

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan listrik yang semakin meningkat memaksa pihak PT PLN selaku salah satu penyedia listrik di Indonesia untuk dapat memasok dan mendistribusikan listrik se-efisien dan se-efektif mungkin.

Pemasangan instalasi listrik yang semakin meningkat jumlahnya menyebabkan timbulnya beberapa gejala-gejala yang merugikan baik pada pihak konsumen maupun dari pihak penyedia listrik. Gejala-gejala yang merugikan tersebut didefinisikan sebagai gangguan. Timbulnya berbagai macam gangguan menuntut pihak PT PLN melakukan berbagai macam tindakan pencegahan dan pertahanan guna melindungi peralatan-peralatan listrik dari dampak gangguan-gangguan tersebut.

Saat ini ada dua macam sistem penyaluran udara yang umum digunakan, yakni menggunakan Saluran Kabel Tegangan Menengah dan Saluran Udara Tegangan Menengah. Khususnya untuk sistem Jaringan Tegangan Menengah pada Kabupaten Pasuruan menggunakan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM), konstruksi sistem penyaluran ini merupakan konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Juga merupakan konstruksi terbanyak yang digunakan untuk konsumen Jaringan Tegangan Menengah yang digunakan di Indonesia, namun pada sistem penyaluran semacam ini timbul lebih banyak gangguan.

Salah satu gangguan yang timbul pada sistem penyaluran udara tegangan menengah di Kabupaten Pasuruan adalah gangguan hubung singkat antara fasa dengan tanah yang timbul pada saat kondisi cuaca hujan disertai petir. Salah satu kemungkinan penyebabnya adalah turunnya *BIL* (*basic impulse level*) dari isolator pin 20 kV. Penurunan *BIL* dapat diartikan sebagai penurunan resistansi dari isolator pin. Penurunan *BIL* isolator pin ini terjadi karena terbentuknya lapisan polutan pada permukaan isolator serta diakibatkan juga oleh sambaran petir.

Letak Kabupaten Pasuruan yang berdekatan dengan laut dan banyaknya pabrik yang beroperasi, mengakibatkan tingginya tingkat intensitas polusi isolator pin. Larutan garam dari laut yang bercampur dengan polutan lain yang berasal dari limbah pabrik dapat menempel pada permukaan isolator pin 20 kV, sehingga terbentuklah lapisan konduktif pada permukaan isolator pin.

Timbulnya arus bocor diawali oleh adanya lapisan konduktif pada permukaan isolator. Lapisan konduktif terbentuk akibat adanya kontaminasi polutan di permukaan isolator. Polutan yang menempel pada permukaan isolator dapat bersifat konduktif atau non konduktif.

Polutan konduktif secara langsung dapat menyebabkan timbulnya arus bocor permukaan, sedangkan polutan non konduktif dapat memperbesar tingkat kebasahan permukaan isolator karena sifatnya hidrofilik. Polutan non konduktif juga dapat mengikat partikel lain yang bersifat konduktif.

Dalam keadaan bersih, nilai tahanan isolator sangat besar. Namun apabila terbentuk lapisan konduktif pada permukaan isolator dapat menyebabkan turunnya nilai tahanan isolator. Ketika lapisan konduktif mengalami pembasahan, nilai tahanan isolator akan semakin turun. Penurunan tahanan ini akan memperbesar arus bocor yang mengalir melalui permukaan isolator. Meningkatnya arus bocor akan menimbulkan terjadinya proses penguapan.

Pada daerah yang mendapat rapat arus terbesar akan terbentuk pita kering karena lapisan konduktif pada daerah ini lebih cepat kering. Daerah pita kering mempunyai tahanan yang lebih besar jika dibandingkan daerah konduktif lainnya. Keadaan ini menyebabkan terjadinya peluahan muatan (discharge) melintasi pita kering. Bila busur api memanjang melintasi seluruh permukaan isolator maka akan terjadi lewat-denyar atau flashover.

Salah satu upaya pihak PLN APJ Pasuruan adalah melakukan pemasangan alat bantu isolasi pada bagian konduktor AAAC yang terikat pada isolator pin. Isolasi tersebut dinamakan *PIN-PEX* yang berbahan dasar *Cross-Linked Polyethylene*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang yang diuraikan, maka rumusan masalah ditekankan pada:

1. Bagaimana pengaruh pemasangan *PIN-PEX* terhadap nilai arus bocor dan rugi-rugi energi akibat arus bocor pada isolator pin pada tegangan kerja 20 kV.
2. Bagaimana pengaruh perubahan tingkat pembasahan terhadap nilai arus bocor pada isolator pin sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan *PIN-PEX*.

3. Bagaimana pengaruh variasi tegangan masukan terhadap nilai arus bocor pin isolator sebelum dan sesudah dipasang *PIN-PEX* pada kondisi kering dan basah.

### 1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini pembatasan–pembatasan yang digunakan adalah:

1. Sampel isolator pin jenis P 20 A berbahan dasar porselen diambil langsung dari lapangan, sedangkan *PIN-PEX* berbahan dasar *Cross-Linked Polyethylene*. *PIN-PEX* merupakan pipa untuk saluran air panas (*Westpex*), tebal 0,4 cm, diameter 28 mm dan panjang 50 cm.
2. Konduktor yang digunakan adalah konduktor jenis *AAAC (All-Aluminium-Alloy Conductor)* ukuran 150 mm<sup>2</sup> dengan panjang 50 cm.
3. Variasi tegangan untuk pengujian arus bocor adalah 1 kV sampai dengan 24 kV, dengan setiap kenaikan sebesar 1 kV.
4. Parameter yang diamati adalah besar arus bocor pada isolator pin.

### 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah mengukur, menganalisa dan mengetahui pengaruh pemasangan *PIN-PEX* terhadap besar nilai tahanan, arus bocor pada pin isolator dan rugi – rugi energi yang diakibatkan oleh arus bocor pada pin isolator.

### 1.5 Skematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini tersusun atas 5 bab yaitu:

1. BAB I mengulas tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan uraian sistematika penulisan skripsi.
2. BAB II berisi tinjauan pustaka, membahas tentang teori dasar yang menunjang penulisan skripsi, yakni tentang konsep dasar bahan isolasi, peralatan maupun gangguan pada jaringan tegangan menengah, dan mekanisme terjadinya arus bocor.
3. BAB III dalam bab ini akan diuraikan beberapa metode penelitian yang meliputi studi literatur mengenai arus bocor dan tegangan tembus, kemudian metode pengambilan data-data yang digunakan dalam skripsi, metode analisis data, dan metode pengambilan kesimpulan.

4. BAB IV berisi mengenai urutan pengolahan data yang diambil, pengaruh intensitas hujan serta pemasangan *PIN-PEX* terhadap besarnya arus bocor pada isolator pin akan dijelaskan dalam bab ini.
5. BAB V berisi mengenai kesimpulan dan hasil dari penelitian ini.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

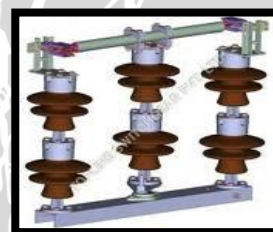
#### 2.1 Isolator

Pada transmisi hantaran udara, suatu konduktor dengan konduktor lain diisolir dengan udara, sedangkan konduktor dengan menara atau tiang pendukung diisolir dengan bahan isolasi padat yang disebut isolator. Jadi, isolator berfungsi sebagai pendukung konduktor dan sekaligus memisahkan konduktor bertegangan dengan bagian yang bertegangan nol (Tobing, 2012: 144).

Selain pada transmisi, isolator juga dijumpai pada jaringan distribusi hantaran udara, gardu induk dan panel pembagi daya. Pada jaringan distribusi hantaran udara digunakan sebagai penggantung atau penopang konduktor. Pada gardu induk digunakan sebagai sebagai pendukung sakelar pemisah, pendukung konduktor penghubung dan penggantung rel daya. Pada panel pembagi daya, rel dengan rel dipisahkan oleh udara, sedangkan rel dengan kerangka pendukung dipisahkan oleh isolator. Pada Gambar 2.1a diperlihatkan isolator tegangan tinggi pada suatu transmisi hantaran udara dan pada Gambar 2.1b diperlihatkan sakelar pemisah (Tobing, 2012: 144).



a. Isolator Transmisi



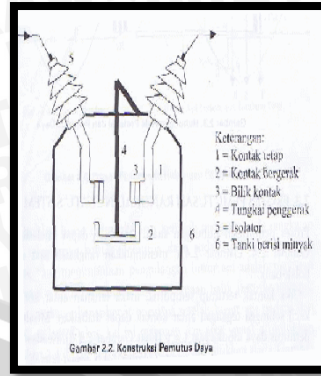
b. Saklar Pemisah

**Gambar 2.1** Isolator pada transmisi dan Saklar pemisah  
Sumber : [www.pln.co.id](http://www.pln.co.id)

Bushing adalah isolator yang digunakan untuk mengisolir badan suatu peralatan dengan konduktor bertegangan tinggi yang menerobos badan peralatan tersebut. Bushing ditemukan pada transformator, kapasitor tegangan tinggi, pemutus daya dan trafo ukur. Pada Gambar 2.2a diperlihatkan bushing pada trafo dan Gambar 2.2b diperlihatkan pemutus daya tegangan tinggi (Tobing, 2012:144).



a. Bushing Trafo



b. Bushing Pemutus Daya

**Gambar 2.2** Bushing pada trafo dan Pemutus daya  
 sumber : electro.neutron.com

### 2.1.1 Jenis Isolator

Dilihat dari lokasi pemasangan isolator terdiri dari isolator pasangan dalam (indoor) dan isolator pasangan luar (outdoor). Isolator pasangan luar dibuat bersirip untuk memperpanjang lintasan arus bocor dan mencegah terjadinya jembatan air yang terbentuk jika isolator dibasahi air hujan (Tobing, 2012: 147).

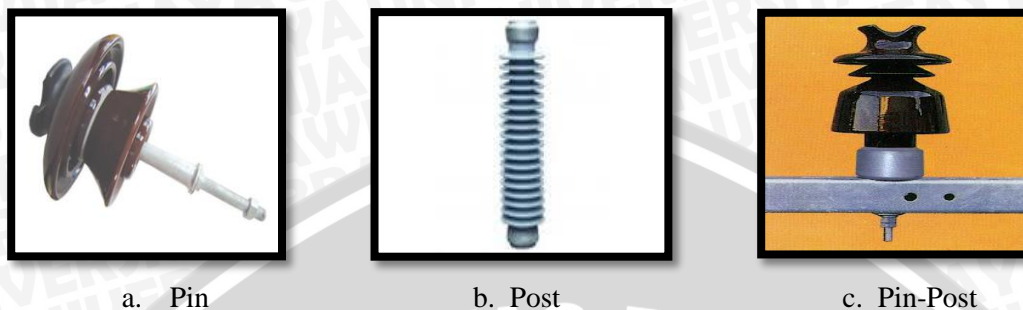
Dilihat dari fungsinya isolator terdiri dari isolator pendukung dan isolator gantung (*suspension*). Isolator pendukung terbagi atas tiga jenis, yaitu: isolator pin, isolator pos, dan isolator pin-pos. yang diperlihatkan pada Gambar 2.3a, 2.3b dan 2.3c (Tobing, 2012: 147).

Isolator jenis pin digunakan untuk jaringan distribusi hantaran udara tegangan menengah, dipasang pada palang tiang tanpa beban tekuk, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4a. Isolator pin dapat juga digunakan untuk tiang yang mengalami beban tekuk, dalam hal ini isolator dipasang ganda pada palang ganda, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4b. Jenis pin-pos digunakan untuk jaringan distribusi hamparan udara tegangan menengah, dipasang pada tiang yang mengalami daya tekuk (Tobing, 2012: 147).

Isolator jenis pos digunakan untuk pasangan dalam, antara lain sebagai penyangga rel daya pada panel tegangan menengah. Isolator jenis pos tidak bersirip seperti halnya isolator jenis pin-pos, karena isolator ini dirancang untuk pasangan dalam. Dilihat dari bentuknya, isolator gantung terdiri dari dua jenis, yaitu isolator piring (Gambar 2.5a) dan isolator batang tonggak (Gambar 2.5b) (Tobing, 2012: 148).

Untuk transmisi tegangan tinggi, isolator piring dirangkai berbentuk rantai, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.5c. Tegangan lebih pada jaringan dapat menimbulkan peristiwa lewat denyar, yaitu terjadinya busur api yang merambat melalui permukaan isolator (Tobing, 2012: 148).

Isolator piring digunakan juga untuk jaringan hantaran udarategangan menengah. Pada jaringan tegangan menengah isolator piring digunakan pada tiang akhir dan tiang sambungan seperti pada Gambar 2.6 (Tobing, 2012: 148).

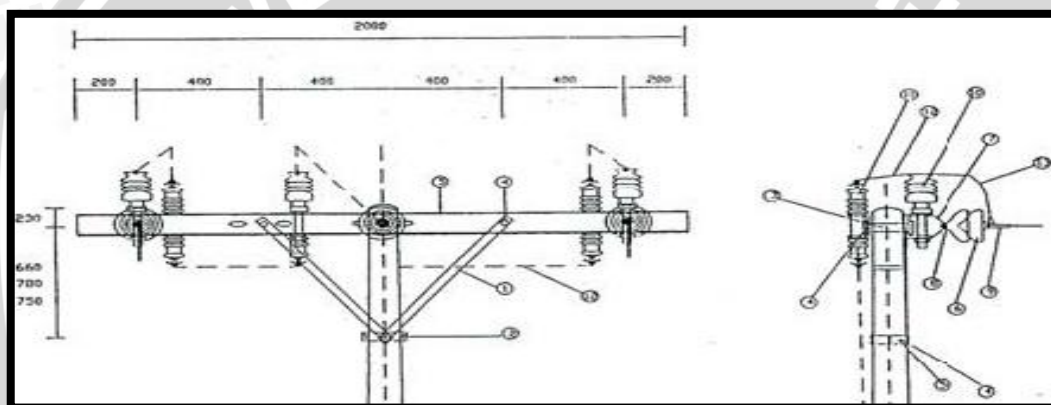


a. Pin

b. Post

c. Pin-Post

**Gambar 2.3** Jenis Isolator Pendukung  
Sumber : [www.laxmielectricalcompany.com](http://www.laxmielectricalcompany.com)

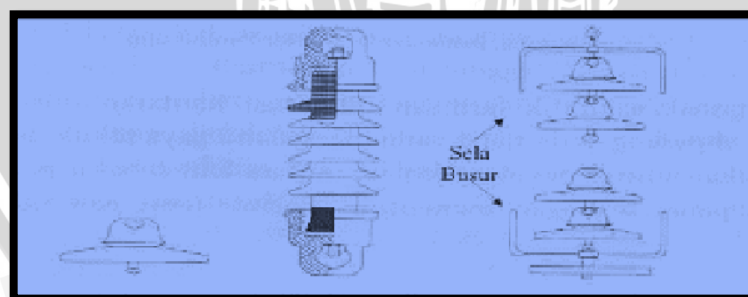


a. Isolator Pin pada Tiang tanpa Gaya

b. Pin pada Tiang Tarik

**Gambar 2.4** Pemasangan Isolator Pin dan Pin-Post

Sumber : diktat PLN Bansel



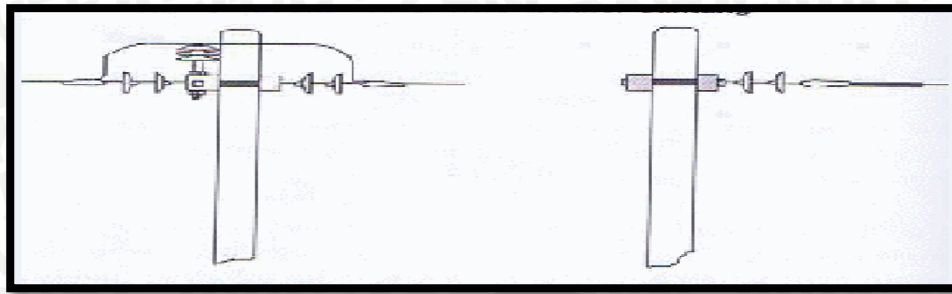
a. Piring

b. Isolator Batang

c. Isolator Rantai

**Gambar 2.5** Bentuk Isolator Gantung

Sumber : Bonggas L.Tobing., 2003



a. Isolator Piring Pada Tiang Penyambung      b. Isolator Piring Pada Tiang Akhir

**Gambar 2.6** Konstruksi Isolator Piring

Sumber : Bonggas L.Tobing., 2003

### 2.1.2 Bahan Dielektrik Isolator

Karakteristik elektrik dan mekanik suatu isolator bergantung pada konstruksi dan bahan yang digunakan. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa salah satu bagian utama suatu isolator adalah bahan dielektrik. Bahan dielektrik isolator harus memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan tidak dipengaruhi oleh kondisi udara disekitarnya (Tobing, 2012: 149).

Dewasa ini, ada tiga jenis bahan dielektrik yang digunakan untuk isolator, yaitu porselen, gelas dan bahan komposit (Tobing, 2012: 149).

#### 1. Porselen

Bahan dielektrik untuk isolator umumnya adalah porselen, karena kekuatan dielektriknya tinggi dan tidak dipengaruhi udara di sekitarnya. Pada Gambar 2.7 ditunjukkan isolator yang terbuat pada bahan porselen (Tobing, 2012: 149). Sampel uji porselen yang tebalnya 1,5 mm, dalam medan elektrik seragam, mempunyai kekuatan elektrik sebesar 22 – 28 kV<sub>rms</sub>/mm. Jika tebal porselen bertambah maka kekuatan elektriknya berkurang, karena medan elektrik di dalam isolator semakin tidak seragam. Bila tebal bertambah dari 10 mm hingga 30 mm, kekuatan elektrik berkurang dari 80 kV<sub>rms</sub>/mm menjadi 55 kV<sub>rms</sub>/mm. kekuatan dielektrik porselen pada tegangan impuls, 50 – 70 % lebih tinggi daripada kekuatan dielektrik frekuensi daya (Tobing, 2012: 149). Kekuatan mekanik porselen bergantung pada cara pembuatannya. Porselen sangat baik jika bekerja memikul beban tekan, tetapi sifat mekanisnya memburuk jika memikul beban tekuk dan semakin memburuk jika memikul beban tarik. Kekuatan mekanis porselen standar berdiameter 2 – 3 cm adalah 45.000 kg/cm<sup>2</sup> untuk beban tekan; 700 kg/cm<sup>2</sup> untuk beban tekuk; dan 300 kg/cm<sup>2</sup> untuk beban tarik. Kekuatan mekanik porselen suatu isolator bergantung pada: konstruksi jepitan, cara



menghubungkan porselen dengan jepitan dan luas penampang porselen. Kekuatan mekanik porselen berkurang dengan penambahan luas penampang porselen dan pengurangan itu lebih besar pada kekuatan mekanik beban tarik dan beban tekuk (Tobing, 2012: 149).

## 2. Gelas

Dewasa ini, gelas semakin banyak digunakan sebagai bahan dielektrik isolator. Pada Gambar 2.8 diperlihatkan isolator piring dan isolator pin yang terbuat dari gelas (Tobing, 2012: 149). Isolator gelas lebih murah daripada porselen, sedangkan karakteristik elektrik dan karakteristik mekanisnya tidak jauh berbeda dari porselen. Karakteristik elektrik dan mekanik gelas bergantung pada komposisi kimiawi dari gelas, khususnya pada kandungan alkali yang terdapat dalam gelas. Adanya larutan alkali dalam komposisi gelas akan menambah sifat higroskopis permukaan isolator sehingga konduktivitas permukaan isolator semakin besar. Akibatnya, sifat elektrik isolator gelas alkali tinggi lebih buruk daripada gelas alkali rendah, juga lebih buruk daripada porselen. Kekuatan elektrik gelas alkali tinggi adalah  $17,9 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$  dan gelas alkali rendah adalah  $48 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ , yakni dua kali lebih tinggi daripada kekuatan elektrik porselen (Tobing, 2012: 150). Jika isolator gelas alkali tinggi memikul tegangan tinggi searah, arus bocor pada isolator tersebut dapat menimbulkan penguraian kimiawi pada gelas. Oleh karena itu isolator gelas alkali tinggi tidak digunakan untuk instalasi tegangan searah. Pada tegangan bolak – balik, penguraian kimiawi karena arus bocor secara praktis tidak terjadi, sehingga penuaan isolator akibat arus bocor berlangsung lebih lambat (Tobing, 2012: 150). Dilihat dari proses pembuatannya, isolator gelas terdiri dari dua jenis, yaitu gelas yang dikuatkan (*annealed glass*) dan gelas yang dikeraskan (*hardened glass*). Kekuatan mekanik sampel uji gelas yang dikuatkan lebih besar daripada porselen, karena regangan mekanik internal pada gelas mudah dihilangkan pada saat proses penguatan. Pada porselen, regangan internal secara praktis tetap ada. Hal ini mengurangi kekuatan mekanik porselen. Gelas alkali tinggi memiliki koefisien pemuaian yang tinggi, sehingga isolator gelas mudah pecah. Peristiwa ini sangat mungkin terjadi jika isolator gelas dioperasikan pada suatu lokasi yang temperaturnya berubah-ubah dengan tajam. Hal ini membuat gelas alkali tinggi dibatasi pemakaiannya hanya untuk instalasi pasangan dalam, tidak untuk instalasi yang mengalami perubahan temperature yang tajam. Isolator untuk instalasi pasangan luar terbuat dari gelas alkali rendah

yang dikuatkan (Tobing, 2012: 150). Gelas alkali tinggi digunakan hanya jika isolator akan dikeraskan. Pengerasan isolator gelas alkali tinggi bertujuan untuk memperoleh isolator yang memiliki kekuatan mekanik yang tinggi. Pengerasan dilakukan dengan memanaskan isolator gelas alkali tinggi sampai mencapai temperatur 650 °C. Setelah itu, udara dingin ditiupkan kedalam gelas. Selama peniupan udara berlangsung, gelas mengalami pendinginan, sehingga lapisan luar gelas menjadi keras, sedangkan bagian dalam gelas mengalami penyusutan. Proses ini bertujuan untuk membuat lapisan luar gelas memiliki kekuatan tarik dan bagian dalam gelas memiliki kekuatan tekanan, maka kerusakan mulai terjadi jika gaya tarik pada lapisan luar melebihi kekuatan tarik gelas. Dengan demikian isolator gelas yang dikeraskan lebih baik daripada isolator gelas yang dikuatkan (Tobing, 2012: 150). Isolator gelas alkali rendah yang dikeraskan dapat menahan beban dinamis dengan baik, sehingga masih layak dipakai sekalipun pernah jatuh dari tempat tinggi. Tetapi ongkos pembuatannya tinggi, karena pemanasan harus berlangsung sampai temperatur gelas mencapai 780 °C. Isolator ini hanya digunakan jika dibutuhkan kekuatan mekanik yang tinggi dan stabil pada setiap perubahan suhu (Tobing, 2012: 151).

### 3. Bahan Komposit

Isolator poselen dan gelas memiliki karakteristik elektrik yang baik, tetapi memiliki kelemahan, yaitu: mudah pecah, dan kemampuannya menahan tegangan berkurang karena polutan yang mudah menempel pada permukaannya. Untuk mengatasi permukaan tersebut dikembangkan jenis isolator komposit. Bahan komposit tertua untuk isolator adalah kertas. Tetapi, akhir-akhir ini paling diminati dan terus dikembangkan adalah karet silikon (*silicon rubber*). Isolator komposit kertas digunakan untuk isolator hantaran udara jenis pos, mantel peralatan uji tegangan tinggi dan *bushing*, isolator komposit ini dibuat dari bahan kertas yang dikeringkan melalui pemanasan. Pada temperature tinggi kertas dilapisi dengan pernis, kemudian digulung membentuk tabung selanjutnya tabung tersebut diawetkan melalui proses pemanasan sehingga tabung menjadi kokoh, permukaan berkilat, dan tidak menjadi lembut jika mengalami pemanasan ulang. Akhirnya permukaan isolator kertas dipernis lagi. Isolator kertas yang diproses seperti ini menghasilkan isolator yang kekuatan elektrik dan kekuatan mekanik yang cukup tinggi (Tobing, 2012: 151). Struktur suatu isolator komposit diperlihatkan pada Gambar 2.9. Bagian utama suatu isolator komposit adalah: inti

berbentuk batang (*rod*), yang terbuat dari bahan komposit, sarung yang terbuat dari bahan komposit, fitting yang terbuat dari bahan logam dan bahan antar-muka (*interface*) (Tobing, 2012: 151). Inti berfungsi memikul beban mekanis isolator: dan terbuat dari *fiber-reinforced plastic* (FRP), yaitu komposit gelas dengan resin epoksi. Sarung merupakan komponen yang menentukan sifat elektrik isolator komposit. Ada beberapa bahan yang dapat digunakan untuk sarung isolator antara lain: *ethylene propylene rubber* (EPR), *ethylene propylene diene methylene* (EPDM), *polytetrafluoro ethylene* (PTFE) dan karet silikon (*silicone rubber*, SR). Bahan yang digunakan untuk fitting, antara lain: baja tempaan, besi lunak (*malleable cast iron*), aluminum, besi tuang grafit, dan lain-lain. Antar-muka berfungsi sebagai medium antara sarung dengan inti; dan antara sarung dengan fitting. Antar-muka terbuat dari bahan *polymer*, *resin hidrolisis* atau *metal stable silicon* (Tobing, 2012: 151).

Isolator komposit memiliki keunggulan dibandingkan dengan isolator porselin maupun isolator gelas, karena isolator komposit memiliki sifat sebagai berikut:

- a. Ringan, karena rapat massanya lebih rendah daripada isolator porselen atau gelas.
- b. Pembuatannya lebih mudah.
- c. Tidak ada rongga udara, sehingga tidak terjadi perluasan sebagian didalam bahan isolator komposit.
- d. Untuk memperoleh jarak lambat yang panjang, sarung dibuat berbentuk sederetan sirip tipis sehingga bentuk isolator lebih sederhana.
- e. Tekanan karena angin terhadap isolator lebih rendah, karena sirip-siripnya tipis.
- f. Karena bentuknya yang sederhana dan bobotnya ringan, maka mudah membawa dan memasangnya.
- g. Permukaan sarung memiliki sifat menolak air (*hydrophobic*), sehingga polutan yang terbawa air tidak menempel permukaan sarung.
- h. Karena polutan tidak menempel pada permukaan isolator, maka tegangan lewat denyarnya tidak menurun karena polusi. Dengan kata lain, isolator komposit cocok dipasang pada daerah yang bobot polusinya berat.
- i. Jika tingkat ketahanan tegangannya hendak dinaikan, cukup mengganti sarungnya dengan sarung yang jarak rambatnya lebih panjang.

Kelemahan yang dimiliki isolator komposit antara lain adalah:

- a. Harga material dasar untuk pembuatan komposit mahal.
- b. Kekuatan mekanismenya lebih rendah.
- c. Kurang terpadu karena ditemukan beberapa antar-muka.
- d. Penuaan lebih cepat, karena timbulnya kerusakan pada permukaan isolator: reaksi suatu unsur kimia pada permukaan isolator; karena radiasi sinar ultraviolet; karena panas dan koronayang timbul pada fitting.
- e. Ketidak cocokan bahan antar-muka yang digunakan dapat menimbulkan korosi atau keretakan.

Dari beberapa sarung komposit yang sudah disebutkan terdahulu, sarung karet silikon lebih disukai, karena memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut:

- a. Sifat *hydrophobic*-nya lebih baik daripada bahan komposit yang lainnya.
- b. Karena sifat *hydrophobic*nya yang baik maka polutan tidak menempel pada permukaan isolator, sehingga isolator tidak membutuhkan pembersihan rutin.
- c. Karena polutan tidak menempel pada permukaan isolator, maka arus bocor yang melalui permukaan isolator karet silicon lebih rendah, sehingga tegangan lewat denyarnya lebih tinggi.
- d. Kekuatan mekanismenya lebih tinggi daripada bahan komposit lainnya.
- e. Sifatnya tidak berubah karena perubahan cuaca.
- f. Lebih tahan terhadap korona, radiasai ultraviolet dan panas.



**Gambar 2.7** Porselen

Sumber : annisaniesya7.blogspot.com



**Gambar 2.8** Gelas

Sumber : Bonggas L.Tobing., 2003



**Gambar 2.9** Bahan Komposit  
Sumber : indonesian.alibaba.com

Contoh spesifikasi suatu isolator komposit seperti pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Spesifikasi isolator komposit

Parameter	Satuan	Besaran
Tegangan nominal	kV <sub>rms</sub>	126
Panjang keseluruhan	mm	1300
Panjang efektif (Jarak busur)	mm	1100
Jumlah sirip	-	23
Diameter sirip besar	mm	192
Diameter sirip kecil	mm	140
Jarak antar sirip berdiameter sama	mm	51
Jarak rambat permukaan	mm	3100
Bobot	Kg	16
Tegangan lewat denyar frekuensi daya (kondisi basah)	kV <sub>rms</sub>	185
Tegangan lewat denyar implus petir	kV <sub>puncak</sub>	550
Kekuatan lentur beban mekanis	kN	10

Sumber : Bonggas L.Tobing., 2003

## 2.2 Deskripsi Umum Jaringan Tegangan Menengah

Pada pendistribusian tenaga listrik ke pengguna tenaga listrik di suatu kawasan, penggunaan sistem Tegangan Menengah sebagai jaringan utama adalah upaya utama menghindari rugi-rugi penyaluran (*losses*) dengan kualitas persyaratan tegangan yang harus dipenuhi oleh PT PLN Persero selaku pemegang Kuasa Usaha Utama sebagaimana diatur dalam UU ketenagalistrikan No 30 tahun 2009.

Dengan ditetapkannya standar Tegangan Menengah sebagai tegangan operasi yang digunakan di Indonesia adalah 20 kV, konstruksi JTM wajib memenuhi kriteria keamanan ketenagalistrikan, termasuk didalamnya adalah jarak aman minimal antara Fasa dengan lingkungan dan antara Fasa dengan tanah, begitu juga kemudahan dalam hal pengoperasian atau pemeliharaan Jaringan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) pada jaringan utama. Hal ini dimaksudkan sebagai usaha menjaga keandalan kontinuitas pelayanan konsumen.

Ukuran dimensi konstruksi selain untuk pemenuhan syarat pendistribusian daya, juga wajib memperhatikan syarat ketahanan isolasi penghantar untuk keamanan pada tegangan 20 kV.

Lingkup Jaringan Tegangan Menengah pada sistem distribusi di Indonesia dimulai dari terminal keluar (*out-going*) pemutus tenaga dari transformator penurun tegangan Gardu Induk atau transformator penaik tegangan pada Pembangkit untuk sistem distribusi skala kecil, hingga peralatan pemisah/proteksi sisi masuk (*in-coming*) transformator distribusi 20 kV-231/400V

Konstruksi jaringan Tenaga Listrik Tegangan Menengah dapat dikelompokkan menjadi 3 macam konstruksi sebagai berikut:

### 2.2.1 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan Tegangan Menengah yang digunakan di Indonesia.

Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton. Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan faktor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan seperti jarak aman minimum yang harus dipenuhi penghantar bertegangan 20 kV tersebut antar Fasa atau dengan bangunan atau dengan tanaman atau dengan jangkauan manusia.

Termasuk dalam kelompok yang diklasifikasikan SUTM adalah juga bila penghantar yang digunakan adalah penghantar berisolasi setengah (*half insulated single core*). Penggunaan penghantar ini tidak menjamin keamanan terhadap tegangan sentuh yang dipersyaratkan akan tetapi untuk mengurangi resiko gangguan temporer khususnya akibat sentuhan tanaman. Saluran Udara Tegangan Menengah ditunjukkan pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)  
Sumber : rakassably.wordpress.com

Kawat tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar alumunium, karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Akan tetapi juga mempunyai kelemahan yaitu untuk besaran tahanan yang sama, tembaga lebih berat dan lebih mahal dari alumunium. Oleh karena itu kawat penghantar alumunium telah mulai menggantikan kedudukan kawat tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat alumunium, digunakan campuran alumunium (*alumunium alloy*), ditunjukkan pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Konduktor Jenis AAAC (*All-Aluminium-Alloy Conductor*)  
Sumber : indonesian.alibaba.com

### 2.2.2 Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM)

Untuk lebih meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi Udara Tegangan Menengah 20 kV, dapat juga digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Kabel udara tegangan menengah ditunjukkan pada Gambar 2.12.

Isolasi penghantar tiap Fasa tidak perlu dilindungi dengan pelindung mekanis. Berat kabel pilin menjadi pertimbangan terhadap pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton penopangnya.



**Gambar 2.12** Kabel Udara Tegangan Menengah  
Sumber : Bonggas L.Tobing., 2003

### 2.2.3 Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah (SKTM)

Konstruksi SKTM ini adalah konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan tenaga listrik Tegangan Menengah, tetapi relatif lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama. Kabel tanah tegangan menengah ditunjukkan pada Gambar 2.13.

Keadaan ini dimungkinkan dengan konstruksi isolasi penghantar per-fasa dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan. Pada rentang biaya yang diperlukan, konstruksi ditanam langsung adalah termurah bila dibandingkan dengan penggunaan conduit atau bahkan tunneling (terowongan beton).



**Gambar 2.13** Kabel Tanah Tegangan Menengah  
Sumber : indonesian.alibaba.com

Penggunaan Saluran Kabel bawah tanah Tegangan Menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik adalah sebagai upaya utama peningkatan kualitas pendistribusian. Dibandingkan dengan SUTM, penggunaan SKTM akan memperkecil resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal/meningkatkan keamanan ketenagalistrikan. Secara garis besar, termasuk dalam kelompok SKTM adalah:



1. SKTM bawah tanah – underground MV Cable.
2. SKTM laut – Submarine MV Cable

Selain lebih aman, namun penggunaan SKTM lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama, sebagai akibat konstruksi isolasi penuh penghantar per-fasa dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan sesuai keamanan ketenagalistrikan.

Penerapan instalasi SKTM seringkali tidak dapat lepas dari instalasi Saluran Udara Tegangan Menengah sebagai satu kesatuan sistem distribusi sehingga masalah transisi konstruksi diantaranya tetap harus dijadikan perhatian.

### **2.3 Komponen Utama Saluran Udara Tegangan Menengah**

Komponen utama pada saluran udara tegangan menengah adalah penghantar, peralatan hubung dan tiang.

#### **2.3.1 Penghantar**

Penghantar yang digunakan pada saluran udara tegangan menengah adalah penghantar telanjang, penghantar berisolasi setengah, penghantar berisolasi penuh.

##### **2.3.1.1 Penghantar Telanjang (*Bare Conductor*)**

Konduktor dengan bahan utama tembaga (Cu) atau *alluminium* (Al) yang di pilin bulat padat, sesuai SPLN 42 -10: 1986 dan SPLN 74: 1987

Pilihan konduktor penghantar telanjang yang memenuhi pada dekade ini adalah AAC atau AAAC. Sebagai akibat tingginya harga tembaga dunia, saat ini belum memungkinkan penggunaan penghantar berbahan tembaga sebagai pilihan yang baik.

##### **2.3.1.2 Penghantar Berisolasi Setengah AAAC-S (*half insulated single core*)**

Konduktor dengan bahan utama aluminium ini diisolasi dengan material XLPE (*crosslink polyetilene* langsung), dengan batas tegangan 6 kV dan harus memenuhi SPLN No 43-5-6 tahun 1995.

##### **2.3.1.3 Penghantar Berisolasi Penuh (*Three single core*)**

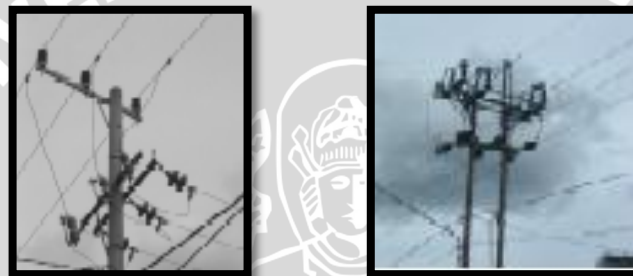
XLPE dan berselubung PVC berpenggantung penghantar baja dengan tegangan Pengenal 12/20 (24) kV Penghantar jenis ini khusus digunakan untuk SKUTM dan berisolasi penuh. SPLN 43-5-2: 1995-Kabel.



**Gambar 2.14** Penghantar Berisolasi Penuh (Three Single Core)  
Sumber : indonesian.alibaba.com

### 2.3.2 Peralatan Hubung (*Switching*)

Pada percabangan atau pengalokasian seksi pada jaringan SUTM untuk maksud kemudahan operasional harus dipasang Pemutus Beban (*Load Break Switch*), selain LBS dapat juga dipasangkan *Fused Cut-Out* (FCO). LBS dan FCO ditunjukkan pada Gambar 2.15.



**Gambar 2.15** *Fuse Cut-Out* dan *Load Break Switch*  
Sumber : dokumentasi pribadi

### 2.3.3 Tiang

Tiang untuk saluran udara tegangan menengah adalah tiang kayu, tiang besi dan tiang beton

#### 2.3.3.1 Tiang Kayu

SPLN 115: 1995 berisikan tentang Tiang Kayu untuk jaringan distribusi, kekuatan, ketinggian dan pengawetan kayu sehingga pada beberapa wilayah perusahaan PT PLN Persero bila suplai kayu memungkinkan, dapat digunakan sebagai tiang penopang penghantar penghantar SUTM.

#### 2.3.3.2 Tiang Besi

Adalah jenis tiang terbuat dari pipa besi yang disambungkan hingga diperoleh kekuatan beban tertentu sesuai kebutuhan. Walaupun lebih mahal, pilihan tiang besi untuk area/wilayah tertentu masih diijinkan karena bobotnya lebih ringan dibandingkan dengan tiang beton. Pilihan utama juga dimungkinkan bilamana total biaya material dan

transportasi lebih murah dibandingkan dengan tiang beton akibat diwilayah tersebut belum ada pabrik tiang beton.

### 2.3.3.3 Tiang Beton

Untuk kekuatan sama, pilihan tiang jenis ini dianjurkan digunakan di seluruh PLN karena lebih murah dibandingkan dengan jenis konstruksi tiang lainnya termasuk terhadap kemungkinan penggunaan konstruksi rangkaian besi profil.

## 2.4 Gangguan pada Jaringan Distribusi

Gangguan terdiri dari gangguan temporer atau permanen, rata-rata jumlah gangguan temporer lebih tinggi dibandingkan gangguan permanen. Kebanyakan gangguan temporer di amankan dengan *circuit breaker* (CB) atau pengaman lainnya.

Gangguan permanent adalah gangguan yang menyebabkan kerusakan permanent pada sistem. Seperti kegagalan isolator, kerusakan penghantar, kerusakan pada peralatan seperti transformator atau kapasitor. Pada saluran bawah tanah hampir semua gangguan adalah gangguan permanen. Kebanyakan gangguan peralatan akan menyebabkan hubung singkat.

Gangguan permanen hampir semuanya menyebabkan pemutusan/gangguan pada konsumen. Untuk melindungi jaringan dari gangguan digunakan *fuse*, *recloser* atau CB.

### 2.4.1 Jenis Gangguan

Pada dasarnya gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi saluran 20 kV dapat digolongkan menjadi dua macam yaitu gangguan dari dalam sistem dan gangguan dari luar sistem. Gangguan yang berasal dari luar sistem disebabkan oleh sentuhan daun/pohon pada penghantar, sambaran petir, manusia, binatang, cuaca dan lain-lain. Sedangkan gangguan yang datang dari dalam sistem dapat berupa kegagalan dari fungsi peralatan jaringan, kerusakan dari peralatan jaringan, kerusakan dari peralatan pemutus beban dan kesalahan pada alat pendeteksi. Klasifikasi gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi (*Hutauruk, 1987: 4*) adalah:

a. Dari jenis gangguannya:

- 1) Gangguan dua fasa atau tiga fasa melalui hubungan tanah
- 2) Gangguan fasa ke fasa
- 3) Gangguan dua fasa ke tanah
- 4) Gangguan satu fasa ke tanah atau gangguan tanah

b. Dari lamanya gangguan:

1) Gangguan temporer

Gangguan yang bersifat temporer ini apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut tidak akan lama dan dapat normal kembali. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutus sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Kemudian disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila gangguan temporer sering terjadi dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen. Salah satu contoh gangguan yang bersifat temporer adalah gangguan akibat sentuhan pohon yang tumbuh disekitar jaringan, akibat binatang seperti burung kelelawar, ular dan layangan. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya yang disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila gangguan temporer sering terjadi maka hal tersebut akan menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen.

2) Gangguan permanen

Gangguan permanen tidak akan dapat hilang sebelum penyebab gangguan dihilangkan terlebih dahulu. Gangguan yang bersifat permanen dapat disebabkan oleh kerusakan peralatan, sehingga gangguan ini baru hilang setelah kerusakan ini diperbaiki atau karena ada sesuatu yang mengganggu secara permanen. Untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut. Terjadinya gangguan ditandai dengan jatuhnya pemutus tenaga, untuk mengatasinya operator memasukkan tenaga secara manual. Contoh gangguan ini yaitu adanya kawat yang putus, terjadinya gangguan hubung singkat, dahan yang menimpa kawat fasa dari saluran udara, adanya kawat yang putus, dan terjadinya gangguan hubung singkat.

#### 2.4.2 Penyebab Gangguan

Gangguan biasanya diakibatkan oleh kegagalan isolasi di antara penghantar fasa atau antara penghantar fasa dengan tanah. Secara nyata kegagalan isolasi dapat menghasilkan beberapa efek pada sistem yaitu menghasilkan arus yang cukup besar, atau

mengakibatkan adanya impedansi diantara konduktor fasa atau antara penghantar fasa dan tanah.

Penyebab terjadinya gangguan pada jaringan distribusi disebabkan karena:

- a. kesalahan mekanis
- b. kesalahan thermis
- c. karena tegangan lebih
- d. karena material yang cacat atau rusak
- e. gangguan hubung singkat
- f. konduktor putus

Faktor-faktor penyebab terjadinya gangguan pada jaringan distribusi adalah karena:

- a. Surja petir atau surja hubung
- b. Burung atau daun – daun
- c. Polusi debu
- d. Pohon-pohon yang tumbuh di dekat jaringan
- e. Keretakan pada isolator
- f. Andongan yang terlalu kendor

Secara umum gangguan dibedakan pada dua kondisi tegangan saat terjadinya gangguan, yaitu gangguan terjadi pada tegangan normal dan gangguan terjadi pada tegangan lebih.

#### **2.4.2.1 Gangguan Terjadi pada Kondisi Tegangan Normal.**

Gangguan pada kondisi tegangan normal terjadi dikarenakan pemerosotan dari isolasi dan kejadian-kejadian tak terduga dari benda asing. Pemerosotan isolasi dapat terjadi karena polusi dan penuaan. Saat ini batas ketahanan isolasi tertinggi (*high insulation level*) sekitar 3-5 kali nilai tegangan nominalnya.

Tapi dengan adanya pengotoran (*pollution*) pada isolator yang biasanya disebabkan oleh penumpukan jelaga (*soot*) atau debu (*dust*) pada daerah industri dan penumpukan garam (*salt*) karena angin yang mengandung uap garam menyebabkan kekuatan isolasi akan menurun. Hal inilah yang menyebabkan penurunan resistansi dari isolator dan menyebabkan kebocoran arus. Kebocoran arus yang kecil ini mempercepat kerusakan isolator. Selain itu pemuaiian dan penyusutan yang berulang-ulang dapat juga menyebabkan kemerosotan resistansi dari isolator.

#### 2.4.2.2 Gangguan Terjadi pada Kondisi Tegangan Lebih

Gangguan pada kondisi tegangan lebih salah satunya disebabkan sambaran petir yang tidak cukup diamankan oleh alat-alat pengamanan petir. Petir menghasilkan surja tegangan yang sangat tinggi pada sistem tenaga listrik, besarnya tegangan dapat mencapai jutaan volt dan ini tidak dapat ditahan oleh isolasi. Surja ini berjalan secepat kilat pada jaringan listrik, faktor yang membatasinya adalah impedansi dan resistansi dari saluran. Untuk mengatasi surja petir ini sehingga tidak mengakibatkan kerusakan pada isolasi dan peralatan sistem tenaga lainnya, diperlukan suatu peralatan proteksi khusus untuk dapat mengatasi surja petir ini.

#### 2.4.2.3 Akibat dari Gangguan

Akibat yang paling serius dari gangguan adalah kebakaran yang tidak hanya akan merusak peralatan dimana gangguan terjadi tetapi bias berkembang ke sistem dan akan mengakibatkan kegagalan total dari sistem. Berikut ini akibat- akibat yang disebabkan oleh gangguan:

- a. Penurunan tegangan yang cukup besar pada sistem daya sehingga dapat merugikan pelanggan atau mengganggu kerja peralatan listrik.
- b. Bahaya kerusakan pada peralatan yang diakibatkan oleh busur api listrik (*arcing*).
- c. Bahaya kerusakan pada peralatan akibat pemanasan berlebih (*overheating*) dan akibat tekanan mekanis (alat pecah dan sebagainya).
- d. Tergangguanya stabilitas sistem dan ini dapat menimbulkan pemadaman menyeluruh pada sistem tenaga listrik.
- e. Menyebabkan penurunan tegangan sehingga koil tegangan relai gagal bertahan.

### 2.5 Arus Bocor

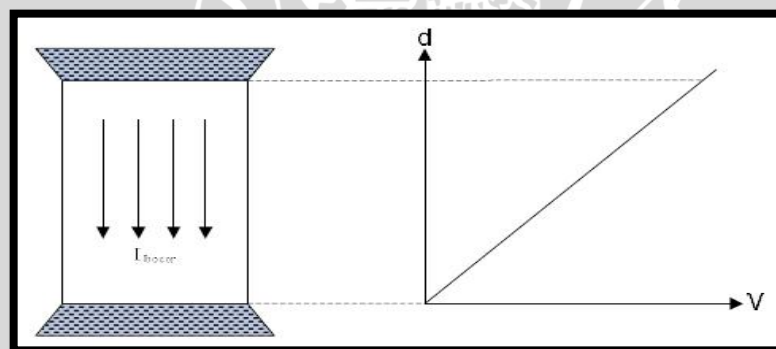
Arus bocor adalah arus yang mengalir melalui pengaman konduktor tanah ke tanah. Dalam ketiadaan koneksi/hubungan tanah, arus bocorlah yang dapat mengalir dari bagian permukaan bahan non konduktif ke tanah.

Timbulnya arus bocor diawali oleh adanya lapisan konduktif pada permukaan isolator. Lapisan konduktif terbentuk akibat adanya kontaminasi polutan di permukaan isolator. Polutan yang menempel pada permukaan isolator dapat bersifat konduktif atau non konduktif. Polutan konduktif secara langsung dapat menyebabkan timbulnya arus bocor permukaan, sedangkan polutan non konduktif dapat memperbesar tingkat

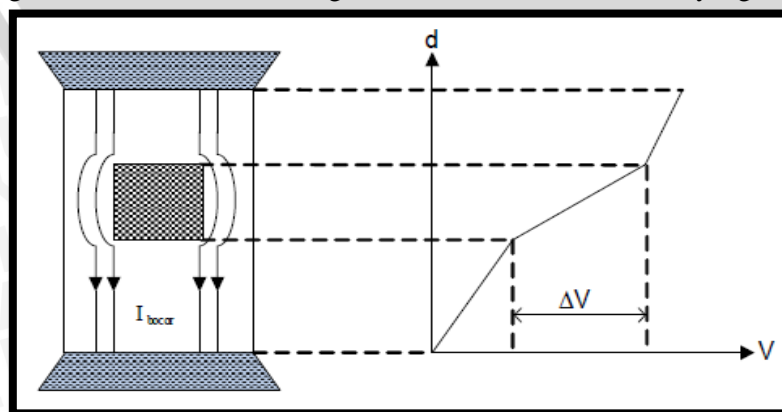
kebasahan permukaan isolator karena sifatnya hidrofilik. Polutan non konduktif juga dapat mengikat partikel lain yang bersifat konduktif.

Permukaan isolator yang seharusnya memiliki tahanan listrik yang besar mengalami penurunan nilai tahanan listrik akibat adanya lapisan konduktif dan kontaminasi air, sehingga menyebabkan peningkatan arus bocor pada permukaan isolator. Temperatur yang tinggi pada permukaan isolator mengakibatkan terjadinya penguapan sebagian pada permukaan isolator yang basah, sehingga dapat dilalui arus bocor dengan kerapatan tinggi. Oleh karena itu, terbentuklah pita kering atau biasa disebut *dry band*.

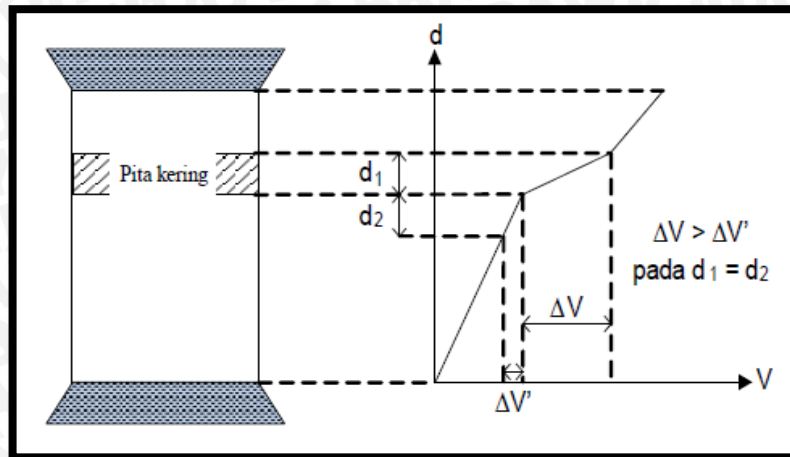
Terbentuknya pita kering ini menyebabkan gangguan medan listrik di sepanjang permukaan sehingga terjadi tegangan percikan (*spark over*) dan menimbulkan pelepasan muatan di daerah tertentu. Mekanisme terbentuknya pita kering dapat dilihat dalam Gambar 2.16. Pita kering memiliki tahanan arus merayap yang lebih besar daripada daerah yang masih basah. Dengan demikian, tegangan jatuh yang terjadi di daerah kering ( $\Delta V$ ) lebih besar daripada tegangan jatuh di daerah basah ( $\Delta V'$ ). Pada jarak  $d_1$  yang sama dengan  $d_2$ , tegangan jatuh ini menimbulkan kuat medan yang besar sehingga udara diantaranya tidak kuat menahan medan tersebut dan terjadi pelepasan muatan (*discharge*).



a. Isolator yang Memiliki Permukaan dengan Kekotoran dan Kebasahan yang Homogen



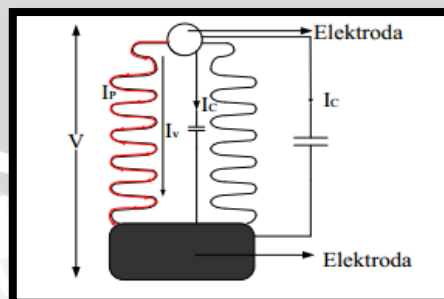
b. Sebagian Permukaan Isolator menjadi Lebih Kering



c. Pengeringan Membentuk Pita Kering akibat Kerapatan Arus yang Relatif Lebih Besar

**Gambar 2.16** Mekanisme terbentuknya Pita Kering  
 Sumber : Valdi Rizki Yandri, Nurhatisyah., 2012

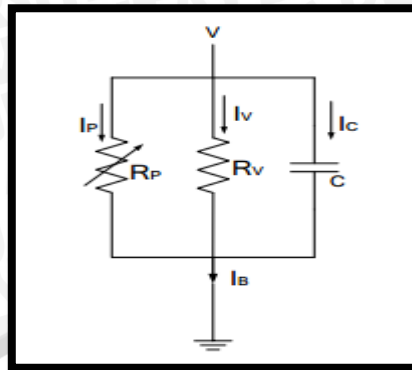
Apabila isolator memikul tegangan searah, maka arus akan mengalir melalui permukaan dan bagian dalam isolator. Arus yang melalui permukaan disebut arus permukaan. Sedangkan hambatan yang dialami arus ini disebut tahanan permukaan. Arus yang melalui bagian dalam isolator disebut arus volume dan hambatan yang dialami arus tersebut disebut tahanan volume. Besarnya tahanan volume dipengaruhi oleh bahan isolator yang digunakan. Sedangkan besarnya tahanan permukaan dipengaruhi oleh kondisi dari permukaan isolator. Jumlah arus volume dan arus permukaan disebut arus bocor. Jika tegangan yang dipikul isolator adalah tegangan AC, maka selain kedua jenis arus tersebut, pada isolator juga mengalir arus kapasitif. Arus kapasitif terjadi karena adanya kapasitansi yang dibentuk isolator dengan elektroda. Pada Gambar 2.17 ditunjukkan arus permukaan, arus volume dan arus kapasitif yang mengalir pada suatu isolator.



**Gambar 2.17** Arus Bocor pada Permukaan Isolator  
 Sumber : A Ivran., 2000



Rangkaian listrik ekivalen suatu isolator ditunjukkan pada Gambar 2.18.



**Gambar 2.18** Rangkaian Listrik Ekivalen Isolator  
Sumber : A Ivran., 2000

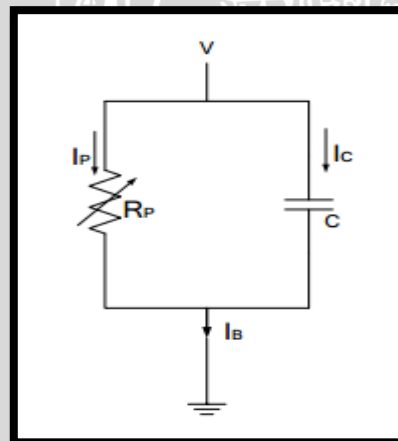
Menurut Gambar 2.18, arus bocor yang mengalir melalui suatu isolator adalah:

$$I_B = I_p + I_c + I_v \quad (2-1)$$

Karena tahanan volume relatif besar dibandingkan dengan tahanan permukaan, maka menyebabkan arus volume dapat diabaikan. Sehingga, arus bocor total menjadi:

$$I_B = I_p + I_c \quad (2-2)$$

Dengan demikian, tahanan ekivalen isolator menjadi seperti pada Gambar 2.19.



**Gambar 2.19** Rangkaian Ekivalen Arus Bocor pada Isolator  
Sumber : A Ivran., 2000

Tahanan permukaan isolator dapat bervariasi, bergantung pada material yang menempel pada permukaan isolator. Keadaan iklim, daerah pemasangan isolator serta kelembaban udara menjadi faktor yang mempengaruhi besar dari tahanan permukaan isolator. Polutan yang menempel pada permukaan isolator akan menyebabkan tahanan

permukaan isolator turun dan meningkatkan besar arus permukaan yang mengalir pada permukaan isolator sehingga arus bocor semakin besar.

Lingkungan tropis ditandai dengan kelembaban tinggi, curah hujan tinggi, radiasi sinar matahari tinggi dan frekuensi petir cukup tinggi dibandingkan dengan iklim lain. Wilayah dataran rendah memiliki kisaran temperatur 30 – 35 °C dan kelembaban 50 – 80 % sedangkan wilayah dataran tinggi memiliki kisaran temperatur 20 – 25 °C dan kelembaban 70 – 98 %. (Yandri Kahar, 1998).

## 2.6 Resistivitas

Sesuai dengan fungsinya bahan isolasi yang baik adalah bahan isolasi yang resistivitasnya besar tak berhingga, tetapi pada kenyataannya bahan yang demikian belum bisa diperoleh. Sampai saat ini semua bahan isolasi masih mengalirkan arus listrik (walaupun kecil) yang disebut arus bocor. Hal ini menunjukkan bahwa resistansi bahan isolasi bukan tidak terbatas besarnya (Gatot Priowirjanto, 2003:30).

Besarnya resistansi bahan isolasi sesuai dengan Hukum Ohm adalah:

$$R_i = \frac{V}{I_b} \quad (2-8)$$

Dimana :

$R_i$  = Resistansi isolasi (ohm)

$V$  = Tegangan yang digunakan (volt)

$I_b$  = Arus bocor (ampere)

Jika diperhatikan lebih jauh, terdapat dua macam resistansi yaitu resistansi permukaan dan resistansi volume. Resistansi volume mengakibatkan arus bocor ( $I_v$ ), sedangkan resistansi permukaan menyebabkan mengalirnya arus bocor ( $I_p$ ).

$R_v$  dan  $R_p$  terhubung secara paralel, sehingga berdasarkan Hukum Kirchoff 1:

$$I_b = I_v + I_p \quad (2-3)$$

Dimana:

$I_b$  = Arus bocor total (ampere)

$I_v$  = Arus bocor yang disebabkan resistansi volume (ampere)

$I_p$  = Arus bocor yang disebabkan resistansi permukaan (ampere)

Dengan:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_p} \quad (2-4)$$

$$R_i = \frac{R_v \times R_p}{R_v + R_p} \quad (2-5)$$

Dimana:

$R_i$  = Resistansi total (ohm)

$R_v$  = Resistansi volume (ohm)

$R_p$  = Resistansi permukaan (ohm)

Besarnya resistivitas volume adalah:

$$R_v = \rho_v \frac{l}{A} \quad (2-6)$$

$\rho_v$  = Resistivitas volume (ohm-meter)

$l$  = Panjang bagian yang dilewati arus (meter)

$A$  = Luas penampang ( $m^2$ )

Besarnya resistivitas permukaan di antara 2 bidang seluas  $b$  pada jarak  $a$  adalah:

$$R_v = \rho_v \frac{a}{b} \quad (2-7)$$

$\rho_v$  = Resistivitas volume (ohm-meter)

$a$  = jarak antara 2 bidang (meter)

$b$  = Luas bidang ( $m^2$ )

Definisi dari resistivitas permukaan adalah resistansi pada permukaan persegi suatu bahan waktu arus mengalir di sisi lain dari penampang tersebut (Gatot Priowirjanto, 2003:31).

Menurut Gatot Priowirjanto (2003:32) beberapa hal yang harus diperhatikan sehubungan dengan resistivitas adalah:

- Baik resistivitas volume maupun resistivitas permukaan akan berkurang besarnya jika suhu dinaikkan.
- Untuk bahan isolasi yang higroskopis, di daerah-daerah yang lembab resistivitasnya akan turun secara mencolok.
- Resistivitas akan turun jika tegangan yang diberikan naik.

## 2.7 Penentuan Trend dan Koefisien Korelasi

Trend Linier adalah trend yang variabel X-nya berpangkat paling tinggi 1. Trend linier memiliki persamaan  $Y = aX + b$ , dimana nilai Y pada penelitian ini adalah variabel arus bocor sedangkan nilai X adalah variabel tegangan. Untuk menentukan garis trend, terlebih dahulu mencari nilai a dan b. Artinya, jika nilai a dan b sudah diketahui maka

garis trend dapat dibuat. Nilai a dan b dapat ditentukan dengan 2 metode yaitu metode kuadrat terkecil dan metode matematis. Penentuan garis trend dalam skripsi ini menggunakan metode kuadrat terkecil dengan persamaan 2-8 dan 2-9.

$$a = \frac{\sum Y \times \sum X^2 - \sum X \times \sum XY}{n \times \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2-8)$$

$$b = \frac{n \times \sum Y^2 - \sum X \times \sum XY}{n \times \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2-9)$$

Nilai dari konstanta b harus sama dengan nol, sesuai dengan hukum Ohm yakni tegangan sama dengan nilai resistansi dikalikan dengan arus. Arus bocor tidak akan muncul ketika tidak ada catu tegangan.

Koefisien korelasi adalah indeks atau angka yang digunakan untuk mengukur hubungan antara dua variabel yang datanya berbentuk data interval atau rasio. Koefisien korelasi dapat ditentukan dengan 2 metode yaitu *least square* dan *product moment*. Penentuan koefisien korelasi di dalam skripsi ini menggunakan metode *product moment*, dengan persamaan 2-10.

$$R = \frac{n \times \sum Y^2 - \sum X \times \sum Y}{\sqrt{(n \times \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \times \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (2-10)$$

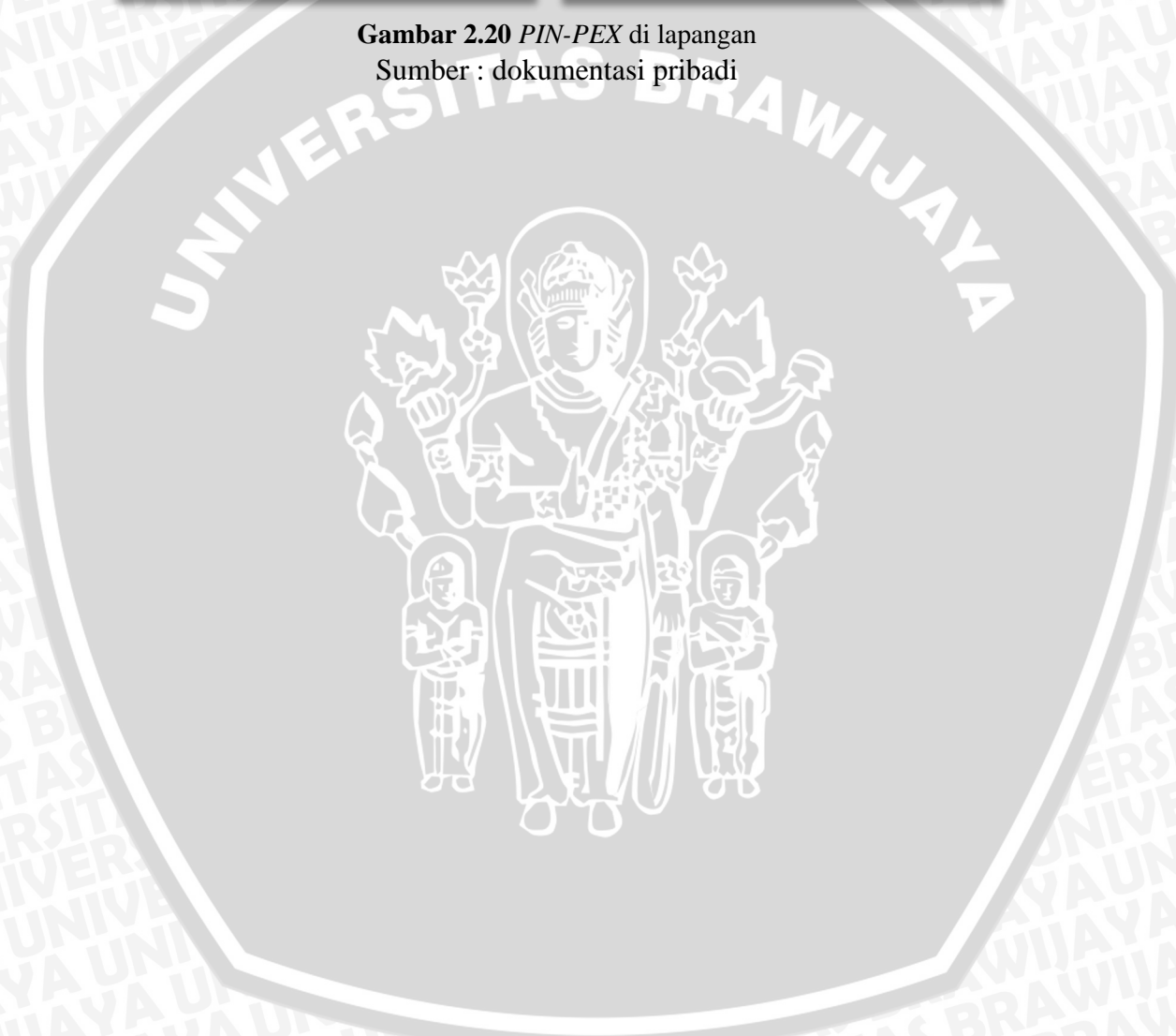
## 2.8 PIN-PEX

Bahan dasar *PIN-PEX* adalah *PEX* (*cross linked polyethylene*) yang diperoleh dengan merubah bahan thermoplastic dari *low density polyethylene* menjadi bahan *thermosetting* dengan proses *cross linking*. Pada *polyethylene*, molekul-molekul karbon dan *hydrogen* mempunyai bentuk seperti rantai yang fleksibel, rantai-rantai ini saling berdiri sendiri. Pada temperatur tinggi, molekul-molekul ini mudah berubah bentuk, sedangkan molekul-molekul *PEX* terikat dalam jaringan dan lebih tahan terhadap perubahan suhu dan bentuk.

*PIN-PEX* dapat diartikan sebagai pipa yang berbahan dasar *cross linked polyethylene* yang dipasang pada bagian konduktor AAAC yang bersentuhan dengan isolator pin. Pemasangan *PIN-PEX* ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 PIN-PEX di lapangan  
Sumber : dokumentasi pribadi



## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Studi Literatur

Dalam penyusunan penelitian ini, pencarian dan pengumpulan data yang berkaitan dengan penelitian ini bisa didapat dari antara lain:

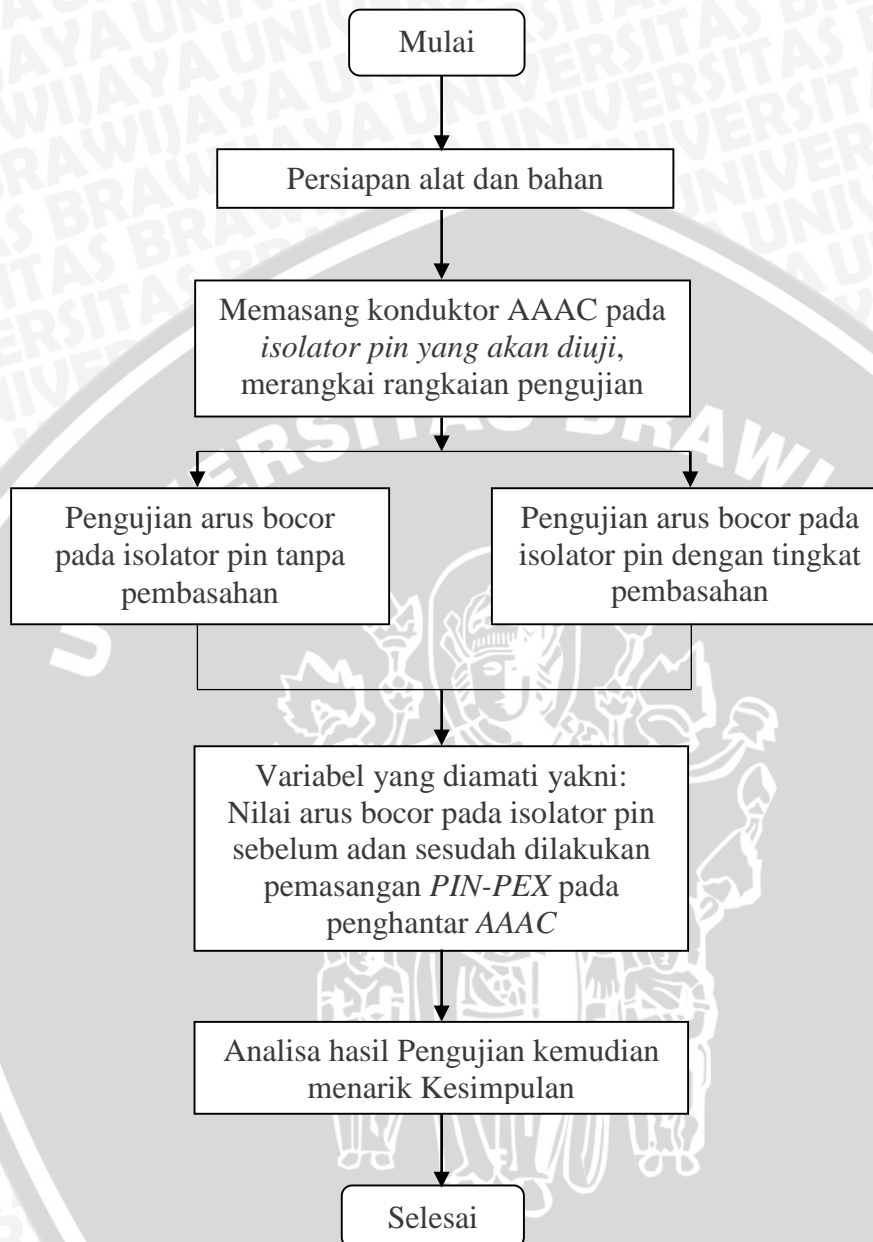
1. Informasi internet
2. Pustaka-pustaka referensi
3. Pustaka penunjang

Studi literatur yang dilakukan bertujuan untuk mengkaji hal-hal yang berhubungan dengan teori-teori yang mendukung penelitian ini. Teori-teori yang dikaji adalah sebagai berikut:

1. Teori umum mengenai bahan isolasi.
2. Teori umum mengenai jaringan tegangan menengah.
3. Teori umum mengenai gangguan pada jaringan tegangan menengah.
4. Teori umum mengenai arus bocor
5. Teori umum mengenai resistivitas dan permitivitas

### 3.2 Langkah Pengujian

Langkah – langkah pengujian yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Diagram Pengujian Arus Bocor pada Isolator Pin

### 3.3 Alat dan Bahan

#### 3.3.1 *PIN-PEX*

Gambar pipa *PEX* ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan pemasangan *PIN-PEX* pada penghantar AAAC ditunjukkan pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.2** Pipa PEX  
Sumber : dokumentasi pribadi



**Gambar 3.3** Pemasangan PIN-PEX  
Sumber : dokumentasi pribadi

### 3.3.2 Peralatan Pengujian

Peralatan yang digunakan dalam pengujian arus bocor pada pin isolator adalah sebagai berikut:

1. Peralatan pengujian tegangan tinggi yang terdiri dari trafo uji dan *DSM*.
2. *Thermometer*, *barometer*, dan *hygrometer* digunakan untuk mengetahui kondisi lingkungan saat pengujian
3. Seperangkat alat pembasahan antara lain *chamber*, *valve*, *sprayer*, *manometer* dan alat pembantu penyemprot
4. *Amperemeter* yang digunakan sebagai alat pengukur arus bocor.
5. Sela Bola sebagai peralatan pengaman *amperemeter* terhadap arus lebih, jarak sela bola dibuat tetap yakni 5 mm.

### 3.4 Tempat Penelitian

Pengujian dilaksanakan pada Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan Elektro Universitas Brawijaya.

### 3.5 Rangkaian Pengujian

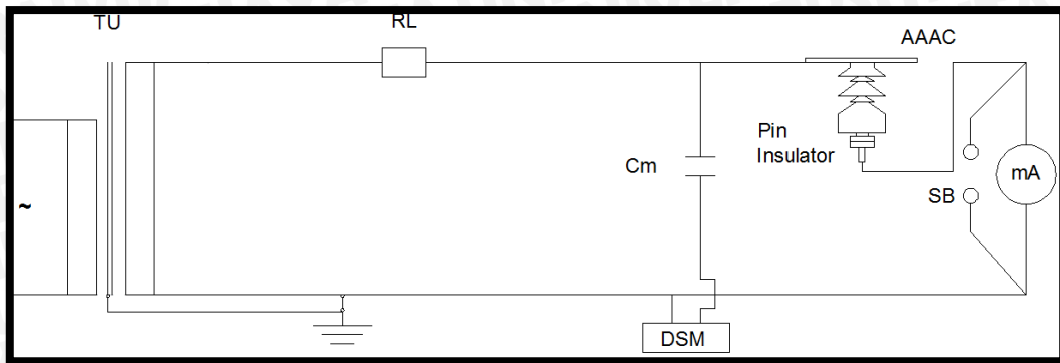
Pengukuran arus bocor dilakukan dengan menggunakan tegangan tinggi bolak-balik (AC), hal ini bertujuan untuk merepresentasikan kondisi sebenarnya dilapangan dengan tegangan sistem yang digunakan pada jaringan tegangan menengah. Pada pengukuran arus bocor digunakan sela bola sebagai pengaman peralatan pengujian terhadap tegangan lebih. Besar arus bocor akan langsung ditampilkan pada miliampere digital bolak balik yang terpasang seri dengan obyek uji.

Tegangan kerja yang dikenakan pada isolator pin dinaikan secara bertahap baik dalam keadaan kering maupun dengan beberapa tingkat pembasahan. Pada setiap tahap

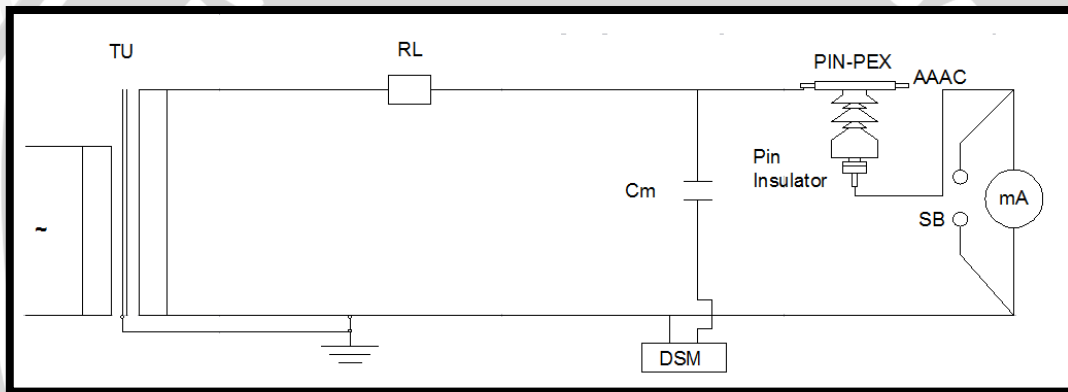


tegangan kerja diukur arus bocornya. Untuk menghindari kesalahan pengukuran akibat pemanasan, maka lama pengukuran arus bocor diusahakan dilakukan sesingkat mungkin.

Rangkaian pengujian arus bocor pada isolator pin sebelum dilakukan pemasangan *PIN-PEX* ditunjukkan pada Gambar 3.5.



a. Sebelum pemasangan *PIN-PEX*



b. Setelah pemasangan *PIN-PEX*

**Gambar 3.4** Rangkaian Pengujian Arus Bocor pada Isolator Pin

- Keterangan :
- TU : Trafo uji 1 fasa 3 belitan 220 V/100 kV, 5kVA.
  - $R_L$  : Resistor pembatas arus sebagai pengaman trafo uji, 10 M $\Omega$ .
  - SB : Sela bola sebagai proteksi arus lebih.
  - $C_M$  : Kapasitor ukur 10.000 pF.
  - $R_i$  : Resistor 280 M $\Omega$  sebagai pembatas arus untuk mengamankan osiloskop.
  - DSM : Alat ukur tegangan tinggi AC.
  - Pin Insulator : Isolator uji.
  - mA : *Amperemeter*, digunakan sebagai alat pengukur arus bocor.
  - PIN-PEX* : Lapisan isolasi *PIN-PEX*.

### 3.6 Pengukuran Model Curah Hujan

Penggunaan air untuk pembasahan pada isolator rantai, menggunakan volume air yang telah dilakukan pengukuran sebelumnya dan dikondisikan seperti terjadi hujan atau hujan buatan. Dengan menggunakan alat ukur tekanan yang sudah terpasang di pompa

air sebagai acuan kekuatan semburan air yang dikeluarkan. Maka didapatkan volume air seperti pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Volume air yang tertampung pada tiap tekanan

No.	Tekanan (psi)	Volume Air (ml)	Intensitas Hujan (mm/mnt)
1	4	2473	2.47
2	5	2749	2.75
3	6	2944	2.94
4	7	3085	3.08
5	8	3261	3.26
6	9	3426	3.43
7	10	3615	3.61
8	11	3850	3.85
9	12	4021	4.02
10	13	4121	4.12
11	14	4274	4.27
12	15	4474	4.47
13	16	4592	4.59
14	17	4686	4.69
15	18	4839	4.84

Sumber: Hasil Perhitungan

Volume air di atas dijadikan atau dikonversikan ke intensitas hujan. Pada waktu pengukuran waktu yang digunakan adalah selama 1 menit, sehingga intensitas hujan waktu yang dipakai per menit. Setelah didapatkan intensitas hujan yang diperlukan, langkah selanjutnya adalah menentukan intensitas hujan yang akan dipakai di dalam pengujian. Di dalam pengujian kali ini akan memakai intensitas hujan 2,47; 2,94; 3,26; 3,61; dan 4,02 mm/mnt. Nilai-nilai tersebut sudah mewakili variasi intensitas hujan dari skala kecil, hingga besar (deras).

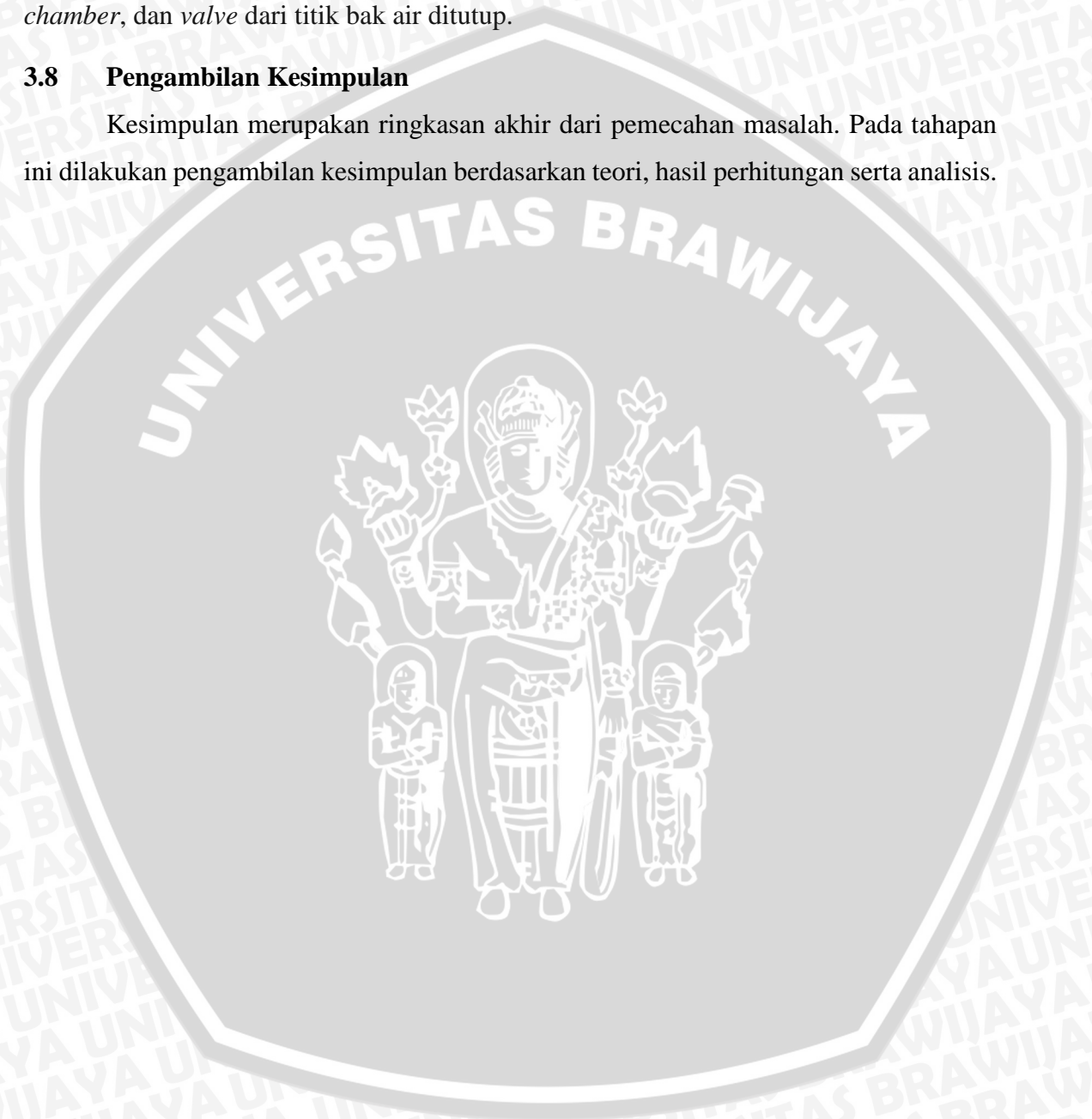
### 3.7 Kondisi Pengujian

Sebelum dilakukan proses pembasahan pada isolator, langkah pertama yang harus dilakukan adalah mempersiapkan volume air yang digunakan. Volume air yang digunakan dimulai dari volume terkecil sesuai perhitungan pada sub bab 3.6 di atas, yaitu sebesar 2,47 mm/mnt, kemudian ditingkatkan lagi menjadi 2,94 mm/mnt, 3,61 mm/mnt, dan volume tertinggi sebesar 4,02 mm/mnt.

Agar semua perlakuan di atas lebih akurat, obyek uji ditempatkan pada suatu ruangan uji yang biasa disebut *chamber*. Untuk mengatur kapasitas air yang digunakan dapat diatur melalui *valve* (kran) yang diatur sedemikian rupa, sehingga air yang digunakan sesuai dengan kapasitas volume yang digunakan. Jika air yang berada di *chamber* sudah penuh, maka untuk mengeluarkan air dapat melalui *valve* dititik saluran *chamber*, dan *valve* dari titik bak air ditutup.

### 3.8 Pengambilan Kesimpulan

Kesimpulan merupakan ringkasan akhir dari pemecahan masalah. Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan serta analisis.



## BAB IV

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Umum

Bab ini mendeskripsikan hasil pengujian penggunaan *PIN-PEX* pada konduktor AAAC sebagai alat bantu isolasi pin isolator pada keadaan kering dan basah. Pengaruh tingkat pembasahan untuk kondisi sebelum dan sesudah pemasangan *PIN-PEX* dengan pengujian arus bocor pada isolator pin. Dalam melakukan pengujian basah digunakan standar pembasahan yang telah dijelaskan pada Bab III.

Dalam bab ini akan dianalisis hasil pengujian isolator pin jenis 20 A, yang meliputi:

1. Pengujian arus bocor isolator dalam keadaan kering dan basah untuk kondisi sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan *PIN-PEX* pada konduktor AAAC.
2. Besar tahanan ekivalen dan rugi daya listrik sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan *PIN-PEX* pada konduktor AAAC dalam kondisi kering dan basah.

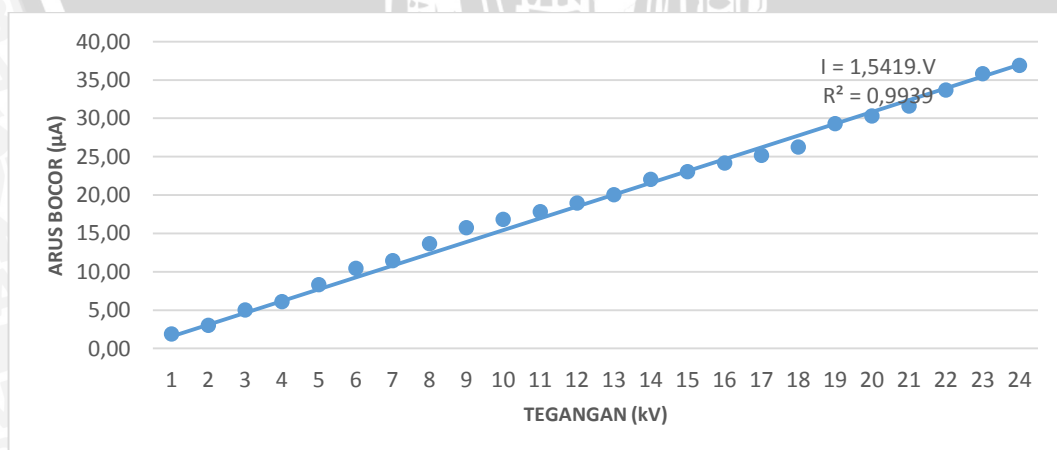
#### 4.2 Pengujian Perubahan Tegangan terhadap Arus Bocor Isolator dalam Keadaan Kering sebelum Pemasangan *PIN-PEX*

Untuk mengetahui pengaruh perubahan tegangan terhadap arus bocor isolator dalam keadaan kering maka dilakukan pengujian terhadap isolator pin di laboratorium. Nilai level tegangan yang digunakan pada keadaan kering ini adalah 1 kV sampai 24 kV. Nilai hasil pengujian pengaruh perubahan tegangan terhadap nilai arus bocor ini dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Nilai arus bocor keadaan kering pada level tegangan kerja yang berbeda

TEGANGAN (kV)	ARUS BOCOR ( $\mu$ A)
1	1,91
2	3,01
3	5,02
4	6,12
5	8,33
6	10,43
7	11,43
8	13,64
9	15,75
10	16,85
11	17,85
12	18,96
13	20,06
14	22,07
15	23,07
16	24,17
17	25,18
18	26,28
19	29,29
20	30,29
21	31,60
22	33,70
23	35,81
24	36,91

Berdasarkan data pada Tabel 4.1, maka dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan level tegangan kerja terhadap nilai arus bocor pada isolator pin. Seperti diperlihatkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Grafik Hubungan antara Kenaikan tegangan dengan Arus Bocor Kondisi Kering  
Sumber : Hasil Pengujian

Dari Gambar 4.1, pada kondisi isolator kering, peningkatan tegangan bolak-balik menyebabkan peningkatan nilai arus bocor. Pada tegangan bolak-balik 9 kV, nilai arus yang lewat isolator pin adalah sebesar 15,75  $\mu\text{A}$ . Nilai tegangan bolak-balik dinaikkan menjadi 11 kV, nilai arus yang lewat isolator pin bertambah yakni sebesar 17,85  $\mu\text{A}$ . Kemudian tegangan dinaikkan lagi sebesar 13 kV, nilai arus yang lewat isolator pin bertambah menjadi 20,06  $\mu\text{A}$ .

Grafik kenaikan arus bocor cenderung mengikuti trend linier dengan persamaan berikut:

$$I (\mu\text{A}) = 1,5419.V (\text{kV})$$

Dilihat dari persamaan tersebut, berarti untuk setiap kenaikan tegangan sebesar 1 kV maka arus bocor akan naik sebesar 1,5419  $\mu\text{A}$ . Nilai 1,5419 merupakan gradient dari garis trend yang juga merepresentasikan nilai konduktansi dengan satuan nano Siemens.

Tegangan kerja pada saluran distribusi setiap satu fasa adalah 11,547 kV, dengan menggunakan persamaan garis trendline didapatkan nilai arus bocornya yakni sebesar 17,8  $\mu\text{A}$ .

Besar dari koefisien korelasi dari kedua variabel arus bocor dan tegangan kerja adalah 0,9939. Pada grafik terlihat kenaikan nilai arus bocor mengikuti kenaikan nilai tegangan secara linier dan hubungan dari kedua variabel tersebut dapat dikatakan sangat baik karena nilai dari koefisien korelasi mendekati 1.

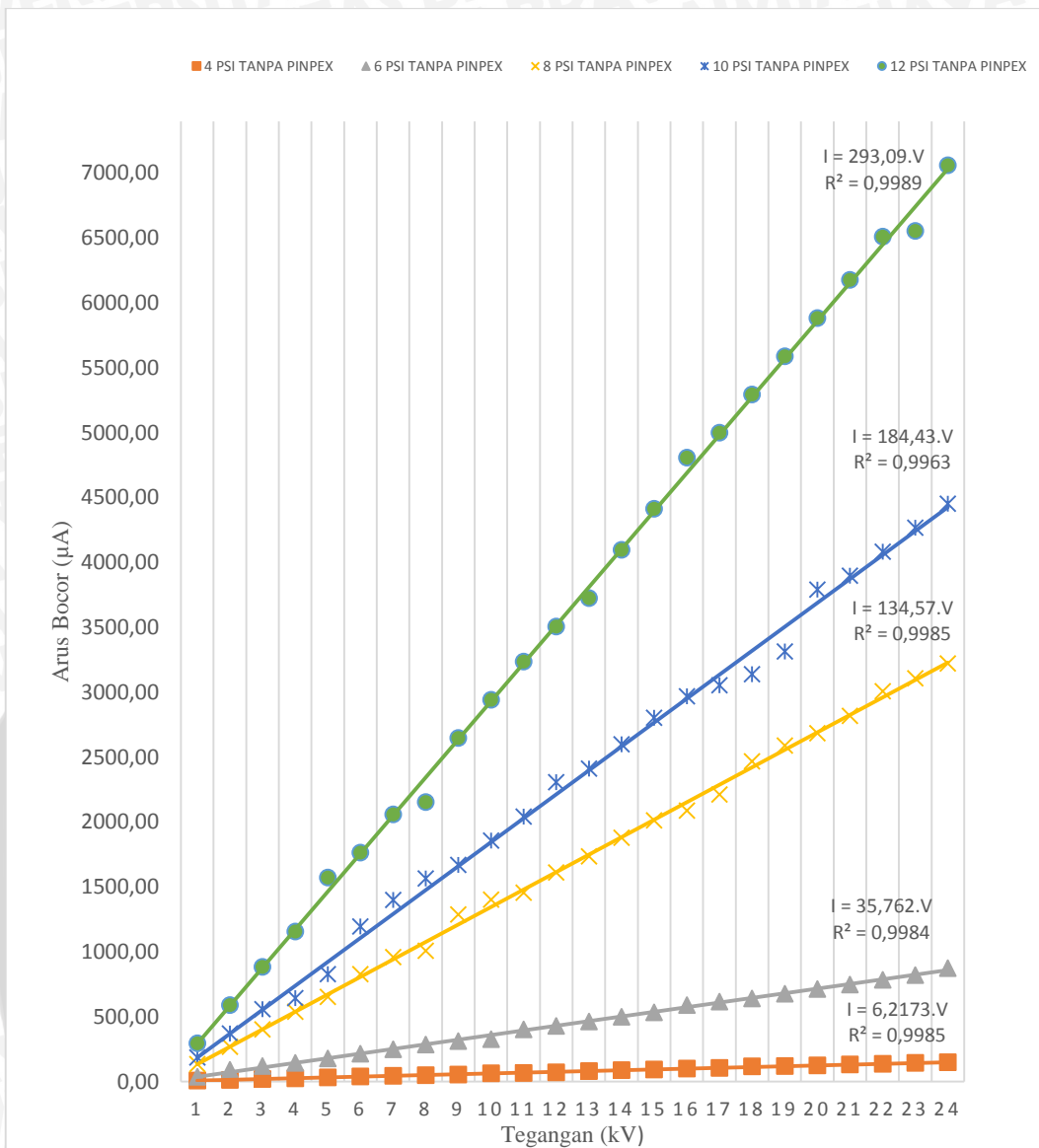
#### **4.3 Pengaruh Tingkat Pembasahan terhadap Arus Bocor Isolator sebelum Pemasangan PIN-PEX**

Untuk mengetahui pengaruh tingkat pembasahan isolator terhadap arus bocor maka dilakukan pengujian di laboratorium dengan menggunakan tingkat tegangan dari beberapa tingkat pembasahan sebagai sampel. Pengaruh tingkat pembasahan terhadap arus bocor dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Tabel arus bocor pada beberapa sampel tegangan dengan tingkat pembasahan yang berbeda-beda

No	Tegangan Kerja (kV)	Nilai arus bocor dengan tingkat pembasahan yang berbeda-beda ( $\mu\text{A}$ )				
		2,47 (mm/mnt)	2,94 (mm/mnt)	3,26 (mm/mnt)	3,61 (mm/mnt)	4,02 (mm/mnt)
1	1	6,22	35,61	134,21	185,56	294,19
2	2	11,43	89,37	268,41	371,12	588,38
3	3	18,66	118,86	402,62	556,69	882,57
4	4	24,88	142,43	536,83	641,95	1156,71
5	5	31,09	178,04	650,97	827,51	1571,26
6	6	39,32	213,65	826,30	1193,62	1765,15
7	7	43,53	249,26	959,51	1399,24	2059,34
8	8	49,75	284,86	1008,46	1564,74	2152,93
9	9	53,96	310,44	1288,10	1670,06	2647,72
10	10	62,19	325,99	1402,25	1855,62	2941,92
11	11	65,40	400,71	1456,21	2041,19	3236,11
12	12	70,61	427,30	1610,48	2306,99	3506,63
13	13	80,85	462,90	1734,66	2412,31	3724,19
14	14	87,06	498,51	1878,89	2597,87	4098,62
15	15	93,28	534,12	2013,10	2803,50	4412,87
16	16	100,10	589,79	2087,13	2969,00	4807,37
17	17	103,71	615,37	2211,30	3054,26	5001,26
18	18	116,95	640,94	2467,88	3139,52	5295,45
19	19	120,16	676,55	2588,04	3315,05	5589,64
20	20	124,38	712,16	2684,14	3791,49	5883,83
21	21	130,60	747,77	2818,34	3896,81	6178,02
22	22	135,81	783,37	3007,72	4082,37	6512,34
23	23	143,03	818,98	3106,82	4267,94	6555,77
24	24	149,25	874,65	3220,96	4453,50	7060,60

Berdasarkan data pada Tabel 4.2, maka dapat dibuat grafik pengaruh tingkat pembasahan terhadap nilai arus bocor pada isolator. Seperti diperlihatkan pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Grafik Pengaruh Tingkat Pembasahan terhadap Arus Bocor  
Sumber : Pengujian

Pada Gambar 4.2, Ketika nilai tegangan bolak-balik sebesar 1 kV untuk intensitas penyiraman sebesar 2,47 mm/mnt, 2,94 mm/mnt dan 3,26 mm/mnt, masing-masing nilai arus bocornya adalah 6,22 µA, 35,61 µA dan 134,21 µA. Bertambahnya tingkat pembasahan menyebabkan turunnya nilai tahanan. Arus bocor merupakan fungsi dari nilai tahanan permukaan isolator yang dibasahi, artinya dengan meningkatnya nilai arus bocor ini maka akan diikuti dengan penurunan nilai tahanan permukaan isolator.

Dari Gambar 4.2, Peningkatan tegangan bolak-balik menyebabkan peningkatan nilai arus bocor. Untuk intensitas penyiraman sebesar 2,47 mm/mnt, pada nilai tegangan sebesar 9 kV, 10 kV dan 11 kV, nilai arus yang lewat isolator pin masing-masing adalah 53,96 µA, 62,19 µA dan 65,40 µA. Kenaikan tegangan bolak-balik menyebabkan



bertambahnya nilai arus yang lewat pada isolator pin. Bentuk grafik akan linier karena arus akan sebanding dengan tegangan yang diterapkan.

Dengan menggunakan masing – masing persamaan garis trendline untuk tegangan kerja satu isolator pin tiap fasa sebesar 11,547 kV didapatkan nilai arus bocor untuk masing – masing tingkat pembasahan secara berturut – turut mulai dari terendah hingga tertinggi yakni sebesar 71,79  $\mu\text{A}$ , 412,94  $\mu\text{A}$ , 1553,88  $\mu\text{A}$ , 2129,61  $\mu\text{A}$  dan 3384,31  $\mu\text{A}$ .

#### 4.4 Pengaruh Tingkat Pembasahan terhadap Tahanan Ekuivalen sebelum Pemasangan PIN-PEX

Besar nilai tahanan ekivalen ditentukan oleh nilai arus bocornya. Dengan mengacu pada data mulai dari 1 kV-24 kV yang terdapat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. dengan menggunakan persamaan garis trendlinenya maka dapat dicari nilai tahanan total (tahanan permukaan isolator dan tahanan konduktor AAAC). Sebagai sampel digunakan persamaan garis trendline pada pengujian dengan tingkat pembasahan 3,26 mm/menit, dengan tegangan yang digunakan sebesar 20 kV:

$$I = 134,57.V$$

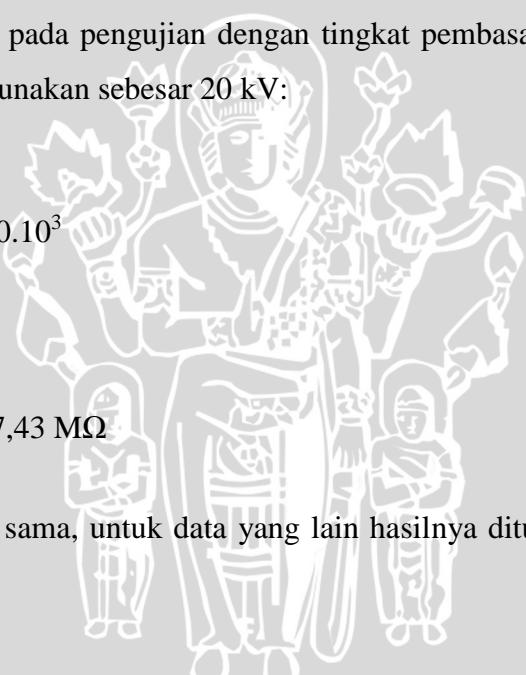
$$I = 134,57.10^{-9} \times 20.10^3$$

$$I = 2691,4 \mu\text{A}$$

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{20 \times 10^3}{2691,4 \times 10^{-6}} = 7,43 \text{ M}\Omega$$

Dengan cara yang sama, untuk data yang lain hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.3.



**Tabel 4.3** Nilai Tahanan Ekvivalen

Tegangan (kV)	Nilai Arus Bocor ( $\mu\text{A}$ )						Nilai Tahanan ( $\text{M}\Omega$ )					
	Kering	2,47 mm/mnt	2,94 mm/mnt	3,26 mm/mnt	3,61 mm/mnt	4,02 mm/mnt	Kering	2,47 mm/mnt	2,94 mm/mnt	3,26 mm/mnt	3,61 mm/mnt	4,02 mm/mnt
1	1,91	6,22	35,61	134,21	185,56	294,19	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
2	3,01	11,43	89,37	268,41	371,12	588,38	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
3	5,02	18,66	118,86	402,62	556,69	882,57	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
4	6,12	24,88	142,43	536,83	641,95	1156,71	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
5	8,33	31,09	178,04	650,97	827,51	1571,26	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
6	10,43	39,32	213,65	826,30	1193,62	1765,15	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
7	11,43	43,53	249,26	959,51	1399,24	2059,34	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
8	13,64	49,75	284,86	1008,46	1564,74	2152,93	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
9	15,75	53,96	310,44	1288,10	1670,06	2647,72	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
10	16,85	62,19	325,99	1402,25	1855,62	2941,92	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
11	17,85	65,40	400,71	1456,21	2041,19	3236,11	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
12	18,96	70,61	427,30	1610,48	2306,99	3506,63	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
13	20,06	80,85	462,90	1734,66	2412,31	3724,19	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
14	22,07	87,06	498,51	1878,89	2597,87	4098,62	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
15	23,07	93,28	534,12	2013,10	2803,50	4412,87	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
16	24,17	100,10	589,79	2087,13	2969,00	4807,37	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
17	25,18	103,71	615,37	2211,30	3054,26	5001,26	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
18	26,28	116,95	640,94	2467,88	3139,52	5295,45	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
19	29,29	120,16	676,55	2588,04	3315,05	5589,64	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
20	30,29	124,38	712,16	2684,14	3791,49	5883,83	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
21	31,60	130,60	747,77	2818,34	3896,81	6178,02	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
22	33,70	135,81	783,37	3007,72	4082,37	6512,34	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
23	35,81	143,03	818,98	3106,82	4267,94	6555,77	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41
24	36,91	149,25	874,65	3220,96	4453,50	7060,60	648,55	160,84	27,96	7,43	5,42	3,41

Dari Tabel 4.3 terlihat bahwa perubahan tingkat pembasahan akan memberikan perubahan terhadap nilai tahanan permukaan isolator pin. Pada pengujian dengan tingkat pembasahan rendah yakni sebesar 2,47 mm/mnt, tahanan total memiliki nilai sebesar 160,84 MΩ, setelah tingkat pembasahan dinaikkan sebesar 2,94 mm/mnt nilai tahanan total menurun sebanyak 82,6 % menjadi 27,96 MΩ. Dengan bertambahnya tingkat pembasahan akan mengakibatkan penurunan nilai tahanan permukaan isolator.

#### 4.5 Pengaruh Arus Bocor terhadap Rugi-Rugi Daya Listrik sebelum Pemasangan PIN-PEX

Permukaan isolator yang basah mengakibatkan terjadinya penurunan kemampuan isolator dalam mengisolasi penghantar yang bertegangan. Ini ditandai dengan semakin besarnya nilai arus bocor yang melewatinya.

Arus bocor dapat menyebabkan terjadinya rugi-rugi daya listrik. Dengan mengacu pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, maka dapat dihitung rugi-rugi daya akibat arus bocor pada isolator pin. Untuk tegangan kerja satu isolator pin tiap fasa pada kondisi kering rugi-rugi dayanya adalah sebesar:

$$\begin{aligned} S_{\text{loss}} &= V \times I \\ &= 11,547.10^3 \times 17,8.10^{-6} \\ &= 0,206 \text{ VA} \end{aligned}$$

Karena dalam satu tahun ada 8760 jam, maka dengan menggunakan persamaan berikut didapatkan rugi energi akibat arus bocor pertahun pada satu isolator tiap fasa:

$$\begin{aligned} W_{\text{loss}} &= V \times I \times 8760 \\ &= 11,547.10^3 \times 17,8.10^{-6} \times 8760 \\ &= 1800,94 \text{ Wh} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama didapatkan hasil perhitungan rugi-rugi daya dan rugi energi akibat arus bocor untuk data lain, yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

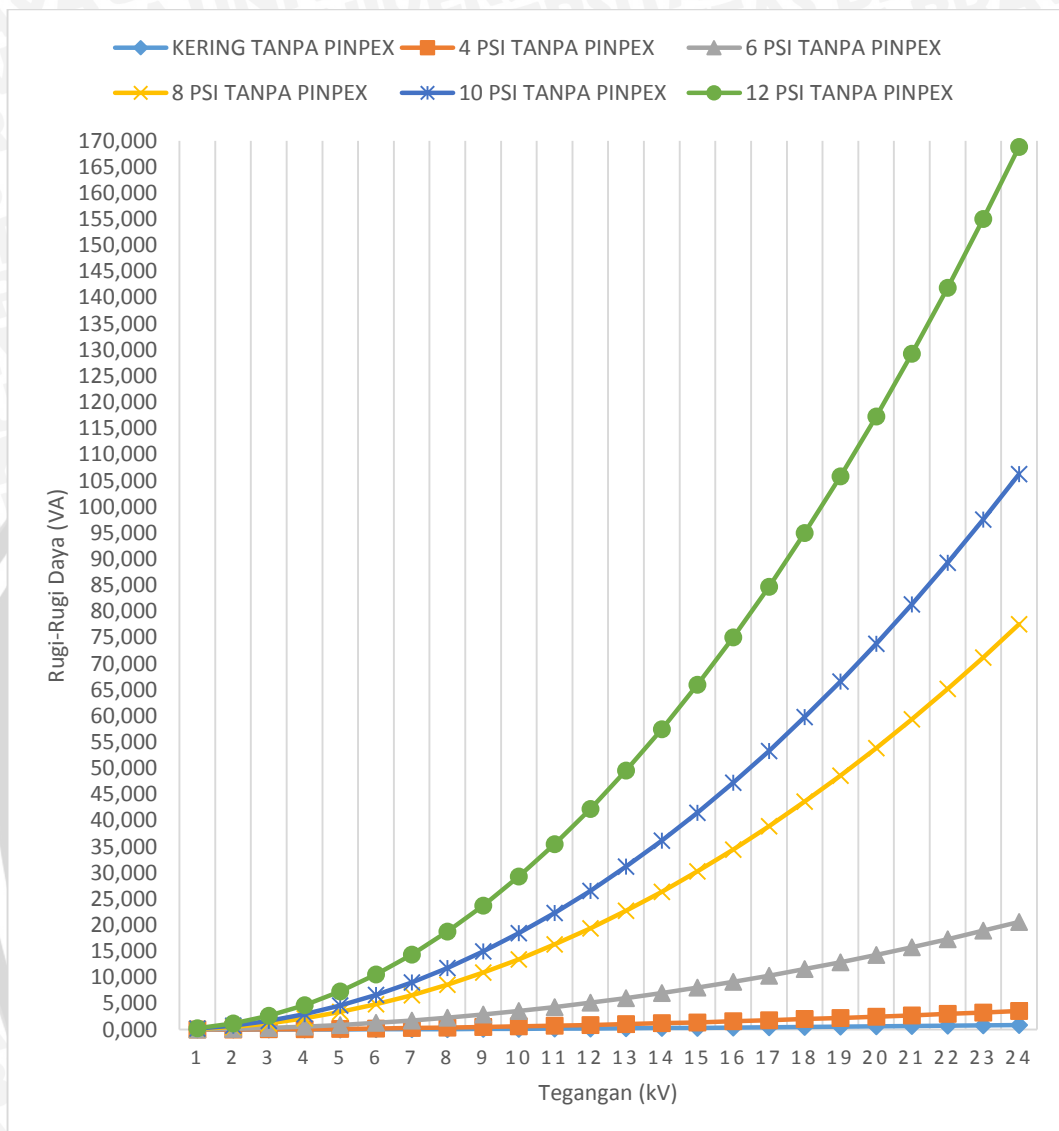
**Tabel 4.4** Rugi daya akibat adanya arus bocor pada satu isolator pin tiap fasa dengan berbagai kondisi yang berbeda

Tegangan (kV)	Rugi daya akibat adanya arus bocor pada isolator pin (VA)					
	Kering	2,47 mm/mnt	2,94 mm/mnt	3,26 mm/mnt	3,61 mm/mnt	4,02 mm/mnt
1	0,002	0,006	0,036	0,135	0,184	0,293
2	0,006	0,025	0,143	0,538	0,738	1,172
3	0,014	0,056	0,322	1,211	1,660	2,638
4	0,025	0,099	0,572	2,153	2,951	4,689
5	0,039	0,155	0,894	3,364	4,611	7,327
6	0,056	0,224	1,287	4,845	6,639	10,551
7	0,076	0,305	1,752	6,594	9,037	14,361
8	0,099	0,398	2,289	8,612	11,804	18,758
9	0,125	0,504	2,897	10,900	14,939	23,740
10	0,154	0,622	3,576	13,457	18,443	29,309
11	0,187	0,752	4,327	16,283	22,316	35,464
12	0,222	0,895	5,150	19,378	26,558	42,205
13	0,261	1,051	6,044	22,742	31,169	49,532
14	0,302	1,219	7,009	26,376	36,148	57,446
15	0,347	1,399	8,046	30,278	41,497	65,945
16	0,395	1,592	9,155	34,450	47,214	75,031
17	0,446	1,797	10,335	38,891	53,300	84,703
18	0,500	2,014	11,587	43,601	59,755	94,961
19	0,557	2,244	12,910	48,580	66,579	105,805
20	0,617	2,487	14,305	53,828	73,772	117,236
21	0,680	2,742	15,771	59,345	81,334	129,253
22	0,746	3,009	17,309	65,132	89,264	141,856
23	0,816	3,289	18,918	71,188	97,563	155,045
24	0,888	3,581	20,599	77,512	106,232	168,820

**Tabel 4.5** Rugi energi akibat adanya arus bocor pada satu isolator pin tiap fasa dengan berbagai kondisi yang berbeda

Rugi energi akibat adanya arus bocor pada isolator pin (Wh)					
Kering	2,47 mm/mnt	2,94 mm/mnt	3,26 mm/mnt	3,61 mm/mnt	4,02 mm/mnt
13,51	54,46	313,28	1178,83	1615,61	2567,47
54,03	217,85	1253,10	4715,33	6462,43	10269,87
121,56	490,17	2819,48	10609,50	14540,46	23107,22
216,11	871,42	5012,40	18861,33	25849,71	41079,49
337,68	1361,59	7831,88	29470,83	40390,17	64186,71
486,25	1960,69	11277,90	42438,00	58161,84	92428,86
661,85	2668,71	15350,48	57762,83	79164,73	125805,95
864,45	3485,67	20049,61	75445,32	103398,84	164317,98
1094,07	4411,55	25375,28	95485,49	130864,15	207964,94
1350,70	5446,35	31327,51	117883,32	161560,68	256746,84
1634,35	6590,09	37906,29	142638,82	195488,42	310663,68
1945,01	7842,75	45111,62	169751,98	232647,38	369715,45
2282,69	9204,34	52943,50	199222,81	273037,55	433902,16
2647,38	10674,86	61401,92	231051,31	316658,93	503223,81
3039,08	12254,30	70486,90	265237,47	363511,53	577680,39
3457,80	13942,67	80198,43	301781,30	413595,34	657271,91
3903,54	15739,97	90536,51	340682,79	466910,37	741998,37
4376,28	17646,19	101501,14	381941,96	523456,60	831859,76
4876,04	19661,34	113092,32	425558,79	583234,05	926856,09
5402,82	21785,42	125310,05	471533,28	646242,72	1026987,36
5956,61	24018,42	138154,33	519865,44	712482,60	1132253,56
6537,41	26360,36	151625,16	570555,27	781953,69	1242654,71
7145,23	28811,22	165722,54	623602,76	854656,00	1358190,78
7780,06	31371,00	180446,47	679007,92	930589,52	1478861,80

Untuk melihat kenaikan rugi daya elektrik pada setiap kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.3** Grafik Pengaruh Arus Bocor terhadap Rugi Daya Elektrik  
Sumber : Hasil Pengujian

Gambar 4.3 menunjukkan peningkatan arus bocor akan menyebabkan rugi daya semakin besar. Ditunjukkan Pada data pengujian untuk tegangan bolak-balik sebesar 3 kV dengan kondisi tanpa pembasahan menghasilkan arus bocor sebesar  $5,02 \mu\text{A}$  dan rugi-rugi daya sebesar  $0,014 \text{ VA}$ . Pada data pengujian dengan tegangan bolak-balik sebesar 3 kV dengan intensitas pembasahan sebesar  $2,47 \text{ mm/mnt}$  menghasilkan arus bocor sebesar  $18,66 \mu\text{A}$  dan rugi-rugi daya sebesar  $0,056 \text{ VA}$ . Sedangkan Pada data pengujian dengan tegangan bolak-balik sebesar 3 kV dengan intensitas pembasahan sebesar  $3,26 \text{ mm/mnt}$  menghasilkan arus bocor sebesar  $402,62 \mu\text{A}$  dan rugi-rugi daya sebesar  $1,211 \text{ VA}$ .

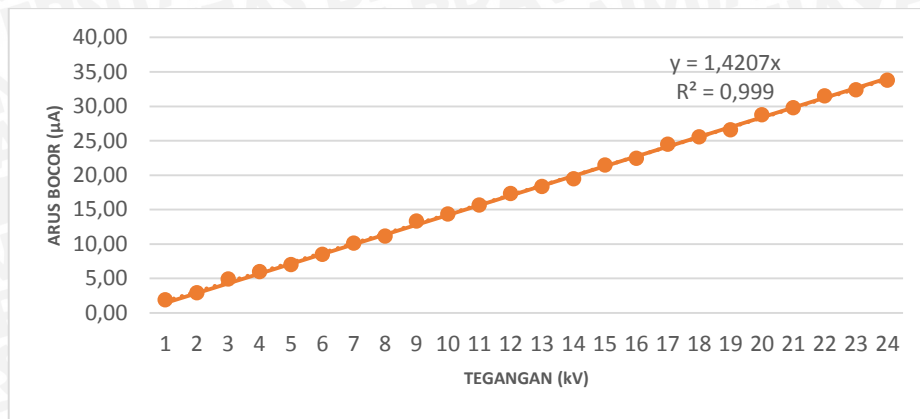
#### 4.6 Pengujian Perubahan Tegangan terhadap Arus Bocor Isolator dalam Keadaan Kering dengan Pemasangan *PIN-PEX* pada penghantar AAAC

Untuk mengetahui pengaruh perubahan tegangan terhadap arus bocor isolator dengan pemasangan *PIN-PEX* dalam keadaan kering maka dilakukan pengujian terhadap isolator pin dengan melakukan pemasangan *PIN-PEX* pada konduktor AAAC di laboratorium. Nilai level tegangan yang digunakan pada keadaan kering ini adalah dibawah level tegangan tembusnya yaitu 24 kV. Nilai hasil pengujian pengaruh perubahan tegangan terhadap nilai arus bocor ini dapat dilihat pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Nilai arus bocor keadaan kering pada level tegangan kerja yang berbeda

TEGANGAN (kV)	ARUS BOCOR ( $\mu$ A)
1	1,91
2	2,91
3	4,91
4	6,02
5	7,02
6	8,53
7	10,13
8	11,13
9	13,34
10	14,34
11	15,65
12	17,35
13	18,36
14	19,46
15	21,47
16	22,47
17	24,47
18	25,58
19	26,58
20	28,79
21	29,79
22	31,50
23	32,40
24	33,80

Berdasarkan data pada Tabel 4.6, maka dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan level tegangan kerja terhadap nilai arus bocor pada isolator pin. Seperti diperlihatkan pada Gambar 4.4 berikut.



**Gambar 4.4** Grafik Hubungan antara Kenaikan Tegangan dengan Arus Bocor setelah dilakukan Pemasangan *PIN-PEX*  
Sumber : Hasil Pengujian

Dari Gambar 4.4, pada kondisi isolator kering, peningkatan tegangan bolak-balik menyebabkan peningkatan nilai arus bocor. Pada tegangan bolak-balik 9 kV, nilai arus yang lewat isolator pin adalah sebesar 13,34 µA. Nilai tegangan bolak-balik dinaikkan menjadi 11 kV, nilai arus yang lewat isolator pin bertambah yakni sebesar 15,65 µA. Kemudian tegangan dinaikkan lagi sebesar 13 kV, nilai arus yang lewat isolator pin bertambah menjadi 18,36 µA.

Grafik kenaikan arus bocor cenderung mengikuti trend linier dengan persamaan berikut:

$$I = 1,4207 V$$

Dilihat dari persamaan tersebut, berarti untuk setiap kenaikan tegangan sebesar 1 kV maka arus bocor akan naik sebesar 1,4207 µA. Nilai 1,4207 merupakan gradient dari garis trend yang juga merepresentasikan nilai konduktansi dengan satuan nano Siemens.

Tegangan kerja pada saluran distribusi setiap satu fasa adalah 11,547 kV, dengan menggunakan persamaan garis trendline didapatkan nilai arus bocornya yakni sebesar 16,4 µA.

Besar dari koefisien korelasi dari kedua variabel arus bocor dan tegangan kerja adalah 0,999. Pada grafik terlihat kenaikan nilai arus bocor mengikuti kenaikan nilai tegangan secara linier dan hubungan dari kedua variabel tersebut dapat dikatakan sangat baik karena nilai dari koefisien korelasi mendekati 1.



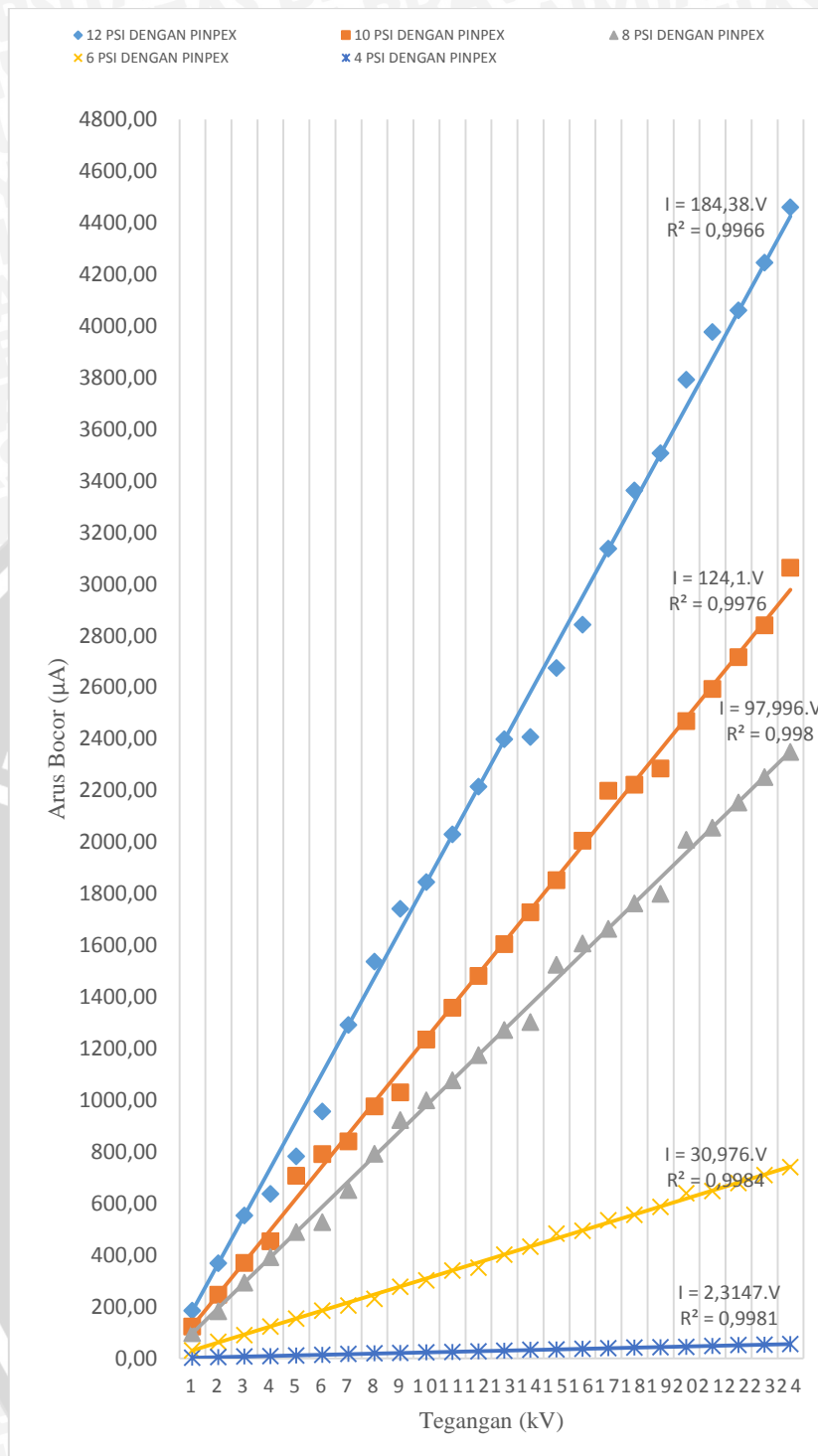
#### 4.7 Pengaruh Tingkat Pembasahan terhadap Arus Bocor Isolator dengan Pemasangan PIN-PEX pada penghantar AAAC

Untuk mengetahui pengaruh tingkat pembasahan isolator terhadap arus bocor maka dilakukan pengujian di laboratorium dengan menggunakan tingkat tegangan dari beberapa tingkat pembasahan sebagai sampel. Pengaruh tingkat pembasahan terhadap arus bocor dapat dilihat pada Tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Tabel arus bocor pada beberapa sampel tegangan

No	Tegangan Kerja (kV)	Nilai arus bocor dengan tingkat pembasahan yang berbeda-beda ( $\mu\text{A}$ )				
		2,47 (mm/mnt)	2,94 (mm/mnt)	3,26 (mm/mnt)	3,61 (mm/mnt)	4,02 (mm/mnt)
1	1	2,31	30,89	97,90	123,47	184,56
2	2	4,61	64,40	182,85	246,95	369,12
3	3	6,92	90,67	293,69	370,42	553,68
4	4	9,23	123,57	391,59	453,78	637,93
5	5	11,53	154,47	489,48	707,64	782,37
6	6	13,84	185,36	527,20	791,00	956,90
7	7	17,55	205,12	652,18	841,25	1291,92
8	8	19,86	231,00	793,20	975,76	1536,66
9	9	21,16	278,04	923,20	1031,02	1741,28
10	10	23,17	302,22	999,53	1234,74	1845,59
11	11	24,98	339,83	1076,86	1358,22	2030,15
12	12	27,68	351,67	1174,76	1481,69	2214,71
13	13	29,99	401,62	1272,66	1605,16	2399,27
14	14	34,00	432,51	1303,25	1728,64	2407,90
15	15	34,60	483,57	1524,92	1852,11	2675,11
16	16	36,91	494,30	1607,17	2005,68	2842,62
17	17	39,22	535,22	1664,24	2199,37	3137,51
18	18	41,53	556,09	1762,14	2222,54	3362,19
19	19	43,83	586,98	1799,85	2285,83	3506,63
20	20	44,33	639,64	2009,29	2469,48	3791,49
21	21	48,45	648,77	2055,83	2592,96	3976,05
22	22	51,76	679,66	2153,73	2716,43	4060,31
23	23	53,46	710,55	2251,62	2839,91	4244,87
24	24	55,27	741,45	2349,52	3063,69	4459,52

Berdasarkan data pada Tabel 4.6, maka dapat dibuat grafik pengaruh tingkat pembasahan terhadap nilai arus bocor pada isolator. Seperti diperlihatkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Grafik Pengaruh Tingkat Pemasahan terhadap Arus Bocor dengan Pemasangan *PIN-PEX*

Sumber : Hasil Pengujian

Pada Gambar 4.5, Ketika nilai tegangan bolak-balik sebesar 1 kV untuk intensitas penyiraman sebesar 2,47 mm/mnt, 2,94 mm/mnt dan 3,26 mm/mnt, masing-masing nilai arus bocornya adalah 2,31  $\mu\text{A}$ , 30,89  $\mu\text{A}$  dan 97,90  $\mu\text{A}$ . Bertambahnya tingkat pemasahan menyebabkan turunnya nilai tahanan. Arus bocor merupakan fungsi dari

nilai tahanan permukaan isolator yang dibasahi, artinya dengan meningkatnya nilai arus bocor ini maka akan diikuti dengan penurunan nilai tahanan permukaan isolator.

Dari Gambar 4.5, Peningkatan tegangan bolak-balik menyebabkan peningkatan nilai arus bocor. Untuk intensitas penyiraman sebesar 2,47 mm/mnt, pada nilai tegangan sebesar 9 kV, 10 kV dan 11 kV, nilai arus yang lewat isolator pin masing-masing adalah 21,16  $\mu\text{A}$ , 23,17  $\mu\text{A}$  dan 24,98  $\mu\text{A}$ . Kenaikan tegangan bolak-balik menyebabkan bertambahnya nilai arus yang lewat pada isolator pin. Bentuk grafik akan cenderung linier karena nilai arus sebanding dengan nilai tegangan yang diterapkan.

Dengan menggunakan masing – masing persamaan garis trendline untuk tegangan kerja satu isolator pin tiap fasa sebesar 11,547 kV didapatkan nilai arus bocor untuk masing – masing tingkat pembasahan secara berturut – turut mulai dari terendah hingga tertinggi yakni sebesar 26,73  $\mu\text{A}$ , 357,68  $\mu\text{A}$ , 1131,56  $\mu\text{A}$ , 1432,98  $\mu\text{A}$  dan 2129,04  $\mu\text{A}$ .

#### 4.8 Pengaruh Tingkat Pembasahan terhadap Tahanan Ekuivalen dengan Pemasangan PIN-PEX pada penghantar AAAC

Besar nilai tahanan isolator pin ditentukan oleh nilai arus bocornya. Dengan mengacu pada data mulai dari 18 kV-24 kV yang terdapat pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7. dengan menggunakan persamaan garis trendlinenya maka dapat dicari nilai tahanan permukaannya. Sebagai sampel digunakan persamaan garis trendline pada pengujian dengan tingkat pembasahan 3,26 mm/menit dengan tegangan yang digunakan sebesar 18 kV:

$$I = 2,314.V$$

$$I = 2,314.10^{-9} \times 18.10^3$$

$$I = 41,66 \mu\text{A}$$

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{18 \times 10^3}{41,66 \times 10^{-6}} = 432,02 \text{ M}\Omega$$

Dengan cara yang sama, untuk data yang lain hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** Nilai Tahanan Ekvivalen

Tegangan (kV)	Nilai Arus Bocor ( $\mu\text{A}$ )						Nilai Tahanan ( $\text{M}\Omega$ )					
	Kering	2,47 (mm/mnt)	2,94 (mm/mnt)	3,26 (mm/mnt)	3,61 (mm/mnt)	4,02 (mm/mnt)	Kering	2,47 (mm/mnt)	2,94 (mm/mnt)	3,26 (mm/mnt)	3,61 (mm/mnt)	4,02 (mm/mnt)
1	1,91	2,31	30,89	97,90	123,47	184,56	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
2	2,91	4,61	64,40	182,85	246,95	369,12	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
3	4,91	6,92	90,67	293,69	370,42	553,68	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
4	6,02	9,23	123,57	391,59	453,78	637,93	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
5	7,02	11,53	154,47	489,48	707,64	782,37	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
6	8,53	13,84	185,36	527,20	791,00	956,90	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
7	10,13	17,55	205,12	652,18	841,25	1291,92	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
8	11,13	19,86	231,00	793,20	975,76	1536,66	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
9	13,34	21,16	278,04	923,20	1031,02	1741,28	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
10	14,34	23,17	302,22	999,53	1234,74	1845,59	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
11	15,65	24,98	339,83	1076,86	1358,22	2030,15	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
12	17,35	27,68	351,67	1174,76	1481,69	2214,71	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
13	18,36	29,99	401,62	1272,66	1605,16	2399,27	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
14	19,46	34,00	432,51	1303,25	1728,64	2407,90	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
15	21,47	34,60	483,57	1524,92	1852,11	2675,11	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
16	22,47	36,91	494,30	1607,17	2005,68	2842,62	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
17	24,47	39,22	535,22	1664,24	2199,37	3137,51	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
18	25,58	41,53	556,09	1762,14	2222,54	3362,19	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
19	26,58	43,83	586,98	1799,85	2285,83	3506,63	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
20	28,79	44,33	639,64	2009,29	2469,48	3791,49	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
21	29,79	48,45	648,77	2055,83	2592,96	3976,05	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
22	31,50	51,76	679,66	2153,73	2716,43	4060,31	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
23	32,40	53,46	710,55	2251,62	2839,91	4244,87	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42
24	33,80	55,27	741,45	2349,52	3063,69	4459,52	703,88	432,02	32,28	10,20	8,06	5,42

Dari Tabel 4.8 terlihat bahwa perubahan tingkat pembasahan akan memberikan perubahan terhadap nilai tahanan permukaan isolator pin. Pada pengujian dengan pembasahan rendah yakni 2,47 mm/mnt, tahanan total mempunyai nilai tetap sebesar 432,02  $\text{M}\Omega$ , sedangkan pada pengujian dengan tingkat pembasahan tinggi yakni 4,02 mm/mnt, nilai tahanan total menurun menjadi 5,42  $\text{M}\Omega$  atau menurun hingga 98,7 %. Dengan bertambahnya tingkat pembasahan akan mengakibatkan penurunan nilai tahanan

permukaan isolator. Karena arus bocor merupakan hasil pengukuran, maka sesuai dengan hukum ohm yang menyatakan bahwa arus I (ampere), yang mengalir dalam sebuah bahan, berbanding lurus dengan tegangan kerja (volt) dan berbanding terbalik dengan nilai tahananannya (ohm).

#### 4.9 Pengaruh Arus Bocor terhadap Rugi-Rugi Daya Listrik dengan pemasangan PIN-PEX pada penghantar AAAC

Permukaan isolator yang basah mengakibatkan terjadinya penurunan kemampuan isolator dalam mengisolasi penghantar yang bertegangan. Ini ditandai dengan semakin besarnya nilai arus bocor yang melewatinya.

Arus bocor dapat menyebabkan terjadinya rugi-rugi daya listrik. Dengan mengacu pada Tabel 4,6 dan Tabel 4.7, maka dapat dihitung rugi-rugi daya akibat arus bocor pada isolator pin. Untuk tegangan kerja satu isolator pin tiap fasa pada kondisi kering rugi-rugi dayanya adalah sebesar:

$$\begin{aligned} S_{\text{loss}} &= V \times I \\ &= 11,547.10^3 \times 16,4.10^{-6} \\ &= 0,189 \text{ VA} \end{aligned}$$

Karena dalam satu tahun ada 8760 jam, maka dengan menggunakan persamaan berikut didapatkan rugi energi akibat arus bocor pertahun pada satu isolator tiap fasa:

$$\begin{aligned} W_{\text{loss}} &= V \times I \times 8760 \\ &= 11,547.10^3 \times 16,4.10^{-6} \times 8760 \\ &= 1659,38 \text{ Wh} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama didapatkan hasil perhitungan rugi-rugi daya dan rugi energi akibat arus bocor untuk data lain data lain, yang ditunjukkan pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10.

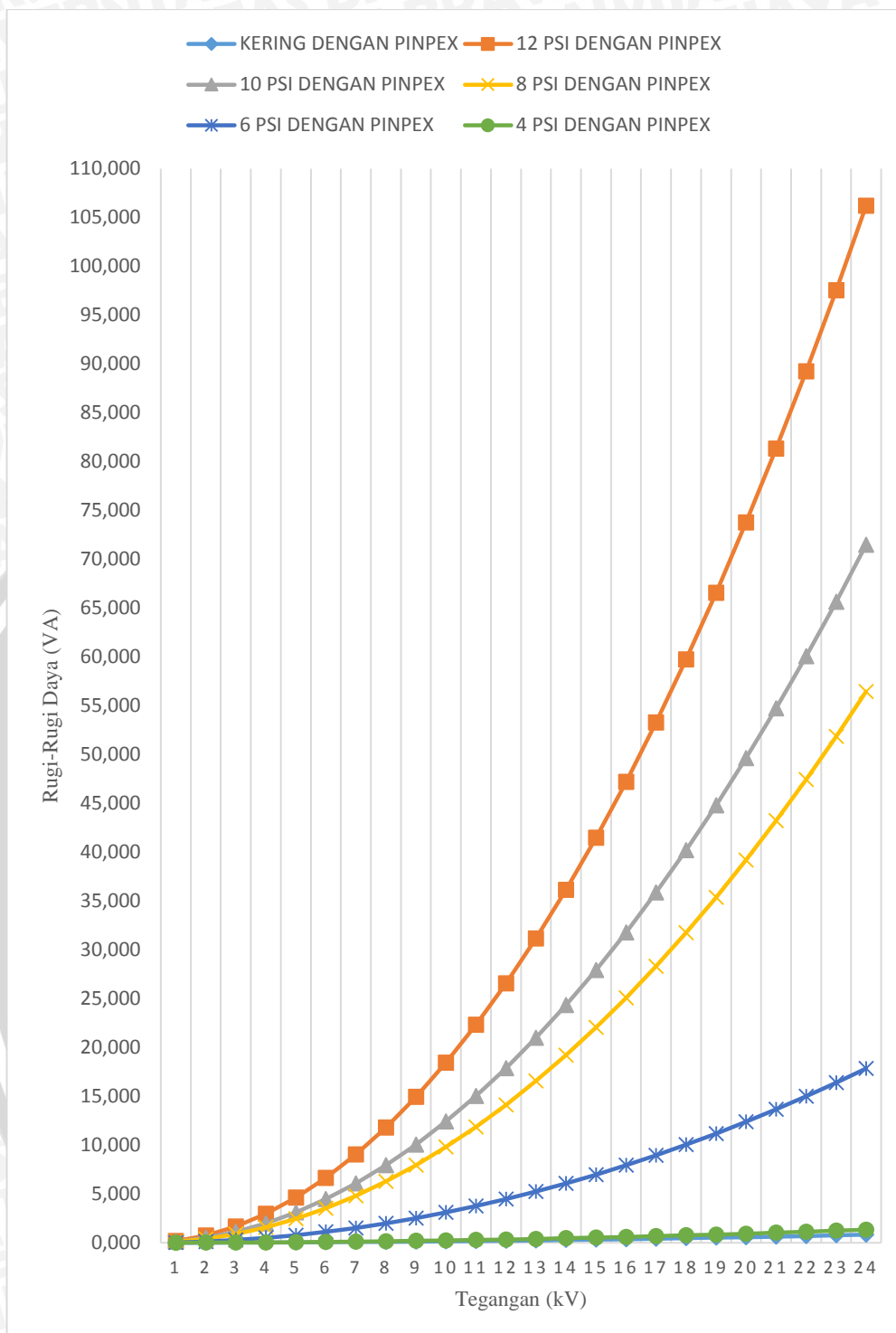
**Tabel 4.9** Rugi daya elektrik dan rugi energi akibat adanya arus bocor pada berbagai kondisi yang berbeda

Tegangan (kV)	Rugi daya akibat adanya arus bocor pada isolator pin (W)					
	Kering	2,47 mm/mnt	2,94 mm/ mnt	3,26 mm/ mnt	3,61 mm/ mnt	4,02 mm/mnt
1	0,001	0,002	0,031	0,098	0,124	0,184
2	0,006	0,009	0,124	0,392	0,496	0,738
3	0,013	0,021	0,279	0,882	1,117	1,659
4	0,023	0,037	0,496	1,568	1,986	2,950
5	0,036	0,058	0,774	2,450	3,103	4,610
6	0,051	0,083	1,115	3,528	4,468	6,638
7	0,070	0,113	1,518	4,802	6,081	9,035
8	0,091	0,148	1,982	6,272	7,942	11,800
9	0,115	0,187	2,509	7,938	10,052	14,935
10	0,142	0,231	3,098	9,800	12,410	18,438
11	0,172	0,280	3,748	11,858	15,016	22,310
12	0,205	0,333	4,461	14,111	17,870	26,551
13	0,240	0,391	5,235	16,561	20,973	31,160
14	0,278	0,454	6,071	19,207	24,324	36,138
15	0,320	0,521	6,970	22,049	27,923	41,486
16	0,364	0,593	7,930	25,087	31,770	47,201
17	0,411	0,669	8,952	28,321	35,865	53,286
18	0,460	0,750	10,036	31,751	40,208	59,739
19	0,513	0,836	11,182	35,377	44,800	66,561
20	0,568	0,926	12,390	39,198	49,640	73,752
21	0,627	1,021	13,660	43,216	54,728	81,312
22	0,688	1,120	14,992	47,430	60,064	89,240
23	0,752	1,224	16,386	51,840	65,649	97,537
24	0,818	1,333	17,842	56,446	71,482	106,203

**Tabel 4.10** Rugi energi akibat adanya arus bocor pada satu isolator pin tiap fasa dengan berbagai kondisi yang berbeda

Rugi energi akibat arus bocor pada isolator pin (Wh)					
Kering	2,47 mm/ mnt	2,94 mm/ mnt	3,26 mm/ mnt	3,61 mm/ mnt	4,02 mm/ mnt
12,45	20,28	271,35	858,44	1087,12	1615,17
49,78	81,11	1085,40	3433,78	4348,46	6460,68
112,01	182,49	2442,15	7726,00	9784,04	14536,52
199,13	324,43	4341,60	13735,12	17393,86	25842,70
311,13	506,92	6783,74	21461,12	27177,90	40379,22
448,03	729,96	9768,59	30904,02	39136,18	58146,08
609,82	993,56	13296,14	42063,80	53268,68	79143,27
796,50	1297,71	17366,38	54940,48	69575,42	103370,80
1008,07	1642,42	21979,33	69534,04	88056,40	130828,67
1244,53	2027,68	27134,98	85844,50	108711,60	161516,88
1505,89	2453,49	32833,32	103871,84	131541,04	195435,42
1792,13	2919,86	39074,37	123616,07	156544,70	232584,31
2103,26	3426,77	45858,11	145077,20	183722,60	272963,53
2439,29	3974,25	53184,55	168255,21	213074,74	316573,08
2800,20	4562,27	61053,70	193150,12	244601,10	363412,98
3186,00	5190,85	69465,54	219761,91	278301,70	413483,21
3596,70	5859,99	78420,08	248090,59	314176,52	466783,78
4032,29	6569,67	87917,32	278136,17	352225,58	523314,69
4492,76	7319,91	97957,26	309898,63	392448,88	583075,94
4978,13	8110,71	108539,90	343377,98	434846,40	646067,52
5488,39	8942,06	119665,24	378574,23	479418,16	712289,44
6023,54	9813,96	131333,28	415487,36	526164,14	781741,70
6583,58	10726,41	143544,02	454117,38	575084,36	854424,30
7168,51	11679,42	156297,46	494464,30	626178,82	930337,23

Untuk melihat kenaikan rugi daya elektrik pada setiap kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.6** Grafik Pengaruh Arus Bocor terhadap Rugi Daya Elektrik dengan Pemasangan PIN-PEX

Sumber : Hasil Pengujian

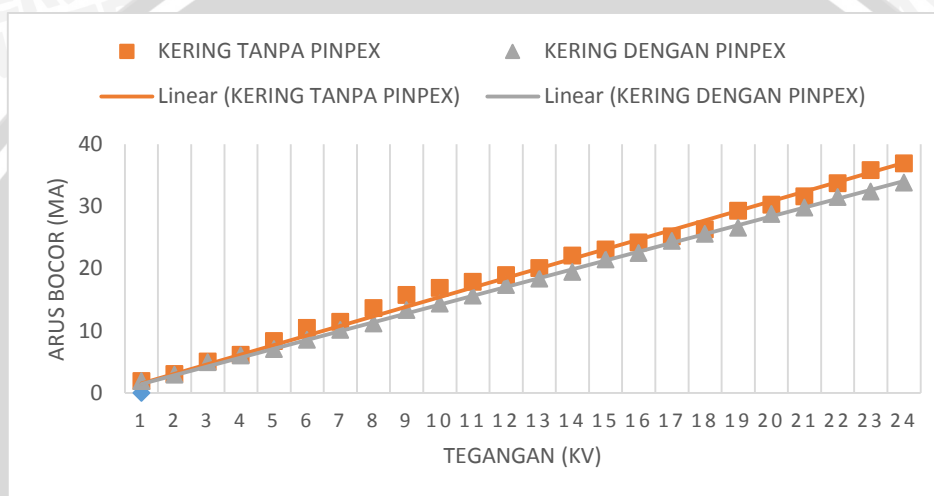
Gambar 4.6 menunjukkan peningkatan arus bocor akan menyebabkan rugi daya semakin besar. Ditunjukkan Pada data pengujian untuk tegangan bolak-balik sebesar 3 kV dengan kondisi tanpa pembasahan menghasilkan arus bocor sebesar 4,91  $\mu$ A dan rugi-rugi daya sebesar 0,013 VA. Pada data pengujian dengan tegangan bolak-balik sebesar 3



kV dengan intensitas pembasahan sebesar 2,47 mm/mnt menghasilkan arus bocor sebesar 6,92  $\mu\text{A}$  dan rugi-rugi daya sebesar 0,021 VA. Sedangkan Pada data pengujian dengan tegangan bolak-balik sebesar 3 kV dengan intensitas pembasahan sebesar 3,26 mm/mnt menghasilkan arus bocor sebesar 293,69  $\mu\text{A}$  dan rugi-rugi daya sebesar 0,882 VA.

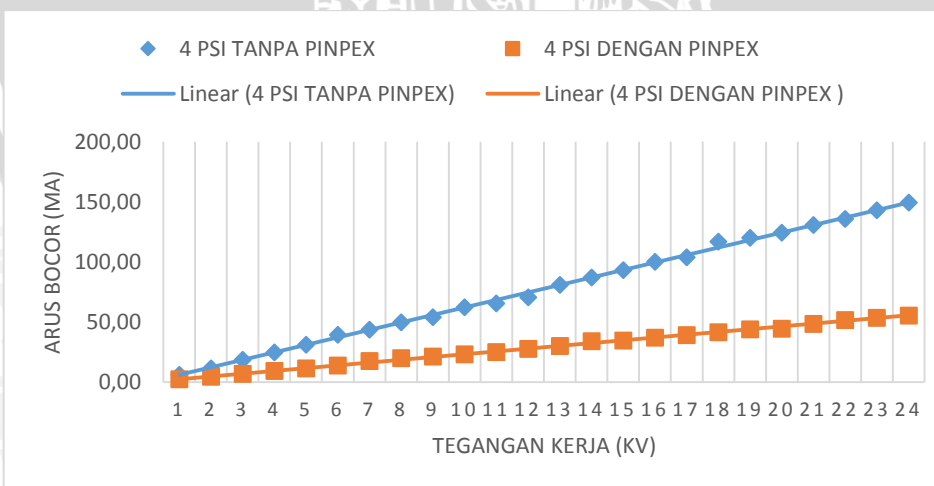
#### 4.10 Analisa Hasil Penelitian

Berikut adalah grafik perbandingan nilai arus bocor pada isolator pin dengan melakukan pemasangan *PIN-PEX* dan tanpa pemasangan *PIN-PEX* pada kondisi kering dan beberapa tingkat penyiraman:



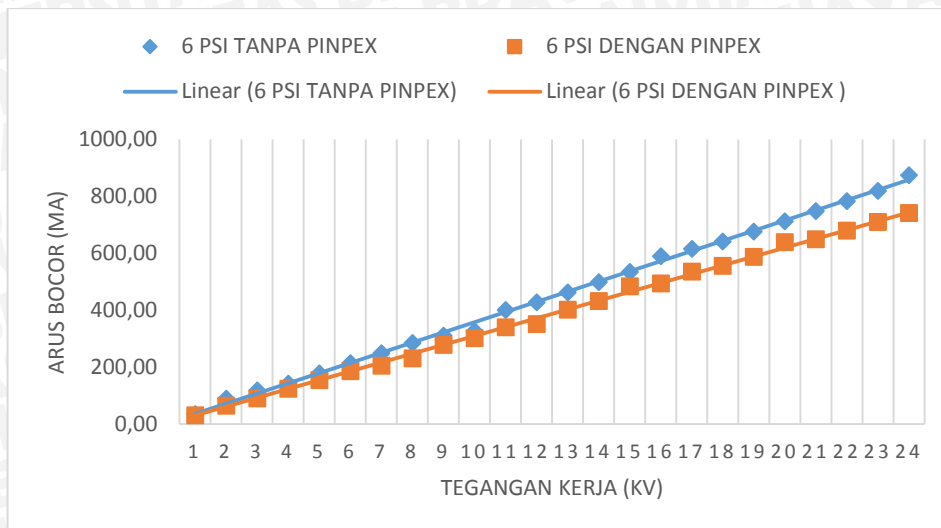
**Gambar 4.7** Grafik perbandingan nilai arus bocor pada pin isolator dengan pemasangan *PIN-PEX* dan tanpa pemasangan *PIN-PEX* kondisi kering

Sumber : Hasil Pengujian

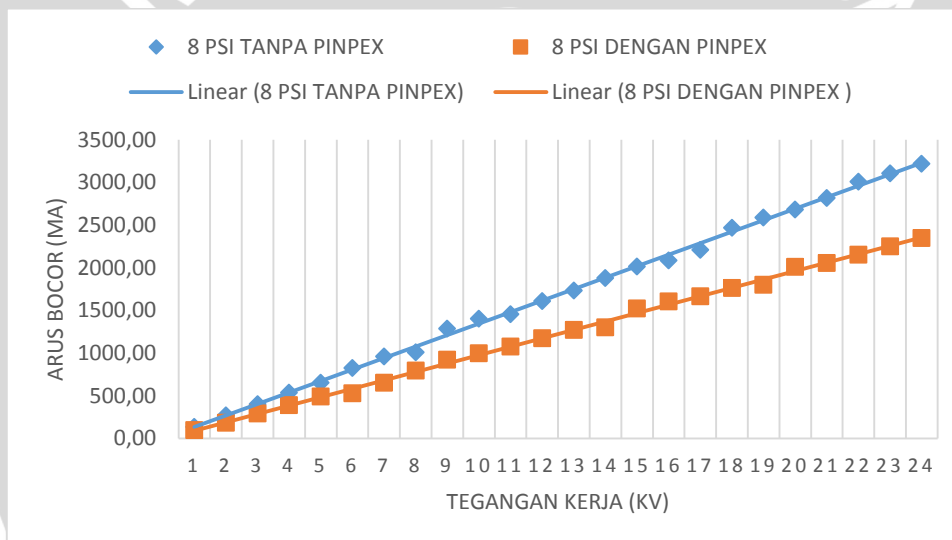


**Gambar 4.8** Grafik perbandingan nilai arus bocor pada pin isolator dengan pemasangan *PIN-PEX* dan tanpa pemasangan *PIN-PEX* dengan intensitas penyiraman sebesar 2,47 mm/mnt

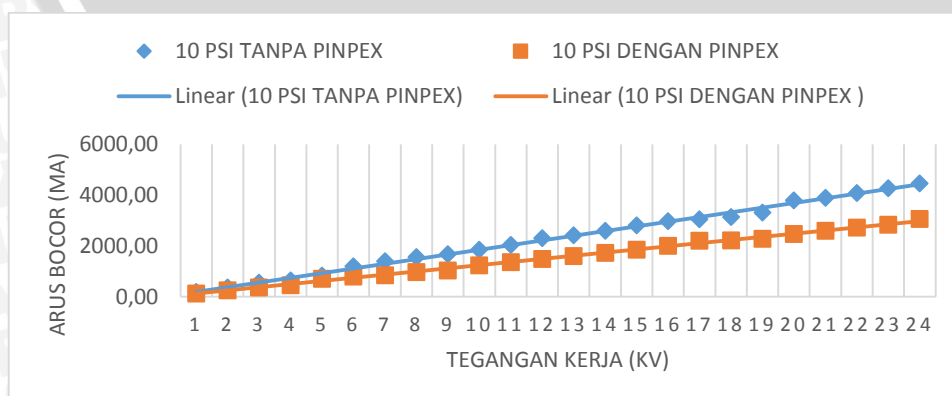
Sumber : Hasil Pengujian



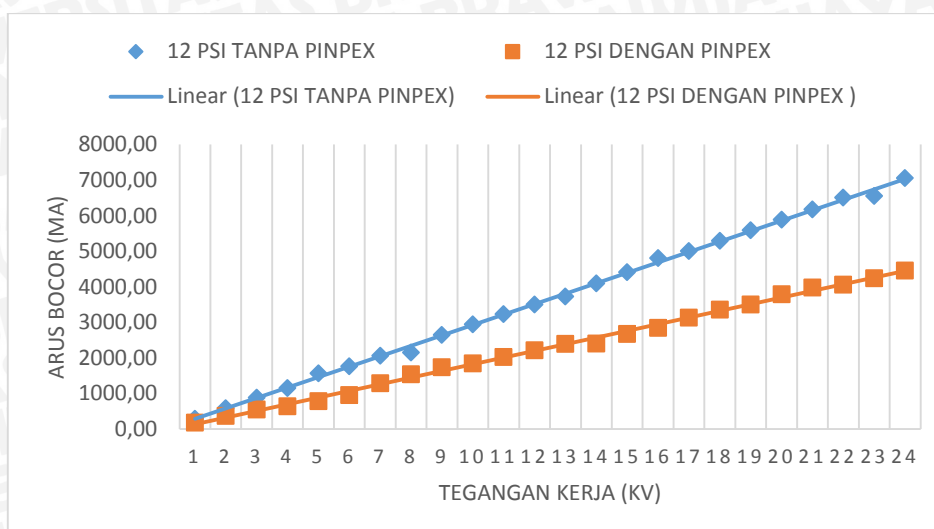
**Gambar 4.9** Grafik perbandingan nilai arus bocor pada pin isolator dengan pemasangan *PIN-PEX* dan tanpa pemasangan *PIN-PEX* dengan intensitas penyiraman sebesar 2,94 mm/mnt  
Sumber : Hasil Pengujian



**Gambar 4.10** Grafik perbandingan nilai arus bocor pada pin isolator dengan pemasangan *PIN-PEX* dan tanpa pemasangan *PIN-PEX* dengan intensitas penyiraman sebesar 3,26 mm/mnt  
Sumber : Hasil Pengujian



**Gambar 4.11** Grafik perbandingan nilai arus bocor pada pin isolator dengan pemasangan *PIN-PEX* dan tanpa pemasangan *PIN-PEX* dengan intensitas penyiraman sebesar 3,61 mm/mnt  
Sumber : Hasil Pengujian



**Gambar 4.12** Grafik perbandingan nilai arus bocor pada pin isolator dengan pemasangan *PIN-PEX* dan tanpa pemasangan *PIN-PEX* dengan intensitas penyiraman sebesar 4,02 mm/mnt  
Sumber : Hasil Pengujian

Dari Gambar 4.7 sampai dengan Gambar 4.12 ditunjukkan bahwa pemasangan *PIN-PEX* dapat memperkecil arus bocor yang melewati pin isolator. Penurunan nilai arus bocor disebabkan karena nilai tahanan isolasi yang bertambah. Sebelum dilakukan pemasangan *PIN-PEX* nilai tahanan total adalah tahanan konduktor AAA-C dengan panjang 50 cm dan tahanan dari bahan isolasi pin isolator, sedangkan setelah dipasang *PIN-PEX* nilai tahanan total ditambahkan dengan tahanan dari *PIN-PEX* dengan panjang 50 cm. Sesuai dengan hukum ohm dengan besar nilai tegangan yang tetap ketika nilai resistansi bertambah maka besar arus bocor akan semakin kecil.

Bertambahnya tingkat pembasahan menyebabkan turunnya nilai tahanan. Arus bocor merupakan fungsi dari nilai tahanan permukaan isolator yang dibasahi, artinya dengan meningkatnya nilai arus bocor ini maka akan diikuti dengan penurunan nilai tahanan permukaan isolator. Karena arus bocor merupakan hasil pengukuran, maka sesuai dengan hukum ohm yang menyatakan bahwa arus  $I$  (ampere), yang mengalir dalam sebuah bahan, berbanding lurus dengan tegangan kerja (volt) dan berbanding terbalik dengan nilai tahanannya (ohm). Bila nilai arus bocor meningkat, maka nilai rugi-rugi daya akan semakin besar.

Prosentase penurunan arus bocor pada pin isolator sebelum dan setelah pemasangan *PIN-PEX* pada kondisi kering untuk tegangan 19 kV didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \% \text{Susut} &= \frac{I_{\text{sebelum}} - I_{\text{setelah}}}{I_{\text{sebelum}}} \times 100 \% \\ &= \frac{29,30 - 26,99}{29,30} \times 100 \% \\ &= 7,86 \% \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama didapatkan hasil perhitungan prosentase penurunan arus bocor pada pin isolator sebelum dan setelah pemasangan *PIN-PEX* untuk data lain data lain, yang ditunjukkan pada Tabel 4.11.

**Tabel 4.11** Prosentase penurunan nilai arus bocor pada pin isolator sebelum dan setelah pemasangan *PIN-PEX* untuk berbagai kondisi yang berbeda

TEGANGAN (kV)	Prosentase Penurunan Arus Bocor (%)					
	Kering	2,47 mm/ mnt	2,94 mm/ mnt	3,26 mm/ mnt	3,61 mm/ mnt	4,02 mm/ mnt
1	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
2	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
3	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
4	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
5	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
6	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
7	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
8	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
9	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
10	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
11	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
12	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
13	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
14	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
15	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
16	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
17	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
18	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
19	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
20	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
21	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
22	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
23	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09
24	7,86	62,77	13,38	27,18	32,71	37,09

Jika rugi – rugi daya akibat timbulnya arus bocor pada satu isolator tiap satu fasa dengan tingkat pembasahan 4,02 mm/mnt pada saat sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan *PIN-PEX* pada tegangan kerja suatu saluran distribusi memiliki nilai secara berturut – turut yakni 39,079 VA dan 24,584 VA, maka besar rugi – rugi daya elektrik untuk sebuah tiang dimana terdapat 3 buah isolator pin adalah:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{sebelum}} &= 3 \times 39,079 \text{ VA} \\
 &= 117,237 \text{ VA} \\
 S_{\text{setelah}} &= 3 \times 24,584 \text{ VA} \\
 &= 73,752 \text{ VA}
 \end{aligned}$$

Menurut SPLN nomor:606.K tahun 2010 standar jarak antar 2 tiang pada Saluran Udara Tegangan Menengah adalah 40 m sampai dengan 50 m. Jika pada saluran sepanjang 5 km dengan jarak antar tiang maksimal yakni sebesar 50 m terdapat 100 tiang, maka besar rugi – rugi daya akibat arus bocor pada isolator pin untuk saluran sepanjang 5 km adalah:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{sebelum}} &= 100 \times 117,237 \text{ VA} \\
 &= 11723,7 \text{ VA} \\
 S_{\text{setelah}} &= 100 \times 73,752 \text{ VA} \\
 &= 7375,2 \text{ VA}
 \end{aligned}$$

Maka rugi – rugi energi tiap tahunnya adalah sebesar:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{sebelum}} &= 11723,7 \times 8760 \\
 &= 102699612 \text{ Wh} \\
 W_{\text{setelah}} &= 7375,2 \times 8760 \\
 &= 64606752 \text{ Wh}
 \end{aligned}$$

Nilai rugi daya akibat arus bocor pada isolator pin tiap tahun untuk saluran sepanjang 5 km mengalami penurunan sebesar 37,09 %, jika dikonversikan dalam nilai rupiah dengan acuan harga per kWh sebesar Rp1.352:

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya rugi arus bocor} &= 102699612 \times \text{Rp}1.352 \\
 &= \text{Rp}138.849.875.424
 \end{aligned}$$

(Sebelum dilakukan pemasangan *PIN-PEX*)

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya rugi arus bocor} &= 64606752 \times \text{Rp}1.352 \\
 &= \text{Rp}87.348.328.704
 \end{aligned}$$

(Setelah dilakukan pemasangan *PIN-PEX*)

Selisih harga dari kedua kondisi tersebut tentu sangatlah besar. Terlihat bahwa dengan pemasangan *PIN-PEX* dapat memperkecil rugi daya akibat adanya arus bocor pada isolator pin, serta memperkecil biaya rugi daya pada sistem distribusi 20 kV.



## BAB V

### KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sebelum dilakukan pemasangan *PIN-PEX*, nilai arus bocor pada tegangan kerja sistem 20 kV untuk sebuah isolator pin tiap fasa dengan kondisi kering adalah 17,8  $\mu\text{A}$ , dan setelah dilakukan pemasangan *PIN-PEX*, nilai arus bocor menjadi 16,4  $\mu\text{A}$ . Nilai arus bocor mengalami penurunan sebesar 7,86 %. Besar rugi-rugi energi yang diakibatkan oleh arus bocor tiap tahun pada tegangan kerja sistem 20 kV untuk sebuah isolator pin tiap fasa sebelum dilakukan pemasangan *PIN-PEX* adalah 1800,94 Wh, setelah dilakukan pemasangan *PIN-PEX* menurun menjadi 1659,38 Wh.
2. Sebelum dilakukan pemasangan *PIN-PEX* dengan tegangan kerja 20 kV untuk sebuah isolator pin tiap fasa, pengaruh tingkat pembasahan mulai dari yang terkecil (2,47 mm/menit) hingga yang paling besar (4,02 mm/menit) berturut-turut menghasilkan nilai arus bocor sebesar 71,79; 412,94; 1553,88; 2129,61; 3384,31  $\mu\text{A}$ . Nilai tersebut mengalami kenaikan secara linier. Setelah dilakukan pemasangan *PIN-PEX* dengan tegangan kerja 20 kV untuk sebuah isolator pin tiap fasa, pengaruh tingkat pembasahan mulai dari yang terkecil (2,47 mm/menit) hingga yang paling besar (4,02 mm/menit) berturut-turut menghasilkan nilai arus bocor sebesar 26,73; 357,68; 1131,56; 1432,98; 2129,04  $\mu\text{A}$ .
3. Sebelum dilakukan pemasangan *PIN-PEX* dengan kondisi kering, pengaruh kenaikan tegangan mulai dari 4; 8; 12; 16; 20 kV, berturut-turut menghasilkan nilai arus bocor sebesar 6,12; 13,64; 18,96; 24,17; 30,29  $\mu\text{A}$ . Nilai tersebut mengalami kenaikan secara linier. Setelah dilakukan pemasangan *PIN-PEX* dengan kondisi kering, pengaruh kenaikan tegangan mulai dari 4; 8; 12; 16; 20 kV, berturut-turut menghasilkan nilai arus bocor sebesar 6,02; 11,13; 17,35; 22,47; 28,79  $\mu\text{A}$ .