

PERBANDINGAN PENGGUNAAN KABEL ISOLASI XLPE DENGAN KABEL LAUT ISOLASI MINYAK PADA SALURAN KABEL TEGANGAN TINGGI (SKTT) 150 kV JAWA-MADURA

Naskah diterima Tgl 19 September 2011, Naskah disetujui 30 November 2011

Amirullah dan ¹⁾, Adi Laksono ²⁾

Email : am9520012003@yahoo.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan unjuk kerja kabel laut three core isolasi minyak antara Pulau Jawa dengan Madura dengan kabel isolasi XLPE single core pada Jembatan Suramadu. Analisis dilakukan pada sejumlah parameter yaitu; tahanan arus bolak-balik, kerugian dielektrik, kemampuan hantar arus, jatuh tegangan, daya sisi kirim, rugi-rugi daya, daya sisi terima, dan efisiensi penyaluran kabel. Penelitian ini juga melakukan prediksi jangka waktu kemampuan kabel isolasi XLPE pada Jembatan Suramadu melayani pasokan daya listrik mengacu pada data pertumbuhan kebutuhan daya listrik di Pulau Madura dengan menggunakan Metode Regresi Linier. Hasil penelitian menunjukkan kabel isolasi XLPE jenis three core mempunyai nilai jatuh tegangan lebih kecil, serta kemampuan hantar arus (KHA) dan efisiensi saluran transmisi yang lebih besar dibandingkan dengan kabel laut isolasi minyak jenis three core. Berdasarkan nilai parameter listrik tersebut, kabel isolasi XLPE jenis single core lebih sesuai digunakan untuk memasok kebutuhan daya listrik di Pulau Madura dibandingkan dengan kabel laut isolasi minyak tipe three core. Jika menggunakan Metode Regresi Linier, angka pertumbuhan kebutuhan daya listrik di Pulau Madura adalah 2,12 % per-tahun. Dengan nilai pertumbuhan tersebut, kabel isolasi XLPE single core yang terpasang pada Jembatan Suramadu diprediksikan masih mampu menyuplai daya Pulau Madura sampai dengan 2076.

Kata-kunci: kabel XLPE single core, kabel laut three core, saluran kabel tegangan tinggi, metode regresi linier.

ABSTRACT

Objective of research is to compare the performance of three core oil insulating submarine cable between Java and Madura Island with single core XLPE insulation cable at Suramadu Bridge. Analysis were performed on a number of parameters namely; alternating current resistance, dielectric losses, current carrying capacity, voltage drop, source power, power losses, receiving power, and power transmission lines efficiency. This research will also perform duration forecasting ability of single core XLPE insulation cable at Suramadu Bridge serving the electric power supply to the data refers to the power demand on Madura Island by using Linear Regression Method. The results of research shows that single core XLPE insulation cable has a smaller voltage drop value and also current carrying capacity and power

¹⁾ Staf Pengajar Pada Teknik Elektro Universitas Bhuyangkara Surabaya,

²⁾ Alumnus Teknik Elektro Universitas Bhuyangkara Surabaya, Karyawan PT. PLN (P3B) Region Jawa-Timur dan Bali

transmission lines efficiency greater than three core insulation oil submarine cable. Based on the value of electrical parameters, single core XLPE insulation cable more suitable is used to supply electrical power on Madura Island compared to three core oil insulation submarine cable. Using Linear Regression Method, electric power demand growth rate on the island of Madura is 2.12%. With this growth value, single core XLPE insulation cable is installed on the Bridge Suramadu predicted still capable of supplying power to the end of Madura Island in 2076.

Key-words : single core XLPE cable, three core submarine cable, high voltage cable transmission lines, linear regression method.

PENDAHULUAN

Madura merupakan pulau kecil yang mempunyai aset besar untuk menunjang perekonomian Propinsi Jawa-Timur. Sejak tahun 1988 penyaluran daya listrik dari Pulau Jawa ke Pulau Madura dilakukan dengan menggunakan kabel laut isolasi minyak 150 kV jenis *three core* (tiga inti) dan *single core* (satu inti). Keunggulan kabel laut jenis *single core* dibandingkan kabel laut jenis *three core* adalah memiliki kontinuitas penyaluran daya listrik lebih baik yaitu apabila salah satu fasa mengalami gangguan atau pemeliharaan, maka pasokan daya listrik ke Pulau Madura masih masih mampu beroperasi, karena fasa yang mengalami gangguan akan dialihkan kepada kabel cadangan (*spare*) yang ada. Sedangkan jika kabel laut jenis *three core* mengalami gangguan, maka penyaluran daya listrik akan berhenti sama sekali. Keunggulan kabel laut *three core* adalah dari sisi ekonomis, karena hanya membutuhkan satu penghantar kabel. Sedangkan kabel laut *single core* membutuhkan empat penghantar kabel masing-masing tiga kabel fasa (R, S, dan T) dan satu kabel cadangan. Kelemahan kabel laut jenis *three core* dan *single core* adalah keduanya sangat rentan mengalami gangguan mekanis

yang dapat menyebabkan putusnya kabel laut akibat arus laut atau tersangkut jangkar kapal. Kerusakan terparah kabel laut 150 kV Jawa-Madura terjadi pada tahun 1998 berbentuk putusnya kabel laut *three core* akibat tersangkut jangkar kapal sehingga menyebabkan berhentinya pasokan daya listrik pada Pulau Madura dan pulau ini harus mengalami pemadaman total (*black-out*) selama empat bulan.

Untuk mempermudah akses transportasi antara Pulau Jawa dan Madura maka sejak tahun 2003 dibangun Jembatan Surabaya Madura (Suramadu). Setelah melewati masa konstruksi selama enam tahun, akhirnya jembatan selesai dibangun resmi beroperasi sejak tahun 2009. Untuk mengantisipasi kemungkinan terulangnya gangguan mekanis pada kabel laut *three core*, maka pada tahun 2010 PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN) berinisiatif memanfaatkan Jembatan Suramadu dengan memasang kabel tanah tipe *single core* berisolasi XLPE (*Cross Link Poly Ethylene*) untuk menyalurkan daya listrik ke Pulau Madura. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan unjuk kerja kabel laut *three core* isolasi minyak antara Pulau Jawa dengan Madura dengan kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu. Analisis dilakukan pada sejumlah parameter yaitu; tahanan arus

bolak-balik, kerugian dielektrik, kemampuan hantar arus, jatuh tegangan, daya sisi kirim, rugi-rugi daya, daya sisi terima, dan efisiensi penyaluran kabel. Penelitian ini juga akan melakukan peramalan atau prediksi jangka waktu kemampuan kabel isolasi XLPE pada Jembatan Suramadu melayani pasokan daya listrik mengacu pada data pertumbuhan kebutuhan daya listrik di Pulau Madura dengan menggunakan Metode Regresi Linier.

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Berapa nilai parameter listrik kabel antara kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu dan kabel laut isolasi minyak *three core* Jawa-Madura? Parameter kabel tersebut adalah tahanan arus bolak-balik, kerugian dielektrik, kemampuan hantar arus, jatuh tegangan, daya sisi kirim, rugi-rugi daya, daya sisi terima, dan efisiensi penyaluran kabel.
2. Kabel isolasi jenis manakah yang mempunyai karakteristik lebih baik mengacu pada nilai parameter listrik antara kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu dan kabel laut isolasi minyak *three core* Jawa-Madura?
3. Kapan prediksi waktu kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu masih mampu melayani pasokan daya listrik di Pulau Madura mengacu pada data pertumbuhan kebutuhan daya listrik dengan menggunakan Metode Regresi Linier?

TUJUAN

1. Menentukan nilai parameter listrik kabel antara kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu dan kabel laut isolasi minyak *three*

core Jawa-Madura. Parameter kabel tersebut adalah tahanan arus bolak-balik, kerugian dielektrik, kemampuan hantar arus, jatuh tegangan, daya sisi kirim, rugi-rugi daya, daya sisi terima, dan efisiensi penyaluran kabel.

2. Menentukan jenis kabel isolasi yang mempunyai karakteristik paling baik mengacu pada nilai parameter listrik antara kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu dan kabel laut isolasi minyak *three core* Jawa-Madura.
3. Melakukan prediksi waktu kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu masih mampu melayani pasokan daya listrik di Pulau Madura mengacu pada data pertumbuhan kebutuhan daya listrik dengan menggunakan Metode Regresi Linier.

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian dilakukan pada dua jenis kabel yaitu kabel isolasi XLPE jenis *single core* pada Jembatan Suramadu dan kabel laut isolasi minyak jenis *three core* Jawa-Madura.
2. Penelitian tidak membahas masalah sistem proteksi dan hanya membahas masalah aspek teknis kabel.
3. Analisis dilakukan pada nilai parameter kabel yaitu tahanan arus bolak-balik, kerugian dielektrik, kemampuan hantar arus, jatuh tegangan, daya sisi kirim, rugi-rugi daya, daya sisi terima, dan efisiensi penyaluran kabel.
4. Penelitian hanya mempertimbangkan pertumbuhan kebutuhan listrik untuk sektor rumah-tangga dan tidak mempertimbangkan pertumbuhan daya listrik akibat rencana industrialisasi di Pulau Madura pasca selesainya pembangunan Jembatan Suramadu.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode dan tahapan sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data teknis XLPE jenis *single core* pada Jembatan Suramadu dan kabel laut isolasi minyak jenis *three core* Jawa-Madura dari PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali. Data teknik tersebut meliputi:
 - a. Klasifikasi kabel.
 - b. Karakteristik listrik kabel.
 - c. Keuntungan dan kelebihan kabel.
 - d. Cara pemasangan dan peletakan kabel.
 - e. Diagram segaris kabel.
2. Menentukan nilai parameter kabel yaitu:
 - a. Tahanan arus bolak-balik.
 - b. Kerugian dielektrik.
 - c. Kemampuan hantar arus.
 - d. Jatuh tegangan.
 - e. Daya sisi kirim.
 - f. Rugi-rugi daya.
 - g. Daya sisi terima.
 - h. Efisiensi penyaluran kabel.
3. Menentukan jenis kabel isolasi yang mempunyai karakteristik paling baik mengacu pada nilai parameter listrik antara kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu dan kabel laut isolasi minyak *three core* Jawa-Madura.
4. Menentukan prediksi waktu kabel isolasi XLPE *single core* pada Jembatan Suramadu masih mampu melayani pasokan daya listrik di Pulau Madura mengacu pada data pertumbuhan kebutuhan daya listrik dengan menggunakan Metode Regresi Linier.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Saluran Transmisi Kabel

Kabel listrik memegang peranan penting sebagai penghubung antar gardu distribusi dengan konsumen atau antara Gardu Induk (GI) dengan GI lain apabila saluran udara tidak memungkinkan. Ditinjau dari sisi ekonomis, untuk daya yang sama penggunaan kabel tanah dan kabel laut sebagai saluran transmisi relatif jauh lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara. Selain untuk ongkos pemasangan, penggalian dan pengurukan (untuk kabel tanah), biayanya untuk bahan isolasi membuat jaringan kabel tanah dan kabel laut menjadi sangat mahal. Alasan utama penggunaan saluran transmisi dengan kabel tanah dan kabel laut adalah segi keamanan dan estetika (keindahan).

Penggunaan kabel laut pada dasarnya sama dengan kabel bawah tanah. Perbedaannya terletak pada lapisan isolasi dan cara pemasangan. Pemasangan kabel laut untuk daerah yang dangkal dilengkapi dengan perlindungan yang sedemikian hingga dapat mengatasi gangguan mekanis, seperti: gelombang, jangkar kapal, jaring kapal dan lain sebagainya. Perlindungan dilakukan dengan menanam kabel atau memberi tanda pelampung sepanjang transmisi kabel laut. Sedangkan pemasangan kabel laut untuk daerah yang relatif dalam pemasangan kabel cukup dengan diletakkan atau dihamparkan langsung. Pada kabel laut tipe *three core* pengamanan kabel adalah dengan menanam kabel sedalam satu meter di dalam parit beton. Untuk daerah yang agak dalam jalur sepanjang transmisi kabel laut diberi beton matras yang berfungsi melindungi kabel terhadap

pergeseran oleh arus laut. Kelemahan kabel laut jenis *three core* dan *single core* adalah keduanya sangat rentan mengalami gangguan mekanis yang dapat menyebabkan putusnya kabel laut akibat arus laut atau tersangkut jangkar kapal. Berdasarkan kelemahan tersebut, maka pada tahun 2010 PT. PLN berinisiatif memanfaatkan Jembatan Suramadu dengan memasang kabel tanah tipe *single core* berisolasi XLPE (*Cross Link Poly Etylene*) untuk menyalurkan daya listrik ke dari Pulau Jawa ke Madura.

Keuntungan dan Kelemahan Kabel Isolasi XLPE

Keuntungan kabel isolasi XLPE antara-lain: (1) Ringan dan mudah pemasangannya, (2) Radius lingkaran yang kecil dan konsekuensi khusus untuk instalasi yang terbatas misalnya switchgear instalasi dalam, (3) Pengenal penghubung singkat yang tinggi khususnya sesuai untuk penampang kabel yang dipilih dengan dasar arus hubung singkat, (4) Tidak ada tekanan terhadap peralatan untuk stabilisasi dielektrik, dengan simplifikasi dari pemasangan dan peralatan bantu, sehingga mengurangi biaya pemasangan dan pemeliharaan, (5) Isolasi yang padat konsekuensinya sesuai untuk *slope* yang besar dan perbedaan ketinggian dari rute kabel, (6) Tangen delta (δ) yang rendah

sehingga mengurangi biaya operasi akibat rugi dielektrik yang rendah. Sedangkan kerugian kabel isolasi XLPE adalah (1) Pengaman mekanik yang rendah, dibanding dengan kabel di dalam pipa besi, (2) Pengaruh *screen* yang rendah dari kabel dengan selubung logam atau kabel didalam pipa.

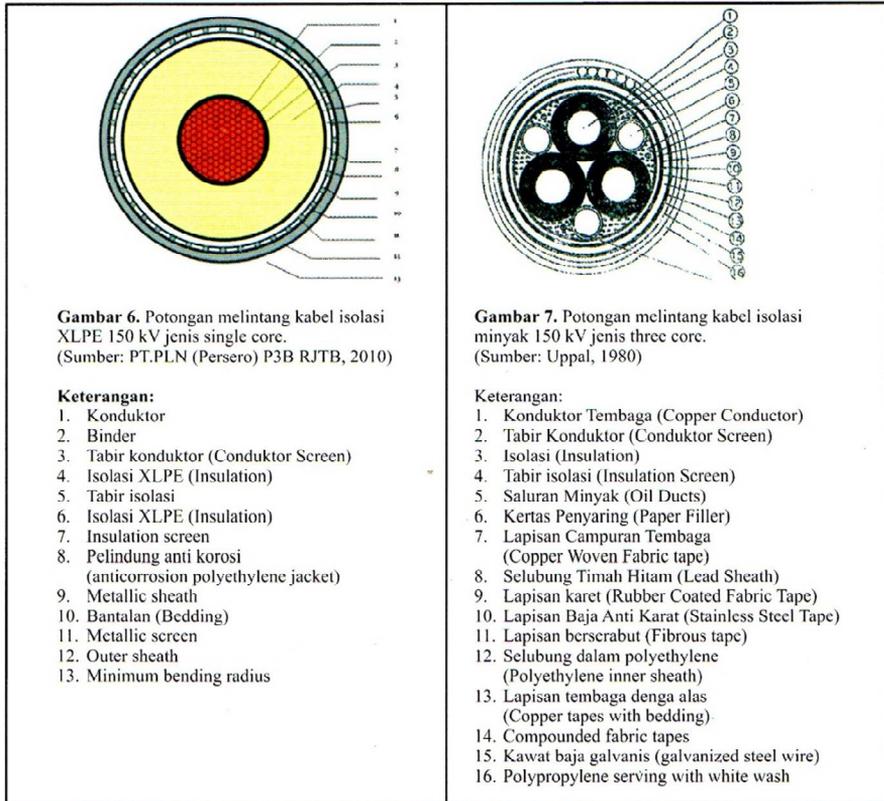
Pemasangan Kabel Isolasi XLPE Tipe *Single Core*

Gambar 1 menunjukkan pemasangan kabel XLPE yang ditempatkan pada sisi kanan dan kiri utilitas Jembatan Suramadu. Kabel mempunyai jumlah inti (*core*) yang sama, supaya beban yang diterima jembatan dari berat kabel tetap seimbang. Gambar 2 adalah Gambar 1 yang diperbesar dan menunjukkan gambar penampang kabel XLPE *single core* yang terpasang pada Jembatan Suramadu. Gambar 3 adalah bentangan kabel XLPE dilihat dari *global positioning system (GPS)*. Gambar dibawah menunjukkan jarak antara Pulau Jawa dan Madura dan sistem kelistrikan disambung dengan kabel XLPE *single core* yang berada di bawah Jembatan Suramadu. Gambar 4 menunjukkan Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 150 kV pada Jembatan Suramadu menggunakan Kabel XLPE. Gambar 5 menunjukkan diagram segaris SKTT 150 kV antara GI Ujung dan GI Kenjeran dengan GI Gilitimur dan GI Bangkalan.

Konstruksi Kabel

Gambar 6 dan 7 menunjukkan potongan melintang kabel isolasi XLPE

jenis *single core* dan kabel laut isolasi minyak jenis *three core*.



Parameter untuk Menentukan Rugi-Rugi Penghantar pada Kabel XLPE

Tabel 1 menunjukkan parameter kabel isolasi XLPE *single core* yang diperlukan untuk menghitung rugi-rugi penghantar.

No.	Uraian	Parameter	Besaran	Satuan
1.	Tegangan kerja	V_{L-L}	150	kV
2.	Temperatur penghantar awal	θ_0	20	$^{\circ}\text{C}$
3.	Temperatur penghantar Maksimum	θ_1	85	$^{\circ}\text{C}$
4.	Temperatur selubung logam	θ_{sh}	50	$^{\circ}\text{C}$
5.	Temperatur perisai	θ_{ar}	45	$^{\circ}\text{C}$
6.	Temperatur lingkungan	θ_L	33/25	$^{\circ}\text{C}$
7.	Koefisien temperature tembaga	α_{cu}	0,00393	$^{\circ}\text{C}$
8.	Koefisien temperature timbal	α_{pb}	0,004	$^{\circ}\text{C}$
9.	Tahanan panas jenis isolasi	ρ_1	3,5	$^{\circ}\text{C m/W}$
10.	Tahanan panas jenis anti korosi	ρ_2	6	$^{\circ}\text{C m/W}$
11.	Tahanan panas jenis selubung luar	ρ_3	3	$^{\circ}\text{C m/W}$
12.	Tahanan panas jenis saluran instalasi	ρ_4	1,2/0,7	$^{\circ}\text{C m/W}$
13.	Permittivas bahan isolasi	ϵ_r	2,4	-
14.	Sudut kerugian dielektrik	$\text{Tan } \delta$	0,0004	-
15.	Diameter luar penghantar	d_c	20,90	mm
16.	Luas penampang	L_c	300	mm^2
17.	Tebal isolasi	T_1	19	mm
18.	Tebal bahan anti korosi	T_2	4,5	mm
19.	Panjang kabel di suramadu	L	4,04	km
20.	Tahanan jenis tembaga	ρ_o	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \text{ m}$
21.	Konstanta pejal dipilin	C_s	1	-
22.	Konstanta pejal dipilin	C_p	0,8	-

Tahanan Arus Searah Kabel XLPE

Tahanan dari penghantar saluran transmisi adalah penyebab utama dari rugi daya pada saluran transmisi. Resistansi DC pada temperature operasi (20°C) per meter pada kabel *single core* dan kabel *three core* ditentukan menggunakan Persamaan 1 (Hutauruk, 1985):

$$R_{dc0} = \frac{\rho}{A} (1+Z) \quad (1)$$

Karena bahan konduktor adalah Tembaga maka berdasarkan Tabel 1 harga R_o adalah $5,91941 \cdot 10^{-5} / \text{km}$.

Tahanan DC pada temperatur maksimum (85°C) per meter panjang kabel pada kabel *single core* dan *three core* dapat dihitung dengan menggunakan

Persamaan 2 (Anonim, 1989):

$$R_{dc} = R_{dc0} \cdot [1 + \alpha_1 (\theta_2 - \theta_1)] = 7,43152 \cdot 10^{-5} \Omega/m$$

Faktor Efek Kulit Kabel XLPE

Faktor Efek Kulit atau Skin Effect Faktor Kabel XLPE dihitung menggunakan Persamaan 2 dan 3:

1. Konstanta Efek Kulit (K_s)

Besarnya konstanta efek kulit tergantung pada jenis penghantar yang direkomendasikan oleh IEC 287 (Anonim, 1989). Konstanta efek kulit untuk kabel jenis single core adalah 1 dapat dilihat pada lampiran 7 karena jenis konduktor berbentuk pejal dipilin.

2. Reaktansi Efek Kulit (X_s) (Anonim, 1988):

$$X_s = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{dc}}} \cdot 10^7 \cdot K_s = 13,00038 \cdot 10^6 \quad (2)$$

3. Faktor Efek Kulit (Y_s) adalah:

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0,8 \cdot X_s^4} = 0,01489 \quad (3)$$

Faktor Efek Pendekatan Kabel XLPE

Harga faktor efek pendekatan atau proximity effect factor untuk berbagai jenis penghantar dapat dilihat pada Tabel 1.

1. Reaktansi efek pendekatan (X_p) adalah (Anonim, 1988):

$$X_p = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{dc}}} \cdot 10^7 \cdot K_p = 1,223674221$$

2. Faktor efek pendekatan (Y_p) adalah (Anonim, 1988):

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8 \cdot X_p^4} \left[\left(\frac{dc}{S} \right)^2 \cdot 0,312 \left(\frac{dc}{S} \right)^2 + \frac{1,18}{192 + 0,8 \cdot X_p^4 - 0,27} \right] = 0,00223$$

Tahanan Arus Bolak Balik Kabel XLPE

Dengan menggunakan Persamaan 5, nilai tahanan arus bolak-balik (R_{ac}) adalah (Anonim, 1988):

$$R_{ac} = R_{dc} (1 + Y_s + Y_p) = 7,54634 \cdot 10^{-5} \Omega/m \quad (5)$$

Perbedaan ini karena pengaruh efek pendekatan yang dipengaruhi faktor jarak.

Tabel 2. Parameter kabel XLPE single core

No.	Parameter	Kabel inti tunggal berisolasi XLPE tipe cm
1.	R_{dc0}	$5,91941 \cdot 10^{-5} \Omega/m$
2.	Y_s	0,01489
3.	Y_p	Flat dengan jarak aman = 0,00056
4.	R_{dc1}	$7,43152 \cdot 10^{-5} \Omega/m$
5.	R_{ac1}	Flat dengan jarak aman = $7,54634 \cdot 10^{-5} \Omega/m$

Faktor Kerugian Perisai Kabel XLPE

Berdasarkan IEC 287 karena bahan perisai terbuat dari bahan non magnetik, maka faktor rugi-rugi perisai dapat (,) diabaikan (IEC 287 Publication, 1982).

Faktor kerugian perisai $= 0$

Tahanan Efektif Kabel XLPE

Tabel 3 menunjukkan nilai parameter Kabel XLPE.

Tabel 3. Parameter Kabel XLPE

No.	Parameter	Besaran	Satuan
1.	d a	0,0751	m
2.	la	4040	m
3.	Aa	$8,625 \cdot 10^{-2}$	m^2
4.	As	502,6512	mm^2
5.	psh	$21,4 \cdot 10^{-28}$	Ωm
6.	0sh	50	$^{\circ}C$
7.	t ₁	21,7	mm^2
8.	t ₂	0,5	mm
9.	t ₃	4,5	μm
10.	dc	20,90	mm
11.	Ds	69,1	mm
12.	-	80,1	mm
13.	D	71,02	mm
14.	Dc	89,1	mm
15.	Wd	0,31307	W/m per fasa

Prosedur penentuan parameter kabel isolasi XLPE *single core*:

1. Menghitung nilai R

$$R_a = \frac{\rho_{\text{perisai kawat tembaga}} \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot 0,0751}{4040}\right)^2 + 1} [1 + \alpha_{20} (\theta_{\text{perisai kawat tembaga}} - 20^\circ)]}{\alpha_{20} \text{ perisai kawat tembaga}} \quad (6)$$

$$= 2,19281 \cdot 10^5 \Omega/\text{m}$$

$$R_a = 1,4 \times 2,19281 \cdot 10^5 = 3,069934 \cdot 10^5 \Omega/\text{m}$$

2. Menghitung nilai R_s

$$R_s = [1 + \alpha_{20} \text{ selubung timah hitam} (\theta_{\text{selubung timah hitam}} - 20^\circ)] \quad (7)$$

$$= 4,76832 \cdot 10^6 \Omega/\text{m}$$

R_s paralel dengan R_a:

$$R_{\text{tot}} = \frac{R_a \times R_s}{R_a + R_s} \quad (8)$$

$$= 2,88424 \cdot 10^5 \Omega/\text{m}$$

$$X = \omega \cdot 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{2s}{d} \quad (9)$$

$$= 5,77725 \cdot 10^5 \Omega/\text{m}$$

$$\lambda'_{1sa} = \frac{R_{\text{tot}}}{R_{\text{acl}}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{\text{tot}}}{X}\right)^2} = 0,30545 \quad (10)$$

3. Menghitung faktor rugi-rugi selubung dan armour

$$\lambda_1 = \lambda'_{1sa} \frac{R_a}{R_s + R_a} = 0,01848 \quad (11)$$

$$\lambda_2 = 0,30545 - 0,01848 = 0,28697$$

Tahanan efektif pada kabel inti tunggal

$$R_{\text{eff}} = R_{\text{acl}} (1 + \lambda_1 + \lambda_2) = 1,02621 \cdot 10^5 \Omega/\text{m}$$

Tahanan Panas Kabel XLPE

Tahanan panas kabel meliputi tahanan panas isolasi (T₁), tahanan panas bantalan dan bahan anti korosi (T₂), tahanan panas selubung (T₃) dan tahanan panas diluar kabel (T₄). Nilai tahanan panas tersebut dihitung mengikuti Persamaan 12 s/d 15.

Kabel inti tunggal formasi *flat*

$$T_1 = \frac{P_l}{2\pi} \cdot \ln \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right] \quad (12)$$

$$= 0,62633^\circ\text{C m/W}$$

$$T_2 = \frac{P}{2\pi} \cdot \ln \left[1 + \frac{2t_2}{d_{so}} \right] \quad (13)$$

$$= 0,01373^\circ\text{C m/W}$$

$$T_3 = \frac{P_3}{2\pi} \cdot \ln \left[1 + \frac{2t_3}{d_{si}} \right] \quad (14)$$

$$= 0,05087^\circ\text{C m/W}$$

$$u = \frac{2L_1}{D_c} = 33,67003$$

$$T_4 = \rho_4 [0,475 \ln(2u) - 0,346] \quad (15)$$

$$= 1,98436^\circ\text{C m/W}$$

Kapasitansi Kabel

Kapasitansi Kabel XLPE *single core* ditentukan dengan Persamaan 16.

$$C = \frac{\epsilon}{18 \cdot \ln \left(\frac{d_{is}}{d_{cs}} \right)} \cdot 10^{-9} = 3,32343 \cdot 10^{10} \quad (16)$$

Kerugian Dielektrik

Kerugian dielektrik kabel XLPE *single core* ditentukan dengan Persamaan 17.

$$W_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot c \cdot V_o^2 \cdot \tan \delta = 0,31307 \quad (17)$$

Pemuat Total (Pic)

Rugi pemuat total kabel XLPE *single core* ditentukan dengan Persamaan 18.

$$P_{ic} = \frac{3 \cdot V_o^2}{R_l \cdot I} = 135,4730618 \quad (18)$$

Kemampuan Penyaluran Daya dan Efisiensi Saluran Transmisi

Besarnya kemampuan penyaluran daya pada saluran transmisi dipengaruhi oleh kemampuan arus (KHA) yang diijinkan, rugi daya pada penghantar dan rugi-rugi saluran yang tidak dipegaruhi arus beban.

Kemampuan Hantar Arus

Dengan menggunakan perhitungan kemampuan hantar arus maksimum yang diijinkan sesuai persamaan dan hasil perhitungan R_{ac}, tahanan panas dan rugi-rugi dielektrik pada sub bab

sebelumnya didapatkan nilai kemampuan hantar arus sesuai Persamaan 19 (Anonim, 1988).

$$I_m = \frac{\Delta\theta - P_d [0,5T_1 + (T_2 + T_3 + T_4)]}{\sqrt{R_{sc} [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \quad (19)$$

$$= 499,8644913A$$

Jatuh Tegangan pada Saluran

Untuk menghitung besarnya jatuh tegangan atau *voltage drop* digunakan model transmisi saluran panjang.

$$Z = R + j 2\pi fL = 0,18308 \angle 57,39^\circ \Omega/km$$

$$y = 0 + j 2\pi fC = 1,04356 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ mho/km}$$

$$\gamma l = \sqrt{yz} \quad l = 0,00496 + j 0,01695 = \alpha l + j\beta l$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{y}} = 41,88531 \angle -16,305^\circ \Omega$$

$$V_R = \frac{150000}{\sqrt{3}} = 86602,54038 \angle 0^\circ \text{ V ke netral}$$

$$I_R = 200 \angle 0^\circ \text{ A}$$

Asumsikan *incident voltage* sebagai V^+ dan *reflected voltage* V^- . Maka pada ujung titik terima (*receiving end*), dimana $x = 0$

$$V_R^+ = \frac{V_R + I_R \cdot Z_c}{2} = 47335,95047 \angle -1,42^\circ \text{ V}$$

$$V_R^- = \frac{V_R - I_R \cdot Z_c}{2} = 39298,79613 \angle 1,71^\circ \text{ V}$$

Pada ujung titik kirim, dimana $x = l$

$$V_S^+ = \frac{V_R + I_R \cdot Z_c}{2} e^{\alpha l} e^{j\beta l} = 48672,150 \angle -0,45^\circ \text{ V}$$

$$V_S^- = \frac{V_R - I_R \cdot Z_c}{2} e^{-\alpha l} e^{j\beta l} = 39214,335 \angle 0,74^\circ \text{ V}$$

Tegangan saluran ke netral pada ujung titik kirim :

$$V_S = V_S^+ + V_S^- = 87886,17816 \angle 0,09^\circ \text{ V}$$

$$V_S = \sqrt{3} \times V_S = 152223,8573 \text{ V}$$

Sehingga diperoleh tegangan jatuh atau *voltage drop* sesuai Persamaan 20 (Hutauruk, 1989).

$$\Delta V = \frac{V_S - V_R}{V_S} \times 100\% = 0,07779\% \quad (20)$$

Daya Sisi Kirim Kabel XLPE

Daya sisi kirim kabel XLPE dihitung berdasarkan Persamaan 21 (Hutauruk, 1989).

$$P_s = \sqrt{3} \cdot V_H \cdot I_m \cdot \cos \varphi \quad (21)$$

$$= \sqrt{3} \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 499,864 \cdot 0,999$$

$$= 129,74 \text{ MW}$$

Rugi Daya Kabel XLPE

Rugi daya kabel XLPE dihitung berdasarkan Persamaan 22 (Hutauruk, 1989).

$$P_p = I^2 \cdot R_{\text{eff}} \quad (22)$$

$$= 499,864^2 \cdot 1,02621 \cdot 10^{-4} \cdot 4,421$$

$$= 113,36 \text{ Watt/m/phase}$$

Rugi Daya Spesifik Total Kabel XLPE

Rugi daya spesifik kabel XLPE dihitung berdasarkan Persamaan 23 (Gonen, 1987).

$$P_{\text{loss}} = P_p + P_{\text{ic}} \quad (23)$$

$$= 113,36 + 135,47$$

$$= 249,25 \text{ Watt} = 0,00024925 \text{ MW}$$

Daya pada Sisi Terima Kabel XLPE

Daya pada sisi terima kabel XLPE dihitung berdasarkan Persamaan 24 (Anonim, 1988).

$$P_r = P_s - P_{\text{loss}} \text{ MW} \quad (24)$$

$$= 129,74 - 0,00024925$$

$$= 129,73 \text{ MW}$$

Efisiensi Saluran Transmisi Kabel XLPE

Daya pada sisi terima kabel XLPE dihitung berdasarkan Persamaan 25 (Uppal, 1980).

$$\pi = \frac{P_r}{P_s} \times 100\% \quad (25)$$

$$= \frac{129,73}{129,74} \times 100\%$$

$$= 99,9922922\%$$

Parameter untuk Menentukan Rugi-Rugi pada Penghantar Kabel Laut Isolasi Minyak

Tabel 4 menunjukkan parameter kabel laut isolasi minyak *three core* yang diperlukan untuk menghitung rugi-rugi penghantar.

Tabel 4. Parameter-parameter perhitungan kabel laut isolasi minyak *three core*

No.	Uraian	Simbol	Besaran	Satuan
1.	Tahanan armour	Ra	$1,26760 \cdot 10^{-4}$	Ω/m
2.	Tahanan selubung	Rs	$1,73165 \cdot 10^{-4}$	Ω/m
3.	Tahanan	Re	$7,31863 \cdot 10^{-3}$	Ω/m
4.	Jarak pusat penghantar dengan pusat kabel	C	48,9	mm
5.	Tebal isolasi	T	26,4	mm
6.	Tebal bahan anti korosi	t ₁	13,2	mm
7.	Tebal lapisan dibawah penguat	t ₂	1,5	mm
8.	Tebal selubung luar	t ₃	4,6	mm
9.	Diameter luar penghantar	Dc	22,5	mm
10.	Diameter luar selubung	Ds	114,2	mm
11.	Diameter luar lapisan pertama	D'a	139,6	mm
12.	Diameter dalam lapisan pertama	D	122,4601976	mm

Tabel 5 menunjukkan perbandingan hasil penentuan kabel laut isolasi minyak *three core*

Tabel 5 Perbandingan hasil penentuan kabel laut isolasi minyak *three core*

No.	Parameter	Kabel 3 inti berisolasi minyak
1.	R _{det}	$5,91941 \cdot 10^{-4} \Omega/m$
2.	Y _s	0,00537
3.	Y _p	0,00869
4.	R _{del}	$7,43152 \cdot 10^{-3} \Omega/m$
5.	R _{sc1}	$7,53601 \cdot 10^{-3} \Omega/m$

Analisis Perbandingan Kabel XLPE Single Core dengan Kabel Laut Isolasi Minyak Three Core

Dengan prosedur yang sama seperti pada Kabel XLPE tipe *single core*, maka nilai parameter listrik meliputi tahanan arus bolak-balik, kerugian dielektrik, kemampuan hantar arus, jatuh tegangan, daya sisi kirim, rugi-rugi daya, daya sisi terima, dan efisiensi penyaluran kabel laut isolasi minyak *three core* dapat diperoleh dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Kabel XLPE Single Core dengan Kabel Laut Isolasi Minyak Three Core

No	Parameter	Kabel XLPE Single Core	Kabel Laut Three Core
1	Tahanan AC (R _{eff})	$1,02621 \cdot 10^{-4} (\Omega/m)$	$1,56407 \cdot 10^{-4} (\Omega/m)$
2	Rugi-rugi Elektrik (Wd)	0,31307	1,46139
3	Tegangan Jatuh (%)	0,07779 %	0,13995 %
4	Kemampuan Hantar Arus (KHA)	499,8644913 A	415,4620701 A
5	Daya Sisi Kirim (P _s)	129,74 MW	107,83 MW
6	Rugi Daya (P _{loss})	249,25 W	166,19 W
7	Daya Sisi Terima (Pr)	129,73 MW	107,82 MW
8	Efisiensi Saluran Transmisi	99,9922922%	99,9907261%

Tabel 6 menunjukkan bahwa Kabel Isolasi XLPE jenis *single core* mempunyai nilai jatuh tegangan lebih kecil, serta kemampuan hantar arus (KHA) dan efisiensi saluran transmisi yang lebih besar dibandingkan dengan kabel laut isolasi minyak jenis *three core*. Dengan demikian ditinjau dari parameter listrik, maka kabel isolasi XLPE jenis *single core* lebih sesuai digunakan untuk memasok kebutuhan daya listrik di Pulau Madura dibandingkan dengan kabel laut isolasi minyak tipe *three core*.

Prediksi Jangka Waktu Operasi Kabel XLPE Tipe Single Core

Prediksi Jangka Waktu Operasi Kabel XLPE Tipe *Single Core* harus menggunakan data historis beban puncak tahunan sebagai cermin pertumbuhan daya listrik di Pulau Madura. Data data beban puncak tahunan selama lima tahun terakhir ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Data data beban puncak tahunan selama lima tahun terakhir .

Tahun	Daya beban puncak (MW)
2006	131,0
2007	134,3
2008	141,9
2009	153,0
2010	138,0

Sumber: PT.PLN (Persero) P3B RJTB, 2010

Dengan menggunakan Metode Regresi Linier (Haryono Subiyakto, 2005), berdasarkan data beban puncak tahunan pada Tabel 8, maka ditentukan data-data beban puncak tahun mendatang. Analisis data beban puncak tersebut selanjutnya disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Analisis Data Beban Puncak dengan Metode Regresi Linier

Tahun	X	Y Beban puncak (MW)	XY	X ²	Y ²
2006	0	131,0	0	0	0
2007	1	134,0	134,0	1	17956
2008	2	141,9	283,8	4	20135
2009	3	153,0	459	9	23409
2010	4	138,0	552	16	19044
Jumlah	10	697,9	1428,8	30	80544,61

Berdasarkan data beban puncak diatas, maka prediksi kebutuhan daya di Pulau Madura pada beberapa tahun mendatang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 26.

$$Y = a + bx \tag{26}$$

Keterangan Y = kebutuhan daya (MW)

Untuk x = 1 tahun

Nilai a dan b dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 27 dan 28.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - b \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{27}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \tag{28}$$

Keterangan : Y = kebutuhan daya (MW)

x = 1 tahun

n = jumlah data

Jika nilai-nilai pada Tabel 9 di masukkan ke persamaan 27 dan 28, maka nilai a = 132,98 dan b = 3,3.

Jika nilai a dan b dimasukkan ke Persamaan 26 maka diperoleh Persamaan 29.

$$Y = 132,98 + 3,3 x \tag{29}$$

Dengan menggunakan persamaan 29, maka dapat diperoleh prediksi kebutuhan daya listrik di Pulau Madura pada tahun mendatang yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Prediksi Kebutuhan Daya Listrik di Pulau Madura Beberapa Tahun Mendatang

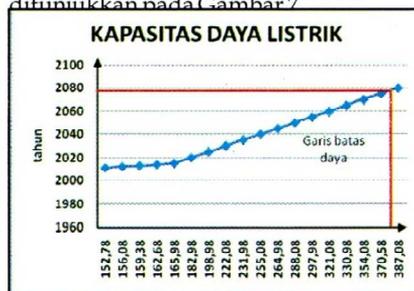
Tahun	Kebutuhan daya listrik (MW)
2011	152,78
2012	156,08
2013	159,38
2014	162,68
2015	165,98
2020	182,48
2025	198,98
2030	222,08
2035	231,98
2040	255,08
2045	264,98
2050	288,08
2055	297,98
2060	321,08
2065	330,98
2070	354,08
2075	370,58
2076	373,88
2080	387,08

Berdasarkan Tabel 10 maka dapat dihitung bahwa pertumbuhan daya listrik rata-rata pertahun di Pulau Madura adalah 2,12 %.

Prediksi Jangka Waktu Operasi Kabel Isolasi XLPE Tipe Single Core

Kapasitas pembangkitan nominal di Pulau Madura adalah 116 MW yang dipasok dari PLTG Gili Timur Bangkalan. Dengan asumsi kapasitas

pembangkit di PLTU Gili Timur tetap dan kapasitas daya maksimum yang dapat disalurkan dari Pulau Jawa ke Madura melalui Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 150 kV Isolasi XLPE tipe *single core* yang terpasang dibawah Jembatan Suramadu adalah 259,48 MW, maka total daya tersedia untuk Madura adalah 375,48 MW. Berdasarkan kapasitas eksisting tersebut dan pertambahan kebutuhan daya di Madura per-tahun, maka dapat di tentukan prediksi jangka waktu operasi kabel isolasi XLPE tipe *single core*. Selanjutnya berdasarkan prediksi tersebut maka dapat ditentukan pada tahun berapa perlu dilakukan penambahan SKTT 150 kV Jawa-Madura atau pembangkit baru di Pulau Madura. Analisis lengkap prediksi ditunjukkan pada Gambar 7



Gambar 8. Grafik Prediksi Kebutuhan Daya Listrik di Pulau Madura berdasarkan kapasitas Kabel 150 kV Isolasi XLPE *Single Core* yang Terpasang pada Jembatan Suramadu

Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa kabel isolasi XLPE *single core* yang terpasang pada Jembatan Suramadu masih mampu mensuplai daya Pulau Madura sampai dengan akhir 2076. Dengan demikian di

harapkan paling tidak pada tahun 2075, PT. PLN harus mempersiapkan pemasangan saluran atau pembangkit baru untuk memenuhi kebutuhan daya di Madura supaya siap beroperasi pada tahun 2076.

SIMPULAN DAN REKOMENDASI

Simpulan

1. Berdasarkan Tabel 6 kabel isolasi XLPE jenis *single core* mempunyai nilai jatuh tegangan lebih kecil serta kemampuan hantar arus (KHA) dan efisiensi saluran transmisi yang lebih besar dibandingkan dengan kabel laut isolasi minyak jenis *three core*.
2. Berdasarkan nilai parameter listrik, maka kabel isolasi XLPE jenis *single core* lebih sesuai digunakan untuk memasok kebutuhan daya listrik di Pulau Madura dibandingkan dengan kabel laut isolasi minyak tipe *three core*.
3. Jika menggunakan Metode Regresi Linier, angka pertumbuhan kebutuhan daya listrik di Pulau Madura adalah 2,12 %. Dengan nilai pertumbuhan tersebut, kabel isolasi XLPE *single core* yang terpasang pada Jembatan Suramadu diprediksikan masih mampu menyuplai daya listrik ke Pulau Madura sampai dengan akhir 2076.

Rekomendasi

Dalam rangka mengantisipasi kemampuan kebel isolasi XLPE *single core* ketika melayani kebutuhan daya listrik, sebaiknya pada tahun 2075 PT. PLN harus mempersiapkan pemasangan saluran atau pembangkit baru untuk memenuhi kebutuhan daya di Madura supaya siap beroperasi pada tahun 2076.

pemerintah melalui Badan Pengembangan Wilayah Suramadu (BPWS) segera merealisasikan rencana industrialisasi di Pulau Madura pasca selesainya pembangunan Jembatan Suramadu.

Haryono Subiyakto, 1995, *Statistika (Inferen) Untuk Bisnis*, Edisi Ke-I, Cetakan Pertama, April 1995, Bagian Penerbitan Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi YKPN, Yogyakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1989, *Text for Intensive Lecture on Transmission Lines (Under Ground Lines)*, New Japan Engineering Consultant, Osaka Japan.
- Anonim, 1988, *Thermal Problems: Continous Current Rating Current Carrying Capacity*, Tim Pelaksana Penyelenggara Pendidikan dan Panataran Sarjana Teknik PLN Prokema PLN dengan ITB, Bandung.
- Gonen, T., 1987, *Electric Power Transmission System Engineering : Analysis and Desing*, A Willey Interscience Publication, California.
- Hutauruk, T.S., 1989, *Transmisi Daya Listrik*, Erlangga, Jakarta.
- IEC, Publication 287, 1982, *Calculation of Continous Current Rating of Cable*, Geneva-Swiss.
- Uppal, S.L., DR., 1980, *Elektical Power*, Khanna Publisher, New Delhi.
- Weedy, B.M., 1967, *Sistem Tenaga Listrik*, Aksara Persada Indonesia, Shouthampton.
- PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Region Jawa Timur dan Bali (P3B-RJTB) Unit Pelayanan Teknis (UPT) Surabaya, 2010, *Data Beban Puncak Pulau Madura Periode 2006 s/d 2010*, Jl. Suningrat No. 45 Taman Sidoarjo.