	1 - 2	≤ 1,35 kV	≤ 1,5 kV	Sesuai
		≤ 0,6 kV		
Sub SDP	2 - 3	≤ 0,8 kV	≤ 1 kV	Sesuai

Data aktual Up pada Tabel 4.6 diperoleh dari spesifikasi masing-masing perangkat. OBO V25-B+C pada LVMDP memiliki Up ≤ 2 kV, Phoenix VAL-MS pada SDP sisi AC memiliki Up ≤ 1,35 kV, FunElec pada sisi DC memiliki Up ≤ 0,6 kV, sedangkan OBO V20-C pada Sub SDP memiliki Up ≤ 0,8 kV.

Berdasarkan Tabel 4.6, nilai Up OBO V25-B+C sebesar ≤ 2 kV masih berada di bawah batas evaluasi 2,5 kV pada LPZ 0–1. Pada SDP sisi AC, nilai Up Phoenix

sebesar ≤ 1,35 kV lebih rendah daripada batas 1,5 kV. Pada SDP sisi DC, nilai Up FunElec sebesar ≤ 0,6 kV juga berada di bawah batas 1,5 kV. Selanjutnya, nilai Up OBO V20-C pada Sub SDP sebesar ≤ 0,8 kV berada di bawah batas 1 kV pada LPZ 2–3. Dengan demikian, seluruh SPD memenuhi batas Up yang digunakan dalam evaluasi.

Hasil evaluasi Uc dan Up menunjukkan bahwa parameter tegangan SPD yang terpasang berada dalam batas yang dapat diterima terhadap kondisi sistem dan tahapan proteksinya. Penentuan status "Sesuai" dilakukan berdasarkan hasil perbandingan kuantitatif antara nilai aktual SPD dan nilai pembanding yang telah ditetapkan dari kriteria evaluasi. Dengan demikian, keputusan kesesuaian tidak didasarkan pada penilaian subjektif, tetapi diperoleh melalui tahapan identifikasi parameter, penentuan dasar kriteria, perhitungan nilai pembanding, perbandingan nilai aktual, dan penentuan status kesesuaian.

4.1.7 Ringkasan hasil evaluasi Tujuan Penelitian 1

Berdasarkan hasil evaluasi pada sub-bab 4.1.1 hingga 4.1.6, penempatan, spesifikasi, dan instalasi Surge Protective Device (SPD) pada jalur distribusi tenaga menuju Panel Relay Defense Scheme (RDS) di Gardu Induk Binjai secara keseluruhan telah sesuai dengan ketentuan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4. Seluruh titik transisi LPZ telah dilengkapi SPD dengan tipe yang sesuai (Tabel 4.4), parameter teknis Uc dan Up pada setiap SPD memenuhi kriteria yang dipersyaratkan (Tabel 4.5 dan Tabel 4.6), serta aspek instalasi berupa kualitas sambungan, kondisi fisik, penampang konduktor pembumian, dan resistansi pembumian turut memenuhi ketentuan (Tabel 4.7).

Dengan demikian, tujuan penelitian pertama, yaitu menganalisis kesesuaian instalasi dan spesifikasi SPD pada panel kontrol berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, telah tercapai. Hasil evaluasi ini selanjutnya menjadi dasar dalam menganalisis kinerja dan efektivitas SPD melalui simulasi ATPDraw pada sub-bab tujuan penelitian kedua.

4.2 Analisis Kinerja dan Efektifitas SPD Berdasarkan Simulasi ATPDraw

Analisis pada subbab ini dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw untuk mengevaluasi kinerja sistem proteksi surja pada panel kontrol Gardu Induk Binjai. Pemodelan sistem disusun berdasarkan kondisi eksisting hasil observasi lapangan sehingga konfigurasi simulasi dapat merepresentasikan kondisi aktual pemasangan *Surge Protective Device* (SPD) pada jalur distribusi menuju *Panel Relay Defense Scheme* (RDS).

Simulasi dilakukan dengan memberikan injeksi arus surja petir pada sisi sumber menggunakan beberapa variasi arus. Perubahan respons sistem diamati pada setiap Titik Pengukuran (TP) yang telah ditentukan untuk mengetahui kemampuan masing-masing SPD dalam membatasi tegangan lebih transien sebelum diteruskan menuju sisi beban. Hasil simulasi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menganalisis efektivitas sistem proteksi berlapis yang diterapkan pada jalur distribusi tenaga.

Pembahasan pada subbab ini diawali dengan pemodelan sistem proteksi surja pada ATPDraw, dilanjutkan dengan penyusunan skenario simulasi, penyajian hasil simulasi untuk setiap variasi arus surja petir, analisis efektivitas SPD berdasarkan hasil simulasi, serta diakhiri dengan ringkasan hasil analisis sebagai jawaban terhadap tujuan penelitian kedua.

4.2.1 Skenario Simulasi Surja Petir pada ATPDraw

Setelah model sistem proteksi surja selesai dibangun pada ATPDraw, tahap selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan memberikan injeksi arus surja petir pada sisi sumber sistem. Simulasi dilakukan untuk memperoleh respons tegangan transien pada setiap titik pengukuran akibat pengaruh arus surja yang merambat melalui sistem proteksi berlapis. Seluruh simulasi menggunakan model yang sama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2, sehingga konfigurasi rangkaian, komponen sistem, dan titik pengukuran yang digunakan tetap sesuai dengan model yang telah disusun.

Arus surja pada penelitian ini dimodelkan menggunakan gelombang impuls 8/20 μs, yang merupakan bentuk gelombang standar untuk pengujian kinerja *Surge Protective Device* (SPD) berdasarkan IEC 61643-11. Gelombang impuls tersebut

diinjeksikan pada sisi sumber sistem untuk mensimulasikan kondisi tegangan lebih transien akibat surja petir, sehingga respons masing-masing SPD terhadap propagasi tegangan lebih dapat diamati selama proses simulasi berlangsung.

Simulasi dilakukan menggunakan tiga variasi arus surja, yaitu 40 kA, 70 kA, dan 110 kA. Pada setiap variasi arus, seluruh parameter model dipertahankan tetap sehingga satu-satunya parameter yang diubah adalah besarnya arus surja yang diinjeksikan ke dalam sistem. Dengan pendekatan tersebut, pengaruh perubahan besar arus surja terhadap respons sistem proteksi dapat diamati secara langsung berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh.

Selama simulasi berlangsung, respons tegangan diamati pada setiap titik pengukuran yang telah ditentukan pada model ATPDraw. Data hasil simulasi dari masing-masing titik pengukuran kemudian digunakan untuk mengevaluasi perubahan tegangan transien setelah impuls arus surja melewati setiap tahapan proteksi. Hasil pengukuran tersebut menjadi dasar dalam menganalisis kemampuan sistem proteksi berlapis dalam membatasi tegangan lebih sebelum mencapai sisi beban.

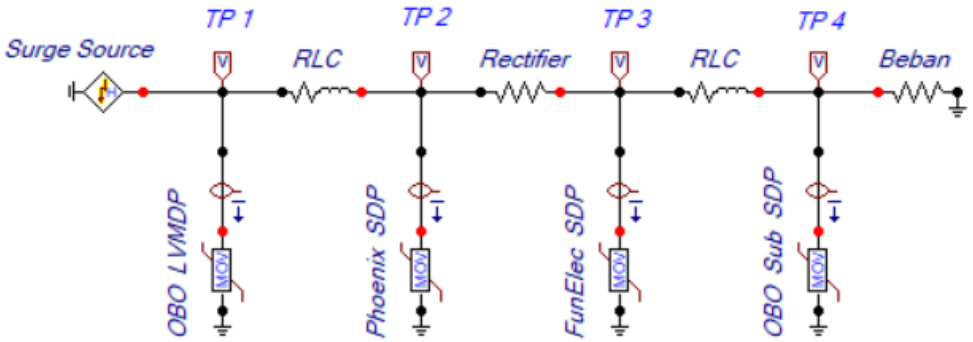
Berdasarkan skenario simulasi tersebut, setiap variasi arus surja kemudian dijalankan pada model ATPDraw untuk memperoleh respons tegangan pada seluruh titik pengukuran. Hasil simulasi yang diperoleh selanjutnya disajikan dan dianalisis pada subbab berikutnya sebagai dasar dalam mengevaluasi efektivitas *Surge Protective Device* (SPD) pada sistem proteksi panel kontrol Gardu Induk Binjai.

4.2.2 Pemodelan Sistem Proteksi Surja pada ATPDraw

Pemodelan sistem proteksi surja dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw dengan mengacu pada konfigurasi sistem distribusi tenaga dan pemasangan *Surge Protective Device* (SPD) berdasarkan kondisi eksisting di Gardu Induk Binjai. Model simulasi disusun untuk merepresentasikan jalur distribusi tenaga menuju Panel *Relay Defense Scheme* (RDS), sehingga proses perambatan arus surja petir dan respons masing-masing SPD terhadap tegangan lebih transien dapat dianalisis secara berurutan sesuai kondisi aktual di lapangan.

Pada penelitian ini, model simulasi tidak hanya digunakan untuk menggambarkan susunan komponen pada sistem tenaga, tetapi juga untuk

mengevaluasi efektivitas sistem proteksi berlapis (*layered protection*) yang diterapkan melalui pemasangan SPD pada beberapa tingkat panel. Dengan pendekatan tersebut, perubahan tegangan lebih akibat injeksi arus surja petir dapat diamati pada setiap tahapan proteksi sehingga kemampuan masing-masing SPD dalam membatasi tegangan transien dapat dianalisis secara lebih komprehensif.



Gambar 4. 2 Simulasi ATPDraw

Pada Gambar 4.2 menunjukkan model sistem proteksi surja yang dibangun menggunakan perangkat lunak ATPDraw berdasarkan konfigurasi eksisting pada Gardu Induk Binjai. Model simulasi diawali dengan *Heidler Current Source* sebagai sumber arus surja petir yang diinjeksikan ke dalam sistem. Arus surja kemudian merambat melalui saluran penghantar yang dimodelkan menggunakan elemen RLC sebelum melewati setiap tahapan proteksi yang terdiri atas SPD OBO V25-B+C 3+NPE+AS pada *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP), SPD Phoenix VAL-MS 230/3+1 FM pada *Secondary Distribution Panel* (SDP) sisi AC, SPD FunElec DC SPD 2P 100 V setelah rangkaian *rectifier*, serta SPD OBO V20-C 0-150 pada *Sub Secondary Distribution Panel* (Sub SDP) sebelum menuju sisi beban. Konfigurasi tersebut menggambarkan jalur proteksi berlapis yang digunakan dalam model simulasi.

Proses injeksi arus surja dilakukan dengan menggunakan komponen *Heidler type 15* sebagai sumber arus transien. Komponen tersebut ditempatkan pada sisi masuk model sebagai representasi sumber arus surja petir. Besarnya amplitudo arus sumber kemudian diatur sesuai dengan skenario simulasi yang ditetapkan, yaitu 40 kA, 70 kA, dan 110 kA. Dengan demikian, perubahan skenario dilakukan dengan

mengubah nilai amplitudo arus pada sumber surja, sedangkan konfigurasi rangkaian, karakteristik SPD, elemen saluran, beban, dan titik pengukuran dipertahankan tetap. Pendekatan tersebut memungkinkan respons sistem proteksi diamati berdasarkan pengaruh perubahan besar arus surja yang diberikan pada sisi masuk sistem.

Bentuk arus surja yang digunakan dalam simulasi dimodelkan sebagai gelombang impuls 8/20 μs. Parameter waktu pada sumber *Heidler* digunakan untuk membentuk karakteristik gelombang impuls sehingga arus mengalami kenaikan secara cepat menuju nilai puncak dan kemudian mengalami penurunan secara bertahap. Nilai amplitudo puncak sumber ditetapkan sesuai dengan masing-masing skenario, sedangkan parameter pembentuk gelombang dipertahankan sama pada seluruh skenario. Dengan cara tersebut, perbedaan hasil simulasi antara skenario 40 kA, 70 kA, dan 110 kA berasal dari perubahan amplitudo arus injeksi, bukan dari perubahan bentuk dasar gelombang surja.

Arus surja yang telah dibentuk oleh *Heidler Current Source* selanjutnya diinjeksikan ke jalur sistem melalui rangkaian penghantar yang dimodelkan menggunakan elemen RLC. Gelombang surja kemudian merambat dari sisi sumber menuju LVMDP dan melewati SPD secara berurutan hingga mencapai sisi beban. Respons tegangan pada jalur tersebut diamati menggunakan empat titik pengukuran yang ditempatkan setelah masing-masing SPD. Penempatan titik pengukuran digunakan untuk memperoleh nilai tegangan transien pada setiap tahapan proteksi sehingga perubahan tegangan akibat kerja SPD dapat diamati dari sisi sumber menuju sisi beban.

Untuk memperoleh data respons tegangan selama simulasi berlangsung, model dilengkapi dengan empat titik pengukuran yang ditempatkan setelah masing-masing SPD. Penempatan titik pengukuran ini dilakukan agar perubahan tegangan transien pada setiap tahapan proteksi dapat diamati secara sistematis, sehingga efektivitas masing-masing SPD maupun sistem proteksi berlapis secara keseluruhan dapat dianalisis berdasarkan hasil simulasi. Lokasi keempat titik pengukuran tersebut disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Titik Pengukuran Tegangan pada Simulasi ATPDraw

Titik Pengukuran	Komponen MOV	Parameter yang diukur
TP 1	OBO V25 LVMDP	Tegangan Transien
TP 2	Phoenix SDP	Tegangan Transien
TP 3	FunElec SDP	Tegangan Transien
TP 4	OBO V20 Sub SDP	Tegangan Transien

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.8, TP1 ditempatkan setelah SPD OBO V25 pada LVMDP, TP2 setelah SPD Phoenix pada sisi SDP AC, TP3 setelah SPD FunElec pada sisi DC setelah *rectifier*, dan TP4 setelah SPD OBO V20 pada Sub SDP. Masing-masing titik digunakan untuk merekam tegangan transien yang muncul setelah gelombang surja melewati tahapan proteksi terkait. Data tegangan pada keempat titik tersebut selanjutnya digunakan untuk membandingkan perubahan tegangan puncak pada setiap skenario simulasi.

Tabel 4. 9 Komponen Pemodelan Sistem Proteksi Surja pada Simulasi ATPDraw

Komponen	Parameter	Nilai	Keterangan
Heidler Type 15	Arus puncak (Ipeak)	40 kA, 70 kA, 110 kA	Variasi amplitudo arus surja yang diinjeksikan pada sisi masuk sistem.
	Front time (Tf)	1,2 μs	Parameter pembentuk waktu kenaikan gelombang impuls.
	Time constant (τ)	50 μs	Parameter pembentuk karakteristik penurunan gelombang impuls.
	Eksponen (n)	2	Parameter pembentuk karakteristik gelombang Heidler.
	Tstart	0 s	Waktu mulai pembangkitan arus surja.
	Tstop	1000 s	Waktu akhir pembangkitan sumber pada simulasi.
MOV Type 92	SPD LVMDP	OBO V25-B+C	Model MOV untuk merepresentasikan SPD pada LVMDP.
	SPD SDP AC	Phoenix VAL-MS 230/3+1 FM	Model MOV untuk merepresentasikan SPD pada sisi AC.
	SPD SDP DC	FunElec DC SPD 2P 100 V	Model MOV untuk merepresentasikan SPD pada sisi DC.
	SPD Sub SDP	OBO V20-C 0-150	Model MOV untuk merepresentasikan SPD pada Sub SDP.

Komponen	Parameter	Nilai	Keterangan
RLC Branch	Resistansi (R)	1 Ω	Merepresentasikan komponen resistif pada bagian rangkaian penghubung.
	Induktansi (L)	0,001 mH	Merepresentasikan komponen induktif pada bagian rangkaian penghubung.
	Kapasitansi (C)	0 μF	Merepresentasikan komponen kapasitif sesuai konfigurasi model.
Resistor Branch	Resistansi	10 Ω	Merepresentasikan bagian rectifier dan beban panel kontrol.

Pada Tabel 4.9 ditunjukkversi fixnya giman an komponen-komponen utama yang digunakan dalam pemodelan sistem proteksi surja pada ATPDraw. *Heidler type 15* digunakan sebagai sumber arus surja, elemen RLC digunakan untuk merepresentasikan impedansi penghantar antarbagian sistem, sedangkan masing-masing SPD dimodelkan menggunakan *MOV type 92* sebagai elemen pembatas tegangan nonlinier. Rangkaian *rectifier* dan beban dimodelkan menggunakan *resistor branch* sesuai dengan representasi sistem yang digunakan dalam simulasi. Pemodelan tersebut memungkinkan respons tegangan pada setiap tahapan proteksi diamati ketika sistem diberikan injeksi arus surja.

Berdasarkan pemodelan tersebut, setiap skenario simulasi dilakukan dengan urutan yang sama, yaitu menentukan amplitudo arus surja pada *Heidler Current Source*, menjalankan simulasi transien, kemudian mengamati respons tegangan pada TP1, TP2, TP3, dan TP4. Nilai tegangan puncak yang diperoleh pada masing-masing titik digunakan sebagai data hasil simulasi untuk mengevaluasi kemampuan sistem proteksi dalam membatasi tegangan lebih transien hingga mencapai sisi beban.

4.2.3 Hasil Skenario Simulasi Surja Petir pada ATPDraw

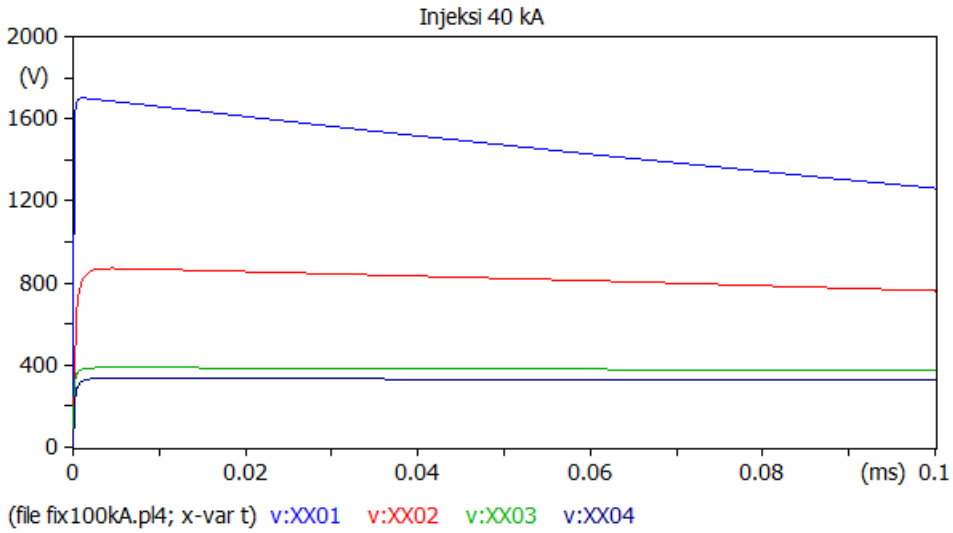
Hasil pengujian model sistem proteksi terhadap surja petir menggunakan perangkat lunak ATPDraw disajikan berdasarkan tiga skenario injeksi arus surja yang telah ditetapkan pada tahap perancangan simulasi. Simulasi dilakukan dengan memberikan injeksi arus surja berbentuk gelombang 8/20 μs sebesar 40 kA, 70 kA, dan 110 kA pada sisi masuk sistem. Selama proses simulasi, seluruh parameter model dipertahankan tetap sehingga perbedaan hasil yang diperoleh hanya

dipengaruhi oleh perubahan besar arus surja yang diinjeksikan. Respon tegangan transien diamati pada empat titik pengukuran (TP1, TP2, TP3, dan TP4) yang telah ditentukan pada model ATPDraw. Masing-masing titik pengukuran merepresentasikan kondisi tegangan setelah melewati tahapan proteksi Surge Protective Device (SPD) pada sistem.

Hasil simulasi setiap skenario disajikan dalam bentuk grafik respon tegangan terhadap waktu serta nilai tegangan puncak yang diperoleh pada setiap titik pengukuran. Penyajian hasil tersebut memberikan gambaran mengenai perubahan karakteristik tegangan transien pada setiap tahapan proteksi sebagai dasar dalam mengevaluasi efektivitas kinerja SPD pada pembahasan selanjutnya.

4.2.3.1 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 40 kA

Pengujian pertama dilakukan dengan memberikan injeksi arus surja sebesar 40 kA pada sisi masuk sistem. Nilai arus tersebut digunakan sebagai skenario awal untuk mengevaluasi respons sistem proteksi terhadap surja petir. Respon tegangan transien kemudian diamati pada empat titik pengukuran, yaitu TP1, TP2, TP3, dan TP4, untuk mengetahui perubahan tegangan setelah melewati setiap tahapan sistem proteksi.



Gambar 4. 3 Gelombang Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 40 kA

Berdasarkan Gambar 4.3, respon tegangan transien pada keempat titik pengukuran menunjukkan karakteristik yang serupa, yaitu terjadi kenaikan

tegangan secara cepat hingga mencapai nilai puncak sesaat setelah injeksi arus surja diberikan, kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga kembali menuju kondisi tunak. Bentuk gelombang yang dihasilkan mengikuti karakteristik respon transien sistem terhadap impuls arus surja, dengan amplitudo tegangan yang berbeda pada setiap titik pengukuran sesuai dengan tahapan proteksi yang dilewati. Untuk memperoleh perbandingan yang lebih jelas, nilai tegangan puncak hasil simulasi pada masing-masing titik pengukuran dirangkum pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 40 kA

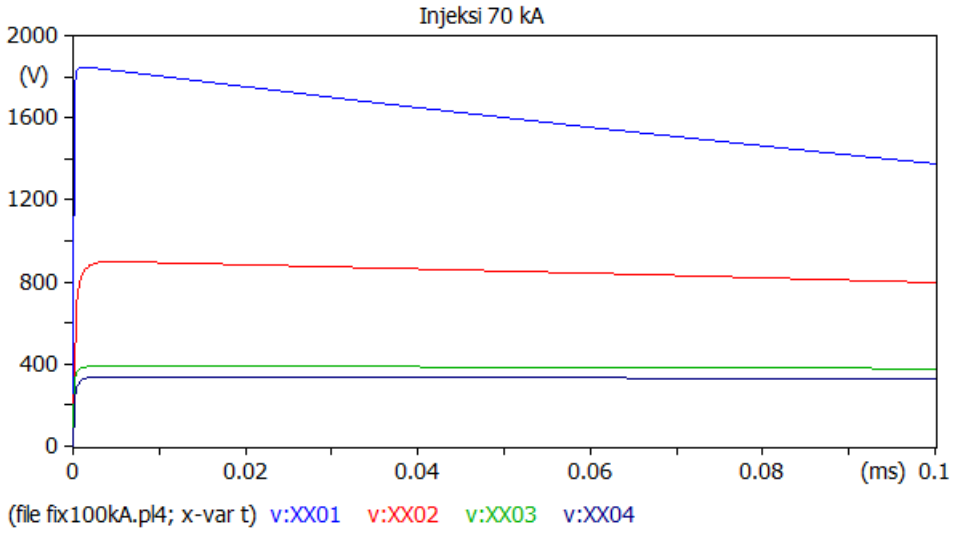
Titik Pengukuran	Komponen MOV	Tegangan Puncak (V)
TP 1 (XX01)	OBO V25 LVMDP	1700,6
TP 2 (XX02)	Phoenix SDP	871,2
TP 3 (XX03)	FunElec SDP	387,9
TP 4 (XX04)	OBO V20 Sub SDP	335,5

Berdasarkan Tabel 4.10, tegangan puncak tertinggi tercatat pada TP1 sebesar 1700,6 V, sedangkan tegangan pada titik pengukuran berikutnya mengalami penurunan secara bertahap menjadi 871,2 V pada TP2, 387,9 V pada TP3, dan 335,5 V pada TP4. Perbedaan nilai tegangan tersebut menunjukkan bahwa respon tegangan yang terukur pada setiap titik pengamatan tidak sama, seiring dengan posisi titik pengukuran yang berada setelah tahapan proteksi SPD yang berbeda dalam sistem.

Secara umum, hasil pengujian dengan injeksi arus surja sebesar 40 kA menunjukkan bahwa tegangan transien yang merambat di sepanjang sistem mengalami perubahan pada setiap titik pengukuran. Data hasil simulasi ini selanjutnya digunakan sebagai dasar pembanding terhadap hasil pengujian dengan injeksi arus surja sebesar 70 kA dan 110 kA, sehingga pengaruh peningkatan arus surja terhadap respon tegangan sistem dapat diamati secara menyeluruh pada pembahasan berikutnya.

4.2.3.2 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 70 kA

Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan injeksi arus surja sebesar 70 kA pada sisi masuk sistem. Nilai arus tersebut lebih tinggi dibandingkan skenario pertama, namun masih berada di bawah Imax SPD LVMDP sebesar 100 kA. Pada SPD tahap berikutnya yang memiliki Imax 40 kA, nilai injeksi ini berada di atas rating arus pelepasan maksimumnya. Seluruh parameter model dipertahankan sama seperti pada pengujian sebelumnya sehingga perubahan respon tegangan yang terjadi hanya dipengaruhi oleh peningkatan besarnya arus surja yang diinjeksikan.



Gambar 4. 4 Gelombang Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 70 kA

Berdasarkan Gambar 4.4, respons tegangan transien pada seluruh titik pengukuran menunjukkan pola yang serupa dengan skenario injeksi 40 kA, yaitu tegangan meningkat secara cepat hingga mencapai nilai puncak sesaat setelah injeksi arus surja diberikan, kemudian menurun secara bertahap menuju kondisi stabil. Peningkatan arus surja menjadi 70 kA menyebabkan amplitudo tegangan puncak pada setiap titik pengukuran meningkat dibandingkan skenario sebelumnya. Meskipun demikian, tegangan transien tetap mengalami penurunan secara bertahap dari TP1 hingga TP4 setelah melewati setiap tahapan proteksi SPD.

Pada skenario ini, nilai injeksi 70 kA masih berada di bawah Imax SPD OBO V25-B+C pada LVMDP sebesar 100 kA. Tegangan puncak yang diperoleh pada TP1 sebesar 1847,3 V juga masih berada di bawah tingkat perlindungan

tegangan SPD tersebut, yaitu Up ≤ 2 kV. Selanjutnya, tegangan menurun menjadi 898,7 V pada TP2, 391,5 V pada TP3, dan 338 V pada TP4. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun arus surja yang diinjeksikan meningkat, sistem proteksi berlapis tetap mampu membatasi dan menurunkan tegangan transien sebelum mencapai sisi beban.Untuk memperoleh perbandingan yang lebih jelas, nilai tegangan puncak hasil simulasi pada masing-masing titik pengukuran dirangkum pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 70 kA

Titik Pengukuran	Komponen MOV	Tegangan Puncak (V)
TP 1 (XX01)	OBO V25 LVMDP	1847,3
TP 2 (XX02)	Phoenix SDP	898,7
TP 3 (XX03)	FunElec SDP	391,5
TP 4 (XX04)	OBO V20 Sub SDP	338,0

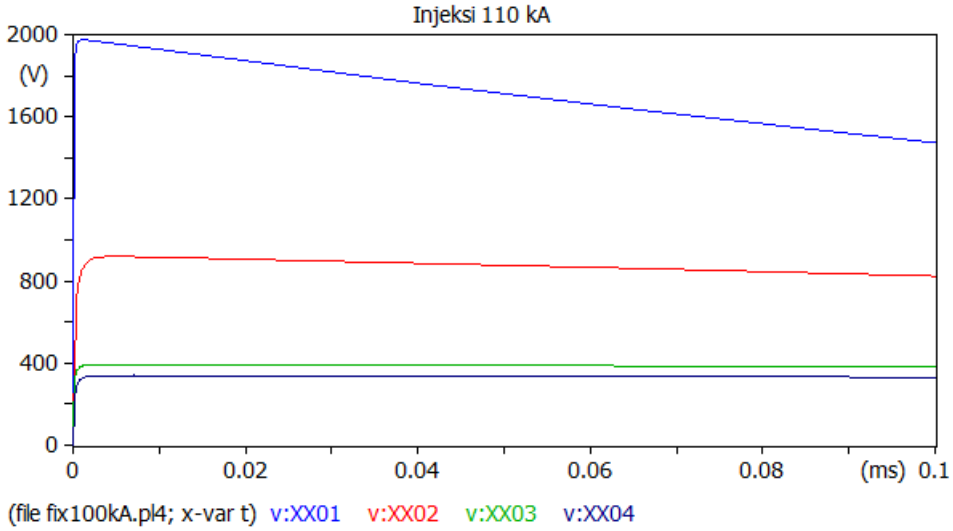
Berdasarkan Tabel 4.11, tegangan puncak tertinggi diperoleh pada TP1 sebesar 1847,3 V. Setelah melewati tahapan proteksi berikutnya, tegangan yang terukur mengalami penurunan menjadi 898,7 V pada TP2, 391,5 V pada TP3, dan 338,0 V pada TP4. Nilai tegangan pada setiap titik pengukuran menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan bertambahnya tahapan proteksi yang dilalui oleh gelombang surja sebelum mencapai sisi beban.

Secara keseluruhan, hasil pengujian dengan injeksi arus surja sebesar 70 kA memperlihatkan pola respon tegangan yang serupa dengan pengujian 40 kA, namun dengan nilai tegangan puncak yang lebih tinggi pada setiap titik pengukuran. Hasil tersebut selanjutnya dibandingkan dengan pengujian menggunakan injeksi arus surja sebesar 110 kA untuk mengamati perubahan respon sistem terhadap peningkatan arus surja yang lebih besar.

4.2.3.3 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 110 kA

Pengujian ketiga dilakukan dengan memberikan injeksi arus surja sebesar 110 kA pada sisi masuk sistem. Besarnya arus ini dipilih untuk merepresentasikan

kondisi surja dengan amplitudo paling tinggi di antara seluruh skenario pengujian, sehingga respon sistem proteksi terhadap tegangan transien dapat diamati pada kondisi yang lebih berat. Nilai 110 kA juga melampaui Imax seluruh SPD yang dimodelkan. Seperti pada pengujian sebelumnya, seluruh parameter model dipertahankan tetap sehingga perubahan respon tegangan yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh peningkatan besarnya arus surja yang diinjeksikan.



Gambar 4. 5 Gelombang Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 110 kA

Berdasarkan Gambar 4.5, respon tegangan transien pada seluruh titik pengukuran masih menunjukkan pola yang serupa dengan dua skenario sebelumnya. Tegangan meningkat secara cepat hingga mencapai nilai puncak sesaat setelah injeksi arus surja diberikan, kemudian menurun secara bertahap seiring dengan meredanya gelombang transien hingga sistem kembali menuju kondisi stabil. Meskipun bentuk gelombang relatif tidak mengalami perubahan yang signifikan, amplitudo tegangan yang dihasilkan pada setiap titik pengukuran meningkat dibandingkan skenario injeksi arus surja 40 kA dan 70 kA. Untuk memperoleh perbandingan yang lebih jelas, nilai tegangan puncak hasil simulasi pada masing-masing titik pengukuran dirangkum pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil Simulasi Injeksi Arus Surja 110 kA

Titik Pengukuran	Komponen MOV	Tegangan Puncak (V)
TP 1 (XX01)	OBO V25 LVMDP	1974,5

Titik Pengukuran	Komponen MOV	Tegangan Puncak (V)
TP 2 (XX02)	Phoenix SDP	919,7
TP 3 (XX03)	FunElec SDP	394,1
TP 4 (XX04)	OBO V20 Sub SDP	339,8

Berdasarkan Tabel 4.12, tegangan puncak tertinggi diperoleh pada TP1 sebesar 1974,5 V. Setelah melewati tahapan proteksi berikutnya, tegangan yang terukur menurun menjadi 919,7 V pada TP2, 394,1 V pada TP3, dan 339,8 V pada TP4. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan yang terukur pada setiap titik pengamatan tetap berbeda sesuai dengan posisi titik pengukuran dalam sistem proteksi.

Secara umum, hasil pengujian dengan injeksi arus surja sebesar 110 kA menunjukkan pola respon tegangan yang konsisten dengan dua skenario sebelumnya. Perbedaan utama yang terlihat adalah meningkatnya nilai tegangan puncak pada seluruh titik pengukuran sebagai konsekuensi dari bertambahnya amplitudo arus surja yang diinjeksikan. Keseluruhan hasil pengujian pada ketiga skenario tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi efektivitas kinerja SPD dalam meredam tegangan transien pada sistem proteksi, yang akan dibahas pada Subbab 4.2.4 Analisis Efektivitas SPD.

4.2.4 Analisis Efektivitas SPD

Analisis efektivitas Surge Protective Device (SPD) dilakukan berdasarkan hasil simulasi tegangan transien yang diperoleh pada setiap titik pengukuran untuk tiga skenario injeksi arus surja, yaitu 40 kA, 70 kA, dan 110 kA. Evaluasi difokuskan pada kemampuan sistem proteksi dalam mereduksi tegangan lebih secara bertahap dari sisi sumber menuju sisi beban melalui koordinasi beberapa SPD yang dipasang secara berlapis. Parameter yang dianalisis meliputi perubahan nilai tegangan puncak pada setiap titik pengukuran, kecenderungan respon tegangan akibat peningkatan arus surja, serta kesesuaian karakteristik proteksi terhadap prinsip koordinasi SPD sebagaimana direkomendasikan dalam IEC

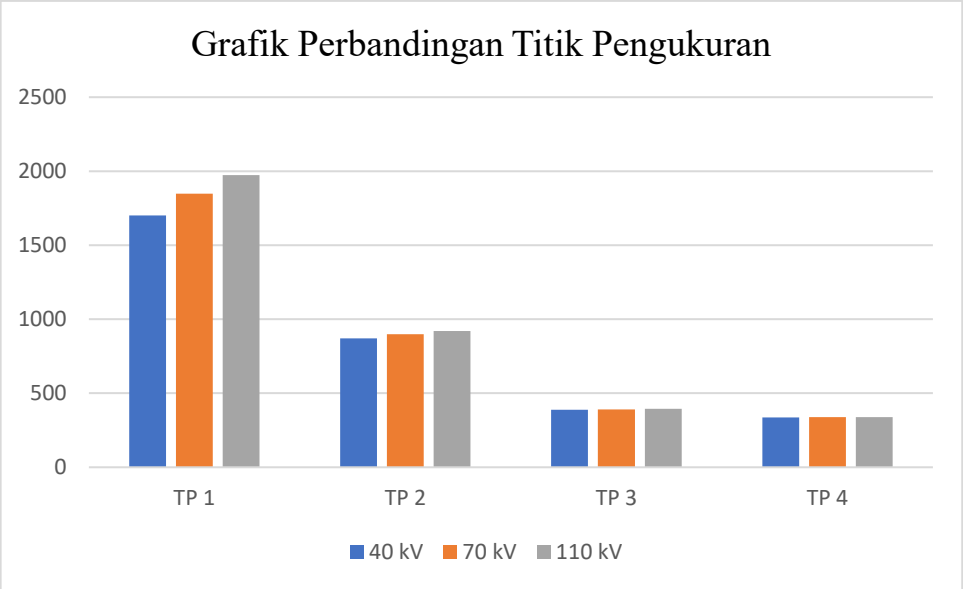
61643-11 dan konsep Lightning Protection Zone (LPZ) pada IEC 62305-4. Untuk mempermudah analisis, hasil simulasi dari ketiga skenario dirangkum pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Rekapitulasi Tegangan Puncak Hasil Simulasi

Injeksi Arus (kA)	TP 1 (V)	TP 2 (V)	TP 3 (V)	TP 4 (V)
40	1700,6	871,2	387,9	335,5
70	1847,3	898,7	391,5	338,0
110	1974,5	919,7	394,1	339,8

Berdasarkan Tabel 4.13, peningkatan arus surja dari 40 kA menjadi 110 kA menyebabkan kenaikan tegangan puncak pada seluruh titik pengukuran. Tegangan tertinggi selalu terjadi pada TP1, yaitu titik pengukuran yang berada setelah SPD OBO V25-B+C Type 1+2 di sisi LVMDP, sedangkan tegangan terendah selalu diperoleh pada TP4, yaitu setelah SPD OBO V20-C sebelum sisi beban. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun amplitudo arus surja meningkat, kecenderungan penurunan tegangan pada setiap tahapan proteksi tetap dapat dipertahankan.

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai perubahan tegangan pada setiap titik pengukuran, hubungan antara arus surja yang diinjeksikan dan tegangan puncak hasil simulasi dapat disajikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Perbandingan Tegangan Puncak pada Setiap Titik Pengukuran untuk Berbagai Arus Surja

Berdasarkan Gambar 4.6., peningkatan arus surja menyebabkan kenaikan tegangan puncak pada seluruh titik pengukuran. Meskipun demikian, urutan besar tegangan tetap konsisten pada setiap skenario, yaitu TP1 > TP2 > TP3 > TP4. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa setiap SPD yang terpasang masih mampu menjalankan fungsinya dalam membatasi tegangan transien sehingga tegangan yang diteruskan ke tahapan berikutnya menjadi lebih rendah dibandingkan tegangan pada tahap sebelumnya.

Karakteristik tersebut sesuai dengan prinsip kerja SPD yang dijelaskan dalam IEC 61643-11, yaitu membatasi tegangan lebih transien dengan mengalihkan arus surja ke sistem pentanahan sehingga tegangan yang diteruskan menuju peralatan menjadi lebih rendah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa meskipun besarnya arus surja meningkat, mekanisme pembatasan tegangan tetap berlangsung pada setiap tahapan proteksi.

Selain itu, konfigurasi pemasangan SPD secara bertingkat pada sisi LVMDP, panel SDP, dan Sub SDP juga menunjukkan kesesuaian dengan konsep Lightning Protection Zone (LPZ) sebagaimana direkomendasikan dalam IEC 62305-4. Dalam konsep tersebut, energi surja tidak direduksi oleh satu SPD saja, melainkan

dikurangi secara bertahap melalui koordinasi beberapa SPD yang dipasang pada setiap batas zona proteksi. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa tegangan transien mengalami penurunan secara berurutan dari TP1 hingga TP4, sehingga menunjukkan adanya koordinasi kerja antar-SPD dalam meredam propagasi tegangan lebih menuju sisi beban.

Meskipun tegangan puncak pada setiap titik pengukuran meningkat seiring dengan bertambahnya arus surja yang diinjeksikan, kecenderungan penurunan tegangan pada setiap tahapan proteksi tetap dapat dipertahankan. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi SPD yang digunakan masih mampu memberikan perlindungan terhadap tegangan lebih pada berbagai tingkat arus surja yang diuji. Dengan demikian, sistem proteksi tidak hanya mampu membatasi tegangan transien pada satu titik tertentu, tetapi juga mempertahankan mekanisme proteksi berlapis sesuai dengan konsep koordinasi SPD.

Perbandingan lebih lanjut dilakukan antara tegangan puncak hasil simulasi dengan nilai tingkat perlindungan tegangan (Up) masing-masing SPD. Pada TP1, tegangan puncak sebesar 1700,6 V pada injeksi 40 kA, 1847,3 V pada 70 kA, dan 1974,5 V pada 110 kA masih berada di bawah nilai Up SPD LVMDP yang diperbarui, yaitu $\leq$ 2 kV. Dengan demikian, pada ketiga skenario tersebut SPD LVMDP masih mampu membatasi tegangan sisa di bawah tingkat perlindungan tegangannya. Dari sisi kemampuan arus, skenario 40 kA dan 70 kA masih berada di bawah Imax LVMDP sebesar 100 kA, sedangkan skenario 110 kA sedikit melampaui Imax tersebut. Kondisi 110 kA digunakan sebagai skenario uji berat untuk mengamati respons model ketika amplitudo injeksi melebihi rating arus pelepasan maksimum SPD LVMDP. Pada TP2, TP3, dan TP4, penilaian terhadap Up tetap mengacu pada rating masing-masing SPD dan tidak berubah akibat pembaruan spesifikasi SPD LVMDP.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi SPD yang diterapkan pada sistem mampu meredam tegangan transien secara bertahap dari sisi sumber menuju sisi beban. Karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa pemasangan SPD pada setiap tingkat distribusi telah bekerja sesuai dengan prinsip koordinasi proteksi berlapis yang direkomendasikan dalam IEC 61643-11 dan IEC

62305-4, sehingga efektivitas sistem proteksi terhadap surja petir dapat dinilai baik berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh.

4.2.5 Analisis Persentase Reduksi Tegangan Efektivitas SPD

Persentase efektivitas Surge Protective Device (SPD) dalam mereduksi tegangan lebih dihitung berdasarkan perbandingan antara tegangan sebelum proteksi (TP1) dan tegangan setelah melewati seluruh tahapan proteksi (TP4). Persamaan yang digunakan adalah:

Persentase Reduksi Tegangan :

$\eta = \frac{U_{surja} - U_p}{U_{surja}} \times 100\%$.

dengan:

U_{surja} = Tegangan masuk pada titik pengukuran

U_p = Tegangan sisa pada titik pengukuran

V_{TP1} = Tegangan pada titik pengukuran pertama (tegangan sebelum SPD bekerja)

V_{TP4} = Tegangan pada titik akhir panel kontrol (tegangan setelah proteksi SPD)

1. Injeksi Arus 40 kA

   Diketahui:

   TP1 = 1700,6 V

   TP4 = 335,5 V

$$\%\ Reduksi = \frac{1700{,}6 - 335{,}5}{1700{,}6}\ x\ 100\%$$

$$= \frac{1365{,}1}{1700{,}6}\ x\ 100\ \%$$

$$= 80{,}27\ \%$$

   Artinya, tegangan berhasil diturunkan sebesar 1365,1 Volt atau 80,27% dari tegangan awal.

2. Injeksi Arus 70 kA

   Diketahui

   TP1 = 1847,3 V

TP4 = 338,0 V

$$\% \, Reduksi = \frac{1847{,}3 \; - 338{,}0}{1847{,}3} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{1509{,}3}{1847{,}3} \; x \; 100 \; \%$$

$$= 81{,}70 \; \%$$

Artinya, SPD berhasil menurunkan tegangan sebesar 1509,3 Volt atau 81,70%.

3. Injeksi Arus 110 kA

Diketahui

TP1 = 1974,5 V

TP4 = 339,8 V

$$\% \, Reduksi = \frac{1974{,}5 - 339{,}8}{1974{,}5} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{1634{,}7}{1974{,}5} \; x \; 100 \; \%$$

$$= 82{,}79\%$$

Artinya, SPD berhasil menurunkan tegangan sebesar 1634,7 Volt atau 82,79%**.**

Tabel 4. 14 Rekapitulasi Efektifitas SPD

Injeksi Arus (kA)	TP1 (V)	TP4 (V)	Reduksi Tegangan (V)	Persentase Reduksi (%)
40	1700,6	335,5	1365,1	80,27
70	1847,3	338,0	1509,3	81,70
110	1974,5	339,8	1634,7	82,79

Berdasarkan hasil perhitungan Tabel 4.14, terlihat bahwa Surge Protective Device (SPD) mampu mereduksi tegangan lebih pada seluruh variasi arus impuls yang diberikan. Pada injeksi arus 40 kA, tegangan turun dari 1700,6 V menjadi 335,5 V, sehingga diperoleh reduksi sebesar 1365,1 V atau 80,27%. Ketika arus impuls ditingkatkan menjadi 70 kA, tegangan awal meningkat menjadi 1847,3 V, namun sistem SPD tetap mampu membatasi tegangan hingga 338,0 V dengan reduksi 1509,3 V atau 81,70%. Pada skenario tertinggi, yaitu 110 kA, tegangan awal mencapai 1974,5 V, tetapi tegangan pada sisi keluaran hanya sebesar 339,8 V, sehingga diperoleh reduksi 1634,7 V atau 82,79%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa persentase reduksi tegangan meningkat seiring bertambahnya arus impuls, yaitu dari 80,27% pada arus 40 kA menjadi 81,70% pada arus 70 kA, dan mencapai 82,79% pada arus 110 kA. Pada rentang simulasi ini, peningkatan arus surja menghasilkan kenaikan tegangan yang jauh lebih besar pada TP1 dibandingkan TP4, sehingga persentase reduksi total TP1–TP4 meningkat. Tegangan sisa pada sisi akhir panel tetap berada pada kisaran 335,5–339,8 V.

Dari sudut pandang proteksi sistem tenaga, karakteristik tersebut menunjukkan bahwa koordinasi tahapan SPD pada model mampu menahan peningkatan tegangan agar tidak diteruskan secara proporsional ke sisi beban. Ketika arus injeksi meningkat dari 40 kA menjadi 110 kA, tegangan TP1 meningkat sekitar 16,11% (dari 1700,6 V menjadi 1974,5 V), sedangkan tegangan TP4 hanya meningkat sekitar 1,28% (dari 335,5 V menjadi 339,8 V). Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar kenaikan tegangan transien berhasil dibatasi sepanjang tahapan proteksi sebelum mencapai titik akhir panel.

Secara keseluruhan, hasil penelitian memperlihatkan bahwa sistem SPD memiliki karakteristik reduksi tegangan yang konsisten terhadap peningkatan arus impuls pada skenario 40 kA, 70 kA, dan 110 kA. Temuan ini memperkuat hasil evaluasi berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4 bahwa konfigurasi proteksi berlapis mampu mempertahankan tegangan akhir pada rentang yang relatif stabil. Temuan utama pada simulasi ini adalah peningkatan arus impuls dari 40 kA menjadi 110 kA diikuti peningkatan persentase reduksi tegangan dari 80,27% menjadi 82,79%, walaupun pada TP1 tegangan sisa telah melampaui nilai Up SPD LVMDP pada seluruh skenario sehingga titik tersebut tetap menjadi perhatian utama dalam evaluasi proteksi.

4.2.6 Ringkasan Hasil Tujuan Penelitian 2

Ringkasan hasil evaluasi disusun berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw untuk menilai efektivitas Surge Protective Device (SPD) dalam meredam tegangan lebih transien akibat surja petir. Evaluasi dilakukan melalui tiga skenario injeksi arus surja, yaitu sebesar 40 kA, 70 kA, dan 110 kA dengan bentuk gelombang 8/20 μs. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh bahwa peningkatan arus surja menyebabkan kenaikan tegangan puncak pada

seluruh titik pengukuran. Meskipun demikian, pola penurunan tegangan tetap terjadi secara bertahap dari TP1 hingga TP4 pada setiap skenario pengujian.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa konfigurasi SPD yang terdiri atas SPD OBO V25-B+C Type 1+2 pada LVMDP, SPD Phoenix pada sisi AC panel SDP, SPD FunElec pada sisi DC panel SDP, dan SPD OBO V20-C pada Sub SDP mampu bekerja secara terkoordinasi dalam membatasi propagasi tegangan lebih menuju sisi beban. Penurunan tegangan yang terjadi pada setiap titik pengukuran menunjukkan bahwa setiap SPD berkontribusi dalam meredam energi surja sesuai dengan fungsi dan lokasi pemasangannya.

Berdasarkan analisis hasil simulasi, mekanisme koordinasi SPD telah sesuai dengan prinsip proteksi berlapis (coordinated SPD) dan konsep *Lightning Protection Zone* (LPZ) sebagaimana direkomendasikan dalam IEC 62305-4. Selain itu, kemampuan SPD dalam membatasi tegangan lebih transien juga sejalan dengan prinsip kerja SPD yang dijelaskan pada IEC 61643-11, yaitu mengalihkan arus surja ke sistem pentanahan sehingga tegangan yang diteruskan menuju peralatan menjadi lebih rendah.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem proteksi yang diterapkan mampu mengurangi tegangan transien secara bertahap dari sisi sumber menuju sisi beban pada seluruh skenario pengujian. Dengan demikian, tujuan penelitian kedua, yaitu menganalisis efektivitas Surge Protective Device (SPD) dalam meredam tegangan lebih transien akibat surja petir berdasarkan hasil simulasi ATPDraw, telah tercapai.

4.3 Rekomendasi Teknis untuk Optimasi Proteksi Surja pada Panel Kontrol Gardu Induk Binjai

Sub-bab ini menjawab tujuan penelitian ketiga, yaitu menyusun rekomendasi teknis untuk optimalisasi proteksi surja pada panel kontrol Gardu Induk Binjai agar lebih efektif dan sesuai standar internasional. Berdasarkan hasil evaluasi pada tujuan penelitian pertama, seluruh SPD eksisting telah memenuhi ketentuan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4 dari aspek penempatan, spesifikasi, dan instalasi. Berdasarkan hasil analisis pada tujuan penelitian kedua, sistem proteksi SPD secara keseluruhan juga telah dinyatakan efektif berdasarkan kriteria tegangan sisa pada

titik akhir dan konsistensi tren reduksi tegangan (sub-bab 4.2.5). Meskipun demikian, kedua evaluasi tersebut turut mengidentifikasi beberapa aspek yang masih dapat diperkuat, khususnya terkait margin proteksi pada titik LVMDP yang menanggung beban energi surja terbesar dalam sistem. Rekomendasi pada sub-bab ini disusun secara langsung berdasarkan temuan-temuan tersebut, sehingga bersifat spesifik terhadap kondisi eksisting objek penelitian dan dapat langsung dipertimbangkan untuk diterapkan guna meningkatkan efektivitas proteksi secara berkelanjutan.

4.3.1 Dasar Penyusuanan Rekomendasi

Sebelum menyusun rekomendasi, seluruh temuan kunci dari tujuan penelitian pertama dan kedua dirangkum terlebih dahulu sebagai dasar penyusunan. Rangkuman temuan tersebut disajikan pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Rangkuman Temuan Kunci Tujuan Penelitian 1 dan 2 sebagai Dasar Rekomendasi

No	Aspek	Temuan Kunci	Sumber
1	Penempatan dan spesifikasi SPD	Seluruh titik (LVMDP, SDP sisi AC dan DC, Sub SDP) telah sesuai dengan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4	Tabel 4.4, 4.5, 4.6
2	Margin proteksi Up	SDP sisi AC dan Sub SDP memiliki margin proteksi Up yang relatif tipis terhadap ambang batas rekomendasi per tahap LPZ	Tabel 4.6
3	Parameter In dan Imax	Belum dievaluasi status kesesuaiannya karena memerlukan data risk assessment tambahan di luar cakupan penelitian	Sub-bab 4.1.5
4	Kinerja SPD pada arus surja tinggi	Tegangan puncak pada TP1 (LVMDP) meningkat seiring peningkatan arus surja, yaitu 1700,6 V, 1847,3 V, dan 1974,5 V, namun seluruhnya masih berada di bawah nilai Up SPD LVMDP sebesar ≤ 2 kV.	Tabel 4.13
5	Kondisi arus uji ekstrem	Skenario 110 kA sedikit melampaui Imax SPD LVMDP sebesar 100 kA, sedangkan injeksi 40 kA dan 70 kA masih berada di bawah Imax LVMDP. Pada SPD tahap berikutnya yang memiliki Imax 40 kA, skenario 70 kA dan 110 kA berada di atas rating tersebut.	Sub-bab 4.2.2, 4.2.4

Berdasarkan Tabel 4.15, disusun tiga kelompok rekomendasi teknis yang saling melengkapi, yaitu penguatan proteksi pada titik LVMDP, verifikasi dan pemeliharaan berkala pada seluruh titik SPD, serta kajian lanjutan terhadap parameter In/Imax dan jenis surja.

4.3.2 Rekomendasi Penguatan Proteksi pada titik LVMDP

Hasil simulasi menunjukkan bahwa LVMDP tetap menjadi titik yang menerima tegangan puncak tertinggi sebagai tahap proteksi pertama. Namun, setelah spesifikasi SPD LVMDP diperbarui menjadi Imax 100 kA dan Up ≤ 2 kV, tegangan puncak TP1 pada injeksi 40 kA, 70 kA, dan 110 kA masing-masing sebesar 1700,6 V, 1847,3 V, dan 1974,5 V masih berada di bawah batas Up 2 kV. Dari sisi arus, injeksi 40 kA dan 70 kA masih berada dalam batas Imax 100 kA, sedangkan injeksi 110 kA melampaui Imax sebesar 10 kA. Oleh karena itu, rekomendasi pada LVMDP tidak lagi didasarkan pada pelampauan Up pada skenario 40 kA dan 70 kA, melainkan diarahkan pada verifikasi margin proteksi dan evaluasi respons terhadap skenario ekstrem 110 kA.Berdasarkan temuan ini, rekomendasi teknis pada titik LVMDP disajikan pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Rekomendasi Teknis pada Titik LVMDP

Aspek	Kondisi Saat Ini	Rekomendasi	Prioritas
Rating arus pelepasan maksimum (Imax)	100 kA (SPD kombinasi Tipe 1+2)	Pertahankan SPD Imax 100 kA untuk skenario hingga 70 kA; evaluasi rating yang lebih tinggi hanya jika kajian risiko menunjukkan potensi arus surja melebihi 100 kA	Tinggi
Tegangan sisa pada arus tinggi	Tegangan puncak TP1 pada seluruh skenario masih di bawah Up ≤ 2 kV; skenario 110 kA melampaui Imax 100 kA	Tidak menjadi kebutuhan langsung berdasarkan batas Up, karena TP1 maksimum 1974,5 V masih di bawah Up ≤ 2 kV; penguatan tambahan dipertimbangkan berdasarkan kajian risiko untuk arus >100 kA	Sedang
Pengujian karakteristik SPD	Kondisi fisik baik, namun belum ada data pengujian elektris berkala	Jadwalkan pemeriksaan kondisi dan pengujian karakteristik SPD (Up, Uc, indikator) secara berkala untuk memastikan kinerja tetap	Tinggi

Aspek	Kondisi Saat Ini	Rekomendasi	Prioritas
		sesuai rating Imax 100 kA dan Up ≤ 2 kV	

LVMDP tetap perlu mendapat perhatian karena merupakan lini pertahanan pertama dan menerima tegangan puncak tertinggi. Meskipun demikian, hasil simulasi terbaru menunjukkan bahwa tegangan sisa TP1 pada seluruh skenario masih berada di bawah Up ≤ 2 kV. Dengan Imax 100 kA, SPD LVMDP juga masih berada dalam rating pada injeksi 40 kA dan 70 kA. Perhatian khusus diperlukan pada skenario 110 kA karena nilainya sedikit melampaui Imax perangkat, sehingga tindak lanjut yang lebih tepat adalah verifikasi kemampuan SPD terhadap kejadian ekstrem, pemeriksaan kondisi perangkat, serta evaluasi kebutuhan margin arus yang lebih besar berdasarkan kajian risiko.

Secara teknis, elemen Metal Oxide Varistor (MOV) memiliki karakteristik arus-tegangan nonlinier, sehingga tegangan sisa cenderung meningkat ketika arus surja meningkat. Hasil simulasi menunjukkan kenaikan tegangan TP1 dari 1700,6 V menjadi 1974,5 V ketika injeksi dinaikkan dari 40 kA menjadi 110 kA, tetapi nilai tertinggi tersebut masih berada di bawah Up LVMDP ≤ 2 kV. Karena skenario 110 kA telah melampaui Imax 100 kA, hasil pada titik tersebut lebih tepat digunakan sebagai indikasi respons model pada kondisi ekstrem, bukan sebagai dasar untuk menyatakan bahwa SPD LVMDP gagal memenuhi nilai Up. Evaluasi penggantian ke rating yang lebih tinggi dapat dipertimbangkan apabila kajian risiko menunjukkan kemungkinan arus surja melebihi 100 kA.

4.3.3 Rekomendasi Verifikasi dan Pemeliharaan Berkala pada Seluruh Titik SPD

Selain penguatan pada titik LVMDP, margin proteksi Up yang relatif tipis pada SDP sisi AC dan Sub SDP (Tabel 4.6) perlu diantisipasi mengingat karakteristik Metal Oxide Varistor (MOV) pada SPD dapat mengalami penurunan performa (degradasi) akibat pembebanan surja berulang selama masa operasi, yang berpotensi menggeser nilai Up aktual seiring waktu. Rekomendasi verifikasi dan pemeliharaan berkala disajikan pada Tabel 4.17

Tabel 4. 17 Rekomendasi Verifikasi dan Pemeliharaan Berkala SPD

Titik	Kondisi	Rekomendasi	Disarankan
SDP sisi AC (Phoenix VAL-MS)	Margin Up tipis (0,15 kV)	Verifikasi ulang nilai Up melalui pengujian atau pembacaan indikator kondisi SPD	6 bulan - 1 tahun
Sub SDP (OBO V20-C)	Margin Up cukup tipis (0,2 kV)	Verifikasi ulang nilai Up melalui pengujian atau pembacaan indikator kondisi SPD	6 bulan - 1 tahun
LVMDP, SDP sisi DC	Margin Up besar	Pemeriksaan visual dan indikator status secara rutin	1 tahun
Seluruh titik	Indikator visual SPD dalam kondisi baik	Pengecekan indikator status SPD (baik/perlu penggantian) sebagai bagian dari pemeliharaan rutin gardu induk	3-6 bulan

Kebutuhan verifikasi berkala ini juga didasari oleh karakteristik degradasi MOV, yaitu paparan arus surja secara berulang selama masa operasi dapat meningkatkan arus bocor (leakage current) pada elemen MOV secara bertahap, yang pada akhirnya dapat menggeser nilai Uc dan Up aktual SPD menjauhi nilai nominal pada datasheet. Pada SPD dengan margin proteksi yang sudah relatif tipis seperti SDP sisi AC dan Sub SDP, pergeseran nilai tersebut berpotensi membuat Up aktual melampaui ambang batas rekomendasi lebih cepat dibandingkan SPD dengan margin yang lebih besar. Pemeriksaan indikator status SPD yang sudah menjadi praktik eksisting pada objek penelitian merupakan langkah awal yang baik, namun perlu dilengkapi dengan pengujian elektris terjadwal agar penurunan performa dapat terdeteksi sebelum SPD benar-benar gagal berfungsi.

Pemeliharaan berkala ini juga sebaiknya disertai dengan upaya memperoleh data tegangan tahan impuls (Uw) resmi dari peralatan kontrol dan proteksi yang dilindungi (rectifier controller, relay proteksi), sehingga evaluasi margin proteksi Up pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan terhadap nilai Uw aktual peralatan, bukan hanya terhadap ambang batas rekomendasi umum per tahap LPZ sebagaimana digunakan pada penelitian ini.

4.3.4 Ringkasan Rekomendasi Teknis

Seluruh rekomendasi teknis yang disusun pada sub-bab ini dirangkum pada Tabel 4.18 sebagai acuan prioritas tindak lanjut.

Tabel 4. 18 Ringkasan Rekomendasi Teknis Optimalisasi Proteksi Surja

No	Rekomendasi	Prioritas
1	Evaluasi kebutuhan rating Imax di atas 100 kA pada titik LVMDP apabila kajian risiko menunjukkan kemungkinan arus surja melebihi 100 kA	Tinggi
2	Jadwalkan pengujian karakteristik SPD secara berkala pada titik LVMDP	Tinggi
3	Verifikasi ulang nilai Up secara berkala pada SDP sisi AC dan Sub SDP	Sedang
4	Pertimbangkan penguatan proteksi LVMDP hanya apabila hasil kajian risiko menunjukkan kebutuhan margin arus di atas Imax 100 kA	Sedang
5	Peroleh data Uw resmi peralatan kontrol/proteksi untuk evaluasi margin yang lebih presisi	Sedang
6	Lakukan evaluasi tambahan terhadap skenario surja switching sebagai pelengkap	Rendah

Berdasarkan Tabel 4.18 Penerapan rekomendasi ini diharapkan dapat mempertahankan efektivitas sistem proteksi, terutama dengan menjaga kondisi SPD LVMDP yang pada simulasi masih membatasi tegangan TP1 di bawah $Up \leq 2$ kV. Perhatian tambahan diarahkan pada skenario ekstrem 110 kA yang sedikit melampaui Imax LVMDP 100 kA, sehingga kebutuhan peningkatan rating sebaiknya ditentukan melalui kajian risiko dan verifikasi teknis.

Dengan tersusunnya rekomendasi teknis ini, tujuan penelitian ketiga telah tercapai, sehingga secara keseluruhan ketiga tujuan penelitian mengenai kesesuaian, efektivitas, dan optimalisasi proteksi surja pada panel kontrol Gardu Induk Binjai telah terjawab.

BAB 5
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Analisis Efektivitas Surge Protective Device (SPD) pada Panel Kontrol Gardu Induk Binjai Berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Evaluasi kondisi eksisting menunjukkan bahwa penempatan SPD berdasarkan konsep Lightning Protection Zone (LPZ), parameter Uc dan Up, serta aspek instalasi dan sistem pentanahan Surge Protective Device (SPD) pada panel kontrol telah memenuhi kriteria yang dievaluasi berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4. Penerapan konsep Lightning Protection Zone (LPZ) pada sistem proteksi internal juga telah sesuai sehingga mampu mendukung koordinasi proteksi terhadap gangguan tegangan lebih transien.
2. Hasil simulasi menggunakan ATPDraw menunjukkan bahwa sistem SPD mampu mempertahankan pola reduksi tegangan pada seluruh variasi arus impuls yang dianalisis. Tegangan puncak pada titik pengukuran pertama (TP1) sebesar 1700,6 V, 1847,3 V, dan 1974,5 V berhasil direduksi menjadi 335,5 V, 338,0 V, dan 339,8 V pada titik akhir panel (TP4). Persentase reduksi tegangan berturut-turut sebesar 80,27%, 81,70%, dan 82,79%. Peningkatan arus impuls dari 40 kA menjadi 110 kA menyebabkan tegangan TP1 meningkat sekitar 16,11%, sedangkan tegangan TP4 hanya meningkat sekitar 1,28%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem proteksi berlapis mampu membatasi kenaikan tegangan yang diteruskan menuju sisi beban, dengan tegangan sisa pada TP1 masih berada di bawah nilai Up SPD LVMDP sebesar $\leq$ 2 kV pada seluruh skenario pengujian, meskipun pada skenario 110 kA nilainya mendekati batas Up tersebut.
3. Berdasarkan hasil evaluasi standar dan simulasi ATPDraw, rekomendasi teknis untuk meningkatkan efektivitas sistem proteksi surja pada panel kontrol Gardu Induk Binjai meliputi penguatan perhatian pada SPD LVMDP sebagai proteksi tahap awal, terutama terhadap skenario arus surja 110 kA yang telah melampaui Imax SPD sebesar 100 kA, serta verifikasi kebutuhan rating arus yang lebih tinggi berdasarkan kajian risiko. Selain itu, perlu dilakukan pemeriksaan

kondisi dan verifikasi karakteristik SPD secara berkala, khususnya pada SDP sisi AC dan Sub SDP yang memiliki margin Up relatif tipis. Pemeriksaan dapat mencakup kondisi fisik, indikator status SPD, sistem pembumian, serta verifikasi parameter proteksi seperti Up dan Uc sesuai metode pengujian yang tersedia. Pemeriksaan indikator status seluruh SPD disarankan menjadi bagian dari pemeliharaan rutin, sedangkan verifikasi lebih lanjut pada SDP sisi AC dan Sub SDP dapat dilakukan secara berkala setiap 6 bulan sampai 1 tahun. Dengan penerapan rekomendasi tersebut, efektivitas sistem proteksi dapat dipertahankan dan potensi penurunan kinerja SPD akibat pembebanan surja berulang dapat dideteksi lebih awal.

4. Penelitian ini menghasilkan validasi bahwa pendekatan evaluasi berbasis IEC 61643-11 dan IEC 62305-4 yang dipadukan dengan simulasi ATPDraw mampu memberikan penilaian yang menyeluruh terhadap efektivitas SPD pada panel kontrol gardu induk. Pendekatan tersebut tidak hanya mampu mengevaluasi kesesuaian instalasi berdasarkan standar internasional, tetapi juga memverifikasi secara kuantitatif kemampuan SPD dalam mereduksi tegangan lebih akibat surja petir. Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi teknis dalam evaluasi, pengembangan, dan optimalisasi sistem proteksi internal pada gardu induk yang memiliki karakteristik operasi serupa.

5.2 Saran

1. PT PLN (Persero) disarankan untuk melakukan inspeksi dan pengujian berkala terhadap kondisi SPD, termasuk pemeriksaan indikator kerusakan, sistem pembumian, serta koordinasi proteksi agar kemampuan SPD dalam meredam tegangan lebih tetap optimal.
2. Pada pengembangan sistem proteksi berikutnya disarankan dilakukan analisis terhadap variasi tipe SPD, konfigurasi sistem pembumian, dan koordinasi antar-SPD menggunakan perangkat lunak simulasi transien yang lebih rinci sehingga diperoleh desain proteksi yang lebih optimal.
3. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan kajian dengan menggunakan data arus petir aktual di lokasi penelitian, sehingga pemilihan skenario injeksi arus dapat dibandingkan secara langsung dengan tingkat gangguan yang benar-benar

terjadi. Selain itu, variasi bentuk gelombang impuls, analisis koordinasi energi SPD, maupun simulasi elektromagnetik yang lebih menyeluruh dapat digunakan untuk memperluas evaluasi kinerja sistem proteksi gardu induk.

DAFTAR PUSTAKA

[1] D. Aribowo and M. Otong, “Remote Terminal Unit (RTU) SCADA Pada Jaringan Tegangan Menengah 30 KV,” vol. 3, no. 2, pp. 2–7, 2014.

[2] B. Eko, A. Hermawan, and S. Azizah, “Analisis Perbaikan Sistem Pentanahan Tower 70 kV pada Transmisi Wlingi - Blitar,” vol. 09, no. 3, 2022.

[3] B. Meteorologi and D. A. N. Geofisika, “Badan meteorologi, klimatologi, dan geofisika stasiun geofisika kelas i deli serdang,” no. 1, pp. 2025–2027, 2026.

[4] T. Rendah, “JURNAL ILMIAH SINTEKS ISSN : 1907-2007 E-ISSN : 2579-7115 JURNAL ILMIAH SINTEKS ISSN : 1907-2007 E-ISSN : 2579-7115,” vol. 12, no. 1, pp. 37–42, 2023.

[5] D. Aprili, A. Jaya, and D. Suwarti, “INTERNAL PADA GEDUNG APARTEMEN”.

[6] M. Septian, “DESAIN SISTEM PROTEKSI PETIR INTERNAL PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA”.

[7] R. R. Wirasari, S. Hardi, R. Rohana, and M. Harahap, “Analisa Sambaran Petir Terhadap Sistem Proteksi Tower Telekomunikasi Menggunakan Simulasi Software Atp Draw,” *Rang Tek. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 373–378, 2022, doi: 10.31869/rtj.v5i2.3416.

[8] Y. Berkah, D. Rukti, K. Seputih, and L. Tengah, “Sistem Proteksi Sambaran Petir Kandang Ternak Koperasi,” vol. 4, no. 2, pp. 2–8, 2024.

[9] R. S. Widagdo, G. Budiono, and M. Nasichin, “Analysis of Determining the Surge Arrester Protective Distance for Protection on 60 MVA Power Transformers at the 150 KV Main Substation in Surabaya Barat,” *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 6, no. 1, p. 25, 2024, doi: 10.30595/jrre.v6i1.21555.

[10] C. Liu, Y. B. Muna, Y. Chen, C. Kuo, and H. Chang, “Risk Analysis of Lightning and Surge Protection Devices for Power Energy Structures,” 2018, doi: 10.3390/en11081999.

[11] M. Borecki and M. Ciuba, “Testing of Selected Surge Protection Devices in the Context of the Possibility of Ensuring the Reliability of Power Grids,”

Energies, vol. 16, no. 3, 2023, doi: 10.3390/en16031445.

[12] S. Djulihenanto, M. Saputra, S. Luthfi, and D. Nabiel, "Implementasi Sistem Proteksi Arus dan Tegangan Lebih Pada PLTS," vol. 12, no. 1, pp. 49–54, 2025.

[13] Heru Muhtari *et al.*, "Analysis of Arrester Usage as Over Voltage Protection at 150 kV Mantang Substation, Indonesia," *Front. Adv. Appl. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 28–39, 2025, doi: 10.59535/faase.v3i1.426.

[14] G. L. Amicucci, F. Fiamingo, Z. Flisowski, G. B. Lo Piparo, and C. Mazzetti, "Surge protective devices for low voltage systems: Practical approach for the protection distance evaluation," *2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proc.*, pp. 778–782, 2007, doi: 10.1109/PCT.2007.4538414.

[15] A. Channe, "Surge Protective Device Failure Modes , Impact and Corrective Actions," vol. 9, no. 06, pp. 1533–1537, 2020.

[16] Y. He, Z. Fu, B. Wei, J. Chen, and A. Jiang, "Dynamic characteristics and cascaded coordination of limiting-type SPDs under subsequent negative strokes," vol. 10, pp. 4197–4204, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0803.

[17] S. M. Gunawan, J. Santosa, J. T. Elektro, U. K. Petra, J. Siwalankerto, and A. G. Induk, "Analisa Perancangan Gardu Induk Sistem Outdoor 150 kV di Tallasa , Kabupaten Takalar , Sulawesi Selatan," vol. 1, no. 1, pp. 37–42, 2013.

[18] M. F. Nur, "Studi Optimalisasi Kinerja PLTB Melalui Pemilihan Type Generator Terhadap Stabilitas Sistem Tenaga Listrik (Stabilitas Frekuensi dan Tegangan) Sulbagsel," vol. 1, no. 1, pp. 7–13, 2022.

[19] A. Hadi and E. Ervianto, "Studi Pelepasan Beban Dengan Menggunakan Relai Frekuensi Kurang Pada Sistem Tenaga Listrik," pp. 1–7.

[20] R. Amelia, T. E. Industri, P. Elektronika, and N. Surabaya, "SISTEM KENDALI 2 HEATER GUNA MENCEGAH GUNA MENCEGAH KERUSAKAN PANEL KONTROL 150 KV DI GARDU INDUK," vol. 10, no. 1, 2021.

[21] K. M. Habsari, H. Darna, F. Amaral, and H. Farhan, "Profil Tegangan Surja Petir pada Generator Impuls RLC Sebagai Simulasi Tegangan Lebih," vol. 9, no. 1, pp. 24–27, 2022.

[22] F. Bramantyo, R. Rohana, and S. Hardi, “Pemodelan Perlindungan Sambaran Petir Pada Transformator Daya Di Gardu Induk Tegangan Tinggi,” *J. Al Ulum LPPM Univ. Al Washliyah Medan*, vol. 11, no. 1, pp. 1–6, 2023, doi: 10.47662/alulum.v11i1.431.

[23] A. Prasstia, I. Roza, and A. Nasution, “Analisis Daya di Pengaruhi Switching Kapasitor Bank Menggunakan Power Factor Regulator,” vol. 8, no. 1, pp. 290–294, 2025.

[24] A. Mahira *et al.*, “Evaluasi Sistem Proteksi Petir Eksternal pada Bangunan Pusat Perbelanjaan Studi Kasus Gedung,” vol. 7, no. 02, 2024.

[25] T. E. Team, “Perangkat Pelindung Lonjakan Arus : Panduan Lengkap,” pp. 1–25, 2026.

[26] T. E. Team, “SPD Tipe 1 vs Tipe 2 vs Tipe 3 : Panduan Lengkap IEC,” pp. 1–19, 2026.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Permohonan Izin Pengambilan Data dari Universitas

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya
Bila menjawab surat ini agar disebutkan nomor dan tanggalnya
UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Ppj/PT/III/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003
https://fatek.umsu.ac.id fatek@umsu.ac.id umsumedan umsumedan umsumedan umsumedan

Nomor : 628/II.3.AU/UMSU-07/B/2026 Medan, 24 Ramadhan 1447 H
Lamp : - 13 Maret 2026 M
Hal : **Pengambilan Data**

Kepada Yth. : **Bapak / Ibu Pimpinan**
PT. PLN (Persero) UIP3B Sumatera UPT Medan
Di -
Tempat

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dengan hormat,

Kami memohon kesediaan Bapak/Ibu untuk menerima dan memberikan izin mahasiswa kami yang akan melakukan Pengambilan Data di **PT. PLN (Persero) UIP3B Sumatera UPT Medan,** untuk penulisan Tugas Akhir, di Fakultas Teknik UMSU.

Adapun nama mahasiswa kami tersebut adalah :

Nama : Dafa Rizky Nurviantoro
NPM : 2207220088
Prodi : Teknik Elektro
Judul Tugas Akhir : **Analisis Efektivitas Surge Protective Device Pada Panel Kontrol Gardu Induk Binjai PT. PLN UIP3B Sumatera UPT Medan Berdasarkan IEC 61643-11 dan IEC 62305-4**
Pembimbing : **Dr. Rohana, ST., MT.**

Adapun data Perusahaan yang akan diminta sebagai berikut:
1. Data single line diagram GI dan panel kontrol
   (SLD GI, konfigurasi panel kontrol, titik suplai, dan hubungan ke relay/RTU/SCADA)
2. Data spesifikasi dan pemasangan SPD
   (Jenis SPD, parameter utama, lokasi pemasangan, dan konfigurasi sambungan)
3. Data sistem pembumian panel kontrol
   (Nilai tahanan grounding, jenis sistem pembumian, dan koneksi ke grounding GI)
4. Data karakteristik kabel dan peralatan kontrol
   (Jenis kabel, ukuran, panjang, shielding, serta jenis peralatan kontrol)
5. Data gangguan surja petir dan switching
   (Jumlah gangguan, jenis gangguan, lokasi terdampak, dan data rekaman gangguan)
6. Data spesifikasi peralatan kontrol yang dilindungi
   (Jenis peralatan, tegangan kerja, ketahanan isolasi, dan batas tegangan lebih)

Demikianlah, atas bantuan dan kerjasama Bapak/Ibu kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Dekan

Ir. Ade Faisal, ST., M.Sc., Ph.D.
NIDN : 0123097203

Lampiran 2 Surat Izin Pengambilan Data dari PT. PLN (Persero) UIP3B Sumatera UPT Medan

PLN

UIP3B SUMATERA
UPT MEDAN

Nomor : 0457/SDM.02.04/F22060000/2026
Lampiran : 1 Lembar
Sifat : Segera - Terbatas
Hal : Izin Pengambilan Data

11 April 2026

Kepada

Yth. Dekan
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah
Sumatera Utara
Jl.Mukhtar Basri No.3 Medan
20238

Menunjuk surat dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Fakultas Teknik Prodi Teknik Elektro yang beralamat di Jalan Mukhtar Basri No.3 Medan 20238 dengan nomor surat : 628/II.3..AU/UMSU-07/B/2026 pada tanggal 30 Maret 2026 perihal Permohonan Izin Pengambilan Data atas nama :

No.	Nama	NPM	Prodi
1	Dafa Rizky Nurviantoro	2207220088	Teknik Elektro

Bersama ini diinformasikan bahwa untuk pelaksanaan Pengambilan Data tersebut dapat dilaksanakan di lingkungan kantor PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Binjai tanggal 14 April 2026. Adapun dalam pelaksanaan Pengambilan Data tersebut hal-hal yang perlu diperhatikan siswa sebagai berikut :

1. Mengisi daftar hadir.
2. Menjaga etika sopan santun dan melaksanakan tata tertib di perusahaan PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Binjai.
3. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menyediakan transportasi dan akomondasi.
4. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak memberikan honorarium dan konsumsi.
5. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menanggung biaya pemeliharaan kesehatan dan resiko kecelakaan.
6. Mengikuti protokol kesehatan dan keselamatan (K3) yang berlaku.
7. Peserta Pengambilan Data tidak akan mengekspose data/informasi perusahaan kepada pihak lain.
8. Menyerahkan copy laporan Pengambilan Data setelah selesai dilaksanakan ke Gardu Induk Binjai.
9. Hasil Pengambilan Data harus di presentasikan ke ASMAN KONS dan LUR
10. Untuk laporan Pengambilan Data ijin dan mekanisme dapat menghubungi Manager ULTG Binjai.

Demikian disampaikan untuk dapat dipergunakan seperlunya terima kasih.

Jl. Listrik No. 12, Kel. Petisah Tengah, Kec. Medan Petisah, Medan 20112
T (061) 4579900 F (061) 4577700 E upt_medan@p3b-sumatera.co.id

Paraf _____

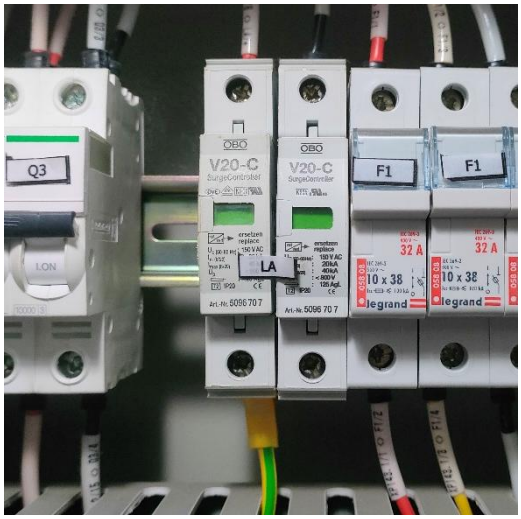
1 dari 2

DALIN SITI WAHYUNI/13 April 2026 16:00:10/cetakan ke - 7

Lampiran 3 Data Pendukung Penelitian







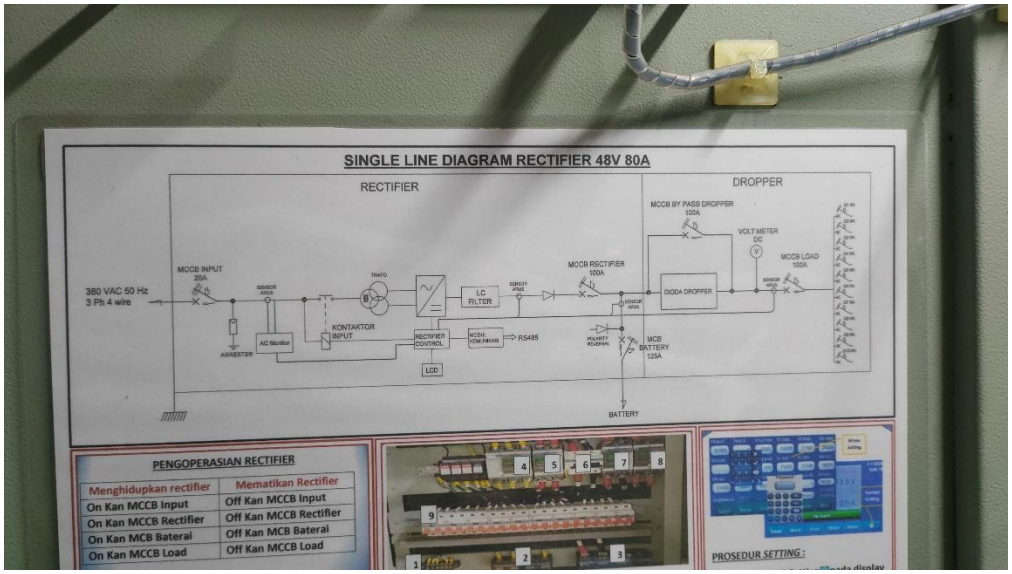




Lampiran 4 Data Pendukung Penelitian







Lampiran 5 Lembar Asistensi Seminar Proposal

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400-66224567

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : DAFA RIZKY NURVIANTORO
NPM : 2207220088
Judul : ANALISIS EFEKTIVITAS SURGE PROTECTIVE DEVICE (SPD) PADA PANEL KONTROL GARDU INDUK UIP3B SUMATERA UTARA BERDASARKAN IEC 61643-11 DAN IEC 62305-4

Dosen Pembimbing : Dr. Rohana, S.T.,M.T

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1	Rabu 17 Desember 2025	1. Perbaiki Judul, 2. Tujuan Penulisan, Latar Belakang	
2	Senin 22 Desember 2025	1. Rakasan Masalah, 2. Sinkronkan Judul TA, dengan Tujuan, Rumusan.	
3	Senin 5 Januari 2026	1. Tambahkan Teori 2. Tinjauan Pustaka 3. Gap Penelitian.	
4	Senin 19 Januari 2026	1. Prosedur Penelitian 2. Data Penelitian, 3. Tambah Teori	
5	Senin 9 FEB 2026	1. Diagram Blok Penelitian, 2. Flowchard Penelitian, 3. Metode Penelitian.	
6	Selasa 24 FEB 2026	Acc Sempro	

Dosen Pembimbing

Dr. Rohana, S.T., M.T.

Lampiran 6 Lembar Asistensi Seminar Hasil

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400-66224567

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : DAFA RIZKY NURVIANTORO
NPM : 2207220088
Judul : ANALISIS *EFEKTIVITAS SURGE PROTECTIVE DEVICE* (SPD) PADA PANEL KONTROL GARDU INDUK BINJAI BERDASARKAN IEC 61643-11 DAN IEC 62305-4

Dosen Pembimbing : Dr. Rohana, S.T.,M.T

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1	Jumat 29/5 26	Perbaikan dan Penambahan research	
2	Jumat 12/6 26	Perbaikan dan tambahan pada BAB 3	
3	Selasa 23/6 26	Perbaikan tahapan tujuan 3	
4	Jumat 10/7 26	Perbaikan dan tambahkan BAB 4	
5	Selasa 21/7 26	Perbaikan dan tambahan BAB 5, lampiran	
6	27 juli 2026	Acc Semhas	

Dosen Pembimbing

Dr. Rohana, S.T., M.T.

Lampiran 7 Lembar Asistensi Sidang

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400-66224567

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : DAFA RIZKY NURVIANTORO
NPM : 2207220088
Judul : ANALISIS EFEKTIVITAS *SURGE PROTECTIVE DEVICE* (SPD) PADA PANEL KONTROL GARDU INDUK BINJAI BERDASARKAN IEC 61643-11 DAN IEC 62305-4

Dosen Pembimbing : Dr. Rohana, S.T.,M.T

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1			
2			
3			
4			
5			
6	Kamis / 13-08-2026	Acc Sidang TA	

Dosen Pembimbing

Dr. Rohana, S.T., M.T.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA DIRI PENULIS

Nama	: Dafa Rizky Nurviantoro
NPM	: 2207220088
Tempat, Tanggal Lahir	: Medan, 11 januari 2005
Jenis Kelamin	: Laki – laki
Alamat	: Jl Danau Poso Gg darma Lk V Sumber Mulyorejo
Agama	: Islam
Pekerjaan	: Mahasiswa
No.Telp	: 0821-7724-2168
Gmail	: daffarizkyn@gmail.com

DATA DIRI ORANG TUA

Nama Ayah	: Untoro
Agama	: Islam
Nama Ibu	: Novi Puspita Sari
Agama	: Islam
Alamat	: Jl Danau Poso Gg darma Lk V Sumber Mulyorejo

RIWAYAT PENDIDIKAN

2010 - 2016	: SD SWASTA HARAPAN 1 BINJAI
2016 - 2019	: SMP NEGERI 1 BINJAI
2019 - 2022	: SMA NEGERI 1 PLUS MATAULI PANDAN
2022 - 2026	: S1 Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara