

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Dalam proses pemenuhan pelayanan energi listrik yang berkualitas bagi masyarakat Indonesia, PT. PLN atau yang biasa disebut sebagai Perusahaan Listrik Negara dituntut agar memberikan kepuasan kepada masyarakat berupa energi listrik yang berkualitas bagi masyarakat Indonesia dengan tidak adanya kendala ataupun masalah dalam proses penyaluran. Untuk meminimalisir atau menghindari masalah yang mungkin bisa saja terjadi, Gardu Induk sebagai tempat penyaluran energi listrik ke konsumen perlu diproteksi untuk menghindari adanya tegangan lebih yang mungkin dapat mengganggu kinerja dari Transformator. Dengan menghindarkan kejadian tegangan lebih yang dapat mengganggu kinerja dari Transformator tersebut maka perlu adanya ketentuan dalam proses pemasangan *Arrester* sebagai peralatan proteksi.

Berikut merupakan beberapa referensi dari penelitian mengenai letak pemasangan Lightning Arrester, proses adanya kejadian tegangan lebih pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT), Transformator tenaga 150 kV serta software penggunaan ATP (Alternative Transient Program) sebagai software simulasi yang menjadi sumber dalam tugas akhir ini:

Kholis (2006) dengan penelitian yang berjudul tentang Unjuk Kerja Arrester Type HLMN 136 sebagai pengaman Reaktor 7R1 Pada Gardu Induk 500 KV di UPT Semarang. Dalam penelitian tersebut nur Kholis melakukan uji perhitungan matematis jarak Arrester terhadap Reaktor 7R1, dimana Reaktor yang dipasang pada Gardu Induk 500 kV UPT Semarang termasuk reaktor jenis shunt dengan fasa yaang digunakan R, S dan T. Dalam perhitungan matematis tidak jauh berbeda antara Arrester sebagai pengaman Transformator dan juga Arrester sebagai pengaman Reaktor 7R1. Arrester sebagai pengaman Reaktor 7R1 juga melakukan uji perhitungan dengan teori pantulan berulang antara waktu dan juga tegangan yang dihasilkan. Sementara jarak yang ada di lapangan didapatkan nilai 38 meter, namun dalam perhitungan nilai jarak antara Arrester terhadap Reaktor 7R1

didapatkan nilai maksimal 49 meter, artinya pemasangan Arrester masih aman bagi Reaktor 7R1 yang nilainya dibawah harga maksimum. Perbedaan penelitian ini adalah jika penelitian terdahulu melakukan perhitungan jarak ideal antara Arrester terhadap Reaktor sementara pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan jarak ideal antara Arrester terhadap Transformator.

Sintianingrum (2016) penelitiannya dengan judul Simulasi Tegangan Lebih Akibat Sambaran Petir terhadap Penentuan Jarak Maksimum untuk Perlindungan Peralatan pada Gardu Induk. Dalam penelitiannya hal pertama yang dilakukan untuk menghitung jarak maksimum Arrester adalah melakukan simulasi tegangan lebih akibat sambaran petir dengan menggunakan software ATP (Alternative Transient Program). Simulasi dilakukan dengan melakukan variasi arus petir yang menyambar serta waktu muka petir yang berbeda dan penentuan rating Arrester serta transformator. Setelah dilakukan simulasi dilanjutkan dengan melakukan analisis dari perbandingan terhadap kedua waktu muka petir dan perubahan variasi arus petir. Dari hasil simulasi dan analisis didapatkan nilai maksimum untuk jarak maksimum pemasangan Arrester yang disarankan adalah 29,4 m. Perbedaan penelitian ini adalah jika dalam penelitian sebelumnya melakukan gambar rangkaian pada ATP *Draw* secara lengkap dari Pembangkit, maka pada penelitian ini penulis fokus pada posisi Arrester dengan Transformator.

Setiawan (2010) penelitian dengan judul Karakteristik Unjuk Kerja Arrester ZnO Tegangan Rendah 220 volt. Pada penelitian tersebut Setiawan mendeskripsikan tentang karakteristik Arrester ZnO 220 volt dalam mengatasi impuls untuk digunakan sebagai sistem proteksi saluran tegangan rendah kemudian melakukan simulasi menggunakan program EMTP. Pada penelitian tersebut dilakukan perbandingan antara hasil pengujian Arrester ZnO 220 volt dengan hasil simulasi. Pengujian dilakukan menggunakan tegangan impuls kapasitif dengan tegangan uji impuls dari 1200 volt hingga 1700 volt kemudian dengan melakukan simulasi terhadap 3 model ZnO yaitu model pincetti, IEEE dan Saha. Penelitian tersebut menunjukkan Arrester ZnO 220 volt memiliki tegangan potong dan tegangan residu yang masih berada di bawah batas BIL. Model Arrester IEEE dapat diterapkan sebagai model Arrester tegangan rendah 220 volt karena memiliki

presentase tegangan residu kecil dibandingkan model lainnya terhadap pengujian yaitu sebesar 4,83. Perbedaan pada penelitian ini adalah jika pada penelitian sebelumnya melakukan pengujian pada Arrester tegangan rendah 220 volt, sementara rencana penelitian penulis adalah melakukan pengujian Arrester pada jaringan 150 kV.

Ibrahim (2015) dengan judul “Pengaruh Sambaran Petir Terhadap Sistem Proteksi Pada Peralatan Telekomunikasi PT. Telkom Pekanbaru” dengan hasil penelitian pengukuran menggunakan simulasi ATP-EMTP dengan stimulus arus petir sebesar 200 kA, maka besar pengaruh arus yang melewati saluran PLN adalah 4.7 kA, pada genset adalah 4,9 kA, pada pada sentral adalah 6,2 kA, pada rectifier adalah 10,8 kA, dan pada distribusi sebesar 7,6 kA , serta pada transmisi sebesar 8 kA. Sehingga di sarankan untuk saluran PLN dan genset menggunakan Arrester yang memiliki kapasitas arus surja sebesar 50 kA, dan untuk saluran rectifier disarankan menggunakan Arrester dengan kapasitas arus surja sebesar 20 kA, sedangkan untuk saluran distribusi, saluran transmisi dan saluran sentral menggunakan Arrester dengan kapasitas arus surja 10 kA. Pada saat impulse arus petir sebesar 4.,56 kA maka arus yang melewati saluran PLN adalah 980 A, genset adalah 1 kA, sentral adalah 1,3 kA, rectifier adalah 2,2 kA, distribusi adalah 1,5 kA, dan transmisi sebesar 1,6 kA. Maka rekomendasi Arrester yang memiliki kapasitas arus surja untuk saluran PLN dan genset adalah 50 kA, pada saluran rectifier sebesar 7 kA dan pada saluran transmisi distribusi dan sentral sebesar 2 kA.

Aliando,dkk (2015) dengan judul “Analisis Sistem Proteksi Pada SUTT 150 kV menggunakan Software ATP”. Hasil penelitian menunjukkan bahwa saluran distribusi udara 150 kV dengan memvariasikan penempatan lokasi Arrester pada saluran udara. Dengan pemilihan tegangan maksimum sambaran petir sebesar 10 MV pada menara transmisi menggunakan simulasi ATP, menunjukkan bahwa hasil terbaik adalah dengan memasang Arrester pada setiap fase menara dengan data penurunan tegangan sebesar (menara 1) 0.4679 mv (92,81%), menara 2 yaitu 0.5674 MV (92,64%), menara 3 yaitu 1,2248 MV (85,79%), menara 4 yaitu 10 MV (0%), menara 5 yaitu 1,2322 MV (86,09%) dan menara 6 yaitu 0,6219 MV (92,53%).

Dharma, dkk (2015) dengan judul “Analisis Persebaran Medan Listrik Pada Lightning Arrester 20 kV menggunakan “Finite Elemen Method” dengan hasil saat diberi tegangan nominal dengan diberi arus impulse maka perbandingan nilai listrik antara badan dan sirip memiliki perbedaan yang sangat jauh karena saat terkena arus impulse maka tegangannya akan menjadi sangat kecil bahkan nol (0). Pembentukan sudut kontak butir air garam mempengaruhi nilai medan listrik pada sirip pertama Arrester, pengaruh void pada permukaan sirip pertama Arrester mempengaruhi nilai medan keseluruhan pada sirip pertama Arrester, perbandingan nilai medan listrik dengan kontaminasi debu dengan saat minimal pada sirip pertama Arrester.

Nugroho, dkk (2014) dengan judul “Optimasi Penempatan Arrester Terhadap Tegangan Lebih Transien Pada Transformator Daya Dengan Metode Algoritma Genetika” dengan hasil pengujian berupa jarak antara Arrester dan transformator daya dengan hasil pada pengujian tegangan 20 kV menghasilkan jarak antara saluran kawat – kawat (X1) = 1,035 m dan saluran kawat-kabel (X2) = 9,009 m. Pengujian tegangan 150 kV jarak maksimum saluran X1 adalah 1,035 m dan saluran X2 adalah 1,297 m. Sedangkan pengujian pada tegangan 500 kV jarak aman X1 adalah 2,74 m dan jarak aman saluran X2 adalah 19, 177

Saengsuwan (2014) dengan penelitian dengan judul Lightning Arrester Modelling Using ATP-EMTP, penelitian ini mendeskripsikan analisis operasi surja Arrester metal oxida model IEEE W.G. 3.4.11 dan Pincetti kemudian melakukan simulasi menggunakan software ATP/EMTP. Dari hasil tersebut Saengsuwan menyimpulkan ketika waktu muka standar presentase error dari model IEEE lebih tinggi dari pada model Pincetti. Sementara pada kondisi switching overvoltage presentase error IEEE hampir sama seperti model Pincetti. Perbedaannya adalah jika penelitian Saengsuwan melakukan unjuk kerja Arrester terhadap jaringan 220 volt, sementara pada penelitian penulis akan membahas pengujian pada Arrester jaringan 150 kV.

Sinaga (2016) dengan judul “Analisis Usia Arrester Pada Jaringan Distribusi Terhadap Kilat Dengan Menggunakan ATP-EMTP Studi Kasus PLN Ranting Medan Johor” dengan hasil bahwa Arrester jika selamanya dapat menyalurkan petir

ke tanah ada kalanya Arrester akan mengalami kegagalan dalam melindungi peralatan sistem tenaga, kegagalan ini biasanya disebabkan karena usia Arrester itu sendiri, dari percobaan ini didapat bahwa probabilitas kegagalan Arrester sebesar  $0,73479 \times 10^{-3}$  dan usia yang mampu dicapai Arrester untuk kondisi kerapatan sambaran rata-rata yaitu 6 tahun 10 bulan 28 hari

Stevanny,dkk (2017) dengan judul “Analisis Sambaran Petir Terhadap Kinerja Arrester Pada Transformator Daya 150 kV menggunakan Program ATP Menunjukkan bahwa variasi pada impulse petir tidak mempengaruhi muatan arus dan integral kuadrant arus, variasi waktu gelombang pada impulse petir akan mempengaruhi muatan arus dan integral kuadrant arus pada Arrester. Pada saat waktu muka gelombang pada ketiga fase sama namun pada ketika mencapai puncak fase A lebih cepat mengalami kenaikan dari pada fase B dan C. Variasi lamanya waktu sambaran pada implus petir akan sangat berpengaruh terhadap muatan arus dan integral kuadrant arus yaitu pada saat mencapai titik puncak gelombang ketiga fase sama, namun ketika selesai arus puncak fase A akan lebih cepat turun sampai nol (0) dari pada fase B dan C. Untuk variasi waktu sambaran dan waktu gelombang tidak menyebabkan lebihnya arus maksimum tahanan Arrester yaitu 100 kA, dan muatan arus pada Arrester tidak melebihi batas muatan (colombo) yaitu 3,2 Colombo.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 *Arrester*

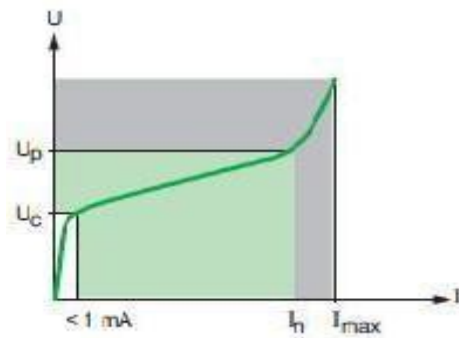
*Arrester* adalah alat proteksi (pelindung) bagi peralatan listrik terhadap tegangan lebih, yang disebabkan oleh sambaran surja (*switching surge*). Alat ini bersifat sebagai *by-pass* disekitar lokasi yang membentuk jalan dan mudah dilalui oleh arus kilat ke sistem pentanahan sehingga tidak menimbulkan tegangan lebih yang tinggi dan tidak merusak isolasi peralatan listrik. *By-pass* ini harus sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran daya sistem frekuensi 50Hz.

Ketika terjadi beberapa arus petir yang melewati *Arrester*, maka *Arrester* mempunyai karakteristik yang dibatasi oleh tegangan (*voltage limiting*). Karakteristik dari pembatas tegangan tersebut merupakan tanda bahwa harga tegangan terminal mampu ditahan oleh *Arrester* saat menyalurkan arus tertentu. *Arrester* juga memiliki batasan termis yang artinya *Arrester* mampu melewatkan arus sambaran petir dalam durasi lama dan berulang. Pada gambar 2.1 ditunjukkan gambar rangkaian *Arrester* yang ada di Gardu Induk 150 kV *Godean*.



Gambar 2. 1 *Arrester* Gardu Induk  
sumber: Gardu Induk 150 kV *Godean*

Definisi standar internasional dari IEC 61643-1 Edition 2.0 (03/2005) menjelaskan bahwa karakteristik pada perangkat perlindungan surja/petir (*surge protection device*) pada sistem distribusi tegangan rendah diperlihatkan pada gambar 2.2 dibawah ini:



Gambar 2. 2 Karakteristik arus/waktu dari sebuah SPD dengan varistor  
sumber: *Overvoltage protection*, Chapter J, *Schneider Electric Electrical installation guide 2010*

Pada umumnya pengenalan atau “*rating*” *Arrester* hanya pengenalan tegangan. Pada beberapa jenis *Arrester* perlu juga disebut pengenalan arusnya yang menentukan kapasitas termal *Arrester* tersebut. Supaya pemakaian *Arrester* lebih efektif dan ekonomis, perlu diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi yaitu:

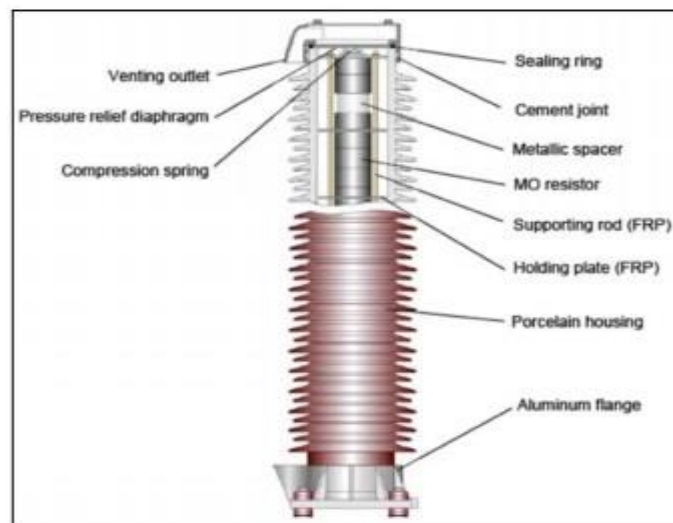
Perkiraan Besarnya Tegangan Nominal/ Pengenalan *Arrester* ( $U_C$ ) (*Nominal Voltage Arrester*) *Rating* dari *Arrester* biasanya dinyatakan dalam frekuensi dan nilai tegangan dalam kV. Dimana tegangannya adalah tegangan nominal atau tegangan pengenalan ( $U_C$ ) yang juga merupakan tegangan disaat penangkap petir masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya. Penangkap petir tidak dapat bekerja pada tegangan maksimum sistem yang direncanakan, tetapi masih mampu memutuskan arus ikutan dari sistem secara efektif. Tegangan pengenalan dari suatu penangkap petir (*rating Arrester*) adalah :

$$\begin{aligned} U_C &= \text{Tegangan rms fasa ke fasa tertinggi} \times \text{koefisien pentanahan} \\ &= \text{Tegangan rms fasa} \times 1,10 \times \text{koefisien} \end{aligned}$$

Sebagai satu peralatan pengaman/proteksi yang ada di gardu induk, *Lightning Arrester* juga memiliki konstruksi serta jenis-jenis *Lightning Arrester* yang sifatnya tahan terhadap gangguan petir guna melindungi beberapa komponen vital yang ada di Gardu Induk seperti melindungi transformator yang dipasang pada gardu induk. Dibawah ini dijelaskan mengenai kontruksi serta jenis-jenis *Lightning Arrester* yang ada di Gardu Induk adalah sebagai berikut :

#### 2.2.1.1 Kontruksi *Arrester*

*Arrester* mempunyai komponen utama yang terbuat dari *zinc oxide* atau yang bisa disebut komponen aktif. Komponen aktif yang terbut dari *zinc oxide* ini berbentuk seperti keping blok dan tersusun didalam *housing* yang mana terbuat dari porselen. *Housing* selain sebagai penyangga juga memiliki fungsi menginsulasi antara bagian bertegangan dengan tanah pada saat *Arrester* beroperasi. Bagian bagian dari *Arrester* dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah ini :



Gambar 2. 3 Konstruksi *Lightning Arrester*

sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan 2014:5

*Arrester* memiliki katup *pressure relief* di kedua ujungnya. Katup *pressure relief* ini memiliki fungsi melepas tekanan internal yang berlebih ketika *Lightning Arrester* dilalui arus surja. Selain itu konstruksi lain dari *Lightning Arrester* terdiri dari struktur penyangga, *grading ring Lightning Arrester* pada



transformator, *grounding*, dan juga alat monitoring berupa milimeter dan counter yang akan dijelaskan dibawah ini.

#### 1. Varistor/*active part*

Komponen ini terdiri dari kolom varistor *Zinc Oxide (ZnO)*. *Zinc Oxide (ZnO)* ini dicetak dalam bentuk silinder yang memiliki diameter keping tergantung pada nilai *discharge* arus. Silinder tersebut terbuat dari material aluminium yang memiliki fungsi sebagai pendingin. Pada *Lightning Arrester* kelas distribusi, nilai diameter keping bervariasi dari 30 mm hingga 100 mm untuk *Lightning Arrester* dengan tipe HV/EHV. Selain itu, setiap keping memiliki tinggi bervariasi dari 20 hingga 45 mm. Gambar 2.4 dibawah adalah komponen aktif metal *oxide* varistor pada *Arrester*:



Gambar 2. 4 *Varistor / Active Part*

sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan 2014:6

Setiap keping ZnO pada saat dilewati arus surja nilai *residual voltage* bergantung pada diameter keping tersebut. Ketika keping memiliki diameter 32 mm, maka nilai *residual voltage* nya sebesar 450 V/mm, sementara jika diameter memiliki nilai 70 mm maka nilai *residual voltage* menurun menjadi 280 V/mm. Artinya pada satu keping ZnO dengan diameter 70 mm dan tinggi 45 mm terdapat kemampuan *residual voltage* sebesar 12.5 kV. Apabila nilai *residual voltage* yang diinginkan sebesar 823 kV, maka diperlukan 66 keping ZnO tersusun ke atas.

## 2. *Housing Lightning Arrester*

Dalam sangkar rod terdapat tumpukan keping ZnO yang pada umumnya terbuat dari *Fiber Glass Reinforced Plastic* (FRP). Pada kedua ujung kolom *active part*, *compression spring* dipasang untuk memastikan susunan keping ZnO yang memiliki ketahanan mekanis. Sementara, *kompertemen housing* tersebut terbuat dari porselen maupun polymer. Kemudian Alumunium *flange* direkatkan pada kedua ujung *housing* dengan menggunakan semen.

## 3. *Sealing dan Pressure Relief Systems*

Letak posisi dari *sealing ring* dan *pressure relief system* dipasang pada kedua ujung *Lightning Arrester*. *Sealing ring* tersebut terbuat dari material sintetis sementara *pressure relief system* terbuat dari *steel/ nikel*. Sebagai katup pelepasan tekanan internal, *pressure relief system* bekerja pada saat *Lightning Arrester* mengalirkan arus sambaran petir

## 4. *Grading Ring*

Pada ketinggian lebih besar dari 1,5 meter atau pada *Lightning Arrester* yang dipasang secara bertingkat diperlukan adanya *Grading Ring*. Fungsi dari *Grading ring* itu sendiri sebagai kontrol distribusi medan listrik sepanjang permukaan *Lightning Arrester*. Posisi medan listrik tersebut memiliki posisi yang lebih tinggi pada bagian yang dekat dengan tegangan, sehingga *stress active part* jauh lebih tinggi dibandingkan pada posisi dibawahnya. Stress ini dapat menyebabkan degradasi pada komponen *active part*. Pada posisi ukuran *grading ring* perlu mempertimbangkan jarak antar fasa sehingga jarak aman antar konduktor harus sama dengan jarak antar *grading ring* antar fasa dari posisi *Arrester*.

## 5. *Peralatan Monitoring dan Insulator Dudukan Lightning Arrester*

Pada peralatan monitoring, *Lightning Arrester* dilengkapi dengan *discharge counter* serta miliamper (mA). Kawat pentanahan dilewatkan dahulu pada peralatan monitoring sebelum dimonitoring. Maka, pada kedua ujung peralatan monitor maupun pada dudukan *Lightning Arrester*, insulator dudukan perlu dipasang baik, agar ketika arus yang melewati *Lightning Arrester* hanya

melewati kawat pentanahan. Gambar dibawah ini menunjukkan Insulator dudukan yang ada pada *Lightning Arrester*.

#### 6. Struktur Penyangga *Lightning Arrester*

Letak posisi *Lightning Arrester* pada posisi tertentu dengan ketinggian tertentu dari permukaan tanah diperlukan adanya struktur penyangga sebagai penahan dari *Lightning Arrester* tersebut. Diharapkan dengan adanya struktur penyangga tersebut *Lightning Arrester* semakin kuat dan kokoh.

##### 2.2.1.2 Jenis-jenis *Lightning Arrester*

Sebagai peralatan proteksi pada jaringan tinggi gardu induk, *Arrester* memiliki bermacam-macam jenis sesuai dengan prinsip kerja masing-masing *Arrester*. Dibawah ini dijelaskan jenis *Arrester* yang biasa dipasang pada gardu induk, yaitu:

#### 1. *Arrester* jenis Ekspulsi (*expulsion type*)

*Arrester* ini pada prinsipnya adalah apabila terjadi gangguan tegangan lebih (*over voltage*) sampai pada titik terminal *Arrester*, maka hal yang akan terjadi adalah pada serat dan sela percik batang yang berada diluar terjadi *spark over* serta terjadi sela percik pada tabung bagian dalam. Apabila terjadi sambaran petir pada terminal *Arrester*, maka terjadi percikan pada kedua sela sehingga muatan listrik dapat langsung dibumikan. Ketika pada posisi tegangan tertentu *Arrester* bersifat konduktor dan kemudian akan mengalir *discharger current* tegangan lebih. Kemudian apabila tegangan lebih hilang, maka akan mengalirkan arus (*flow current*) dari tegangan sistem. Kemudian akan terjadi pemanasan akibat mengalirnya arus pada tabung *Arrester* yang membangkitkan gas dari dinding fiber akibat tekanan udara dalam tabung naik dan gas keluar.

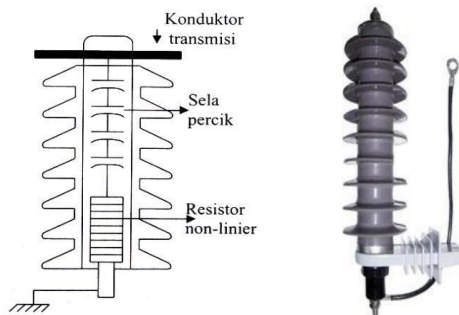
Pada *Arrester* jenis ekspulsi ini terjadi keluarnya udara melalui gas tabung ventilasi dari tabung *Arrester*. Pada kejadian ini arus (*flow current*) akan diputus kemudian *Arrester* akan bertindak sebagai isolator. Jenis *Arrester* ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu tipe transmisi yang digunakan untuk proteksi saluran transmisi agar dapat mengurangi besar tegangan surja petir yang masuk ke Gardu Induk dan tipe distribusi yang digunakan untuk proteksi jaringan distribusi agar dapat mengurangi besarnya tegangan surja petir menuju beban.

Jadi *Arrester* ini dapat digunakan untuk melindungi transformator distribusi bertegangan 3-15 kV, namun belum optimal untuk melindungi transformator daya.

## 2. Jenis Katup (*valve type*)

*Arrester* jenis katup ini memiliki bentuk yang lebih besar dari tipe ekspulsi serta memiliki harga yang lebih mahal. Pada *Arrester* ini terdiri dari beberapa sela percik yang dihubungkan secara seri serta memiliki elemen tahanan yang mempunyai karakteristik tak linier. Sifat khusus dari tahanan ini yaitu rendah saat dialiri arus besar serta tahanan akan berubah menjadi besar saat dialiri arus kecil. *Arrester* ini memiliki tahanan yang terbuat dari bahan *sillicon carbid (SiC)*. Sela percik dan tahanan tak linier ditempatkan dalam tabung isolasi tertutup sehingga kerja dari *Arrester* ini tidak dipengaruhi oleh keadaan udara sekitar. Sistem kerjanya yaitu dalam kondisi normal bertindak sebagai isolator. Bila ada gangguan tegangan lebih pada *Arrester* akan terjadi *spark over* pada gap seri. Pada saat itu, *discharger current* berupa tahanan non linier. Jika tegangan terminal semakin besar maka tahanannya juga akan semakin rendah.

Maka tegangan jepitan antar *Arrester* tetap ada harga-harga yang tidak membahayakan pada *discharger current* yang cukup besar. Setelah tegangan turun atau mengecil, tahanan *valve element* naik. Oleh *valve element* arus *volt current* makin kecil, pada akhirnya melewati titik nol perjalanan arus. Gap seri berfungsi sebagai tempat terjadinya *discharger current*, sedangkan *valve element* berfungsi sebagai pengatur besarnya *discharger current* dan akhirnya dapat memutuskan *flow current* oleh gap seri bersama dengan *valve element*. Maka ketika terjadi putusnya *flow current* *Arrester* akan kembali sebagai isolator. Gambar 2.5 di bawah adalah arrester jenis katup.



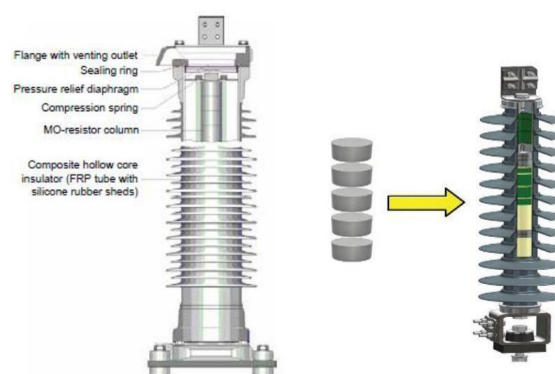
Gambar 2. 5 Arrester jenis katup (*valve type*)

Sumber: Indiamart.com

Sementara *Arrester* ini berdasarkan material jenis tahanan katub/varistor (*valve resistor*) dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *Arrester* dengan material jenis *zinc oxide* (*ZnO*) dan juga *Arrester* dengan material jenis *silicon carbid* (*SiC*).

a. *Arrester zinc oxide* (*ZnO*)

*Arrester* jenis seng oksida atau yang biasa dikenal dengan nama metal oxide arrester (MOA) adalah satu jenis arrester yang terdiri tanpa sela seri dan terdiri satu atau lebih unit yang kedap udara yang didalamnya berisikan blok-blok *ZnO* (*zinc oxide*) sebagai elemen aktif tahanan katup (*valve resistor*). Gambar 2.6 dibawah ini merupakan arrester jenis *zinc oxide*.



Gambar 2. 6 *Arrester* jenis *zinc oxide* dengan elemen aktif

sumber: Siemens AG, 2012:32 dan inmr.com

b. Jenis *Sillicon Carbid (SiC)*

Arrester Jenis *Silicon Carbide (SiC)* atau yang disebut non *linear* terdiri beberapa celah (*spark gaps*) yang dipasang secara seri dengan elemen resistor *Silicon Carbide (SiC)*. Jenis arrester *Silicon Carbide (SiC)* ini terhubung pada konduktor fasa dan *grounding*. Pada kondisi tegangan sistem beroperasi normal, celah (*spark gap*) antar resistor material *Silicon Carbide (SiC)* tidak melakukan pemisahan konduktor bertegangan tinggi dari *grounding*. Ketika tegangan lebih yang terjadi dari sambaran petir secara langsung atau akibat hubung singkat serta berbahaya bagi isolasi peralatan proteksi tegangan lebih, maka celah (*spark gap*) akan bekerja dengan menyalurkan tegangan lebih melalui *grounding*. Sifat variabel  $K$  dan  $\beta$  tergantung pada komposisi serta proses pembuatan resistor non linier (NLR). Nilai  $\beta$  rata-rata berkisar dari 0.3 dan 0.45 untuk arrester Jenis *Silicon Carbide (SiC)*. Apabila tegangan melalui resistor non *linear* (NLR) dua kali lipat, maka arus akan meningkat kira-kira menjadi 10 kali. Jadi dengan adanya *multiple spark gap*, laju pemulihan tegangan yang cukup tinggi dapat ditahan melalui arrester. Kelebihan jenis *Sillicon Carbid (SiC)* ini adalah memiliki celah (*gaps*) yang cukup jauh antar material. Jadi nilai tegangan, frekuensi serta daya selama operasi normal dapat diabaikan. Jadi, ketika terjadi aliran arus bocor antara terminal penghantar dan *grounding* dapat diminimalisir oleh arrester jenis *Sillicon Carbid (SiC)* ini.

### 2.2.2 Transformator

Transformator atau trafo tenaga berfungsi untuk menyalurkan tenaga/ daya listrik dengan menaikkan atau menurunkan tegangan di Gardu Induk. Dari jumlah belitannya, ada dua macam trafo yaitu trafo 1 fasa dan trafo 3 fasa. Kapasitas dasar transformator dipilih sama dengan daya dasar (*rated output*) generator (kVA). Tegangan primer biasanya dipilih 5% dibawah tegangan dasar generator. Namun, dalam beberapa hal, khususnya untuk transformator yang dihubungkan dengan kawat transmisi tegangan tinggi sekali (*extra-high voltage*) maka, karena faktor daya mungkin sama dengan 1,0 atau bahkan mendahului (*leading*), tegangan primer dipilih sama dengan tegangan generator. Pemakaian sistem pengaturan tegangan dengan cara mengatur tegangan generator.

Ketika terjadi gangguan abnormal/tegangan lebih (*over voltage*) yang diakibatkan oleh sambaran petir (*lightning impulse*) dan surja hubung (*switching*) maka dalam memberikan perlindungan terhadap transformator harus dalam kondisi yang optimal sehingga dalam pendistribusian energi listrik ke beban dapat berjalan dengan semestinya. Transformator tenaga (*step down*) dapat menurunkan tegangan yang berasal dari saluran transmisi 150 kV hingga menjadi 20 kV dan selanjutnya akan diturunkan kembali tegangannya menggunakan transformator *step-down* distribusi jaringan tegangan menengah 20 kV ke jaringan tegangan rendah 380/220 volt. Gambar 2.7 di bawah adalah transformator tenaga.



Gambar 2. 7 Transformator

sumber: Gardu Induk 150 kV Godean

*Basic Impulse Insulation Level* (BIL) atau tingkat isolasi dasar impuls transformator adalah batas kemampuan transformator dalam melewati tegangan lebih (*over voltage*) akibat sambaran petir (*lightning strike*) dan hubung singkat (*switching*). Pada Gardu Induk 150 kV Godean diperlukan kekuatan BIL sampai 750 kV atau lima kali lipat dari tegangan sistem agar dapat menghindari adanya kerusakan pada transformator tenaga akibat adanya kondisi abnormal.

### **2.2.3 Software ATP (*Alternative Transient Program*)**

ATP (*Alternative Transient Program*) merupakan sebuah *software* komputer sebagai program pada ketenagalistrikan yang didesain untuk menyelesaikan persoalan *transient* pada sistem tenaga listrik. ATP (*Alternative Transient Program*) digunakan pada rangkaian distribusi maupun rangkaian terkonsentrasi. Program ini dikembangkan pertama kali oleh H.M. Dommel pada tahun 1960-an di Munich Institute of Technology. H.M. Dommel kemudian melanjutkan pekerjaan tersebut di BPA (*Bonneville Power Administration*) dan bekerja sama dengan S. Meyer.

ATP (*Alternative Transient Program*) merupakan pengembangan dari program EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) yang dikembangkan pada



tahun 2012 oleh Dr. Hans Kr. Høidalen di SINTEF Energy Reseach/Norwegian University of Science and Technology in Norway, serta didukung oleh Bonneville Power Administration, Portland-Oregon-USA. Gambar 2.8 berikut *icon* dari *software ATP Draw*.



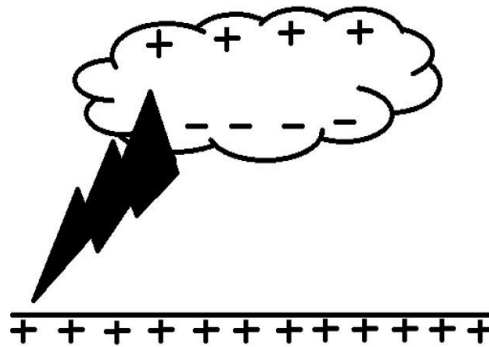
Gambar 2. 8 *Icon software ATP Draw (Alternative Transient Program)*

sumber: *Software ATP*

*ATP Draw* dan *EMTP* lebih ditekankan pada penyelesaian mengenai masalah transien pada sistem tenaga listrik, walaupun demikian program ini juga dapat menyelesaikan persoalan tenaga listrik dalam keadaan lunak. *ATP Draw* dan *EMTP* dapat digunakan untuk menganalisis *transient* pada rangkaian yang mengandung parameter terkonsentrasi (R, L, dan C), saluran transmisi dengan parameter terdistribusi, saluran yang ditransposisi atau saluran yang tidak ditransposisi. *ATP Draw* dan *EMTP* sangat tepat jika digunakan untuk menganalisis *transient* pada operasi surja hubung (*switching surge*) atau surja petir (*lightning surge*) karena program ini secara khusus menyediakan fasilitas pemodelan untuk generator, circuit breaker, transformator, sumber surja petir dan pemodelan berbagai jenis saluran transmisi. (Dommel, Herman, 1996).

#### 2.2.4 Gangguan Petir Pada Gardu Induk

Terjadinya petir diawali karena adanya awan bermuatan di atas bumi. Ketika terjadi kelembapan udara dan adanya gerakan udara keatas maka akan terjadinya pembentukan awan bermuatan. Adanya pengaruh sinar matahari menimbulkan kelembapan udara yang kemudian akan menyebabkan penguapan air. Kemudian dari uap air tersebut naik ke atas (*up draft*). Proses *up draft* yang terjadi terus menerus akan membentuk awan bermuatan. Pada gambar 2.9 berikut menunjukkan ilustrasi sambaran petir dari awan ke bumi.



Gambar 2. 9 Sambaran Petir dari Awan ke Bumi

Sumber: <http://darsimanb.blogspot.com>

Setelah timbul awan bermuatan, selanjutnya kristal-kristal es yang terdapat pada awan bermuatan tersebut saat terkena angin akan mengalami gesekan sehingga muatan pada kristal es tidak menjadi netral seperti sebelumnya, maka pada awan tersebut terdapat muatan positif (+) dan negatif (-). Muatan positif pada awan berkumpul dibagian atas awan, sedangkan muatan negatif berada dibagian bawah awan. Permukaan bumi dianggap memiliki muatan positif sehingga muatan-muatan negatif yang berada di awan akan tertarik menuju muatan positif yang berada di bumi. Saat terjadi proses pengaliran muatan dari awan ke bumi ini yang kemudian disebut sebagai petir.

#### 2.2.4.1 Gelombang Berjalan Saluran Transmisi

Bagian terbesar dari studi mengenai gangguan pada saluran transmisi adalah teori gelombang berjalan, sumber – sumber gelombang berjalan antara lain sambaran kilat secara langsung pada kawat transmisi, sambaran tidak langsung atau sambaran induksi, operasi pemutusan atau *switching*, gangguan arus ke tanah.

Semua sebab – sebab tersebut menimbulkan surja pada kawat transmisi, yaitu surja tegangan dan arus, dari sudut energi, dapat dikatakan surja pada kawat disebabkan bertambahnya energi listrik yang disalurkan secara tiba – tiba pada kawat transmisi. Energi ini merambat pada kawat yang berupa rambatan arus dan tegangan. Kecepatan merambat gelombang berjalan tergantung dari konstanta-konstanta kawat, pada kawat udara kecepatan merambat ini kira-kira 300 meter

permikro detik jadi kecepatannya sama dengan kecepatan cahaya, sedang pada kabel tanah kira-kira 150 meter permikro detik (Hutauruk, 1988: 2)

#### 2.2.4.2 Gelombang sambaran Petir

Gelombang yang disebabkan oleh sambaran petir (surja petir) ini dapat terjadi karena berbagai macam sebab berdasarkan dengan jenis sambaran petirnya, antara lain:

a. Sambaran langsung

Sambaran langsung merupakan jenis sambaran yang mengenai langsung peralatan pada Gardu Induk atau sepanjang kawat hantaran transmisi daya listrik. Sambaran ini merupakan sambaran yang paling hebat di antara gelombang berjalan lainnya yang datang ke GI. Hal ini dikarenakan sambaran tersebut menyebabkan tegangan lebih (*overvoltage*) yang sangat tinggi dan tidak memungkinkan dapat ditahan oleh isolasi yang ada.

b. Sambaran induksi

Sambaran induksi merupakan jenis sambaran yang terjadi apabila awan petir (*thunder cloud*) ada di atas peralatan yang berisolasi. Awan tersebut akan menginduksikan muatan listrik dalam jumlah besar dengan polaritas yang berlawanan dengan awan petir tersebut. Ini akan menimbulkan muatan terikat (*bound charges*). Bila terjadi pelepasan muatan dari awan petir tersebut maka muatan terikat tersebut kembali bebas dan terjadi gelombang berjalan yang besarnya tergantung pada keadaan pelepasannya. Meskipun tegangan induksi itu berubah-ubah tergantung dari pelepasannya, kebanyakan besarnya tidak terlalu berbahaya bagi peralatan tegangan tinggi, meskipun sambaran induksi merupakan ancaman bagi peralatan distribusi.

c. Sambaran dekat

Sambaran dekat merupakan gelombang berjalan yang datang ke Gardu Induk dari sambaran petir pada saluran transmisi, jarak dari sambaran ini hanya beberapa kilometer dari gardu induk. Besarnya dibatasi oleh tegangan lompatan dari dari isolator saluran itu bila rambatannya sepanjang saluran melalui beberapa tiang.

d. Sambaran jauh

Sambaran ini terjadi jika perisai (*shielding*) dari Gardu Induk dan saluran transmisinya cukup baik, gelombang tegangan yang mungkin datang ke Gardu Induk adalah dari sambaran petir yang jauh. Gelombang berjalan yang jauh ini dapat berasal dari sambaran langsung pada saluran, dari sambaran induksi, maupun dari sambaran lompatan balik (*back flashover*) dari tiang.

#### 2.2.4.3 Tegangan Abnormal dengan Frekuensi Rendah

Tegangan abnormal dengan frekuensi rendah ini dapat disebabkan karena efek peralatan tegangan tinggi seperti:

- a. Penguatan sendiri dari generator
- b. Tegangan yang terjadi akibat beban lepas
- c. Tegangan abnormal karena lepas sinkron
- d. Tegangan abnormal akibat hilang gangguan satu fasa ke tanah pada sistem dengan pembumian, atau pada sistem dengan pembumian yang mempunyai saluran transmisi pada satu tiang bersama-sama dengan sistem yang lain yang mengalami gangguan satu fasa ke tanah.

Meskipun banyak macamnya, tetapi pada umumnya tegangan abnormal yang terjadi pada sistem tenaga listrik diperkirakan tidak sehebat surja petir dan surja hubung, namun karena tegangan abnormal frekuensi rendah ini umumnya berlangsung lebih dari beberapa puluh milidetik, tegangan ini sukar terdeteksi oleh *Arrester*. Yang penting adalah mengusahakan agar tegangan abnormal frekuensi rendah yang terjadi pada sistem dapat serendah mungkin, karena perkiraan nilai tegangan abnormal ini merupakan dasar utama dalam penentuan tegangan dasar (*rated voltage*) dari *Arrester*. Tegangan dasar dipilih berdasarkan tegangan lebih dari fasa yang sehat pada saat ada gangguan satu fasa ke tanah.

### 2.2.5 Perhitungan Tegangan *Arrester*

Tegangan dasar *Arrester* ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Tegangan ini dipilih berdasarkan kenaikan tegangan dari fasa-fasa yang normal pada waktu ada gangguan 1 fasa ke tanah ditambah suatu toleransi. Dalam menentukan tegangan dasar *Arrester* dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_r = \alpha \beta U_m \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

$E_r$  = Tegangan dasar *Arrester* (kV)

$\alpha$  = Koefisien pembumian

$\beta$  = Toleransi guna memperhitungkan fluktuasi tegangan, efek ferranti, dan sebagainya

$U_m$  = Tegangan sistem maksimum (kV)

Koefisien  $\alpha$  menunjukkan kenaikan tegangan dari fasa yang normal pada waktu ada gangguan 1 fasa ke tanah, tergantung dari impedansi-impedansi urutan positif, negatif dan nol dilihat dari titik gangguan.

### 2.2.6 Teori Atasi Gangguan

Terjadinya tegangan lebih yang berada pada sistem jaringan tidak semuanya mencapai kondisi maksimum, maka tidak semua diperlukan pemasangan peralatan pengaman karena hal ini tidaklah ekonomis jika seluruh peralatan sistem tersebut

diisolasikan.

Isolasi tahanan tegangan merupakan tingkat isolasi Arrester dalam melewati tegangan lebih (*over voltage*) pada kondisi abnormal. Dalam proses pemeliharaan peralatan serta meningkatkan keandalan pada Gardu Induk dan saluran transmisi, diperlukan adanya koordinasi isolasi yang kuat. Hal ini menandakan bahwa isolasi yang baik memberikan perlindungan yang lebih baik bagi Gardu Induk dan saluran transmisi ketika terjadi rambatan gelombang akibat tegangan lebih. Sebaliknya apabila tingkatan isolasi dari saluran tersebut terlalu rendah, maka gangguan akan lebih banyak terjadi dan keandalan saluran tersebut akan menurun. Oleh karena itu perlu disesuaikan tingkat isolasi secara menyeluruh dengan mengingat kemampuan dari alat pengaman tersebut. Prinsip ini berlaku pada tegangan lebih akibat surja hubung.

Menurut IEEE C62.11-2012 nilai isolasi tahanan tegangan akibat sambaran petir yang diterbitkan tahun 2012 memberikan beberapa nilai tingkat maksimal sambaran petir (*lightning impulse*) seperti ditunjukkan tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1 Isolasi tahanan tegangan akibat sambaran petir.

<i>Arrester ratings</i>	<i>Arrester MCOV</i>	1.2/50 Impulse	Switching surge impulse	60 Hz / 60 seconds	60 Hz wet 10 seconds	Jarak Rambat
kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	Inches
9	7.65	149	153	102	68	20.3
10	8.4	149	153	102	68	20.3

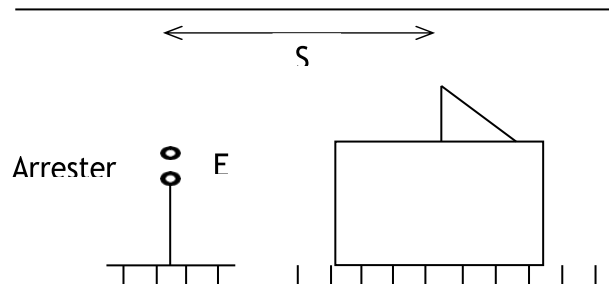
Tabel 2.1 Isolasi tahanan tegangan akibat sambaran petir. (lanjutan)

<i>Arrester</i> ratings	<i>Arrester</i> MCOV	1.2/50 Impulse	<i>Switching</i> <i>surge</i> <i>impulse</i>	60 Hz / 60 seconds	60 Hz wet 10 seconds	Jarak Rambat
kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	Inches
18	15.3	193	189	126	93	28.4
27	22	236	216	144	117	36.5
54	42	344	273	182	178	56.7
60	48	366	288	192	190	60.8
84	68	602	495	330	308	97.2
90	70	623	507	338	320	101.3
96	76	644	519	346	332	105.3
108	84	710	561	374	368	117.5
120	98	732	576	384	380	128.1
144	115	890	776	517	467	166.5
180	144	1029	960	586	533	192.2
192	152	1212	1166	690	633	222
198	160	1256	1208	708	657	230.6

Sumber: IEEE C62.11-2012.

### 2.2.7 Perancangan Sistem

Sebagai langkah dalam melindungi transformator dari gangguan tegangan lebih akibat surja hubung maka diperlukan adanya parameter penentuan letak pemasangan *Arrester*. Dalam proses pemasangan *Arrester* penentuan jarak maksimum antara *Arrester* terhadap peralatan yang dilindungi harus sesuai dengan standar seperti gambar 2.10 dibawah ini:



Gambar 2. 10 Skema jarak transformator dan *Arrester* dengan jarak  $S$

(Hutauruk, 1989:112)

Sebagai bahan pertimbangan, bahwa letak pemasangan *Arrester* terhadap Transformator secara teori dipasang sedekat mungkin pada gardu induk, namun dalam kenyataanya dilapangan pemasangan antara *Arrester* terhadap transformator dipasang pada letak tertentu sesuai kondisi dilapangan. Sementara berdasarkan rumus perhitungan, jarak antara *Arrester* terhadap transformator dapat dihitung dengan rumus perhitungan sebagai berikut:

$$E_p = E_a + 2A S/V \dots\dots\dots(2)$$

(Hutauruk, 1988:113)

Keterangan:

$E_a$  = Tegangan percik *Arrester*

$E_p$  = Tegangan pada jepitan trafo

$a$  =  $de/dt$  = kecuraman gel datang, dan dianggap kontan

$S$  = Jarak antara *Arrester* dengan trafo (m)

$V$  = kecepatan merambat gelombang