

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Sistem tenaga listrik memiliki peran strategis dalam mendukung aktivitas ekonomi, sosial, dan industri. Sistem ini terdiri atas tiga subsistem utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik. Di antara ketiga subsistem tersebut, ada sistem titik penghubung antara jaringan transmisi dan distribusi, yaitu gardu induk. Di gardu induk, energi listrik yang dikirim dari pusat pembangkit diatur tegangannya melalui transformator daya sebelum disalurkan ke jaringan distribusi untuk memenuhi kebutuhan konsumen [1].

Salah satu komponen penting dalam gardu induk adalah Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*), yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutus arus listrik, baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan [2]. Dengan adanya pemutus tenaga (PMT), bagian sistem yang tidak terdampak gangguan dapat tetap beroperasi secara normal, sehingga kerusakan tidak menyebar ke area lain. Oleh karena itu, tingkat keandalan pemutus tenaga harus dipertahankan agar penyaluran daya listrik tetap terjaga. Apabila terjadi kegagalan fungsi pada pemutus tenaga, maka gangguan yang semula lokal dapat berkembang dan memengaruhi peralatan lain, berpotensi menyebabkan pemadaman menyeluruh pada sistem tenaga listrik [3].

Transient Recovery Voltage (TRV) merupakan lonjakan tegangan sesaat yang terjadi akibat pelepasan energi secara tiba-tiba dari energi yang sebelumnya tersimpan dalam sistem. Fenomena ini muncul ketika pemutus tenaga (PMT) membuka kontaknya untuk menghentikan arus listrik selama terjadi gangguan. Pada saat kontak terbuka, titik hubungan antara sisi sumber dan sisi beban jaringan listrik terputus, sehingga menyebabkan timbulnya tegangan transien. Berdasarkan standar IEEE C37.04, *Transient Recovery Voltage* memiliki karakteristik berupa frekuensi yang sangat tinggi dan amplitudo yang dapat melebihi tegangan operasi normal sistem [4]. Apabila *rate of rise of recovery voltage* (RRRV) lebih cepat dibanding kemampuan media pemadam busur api dalam PMT, maka dapat terjadi *reignition*, yaitu penyalan ulang busur api yang telah padam. Dalam kondisi

ekstrem, jika TRV meningkat sangat cepat sebelum media pemadam sempat menstabilkan celah isolasi, dapat terjadi *restrike*, yang berpotensi menimbulkan kerusakan serius pada peralatan gardu induk serta mengancam keandalan sistem tenaga listrik secara keseluruhan [5].

Resistansi dan kapasitansi pada saluran transmisi memegang peranan vital dalam menentukan karakteristik *Transient Recovery Voltage* (TRV) yang muncul saat proses pemutusan arus oleh Pemutus Tenaga (PMT). Resistansi berfungsi sebagai elemen redaman (*damping*) yang mengonsumsi energi transien dan mengurangi amplitudo lonjakan tegangan. Sementara itu, kapasitansi bertugas menyimpan energi listrik dan membantu mengurangi *rate of rise of recovery voltage* (RRRV) [6]. Berdasarkan penelitian [7] dilaporkan adanya kegagalan operasi pemutus tenaga jenis SF₆ dan vacuum saat melakukan pemutusan arus pada beban reaktor. Studi tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa penerapan rangkaian resistor dan kapasitor yang memadai, karakteristik *Transient Recovery Voltage* (TRV) akan memiliki *rate of rise of recovery voltage* (RRRV) yang tinggi sehingga melebihi kemampuan pemulihan dielektrik pemutus tenaga. Akibatnya, meskipun arus telah berhasil diputus pada titik nol, terjadi kegagalan dielektrik berupa *restrike* [7].

Berbagai penelitian telah dikembangkan untuk mengatasi dampak fenomena TRV, salah satunya adalah metode *Pre-Insertion Resistors* (PIR) sebagaimana dilakukan dalam penelitian [8]. Pada metode ini, implementasi PIR terbukti efektif meredam energi transien secara signifikan. Dalam studi tersebut, penggunaan PIR mampu menekan lonjakan arus puncak (*peak current*) dari kisaran 5 – 10 kA menjadi hanya 1,1 – 1,2 kA. Selain itu, penelitian [9] mengkaji pengaruh pemasangan *grading capacitor* terhadap TRV yang muncul saat shunt reactor dilepas dari sistem tenaga. Studi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *grading capacitor* (kapasitor pembagi) mampu mengoptimalkan proses pemutusan arus dengan cara mempersingkat durasi *arcing*, serta menurunkan *rate of rise of recovery voltage* (RRRV). dapat membantu menurunkan TRV secara signifikan, sehingga proses pemutusan menjadi lebih aman dan risiko terjadinya *restrike* dapat dikurangi.

Fenomena TRV memegang peranan kritis dalam operasional PMT, di mana kegagalan dalam meredam tegangan transien ini dapat memicu kerusakan fatal pada peralatan dan gangguan sistem yang luas. Oleh karena itu, untuk menghindari risiko kerusakan atau kegagalan operasional pada PMT, diperlukan langkah langkah yang efektif untuk meredam lonjakan TRV. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah dengan mensimulasikan penerapan komponen proteksi seperti *grading resistor*, *capacitor*, atau gabungan keduanya dalam bentuk *RC snubber* sebagai media peredam tegangan transien.

Simulasi dan analisis terhadap berbagai metode peredaman *Transient Recovery Voltage* (TRV) diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas masing masing metode dalam menurunkan nilai puncak tegangan TRV serta laju kenaikan tegangan atau *Rate of Rise of Recovery Voltage* (RRRV). Selain itu, kinerja pemutus tenaga (PMT) perlu dipastikan telah memenuhi persyaratan dan batasan yang ditetapkan dalam standar yang berlaku. Hasil simulasi TRV yang diperoleh selanjutnya dianalisis dengan membandingkannya terhadap kemampuan PMT dalam memadamkan busur api serta kesesuaiannya dengan standar IEEE C37.06. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan simulasi dan analisis terhadap penerapan *grading resistor*, *grading capacitor*, serta kombinasi keduanya untuk menilai kinerjanya dalam meredam TRV dan RRRV pada pemutus tenaga.

1.2. Kajian Riset Terdahulu

Untuk menunjukkan bahwa penelitian ini tidak ada unsur plagiat terhadap penelitian peneliti lain. Dalam hal ini, penelitian terdahulu menjelaskan perbandingan terhadap riset yang telah dilakukan sebelumnya, dan menjadi acuan pembuatan tugas akhir ini. Perbandingan tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1. Kajian riset terdahulu.

No	Judul	Peneliti	Tahun
1	Pengaruh Nilai PIR dan Penggantian Elemen Resistor dengan DISP Aluminium terhadap GCB 420 kV [8].	Adistia Nurul, Simatupang Joni, Tampubolon Marojahan, Samsuri Faisal.	2023

No	Judul	Peneliti	Tahun
2	<i>Impact of grading capacitor on transient recovery voltage due to shunt reactor de energization for different values of current chopping [9].</i>	Al-Tak Mazyed A, Ain Mohd Fadzil Bin, Al-Yozbaky Omar Sh, Jamil, Mohamad Kamarol Mohd.	2024
3	<i>Optimal design of RC snubber circuit for mitigating transient overvoltage on VCB via hybrid FFT/Wavelet Genetic approach [10].</i>	Ebrahim Mohamed A, Elyan Tamer, Wadie Fady, Abd-Allah Mousa A.	2021
4	<i>Simulation of Switching over voltages of 400 kV Shunt Reactor [11].</i>	Asghar Barghan dan Behzad Sedaghat.	2024
5.	<i>Mitigation of Transient Recovery Voltages using the Supercapacitor [12].</i>	Eman A. Awad, Ebrahim A. Badran.	2020

Penelitian [8] membahas kinerja GCB (*Gas Circuit Breaker*) 420 kV, khususnya pada pengaruh nilai PIR (*Pre-Insertion Resistor*) dan penggantian elemen resistor konvensional dengan DISP Aluminium terhadap performa alat. Fokus utama pada penelitian ini yaitu membandingkan performa elemen resistor konvensional dengan DISP Aluminium (*grading resistor*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan resistor mampu mengurangi arus puncak dari 1,7963 kA menjadi 0,9845 kA atau sekitar 45,2%, serta memperpendek durasi transien dari 20 ms menjadi 10 ms dibandingkan kondisi tanpa resistor. Selain itu, penggunaan PIR menghasilkan karakteristik kenaikan tegangan (*ramp-up*) yang lebih baik sehingga tegangan transien saat *switching* menjadi lebih terkendali. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan elemen resistif pada pemutus tenaga efektif dalam meredam fenomena transien akibat proses *switching*.

Penelitian [9] mengkaji pengaruh pemasangan *grading capacitor* terhadap *transient recovery voltage* (TRV) yang muncul saat *shunt reactor* dilepas dari sistem tenaga. Studi ini juga menilai variasi *current chopping* dalam memengaruhi besarnya TRV pada *circuit breaker*, karena kondisi tersebut dapat menimbulkan tegangan transien yang tinggi dan berisiko menyebabkan gangguan operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi rangkaian dengan penambahan *grading capacitor* mampu menurunkan TRV pada pemutus tenaga hingga sekitar 61,5%, sehingga pemutusan menjadi lebih aman dan risiko *restrike* dapat dikurangi.

Penelitian [10] mengkaji fenomena *transient overvoltage* (tegangan transient berlebih) pada saat pemutusan *vacuum circuit breaker* (VCB). Karena pemutusan arus pada beban induktif sering menyebabkan fenomena *multiple reignitions* (penyalan busur api berulang) dan *voltage escalation* (kenaikan tegangan bertahap). Untuk mengatasi ini, peneliti berfokus pada optimasi parameter *RC Snubber* dengan melakukan simulasi menggunakan EMTP-RV serta menganalisis menggunakan *genetic algorithm* (algoritma genetika). Hasilnya Penggunaan *RC snubber* hasil optimasi algoritma genetika mampu menurunkan tegangan puncak (Vp), *rate of rise of recovery voltage* (RRRV) serta menghilangkan *reignition*.

Penelitian [11] membahas fenomena *transient switching overvoltages* pada *shunt reactor* 400 kV di gardu induk Bam 400/132 kV. Fokus konfigurasi *shunt reactor* yang di *ground* melalui *neutral reactor* menghasilkan *duty* yang lebih berat dibanding *shunt reactor* yang di *ground* langsung. Saat pemutusan, arus yang harus diputus memang kecil, tetapi bisa memunculkan tegangan transien yang tinggi sehingga berisiko menyebabkan *restrike*, *overstress*, bahkan kerusakan peralatan. Hasil simulasi dengan menggunakan PSCAD/EMTP perilaku busur listrik, tegangan pemulihan, dan *overvoltage* saat *switching*, menunjukkan bahwa jika tidak ada peralatan pengendali, terjadi *reignition* dan tegangan pada terminal *reactor* mencapai sekitar 2,4 pu, sementara tegangan pemulihan di *circuit breaker* mendekati batas tahan switching 1050 kV.

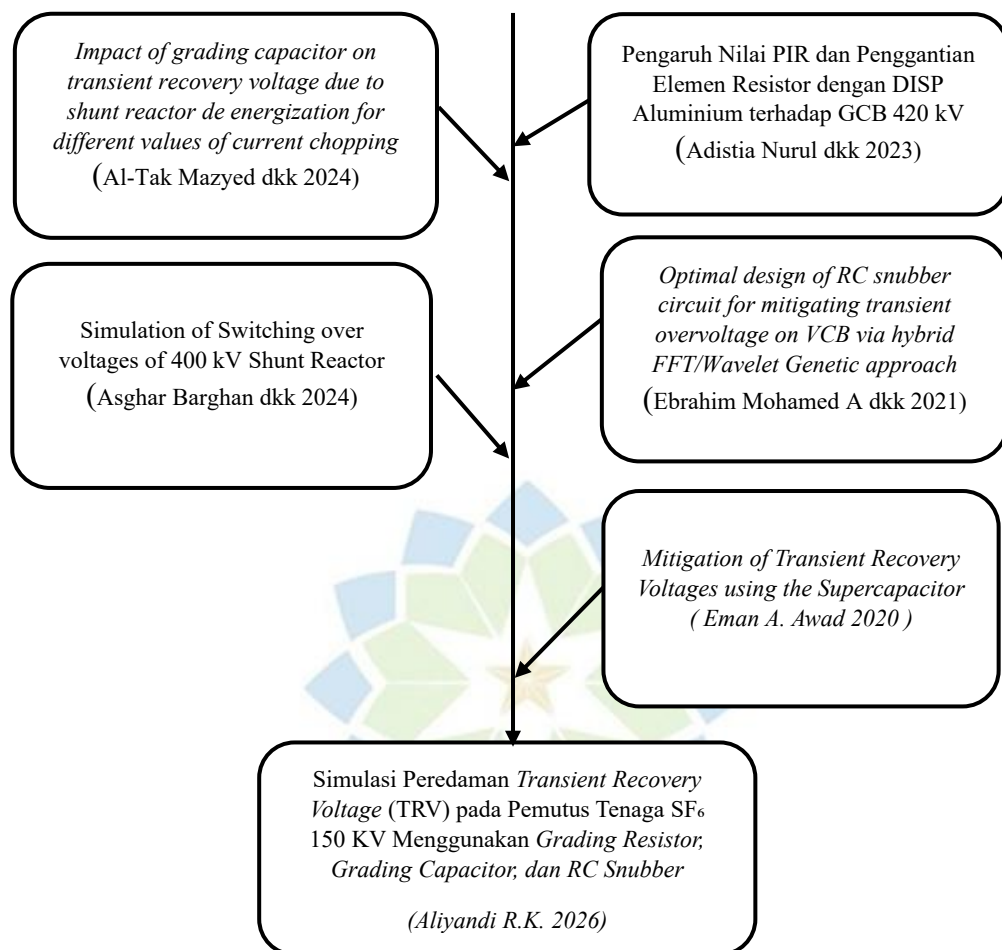
Penelitian [12] ini membahas tentang fenomena *Transient Recovery Voltage* (TRV) yang muncul pada kontak pemutus daya (*circuit breaker*) tegangan tinggi segera setelah pemutusan arus gangguan. Fokus utama penelitian ini adalah

simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ATP/EMTP dengan mengambil studi kasus pada sistem tenaga listrik tegangan tinggi (khususnya level 220 kV) untuk melihat perilaku transien saat terjadi berbagai jenis gangguan, seperti gangguan terminal (*terminal fault*) dan gangguan jarak dekat (*short line fault*).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tanpa adanya sistem peredaman, nilai puncak TRV dan RRRV pada sistem tegangan tinggi seringkali melebihi kemampuan desain pemutus daya, yang meningkatkan risiko terjadinya percikan api kembali (*restrike*). Namun, dengan pemasangan kapasitor peredam, hasil simulasi membuktikan terjadinya penurunan yang signifikan pada nilai RRRV, sehingga memberikan waktu bagi media isolasi pemutus daya untuk memulihkan kekuatannya.

Meskipun berbagai penelitian telah mengeksplorasi penggunaan komponen proteksi untuk meredam *Transient Recovery Voltage* (TRV), sebagian besar studi tersebut cenderung berfokus pada efektivitas satu jenis komponen secara spesifik atau diterapkan pada sistem tegangan ekstra tinggi (500 kV) dan menengah (VCB). Terdapat keterbatasan literatur yang membandingkan secara komprehensif efektivitas antara *grading resistor*, *grading capacitor*, dan kombinasi *RC snubber* secara bersamaan dalam satu studi kasus, khususnya pada level tegangan 150 kV. Selain itu, analisis yang menghubungkan karakteristik beban harian riil di Gardu Induk 150 kV Cigereleng dengan berbagai skenario gangguan (seperti 1LG dan 3PH) masih jarang dilakukan secara mendalam. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan mengevaluasi metode peredaman mana yang paling optimal dalam menurunkan nilai puncak TRV dan *Rate of Rise of Recovery Voltage* (RRRV) pada Pemutus Tenaga (PMT) jenis SF₆ di lingkungan operasional spesifik Gardu Induk Cigereleng.

Gambar 1.1 mengilustrasikan korelasi antara studi studi terdahulu dengan penelitian yang sedang disusun oleh penulis.



Gambar 1.1. Hubungan penelitian

1.3. Rumusan Masalah

Dari latar belakang masalah yang sudah diuraikan maka rumusan masalah adalah sebagai berikut :

1. Kondisi operasi manakah yang menghasilkan nilai puncak TRV dan RRRV paling kritis pada PMT SF₆ 150 kV di Gardu Induk Cigereleng berdasarkan simulasi *switching* normal, gangguan satu fasa ke tanah, dan gangguan tiga fasa?
2. Bagaimana kinerja metode *grading resistor*, *grading capacitor*, dan *RC snubber* dalam membatasi nilai puncak TRV dan RRRV agar tetap berada dalam batas kemampuan PMT SF₆ 150 kV di Gardu Induk Cigereleng berdasarkan hasil simulasi PSCAD?

1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tugas penelitian ini memerlukan data data valid untuk dibahas serta diteliti dan dianalisis. Adapun teknik dari pengumpulan data tersebut adalah sebagai berikut:

1.4.1. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis kondisi operasi yang menghasilkan nilai puncak *Transient Recovery Voltage* (TRV) dan *Rate of Rise of Recovery Voltage* (RRRV) paling kritis pada PMT SF₆ 150 kV di Gardu Induk Cigereleng berdasarkan simulasi PSCAD pada kondisi *switching* normal, gangguan satu fasa ke tanah (1LG), dan gangguan tiga fasa (3PH).
2. Menganalisis kinerja metode grading *resistor*, *grading capacitor*, dan *RC snubber* dalam membatasi nilai puncak *Transient Recovery Voltage* (TRV) dan *Rate of Rise of Recovery Voltage* (RRRV) agar tetap berada dalam batas kemampuan PMT SF₆ 150 kV di Gardu Induk Cigereleng berdasarkan simulasi PSCAD.

1.4.2. Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini diharapkan dapat memperoleh beberapa manfaat berupa:

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi akademik berupa peningkatan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai fenomena *Transient Recovery Voltage* (TRV) pada sistem bertegangan tinggi, khususnya pada Pemutus Tenaga (PMT) dengan metode *grading resistor* serta berbagai kombinasi komponen lainnya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai referensi ilmiah terkait metode, teknik analisis, serta simulasi yang dapat digunakan untuk mengurangi besarnya TRV. Dengan demikian, penelitian ini bermanfaat bagi mahasiswa, akademisi, dan peneliti yang mendalami bidang proteksi sistem tenaga listrik, terutama yang berkaitan dengan TRV pada PMT.

2. Manfaat Praktis

Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi teknisi lapangan dalam melakukan evaluasi serta pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT), sehingga potensi kegagalan yang disebabkan oleh *Transient Recovery Voltage* (TRV) dapat ditekan. Selain itu, penelitian ini diharapkan turut berperan dalam pengembangan prosedur keselamatan yang lebih efektif dalam penanganan kondisi TRV ekstrem, guna meminimalkan risiko kecelakaan kerja serta kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik. Dengan tersedianya panduan teknis dan prosedur keselamatan yang lebih optimal, keandalan dan kontinuitas penyaluran energi listrik dari pembangkit hingga ke konsumen diharapkan dapat semakin terjaga. Lebih lanjut, hasil penelitian ini juga berpotensi menjadi rujukan dalam pengembangan teknologi PMT sehingga dapat memperpanjang umur dari peralatan tersebut sehingga menjadi yang lebih andal dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan di masa mendatang.

1.5. Batasan Masalah

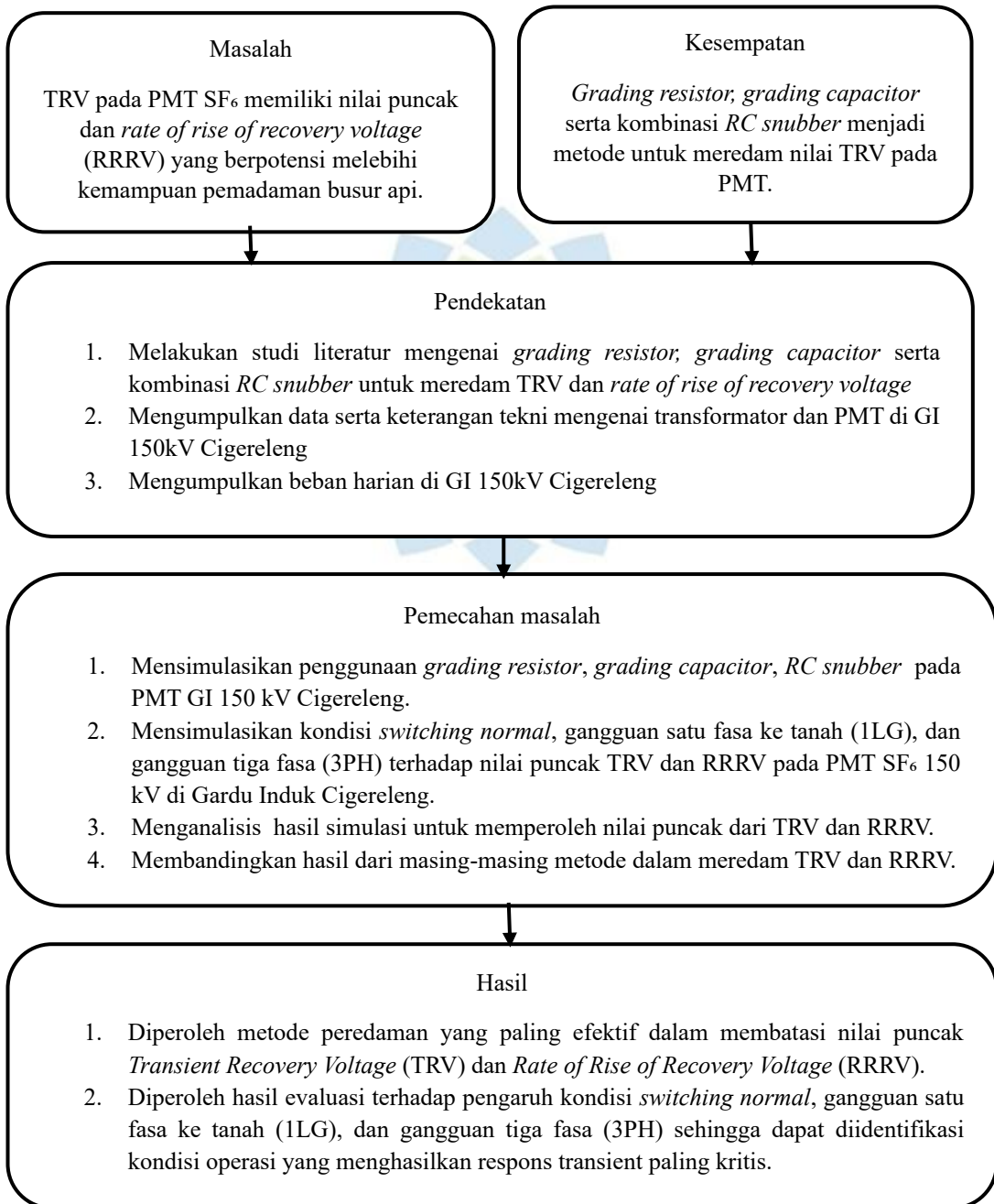
Penelitian ini dibatasi pada beberapa aspek utama agar pembahasan lebih terfokus dan terarah. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan pada pemutus tenaga (PMT) jenis SF₆ yang beroperasi pada Gardu Induk 150 kV Cigereleng, dengan parameter sistem yang disesuaikan berdasarkan data dan asumsi teknis yang relevan.
2. Data pembebanan harian yang digunakan dalam simulasi adalah data pembebanan harian GI 150 kV Cigereleng terutama pada bay IBT 1 dan bay PHT 70kV Majalaya.
3. Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi dengan perangkat lunak PSCAD, dengan metode peredaman penggunaan *grading resistor*, *grading capacitor*, serta kombinasi keduanya dalam bentuk rangkaian *RC snubber*.

4. Perhitungan TRV pada PMT dilakukan menggunakan simulasi dengan tiga jenis pemutusan, yaitu *switching normal*, gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (1LG) dan gangguan hubung singkat tiga fasa (3PH), yang masing masing berfungsi sebagai pemicu operasi PMT untuk memutuskan sirkuit.
5. Parameter TRV yang dianalisis meliputi tegangan puncak TRV, laju kenaikan tegangan (*Rate of Rise of Recovery Voltage/RRRV*), serta karakteristik osilasi tegangan setelah pemutusan arus gangguan.
6. Penelitian ini hanya membahas fenomena *Transient Recovery Voltage* (TRV) dan *Rate of Rise of Recovery Voltage* (RRRV) pada PMT, serta tidak mencakup analisis harmonisa, kestabilan sistem, maupun koordinasi proteksi secara menyeluruh
7. Evaluasi kinerja PMT terhadap TRV mengacu pada standar IEEE C37.06 dan tidak membahas desain internal PMT secara manufaktur.
8. Pemodelan sistem tenaga listrik pada simulasi dilakukan dalam kondisi parameter sistem dianggap konstan dan tidak mempertimbangkan perubahan konfigurasi jaringan secara dinamis selama simulasi berlangsung.
9. Analisis dilakukan pada sisi transient tegangan setelah proses pemutusan arus dan tidak membahas performa sistem proteksi relai secara detail.

1.6. Kerangka Berpikir

Masalah yang berkaitan dengan fokus penelitian ini sangat luas dan kompleks. Oleh karena itu, penulis membatasi ruang lingkup penelitian pada beberapa aspek kunci, yaitu :



Gambar 1.2. Kerangka berpikir

1.7. Sistematika Penulisan

Dalam mendapatkan struktur penyusunan data dan penulisan yang baik, tugas akhir ini memiliki kerangka dan sistematika yang mengikuti aturan yang telah ditentukan, sehingga diharapkan mendapatkan hasil tulisan yang baik. Sistematika tugas akhir penelitian ini terdiri dari:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai permasalahan yang diangkat melalui latar belakang, kajian dari penelitian terdahulu, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian secara akademis dan praktis, batasan masalah, kerangka berpikir dan sistematika penulisan.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini memberikan justifikasi teoritis terkait topik-topik yang diangkat dalam penelitian, seperti penjelasan terkait saluran transmisi, gardu induk, peralatan gardu induk, gangguan sistem tenaga listrik, *transient recovery voltage* (TRV), dan metode peredaman TRV.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang metode penelitian yang akan digunakan, yaitu analisis kebutuhan pengumpulan dan pengolahan data, penyusunan skema simulasi TRV tanpa peredam serta penambahan metode peredam pada simulasi. Serta jadwal penelitian yang berupa tahapan-tahapan sistematis selama penelitian berlangsung di PT. PLN (Persero) GI Cigereleng Bandung bagian jaringan mengenai kondisi pemutus tenaga (PMT).

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN SIMULASI

Bab ini berisi data-data yang digunakan untuk menyusun skema simulasi TRV. Data tersebut meliputi single line diagram GI CIGERELENG 150 kV, spesifikasi transformator, pemutus tenaga (PMT), data beban harian transformator, serta data kapasitansi liar yang terdapat pada masing-masing peralatan gardu induk. Selain itu, pada bab ini juga dijelaskan metode peredaman yang akan digunakan, yaitu *grading resistor*, *grading capacitor* dan *RC*. Variasi skenario simulasi TRV pada PMT juga dijelaskan secara rinci untuk mendukung analisis yang dilakukan.

BAB V HASIL DAN ANALISIS

Bab ini memaparkan hasil simulasi *Transient Recovery Voltage* (TRV) beserta analisis yang dilakukan terhadap data yang diperoleh. Analisis disusun berdasarkan masing masing skenario pemutusan yang disimulasikan untuk mengidentifikasi metode peredaman yang paling efektif dalam menurunkan nilai puncak TRV dan RRRV pada setiap kondisi pemutusan. Selanjutnya, dilakukan perbandingan kinerja antara metode peredaman yang diterapkan guna mengevaluasi tingkat efektivitasnya. Hasil simulasi tersebut juga dianalisis dengan mengacu pada batas kemampuan Pemutus Tenaga (PMT) sehingga dapat diketahui kesesuaian nilai TRV yang dihasilkan terhadap kemampuan operasi PMT.

BAB VI PENUTUP

Bab ini menjelaskan tentang bagian penutup dari penelitian. Bagian ini berisi mengenai kesimpulan dari penelitian, serta saran untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

