

BAB II

DASAR TEORI

Dalam sistem tenaga listrik kabel merupakan benda yang sangat penting. Secara umum, kabel memiliki 2 fungsi yaitu :

1. Untuk menyalurkan daya listrik dari satu tempat ke tempat lain
2. Untuk membawa sinyal informasi dari satu tempat ke tempat lain



Gambar 2.1 Kabel sebagai penyalur daya listrik

2.1 Jenis Kabel Instalasi [1]

Kabel instalasi rumah yang sering dipakai adalah jenis kawat tembaga, bukan kabel serabut. Kabel kawat tembaga ini ada beberapa macam, diantara yang umum dipakai adalah tipe kabel NYA, NYM dan NYY. Keterangan masing-masing kabel sebagai berikut:

1. NYA

Karakteristik dari kabel jenis ini adalah berinti tunggal, berlapis bahan isolasi PVC, untuk instalasi luar/kabel udara. Kode warna isolasi ada warna merah, kuning, biru dan hitam. Kabel tipe ini umum dipergunakan di perumahan karena harganya yang relatif murah. Lapisan isolasinya hanya 1 lapis sehingga mudah cacat, tidak tahan air (NYA adalah tipe kabel udara) dan mudah digigit tikus.

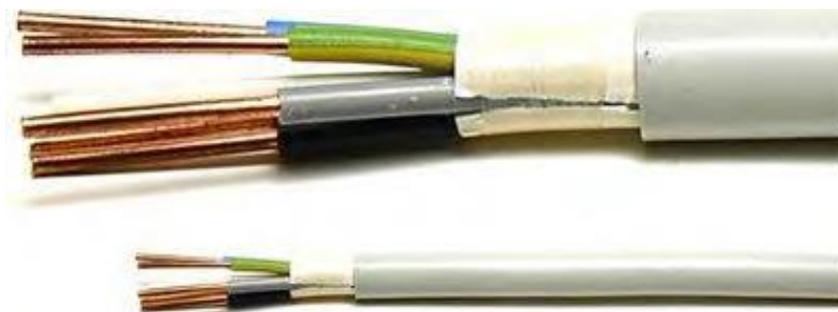


Gambar 2.2 Kabel NYA [1]

Agar aman memakai kabel tipe ini, kabel harus dipasang dalam pipa/conduit jenis PVC atau saluran tertutup. Sehingga tidak mudah terjadi gangguan luar seperti menjadi sasaran gigitan tikus, dan apabila ada isolasi yang terkelupas tidak tersentuh langsung oleh orang

2. NYM

Kabel jenis ini memiliki lapisan isolasi PVC (biasanya warna putih atau abu-abu), ada yang berinti 2, 3 atau 4. Kabel NYM memiliki lapisan isolasi dua lapis, sehingga tingkat keamanannya lebih baik dari kabel NYA (harganya lebih mahal dari NYA). Kabel ini dapat dipergunakan di lingkungan yang kering dan basah, namun tidak boleh ditanam.



Gambar 2.3 Kabel NYM [1]

3. NYY

Karakteristik dari kabel ini yaitu memiliki lapisan isolasi PVC (biasanya warna hitam), ada yang berinti 2, 3 atau 4. Kabel NYY dipergunakan untuk instalasi tertanam (kabel tanah), dan memiliki lapisan isolasi yang lebih kuat dari kabel NYM (harganya lebih mahal dari NYM). Kabel NYY memiliki isolasi yang terbuat dari bahan yang tidak disukai tikus.



Gambar 2.4 Kabel NYY [1]

2.2 KABEL NYM

2.2.1 Arti Kode Pengenal Kabel NYM [2]

Arti kode pengenal kabel NYM menurut SPLN 42-2:1992 adalah sebagai berikut :

N : Kabel jenis standar dengan tembaga sebagai penghantar

Y : Isolasi PVC

M : Selubung PVC

I : Kabel dengan sistem pengenal warna inti hijau-kuning

O : Kabel dengan sistem pengenal warna inti tanpa hijau-kuning

Penandaan kode pengenal dilengkapi dengan luas penampang penghantar dan tegangan pengenal. Sehingga pengertian dari kabel yang digunakan pada Tugas Akhir ini NYM $2 \times 1.5 \text{ mm}^2$ re 300/500 volt menyatakan kabel berisolasi dan berselubung PVC berinti dua dengan tegangan pengenal 300/500 V,

berpenghantar tembaga padat bulat dengan luas penampang 1.5 mm^2 dengan sistem pengenalan warna inti tanpa hijau-kuning.

2.2.2 Konstruksi Kabel NYM



Gambar 2.5 Bagian kabel NYM [3]

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.

2.2.3 Standar Untuk Kabel NYM

Dalam rangka peningkatan produktivitas dan daya guna produksi serta menjamin mutu produk dan/atau jasa, sehingga dapat meningkatkan daya saing produk dan/atau jasa, melindungi konsumen, tenaga kerja, dan masyarakat baik keselamatan maupun kesehatan, dipandang perlu adanya pengaturan mengenai standarisasi. Standarisasi adalah proses merumuskan, merevisi, menetapkan, dan menerapkan standar, dilaksanakan secara tertib dan kerjasama dengan semua pihak.

Standar adalah spesifikasi teknis atau sesuatu yang dibakukan, disusun berdasarkan konsensus semua pihak yang terkait dengan memperhatikan syarat-syarat kesehatan, keselamatan, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta pengalaman, perkembangan masa kini dan masa yang akan datang untuk memperoleh manfaat yang sebesar-besarnya

Menurut PP 15 Tahun 1991 Standar Nasional Indonesia (SNI) adalah standar yang ditetapkan oleh instansi teknis setelah mendapat persetujuan dari Dewan Standardisasi Nasional, dan berlaku secara nasional di Indonesia.

Standar Nasional Indonesia bertujuan :

1. Memberikan perlindungan kepada konsumen, tenaga kerja, dan masyarakat baik dalam keselamatan maupun kesehatan
2. Mewujudkan jaminan mutu dengan memperhatikan sektor-sektor yang terkait

3. Meningkatkan daya guna, hasil guna dan produktivitas dalam mencapai mutu produk dan/atau jasa yang memenuhi standar
4. Mewujudkan tercapainya persaingan yang sehat dalam perdagangan
5. Menunjang kelestarian lingkungan hidup.

Pemerintah mengarahkan agar standar nasional yang disusun berdasarkan kesepakatan antara pihak-pihak yang berkepentingan termasuk instansi Pemerintah, organisasi pengusaha dan organisasi perusahaan, kalangan ahli ilmu pengetahuan dan teknologi, produsen, serta wakil-wakil konsumen dan pemakai produk merupakan perwujudan kesepakatan nasional untuk ditetapkan sebagai Standar Nasional Indonesia. Hal ini diatur oleh PP no 15 tahun 1991 [4].

Standar Nasional Indonesia untuk jenis kabel NYM diatur oleh SNI -04-2699 yang ditunjukkan oleh table di bawah ini:



Tabel 2.1 Standar Nasional 04-2699 tentang kabel NYM

No. of cores	Size	Conductor			Nominal Thickness		Approx Overall Diameter	Approx Net Weight	Resistance at 20°C DC		Current Carrying Capacity	Test Voltage AC
		D	Construction	No. of wire	insulation	Shealth			Max. Conductor	Min. Insulation		
-	mm2	mm	-	-	mm	mm	mm	Kg/100m	Ohm/Km	M Ohm/Km	Ampere	KV
2	1.5	1.4	re(rm)	1(7)	0.76	1.2	8.6	11.8	12.1	50	19	2
2	2.5	1.8	re(rm)	1(7)	0.86	1.2	9.8	16.2	7.28	50	25	2
2	4	2.25	re(rm)	1(7)	0.87	1.2	10.9	21.5	4.56	50	34	2
2	6	2.76	re(rm)	1(7)	0.9	1.3	12.2	28.6	3.03	50	44	2
2	10	3.56	re(rm)	1(7)	1.07	1.6	15	45	1.61	50	61	2
2	16	1.71x7	re(rm)	1(7)	1.14	1.6	17	53	1.15	40	82	2
2	25	2.13x7	re(rm)	1(7)	1.27	1.6	20.7	96	0.73	40	108	2
3	1.5	1.4	re(rm)	1(7)	0.76	1.2	9.2	14.2	12.1	50	19	2
3	2.5	1.8	re(rm)	1(7)	0.86	1.2	10.4	19.5	7.28	50	25	2
3	4	2.25	re(rm)	1(7)	0.87	1.2	11.6	26.7	4.56	50	34	2
3	6	2.76	re(rm)	1(7)	0.9	1.3	13.2	36.5	3.03	50	44	2
3	10	3.56	re(rm)	1(7)	1.07	1.6	16	56	1.61	50	61	2
3	16	1.71x7	re(rm)	1(7)	1.14	1.6	18.5	82	1.15	40	82	2
3	25	2.13x7	re(rm)	1(7)	1.27	1.6	22.3	123	0.73	40	108	2
4	1.5	1.4	re(rm)	1(7)	0.76	1.2	10	17.5	12.1	50	19	2
4	2.5	1.8	re(rm)	1(7)	0.86	1.2	11.3	24	7.28	50	25	2
4	4	2.25	re(rm)	1(7)	0.87	1.2	13.9	37.5	4.56	50	34	2
4	6	2.76	re(rm)	1(7)	0.9	1.3	14.4	45	3.03	50	44	2
4	10	3.56	re(rm)	1(7)	1.07	1.6	17	68	1.61	50	61	2
4	16	1.71x7	re(rm)	1(7)	1.14	1.6	20.5	104	1.15	40	82	2
4	25	2.13x7	re(rm)	1(7)	1.27	1.6	25	160	0.73	40	108	2
5	1.5	1.4	re(rm)	1(7)	0.76	1.2	12.7	19.5	12.1	50	19	2
5	2.5	1.8	re(rm)	1(7)	0.86	1.2	14.1	28	7.28	50	25	2
5	4	2.25	re(rm)	1(7)	0.87	1.2	16.9	42.6	4.56	50	34	2
5	6	2.76	re(rm)	1(7)	0.9	1.3	18.8	58.4	3.03	50	44	2
5	10	3.56	re(rm)	1(7)	1.07	1.6	19.5	87.6	1.61	50	61	2
5	16	1.71x7	re(rm)	1(7)	1.14	1.6	23	130	1.15	40	82	2
5	25	2.13x7	re(rm)	1(7)	1.27	1.6	28	199	0.73	40	108	2

Selain Standar Nasional Indonesia, standar lain yang digunakan di Indonesia adalah SPLN yaitu standar yang digunakan oleh PLN. Standar ini tidak berbeda jauh dengan SNI karena keduanya mengacu pada standar internasional. Kedua standar ini memiliki fungsi yang sama yaitu untuk memberikan perlindungan kepada konsumen, tenaga kerja, dan masyarakat baik dalam keselamatan maupun kesehatan, mewujudkan jaminan mutu dengan memperhatikan sektor-sektor yang terkait, meningkatkan daya guna, hasil guna dan produktivitas dalam mencapai mutu produk dan/atau jasa yang memenuhi standar, mewujudkan tercapainya persaingan yang sehat dalam perdagangan, dan menunjang kelestarian lingkungan hidup.

Standar untuk kabel NYM menurut SPLN [2] dituliskan dalam SPLN 42-2:1992 seperti table dibawah ini :



Tabel 2.5 SPLN 42.-2: 1992 tentang kabel NYM dengan 5 inti

Jumlah inti luas penampang penghantar dan konstruksi penhantar	Pengantar		Tabel			diameter luar (d)		resistansi isolasi setiap inti terhadap inti/gabun gan inti yang lain pada suhu 20°C	resistensi isolasi pada suhu 70°C	kuat hantar arus pada suhu			
	Jumlah kawat	diameter kawat	isolasi nominal	lapisan pembung kus inti	selubung nominal	minimum	maksimum			minimum	maksimum	30°C	40°C
buah	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	M.ohm/km	M.ohm/km	A	A		
5x1.5	re	1	1.38	0.7	0.4	1.2	10	12	50	0.011	19	16	
5x1.5	rm	7	0.52	0.7	0.4	1.2	10	12.5	50	0.01	19	16	
5x2.5	re	1	1.78	0.8	0.4	1.2	11.5	14	50	0.01	25	22	
5x2.5	rm	7	0.67	0.8	0.4	1.2	12	14.5	50	0.009	25	22	
5x4	re	1	2.26	0.8	0.6	1.4	13.5	16	50	0.0085	34	30	
5x4	rm	7	0.85	0.8	0.6	1.4	14	17	50	0.0077	34	30	
5x6	re	1	2.76	0.8	0.6	1.4	15	17.5	50	0.07	44	39	
5x6	rm	7	1.04	0.8	0.6	1.4	15.5	18.5	50	0.0065	44	39	
5x10	re	1	3.57	1	0.6	1.4	18	21	50	0.007	61	53	
5x10	rm	7	1.35	1	0.6	1.4	18.5	22	50	0.0065	61	53	
5x16	rm	7	1.71	1	0.8	1.6	22	26	40	0.0052	82	71	
5x25	rm	7	2.13	1.2	1	1.6	27	31.5	40	0.005	108	94	
5x35	rm	7	2.52	1.2	1.2	1.6	30	35	40	0.0044	134	117	

Sumber : SPLN 42-2:1992 (telah diolah kembali)

Tabel 2.3 SPLN 42.-2: 1992 tentang kabel NYM dengan 3 inti

Jumlah inti luas penampang penghantar dan konstruksi penhantar	Pengantar		Tabel			diameter luar (d)		resistansi isolasi setiap inti terhadap inti/gabun gan inti yang lain pada suhu 20°C	resistensi isolasi pada suhu 70°C	kuat hantar arus pada suhu		
	Jumlah kawat	diameter kawat	isolasi nominal	lapisan pembung kus inti	selubung nominal	minimum	maksimum			minimum	maksimum	30°C
								S1	S2			S3
	buah	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	M.ohm/km	M.ohm/km	A	A
3x1.5	re	1	1.38	0.7	0.4	1.2	8.4	8.8	50	0.011	19	16
3x1.5	rm	7	0.52	0.7	0.4	1.2	8.4	8.8	50	0.01	19	16
3x2.5	re	1	1.78	0.8	0.4	1.2	9.6	10	50	0.01	25	22
3x2.5	rm	7	0.67	0.8	0.4	1.2	9.6	10	50	0.009	25	22
3x4	re	1	2.26	0.8	0.4	1.2	10.5	11	50	0.0085	34	30
3x4	rm	7	0.85	0.8	0.4	1.2	10.5	11	50	0.0077	34	30
3x6	re	1	2.76	0.8	0.4	1.2	11.5	12.5	50	0.07	44	39
3x6	rm	7	1.04	0.8	0.4	1.2	11.5	12.5	50	0.0065	44	39
3x10	re	1	3.57	1	0.6	1.4	14.5	15.5	50	0.007	61	53
3x10	rm	7	1.35	1	0.6	1.4	15	15.5	50	0.0065	61	53
3x16	rm	7	1.71	1	0.6	1.4	16.5	18	40	0.0052	82	71
3x25	rm	7	2.13	1.2	0.8	1.4	20.5	22	40	0.005	108	94
3x35	rm	7	2.52	1.2	1	1.6	23	24.5	40	0.0044	134	117

Sumber : SPLN 42-2:1992 (telah diolah kembali)

Tabel 2.4 SPLN 42.-2: 1992 tentang kabel NYM dengan 4 inti

Jumlah inti luas penampang penghantar dan konstruksi penhantar	Pengantar		Tabel			diameter luar (d)		resistansi isolasi setiap inti terhadap inti/gabun gan inti yang lain pada suhu 20°C	resistensi isolasi pada suhu 70°C	kuat hantar arus pada suhu			
	Jumlah kawat	diameter kawat	isolasi nominal	lapisan pembung kus inti	selubung nominal	minimum	maksimum			minimum	maksimum	30°C	40°C
												buah	mm
4x1.5	re	1	1.38	0.7	0.4	1.2	9.6	11.5	50	0.011	19	16	
4x1.5	rm	7	0.52	0.7	0.4	1.2	9.6	12	50	0.01	19	16	
4x2.5	re	1	1.78	0.8	0.4	1.2	11	13	50	0.01	25	22	
4x2.5	rm	7	0.67	0.8	0.4	1.2	11	13.5	50	0.009	25	22	
4x4	re	1	2.26	0.8	0.4	1.2	12	14.5	50	0.0085	34	30	
4x4	rm	7	0.85	0.8	0.4	1.2	12.5	15	50	0.0077	34	30	
4x6	re	1	2.76	0.8	0.4	1.2	14	16	50	0.07	44	39	
4x6	rm	7	1.04	0.8	0.4	1.2	14	17	50	0.0065	44	39	
4x10	re	1	3.57	1	0.6	1.4	16.5	19	50	0.007	61	53	
4x10	rm	7	1.35	1	0.6	1.4	17	20.5	50	0.0065	61	53	
4x16	rm	7	1.71	1	0.6	1.4	20	23.5	40	0.0052	82	71	
4x25	rm	7	2.13	1.2	0.8	1.4	24.5	28.5	40	0.005	108	94	
4x35	rm	7	2.52	1.2	1	1.6	27	32	40	0.0044	134	117	

Sumber : SPLN 42-2:1992 (telah diolah kembali)

Tabel 2.5 SPLN 42.-2: 1992 tentang kabel NYM dengan 5 inti

Jumlah inti luas penampang penghantar dan konstruksi penhantar	Pengantar		Tabel			diameter luar (d)		resistansi isolasi setiap inti terhadap inti/gabun gan inti yang lain pada suhu 20°C	resistensi isolasi pada suhu 70°C	kuat hantar arus pada suhu			
	Jumlah kawat	diameter kawat	isolasi nominal	lapisan pembung kus inti	selubung nominal	minimum	maksimum			minimum	maksimum	30°C	40°C
buah	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	M.ohm/km	M.ohm/km	A	A		
5x1.5 re	1	1.38	0.7	0.4	1.2	10	12	50	0.011	19	16		
5x1.5 rm	7	0.52	0.7	0.4	1.2	10	12.5	50	0.01	19	16		
5x2.5 re	1	1.78	0.8	0.4	1.2	11.5	14	50	0.01	25	22		
5x2.5 rm	7	0.67	0.8	0.4	1.2	12	14.5	50	0.009	25	22		
5x4 re	1	2.26	0.8	0.6	1.4	13.5	16	50	0.0085	34	30		
5x4 rm	7	0.85	0.8	0.6	1.4	14	17	50	0.0077	34	30		
5x6 re	1	2.76	0.8	0.6	1.4	15	17.5	50	0.07	44	39		
5x6 rm	7	1.04	0.8	0.6	1.4	15.5	18.5	50	0.0065	44	39		
5x10 re	1	3.57	1	0.6	1.4	18	21	50	0.007	61	53		
5x10 rm	7	1.35	1	0.6	1.4	18.5	22	50	0.0065	61	53		
5x16 rm	7	1.71	1	0.8	1.6	22	26	40	0.0052	82	71		
5x25 rm	7	2.13	1.2	1	1.6	27	31.5	40	0.005	108	94		
5x35 rm	7	2.52	1.2	1.2	1.6	30	35	40	0.0044	134	117		

Sumber : SPLN 42-2:1992 (telah diolah kembali)

2.2.4 Penggunaan 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.

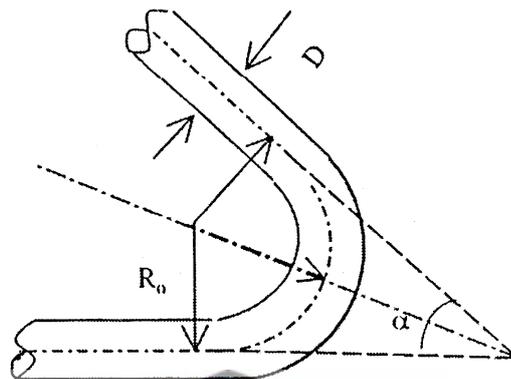
Untuk pemasangannya digunakan klem dengan jarak antara yang cukup sehingga terpasang rapi dan lurus. Jika dipasang diruang lembab harus digunakan kotak sambung yang kedap air dan kedap lembab. Luas penampang hantaran yang harus digunakan ditentukan kemampuan hantaran arus yang diperlukan dan suhu keliling 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

Temperatur yang dihasilkan di sepanjang penghantar yang ditekuk ketika dialiri arus 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 dengan sudut tekuk yang lebih kecil lebih

tinggi daripada penghantar yang ditekuk dengan sudut tekuk yang lebih besar. 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 2.6 Penghantar yang ditekuk [5]

Pada gambar 2.6 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.

2.3.1. Distribusi Gaya Magnetik pada Konduktor yang Ditekuk [6]

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

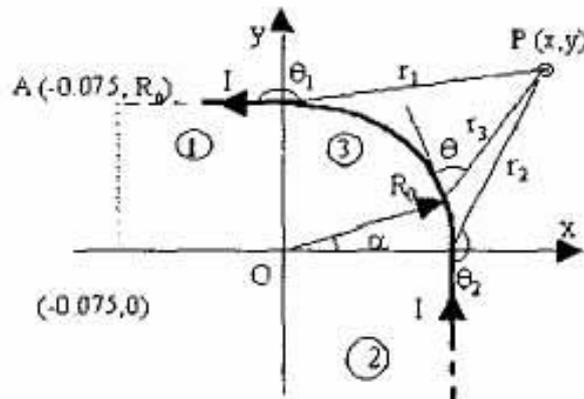
$$B = B_1 + B_2 + B_3 \text{ (T)} \quad (2.1)$$

$$B_{1,2} = \frac{\mu I}{4\pi} \cdot \frac{1}{r_{1,2} \sin \theta_{1,2}} (1 + \cos \theta_{1,2}) \text{ (T)} \quad (2.2)$$

$$B_3 = \int_0^\pi \frac{\mu / R_0 \sin \theta}{4\pi^2} \cdot d\alpha(t) \quad (2.3)$$

$$\Delta \vec{F}_m = (I \cdot \Delta \vec{s}) \times \vec{B} \text{ (N/m)} \quad (2.4)$$

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



Gambar 2.7 Model yang digunakan untuk perhitungan [6]

Pada persamaan 2.2, $B_{1,2}(T)$, $r_{1,2}(m)$ dan $\theta_{1,2}(\text{radian})$ adalah parameter yang diukur pada titik 1 dan 2. $R_0(m)$ 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 2.2. Perhatikan gambar di atas, untuk bagian 1, nilai B pada persamaan 2.11 adalah $B_2 + B_3$, pada bagian 2 adalah $B_1 + B_3$.

2.3.2. Karakteristik Temperatur dari Konduktor yang Ditekuk [5]

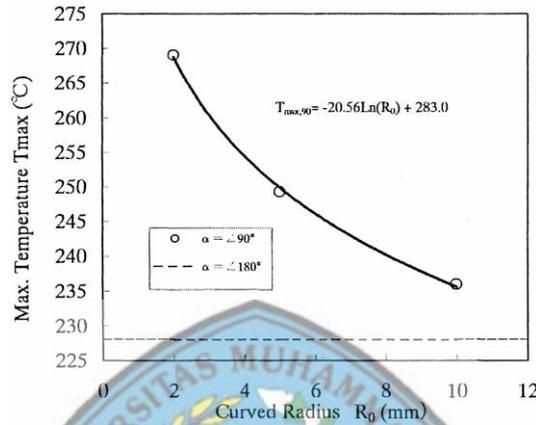
2.3.2.1. Pengaruh Sudut Penekukan dan Radius Penekukan Terhadap Temperatur Konduktor

Pada percobaan yang telah dilakukan dengan menggunakan kabel dengan diameter 1mm didapatkan pengaruh radius tekukan R_0 terhadap temperatur maksimum konduktor, hal ini dapat ditunjukkan oleh gambar 8. 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 $R_0=2$ mm, T_{max} yang diperoleh lebih tinggi jika dibandingkan dengan konduktor yang lurus. Bertambahnya nilai radius penekukan akan menyebabkan temperature

maksimum T_{max} berkurang. T_{max} dari konduktor yang ditekuk 90° dapat dapat diturunkan dalam bentuk persamaan:

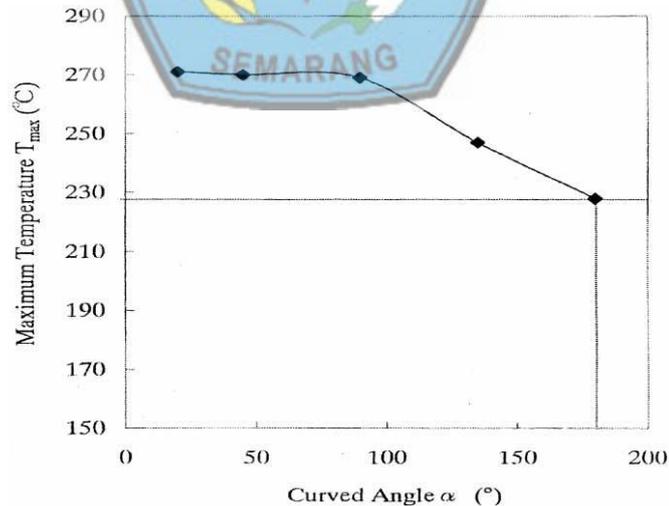
$$T_{\max 90} (^{\circ}\text{C}) = -20.56 \ln R_o \quad (2.5)$$

Persamaan diatas jika digambarkan dalam bentuk grafik adalah seperti pada gambar 2.8 di bawah ini :



Grafik 2.1 Pengaruh nilai R_o terhadap temperatur maksimum [5]

Sedangkan grafik pengaruh sudut penekukan terhadap temperatur maksimum kabel adalah seperti pada gambar 2.9 dibawah ini :



Grafik 2.2 Pengaruh sudut penekukan terhadap temperatur maksimum [5]

Kabel yang digunakan disini adalah kabel dengan diameter 1 mm. Gambar diatas menunjukkan semakin besar nilai sudut penekukan, semakin besar nilai temperatur maksimum yang dicapai.

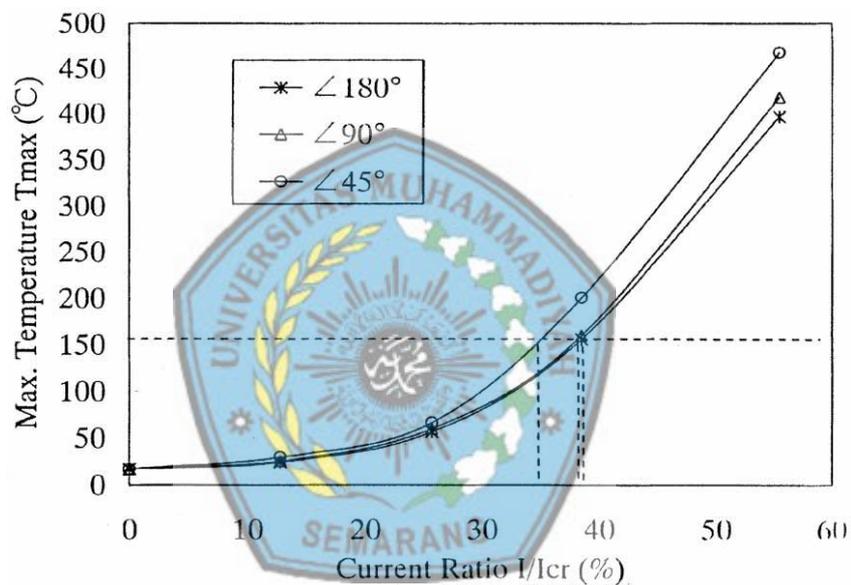
2.3.2.2. Pengaruh Rasio Arus I/I_{cr} Terhadap Temperatur Konduktor

Kenaikan temperatur pada penghantar yang lurus dapat digambarkan pada persamaan 2.6 dimana I_{cr} adalah Arus kritis dari penghantar.

$$T_{\max,180} \text{ } ^\circ\text{C} = 0.00170 \left(\frac{I}{I_{cr}} \right)^3 + 0.0382 \left(\frac{I}{I_{cr}} \right)^2 - 0.441 \left(\frac{I}{I_{cr}} \right) + 17.0 \quad (2.6)$$

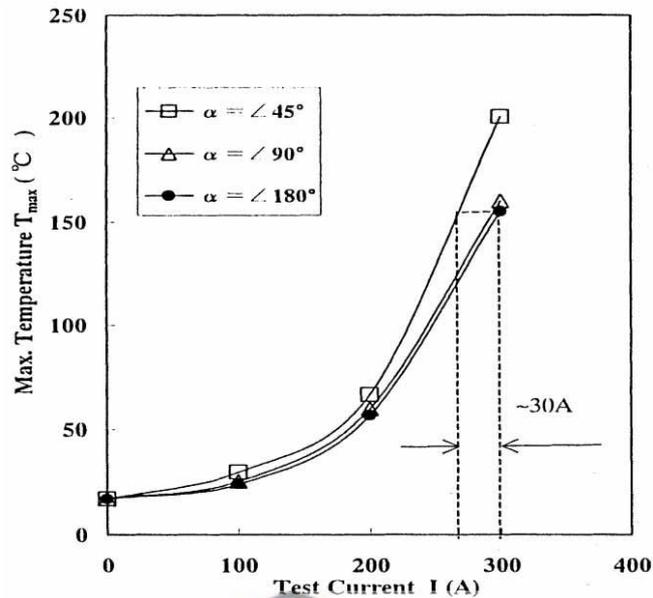
dimana $\left(0 \leq \frac{I}{I_{cr}} (\%) \leq 55,5 \right)$. Jika digambarkan dalam bentuk grafik, maka

persamaan 2.6 dapat ditunjukkan seperti pada gambar 2.10 di bawah ini :



Grafik 2.3 Pengaruh rasio arus terhadap temperatur maksimum [5]

Sedangkan Pengaruh arus pengujian terhadap temperatur dapat dilihat pada gambar 2.11 di bawah ini :



Gambar 2.4 Pengaruh suhu pengujian terhadap temperatur maksimum [5]

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

2.4. Sumber Pemanasan pada Kabel [7]

Pemanasan yang terjadi pada kabel berasal dari arus listrik yang terjadi menyebabkan *losses* atau rugi-rugi di dalam kabel. Sumber-sumber yang 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.

$$P_c = I^2 R_{ac} W \quad (2.7)$$

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:

$$R_r = R_{20} [1 + \alpha_{20} (T - 20)] \quad (2.8)$$

dengan :

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

A_{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.

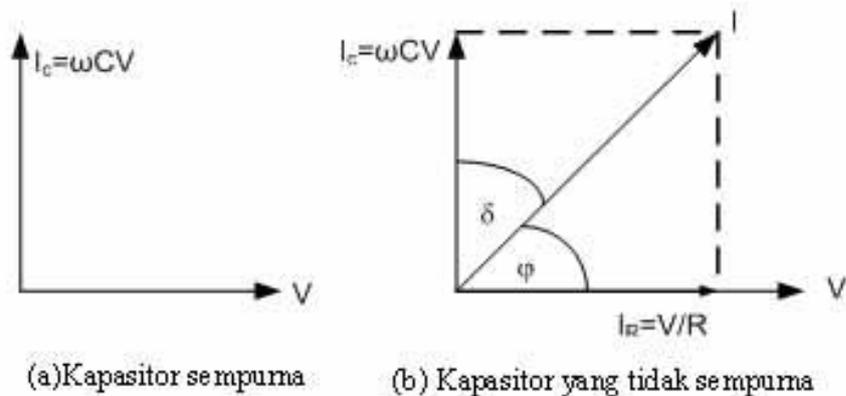
Akibat kedua efek tersebut, resistansi AC lebih besar daripada resistansi DC, dan hubungannya dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$R_{ae} = R_{dc} I + Y_s + Y_p \quad (2.9)$$

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 2.12a, 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. Keadaan tersebut dapat ditunjukkan oleh gambar 12b. Sudut ϕ adalah sudut fasa kapasitor, dan $\delta = 90^{\circ} - \phi$, adalah sudut kehilangan (*loss-angle*).



Gambar 2.8 Diagram vector arus pada kapasitor

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

$$P_D = \omega CV^2 \tan \delta \quad W \quad (2.10)$$

dengan:

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

$$C = \text{kapasitansi [F]}$$

$$V = \text{tegangan [V]}$$

$$\tan \delta = \text{faktor kehilangan (loss factor)}$$

Kapasitansi pada kabel, menurut [6], untuk kabel berinti tunggal atau tiga inti berpelindung dengan konduktor silindris dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$C = \frac{0.024\epsilon}{\log \frac{d_m}{d_c}} \mu F / \text{phase} / \text{km} \quad (2.11)$$

dengan:

d_{in} : diameter bahan isolasi kabel

d_c : diameter konduktor

ϵ : permitivitas bahan dielektrik kabel

2.5. 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, $R_t [C / W]$, dan perbedaan temperatur, $T [C]$, pada daerah yang dilewatinya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta T = R_t \cdot q \quad (2.12)$$

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

$$R_t = r \frac{l}{A} \quad (2.13)$$

dengan :

r : resistivitas termal $[C \cdot m / W]$

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:

$$k = \frac{q}{A \cdot \Delta T / m} [W / m / ^\circ C] \quad (2.14)$$

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

$$K = 1/R_t \approx q/\Delta T [W / ^\circ C] \quad (2.15)$$

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:

\vec{R} = resistansi termal

Q = Sumber energi panas

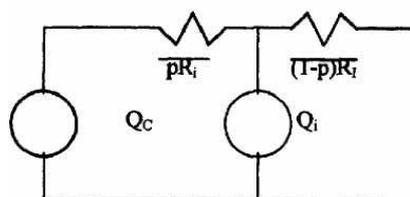
\vec{C} = Kapasitansi Termal

Untuk kabel dengan satu lapis bahan isolasi rangkaian termalnya adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13a. Sumber panas yang ada pada konduktor mengalirkan panas hanya kepada satu resistansi termal. Resistansi ini bisa dalam wujud isolasi dan selubung. Sedangkan gambar 2.13b merupakan gambar rangkaian termal dari kabel dengan dua bahan isolasi yang berbeda.



Gambar 2.9 Rangkaian termal untuk kabel dengan satu sumber kalor [7]

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 seperti pada gambar 14 dibawah ini, dimana Q_c adalah sumber kalor dari konduktor, dan Q_i adalah sumber kalor dari Isolasi.



Gambar 2.10 Rangkaian termal untuk kabel dengan dua sumber kalor [7]