

BAB 2

DASAR TEORI

Polimer merupakan nama teknik untuk plastik, yaitu molekul yang besar atau makro molekul terdiri satuan yang berulang-ulang atau mer[1]. Polimer ini telah mengambil peran teknologi yang penting. Hal ini disebabkan karena sifat ringan, mudah dibentuk (walaupun rencana desain sangat rumit) serta memiliki sifat-sifat yang diinginkan dengan energi dan kerja minimum. Bahan plastik mengalami pengembangan dan penggunaan yang luas. Karena plastik mudah dalam proses pengerjaan, seringkali bahan tersebut digunakan oleh ahli desain tanpa mengindahkan karakteristik dan batasan yang mendalam. Bahan polimer secara garis besar dapat digolongkan ke dalam 2 bagian yaitu :

1. Polimer termoplastik / Resin termoplastik

Berstruktur molekuler linier dan dapat diinjeksikan ke dalam cetakan selagi panas karena polimer termoplastik menjadi lunak pada suhu yang tinggi. Pada proses pembentukan tidak terjadi polimerisasi lagi. PVC termasuk dalam polimer jenis ini yang mempunyai rumus kimiawi sebagai berikut.



Gambar 2.1. Rumus kimiawi bahan PVC

2. Polimer termoset / Resin termoset

Polimer ini tidak menjadi lunak bila dipanaskan dan tetap kaku. Agar dapat mencetak polimer termoset ini, perlu mulai dengan campuran yang terpolimerisasi sebagian dan perubahan bentuk dibawah pengaruh tekanan. Bila didiamkan pada suhu disekitar $200^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$, polimerisasi sempurna dan terbentuklah struktur tiga dimensi yang lebih kaku. Hal ini disebut

endapan *setting thermal*. Sekali terbentuk, produk dapat dikeluarkan dari cetakan tanpa menunggu pendingin lebih lanjut.

Tabel 2.1 Pembagian material polimer secara umum

Resin termoplastik	Resin termoset
- Resin PVC	- Resin Fenol
- Resin Vinil Asetat	- Resin Urea
- Polivinil Format	- Resin Melamin
- Polivinilidewn klorid	- Resin Poliester
- Polietilen	- Resin Epoksi
- Polipropilen	- Resin silikon
- Polistiren	
- Kopolimer stiren	
- Resin Metakrilat	
- Poliamid	
- Polikarbonat	
- Resin Asetal	
- Fluorplastik	

2.1. Karakteristik Bahan Polimer

Karakteristik khas bahan polimer pada umumnya adalah sebagai berikut :

1. Pencetakan yang mudah. Pada temperatur relatif rendah bahan dapat dicetak dengan penyuntikan, penekanan, ekstrusi, dan seterusnya, yang menyebabkan ongkos pembuatan lebih rendah daripada untuk logam dan keramik.
2. Sifat produk yang ringan dan kuat. Berat jenis polimer rendah dibandingkan dengan logam dan keramik, yaitu berkisar antara 1.0 – 1.7 ; yang memungkinkan membuat produk yang ringan dan kuat.
3. Kurang tahan terhadap panas. Hal ini sangat berbeda dengan logam dan keramik. Karena ketahanan panas bahan polimer tidak sekuat logam dan keramik, pada penggunaannya harus cukup diperhatikan.
4. Produk-produk dengan sifat yang cukup berbeda dapat dibuat tergantung pada cara pembuatannya. Dengan mencampur zat pemplastis, pengisi dan

sebagainya sifat-sifat dapat berubah dalam daerah yang luas. Misalnya plastik diperkuat serat gelas (FRP = *Fiberglass Reinforced Plastics*).

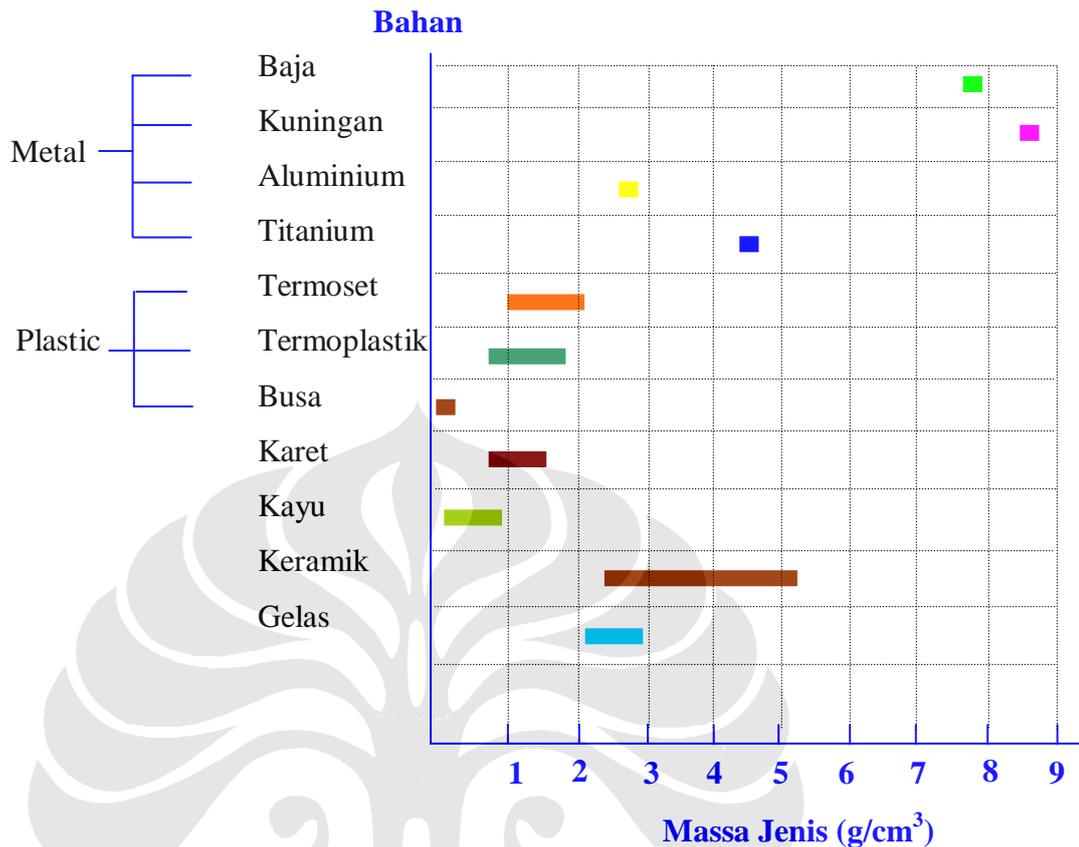
5. Baik sekali dalam ketahanan air dan ketahanan zat kimia. Pemilihan bahan yang baik akan menghasilkan produk yang mempunyai sifat-sifat baik sekali.
6. Banyak diantara polimer bersifat isolasi listrik yang baik. Polimer mungkin juga dibuat konduktor dengan cara mencampurnya dengan serbuk logam, butiran karbon dan lainnya.
7. Umumnya bahan polimer lebih murah
8. Kekerasan permukaan yang sangat kurang. Bahan polimer yang keras ada, tetapi masih jauh dibawah kekerasan logam dan keramik
9. Kurang tahan terhadap pelarut. Umumnya larut dalam zat pelarut tertentu kecuali beberapa bahan khusus. Kalau tidak dapat larut, mudah retak karena kontak yang terus-menerus dengan pelarut dan disertai adanya tegangan.
10. Mudah termuati listrik secara elektrostatik. Kecuali bahan yang khusus dibuat agar menjadi hantaran listrik.
11. Beberapa bahan tahan terhadap abrasi, atau mempunyai koefesien gesek yang kecil.

Dengan melihat beberapa sifat yang disebutkan diatas, maka sangat penting untuk dapat memilih bahan yang paling cocok.

2.1.1 Massa Jenis Bahan Polimer

Dilihat dari segi biaya, massa jenis merupakan faktor yang sangat penting. Bagi bahan bermassa jenis rendah maka dengan volume yang sama diperoleh bahan dengan massa yang ringan dan lebih kuat. Massa jenis polimer jauh lebih rendah daripada logam ataupun keramik. Sifat ringan tersebut adalah salah satu sifat khas dari bahan polimer. Untuk lebih jelasnya diterangkan oleh tabel berikut ini :

Tabel 2.2 Perbandingan massa jenis bahan industri



2.1.2 Karakteristik Mekanik Polimer

Yang termasuk ke dalam karakteristik mekanik suatu bahan antara lain :

- Kekuatan tarik
- Kekuatan tekan
- Kekuatan lentur
- Modulus elastisitas
- Modulus geser
- Kekerasan bahan

Besaran – besaran di atas diketahui dengan tujuan agar sifat material dapat diperkirakan secara akurat dan cermat. Karakteristik mekanik yang penting untuk diketahui dari bahan polimer ini adalah :

1. Banyak bahan biasa mengalami pemelaran atau relaksasi tegangan, terutama bagi bahan polimer yang memiliki gaya antar molekulnya lemah dan dikonfigurasi hanya oleh ikatan van der waals. Namun bagi bahan polimer

yang mempunyai ikatan hidrogen dengan gaya antar molekul yang kuat dan demikian juga bagi resin termoset yang terbentuk dengan ikatan kovalen tiga dimensi, pengaruh pemelaran dan relaksasi tegangan agak kurang.

2. Regangan sisa dari pencetakan terjadi waktu pemanasan, mudah menyebabkan retakan karena tegangan.
3. Terdapat beberapa bahan yang dapat mengatasi tegangan tarik sederhana dan pemelaran, tetapi tidak tahan terhadap kelelahan(fatigue) karena terjadi kombinasi beban antara penekanan dan penarikan.
4. Beberapa bahan polimer cenderung tahan dalam waktu singkat apabila dicelupkan ke dalam minyak, pelarut, dan sebagainya, namun apabila disertai tegangan dapat terjadi retak dan akhirnya putus.
5. Beberapa bahan polimer memiliki ketahanan impak relatif kecil. Akan tetapi, dewasa ini telah dikembangkan plastik yang mempunyai kekuatan impak tinggi seperti polikarbonat, poliasetal, dan sebagainya.

2.1.3 Karakteristik Listrik Polimer

Bahan polimer banyak yang bersifat isolator dan tahan terhadap medan listrik. Oleh karena itu, sering digunakan sebagai isolator listrik.

Karakteristik listrik suatu material dapat ditentukan dengan memperhatikan beberapa besaran listrik yang patut diketahui, seperti :

2.1.3.1 Kekuatan hancur dielektrik/bahan isolasi

Sejauh mana isolator bisa bertahan terhadap tegangan listrik bergantung pada kekuatan hancur dielektrik Tegangan listrik maksimum yang dapat ditahan suatu isolator tanpa merusak sifat isolasinya ini dinyatakan dengan rumus :

$$E = V_{bd} / h \quad (2.1)$$

E = kekuatan hancur dielektrik (KV/mm)

V_{bd} = tegangan tembus dielektrik/material isolasi (KV)

h = ketebalan dielektrik (mm)

$h = d^n$ untuk material polimer

d = ketebalan (mm)

n = konstanta dari keadaan yang diuji, tergantung dari macam benda uji. $n = 0$ untuk tegangan arus searah dan n berkisar 0.3 sampai 0.5 untuk tegangan bolak-balik.

Kekuatan hancur dielektrik polimer ini kebanyakan merupakan kekuatan hancur termal bahan tersebut.

Kekuatan hancur dielektrik berubah banyak dipengaruhi lingkungannya. Kalau tegangan hancur dielektrik suatu media sekeliling isolator besar maka kekuatan hancur dielektriknya menjadi besar. Hal ini terjadi terutama pada arus bolak-balik. Kekutan hancur dielektrik dari bahan polimer pada umumnya berkurang kalau temperatur dinaikkan, demikian halnya terhadap kadar air. Oleh karena itu, tanpa perlakuan yang cukup untuk menghilangkan bahan higroskopik dari berbagai bahan yang dipakai untuk polimer seperti perekat, kekuatan tersebut sangat berkurang karena absorpsi air. Selanjutnya pada tegangan AC untuk waktu yang lama, bahan rusak walaupun tegangan rendah.

2.1.3.2 Tahanan Isolasi

Kalau tegangan DC diberikan pada isolator yang terbuat dari bahan polimer, arus listrik melalui bagian dalam dan permukannya. Perbandingan tegangan DC yang diberikan dan arus listrik total disebut tahanan isolasi, antara tegangan dengan arus listrik (dalam volume) disebut tahanan volume, dan antara tegangan dengan arus permukaan disebut tahanan permukaan.

Jika tegangan DC diberikan pada bahan polimer, arus volume berkurang dengan berjalannya waktu sampai harga tertentu setelah waktu yang lama. Oleh karena itu biasanya dalam standar pengujian bahan dipakai waktu satu menit setelah dimulai. Selama Tegangannya rendah, hukum ohm berlaku untuk arus tersebut, tetapi untuk tegangan yang lebih besar, arus listrik bertambah dan dipercepat, maka hukum tersebut tidak berlaku

2.1.3.3 Konstanta Dielektrik (ϵ) dan faktor kerugian dielektrik ($\tan \delta$)

Kalau kedua dielektrik ditempatkan dalam satu elektroda dan diberi tegangan DC, maka muatan listrik disimpan diantara kutub, hal ini lebih besar terjadi dalam hampa udara. Perbandingan energi tersimpan dalam hampa udara per satuan volume dielektrik per satuan tegangan disebut konstanta dielektrik dalam bahan polimer. Yaitu kalau tegangan arus bolak balik V diberikan pada kondensor hampa udara, arus yang mengalir adalah:

$$I_0 = j\omega C_0 V \quad (2.2)$$

Dimana j adalah suatu kompleks, ω frekuensi sudut arus bolak-balik, C_0 kapasitans elektrostatik dalam kondensor hampa udara, dan

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

Dimana ϵ_0 adalah suatu konstanta dielektrik dalam hampa udara, A adalah suatu luas dari elektroda dan d adalah jarak kutub.

Kalau hampa udara digantikan oleh dielektrik, umpamanya oleh bahan polimer, terjadi arus rugi sefasa dengan tegangan, maka arus total menjadi

$$I = (j\omega c + G)V$$

Dimana c adalah kapasitans statik dari kondensor dielektrik, G komponen arus rugi, dan V hantaran.

Arus total yang mengalir melalui melalui kondensor dielektrik mempunyai sudut fasa $(90-\delta)^\circ$, dimana δ° lebih kecil dari pada dalam hampa udara. Dengan arus rugi kecil, mendekati $\delta=0$, yang dinyatakan dengan:

$$\tan \delta = \frac{\text{komponen arus rugi}}{\text{komponen arus pengisi}} = \frac{G}{\omega c} \quad (2.4)$$

Dimana $\tan \delta$ disebut tangent rugi dielektrik.

Konstanta dielektrik AC adalah $\epsilon' = \frac{c}{C_0}$

Kerugian daya listrik (W) oleh kerugian dielektrik adalah:

$$W = GV^2 = \omega C_0 \epsilon' \tan \delta V^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon' \tan \delta B \cdot E^2 \quad (2.5)$$

di mana B adalah volume dielektrik, E kuat medan listrik AC $\epsilon' \tan \delta = \epsilon''$ adalah medan listrik AC dari satuan kekuatan, yaitu kerugian daya yang di

pakai untuk volume satuan dielektrik dalam satu siklus. Ini dinamakan kerugian dielektrik.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.6)$$

ϵ disebut konstanta dielektrik kompleks.

Dari Persamaan diatas kerugian dielektrik berbanding lurus dengan pangkat dua dari frekuensi dan tegangan, oleh karena itu untuk mengisolasi frekuensi dan tegangan yang tinggi lebih cocok memakai bahan yang mempunyai konstanta dielektrik kecil.

2.1.4 Sifat-sifat termal polimer

Sifat khas bahan polimer sangat berubah oleh perubahan temperatur. Hal ini disebabkan apabila temperatur berubah, pergerakan molekul karena termal akan mengubah struktur (terutama struktur yang berdimensi besar). Selanjutnya, karena panas, oksigen dan air bersama-sama memancing reaksi kimia pada molekul, terjadilah depolimerisasi, oksidasi, hidrolisa dan seterusnya, yang lebih hebat terjadi pada temperatur tinggi. Keadaan tersebut jelas akan mempengaruhi sifat-sifat: mekanik, listrik, dan kimia. Pada bagian ini, dalam daerah terbatas dari sifat-sifat termalnya akan dibahas mengenai: hantaran termal, kapasitas termal dan panas jenis, koefisien pemuaian sebagai akibat dari pergerakan molekul oleh panas dan temperature transisi gelas (T_g) yang berupa indeks penting bahan, Titik cair (T_m), titik lunak dan ketahanan panas.

2.1.4.1 Koefisien Pemuaian Termal

Koefisien Pemuaian Panjang karena panas adalah sederhana apabila bahan bersifat isotropi, tapi apabila struktur bahan berbeda di setiap arah maka diperlukan suatu pertimbangan khusus. Jadi pada setiap pembahasan koefisien panjang perlu diingat bahwa pada film dan serat sering terjadi penyusutan karena panas, karena apabila temperatur naik, cara pengumpulan molekul berubah oleh pergerakan termal dari molekul.

Tabel 2.3. menunjukkan koefisien pemuaian panjang bahan polimer yang berubah karena berbagai keadaan. Polietilen bercabang dengan kristalinitas rendah mempunyai koefisien lebih besar. Pada kopolimer harga tersebut berubah

tergantung pada perbandingan kopolimerisasi dan banyaknya zat pemlastis yang dibubuhkan. Kalau pengisi dengan harga koefisien resin menjadi lebih kecil. Pada nilon berkrystal, kalau kristalinitasnya besar, harga koefisien muainya kira-kira $6 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ kalau kristalinitasnya kecil menjadi kira-kira $10 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ yang lebih besar daripada harga koefisien muai untuk logam dan keramik

Tabel 2.3. Koefisien pemuai panjang bahan polimer

Polimer	Koefisien pemuai panjang/ $^\circ\text{C} \times 10^{1-5}$
Polietilen(masa jenis rendah)	16-18
Polietilen(masa jenis medium)	14-16
Polietilen(masa jenis tinggi)	11-13
Polipropilen	6-10
Polistirene	6-8
ABS(tahan impak)	9-10
ABS(tahan panas)	6-8
Polivinil klorida	5-18
Polivinil klorid(dengan Pemlastis)	7-25
Polikarbonat	7
Poliamid	8
Poliasetal	8

2.1.4.2 Panas jenis

Panas jenis bahan polimer kira-kira 0,25-0,55 cal/g/ $^\circ\text{C}$ yang lebih besar dibandingkan dengan bahan logam, juga lebih besar dibandingkan dengan keramik. Hal ini disebabkan karena panas jenis adalah panas yang diperlukan untuk pergerakan termal dari molekul-molekul dalam strukturnya, sedangkan energi kinetik termal molekul lebih besar dari energi relaksasinya kisi kristal. Tabel 2.4 menunjukkan panas jenis beberapa bahan polimer. Perbedaan pada harga panas jenis tergantung pada perbedaan komposisi.

Tabel 2.4. Panas Jenis bahan Polimer

Polimer	Panas jenis(cal/°C)
Polietylen	0,55
Polipropilen	0,46
Polistiren	0,32
ABS	0,3-0,4
Polivinil klorida	0,2-0,3
Polikarbonat	0,3
Poliamid	0,4
Polimetil metakrilat	0,35
Politetrafluoroetilen	0,25
Poliasetal	0,35

2.1.4.3. Koefisien hantaran termal

Koefisien hantaran termal adalah harga yang penting bagi bahan polimer sehubungan dengan panas pencetakan dan penggunaan produknya. Mekanisme penghantar panas pada bahan polimer juga merupakan akibat propagasi panas dari pergerakan molekul.

Cara terjadinya formasi kristal dengan adanya daerah amorf dan seterusnya. Pada dasarnya berbeda dengan bahan logam dan keramik. Kira-kira $10^{-3} - 10^{-5}$ (cal/detik/cm²/°C/cm).

Data mengenai koefisien hantaran termal bagi bahan polimer lebih sedikit karena pengukurannya yang agak sukar dilakukan. Bahan Polimer sering diproses untuk menghasilkan bahan isolasi panas. Koefisien hantaran termal berubah karena gelembung-gelembung di dalam busa berhubungan atau bebas satu sama lain, macam gas dalam gelembung, ukuran gelembung, fraksi volume, dan seterusnya. Kalau masa jenisnya kecil, yaitu kalau volume gas busa besar, koefisien hantaran termal kecil maka akan memberikan pengaruh isolasi termal lebih besar

2.1.4.4 Titik Tahan Panas

Kalau temperatur bahan polimer naik, pergerakan molekul menjadi aktif ke titik transisi, yang menyebabkan modulus elastik dan kekerasannya rendah,

sedangkan tegangan patahnya lebih kecil dan perpanjangannya lebih besar. Bersamaan dengan itu, sifat listrik, ketahanan volume dan tegangan putus dielektrik menjadi lebih kecil dan pada umumnya konstanta dielektrik menjadi besar. Kalau Temperatur melewati titik transisi, bahan termoplastik seperti karet menjadi lunak, dan selain perubahan pada sifat-sifat diatas modulus elastiknya juga tiba-tiba berubah. Selanjutnya, pada temperatur tinggi bahan kristal, kristalnya meleleh dan dapat mengalir. T_g adalah temperatur yang terutama menyangkut daerah amorf, perubahan sifat-sifat fisik pada T_g besar kalau volume daerah amorf tersebut lebih besar. Di bawah T_g bahan menunjukkan keadaan seperti gelas, yang berubah ke keadaan seperti karet atau kulit diatas temperatur T_g . Panas jenis, koefisien muai, sifat mekanis dan seterusnya biasanya berubah, oleh karena itu perlu mengetahui T_g Terlebih dahulu sebelum pemakaian bahan tersebut. T_g berubah disebabkan perubahan struktur molekul didalam bahan, macam.kadar air, bahan pemlastis

Titik cair(T_m) merupakan faktor penting bagi polimer termoplastik berkrystal, yang ada hubungannya dengan ukuran kristal, kesempurnaan, struktur molekul, gaya antar molekul dan seterusnya. Secara termodinamika dapat dinyatakan:

$$T_m = \frac{\Delta H}{\Delta S} \quad (2.7)$$

dimana ΔS dan ΔH masing-masing entropi dan entalpi pada pencairan. Karena itu bahan polimer yang terdiri dari molekul rantai dengan ΔH besar (gaya antar molekul kuat) dan ΔS kecil(molekul tidak fleksibel), mempunyai titik cair tinggi.

Sangat sukar untuk mengukur ketahanan panas bahan polimer pada temperatur tinggi, sebab banyak sekali faktor yang akan memberikan pengaruh tertentu seperti keadaan lingkungan, bentuk bahan, macam dan jumlah pengisi, adanya bahan penstabil dan seterusnya. Lamanya waktu berada pada pada temperatur tinggi juga merupakan persoalan. Dalam waktu yang singkat pada temperatur tinggi tidak memberikan perubahan banyak, tetapi dalam temperatur rendah dalam waktu yang lama dapat mengakibatkan kerusakan. Jadi persyaratan tertentu perlu dipertimbangkan untuk bahan tertentu, misalnya sampai sejauh mana degradasi termal dapat merusak fungsi tertentu suatu bahan. Untuk

mudahnya, temperatur ketahanan panas yang dipakai untuk waktu lama dinyatakan dalam table 2.5

Tabel 2.5. Tabel ketahanan Panas Polimer

Polimer	Ketahanan panas(°C)
Polietylen(masa jenis rendah)	80-100
Polietylen(masa jenis medium)	105-120
Polistiren	65-75
Polivinil klorida	65-75
Resin fenol	150
Resin melamin	160
Resin Urea	90
Polietylen(masa jenis tinggi)	120
Polipropilen	120
Polikarbonat	120
Poliamid	80
Polisulfon	100

2.2 Kabel dan Penghantar[2]

2.2.1 Jenis Kabel dan Penghantar

Bahan penghantar untuk kabel listrik digunakan tembaga atau aluminium. Tembaga yang digunakan untuk penghantar kabel umumnya adalah tembaga elektrolisis dengan kemurnian minimum 99.9 % dan tahanan jenis tidak melebihi $1/58 = 0,017241 \text{ ohm mm}^2/\text{m}$ pada $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Daya hantar tembaga sangat dipengaruhi ketidakmurnian. Campuran besi 0,02 % akan meningkatkan tahanan jenis tembaga kurang lebih 10 %. Tembaga lunak memiliki kekuatan tarik $195\text{-}245 \text{ N/mm}^2$ dengan daya hantar 100 %. Sedangkan tembaga keras $390\text{-}440 \text{ N/mm}^2$ jadi daya hantarnya 3 %, dibawah tembaga lunak. Aluminium yang dibakukan sekurang-kurangnya mempunyai kemurnian 99,5 % dengan tahanan jenis $0,028264 \text{ ohm mm}^2/\text{m}$ pada suhu 20 derajat (sama dengan daya hantarnya yaitu 61 %). Adapun kekuatan tarik pada daya hantar tersebut

untuk aluminium lunak $60-70 \text{ N/mm}^2$ sedangkan untuk aluminium keras $150-195 \text{ N/mm}^2$.

Penggolongan kabel sebagai sarana untuk menyalurkan energi listrik dalam instalasi digolongkan sebagai berikut :

1. Kabel instalasi tetap.

Kabel ini adalah kabel yang lazim digunakan untuk instalasi perumahan atau perkantoran. Kabel ini mempunyai 2 jenis konstruksi penghantar yaitu inti tunggal dan inti serabut. Stop kontak yang terpasang pada kabel jenis ini tidak bisa dipindahkan apabila diperlukan. Kabel ini mempunyai kode NYM.



Gambar 2.2 Kabel Instalasi Tetap

2. Kabel fleksibel.

Kabel ini merupakan kabel jenis baru. Stop kontak yang terpasang pada kabel ini bisa dipindahkan sepanjang kabel tersebut apabila diperlukan. Jadi pengertian fleksibel disini bukan hanya mudah dibengkokkan.



Gambar 2.3 Kabel Fleksibel

2.2.2 Kabel NYM

Kabel NYM merupakan kabel yang paling banyak digunakan untuk instalasi rumah tinggal. Penggunaan kabel jenis ini dipasang langsung menempel pada dinding, kayu, atau ditanam langsung dalam dinding. Juga diruangan lembab atau basah, ruang kerja atau gudang dengan bahaya kebakaran atau ledakan. Bisa juga dipasang langsung pada bagian-bagian lain bangunan

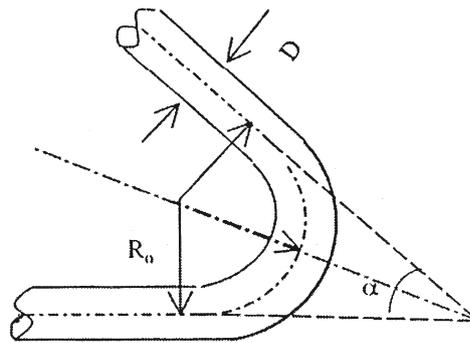
konstruksi, rangka asalkan cara pemasangannya tidak merusak selubung luar kabelnya tetapi tidak boleh dipasang didalam tanah.

Untuk pemasangannya digunakan klem dengan jarak antara yang cukup sehingga terpasang rapi dan lurus. Jika dipasang diruang lembab harus digunakan kotak sambung yang kedap air dan kedap lembab.

Luas penampang hantaran yang harus digunakan ditentukan kemampuan hantaran arus yang diperlukan dan suhu keliling yang harus diperhitungkan. Selain itu rugi tegangannya harus diperhatikan. Rugi tegangan antara perlengkapan hubung bagi utama dan setiap titik beban pada keadaan stasioner dengan beban penuh tidak boleh melebihi 5% dari tegangan di perlengkapan hubung bagi utama. Untuk instalasi rumah tinggal sekurang-kurangnya harus memiliki luas penampang 1.5 mm^2 . Untuk saluran 2 kawat, kawat netral harus memiliki luas penampang sama dengan luas penampang kawat fasanya. Untuk saluran 3 fasa dengan hantaran netral, kemampuan hantaran arusnya harus sesuai dengan arus maksimum yang mungkin timbul dalam keadaan beban tak seimbang yang normal. Luas penampang sekurang-kurangnya harus sama dengan luas penampang kawat fasa. Dalam saluran 3 fasa semua hantaran fasanya harus mempunyai penampang yang sama.

2.3 Karakteristik Medan Magnet dan Temperatur pada Penghantar yang Ditekuk[3][4]

Hasil percobaan dan hasil perhitungan menunjukkan bahwa temperatur di sepanjang penghantar yang ditekuk tidaklah merata. Hal ini disebabkan karena kepadatan arus yang tidak sama di sepanjang penghantar. Pada nilai arus yang sama, temperatur permukaan dari sebuah penghantar yang ditekuk lebih tinggi daripada penghantar yang direntang lurus. Perubahan temperatur berbanding lurus dengan nilai rasio arus I/I_{cr} , sudut tekukan, dan radius penekukan dimana I adalah besar arus yang dialirkan, dan I_{cr} adalah arus maksimal yang bisa diberikan kepada penghantar



Gambar 2.4. Penghantar yang ditekuk

Pada gambar 2.4, R_0 adalah radius penekukan, α adalah sudut penekukan dan D adalah diameter penghantar. Adapun hal yang menyebabkan kenaikan suhu pada penghantar yang ditekuk adalah medan magnet yang dihasilkan oleh arus, hambatan termal yang disebabkan penekukan, efek kulit, serta kepadatan arus yang tidak merata di sepanjang penghantar. Temperatur maksimum dan medan magnet maksimum terjadi pada bagian konduktor yang ditekuk. Sedangkan nilai maksimum dari gaya magnetik pada bagian yang ditekuk bisa sepuluh kali lebih besar dari pada nilai yang terukur pada bagian yang lain.

2.3.1. Distribusi gaya magnetik pada konduktor yang ditekuk[3]

Kepadatan flux magnet yang dihasilkan pada titik $P(x,y)$, dimana $x,y(m)$ adalah koordinat Cartesian dari titik P , digambarkan pada persamaan berikut:

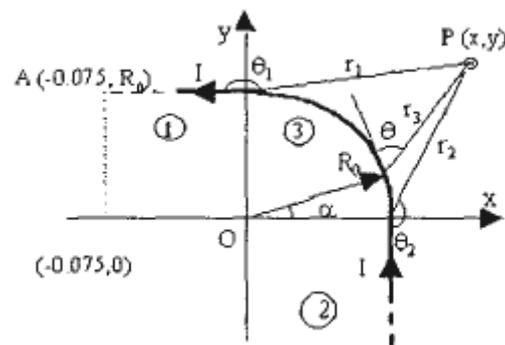
$$B = B_1 + B_2 + B_3 \text{ (T)} \quad (2.8)$$

$$B_{1,2} = \frac{\mu I}{4\pi} \cdot \frac{1}{r_{1,2} \sin \theta_{1,2}} (1 + \cos \theta_{1,2}) \text{ (T)} \quad (2.9)$$

$$B_1 = \int_0^\pi \frac{\mu I R_0 \sin \theta}{4\pi r^2} d\alpha(t) \quad (2.10)$$

$$\vec{F}_m = (I \vec{s}) \times \vec{B} \text{ (N/m)} \quad (2.11)$$

dimana B_1 , B_2 , dan B_3 adalah kepadatan medan magnet pada titik 1, 2 dan 3.



Gambar 2.5 Model yang digunakan untuk perhitungan[3]

Pada persamaan 2.9, $B_{1,2}(T)$, $r_{1,2}(m)$ dan $\theta_{1,2}(\text{radian})$ adalah parameter yang diukur pada titik 1 dan 2. $R_o(m)$ adalah radius penekukan, I adalah nilai dari arus, $\alpha(\text{radian})$ adalah sudut yang dibentuk oleh garis yang ditarik dari titik yang diukur menuju titik $(0,0)$ dan $\theta(\text{radian})$ adalah sudut antara garis yang ditarik dari titik 3 menuju titik P.

Medan magnet per satuan panjang dapat diekspresikan pada persamaan 2.9. Perhatikan gambar 2.5, untuk bagian 1, nilai B pada persamaan 2.11 adalah $B_2 + B_3$, pada bagian 2 adalah $B_1 + B_3$ dan $B_1 + B_2 + B_3$ untuk bagian 3, dimana B_3 adalah kepadatan flux magnetik yang dihasilkan bagian 3.

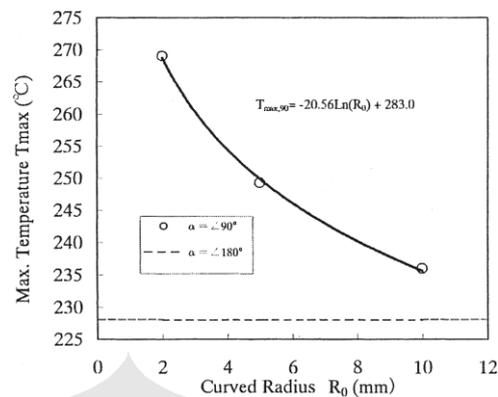
2.3.2 Karakteristik Temperatur dari konduktor yang ditekuk[4]

2.3.2.1 Pengaruh sudut penekukan dan Radius Penekukan Terhadap temperatur Konduktor

Gambar 2.6 menunjukkan pengaruh radius tekukan R_o terhadap temperatur maksimum konduktor. Konduktor yang digunakan adalah konduktor dengan diameter 1 mm. Arus kritis dari konduktor yang lurus adalah $I_{cr}=69$ A. Temperatur maksimum adalah temperatur yang tercapai ketika konduktor dialiri arus dalam waktu yang cukup lama. Ketika penghantar dialiri arus $I=50$ A, sudut penekukan $\alpha=90^\circ$ dan radius penekukan $R_o=2$ mm, T_{max} yang diperoleh lebih tinggi jika dibandingkan dengan konduktor yang lurus. Bertambahnya nilai radius penekukan akan menyebabkan temperatur maksimum T_{max} berkurang. T_{max} dari konduktor yang ditekuk 90° dapat diturunkan dalam bentuk persamaan:

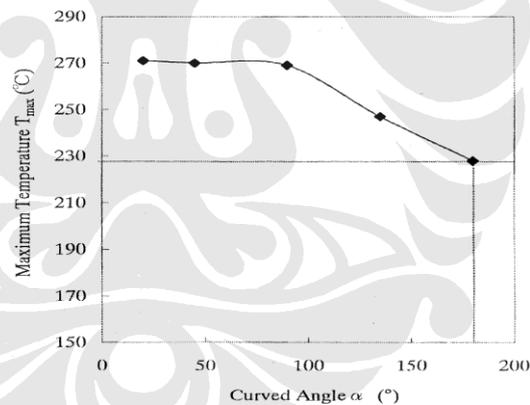
$$T_{\max,90} (^{\circ}\text{C}) = -20.56 \ln R_o + 283 \quad (2.12)$$

Persamaan 2.12 jika digambarkan dalam bentuk grafik adalah seperti pada gambar 2.6:



Gambar 2.6. Pengaruh nilai R_0 terhadap temperatur maksimum[4]

Sedangkan grafik pengaruh sudut penekukan terhadap temperatur maksimum kabel adalah seperti pada gambar 2.7. Kabel yang digunakan disini adalah kabel dengan diameter 1 mm. Gambar 2.7 menunjukkan semakin besar nilai sudut penekukan, semakin besar nilai temperatur maksimum yang dicapai.



Gambar 2.7. Pengaruh sudut penekukan terhadap Temperatur maksimum[4]

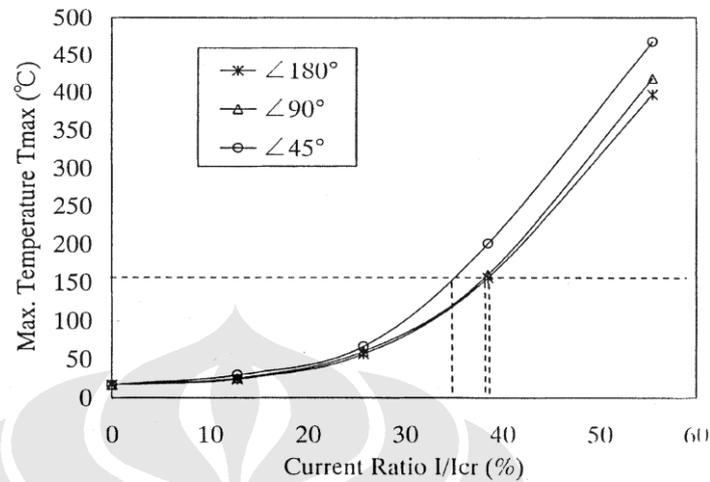
2.3.2.2. Pengaruh Rasio Arus I/I_{cr} terhadap Temperatur Penghantar

Kenaikan temperatur pada penghantar yang lurus dapat digambarkan pada persamaan 2.16 dimana I_{cr} adalah Arus kritis dari penghantar.

$$T_{max,180} \text{ } ^\circ\text{C} = 0.00170 \left(\frac{I}{I_{cr}} \right)^3 + 0.0382 \cdot \left(\frac{I}{I_{cr}} \right)^2 - 0.441 \left(\frac{I}{I_{cr}} \right) + 17.0 \quad (2.13)$$

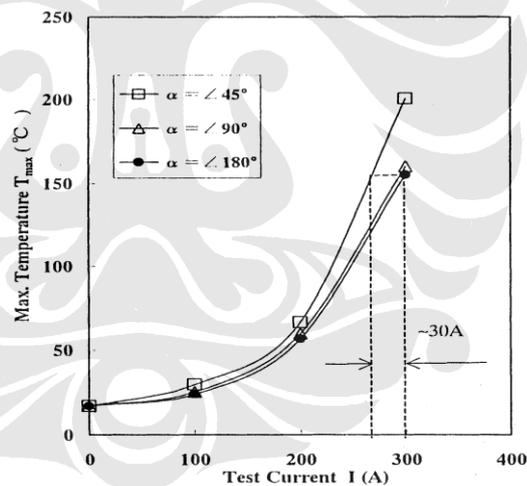
dimana $\left(0 \leq \frac{I}{I_{cr}} (\%) \leq 55,5\right)$. Jika digambarkan dalam bentuk grafik, maka

persamaan 2.16 dapat digambarkan seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Pengaruh rasio arus terhadap temperatur maksimum[4]

Sedangkan Pengaruh arus pengujian terhadap temperatur dapat dilihat pada gambar 2.9.



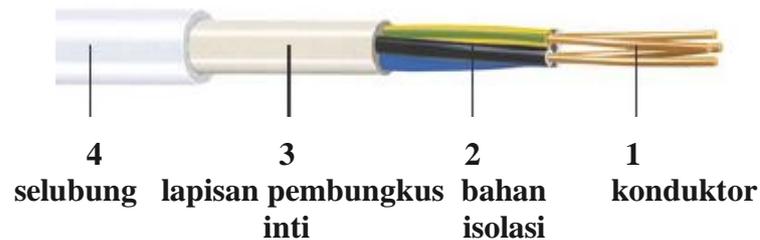
Gambar 2.9. Pengaruh suhu pengujian terhadap temperatur maksimum[4]

Terlihat bahwa untuk arus yang sama, nilai temperatur maksimum yang dicapai penghantar yang ditekuk lebih besar bila dibandingkan dengan penghantar lurus.

2.4 Karakteristik Panas Dari Kabel

Menurut [5] Kabel dirancang dengan berbagai macam konstruksi sesuai dengan kebutuhannya. Pada bagian ini akan dibahas konstruksi kabel khusus

untuk tegangan pengenal 300 /500V berisolasi PVC. Konstruksi dari kabel jenis ini dapat dibagi menjadi 4 bagian:



Gambar 2.10 Konstruksi kabel tegangan menengah

1. 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.

2. 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.

3. Lapisan pembungkus inti

Untuk tegangan kerja yang tinggi, setiap inti kabel dilengkapi dengan suatu lapisan yang disebut lapisan pembungkus inti, yang terbuat dari bahan semi konduktif. Lapisan tersebut berfungsi untuk:

- Meratakan distribusi medan listrik sehingga tidak terjadi penimbunan tegangan.
- Untuk mengamankan manusia dari bahaya listrik.
- Untuk menahan radiasi medan elektromagnetik.

4. Selubung

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.

2.4.1 Sumber Pemanasan pada Kabel [6]

Pemanasan yang terjadi pada kabel berasal dari arus listrik yang menyebabkan *losses* atau rugi-rugi yang terjadi di dalam kabel. Sumber-sumber pemanasan tersebut adalah sebagai berikut:

2.4.1.1 Rugi-Rugi Konduktor

Sumber panas utama yang terjadi pada suatu kabel tenaga adalah rugi-rugi yang terjadi pada konduktor karena adanya resistansi.

$$P_c = I^2 R_{ac} \quad W \quad (2.14)$$

dengan I adalah arus yang mengalir dan R_{ac} adalah resistansi AC.

Nilai resistansi AC berbeda dengan nilai resistansi DC. Nilai resistansi DC dipengaruhi oleh temperatur kerja dan dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$R_T = R_{20} [1 + \alpha_{20} (T - 20^\circ)] \quad (2.15)$$

dengan :

R_{20} : resistansi arus searah pada suhu 20°C [Ohm]

α_{20} : koefisien temperatur dari resistansi pada 20°C [Ohm/ $^\circ\text{C}$]

T : temperatur kerja [$^\circ\text{C}$]

Resistansi AC lebih besar daripada resistansi DC karena dipengaruhi oleh efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan (*proximity effect*). Efek kulit (*skin effect*) adalah gejala ketidakseragaman distribusi kerapatan arus listrik pada suatu penampang penghantar. Pada penghantar berbentuk silinder kerapatan arus semakin meningkat dari sumbu penghantar ke permukaan. Ketidakseragaman tersebut meningkat bila frekuensi arus bolak-baliknya semakin besar. Sedangkan efek kedekatan (*proximity effect*) adalah gejala ketidakseragaman distribusi

kerapatan arus pada penampang suatu penghantar akibat adanya pengaruh dari penghantar lain yang berdekatan.

Akibat kedua efek tersebut, resistansi AC lebih besar daripada resistansi DC, dan hubungannya dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$R_{ac} = R_{dc} (1 + Y_s + Y_p) \quad (2.16)$$

dengan :

R_{ac} : resistansi AC [Ohm]

R_{dc} : resistansi DC [Ohm]

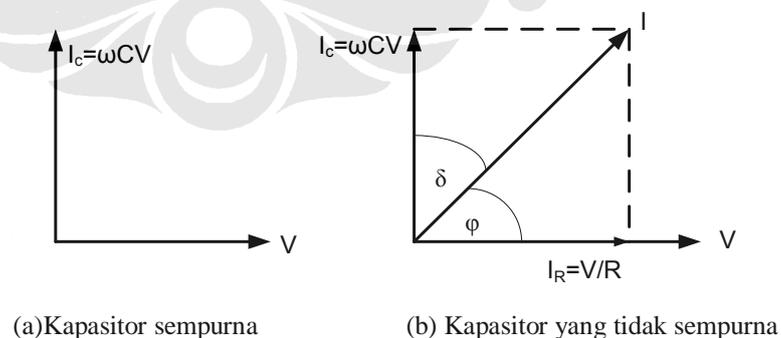
Y_s : faktor koreksi akibat *skin effect*

Y_p : faktor koreksi akibat *proximity effect*

2.4.1.2 Rugi-Rugi Dielektrik (*Dielectric losses*)

Rugi-rugi dielektrik adalah rugi-rugi yang terjadi pada bahan isolasi akibat ketidakidealan bahan isolasi.

Apabila arus bolak-balik melalui suatu kapasitor sempurna, maka arus mendahului tegangan sebesar 90° , seperti terlihat pada Gambar 2.5a, dan arusnya adalah $I_c = \omega CV$. Sedangkan pada kapasitor yang tidak ideal, maka I mendahului V dengan sudut kurang dari 90° karena terjadi kehilangan daya dielektrik. Sudut ϕ adalah sudut fasa kapasitor, dan $\delta = 90^\circ - \phi$, adalah sudut kehilangan (*loss-angle*).



Gambar 2.11 Diagram arus pada kapasitor

Pada kapasitor sempurna kehilangan daya dielektriknya adalah nol, sedangkan pada bahan dielektrik yang tidak ideal, kehilangan daya dielektriknya adalah sebagai berikut:

$$P_D = \omega CV^2 \tan \delta \quad W \quad (2.17)$$

dengan:

$\omega = 2\pi f$, f adalah frekuensi [Hz]

C : kapasitansi [F]

V : tegangan [V]

$\tan \delta$: faktor kehilangan (*loss factor*)

Kapasitansi pada kabel, menurut [7], untuk kabel berinti tunggal atau tiga inti berpelindung dengan konduktor silindris dapat dinyatakan dengan:

$$C = \frac{0,024\varepsilon}{\log \frac{d_{in}}{d_c}} \quad \mu F / phase / km \quad (2.18)$$

dengan:

d_{in} : diameter bahan isolasi kabel

d_c : diameter konduktor

ε : permitivitas bahan dielektrik kabel

2.4.2 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 [W], melalui suatu resistansi termal, R_t [$^{\circ}C/W$], dan perbedaan temperatur, ΔT [$^{\circ}C$], pada daerah yang dilewatinya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta T = R_t \cdot q \quad (2.19)$$

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

$$R_t = r \frac{l}{A} \quad (2.20)$$

dengan:

r : resistivitas termal [$^{\circ}C \cdot m/W$]

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:

$$k = \frac{q}{A \cdot \Delta T / m} [W / m / ^\circ C] \quad (2.21)$$

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

$$K = 1/R_t = q / \Delta T [W / ^\circ C] \quad (2.22)$$

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.

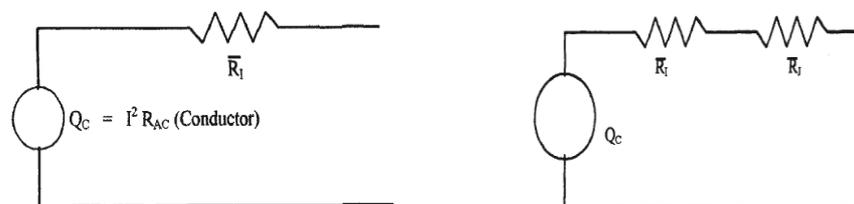
Aliran panas pada penghantar dapat digambarkan dalam bentuk rangkaian termal, semakin banyak komponen yang ada pada kabel, maka rangkaian termalnya akan semakin kompleks. Simbol yang digunakan pada rangkaian termal adalah:

\bar{R} = resistansi termal

Q = Sumber energi panas

\bar{C} = Kapasitansi Termal

Untuk kabel dengan satu lapis bahan isolasi rangkaian termalnya adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3 a. Sumber panas yang ada pada konduktor mengalirkan panas hanya kepada satu resistansi termal. Resistansi ini bisa dalam wujud isolasi dan selubung. Sedangkan gambar 3.3.b merupakan gambar rangkaian termal dari kabel dengan dua bahan isolasi yang berbeda

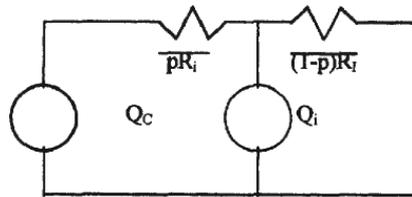


a. kabel dengan satu bahan isolasi

b. kabel dengan dua bahan isolasi

Gambar 2.12 .rangkaiian termal untuk kabel dengan satu sumber kalor

Kedua rangkaian termal diatas adalah rangkain termal untuk kabel dengan satu sumber panas. Untuk kabel dengan lebih dari satu sumber panas, maka gambar rangkaiannya adalah sperti pada gambar dibawah adalah, dimana Q_c adalah sumber kalor dari konduktor, dan Q_i adalah sumber kalor dari Isolasi.



Gambar 2.13 rangkaian termal untuk kabel dengan dua sumber kalor

