

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Dasar–Dasar Mekanisme Perpindahan Energi Panas

Pada dasarnya terdapat tiga macam proses perpindahan energi panas. Proses tersebut adalah perpindahan energi secara konduksi, konveksi, dan radiasi [4]. Perpindahan energi secara konduksi dan konveksi terjadi pada material padat dan cair. Sedangkan proses perpindahan energi panas secara radiasi terjadi pada ruang hampa. Berikut pembahasan lebih lanjut mengenai ketiga perpindahan energi panas tersebut.

2.1.1 Konduksi

Perpindahan energi panas secara konduksi merupakan perpindahan energi panas yang disalurkan secara langsung antar molekul tanpa adanya perpindahan dari molekul yang bersangkutan. Proses konduksi terjadi pada benda padat, cair maupun gas jika terjadi kontak secara langsung dari ketiga macam benda tersebut. Ada empat hal penting dalam konduksi yaitu: 1. konduktivitas panas, 2. konduktansi panas, 3. resistivitas panas, dan 4. resistansi panas.

Konduktivitas panas (k) merupakan perhitungan kapasitas hantar panas suatu material atau disebut dengan indeks hantar panas per unit luas konduksi per gradient temperatur dari suatu material. Perumusannya adalah sebagai berikut:

$$k = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T/m} \left[\frac{W}{m^2 \cdot \Delta_1 \text{ } ^\circ C/m} \right] \quad (2.1)$$

keterangan : \dot{Q} = kecepatan aliran panas [W]

A = luas daerah hantaran panas [m^2]

$\Delta T/m$ = gradient temperatur disepanjang material

[$\Delta_1 \text{ } ^\circ C/m$]

Konduktansi panas (K) merupakan perhitungan kapasitas dari perpindahan panas materi dalam menghantarkan panas. Perumusannya adalah:

$$K = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T} \left[\frac{W}{m^2 \Delta_1 ^\circ C} \right] \quad (2.2)$$

Keterangan : \dot{Q} = kecepatan aliran panas [W]

A = luas daerah hantaran panas [m^2]

ΔT = selisih temperatur [$\Delta_1 ^\circ C$]

Konduktansi panas \underline{K} untuk proses konduksi adalah sebagai berikut:

$$K = A\underline{K} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T} \left[\frac{W}{\Delta_1 ^\circ C} \right] \quad (2.3)$$

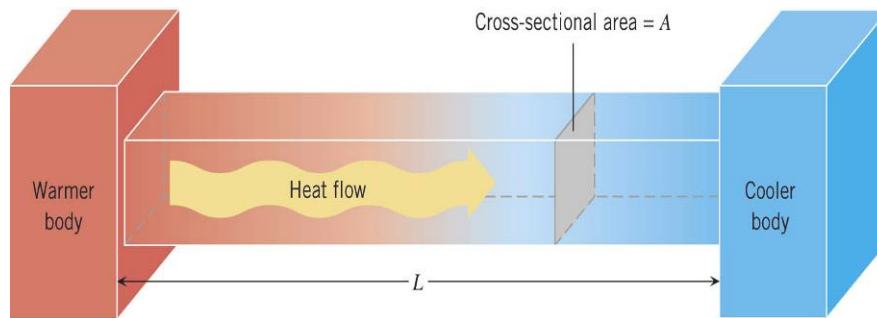
Sedangkan untuk resistivitas panas (r) dan resistansi panas (R) masing – masing merupakan kebalikan dari konduktivitas panas dan konduktansi panas yaitu dirumuskan sebagaimana seperti dibawah ini :

$$R = A(1/K) \left[\frac{m^2 \Delta_1 ^\circ C}{W} \right] \quad (2.4)$$

$$\underline{R} = 1/\underline{K} = 1/AK = R/A \left[\frac{\Delta_1 ^\circ C}{W} \right] \quad (2.5)$$

Konduktivitas panas merupakan properti dari suatu material yang menentukan kemampuan suatu benda menghantarkan panas. Materi yang memiliki konduktivitas panas rendah dapat disebut dengan isolator yang baik. Setiap materi memiliki lebar batasan dari konduktivitas panas.

Konsep dasar konduktivitas panas adalah kecepatan dari proses difusi energi kinetik molekular pada suatu material yang menghantarkan panas. Walaupun mekanisme perambatan gerakan secara molekular pada perambatan panas hampir sama dengan perambatan dari suara dan sifat elektik dari material itu, tetapi hanya ada sebagian dari hubungan secara teoritis yang bisa dicapai.



Gambar 2.1 Aliran panas pada saat terjadi konduksi

2.1.2 Konveksi

Perpindahan energi panas dengan proses konveksi terjadi hanya pada benda cair. Perpindahan ini disertai dengan perpindahan benda cair secara fisik.. Pada saat energi panas yang diterima oleh benda cair tersebut melebihi titik batas maka benda cair itu akan mengalami perubahan fasa.

2.1.3 Radiasi

Perpindahan panas dengan proses radiasi ini berbeda dengan proses- proses yang telah dijelaskan sebelumnya. Energi radiasi dirambatkan menggunakan gelombang elektromagnetik diantara dua objek yang dipisahkan oleh jarak dan perbedaan temperatur dan tanpa medium penghantar. Hal ini sangat berbeda dengan perambatan energi cahaya yang hanya menggunakan panjang gelombang masing – masing. Gelombang elektromagnetik ini (radiant energi) dapat melalui ruangan hampa dengan sangat cepat dan juga dapat melalui cair, gas dan beberapa benda padat. Energi yang dirambatkan (radiant energi) ini diserap oleh permukaan benda yang dikenainya dengan jumlah yang berbeda – beda. Hal ini tergantung pada kemampuan menyerap dari benda yang dikenainya. Matahari merupakan contoh yang mudah untuk perpindahan panas dengan radiasi. Radiant energi dari matahari dirambatkan melalui ruang hampa dan atmosfer bumi. Energi yang dirambatkan ini akan diserap dan tergantung pada karakteristik permukaan. Semua objek yang memiliki warna yang gelap terutama berwarna hitam akan lebih mudah menyerap energi ini.

Konsep *blackbody* (benda gelap) dan emisivitas sangat erat dengan radiant energi emisi suatu benda. Daya serap (*absorptivity*), daya pantul (*reflectivity*), dan *transmissivity* juga berhubungan dengan radiant energi, yang datang dari sumber

lainnya. Sebuah benda gelap memiliki radiasi yang ideal dalam karakteristik hantaran panas yaitu :

- memiliki radiasi energi maksimum pada temperatur benda.
- menyerap semua energi radiasi yang mengenainya pada panjang gelombang tertentu.

2.2 Tembaga Sebagai Konduktor

Pada saat ini terdapat dua jenis material yang banyak digunakan untuk keperluan konduktor, yaitu tembaga dan aluminium. Tembaga memiliki kemampuan hantar arus yang tinggi, sehingga tembaga lebih efisien dibandingkan dengan penghantar listrik yang lain. Karena konduktivitasnya yang baik, tembaga tempa merupakan standar internasional untuk pembandingan bagi penghantar listrik lain. Pada tahun 1913, berdasarkan pengukuran konduktivitas tembaga pada semua tingkatan dan kemurnian tembaga serta campurannya diukur, maka IEC menetapkan bahwa konduktivitas tembaga tempa adalah 100 % (International Annealed Copper Standard (IACS)) [6]. Hal ini menyatakan bahwa tembaga memiliki kemampuan hantar arus yang terbaik sebagai konduktor. Sekarang, penghantar tembaga yang digunakan pada instalasi gedung mempunyai rating konduktivitas berdasarkan skala IACS.

Tembaga tahan terhadap pemuluran dan lainnya. Tembaga memiliki kekuatan yang lebih baik, dibandingkan dengan penghantar aluminium. Pemuluran yang terjadi dapat menyebabkan kapasitas hantar arusnya berkurang, memboroskan energi, dan menimbulkan panas berlebih. Tembaga juga memiliki kemampuan untuk menahan panas dan tekanan elektromagnetis akibat pembebanan yang berlebih, hal ini menjadi pertimbangan tersendiri dari segi keamanan dalam instalasi listrik.

Perubahan bentuk atau deformasi pada penghantar terjadi dikarenakan tekanan terhadap penghantar yang tidak seimbang. Hal ini mampu menimbulkan busur api, dan *overheating*, namun dapat diatasi oleh tingkat kekerasan dan kekuatan tembaga yang baik.

Titik cair dan daya hantar listrik yang tinggi mampu mengurangi kemungkinan kerusakan yang disebabkan oleh pemanasan titik (*hot spot*) atau lompatan api (*flash over*) yang tiba-tiba pada saat pengoperasiannya. Apabila terjadi

pemanasan yang sangat tinggi maka tembaga akan diuapkan, oleh karena itu tembaga dapat menahan pembakaran apabila terjadi penyalaan api yang tiba-tiba.

Resistivitas listrik tembaga, sebagaimana yang terjadi pada semua logam murni lainnya, akan berubah menurut temperatur. Perubahan resistansi dapat dihitung dengan:

$$R_{t_2} = R_{t_1} [1 + \alpha_{11} (t_2 - t_1)]$$

di mana α_{11} adalah konstanta koefisien temperatur resistansi tembaga pada $t_1^\circ\text{C}$. Untuk temperatur acuan 0°C persamaannya menjadi:

$$R_t = R_o (1 + \alpha_{ot})$$

Walaupun resistansi dapat dianggap sebagai fungsi linier dari temperatur untuk tujuan praktis, harga koefisien temperatur tidaklah konstan tetapi bergantung dan berubah menurut temperatur acuan sesuai dengan persamaan di bawah ini:

$$\alpha_t = 1/(1/\alpha_0 + t)$$

$$\text{karena, } 1/\alpha_0 = 234,45$$

$$\text{maka, } \alpha_t = 1/(234,45 + t)$$

berdasarkan sifat di atas maka, untuk kekuatan, daya tahan, dan keandalan tembaga adalah yang terbaik.

2.3 Karakteristik Termal [6]

2.3.1 Kapasitas Kalor (*Heat Capacity*)

Suhu dan kandungan kalor suatu bahan merupakan dua hal yang berbeda. Suhu atau temperatur adalah level aktivitas termal sedang kandungan kalor adalah besarnya energi termal. Keduanya berkaitan dengan kapasitas kalor.

Bila tidak ada perubahan isi maka kapasitas kalor sama dengan perubahan kandungan kalor per $^\circ\text{C}$. Dalam tabel teknik seringkali tercatat panas jenis sebagai pengganti kapasitas kalor. Panas jenis (*specific heat*) suatu bahan adalah perbandingan antara kapasitas kalor dari bahan tersebut dengan kapasitas kalor air. Diketahui

kapasitas panas air sama dengan 1 kal/g.^oC (4.184 joule/g.^oC atau 1 Btu/lb.^oF), jadi kita dapat menghitung dalam satuan yang kita pilih.

Nilai panas transformasi untuk berbagai bahan perlu diketahui. Yang banyak digunakan adalah panas peleburan (*heat of fusion*) dan panas penguapan (*heat of vaporization*) yaitu kalor yang diperlukan untuk mencairkan atau menguapkan suatu bahan. Keduanya melibatkan perubahan struktur atom atau molekul. Akan diketahui kelak bahwa dalam keadaan padat pun dapat terjadi perubahan struktur dan ternyata bahwa perubahan-perubahan ini mengakibatkan adanya perubahan dalam kapasitas panas atau energi termal bahan.

2.3.2 Muai Panas (*Thermal Expansion*)

Muai panas adalah pemuaian yang lazim dialami oleh bahan yang dipanaskan sehingga timbul peningkatan getaran termal atom-atom. Pemuaian dapat mengakibatkan pertambahan panjang ΔL .

$\Delta L/L$ yang sebanding dengan naiknya suhu ΔT

$$\Delta L/L = \alpha_L \Delta T \quad (2.6)$$

Ternyata pada umumnya α_L (koefisien muai linier) naik sedikit dengan naiknya suhu.

Pada muai volume, akibat pemuaian maka bahan selain mengalami perubahan panjang juga mengalami perubahan volume yang sebanding dengan kenaikan suhu. Koefisien muai volume α_V mempunyai hubungan serupa dengan persamaan diatas dengan perubahan volume $\Delta V/V$ dan kenaikan suhu ΔT . Nilai α_V adalah 3 kali nilai α_L . Diskontinuitas koefisien muai disebabkan oleh perubahan dalam susunan atom bahan.

2.3.3 Daya Hantar Panas (*Thermal Conductivity*)

Perambatan panas melalui bahan padat biasanya terjadi oleh konduksi. Koefisien daya hantar panas k adalah konstanta yang menghubungkan aliran panas (*heat flux*) Q dengan gradien suhu $\Delta T/\Delta x$.

$$Q = k \left(\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (2.7)$$

Koefisien daya hantar panas juga tergantung pada suhu, akan tetapi berlainan dengan koefisien muai panas. Naiknya suhu yang tinggi terhadap suatu bahan akan mengakibatkan perubahan atom yang mengiringi pencairan dan pengaturan kembali susunan atom-atom yang diakibatkan perubahan suhu akan menyebabkan daya hantar panas terganggu.

$$\frac{\text{energi}}{\text{luas, waktu}} = k \left(\frac{\text{perbedaan suhu}}{\text{tebal}} \right)$$

Jadi satuan daya hantar panas, k adalah $J/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})/(\text{°C}/\text{mm})$ atau $(\text{W}/\text{mm}^2)/(\text{°C}/\text{mm})$.

2.4 Kerja Panas Pada Kabel

2.4.1 Temperatur dan Aliran Panas pada Kabel

Pada kabel, panas yang timbul dari dalam kabel akan dialirkan ke luar kabel melalui proses konduksi panas. Pada proses konduksi, aliran panas rata-rata, $q[\text{W}]$, melalui suatu resistansi termal, $R_t [\text{°C}/\text{W}]$, dan perbedaan temperatur, $\Delta T [\text{°C}]$, pada daerah yang dilewatinya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta T = R_t \cdot q \quad (2.8)$$

Resistansi termal dapat dianalogikan dengan resistansi listrik, dan satuannya mengikuti hukum Ohm yaitu ‘termal ohm’. Oleh karena itu resistansi termal dapat dinyatakan dengan:

$$R_t = r \frac{l}{A} \quad (2.9)$$

dengan:

r : resistivitas termal [$\text{°C} \cdot \text{m}/\text{W}$]

l : panjang [m]

A : luas permukaan yang benda padat yang dilewati [m^2]

Kebalikan dari resistivitas termal dan resistansi termal adalah konduktivitas termal dan konduktansi termal. Konduktivitas termal dinyatakan dengan:

$$k = \frac{q}{A \cdot \left(\frac{\Delta T}{m} \right)} [\text{W}/\text{m}/\text{°C}] \quad (2.10)$$

yang menyatakan kemampuan suatu material untuk menyalurkan panas, dan konduktansi panas dinyatakan dengan:

$$K = 1/R_t = q/\Delta T \quad [W/^\circ C] \quad (2.11)$$

Konduktivitas termal merupakan besaran yang bersifat *temperature dependent*, artinya nilainya berubah-ubah sesuai dengan perubahan temperatur. Semakin bertambah temperatur, nilai konduktivitas termal dapat bertambah atau berkurang sesuai dengan jenis bahannya.

Kemampuan suatu bahan untuk menyimpan panas dinyatakan sebagai kapasitas termal.

$$C_t = \rho \times V \times c_p \quad [J/^\circ C] \quad (2.12)$$

dengan:

C_t : kapasitas termal [$J/^\circ C$]

V : volume [m^3]

ρ : massa jenis [kg/m^3]

c_p : panas jenis [$J/kg/^\circ C$]

Banyaknya panas yang dapat disimpan suatu bahan adalah $Q = C_t \times \Delta T$ [J].

Bentuk tersebut analog dengan penyimpanan muatan listrik pada kapasitor. Panas yang tersimpan tersebut kemudian dibuang melalui proses konduksi, radiasi atau konveksi.

2.5 Api Karena Listrik

Api karena listrik merupakan api yang berasal dari peralatan listrik. Akibat dari api ini bervariasi dari kebakaran kecil pada papan isolasi atau kabel isolasi sampai ke bencana besar yang dapat mengakibatkan kerusakan fatal. Salah satu faktor yang sangat berpengaruh adalah ketahanan material terhadap api, Hal yang paling baik untuk dilakukan untuk meminimalkan kerusakan adalah dengan mengatasi sumbernya, contohnya ialah dengan mencegah timbulnya api.

2.5.1 Penyebab-penyebab utama dari api karena listrik

Berikut adalah penyebab-penyebab utama dari api karena listrik:

a) Beban berlebih

Beban berlebih pada peralatan listrik menghasilkan arus berlebih. Panas juga bertambah pada kabel dan proporsional dengan kuadrat arus sehingga menjadi terlalu panas. Isolasi kabel umumnya dibuat material yang mudah sekali rusak akibat temperatur berlebih. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya hubung singkat. Karena banyak material isolasi yang mudah terbakar, bahkan dapat menyebabkan kebakaran apabila mencapai temperatur penyalaan.

b) Kegagalan isolasi

Kerusakan atau pengurangan kemampuan dari isolasi listrik dapat menghasilkan hubung singkat dan munculnya busur listrik secara kontinu, diikuti dengan terbakarnya material isolasi yang mudah terbakar. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, hal ini diakibatkan suhu busur listrik yang sangatlah tinggi.

c) Kegagalan tekanan kontak

Penurunan kemampuan dan kegagalan tekanan kontak antara variasi komponen dalam instalasi listrik yang bisa menyebabkan busur api, pemanasan lokal dan terbakarnya material isolasi yang mudah terbakar. Dalam kasus tertentu, ada kemungkinan tidak terjadi busur listrik tetapi dengan pemanasan berlebih sudah dapat menyalakan api. Hubung singkat dan busur listrik dapat terjadi kemudian, namun mereka bukan merupakan penyebab utama munculnya api.

d) Kerusakan konduktor

Kerusakan dari komponen arus konduktor yang disebabkan tekanan mekanis dapat menyebabkan busur listrik lokal pada titik terjadinya kerusakan. Temperatur busur listrik listrik sangatlah tinggi dan apabila terdapat material yang mudah terbakar disekitarnya, api dapat dengan mudah tersulut.

2.6 Konstruksi dan Material Kabel

2.6.1 Kriteria Umum Kabel

Dalam merancang suatu kabel terdapat beberapa kriteria umum yang harus diperhatikan yaitu:

1. Konduktor yang dipilih harus memiliki ukuran yang optimum sehingga dapat menyalurkan arus beban atau arus hubung singkat dalam waktu tertentu tanpa *overheating* serta memenuhi batas *voltage drop* yang ditentukan.
2. Bahan isolasi yang digunakan pada kabel harus memadai untuk operasi kontinyu pada level tegangan yang telah ditetapkan, dengan tingkat kestabilan termal, keamanan dan reliabilitas yang tinggi.
3. Material yang digunakan harus memiliki stabilitas fisik dan kimia yang baik di seluruh umur operasi kabel pada suatu lingkungan tertentu.
4. Kuat secara mekanik, serta cukup fleksibel untuk bertahan pada saat pabrikan maupun pada saat pemasangan.
5. Perlindungan eksternal harus cukup memadai, baik dari segi mekanik maupun kimia sehingga dapat bertahan pada kondisi lingkungan tertentu.

2.6.2 Konstruksi Dan Material Kabel NYM

Kabel dirancang dengan berbagai macam konstruksi sesuai dengan kebutuhannya. Pada bagian ini akan dibahas konstruksi kabel NYM 2 x 1,5 mm², dengan tegangan pengenal 300/500V [7].

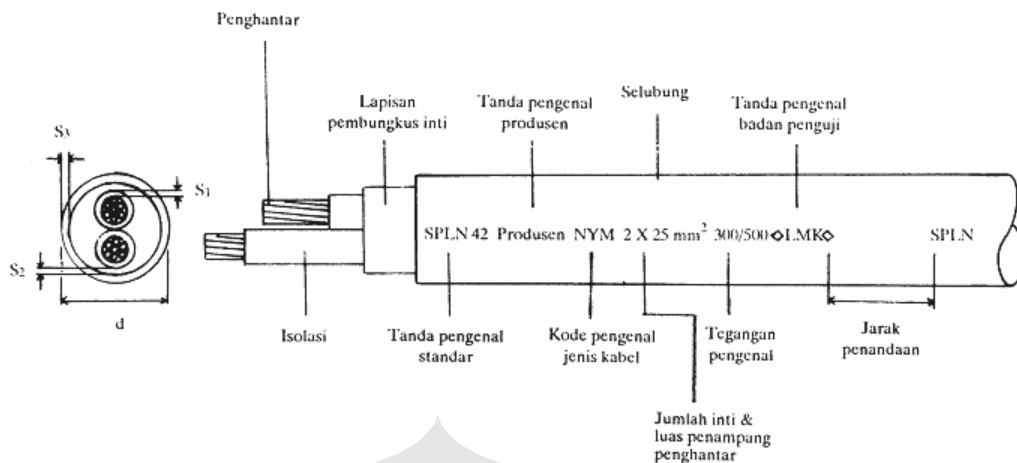
Konstruksi kabel NYM, dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian utama dan bagian pelengkap.

2.6.2.1 Bagian Utama

Bagian utama dari suatu kabel NYM, yaitu :



Gambar 2.2 Kabel instalasi NYM



Gambar 2.3 Konstruksi kabel inti ganda NYM

A. Konduktor.

Merupakan bagian dari kabel yang bertegangan dan berfungsi untuk menyalurkan energi listrik. Umumnya tidak berupa satu hantaran pejal, tetapi kumpulan kawat yang dipilin agar lebih fleksibel. Bahan yang digunakan adalah tembaga atau aluminium. Bentuk penampangnya bisa bulat tanpa rongga, bulat berongga, maupun bentuk sektoral.

B. Bahan isolasi.

Isolasi suatu kabel merupakan bahan yang berfungsi untuk menahan tekanan listrik sehingga energi listrik tidak bocor kemana-mana. Terdapat berbagai jenis bahan isolasi yang umumnya dikelompokkan menjadi bahan isolasi cair, isolasi gas dan isolasi padat.

C. Selubung (*sheath*).

Lapisan ini berfungsi sebagai pelindung inti kabel dari pengaruh luar, pelindung terhadap korosi, pelindung terhadap gaya mekanis dan gaya listrik, maupun sebagai pelindung terhadap masuknya air atau uap air.

Bahan yang digunakan adalah logam, seperti timbal atau aluminium, maupun bahan sintesis seperti karet silikon dan PVC. Untuk kabel NYM selubungnya menggunakan bahan termoplastik PVC.

2.6.2.2 Bagian Pelengkap

Bagian pelengkap adalah bagian yang melengkapi suatu kabel untuk memperkuat, memberikan informasi, memberikan perlindungan mekanis dan memperbaiki sifat-sifat kabel. Bagian tersebut terdiri dari:

Lapisan pembungkus inti

Lapisan ini harus terbuat dari bahan elastis atau plastis yang dapat dibuka tanpa merusak inti-inti kabel, fungsinya adalah mengisi celah-celah dari inti yang dibelit serta menutupi inti-inti secara keseluruhan.

Pemilinan Inti

Inti-inti kabel harus dipilin secara konsentris, dengan langkah pilinan inti kabel tidak boleh lebih besar dari 35 kali diameter luar yang terbentuk dari inti-inti yang dipilin.

Penandaan pada kabel

Huruf kode	Keterangan
N	Kabel jenis standar dengan tembaga sebagai penghantar
Y	Isolasi PVC
M	Selubung PVC
re	Penghantar padat bulat
rm	Penghantar bulat berkawat banyak
- I	Kabel dengan sistem pengenalan warna inti hijau-kuning
- O	Kabel dengan sistem pengenalan warna inti tanpa hijau-kuning

Penandaan kode pengenalan dilengkapi dengan luas penampang penghantar, tegangan pengenalan, standar SPLN, tanda pengenalan produsen, dan tanda pengenalan badan pengujian.