

**EVALUASI TEGANGAN TRANSIEN SURJA PETIR SISTEM
TENAGA LISTRIK TERHADAP INTEGRASI BEBAN
INDUSTRI**

*EVALUATION OF TRANSIENT VOLTAGE DUE TO
LIGHTNING SURGE ON ELECTRICAL POWER SYSTEM
WITH INDUSTRIAL LOAD INTEGRATION*

DESI WIDYANINGSIH



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

**EVALUASI TEGANGAN TRANSIEN SURJA PETIR SISTEM
TENAGA LISTRIK TERHADAP INTEGRASI BEBAN
INDUSTRI**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

DESI WIDYANINGSIH

kepada

PROGRAM PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020

TESIS

EVALUASI TEGANGAN TRANSIEN SURJA PETIR SISTEM TENAGA LISTRIK TERHADAP INTEGRASI BEBAN INDUSTRI

Disusun dan diajukan oleh

DESI WIDYANINGSIH

Nomor Pokok P2700216032

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis

Pada tanggal 11 November 2020

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui

Komisi Penasehat,

Ketua



Ir. M. Bachtiar Nappu, ST, MT, M.Phil, Ph.D

NIP 197604062003121002

Anggota



Ir. Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D

NIP 197804242001122001

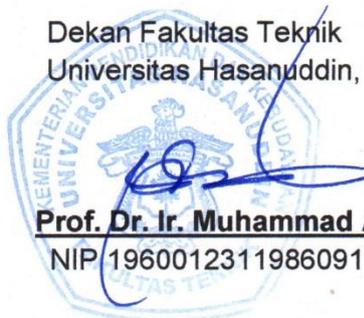
Ketua Program Studi S2
Teknik Elektro,



Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, ST, M. Eng

NIP 197405301999031003

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin,



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT

NIP 1960012311986091001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Desi Widyaningsih

Nomor Mahasiswa : P2700216032

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, November 2020

Yang menyatakan,



Desi Widyaningsih

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim. Alhamdulillah Robbil'Alaamin, puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis yang berjudul "Evaluasi Tegangan Transien Surja Petir Sistem Tenaga Listrik Dengan Integrasi Beban Industri".

Penulisan tesis ini sebagai salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan tesis ini, berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak maka tesis ini dapat diselesaikan. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada Allah SWT yang telah memberikan ridho-Nya sehingga tesis ini dapat terselesaikan. Kedua orang tua saya, Bapak Bambang Suwardi, BA dan Ibu Bunga S,ST. yang senantiasa mendoakan, mengingatkan dan memberikan semangat. Terima kasih kepada pembimbing tesis, Bapak Ir. Muhammad Bachtiar Nappu, ST, MT, M.Phil, Ph.D dan Ibu Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D yang telah membimbing, mengarahkan, serta memberi masukan yang membangun untuk penyusunan tesis ini. Adik-adik saya, Ainun Jariah Safitri dan Tri Yoga Sujatmiko yang senantiasa memberi semangat. Kepada dosen-dosen Pascasarjana Teknik Energi yang telah memberikan banyak ilmu dan

pengalaman selama proses perkuliahan dan pengerjaan tesis ini. Kepada teman-teman Pascasarjana Teknik Energi angkatan 2016 atas dukungan, kerjasamanya. Terima kasih juga penulis ucapkan kepada saudara Muhammad Galvanir Noor, ST. MT., Fauziah, ST, MT, dan Mila Karmila, S.Si, MSi yang senantiasa memberikan support dan bantuannya.

Demikian kata pengantar ini. Mohon maaf untuk pihak-pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya. Sekian dan terima kasih.

Makassar, November 2020

Penulis

ABSTRAK

DESI WIDYANINGSIH, P2700216032, Evaluasi Tegangan Transien Akibat Surja Petir Sistem Tenaga Listrik Terhadap Integrasi Beban Industri (dibimbing oleh Ir. M. Bachtiar Nappu ST, MT, M.Phil, Ph.D dan Ardiaty Arief ST, MTM, Ph.D).

Surja petir merupakan salah satu penyebab utama gangguan pada sistem tenaga listrik yang dapat mengakibatkan kondisi berbahaya karena tingginya arus dan tegangan yang dapat merusak peralatan listrik. Penelitian ini akan mensimulasikan sambaran petir dengan memodelkan dan menganalisis fluktuasi selama terjadi gangguan. Analisis dilakukan dengan menggunakan program *ATPDraw* dengan membandingkan model sistem proteksi konvensional dengan beberapa pemodelan proteksi yang diusulkan, yaitu pemodelan IEEE, Fernandez-Diaz dan Picienti-Giannettoni pada line transmisi Sengkang khususnya LNG Sengkang yang diasumsikan sebagai beban industri. Adapun hasil yang didapatkan bahwa dengan menggunakan 3 jenis pemodelan yang diusulkan dapat meredam tegangan lebih akibat surja petir mencapai 50% dibandingkan dengan menggunakan sistem proteksi konvensional. Penggunaan pemodelan Picienti-Giannettoni memiliki performa lebih baik dibanding pemodelan lainnya karena dapat meredam tegangan transien lebih besar dibandingkan dengan IEEE dan Fernandez-Diaz, serta dapat membuat sistem kembali pada nominal tegangan 150kV.

Kata Kunci: Surja petir; Arrester; Pemodelan IEEE; Pemodelan Fernandez-Diaz; Pemodelan Picienti-Giannettoni; *ATPDraw*.

ABSTRACT

DESI WIDYANINGSIH, P2700216032, Evaluation of Transient Voltage Due to Lightning Surge on Electrical Power Systems with Industrial Load Integration (supervised by Ir. M. Bachtiar Nappu ST, MT, M.Phil, Ph.D and Ardiaty Arief ST, MTM, Ph.D).

Lightning surge are one of the main causes of disruption to electrical power systems which can result in dangerous conditions due to high currents and voltages that can damage electrical equipment. This study will simulate a lightning strike by modeling and analyzing fluctuations during a disturbance. The analysis was carried out using the ATPDraw program by comparing the conventional protection system model with several proposed protection models, namely the IEEE, Fernandez-Diaz and Picenti-Giannettonni models on the Sengkang transmission line, especially Sengkang LNG which is assumed to be an industrial load. The results obtained are that by using the 3 types of modeling proposed can reduce the overvoltage due to the surge connection by up to 50% compared to using a conventional protection system. The use of the Picenti-Giannettonni model has better performance than other models because it can reduce transient voltages greater than IEEE and Fernandez-Diaz, and can make the system return to a nominal voltage of 150kV.

Keywords: Lightning Surge; Arrester; IEEE modeling; Fernandez-Diaz modeling; Picenti-Giannettonni Modeling; ATPDraw.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUNG DEPAN	i
HALAMAN PENGANTAR	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK DALAM BAHASA INDONESIA	vii
ABSTRAK DALAM BAHASA INGGRIS	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.2 Sistem transmisi	11
2.3 Konstruksi saluran transmisi	11
2.4 Arrester	20
2.5 Impedansi Saluran	27
2.6 Pemodelan arrester yang diusulkan	29
2.7 Validasi Model Arrester	32
2.8 Gangguan Surja petir	40
2.9 Alternative Transient Program (ATPDraw)	45

2.10	Kerangka Pikir.....	50
BAB III	METODE PENELITIAN.....	51
3.1	Rancangan Penelitian.....	51
3.2	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	51
3.3	Metode Pengumpulan Data	52
3.3.1	Studi Literatur.....	52
3.3.2	Pengumpulan dan Pengolahan Data.....	52
3.3.3	Analisa Hasil.....	53
3.3.4	Penarikan Kesimpulan	53
3.4	Instrumen Penelitian.....	53
3.5	Diagram Alir Penelitian.....	53
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1	Hasil Simulasi.....	55
4.2	Simulasi Sistem Tenaga Listrik Menggunakan <i>Software</i> ATPDraw	57
4.2.1.	Simulasi normal tegangan sebelum terjadi sambaran.....	57
4.2.2.	Simulasi tanpa menggunakan proteksi arrester	58
4.2.3.	Simulasi dengan menggunakan sistem proteksi konvensional.....	61
4.2.4	Simulasi sistem dengan menggunakan pemodelan Picenti	66
4.2.5	Simulasi sistem dengan menggunakan pemodelan Fernandez-Diaz	69
4.2.6	Validasi Hasil Simulasi.....	73
4.3	Pembahasan	78
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	83
5.1	Kesimpulan.....	83
5.2	Saran.....	85
	DAFTAR PUSTAKA.....	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Sistem Tenaga Listrik.....	11
Gambar 2. Tiang Transmisi	12
Gambar 3. Konstruksi untuk Saluran Udara Tegangan Tinggi	14
Gambar 4. Isolator Piring	15
Gambar 5. Isolator Tonggak Saluran Horizontal.....	15
Gambar 6. Isolator Tonggak Saluran Vertical	16
Gambar 7. Struktur umum varistor ZnO [19].....	19
Gambar 8. <i>Arrester</i> jenis ekspulsi.....	21
Gambar 9. <i>Arrester</i> Katup Jenis Gardu.....	23
Gambar 10. <i>Arrester</i> Katup jenis Saluran	23
Gambar 11. <i>Arrester</i> katup jenis distribusi untuk mesin-mesin.....	24
Gambar 12. Profil Resistivitas Dalam Model Dinamis.....	25
Gambar 13. Model Sederhana Untuk Elektroda Batang Tunggal Yang Tertanam Ditanah.....	26
Gambar 14. Skema Diagram Impedansi.....	28
Gambar 15. Skema Diagram Impedansi Urutan Nol.....	28
Gambar 16. Model Picenti-Gianettoni [23].....	29
Gambar 17. Model Fernandez-Diaz [8].....	31
Gambar 18. Karakteristik V-I nonlinier A0 dan A1[26].....	33
Gambar 19. Model fisikal.....	34
Gambar 20. Model IEEE [22].....	35
Gambar 21. Rangkaian Uji Simulasi.....	36
Gambar22. Relatif error pada tegangan sisa dengan elemen induktif yang ditentukan dalam kaitannya dengan dimensi fisik perangkat.	37
Gambar 23. Kesalahan relatif pada tegangan sisa dengan elemen induktif yang didefinisikan dalam kaitannya dengan kinerja yang diukur.....	38
Gambar 24. Kesalahan relatif pada tegangan sisa diperoleh dari model umum pada percobaan pertama untuk beberapa arester yang dibuat dari Siemens dan GEC Alsthom	38
Gambar 25. Bentuk gelombang surja petir	43
Gambar 26. Model Probe Tegangan	46
Gambar 27. Model Probe Arus.....	46
Gambar 28. Model splitter dan Model splitter.....	46
Gambar 29. Model Resistor	47
Gambar 30. Model Resistor	47
Gambar 31. Model Resistor	47

Gambar 32. Model LLC (panjang span).....	48
Gambar 33. Model Trafo	48
Gambar 34. Model Arrester	48
Gambar 35. Petir tipe Heidler	49
Gambar 36. Diagram Alir Penelitian	54
Gambar 37. Model Arus Surja petir Tipe <i>Heidler</i> [16].....	55
Gambar 38. Sistem dalam kondisi normal.....	57
Gambar 39. Sistem tanpa menggunakan proteksi arrester.....	58
Gambar40. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa R tanpa menggunakan proteksi arrester.....	58
Gambar 41. Tegangan puncak pada fasa R tanpa menggunakan arrester	59
Gambar42. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa S tanpa menggunakan proteksi arrester.....	59
Gambar 43. Tegangan puncak pada fasa S tanpa menggunakan arrester	60
Gambar44. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa T tanpa menggunakan proteksi arrester.....	60
Gambar 45. Tegangan puncak pada fasa T tanpa menggunakan arrester	61
Gambar 46. Hasil simulasi dengan menggunakan sistem proteksi konvensional	62
Gambar 47. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa R menggunakan proteksi arrester konvensional.....	62
Gambar 48. Tegangan puncak pada fasa R menggunakan arrester konvensional	63
Gambar 49. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa S menggunakan proteksi arrester konvensional.....	64
Gambar50. Tegangan puncak fasa S menggunakan proteksi arrester konvensional	64
Gambar 51. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa T menggunakan proteksi arrester konvensional.....	65
Gambar52. Tegangan puncak fasa T menggunakan proteksi arrester konvensional	65
Gambar 53. Hasil simulasi dengan menggunakan pemodelan picenti	66
Gambar 54. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa R menggunakan pemodelan picenti	66
Gambar 55. Tegangan puncak fasa R menggunakan pemodelan picenti	67
Gambar 56. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa S menggunakan pemodelan picenti	67
Gambar 57. Tegangan puncak fasa S menggunakan pemodelan picenti.....	68
Gambar 58. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa T menggunakan pemodelan picenti	68
Gambar 59. Tegangan puncak fasa T menggunakan pemodelan picenti.....	69
Gambar 60. Hasil simulasi dengan menggunakan pemodelan Fernandez-Diaz .70	

Gambar 61. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa R menggunakan pemodelan Fernandez-Diaz.....	70
Gambar 62. Tegangan puncak fasa R menggunakan pemodelan Fernandez-Diaz	70
Gambar 63. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa S menggunakan pemodelan Fernandez-Diaz.....	71
Gambar 64. Tegangan puncak fasa S menggunakan pemodelan Fernandez-Diaz	71
Gambar 65. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa T menggunakan pemodelan Fernandez-Diaz.....	72
Gambar 66. Tegangan puncak fasa T menggunakan pemodelan Fernandez-Diaz	72
Gambar 67. Hasil simulasi dengan menggunakan pemodelan IEEE	74
Gambar 68. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa R menggunakan proteksi arrester IEEE	74
Gambar 69. Tegangan puncak fasa R menggunakan pemodelan IEEE	75
Gambar 70. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa R menggunakan pemodelan IEEE	75
Gambar 71. Tegangan puncak fasa R menggunakan pemodelan IEEE	76
Gambar 72. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa S menggunakan pemodelan IEEE	76
Gambar 73. Tegangan puncak fasa S menggunakan pemodelan IEEE	77
Gambar 74. Hasil simulasi efek tegangan transient pada fasa T menggunakan pemodelan IEEE	77
Gambar 75. Tegangan puncak fasa T menggunakan pemodelan IEEE	78

DAFTAR TABEL

Tabel 1. <i>State of The Art</i> Penelitian	7
Tabel 4. Karakteristik A_0 dan A_1 model Picenti [23].....	30
Tabel 3. Karakteristik V-I untuk A_0 dan A_1	34
Tabel 5. Data teknis arester yang dipertimbangkan	39
Tabel 6. Data Manufaktur.....	39
Tabel 7. Persen error residu tegangan dari pelepasan arus berbeda berdasarkan nilai yang tercatat pada Tabel 2	40
Tabel 8. Relasi empiris antara kerapatan surja petir dan hari guruh tahunan [32]	44
Tabel 9. Hasil Simulasi ATPDraw	79

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Liquefied Natural Gas (LNG) merupakan gas alam yang telah diproses untuk menghilangkan ketidakmurnian dan hidrokarbon berat yang kemudian dikondensasi menjadi cairan pada tekanan atmosfer dengan mendinginkannya pada suhu -160°C . Untuk memproduksi LNG, terdapat serangkaian proses yang harus dilakukan. Proses yang pertama adalah menghilangkan CO_2 yang ada pada gas alam, selanjutnya *dehydration* atau penghilangan air dari gas alam dan penghilangan logam berat, seperti merkuri pada gas alam tersebut. Proses selanjutnya adalah *fractionation* atau pemecahan senyawa pada gas alam, dimana untuk LNG hanya senyawa metana yang dibutuhkan. Setelah itu, proses pendinginan untuk mengubah gas menjadi cair, lalu disimpan pada *storage tank* (tangki penyimpanan) dan kemudian siap untuk dipasarkan.

Proses produksi LNG tersebut menggunakan mesin-mesin listrik seperti motor-motor listrik berdaya besar dan mesin pendingin yang harus mampu mendinginkan hingga suhu -160°C untuk mengubah gas menjadi cair. Selain mesin-mesin listrik, perusahaan juga memerlukan penerangan pada pabriknya, sehingga industri yang bergerak di bidang LNG ini membutuhkan daya listrik yang cukup besar untuk beroperasi.

Pada saat ini kebutuhan energi listrik semakin meningkat sejalan dengan berkembangnya teknologi. Seiring dengan perkembangan teknologi yang pesat ini harus diikuti dengan perbaikan mutu energi listrik yang dihasilkan, yaitu harus memiliki kualitas dan keandalan yang tinggi. PT. PLN (Persero) merupakan perusahaan listrik negara yang merencanakan, merancang, mengoperasikan, dan melakukan perawatan untuk apa saja obstruksi pada jaringan tegangan tinggi di Indonesia [1]. Perusahaan ini menjamin pengoperasian sistem dan penyediaan kualitas terbaik kepada konsumen [2].

Indonesia merupakan daerah yang terletak di garis Katulistiwa dengan iklim tropis dan kelembaban yang tinggi, sehingga menyebabkan potensi surja petir di Indonesia jauh lebih besar dibandingkan dengan negara lainnya. Surja petir merupakan salah satu penyebab utama kegagalan sistem transmisi dan distribusi[3-9]. Secara langsung maupun tidak langsung, surja petir dapat menyebabkan kerusakan terhadap sistem dan peralatan listrik yang dapat berdampak terhadap kualitas dan keandalan penyaluran sistem tenaga listrik [10, 11].

Terdapat dua macam surja petir, yaitu surja petir langsung (*direct stroke*) dan surja petir tidak langsung (*indirect stroke*). Surja petir langsung terjadi apabila surja petir menyambar langsung kawat fasa atau kawat pelindungnya. Sedangkan surja petir tidak langsung terjadi apabila surja petir menyambar objek di dekat saluran. Untuk meningkatkan kinerja proteksi surja petir dan mengurangi jumlah

kegagalan dalam jalur transmisi dan distribusi, salah satu yang paling banyak metode umum dan efektif adalah pemasangan *surge arrester*[12].

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk memenuhi kebutuhan listrik yang cukup besar dalam proses produksi LNG adalah dengan pembangunan pembangkit tenaga listrik baru. Namun, karena mempertimbangkan waktu dalam perancangan dan studi yang cukup lama serta diperlukan biaya investasi yang cukup besar. Maka hal lain yang dapat dilakukan untuk memenuhi kebutuhan tersebut yaitu dengan membangun gardu induk. Dikarenakan LNG dianggap sebagai suatu beban industri yang besar. Dimana pembangunan gardu induk dinilai lebih efisien karena berfungsi sebagai penghubung dengan sistem yang telah ada.

Dengan membangun gardu induk 150 kV maka dibutuhkan suplai tenaga listrik yang cukup besar yang tentunya akan ada dampak signifikan yang disebabkan oleh integrasi gardu induk 150 kV terhadap sistem. Oleh karena itu, untuk melihat kinerja beberapa kondisi dengan beberapa jenis pemodelan arrester terhadap sambaran surja petir terhadap rencana terintegrasinya LNG yang diasumsikan sebagai beban besar atau beban industri, perlu dilakukan analisis tegangan transien terhadap sistem kelistrikan Sulbagsel.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana menganalisis respon kondisi tegangan transien transient pada sistem kelistrikan Sulbagsel dengan terintegrasinya Sengkang LNG *Production Plant and Export Terminal* sebagai beban industri tanpa dan dengan menggunakan beberapa jenis pemodelan proteksi terhadap gangguan surja petir.
2. Bagaimana menentukan pemodelan arrester yang baik terhadap kondisi gangguan tegangan transien pada line transmisi Sengkang.

1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian pada tesis ini adalah:

1. Menganalisis respon kondisi tegangan transien pada sistem kelistrikan Sulbagsel dengan terintegrasinya Sengkang LNG *Production Plant and Export Terminal* sebagai beban industri baik untuk kondisi tanpa dan dengan menggunakan berbagai jenis pemodelan sistem proteksi terhadap gangguan surja petir.
2. Menentukan pemodelan jenis arrester yang baik terhadap kondisi tegangan transien pada line transmisi Sengkang.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Objek penelitian adalah sistem kelistrikan Sulbagsel dengan integrasi Sengkang LNG *Production Plant and Export Terminal* sebagai beban industri.
2. Tegangan transien yang menjadi objek penelitian ini adalah akibat tegangan transien yang terjadi akibat surja petir.
3. Surja petir yang terjadi diasumsikan langsung mengalir ke *arrester* pada Gardu Induk.
4. Gangguan surja petir yang disimulasikan menggunakan type Heidler yang diasumsikan sebagai tegangan lebih atau induksi.
5. Untuk sistem proteksi digunakan berbagai jenis pemodelan *arrester*.
6. Model dan jarak antara gangguan diasumsikan.
7. Simulasi sistem menggunakan *software ATPDraw*.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan tesis ini terdiri dari beberapa bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini merupakan pengantar penelitian, Pada bab ini terdiri atas latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan dan pentingnya penelitian, ruang lingkup, definisi atau glosarium, dan di akhiri dengan sistematika/ organisasi tesis

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisi teori dasar diuraikan teori-teori yang berkaitan dengan masalah yang diteliti pada tesis ini. Serta uraian sistematis tentang teori, pemikiran dan hasil penelitian terdahulu yang ada hubungannya dengan penelitian yang dilakukan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini membahas mengenai waktu dan tempat penelitian, teknik pengumpulan data, serta langkah-langkah penelitian yang dilakukan.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai analisis hasil dan temuan yang diperoleh ketika melakukan pengujian dan percobaan dalam penelitian ini.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi simpulan dan saran hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran – saran pembangunan selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Pada tabel 1. *State of Art* Penelitian yang menunjukkan bahwa penelitian mengenai analisis tegangan transien terhadap surja petir perlu dilakukan untuk mengetahui akibatnya pada saluran transmisi, mengetahui kinerja peralatan sistem proteksi sistem transmisi.

Tabel 1. *State of The Art* Penelitian

Penelitian	Peneliti	Judul Penelitian	Tahun	Tujuan
Telah dilakukan	Abdul Syakur Agung Warsito Liliyana Nilawati	KinerjaArrester Akibat Induksi Sambaran Petir pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV	2009	Melakukan simulasi gangguan surja petir pada setiap fasa untuk melihat kinerja arrester
Telah dilakukan	Rizky Fajar A.	Studi Performansi Perlindungan Sambaran Petir Pada Saluran Udara tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Untuk Beragam Karakteristik Sambaran	2011	Menguji karakteristik surja petir dengan nilai IKL dan jarak sambaran minimum dengan metode Monte Carlo
Telah dilakukan	Mochammad Apriyadi	Analisis Tegangan Impuls dan Arus transien Jaringan Transmisi 150kv Sinjai – Bone Akibat Sambaran Petir Menggunakan software ATPDraw	2014	Membuat pemodelan surja petir pada saluran transmisi 150kV dengan menggunakan simulasi ATPDraw. Menganalisis besar tegangan impuls transien pada sistem jaringan transmisi 150 kV tanpa dan dengan menggunakan arrester
Telah dilakukan	Muh Galvanir Noor	Desain Kkombinasi Sistem Proteksi PLTB (simulasi menggunakan ATPDraw)	2018	Membuat pemodelan sistem proteksi pembangkit tenaga bayu dengan memadukan cincin ferit, Voltage Surge Protector

				(VSP) dengan model pincetti
Telah dilakukan	Bayu Tri Utomo	Penempatan <i>Transmission Line Arrester</i> pada Tower Krisis Berbasis <i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>	2019	Menghitung nilai kerapatan surja petir pada tower. Kemudian menggunakan ANFIS untuk memperoleh nilai kerapatan surja petir tower di jalur transmisi. Tower yang termasuk kategori kritis dan mempunyai tahanan tanah yang tinggi di letakkan di <i>Transmission Lightning</i>
Yang diusulkan	Desi Widyaningsih	Analisis Tegangan Transien Sistem Tenaga Listrik dengan Integrasi Beban Industri	2020	Melakukan analisis terhadap adanya tegangan transien dengan berbagai pemodelan arrester pada sistem kelistrikan Sulserabar terhadap integrasi LNG Sengkang sebagai beban industry

1. Abdul Syakur, Agung Warsito, Liliyana Nilawati.2009. Kinerja Arrester Akibat Induksi Sambaran Petir pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV. Jurnal Teknik ElektroUniversitas Diponegoro.

Review penelitian: Penelitian ini mengkaji tentang dampak terjadinya surja petir pada jaringan 20 kV serta kinerja arrester dalam mengatasi gangguan. Dalam penelitian ini digunakan program EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) dengan studi kasus diambil dari data Penyulang 1 Gardu Induk Mojosongo Boyolali. Dengan mengukur setiap fasanya[13].

2. Rizky Fajar A. 2011. Studi Performansi Perlindungan Sambaran Petir Pada Saluran Udara tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Untuk beragam Karakteristik Sambaran. Proceeding Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS[14].

Review penelitian: Penelitian ini mengkaji tentang uji karakteristik surja petir dengan nilai IKL dan jarak sambaran minimum dengan metode Monte Carlo untuk mengetahui tingkat performansi perlindungan surja petir pada jalur transmisi 150kv[14].

3. Mochammad Apriyadi, 2016. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Analisis tegangan impuls dan arus transien jaringan transmisi 150 kV Sinjai – Bone akibat sambaran petir menggunakan software ATPDRAW.

Review penelitian: penelitian ini membahas sambaran sambaran petir dan kinerja arrester yang di letakkan di antara GI Bone dan GI Sinjai. Dari simulasi tegangan impuls transien yang didapatkan dari hasil perhitungan yaitu sebesar 6,092 MV mendekati dari hasil simulasi *ATPDraw* yaitu 5,593 MV. Dan dilihat dari hasil perhitungan tegangan impuls maka sudah melebihi BIL isolator yaitu 750 kV, hal ini menunjukkan bahwa akan terjadi *flashover*[15].

4. Muh Galvanir Noor, 2018. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Desain kombinasi Sistem Proteksi PLTB (simulasi menggunakan *ATP/Draw*).

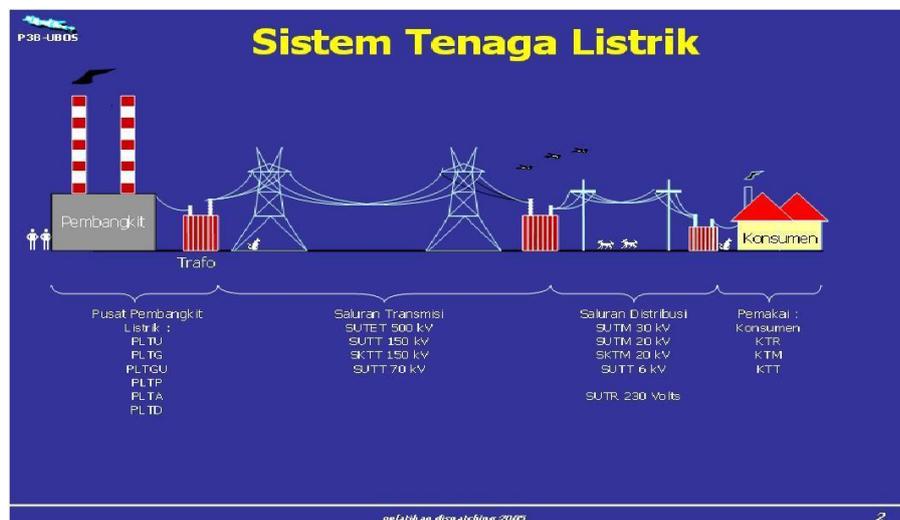
Review Penelitian: Pengembangan sistem proteksi dengan mengandalkan Perpaduan cincin ferrit, VSP (voltage surge protector), SA (Surge Arrester), dan rangkaian modifikasi sistem pentanahan terpisah. Meredam gelombang transien saat terjadi sambaran langsung terhadap sistem distribusi pembangkit angin, serta membuang energi deduskstrif yang dapat memicu timbulnya

arus balik atau *Black Flash Over* (BFO). Hasil simulasi ini dengan metode pentanahan terpisah (Earthing) yang disertai dengan nilai tahanan 5 ohm dengan jarak 50 meter dan 2 ohm pada jarak 3 meter dalam terapan desain kombinasi. Tegangan transien berkurang mencapai 11.7 kV di sistem (ground). VSP (Voltage Surge Protector) membuang tegangan lebih di sistem pentanahan terpisah (Earthing) sebesar 8.9 kV. Dan Hasil simulasi kinerja arrester dengan menggunakan model picentti berdasarkan data produsen yang dibandingkan dengan uji simulasi tercatat memiliki selisi 60 – 100 v yaitu 3100 v pada sisi LV dan 10.60 kV pada sisi MV[16].

5. Bayu Tri Utomo (2019). Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penempatan *transmission line arrester* pada tower kritis berbasis *adaptive neuro-fuzzy inference system*.
Review Penelitian: Penelitian ini mengenai cara mendapatkan menentukan nilai sambaran petir struktur yang akurat menggunakan metode ANFIS. *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) digunakan sebagai sarana untuk dapat mendapatkan nilai sambaran petir struktur pada tower transmisi. Kemudian kita dapat menentukan tower yang termasuk dalam kategori kritis pada saluran transmisi. Hasil pengelompokan tower kritis tadi kemudian di simulasikan ke ATP Draw dengan memasang arrester model IEEE untuk menganalisa nilai tegangan impuls yang terjadi akibat petir di jalur transmisi tersebut[1].

2.2 Sistem transmisi

Saluran Transmisi (*Transmission Line*) merupakan kawat-kawat yang di pasang pada menara atau tiang dan bisa juga melalui kabel yang di pendam di bawah permukaan tanah, saluran transmisi berfungsi menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit, yang umumnya terletak jauh dari pusat beban, ke gardu induk penurun tegangan yang memiliki transformer penurun tegangan dari tegangan transmisi ke tegangan distribusi (menengah). Suatu sistem distribusi menghubungkan semua beban-beban yang terpisah satu dengan yang lain ke saluran transmisi[17].



Gambar 1. Sistem Tenaga Listrik

2.3 Konstruksi saluran transmisi

Komponen-komponen utama dalam penyaluran sistem transmisi tegangan tinggi terdiri dari:

1. Menara atau Tiang Transmisi

Menara atau tiang transmisi adalah suatu bangunan penopang saluran transmisi, yang biasa berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang dan tiang kayu. Tiang-tiang baja, beton, atau kayu biasanya digunakan pada saluran-saluran dengan tegangan kerja relatif rendah (dibawah 70 kV) sedang untuk saluran transmisi tegangan tinggi atau ekstra tinggi digunakan menara baja.

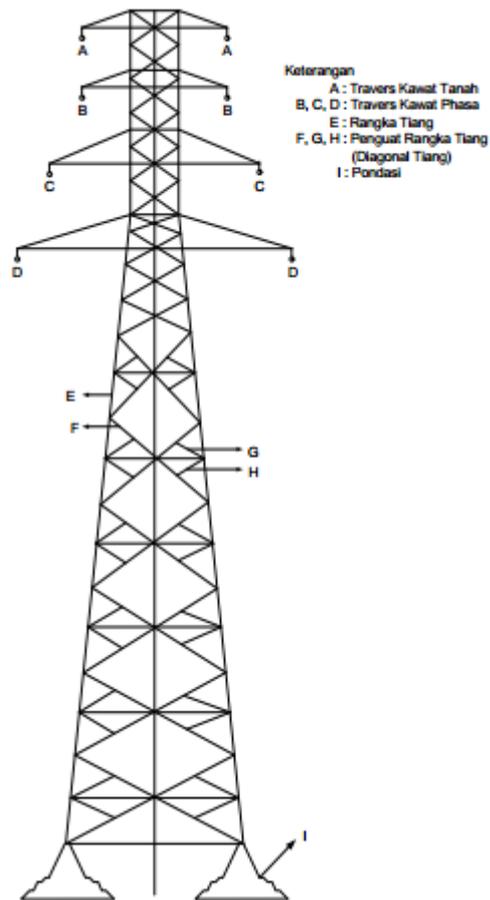
Penyaluran energi listrik melalui saluran transmisi udara umumnya menggunakan sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antar kawat penghantar dengan benda sekelilingnya. Serta untuk menyanggah atau merentangkan kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan. Kawat-kawat penghantar yang dipasang pada suatu konstruksi yang kokoh biasa disebut dengan *tower* [18].



Gambar 2. Tiang Transmisi

Konstruksi tower besi baja merupakan jenis konstruksi saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT) ataupun saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET) yang paling banyak digunakan di jaringan PLN, karena mudah dirakit terutama untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya, harganya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan penggunaan saluran bawah tanah serta pemeliharaannya yang mudah.

Namun demikian perlu pengawasan yang intensif, karena besi-besinya rawan terhadap pencurian. Seperti yang telah terjadi di beberapa daerah di Indonesia, dimana pencurian besi-besi baja pada menara / tower listrik mengakibatkan menara / tower listrik tersebut roboh, dan penyaluran energi listrik ke konsumen pun menjadi terganggu.



Gambar 3. Konstruksi untuk Saluran Udara Tegangan Tinggi

Suatu menara atau tower listrik harus kuat terhadap beban yang bekerja padanya, antara lain yaitu :

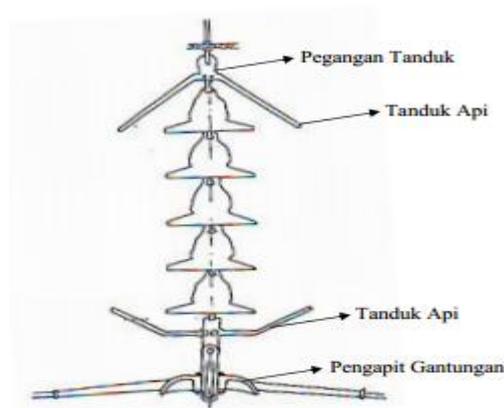
- Gaya berat tower dan kawat penghantar (gaya tekan).
- Gaya tarik akibat rentangan kawat.
- Gaya angin akibat terpaan angin pada kawat maupun badan tower.

2. Isolator

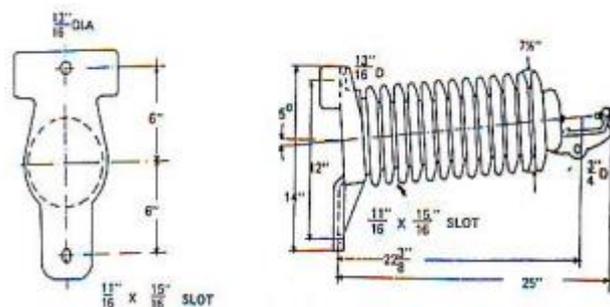
Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi pada umumnya adalah jenis porselin atau gelas yang berfungsi sebagai isolasi tegangan listrik antara kawat penghantar dengan tiang.

Macam-macam isolator yang digunakan pada saluran udara tegangan tinggi adalah sebagai berikut :

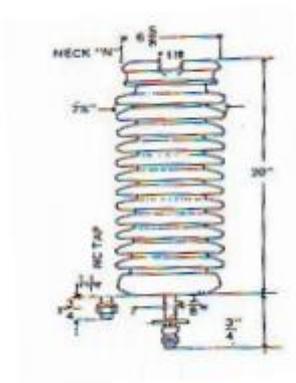
- isolator piring
dipergunakan untuk isolator penegang dan isolator gantung, dimana jumlah piringan isolator disesuaikan dengan tegangan sistem pada saluran udara tegangan tinggi tersebut (Gambar 3)
- isolator tonggak saluran *vertical* (Gambar 4)
- isolator tonggak saluran *horizontal* (Gambar 5)



Gambar 4. Isolator Piring



Gambar 5. Isolator Tonggak Saluran Horizontal



Gambar 6. Isolator Tonggak Saluran Vertical

Menurut penggunaan dan konstruksinya, isolator diklasifikasikan menjadi:

- a. isolator jenis pasak.
- b. isolator jenis pos-saluran.
- c. isolator gantung

Isolator jenis pasak dan isolator jenis pos-saluran digunakan pada saluran transmisi dengan tegangan kerja relatif rendah (kurang dari 22-33 kV), sedangkan isolator gantung dapat digandeng menjadi rentengan/rangkaian isolator yang jumlahnya dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

3. Kawat Penghantar

Kawat penghantar berfungsi untuk mengalirkan arus listrik dari suatu tempat ke tempat yang lain. Jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100 % (CU 100 %), atau aluminium dengan konduktivitas 61 % (AL 61 %), (Tabel 2.1.). Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas

dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya ialah, untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium, dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga. Jenis-jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah:

- a. tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%)
- b. tembaga dengan konduktivitas 97,5% (Cu 97,5%)
- c. aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%)

Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium, karena konduktivitas dan kuat tariknya yang lebih tinggi. Tetapi juga memiliki kelemahan, yaitu untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dan lebih mahal dari aluminium. Oleh karena itu dewasa ini kawat penghantar aluminium telah mulai menggantikan kedudukan kawat penghantar tembaga.

Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium, digunakan campuran aluminium (*aluminium alloy*). Untuk saluran-saluran transmisi *tegangan tinggi*, dimana jarak antara menara/tiang berjauhan, mencapai ratusan meter, maka dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi, untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.

Kawat penghantar aluminium, terdiri dari berbagai jenis, dengan lambang sebagai berikut:

- a. AAC (All-Aluminium Conductor), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- b. AAAC (All-Aluminium-Alloy Conductor), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- c. ACSR (Aluminium Conductor, Steel-Reinforced), yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
- d. ACAR (Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced), yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

4. Kawat tanah

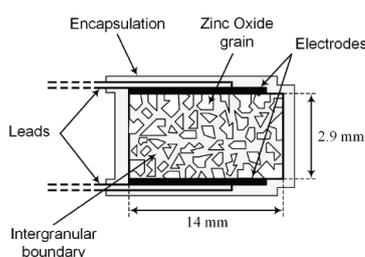
Kawat tanah atau ground wires, juga disebut sebagai kawat pelindung (shield wires) gunanya untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat-kawat fasa terhadap surja petir. Jadi kawat tanah ini dipasang diatas kawat fasa. Sebagai kawat tanah dipakai kawat baja (steel wires).

5. *Metal Oxide Varistor* (MOV)

Metal oxide varistor (MOV) merupakan komponen semikonduktor yang bersifat non-linear, yang nilai resistansinya dikontrol berdasarkan tegangan. MOV dengan bahan dasar *zinc oxide* merupakan jenis yang banyak dipakai sebagai elemen proteksi surja. Saat ini, dengan jumlah semikonduktor daya yang terus berkembang perangkat yang digunakan dalam aplikasi misi kritis, kendala biaya dan persyaratan keandalan

menjadi lebih dan lebih ketat. Dalam banyak aplikasi (misalnya, penggerak pompa, penerangan jalan, peralatan rumah tangga, dll.). Tegangan berlebih dan transien yang dihasilkan oleh surja petir atau kondisi jaringan yang tidak ideal, adalah salah satu penyebab utama kegagalan dalam komponen semikonduktor [19]. Untuk melindungi komponen elektronik daya melindungi peralatan terhadap tegangan dan lonjakan arus, metal oxide varistor (MOV) dihubungkan secara paralel dengan yang diperlukan *sub-assembly*, dan dengan demikian membentuk shunt resistansi rendah selama kondisi tegangan lebih.

Kegagalan ini secara inheren akan mengarah pada keseluruhan peningkatan biaya siklus hidup sistem kelistrikan, karena biaya yang terkait dengan pemeliharaan dan waktu henti. Simbol dan konstruksi dari *metal oxide varistor* ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 7. Struktur umum varistor ZnO [19]

Pada saat tegangan normal resistansi pada MOV cukup besar, dan saat tegangan pada MOV melebihi *minimum clamping voltage*, maka akan terjadi penurunan nilai resistansi yang mengalir. MOV memiliki kelebihan yaitu respon yang cepat saat terjadi surja, dan mampu menyerap energy

dalam jumlah besar. Sedangkan kekurangannya adalah terdapat kebocoran arus saat tegangan normal [20].

Surge arrester meningkatkan keandalan transmisi dan sistem distribusi, tetapi ada juga kemungkinan kerusakan arester, karena magnitudo tinggi dan arus curam transien yang melewatinya dan penyerapan energi masuk arester surja melebihi kemampuan penyerapan mereka [8]. Baru-baru ini statistik tahun menunjukkan bahwa kegagalan arester yang disebabkan oleh surja petir menyumbang 80% dari total jumlah kegagalan [21]. Karena itu, perhitungan teoritis probabilitas kegagalan arester surja adalah signifikan untuk keandalan dan analisis risiko transmisi dan jalur distribusi, yang membutuhkan perhitungan yang akurat penyerapan energi di surja arrester. Pemodelan dan simulasi akurat dari karakter dinamis karakteristiknya sangat penting untuk alokasi keandalan system arrester dan studi koordinasi isolasi [22] [23] [24].

2.4 Arrester

Arrester membentuk jalan yang mudah dilalui oleh arus petir, sehingga tidak timbul tegangan lebih yang tinggi pada peralatan. Jalan pintas itu harus sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran arus daya sistem 50 *Hertz*. Jadi pada kerja normal *arrester* itu berlaku sebagai isolator dan bila timbul surja dia berlaku sebagai konduktor, jadi melewatkan aliran arus yang tinggi, setelah surja hilang *arrester* harus dengan cepat kembali menjadi isolator, sehingga pemutus daya tidak sempat membuka. *Arrester* dapat memutuskan arus susulan tanpa menimbulkan gangguan, *Arrester* terdiri dari dua jenis : (*expulsion type*)

jenis ekspulsi atau tabung pelindung (*protector tube*) dan (*valve type*) jenis katub [22].

- **Arrester Jenis Ekspulsi**

Arrester jenis ekspulsi pada prinsipnya terdiri dari sela percik yang berada dalam tabung serat dan sela percik batang yang berada diluar di udara atau disebut sela seri, terlihat pada Gambar 8.

Tegangan surja yang tinggi sampai pada jepitan arrester kedua sela percik, yang di luar dan yang berada di dalam tabung serat, tembus seketika dan membentuk jalan penghantar dalam bentuk busur api. Jadi *arrester* menjadi konduksi dengan impedansi rendah dan melakukan surja arus dan surja daya sistem bersama – sama. Panas yang timbul karena mengalirnya arus petir menguapkan sedikit bahan dinding tabung serat, sehingga gas yang ditimbulkannya menyembur pada api dan mematakannya pada waktu arus susulan melewati titik nolnya.



Gambar 8. *Arrester* jenis ekspulsi

Arus susulan dalam arrester jenis ini dapat mencapai harga yang tinggi sekali tetapi lamanya tidak lebih dari satu atau dua gelombang dan biasanya kurang dari setengah gelombang. Jadi tidak menimbulkan gangguan. *Arrester* ini banyak juga digunakan pada saluran transmisi untuk membatasi besar surja yang memasuki gardu induk.

- **Arrester jenis katup**

Arrester jenis katup ini terdiri dari sela percik terbagi atau sela seri yang terhubung dengan elemen tahanan yang mempunyai karakteristik tidak *linear*. Tegangan frekuensi dasar tidak dapat menimbulkan tembus pada sela seri. Apabila sela seri tembus saat tibanya suatu surja yang cukup tinggi, alat tersebut menjadi penghantar. Sela seri itu dapat memutuskan arus susulan, dalam hal ini dia dibantu oleh tahanan tak *linear* yang mempunyai karakteristik tahanan kecil untuk arus besar dan tahanan besar untuk arus susulan dari frekuensi dasar [22]. *Arrester* jenis katup ini terbagi atas tiga jenis yaitu :

1. *Arrester* jenis gardu ini adalah jenis yang paling efisien dan juga paling mahal. Perkataan “gardu” di sini berhubungan dengan pemakaiannya secara umum pada gardu induk besar Gambar 9. Umumnya dipakai untuk melindungi alat-alat yang mahal pada rangkaian-rangkaian jika terjadi gangguan

sambaran petir yaitu tegangan impuls mulai dari 2.400 volt sampai 287 kV dengan BIL isolator 750 kV.



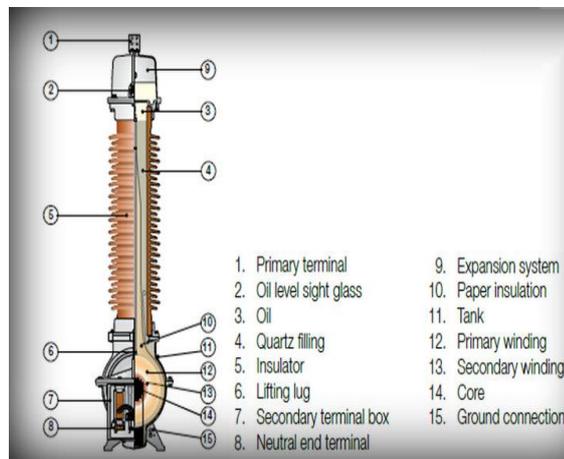
Gambar 9. *Arrester* Katup Jenis Gardu

2. *Arrester* katup jenis saluran ini lebih murah dari arester jenis gardu, *arrester* jenis saluran ini juga dipakai pada gardu induk untuk melindungi peralatan yang kurang penting Gambar 10. *Arrester* jenis saluran ini dipakai pada sistem dengan tegangan yaitu 15 kV sampai 69 kV, jika terjadi sambaran petir pada saluran transmisi BIL isolator 255 kV.



Gambar 10. *Arrester* Katup jenis Saluran

3. *Arrester* katup jenis gardu dan distribusi untuk mesin-mesin, arrester jenis gardu dan distribusi ini khusus untuk melindungi mesin-mesin berputar dan juga untuk melindungi transformator dengan pendingin udara tanpa minyak. *Arrester* jenis ini dipakai pada peralatan dengan tegangan 120 Volt sampai 750 Volt. Gambar 10 menunjukkan arrester katup jenis gardu.



Gambar 11. *Arrester* katup jenis distribusi untuk mesin-mesin

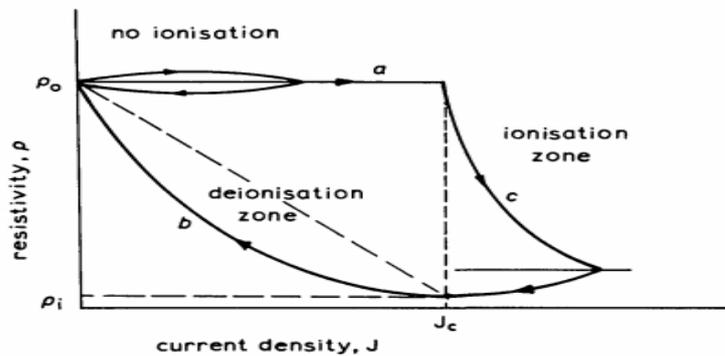
2.5 Karakteristik Transient Terhadap Elemen Elektroda Didalam Tanah

Pada dasarnya tingkat arus balik transient untuk keadaan terlindung atau aman sangat sensitif terhadap resistansi yang dianggap berasal dari menara ke bumi. Hal ini jelas bahwa setiap model yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik lonjakan tanah atau biasa yang disebut ground potential rise (GPR) selalu mereproduksi histeresis yang diamati dalam bentuk domain waktu, serta kerusakan suatu sistem itu terjadi di akibatkan oleh efek ionisasi didalam tanah, untuk menggambarkan proses ionisasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11, dimana suatu batang konduktor yang tertanam didalam tanah

dengan kedalaman tertentu dan dialiri arus dan tegangan, arus tersebut berproses menyebar berdasarkan sifat transient alaminya.

1. Asumsi Dasar Dalam Model Karakteristik Petir Dinamis

Tanah dikategorikan bersifat homogen dan isotropic, yaitu resistivitasnya sama disemua arah, saat arus menumpuk dan menembus kedalam tanah, respon tanah terhadap arus dengan kerapatan yang lebih besar hal ini akan mempengaruhi nilai potensi tanah, dalam penamaannya biasa disebut ionisasi dan deionisasi tanah berikut proses perilaku transient terhadap tanah pada Gambar 12.



Gambar 12. Profil Resistivitas Dalam Model Dinamis

Resistivitas harus memiliki transisi ketepatan waktu dari nilai yang lebih tinggi P_0 harus lebih rendah dari p maka persamaanya diberikan :

$$p = p_0 \exp \frac{-t}{T_1} \quad (1)$$

Dimana T_1 adalah konstanta waktu ionisasi pada saat terjadi penumpukan arus dan t adalah waktu yang diukur saat terjadi ionisasi. Disaat arus surut, resistivitas akan pulih ke nilai P_0 dengan cara eksponensial tergantung waktu maka persamaannya di berikan :

$$1 - p_0 \exp \frac{-t}{T_2} \quad (2)$$

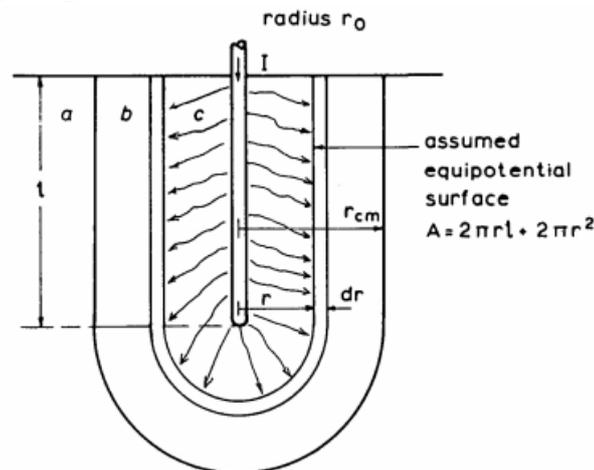
Dimana T_2 adalah konstanta waktu deionisasi dan t adalah waktu yang diukur saat terjadi deionisasi. Maka persamaan terakhir diberikan :

$$1 - \left(\frac{J}{J_c}\right)^B \quad (3)$$

Dimana J adalah kerapatan tanah dan J_c adalah kerapatan arus kritis didalam tanah dan B adalah eksponen yang akan ditentukan.

2. Perhitungan Resistansi Terhadap Elemen Elektroda Tunggal.

Resistansi dari element elektroda tunggal yang tertanam didalam tanah l memiliki radius sebesar r_0 hal ini ditentukan oleh metode potensial rata – rata, untuk mempertimbangkan metode alternatif dimana pola ekuipotensial diasumsikan seperti ditunjukkan gambar 13 luas permukaan ekuipotensial sederhana yang dapat dihitung untuk elemen – elemen yang diasumsikan dr berdasarkan ketebalan elemen seragam elektroda yang memungkinkan mendefinisikan dari suatu daerah densitas arus kritis saat ionisasi berlangsung.



Gambar 13. Model Sederhana Untuk Elektroda Batang Tunggal Yang Tertanam Ditanah

Resistansi dari kulit tanah atau dR maka persamaannya sebagai berikut :

$$dR = \frac{\rho dR}{2\pi(r^2 + r^l)} = \frac{\rho dR}{2\pi l} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+l} \right) \quad (4)$$

Resistansi total dari elektroda batang yang terisolasi diperoleh dengan menjumlahkan semua element tersebut dari permukaan batang hingga tak terbatas maka :

$$R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho}{2\pi l} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+l} \right) dr \quad (5)$$

Sehingga :

$$= \frac{\rho}{2\pi\ell} \left(\ln \frac{r+\ell}{r} \right)_{r_0}^{\infty} \quad (6)$$

$$\text{As } r \rightarrow \infty, \ln \frac{r+\ell}{r} \rightarrow \ln 1 = 0 \quad (7)$$

Jadi :

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \ln \frac{r_0+\ell}{r_0} \quad (8)$$

3. Resistansi Implus Pada Elektroda Batang Tunggal.

Dalam perhitungan mengikuti asumsi model dinamis pada Gambar 2.23, ketika lonjakan arus tinggi disuntikan ketanah, fenomena gangguan terjadi, dan beberapa hubungan dasar dianggap sebagai berikut :

Kerapatan arus,

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (9)$$

Tegangan yang melewati elemen,

$$= \frac{I\rho dr}{2\pi r^2} \quad (10)$$

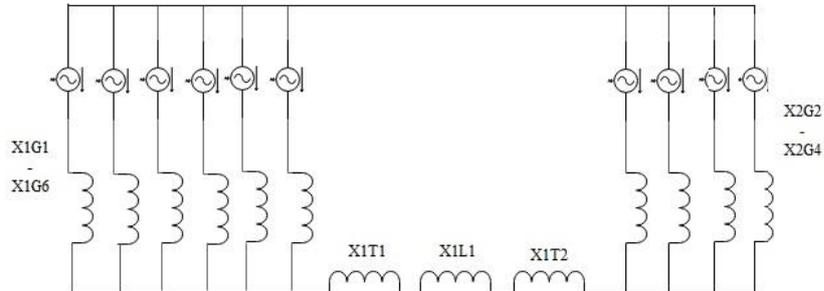
Densitas arus kritis,

$$J_C = \frac{g_c}{\rho_0} \quad (11)$$

2. Impedansi Saluran

Untuk menghitung sifat suatu sistem dalam keadaan berbeban atau pada saat timbulnya suatu hubung-singkat, diagram segaris harus diubah menjadi diagram impedansi (gambar 69) yang menunjukkan rangkaian

setara masing-masing komponen sistem dengan berpedoman pada salah satu sisi yang sama pada transformator.



Gambar 14. Skema Diagram Impedansi

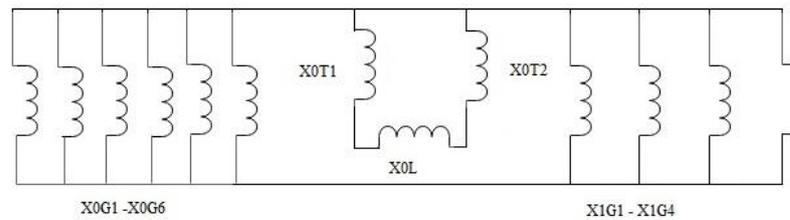
Untuk menghitung nilai impedansi urutan positif maka :

$$Z = (X1G^6 + X1T1 + XL)(X1T2 + X2G^4) \quad (12)$$

$$Z = (0.2^6 + 0.1224 + 2.55) (0.1234 + 0.2^4)$$

$$Z = 0.3340$$

Sedangkan untuk menghitung nilai impedansi urutan nol maka :



Gambar 15. Skema Diagram Impedansi Urutan Nol

$$Z = \frac{(X0T1 + X1G1)(X0T2)}{X0T1 + X0L + X0T2} \quad (13)$$

$$Z = \frac{(13.7 + 0.2)(0.1234)}{13.7 + 0.2 + 0.1234}$$

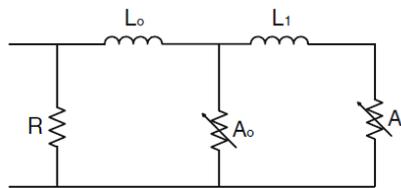
$$Z = 0.0013$$

2.6 Pemodelan arrester yang diusulkan

Selain pemodelan konvensional pada sistem proteksi arrester, pada simulasi juga dilakukan uji coba menggunakan beberapa jenis pemodelan arrester untuk melihat performa dari masing-masing model. Berikut ini merupakan jenis pemodelan yang diusulkan:

1. Model Picenti-Giannettoni

Model ini didasarkan pada model IEEE dengan beberapa perbedaan. Tidak ada kapasitansi dan resistansi R_0 dan R_1 adalah diganti dengan satu resistansi (kira-kira $1 \text{ M}\Omega$) di terminal input, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 16. Model Picenti-Gianettoni [23]

Resistor non-linier berdasarkan kurva [22]. Resistensi R (sekitar $1 \text{ M}\Omega$) diganti antara terminal input, hanya untuk menghindari masalah numerik. Resistensi R_0 menstabilkan osilasi numerik dan resistor nonlinier A_0 dan A_1 dapat diperkirakan dengan menggunakan kurva yang ditunjukkan pada Gambar 8. Induktansi L_0 dan L_1 dihitung menggunakan persamaan [23]:

$$L_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{Vr(1/T2) - Vr(\frac{8}{20})}{Vr(\frac{8}{20})} \cdot Vn \mu H \quad (14)$$

$$L_1 = \frac{1}{12} \cdot \frac{Vr(1/T2) - Vr(\frac{8}{20})}{Vr(\frac{8}{20})} \cdot Vn \mu H \quad (15)$$

dimana

Vn merupakan rating tegangan arrester

$Vr(8/20)$ merupakan residual tegangan untuk 8/20 10kA arus surja petir

$Vr(1/T2)$ merupakan residual tegangan untuk 1/T2 10kA arus surja petir

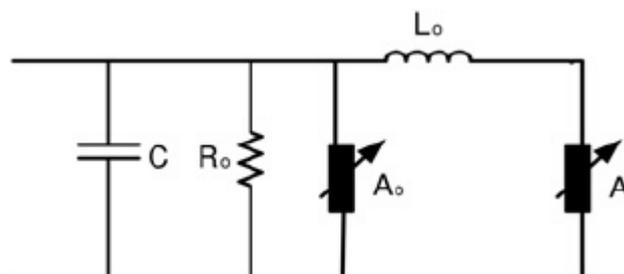
Karakteristik nilai $V - I$ didefinisikan dengan kurva yang ditampilkan pada tabel 4.

Tabel 2. Karakteristik A_0 dan A_1 model Picenti [23]

I [kA]	A_0 [p.u]	A_1 [p.u]
$2 \cdot 10^{-6}$	37.4	28.8
0.1	45	36.4
1	48.6	40
3	51.2	42.6
10	55.2	46.6
20	59	50.4

2. Model Fernandez-Diaz

Model yang diusulkan oleh Fernandez-Diaz [25], ditampilkan pada gambar 11. Pemodelan arrester Fernandez-Diaz dikembangkan berdasarkan model IEEE dan model Picenti, resistor non-linier A0 dan A1 terhubung secara parallel dan dipisahkan oleh L1, sedangkan L0 diabaikan (Gambar 12). Kapasitansi (C) adalah nilai terminal ke terminal kapasitor dan resistor ditambahkan di terminal arrester dan mewakili kapasitansi terminal-ke-terminal dari arrester yang memiliki nilai keseluruhan sebesar $1\text{M}\Omega$. Model ini tidak memerlukan penghitungan berulang karena data yang diperlukan diperoleh dari lembar data produsen. Prosedur untuk menghitung parameter diberikan dalam [10].



Gambar 17. Model Fernandez-Diaz [8]

Karakteristik $V - I$ untuk A0 dan A 1 dihitung menggunakan data pabrikan, mengingat rasio I_0 ke I_1 sama dengan 0,02. Induktansi L_1 diberikan sebagai:

$$L_1 = nL'_1 \quad (16)$$

dimana

n merupakan faktor skala

L'_1 diberikan [25] menghitung persentase kenaikan tegangan residual sebagai

$$\Delta V_{res} (\%) = \frac{Vr\left(\frac{1}{T2}\right) - Vr\left(\frac{8}{20}\right)}{Vr\left(\frac{8}{20}\right)} \cdot 100 \quad (9)$$

dimana

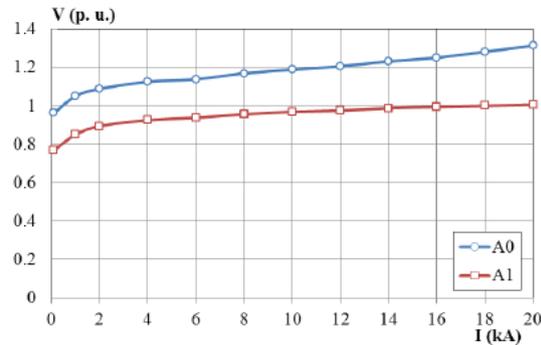
$Vr(8/20)$ merupakan residual tegangan untuk arus surja petir 8/20

$Vr(1/T2)$ merupakan residual tegangan untuk arus surja petir 1/T2 dengan amplitude nominal

2.7 Validasi Model Arrester

The IEEE Working Group 3.4.11 [22] mengusulkan model Gambar.12, termasuk resistansi non-linier A0 dan A1, dipisahkan dengan filter R – L. Untuk lonjakan depan yang lambat, impedansi filter rendah dan resistansi non-linier sejajar. Untuk impedansi filter lonjakan depan menjadi tinggi, dan arus mengalir melalui resistansi non-linier A0. Model ini mencakup resistor non-linier, ditunjukkan oleh A0 dan A1, dipisahkan oleh resistor linier, ditunjuk oleh A0 dan A1, dipisahkan oleh RL low pass

filter [22], di mana parameternya dihitung dari perkiraan ketinggian arester, jumlah kolom MO *disk* dan kurva yang ditampilkan pada Gambar 12.



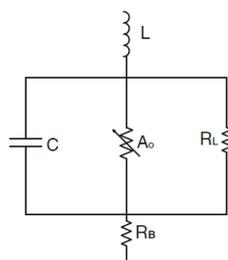
Gambar 18. Karakteristik V-I nonlinier A0 dan A1[26]

Induktansi L1 dan resistansi R1 terdiri dari filter antara dua varistor, karena induktansi L0 terkait dengan medan magnet di sekitar arrester. R0 menstabilkan integrasi numerik dan C mewakili terminal ke-kapasitansi terminal. Untuk mendefinisikan parameter resistor non-linier, referensi A0 dan A1 digunakan dari IEEE [22]. Nilai skala tegangan dengan factor $V_{8/20}$ dari pemodelan arrester dimodelkan. Karakteristik A0 dan A1 ditentukan oleh poin yang tercantum pada tabel 3.

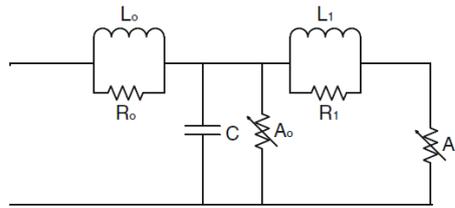
Persamaan untuk parameter di atas dan karakteristik V – I per unit dari varistor diberikan dalam [22]:

Tabel 3. Karakteristik V-I untuk A_0 dan A_1

I [kA]	V [p.u]	
	A_0	A_1
0.1	0.963	0.769
1	1.05	0.85
2	1.088	0.894
4	1.125	0.925
6	1.138	0.938
8	1.169	0.956
10	1.188	0.969
12	1.206	0.975
14	1.231	0.988
16	1.25	0.944
18	1.281	1
20	1.313	1.006



Gambar 19. Model fisikal



Gambar 20. Model IEEE [22]

$$L_1 = (15d)/\eta \text{ } \mu\text{H} \quad (17)$$

$$R_1 = (65d)/\eta \text{ } \Omega \quad (18)$$

$$L_0 = (0.2d)/\eta \text{ } \mu\text{H} \quad (19)$$

$$R_0 = (100d)/\eta \text{ } \Omega \quad (20)$$

$$C = (100\eta)/d \text{ } \text{pF} \quad (21)$$

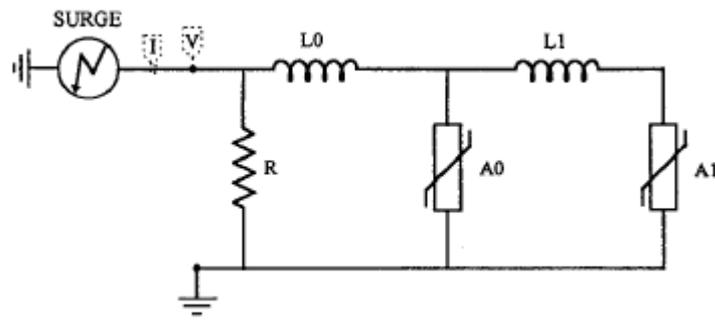
dimana

d merupakan panjang kolom arrester dalam satuan meter dan

η merupakan nomor kolom paralel *metal oxide disks*

1. Model Picenti-Giannettoni

Dalam mengimpletasikan model arrester yang digunakan pada ATP/draw rangkaian di bangun seperti gambar 13, hal ini dilakukan untuk membuktikan keakuratan model dengan data manufaktur dari produsen. Dengan implus arus yang berbeda dengan debit lonjakan (1/5 atau 1/2 μs) dan implus arus petir (8/20 μs) dengan amplitude antara 1 kA dan 20kA.

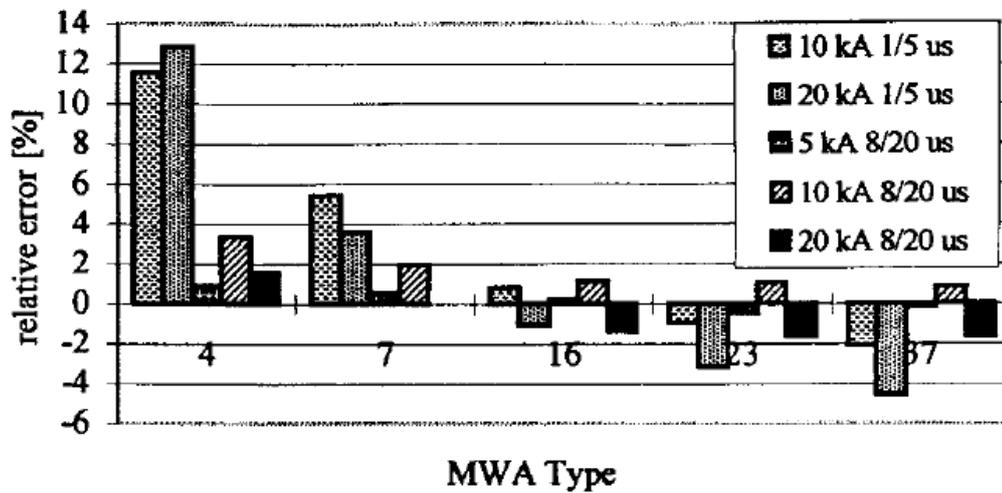


Gambar 21. Rangkaian Uji Simulasi

Poin penting adalah kriteria pemilihan nilai parameter induktif sedangkan definisi karakteristik resistor nonlinier dilakukan sesuai dengan indikator IEEE W.G. 3.4.1 1.

Perbandingan dilakukan pada satu set arester yang diproduksi oleh ABB; arrester yang dipertimbangkan memiliki *Maximum Continuous Operating Voltage* (MCOV) antara 4 kV dan 37 kV. Hasil yang diperoleh dengan impuls arus switching tidak dilaporkan karena tidak relevan untuk perilaku dinamis *metal oxidel varistor* arrester. Gambar 14 menunjukkan kinerja model ketika kriteria tradisional digunakan untuk menentukan elemen induktif.

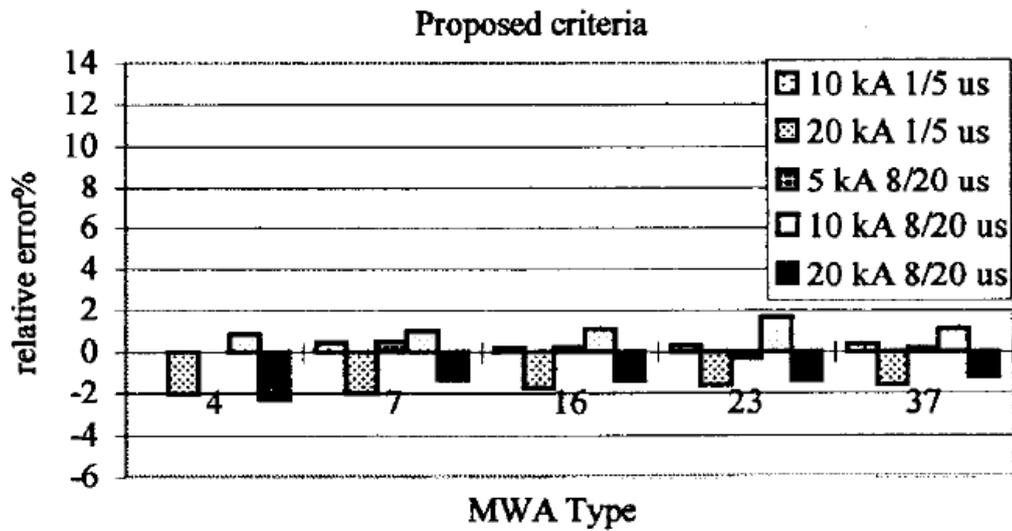
Traditional criteria



Gambar 22. Relatif error pada tegangan sisa dengan elemen induktif yang ditentukan dalam kaitannya dengan dimensi fisik perangkat.

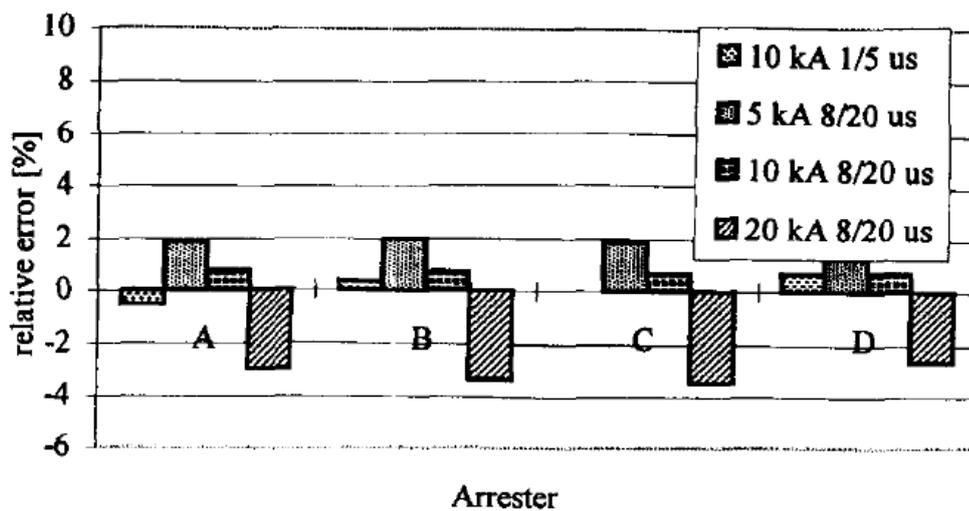
Model diatur dengan prosedur iterasi yang berurutan untuk arrester ABB, kemudian hubungan proporsional dengan tinggi perangkat diperkenalkan untuk menghitung parameter arrester dari tegangan yang berbeda. Sangat mudah untuk mengamati bahwa kriteria ini selalu membutuhkan prosedur koreksi untuk menjaga kesalahan dalam batas yang dapat diterima.

Secara berbeda, Gambar 6 menunjukkan hasil yang mengadopsi aturan yang diusulkan. Homogenitas yang cukup besar dapat diamati sebagai bukti keefektifannya.



Gambar 23. Kesalahan relatif pada tegangan sisa dengan elemen induktif yang didefinisikan dalam kaitannya dengan kinerja yang diukur

Hasil yang diperoleh dengan mempertimbangkan arester dari pabrikan yang berbeda memberikan konfirmasi lebih lanjut dari efisiensi model (lihat Gambar 16). Data teknis arester tersebut dilaporkan pada Tabel 1.



Gambar 24. Kesalahan relatif pada tegangan sisa diperoleh dari model umum pada percobaan pertama untuk beberapa arester yang dibuat dari Siemens dan GEC Alsthom

Tabel 4. Data teknis arester yang dipertimbangkan

Arrester	Rated Voltage kV	Residual voltage with waveform... At a discharge current of...			
		1/5 μ s	8/20 μ s		
		10 kA kV	5 kV kV	10 kA kV	20 kA kV
A - GEC Altsthom	20	55	48	51	57
B - SIEMENS	111	282	250	266	298
C - SIEMENS	111	300	266	283	317
D - SIEMENS	120	286	254	270	300

2. Model Fernandez-Diaz

Model yang disederhanakan pada gambar 12 telah disesuaikan untuk beberapa arester tegangan menengah dan tinggi dari nominal arus 5 dan 10 kA (I_n) dari pabrikan yang berbeda, dengan mengadopsi mekanisme pengaturan yang diusulkan. Data katalog untuk beberapa kasus ilustrasi ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 5. Data Manufaktur

Case	Type, I_n [kA]	Urate kV	Residual voltage [kV] for discharge currents [kA]				
			1/5 μ s	8/20 μ s			
			I_n	3	5	10	20
1	Manuf.1, 5	12	40.8	36.8	39.2	43.4	51.0
2	Manuf.2, 10	20	55.0		48.0	51.0	57.0
3	Manuf.3, 10	111	282		250	266	298

Model diimplementasikan di ATPDraw. *Branch card* tipe-92 [7] digunakan untuk mensimulasikan karakteristik non-linier dari A0 dan A1, dan *surge source* tipe-15 untuk pelepasan arus.

Tabel 7 merangkum persentase kesalahan dalam tegangan sisa untuk tiga kasus tabel 6. Dalam semua kasus, hasil model berada dalam 1,7% dari data yang dipublikasikan, untuk waktu depan arus pelepasan mulai dari 8 μ s hingga 1 μ s dan oleh karena itu lebih rendah dari pada [22, 23, 27]. Juga perlu diperhatikan, bahwa karena mekanisme penyesuaian yang diusulkan, kesalahan pelepasan arus petir mungkin hanya positif.

Tabel 6. Persen error residu tegangan dari pelepasan arus berbeda berdasarkan nilai yang tercatat pada Tabel 2

Case	Type, In [kA]	e% residual voltage for discharge currents			
		1/5 μ s	8/20 μ s		
		In [kA]	5 [kA]	10 [kA]	20 [kA]
1	Manuf.1	+0.03	+0.10	+0.29	+0.53
2	Manuf.2	+1.56	+0.07	+0.27	+0.47
3	Manuf.3	+1.69	+0.06	+0.21	+0.37

2.8 Gangguan Surja petir

Surja petir merupakan gejala alam yang bisa dianalogikan dengan sebuah kapasitor raksasa, di mana lempeng pertama adalah awan (bisa lempeng negatif atau lempeng positif) dan lempeng kedua adalah bumi (dianggap netral). Seperti yang sudah diketahui kapasitor adalah sebuah komponen pasif pada rangkaian listrik yang bisa menyimpan energi

sesaat. Peristiwa ini terjadi karena ada perbedaan potensial antara awan dan bumi. Proses terjadinya pemisahan muatan pada awan karena dia bergerak terus menerus secara teratur, dan selama pergerakannya dia akan berinteraksi dengan awan lainnya sehingga muatan negatif akan berkumpul pada salah satu sisi (atas atau bawah), sedangkan muatan positif berkumpul pada sisi sebaliknya. Jika perbedaan potensial antara awan dan bumi cukup besar, maka akan terjadi pembuangan muatan negatif (elektron) dari awan ke bumi atau sebaliknya untuk mencapai kesetimbangan.

Pada proses pembuangan muatan ini, media yang dilalui elektron adalah udara. Pada saat elektron mampu menembus ambang batas isolasi udara inilah terjadi ledakan suara. Surja petir lebih sering terjadi pada musim hujan, karena pada saat tersebut udara mengandung kadar air yang lebih tinggi sehingga daya isolasinya turun dan arus lebih mudah mengalir. Karena ada awan bermuatan negatif dan awan bermuatan positif, maka surja petir juga bisa terjadi antar awan yang berbeda muatan [28]. Pada musim penghujan perlu diwaspadai terjadinya fenomena surja petir ini. Peristiwa ini biasa terjadi saat akan turun hujan atau ketika hujan. Namun, bukan berarti setiap hujan dan mendung akan selalu disertai peristiwa surja petir.

Teori yang secara luas dapat diterima tentang surja petir yaitu bahwa awan terdiri dari daerah bermuatan positif dan negatif. Pusat-pusat muatan ini menginduksikan muatan berpolaritas berlawanan ke awan terdekat atau ke bumi. *Gradient* potensial di udara antara pusat-pusat

muatan di awan atau antara awan dan bumi tidak seragam tapi *gradient* tersebut timbul pada bagian konsentrasi muatan tinggi. Ketika *gradient* tegangan tinggi pada titik konsentrasi muatan dari awan melebihi harga tembus udara yang terionisasi, maka udara di daerah konsentrasi tekanan tinggi mengionisasi atau tembus (*breakdown*). Kebanyakan surja petir memiliki fase waktu, antara lain [29] :

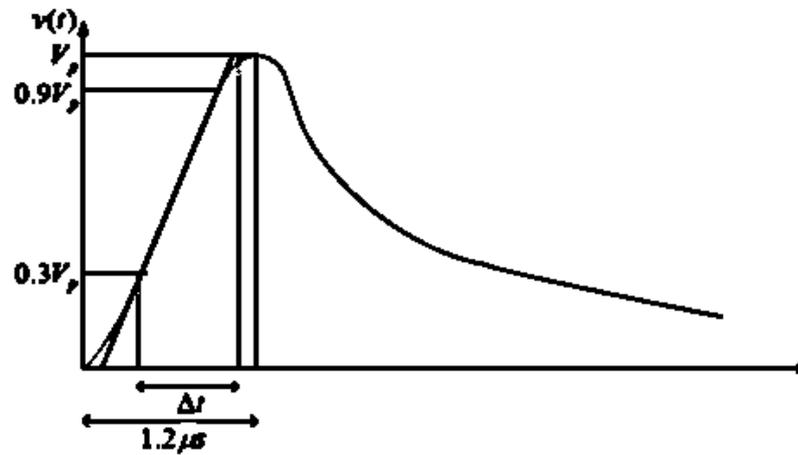
Fase waktu muka, sekitar 10 - 20 ms.

Fase waktu peralihan, sekitar 15 - 30 ms.

Fase waktu ekor, sekitar 30 ms.

Surja petir adalah gejala tegangan lebih transien yang disebabkan oleh proses surja petir pada saluran transmisi. Bentuk gelombang surja dapat didefinisikan sebagai tegangan transien yaitu, tegangan yang naik dalam waktu singkat sekali disusul dengan penurunan yang lambat menuju nol.

Muka gelombang didefinisikan sebagai bagian dari gelombang yang dimulai dari titik nol nominal sampai ke titik puncak, sedangkan sisanya disebut ekor gelombang. Tegangan lebih transien yang terjadi akibat proses pemberian tenaga pada sebuah saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban bisa mencapai 1,5 – 2,5 kali tegangan nominal pada ujung penerima, tergantung karakteristik saluran transmisi yang dipakai [30], Gambar memperlihatkan bentuk gelombang surja surja .



Gambar 25. Bentuk gelombang surja petir

Salah satu faktor mempengaruhi jumlah kebutuhan kawat tanah yang dilakukan untuk mendirikan sebuah pembangkit listrik tenaga bayu adalah jumlah hari guruh tahunan "*Isokreaunic Level*" (IKL) yang terjadi pada daerah pembangkit angin itu yang akan dibangun. Pengaruh atau hubungan keduanya akan sangat jelas pada saat menentukan perkiraan jumlah surja petir. Perkiraan jumlah gangguan berbanding lurus terhadap jumlah hari guruh tahunan yang terjadi.

Hari guruh adalah dimana terdengar minimal satu kali dalam satu hari. Jumlah hari guruh yang telah terjadi pada suatu daerah dalam satu tahun disebut *Isokreaunic Level* dan disimbilkan dengan *IKL*. Kerapatan surja petir ketanah (*ground flash density*) adalah jumlah surja petir ketanah yang terjadi dalam satu tahun pada suatu wilayah yang luasnya dalam satuan km^2 [31]. Relasi empiris antara kerapatan surja petir ketanah dengan hari guruh tahunan diberikan pada Tabel 5.

Tabel 7. Relasi empiris antara kerapatan surja petir dan hari guruh tahunan [32]

No	Lokasi	Kerapatan surja petir N_s (per km.kuadrat per tahun)	Peneliti
1.	India	0.10 <i>Ikl</i>	Aiya (1968)
2.	Rhodesia	0.14 <i>Ikl</i>	Anderson & Jenner (1954)
3.	Afrika Selatan	0.023 (<i>Ikl</i>) ^{1.3}	Anderson & Erikson
4.	Swedia	0.004 (<i>Ikl</i>) ²	(1954)
5.	Inggris (UK)	a (<i>Ikl</i>) ^b	Muller-Hillebrend (1964)
		a = $2.6 \pm 0.2 \times 10^{-3}$	Stringfellow (1974)
		b = 1.9 ± 0.1	
6.	USA (utara)	0.11 <i>Ikl</i>	
7.	USA (selatan)	0.17 <i>Ikl</i>	Horn & Ramsey (1951)
8.	USA	0.10 <i>Ikl</i>	Horn & Ramsey (1951)
9.	USA	0.15 <i>Ikl</i>	Anderson (1968)
10	Rusia	0.036 (<i>Ikl</i>) ^{1.3}	Brown & Whitehead
.	Dunia (iklim	0.19 <i>Ikl</i>	(1969)
11	sedang)	0.15 <i>Ikl</i>	Kolokolov & Pavlova
.	Dunia (iklim	0.13 <i>Ikl</i>	(1972)
12	sedang)		Brooks (1950)
.			Golde (1966)
13			Brooks (1950)
.			

2.9 Alternative Transient Program (ATPDraw)

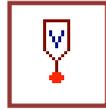
Software *ATPDraw* untuk *windows* adalah merupakan program bebas (*royalty free*) yang berbasis gambar. *Software* ini membantu dalam pembuatan dan mengubah jaringan listrik yang akan disimulasikan. Dalam program ini, para penggunanya dapat merangkai suatu rangkaian listrik dari komponen-komponen dasar yang telah ada. *processor* selanjutnya mengolah inputan dan memberikan penamaan unik untuk setiap sambungan komponen yang selanjutnya disebut *node*. Rangkaian listrik dapat digambar dalam satu fasa maupun tiga fasa. *ATPDraw* sangat membantu dalam analisa transien pada sistem daya listrik.

ATPDraw memiliki banyak model, antara lain mesin-mesin, transformator, *surge arrester*, saluran transmisi dan jaringan kompleks yang dapat disimulasi. Analisis sistem kontrol, peralatan elektronika dan karakteristik komponen-komponen *non-linear* juga memungkinkan untuk dianalisa. Gangguan simetris dan tidak simetris seperti gangguan, *lightning surge* dan berbagai macam operasi *switching* dapat pula disimulasi.

Komponen – komponen dasar Yang digunakan dalam pemodelan adalah sebagai berikut :

Probe Volt

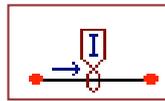
Untuk menampilkan besarnya keluaran tegangan ke tanah pada node yang terpasang yang dapat dilihat pada contoh Gambar 20.



Gambar 26. Model Probe Tegangan

Probe Current

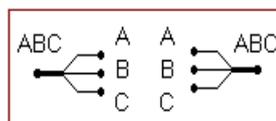
Untuk menampilkan besarnya keluaran arus terukur pada dua node yang terhubung di dalam rangkaian, yang dapat dilihat pada contoh Gambar 21.



Gambar 27. Model Probe Arus

Splitter

Objek ini merupakan transformasi dari satu *node* 3-fasa ke tiga *node* 1-fasa. Jika *splitter* diputar, urutan fasa pada sisi 1-fasanya akan berubah seperti Gambar 22.



Gambar 28. Model splitter dan Model splitter

Resistor

Model resistor murni dalam satuan ohm yang dapat dilihat pada contoh gambar 23.



Gambar 29. Model Resistor

Inductor

Model induktor murni dalam satuan mikro Henry dapat dilihat pada contoh gambar 24.



Gambar 30. Model Resistor

Kapasitor

Model kapasitor dalam satuan mikro Farad yang dapat dilihat pada contoh gambar 25.



Gambar 31. Model Resistor

LCC

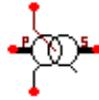
Model kabel LCC digunakan berdasarkan parameter data sheet dan dapat digunakan berdasarkan pengaturan sesuai kebutuhan pemodelan, kemampuan keakuratannya terhadap tegangan dan arus yang melaluinya menjadi pilihan untuk pemodelan kabel dalam penelitian ini. Untuk modelnya dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 32. Model LLC (panjang span)

Sattrafo

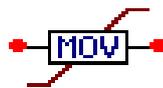
Untuk pemodelan transformator menggunakan SATTRAFO yang dapat dilihat pada 27.



Gambar 33. Model Trafo

Metal Oxide Varistor (MOV Type 92)

Untuk pemodelan arrester menggunakan MOV Type 92, model ini memiliki karakteristik yang sesuai dengan Arrester pada Umumnya dan dapat disesuaikan dengan data manufaktur dari produsen berdasarkan kemampuannya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 28.



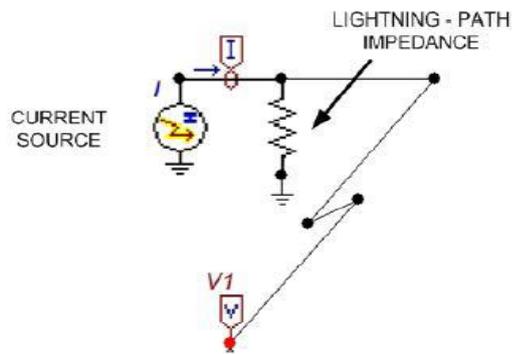
Gambar 34. Model Arrester

Tipe Petir Heidler

Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *heidler*, di mana ada empat karakteristik petir jumlah arus pada titik sambaran yang harus diperhatikan yaitu arus puncak petir (*lightning-current peak*), arus

kecuraman maksimum (*maximum of current-steepness*), waktu muka (*rise time*), dan waktu ekor (*decay time*).

Model Petir tipe *heidler* pada Gambar 23 adalah untuk menggambarkan bentuk gelombang arus petir yaitu diasumsikan sekitar 20 – 150 kA .



Gambar 35. Petir tipe Heidler

2.10 Kerangka Pikir

