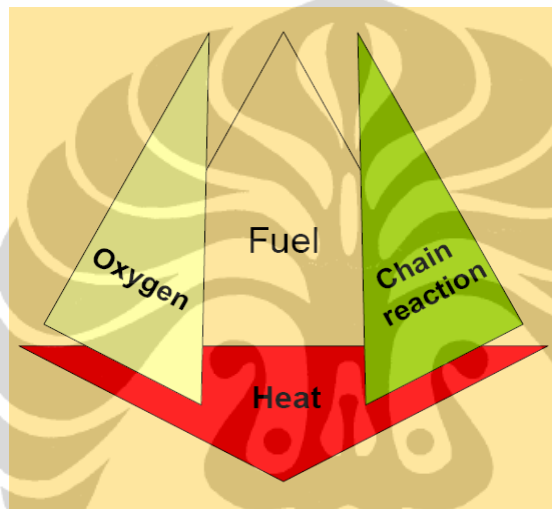


BAB III

LANDASAN TEORI

A. PRINSIP OVERHEATING PADA KABEL

Sebagaimana diketahui bahwa dalam suatu peristiwa kebakaran tidak lepas dari yang namanya reaksi yang pembakaran dimana masing-masing komponen berperan sangat penting terhadap komponen lainnya, seperti yang digambarkan dari diagram Tetrahedron berikut ini :



Gambar 3.1 : Tetrahedron reaksi pembakaran

Dalam kebakaran yang diakibatkan oleh listrik, berikut berdasarkan sumber dari timbulnya api dapat dikategorikan dalam dua penyebab utama yaitu :

1. Api yang timbul pada penghantar kabel
2. Api yang timbul akibat gagalnya pengaman dan pemutus arus listrik bekerja.

Jika pada saat dimana pengaman dan pemutus rangkaian tidak bekerja maka didalam penghantar akan timbul panas yang berlebih yang biasa dinamakan *overheating*. Pada saat *overheating* yang diakibatkan oleh arus listrik yang melalui penghantar kabel melebihi batas kemampuan hantar arusnya sehingga akan terjadi pemijaran, pijaran (*glowing*) ini pada saat tertentu akan melelehkan isolasi penghantar kabel yang juga melewati batas kemampuannya menahan panas, isolasi akan berubah menjadi bahan bakar bagi pijaran dan pada saat semua isolasi meleleh maka akan bercampur dengan oksigen maka timbulah api.

Adapun overheating pada penghantar kabel antara lain dikakibatkan oleh :

1. Overheating karena tahanan listrik pada penghantar kabel

2. Overheating karena short circuit
3. Overheating karena sambungan listrik

I. PENGHANTAR KABEL SECARA UMUM

Penghantar listrik didalam suatu bangunan apapun bangunannya hampir selalu menggunakan kabel listrik, kabel listrik pada dasarnya mempunyai Kemampuan Hantar Arus (*KHA*) masing – masing sesuai dengan beban yang akan dipikulnya. Secara umum jenis penghantar kabel yang sering digunakan adalah tembaga dan alumunium karena sifat konduktornya.

Sifat karakteristik thermal suatu bahan berbeda antara temperatur/ suhu dengan kadungan kalor. Temperatur/ suhu adalah tinggi rendahnya (*level*) termal dari suatu aktivitas, sedangkan kandungan kalor adalah besarnya energi termal tetapi keduanya berkaitan dengan kapasitas kalor.

1. Pemuaiian Panas mengakibatkan perubahan panjang (ΔL) :

$$\Delta L/L = \alpha_L \Delta T \dots\dots\dots (3.1)$$

2. Pemuaiian Volume (ΔV) :

$$\Delta V/V = \alpha_L \Delta T \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana α_L : Koefisien muai linier

3. Daya hantar panas, perambatan panas melalui benda padat biasanya karena konduksi. Koefisien daya hantar panas k adalah konstanta yang menghubungkan aliran panas Q dengan gradien suhu $\Delta T/\Delta x_1$:

$$Q = k \left(\frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1} \right) \dots\dots\dots (3.3)$$

Koefisien daya hantar panas juga tergantung kepada suhu, akan tetapi berlainan dengan koefisien muai panas.

Naiknya suhu secara ekstrim pada suatu bahan, maka akan terjadi perubahan susunan atom yang mengiringi pencairan, dan pengaturan kembali susunan atom-atom yang diakibatkan perubahan suhu akan menyebabkan daya hantar panas yang terganggu.

Selain itu daya hantar (konduktivitas) merupakan kebalikan dari tahanan jenis ρ , suatu penghantar dalam mengalirkan muatan listrik yang tentunya nanti berhubungan dengan panas yang timbul juga dipengaruhi oleh medan listrik :

$$\frac{1}{\rho} = \gamma = nq\mu \dots \dots \dots (3.4)$$

Pada logam dan semikonduktor elektron merupakan pembawa muatan. Dimana ρ merupakan suatu sifat dari bahan sehingga tidak tergantung kepada bentuknya, daya hantar γ tergantung dari kepada pembawa muatan n , besar muatan q dan mobilitas μ dari pembawa muatan. Dimana untuk suatu bahan yang seragam maka besarnya tahanan dapat dihubungkan dengan persamaan (3.9).

Secara umum rumus persamaan daya listrik dari hukum Joule adalah :

$$P = V \cdot I \cdot t \dots \dots \dots (3.5)$$

Dimana :

$$V = I \cdot R \dots \dots \dots (3.6)$$

Dari dua persamaan tersebut didapat :

$$P = V \cdot I \cdot t = \frac{V^2}{R} \cdot t = V \cdot I^2 \cdot t \dots \dots \dots (3.7)$$

Dimana :

- P = Power / Daya listrik (Watt)
- I = Arus listrik (Ampere)
- R = Resistance / tahanan listrik (Ω / Ohm)
- t = time / waktu pembebanan (detik)

Pemanasan yang diakibat adanya arus listrik dalam penghantar kabel akan menimbulkan perubahan pada penghantar itu sendiri, perubahan yang timbul antara lain :

Penghantar listrik tembaga digunakan untuk menghantar kabel umumnya tembaga elektrolitis dengan kemurnian sekurang – kurangnya 99,9 %. Tahanan jenis tembaga lunak untuk hantaran listrik telah dibakukan secara internasional yaitu tidak boleh melebihi :

$$1/58 = 0,017241 \text{ ohm mm}^2 / \text{m pada } 20^\circ \text{ C}$$

Atau sama dengan daya hantar sekurang – kurangnya 58 siemens = 100 % IACS (*international annealed copper standard*)

Daya hantar tembaga sangat dipengaruhi oleh faktor – faktor berikut ini :

1. Ketidakmurnian
Campuran besi sebanyak 0,02% misalnya akan meningkatkan tahanan jenis tembaga sampai dengan 10 %.
2. Koefisien suhu tembaga

Koefisien suhu tembaga pada suhu 20° C sekitar 0,004 / ° C, jadi kenaikan suhu 10° saja akan menaikkan tahanan jenis sampai dengan 4 %.

3. Kekerasan dari tembaga

Kekerasan dari tembaga juga mempengaruhi, tembaga lunak dengan daya hantar 100% IACS, memiliki kuat tarik 195 – 245 N/ mm². Daya hantar tembaga keras dengan kuat tarik 390 – 440 N/mm², hanya 97 % dari IACS, jadi 3 % lebih rendah dari daya hantar tembaga lunak.

Dibandingkan dengan penghantar tembaga, aluminium untuk kabel juga harus aluminium murni dengan kemurnian 99,5 %. Tahanan jenis aluminium lunak untuk hantaran listrik telah dibakukan tidak boleh melebihi :

$$0,028264 \text{ Ohm mm}^2 / \text{m pada temperatur } 20^\circ \text{ C}$$

Atau sama dengan daya hantar sekurang – kurangnya 61 % IACS.

Sama halnya dengan tembaga, yang mempengaruhi daya hantar aluminium tergantung dari :

1. Kekerasan dari Aluminium

Kekerasan dari aluminium juga mempengaruhi, aluminium lunak dengan daya hantar 61 % IACS, memiliki kuat tarik 60 – 70 N/ mm². Daya hantar aluminium keras dengan kuat tarik 150 – 195 N/mm², hanya 1 % dari IACS, jadi 3 % lebih rendah dari daya hantar aluminium lunak.

2. Koefisien suhu aluminium

Koefisien suhu tembaga pada suhu 20° C sekitar 0,004 / ° C, jadi kenaikan suhu 10° saja akan menaikkan tahanan jenis sampai dengan 4 %, jadi sama dengan tembaga.

Aluminium jauh lebih ringan dari tembaga, berat jenis aluminium pada temperatur 20° C masing – masing 2,7 dan 8,9

Karena daya hantar aluminium hanya 61 % IACS, maka untuk tahanan penghantar yang sama diperlukan luas penampang aluminium :

$$100 / 61 = 1,64 \text{ x luas penampang tembaga}$$

Jadi untuk penghantar bulat diperlukan penghantar aluminium dengan diameter :

$$\sqrt{1,64} = 1,28 \text{ x diameter penghantar tembaga}$$

Berat aluminium yang diperlukan untuk penghantar dengan tahanan yang sama ialah :

$$1,64 \text{ x } 2,7 / 8,9 \text{ x } 100 \% = 50 \% \text{ dari berat tembaga}$$

Persamaan tahanan listrik terhadap luas penampangnya adalah :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{1}{\gamma \cdot A} \dots\dots\dots (3.8)$$

Dimana : R = Resistance / tahanan listrik (Ω / Ohm)
 ρ = Tahanan jenis penghantar (Ω mm² / m)
 γ = Konduktivitas penghantar (m / Ω mm²)
 l = Panjang penghantar (m)
 A = Luas penampang penghantar (mm²)

Sedangkan tahanan listrik yang timbul pada temperatur tertentu adalah :

$$R_t = R_0 \cdot [1 + \alpha(T_t - T_0)] \dots\dots\dots (3.9)$$

Dimana : R_t = Tahanan yang timbul pada temperatur t (Ω)
 R_0 = Tahanan awal saat penghantar belum dibebani (Ω)
 α = Koefisien tahanan - (1/K atau 1/°C)
 T_t = Temperatur akhir (°C)
 T_0 = Temperatur awal (°C)

Tabel 3.1 : Data resistifitas listrik dari beberapa jenis material

NO	METAL	Relative Conductivity (Copper)	Electrical Resistivity at 20o C Ohm m (10-8)	Temperature Coefficient Of Resistance (per oC)
1	Silver	106	1.6260	0.0041
2	Copper (HC, annealed)	100	1.7240	0.0039
3	Copper (HC, hard drawn)	97	1.7770	0.0039
4	Tinned copper	95-99	1.741 - 1.814	0.0039
5	Aluminium (EC Grade, soft)	61	2.8030	0.0040
6	Aluminium (EC Grade, 1/2 H-H)	61	2.8260	0.0040
7	Sodium	35	4.9260	0.0054
8	Mild Steel	12	13.8000	0.0045
9	Lead	8	21.4000	0.0040

Dari persamaan (3.5) sampai dengan persamaan (3.9) dapat dilihat bahwa untuk menentukan diameter penghantar yang tepat sesuai dengan kemampuannya tergantung dari :

1. Besarnya beban yang akan dilayani yang akan berpengaruh terhadap temperatur pembebanannya.
2. Jenis kabel yang berpengaruh terhadap tahanan jenis penghantar.
3. Tegangan listrik yang diberikan
4. Panjang penghantar

Dengan demikian dapat dilihat kenaikan arus yang mengalir pada suatu penghantar kabel dengan luas penampang tertentu berbanding terbalik dengan

tahanan, dimana tahanan listrik ini sangat berpengaruh dengan temperatur, dimana temperatur akan naik jika arus listrik didalam penghantar naik . Arus listrik ini naik bisa meningkat karena beban listrik yang naik. Kenaikan arus listrik yang tidak dibatasi inilah yang akan menimbulkan panas (*overheating*).

II. OVERHEATING KARENA TAHANAN PENGHANTAR KABEL

Overheating yang terjadi di dalam penghantar kabel dipengaruhi oleh faktor-faktor, antara lain :

1. Tahan / hambatan atau Resistansi didalam penghantar kabel sendiri, yaitu dengan adanya pengaruh dari :
 - Induktansi
 - Reaktansi
 - Tahanan isolasi
 - Kapasitansi
2. Rugi-rugi dalam penghantar kabel :
 - Rugi pada penghantar kabel
 - Rugi dielektrik
 - Rugi Eddy current
 - Rugi Pada selubung penghantar kabel

II.1. TAHANAN DALAM PENGHANTAR KABEL

Dalam suatu penghantar kabel tahanan yang timbul pada saat arus mengalir adalah sebagai berikut :

1. INDUKTANSI

Dimana induktansi yang timbul dalam kabel adalah :

$$L = K + 0.2 \log_e \frac{2S}{d} (mH / m) \dots\dots\dots (3.10)$$

Dimana :

- K = Konstanta tergantung jumlah inti kabel
- S = Jarak antara inti kabel (mm)
= 1.26 untuk kabel berinti tunggal
- d = diameter dari kabel

Dimana nilai K dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut ini :

Tabel 3.2 : Nilai konstanta K untuk kabel serabut (50 Hz)

NO	JUMLAH PENGHANTAR	K
1	3	0.0778
2	7	0.0642
3	19	0.0554
4	37	0.0528

Untuk kabel dengan inti 2 atau 3 harus dikalikan dengan 1.02 jika penampangnya bulat dan dikalikan dengan 0.97 jika penampangnya oval atau elips.

2. REAKTANSI

Dimana reaktansi yang timbul dalam kabel dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$X = 2\pi fL \text{ (ohm / m)} \dots\dots\dots (3.11)$$

Dimana :

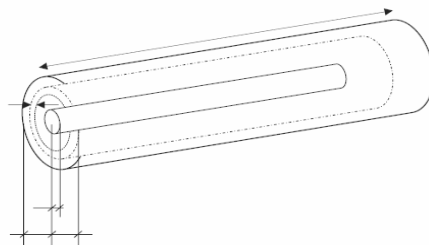
- f : frekuensi (Hz)
- L : Induktansi (mH / m)

3. TAHANAN ISOLASI KABEL

Dimana nilai tahanan isolasi kabel dapat ditentukan sebagai berikut :

$$D_R = \frac{\rho \delta x}{2\pi x} \text{ (ohm)} \dots\dots\dots (3.12)$$

Dimana persamaan tersebut diatas dapat diwakili dengan memperhatikan gambar berikut ini :



Gambar 3.2 : Perhitungan tahanan isolasi kabel

Dimana :

ρ : nilai tahanan spesifik (ohm m)

Jadi nilai tahanan isolasi dari suatu penghantar kabel dengan ketebalan R-r dengan panjang 1 meter adalah :

$$D_R = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^R \frac{dx}{x} \text{ (ohm) (3.13)}$$

$$D_R = \frac{\rho}{2\pi} \log_e \frac{R}{r} \text{ (ohm) (3.14)}$$

Dengan panjang kabel l , maka :

$$D_R = \frac{\rho}{2\pi l} \log_e \frac{R}{r} \text{ (ohm) (3.15)}$$

Dimana tahanan isolasi ini dipengaruhi oleh temperatur tertentu dan mempunyai hubungan sebagai berikut :

$$\rho_t = \rho_{20} \varepsilon^{-\alpha t} \text{ (3.16)}$$

Dimana :

ρ_{20} : resistifitas kabel pada temperatur 20° C

α : koefisien temperatur tahanan penghantar per ° C pada 20° C

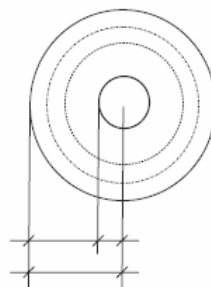
t : temperatur (° C)

Resistifitas kabel juga tergantung dari tegangan elektrik, maka dari itu persamaan tersebut merupakan bentuk yang telah disederhanakan. Pada persamaan ini, karena yang menjadi perhatian adalah masalah temperatur maka faktor-faktor lain yang mempunyai pengaruh yang tidak terlalu signifikan maka faktor tersebut dapat diabaikan.

Namun pada kabel DC faktor ini tidak boleh diabaikan, dan semua faktor-faktor yang mempengaruhi harus tetap diperhitungkan.

4. KAPASITANSI

Dengan memperhatikan gambar berikut ini :



Gambar 3.3 : Penampang inti kabel

Jika diasumsikan bahwa penghantar kabel membawa muatan q (coulomb/m), dan radiasi flux dari inti kabel secara radial maka density flux pada radius $X(m)$ dari pusat penghantar adalah :

$$D_x = \frac{q}{2\pi X} \text{ (coulomb / m}^2\text{) (3.17)}$$

Dan intensitas medan listrik pada radius X adalah :

$$E_x = \frac{D_x}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{q}{2\pi X \epsilon_0 \epsilon_r} \text{ (3.18)}$$

Dimana, ϵ_0 permitivitas udara dan ϵ_r adalah permitivitas relatif dari isolasi penghantar kabel .

Dengan demikian energi medan listrik yang ditimbulkan sepanjang dx adalah :

$$dW = - E dx \text{ (3.19)}$$

Dan beda potensial yang timbul sepanjang dx adalah :

$$dV = - E dx \text{ (3.20)}$$

Dengan demikian beda potensial yang timbul antara permukaan kabel ke permukaan isolasi adalah :

$$V = \int_R^r - E dx = - \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \int_R^r \frac{dx}{X} = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \log_e(R/r) \text{ (V) (3.21)}$$

Sehingga kapasitansi penghantar kabel permeter didapat :

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\log_e(R/r)} = \frac{2\pi \epsilon_r 10^{-9}}{36\pi \log_e(R/r)} \text{ (F/m)}$$

$$= \frac{\epsilon_r}{18 \log_e(D/d)} \text{ (}\mu\text{F / m) (3.22)}$$

Dimana :

- D : Diameter total penghantar (m)
- d : Diameter penghantar kabel (m)

II.2. RUGI – RUGI DALAM PENGHANTAR KABEL

Selain tahanan pada penghantar kabel, rugi-rugi pada penghantar kabel juga meningkatkan nilai tahanan pada pada kabel sehingga juga meningkatkan temperatur pada penghantar kabel. Selain tahanan pada penghantar maka rugi-rugi yang ada pada kabel adalah antara lain :

1. RUGI PADA PENGHANTAR

$$nI^2 R_{\theta} \text{ (watt) (3.23)}$$

Dimana :

I : Arus yang melewati penghantar kabel (A)

R_{θ} : Nilai tahanan penghantar kabel pada θ° C (ohm)

n : Jumlah inti kabel

2. RUGI DIELEKTRIK

Rugi dielektrik ini tergantung dari kapasitansi penghantar kabel, frekuensi, tegangan dan power factor. Dimana persamaannya dapat diberikan sebagai berikut :

$$D = \omega C U_0^2 \tan \delta 10^{-3} \text{ (watt / m / phase) (3.24)}$$

Dimana :

ω : $2\pi f$ (Hz)

C : kapasitansi penghantar ($\mu\text{F}/\text{m}$)

U_0 : Tegangan (Volt)

$\tan \delta$: dielektrik power faktor

Dimana kapasitansi dari kabel sendiri adalah :

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \log_e (D_i / d_c)} 10^{-9}$$

Dimana :

ε : Permittivitas relatif dari isolasi kabel

D_i : Eksternal diameter dari isolasi diluar serabut pelindung kabel (mm)

d_c : diameter dari penghantar kabel, termasuk serabut pelindung kabel (mm)

3. RUGI EDDY CURRENT

Eddy current adalah rugi yang timbul yang diakibatkan arus listrik yang mengalir pada selubung luar dari penghantar kabel. Dimana *Eddy Current* di dapat dari persamaan berikut :

$$S_e = I^2 \left[\frac{3\omega^2 \left(\frac{d_m}{2S} \right)^2}{R_s} 10^{-5} \right] \text{ (watt/ m/ phase)..... (3.25)}$$

Dimana :

- S_e : Rugi Eddy Current
- I : Arus listrik (A)
- ω : $2 \pi f$ (Hz)
- S : Jarak antara inti kabel (m)
- R_s : Tahanan isolasi penghantar kabel (ohm/ m)

Tabel 3.3 : Nilai untuk permitivitas relatif isolasi penghantar kabel dan fator rugi-rugi

NO	TYPE KABEL	PERMITIVITAS	tan δ
1	Solid type paper insulated	4	0.01
2	Oil-filled paper, low/ medium pressure	3.3	0.004
3	Oil-filled paper, high pressure	3.5	0.0045
4	oil-pressure pipe type/ paper	3.7	0.0045
5	External gas pressure/ paper	3.5	0.004
6	Internal gas pressure/ paper	3.4	0.0045
7	Butyl rubber	4	0.05
8	EPR	3	0.04
9	PVC	8	0.1
10	PE	2.3	0.001
11	XLPE	2.5	0.008

4. RUGI RANGKAIAN SELUBUNG PENGHANTAR

Induksi tegangan yang timbul pada selubung penghantar adalah :

$$E_s = IX_m$$

Dimana ;

- I : arus listrik (A)
- X_m : $2\pi fM$ (ohm/ m)

Dimana resultan induktansi antara penghantar kabel dan isolasi kabel adalah :

$$M = 2 \log_e \frac{2S}{d_m} 10^{-5} \text{ (mH/m)}$$

Dimana impedansi pada kulit kabel :

$$Z_s = \sqrt{(R_s^2 + X_m^2)}$$

Dimana :

R_s : Tahanan pada kulit penghantar kabel (ohm/m)

Sehingga arus listrik pada kulit penghantar kabel adalah :

$$I_s = \frac{E}{\sqrt{(R_s^2 + X_m^2)}} = \frac{IX_m}{\sqrt{(R_s^2 + X_m^2)}} \text{ (A) } \dots\dots\dots (3.26)$$

Sedangkan rugi arus listrik pada kulit kabel per fasa adalah :

$$I_s^2 R_s = \frac{I^2 X_m^2 R_s}{R_s^2 + X_m^2} \text{ (watt / m) } \dots\dots\dots (3.27)$$

Dengan demikian, total rugi pada kulit kabel adalah rugi pada rangkaian kulit kabel ditambah dengan rugi *Eddy Current*, sehingga persamaan yang didapat adalah :

$$I^2 R_s \left[\frac{X_m^2}{R_s^2 + X_m^2} + \left\{ \frac{3\omega^2}{R_s^2} \left(\frac{d_m}{2S} \right)^2 10^{-5} \right\} \right] \dots\dots\dots (3.28)$$

Dengan demikian panas pada kabel yang dikibatkan karena rugi-rugi baik pada penghantar kabel, dielektrik dan kulit penghantar kabel tanpa memperhatikan media dimana penghantar kabel melewatinya.

$$\Delta\theta = \left(I^2 R + \frac{1}{2} W_d \right) T_1 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4) \dots\dots\dots (3.29)$$

Dimana :

- Δ_θ : Kenaikan temperatur pada penghantar kabel (K)
- I : Arus listrik yang melalui penghantar kabel (A)
- R : Tahan penghantar per satuan panjang penghantar kabel (ohm/ m)
- W_d : Rugi dielektrik per satuan panjang penghantar kabel disekeliling penghantar kabel (W / m)
- T_1 : Resistansi thermal persatuan panjang penghantar antara inti penghantar kabel dengan kulit selubung kabel (K m/W)
- T_2 : Resistansi thermal persatuan panjang penghantar antara kulit penghantar kabel dengan kulit selubung kabel (K m/W)

- T_3 : Resistansi thermal persatuan panjang penghantar dimana penghantar kabel disambungkan (K m/W)
- T_4 : Resistansi thermal persatuan panjang penghantar dimana permukaan penghantar kabel dengan temperatur sekeliling (K m/W)
- n : jumlah penghantar dan beban arus yang diterima penghantar kabel (ukuran kabel dengan beban yang sama)
- λ_1 : Rasio rugi antara selaput metal dan penghantar kabel
- λ_2 : Rasio rugi antara selubung kabel dan seluruh penghantar dalam kabel

Dari persamaan (3.29) diatas maka arus listrik yang dimungkinkan untuk melewati suatu penghantar kabel adalah :

$$I = \left[\frac{\Delta_\theta - W_d \left[\frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(3.30)$$

T_1, T_2, T_3 dan T_4 dapat diwakili dari persamaan berikut :

T_1 adalah tahanan yang timbul pada temperatur tertentu, yang timbul antara satu penghantar kabel dengan selubung kulit kabel. Persamaannya dapat diberikan sebagai berikut :

Untuk kabel tunggal :

$$T_1 = \frac{\rho_\tau}{2\pi} \log_e (1 + 2t_1 / d_c) \dots\dots\dots (3.31)$$

Dimana :

- ρ_τ : Tahanan resistivitas pada isolasi kabel (K m/W)
- d_c : diameter dari penghantar kabel (mm)
- t_1 : Ketebalan isolasi luar penghantar sampai dengan luar selubung (mm)

Untuk berinti banyak :

$$T_1 = \frac{\rho_\tau}{2\pi} \log_e G \dots\dots\dots (3.32)$$

Dimana :

G : Geometrik factor

Informasi data perihal geometrik faktor ini dapat dilihat pada IEC 287 pada lampiran.

Untuk kabel berinti banyak dan jenis screen maka :

$$T_1 = \frac{\rho_\tau}{2\pi} \log_e G \times \text{screening factor} \dots\dots\dots (3.33)$$

T_2 adalah tahanan yang timbul pada temperatur tertentu, yang timbul antara selubung kabel dengan penahan serabut kabel. Persamaannya dapat diberikan sebagai berikut :

Berlaku untuk berinti tunggal maupun berinti banyak :

$$T_1 = \frac{\rho_\tau}{2\pi} \log_e (1 + 2t_2 / D_s) \dots\dots\dots (3.34)$$

Dimana :

- t_2 : Ketebalan dari selimut kabel (mm)
- D_s : Diameter luar dari penghantar kabel (mm)

T_3 adalah tahanan yang timbul pada temperatur tertentu, yang timbul pada lapisan luar pelindung serabut kabel. Persamaannya dapat diberikan sebagai berikut :

$$T_1 = \frac{\rho_\tau}{2\pi} \log_e (1 + 2t_3 / D'_a) \dots\dots\dots (3.35)$$

Dimana :

- t_3 : Ketebalan dari lapisan luar pelindung serabut kabel (mm)
- D'_a : Diameter luar dari pelindung serabut kabel (mm)

Sedangkan T_4 adalah tahanan yang timbul pada temperatur tertentu, yang timbul pada kondisi luar dimana kabel ditempatkan (kabel yang ditempatkan diudara). Persamaannya dapat diberikan sebagai berikut :

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e h (\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}} \dots\dots\dots (3.36)$$

Dimana :

- D_e : Diameter luar dari kabel (mm)
- h : koefisien disipasi panas dari IEC 287
- $\Delta\theta_s$: Kelebihan panas yang timbul diatas temperatur sekeliling kabel (K)

Dalam hal ditanam didalam tanah maka persamaan tersebut berubah sehingga menjadi :

$$T_4 = (\rho_\tau / 2\pi) \log_e (\mu + \sqrt{(\mu^2 - 1)}) \dots\dots\dots (3.37)$$

Dimana :

ρ_r : Thermal resistivitas dari tanah (K m/W)

μ : $2L/D_e$

D_e : Diameter luar dari kabel (mm)

Secara umum maka parameter-parameter yang mempengaruhi kenaikan temperatur dari suatu penghantar kabel adalah :

1. *Temperatur* : Yaitu temperatur yang ditimbulkan oleh temperatur sekeliling dimana kabel ditempatkan, temperatur yang timbul pada isolasi dan konstruksi kabel itu sendiri.
2. *Cable design* : Berapa jauh dari limit temperatur yang diijinkan, dan kemampuan kabel untuk menahan transfer panas pada permukaan luarnya dari kondisi sekelilingnya. Dan dari variasi lapisan kabel yang digunakan.
3. *Kondisi Instalasi* : Kabel yang ditempatkan diudara akan lebih baik perihal penyerapan panas sekelilingnya dibandingkan dengan kabel yang ditempatkan didalam tanah, namun pada kondisi tertentu penempatan kabel diatas permukaan tanah jauh lebih menguntungkan.
4. *Efek keliling* : Penempatan kabel dilapangan baik efek panas yang ditimbulkan antar kabel ataupun benda lain yang mengeluarkan panas misalnya pipa panas ataupun buangan dari radiator.
5. *Safety faktor pada saat perancangan*

III. KABEL PADA ARUS HUBUNGAN SINGKAT

Walaupun tidak terjadi setiap saat namun pada saat terjadinya arus listrik hubungan singkat, maka kabel dipaksa untuk dapat menahan beban ini selama normalnya 0.2 sampai 0.3 detik, sampai dengan peralatan perlindungan terhadap arus hubungan singkat ini bekerja. Walaupun kabel biasanya dirancang (tergantung pabrik pembuatnya) minimal dapat menahan beban arus hubung singkat sampai dengan 5 detik.

Pada saat terjadinya arus hubungan singkat ini, kabel akan dipaksa untuk bekerja melewati ambang batas kapasitas arus yang diijinkan dan akan meningkatkan temperatur didalam penghantar kabel.

Pada saat ini arus akan meningkat sampai dengan 20 kali arus nominalnya sampai tidak terhingga. Dan pada kondisi saat ini akan timbul efek *thermomechanical* dan efek gaya *elektomagnetik* yang berbanding lurus dengan kwadrat arus listrik.

Sedangkan isolasi penghantar kabel sendiri juga akan mengalami kenaikan yang tajam, seperti misalnya isolasi PVC akan naik dari temperatur 150°C/ 130° C menjadi 160° C/ 140° C, seperti yang dapat dilihat pada tabel 3.3 :

Tabel 3.4 : Batas temperatur pada saat arus hubungan singkat

NO	KOMPOSISI MATERIAL	TEMPERATUR (° C)
1	Paper Insulation	250
2	PVC - Insulation - up to 300 mm ²	150
3	PVC - Insulation - above 300 mm ²	130
4	PVC - Insulated 6.6 kV and above	130
5	PVC - oversheath	200
6	Natural rubber	200
7	Butyl rubber	220
8	Polyethylene - oversheath	150
9	XLPE and rubber	250
10	Silicone rubber	350
11	CSP - oversheath	220
12	Soldered conductor joints	160
13	Compression joints	250
14	Lead sheath - unalloyed	170
15	Lead sheath - alloyed	200

Untuk panas akibat arus hubungan singkat pada kabel didapat dari panas yang timbul (I^2RT) dan panas yang diserap (temperatur massa, *specific heat* dan kenaikan temperatur), dimana persamaannya dapat digambarkan sebagai berikut :

$$I^2 = \frac{K^2 A^2}{T} \log_e \frac{\theta_1 + \beta}{\theta_0 + \beta} \dots\dots\dots (3.38)$$

Dimana :

- I : Arus hubungan singkat (A)
- T : Lama terjadinya arus hubungan singkat (detik)
- K : Konstanta dari material penghantar kabel
- A : Luas penampang penghantar kabel (mm²)
- θ_1 : Temperatur akhir (° C)
- θ_2 : Temperatur awal (° C)
- β : *Reciprocal koefisien* temperatur dari tahanan (α) penghantar kabel (per ° C pada 0° C)

Dengan menggunakan Tabel 3.4, dapat menggunakan persamaan berikut dapat ditentukan nilai K yakni :

$$K^2 = \frac{Q_c(\beta + 20)}{\rho_{20}}$$

Dimana :

- Q_c : Volumetric specific heat dari penghantar kabel pada 20° C (J/° C mm³)
 ρ_{20} : resistivitas penghantar kabel metal pada 20° C (ohm mm)

Tabel 3.5 : Konstanta untuk hubungan singkat

NO	MATERIAL	K	β	Q_c	ρ_{20}
1	Copper	226	234.5	3.45×10^{-3}	17.241×10^{-6}
2	Alumunium	148	228	2.50×10^{-3}	28.264×10^{-6}
3	Lead	42	230	1.45×10^{-3}	214.00×10^{-6}
4	Steel	78	202	3.80×10^{-3}	138.00×10^{-6}

Sementara kemampuan hantar arus (KHA) didalam penghantar kabel ditentukan oleh , maksimum temperatur penghantar kabel dan jenis material yang digunakan untuk bahan penghantar kabel

IV. TEMPERATUR PADA SAMBUNGAN KABEL

Tidak kalah pentingnya adalah faktor pada saat menyambung kabel, pada saat penyambungan kabel maka ada dua luas penampang yang disatukan disana dimana berarti luas penampang kabel menjadi dua kali. Dengan bertambahnya luas penampang maka sesuai dengan persamaan (3.8) maka nilai tahanan kabel akan turun, dengan turunnya tahanan kabel maka kemampuan hantar arus listrik yang mengalir akan naik.

Yang menjadi pertanyaan adalah mengapa pada sambungan kabel nilai kenaikan temperatur lebih tinggi sehingga terjadi panas yang lebih tinggi dari penghantar kabel, dan pada sambungan kabel yang buruk justru menjadi titik penyalan api pada kebakaran.

Pada dasarnya, tingkat pemanasan pada sambungan kabel sama dengan yang mempengaruhi kabel, seperti yang sudah dibahas diatas antara lain :

1. Adanya tahanan pada kabel (Resistansi, induktansi, reaktansi dan kapasitansi)
2. Adanya rugi-rugi pada kabel (rugi penghantar, rugi *Eddy Current* dan rugi pada isolasi kabel)

Namun faktor yang paling berpengaruh pada sambungan kabel adalah nilai kapasitansinya. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut :
 Perhatikan gambar 3.3 berikut ini :



Gambar 3.3 : Sambungan kabel didalam T-doo

Atau gambar 3.4 berikut ini :



Gambar 3.4 : Sambungan Kabel menggunakan las-dop

Dalam suatu instalasi listrik terutama pada bangunan baik residensial atau gedung biasa, sering terjadi pemanasan yang lebih pada sambungan yang ditandai dengan berubahnya warna menjadi kehitaman pada sambungan dan kabel itu sendiri.

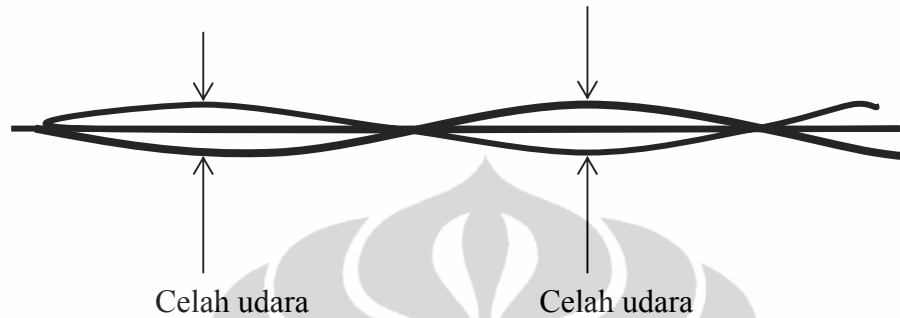


Gambar 3.5 : Sambungan Kabel menggunakan las-dop dan terbakar

Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut, pada sambungan kabel terutama pada kabel kecil baik yang penyambungan kabel menggunakan lasdop ataupun isolasi

biasa, kabel tersebut disambung dengan mempertemukan dua kabel dan kemudian dipuntir.

Secara teoritis memang kelihatan bahwa kabel tersebut menyambung bersatu apalagi dengan puntiran yang berkali-kali, namun secara *mikroskopis* tetap ada celah udara atau kerenggangan pada dua kabel yang tersambung sehingga dengan adanya celah ini dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.6 : Celah udara pada sambungan kabel

Sehingga kapasitansi yang timbul adalah pada sambungan tersebut :

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{\sum \left[\frac{d_1}{\epsilon_{r_1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r_2}} \right]} \text{ (F)} \dots\dots\dots (3.39)$$

Dimana muatan yang timbul :

$$Q = CV \text{ (coloumb)}$$

Sementara nilai fluks densiti listrik adalah :

$$D = Q/A = \frac{Q}{2 \pi x} \text{ C/ m}^2 \dots\dots\dots (3.40)$$

Nilai dari intensitas listrik adalah :

$$E = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{Q}{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r x} \text{ (V/m)} \dots\dots\dots (3.41)$$

Dimana permitivitas udara atau vakum $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}$ F/m, sedangkan permitivitas relatifnya adalah 1, sedangkan permitivitas absolut adalah $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ F/m. Nilai permitas relatif beberapa material lainnya dapat dilihat pada *Tabel 3.3*

Sehingga energi yang terjadi pada sifat kapasitannya ini adalah :

$$dW = v.dq$$

$$q = Cv \text{ sehingga } dq = C.dv$$

$$dW = Cv.dv$$

$$W = \int_0^V Cv.dv = C \left| \frac{v^2}{2} \right|_0^V \qquad W = \frac{1}{2} CV^2 \text{ (joules) (3.42)}$$

Sehingga disini dapat dijelaskan kenapa pada sambungan kabel lebih cepat panas, padahal luas penampang kabel bertambah, karena pada persambungan dua kabel ini adanya celah udara yang berubah sifat menjadi dielektrik, sifat kapasitansi kabel, memang kapasitas dari aliran arus listrik meningkat karena luas titik sentuh pada penampang kabel bertambah.

Pada kabel – kabel dengan ukuran diameter relatif kecil banyak faktor –faktor yang bisa diabaikan. Demikian juga halnya dengan kapasitansi yang timbul pada kabel ukuran kecil, pada permukaan bidang sentuh adanya celah udara yang menimbulkan sifat kapasitansi, yang berpengaruh besar bukannya kapasitansi yang timbul dengan sifat listriknya namun sifat kapasitansi yang mengakibatkan adanya *heat loss* pada sambungan kabel ini.

Juga pada sambungan, terutama pada sambungan dengan isolasi plastik biasa timbul efek elektrostatik yang menangkap debu-debu halus dan menempel pada isolasi sambungan, akibat udara yang lembab maka debu akan menempel pada isolasi sambungan dan terus terakumulasi, kemudian mengering dan pada saat panas yang terakumulasi pada sambungan ini, akan dapat menjadi titik timbulnya api.

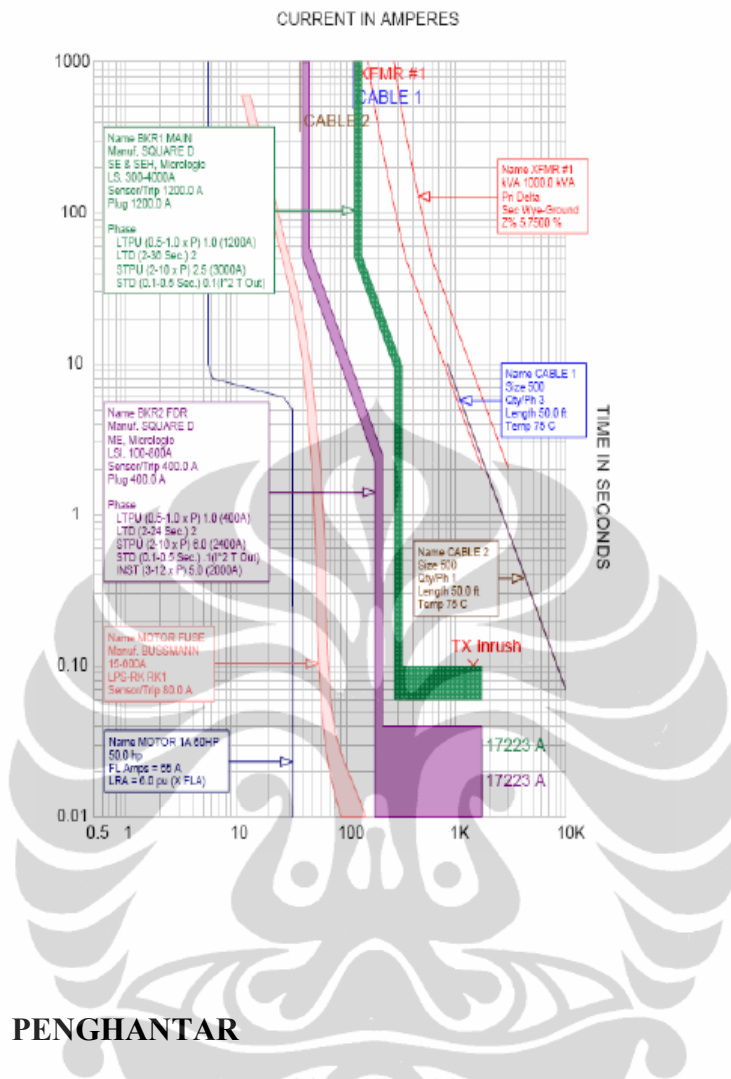
V. HUBUNGAN PEMBATAS/ PEMUTUS BEBAN DAN KABEL

PUIL 2000 sudah diatur penggunaan dan pemakaian pembatas dan pemutus beban sehingga jika regulasi ini dipatuhi dan diikuti maka dengan sendirinya kabel akan aman dalam pemakaian. Dimana sebelum beban belum merasakan panas akibat beban lebih ataupun hubungan singkat maka pembatas dan pemutus sudah bekerja mengamankan jaringan, seperti yang digambarkan oleh grafik 3.1 dibawah ini

Memang banyak ditemukan dilapangan bahwa banyak pengaman dan pemutus arus palsu yang beredar namun palsunya peralatan ini lebih cenderung untuk selalu memutuskan arus dan tidak dalam kondisi selalu memberikan pasokan arus.

Namun dalam bahasan ini adanya pengaman, pembatas dan pemutus arus diabaikan dan dianggap tidak berfungsi sehingga kabel merasakan dampak langsung dari *overheating* yang diakibatkan oleh beban lebih dan arus hubungan singkat.

Grafik 3.1 : Hubungan antara pengaman dan pembatas arus dengan penghantar kabel



VI. ISOLASI PENGHANTAR

Isolasi kabel memegang peranan penting didalam suatu penghantar listrik. Selain sebagai pelindung dari bahaya sengatan listrik, isolasi penghantar juga sebagai peredam panas dan peredam api.

Pada umumnya bahan isolasi kabel terbuat dari PVC (*Polyvinilchlorida*) yang adalah hasil polimerisasi dari *vinylchlorida* $H_2C = CHCl$.

Pada proses polimerisasi, ikatan ganda yang terdapat pada molekul *vinylchlorida* dirubah menjadi ikatan tunggal. Ikatan yang menjadi bebas kemudian mengikat molekul – molekul *vinylchlorida* lain, sehingga timbul molekul – molekul makro panjang yaitu PVC.

Dari rangkaian penyusunan isolasi penghantar kabel PVC dapat dilihat sebagai berikut :

Pada suhu kamar PVC ini keras dan rapuh. Supaya dapat digunakan sebagai bahan isolasi kabel, PVC dicampur dengan bahan pelunak (*plasticiser*). Bahan pelunak yang dicampurkan umumnya sebanyak 20% hingga 40%, kadang – kadang bahkan lebih.

Karena bahan pelunak yang dicampurkan demikian banyak, sifat campuran PVC ini tentu saja dipengaruhi oleh sifat – sifat bahan pelunak yang digunakan. Untuk PVC isolasi kabel harus digunakan bahan pelunak dengan sifat – sifat listrik yang baik. Selain itu bahan pelunaknya tidak boleh menguap, dan tidak menyalakan api, walaupun dapat terbakar / dibakar, api akan padam dengan sendirinya jika sumber apinya disingkirkan.

Kelemahan dari campuran PVC ini, sebagai akibat harus digunakannya bahan pelunak, ialah ketahanannya terhadap tekanan. Kalau ditekan cukup kuat dan cukup lama, campuran PVC tidak dapat pulih. Makin tinggi suhunya, makin kurang ketahanannya terhadap tekanan itu. Umumnya campuran PVC pada kondisi normal hanya dapat digunakan pada temperatur setinggi – tingginya 70° C terus – menerus. Pada kondisi tertentu campuran PVC dapat dibuat untuk suhu lebih tinggi.

Untuk isolasi penghantar kabel komposisi dari PVC adalah, 50% PVC 25% dioctyl phthalate ($2\text{-HO}_2\text{CC}_6\text{H}_4\text{CO}_2[\text{CH}(\text{CH}_3)\text{C}_6\text{H}_{13}]$) atau diisodecylphthalate ($\text{C}_2\text{H}_4[\text{COOCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3]_2$) sebagai bahan plastisnya. Bahan-bahan campuran lainnya seperti bahan stabiliser, bahan anorganik lead sulfat (PbSO_4) atau lead phthalate $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COO})_2\text{Pb}2\text{PbO}$, bahan pengisi (CaCO_3) dan beberapa bahan minoritas lainnya seiring dengan umur penghantar kabel, ionisasi dan pemanasan menyebabkan kabel menjadi rapuh.

Selain itu PVC lebih mudah menyerap, sehingga jika digunakan ditempat lembab atau basah, tahanan isolasinya akan turun.

Thermal conductivity dari isolasi PVC dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut ini :

Tabel 3.6 : *Thermal conductivity* dari isolasi kabel

No	Material Kabel	σ		ϵ	
		20°C	60°C	20°C	60°C
1	PVC	$5,10^{-6} - 2,13 \cdot 10^{-14}$	$1,38 \cdot 10^{-10}$	3,39	3,61
2	PE-X	$1,67 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-15}$	2,28 - 2,32	2,19
3	CSP				
4	E/P	$1,10^{-15}$		3,0 - 3,5	
5	EPDM				
6	PMMA	$< 10^{-15}$		3,0 - 3,6	
7	FMQ,FMVQ	$10^{-12} - 10^{-14}$			
8	PO	$10^{-12} - 10^{-14}$		2,95 - 4,00	
9	PCP-Rubber	$1 \cdot 10^{-10} - 10^{-11}$		8,00 - 10,00	

Sedangkan Tabel 3.7 menunjukkan batasan temperature untuk material kabel

Tabel 3.7 : Batasan temperature untuk material isolasi penghantar kabel

No	Material Kabel	GT	MT	U	E	S	PLASTIC
1	PVC		182 - 199	70		160	TP
2	PE-X			90	130	250	TS
3	CSP						TS
4	E/P	-55	150	90		250	TS
5	EPDM			90		250	TS
6	PMMA	104		70			TP
7	FMQ,FMVQ			250			TS
8	PO		110	70	90	130	
9	PCP-Rubber			60 - 90			EL

GT : Glass Transition ; MT : Melting Temperatur ; U : Normal Operation Temperatur ; E : Emergency Operation Temperatur ; S : Short Circuit Temperatur ; TP : Thermoplastic ; TS : Thermoset ; EL Elastomer

Melihat bahwa perbedaan titik lebur pada material penghantar kabel yang timbul karena *overheating* pada penghantar kabel baik pada saat beban lebih maupun pada saat hubungan singkat, maka dapat disimpulkan bahwa peranan isolasi sangat penting yang berfungsi sebagai bahan bakar dalam terjadinya api.

Pada saat terjadinya *overheating*, katakanlah pada saat terjadinya hubungan singkat maka pada saat tersebut penghantar tembaga temperaturnya naik sampai ketitik leburnya pada temperature 1084°C sedangkan isolasi penghantar hanya mempunyai titik lebur pada temperature 182 - 199°C, pada saat ini sudah dapat dipastikan bahwa isolasi kabel sudah berubah menjadi bahan bakar.

Tabel 3.8 : Temperature lebur untuk beberapa material

No	Material Kabel	°C	°F
1	Alumunium	660	1220
2	Carbon Steel	1425 - 1540	2600 - 2800
3	Copper	1084	1983
4	Gold	1063	1945
5	Iron	1536	2797
6	Magnesium	650	1200
7	Silicon	1411	2572
8	Silver	961	1760
9	Titanium	1670	3040

VII. PENYALAN PADA KABEL LISTRIK

VII.1. ENERGI YANG TIMBUL DIDALAM PENGHANTAR

Pada saat penghantar kabel belum diberikan arus listrik dialiri arus listrik maka energi konstan yang timbul dapat diberikan oleh persamaan berikut :

$$g = I''^2 / \sigma \dots\dots\dots (3.43)$$

Dimana :

- g : Energi yang timbul dalam penghantar kabel
- I'' : Arus listrik pada waktu sesaat belum diberi arus listrik ($t = 0$)
- Σ : Conductor resistivity (Resistivitas penghantar kabel)

Diasumsikan bahwa penghantar dan isolasi berhubungan secara sempurna satu sama lain, walaupun asumsi ini tidak ideal karena pada saat terjadinya pemanasan akan timbul gas pyrolisis yang terbentuk dari kantong gas antara penghantar dan isolasi.

Sementara permukaan kabel mengalami pendinginan baik secara konveksi maupun secara radiasi, yang persamaannya secara linier diberikan sebagai berikut :

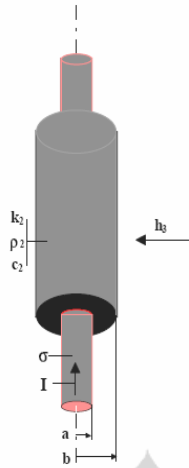
$$-k_2 \frac{\partial T_2(b,t)}{\partial r} = h_3 T_2(b,t); t > 0 \dots\dots\dots (3.43)$$

Dimana :

- T_2 : Temperatur pendinginan pada luar penghantar kabel
- h_3 : Koefisien linier heat transfer baik konveksi maupun radiasi
- r : permukaan kabel = b

Persamaan ini dapat digunakan untuk peralatan listrik lainnya, karena pada dasarnya semua peralatan ini memerlukan suatu nilai temperature yang pasti.

Panas yang timbul dihantarkan secara konduksi keseluruhan permukaan kabel . Dengan asumsi bahwa logam penghantar adalah logam dengan thermal conductor yang baik dibandingkan dengan isolasinya , maka dianggap temperature diseluruh permukaan penghantar adalah konstan.



Gambar 3.7 : Isometrik penampang kabel yang panas akibat arus listrik

Dengan memperhatikan gambar 3.9 tersebut diatas, secara umum persamaan perpindahan panas secara konduksi dapat diberikan sebagai berikut :

$$\alpha_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\alpha_1}{k_1} g_1 = \frac{\partial T_1}{\partial t}; 0 < r < a, t > 0 \dots\dots\dots (3.44)$$

Dan :

$$\alpha_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\alpha_2}{k_2} g_2 = \frac{\partial T_2}{\partial t}; 0 < r < a, t > 0 \dots\dots\dots (3.45)$$

Dengan kondisi inisial :

$$T_1(r,0) = T_2(r,0) = 0$$

Dan dengan kondisi sekeliling :

$$T_1(a,t) = T_2(a,t); t > 0$$

Dengan men-substitusikan volume penghantar $dV = \pi a^2 dz$ kedalam persamaan (3.43), maka :

$$\int k_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} dV + \int \frac{k_1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} dV + \int g_1 dV = \int c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} dV \dots\dots\dots (3.46)$$

Dimana *thermal diffusivity* (temperature keseluruhan) $\alpha_1 = k_1 / c_1 \rho_1$ untuk memperlihatkan hubungan perbedaan proses energi yang berbeda, seperti yang diberikan pada persamaan (3.46). Tidak ada perbedaan temperature sepanjang penghantar kabel, sehingga jika panjang penghantar dz dan luas penampang dimasukkan ke persamaan (3.46) maka didapat :

$$Z_0^a \frac{\partial T_1}{\partial r^2} \cdot 2\pi k_1 r dr dz + Z_0^a \frac{k_1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \cdot 2\pi r dr dz + Z_0^a g_1 \cdot 2\pi r dr dz = \dots (3.47)$$

$$Z_0^a c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \cdot 2\pi r dr dz$$

$$2\pi k_1 dz \left[\int_0^a \frac{\partial T_1}{\partial r} \cdot r - Z_0^a \frac{\partial T_1}{\partial r} \cdot dr \right] + 2\pi k_1 dz [T_1(a, t) - T_1(0, t)] + \pi a^2 g_1 dz = \dots (3.48)$$

$$\pi a^2 c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \cdot dz$$

Sehingga setelah substitusi dilakukan maka persamaannya menjadi :

$$2\pi k_1 dz \cdot a \frac{\partial T_1}{\partial r} /_{r=a} + \pi a^2 g_1 dz = \pi a^2 c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \cdot dz \dots (3.49)$$

Jika persamaan ini dibagi dengan persamaan (3.43) maka akhirnya menjadi :

$$\frac{2}{a} \cdot k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} /_{r=a} + g_1 = c_1 \rho_1 \frac{\partial T_2}{\partial t} /_{r=a} \dots (3.50)$$

Dengan demikian didapat persamaan pada kondisi-kondisi khusus :

$$\alpha_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + = \frac{\partial T_2}{\partial t}; a < r < b, t > 0 \dots (3.51)$$

$$\frac{2}{a} \cdot k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + g_1 = c_1 \rho_1 \frac{\partial T_2}{\partial t}; r = a, t > 0 \dots (3.52)$$

$$k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + h_3 T_2 = 0; r = b, t > 0 \dots (3.53)$$

$$T_2 = 0; a < r < b; t = 0 \dots (3.54)$$

Pada Kondisi *Steady State* temperature T_2^∞ persamaan (3.44) dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2^\infty}{\partial r} \right) = 0 \dots (3.55)$$

Dimana dengan integral :

$$T_2^\infty = C_1 \ln r + C_2 \dots\dots\dots (3.56)$$

Dimana nilai konstanta C_1 dan C_2 didapat dari persamaan, ditentukan dari kondisi seperti pada persamaan (3.53) dan (3.54), sehingga didapat :

$$C_1 = -a^2 g_1 / 2k_2 \dots\dots\dots (3.57)$$

$$C_2 = \frac{a^2 g_1}{2bh_3} \left(1 + \frac{bh_3}{k_2} \ln b \right) \dots\dots\dots (3.58)$$

Dimana jika di substitusikan ke persamaan (3.56), didapatkan :

$$T_2^\infty = \frac{a^2 g_1}{2k_2} \left[\ln \left(\frac{b}{r} \right) + \frac{k_2}{bh_3} \right] \dots\dots\dots (3.59)$$

Dengan catatan bahwa T_0 :

$$T_0 = a^2 g_1 / 2k_2 \dots\dots\dots (3.60)$$

Dan bilangan Biot Bi adalah :

$$Bi = bh_3 / k_2 \dots\dots\dots (3.61)$$

Dengan demikian maka T_2^∞ :

$$T_2^\infty = T_0 [1 / Bi + \ln(b / r)] \dots\dots\dots (3.62)$$

Kondisi sekitar penghantar kabel seperti pada persamaan (3.52) adalah pada kondisi tidak homogen karena pengaruh dari g_1 , dan dapat di homogenkan dengan memeberikan variable temperature yang baru $\mathcal{G}(r,t)$, dimana :

$$\mathcal{G}(r,t) = T_2(r,t) - T_2^\infty \dots\dots\dots (3.63)$$

Sehingga jika disubstitusikan pada persamaan (3.51) sampai dengan (3.54) maka didapat persamaan :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t}; a < r < b, t > 0 \dots\dots\dots (3.64)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} - \frac{ac_1 \rho_1}{2k_2} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} = 0; r = a, t > 0 \dots\dots\dots (3.65)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} + \frac{h_3}{k_2} \mathcal{G} = 0; r = b, t > 0 \dots\dots\dots (3.66)$$

$$\mathcal{G} = -T_0 [1/Bi + \ln(b/r)]; a < r < b; t = 0 \dots\dots\dots (3.67)$$

VII.2. SELF IGNITION PADA KABEL

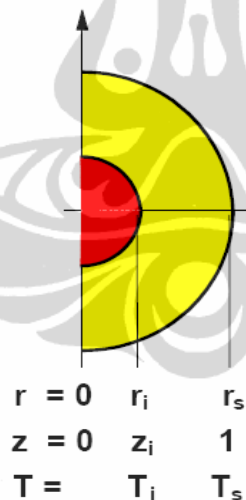
Self ignition dari sebuah material, reaksi kimia yang terjadi akan memproduksi panas, yang mana bisa disimpan didalam material itu sendiri atau dilepaskan kepermukaan material.

Jika panas yang diproduksi melebihi kemampuan batas dari sistem itu sendiri maka *thermal explosion* atau kenaikan temperature yang tidak terkendali akan terjadi. Ini yang disebut dengan pemanasan sendiri atau lebih dikenal dengan penyalaan sendiri (*self ignition*).

Kabel secara prinsip mempunyai potensi terhadap *self ignition* walaupun isolasi kabel bukan merupakan *self ignition material*.

Jika kabel yang berisolasi yang terus menerus dialiri arus listrik, *self ignition* dimungkinkan jika kapasitasnya melebihi kemampuan dari kabel itu sendiri.

Potongan penampang kabel sendiri dapat digambarkan pada gambar 3.10 berikut ini :



Gambar 3.8 : Potongan penampang kabel

Diasumsikan untuk sederhananya sebuah kabel single core (inti tunggal), dengan radius r_1 , diselubungi oleh material isolasi dengan radius r_s . Dalam kondisi steady state temperature permukaan dalam isolasi adalah T_i , dan temperature permukaan laurnya adalah T_s , pada kabel dengan ukuran yang panjang perubahan temperature hanya pada radius r .

Untuk sebuah *self heating*, persamaan *heat balance* disumsikan pada kondisi *zero order kinetic*, dimana reaksi kimia diberikan oleh (Thomas 1958 dan Less 1980). Dimana

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{d\theta}{dz} = -\delta \exp(\theta) \dots\dots\dots (3.68)$$

Dimana non dimensional temperature θ , dan radius z diberikan :

$$\theta = \frac{E}{RT_s} (T - T_s); \theta > 0 \dots\dots\dots (3.69)$$

$$z = \frac{r}{r_s} \dots\dots\dots (3.70)$$

Penyelesaian secara umum persamaan (3.69) didapatkan :

$$\theta = \ln \left(\frac{2F^2 G z^{F-2}}{\delta (1 + G z^F)^2} \right) \dots\dots\dots (3.71)$$

Dimana nilai konstanta F dan G didapat dari kondisi sekeliling, dimana :

$$\theta = \theta_i; z = z_i \dots\dots\dots (3.72)$$

$$\theta = \theta_s; z = 1 \dots\dots\dots (3.73)$$

Pada saat kondisi kritis :

$$\frac{d\theta}{dz} = 0; z = z_i \dots\dots\dots (3.74)$$

Konstanta F dan G dapat ditentukan sebagaimana juga parameter δ_c ,

$$G = \frac{F - 2}{F + 2} z_i^{-F} \dots\dots\dots (3.75)$$

$$\exp(\theta_s) = \frac{(1 + G z_i^F)^2}{(1 + G)^2} z_i^{-F+2} \dots\dots\dots (3.76)$$

$$\delta_c = \frac{2F^2 G}{(1 + G)^2} \exp(-\theta_s) \dots\dots\dots (3.77)$$

Sedangkan temperature pada isolasi terluar dari kabel dapat ditentukan dengan perhitungan, dimana jika arus yang mengalir pada penghantar logam diketahui, hambatan listrik, diameter penghantar dan temperature dimana kabel diketahui serta koefisien konduksi diketahui maka panas yang ditimbulkan dapat dihitung.

Sebagai ilustrasi, katakan suatu penghantar logam (tembaga/ alumunium) dengan diameter 2.5 mm² menghantar arus dengan maksimum 32A dan mempunyai hambatan listrik sebesar $1.72 \times 10^{-8} \Omega / m$ pada temperature 30°C. Sedangkan koefisien total 25 W / m² K

Maka temperature pada penghantar logam tersebut adalah :

$$P = I^2 \cdot R = (32)^2 \cdot 1.72 \times 10^{-8} = 1024 \cdot 1.72 \times 10^{-8} = 0.59 \text{ LWatt}$$

$$Q = H_{\text{konduksi}} A (T_{\text{logam}} - T_{\text{ambient}})$$

$$0.59 \text{ Watt} = 25 \text{ W / m}^2 \text{ K} (0.025 \pi L_m) (T_{\text{logam}} - 30)^\circ\text{C}$$

$$(T_{\text{logam}} - 30)^\circ\text{C} = 0.59 / 0,19625$$

$$T_{\text{logam}} = 3,006^\circ\text{C} + 30^\circ\text{C} = 33^\circ\text{C}$$

Jika isolasi PVC dengan hambatan kontak sebesar 0,002 m² K/W (R_{tc}) menyelubungi penghantar, maka temperature isolasi pada permukaan luar kabel adalah :

$$R_{tc} = \frac{A(T_1 - T_2)}{Q}$$

$$T_1 - T_2 = \frac{R_{tc} Q}{A} \text{ maka didapat } T_1 - T_w = \frac{R_{tc} Q}{A} + \frac{Q}{H_t A} = \frac{Q}{A} (R_{tc} + 1)$$

$$= \frac{0,59 \text{ LW}}{0,0025 \pi L_m} (0,02 \text{ m}^2 \text{ K / W} + 1)$$

$$(T_1 - 30)^\circ\text{C} = \frac{236}{\pi} = 75,15^\circ\text{C} + 30^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 105,15^\circ\text{C}$$

Dari sini didapat temperature pada permukaan kabel atau T_2 sebesar : 105,14 °C, atau sama dengan tempeartur dipermukaan dalam kabel.

VII.3. SELF IGNITION KABEL PADA ARUS HUBUNGAN SINGKAT

Dalam suatu hubungan singkat listrik selalu terbentuk bunga api diantara dua penghantar. Bunga api menimbulkan temperature yang tinggi dan panas intensif dalam skala kecil. Selain itu arus hubungan singkat dapat melelehkan penghantar sepanjang kabel selama adanya bunga api.

Arus listrik yang mengalir membawa muatan elektron, persamaan density arus listrik tersebut diberikan oleh *Dushman-Richardson* adalah :

$$I'' = AT^2 e^{-\phi/kT} \dots\dots\dots (3.78)$$

Dimana :

- A : konstanta $1.2\mu\text{A}/\text{m}^2\text{K}^2$
- K : konstanta Boltzmann $86.17 \mu\text{eV}/\text{K}$
- ϕ : work fuction (eV)
- T : absolute temperature

Dalam suatu percobaan secara kuantitatif yang dilakukan oleh *Mrs Hertha Ayrton (1895)*, didapatkan suatu panjangnya loncatan bunga api listrik dihubungkan dengan tegangan dan arus sebagai berikut :

$$V = \alpha + \beta l + \frac{\gamma + \delta l}{I} \dots\dots\dots (3.79)$$

Dimana α, β, γ dan δ adalah konstan tergantung dari material yang digunakan.

Tabel 3.9 : Koefisien metal untuk percobaan Ayrton

NO	METAL	α	β	γ	δ
1	Carbon	45.75	3.33	35.7	19.31
2	Copper	26.61	2.22	32.49	18.65
3	Iron	15.01	9.44	15.73	2.52

Dimana energi dari bunga api yang timbul tersebut adalah :

$$I = \frac{E}{R} \dots\dots\dots (3.80)$$

Dimana pada saat kondisi stabil :

$$V = \frac{1}{2} \left(E + \alpha + \beta l - \sqrt{(E - \alpha - \beta l)^2 - 4R(\lambda + \delta l)} \right) \dots\dots\dots (3.81)$$

$$I = \frac{1}{2R} \left(E - \alpha - \beta l + \sqrt{(E - \alpha - \beta l)^2 - 4R(\gamma + \delta l)} \right) \dots\dots\dots (3.82)$$

Sedangkan tahanan maksimum pada saat kondisi stabil adalah :

$$R_{Max} = \frac{(E - \alpha - \beta l)^2}{4(\gamma + \delta l)} \dots\dots\dots (3.83)$$

B. PEMBUKTIAN PENYEBAB KEBAKARAN OLEH LISTRIK

I. ANALISA SISA KABEL TERBAKAR

Pada saat terjadinya kebakaran yang diakibatkan oleh terbakarnya kabel dari dalam akan timbulnya yang namanya busur api. Busur api ini timbul akibat isolasi kabel yang meleleh karena temperature yang meningkat sehingga penghantar fasa dan netral bersentuhan (hubungan singkat), akibat singgungan ini timbul percikan api yang jika pada saat arus listriknya tinggi akan menimbulkan busur api yang besar.

Jika dilihat dari proses awal dimana terjadinya hubungan singkat pada kabel, naiknya temperature pada kabel, terjadinya pelepasan gas bertekanan yang membentuk suatu pola *V-shape* disuatu permukaan, maka disini pasti ada unsur atau senyawa yang terlepas yang bersamaan dengan gas, tentu yang sangat berperan penting disini adalah material atau unsur-unsur yang membentuk isolasi PVC pada kabel.

I.1. Karbonisasi Dari Isolasi Kabel

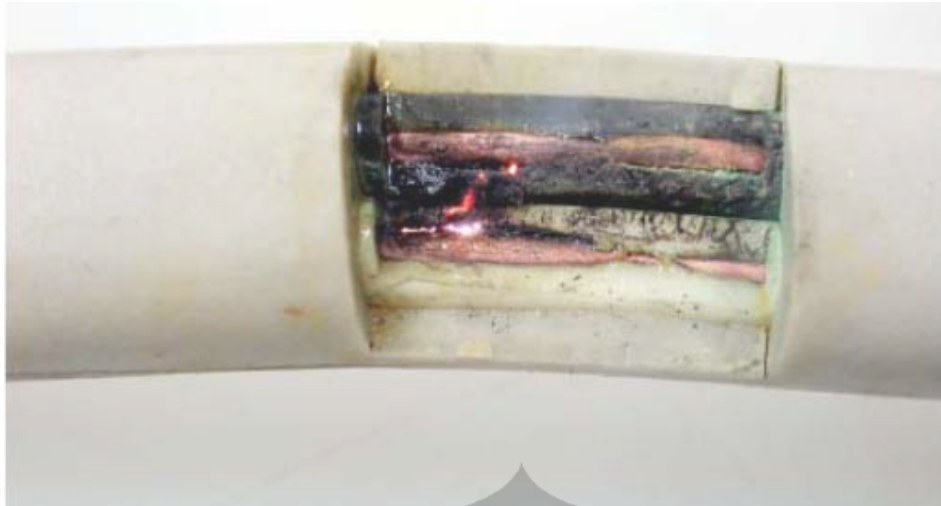
Dalam rangkaian listrik yang bertegangan 220 volt tidak susah untuk menentukan bekas terjadinya busur api dengan adanya jejak atau bekas berupa petunjuk karbonisasi / arang. Yang mana kadang disebut "*arc across char*" atau loncatan bunga api melintasi arang.

Pada saat terjadinya arus hubungan singkat atau beban lebih yang melewati batas ketahanan temperature isolasi PVC maka perlahan – lahan akan terbentuk arang yang terbentuk dari karbonisasi dari bahan PVC.

Karbonisasi ini akan terbentuk perlahan-lahan, makin sering kabel mengalami arus hubungan singkat dan beban lebih dengan temperature relative tinggi makin banyak banyak arang terbentuk. Arang terbentuk pada titik terjadi hubungan singkat atau jika pada kasus beban lebih arang karbonisasi terbentuk pada bagian isolasi paling tipis atau kantong udara (*air pocket*) atau pada titik kabel yang lembab.

Arang hasil akumulasi karbonisasi PVC ini akan terbentuk dan bersifat semi konduktor yang artinya pada besaran arus tertentu akan bersifat menghantar listrik. Pada saat tertentu, arang ini dimana batas temperature dan arus dilewati maka akan ada loncatan bunga api lagi, bunga api sekarang sudah mempunyai media untuk menyala yaitu arang. Bahkan pada temperature 40°C karbon atau arang sudah bisa menyala.

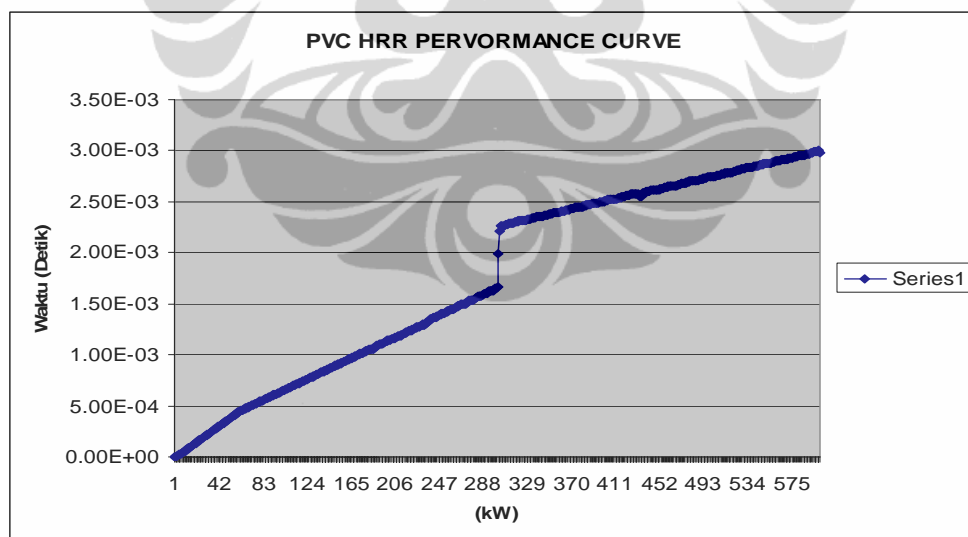
Fenomena inilah yang terjadi dimana kebakaran terjadi mempunyai rentang waktu untuk menyala sejak terjadinya arus lebih atau hubungan singkat sampai munculnya api pertama kali, dari mulai dari beberapa jam sampai beberapa hari, sehingga mengaburkan penyebab yang sesungguhnya.



Gambar 3.9 : Terbentuknya proses karbonisasi dalam kabel

Pada saat terjadi beban lebih dan temperature tembaga pada saat *overheating* meningkat tinggi maka pada saat yang sama isolasi PVC sudah mulai mengalami kerusakan structural. Walaupun bebanya dikembalikan ke kondisi semula namun pada saat mengalami beban lebih lagi maka proses kerusakan pada isolasi akan berlanjut lagi. Hal ini dapat dilihat pada isolasi PVC yang dibakar melalui simulasi FDS seperti yang dapat dilihat pada kurva berikut ini :

Grafik 3.2 : Kurva Performance PVC pada saat beban lebih dan lanjutan



I.2. Akumulasi Ionisasi Udara Luar

Sama halnya dengan proses karbonisasi, pada dasarnya kekuatan dielektrik udara adalah tinggi (sekitar 3 MV/m untuk semuanya kecuali untuk celah udara yang sangat kecil), namun kerusakan atau luka kecil pada isolasi PVC bisa menurunkan nilai dielektrik dengan beberapa cara.

Pada saat terjadi loncatan bunga api maka gas dari pyrolisis akan di paksa keluar dan akan mengendap pada celah-celah atau pori-pori isolasi kabel ini

dan sisa gas ini akan mengalami ionisasi dengan udara luar yang tidak bersih dari debu dan akan membentuk suatu endapan kerak yang juga bersifat semi konduktor. Jika kerak ini suatu dilewati oleh arus listrik yang cukup besar atau timbulkan panas yang cukup untuk memberikan energi padanya sehingga bisa membuat cetusan aytua ignition pada isolasi kabel tersebut.

II. Komposisi Pada Kabel Tebakar

II.1. Struktur Pada Kabel

Bunga api yang timbul pada kabel listrik mempunyai temperature sampai dengan 6000°K . Pada saat terjadinya bunga api dan tersedianya bahan bakar maka kebakaran pasti akan terjadi. Pada saat terjadinya kebakaran

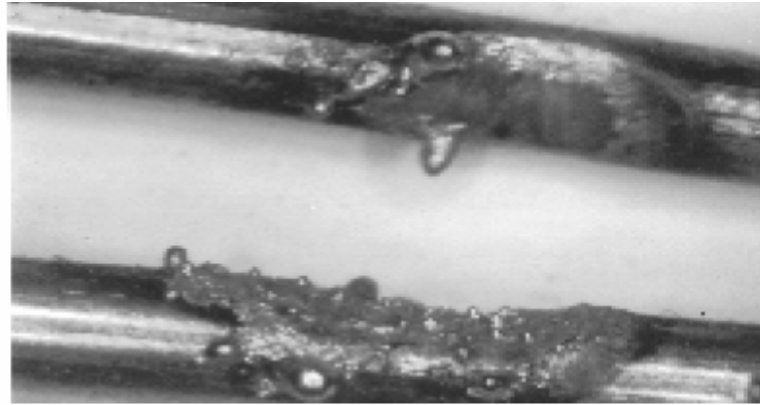
dimana penghantar tembaga akan meleleh pada temperature 1085°C , dan pada saat setelah kebakaran maka akan terjadi proses pendinginan, maka kabel yang terbakar tadi akan membentuk suatu bentuk bulat/ butiran yang kasar seperti yang dapat pada gambar berikut :



Gambar 3.10 : Butiran dari lelehan kabel dengan adanya bunga api



Gambar 3.11 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran yang sesungguhnya
Namun kadang kala tidak semua bentuknya berupa bola/ butiran namun ada kalanya berupa bentuk yang tidak beraturan namun tetap menyisakan bentuk yang tidak tajam pada ujungnya, seperti dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 3.12 : Butiran tidak beraturan dari lelehan kabel hubungan singkat tanpa isolasi

Struktur kristalisasi yang membentuk tembaga berubah pada saat pemanasan, pada pemanasan sampai dengan 300°C , penghantar tembaga membentuk alur memanjang yang rapi. Pada saat dipanaskan pada temperature yang lebih tinggi butir-butir halus dari rekristalisasi tembaga mulai muncul, dan butir-butir yang lebih besar akan muncul pada saat pemanasan telah mencapai 800°C .



Gambar 3.13 : Butiran dari lelehan kabel yang terbakar langsung tanpa adanya loncatan bunga api

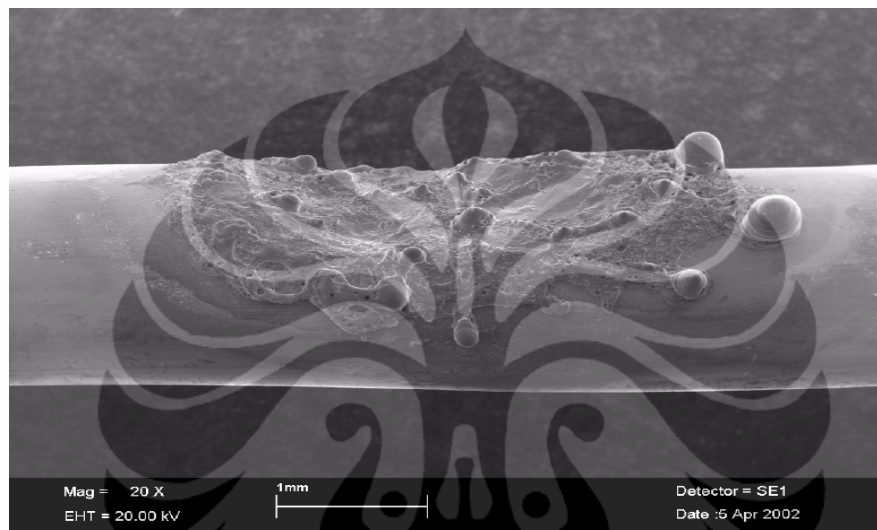
Jejak dari lelehan akibat kebakaran yang berupa pola tetesan secara visual dapat dibedakan dengan butiran-butiran akibat percikan bunga api. Jadi pada saat kebakaran yang dimulai oleh api yang dipicu dari dalam kabel hasil akhirnya berupa pola butiran kristalisasi sedangkan pada kebakaran yang diakibatkan bukan dari kabel maka akan membentuk pola tetesan.

Secara umum butiran akibat arcing mempunyai perbedaan yang tajam antara bulir-bulir kasar dengan bentuk silindris dari kabel. Pada saat kabel meleleh

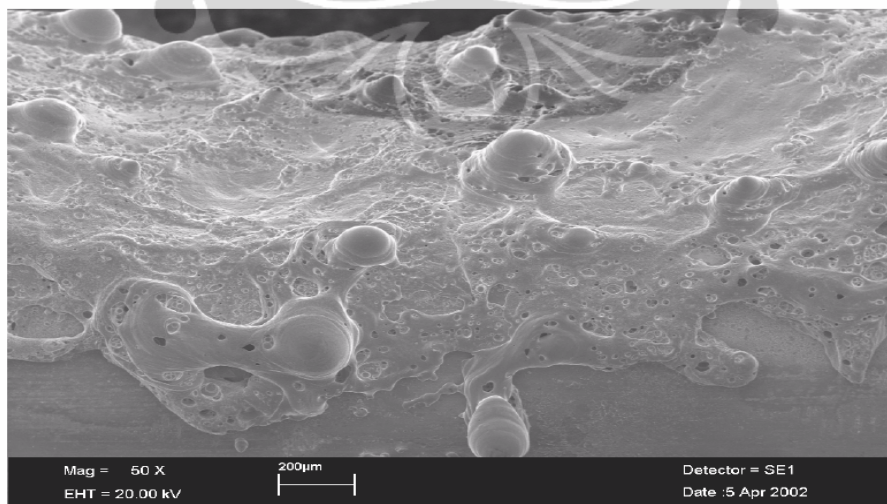
akibat dibakar maka tidak akan menunjukkan bentuk dari material peralihan yang tajam antara kabel yang meleleh dengan material kabel yang masih utuh.

Jika dilihat dengan mikroskop maka akan terlihat struktur butiran yang lebih halus dibandingkan dengan yang kabel yang terbakar. Dimana jika kabel meleleh dengan adanya reaksi yang melibatkan oksigen maka membentuk pola dari tembaga murni yang diselingi dengan adanya oksigen, tergantung dari apa penyebab pelelehan itu.

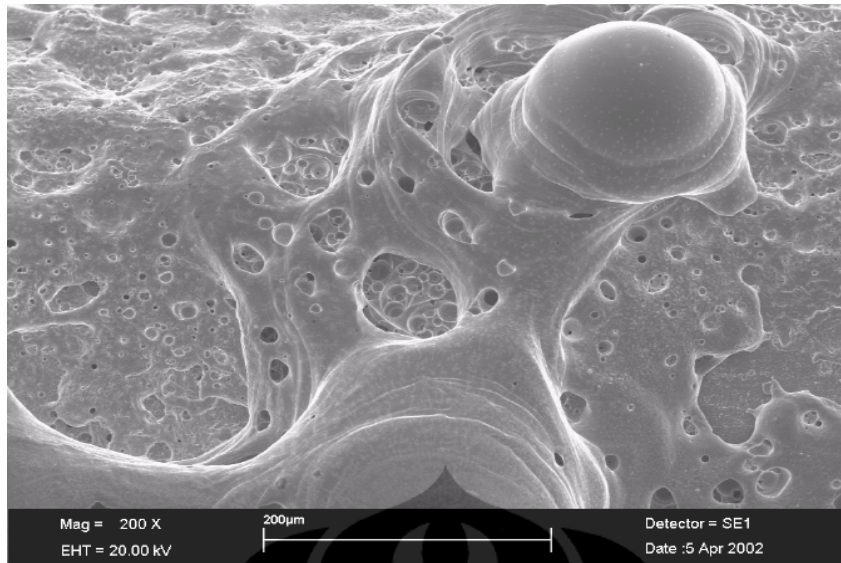
Berikut dibawah ini gambar dari scanning electron microscope (SEM) dari butir lelehan kabel dengan berbagai pembesaran



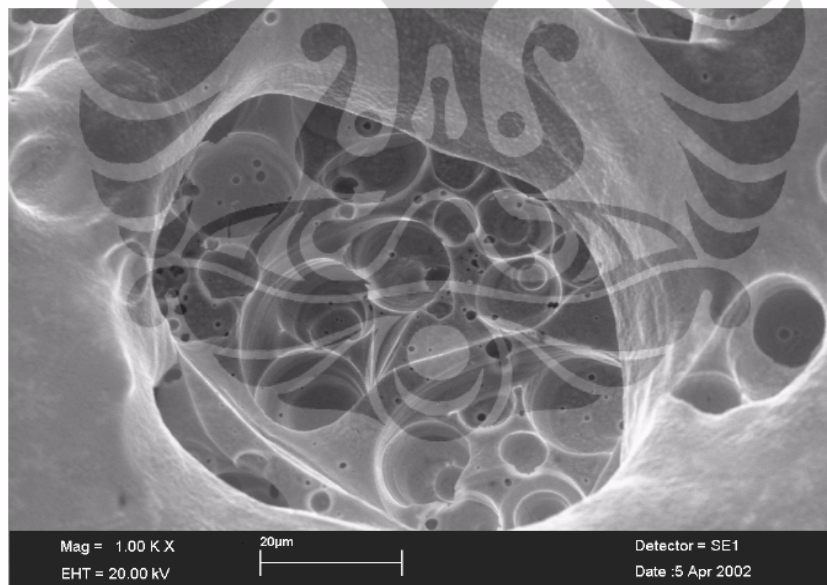
Gambar 3.14 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran setelah terjadinya bunga api pada pembesaran 20 X



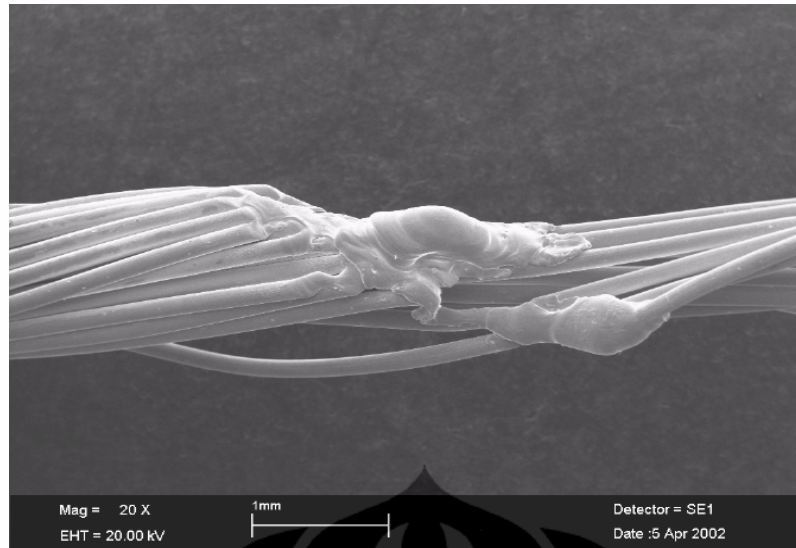
Gambar 3.15 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran setelah terjadinya bunga api pada pembesaran 50 X



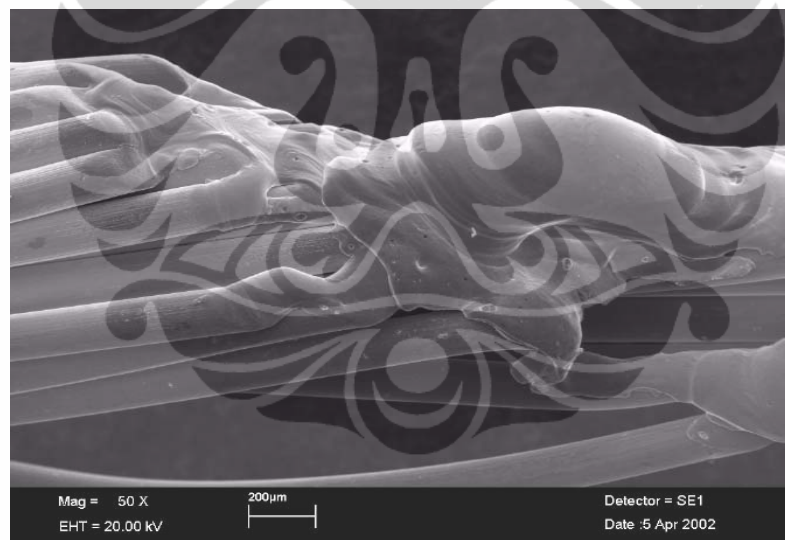
Gambar 3.16 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran setelah terjadinya bunga api pada pembesaran 200 X



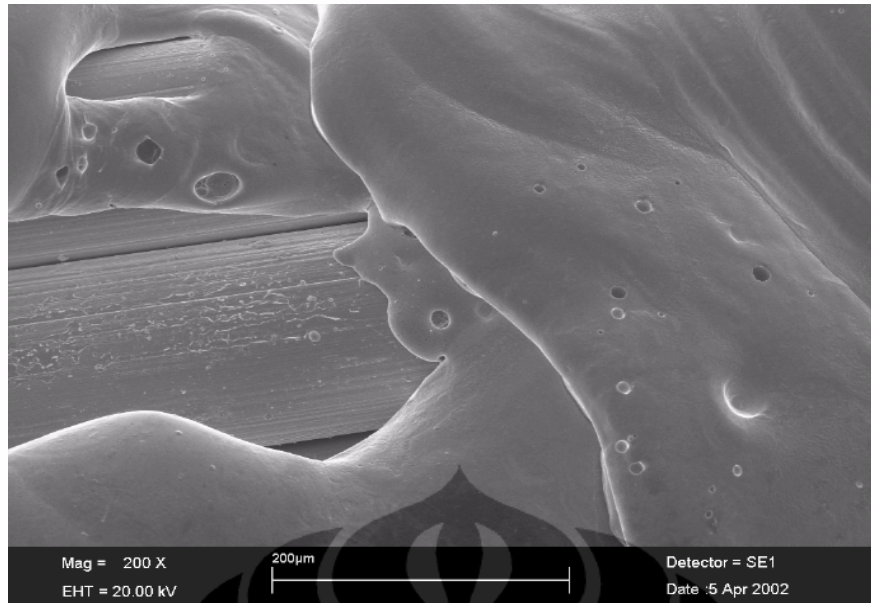
Gambar 3.17 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran setelah terjadinya bunga api pada pembesaran 1000 X



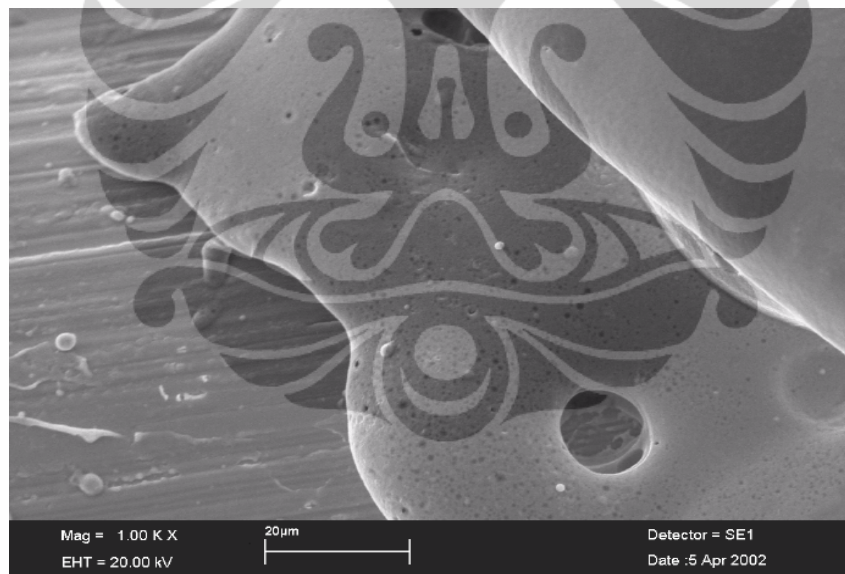
Gambar 3.18 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran setelah terjadinya bunga api pada pembesaran 20 X, kabel serabut



Gambar 3.19 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran setelah terjadinya bunga api pada pembesaran 50 X, kabel serabut



Gambar 3.20 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran setelah terjadinya bunga api pada pembesaran 200 X, kabel serabut tampak adanya lapisan lelehan yang overlap



Gambar 3.21 : Butiran dari lelehan kabel dari kebakaran setelah terjadinya bunga api pada pembesaran 1000 X, kabel serabut tampak adanya lapisan lelehan yang overlap gelembung udara

Selain itu disebutkan juga jika melelehnya kabel yang diakibatkan atau diawali oleh loncatan bunga api (dalam hal ini hubungan singkat / beban lebih), maka akan ditandai juga dengan hadirnya butir – butir halus CuO atau Cu_2O dekat ujung dari lelehan dan secara bertahap berkurang dan habis dititik paling akhir dari lelehan.

Pada sisi lain jika lelehan diakibatkan oleh kebakaran luar, akan terbentuk macam-macam butiran yang melekat pada sepanjang kabel yang meleleh tanpa bentuk yang sistematis atau bentuk yang tidak beraturan.

Secara umum, kebakaran yang diakibatkan atau diawali oleh arus hubungan singkat biasanya dibagi atas tiga bagian, yakni :

1. Permukaan mempunyai banyak pori-pori
2. Pada lapisan dibawahnya yang tidak meleleh terjadi rekristalisasi
3. Pada bagian paling dalam dimana tidak terjadi proses pelelehan maupun rekristalisasi, melalui mikroskop dapat dilihat bahwa bentuknya cenderung seragam.



Gambar 3.22 : Butiran yang menunjukkan tiga lapis zona (permukaan, tengah dan lapisan dalam)

II.2. Unsur dan Senyawa Pada Kabel

Berikut ini ada beberapa metoda penelitian yang dilakukan oleh ilmuwan yang berbeda, yang mana metoda ini memberikan gambaran baru tentang penelitian apakah kabel adalah korban atau penyebab kebakaran. Metoda ini antara lain adalah :

1. Penelitian dilakukan oleh Gray et.al

Gray menyampaikan hasil dari suatu penelitian dimana dengan menggunakan kabel PVC dan dialiri arus listrik sampai kabel terbakar (penyebab), dan menggunakan kabel dan dialiri arus yang normal sesuai dengan nilai nominalnya dan kemudian dibakar (korban).

Kemudian potongan hasil percobaan ini dilihat dibawah *scanning electron microscope* (SEM) , dan dapat dilihat bahwa kabel yang merupakan penyebab mempunyai banyak butiran-butiran kotak tak beraturan, sedangkan kabel yang berupa korban mempunyai sedikit sekali butiran-butiran atau hampir tidak ada sama sekali.

2. Penelitian oleh Erlandson and Strand

Melakukan dengan membuat kabel hubungan singkat dan membakarnya dengan api yang berbahan bakar kayu dan PVC dan membandingkannya dengan kabel yang dihubung singkatkan dan membakarnya pada api normal. Diawah SEM dapat dilihat kabel yang menjadi korban ini mempunyai partikel – partikel

kecil yang seragam dan berukuran 2 μm yang tersebar dipermukaan butiran-butiran yang terbentuk.

Pada kasus tertentu partikel ini juga terbentuk mengandung gas HCl murni, yang terbentuk dari uap HCl cair dan bukan dari PVC yang terbakar.

Dalam penelitian yang lain Erlandson dan Strand menemukan bahwa butiran dari kabel yang terbakar (korban) mempunyai pori-pori yang sangat banyak, sedangkan lelehan butiran yang diakibatkan oleh arus hubungan singkat tidak mempunyai pori sama sekali.

Erlandson dan Starnd juga memberikan catatan bahwa rangkaian oksidasi bisa timbul antara material yang meleleh dan tidak meleleh jika diuji di udara terbuka namun tidak akan muncul jika diuji pada ruang yang kurang oksigen.

Namun hasil penelitian ini berkebalikan dengan yang didapatkan oleh *Tokyo Fire Department*, dimana pori-pori ini dapat terbentuk diudara terbuka yang merupakan hasil dari lelehan akibat arus hubungan singkat. Dengan menggabungkan kabel dalam kondisi hubungan singkat didalam udara dan ruangan yang berisi N_2 dan CO_2 dan temperature yang terkontrol. Pori-pori ini selalu ada ketika pada saat percobaan diudara dengan temperature 1000°C, namun tidak pada ruangan dengan N_2 dan CO_2 pada temperature yang sama.

3. Penelitian oleh Tokyo Fire Department

Dalam penelitian ini menyimpulkan pori-pori pada butir-butir kabel yang menjadi penyebab mempunyai ukuran yang lebih kecil dari pori yang merupakan korban, butir dari lelehan yang menjadi sebab berada dipermukaan sedangkan butir yang merupakan korban berada lebih dalam, hal ini dimungkinkan karena lelehan penyebab cenderung lebih cepat mengeras sedangkan oksigen mempunyai kemungkinan yang lebih kecil dan cenderung berpenjar serta mengeras lebih lama dan pori-pori yang berada dipermukaan cenderung berpindah dan mengisi bagian dalam dari pori yang lebih besar pada saat temperature masih tinggi.

4. Penelitian oleh Ishibasi dan Kishida

Dari meneliti 15 hasil lelehan kabel baik karena hubungan singkat maupun yang terbakar, ditemukan bahwa pori-pori pada kabel yang menjadi penyebab lebih banyak dari kabel yang menjadi korban. Ini dimungkinkan karena lelehan penyebab dibentuk dalam suatu peristiwa oksidasi sedangkan korban mengurangi udara.

Mitsubishi menemukan pada saat hubungan singkat pada temperature 400 °C-1000 °C menemukan bahwa ukuran butiran ini antara 0.5 – 1.0 μm dan jumlahnya pada korban lebih banyak dua kali dari penyebab.

5. Penelitian oleh Miyoshi

Menemukan bahwa pori dalam jumlah yang banyak ditemukan pada butir korban dari pada butir pada penyebab. Pada penelitian ini butir korban dibuat melalui pembakaran kabel listrik didalam tungku sampai terjadinya hubungan singkat, sedangkan penyebab dibuktikan hanya dengan hubungan singkat. Diameter pori pada korban seragam antara 2 – 3 kali lebih besar dari diameter penyebab.

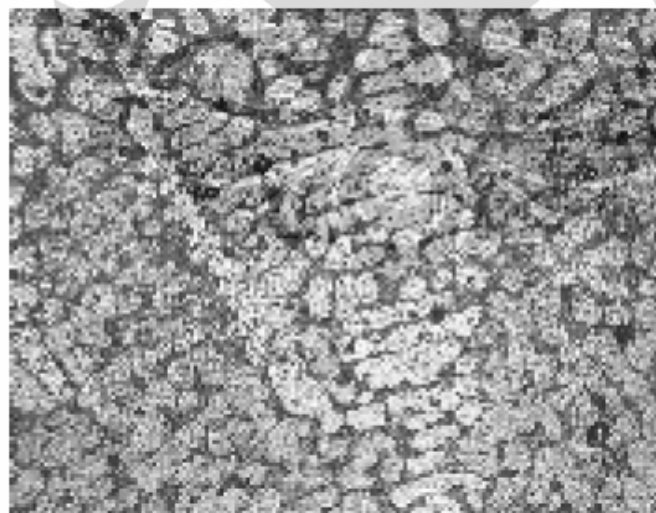
6. Penelitian oleh Seki

Penelitian oleh Seki memusatkan kepada keberadaan dari struktur Kristal dendrit yang menunjukkan konsentrasi oksigen pada butir-butir lelehan. Konsentrasi oksigen lebih kecil dari konsentrasi kristalisasi Cu, yang terbentuk dari konsentrasi yang besar dari Cu_2O .

Seki et.al bersama dengan Lee et al, menemukan jika struktur Kristal dendrite terbentuk maka jarak antar bagian menunjukkan besarnya temperature ambient. Butir penyebab akan mengeras pada saat temperature $< 400^\circ\text{C}$ dan dengan jarak lengan yang pendek, sedangkan pada korban dengan jarak antar lengan yang lebih panjang pada temperaturnya $> 400^\circ\text{C}$. Dari penelitian Seki lainnya didapat suatu hasil yang mengklasifikasikan antara korban dan penyebab dengan adanya struktur kristalisasi dari dendrite, seperti yang digambarkan pada table berikut ini :

Tabel 3.10 : Struktur Kristalisasi Dendrit

NO	BUTIRAN	JUMLAH KRISTALISASI DENDRIT	KRISTAL DENDRITE Cu	KRISTAL DENDRITE Cu_2O
1	Penyebab	57%	38%	5.00%
2	Korban	92%	8%	-



Gambar 3.23 : Struktur Kristalisasi Dendrit

7. Penelitian oleh Levinson

Yang memberikan kesimpulan panjang dari berkas yang seragam yang menunjukkan bentuk yang khas dari proses rekristalisasi yang biasanya tampak pada panas akibat hubungan singkat dibandingkan akibat pemanasan dari luar yang bentuk struktur panjang rekristalisasinya tidak beraturan

8. Metoda Raman Spectroscopy and X-Ray Micronaalysis

Tokyo Fire Department menyatakan bahwa adanya unsure karbon ditemukan pada butiran yang menjadi korban namun tidak tampak pada penyebab.

9. Metoda AES, SIMS dan ESCA

Metoda AES (*Auger Electron Spectroscopy*), SIMS (*Electron spectroscopy for Chemical Analysis*) dan SIMS (*Secondary Ion Mass Spectrometry*). Metoda ini memusatkan pada nilai konsentrasi dari material yang dapat dilihat secara progresif. Erlandson dengan menggunakan metoda ini kadang menemukan adanya unsure chlorine pada butir-butir lelehan, namun adanya chlorine ini tidak muncul dan menunjukkan suatu yang khas berhubungan langsung pada butiran korban dan tampak hanya pada butiran yang menjadi korban.

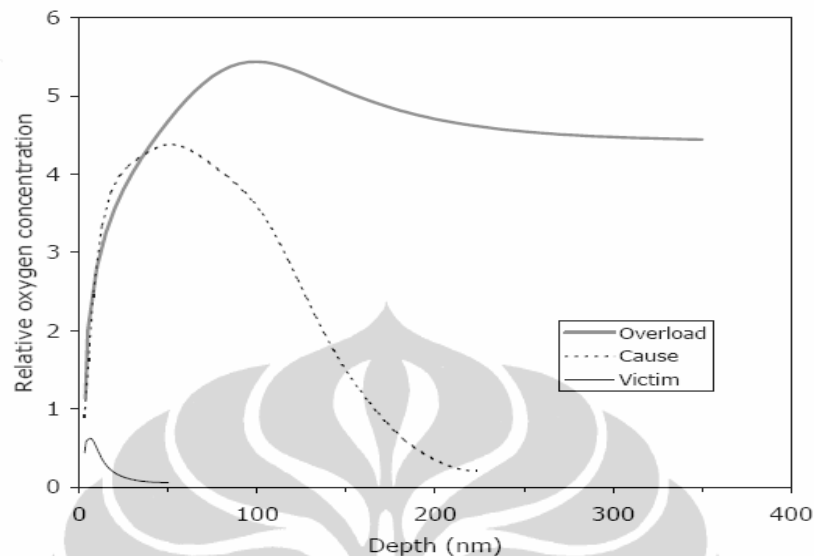
Mac Cleary and Thaman menemukan bahwa konsentrasi oksigen pada butir-butir lelehan sangat menentukan penyebab dari kebakaran. Dalam penelitiannya dibuat suatu kabel yang mengalami hubungan singkat selama 15 detik yang dijadikan sample sebagai penyebab, dan untuk korban kabel dibakar untuk beberapa saat (tidak disebutkan berapa lama dan pada temperature berapa) sedangkan untuk kabel yang terbakar akibat beban lebih didapat dari kabel yang diberi arus melebihi batas kemampuannya sampai meleleh dan terjadi percikan bunga api. Selain itu diambil juga sample dari kebakaran yang sesungguhnya.

Dari sample ini pada lapisan 5 nm pertama dibuang dan sisanya dianalisa dan diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Jika konsentrasi oksigen yang terbentuk rendah dan puncaknya ditemukan pada kedalaman 20 nm atau kurang dibawah permukaan, dan konsentrasi ke arah puncaknya perlahan berkurang, maka dalam kebakaran ini kabel hanya korban.
- Jika konsentrasi oksigen yang terbentuk tinggi dari puncak atau ujung permukaan pada kedalaman 20 – 200 nm, dan konsentrasinya makin dalam makin berkurang, maka kabel disini merupakan penyebab.
- Jika konsentrasi oksigen yang terbentuk sangat tinggi dan ditemukan pada kedalaman 2000 – 4000 nm dari permukaan, maka kabel disini menjadi penyebab dimana dan pada kabel ini terjadi percikan bunga api dan mengalami pemanasan untuk waktu lama.

Dimana grafik untuk penelitian Mac Cleary and Thaman ini dapat dilihat sebagai berikut :

Grafik 3.3 : Konsentrasi oksigen pada butir lelehan kabel dengan loncatan bunga api (Mac Cleary dan Thaman)



Satoh et al. melakukan penelitian dengan mengambil sample kabel empat sample utama, yaitu :

1. Penyebab dan korban diambil dari kebakaran yang sesungguhnya
2. Penyebab di buat laboratorium dengan menggunakan kabel serabut dan dilakukan hubungan singkat
3. Korban dibuat dengan menempatkan kabel didalam tungku pemanas sampai terjadi hubungan singkat.

Dengan menggabungkan membuat komparasi dari hasil AES, SIMS dan AES, diambil kesimpulan :

1. Pada kabel yang menjadi penyebab konsentrasi oksigen pada 100 nm dibawah permukaan.
2. Pada kabel yang menjadi korban tampak konsentrasi oksigen, karbon dan chlorine dalam bentuk yang seragam tanpa ada konsentrasi yang dominant.

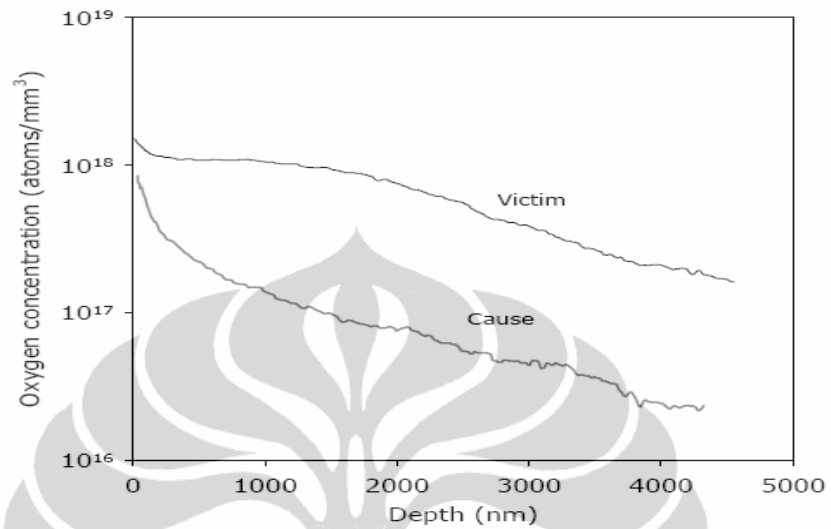
Dari penelitian dan perbandingan ini ditarik kesimpulan bahwa penelitian menggunakan SIMS lebih dianjurkan dan lebih baik.

Dalam lainnya Satoh dengan hanya menggunakan SIMS dengan mengambil sepuluh sample dari kebakaran yang sesungguhnya dan setelah diidentifikasi mana yang korban dan mana yang penyebab kemudian dianalisa dan hasilnya adalah sebagai berikut :

1. Jika jumlah konsentrasi absolute oksigen pada kedalaman 3000 nm adalah $< 10^{-17}$ atom / mm^3 maka kabel ini adalah penyebab kebakaran
2. Jika konsentrasi absolute oksigen $> < 10^{-17}$ atom / mm^3 maka kabel ini adalah korban kebakaran.

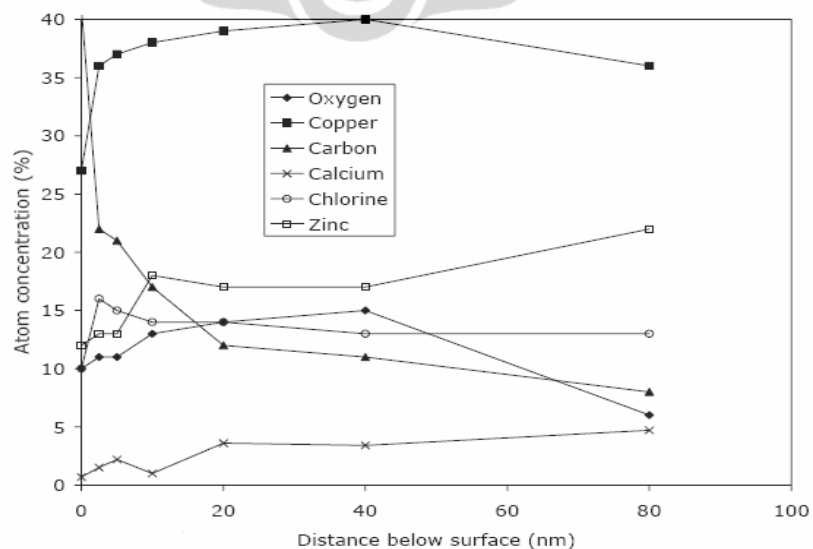
Dimana grafik hasil penelitian Satoh dengan menggunakan SIMS digambarkan sebagai berikut :

Grafik 3.4 : Konsentrasi oksigen pada butir lelehan kabel dengan loncatan bunga api seperti yang diukur oleh Satoh

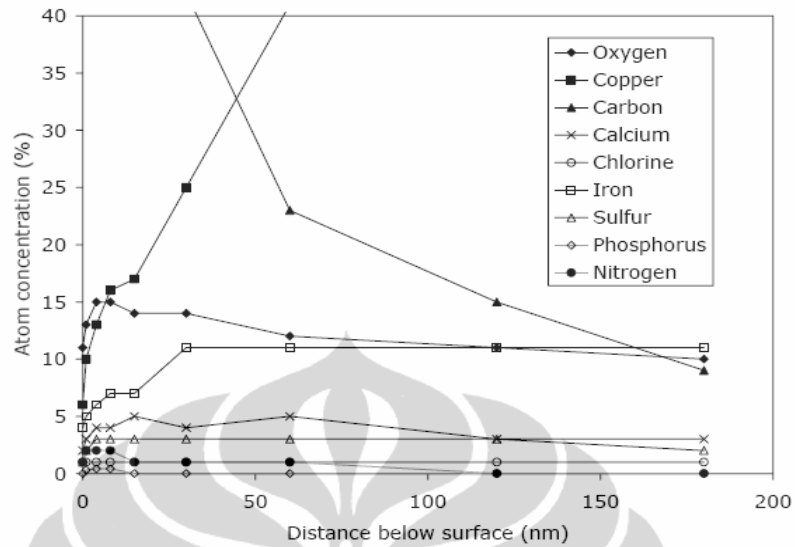


Dasar Penelitian dari Mc Cleary dan Thaman dilanjutkan oleh Anderson, Dalam penelitian ini Anderson melakukan penelitian terhadap udara sekeliling dari kabel yang terbakar. Karena pada prinsipnya jika terjadi arus hubungan singkat dan terjadi percikan bunga api maka akan ada atom – atom yang terurai dalam bentuk gas terlepas dari oksigen. Dari hasil penelitian ini dapat digambarkan pada grafik berikut ini :

Grafik 3.5 : Komposisi unsure kimiawi lelehan kabel sebagai penyebab kebakaran

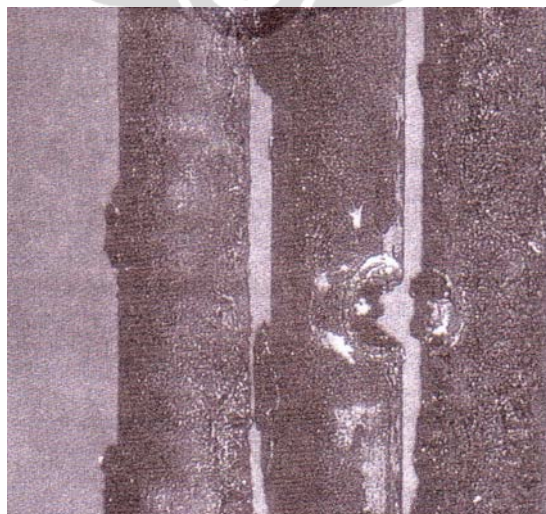


Grafik 3.6 : Komposisi unsure kimiawi lelehan kabel sebagai korban kebakaran

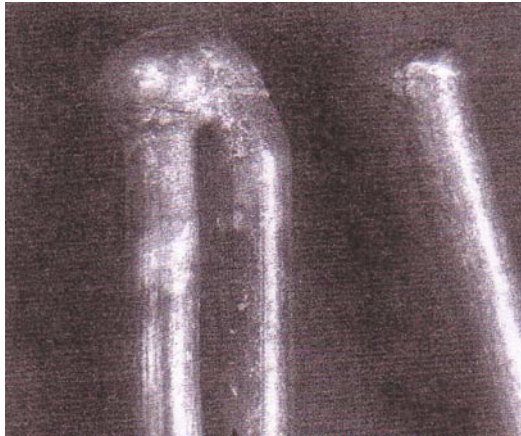


Penelitian ini berdasarkan pada bahwa pada saat terjadi pemanasan maka atom – atom akan terurai diudara baik yang dari metal penghantar maupun dari material PVC dan pada saat pendinginan sebagian kembali beraksi dan terperangkap didalam butir-butir dari lelehan kabel.

Dari Penelitian dan beberapa pengalaman yang diambil, oleh bidang foreksik diluar di Amerika Serikat dan sudah dibakukan dan dibukukan dalam bentuk petunjuk pelaksanaan dan regulasi dalam NFPA – 921 (*Fire and Explosion Investigation*), dibawah ini dapat dilihat dan dijadikan referensi beberapa gambar sebagai berikut :



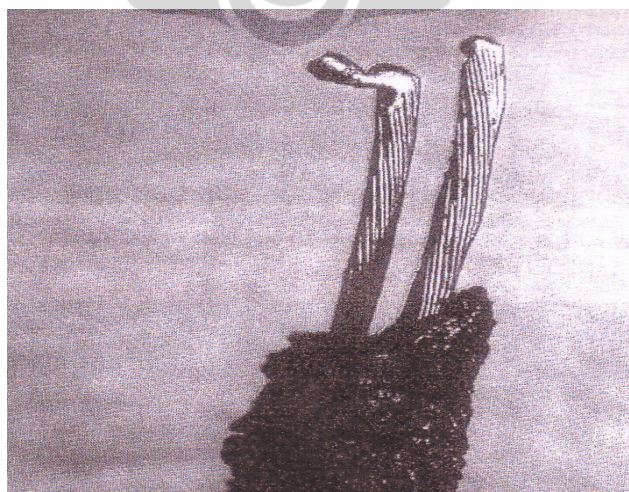
Gambar 3.24 : Titik terjadinya loncatan bunga api yang dimulai dari proses karbonisasi.



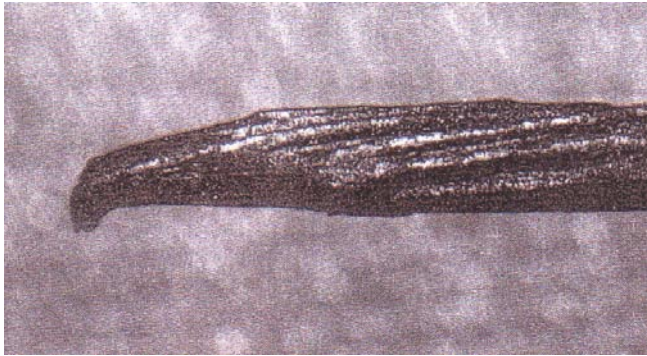
Gambar 3.25 : Penghantar tembaga dengan butir pada lelehan diujung penghantar yang disebabkan oleh loncatan bunga api pada kedua penghantarnya dan terjadi karbonisasi pada isolasinya



Gambar 3.26 : Kabel yang hancur karena terjadinya loncatan bunga api yang dimulai dari proses karbonisasi.



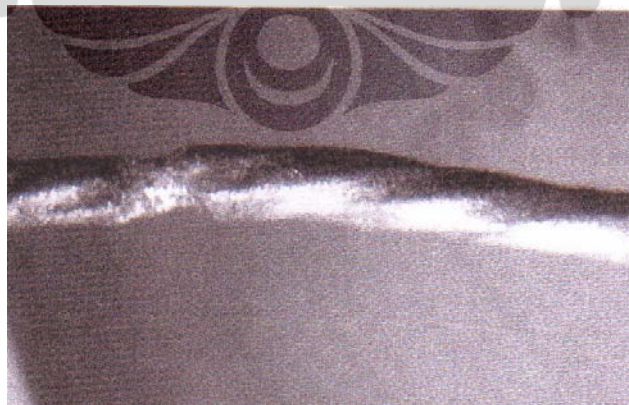
Gambar 3.27 : Kabel yang hancur karena terjadinya loncatan bunga api yang dimulai dari proses karbonisasi.



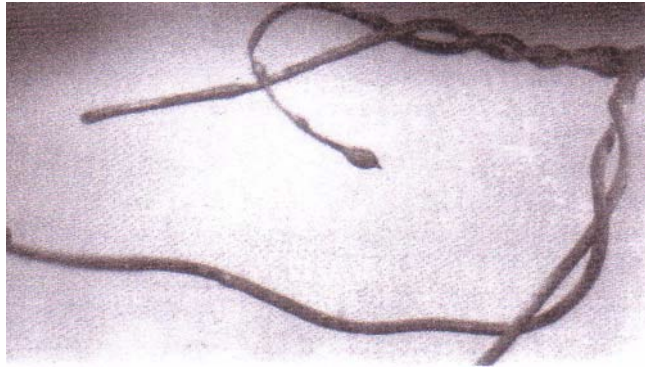
Gambar 3.28 : Kabel serat optik yang meleleh karena terjadinya api dari kebakaran yang sesungguhnya .



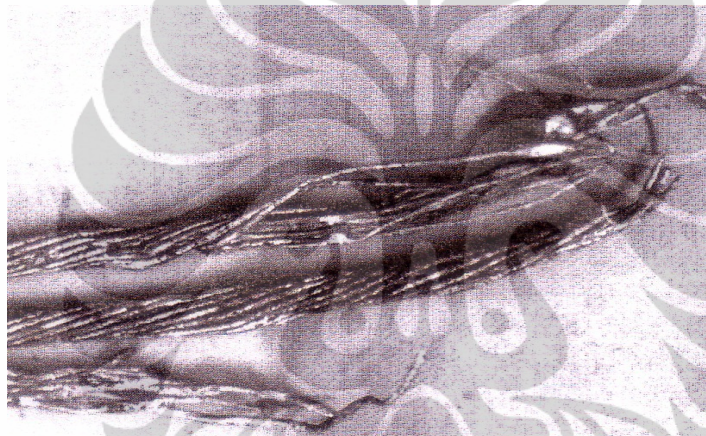
Gambar 3.29 : Isolasi kabel yang melepuh dan meleleh dari api dari kebakaran yang sesungguhnya dilihat dari alurnya .



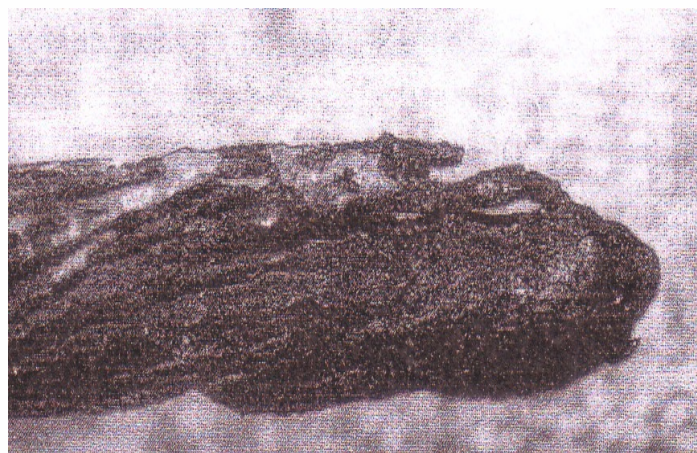
Gambar 3.30 : Isolasi kabel yang menyatu akibat meleleh isolasi dari api dari kebakaran yang sesungguhnya.



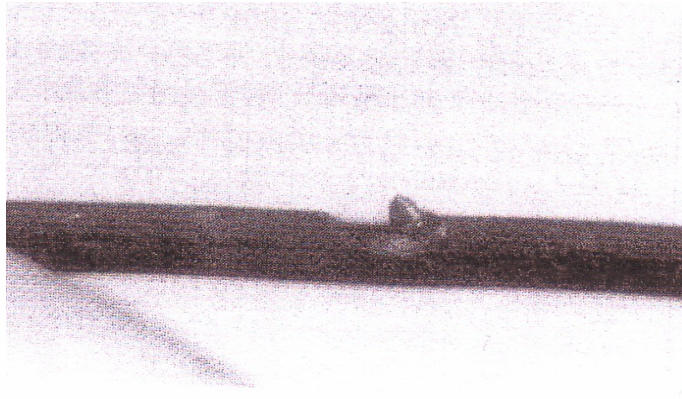
Gambar 3.31 : Isolasi kabel yang membentuk gelembung- gelembung yang terpapar dari api dari kebakaran yang sesungguhnya



Gambar 3.32 : Kabel alumunium yang terpapar dari api dari kebakaran yang sesungguhnya memeplihatkan bentuk yang menjadi berakar, daerah yang menampakkan adanya timah dan ujung yang tumpul



Gambar 3.33 : Contoh lain kabel tembaga serabut yang terbakar



Gambar 3.34 : Kabel tembaga tunggal yang alur puntiran akibat arus hubungan singkat



Gambar 3.35 : Contoh lain kabel tembaga serabut yang terbakar