

## **PENGEMBANGAN SISTEM PENGUKURAN TEGANGAN TEMBUS FREKUENSI RENDAH (50 Hz/60 Hz) UNTUK STANDARISASI PENGUKURAN ARUS BOCOR ISOLATOR PADA TEGANGAN TINGGI KONTINYU DI KONDISI KERING DAN BASAH**

### ***Development of Measurement Systems Breakdown Voltage of Low Frequency (50 Hz / 60 Hz) for The Standardization of High Voltage Insulator Leakage Current for Wet and Dry Conditions***

**R. Hadi Sardjono, Ahnan Ma'ruf, Dono Bardono**

Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi – LIPI

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang 15314, Banten

e-mail: sar\_djono@yahoo.com, ahnan@kim.lipi.go.id, dono@kim.lipi.go.id

Diterima: 13 Agustus 2012, Direvisi: 31 Oktober 2012, Disetujui: 5 November 2012

#### **Abstrak**

Isolator tegangan tinggi adalah salah satu komponen listrik di saluran transmisi yang dipergunakan untuk penyaluran daya listrik tegangan tinggi. Kualitas penyaluran daya berbanding terbalik dengan tingkat kebocoran arus isolator. Tingkat kebocoran arus isolator dapat dikuantitasi dengan metode pengukuran tegangan tembus pada kondisi kering dan basah. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan kemampuan pengukuran tegangan tinggi kontinyu yang telah dimiliki oleh Puslit KIM – LIPI sejak 1980-an, menjadi sebuah sistem pengukuran tegangan tembus isolator mencapai 100 kV pada frekuensi rendah (50 Hz/60 Hz) yang dilengkapi dengan sebuah *chamber* (pengondisi ruang) pengukuran. Pada penelitian ini telah diukur sebuah isolator tegangan tinggi telah terukur dalam ruang *chamber* dan telah menunjukkan tingkat penurunan kualitas mencapai 94 % pada kondisi kering dan mencapai 42 % pada kondisi basah.

**Kata kunci:** pengembangan, sistem tegangan tembus, arus bocor, isolator tegangan tinggi

#### **Abstract**

*High voltage insulator is one of the electrical components in the transmission line that is used for high voltage electrical power distribution. The quality of power distribution is inversely proportional to the level of the insulator leakage current. Rate of insulator leakage current measurement method can be quantified with breakdown voltage in dry and wet conditions. The purpose of this research is to develop a continuous high-voltage measurement capabilities that have been owned by Puslit KIM - LIPI since the 1980s, into a measurement system breakdown voltage is 100 kV insulators at low frequency (50Hz/60Hz) equipped with a chamber. In this research, a breakdown voltage of high voltage insulator has been measured in the chamber and has demonstrated a level of degradation up to 94 % in dry condition and 42 % in wet condition.*

**Keywords:** development, breakdown voltage system, leakage current, high voltage insulator

## **1. PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Isolator tegangan tinggi adalah sebuah komponen listrik yang dipergunakan untuk menghambat mengalirnya arus ke tanah (melalui badan tiang transmisi) dan memegang kawat saluran listrik tegangan tinggi yang terbentang antar tiangnya sampai sejauh 1,5 km. Fungsi isolator tegangan tinggi adalah menjaga kualitas penyaluran daya listrik jarak jauh baik dalam kondisi kering (musim panas) maupun kondisi basah (musim hujan). Penurunan kualitas penyaluran daya listrik terjadi apabila terdapat

arus bocor pada isolator. Tingkat kebocoran arus isolator dapat diperoleh dengan metode pengukuran tegangan tembus sinyal kontinyu sinusoida.

Sejak tahun 80-an laboratorium metrologi kelistrikan Puslit KIM – LIPI telah memiliki kemampuan ukur tegangan tinggi yang bekerja pada sinyal kontinyu mencapai 100 kV dengan frekuensi 50 Hz/60 Hz (frekuensi rendah). Sistem pengukuran ini didukung oleh sebuah transformator tegangan tinggi standar dan sebuah pembagi tegangan kapasitor standar berketelitian 0,5 %. Tegangan output yang diinginkan dapat diatur amplitudonya secara linear dengan mengatur unit pengontrol dan

dimonitor oleh sebuah alat ukur *Peak value* meter.

Implementasi isolator tegangan tinggi di area terbuka diharuskan bekerja untuk menyalurkan daya baik pada kondisi kering (musim kemarau) maupun basah (musim hujan). Pada dasarnya tegangan tembus isolator dipengaruhi oleh material isolator dan kondisi lingkungan. Susunan material yang terjadi pada isolator tersebut dapat dianalisa tegangan tembusnya berdasarkan analogi sebuah komponen listrik kapasitor. Implementasi beberapa isolator yang terpasang pada sistem transmisi tegangan tinggi dapat dianggap sebagai sebuah rangkaian seri beberapa kapasitor.

## 1.2 Tujuan

Pada dasarnya susunan material yang terdapat pada sepasang isolator yang terpasang pada sistem saluran udara tegangan tinggi merupakan rangkaian deret kapasitor yang terdiri dari dua material utama yaitu isolator dan udara. Namun apabila kondisi udara basah maka susunan materialnya menjadi tiga yaitu isolator, udara dan air. Dengan demikian maka kualitas kerja isolator dapat diukur dengan melakukan pengukuran tegangan tembus isolator pada kondisi kering dan basah.

Pengukuran isolator tegangan tinggi pada kondisi tersebut diatas dapat dilakukan secara individual dan terpisah dari saluran tegangan tinggi. Isolator dapat diukur tegangan tembusnya pada posisi tergantung dengan dudukan dan kondisi lingkungan yang dapat disesuaikan. Laboratorium tegangan tinggi Puslit. KIM – LIPI terletak didalam ruangan ukur yang memiliki kondisi lingkungan pengukuran terbatas yaitu di suhu  $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$  dan kelembaban  $(55 \pm 10) \%$ . Oleh karenanya untuk mengukur tegangan tembus isolator tegangan tinggi dengan 2 kondisi tersebut diatas membutuhkan ruangan ukur khusus.

Ruangan ukur khusus tersebut dapat dipenuhi dengan membangun sebuah *chamber*. *Chamber* ini memiliki dimensi luasan ruang yang dapat diletakkan didalam laboratorium dan dilengkapi dengan instalasi pembasah ruang. Pembasahan isolator dapat dilakukan dengan

menyemburkan air dari penampungan air ke ruang *chamber* melalui pipa air yang berujung dengan nosel.

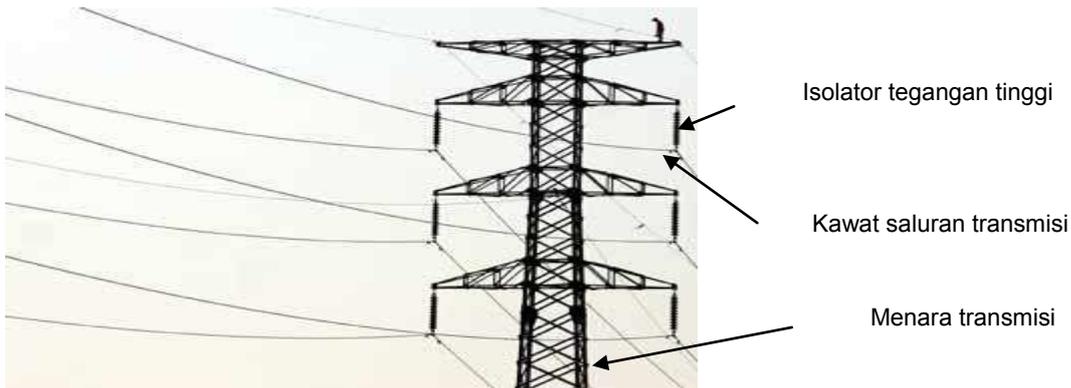
Dengan penelitian yang difasilitasi penuh oleh Puslit KIM – LIPI melalui Proyek DIPA 2011 ini maka tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui kebocoran arus pada isolator dapat tercapai berdasarkan pengukuran tegangan tembus baik pada kondisi kering maupun basah.

Secara fisis tercapainya tujuan penelitian ini ditunjukkan oleh kemampuan operasional bangunan sistem pengukuran tegangan tembus AC sampai dengan 100 kV (50 Hz) pada Isolator tegangan tinggi dalam keadaan kering dan basah dengan menggunakan *chamber*. Secara kualitas tercapainya tujuan penelitian ini ditunjukkan oleh pengukuran tegangan tembus pada sebuah isolator tegangan tinggi dengan spesifikasi tipe porselin yang ternyata memiliki kualitas kerja tegangan mencapai 94% (penurunan kualitas sebesar 6%) jika dioperasikan pada kondisi kering dan 42% (penurunan kualitas sebesar 58%) jika dioperasikan pada kondisi basah.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Fungsi Isolator Tegangan Tinggi

Agar proses penyaluran daya listrik dari pusat pembangkit ke beban yang berjarak 10-an km berjalan dengan lancar, salah satu komponen sistem transmisi daya yang sangat dibutuhkan untuk itu adalah isolator tegangan tinggi. Isolator ini dibutuhkan untuk mempertahankan tegangan tinggi yang disalurkan melalui saluran kawat yang terbentang disepanjang saluran dari rugi kebocoran terhadap tanah (*ground*) melalui lengan tiang transmisi pada saat bekerja di kondisi normal maupun di kondisi tidak normal yaitu pada saat terdapat sambaran petir. Sesuai dengan fungsinya maka isolator ini terletak antara kawat saluran sebagai pemegang dan tiang menara transmisi sebagai penyangga (lihat Gambar 1). Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa mutu pelayanan daya listrik yang tinggi ditentukan oleh tingkat kebocoran yang rendah.

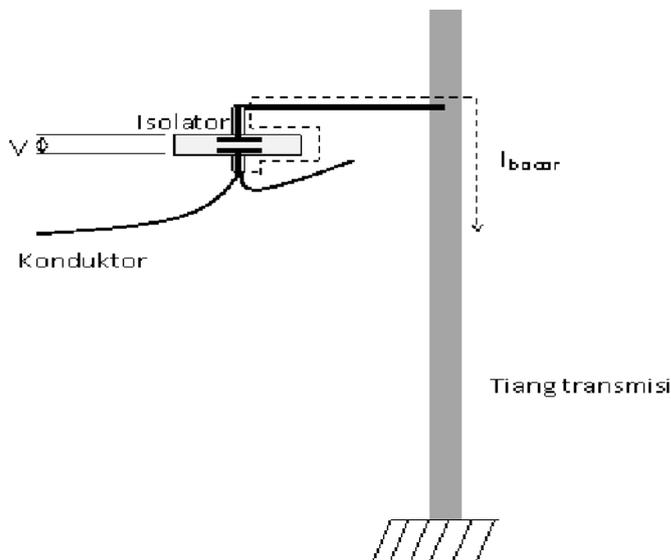


Gambar 1 Tata letak isolator tegangan tinggi di sebuah menara transmisi

Pada saat bekerja normal, kawat transmisi menyalurkan tegangan tinggi berupa sinyal kontinyus. Pada umumnya sinyal kontinyus ini memiliki amplitudo tegangan mencapai antara 100 kV sampai dengan 500 kV dengan frekuensi kerja  $50 \text{ Hz} \pm 10\%$ . Karena sifat listrik dari yang arus yang akan mengalir pada media (kawat konduktor) yang memiliki resistansi terendah maka agar arus bisa mengalir 100% hanya pada kawat saluran maka antara kawat saluran dan tanah atau pemegangnya harus terdapat resistansi yang sangat tinggi. Hal tersebut bisa dipenuhi oleh sistem saluran udara atau sistem saluran bawah tanah. Pada saluran bawah tanah

dipergunakan kabel sedangkan saluran udara dipergunakan kawat.

Komponen komponen yang dibutuhkan oleh sistem saluran udara atau kawat (konduktor) adalah tiang transmisi dan isolator tegangan tinggi. Pada kondisi normal sinyal tegangan kontinyus mengalir disepanjang konduktor karena selain konduktor memiliki nilai resistansi rendah juga dilindungi oleh isolator yang memiliki nilai resistansi tinggi sehingga tidak terhubung singkat ke tanah melalui tiang transmisi yang memiliki nilai resistansi jauh lebih kecil  $\approx 0$  daripada nilai resistansi konduktor.



Gambar 2 Rangkaian listrik sistem saluran udara tegangan tinggi dengan sebuah isolator

Nilai resistansi isolator yang secara fisis terhubung antara tiang transmisi (ke tanah / *ground*) dengan konduktor dapat dihitung ukuran kapasitansnya berdasarkan analogi sebuah kapasitor dimana isolator dianggap sebagai bahan dielektriknya. Ukuran kapasitas

merupakan kemampuan menampung muatan listrik. Suatu konduktor kalau dimuati muatan listrik akan menjadi bermedan listrik dipermukaannya, namun muatan listrik yang ada padanya tidak ditolak keluar dan lepas dari konduktor sebab gaya medan elektostatika itu

diimbangi oleh gaya tarik muatan listrik yang tandanya berlawanan yang berasal dari atom-atom konduktor itu sendiri. Akan tetapi bila mana muatan listriknya terlalu banyak maka medan listrik yang ditimbulkannya akan menjadi kuat sehingga daya tarik dari atom-atom konduktor tidak lagi mampu mengatasi gaya tolak keluar konduktor. Akibatnya sebagian muatan listrik yang dimuatkan padanya menjadi lepas kembali karena konduktor itu tidak mampu menampung muatan listrik atau aliran listrik lebih lanjut yang disebut arus bocor ( $i_{bocor}$ ) seperti terlihat pada Gambar 2. Demikianlah hubungan kesebandingan antara kuat medan listrik dipermukaan konduktor dengan banyaknya muatan listrik yang dimuatkan ke konduktor tersebut, begitu pula antara potensial listrik konduktor itu dengan banyaknya muatan listrik yang dimuatkan. Hubungan antara potensial listrik konduktor dapat diperoleh berdasarkan rumusan berikut.

$$E_{nx} = \frac{v}{e_x \left( \frac{x_1}{e_1} + \frac{x_2}{e_2} + \frac{x_3}{e_3} + \dots + \frac{x_n}{e_n} \right)} \quad (1)$$

dimana,

$e_1, e_2$  adalah permitivitas (F/m),

$v$  adalah tegangan operasional isolator (volt),

$x_1, x_2$  adalah ketebalan dielektrik (m),

$E$  adalah kuat medan elektrostatik (V/m), dan

$n$  adalah bilangan identitas material yang terlibat ( $n = 1, 2, \dots, n$ )

Dalam rangka untuk melindungi aliran arus ke tanah dari penyangga isolator saluran transmisi perlu diamankan dengan penahan arus yang disebut isolator. Isolator memegang peran penting dalam hal keberhasilan pengoperasian saluran. Kebutuhan yang harus dicapai oleh sebuah isolator adalah,

- Secara mekanis harus kuat menahan beban saluran
- Kekuatan dielektrik harus sangat tinggi
- Harus menyediakan tahananisolasi yang sangat tinggi menghadapi arus bocor
- Harus bebas dari ketidak murnian internal
- Tidak berpori
- Harus tahan dari masuknya unsur gas atau cairan kedalam material
- Tidak berefek dengan perubahan suhu udara lingkungan
- Memiliki rasio yang tinggi kuat tusukan (kebocoran) tegangan tembus.

- Akibat utama kegagalan isolator dikarenakan oleh tegangan tembus dimana terjadinya antara saluran konduktor dan pentanahan.

Sebagai material isolator, porselin adalah material umum yang dipergunakan untuk isolator, akan tetapi ada juga yang dibuat dari gelas (*moulded toughened glass*). Isolator porselin dibuat dari lempung China yang terjadi secara alamiah dalam bentuk aluminium silicate. Lempung tersebut dicampur dengan *plastic kaoline*, fespar dan kuarsa yang dipanaskan didalam sebuah alat pembakaran pada suhu yang terkontrol. Isolator yang diperoleh memiliki sifat keras, halus, berkilau dan bebas dari penyerap. Karena sifat mengkilapnya membuat permukaan isolator babas dari sifat penyerap jejak air. Sifat penyerap material isolator akan setara dengan berkurangnya kekuatan dielektriknya, juga ketidakmurniannya atau gelembung udara yang tertinggal dalam material akan menyebabkan rendahnya kekuatan dielektriknya.

Jika material isolator diproduksi pada suhu lebih rendah, sifat mekanisnya membuktikan membaik namun sifat menyerapnya bertambah. Apabila material isolator diproduksi pada suhu terlalu tinggi maka sifat penyerapnya akan berkurang namun material menjadi rapuh. Jadi, suatu kompromi selalu dibuat antara kekuatan mekanik dan kekuatan serap material dan suhu yang cukup dari alat pembakar sehingga diperoleh sifat yang bagus. Spesifikasi teknis isolator porselin memiliki kuat dielektrik sebesar 60 kV/cm (ketebalannya) dan kekuatan tekan sebesar 70 000 kg/cm<sup>2</sup> dan kuat renggangan sebesar<sup>4)</sup> 500 kg/cm<sup>2</sup>. Pengukuran isolator tegangan tinggi menurut ketentuan "British Standard" dapat dilakukan berdasarkan dua kondisi yaitu tegangan tembus dan lingkungan pengukuran.

## 2.2 Pengukuran Tegangan Tembus (*flash over*)

Terdapat 2 kategori tipe pengukuran tegangan tembus yang dapat dilakukan sebelum isolator tersebut bisa dikatakan lulus tegangan tembus yaitu,

- a. Pengukuran tegangan tembus pada kondisi kering 50 Hz

Pada pengukuran ini dilakukan dengan mencatukan tegangan tinggi pada elektroda dimana isolator tersebut dipasangkan sesuai dengan pada saat dipergunakan dan secara bertahap dinaikkan. Nilai tegangan tembus pengukuran seharusnya lebih besar dari batas

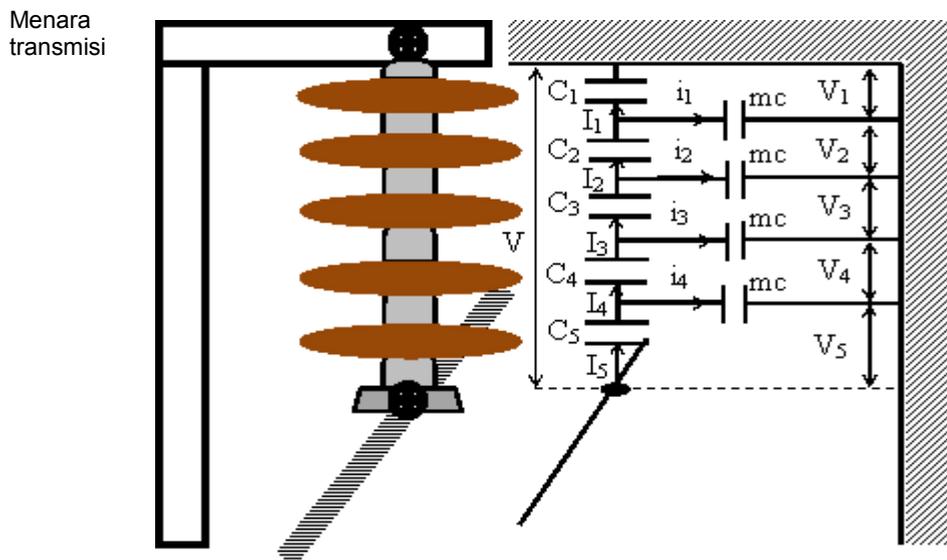
nilai spesifikasi. Isolator harus mampu menahan tegangan minimum selama satu menit.

b. Pengukuran Tegangan Tembus pada Kondisi Basah 50 Hz Selama 30 sekon

Pada pengukuran ini isolator diletakkan sesuai dengan apa yang dilakukan pada pengukuran kategori tipe a, akan tetapi kenaikan tegangan pengukuran harus dibarengi dengan penyemprotan air pada isolator dengan sudut  $45^\circ$  dengan kapasitas semprot tidak lebih dari 5.08 mm/menit. Tahanan air semprotan yang dipergunakan harus sebesar antara (9.000-11.000) Ohm/cm<sup>3</sup> pada suhu dan tekanan normal lingkungan. Isolator tersebut harus mampu

menahan tegangan standar minimum selama 30 sekon.

Dianggap bahwa terdapat sederetan isolator gantung pada sebuah lengan transmisi yang dipergunakan untuk memegang Saluran Udara Tegangan Tinggi. Isolator terbuat dari bahan porselin yang diletakkan diantara dua perkakas logam sehingga membentuk kapasitor sebesar C Farad yang disebut sebagai Kapasitansi Baku (*mutual capacitance*) dan jika secara keseluruhan terdiri dari 5 deret kapasitor yang terpasang secara serial seperti pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Rangkaian listrik saluran udara tegangan tinggi dengan 5 buah isolator

Terdapat tambahan kapasitansi yang terjadi yaitu antara setiap logam pemegang isolator terhadap logam lengan menara transmisi (penyangga saluran) dimana sebagai bahan dielektriknya adalah udara. Selain itu juga ada kapasitansi lain yang keberadaannya terjadi antara logam pemegang isolator dan konduktor saluran akan tetapi karena kecil sekali maka dapat diabaikan.

Jika  $m = \frac{\text{Kapasitansi terhadap tanah}}{\text{Kapasitansi mutual}}$  atau

$$m = \frac{\text{Kapasitansi terhadap tanah}}{c} \quad (2)$$

maka Kapasitansi terhadap tanah sebesar m C (Farad).

Jika  $V_1$  adalah tegangan lintasan isolator paling atas, maka Reaktansi dari Kapasitor mutual adalah,

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3)$$

dan Reaktansi dari Kapasitor ke tanah adalah,

$$X_m = \frac{1}{\omega m C} \quad (4)$$

Kalkulasi  $I_1$  dan  $i_1$ ,

$$I_1 = \frac{V_1}{1/\omega C} = V_1 \omega C \quad (5)$$

$$i_1 = \frac{V_1}{1/\omega m C} = m V_1 \omega C \quad (6)$$

Kalkulasi  $I_2$ ,  $V_2$  dan  $i_2$ ,

$$I_2 = I_1 + i_1 = V_1 \omega C + m V_1 \omega C = V_1 \omega C (1 + m) \quad (7)$$

$$V_2 = \frac{I_2}{\omega C} = \frac{V_1 \omega C (1+m)}{\omega C} = V_1 (1 + m) \quad (8)$$

$$i_2 = \frac{V_1 + V_2}{1/\omega m C} = m (V_1 + V_2) \omega C = m [V_1 + (1 + m)V_1] \omega C = m V_1 \omega C (2 + m) \quad (9)$$

Kalkulasi  $I_3$ ,  $V_3$  dan  $i_3$ ,

$$I_3 = I_2 + i_2 = V_1\omega C (1 + m) + mV_1\omega C (2 + m) = V_1\omega C (1 + 3m + m^2) \quad (10)$$

$$V_3 = \frac{I_3}{\omega C} = V_1 (1 + 3m + m^2) \quad (11)$$

$$i_3 = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{1/\omega m C} = m (V_1 + V_2 + V_3) \omega C = m[V_1 + (1 + m)V_1 + (1 + 3m + m^2)V_1] \omega C = mV_1 \omega C (3 + 4m + m^2) \quad (12)$$

Kalkulasi  $I_4$ ,  $V_4$  dan  $i_4$

$$I_4 = I_3 + i_3 = V_1\omega C (1 + 3m + m^2) + mV_1\omega C (3 + 4m + m^2) = V_1\omega C (1 + 6m + 5m^2 + m^3) \quad (13)$$

$$V_4 = \frac{I_4}{\omega C} = V_1 (1 + 6m + 5m^2 + m^3) \quad (14)$$

$$i_4 = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{1/\omega m C} = m[V_1 + (1 + m)V_1 + (1 + 3m + m^2)V_1 + (1 + 6m + 5m^2 + m^3)V_1] \omega C = mV_1 \omega C (4 + 10m + 6m^2 + m^3) \quad (15)$$

Kalkulasi  $I_5$  dan  $V_5$ ,

$$I_5 = I_4 + i_4 = V_1\omega C (1 + 6m + 5m^2 + m^3) + mV_1\omega C (4 + 10m + 6m^2 + m^3) = V_1\omega C (1 + 10m + 15m^2 + 7m^3 + m^4) \quad (16)$$

$$V_5 = \frac{I_5}{\omega C} = V_1 (1 + 10m + 15m^2 + 7m^3 + m^4) \quad (17)$$

Kalkulasi  $V$ ,

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 = V_1 + V_1(1 + m) + V_1(1 + 3m + m^2) + V_1(1 + 6m + 5m^2 + m^3) + V_1(1 + 10m + 15m^2 + 7m^3 + m^4) \quad (18)$$

$$= V_1 (5 + 20m + 21m^2 + 8m^3 + m^4) \quad (19)$$

### 2.3 Kondisi Sistem Pengukuran Isolator Tegangan Tinggi

Pada penelitian ini telah dilakukan sebuah pengukuran tegangan tembus ( $v$ ) terhadap isolator yang digantung pada dudukan didalam sebuah *chamber* konvensional. Dimensi *chamber* ini terletak didalam ruang laboratorium yang memiliki kondisi suhu dan humiditi ruang  $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$  dan  $(65 \pm 5)\%$ . Sedangkan ruang *chamber* dimungkinkan untuk dilakukannya pengukuran tegangan tembus isolator pada kondisi kering dan basah. Pengukuran tegangan tembus isolator dengan dua kondisi tersebut dilakukan untuk 2 kategori yaitu pengukuran dikategori kategori tipe dan pengukuran kategori kategori rutin. Pengukuran kategori tipe bertujuan untuk membuktikan atau mengecek fitur perancangan dan kualitas. Pengukuran kategori rutin bertujuan untuk mengecek kualitas iasolator secara individu dikondisi lapangan. Pengukuran

kategori tipe dilakukan pada isolator ketika perancangan baru atau ketika diperoleh adanya perubahan dari perancangan, sedangkan pengukuran kategori rutin bertujuan untuk meyakinkan keandalan individu, kualitas dan konsistensi material yang digunakan dalam proses pembuatan. Pada penelitian ini telah dilakukan metode pengukuran tegangan tembus isolator pada frekuensi daya yang terdiri dari dua kategori yaitu pengukuran loncatan kekuatan tegangan pada kondisi kering dan basah.

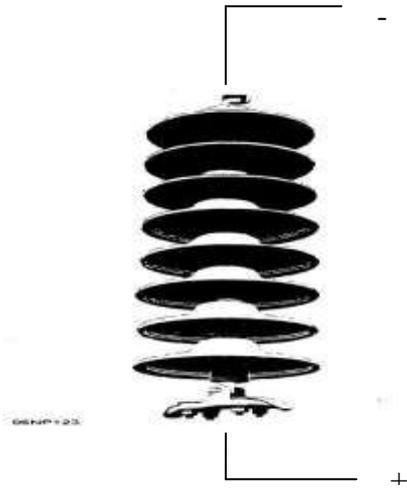
Pada pengukuran ini, tegangan AC pada frekuensi daya dicatukan melintasi isolator dan dinaikkan pada kecepatan yang *uniform* mencapai 75% dari tegangan estimasi pengukuran, dimana pada nilai tersebut tegangan jatuh (*breakdown*) terjadi disepanjang permukaan isolator. Pengukuran ini dilakukan dalam kondisi normal artinya tanpa curahan air hujan disebut pengukuran loncatan kering. Jika pengukuran dilakukan dalam kondisi dengan curahan air disebut pengukuran loncatan basah. Secara umum, pengukuran kondisi basah ini tidak bermaksud untuk mendaur ulang kondisi operasi sebenarnya, tetapi hanya untuk menyediakan kriteria berdasarkan pengalaman bahwa operasi layanan yang memuaskan akan diperoleh. Isolator sebagai subyek pengukuran yang disemprot air melalui alat pemercik (*nozzle*) sehingga secara Isitrik memberikan sifat konduktivitas.

### 2.4 Sistem Pengukuran Tegangan Tembus Isolator

Realisasi sistem pengukuran tegangan tembus isolator pada level tegangan mencapai 100 kV dengan frekuensi daya 50/60 Hz telah dilakukan berdasarkan kondisi kering dan basah. Kondisi basah dapat diperoleh berdasarkan kondisi setelah proses penyemprotan vertikal kebawah, menyudut  $45^\circ$ , dan setelah proses penyemprotan. Masing masing kondisi tersebut merupakan hasil implementasi isolator dilapangan yang dapat diinterpretasikan secara simulasi sebagai berikut,

- Kondisi kering

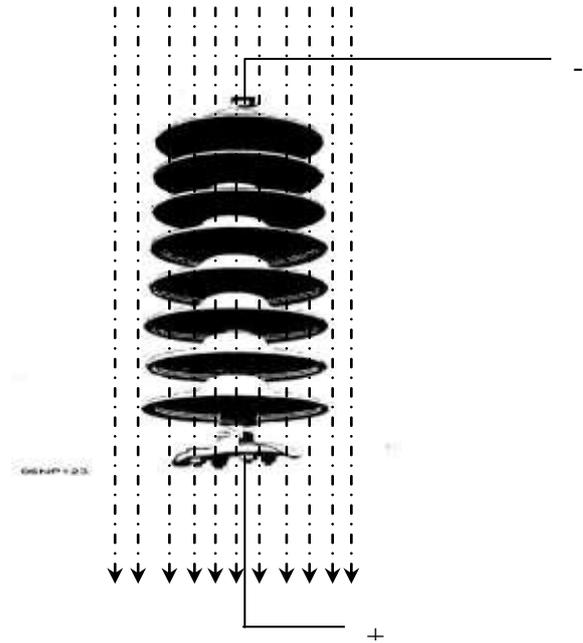
Sesuai dengan kebutuhan di lapangan bahwa isolator telah dipasang dengan posisi vertikal terhadap titik gantungan. Pada pengukuran tegangan tembus isolator dalam kondisi kering dapat dipastikan tidak merubah komposisi material dielektrik (lihat Gambar 4).



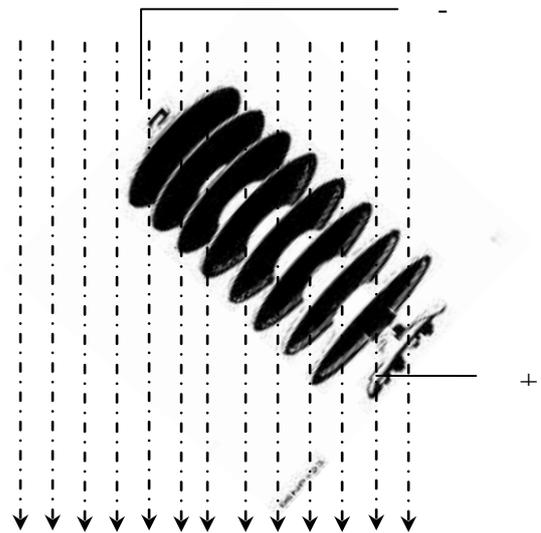
Gambar 4 Isolator pada posisi pemasangan secara vertikal dengan kondisi kering

- Kondisi basah

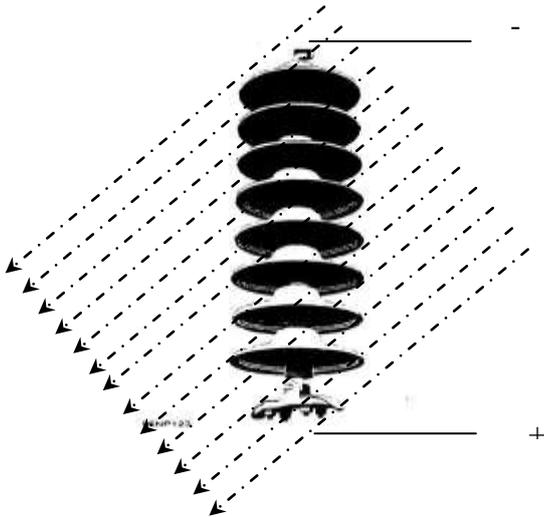
Untuk memenuhi standar pemakaian isolator yang tersebar diseluruh wilayah Indonesia maka diperlukan sebuah ruang yang memiliki kondisi ruang pengukuran isolator dengan kondisi kering yang setara dengan musim panas maupun basah yang setara dengan musim hujan. Untuk pengukuran dengan kondisi basah dapat direalisasikan dengan sebuah sistem pengukuran khusus yang dapat memenuhi korelasi antara curah hujan dengan posisi terpasang isolator. Dengan sistem pengukuran ini dapat diperoleh sebuah proses pengukuran isolator yang dapat diatur ke dalam tiga kondisi. Kondisi pertama dapat diperoleh sebuah proses pengukuran yang menggambarkan posisi isolator yang vertikal dengan curah hujan yang jatuh tegak lurus kebawah (lihat Gambar 5). Kondisi kedua adalah sebuah proses pengukuran yang menggambarkan posisi isolator yang menyudut  $45^{\circ}$  dengan curah hujan yang jatuh tegak lurus kebawah seperti terlihat pada Gambar 6 atau Gambar 7. Kondisi keempat adalah proses pengukuran pada isolator setelah penyemprotan (lihat Gambar 8).



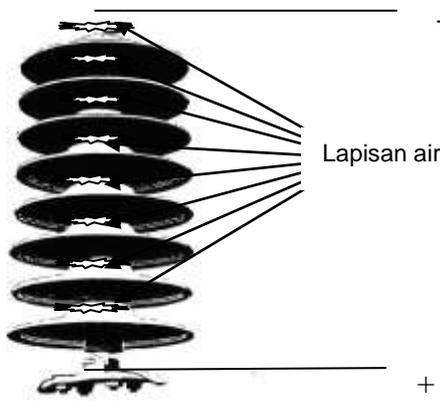
Gambar 5 Posisi arah air hujan dengan posisi isolator vertikal terhadap penggantung



Gambar 6 Posisi aliran air hujan terhadap posisi isolator menyudut  $45^{\circ}$



Gambar 7 Posisi aliran air hujan menyudut 45° dengan posisi isolator vertikal



Gambar 8 Posisi aliran air hujan menyudut 45° dengan posisi isolator vertikal

Pengukuran tegangan tembus isolator dilakukan berdasarkan dua kondisi utama yaitu kondisi kering sebelum isolator disemprot air dan kondisi basah setelah dilakukan penyemprotan. Dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa masing masing kondisi pengukuran telah menghasilkan dua nilai arus bocor isolator yaitu nilai arus bocor awal sebelum terjadi tegangan tembus dan nilai arus bocor akhir pada saat terjadi tegangan tembus. Masing masing nilai tersebut adalah,

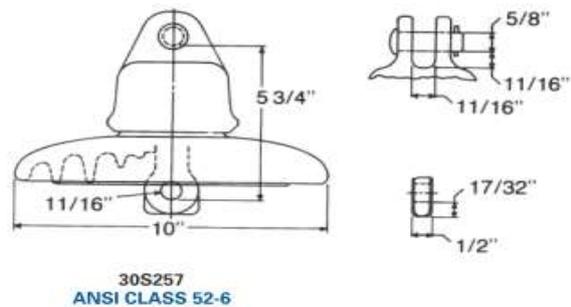
- Kondisi kering  
Awal perambatan arus bocor terjadi pada tegangan catu 30 kV dan perambatan arus bocor akhir pada tegangan catu 95 kV.
- Kondisi basah  
Awal perambatan arus bocor terjadi pada tegangan catu 28 kV dan perambatan arus bocor akhir pada tegangan catu 42 kV.

### 3. METODE PENELITIAN

Pengukuran tegangan tembus isolator pada penelitian ini dilakukan berdasarkan 2 kondisi dimana efektifitas operasional isolator (lihat Gambar 3) di lapangan terjadi yaitu kondisi kering pada saat musim kemarau (kondisi kering) dan kondisi basah pada saat musim hujan. Agar jumlah efektifitas isolator yang harus diperlukan pada sistem saluran udara tegangan tinggi dapat diperoleh maka diperlukan analisa tegangan tembus isolator dikedua kondisi tersebut. Walaupun untuk faktor keamanan yang tinggi dapat diperoleh berdasarkan pertimbangan pada saat isolator harus bekerja dengan baik dalam menghadapi musim hujan. Namun sebagai analisa data untuk mendukung optimasi faktor keamanan perlu dilakukan karakterisasi isolator dikedua kondisi tersebut.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembandingan karakteristik isolator dalam penelitian ini dilakukan terhadap sebuah model isolator keramik (lihat Gambar 9). Pengukuran tegangan tembus isolator dilakukan dikedua kondisi yaitu kering dan basah pada tegangan pengukuran mencapai 100 kV dengan frekuensi daya jala-jala yaitu 50 Hz/60 Hz.



Gambar 9 Spesifikasi sebuah isolator kategori tipe ANSI Class 52-6

Tegangan tembus isolator dapat diestimasi berdasarkan nilai tegangan kritis yang besarnya ditentukan oleh tegangan gangguan yang berakumulasi dengan tegangan spesifikasi isolator. Tegangan kritis ini dapat dihitung dengan menganalisa aspek material yang menyertai isolator secara kondisional diantaranya pada kondisi kering komposisi material terdiri dari isolator (porselin), udara (jarak antar isolator), dan isolator (porselin). Sedangkan kondisi basah komposisi material terdiri dari isolator (porselin), air, udara, dan isolator (porselin). Mengingat bahwa fungsi kerja isolator yang terpasang secara berderet dapat

dianalogikan sebagai komponen kapasitor yang terpasang berderet maka analisa dapat dilakukan berdasarkan prinsip kerja kapasitor (lihat Gambar 3).

#### 4.1 Tinjauan Formulasi Tegangan Tembus Isolator pada Kondisi Kering

Jika  $V_1$  adalah tegangan lintasan isolator maka Reaktansi dari isolator (kapasitor mutual) adalah,

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

karena  $C = 9,2 \times 10^{-11}$  Farad, maka

$$X_C = \frac{1}{2 \times 22,7 \times 50 \times (9,2 \times 10^{-11})} \Omega$$

$$X_C = 405,3 \text{ M}\Omega$$

dan Reaktansi dari Kapasitor ketanah adalah,

$$X_m = \frac{1}{\omega m C}$$

dimana jarak lengan transmisi adalah 24,2 m, permitivitas udara ( $\epsilon_0$ ) adalah 1,0006, konstanta k adalah  $8,85 \times 10^{-12}$ , dan luas elektroda dari keping isolator ke menara adalah  $0,001 \text{ m}^2$  maka nilai m adalah,

karena

$$m = \frac{8,85 \times 10^{-12} \times 0,001 \times 24,2}{9,2 \times 10^{-11}} = \frac{3,7 \times 10^{-16}}{9,2 \times 10^{-11}} = 4 \times 10^{-6}$$

sehingga,

$$X_m = \frac{1}{\omega m C} = \frac{1}{2 \times 22,7 \times 50 \times (4 \times 10^{-6}) \times (9,2 \times 10^{-11})} = 1,2 \times 10^{12} \Omega$$

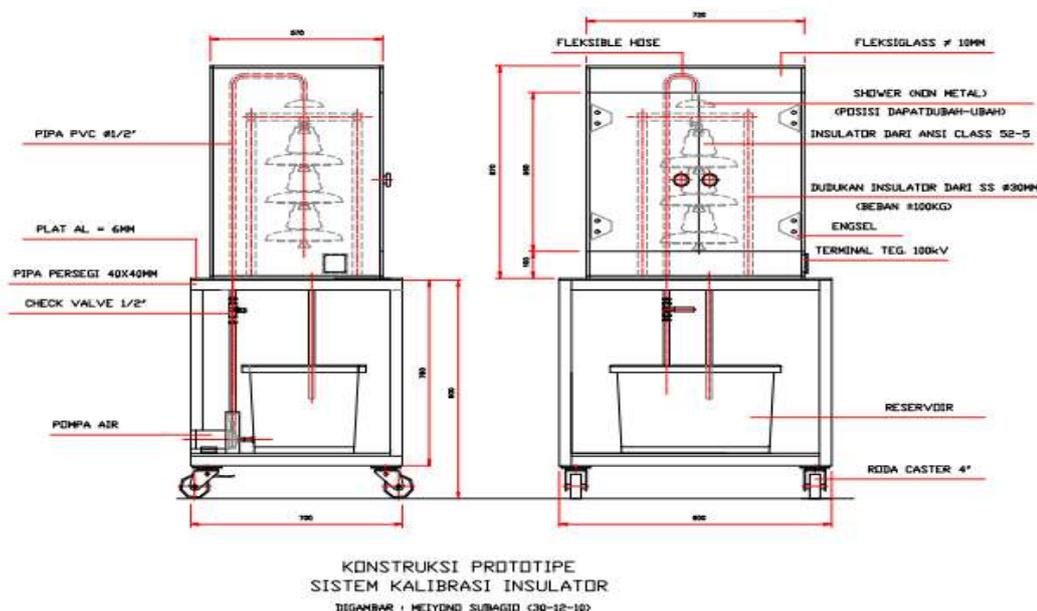
Kalkulasi  $I_1$  dan  $i_1$  pada tegangan operasional normal teori sebesar 100 kV adalah,

$$I_1 = \frac{V_1}{1/\omega C} = 100000 \times 2 \times 22,7 \times 50 \times (9,2 \times 10^{-11}) = 0,021 \text{ A}$$

$$i_1 = \frac{V_1}{1/\omega m C} = 100000 \times 2 \times 22,7 \times 50 \times 4 \times 10^{-6} \times (9,2 \times 10^{-11}) = 0,84 \times 10^{-7} \text{ A}$$

#### 4.2. Tinjauan Penelitian Tegangan Tembus Isolator

Telah dibangun sebuah *chamber* konvensional dengan dimensional ruang tertentu seperti terlihat pada gambar 10 berikut ini.



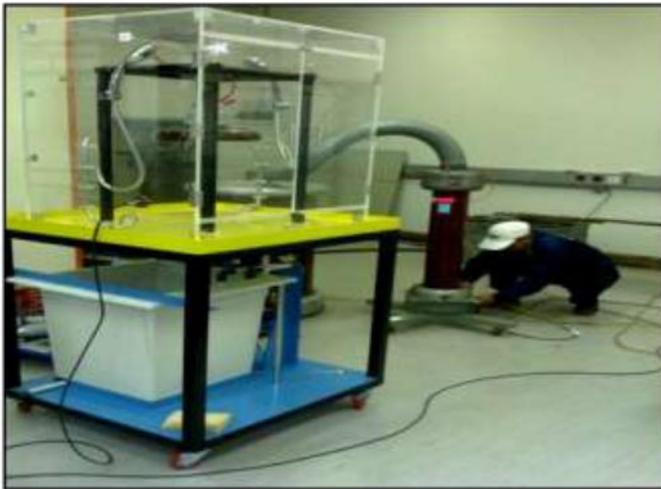
Gambar 10 Perancangan *chamber* konvensional untuk pengukuran tegangan tembus isolator tegangan tinggi

Dari perancangan tersebut diatas kemudian direalisasikan secara mekanis menjadi sebuah *chamber* konvensional untuk sistem pengukuran tegangan tembus isolator seperti terlihat pada Gambar 11 berikut ini. Tiang penyangga isolator dibuat dari material logam dan secara fisis dibuat tidak kontak langsung dengan pemegang isolator. Oleh karena itu, pada saat terjadi tegangan tembus pada isolator aliran tegangan bocor langsung diketanahkan.

Secara fisis *chamber* konvensional ini dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian ruang pengukuran tegangan tembus isolator dan bagian ruang penampungan air. Kedua bagian ini dipisahkan dengan pelat yang dilapisi material isolator (*fiber glass*) dan terdapat lubang pembuangan air dibagian tengah lantai dasar ruang pengukuran. Dengan demikian maka air yang dipompa (dihisap) oleh motor pompa untuk dialirkan keatas kemudian disemprotkan melalui shower akan tertampung dan langsung dialirkan

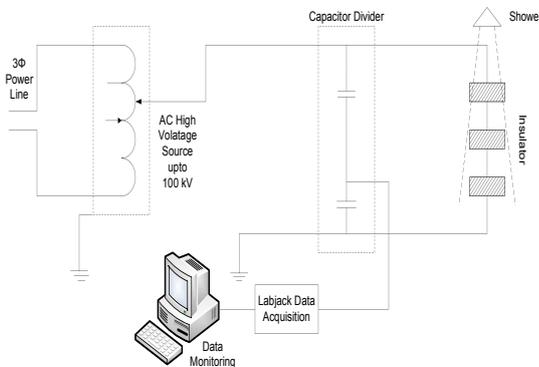
kebawah penampungan dibagian ruang penampungan yang berada dibawahnya. Terminal positif dan negatif dibuat sedemikian rupa agar terhindar dari percikan air sehingga jika terjadi loncatan tegangan bocor pada isolator

hanya akan dialirkan melalui saluran konduktor rangkaian pengukuran yang telah disediakan.



Gambar 11 Realisasi *chamber* konvensional untuk pengukuran tegangan tembus isolator tegangan tinggi

Sedangkan secara rangkaian pengukuran tegangan tembus isolator tegangan tinggi ini dapat digambarkan seperti terlihat pada Gambar 12 berikut.

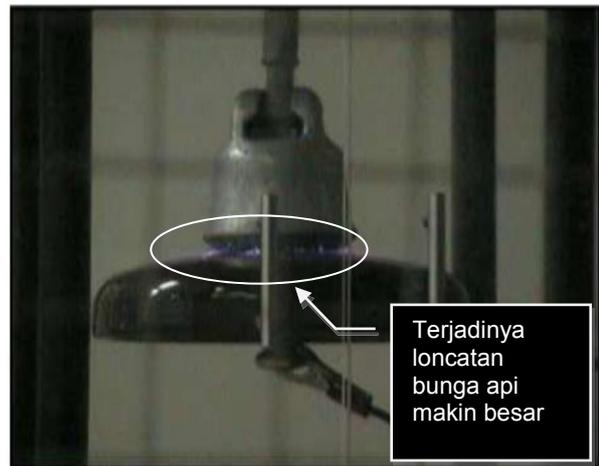


Gambar 12 Diagram rangkaian pengukuran tegangan tembus isolator dalam *chamber*

#### 4.2.1. Tinjauan Penelitian Tegangan Tembus Isolator pada Kondisi Kering

Pengukuran tegangan tembus isolator dilakukan dengan cara menggantungkan sebuah isolator yang terbuat dari bahan porselin pada dudukan yang tersedia dalam *chamber* konvensional. Rangkaian pengukuran terdiri dari benda ukur (isolator tegangan tinggi), sumber  $V_{AC}$  dan peralatan pendukungnya (lihat Gambar 13). Proses pengukuran dilakukan dengan menaikkan amplitudo tegangan tinggi AC (50 Hz/60 Hz) dari sistem sumber pembangkit

secara perlahan dan *uniform*. Pada ketinggian amplitudo tertentu (lihat Tabel 1) telah terjadi proses tegangan tembus pada isolator dengan arah dari terminal negatif ke terminal positif atau dari bawah ke atas seperti terlihat pada Gambar 13 a dan 13 b.



Gambar 13 a Proses perambatan arus sebelum terjadi tegangan tembus pada isolator



Gambar 13 b Proses perambatan arus pada saat terjadi tegangan tembus pada isolator



Gambar 14 Proses pembasahan isolator

Tabel 1 Hasil pengukuran tegangan tembus isolator pada kondisi kering dan basah

	Tegangan tembus pengukuran			
	Kondisi kering		Kondisi basah	
<i>Awal</i> perambatan arus bocor	30	kV	28	kV
<i>Akhir</i> perambatan arus bocor	95	kV	42	kV

Kalkulasi  $I_1$  dan  $i_1$  pada tegangan operasional pengukuran pada kondisi kering dimana isolator hanya mampu menahan tegangan sampai dengan 95 kV (lihat Tabel 1) adalah,

$$I_1 = \frac{V_1}{1/\omega C} = 95000 \times 2 \times 22,7 \times 50 \times (9,2 \times 10^{-11}) = 0,0198 \text{ A}$$

$$i_1 = \frac{V_1}{1/\omega m C} = 95000 \times 2 \times 22,7 \times 50 \times 4 \times 10^{-6} \times (9,2 \times 10^{-11}) = 0,7936 \times 10^{-7} \text{ A}$$

#### 4.2.2 Tinjauan Penelitian Tegangan Tembus Isolator pada Kondisi Basah

Oleh karena keterbatasan *chamber* konvensional dalam hal proses pembasahan isolator maka yang seharusnya semburan air dari *shower* membentuk sudut  $45^\circ$  terhadap posisi isolator tidak bisa dicapai dengan sempurna. Dengan demikian maka tidak seluruh air yang disemprotkan oleh penampang diameter *shower* tidak secara keseluruhan bisa mengenai permukaan isolator (lihat Gambar 14).



Gambar 15 Perambatan arus pada tegangan tembus isolator dengan kondisi basah

Kalkulasi  $I_1$  dan  $i_1$  pada tegangan operasional pengukuran pada kondisi basah dimana isolator hanya mampu menahan tegangan sampai dengan 42 kV (lihat Tabel 1) adalah,

$$I_1 = \frac{V_1}{1/\omega C} = 42000 \times 2 \times 22,7 \times 50 \times (9,2 \times 10^{-11}) = 0,0088 \text{ A}$$

$$i_1 = \frac{V_1}{1/\omega m C} = 42000 \times 2 \times 22,7 \times 50 \times 4 \times 10^{-6} \times (9,2 \times 10^{-11}) = 0,3509 \times 10^{-7} \text{ A}$$

Dari hasil analisa data tegangan tembus pada sebuah isolator tegangan tinggi dengan kondisi kering maupun basah dapat diperoleh karakteristik sesungguhnya sebuah isolator

berdasarkan data data penelitian seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil analisa data pengukuran tegangan tembus isolator

Tegangan dan arus optimum isolator pada pengukuran tegangan tembus				
	Kondisi kering		Kondisi basah	
<i>Awal</i> tegangan bocor	30	kV	28	kV
<i>Akhir</i> tegangan bocor	95	kV	42	kV
Arus optimum ( $I_1$ ) isolator	0,0198	A	0,0088	A
Arus optimum ( $i_1$ ) udara	$0,7936 \times 10^{-7}$	A	$0,3509 \times 10^{-7}$	A

Karakteristik isolator terukur tersebut dapat dianalisa berdasarkan perbandingan kemampuan menahan tegangan tembus pada kondisi operasional (normal) sesuai spesifikasi teknis dengan hasil pengukuran. Sesuai dengan spesifikasi teknis isolator terukur menggunakan bahan porselin sehingga mampu menahan tegangan tembus mencapai 100 kV. Berdasarkan spesifikasi tersebut, nilai arus terkonduksi  $I_1$  dan nilai arus terkonduksi udara  $i_1$  dapat dihitung dan ternyata masing masing memiliki nilai sebesar 0,021 A dan  $0,84 \times 10^{-7}$  A. Dengan demikian maka efektifitas kerja isolator dapat ditetapkan dengan menghitung beda arus terkonduksi isolator maupun udara berdasarkan hasil data data pengukuran seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil analisa arus bocor pada pengukuran tegangan optimum isolator

Arus optimum efektif isolator pada pengukuran tegangan tembus					
	Kondisi spesifikasi		Kondisi kering		Kondisi basah
Arus terkonduksi ( $I_1$ ) isolator	0,021	A	0,0198	A	0,0088
Arus terkonduksi ( $i_1$ ) udara	$0,84 \times 10^{-7}$	A	$0,7936 \times 10^{-7}$	A	$0,3509 \times 10^{-7}$

Efektifitas kerja isolator dapat ditetapkan berdasarkan dua kondisi kemampuan menahan tegangan tembus yaitu kondisi kering ( $I_{1EK}$ ) dan

basah ( $I_{1EB}$ ). Berdasarkan penelitian ini efektifitas kerja isolator pada kondisi kering sebesar,

$$I_{1EK} = \frac{I_{1PK}}{I_{1S}} = \left( \frac{0,0198}{0,021} \right) = 0,94 = 94 \%$$

dimana,

$I_{1EK}$  adalah efektifitas kerja isolator pada kondisi kering

$I_{1S}$  adalah arus terkonduksi isolator ( $I_1$ ) dari spesifikasi

$I_{1PK}$  adalah arus terkonduksi isolator ( $I_1$ ) dari pengukuran kondisi kering

dan efektifitas kerja isolator pada kondisi basah sebesar,

$$I_{1EB} = \frac{I_{1PB}}{I_{1S}} = \left( \frac{0,0088}{0,021} \right) = 0,42 \approx 42 \%$$

dimana,

$I_{1EB}$  adalah efektifitas kerja isolator pada kondisi basah

$I_{1S}$  adalah arus terkonduksi isolator ( $I_1$ ) dari spesifikasi

$I_{1PB}$  adalah arus terkonduksi isolator ( $I_1$ ) dari pengukuran kondisi basah

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini, Puslit KIM – LIPI telah memiliki sebuah sistem pengukuran tegangan tembus isolator tegangan tinggi frekuensi rendah (50 Hz/60 Hz) mencapai 100 kV pada kondisi kering dan basah. Kualitas sebuah isolator porselin berkapasitas 100 kV telah dapat ditetapkan berdasarkan pengukuran tegangan tembus pada kondisi kering dan basah masing masing sebesar 94% dan 42%. Hasil pengukuran tegangan tembus ini diperoleh berdasarkan penggunaan sebuah sistem sumber tegangan standar berketelitian 0.5%.

Pengukuran tegangan tembus isolator tegangan tinggi ini masih terbuka kemungkinan untuk dikembangkan lebih lanjut berdasarkan spesifikasi standar lainnya seperti terkait dengan laju aliran air, sudut aliran air dan kemurnian air.

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terimakasih atas dukungan yang diberikan oleh pihak management Puslit KIM – LIPI didalam Proyek DIPA – 2011 sehingga pelaksanaan penelitian untuk mencapai kemampuan pengukuran

tegangan tembus isolator tegangan tinggi dengan pengondisi ruang kering dan basah oleh *chamber* di laboratorium metrologi kelistrikan Puslit. KIM - LIPI dapat berjalan dengan lancar.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, A. "Teknik Tegangan Tinggi", Pradnya Paramita, Jakarta Pusat, 1978.
- Bakshi, U.A MV Bakshi,"Electrical Power Transmission & Distribution", Technical Publication Pune, #1, Amit Recidency, 412, Shaniwar Peth, Pune – 411 030, India.
- <http://yandi-sage.blogspot.com/2009/09/kaca-dan-porselin.html>.
- [http://www.google.co.id/#hl=id&site=&q=isolator+sama+dengan+kapasitor&oq=isolator+sama+dengan+kapasitor&aq=f&aqi=&aql=&gs\\_sm=e&gs\\_upl=41961179351011852014214216125131114251219610.7.2.1.11110&bav=on.2.or.r\\_gc.r\\_pw.,cf.osb&fp=fedcf306da2549b&biw=1366&bih=569](http://www.google.co.id/#hl=id&site=&q=isolator+sama+dengan+kapasitor&oq=isolator+sama+dengan+kapasitor&aq=f&aqi=&aql=&gs_sm=e&gs_upl=41961179351011852014214216125131114251219610.7.2.1.11110&bav=on.2.or.r_gc.r_pw.,cf.osb&fp=fedcf306da2549b&biw=1366&bih=569).
- <http://www.electrical4u.com/electrical-transmission/insulator-testing.php>.
- Looms, J.S.T., "Insulators for High Voltages", Peter Peregrinus, London 1988.
- Looms, J.S.T., "Insulators for High Voltages", Peter Peregrinus, London 1988.
- Naidu, M.S, V. Kamaraju, "High Voltage Engineering", 1996, ISBN 0-07-136108-1, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Sardjono, H. "Perancangan Sistem Pengukuran Tegangan Tembus Frekuensi rendah (50 Hz . 60 Hz) Untuk Menentukan Nilai Konduktivitas Isolator Tegangan Tinggi Dalam Kondisi Basah", Proceeding PPI – KIM, 2012.
- Uppal, S.L, "Electrical Power", Publishers of Technical Books, 2-B, nath Market, Nai Sarak, DELHI, 1980
- Vosloo, W.L., Holtshausen J.P.,Roediger A.H.A., "Leakage Current Performance of Naturally Aged Non-ceramic Insulators Under a Severe Marine Environment", Africon, September 1996, Stellenbosch.