

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Teori Dasar Kabel Bawah Tanah**

Penggunaan Saluran Kabel bawah tanah Tegangan Menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik dengan upaya 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 yaitu SKTM bawah tanah dan SKTM Laut.

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

Pada metode penyaluran listrik menggunakan SKTM, biasanya gangguan yang terjadi bersifat permanen, dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan atau menyingkirkan gangguan tersebut, sehingga gangguan ini menyebabkan pemutusan tertutup. Penyebab gangguan dari dalam antara lain adalah:

- Tegangan lebih dan arus tak normal (termasuk didalamnya gangguan hubung singkat
- Pemasangan tidak baik
- Penuaan
- Beban lebih
- Kegagalan kerja peralatan pengaman
  - a. Kabel Bawah Tanah adalah semua jenis kabel yang konstruksinya dirancang khusus untuk dipasang di bawah permukaan tanah, sesuai dengan STEL-K-007, STEL-K-008, STEL-K-009 dan yang lainnya yang dituangkan dalam SII (Standar Industri Indonesia).
  - b. Kabel Tanah Tanam Langsung (STEL-K-007) adalah kabel tanah yang dalam pemasangannya ditanam secara langsung di bawah permukaan tanah.
  - c. Kabel Duct (STEL-K008 dan STEL-K009) adalah kabel tanah yang dalam pemasangannya harus diletakkan dalam pipa-pipa di bawah permukaan tanah.

- d. Kabel Primer adalah kabel yang dipasang untuk menghubungkan Rangka Pembagi Utama dengan Rumah Kabel.
- e. Kabel Sekunder adalah kabel yang dipasang untuk menghubungkan Rumah Kabel dengan Kotak Pembagi.
- f. Kabel Catu Langsung adalah kabel-kabel yang dipasang untuk menghubungkan secara langsung antara Rangka Pembagi Utama dengan Kotak-kotak Pembagi dan tidak melalui Rumah Kabel.

### **2.1.1 Jaringan Distribusi Bawah**

Gangguan yang terjadi pada system tenaga listri sangat beragam besaran dan jenisnya. Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah keadaan tidak normal dimana keadaan ini dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Secara umum klasifikasi gangguan pada system tenaga listrik disebabkan oleh 2 faktor, yaitu:

1. Gangguan yang berasal dari system
2. Gangguan yang berasal dari luar system

Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain :

1. Tegangan dan arus abnormal.
2. Pemasangan yang kurang baik.
3. Kesalahan mekanis karena proses penuaan
4. Beban lebih.
5. Kerusakan material seperti isolator pecah, kawat putus, atau kabel cacat isolasinya.

Sedangkan untuk gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain :

1. Gangguan-gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran lain. Gangguan ini terjadi untuk sistem kelistrikan bawah tanah.
2. Pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir. Pada gangguan surja petir dapat mengakibatkan gangguan tegangan lebih dan dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus isolasi peralatan (*breakdown*).
3. Pengaruh lingkungan seperti pohon, binatang dan benda-benda asing serta akibat kecerobohan manusia.

Bila ditinjau dari segi lamanya waktu gangguan, maka dapat dikelompokkan menjadi :

1. Gangguan yang bersifat temporer, yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Gangguan sementara jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman dapat berubah menjadi gangguan permanen.
2. Gangguan yang bersifat permanen, dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan dan/atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut

Untuk gangguan yang bersifat sementara setelah arus gangguannya terputus misalnya karena terbukanya *circuit breaker* oleh rele pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali. Sedangkan pada gangguan permanen terjadi kerusakan yang bersifat permanen sehingga baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti.

Pada saat terjadi gangguan akan mengalir arus yang sangat besar pada fasa yang terganggu menuju titik gangguan, dimana arus gangguan tersebut mempunyai harga yang jauh lebih besar dari rating arus maksimum yang diijinkan, sehingga terjadi kenaikan temperatur yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik yang digunakan.

#### Sebab – Sebab Timbulnya Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga listrik tiga fasa, gangguan–gangguan arus lebih yang mungkin terjadi adalah sebagai berikut yaitu :

##### **2.1.2 Gangguan beban lebih (*overload*)**

Gangguan ini sebenarnya bukan gangguan murni, tetapi bila dibiarkan terus menerus berlangsung dapat merusak peralatan listrik yang dialiri arus tersebut. Pada saat gangguan ini terjadi arus yang mengalir melebihi dari kapasitas peralatan listrik dan pengaman yang terpasang.

##### **2.1.3 Gangguan hubung singkat**

Gangguan hubung singkat dapat terjadi dua fasa, tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, atau 3 fasa ke tanah. Gangguan hubung singkat ini sendiri dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetri yaitu gangguan hubung singkat tiga fasa, sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu.

Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetri. Gangguan tidak simetri ini terjadi sebagai akibat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa, atau gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

Gangguan-gangguan tidak simetri akan menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem sehingga untuk analisa gangguan digunakan metode komponen simetri untuk menentukan arus maupun tegangan di semua bagian sistem setelah terjadi gangguan. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu. Gangguan dapat diperkecil dengan cara pemeliharaannya.

Adapun akibat-akibat yang ditimbulkan dengan adanya gangguan hubung singkat tersebut antara lain:

1. Rusaknya peralatan listrik yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan arus-arus yang besar, arus tak seimbang maupun tegangan-tegangan rendah.
2. Berkurangnya stabilitas daya system tersebut.
3. Terhentinya kontinuitas pelayanan listrik kepada konsumen apabila gangguan hubung singkat tersebut sampai mengakibatkan bekerjanya CB yang biasa disebut dengan pemadaman listrik.

#### **2.1.4 Gangguan tegangan lebih**

Gangguan tegangan lebih diakibatkan karena adanya kelainan pada sistem.

Gangguan tegangan lebih dapat terjadi antara lain karena :

- gangguan petir
- gangguan surja hubung, di antaranya adalah penutupan saluran tak serempak pada pemutus tiga fasa, penutupan kembali saluran dengan cepat, pelepasan beban akibat gangguan, penutupan saluran yang semula tidak masuk sistem menjadi masuk sistem, dan sebagainya.

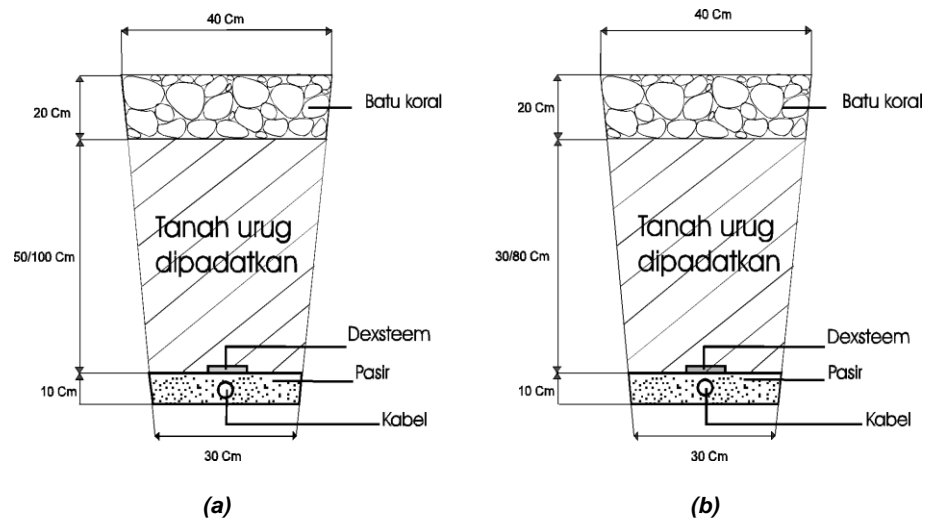
## **2.2 Cara Pemasangan Kabel Tanah Tanam Langsung**

### **2.2.1 Cara Pemasangan Pemasangan Kabel Tanah Tanam Langsung**

Pada umumnya dilakukan di bawah permukaan tanah, ditarik di pinggir sepanjang jalan, dan sewaktu-waktu, sesuai keperluan, menyeberang jalan atau selokan. Kedalaman galian untuk Kabel Primer dan sekunder tidak sama. Demikian juga halnya antara rute lurus dan penyeberangan . Hal ini sangat tergantung kepada aturan pemerintah/PERDA.

#### **2.2.2 Pemasangan di tepi jalan/trottoir**

a. Kabel Primer Secara umum, kedalaman galian alur Kabel Primer ditentukan minimal 80 cm atau sesuai peraturan PEMDA setempat ( contoh Jakarta lebih kurang 130 cm ). Lebar galian bagian atas alur kabel lebih kurang 40 cm dan bagian bawah lebih kurang 30 cm, seperti terlihat pada Gambar 3-01 (a) dibawah ini. Tanah bekas galian diusahakan tidak mengganggu laulintas jalan.



Gambar 2.1  
Ukuran galian Kabel Tanah Tanam Langsung

b. Kabel Sekunder

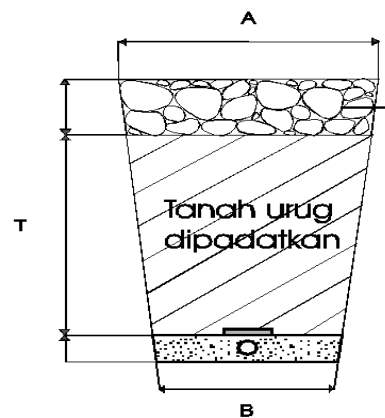
Kedalaman galian untuk Kabel Sekunder ditentukan minimal 60 cm atau sesuai peraturan PEMDA setempat (contoh Jakarta lebih kurang 110 cm), lihat Gambar 3-01 (b). ***Bila kedalaman minimal tidak dapat dipenuhi maka konstruksi perlu diberikan pengamanan.***

c. Lebar galian pada bagian atas maupun bawah tergantung dari kedalamannya, baik untuk penanaman Kabel Primer maupun Sekunder seperti terlihat pada Gambar 3-02 di bawah ini.

Daftar lembar galian atas/bawah :

Tinggi	Lebar atas	Lebar bawah
60 cm	40 cm	30 cm
70 cm	40 cm	35 cm
80 cm	45 cm	40 cm
90 cm	50 cm	40 cm
100 cm	60 cm	45 cm
110 cm	65 cm	45 cm
130 cm	65 cm	50 cm
dst.	dst.	50 cm

(T)      (A)      (B)

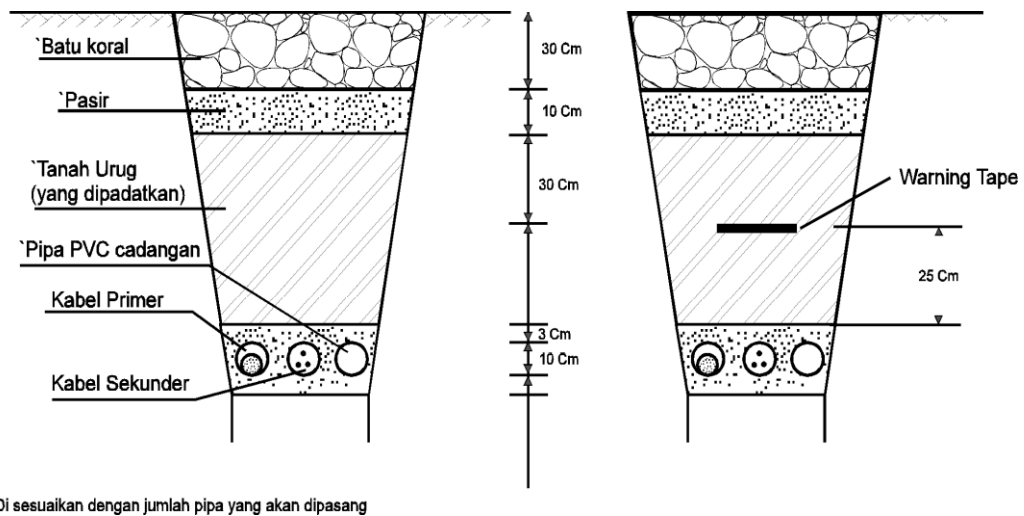


Gambar 2.2 Perbandingan lebar galian bagian atas dan bagian bawah

### 2.2.3 Menyeberang jalan

Kabel dimasukkan dalam pipa PVC dengan diameter 10 cm, tebal 5,5 cm. Kedalaman galian lebih kurang 100 cm atau sesuai peraturan PEMDA setempat (contoh, Jakarta lebih kurang 130 cm). Pada penyeberangan jalan padat lalu lintas, kabel dimasukkan ke dalam pipagalvanis diameter 4 inchi, dengan ketentuan :

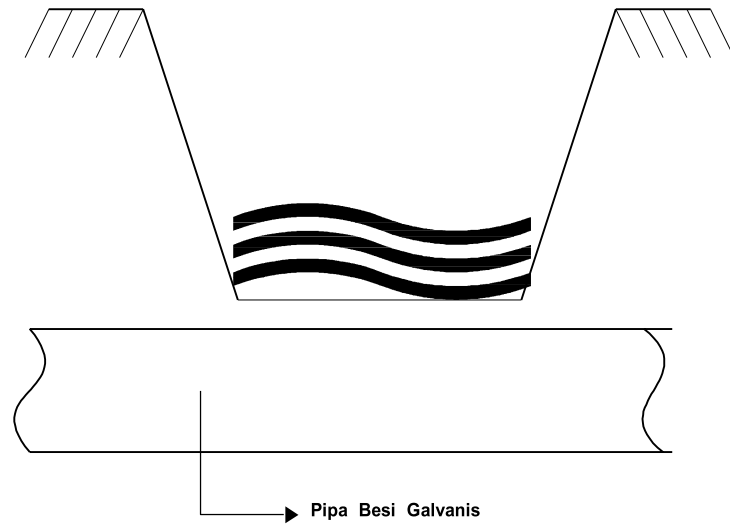
- b. Untuk Kabel Primer : 1 pipa hanya diisi 1 buah kabel.
- c. Kabel Sekunder : untuk satu pipa maksimum diisi oleh 3 buah kabel.
- d. Kabel Primer dan Kabel Sekunder diupayakan tidak dimasukkan kedalam satu pipa yang sama.
- e. Disiapkan pipa cadangan kosong yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan (desain), lihat Gambar 3-03 dibawah ini



**Gambar 2.3**  
*Penanaman kabel yang menyeberang jalan dengan menggunakan Pipa Galvanis*

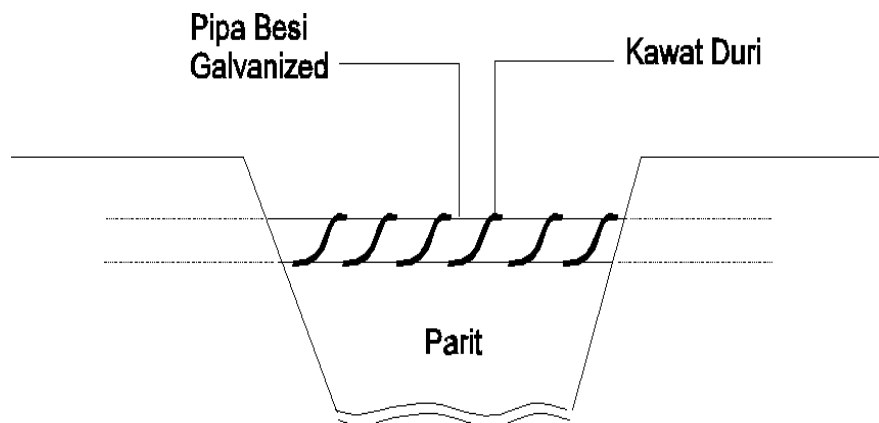
### 2.2.4 Menyeberang parit

Kabel dimasukkan ke dalam pipa pelindung besi galvanis dengan diameter dalam 4 inci atau 2 inci untuk kebutuhan yang menuju DP yang dipasang melewati bawah parit (Gambar 3-04). Jika hal tersebut tidak memungkinkan, maka pipa dapat dipasang di atas parit (Gambar- 05) dengan seijin PEMDA



*Gambar 2.4*

*Pipa Pelindung Galvanis dipasang melewati bawah parit*



*Gambar 2.5*

*Pipa Pelindung Galvanis dipasang diatas parit*



- 1 (satu) pipa pelindung hanya dapat diisi dengan 1 Kabel Primer atau maksimum 3 Kabel Sekunder.
- 2 Kabel Primer dan Kabel Sekunder tidak boleh berada dalam satu pipa yang sama.
- 3 Pipa pelindung dilindungi kawat berduri seperti terlihat pada Gambar 3-05 diatas.
- 4 Pipa pelindung yang belum terisi kabel harus ditutup dengan Stopper pada kedua ujungnya, sedangkan pipa yang sudah terisi kabel supaya dipasang kabel Seal.

### **2.2.5 Menyeberang Rel Kereta Api**

Kabel dimasukkan kedalam pipa galvanis diameter 4 inchi pada kedalaman 1,5 meter atau menurut ketentuan PT. KAI dengan tetap menyediakan pipa cadangan disesuaikan dengan kebutuhan (perencanaan).

### **2.2.6 Menyeberang jalan bebas hambatan**

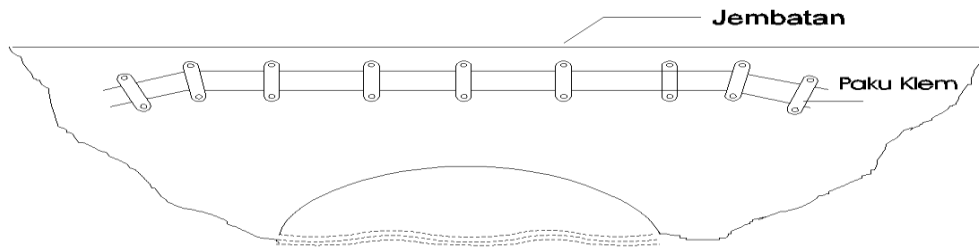
Pipa besi galvanis atau PVC minimal diameter 4 inchi tebal 5,5 mm ditanam dibawah jalan dengan kedalaman tertentu sesuai ketetapan instansi terkait. Pemasangannya dilakukan dengan menggunakan teknologi pengeboran. Kemudian kabel tanah dimasukkan melalui pipa tersebut.

### **2.2.7 Menyeberang sungai**

Pemasangan dan penarikan kabel yang menyeberangi sungai dilakukansesuai kondisi setempat, dengan cara :

- a. Menempel pada jembatan yang ada

Pemasangannya harus seijin PEMDA atau PU setempat. Kabel dimasukkan dalam pipa pelindung besi yang dilewatkan pada sisi atau bawah jembatan, seperti terlihat pada Gambar 3-06 di bawah ini.



**Gambar 2.6**  
**Pemasangan dan penarikan kabel menyeberang jembatan**

b. Pemasangan jembatan kabel

Apabila cara pada butir a diatas tidak memungkinkan, maka alternatif lain adalah dengan membuat jembatan kabel tersendiri dengan seijin PEMDA atau PU setempat. Konstruksi jembatan kabel harus disesuaikan dengan lebar bentang sungai, dan diamankan dari lalu lintas orang.

c. Dalam hal pemasangan pada butir a dan b di atas tidak memungkinkan, maka diupayakan pemasangannya melewati dasar sungai dengan memakai kabel sungai.

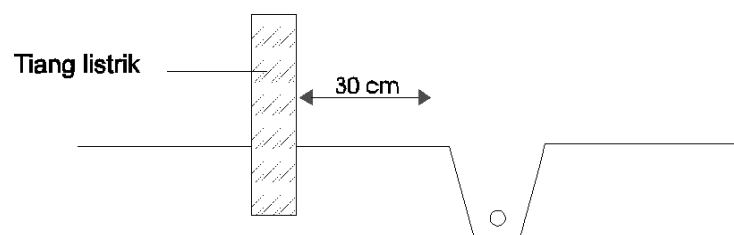
d. Dalam hal lebar sungai kurang dari 50 meter, masih memungkinkan menaikkan kabel tanah dengan memakai tumpuan pada ujung-ujungnya.

### 2.2.8 Galian lubang tempat penyambungan kabel

Galian lubang tempat penyambungan kabel ditentukan ukurannya sesuaidengan kedalaman galian kabel yang berkaitan.

### 2.2.9 Hal-hal lain

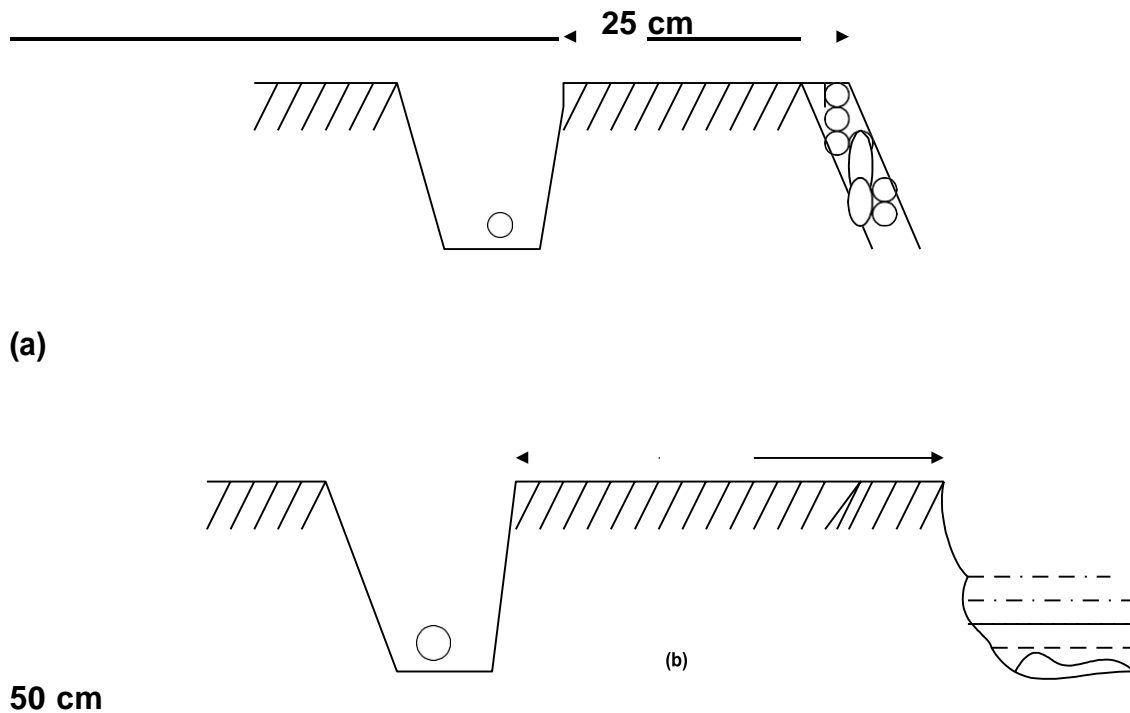
a. Apabila ada tiang listrik, maka galian alur kabel harus berjarak palingsedikit 30 cm, lihat Gambar 3-07 berikut ini.



**Gambar 2.7**

*Galian kabel disamping tiang listrik*

- b. Jarak galian alur kabel terhadap pinggir parit berbeton paling sedikit 25 cm, sedangkan terhadap pinggir parit yang tidak berbeton paling sedikit 50 cm, lihat Gambar 3-08 berikut ini.



*Gambar 2.8*

*Galian alur kabel terhadap parit berbeton (a) dan tidak berbeton (b)*

Sebelum pelaksanaan instalasi harus diadakan pengukuran kabel terlebih dahulu di gudang atau di lapangan. Peletakkan kabel dalam alur harus dibuat berbelok-belok, dengan tujuan agar kabel fleksibel sehingga tidak terjadi kerusakan bila terjadi longsor atau pergeseran tanah dan memudahkan penyambungan bila diperlukan karena panjang kabel masih cukup.

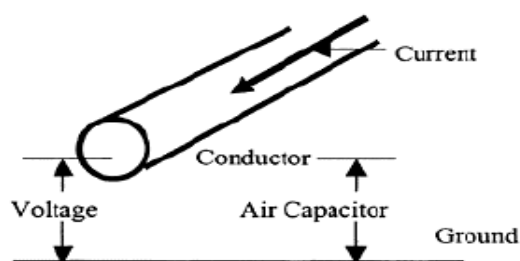
### **2.3 Kabel pada Sistem Tenaga**

Kegunaan dasar dari kabel adalah untuk menyalurkan arus listrik ke suatu tempat atau alat, baik itu untuk menyalurkan daya ataupun sinyal listrik. Untuk dapat menyalurkan arus listrik, maka dibutuhkan sebuah konduktor, dan harus dipastikan bahwa arus yang

mengalir pada kabel tidak mengalir ke arah yang tidak diinginkan. Untuk mencegah arus listrik mengalir ke arah selain pada konduktor, maka sebuah isolasi berbahan dielektris digunakan untuk mengisolasi konduktor.

### 2.3.1 Konduktor dengan Isolasi Udara

Sebuah konduktor berbahan metal yang tergantung dengan bantuan isolator, dikelilingi oleh udara dan membawa sinyal ataupun daya listrik adalah contoh yang paling mudah kita temui bila kita bicara mengenai konduktor dengan insulasi udara. Dari contoh ini kita bisa memvisualisasikan parameter-parameter yang ada pada pemasangan ini seperti arus dan tegangan seperti yang bisa kita



lihat pada gambar 2.9 Konduktor Isolasi Udara

Pada gambar 2.9 tegangan berada diantara konduktor dan tanah, adanya jarak antara konduktor dengan tanah juga menyebabkan adanya kapasitansi, dan karena adanya konduktansi yang nilainya kecil diantara konduktor dan tanah, maka ada hambatan yang bernilai besar diantara konduktor dan tanah.

Udara bukanlah bahan isolasi yang sangat baik karena udara memiliki kekuatan tegangan tembus yang rendah bila dibandingkan dengan bahan isolasi lain. Hanya saja karena faktor biaya yang lebih murah, terutama bila digunakan pada area yang luas seperti sambungan SUTET maka isolasi udara digunakan.

Ketika tegangan diantara konduktor dan tanah terus naik, pada titik tertentu akan terjadi kondisi dimana konduktor mencapai titik jenuh secara elektrik dan konduktor mengalami *breakdown* atau terjadi kegagalan isolasi pada udara. Pada titik ini udara mengalami proses ionisasi dan terbagi menjadi beberapa lapisan ionisasi bersifat konduktif yang mengelilingi konduktor. Proses ini dikenal dengan istilah korona, yang biasanya ditandai dengan adanya daya yang hilang dan dapat menyebabkan interferensi pada saluran radio, televisi, dan sinyal-sinyal lain. Pada isolasi udara ataupun pada gas lain, lapisan ionisasi ini berguna sebagai perluasan diameter konduktor secara elektrik hingga udara yang berada diluar daerah yang mengalami ionisasi tidak lagi mengalami kejenuhan yang

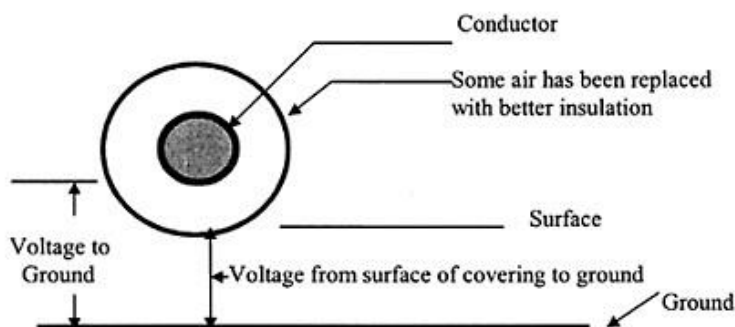
dapat menyebabkan terjadinya *breakdown* susulan.

### 2.3.2 Isolasi untuk Menghemat Ruang

Pada bahan isolasi udara masalah yang dihadapi adalah diperlukan ruang udara yang luas agar tidak ada arus yang mengalir ke daerah yang tidak diinginkan. Hal ini menyebabkan kabel dengan bahan isolasi udara tidak dapat digunakan pada daerah dengan ruang terbatas seperti pada daerah perumahan ataupun daerah padat penduduk.

Oleh sebab itu maka langkah selanjutnya adalah mengganti udara dengan bahan lain sebagai bahan isolasi konduktor. Pada gambar

2.10 dapat kita lihat bahwa tegangan dari



**Gambar 2.10** Konduktor dengan bahan isolasi pelindung

konduktor ke tanah sama dengan tegangan pada bahan isolasi udara. Sebuah pembagi tegangan muncul akibat adanya impedansi dari batang konduktor ke permukaan bahan isolasi, dan dari permukaan bahan isolasi ke tanah. Persebaran tegangan dari konduktor ke permukaan bahan isolasi dan dari permukaan bahan isolasi ke tanah akan proporsional dengan impedansinya.

Besarnya arus yang dapat mengalir dari bahan isolasi yang dalam kondisi baik ke tanah akibat adanya kontak dengan objek yang bersentuhan dengan tanah dibatasi oleh ketebalan, konstanta dielektrik, dan impedansi permukaan dari bahan isolasi tersebut dan juga luas daerah yang mengalami kontak.

Pada permukaan bahan isolasi kabel dengan tegangan rendah, arus yang muncul sangatlah kecil dan tidak terasa. Tegangan rendah yang dimaksud adalah *rating* tegangan berdasarkan tegangan antar fasa yang bernilai kurang dari atau sama dengan 600 volt. Ketika kondisi ini terpenuhi, maka dapat dikatakan bahwa bahan isolasi kabel tersebut

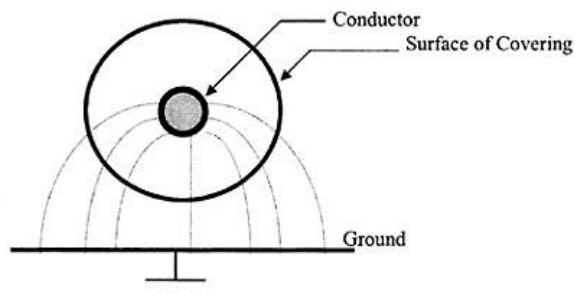
baik dan dapat disentuh oleh objek yang bersentuhan dengan tanah secara terus menerus, selama sentuhan objek tersebut tidak mengakibatkan kerusakan secara kimia dan termal terhadap kabel dan bahan isolasinya.

Bahan isolasi dari kabel sangat berpengaruh dengan kontak kabel tersebut dengan benda lain, oleh sebab itu penentuan ketebalan dari bahan isolasi kabel dengan tegangan rendah pada umumnya lebih menggunakan pertimbangan secara mekanis daripada pertimbangan secara elektrik. Pertimbangan seperti keadaan lingkungan di sekitar kabel, ketahanan terhadap sinar matahari, dan ketahanan terhadap api, terkadang sangat sulit untuk dipenuhi dengan satu jenis bahan isolasi saja, oleh sebab itu terkadang digunakan dua bahan isolasi.

### **2.3.3 Isolasi untuk Tegangan Lebih Besar**

Pada bahan isolasi udara dan isolasi untuk menghemat ruang, ketika kabel berada dekat atau menyentuh pentanahan maka garis-garis medan listrik harus dihilangkan pada sudut-sudut yang tepat. Pada gambar 2.3 dapat kita lihat garis-garis medan listrik yang harus dihilangkan. Pada gambar dapat kita lihat bawah garis *equipotential* tegak lurus dengan garis medan, garis-garis medan yang melengkung menghasilkan perbedaan tegangan pada permukaan pelindung kabel. Pada tegangan yang kecil efek pada permukaan kabel ini dapat diabaikan. Ketika tegangan semakin besar sampai pada titik dimana besarnya tegangan mencukupi untuk mengakibatkan arus mengalir pada permukaan dari pelindung kabel. Fenomena ini dikenal dengan sebutan *tracking*. arusnya. Walaupun ada di permukaan nilainya kecil, resistansi permukaan yang bernilai besar menyebabkan terjadinya pemanasan pada permukaan kabel yang dapat merusak bahan isolasi kabel. Bila kondisi ini dibiarkan terus-menerus dapat menyebabkan kerusakan yang besar, dan bila ada kontak dengan tanah, bisa terjadi kegagalan isolasi.

Pada awalnya mungkin terpikirkan untuk menambah ketebalan isolasi seiring dengan naiknya nilai tegangan. Akan tetapi ketahanan tembus, erosi pada permukaan, dan keselamatan pekerja yang berada disekitar kabel tidak berbanding lurus dengan kenaikan tegangan dan ketebalan isolasi, sehingga pendekatan ini tidak dapat dilakukan.

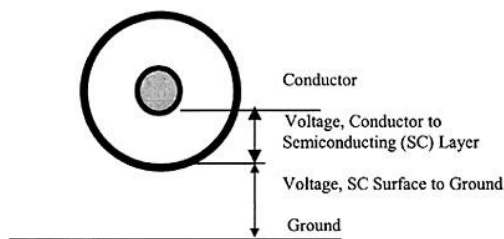


**Gambar 2.11** Garis-garis medan listrik yang ingin dihilangkan

### 2.3.4 Bahan Pelindung Isolasi

Pada konduktor dengan bahan isolasi udara, kita misalkan permukaan tanah kita bungkus melingkari konduktor pada ketebalannya yang sama dengan udara. Ketika kondisi ini, maka garis-garis medan listrik dari konduktor ke tanah akan tegak lurus karena mencari jalan terpendek dari konduktor ke tanah. Konfigurasi ini akan membentuk sebuah kapasitor silindris dan menjadi bahan dielektris yang efektif. Untuk membuat kondisi konfigurasi konduktor dan tanah tersebut memungkinkan, maka sebuah lapisan semikonduktor yang bersifat resistif dipasang melingkari permukaan isolasi kabel. Material ini memaksakan garis-garis medan listrik yang melengkung terjadi di dalam lapisan bahan semikonduktor tersebut. Pada gambar 2.4 dapat kita lihat bahwa kapasitor berbentuk silindris terbentuk dari konduktor ke bahan semikonduktor yang melindungi permukaan bahan isolasi, dan kapasitor lainnya terbentuk dari permukaan bahan semikonduktor ke tanah. Muatan dalam jumlah yang besar dapat terjadi pada kapasitor yang terjadi antara permukaan bahan semikonduktor dan tanah dikarenakan lapisan semikonduktor pada bagian luar kabel menyebabkan muatan dapat bergerak dengan leluasa pada lapisan semikonduktor tersebut. Arus *charging* ini harus dikendalikan agar jalur dari lapisan semikonduktor ke tanah tidak terbentuk. Bila sampai terbentuk jalur dari lapisan semikonduktor ke tanah, maka lapisan semikonduktor tersebut bisa terbakar dan terjadi kegagalan isolasi. Hal ini juga bisa berbahaya terhadap manusia yang berada di sekitar kabel tersebut.

Sangat penting untuk memastikan bahwa terjadi kontak yang berkelanjutan antara lapisan pelindung dengan tanah untuk membuang arus *charging* yang bersifat kapasitif tanpa merusak kabel. Untuk itu ditambahkan sebuah lapisan berbahan metal yang bersentuhan dengan



**Gambar 2.12** Konduktor dengan Bahan Isolasi dan Pelindung Isolasi

lapisan semikonduktor dan menghasilkan sambungan dengan tahanan yang relatif kecil terhadap tanah.

### 2.3.5 Lapisan Pelindung Konduktor

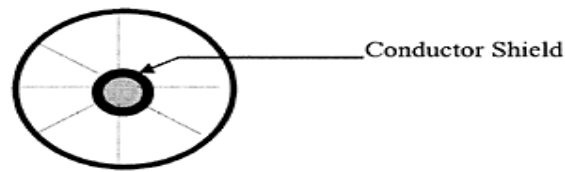
Lapisan pelindung pada bahan isolasi kabel menyebabkan komplikasi lain. Lapisan pelindung isolasi yang diketanahkan mengakibatkan seluruh persebaran tegangan berada pada daerah isolasi dari kabel. Seperti pada kasus konduktor dengan bahan isolasi udara, kita harus memperhatikan kemungkinan timbulnya tegangan yang melebihi batas kekuatan isolasi kabel. Masalah ini dapat timbul pada konduktor dengan tipe berinti banyak ataupun pada konduktor solid yang mengalami cacat fisik seperti goresan ataupun kerusakan lain.

Pada gambar 2.5 sebuah lapisan semikonduktif ditambahkan sebagai pelapis pada konduktor untuk memperhalus segala ketidakseragaman pada konduktor. Dengan adanya lapisan pelindung konduktor ini mengurangi kemungkinan tegangan menembus dari konduktor ke lapisan isolasi. Adanya tegangan yang menembus ke lapisan isolasi dapat memusatkan *stress* pada bahan isolasi yang bila dibiarkan dalam jangka waktu yang panjang dapat mengurangi kekuatan dielektris dari bahan isolasi tersebut.

### 2.3.6 Lapisan Pelindung Isolasi

Ada beberapa syarat yang harus dipenuhi oleh lapisan pelindung isolasi dari kabel untuk mengurangi peningkatan *stress* pada lapisan isolasi. Hal yang harus diperhatikan adalah bentuk dari lapisan pelindung. Lapisan pelindung harus dalam bentuk yang baik, tidak boleh ada cacat produksi seperti adanya tonjolan ataupun kerusakan, karena ketika lapisan mengalami cacat dalam bentuknya maka lapisan pelindung tersebut tidak dapat mengurangi peningkatan *stress* pada lapisan isolasi.





**Gambar 2.13** Kabel dengan Pelindung Konduktor

### 2.3.7 Persyaratan Lapisan Isolasi

Pada tegangan menengah dan tinggi, sangat penting untuk dipastikan bahwa baik lapisan isolasi maupun lapisan pelindung isolasi bebas dari kontaminan. Kontaminasi pada lapisan ini dapat berakibat pada peningkatan *stress* pada bahan isolasi yang dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kegagalan isolasi pada kabel. Adanya lubang pada lapisan isolasi juga dapat menyebabkan efek yang sama dengan adanya kontaminan, selain itu lubang juga dapat menyebabkan timbulnya *capacitive-resistive discharge* pada lubang yang terisi oleh gas saat tegangan muncul pada lubang tersebut. Adanya *discharge* tersebut dapat merusak bahan isolasi kabel dan mengakibatkan kegagalan isolasi.

### 2.3.8 Lapisan Pembungkus Kabel

Pada kabel untuk tegangan rendah, lapisan pembungkus kabel pada umumnya digunakan untuk melindungi lapisan-lapisan dibawahnya dari sinar matahari, api, goresan, ataupun terpapar zat kimia. Pada kabel untuk tegangan menengah, paparan zat kimia juga timbul akibat korosi pada lapisan pelindung berbahan metal. Pada kabel untuk tegangan menengah dan tinggi, lapisan pembungkus kabel juga dipakai untuk tujuan yang sama dengan lapisan pembungkus pada kabel dengan tegangan rendah, akan tetapi lapisan pembungkus tersebut didesain sedemikian rupa untuk melindungi lapisan dibawahnya yang berbahan metal dari korosi.

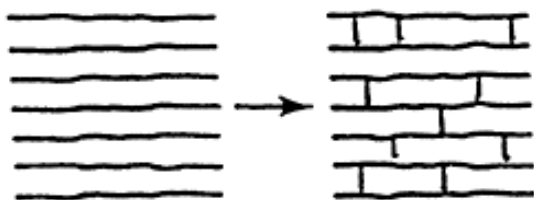
## 2.4 Kabel pada Tegangan Menengah

Pada tegangan menengah kabel yang digunakan pada umumnya adalah kabel dengan bahan isolasi XLPE atau *cross linked polyethylene*. XLPE adalah hasil reaksi kimia dari bahan *polyethylene* yang berbeda-beda sehingga menghasilkan rangkaian *polyethylene* yang lebih kuat dan lebih tahan terhadap kenaikan temperatur.

Pada gambar 2.6 dapat kita lihat penjelasan singkat mengenai proses *crosslinking*. Pada gambar disebelah kiri dimisalkan adalah susunan polimer dari *polyethylene* (PE). Akibat

dari proses kimia yang terjadi pada beberapa rantai PE ini menyebabkan munculnya lengan yang mengikat di antara rantai-rantai PE

yang awalnya terpisah. Akibat adanya lengan-lengan inilah kekuatan fisik dari rantai PE ini bertambah, dan rantai-rantai kimiawi ini disebut dengan nama XLPE. Kekuatan dan ketahanan dari bahan ini dapat kita lihat pada data material dari XLPE



**Gambar 2.14** Ilustrasi pembentukan XLPE

dan PE. Dari data material tersebut dapat kita lihat bahwa XLPE memiliki nilai kekuatan tarikan, dan Modulus Young yang lebih besar bila dibandingkan dengan PE.

Pada kabel tegangan menengah, sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) secara umum kabel dibagi menjadi dua berdasarkan bahan konduktornya, yaitu kabel dengan konduktor aluminium dan kabel dengan konduktor tembaga. Akan tetapi untuk lapisan perlindungan dan isolasinya sebenarnya sama untuk kedua jenis konduktor tersebut. Oleh sebab itu pada penjelasan selanjutnya untuk jenis kabel dengan jenis bahan isolasi yang sama pembahasannya akan disatukan antara kabel dengan konduktor aluminium dan kabel dengan konduktor tembaga.

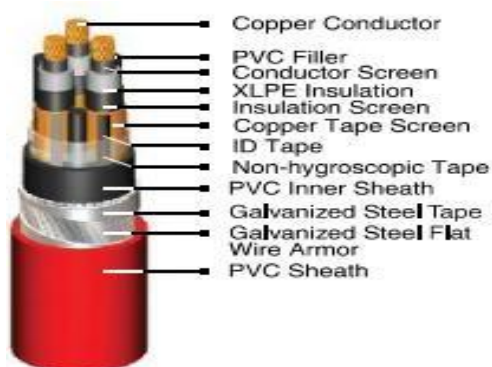
#### 2.4.1 N2XSY/ NA2XSY

Kabel jenis ini adalah kabel tegangan menengah yang memiliki satu inti kabel. Dari kode kabel ini kita bisa mendapatkan penjelasan mengenai bentuk kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. S merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, sedangkan Y adalah kode untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC.

Pada gambar 2.7 dapat kita lihat lapisan dari kabel ini terdiri dari tujuh bagian. Bagian pertama adalah konduktor yang kemudian dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethyl-propylene rubber*. Lapisan selanjutnya

adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang dilapisi oleh sebuah pita yang berfungsi sebagai penghalang agar tidak ada cairan yang dapat masuk kedalam kabel.

#### 2.4.2 N2XSEFGbY/ NA2XSEFGbY



**Gambar 2.15** Struktur Kabel N2XSEFGbY

Kabel jenis ini adalah kabel tegangan menengah yang memiliki tiga inti kabel. Dari kode kabel ini kita bisa mendapatkan penjelasan mengenai bentuk kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. SE merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, perbedaannya dengan kode S adalah SE artinya lapisan metalik ini melapisi masing-masing bahan isolasi pada ketiga inti kabel. Pada kabel ini dilengkapi dengan *armour* yang ditandai dengan adanya kode F dan Gb. Kode F adalah simbol untuk *armour* yang berbentuk *flat wire*, sedangkan kode Gb adalah untuk *steel tape* yaitu pita metalik yang berfungsi untuk mengikat lapisan *flat wire*. Baik *flat wire* dan *steel tape* keduanya terbuat dari bahan baja yang sudah melalui proses galvanisasi. Kode Y adalah untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC.

Pada gambar 4.2 dapat kita lihat lapisan dari kabel ini terdiri dari dua belas bagian. Bagian pertama adalah tiga buah konduktor yang masing-masing kemudian dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethyl-propylene rubber*. Lapisan selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan

tembaga yang kemudian diberi ID tape yang berfungsi untuk pemberian kode kabel. Seluruh lapisan diatas melapisi masing-masing konduktor yang berjumlah tiga buah. Ketiga konduktor yang sudah dilapisi dengan lapisan pelindung kemudian ditambahkan dengan PVC *filler* untuk menjaga bentuk kabel lalu disatukan dengan *non-hygroscopic tape* yaitu pita pelindung yang berfungsi untuk mencegah air atau minyak masuk ke dalam kabel. Setelah itu kabel dilapisi dengan lapisan PVC yang berfungsi untuk mengikat ketiga inti kabel. Kemudian kabel dilapisi lagi dengan *armour* yang berfungsi untuk memberikan perlindungan serta kekuatan fisik pada kabel. *Armour* ini terbuat dari lapisan baja galvanis yang berbentuk kabel pipih yang kemudian diikat dengan pita yang juga terbuat dari baja galvanis untuk memastikan kabel pipih pada *armour* terikat rapat dan tidak bergerak. Kemudian dilapisi terluar dilapisi dengan lapisan PVC yang bertujuan untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel tersebut.

Kabel ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah, pembangkit dan *switchgear*. Adanya *armour* pada kabel membuat kabel ini bisa digunakan untuk pemasangan pada kondisi medan yang cukup rawan seperti pada pemasangan kabel bawah tanah di bawah jalan raya. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm<sup>2</sup> sampai 300 mm<sup>2</sup>.

## **2.5 Konstruksi dan Material yang dipakai pada Kabel Tanah**

Kabel tanah sebenarnya berfungsi sama seperti konduktor lainnya hanya saja konstruksi dan material yang dipakai yang dipakai untuk melapisi inti (penghantar) berbeda dengan kabel pada umumnya.

### **2.5.1 Gangguan dan Klasifikasi Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik**

Gangguan pada sistem kelistrikan dapat didefinisikan sebagai segala sesuatu yang tidak berjalan dengan normal yang mengakibatkan aliran arus listrik menjadi terganggu ataupun tidak seimbang dari sistem tenaga listrik. Tujuan dilakukan analisis gangguan adalah:

- Penyelidikan terhadap unjuk kerja rele proteksi
- Untuk mengetahui rating maksimum dari pemutus tenaga
- Untuk mengetahui distribusi arus gangguan dan tegangan sistem pada saat terjadinya

gangguan.

Sedangkan untuk klasifikasi dari gangguan pada sistem tenaga listrik yaitu:

1) Gangguan Berdasarkan Kesimetrisan, terdiri dari:

- Gangguan Asimetris, yaitu gangguan yang mengakibatkan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang.



Gambar 2.16 Bagian-bagian kabel berinti tunggal

- Gangguan Simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasa sehingga arus pada tiap fasa tetap seimbang walaupun pada saat terjadi gangguan.

2) Berdasarkan Lama Terjadi Gangguan

- Gangguan Transient (*temporer*), yaitu gangguan yang hilang dengan sendirinya apabila pengaman ataupun pemutus tenaga terbuka pada saluran pada waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.
- Gangguan Permanen, merupakan gangguan yang tetap ada apabila pengaman ataupun pemutus tenaga terbuka pada saluran pada waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.

### 2.5.2 Metode Komponen Simetris untuk Gangguan Hubung Singkat

Pada tahun 1918, C. L. Fortesque menemukan suatu metode yang dapat digunakan untuk menganalisa tiga fasa yang tidak seimbang. Fortesque membuktikan bahwa suatu sistem yang tidak seimbang yang terdiri dari tegangan atau arus yang tidak seimbang antar fasanya dapat dipecah menjadi 3 komponen simetris dari sistem 3 fasa yang seimbang. Tiga komponen simetris tersebut yaitu:

- 1) Komponen Urutan Positif (*positive sequence components*), merupakan komponen yang terdiri dari tiga faktor yang besarnya sama, tetapi terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^\circ$ , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasoraslinya. Pada saat sistem berada pada keadaan normal, hanya terdapat arus dan tegangan urutan positif saja, sehingga impedansi sistem pada kondisi normal adalah impedansi urutan positif. Komponen Urutan positif ditandai dengan *subscript 1*.

2) Komponen Urutan Negatif (*negatif sequence components*), merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang besarnya sama, tetapi terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^\circ$ , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya. Jika pada kondisi normal hanya terdapat komponen urutan positif, maka komponen urutan negatif hanya terjadi pada saat terjadinya gangguan. Komponen Urutan positif ditandai dengan *subscript 2*.

3) Komponen Urutan Nol (*zero sequence components*), merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan tidak ada pergeseran fasa antara fasor yang satu dengan yang lain. Komponen urutan nol ditandai dengan *subscript 0*.

### 2.5.3 Kemampuan Hantar Kabel

Kemampuan hantar arus kabel tenaga ditentukan oleh beberapa besar kenaikan temperatur maksimum yang dapat ditahan oleh kabel yang bersangkutan. Kenaikan temperatur yang disebabkan oleh rugi-rugi elektrik dari bagian-bagian kabel, khususnya isolasi memiliki harga tertentu. Dengan kata lain, kenaikan maksimum temperatur pada kabel berpedoman pada batas maksimum temperatur isolasi, agar kontinuitas pelayanan tetap terjaga.

Parameter lain yang ikut menentukan kemampuan hantar arus kabel seperti kondisi tanah, peletakan kabel, temperatur sekeliling kabel, terlebih dahulu diperhitungkan.

Untuk suatu analisa yang sederhana diambil asumsi bahwa :

- 1) Kabel dianggap mempunyai sumber panas yang terdiri dari rugi-rugi penghantar, rugi-rugi dielektrik, rugi-rugi mantel/selubung, rugi-rugi logampenguat, dan rugi-rugi perisai.
- 2) Tahanan panas pada bagian logam diabaikan sehingga tahanan panas yang diperhitungkan hanya tahanan dielektrik dan tanah.
- 3) Panas pada penghantar, selubung, logam penguat dan perisai timbul pada permukaannya.
- 4) Rugi-rugi dielektrik dianggap terpusat pada bagian tengah isolasi.

Rangkaian ekivalen panas dapat dilihat pada Gambar 2.7. Dari rangkaian panas tersebut dapat diperoleh besarnya arus yang dihantarkan kabel, yaitu:

$$T_c - T_a = P_c 0,5 T_1 + (P_c + P_d) 0,5 T_1 + (P_c + P_d + P_s) T_b + (P_c + P_d + P_s = P_{ar})(T_p + T_{pl} + T_t)$$

Dimana :

$T_c$  = temperatur penghantar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_a$  = temperatur permukaan tanah ( $^{\circ}\text{C}$ )

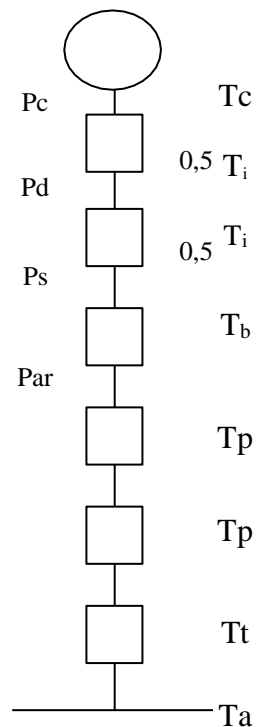
$T_i$  = tahanan panas isolasi ( $\text{K.m/W}$ )

$T_b$  = tahanan panas bantalan ( $\text{K.m/W}$ )

$T_p$  = tahanan panas sarung ( $\text{K.m/W}$ )

$T_t$  = tahanan panas tanah ( $\text{K.m/W}$ )

$T_{pl}$  = tahanan panas pelindung luar ( $\text{K.m/W}$ )



**Gambar 2.17 Rangkaian Ekuivalen Panas Kabel**

Dengan mensubsitusikan persamaan-persamaan akan didapatkan persamaan :

$$T_c - T_a = I^2 R (1 + \square 1) T_b + I^2 R (1 + \square 1 + \square 2) (T_p + T_{pl} + T_t) + P_d (0,5 T_t + T_b + T_p + T_{pl} + T_t)$$

Sehingga arus yang mengalir pada penghantar menjadi :

$$I = \left( \frac{T_c - T_a - P_d (0,5 T_t + T_b + T_p + T_{pl} + T_t)}{R_{ac} T_t + R_{ac} (1 + \lambda) + R_{ac} (T_p + T_{pl} + T_t) (1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right)$$

Dimana :

$\lambda_1$  = faktor rugi-rugi pada selubung

$\lambda_2$  = faktor rugi-rugi pada perisai

$T_c$  = temperatur penghantar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_a$  = temperatur tanah ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R$  = tahanan arus bolak-balik penghantar pada temperatur kerja maximum ( $\Omega/\text{m}$ )

$P_d$  = rugi-rugi elektrik isolasi ( $\text{W}/\text{m}$ )

#### 2.5.4 Perhitungan Tahanan Arus Bolak Balik

Perhitungan tahanan arus bolak balik, Melalui perhitungan tahanan arus searah pada suhu minimum dengan resistance  $20^{\circ}\text{C}$  dilakukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$R_{20^{\circ}} = \frac{k(\rho_{\text{tembaga}})}{D_{\text{kabel}}} \Omega/\text{M}$$

Sedangkan tahanan arus searah pada suhu maksimumnya  $80^{\circ}\text{C}$  dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$R_{\text{dc}} = \frac{K + T_c}{T}$$

Melakukan perhitungan faktor efek kulit ( $y_s$ ) adalah sebagai berikut Koefisien  $K_s$  untuk penghantar dengan rongga menurut persamaan :

$$K_s = \frac{D_c - D_{sm}}{D_c + D_{sm}} \left[ \frac{D_c + (2 \times D_{sm})}{D_c + D_{sm}} \right]^2 \Omega/\text{M}$$

Dengan demikian menurut persamaan :

$$X_s^2 = \frac{8\pi f \cdot 10^{-7}}{R_{dc}} K_s$$

#### 2.5.5

#### Perhitungan Kapasitansi Kabel

Untuk menentukan besarnya kapasitansi pada kabel bawah tanah diperlukan data data sebagai berikut :



$$C = \frac{(5,56 \cdot 10^2) Kr}{\ln\left(\frac{r_{ot}}{r_c}\right)}$$