BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem tenaga listrik memiliki peran penting dalam menyalurkan energi listrik dari pembangkit ke pusat beban. Keandalan penyaluran energi listrik sangat memengaruhi kebutuhan masyarakat, industri, perkantoran, hingga pemerintahan dalam kehidupan sehari-hari. Oleh karena itu, kualitas dan kontinuitas penyaluran energi listrik harus dijaga agar kebutuhan energi dapat terpenuhi dengan baik. Peralatan-peralatan dalam sistem tenaga listrik harus berada dalam kondisi optimal agar penyaluran energi listrik tidak terganggu. Untuk mencegah kegagalan operasi pada peralatan, dilakukan berbagai upaya seperti pemeliharaan rutin dan pengecekan harian. Namun demikian, gangguan atau kondisi abnormal masih dapat terjadi dan berpotensi merusak peralatan sehingga menghambat penyaluran energi listrik.

Gardu induk merupakan salah satu bagian penting dari sistem tenaga listrik, yang berfungsi menjaga stabilitas penyaluran energi dari sistem transmisi. Dalam menangani gangguan atau kondisi abnormal, peralatan proteksi berperan penting untuk mengisolasi bagian sistem yang terdampak [1]. Pemutus tenaga (PMT) berfungsi memutus arus listrik saat diperlukan pemeliharaan atau memutus secara otomatis saat terjadi gangguan, sehingga bagian sistem yang masih normal dapat tetap beroperasi dan kerusakan akibat gangguan tidak meluas. Keandalan PMT harus selalu dijaga agar sistem tenaga listrik tetap beroperasi dengan baik. Namun, jika PMT mengalami kegagalan operasi, maka gangguan dapat meluas ke peralatan lain dan menyebabkan pemadaman [2].

Ketika kontak PMT memutus arus listrik atau ketika arus mencapai titik nol, terjadi tegangan pemulih transien (*transient recovery voltage* atau TRV) yang dapat meningkat dengan sangat cepat dalam kurun waktu mikrosekon [3]. TRV bukanlah gangguan, melainkan fenomena alami yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Namun, jika laju kenaikan TRV (*rate of rise of recovery voltage* atau RRRV) terlalu tinggi, dapat memicu *restrike* tegangan yang berakibat fatal pada PMT serta

mengganggu kontinuitas sistem. Umumnya, isolasi PMT memiliki kekuatan dielektrik yang cukup tinggi untuk memadamkan busur api saat pemutusan atau penutupan kontak. Namun, apabila RRRV lebih tinggi daripada kemampuan dielektrik isolasi PMT, maka *restrike* tegangan dapat terjadi. Jika TRV ini tidak segera dikendalikan, *restrike* tegangan dapat menyebabkan kerusakan pada kontak PMT [4].

Kapasitansi dan induktansi pada saluran transmisi merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi besarnya nilai TRV. Berdasarkan *Outlook* Energi Indonesia (OEI) 2019, permintaan listrik nasional diperkirakan akan terus meningkat hingga tahun 2050, dengan proyeksi peningkatan hampir sembilan kali lipat menjadi 2.309,4 TWh dibandingkan dengan permintaan pada tahun 2018 sebesar 256,6 TWh. Peningkatan beban ini secara langsung akan memengaruhi energi dari induktansi dan kapasitansi saluran, yang pada akhirnya dapat memperburuk kondisi TRV serta meningkatkan risiko kegagalan operasi PMT [5].

Berdasarkan hasil observasi lapangan, pada tahun 2019 PMT7SR di GITET 500 kV Bandung Selatan mengalami kegagalan operasi akibat TRV yang melebihi batas kemampuan peralatan. TRV ekstrem ini dipicu oleh peningkatan beban sistem [6], yang menyebabkan *restrike* tegangan, merusak kontak terminal PMT, dan memicu ledakan pada *chamber*. Kejadian ini menegaskan bahwa TRV yang tidak terkendali dapat berdampak fatal terhadap keandalan PMT [3].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengendalikan TRV. Penelitian [7] menggunakan metode *double break* pada PMT yang berhasil menurunkan waktu *arcing* dari 6,6 ms menjadi 3,4 ms serta menggunakan *grading capacitor* yang mampu menurunkan ketidakseimbangan distribusi tegangan dari 11% menjadi 3%. Selain itu, *grading capacitor* juga digunakan pada penelitian [7] untuk menurunkan RRRV. Pemasangan *surge arrester* pada penelitian [8] dan [9] juga digunakan untuk menyerap energi berlebih dan menyalurkannya ke tanah saat pemutusan PMT, sehingga TRV dapat ditekan.

Dampak TRV pada PMT dapat berakibat sangat fatal. Salah satu faktor yang memengaruhi besarnya TRV adalah beban pada saluran yang terhubung langsung dengan PMT. Dengan beban yang terus meningkat di GITET 500 kV *New* Ujung

Berung, risiko kegagalan operasi PMT akibat TRV juga semakin besar. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk meminimalkan potensi kerusakan atau kegagalan operasi PMT akibat TRV. Salah satu upaya tersebut adalah melalui simulasi penggunaan *grading capacitor*, *surge arrester*, atau kombinasi keduanya sebagai metode peredaman TRV.

Simulasi dan analisis terhadap penggunaan metode peredaman ini penting dilakukan untuk mengetahui mana yang paling efektif dalam menurunkan nilai puncak TRV maupun laju kenaikannya (RRRV). Selain itu, kondisi isolasi PMT juga harus dipastikan telah memenuhi standar yang berlaku. Hasil simulasi TRV yang diperoleh akan dibandingkan dengan kemampuan PMT dalam memadamkan busur api serta disesuaikan dengan standar IEEE C37.06. Oleh karena itu, penelitian ini akan melakukan simulasi dan analisis terhadap penggunaan *grading capacitor*, *surge arrester*, serta kombinasi keduanya guna mengevaluasi efektivitasnya dalam meredam TRV dan RRRV pada PMT di GITET 500 kV New Ujung Berung.

1.2. Kajian Penelitian

Dalam menyusun penelitian ini, literatur yang relevan sebelumnya telah dikaji untuk meningkatkan pemahaman dan mengidentifikasi celah penelitian yang dapat dikembangkan lebih lanjut. Referensi utama yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 1.1.

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI

Tabel 1.1. Rujukan utama.

No.	Judul	Peneliti	Tahun
1.	*Effect of Arcing Time on Voltage Distribution of Double-Break Vacuum Circuit Breaker During the Transient Recovery Voltage Rising Phase.*	Hao Zhang, Minfau Liao, Yifan Fu, dkk.	2021
2.	*Effect of Circuit Breaker Arc on Faulted Inductive and Capacitive Circuit on a Transmission Line.*	P.I. Obi, E.A. Amako, dan C.S. Ezeonye	2021

No.	Judul	Peneliti	Tahun
3.	*A Method for Determining SF6 Circuit Breaker Failure Rate Due to Transient Recovery Voltage.*	Reza Ghanizadeh, Azadrou.	2022
4.	*Transient Recovery Voltage Considerations when Switching a Large Captive Load with a Medium Voltage Circuit Breaker.*	Hamad Alsharhan, Basel Ishwait	2022
5.	*Impact of Grading Capacitor on Transient Recovery Voltage Due to Shunt Reactor De-Energization for Different Values of Current Chopping.*	Mazyed A. Al-Talk, Mohd Fadzil Ain, dkk.	2024

Penelitian [8] membahas pengaruh penggunaan *double-breaker* terhadap waktu *arcing* dan distribusi tegangan pada *vacuum circuit breaker* (VCB) selama fase peningkatan TRV. Fokus utama penelitian tersebut adalah pada penyeimbangan distribusi tegangan saat *arcing* dan upaya memperlambat laju kenaikan TRV (RRRV) dengan menggunakan *grading capacitor*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengurangan waktu *arcing* dapat meningkatkan keseimbangan distribusi tegangan selama fase peningkatan TRV.

Penelitian [12] mengkaji efek dari rangkaian induktif dan kapasitif yang mengalami gangguan pada saluran transmisi terhadap *arcing* pada PMT. Model *arcing* Mayr digunakan, dan simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB serta PSCAD/EMTDC untuk menganalisis parameter seperti tegangan sistem, arus, tegangan busur, arus busur, dan TRV selama kondisi gangguan. Gangguan yang dianalisis mencakup arus induktif kecil, gangguan terminal, arus kapasitif, dan gangguan saluran pendek. Hasilnya menunjukkan bahwa TRV dapat mencapai puncak yang sangat tinggi, dan hal ini menekankan pentingnya karakteristik parameter LC dalam menentukan osilasi TRV.

Penelitian [13] mengkaji metode untuk menentukan tingkat kegagalan PMT berbasis SF_6 akibat TRV saat pemutusan arus hubung singkat. Simulasi kondisi transien dilakukan menggunakan perangkat lunak EMTP/ATP untuk menghitung

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI
BANDUNG

muatan listrik yang dilepaskan akibat *arcing*. Pendekatan statistik digunakan untuk mengidentifikasi lokasi hubung singkat yang seringkali tidak diketahui, dengan studi kasus di Gardu Induk 110 kV Tatev, Iran. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pengaruh pemutusan arus hubung singkat terhadap potensi kegagalan PMT.

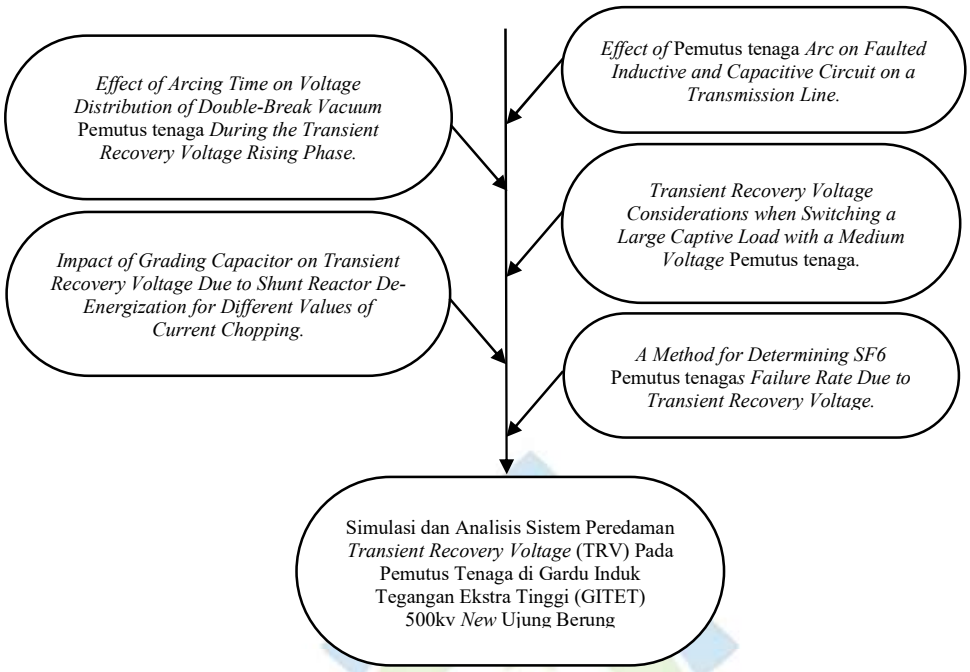
Penelitian [10] juga mengkaji kegagalan VCB di gardu listrik industri 34,5 kV akibat TRV yang melebihi kemampuan tahan tegangan pemutus. Studi ini melaporkan insiden *flashover* yang terjadi saat penyalaan langsung motor sinkron, yang menyebabkan kegagalan VCB. Melalui simulasi, TRV dianalisis dengan mempertimbangkan efek gabungan arus masuk dari transformator *captive* dan motor sinkron. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *metal oxide varistor* (MOV) arrester merupakan solusi efektif untuk mengurangi stres TRV dan mencegah kegagalan lebih lanjut.

Penelitian [8] dan [12] menunjukkan bahwa kegagalan PMT akibat TRV dapat terjadi pada berbagai level tegangan sistem tenaga, mulai dari gardu induk 110 kV hingga gardu industri. Oleh karena itu, tidak dapat diabaikan kemungkinan terjadinya kegagalan serupa pada sistem 500 kV, termasuk di GITET 500 kV *New* Ujung Berung. Hal ini memperkuat perlunya penelitian lanjutan terkait TRV pada PMT di GITET 500 kV *New* Ujung Berung untuk memastikan kontinuitas dan keandalan penyaluran energi listriknya.

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI
BANDUNG

Penelitian [8] secara khusus membahas dampak penggunaan *grading capacitor* terhadap TRV selama proses pemutusan *shunt reactor* pada sistem tegangan tinggi. Simulasi berbasis ATPDraw digunakan untuk mengevaluasi pengaruh *grading capacitor* serta modifikasi rangkaian terhadap penurunan RRRV dan pencegahan terjadinya *restrike* tegangan pada PMT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *grading capacitor* dapat memperlambat laju kenaikan TRV (RRRV), sehingga berkontribusi terhadap peningkatan keandalan operasi PMT.

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan mengenai simulasi dan analisis sistem peredaman TRV pada PMT di GITET 500kV, Gambar 1.1. merupakan hubungan antara penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan oleh penulis.



Gambar 1.1. Hubungan penelitian.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan yang telah diuraikan, penulis merumuskan beberapa pertanyaan utama dalam penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik TRV yang terjadi pada PMT saluran Bandung Selatan di GITET 500kV *New* Ujung Berung?
2. Bagaimana efektifitas simulasi penggunaan *grading capacitor, surge arrester,* dan kombinasi keduanya dalam meredam TRV pada PMT saluran Bandung Selatan di GITET 500kV *New* Ujung Berung?

1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dirumuskan, penelitian ini memiliki tujuan serta diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1.4.1. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam pelaksanaan penelitian ini berfokus pada:

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN GUNUNG DJATI BANDUNG

1. Mengetahui karakteristik TRV yang terjadi pada PMT saluran Bandung Selatan di GITET 500kV *New* Ujung Berung.
2. Mengetahui efektifitas simulasi penggunaan *grading capacitor*, *surge arrester*, dan kombinasi keduanya dalam meredam TRV pada PMT saluran Bandung Selatan di GITET 500kV *New* Ujung Berung.

1.4.2. Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini diharapkan dapat memperoleh beberapa manfaat berupa:

1. Manfaat Akademis

   Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pemahaman yang lebih dalam mengenai TRV dalam sistem bertegangan tinggi, khususnya pada PMT. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat menjadi referensi berupa metode dan teknik analisis serta simulasi untuk meminimalisir besarnya TRV bagi mahasiswa, akademisi, dan peneliti lain yang mendalami bidang proteksi sistem tenaga listrik, khususnya terkait TRV pada PMT.
2. Manfaat Praktis

   Penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan teknis bagi teknisi lapangan dalam melakukan evaluasi dan perawatan PMT, sehingga risiko kegagalan akibat TRV dapat diminimalkan. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan prosedur keselamatan yang lebih baik dalam menangani TRV ekstrem, guna mengurangi potensi kecelakaan dan kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik. Dengan adanya panduan teknis dan prosedur keselamatan yang lebih optimal, kontinuitas penyaluran energi listrik dari pembangkit ke konsumen diharapkan dapat lebih terjamin. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi referensi dalam pengembangan teknologi PMT yang lebih andal dan tahan terhadap gangguan di masa depan.

1.5. Batasan Masalah

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

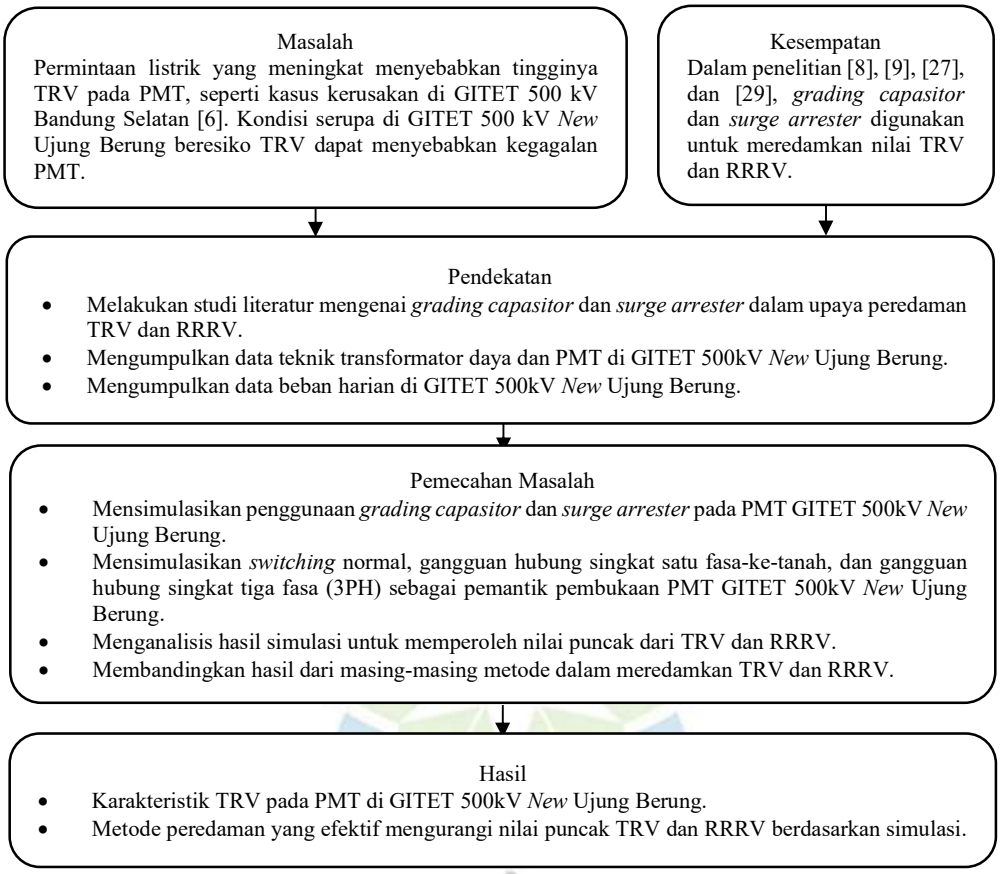
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI
BANDUNG

1. PMT yang menjadi objek penelitian merupakan PMT saluran Bandung Selatan di GITET 500kV *New* Ujung Berung.
2. Data pembebanan harian yang digunakan dalam simulasi adalah data pembebanan harian GITET 500 kV *New* Ujung Berung pada tanggal 6 Maret 2025.
3. Metode peredaman TRV yang digunakan pada penelitian ini adalah penggunaan *grading capacitor, surge arrester,* dan kombinasi keduanya.
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. Lokasi gangguan yang disimulasikan divariasikan menjadi dua, gangguan di *Bus* B, dan gangguan di saluran sejauh 10 km dari gardu induk.

1.6. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir merupakan sebuah alur logis yang menggambarkan korelasi antara variabel-variabel yang akan diteliti berdasarkan teori dan penelitian terdahulu. Kerangka ini membantu penulis dalam menunjukkan bagaimana penelitian akan dilaksanakan untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Dengan demikian, penulis dapat memastikan bahwa penelitian berjalan secara sistematis dan berfokus pada masalah yang telah dirumuskan. Kerangka berpikir ini menjadi landasan penting dalam penulisan karya ilmiah untuk menguraikan gagasan-gagasan penelitian secara terstruktur. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.2, yang menampilkan kerangka berpikir penelitian ini.

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI
BANDUNG



Gambar 1.2. Kerangka berpikir.

1.7. Sistematika Penulisan

Proposal penelitian harus ditulis secara metodis dan disusun dalam enam bab, yang masing-masing bab mempuyai beberapa subbab. Bab-bab tersebut adalah sebagai berikut:

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 system tenaga listrik, *transient recovery voltage* (TRV), dan metode-metode peredamanTRV.

BAB III METODOLOGI DAN JADWAL PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang metode penelitian yang akan digunakan, yaitu berupa pengumpulan data, pengolahan data, dan simulasi sistem transmisi. Serta jadwal penelitian yang berupa tahapan-tahapan sistematis selama penelitian berlangsung di gardu induk tegangan ekstra tinggi (GITET) *New* Ujung Berung

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN SIMULASI

Bab ini berisi data-data yang digunakan untuk menyusun skema simulasi TRV. Data tersebut meliputi *single line diagram* GITET 500 kV *New* Ujung Berung, 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 capacitor* dan *surge arrester*. Variasi skenario simulasi TRV pada PMT juga dijelaskan secara rinci untuk mendukung analisis yang dilakukan.

BAB V HASIL DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan analisis terhadap data hasil simulasi TRV yang telah dilakukan. Analisis dilakukan berdasarkan jenis pemutusan yang disimulasikan, sehingga dapat diketahui metode peredaman yang paling efektif dalam menurunkan nilai TRV pada setiap jenis pemutusan. Selain itu, bab ini juga membahas perbandingan efektivitas antara setiap metode peredaman yang digunakan.

BAB VI PENUTUP

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

UIN
SUNAN GUNUNG DJATI
BANDUNG