



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS DEGRADASI TAHANAN ISOLASI PVC PADA
KABEL DENGAN TEGANGAN PENGENAL 300/500 VOLT**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**BRIAN CAKRA
0405030206**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN ELEKTRO
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Brian Cakra

NPM : 0405030206

Tanda Tangan :



Tanggal : 2 Juli 2009


HALAMAN PENGESAHAN


Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Brian Cakra
NPM : 0405030206
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis Degradasi Tahanan Isolasi PVC pada Kabel dengan Tegangan Pengenal 300/500 Volt

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa MK, MT ()

Penguji : Budi Sudiarto S.T, M.T ()

Ditetapkan di : Kampus UI Depok

Tanggal : 2 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan YME, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
 - (2) Amien Rahardjo, selaku Kepala Laboratorium TTPL yang telah mengizinkan pemakaian peralatan di laboratorium dan memberikan saran-saran yang sangat membangun, serta Pak Budi dan Pak Aji Nurwidyanto yang banyak membantu dan mengajarkan cara memakai peralatan di laboratorium;
 - (3) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan dukungan moral dan material; dan
 - (4) Teman-teman saya di Teknik Elektro yang sulit saya sebutkan satu-persatu.
- Akhir kata, saya berharap Tuhan YME berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juli 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Brian Cakra
NPM : 0405030206
Program Studi : Elektro
Departemen : Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**ANALISIS DEGRADASI TAHANAN ISOLASI PVC PADA KABEL
DENGAN TEGANGAN PENGENAL 300/500 VOLT**


beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 2 Juli 2009

Yang menyatakan


(Brian Cakra)

ABSTRAK

Nama : Brian Cakra
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis Degradasi Tahanan Isolasi PVC dengan Tegangan Pengenal 300/500 Volt

Isolator PVC merupakan isolator yang banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan material lain. Namun isolator jenis ini memiliki beberapa kelemahan, salah satunya adalah ketahanan panas yang rendah jika bekerja pada arus yang tinggi. Panas yang tinggi dapat menyebabkan turunnya tahanan isolasi kabel. Skripsi ini membahas pengujian yang dilakukan dengan memberikan panas pada permukaan kabel ingá diatas titik leburnya. Dengan demikian bisa dilihat penurunan yang terjadi pada tahanan isolasi kabel ketika bekerja pada temperatur yang tinggi. Data yang didapat kemudian akan dianalisis.

Kata Kunci: Tahanan, Isolasi, Kemampuan Hantar Arus, Temperatur, Konduktor.

ABSTRACT

Name : Brian Cakra
Study Program : Electrical Engineering
Title : Insulation Resistance Degradation Analysis on PVC insulated Cable with Rating Voltage 300/500 Volt

PVC insulator is the most used insulator due to its advantage compared to other materials. However, it has some problems. One of them is low thermal endurance when high current is applied on it. High temperature could make degradation to insulation resistance. This final project will discuss an experiment by applying heat on cable surface above its melting point. And then, insulation resistance degradation that happen when the insulator work on very high temperature can be examined. Moreover, data that has been retrieved will be analyzed.

Key word: Resistance, Insulator, Current Conducting Ability, Temperature, Conductor.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	ii
UCAPAN TERIMAKASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
1. PENDAHULUAN	11
1.1. Latar Belakang	11
1.2. Tujuan Penulisan	12
1.3. Batasan Masalah	12
1.4. Metodologi Penulisan	12
1.5. Sistematika Penulisan	12
2. DASAR TEORI	13
2.1. Polimer	13
2.1.1. Karakteristik Bahan Polimer	14
2.1.1.1. Massa Jenis Bahan Polimer	15
2.1.1.2. Karakteristik Mekanik Polimer	16
2.1.1.3. Karakteristik Listrik Polimer	17
2.1.1.4. Sifat-sifat termal polimer	21
2.2. PVC (Polivinil Klorida)	25
2.3. Kabel	27
2.3.1. Jenis Kabel dan Penghantar	27
2.3.2. Kabel NYM	29
2.3.3. Karakteristik Panas Dari Kabel	29
2.3.3.1. Sumber Pemanasan pada Kabel	31
2.3.3.2. Temperatur dan Aliran Panas Pada Kabel	33
3. METODE PENGUJIAN	36
3.2. Deskripsi Sample, Peralatan, dan Rangkaian Pengujian	36
3.2.1. Sampel Pengujian	36
3.2.2. Peralatan Pengujian	39
3.2.3. Rangkaian Pengujian	41
3.3. Pengujian degradasi isolasi kabel NYM 2 x 1.5 mm ²	41
3.3.1. Persiapan awal pengujian	41
3.3.2. Prosedur Pengujian	42
3.4. Pengambilan Data Pengujian	43
4. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS	44
4.1. Data Pengujian	44
4.2. Arus dengan tahanan isolasi	51

5. KESIMPULAN.....	54
DAFTAR ACUAN.....	55



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Pembagian material polimer secara umum	14
Tabel 2.2. Perbandingan massa jenis bahan industri	16
Tabel 2.3. Koefisien pemuaian panjang bahan polimer	22
Tabel 2.4. Panas jenis bahan polimer	23
Tabel 2.5. Tabel ketahanan panas polimer	25
Tabel 4.1. Hasil pengujian degradasi tahanan isolasi	44
Tabel 4.2. Tabel pengukuran temperatur kabel lurus sesuai standar	52



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Rumus Kimiawi PVC	25
Gambar 2.2. Kabel Instalasi Tetap	28
Gambar 2.3. Kabel Fleksibel	28
Gambar 2.4. Konstruksi kabel tegangan menengah	30
Gambar 2.5. Diagram arus pada kapasitor	32
Gambar 2.6. Rangkaian pengganti termal untuk kabel dengan satu sumber kalor	35
Gambar 2.7. Rangkaian pengganti termal untuk kabel dengan dua sumber kalor	35
Gambar 3.1. Konstruksi kabel NYM 2 x 1,5 mm ²	36
Gambar 3.2. Penampang mega ohm meter/megohmmeter	40
Gambar 3.3. Penampang alat-alat pengukur suhu dan kelembaban	40
Gambar 3.4. Rangkaian pengujian degradasi tahanan isolasi	41
Gambar 4.1. Grafik karakteristik degradasi tahanan isolasi	47
Gambar 4.2. Grafik degradasi tahanan isolasi dengan <i>trendline</i> (garis berwarna kuning)	47
Gambar 4.3. Grafik degradasi tahanan isolasi (tanpa nilai terakhir) dengan <i>trendline</i> (garis berwarna kuning)	48
Gambar 4.4. Reaksi kimia pembakaran PVC	50
Gambar 4.5. Kondisi kabel setelah pengujian	51

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA[1] dalam presentasinya sebagai Guru Besar mengatakan bahwa kebakaran dapat terjadi jika ada tiga unsur yaitu bahan yang mudah terbakar, oksigen, dan percikan api. Berdasarkan data yang dikumpulkan oleh Dinas Kebakaran DKI dalam kurun waktu 5 tahun (1992 s/d 1997) telah terjadi kebakaran dimana 50% (2.135 dari 4.244 kasus) lebih disebabkan oleh permasalahan listrik. Penggunaan perlengkapan listrik yang tidak sesuai dengan prosedur yang benar dan standar yang ditetapkan oleh SNI/SPLN, rendahnya kualitas peralatan listrik dan atau kabel yang digunakan, serta instalasi yang asal-asalan dan tidak sesuai peraturan dapat merupakan penyebab dari kasus kebakaran tersebut.

Instalasi listrik yang baik tentunya menggunakan kabel instalasi yang sesuai dengan standar SNI/SPLN seperti kabel NYM dengan isolasi PVC. Insulator PVC karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan instalasi listrik rumah tangga dan memenuhi syarat standar serta beberapa kelebihan dari material lain antara lain yang lebih ringan, sifat mekanik yang lebih baik, sifat rugi dielektrik yang lebih kecil, faktor disipasi yang lebih kecil serta resistivitas volume yang lebih tinggi. Kelebihan lain yang juga penting adalah proses produksinya yang relatif lebih cepat dan biaya produksinya yang lebih murah. Sehingga proses kearah pabrikasi akan lebih mudah jika dibandingkan insulator yang lain.

Dibalik kelebihan yang dimiliki oleh Insulator jenis ini, terdapat beberapa kekurangan. Ketahanan panas yang rendah sehingga mudah rusak/meleleh/hangus jika bekerja pada suhu yang tinggi. Untuk itu pada skripsi ini dilakukan pengujian terhadap insulator PVC dengan memberikan panas diatas kemampuan tahan panas isolasi (di atas titik leburnya) untuk mengetahui karakteristik penurunan dari tahanan isolasinya.

1.2. Tujuan Penulisan

Penulisan skripsi ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik tahanan isolasi nominal dari sebuah inti kabel NYM terhadap perubahan temperatur pada konduktor tersebut. Karakteristik ini dapat dilihat dalam bentuk degradasi tahanan isolasinya bila kabel menerima panas yang berlebih.

1.3. Batasan Masalah

Pada skripsi ini, pengujian degradasi isolasi kabel dibatasi oleh beberapa kondisi yakni kabel yang diuji adalah satu inti dengan isolasi nominalnya dari sebuah kabel NYM 2 core berinti tunggal dengan panjang 30 cm, luas penampang konduktor 1.5 mm^2 jenis NYM 300/500 volt, SNI 04-2699, SPLN 42. Pengujian dilakukan dengan memberikan panas pada permukaan kabel.

1.4. Metodologi Penulisan

Skripsi ini ini dibuat berdasarkan hasil studi literatur dari karya-karya dan tulisan-tulisan ilmiah disamping hasil pengujian yang dilakukan di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia sebagai pembanding atau penguat dari hasil studi literatur.

1.5. Sistematika Penulisan

Skripsi ini terdiri dari lima Bab yang diawali dengan Bab satu yang menjelaskan mengenai latar belakang penulisan skripsi, tujuan penulisan, batasan masalah yang diambil, metodologi pengujian yang dilakukan, dan sistematika penulisan skripsi ini. Kemudian pada Bab dua akan dijelaskan sekilas mengenai Polimer: karakteristik mekanik, karakteristik termal, karakteristik listrik; PVC; kabel; tahanan isolasi. Selanjutnya penjelasan tentang metode-metode yang akan dilakukan dalam pengujian dituliskan pada Bab tiga. Pada bab tersebut dijelaskan tentang peralatan-peralatan dan bahan-bahan yang digunakan dalam pengujian, rangkaian pengujian serta langkah-langkah yang dilakukan selama pengujian. Pada Bab empat akan dibahas tentang hasil pengujian dan analisisnya. Terakhir, Bab lima merupakan penutup/kesimpulan dari semua pembahasan pada skripsi ini.

BAB 2 DASAR TEORI

Pada bagian ini akan dijelaskan sekilas satu persatu mulai dari polimer, PVC, penghantar dan kabel NYM, kemudian tahanan isolasi.

2.1. Polimer

Polimer merupakan molekul yang besar atau makro molekul yang terdiri dari unit-unit terkecil yang berulang-ulang atau *mer*[2] atau *meros* sebagai blok-blok penyusunnya. Molekul-molekul (tunggal) penyusun polimer dikenal dengan nama monomer. Polimer ini telah mengambil peran teknologi yang penting. Hal tersebut 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.

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°C – 300°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	

2.1.1. 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 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*).

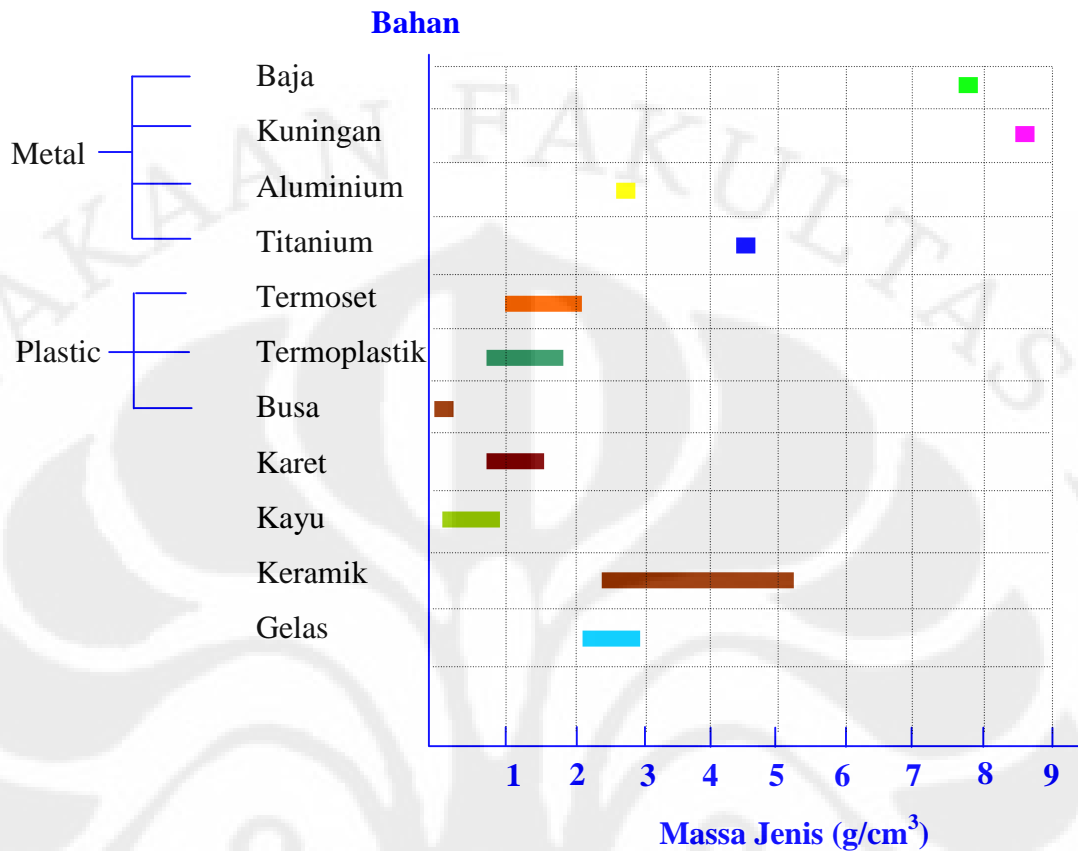
5. Banyak diantara polimer bersifat isolasi listrik yang baik. Polimer mungkin juga dibuat konduktor dengan cara mencampurnya dengan serbuk logam, butiran karbon dan lainnya.
6. Kekerasan permukaan yang sangat kurang. Bahan polimer yang keras ada, tetapi masih jauh dibawah kekerasan logam dan keramik.
7. 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.
8. Mudah termuati listrik secara elektrostatik. Kecuali bahan yang khusus dibuat agar menjadi hantaran listrik.
9. 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 untuk isolasi suatu kabel listrik..

2.1.1.1. 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.

Tabel 2.2. Perbandingan massa jenis bahan industri



2.1.1.2. 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

Parameter-parameter 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. Regangan sisa dari pencetakan terjadi waktu pemanasan, mudah menyebabkan retakan karena tegangan.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

2.1.1.3. Karakteristik Listrik Polimer

Banyak bahan polimer yang baik sebagai isolator panas dan isolator listrik karena tahan terhadap medan listrik. Oleh karena itu, polimer sering digunakan sebagai isolator listrik.

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

1. Kekuatan hancur dielektrik/*dielectric breakdown* 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 = d^n untuk material polimer (mm)

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 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 dapat rusak walaupun tegangan rendah.

2. Tahanan isolasi

Pada pengertian yang sederhana, tahanan isolasi pada kabel adalah rasio dari tegangan yang diberikan pada kabel dibanding total arus yang mengalir diantaranya. Arus tersebut disebut dengan *leakage current*/ arus bocor. Untuk kabel koaksial, tahanan isolasinya adalah tahanan antara kulit isolasi dengan inti konduktor. Biasanya pengukuran tahanan isolasi (*insulation test*) dilakukan pada kabel dengan beberapa konduktor. Pada kasus demikian pengukuran dilakukan dengan mengukur antara konduktor yang satu dengan yang lainnya dan selubung isolasinya.

Tahanan isolasi antara konduktor pada kabel berinti lebih dari satu atau pada kabel beinti satu (antara konduktor dengan kulit isolasi) idealnya memiliki tahanan yang sangat tinggi, biasanya $> 10 \text{ G.ohm}$ [3]. Jika tahanan isolasi dibawah itu maka hasil pengukuran mengindikasikan adanya kerusakan/kecacatan pada kabel, seperti hubung singkat, kerusakan mekanis, kerusakan bahan isolasi, tekanan pada kabel, dan kontaminasi pada kabel. Tingginya tahanan isolasi mengindikasikan baiknya suatu sistem atau peralatan yang diukur dan dapat menghindari gangguan pada sistem/peralatan. Kebocoran arus dan tahanan isolasi dapat dipengaruhi oleh kelembaban ruangan, terutama jika kelembabannya lebih dari 40%. Pada keadaan demikian perlu dilakukan pengukuran berkali-kali dengan nilai kelembaban yang tidak jauh berbeda sebagai perbandingan dan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

Terdapat 3 langkah dasar dalam pengukuran tahanan isolasi, yaitu[4]:

1. Pengukuran dengan waktu singkat

Pada pengukuran ini, waktu operasi tidak boleh terlalu lama, biasanya sekitar 60 detik (yang dianjurkan).

2. Pengukuran dengan waktu lama (tes penyerapan)

Pengukuran dengan metode ini dilakukan selama 2, 5, atau 10 menit untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.

3. Pengukuran dengan tegangan bertingkat

Pengukuran dilakukan dari pengukuran dengan tegangan 250 V, kemudian 500 V, dan 1000 V.

Pengukuran tahanan isolasi kabel secara berkala dimaksudkan untuk menjaga tahanan isolasi kabel tetap tinggi sehingga performa kabel akan tetap baik. Kabel haruslah bersih dan kering, dan terlindung dari gangguan mekanis seperti getaran, abrasi, luka pada isolasi; debu, kotoran, minyak/lemak, oli, dan kontaminan lainnya[5].

Transisi dari kondisi isolasi yang baik sampai hangusnya isolasi merupakan saat turunnya tahanan isolasi, karena pada fase tersebut beberapa nilai-nilai parameter dan karakteristiknya berubah terhadap temperatur, seperti kekuatan hancur dielektrik dan lain-lain. Sebagai contoh, kekuatan hancur dielektrik akan menurun jika temperatur naik. Hal tersebut menyatakan bahwa pada temperatur yang tinggi, akan semakin besar arus yang dapat menembus isolasi, karena itu semakin rendahlah tahanan isolasinya.

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:

$$I_0 \approx j_{\omega} C_0 V \quad (2.2)$$

dimana j adalah suatu kompleks, frekuensi sudut arus bolak-balik, C_0 kapasitansi elektrostatik dalam kondensator 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

$$I = (j\omega C + G)V \quad (2.4)$$

dimana C adalah kapasitansi statik dari kondensator dielektrik, G komponen arus rugi, dan V hantaran.

Arus total yang mengalir melalui kondensator dielektrik mempunyai sudut fasa $(90^\circ - \theta)$, dimana θ lebih kecil daripada dalam hampa udara. Dengan arus rugi kecil, mendekati $\theta = 0$, yang dinyatakan dengan:

$$\tan \theta = \frac{\text{komponen arus rugi}}{\text{komponen arus pengisi}} = \frac{G}{\omega C} \quad (2.5)$$

dimana $\tan \theta$ disebut tangent rugi dielektrik.

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

Kerugian daya listrik (W) oleh kerugian dielektrik adalah:

$$W = G V^2 = \omega C_0 \epsilon' \tan \theta V^2 = \omega C_0 \epsilon' \tan \theta \epsilon'' B \quad (2.6)$$

dimana B adalah volume dielektrik, E kuat medan listrik AC, $\epsilon'' = \epsilon' \tan \theta$ adalah medan listrik AC dari satuan kekuatan, yaitu kerugian daya yang dipakai untuk volume satuan dielektrik dalam satu siklus. Ini dinamakan kerugian dielektrik.

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \theta \quad (2.7)$$

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.

2.1.1.4. Sifat-sifat termal polimer

Sifat khas bahan polimer dapat 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. Sifat-sifat termal dari polimer adalah sebagai berikut.

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 dibutuhkan. 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 pemuaian panjang bahan polimer

Polimer	Koefisien pemuaian panjang/ $^{\circ}\text{C} \times 10^{1-5}$
Polietylen(masa jenis rendah)	16-18
Polietylen(masa jenis medium)	14-16
Polietylen(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. 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
Politetrafluoroetylen	0,25
Poliasetal	0,35

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.

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 di atas 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 di atas 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 seperti kadar air, bahan pemlastis, dan lain-lain.

Titik lebur (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:

$$T_m \propto \frac{\lambda H}{\lambda S} \quad (2.8)$$

dimana S dan H masing-masing entropi dan entalpi pada peleburan. Karena itu bahan polimer yang terdiri dari molekul rantai dengan H besar (gaya antar molekul kuat) dan S kecil (molekul tidak fleksibel), mempunyai titik lebur yang 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 temperatur

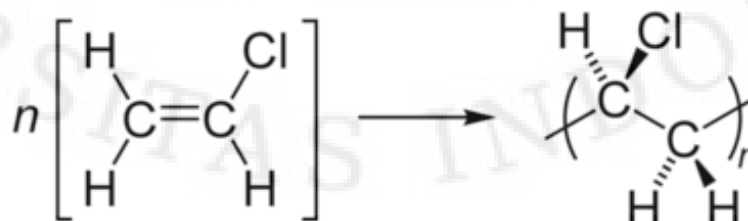
tinggi juga merupakan persoalan. Dalam waktu yang singkat pada temperatur tinggi tidak memberikan perubahan banyak, tetapi dalam temperatur rendah dalam waktu yang lama dapat mengakibatkan kerusakan. Jadi persyaratan tertentu perlu dipertimbangkan untuk bahan tertentu, misalnya sampai sejauh mana degradasi termal dapat merusak fungsi tertentu suatu bahan. Untuk mudahnya, temperatur ketahanan panas yang dipakai untuk waktu lama dinyatakan dalam tabel 2.5

Tabel 2.5. Tabel ketahanan panas polimer

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

2.2. PVC (Polivinil Klorida)

PVC atau Polivinil Klorida termasuk dalam jenis polimer termoplastik/resin termoplastik. PVC memiliki rumus kimiawi sebagai berikut.



Gambar 2.1. Rumus Kimiawi PVC

Sifat dan karakteristik dari PVC, yang sebagian sudah dituliskan pada sub-bab 2.1, adalah sebagai berikut. [6][7][8]

1. Muai panjang = $7-25 / ^\circ\text{C} \times 10^{1-5}$
2. Panas jenis = $0,2-0,3 \text{ cal } / ^\circ\text{C}$
3. Ketahanan panas = $65^\circ\text{C} -75^\circ\text{C}$
4. Berat jenis = 1390 kg/m^3
5. Modulus Young (E) = $2900-3300 \text{ MPa}$
6. Kekuatan Tarik (σ) = $50-80 \text{ MPa}$
7. Pemuluran saat putus = $20-40\%$
8. Temperatur gelas = 82°C
9. Titik lebur = $100^\circ\text{C} -260^\circ\text{C}$
10. Koefisien hantar panas (λ) = $0.16 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
11. Energi pembakaran = 17.95 MJ/kg
12. Penyerapan air (ASTM) = $0.04-0.4$
13. Permittivitas = $3.4-10$ (umumnya 6)
14. Mengandung kira-kira 55% klorin.
15. Memiliki ketahanan kimiawi yang sangat baik (tidak bereaksi) terhadap asam dengan konsentrasi tinggi ataupun konsentrasi rendah.
16. Memiliki ketahanan kimiawi yang cukup baik (bereaksi sedikit) dengan minyak nabati dan oksidan.
17. Memiliki ketahanan kimiawi yang terbatas (bereaksi normal dan hanya bisa untuk waktu yang sebentar) dengan aldehida.
18. Memiliki ketahanan kimiawi yang buruk (tidak disarankan untuk penggunaan) dengan aldehida, ester, aromatik dengan hidrokarbon berhalogen, dan keton.
19. Memiliki kecenderungan untuk kehilangan elastisitas dibawah tekanan terus-menerus.

Untuk penggunaan pada tegangan rendah, PVC banyak digunakan sebagai isolasi dan jaket dari kabel. Karena PVC adalah bahan termoplastik, PVC tidak dapat menahan panas yang terlalu tinggi. Pada suhu tinggi PVC dapat meleleh bahkan hangus atau *plasticizers*nya menguap sehingga PVC menjadi rapuh. Hal

tersebut dapat menyebabkan kegagalan insulasi kabel. Karena alasan tersebut kabel dengan isolasi PVC jarang digunakan di tempat yang mendapatkan panas secara berlebihan. Kabel PVC pada saat terbakar akan menghasilkan gas klorin dalam jumlah yang cukup besar. Hal tersebut merupakan masalah yang cukup penting pada penggunaan kabel dengan isolasi PVC.

PVC pada kabel NYM 2 x 1,5 mm² dengan tegangan pengenal 300/500 V digunakan sebagai isolasi dan selubung kabel. Pada isolasi kabel (bagian yang paling dekat dengan konduktor) mengandung *plasticizers* yang lebih banyak dibandingkan dengan selubung kabel. Hal tersebut menyebabkan isolasi kabel lebih elastis daripada selubungnya. Kandungan *plasticizers* yang lebih banyak juga menyebabkan bahan lebih cepat meleleh dan gas beracun hasil pembakaran lebih banyak.

2.3. Kabel

Salah satu kemungkinan terjadinya kebakaran karena listrik adalah karena kegagalan isolasi kabel listrik. Kegagalan isolasi ini dapat diakibatkan karena sifat-sifat elektris, mekanis, dan termal dari bahan isolasi yang tidak memenuhi persyaratan/standar yang telah ditetapkan. Selain itu kenaikan suhu yang terjadi tidak boleh melampaui batas standarnya, karena semakin tinggi suhunya akan memanaskan daerah sekelilingnya yang mempercepat proses terjadinya penyulutan api[1]. Karena itu diperlukan pengetahuan yang lebih dalam mengenai kabel listrik dan isolasinya. Berikut akan dibahas mengenai kabel untuk instalasi listrik.

2.3.1. Jenis Kabel dan Penghantar

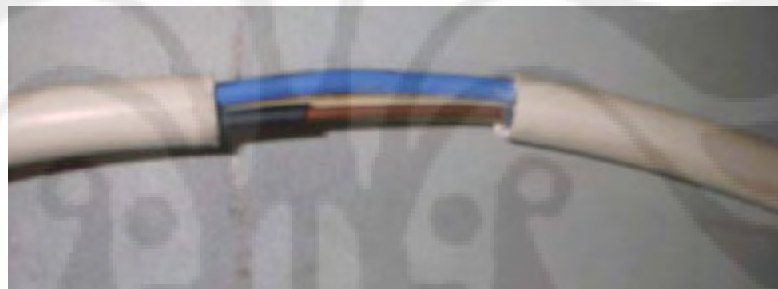
Bahan penghantar untuk kabel listrik digunakan tembaga atau aluminium. Tembaga yang digunakan untuk penghantar kabel umumnya adalah tembaga elektrolisis dengan kemurnian minimum 99.9% dan tahanan jenis tidak melebihi $1/58 = 0,017241 \text{ ohm.mm}^2/\text{m}$ pada 20°C. Daya hantar tembaga sangat dipengaruhi ketidakmurnian. Campuran besi 0,02% akan meningkatkan tahanan jenis tembaga kurang lebih 10%. Tembaga lunak memiliki kekuatan tarik 195-245 N/mm² dengan daya hantar 100%. Sedangkan tembaga keras 390-440

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°C (sama dengan daya hantarnya yaitu 61 % dari tembaga). Adapun kekuatan tarik pada daya hantar tersebut untuk aluminium lunak $60\text{-}70 \text{ N/mm}^2$ sedangkan untuk aluminium keras $150\text{-}195 \text{ N/mm}^2$ [9].

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. Semua alat kontak listrik yang terpasang pada kabel jenis ini tidak bisa dipindahkan apabila diperlukan. Kabel dengan kode NYM termasuk jenis kabel ini.



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

2.3.2. 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.

2.3.3. Karakteristik Panas Dari Kabel

Menurut Colin Bayliss[10], Kabel dirancang dengan berbagai macam konstruksi sesuai dengan kebutuhannya. Pada bagian ini akan dibahas konstruksi kabel khusus untuk tegangan pengenal 300/500V berisolasi dan berselubung PVC. Konstruksi dari kabel jenis ini dapat dibagi menjadi 4 bagian:

4 **3** **2** **1**
selubung **lapisan pembungkus** **bahan** **konduktor**
 inti **isolasi**

Gambar 2.4. 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.

2.3.3.1. Sumber Pemanasan pada Kabel

Pemanasan yang terjadi pada kabel berasal dari arus listrik yang menyebabkan *losses* atau rugi-rugi yang terjadi di dalam kabel[8]. Sumber-sumber pemanasan tersebut adalah sebagai berikut.

1. Rugi-Rugi Konduktor

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

$$P_c = I^2 R_{ac} \quad [W] \quad (2.9)$$

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:

$$R_T = R_{20} [1 + \alpha_{20} (T - 20)] \quad (2.10)$$

dengan :

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

α_{20} : koefisien temperatur dari resistansi pada 20 °C [Ohm/°C]

T : temperatur kerja [°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:

$$R_{ac} = R_{dc} (1 + Y_s + Y_p) \quad (2.11)$$

dengan :

R_{ac} : resistansi AC [Ohm]

R_{dc} : resistansi DC [Ohm]

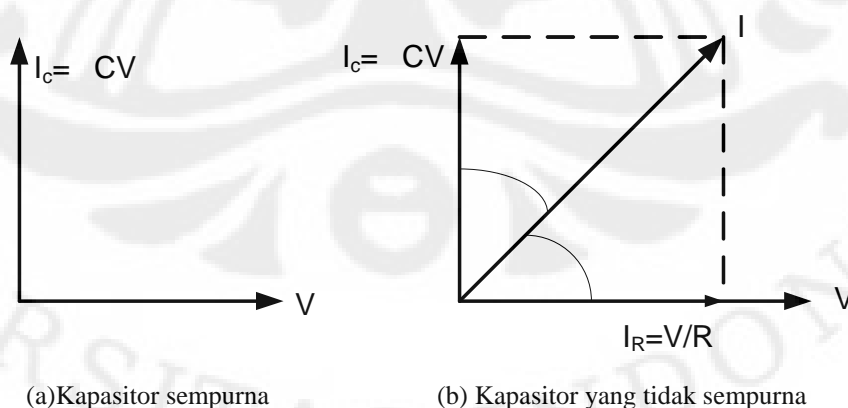
Y_s : faktor koreksi akibat *skin effect*

Y_p : faktor koreksi akibat *proximity effect*

2. 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 3.4a., dan arusnya adalah $I_c = CV$. Sedangkan pada kapasitor yang tidak ideal, maka I mendahului V dengan sudut kurang dari 90° karena terjadi kehilangan daya dielektrik. Sudut adalah sudut fasa kapasitor, dan $= 90^\circ - \theta$, adalah sudut kehilangan (*loss-angle*).



Gambar 2.5. 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:

$$P_d = CV^2 \tan \delta \quad [W] \quad (2.12)$$

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 Colin Bayliss[10], untuk kabel berinti tunggal atau tiga inti berpeling dengan konduktor silindris dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$C = \frac{0,024 \epsilon}{\log \frac{d_{in}}{d_c}} \quad \text{pF / phase / km} \quad (2.13)$$

dengan

d_{in} : diameter bahan isolasi kabel

d_c : diameter konduktor

ϵ : permitivitas bahan dielektrik kabel

2.3.3.2. 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:

$$\Delta T = R_t \cdot q \quad (2.14)$$

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

$$R_t = r \frac{l}{A} \quad (2.15)$$

dengan :

r : resistivitas termal [LCm/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:

$$k \square \frac{q}{A \square \lambda T / m} [W / m / \text{LC}] \quad (2.16)$$

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

$$K \square 1/R_t \square q / \lambda T [W / \text{LC}] \quad (2.17)$$

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.

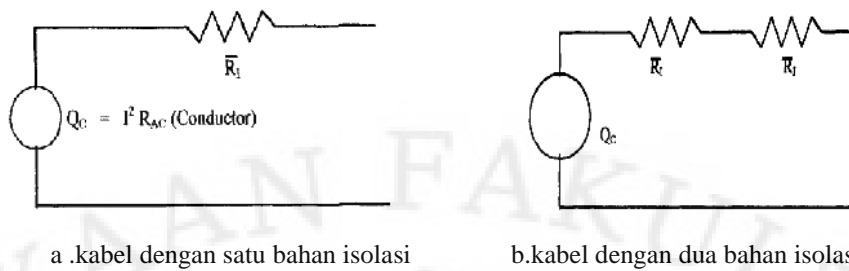
Aliran panas pada penghantar dapat digambarkan dalam bentuk rangkaian termal, semakin banyak komponen yang ada pada kabel, maka rangkaian termalnya akan semakin kompleks. Simbol yang digunakan pada rangkaian termal adalah:

\bar{R} = resistansi termal

Q = Sumber energi panas

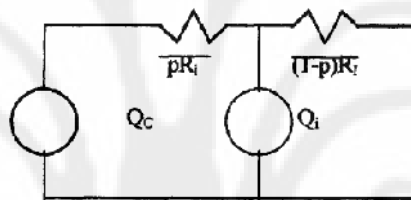
\bar{C} = Kapasitansi Termal

Untuk kabel dengan satu lapis bahan isolasi rangkaian pengganti termalnya adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6a. Sumber panas yang ada pada konduktor mengalirkan panas hanya kepada satu resistansi termal. Resistansi ini bisa dalam wujud isolasi dan selubung. Sedangkan gambar 2.6b. merupakan gambar rangkaian pengganti termal dari kabel dengan dua bahan isolasi yang berbeda.



Gambar 2.6. Rangkaian pengganti termal untuk kabel dengan satu sumber kalor

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



Gambar 2.7. Rangkaian pengganti termal untuk kabel dengan dua sumber kalor

BAB 3

METODE PENGUJIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai metode yang dilakukan dalam pengujian, peralatan dan rangkaian yang digunakan dalam pengujian, serta jalannya pengujian. Pengujian dilakukan di salah satu ruangan dengan ventilasi di lantai 1/dasar Departemen Teknik Elektro FTUI. Peralatan pengujian berasal dari Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik (LTTPL), Departemen Teknik Elektro FTUI.

3.2. Deskripsi Sample, Peralatan, dan Rangkaian Pengujian

3.2.1. Sampel Pengujian

Sampel yang akan digunakan untuk pengujian adalah kabel NYM 2x 1.5 mm² dengan standar SPLN-42. Dibawah ini adalah gambar konstruksi dari kabel NYM.

Gambar 3.1. Konstruksi kabel NYM 2 x 1,5 mm²

Pada kabel yang digunakan tertulis SNI 04-2699 SPLN 42 NYM 2 x 1.5 mm² 300/500 V. Arti dari tulisan tersebut adalah sebagai berikut.

1. SNI 04-2699.[12]
 - a. Nomor lengkap : SNI 04-2699-1999.

- b. Judul SNI : Kabel berisolasi dan berselubung PVC tegangan pengenal 300/500 volt (NYM).
- c. SK Penetapan wajib : 407/M/SK/10/1980.
2. SPLN 42 atau Standar Perusahaan Listrik Negara nomor 42 adalah suatu standar PLN yang menyatakan persyaratan dan detail karakteristik dari sebuah kabel. Nomor lengkap untuk kabel NYM diatas adalah SPLN 42-2:1992.
3. Huruf kode komponen (poin d-g tidak tercantum pada kabel):
- N Kabel jenis standar dengan tembaga scbagai penghantar
 - Y Isolasi PVC
 - M Selubung PVC
 - re Penghantar padat bulat
 - rm Penghantar bulat berkawat banyak
 - I Kabel dengan sistem pengenal warna inti hijau-kuning
 - O Kabel dengan sistem pengenal warna inti tanpa hijau-kuning.
4. $2 \times 1,5 \text{ mm}^2$ berarti kabel tersebut memiliki 2 core/inti dan setiap intinya berdiameter $1,5 \text{ mm}^2$.
5. 300/500 V adalah tegangan pengenal dari kabel tersebut.

Adapun parameter umum dari kabel NYM $2 \times 1,5 \text{ mm}^2$ (re) SPLN 42 adalah sebagai berikut[13]:

Jumlah inti dan luas penampang	= $2 \times 1,5 \text{ mm}^2$
Jumlah kawat dalam satu inti	= 1 buah
Diameter kawat	= 1,38 mm
Isolasi nominal S1	= $0,7 \text{ mm} \pm (0,1 \text{ mm} + 10\%)$
Lapisan Pembungkus inti S2	= 0,4 mm
Selubung Nominal S3	= 1,2 mm
Diameter luar minimum	= 8,4 mm
Diameter luar maksimum	= 10 mm
Kuat Hantar Arus pada 30°C	= 19 A
Kuat Hantar Arus Pada 40°C	= 16 A

Sedangkan detail parameter dan karakteristik dari kabel NYM 2 x 1,5 mm² (re) menurut SPLN 42-2:1992 beserta detail karakteristik dari bahan PVC yang digunakan menurut SPLN 41-1:1991 adalah sebagai berikut.[13]

1. Sebagai penghantar

Menurut SPLN 41-1:1991, kawat tembaga yang digunakan untuk penghantar harus berpermukaan halus, licin, mengkilap, tidak retak, dan tidak teroksidasi. Resistivitas kawat pada suhu 20°C tidak boleh melampaui 17,241 ohm.mm²/km.

2. Sebagai isolasi

PVC yang digunakan sebagai isolasi minimum pada kabel NYM yang diujikan berjenis YJ/C menurut SPLN 42-2:1992. PVC ini memiliki suhu penghantar pengenal maksimum pada kerja normal sebesar 70°C. Sifat dan karakteristik dari PVC jenis ini adalah sebagai berikut.

a. Sifat-sifat mekanis.

- ◆ Jika PVC diperhitungkan tanpa penuaan maka nilai tengah dari kuat tarik minimumnya adalah 12,5 N/mm² dan nilai tengah dari pemuluran minimum adalah 125%.
- ◆ Jika PVC diperhitungkan sesudah penuaan di udara pada suhu (80 ± 2)°C selama 7 x 24 jam, maka pada keping uji dan kabel utuh keduanya memiliki hasil yang sama, yaitu: Memiliki kuat tarik dengan nilai tengah minimum sebesar 12,5 N/mm² dan perubahan (perbedaan antara nilai tengah yang didapat sesudah penuaan dan nilai tengah yang didapat tanpa penuaan sebagai presentase dari yang terakhir) maksimum sebesar ± 20; Pemuluran pada saat putusnya memiliki nilai tengah minimum sebesar 125% dan perubahan maksimum sebesar ± 20.

b. Penyusutan berat maksimum akibat penguapan pada suhu (80 ± 2)°C selama 7 x 24 jam adalah sebesar 2,0 mg/cm².

c. Tekanan pada suhu tinggi pada suhu (80 ± 2)°C selama 4 jam memiliki nilai tengah dari luka maksimum sebesar 50%.

d. Daya tahan retak pada suhu tinggi (150 ± 2)°C adalah selama 1 jam.

- e. Daya tahan retak pada suhu rendah (-15 ± 2)°C pada:
 - ◆ Uji tekuk adalah selama 4 jam
 - ◆ Uji pukul adalah selama 1 jam dengan ketentuan berat pemukul sesuai dengan SPLN 39-3
- f. Memiliki karakteristik hambatan api yang dapat memadamkan sendiri nyala api.
- g. Resistivitas volume untuk kabel dengan tegangan pengenal 3,6/6 kV pada 70°C adalah sebesar 10^{10} ohm.cm.

3. Sebagai lapisan pembungkus inti

Harus terbuat dari kompon yang elastis atau plastis, dan haruslah dibuat sedemikian rupa sehingga mudah dibuka tanpa merusak inti-inti kabel.

4. Sebagai selubung luar

PVC yang digunakan sebagai selubung luar pada kabel NYM yang diujikan berjenis YM/4 menurut SPLN 42-2:1992. PVC ini memiliki suhu penghantar pengenal maksimum pada kerja normal sebesar 70°C. Sifat dan karakteristik dari PVC jenis ini sama dengan poin 2, yaitu PVC untuk penggunaan sebagai isolasi.

Pada pengujian, yang akan digunakan adalah satu inti kabel bersama isolasi nominal S1-nya.

3.2.2. Peralatan Pengujian

Peralatan yang digunakan untuk pengujian kabel NYM 2 x 1,5 mm² adalah sebagai berikut

1. Labu pembakar/pemanas
2. Tripod besi
3. Megohmmeter/Mega Ohm Meter
4. *Thermocouple* APPA 51 dan APPA 55II
5. *Thermo-higrometer*

6. Perekam video
7. Pelat
8. Alat bantu penahan sampel



Gambar 3.2. Penampang mega ohm meter/megohmmeter

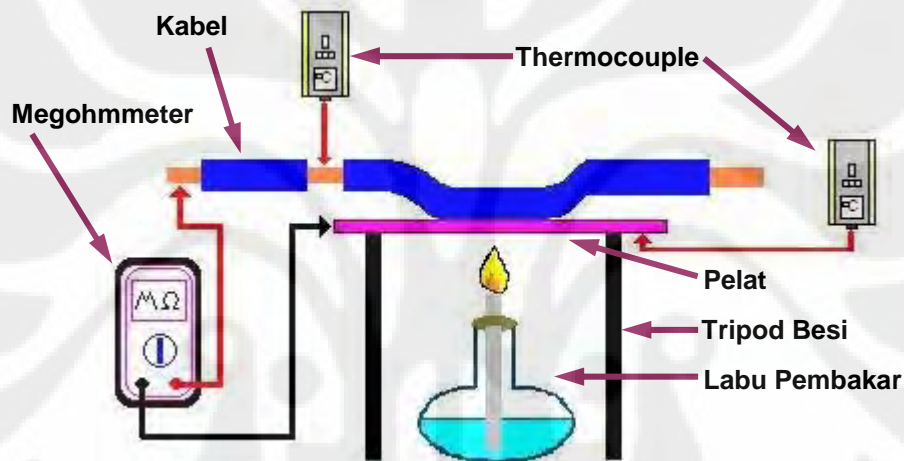


Gambar 3.3. Penampang alat-alat pengukur suhu dan kelembaban

3.2.3. Rangkaian Pengujian

Pada pengujian dapat digunakan inti kabel dengan isolasi nominal S1 berwarna hitam.

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur penurunan nilai/degradasi tahanan isolasi nominal S1 (yang selanjutnya disebut tahanan isolasi) apabila kabel mengalami kenaikan temperatur. Kenaikan temperatur pada kabel disimulasikan dengan cara memberikan panas pada permukaan kabel. Panas tersebut akan menyebabkan isolasi kabel meleleh dan hangus sehingga tahanan isolasinya turun.



Gambar 3.4. Rangkaian pengujian degradasi tahanan isolasi

3.3. Pengujian degradasi isolasi kabel NYM 2 x 1.5 mm²

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai proses pengujian degradasi isolasi kabel yang dibagi menjadi dua tahap, yaitu:

1. Persiapan awal pengujian
2. Proses pengujian

3.3.1. Persiapan awal pengujian

Sebelum melakukan pengujian, maka ada beberapa hal yang harus dikerjakan, antara lain:

1. Mencatat kondisi ruangan (temperatur, kelembaban, tekanan udara).
2. Mencatat temperatur pelat dan temperatur konduktor.
3. Menyiapkan perekam video untuk merekam data pengujian.

3.3.2. Prosedur Pengujian

Apabila setiap langkah pada persiapan telah selesai dilaksanakan, maka kabel telah siap untuk diuji degradasi tahanan isolasinya.

Pengujian dilakukan dengan memberikan panas kepada kabel hingga pada akhirnya isolasi kabel meleleh dan tahanan isolasinya menurun. Langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan semua peralatan.
2. Menyiapkan kabel yang akan diuji, yaitu kabel dengan isolasi warna hitam sepanjang 30 cm.
3. Merangkai rangkaian percobaan seperti pada gambar 3.4.
4. Jarak probe *thermocouple* pada konduktor dan pelat jangan terlalu jauh dari bagian permukaan kabel yang menyentuh pelat. Maksimum 2 cm.
5. Pastikan kabel menempel pada pelat. Pastikan dengan cara menekan pelat sedikit lalu dilihat apakah permukaan kabel mengikuti gerak pelat dan tetap menempel pada pelat, bila demikian berarti kabel sudah tepat posisinya.
6. Mengaktifkan alat-alat pengukur.
7. Posisi Megohmmeter pada 1 KV dengan probe merah pada (+) dan probe biru pada (-).
8. Menyalakan pemanas.
9. Mengaktifkan perekam video yang merekam ketiga alat pengukur. Saat menyalakan api dan menyalakan perekam video sebaiknya pada saat yang sama.
10. Tekan tombol 'test' pada Megohmmeter selama pengujian berlangsung.
11. Saat nilai tahanan isolasi bernilai '0' (nol) berarti pengujian selesai.
12. Lepas tombol 'test' pada Megohmmeter.

13. Matikan pemanas.
14. Non-aktifkan perekam video.
15. Non-aktifkan kedua *thermocouple*.

3.4. Pengambilan Data Pengujian

Perubahan data pada pengujian sangatlah cepat sehingga diperlukan perekam video untuk mengambil data. Data yang sudah terekam diputar ulang dan dicatat nilai-nilainya. Interval pengambilan data adalah 1s.

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1. Data Pengujian

Dari pengujian yang dilakukan di laboratorium, diperoleh data seperti pada tabel 4.1. Kondisi awal pengujian adalah sebagai berikut.

1. Temperatur ruang = 27 °C
2. Kelembaban = 60 %
3. Tekanan Udara = 29,31 inHg
4. Temperatur pelat = 29 °C
5. Temperatur konduktor = 28,9 °C

Perlu diperhatikan:

Waktu = detik ke-n selama pengujian berlangsung.

Tahanan = Tahanan isolasi nominal S1 dari kabel yang diujikan.

Pelat = Temperatur Pelat.

Konduktor = Temperatur inti kabel / konduktor tembaga.

Selisih = Selisih nilai tahanan isolasi antara nilai detik ke-n dengan detik ke-(n-1).

% Selisih = [(Nilai selisih pada baris detik ke-n / Nilai tahanan isolasi pada baris detik ke-(n-1)] * 100%.

Tabel 4.1. Hasil pengujian degradasi tahanan isolasi

Waktu detik (s)	Tahanan (M.Ohm)	Pelat (°C)	Konduktor (°C)	Selisih (M.ohm)	% Selisih (%)
1	20000	29.0	28.9	0	0
2	20000	29.5	28.9	0	0
3	20000	30.2	28.9	0	0
4	20000	31.0	28.9	0	0
5	20000	31.9	29.0	0	0
6	20000	32.7	29.0	0	0
7	20000	34.5	29.1	0	0
8	20000	37.8	29.1	0	0
9	20000	43.4	29.1	0	0
10	20000	48.8	29.3	0	0

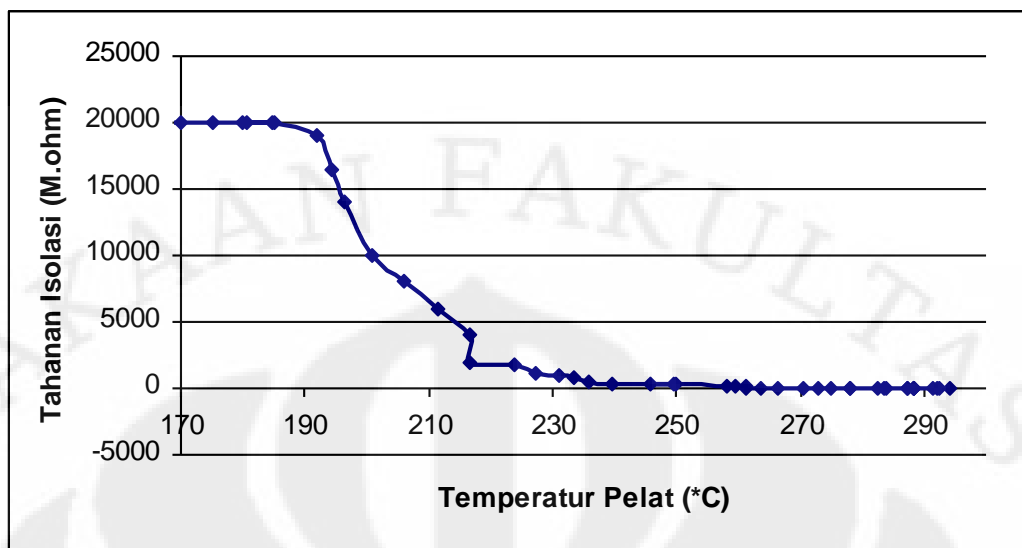
Lanjutan.

Waktu detik (s)	Tahanan (M.Ohm)	Pelat (°C)	Konduktor (°C)	Selisih (M.ohm)	% Selisih (%)
11	20000	55.3	29.3	0	0
12	20000	65.4	29.4	0	0
13	20000	73.9	29.5	0	0
14	20000	85.0	29.6	0	0
15	20000	97.5	29.6	0	0
16	20000	110.6	29.7	0	0
17	20000	120.3	29.9	0	0
18	20000	124.0	30.2	0	0
19	20000	128.2	30.3	0	0
20	20000	131.1	30.6	0	0
21	20000	133.4	31.0	0	0
22	20000	137.7	31.3	0	0
23	20000	140.0	31.6	0	0
24	20000	142.9	32.2	0	0
25	20000	147.5	32.8	0	0
26	20000	152.8	33.4	0	0
27	20000	160.3	33.9	0	0
28	20000	164.1	34.6	0	0
29	20000	168.0	35.1	0	0
30	20000	170.7	35.8	0	0
31	20000	170.7	36.7	0	0
32	20000	175.9	37.7	0	0
33	20000	180.8	38.0	0	0
34	20000	184.9	38.7	0	0
35	19000	191.9	40.1	1000	5.0
36	16500	194.2	40.9	2500	13.2
37	14000	196.4	42.1	2500	15.2
38	10000	200.9	43.0	4000	28.6
39	8000	206.1	43.8	2000	20.0
40	6000	211.4	45.0	2000	25.0
41	4000	216.5	45.9	2000	33.3
42	2000	216.5	47.4	2000	50.0
43	1800	224.0	48.5	200	10.0
44	1200	227.4	49.9	600	33.3
45	950	231.1	50.9	250	20.8
46	750	233.6	52.6	200	21.1
47	500	235.7	53.7	250	33.3
48	400	239.5	55.5	100	20.0
49	330	249.8	56.5	70	17.5
50	300	245.9	57.6	30	9.1
51	250	249.5	59.4	50	16.7
52	200	258.3	60.7	50	20.0
53	130	259.4	63.9	70	35.0
54	100	261.2	65.8	30	23.1
55	80	261.2	66.5	20	20.0

Lanjutan.

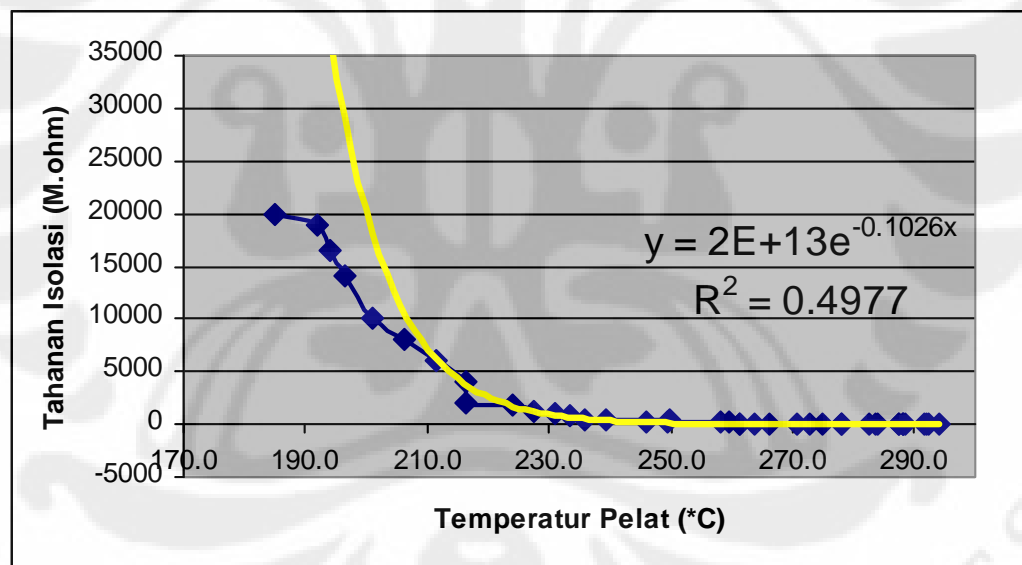
Waktu detik (s)	Tahanan (M.Ohm)	Pelat (°C)	Konduktor (°C)	Selisih (M.ohm)	% Selisih (%)
56	65	263.8	67.9	15	18.8
57	55	266.3	69.2	10	15.4
58	48	270.6	70.7	7	12.7
59	40	272.8	72.9	8	16.7
60	35	275.0	74.4	5	12.5
61	30	278.0	77.4	5	14.3
62	27	278.0	78.8	3	10.0
63	22	282.5	79.6	5	18.5
64	20	283.7	82.0	2	9.1
65	13.5	284.0	85.1	6.5	32.5
66	12	288.3	86.5	1.5	11.1
67	10	288.2	88.0	2	16.7
68	8.5	287.4	89.6	1.5	15.0
69	8	287.4	91.3	0.5	5.9
70	7.7	288.2	92.9	0.3	3.8
71	7.5	288.5	93.7	0.2	2.6
72	7	291.5	97.6	0.5	6.7
73	4	292.0	101.0	3	42.9
74	0.05	292.3	102.4	3.95	98.8
75	0.000000001	294.1	105.0	0.05	100.0

Pada pengujian ini temperatur pelat diasumsikan sebagai temperatur konduktor pada kenyataan, karena pelatlah yang menyentuh langsung isolasi dan dalam prakteknya sumber panas berasal dari arus yang mengalir pada konduktor. Tiga grafik berikut adalah grafik pebandingan antara tahanan isolasi dengan temperatur pelat.



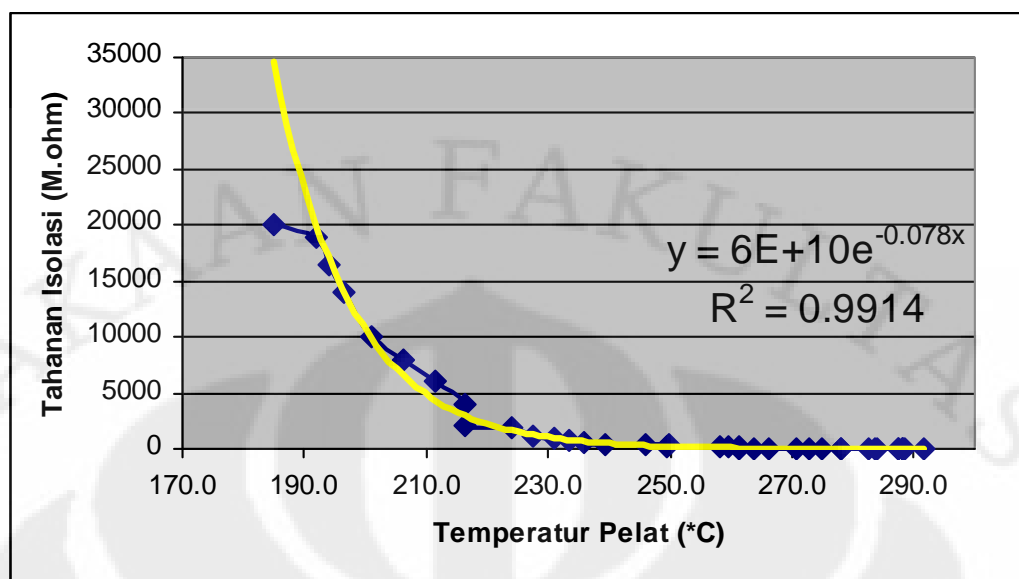
Gambar 4.1. Grafik karakteristik degradasi tahanan isolasi

Jika data diolah dan digunakan *trendline*, maka grafik dan persamaan yang didapatkan adalah:



Gambar 4.2. Grafik degradasi tahanan isolasi dengan *trendline* (garis berwarna kuning)

Jika pada data 3 nilai terakhir diabaikan, maka grafik dan persamaan yang didapatkan adalah:



Gambar 4.3. Grafik degradasi tahanan isolasi (tanpa 3 nilai terakhir) dengan *trendline* (garis berwarna kuning)

Pada data hasil pengujian yang ditunjukkan pada tabel 4.1. dan pada gambar 4.1. terlihat bahwa sejak saat pengujian dimulai (0 detik) sampai detik ke-34, tahanan isolasi tetap diatas atau sama dengan 20.000 M.ohm/20 G.ohm. Pada saat suhu pelat bernilai diatas 184,9°C barulah tahanan isolasinya menurun. Nilai pada data terakhir bernilai 0.000000001 M.ohm atau 1 ohm karena pada faktanya tahanan isolasi tidaklah mungkin bernilai 0 ohm walaupun tampak pada Megohmmeter bernilai 0.

Saat pengujian berlangsung, terlihat pergerakan jarum pada megohmmeter memiliki karakteristik yang unik. Dalam eksperimen yang dilakukan terlihat bahwa pergerakan jarum konstan sejak 20.000 M.ohm sampai daerah 5-10 M.ohm. Setelah itu jarum akan bergerak dengan cepat menuju 0 (pada saat tersebut kondisi isolasi kabel sudah hangus). Hal tersebut ditunjukkan dengan data dari detik ke-72 sampai detik ke-75. Sejak detik ke-35 sampai detik ke-72 penurunan nilai tahanan isolasinya rata-rata 18.22%, namun pada detik ke-73 sampai detik ke-75 persentase penurunan nilai tahanan isolasinya semakin membesar, berturut-turut adalah 42,83%; 98,75%; (hampir) 100%.

Pengujian berhenti dalam waktu 75 detik. Hal tersebut menunjukkan jika panas terus mengalir pada konduktor dan naik secara konstan, maka degradasi

isolasi akan turun terus-menerus. Pada pengujian, saat temperatur pelat bernilai 294,1°C tahanan isolasinya 0 ohm (yang dimaksudkan dengan tahanan isolasi bernilai 0 ohm sesungguhnya tidaklah bernilai 0 ohm mutlak).

Waktu yang dibutuhkan untuk membuat kabel memiliki nilai tahanan isolasi hampir 0 sejak kabel tersebut mulai mengalami penurunan tahanan isolasi adalah 40 detik jika panas terus mengalir dan membesar pada konduktor.

Pada gambar 4.2. data diolah untuk melihat lebih jelas sifat degradasinya. Dengan menggunakan data dari detik ke-34 (karena pada saat itulah nilai 20.000 M.ohm yang terakhir) sampai detik ke-75 (detik terakhir) kemudian digunakan *trendline* eksponensial maka didapatkan persamaan eksponensial dengan $R^2 = 0.4977$. R^2 atau nilai koefisien determinasi adalah sebuah nilai indikator dari 0 sampai 1 yang menunjukkan kedekatan data dengan *trendline* yang ada. *Trendline* dapat sangat diandalkan/sesuai jika nilai dari R^2 -nya bernilai 1 atau mendekati 1.

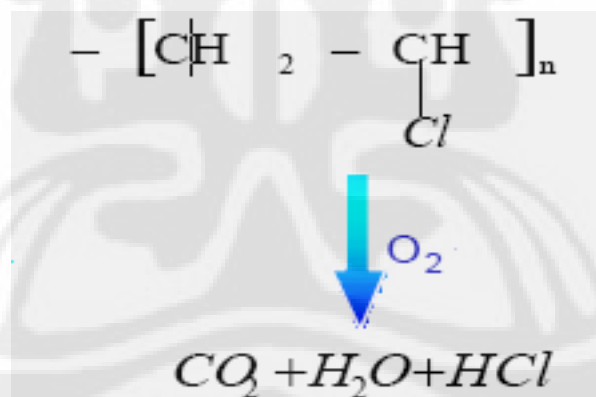
Alasan digunakannya *trendline* dan persamaan eksponensial adalah karena grafik tersebut sifatnya paling mendekati sifat eksponensial, yang pada saat awal nilai penurunan tahanan isolasinya cukup besar dan semakin lama penurunannya semakin kecil. Grafik eksponensial tidak memiliki nilai 0 dan tidak naik kembali setelah turun, itulah persamaannya pada data penurunan tahanan isolasi. Sedangkan perbedaannya adalah jika pada grafik eksponensial, nilainya juga tidak memiliki akhir (tak terhingga), padahal tahanan isolasi tidak mungkin nilainya tak terhingga. Pada data-data mendekati akhir pengujian juga nilainya sangat drastis berbeda dengan nilai sebelumnya. Hal tersebut juga tidak sesuai dengan sifat grafik eksponensial.

Apabila data detik ke-73, ke-74, dan ke-75/terakhir tidak dimasukkan ke dalam grafik (seperti yang tampak pada gambar 4.3.) maka persamaan eksponensial yang dihasilkan memiliki nilai $R^2 = 0,9914$. Nilai tersebut sangat tinggi karena mendekati nilai idealnya yaitu 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa penurunan tahanan isolasi sangat mendekati sifat eksponensial sejak penurunan dimulai (pada detik ke-34 atau nilai 20.000 M.ohm yang terakhir) sampai tepat sebelum jarum pada megohmmeter bergerak turun dengan drastis.

Pada saat pengujian, penurunan tahanan isolasi diikuti dengan rusak/meleleh/hangusnya bahan isolasi dan terdapat asap yang ditimbulkan pada pengujian ini. Kondisi tersebut dapat mengubah struktur PVC, penguapan *plasticizers*, dan atau perubahan sebagian dari isolasi menjadi karbon/karbonasi (karena hangus). Bila terdapat bagian yang menjadi karbon, maka bagian tersebut memiliki tahanan isolasi yang sangat rendah karena karbon bersifat konduktif.

Pada saat temperatur pelat bernilai sekitar 195°C-205°C isolasi kabel mulai meleleh dan nilai tahanan isolasinya antara 8.000-16.500 M.ohm. Kemudian pada temperatur 240°C-250°C isolasi kabel mulai hangus/mulai terjadi karbonasi dan nilai tahanan isolasinya antara 200-400 M.ohm. Dari pengamatan tersebut dapat dilihat bahwa pada saat bahan isolasi mulai meleleh tahanan isolasinya masih cukup tinggi dan saat mulai hangus tahanan isolasinya cukup rendah tetapi belum bernilai 0.

Asap yang ditimbulkan merupakan hasil pembakaran yang tidak sempurna dari material isolasi. Reaksi pembakaran dari material PVC dapat digambarkan pada gambar berikut.



Gambar 4.4. Reaksi kimia pembakaran PVC

Dengan memperhatikan gambar 4.4, asap hasil pembakaran PVC merupakan kombinasi dari gas CO₂ dan HCl. Hal ini diindikasikan oleh timbulnya bau disaat kabel mengeluarkan asap. Disamping itu hasil pembakaran PVC juga menghasilkan air. Cairan yang tertinggal pada tempat pengujian merupakan air hasil pembakaran PVC.



Gambar 4.5. Kondisi kabel setelah pengujian

4.2. Arus dengan tahanan isolasi

Arifianto[11] pada skripsinya yang berjudul Analisis Karakteristik Termal Kabel Berisolasi Berselubung PVC Tegangan Pengenal 300/500V, menghasilkan suatu kesimpulan yang menunjukkan karakteristik termal dari kabel berisolasi dan berselubung PVC jika dialiri arus melebihi kapasitas hantar arusnya (KHA). Kaitannya dengan pengujian ini adalah jika suatu kabel dialirkan arus berlebih pasti akan menimbulkan panas pada kabel. Temperatur yang terus naik akibat arus berlebih yang mengalir pada kabel akan membuat tahanan isolasi mengalami degradasi seperti yang telah diungkapkan sebelumnya.

Arifianto menunjukkan hubungan arus dan temperatur pada konduktor kabel lurus yang sesuai standar adalah sebagai berikut.

Tabel 4.2. Tabel pengukuran temperatur kabel lurus sesuai standar

Arus (A)	Waktu (menit)	Temperatur(°C)	
		Isolasi	Konduktor
0	5	27.9	27.4
1	5	27.6	27.5
2	5	28.9	28.8
3	5	28.2	28.2
4	5	28.2	28.2
5	5	29.5	29.1
10	5	31.1	33.2
15	5	33.8	35.5
19	5	39	44.7
20	5	42	47
25	0.2	35.7	39.9
	0.5	40.6	44.2
	5	49.7	57.3
30	0.2	38.7	42.7
	0.5	48.4	51.3
	5	60.4	66.2
35	0.2	39.4	48.5
	0.5	57.3	63.9
	5	73.2	84
40	0.2	45.1	51.7
	0.5	64.6	73.7
	5	95.5	107
45	0.2	52.2	60
	0.5	77.7	81.3
	5	116.2	126
46	15	120.6	135
47	15	136	150.8
48	15	152	162
50	15	167	180
52	15	184	192
54	15	199	204
55	15	meleleh	223
56	15	meleleh	262

Pada saat temperatur pelat 180,8°C, tahanan isolasi bernilai 20 G.ohm dan data selanjutnya menunjukkan penurunan tahanan isolasi menjadi 19 G.ohm

dengan temperatur pelat 184,9°C. Jika diintegrasikan dengan hasil pengujian Arifianto, saat rentang temperatur tersebut (180,8°C-184,9°C) arus yang mengalir adalah 50 A – 52 A. Berarti pada rentang nilai arus tersebut suatu isolasi nominal kabel akan mulai mengalami degradasi tahanan isolasi pada kabel lurus.

Kabel memiliki KHA 19 A pada suhu ruang 30 °C, maka arus kerja yang sebaiknya mengalir adalah 70% dari KHA-nya, yaitu 13,3 A. Pada tabel 4.2. dapat dilihat temperatur konduktor pada arus 13,3 A adalah sekitar 33,2 °C-35,5 °C. Jadi dalam waktu 69-71 detik kabel akan memiliki nilai tahanan isolasi hampir 0 jika panas terus mengalir dan membesar pada konduktor.

Pada saat isolasi kabel mulai meleleh, temperatur konduktor (pada tabel 4.2.) bernilai 223°C, pada saat itu tahanan isolasi kabel bernilai antara 1.800-2.000 M.ohm (lihat tabel 4.1.). Bagian isolasi yang dikatakan meleleh pada percobaan yang dilakukan oleh Arifianto adalah bukan bagian dalam dari isolasi yang bersentuhan langsung dengan konduktor atau $\pm 0,7$ mm dari konduktor (tebal bahan isolasi). Jika dibandingkan dengan pengamatan sebelumnya, pada sub-bab 4.1., isolasi mulai meleleh pada temperatur pelat 195°C-205°C, berarti untuk mulai melelehkan dan melelehkan bahan isolasi setebal $\pm 0,7$ mm dibutuhkan kenaikan temperatur sebesar 18°C-28°C. Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa pada saat kabel mulai meleleh dan meleleh, namun belum hangus, tahanan isolasinya masih cukup tinggi.

Temperatur pelat, yang dianggap sebagai konduktor, pada 294,1°C merupakan data pengujian terakhir (lihat tabel 4.1.) dimana nilai tahanan isolasinya bernilai 0. Pada saat itu isolasi sudah meleleh bahkan sebagian hangus. Hal tersebut sesuai dengan data dari tabel 4.2. yang menunjukkan isolasi kabel yang sudah meleleh saat temperatur konduktor 223°C dan dialiri arus 55 A. Pada tabel 4.2. data terakhir dari temperatur konduktor adalah 262°C. Berarti pada saat tahanan isolasi bernilai 0, arus yang mengalir pada kabel bernilai > 56 A pada kabel lurus.

BAB 5

KESIMPULAN

1. Dari pengujian yang sudah pernah dilakukan, tahanan isolasi adalah hal yang perlu dicermati pada kabel NYM karena jika kabel diberikan arus melebihi KHA-nya (diatas 19 A pada suhu ruang $\pm 30^{\circ}\text{C}$) maka panas yang timbul pada konduktor akan membesar dan kemudian memiliki tendensi untuk merusak/melelehkan/menghanguskan isolasi kabel.
2. Penurunan tahanan isolasi memiliki sifat mendekati sifat eksponensial (nilai koefisien determinasi atau $R^2 = 0,9914$) sejak penurunan dimulai (pada detik ke-34 atau nilai 20.000 M.ohm yang terakhir) sampai tepat sebelum jarum pada megohmmeter bergerak turun dengan drastis.
3. Pada saat isolasi kabel mulai meleleh dan meleleh (pada temperatur konduktor $\pm 223^{\circ}\text{C}$), namun belum hangus, tahanan isolasinya masih cukup tinggi (antara 1.800-2.000 M.ohm).
4. Waktu yang dibutuhkan untuk membuat kabel memiliki nilai tahanan isolasi hampir 0 ohm sejak kabel tersebut mulai mengalami penurunan tahanan isolasi adalah 40 detik jika panas terus mengalir dan membesar pada konduktor. Apabila arus kerja yang mengalir adalah 13,3 A kemudian panas terus mengalir dan membesar pada konduktor, maka dibutuhkan waktu 69-71 detik untuk membuat kabel memiliki nilai tahanan isolasi hampir 0 ohm.
5. Penurunan tahanan isolasi dipengaruhi langsung oleh temperatur konduktor.

DAFTAR ACUAN

- [1] Setiabudy, Rudy. 2009. Pidato Pengukuhan Guru Besar: “*Permasalahan dan Solusi Terbakarnya Isolasi Kabel Listrik pada Instalasi Rumah Tangga*”.
- [2].Surdia, Tata, & Saito, Shinroku. 1992. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Pradya Paramita.
- [3] Soloman, Sabrie. *Sensors handbook*.
<<http://books.google.co.id/books?id=VvQRkAzT1h4C>>
- [4] Transcat. *Basic Insulation Testing*.
<<http://www.transcat.com/PDF/BasicInsulationTesting.pdf>>
- [5] *Factors Affecting Insulation Resistance*.
<<http://www.tpub.com/content/navyict/14120/141200076.htm>>
- [6] Dyna Laboratory Cooperation. *Technical Info PVC*.
<http://www.dynalabcorp.com/technical_info_pvc.asp.htm>
- [7] Wikipedia. *Polivinyll Chloride*.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride.htm>
- [8] Thue, William A. 1999. *Electrical power cable engineering*. Marcel Dekker, Inc.
- [9] Farizandi, Dananto. 2004. Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI: “*Analisis Karakteristik Penghantar Kabel Fleksibel Dengan Penghantar Kabel Inti Tunggal NYM 2,5 mm² Dan 4mm²*”. Depok.

[10]. Bayliss, Colin. 1996. *Transmission and Distribution Electrical Engineering*. Oxford, Butherworth-Heinemann.

[11] Arifianto. 2008. Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI: “*Analisis Karakteristik Termal Kabel Berisolasi Berselubung PVC Tegangan Pengenal 300/500V*”. Depok.

[12] Badan Standarisasi Nasional. *SNI Kabel Listrik*.
<<http://www.bsn.go.id/files/sni%20kabel%20listrik.pdf>>

[13] Perusahaan Listrik Negara. *Standar Perusahaan Listrik Negara*.
<http://pln-km.com/e-standard/data_spln/>