

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Dalam proses pemenuhan kualitas energi listrik bagi Masyarakat Indonesia, PLN atau yang biasa disebut sebagai Perusahaan Listrik Negara dituntut untuk memberikan kepuasan berupa energi listrik bagi masyarakat Indonesia dengan tidak adanya kendala maupun masalah dalam proses penyaluran. Untuk menghindari masalah yang mungkin bisa terjadi, Gardu Induk sebagai tempat penyaluran energi 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 arester sebagai peralatan proteksi.

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

Nurul Hidayatullah (2009) dengan judul penelitian Kemampuan Aresters untuk pengamanan Transformator pada Gardu Induk 150 kV Sronol. Dimana dalam penelitian tersebut Nurul Hidayatullah melakukan perhitungan jarak ideal antara arester terhadap transformator, dengan melakukan perhitungan secara matematis didapatkan nilai 3 m dengan batas aman 9.75 m. Dari nilai matematis tersebut arester dengan tipe X AR 170 A1/162 masih mampu melindungi trafo dari gangguan *surja petir* dan *surja hubung* dengan tegangan sampai 1000 kV. Perbedaan penelitian ini adalah jika dalam penelitian sebelumnya tanpa menggunakan *software*, maka pada penelitian ini penulis menggunakan simulasi *software* ATP (*Alternative Transient Programme*).

Nur Kholis (2006) dengan judul penelitian mengenai Unjuk Kerja Aresters Type HLMN 136 Untuk pengamanan Reaktor 7R1 Pada Gardu Induk 500 KV DI

UPT Semarang. Dalam penelitian tersebut nur Kholis melakukan uji perhitungan matematis jarak arester 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 arester sebagai pengaman Transformator dan juga arester sebagai penganam Reaktor 7R1. Arestes sebagai pengaman Reaktor 7R1 juga melakukan uji perhitungan dengan teori pantulan berulang antara waktu dan juga tegangan yang dihasilkan. Sementara jarak yang ada dilapangan didapatkan nilai 38 meter, namun dalam perhitungan nilai jarak antara arester terhadap Reaktor 7R1 didapatkan nilai maksimal 49 meter, artinya pemasangan arester masih aman bagi Reaktor 7R1 yang nilainya dibawah harga maksimum. Perbedaan penelitian ini adalah jika penelitian terdahulu melakukan perhitungan jarak ideal antara arester terhadap Reaktor sementara pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan jarak ideal antara arester terhadap Transformator.

Togar Timoteus Gultom (2017) dengan penelitiaannya yang membahas tentang Optimasi Jarak Maksimum Penempatan *Lightning Arestes* Sebagai Proteksi Trafo pada Gardu Induk. Penelitian tersebut membahas tentang jarak pemasangan Arestes dengan tipe EXCLIM R 162 AH 170 yang mana nilai dari perhitungan matematis masih dalam batas aman yaitu didapatkan jarak batasan 3 m sampai 9.75 m. Selain itu, percikan arester masih dalam batas aman sesuai perhitungan matematis serta Naik tegangan yang terjadi pada trafo masih dalam batasan toleransi yang diperbolehkan sebesar 20% lebih tinggi dari BIL trafo sehingga trafo masih terlindungi oleh arester. Perbedaan penelitian ini adalah jika dalam penelitian sebelumnya tanpa menggunakan *software*, maka pada penelitian ini penulis menggunakan simulasi *software* ATP (*Alternative Transient Programme*).

Ayu Sintianingrum (2016) penelitiannya dengan judul Simulasi Tegangan Lebih Akibat Sambaran Petir terhadap Penentuan Jarak Maksimum untuk Perlindungan Peralatan pada Gardu Induk. Dalam penelitiannya Ayu pertamanya melakukan perhitungan jarak maksimum arrester selanjutnya melakukan simulasi tegangan lebih akibat sambaran petir menggunakan *software* ATP

(*Alternative Transient Program*). Simulasi dilakukan dengan melakukan variasi arus petir yang menyambar serta waktu muka petir yang berbeda dan penentuan rating arerster serta transformator. Analisis dilakukan dengan melakukan perbandingan terhadap kedua waktu muka petir dan perubahan variasi arus petir serta didapatkan nilai maksimum 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.

Muhammad Rizaldy (2017) dengan penelitian mengenai Study Analisis Sistem Proteksi Tegangan Lebih (Over Voltage) Menggunakan *software* ATP Menghitung tegangan dasar arrester yang sama serta menggunakan simulasi *software* ATP sebagai analisis jarak pemasangan arester. Pada penelitian tersebut Muhammad Rizaldy menghasilkan kesimpulan bahwa tegangan lebih pada waktu muka petir 0.012401 ms lebih besar dibandingkan nilai tegangan lebih pada saat waktu muka petir 0.03410 ms. Menghitung tegangan dasar arrester yang sama serta menggunakan simulasi *software* ATP sebagai analisis jarak pemasangan arester. 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.

Agung Setiawan penelitian dengan judul Karakteristik Unjuk Kerja Arrester ZnO Tegangan Rendah 220 volt. Pada penelitian tersebut Agung mendeskripsikan tentang karakteristik arrester ZnO 220 volt dalam mengatasi impuls untuk digunakan sebagai sistem proteksi saluran tegangan rendah kemudian Agung 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.

Sapto Nugroho dalam penelitiannya dengan judul Analisis Pengaruh Tegangan Induksi Akibat Sambaran Petir Tak Langsung di Penyulang Badai 20 kV PLN Cabang Tanjung Karang Menggunakan Simulasi EMTP. Pada penelitian ini Sapto Nugroho mendeskripsikan tentang pengaruh tegangan induksi dengan jarak sambaran yang bervariasi pada 30 m dan 50 m dari titik saluran, serta arus sambaran balik petir yang digunakan dimulai dari 10 kA, 50 kA hingga 100 kA. Kemudian pada simulasi dilakukan pemasangan arester dengan jarak pemasangan antara 300 m sampai 400 m pada saluran. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa semakin jauh jarak sambaran maka semakin kecil nilai tegangan induksi, serta pemasangan arester dengan jarak 300 m cukup efektif untuk mengurangi tegangan lebih akibat sambaran petir tak langsung. Perbedaan pada penelitian ini adalah jika pada penelitian sebelumnya melakukan pengujian pada Arester tegangan rendah 20 kV, sementara rencana penelitian penulis adalah melakukan pengujian Arrester pada jaringan 150 kV.

Saengsuwan 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.

Violeta Chis melakukan penelitian mengenai Simulation Of LightningOvervoltages With ATP-EMTP And PSCAD/EMTDC. Pada penelitian tersebut Violeta Chis membandingkan program antara ATP-EMTP And PSCAD/EMTDC dari simulasi tegangan lebih. Simulasi dilakukan pada saluran transmisi 220 kV dengan menara setinggi 40 meter dan jarak 280 meter. Simulasi tegangan lebih selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *software* ATP dan PSCAD. Dari penggunaan kedua *software* tersebut antara ATP dan PSCAD kemudian dibandingkan. Dari percobaan penggunaan simulasi tersebut diperoleh hasil yang hampir sama antara simulasi dengan ATP dan PSCAD. Perbedaannya adalah jika penelitian Violeta Chis melakukan simulasi terhadap *software* ATP dan juga PSCAD pada jaringan 150 kV, sementara pada penelitian penulis hanya menggunakan *software* ATP.

Syakur Abdul dalam penelitiannya mengenai Kinerja Arrester Akibat Induksi Sambaran Petir Pada Jaringan Tegangan Menengah. Syakur Abdul membahas mengenai kinerja arrester yang disebabkan oleh induksi sambaran petir secara berulang pada jaringan 20 kV. Simulasi induksi sambaran terjadi pada tiang 16 pada fasa R dan T yang disebabkan oleh sambaran berulang pada fasa S. Sambaran petir terjadi tiga kali pada saluran. Sambaran pertama 20 kA, selanjutnya 12 kA dan 9 kA. Waktu sambaran yang digunakan pun dari 0,6 ms dan 0,3 ms. Hasil simulasi menunjukkan pada sambaran pertama induksi tegangan fasa R sebesar 795,39 kV dan dipotong oleh arrester menjadi sebesar 11,375 kV. Sambaran kedua menyebabkan kenaikan tegangan pada fasa R sebesar 729,89 kV dan dipotong oleh arrester menjadi 2,6434 kV. Sambaran ketiga menyebabkan kenaikan tegangan induksi fasa R 497,82 kV dan dipotong arrester menjadi 11,309 kV, dimana setelah dilakukan perbandingan pada setiap fasa setelah arrester bekerja diketahui bahwa arrester tersebut dapat memotong kenaikan induksi tegangan yang cukup besar dan mampu menetralsisir gangguan tegangan induksi akibat petir. Perbedaannya adalah jika penelitian ini sistem jaringan tegangan yang digunakan pada jaringan tegangan menengah 20 kV dan pada penelitian ini akan dilakukan untuk gardu induk 150 kV.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Arrester

Arrester atau yang bisa disebut sebagai *Lightning Arrester* merupakan satu peralatan yang ada di gardu Induk yang diciptakan dengan tujuan melindungi peralatan dari tegangan surja baik surja hubung maupun surja petir. *Lightning arrester* bekerja dengan cara membatasi tegangan *abnormal* serta mengalirkan tegangan *abnormal* tersebut ke tanah. Ketika terjadi gangguan alat ini bekerja sebagai konduktor dengan mengalirkan arus surja ke tanah sampai batas aman peralatan tersebut. Namun ketika tidak terjadi gangguan maka alat ini berubah statusnya menjadi isolator.

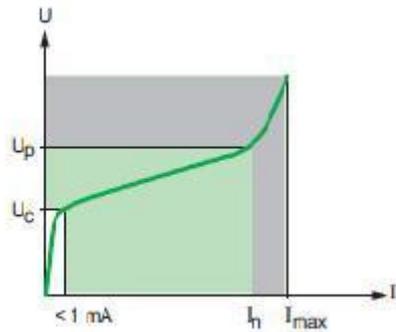
Ketika terjadi beberapa arus petir yang melewati arrester, maka arrester mempunyai karakteristik yang dibatasi oleh tegangan (*voltage limiting*). Karakteristik dari pembatas tegangan tersebut merupakan tanda bahwa harga tegangan terminal mampu ditahan oleh arrester saat menyalurkan arus tertentu. Arrester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



**Gambar 2.1** Arrester

(sumber: Gardu Induk 150 kV Purworejo)

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 grafik dibawah ini.

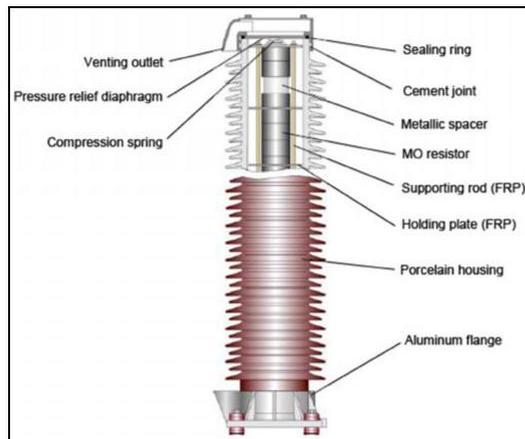


**Gambar 2.2** Karakteristik arus/waktu dari sebuah SPD dengan varistor  
(sumber: *Overvoltage protection, Chapter J, Schneider Electric Electrical installation guide 2010*)

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 konstruksi 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 terbuat 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 dari gambar 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. Berikut gambar dari kompoen aktif *metal oxide varistor* pada arrester:



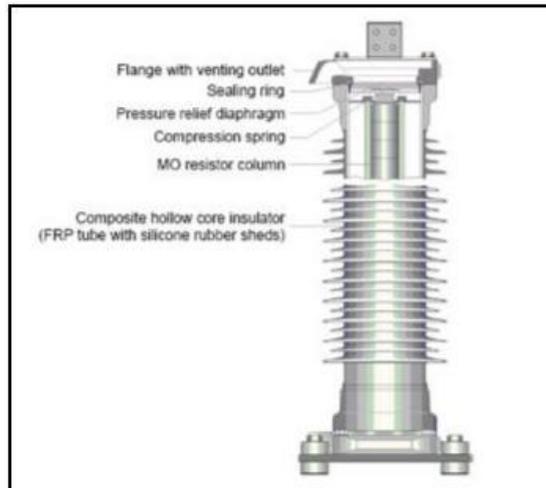
**Gambar 2.4** Varistor / *Active Part*

(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 voltagenya 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*

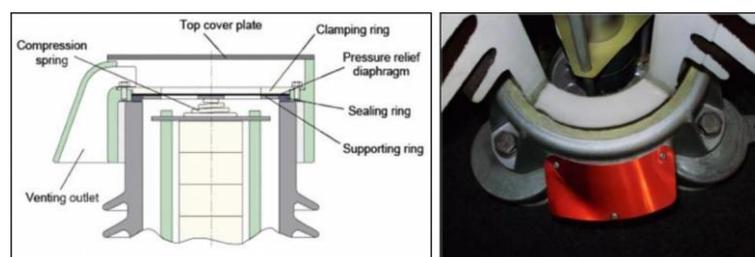
Dalam sangkar *rod* terdapat tumpukan keping ZnO yang pada umumnya terbuat dari *Fiber Glass Reinforced Plastic* (FRP). Pada kedua ujung kolom *active part*, *compression spring* dipasang untuk memastikan susunan keping ZnO yang memiliki ketahanan mekanis. Sementara, kompartemen *housing* tersebut terbuat dari porselen maupun *polymer*. Kemudian *Aluminium flange* direkatkan pada kedua ujung *housing* dengan menggunakan semen. Gambar dibawah ini merupakan gambar dari *housing* dan terminal arrester secara umum.



**Gambar 2.5** *Housing Lightning Arrester*  
(sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan 2014:6)

### 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 pelepasantekanan internal, *pressure relief system* bekerja pada saat *lightning arrester* mengalirkan arus sambaran petir.



**Gambar 2.6** *Sealing dan Pressure Relief System*  
(sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan 2014:6)

### 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 elektris tersebut memiliki posisi yang lebih tinggi pada bagian yang dekat dengan tegangan, sehingga stress *active part* jauh lebih tinggi dibandingkan pada posisi di bawahnya. *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. Gambar dibawah ini menunjukkan susunan dua arrester tegangan tinggi dengan *grading ring*.



**Gambar 2.7** *Lightning Arrester* tegangan tinggi dengan *grading ring*  
(sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan 2014:6)

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

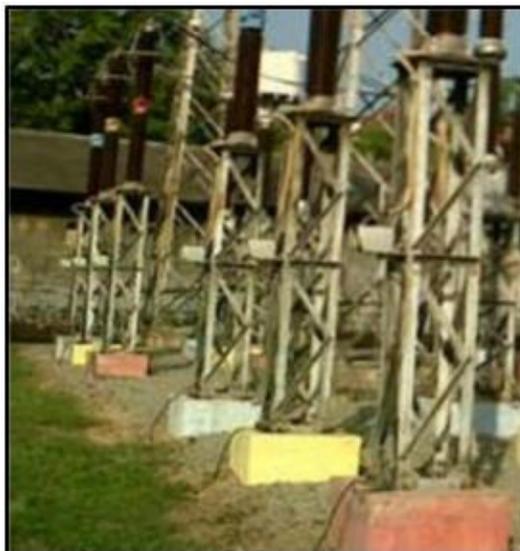
Pada peralatan monitoring, *lightning arrester* dilengkapi dengan *discharge counter* serta *millimeter* (mA). Kawat pentanahan dilewatkan dahulu pada peralatan monitoring sebelum dimonitoring. Maka, pada kedua ujung peralatan monitor maupun pada dudukan *lightning arrester*, insulator dudukan perlu dipasang baik, agar ketika arus yang melewati *lightning arrester* hanya melewati kawat pentanahan. Gambar dibawah ini menunjukkan Insulator dudukan yang ada pada *lightning arrester*.



**Gambar 2.8** Insulator *Lightning Arrester*  
(sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan 2014:6)

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. Gambar dibawah ini menunjukkan penyangga yang berada di Gardu Induk.



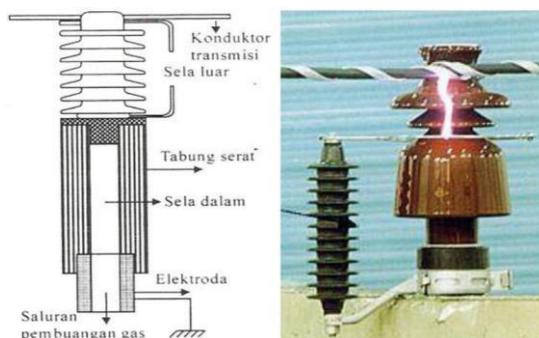
**Gambar 2.9** Struktur Penyangga *Lightning Arrester*  
(sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan 2014:6)

### 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. Arester 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. Dibawah ini salah satu gambar dari arrester jenis ekspulsi pada jaringan tegangan menengah.



**Gambar 2.10** Arrester jenis ekspulsi (*expulsion type*)

(sumber: Mukhalidillah.blogspot.com )

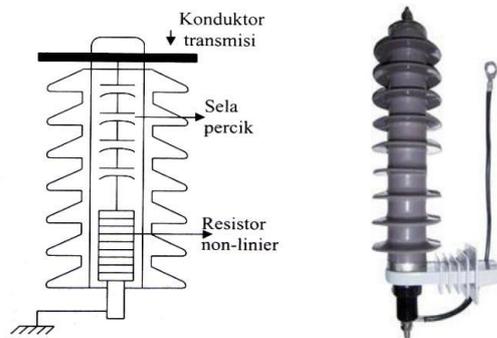
Pada arrester jenis ekspulsi ini terjadi keluarnya udara melalui gas tabung ventilasi dari tabung arrester. Pada kejadian ini arus (*flow current*) akan diputus kemudian arrester akan bertindak sebagai isolator. Jenis arrester ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu tipe transmisi yang digunakan untuk proteksi 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 seta 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.



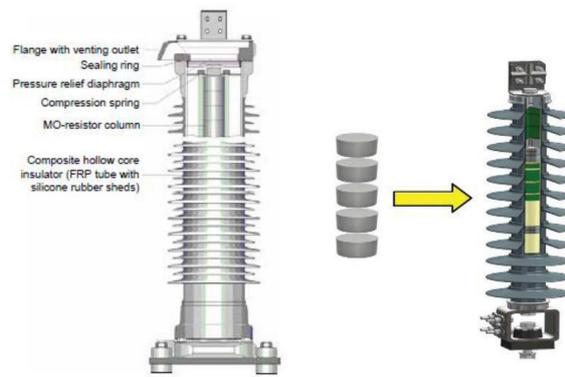
**Gambar 2.11** Arrester jenis katup (*valve type*)

(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*). Dibawah ini merupakan satu gambar arrester jenis *zinc oxide*.



**Gambar 2.12** Arrester jenis *zinc oxide* dengan elemen aktif  
(sumber: Siemens AG, 2012:32 dan inmr.com)

b. Jenis *Silicon Carbide* (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 *Silicon Carbide* (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. Berikut adalah gambar dari transformator tenaga I di Gardu Induk Purworejo 150 kV.



**Gambar 2.13** Transformator

(sumber: Gardu Induk 150 kV Purworejo)

*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 Purworejo 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 Programme*)**

ATP (*Alternative Transient Programme*) merupakan sebuah *software* komputer sebagai program pada ketenagalistrikan yang didesain untuk menyelesaikan persoalan *transient* pada sistem tenaga listrik. ATP (*Alternative Transient Programme*) 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 Programme*) merupakan pengembangan dari program EMTP (*Electromagnetic Transient Programme*) yang dikembangkan pada tahun 2012 oleh Dr. Hans Kr. Høidalen di SINTEF *Energy Research/Norwegian University of Science and Technology in Norway*, serta didukung oleh Bonneville Power Administration, Portland-Oregon-USA. Berikut icon dari *software* ATP Draw.

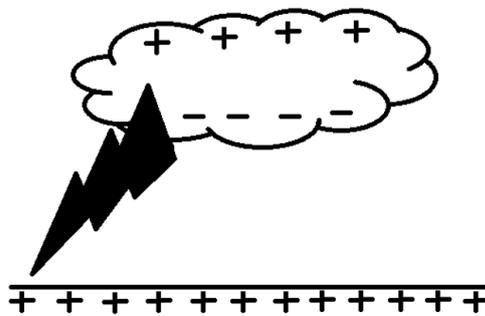


**Gambar 2.14** Icon *software* ATP(*Alternative Transient Programme*)Draw  
(sumber: *Software* ATP)

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 transients 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 transien 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 kelembaban udara dan adanya gerakan udara keatas maka akan terjadinya pembentukan awan bermuatan. Adanya pengaruh sinar matahari menimbulkan kelembaban 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. Berikut ditunjukkan ilustrasi sambaran petir dari awan ke bumi.



**Gambar 2.15** Sambaran Petir dari Awan ke Bumi

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 negative (-). 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 seberat surja petir dan surja hubung, namun karena tegangan abnormal frekuensi rendah ini umumnya berlangsung lebih dari beberapa puluh milli detik, tegangan ini sukar terdeteksi oleh arester. 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 arester. 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 di isolasikan. Jadi, yang dikehendaki adalah perencanaan isolasi yang aman dan ekonomis pada peralatan Garu Induk dan saluran transmisi dengan koordinasi isolasi yang tepat.

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. Maka sangat penting diperlukan perencanaan isolasi sistem yang cukup terhadap gangguan akibat tegangan lebih.

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 dibawah ini.

Tabel 2.1 Isolasi tahanan tegangan akibat sambaran petir.

Arrester ratings	Arrester MCOV	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

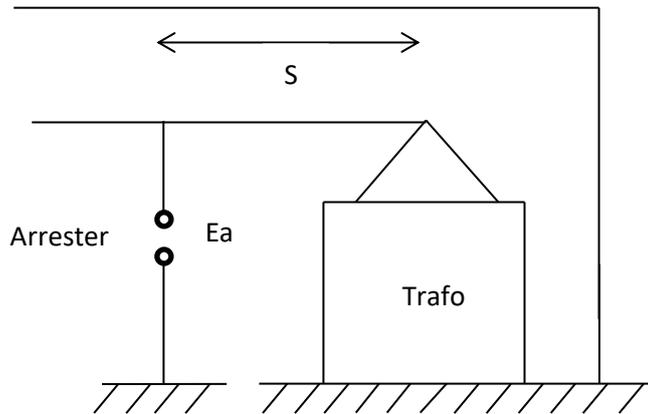
Tabel 2.1 Isolasi tahanan tegangan akibat sambaran petir. (lanjutan)

Arrester ratings	Arrester MCOV	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
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 Arester. Dalam proses pemasangan arrester penentuan jarak maksimum antara arrester terhadap peralatan yang dilindungi harus sesuai dengan standar seperti gambar dibawah ini :



**Gambar 2.16** Skema jarak transformator dan arester 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 kenyataannya 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 arester

$E_p$  = Tegangan pada jepitan trafo

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

$S$  = Jarak antara arester dengan trafo (m)

$v$  = kecepatan merambat gelombang