

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pustaka yang berhubungan dengan arus hubung singkat yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya yang diantaranya adalah sebagai berikut:

Jurnal penelitian yang dilakukan oleh Syahir Mahmud dan Bidayatul Arminah mahasiswa jurusan Teknik Elektro Universitas Atmajaya Makassar tahun 2012 dengan jurnal berjudul “Analisis Kapasitas Hubung Singkat Saluran Kabel Bawah Tanah Berisolasi *XLPE*”. Dalam penelitiannya Syahir melakukan analisis isolasi *polimer XLPE* terhadap pengaruh besarnya kapasitas arus hubung singkat. Syahir melakukan analisisnya dengan cara terlebih dahulu menghitung temperatur awal kabel sebelum diuji dan nantinya akan digunakan sebagai acuan temperature maksimum hubung singkat pada penghantar. *Adiabatik* dan *non adiabatik* adalah beberapa contoh metode yang dapat digunakan untuk mengukur kapasitas arus hubung singkat. Metoda *non adiabatik* dilakukan dengan tujuan untuk mencari kekurangan yang ada pada metode *adiabatik* agar didapat analisis hasil perhitungan arus hubung singkat yang tepat hasilnya. Penelitian dari penulis menghasilkan “bahwa arus hubung singkat yang dapat naik dari 2,05% hingga 4,89 %”, Jika saat penanaman pada sekitar kabel diberikan tanah isian yang memiliki daya tahanan panas yang memiliki jenis tidak tinggi.

Jurnal penelitian yang dilakukan oleh A Sofwandan mahasiswa jurusan Teknik Elektro ISTN tahun 2018 dengan jurnal yang memiliki judul “Pendeteksian Dini Terhadap Arus Bocor Kabel Tanah Tegangan Menengah pada Transformator 150/20 kV”. Sofwandan melakukan penelitian ini atas dasar terjadinya peristiwa gangguan trip PMT 150 kV dan 20 kV transformator 4 di GI Jatiwaringin. Penulis menggunakan metode kegagalan thermal untuk melakukan perhitungan agar mendapatkan hasil yang akurat untuk mendeteksi secara dini jika terjadi arus bocor. Dalam penelitiannya Sofwandan telah menarik kesimpulan

”Dengan suhu sebesar 35°C dengan menggunakan perhitungan

kegagalan thermal untuk arus bocor didapatkan hasil sebesar 0,5618 A dan pada saat pengukuran diperoleh hasil sebesar 0,6 A. Perbandingan antara perhitungan dengan pengukuran arus bocor pada kabel diperoleh sebesar 6,36 %”.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Saluran Transmisi

Saluran Transmisi merupakan saluran yang menghubungkan antara Sumber Tenaga menuju beban - beban yang ada. Saluran transmisi sendiri memiliki beberapa macam konstruksi seperti Saluran Udara dan Saluran Kabel Bawah Tanah, dan selanjutnya akan dijelaskan mengenai keduanya.

2.2.1.1 Saluran Udara

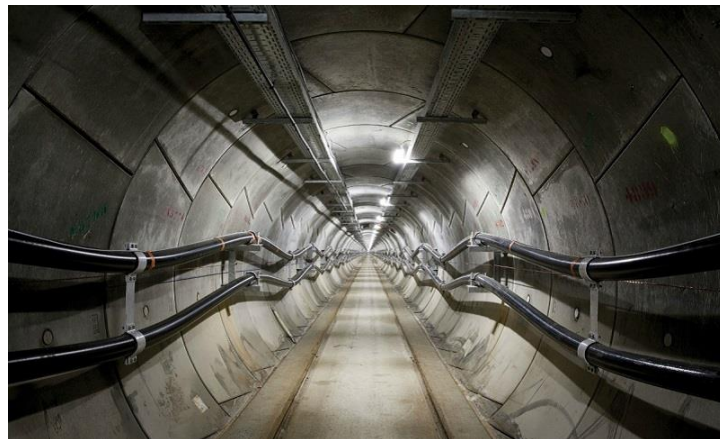
Saluran transmisi udara merupakan saluran transmisi yang memiliki bentuk fisik yang terdiri dari kabel – kabel yang memiliki tegangan dan arus. Bentuk fisiknya ini terdiri dari beberapa komponen yaitu tiang – tiang penyangga yang tingginya sendiri memiliki perbedaan – beda tergantung dari tegangan yang dilaluinya. Dengan melihat konstruksi dari saluran udara memiliki beberapa kelemahan yaitu karena letaknya di tempat terbuka maka saluran udara ini sangat berpengaruh terhadap cuaca dan hal ini akan menyebabkan bahwa saluran udara ini rentan mengalami gangguan karena pengaruh oleh cuaca dan kelemahan lainnya adalah karena letaknya diatas dari permukaan tanah maka akan mengurangi estetika dari sekitar lokasi pemasangannya saluran udara. Dari beberapa kelemahan saluran udara terdapat juga beberapa kelebihan seperti mudah dalam perawatannya dan memiliki biaya investasi yang lebih murah.



Gambar 2.1 Saluran Transmisi Udara

2.2.1.2 Saluran Bawah Tanah

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam didalam tanah. Kategori saluran seperti ini adalah favorit untuk pemasangan didalam kota, karena berada didalam tanah maka tidak mengganggu keindahan kota dan juga tidak mudah terjadi gangguan akibat kondisi cuaca atau kondisi alam. Namun tetap memiliki kekurangan, antara lain mahal dalam instalasi dan investasi serta sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya.



Gambar 2.2 Saluran kabel bawah tanah

2.2.2 Komponen Saluran Kabel Bawah Tanah Tegangan Tinggi

Dalam jaringan transmisi, minyak dapat digunakan sebagai media *dielektrik* pada kabel berjenis SKTT, selain itu media minyak juga dapat digunakan sebagai penyalur panas. SKTT dapat dibagi ke dalam beberapa sub sistem sebagai berikut:

2.2.2.1 Subsystem Penyalur Arus (*Current Carrying*)

Fungsi dari subsistem penyalur arus adalah sebagai media penyalur arus dalam system kabel tenaga. Komponen yang dapat mendukung subsistem ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Konduktor

Konduktor merupakan media yang dapat dijadikan untuk aliran arus. Konduktor yang digunakan yaitu tembaga atau aluminium, logam tersebut dapat digunakan dengan standar yang ada dengan acuan arus, beban dan dari segi keekonomisan.

Untuk dapat mendistribusikan energy listrik pada tegangan tinggi biasanya digunakan konduktor berjenis *miliken*. Konduktor tersebut biasanya dibuat dengan “*Six Stranded Segmen*” dan terisolasi antara bagian satu dan lainnya, dan akan disusun pada sekeliling kanal yang berisi spiral penyangga dan akan diikat bersama dengan *pita bronze*. Pada setiap segmen akan dibentuk oleh sejumlah konduktor bulat dan akan terpasang sempurna dan akan membentuk segmen yang dibutuhkan. Kontruksi harus dibuat secara *equal*. agar dapat meminimalisir rugi – rugi yang diakibatkan oleh efek kulit. Skin efek juga dapat dipengaruhi oleh ukuran kanal (*duct*), misalnya untuk konduktor berukuran 1600 mm^2 , jenis (*conci*) di 50 Hz dan dalam suhu 85° C akan mempunyai skin efek 24,5 % jika kanal 12 mm dan 60 % jika kanal 40 mm.

Pada Konduktor “*Mililiken*”, karena pada setiap sektor telah secara *automatic ditransposed*, maka pembesaran pada diameter kanal akan dapat mengurangi pengaruh skin efek yang cukup signifikan. Nilai rugi – rugi akibat skin efek pada konduktor cooper “*mililiken*” yang cukup rendah yaitu untuk diameter 2500 mm^2 pada 85° C dan 25 mm kanal adalah 14 %. nilai rugi – rugi akibat skin efek yang rendah yaitu 2 % s/d 4 % akan bisa dicapai oleh konduktor yang memiliki susunan elemen yang terisolasi setiap satu dan yang lain menggunakan *enamel*.

b. Terminasi

Terminasi adalah sambungan kabel yang menghubungkan ke peralatan satu dengan peralatan lainnya (*GIS*). Terminasi / *Sealing End* sudah memiliki seal yang tertutup rapat dan terpisah secara fisiknya antara selubung logam dan ujung konduktor.

Isolasi pada bagian luar biasanya terbuat dari porselin yang memiliki ketahanan akan cuaca ekstrem. *Sealing End* ini diciptakan tahan terhadap ketika

tegangan uji kabel, tetapi terminasi harus mempunyai tegangan impulse yang tinggi. Terminasi kabel *three core splitter box* digunakan untuk memisahkan dari *single core* menjadi *three core* dan komponen ini akan dipasang di *sealing end*. *Sealing end* berjenis minyak didesain dapat menahan tekanan minyak yang sangat tinggi. Susunan ini dibuat agar memudahkan pada saat pemeliharaan rutin tanpa harus melepas kabel dan akan memudahkan pengecekan minyak di boks kabel.



Gambar 2.3 *Sealing* atau *Cable Head (Terminal Out Door)*

c. Sambungan (*Jointing*)

Joint digunakan untuk menyambung 2 buah kabel. Berdasarkan kondisi hubungan isolasi minyak pada kedua ujung, *jointing* dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu:

1. Sambungan Lurus (*Straight Joint*)

Pada *straight joint*, minyak di kedua ujung kabel ini dalam keadaan terhubung. *Straight joint* yang mempunyai *bending* di area dikenal dengan sebutan *flexible joint*.

Pada sambungan lurus, konduktor aluminium akan disambung dengan metode di las / mengecor dan pada saat penyambungan tekanan minyak dipantau pada tekanan yang rendah pada sisi ujung kabel. Pada setiap ujung kabel memiliki boks tekanan minyak yang memiliki katup – katup untuk dapat

mengatur, sehingga minyak dapat secara terus – menerus meresapi isolasi kertas pada saat pengerjaan sambungan. Pada kabel jenis lainnya, pendingin dan isolasi menggunakan kanal minyak jenis *steel spiral* yang akan dipasang pada kanal pusat konduktor yang bertujuan agar minyak dapat terus mengalir menekan isolasi kertas.

2. Sambungan Henti (*Stop Joint*)

Pada sambungan henti, minyak pada masing - masing ujung kabel tidak terhubung, dipisah oleh insulated joint. Pada *Oil Filled Cable (OFC)*, *stop joint* digunakan untuk membagi sirkuit kedalam beberapa seksi tekanan minyak yang terpisah, dan setiap sambungan henti dilengkapi dengan peralatan untuk mengekspansi minyak. Pemisahan ini bertujuan untuk dapat membatasi tekanan minyak agar tidak melebihi batas keamanan tekanan dan juga dapat membagi pada beberapa bagian panjang kabel menjadi beberapa seksi tekanan minyak agar dapat memudahkan pada saat pemeliharaan.

Komponen pada Joint sendiri adalah sebagai berikut:

1. Joint / *Sleeve* atau konektor.
2. Pipa minyak / *oil duct*.
3. Isolasi kertas.
4. Semikonduktor.
5. *Screen*.
6. Selongsong / tube.
7. *Insulated Joints*.

2.2.2.2 Sub Sistem Isolasi

Pada setiap bagian konduktif dari suatu peralatan listrik harus aman bagi penggunaannya, hal ini pada umumnya bagian ini akan dilapis dengan bahan yang bersifat isolasi. Hal ini dikarenakan bahan isolasi dapat digunakan untuk memisahkan antara bagian yang bertegangan, maka sifat kelistrikan dari bahan isolasi akan sangat penting, disamping sifat termal, sifat mekanis, ketahanan

terhadap bahan kimia serta sifat lainnya yang juga perlu diperhatikan dari karakteristik isolasi tersebut. Pada sistem Saluran Kabel Tegangan Tinggi dikenal dengan beberapa jenis isolasi adalah sebagai berikut:

1. Isolasi Padat
2. Isolasi Cair

a. Isolasi Padat

Isolasi padat sendiri terdiri dari beberapa jenis, yaitu:

1. Kertas

Isolasi kabel jenis ini dibuat dari isolasi jenis padat yang terdiri dari kertas yang telah dilapiskan pada konduktor yang ditambahkan dengan *Vicosce Compound* dan selanjutnya akan diberikan treatment agar dapat membuang udara dan kelembaban yang terdapat didalamnya.

Cellulose paper merupakan bahan yang dilapiskan konduktor sehingga membentuk isolasi kabel yang dalam proses pembuatannya akan membentuk dinding isolasi yang rapat dan *uniform*. Harus diadakannya pengawasan pada proses penggelaran kabel dilapangan seperti proses pembengkokan, tarikan maupun kelembabannya. Ketebalan kertas biasanya bervariasi, kertas tipis yang memiliki *dielektrik strength* yang tinggi tetapi kekuatan mekaniknya rendah dan dapat digunakan pada tempat yang paling dekat dengan konduktor. Kertas yang digunakan memiliki kemurnian dan keseragaman yang tinggi dan akan dicuci dengan menggunakan *deionize water* selama proses pembuatannya.

Sifat kerapatan dari kertas dipilih secara hati-hati untuk dapat memastikan akan mendapatkan *dielektrik strength* yang paling tinggi dan juga dapat kompatibel dengan metode *impregansi* yang lain. Isolasi tersebut mempunyai ketebalan yang bervariasi dari 3 mm untuk 30 kV dan 35 mm yang digabung dengan minyak bertekanan tinggi khususnya untuk tegangan 750 kV s.d 1000 kV. Supaya dapat menjaga nilai isolasi pada kertas maka akan diberi tekanan 1 s.d 5 atm. Isolasi berjenis ini dapat digunakan untuk instalasi kabel bertegangan tinggi agar dapat menaikkan nilai *dielektrik strength* pada komponen isolasi.

2. *Bushing*

Untuk menjaga nilai isolasi dari kertas maka akan diberi tekanan sebesar 1 s.d 5 atm. Isolasi jenis ini umumnya digunakan untuk system instalasi kabel yang memiliki tekanan tinggi agar dapat menaikkan *dielektrik strength* isolasi.

Bushing yang terbuat dari keramik / komposit merupakan salah satu isolasi yang sangat penting. Pada proses pembuatannya sebagai salah satu bahan isolasi yang sangat penting, porselin ini diberi material *glazur* dengan gelas / kaca. Dengan menggunakan metode pelapisan ini maka arus yang bocor melalui permukaan isolator akan lebih kecil terutama ketika dalam kondisi basah.

Porselin memiliki sifat sebagai berikut:

1. Massa jenisnya berkisar antara 2,3 hingga 2,5 g/cm^3 .
2. Koefisien muai panjangnya berkisar 3×10^{-6} s.d $4,5 \times 10^{-6}$.
3. Memiliki kekuatan tekan 400 hingga 6000 kg/cm^2 .
4. Kekuatan tariknya antara 300 hingga 500 kg/cm^2 (menggunakan pelapis) dan 200 hingga 300 kg/cm^2 (tanpa pelapis).
5. Kekuatan tekuk dari 80 hingga 100 kg/cm^2 .

Adapun sifat – sifat kelistrikan dari porselin yaitu:

1. Resistivitas berkisar antara 10^{11} hingga 10^{14} ohm – cm.
2. Permittivitas relative berkisar antara 6 hingga 7.
3. Kerugian sudut dielektrik ($\tan \delta$) 0,015 hingga 0,02.
4. Tegangan break down berkisar 10 kV sampai 30 kV/mm.

3. *Heat Shrink*

Isolasi ini memiliki fungsi “*Anti Corrosion Protection*” menggunakan bahan “*Adhering Layer Covered*” yang dapat melindungi *terminasi joint* maupun *sealing end*. Isolasi jenis ini dipasang dengan cara dipanaskan dan akan dipasang pada tempatnya yaitu pada lapisan terluar pada kabel.

4. Compound

Compound memiliki fungsi sebagai komponen yang dapat mengisolasi sambungan kabel dengan *metal case joint* atau terhadap *grounding*. Komponen ini dibuat dari bahan seperti aspal yang biasanya digunakan pada masing – masing *joint*.

5. Minyak Isolasi Kabel

Bahan minyak isolasi kabel pada umumnya digunakan sebagai pendingin kabel dan isolasi. Karena itu persyaratan untuk bahan isolasi kabel yang dapat digunakan untuk isolasi yaitu mempunyai tegangan tembus dan daya serap panas yang tinggi.

2.2.2.3 Pelindung Mekanik (*Outer Case*)

Karena kabel diletakkan dibawah tanah yang banyak akan terkena efek getaran, maka diperlukan perlindungan mekanik SKTT dari adanya gangguan eksternal yang akan memberikan efek stress mekanik pada kabel. Untuk mengantisipasi hal tersebut, maka kabel akan dilengkapi dengan komponen sebagai berikut:

1. Lead Sheat

Material ini biasanya berupa suatu tembaga tipis atau pita *alloy* yang sangat ketat yang dililitkan secara berlapis - lapis pada kabel untuk dapat membentuk suatu penutup. Selubung ini terbuat dari bahan timah yang dipasang pada bagian setelah isolasi. Selubung alumunium itu sendiri berfungsi untuk dapat menaikkan fleksibility ketebalan selubung aluminium berpengaruh terhadap diameter dan variasi tekanan operasi dengan range 1,5 mm hingga 5,5 mm.

2. Bedding

Bedding merupakan komponen yang dapat menghindarkan permukaan *leadsheet* dari korosif dengan cara mencegah air masuk ke dalam. Material *bedding* ini biasanya berbahan dasar tape yang elastis atau karet.

3. Armour Rod

Armour rod merupakan suatu komponen untuk dapat menahan ekspansi tekanan termis dari luar maupun dari dalam. Material ini biasanya berbahan dasar galvanis steel wire yang memiliki ukuran dari diameter 8 mm hingga 10 mm yang dililitkan pada kabel.

4. Black PE (Poly Ethelene) dan inner sheath

Extruded black PVC merupakan komponen penutup kabel bagian luar dan ditambahkan bahan kimia *lead naphtenate* seperti pada *anti termite*, memiliki nominal ketebalannya 3 mm. Penutup pengaman anti korosi dan sebagai lapisan *bedding* untuk lapisan anti termite pita kuningan *exreuded black polyethylene compound* digunakan memiliki tebal nominal 2 mm.

5. Flange Sealing End

Flange sealing end memiliki fungsi untuk melakukan pernapasan atau pembuangan udara yang terjebak didalam *top sealing end* setelah dilakukan pengisian minyak isolasi. material *flange sealing end* sendiri terbuat dari tembaga atau sejenis dengan material yang digunakan pada *top connector*.

6. Mechanical Structure

Mechanical structure adalah komponen yang terbuat dari *galvanis steel* yang berfungsi untuk menyangga *sealing end*.

7. Outer Case

Outer case merupakan komponen yang melindungi *joint* dengan cara menampung *compound* pada sambungan.

8. Joint Box

Pada sambungan (*joint*) yang bersekat, selubung logam diikat (*bond*) dan langsung ditanahkan, namun pemasangan seperti ini instalasi tidak dapat dilakukan pengujian. Dengan alasan ini maka pada tiap sambungan, kabel penghubung *crossbonding* ditarik kedalam box khusus atau disebut dengan *box culvert*.

9. Cable Duct

Cable duct sebagai media saluran kabel bawah tanah berbentuk terowongan yang akan melintasi jalan raya, rel kereta maupun yang melauai sungai kecil biasanya digunakanlah *cable duct*. *Cable duct* terbuat dari beton atau baja yang memiliki kekuatan mekanis untuk dapat melindungi tekanan dari beban yang melintas diatas *cable duct*.

10. Jembatan Kabel

Jembatan kabel memiliki fungsi untuk sarana penopang kabel yang melintasi sungai atau jembatan, jembatan kabel ini terbuat dari beton atau baja dimana pada kedua ujungnya akan di beri peringatan pengaman.

2.2.2.4 Sub Sistem Pelindung Elektrik

Kabel akan mengalami stress elektrik yang ditimbulkan oleh tegangan induksi konduktor ke komponen logam pada kabel. Tegangan induksi ini dapat menimbulkan arus induksi yang dapat menyebabkan panas, baik pemanasan local maupun rugi panas dalam proses transfer daya. Komponen – komponen yang termasuk pelindung elektrik adalah sebagai berikut:

1. Electrostatic Screen

Electrostatic screen dipasang pada konduktor dan isolasi kabel minyak tegangan tinggi. *Screen* ini sendiri berguna untuk mendistribusikan *stress electric* pada kabel secara radial, hal ini untuk menghindari timbulnya stress secara *longitudinal* dan akan terkonsentrasi pada permukaan yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi.

Bahan *screen* untuk isolasi pita kertas pada umumnya terbuat dari pita kertas yang dilapisi aluminium atau pita kertas yang terbuat dari *semi conducting carbon* atau *carbon paper*. Untuk jenis isolasi *XLPE*, *screen* terbuat dari campuran *semi conducting extruded*.

Screen ini dilengkapi dengan elektroda pentanahan yang memiliki fungsi melewatkan jalur balik untuk arus gangguan sehingga harus didesain untuk mampu dilalui sejumlah arus pada saat terjadi hubung singkat tanpa menyebabkan kerusakan pada isolasi. Selubung penutup metal yang hampa sering kali diperlukan dan ini akan menyediakan fungsi tambahan untuk menahan tekanan pada selubung, misal untuk kabel minyak dan juga berfungsi sebagai penahan kelembaban.

2. Sistem Pentanahan

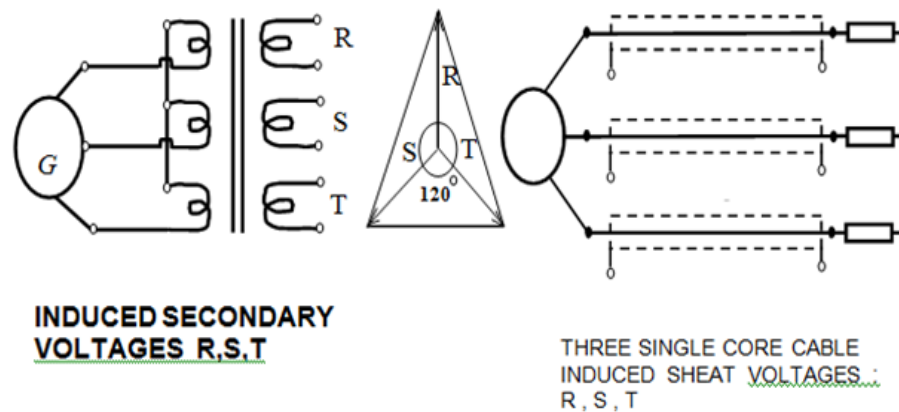
Sistem pentanahan memiliki fungsi yaitu untuk menghilangkan arus selubung logam yang diakibatkan oleh induksi pada konduktor yang dapat menimbulkan rugi panas.

Komponen – komponen pada sistem pentanahan terdiri sebagai berikut:

- a. Selubung Logam
- b. Pisau pentanahan
- c. *Compound*
- d. *Isolator Support*
- e. *Arrester* pentanahan

a. Beragam Sistem Pentanahan pada Saluran Kabel Tegangan Tinggi.

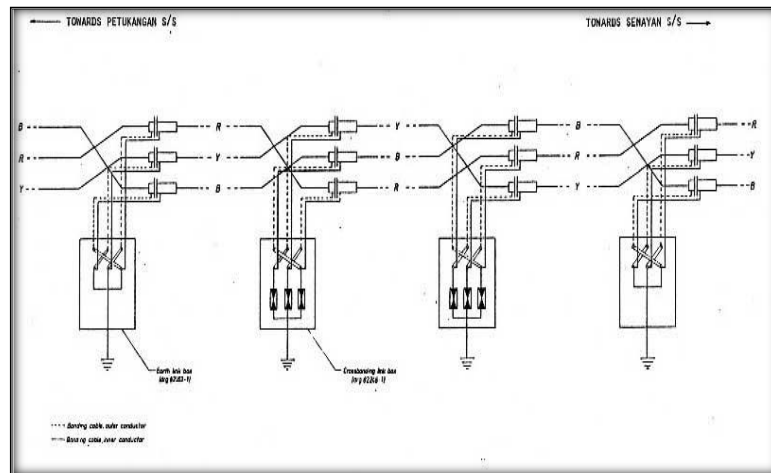
Pada system tiga fasa yang terdiri dari tiga kabel berinti tunggal akan menginduksikan tegangan pada setiap masing – masing selubung logam dan tegangan induksi yang timbul akan bergeser sampai dengan 120° . Apabila system tiga fasa tersebut seimbang maka jumlah tegangan ketiga konduktor tersebut akan sama dengan nol. Kenyataan ini bila system kabel bawah tanah tersebut menggunakan system crossbonding



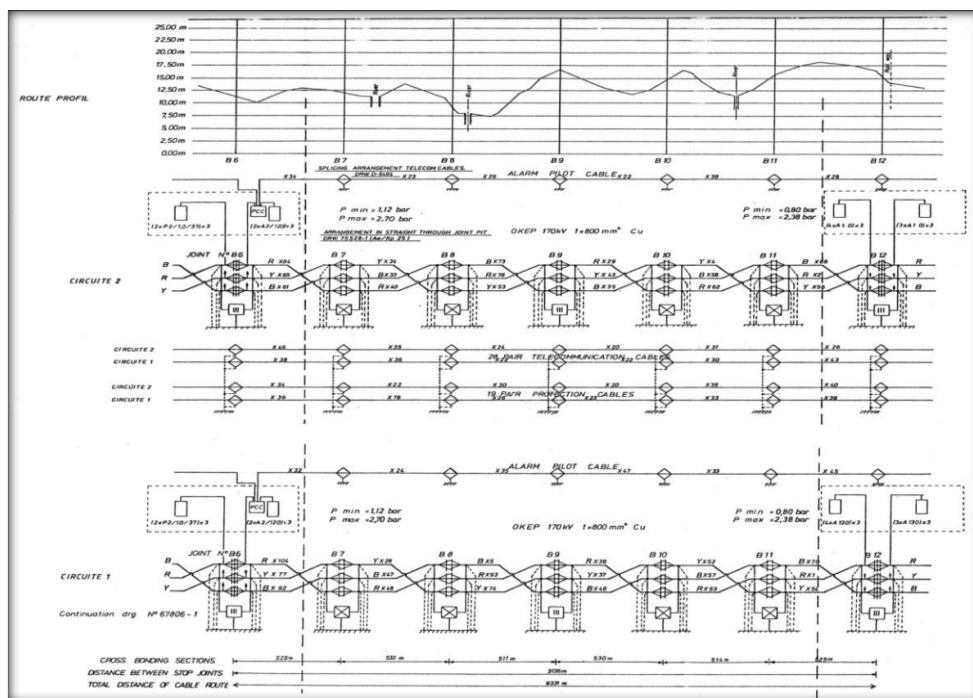
Gambar 2.4 Representasi kabel system 3 fasa

b. Sistem Pentanahan dengan Penggabungan Selubung Logam pada Kedua Ujung

Untuk mencegah tegangan induksi selubung logam yang tinggi dan akan sangat berbahaya maka selubung logam harus digabung dan ditanahkan pada setiap kedua ujungnya. Kabel inti tunggal dimana selubung logam diikat (dibonding) pada setiap kedua ujungnya akan bekerja seperti Transformator yang kumparan sekundernya dihubung singkat dan melakukan arus hubung singkat. Arus selubung logam akan menimbulkan rugi selubung logam dan akan menimbulkan panas yang harus dikompensasi dengan mengurangi arus pada beban pada konduktor. Hal ini berarti bahwa penggabungan selubung logam pada kedua ujungnya akan berkurang kuat hantar arusnya dibandingkan dengan system yang diikat (*bonding*) satu ujung saja.



Gambar 2.5 sistem crossbonding



Gambar 2.6 Detail sistem crossbonding

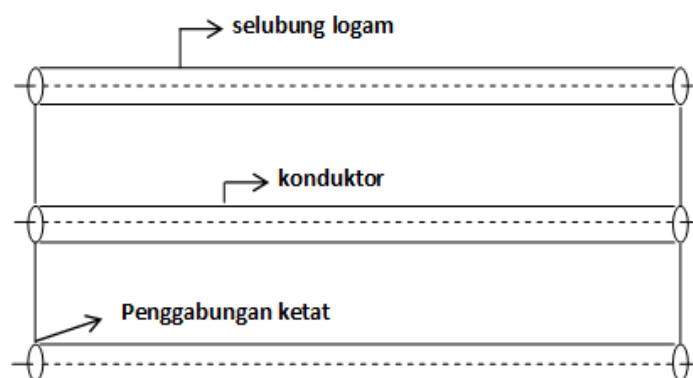
c. Kontruksi Solid Bonding

Pada pemasangan dengan cara ini diadakan penggabungan ketat selubung logam kabel fasa pada beberapa tempat sepanjang bentangan kabel,

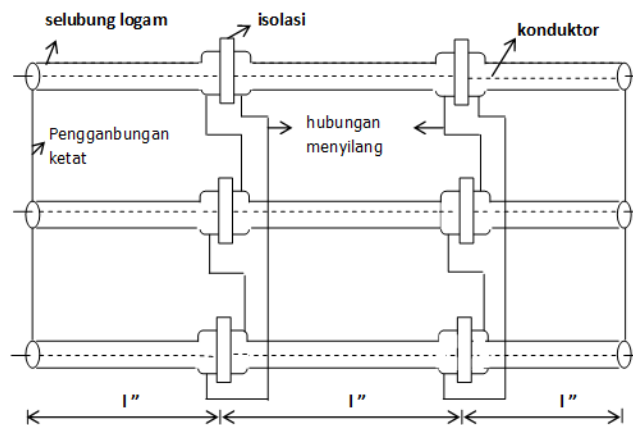
terutama pada kedua ujung kabel. Pentanahan selubung logam hanya akan dilakukan pada satu titik untuk setiap fasa yaitu pada ujung atau pada tengahnya.

d. Cara Kontruksi *Sheath – Cross Bonding*

Cara pemasangan dengan kontruksi *sheath – cross bonding* (penggabungan dengan cara menyilang lapisan selubung logam) untuk saluran bawah tanah yang menggunakan kabel berinti tunggal dengan lapisan selubung logam (*Sheath*).



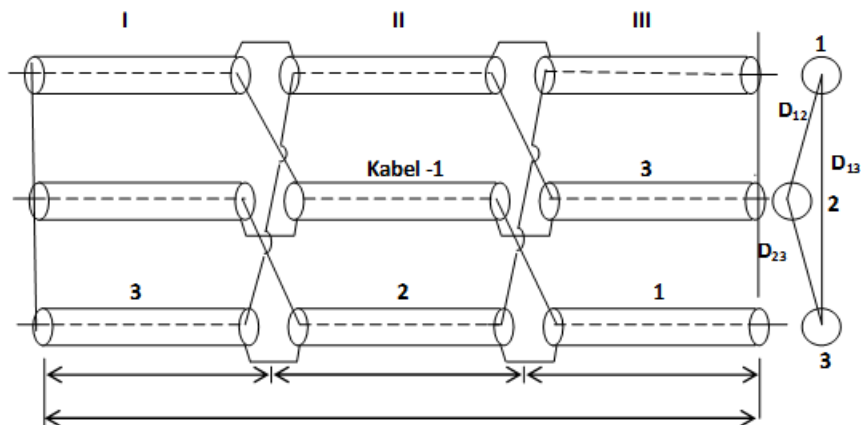
Gambar 2.7 Pemasangan kabel berinti tunggal dengan kontruksi *Solid bonding*



Gambar 2.8 Pemasangan kabel berinti tunggal dengan kontruksi *Sheath - Crossbonding*

e. Kontruksi Transposisi Cross Bonding

Pemasangan dengan kontruksi *crossbonding* jenis ini untuk digunakan pada kabel bawah tanah yang menggunakan inti kabel tunggal. Kabel fasa ditranposisi antar bentangan salurannya, sehingga batangan kabel akan terbagi menjadi tiga bagian yang memiliki panjang yang sama. Pada sepertiga dan dua pertiga panjang bentangan dilakukan penggabungan antara selubung logam kabel fasa.



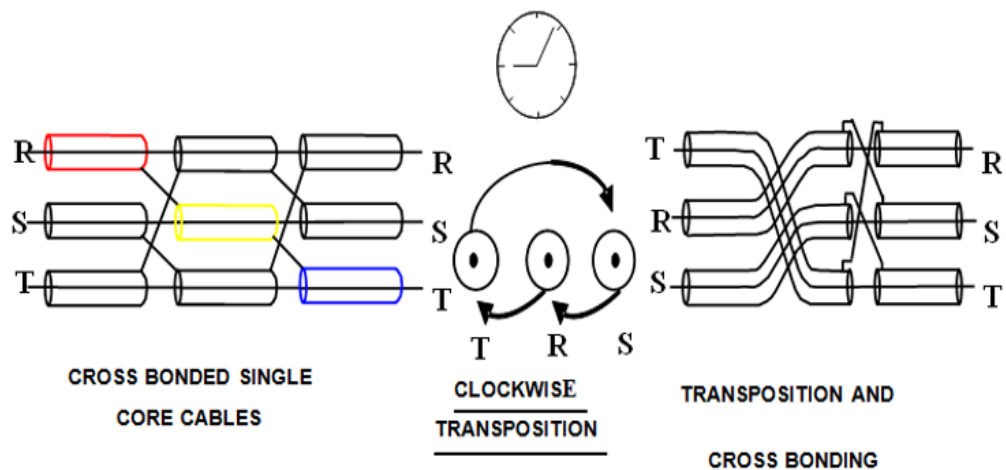
Gambar 2.9 Pemasangan kabel berinti tunggal dengan kontruksi tranposisi *Crossbonding*

f. Sambung Silang Selubung

Kabel pada jaringan distribusi biasanya dipasang dengan selubung digabungkan dan selanjutnya akan ditanahkan. Guna membatasi arus sirkulasi pada kabel inti satu yang disebabkan oleh *fluksi magnetic* antara konduktor dan selubung maka pemasangan kabel harus dekat dan selubung menempel dengan posisi “*trefoil*”. Namun, posisi seperti ini cukup riskan pada saat dispasi panas.

Jika kabel system tiga fasa inti satu dibagi menjadi tiga bagian yang sama dan selubung itu dapat diinterkoneksi, maka tegangan induksi ini akan saling menghilangkan. Jika kabel – kabel inti satu ini digelar dengan posisi mendatar (*flat*) maka yang terjadi tegangan induksi pada kabel ditengah tidak sama dengan dua kabel yang berada diluarnya dan jumlah tegangan induksi tidak sama dengan nol. Untuk itu setiap akan memasuki kabel (*joint*) kabel tenaga dilakukan penukaran

fasa (*transposisi*) dan hubung silang selubung logam dibuat dengan cara perputaran fasa berlawanan dengan *transposisi*, sehingga secara efektif selubung logam akan tersambung lurus. Apabila instalasi kabel tegangan tinggi dibuat transposisi dan saling sambung silang, maka rugi – rugi akan sama dengan nol.



Gambar 2.10 Pemasangan kabel berinti tunggal dengan konstruksi Sambung silang selubung logam

3. Kabel Coaxial

Kabel *coaxial* memiliki fungsi sebagai *minor section* yang akan terangkai menjadi *major section*, hal ini membuat diperlukannya kabel penghubung yang didesain khusus. Kabel jenis ini harus memiliki impedansi yang serendah mungkin. Pada kondisi normal kabel penghubung tidak dialiri arus, tetapi pada waktu terjadi gangguan akan mengalir arus selubung logam, sehingga kabel penghubung tersebut harus memiliki penampang paling tidak harus sama dengan kemampuan selubung logam yaitu 240 mm^2 atau 300 mm^2 hal ini berfungsi untuk mengetahui kekuatan dari isolasi *lead sheet* yang akan menuju pada *joint* selanjutnya di depannya maupun dibelakangnya.

2.2.2.5 Sub Sistem Pendingin

Subsistem ini memiliki fungsi sebagai konduktor dalam mentransfer daya. Minyak yang bersirkulasi melalui pipa minyak, dalam hal ini digunakan sebagai media penyerap panas. Adapun komponen - komponen dari sub sistem pendingin sebagai berikut:

a. Minyak

Minyak selain sebagai komponen *dielektrik*, minyak juga memiliki fungsi dalam hal mentransfer panas yang timbul akibat adanya proses dalam aliran daya. Minyak yang digunakan sama seperti minyak yang umumnya digunakan pada transformator yang memiliki daya hantar panas yang tinggi.

b. Kanal Minyak / *Oil Duct*

Pada kabel minyak dilengkapi dengan kanal minyak atau lebih biasa disebut dengan *oil duct* yang terbuat dari bahan *steel strip spiral* bulat terbuka yang menggunakan kawat induktor standar. Untuk jenis *segmental selfsupporting conductor* tidak diperlukan menggunakan *steel spiral*. Diameter kanal minyak umumnya disesuaikan dengan persyaratan sistem hidrolis dan umumnya menggunakan 12 mm s.d 25 mm. Pada sistem instalasi kabel dilengkapi dengan tangki – tangki ekspansi baik ujung yang satu maupun dengan ujung yang lainnya semua tergantung pada sirkuitnya, dan bisa juga dipasang tangki di tengah – tengah instalasi kabel tersebut. Instalasi kabel dirancang menggunakan prinsip bahwa pada kondisi pelayanan yang tidak normal maka minyak kabel akan lebih tinggi dari tekanan atmosfer sepanjang kabel pada sistem instalasi tersebut.

c. Tangki Minyak

Tangki minyak ini berfungsi sebagai antisipasi pemuaian minyak akibat panas, maka dibutuhkan ruang lebih untuk fleksibilitas perubahan volume minyak, maka dibutuhkan tangki minyak. Fungsi lain dari tangki minyak yang sangat penting

adalah untuk *reservoir* cadangan minyak yang dapat langsung dipasok menuju kedalam kabel apabila terdapat kebocoran pada kabel.



Tangki minyak main hole

Tangki minyak pada Gardu Induk

Gambar 2.11 Tangki Minyak

d. Pipa Minyak

Pipa minyak memiliki fungsi sebagai sarana penghubung minyak dari *sealing end* atau *stop joint* menuju minyak yang disebabkan oleh temperature minyak kabel.

2.2.2.6 Sub Sistem Pengaman Kabel

Sub system pengaman kabel merupakan alat penunjuk tekanan minyak kabel yang letaknya digabung dengan alat - alat proteksi dan terdapat juga arrester yang dapat melindungi kabel dari tegangan lebih surja. dan komponen – komponen yang terdapat di dalamnya yaitu:

a. Manometer

Manometer memiliki fungsi sebagai alat monitoring tekanan media isolasi dan sebagai back up proteksi mekanik diluar proteksi – proteksi secara elektris yang telah ada.



Gambar 2.12 Manometer tekanan minyak tangki

b. Pilot Cable

Pada saluran kabel bawah tanah tegangan tinggi selain kabel power yang tertanam didalam tanah, hal ini bukan semata – mata dalam saluran kabel bawah tegangan tinggi tidak terdapat kabel yang tidak di bawah tanah, dalam saluran ini juga terdapat kabel lain dalam saluran ini, adalah kabel pilot. Kabel tersebut letaknya tertanam dekat dengan kabel power sehingga kemungkinan besar dapat terkena induksi, untuk itu harus dibuat dengan desain yang khusus dan kabel ini diciptakan agar mampu menahan terhadap tegangan tinggi hingga 15 kV. Kabel pilot memiliki beberapa jenis yaitu sebagai berikut:

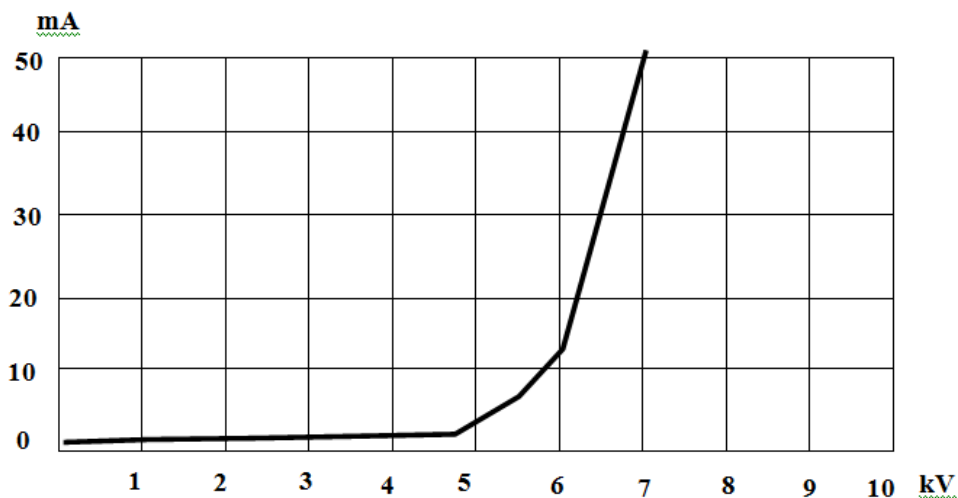
1. Kabel 7 pair digunakan untuk mengamankan tekanan minyak yang dapat memberikan alarm maupun dapat langsung mentriapkan kabel itu sendiri.
2. Kabel 17 pair merupakan kabel penghubung pengaman kabel terhadap adanya gangguan listrik dan fungsi lainnya adalah spemasok power ke proteksi *differential* kabel.
3. Kabel 28 pair umumnya digunakan sebagai fasilitas untuk komunikasi data dan suara.

c. SVL

Tingkat isolasi selubung logam dibuat tahan terhadap tegangan surja yang disebabkan oleh adanya gangguan. Hal ini agar dapat dibatasi harga maksimum tegangan *impulse* yang masuk ke kabel sehingga isolasi selubung logam akan aman. Peralatan ini mempunyai tahanan tidak linier atau sela percik (*Spark Gap*). Kotak

hubung digunakan tahanan tidak linier yang mempunyai tahanan dalam tinggi pada kondisi normal dan mengalirkan arus yang kecil. Tahanan akan menurun secara cepat pada waktu tegangan naik dan menyalurkan arus yang besar pada waktu terjadi pukulan impulse serta mencegah tegangan surja diatas tingkat isolasi selubung logam.

Jika tahanan tak linier ini terkena tekanan tegangan *impulse* atau tegangan surja maka akan mengalir arus yang besar sehingga dapat merusak tahanan tak linier. Untuk itu setelah terjadi gangguan yang besar maka tahanan tak linier atau SVL ini perlu dilakukan pemeriksaan dan pengukuran disamping pemeliharaan secara regular.



Gambar 2.13 Karakteristik tegangan dan arus pada SVL

d. Tank Chamber

Instalasi kabel tanah tegangan tinggi jenis ini menggunakan minyak yang dilengkapi dengan instalasi pemasok minyak yang memiliki fungsi menjaga kondisi tekanan didalam kabel agar selalu positif. Pemasok minyak menggunakan tangki-tangki yang bertekanan, akan memberikan tekanan pada kondisi kabel bebannya rendah dan tangki juga berfungsi untuk menampung kelebihan tekanan pada waktu kabel tersebut dibebani.

Fungsi tangki minyak pada instalasi kabel tegangan tinggi minyak memiliki peranan yang sangat penting. Pada tangki minyak yang dipasang di ruang bawah

tanah, secara fisik tangki tersebut berada pada tempat yang lembab dan kemungkinan dapat terendam air. Tangki minyak ini memiliki jumlah tertentu, tergantung pada profile kabel itu sendiri, semakin rendah kabel tersebut ditanam, maka tangki minyak yang harus disediakan bertambah dan karakteristiknya pun juga pasti berbeda - beda. Untuk dapat menjaga peralatan ini bekerja dengan baik serta dapat terjaga kondisinya maka perlu dilakukan pemeliharaan, baik yang dipasang diatas maupun dibawah tanah harus selalu dilakukan pemeliharaannya, namun untuk tangki yang dipasang dibawah tanah lebih sering diperiksa khususnya pada musim hujan. Untuk melakukan pemeliharaan tangki-tangki tersebut dapat dilakukan dengan kondisi instalasi dalam keadaan bertegangan yaitu dapat dipakai tangki cadangan, untuk mengganti tangki yang dilakukan pemeliharaan

2.2.3 Macam – macam Gangguan Pada Saluran Kabel Bawah Tanah

2.2.3.2 Tegangan Lebih *Transien*

Suatu sistem tenaga listrik dapat mengalami gangguan yang bisa mengakibatkan terhentinya pendistribusian daya listrik. Menurut Aris munandar dalam kutipannya.” Salah satu penyebab gangguan yang mungkin terjadi adalah rusaknya sistem isolasi karena pengaruh tegangan lebih akibat operasi pensaklaran maupun akibat surja hubung, oleh karena itu dalam pengoperasian system tenaga listrik perlu perhatian khusus pada system proteksi terhadap tegangan lebih”.

Tegangan lebih dapat dikategorikan beberapa menurut *IEC*, yang ditimbulkan oleh:

a. Tegangan Lebih (*Lightning Overvoltage*)

Tegangan lebih petir atau yang biasa disebut surja petir merupakan tegangan yang amplitudonya akan naik dalam waktu yang sangat singkat dan akan turun secara perlahan. Surja petir memiliki amplitude tertinggi dibandingkan tegangan lebih lainnya. Arus yang dihasilkan bisa mencapai sekitar 100 kA dalam waktu kurang dari satu sampai dengan beberapa puluh

mikrodetik. Surja petir dapat menyebabkan kerusakan pada jaringan tegangan rendah dan peralatan elektronik tegangan rendah termasuk juga dapat merusak saluran transmisi maupun Gardu Induk.

b. Tegangan Lebih Surja Hubung (*Switching Overvoltage*)

Tegangan lebih surja hubung merupakan peristiwa munculnya tegangan lebih yang bisa diakibatkan karena proses pensaklaran (*switching*) dalam keadaan bertegangan. Tegangan lebih ini merupakan tegangan lebih transien.

c. Tegangan Lebih Sementara (*Temporary Overvoltage*)

IEEE standard 1.313, 1_ 1996 yang berisi tentang cara mendefinisikan tegangan lebih sementara sebagai isolasi tegangan fasa ke tanah ataupun tegangan fasa ke fasa yang memiliki isolasi pada lokasi tertentu dan memiliki durasi yang relatif lama dan tidak dapat teredam dengan baik atau dengan kata lain hanya dapat teredam dengan lemah. Tegangan lebih sementara biasanya terjadi karena proses pensaklaran (*switching*) atau penyebab lainnya yaitu penghilang gangguan (*fault clearing*) misalnya seperti pelepasan beban, efek harmoninisasi, gangguan fasa tunggal atau gangguan pada sistem pentanahan dan tahanan tinggi maupun pada system yang tidak dapat ditanahkan.

d. Tegangan Lebih Transien (*Transien Overvoltage*)

Tegangan lebih transien merupakan tegangan lebih sementara menurut Kyle G. King (2004) yang juga mengacu pada standar *IEEE (Insitute of Electrical and Electronic Engineers)* No. 1313 .1-1996 adalah tegangan transien teredam yang mengalami *osilasi* serta memiliki durasi yang sangat singkat, hanya sekitar beberapa milidetik atau bisa juga tidak sampai beberapa milidetik.

Durasi Tegangan lebih *transien* dapat dibagi menjadi 2, yaitu tegangan *transien* dengan durasi singkat dan durasi yang lebih lama.

Tegangan *transien* yang berdurasi lebih singkat ini dapat mensimulasikan efek surja petir. Jenis tegangan pengujian ini besarnya menuju nilai puncak selama 1,2 mikrodetik dan akan berkurang menjadi sekitar setengahnya (50 %) dari nilai puncaknya selama 50 mikrodetik, sehingga dapat disebut sebagai gelombang 1,2 / 50 mikrodetik. Tingkat ketahanan tegangan terhadap bentuk gelombang uji ini biasa disebut dengan *Basic Impuls Insulation (BIL)*.

Sedangkan untuk tegangan lebih *transien* dengan durasi waktu yang lebih lama akan mensimulasikan efek surja hubung (*switching*). Tegangan pengujian ini akan naik menuju nilai puncak dalam waktu 250 mikrodetik dan akan berkurang menjadi sekitar setengahnya atau sebesar 50 % dari nilai puncak selama 2500 mikrodetik. Tingkat ketahanan tegangan terhadap bentuk gelombang uji ini biasa disebut *Basic Switching Impuls Insulation Level (BSL)*.

2.2.3.3 Terjadinya Arus Bocor

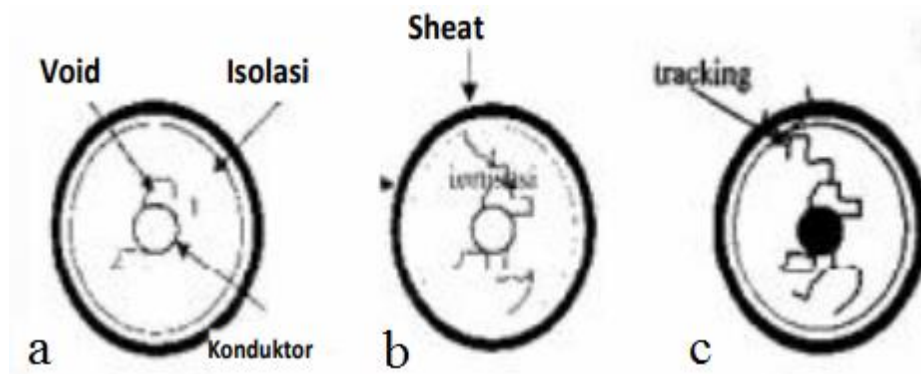
Pada proses terjadinya arus bocor pada kabel memiliki proses yang panjang. Karena untuk kabel pada saat ini diciptakan agar memiliki nilai ketahanan yang sangat baik agar mudah perawatannya dan ekonomis, tetapi dengan begitu kabel tidak luput dari adanya proses pemburukan kinerja atau lebih tepatnya pemburukan isolasi pada kabel. Berikut akan dijelaskan beberapa proses hingga dapat terjadinya arus bocor dalam kabel bawah tanah tegangan tinggi sebagai berikut:

a. Timbulnya Rongga pada Kabel

Pada jaringan kabel terdapat rongga – rongga yang berisi udara atau gas. Rongga udara di dalam kabel ini sendiri terbentuk ketika pada waktu kabel ini dibuat, pada waktu pemasangan kabel atau juga dapat terjadi ketika pemakaian kabel. Seperti yang diketahui bahwa kabel itu sendiri memiliki beberapa lapisan yang bahan dasarnya memiliki sifat yang berbeda – beda dan hal ini juga akan berpengaruh terhadap muai koefisien setiap lapisan yang tentunya pasti memiliki sifat muai sesuai jenisnya. Kabel sendiri pasti akan mengalami anomali cuaca yaitu pendinginan maupun pemanasan yang hal ini kabel juga dapat mengalami proses

pemuaian dan penyusutan. Dan pada saat kabel digunakan pasti juga akan mengalami pemuaian dan penyusutan karena di bebani oleh arus dan pada dasarnya proses pemuaian dan penyusutan setiap lapisan akan berbeda – beda. Hal ini yang mengakibatkan terbentuknya rongga – rongga yang berisi udara diantara lapisan – lapisan kabel, rongga – rongga berisi udara ini memiliki kekuatan *dielektrik* yang lebih kecil dari bahan – bahan isolasi berjenis padat. Selain pada proses penggunaan kabel dan pemasangan kabel rongga – rongga udara ini dapat juga terjadi waktu pembuatan kabel.

Rongga berisi udara merupakan lubang dengan udara yang memiliki tekanan rendah dan juga memiliki kekuatan *dielektrik* isolasi, merupakan salah satu titik lemah isolasi karena *permivitas* yang lebih rendah, hal ini akan berakibat terjadinya peningkatan medan listrik di dalam rongga udara melebihi kekuatan tembus udara.



Gambar 2.14 Proses terjadinya kerusakan pada kabel

b. Proses terjadinya Kegagalan Isolasi

Makna dari kegagalan isolasi dalam sistem transmisi adalah dimana isolasi tidak dapat mengantisipasi atau mencegah keadaan dimana isolasi itu sendiri sudah melebihi batas kemampuan yang dimilikinya. Kegagalan isolasi ini disebabkan banyak faktor yaitu jenis bahan elektroda, konfigurasi medan listrik, tekanan, besar tegangan, dan umur dari bahan isolasi itu sendiri.

c. Kegagalan Thermal

Kegagalan thermal merupakan kegagalan yang terjadi jika kecepatan pembangkitan panas pada suatu titik dalam bahan dapat melebihi laju kecepatan pembuangan panas keluar. Akibatnya akan terjadi kegagalan sehingga tidak stabil dan pada suatu saat akan mengalami kegagalan. Mekanisme kegagalan thermal sendiri mengikuti hukum konversi energi, yaitu panas yang dibangkitkan sama dengan panas yang dapat disalurkan keluar melalui elektroda pada medium disekelilingnya dan ditambah dengan panas yang digunakan untuk menaikkan suhu bahan.

Menurut *Whitehead*, tegangan kegagalan thermal minimum V_{min} adalah:

$$V_{min} = \int_{T_m}^{T_o} \left| \frac{8k}{\sigma} \right| dt$$

Dimana:

V_{min} = Tegangan kegagalan thermal minimum (V)

T_o = Suhu pada permukaan bahan (°C)

T_m = Suhu dimana bahan gagal (°C)

σ = Konduktivitas listrik ($\Omega meter$)

K = Konduktivitas thermal (J /m.s °C)

d. Arus bocor pada kabel

Arus bocor merupakan arus yang dapat mengalir menembus atau dapat melewati permukaan isolasi. Isolasi memiliki fungsi komponen yang dapat memisahkan antara dua penghantar atau lebih yang letaknya saling berdekatan secara elektrik, sehingga dapat menghindarkan terjadinya kebocoran arus. Kebocoran arus juga dapat terjadi ketika proses pembuatan kabel yang disebabkan kesalahan pada prosedur pembuatannya. Tahanan isolasi dapat mempengaruhi besarnya arus bocor. Pada dasarnya semakin panjang kabel maka harus diiringi

dengan besarnya tahanan isolasi juga. Persamaan dari tahanan isolasi adalah sebagai berikut:

$$I_b = \frac{V_m}{R}$$

Dimana:

I_b = Arus bocor (A)

V_m = Tegangan kegagalan thermal minimum (V)

R = Resistansi panas (Ω)

e. Kebocoran Isolasi

Arus listrik secara normal akan melewati konduktor pada kabel, sedangkan arus bocor yang tidak diinginkan akan mengalir secara *radial* dari konduktor melalui dielektrik menuju lapisan pelindung dalam kabel. Maka struktur kabel jika kabel berawal dari konduktor maka kabel tersebut akan memiliki dimensi yang lebih besar.

2.2.4 Macam macam Pengujian pada Saluran Kabel Bawah Tanah Tegangan Tinggi

Pada saat pemeliharaan rutin saluran kabel bawah tanah tegangan tinggi pada umumnya dilakukan beberapa macam pengetesan fungsinya untuk menilai kinerja dari komponen tersebut. Jika terjadi kerusakan maka dapat diketahui secara dini sebelum merusak komponen lainnya, dan pada saat pemeliharaan terdapat beberapa macam pengujian yang dapat dijelaskan seperti dibawah ini:

a. Pengujian Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi merupakan tahanan yang terdapat diantara dua kawat saluran dengan tanah. Pengujian tahanan isolasi memiliki fungsi sebagai standar acuan apakah komponen tersebut masih layak atau tidak layak lagi untuk

digunakan. Pengujian tahanan isolasi ini sendiri merupakan salah satu pengujian tegangan tinggi yang dimana pada proses pengukurannya menggunakan tegangan injeksi hingga 5 kV. Dalam pengujian perlu dilakukan pemadaman pada saluran. Untuk pengujian tahanan isolasi sendiri menggunakan alat bernama *megger* yang dimana pada saat pengujian tegangan injeksi *megger* di tempatkan di skala yang sudah ditentukan hingga nanti terdapat hasil seberapa besar tahanan isolasi yang terdapat pada komponen tersebut. Standar yang digunakan adalah standar yang ditentukan pada PUIL tahun 2011 yang dimana memiliki batasan minimum tahanan isolasi sebesar 1 M Ω ketika diinjeksi menggunakan tegangan 1 kV.

Tabel 2.1 Tahanan Isolasi PUIL Tahun 2011

Voltase Sirkuit Normal (V)	Voltase Uji (V)	Resistans Insulasi (M Ω)
Tegangan Ekstra Rendah	250	≥ 0.5
Sampai Dengan 500 kV	500	$\geq 1,0$
Diatas 500 kV	1000	$\geq 1,0$



Gambar 2.15 Pengujian Tahanan isolasi Kabel

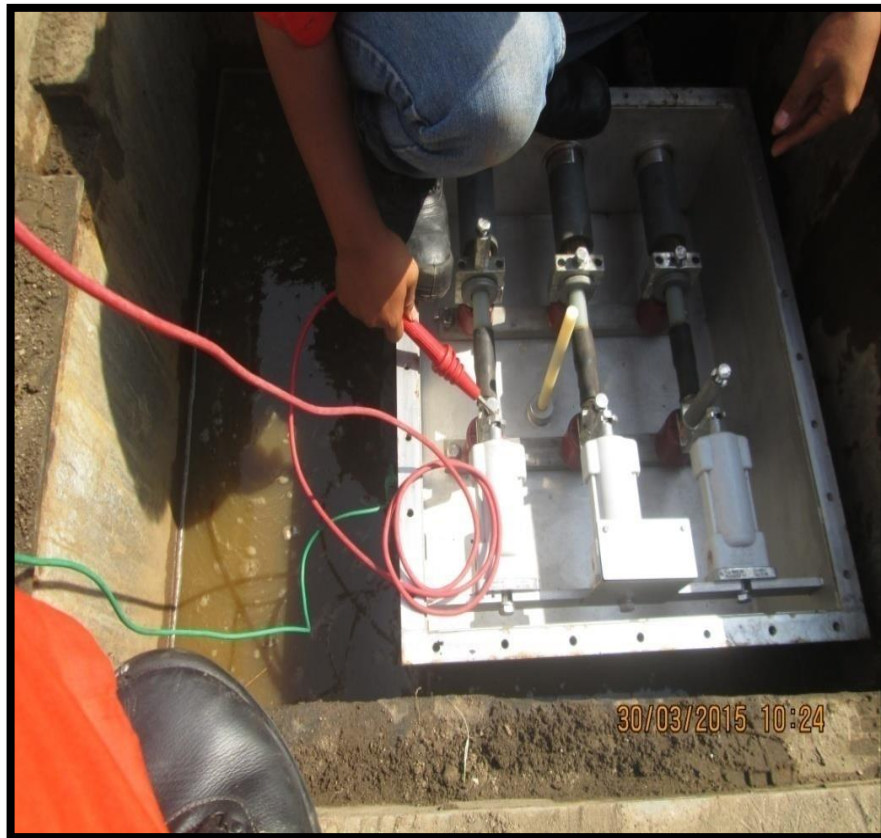
b. Pengujian Arus Bocor

Pada pengujian arus bocor ini memiliki fungsi untuk melihat seberapa besar arus yang bocor melalui isolator. Pada pengujian ini untuk cara penngujiannya dengan cara menginjeksikan tegangan 2,5 kV hingga 5 kV untuk dapat melihat seberapa arus bocor yang terdapat pada komponen tersebut. Dalam pengujian arus bocor ini terdapat dua komponen yang diuji yaitu sebagai berikut:

1. Pengujian *Anti Corrosion Covering (ACC)*

Pada pengujian ini untuk mengetahui apakah kondisi *crossbonding* masih layak atau tidak. *Anti Corrosion Covering* sendiri memiliki fungsi sebagai pelindung karat pada susunan kabel dan akan menjadi jalan balik pada saat arus gangguan apabila terjadi kebocoran arus konduktor utama menuju tanah. Tujuan dari pemasangan komponen ini dalam system *crossbonding* disebabkan karena pada saat kondisi kabel bertegangan maka akan timbul tegangan induksi pada komponen ini dan pemasangan

komponen ini mendukung dari system *crossbonding* yaitu susunan *flat formation* tidak sama, yaitu kabel yang berada ditengah akan lebih tinggi dibandingkan dua kabel disebelahnya. pada pengujiannya sendiri dilakukan dengan menggunakan standar PUIL tahun 2011 dan cara pengujiannya adalah dengan cara menginjeksikan tegangan hingga sebesar 5 kV dan hasil dari arus bocornya sendiri tidak boleh melebihi dari 1 mA.



Gambar 2.16 Pengukuran arus bocor pada kabel di *crossbonding*

2. Pengujian *Cable Covering Protection Unit*

Komponen ini memiliki fungsi sebagai pengaman kabel ketika adanya tegangan lebih *transien* yang dapat merusak sistem *crossbonding*. Prinsip kerja dari komponen ini menggunakan prinsip kerja dari *arrester* yaitu dengan menggunakan prinsip tahanan tak linier, yaitu pada saat tegangan normal memiliki fungsi sebagai isolator dan pada kondisi ada

tegangan lebih transien maka komponen ini akan menjadi bahan yang bersifat konduktor. Dalam pengujian komponen ini sama seperti komponen *Anti Corrosion Covering* yaitu dengan cara menginjeksikan tegangan hingga 3 kV selama satu menit dan selanjutnya akan tampil arus bocor yang terdapat pada alat ukur. Pengujian dengan menggunakan tegangan tinggi 3 kV arus bocornya tidak boleh melebihi dari 1 mA. Standar pengujian *Cable covering protection unit* ini mengacu pada standar *IEC 61643-1 Edition 2.0* yang dalamnya berisi tentang standar arus bocor maksimal pada pengujian adalah 1 mA.



Gambar 2.17 Pengujian besarnya nilai arus bocor pada *arrester*