

Perbandingan Penggunaan Kabel Isolasi Minyak (*Paper Insulation In Oil-Filled Cable*) Dengan Kabel Isolasi XLPE Terhadap Kemampuan Penyaluran Daya dan Efisiensi pada Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 150kV Jawa-Bali

Achmad Nashihuddin Akmal

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: achmadnashihuddin.18078@mhs.unesa.ac.id

Joko, Achmad Imam Agung, Tri Wrahatnolo

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: joko@unesa.ac.id, achmadimam@unesa.ac.id, wrahatnolo@yahoo.co.id

Abstrak

Kabel bawah laut adalah media untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pusat pembangkit menuju pusat beban yang dibentangkan pada saluran dasar laut dan didesain untuk melindungi bagian dalam kabel dari air agar terciptanya penyaluran daya yang ekonomis dan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan unjuk kerja jenis isolasi kabel laut three core (tiga inti) yang paling baik digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik mengacu pada nilai parameter listriknya. Metode penelitian yang digunakan menggunakan metode penelitian gabungan, studi literatur, dan pendekatan kuantitatif. Penelitian dilaksanakan di *Cable Head* (CH) Ketapang Banyuwangi untuk melakukan pengambilan data konstruksi kabel dan spesifikasi kabel laut. Teknik analisis yang dilakukan dengan cara membandingkan hasil nilai parameter listrik yaitu; perhitungan tahanan arus bolak balik, kemampuan hantar arus (KHA), rugi daya, sisi terima kabel dan efisiensi transmisi antara kabel laut *three core* isolasi minyak dengan *three core* isolasi XLPE (*Cross linked polyethylene*). Hasil menunjukan bahwa nilai parameter listrik pada kabel *three core* XLPE mempunyai nilai kemampuan hantar arus sebesar 790,77 A, daya sisi kirim sebesar 205,21 MW, daya sisi terima kabel sebesar 158,83 MW, dan efisiensi saluran transmisi sebesar 99,9951271 % yang lebih unggul dibandingkan dengan kabel *three core* isolasi minyak. Berdasarkan karakteristik dan nilai parameter listrik yang didapatkan bahwa kabel laut *three core* isolasi XLPE mempunyai keunggulan yang paling baik jika digunakan sebagai media penyaluran tenaga listrik pada Pulau Jawa - Bali.

Kata Kunci: Transmisi tenaga listrik, Isolasi Minyak, Kabel laut tiga-inti, XLPE.

Abstract

Submarine cable is a media for transmitting electrical power from generating center to the load center which was stretched on the seabed channel and is designed to protect the inside of the cable from water in order to create an economical and efficient power distribution. This study aims to compare the performance of the three-core submarine cable insulation which was best used for transmitting electric power according to the electrical parameter values. The research method used was combined-research methods, literature studies, and quantitative approaches. The survey was carried out at the Cable Head (CH) Ketapang Banyuwangi to collect data of cable construction and submarine cable specifications. The analysis technique was carried out by comparing the results of the electrical parameter values, namely; calculation of alternating current resistance, kemampuan hantar arus (KHA), power loss, cable receiving side and transmission efficiency between three-core oil insulation and three-core XLPE insulation. The results show that the value of the electrical parameters on the three-core XLPE cable has a current-carrying capability of 790.77 A, the powersending side is 205.21 MW, the cable-receiving side is 158.83 MW, and the transmission efficiency side is 99.9951271% which is superior to the oil-insulating three-core cable. Based on the characteristics and values of the electrical parameters, it was found that the XLPE three-core submarine cable insulation has the best advantages when it is used as a media for transmitting electrical power in Java - Bali.

Keywords: Electric power transmission, Oil Insulation, Three-core submarine cable, XLPE.

PENDAHULUAN

Jawa dan Bali merupakan dua pulau yang mempunyai angka populasi yang sangat besar sehingga membutuhkan konsumsi energi listrik yang memadai. Untuk memenuhi ketersediaan listrik di wilayah Jawa dan Bali diperlukan sistem penyaluran daya. Pada proses penyaluran daya listrik ke pusat beban tidak terlepas dari proses pembangkitannya. Pembangkitan daya listrik pada pusat pembangkit dapat disalurkan melalui saluran transmisi untuk jarak jauh dan saluran distribusi untuk jarak dekat (George dan Ashok, 2021). Penyaluran daya listrik dapat dilakukan melalui saluran udara, saluran bawah tanah dan saluran bawah laut. Agar mempermudah penyaluran daya listrik tegangan kerja 150kV sistem interkoneksi Jawa – Bali maka dilakukan dengan melalui saluran kabel bawah laut yang beroperasi sebanyak empat sirkuit, yaitu sirkuit 1 dan 2 yang telah beroperasi sejak 1999 dan sirkuit 3 dan 4 yang beroperasi sejak 2014.

Penggunaan kabel laut jenis *three core* diunggulkan sebagai media untuk mentransmisikan tenaga listrik pada wilayah kepulauan dan perairan. Kabel laut jenis *three core* adalah kabel dengan tiga inti didalamnya yang mempunyai fasa R, S, dan T di dalam satu penghantar kabel. Isolasi pada kabel laut *three core* berperan penting terhadap kemampuan dan kekuatan mekanis kabel jika digunakan dalam jangka panjang dan didesain agar mampu bertahan terhadap tekanan air, gelombang air laut, dan kondisi lingkungan yang dapat mempengaruhi bagian dalam kabel (Resner dan Paszkiewicz, 2021)

Terdapat dua jenis isolasi kabel laut *three core* yaitu; isolasi minyak (*Paper Insulation in Insulation Cable*) dan isolasi XLPE (*Cross Linked Polyethylene*) yang digunakan pada setiap penghantar kabel. Isolasi pada kabel laut *three core* mencegah kemungkinan terjadinya gangguan mekanis yang dapat mempengaruhi penyaluran daya dan efisiensi transmisi. Namun kekuatan isolasi pada kabel laut *three core* akan menurun jika digunakan dalam jangka waktu yang panjang dan memiliki resiko terjadinya kerusakan yang berdampak berhentinya proses penyaluran daya listrik (Hsieh, dkk, 2022)

Oleh karena itu perlu adanya perbandingan unjuk kerja antara kabel *three core* isolasi minyak dengan kabel *three core* isolasi XLPE agar mampu mengetahui karakteristik kabel yang paling baik digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik pada Pulau Jawa ke Pulau Bali.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan penggunaan kabel *three core* isolasi

minyak dengan kabel *three core* isolasi XLPE terhadap kemampuan penyaluran daya dan efisiensi saluran transmisi mengacu pada perhitungan nilai parameter listrik dan perbandingan karakteristiknya.

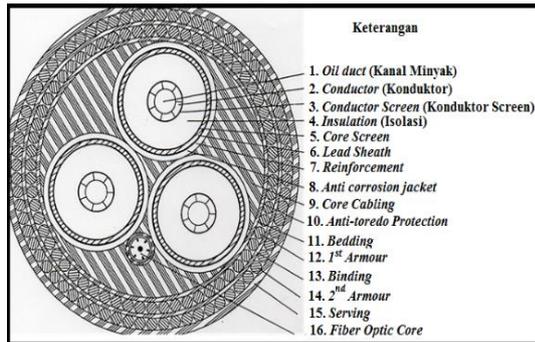
Sesuai dengan pendahuluan di atas maka dapat diambil rumusan masalah yaitu, (1) Berapakah nilai parameter listrik kabel laut *three core* isolasi minyak dan kabel laut isolasi XLPE Jawa – Bali? Nilai parameter listrik tersebut adalah perhitungan tahanan arus bolak balik, kemampuan hantar arus (KHA), rugi daya, sisi terima kabel dan efisiensi pada kabel *three core* isolasi minyak dengan isolasi XLPE (2) Bagaimana karakteristik kabel yang lebih baik mengacu pada nilai parameter listrik antara kabel isolasi minyak dan kabel isolasi XLPE Jawa – Bali?. Dari rumusan masalah diatas dapat diambil tujuan penelitian yaitu (1) Menentukan nilai parameter listrik antara kabel saluran bawah laut *three core* isolasi minyak dan isolasi XLPE Jawa – Bali? Nilai parameter listrik tersebut adalah perhitungan tahanan arus bolak balik, kemampuan hantar arus (KHA), rugi daya, sisi terima kabel dan efisiensi pada kabel *three core* isolasi minyak dengan isolasi XLPE (2) Menentukan karakteristik kabel yang lebih baik mengacu pada nilai parameter listrik antara kabel isolasi minyak dan kabel isolasi XLPE Jawa – Bali.

Saluran Kabel Bawah Laut *Three Core* Isolasi Minyak (*Paper Insulation In Oil-Filled Cable*)

Kabel laut jenis *three core* isolasi minyak memiliki tiga inti dalam satu penghantar kabel yang memiliki fhasa R, S dan T yang dilengkapi dengan kertas penyerap (*oil impregnated paper*) yang dapat menyerap minyak melalui *oil duct* (saluran minyak) dan kelebihan kabel isolasi minyak mampu untuk menghantarkan energi listrik sampai dengan tegangan 400kV (Ardelean dan Minnebo, 2015)

Pemasangan Kabel laut jenis *three core* isolasi minyak (*Paper Insulation In Oil-Filled Cable*) merk Pirelli dari perusahaan asal Italia dipasang agar mempermudah penyaluran daya dan efisiensi transmisi tenaga listrik. Kabel *three core* isolasi minyak mempunyai tegangan kerja 150kV digunakan sebagai media untuk menyalurkan tenaga listrik dari Pulau Jawa ke Bali terdapat pada sirkuit 1 dan 2 Ketapang – Gilimanuk yang terpasang sejak 1999 dan mulai beroperasi pada tahun 2000. Kabel laut *three core* isolasi minyak ini memberikan banyak keuntungan dan manfaat sebagai media penyaluran tenaga listrik yang handal. Gambar konstruksi kabel bawah laut *three core* isolasi Minyak ditunjukkan pada Gambar 1.

Perbandingan Penggunaan Kabel Isolasi Minyak (*Paper Insulation In Oil-Filled Cable*) Dengan Kabel Isolasi XLPE Terhadap Kemampuan Penyaluran Daya dan Efisiensi pada Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 150kV Jawa-Bali



Gambar 1. Konstruksi kabel three core isolasi Minyak

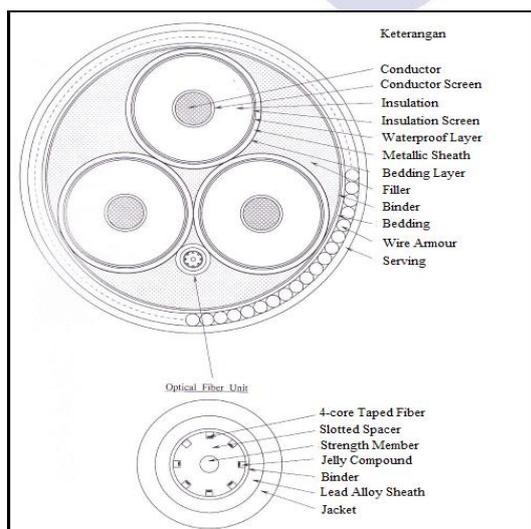
(Sumber: Tim Maintenance PT. PLN (Persero) Cable Head Banyuwangi, 2022)

Kabel Three Core isolasi XLPE (*Cross Linked Polyethylene*)

Pada dasarnya kabel bawah laut *three core* isolasi XLPE tidak jauh berbeda dengan kabel bawah laut *three core* isolasi minyak, perbedaannya terletak pada jenis isolasinya.

Kelebihan kabel bawah laut isolasi XLPE memiliki karakteristik yang tahan panas sehingga tidak meleleh ketika digunakan dan memiliki suhu tempreatur saat beroperasi sebesar 90° C (Sanjaya, 2018)

Kabel jenis ini digunakan sebagai media penyaluran daya listrik Jawa – Bali yang terdapat pada sirkuit 3 dan 4 Ketapang – Gilimanuk dan beroperasi sejak tahun 2014. Gambar konstruksi kabel laut *three core* isolasi XLPE ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konstruksi kabel bawah laut three core isolasi XLPE

(Sumber: Tim Maintenance PT. PLN (Persero) Cable Head Banyuwangi, 2022)

Saluran Transmisi Kabel Laut (*Submarine Cable*)

Saluran transmisi kabel bawah laut sangat cocok digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik pada wilayah kepulauan seperti Indonesia agar terciptanya penyaluran daya secara merata, contohnya Pulau Jawa dan Pulau Bali. Kabel laut didesain agar mampu bertahan terhadap gelombang air laut, tekanan tinggi, melindungi inti dalam dari air, dan faktor gangguan alam lainnya yang mampu mempengaruhi kabel bawah laut baik dari internal maupun eksternal. Agar terjadinya efisiensi transmisi maka penyaluran tenaga listrik pada Pulau Jawa ke Pulau Bali menggunakan media kabel bawah laut.

Penggunaan kabel laut memiliki peranan penting dalam menghubungkan antara Gardu Induk (GI) dengan GI lain melalui bawah permukaan laut agar dapat terjadinya penyaluran daya listrik yang efisien dan ekonomis mengingat angka konsumsi listrik yang naik pesat, kenaikan biaya dan resiko polusi udara dari pembangkit (Wang, dkk, 2018)

Fungsi Dasar Kabel Laut

Fungsi dasar kabel listrik bawah laut memiliki beberapa fungsi yaitu. (Leibfried dan Zöller, 2010)

1. Sebagai penghantar energi listrik yang didesain mampu untuk melindungi kabel dari air, gelombang, tekanan dan kekuatan alam yang dapat mempengaruhi sistem transmisi.
2. Memudahkan sebagai media penghantar energi listrik.
3. Keamanan dan estetika media penghantar (kabel laut) saat digunakan.

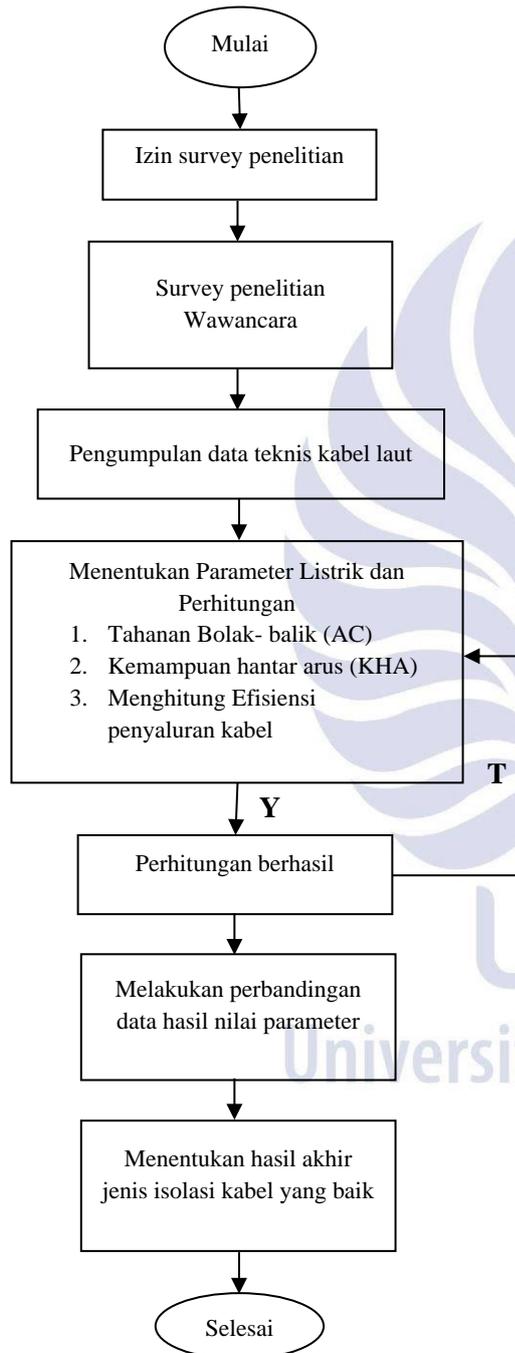
METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode penelitian survey terhadap penggunaan kabel bawah laut jenis *three core* isolasi minyak dan kabel bawah laut jenis *three core* isolasi XLPE dengan cara mengumpulkan data teknis yang diambil dari PT. PLN (Persero) CH Ketapang, Banyuwangi. Data teknis yang diambil untuk penelitian berupa konstruksi kabel dan spesifikasi kabel.

Pengumpulan data digunakan untuk menentukan parameter listrik antara kabel bawah laut *three core* isolasi minyak dan kabel bawah laut *three core* isolasi XLPE agar dapat dilakukan perbandingan penggunaannya. Penentuan nilai parameter dan perhitungan tersebut yaitu:

- a. Tahanan arus bolak balik (AC)
- b. Kemampuan hantar arus (KHA)
- c. Rugi daya
- d. Sisi terima kabel
- e. Efisiensi penyaluran kabel

Setelah menentukan nilai - nilai parameter listrik, lalu menentukan karakteristik isolasi kabel yang baik saat digunakan sebagai media penyaluran tenaga listrik mengacu pada nilai parameter listrik antara kabel jenis *three core* isolasi minyak dengan kabel *three core* isolasi XLPE Jawa – Bali. Penelitian ini memiliki beberapa proses yang harus dijalankan agar dapat terlaksananya keberhasilan dalam penelitian yang dapat dilihat diagram alir penelitian pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi Kabel *Three Core* Isolasi Minyak dan Isolasi XLPE

Kabel laut jenis *three core* isolasi minyak yang digunakan sebagai penghantar energi listrik pada Pulau Jawa dan Pulau Bali.

Tabel 1. Spesifikasi Kabel Bawah Laut *Three Core* Isolasi Minyak

Spesifikasi			
Komponen	Bahan	Unit	Ukuran
Kanal Minyak (<i>Oil duct</i>)	Aluminium	Diameter	12 mm
Konduktor	Tembaga	Penampang	300 mm ²
		Diameter	23,2 mm
Konduktor Screen	Kertas Karbon & Kertas Duplex Tape	-	-
Isolasi	Kertas	Ketebalan	10 mm
Core Screen	Duplex tape & copper woven rayon tape	-	-
Lead Sheath	Extruded half Cu Alloy	Diameter	51,9 mm
		Ketebalan	26 mm
Reinforcement	Tapes stainless steel	Ketebalan	0,3 mm
Anti-Corrosion Jacket	Extruded Polyethylene Sheath	Ketebalan	3mm
		Diameter	60mm
Core Cabling	Plastic binder	Diameter	130 mm
Anti-Teredo Protection	Copper tape	Diameter	0,1 mm
Bedding	Polypropylene yarn	Ketebalan	2 mm
Armour Kesatu (1 st Armour)	Galvanized Steel Wire	Diameter	7 mm
		Ketebalan	2 mm
Binding	Polypropylene yarn	Ketebalan	2 mm
		Diameter	3,5 mm
Armour kedua (2 nd Armour)	Galvanized Steel Wire	Ketebalan	7 mm
		Diameter	173 mm
Serving	Polypropylene yarn	Ketebalan	3,5 mm
		Diameter	173 mm
Fiber Optic Core	12 SMR Optical Fibers Cable with Power Cores	Bobot di udara	71 kg/m
		Bobot di air	54 kg/m

Pada sirkuit 1 dan 2 memiliki komponen dan spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 1. Penggunaan kabel bawah laut isolasi XLPE (*Cross*

Perbandingan Penggunaan Kabel Isolasi Minyak (*Paper Insulation In Oil-Filled Cable*) Dengan Kabel Isolasi XLPE Terhadap Kemampuan Penyaluran Daya dan Efisiensi pada Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 150kV Jawa-Bali

Linked Polyethylene) dengan tegangan kerja 150kV pada memiliki spesifikasi yang dijabarkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Kabel Bawah Laut *Three Core* Isolasi XLPE

Spesifikasi			
Komponen	Bahan	Unit	Ukuran
Konduktor	Tembaga	Penampang	300 mm ²
		Diameter	21 mm
Konduktor	<i>Semikonduktif Screen polyethylene</i>	Ketebalan	1,6 mm
		Diameter	21 mm
Isolasi	XLPE	Ketebalan	22 mm
Isolasi	<i>Semikonduktif Screen polyethylene</i>	Ketebalan	1 mm
Waterproof Layer	-	Ketebalan	0,8mm
<i>Metallic Sheath</i>	<i>Lead alloy</i>	Ketebalan	2,9 mm
<i>Bedding Layer</i>	<i>Polypropylene yarn</i>	Ketebalan	0,2 mm
<i>Wire Armour</i>	Tembaga	Diameter	8 mm
<i>Optical fiber unit</i>	<i>Lead alloy sheath jacket</i>	Diameter	20 mm

Parameter Listrik Kabel Bawah Laut *Three Core* Isolasi Minyak dan Isolasi XLPE

Menentukan parameter listrik awal antara kabel bawah laut *three core* isolasi minyak dengan isolasi XLPE bertujuan untuk acuan dalam perhitungan. Dalam menentukan parameter listrik antara kabel laut *three core* isolasi minyak (*Paper Insulation In Oil-Filled Cable*) dengan isolasi XLPE (*Cross linked polyethylene*) terdapat 13 macam parameter listrik pada kabel laut isolasi minyak dan 12 macam parameter listrik pada kabel laut isolasi XLPE yang bernilai mutlak dan akurat sesuai kontruksi dan spesifikasi kabel laut.

Nilai Parameter listrik ini digunakan untuk beberapa perhitungan yang nantinya dapat diambil kesimpulan berupa hasil nilai parameter akhir secara akurat. Nilai yang akurat menghasilkan perbandingan nilai parameter listrik akhir yang dapat diamati karakteristik terbaik diantara 2 kabel laut isolasi minyak dengan kabel laut isolasi XLPE. Hasil dan nilai parameter listrik awal yang telah ditentukan dapat diamati pada Tabel dibawah ini. Kabel *three core* isolasi minyak dapat diamati pada Tabel 3. Parameter listrik awal kabel bawah laut *three core* isolasi XLPE ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Parameter Listrik Kabel Bawah Laut *Three Core* Isolasi Minyak

Uraian	Parameter	Besaran	Satuan
Tegangan	V_{L-L}	150	kV
Tempreatur suhu awal penghantar	θ_0	20	°C
Tempreatur suhu maksimum	θ_1	85	°C
Tempreatur lingkungan	θ_L	31	°C
Koefisien tempreatur tembaga	α_{cu}	0,00393	/ °C
Diameter penghantar	d_c	23,2	mm
Luas penampang	L_c	300	mm ²
Ketebalan isolasi	T_1	10	mm
Tahanan jenis tembaga	ρ_0	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	Ωm
Frekuensi	f	50	Hz
Konstanta pejal	C_s	1	-
Konstanta pejal	C_p	0,8	-

Tabel 4. Parameter Listrik Kabel Bawah Laut *Three Core* Isolasi XLPE

Uraian	Parameter	Besaran	Satuan
Tegangan	V_{L-L}	150	kV
Tempreatur suhu awal penghantar	θ_0	20	°C
Tempreatur suhu maksimum	θ_1	85	°C
Tempreatur lingkungan	θ_L	31	°C
Koefisien tempreatur tembaga	α_{cu}	0,00393	/ °C
Diameter penghantar	d_c	21	mm
Luas penampang	L_c	300	mm ²
Ketebalan isolasi	T_1	22	mm
Tahanan jenis tembaga	ρ_0	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	Ωm
Frekuensi	f	50	Hz
Konstanta pejal	C_s	1	-
Konstanta pejal	C_p	0,8	-

Tahanan Arus Searah

Tahanan arus searah / Tahanan DC kabel laut three core isolasi minyak dan isolasi X PE dapat diukur dengan mengacu nilai parameter listrik pada Tabel 3 dan 4. Perhitungan tahanan arus searah menghitung resistansi DC pada tempratur operasi (20 °C) per meter dan suhu maksimal (85 °C) agar dapat mengetahui nilai R_{dc0} dan R_{dc1} menggunakan persamaan 1 dan persamaan 2.

$$R_{dc0} = \frac{\rho}{A} \tag{1}$$

$$R_{dc1} = R_{dc0} [1 + \alpha_{cu} (\theta_1 - \theta_2)] \tag{2}$$

Dengan menggunakan persamaan 1 dan 2, diperoleh perhitungan R_{dc0} pada kabel *three core* isolasi minyak pada suhu (20 °C) adalah $5,747 \times 10^{-5} \Omega/m$. Perhitungan R_{dc1} pada kabel *three core* isolasi minyak pada saat suhu maksimum (85 °C) adalah $7,215 \times 10^{-5} \Omega/m$. Perhitungan R_{dc} pada kabel *three core* isolasi XLPE pada saat tempratur operasi (20 °C) per meter adalah $5,747 \times 10^{-5} \Omega/m$. Perhitungan R_{dc1} pada kabel *three core* isolasi XLPE pada saat suhu maksimum (85 °C) adalah $7,215 \times 10^{-5} \Omega/m$.

Perhitungan Faktor Kulit (Skin Effect) Pada Kabel

Kabel memiliki bentuk pejal maka nilai konstanta efek kulit (K_s) adalah 1. Perhitungan dilakukan untuk mengetahui reaktansi *skin effect* (X_s) dan faktor efek kulit (Y_s) dapat menggunakan persamaan 3 dan persamaan 4.

$$X_s = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{dc}}} \cdot 10^{-7} \cdot K_s \tag{3}$$

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0,8 \cdot X_s^4} \tag{4}$$

Dengan menggunakan persamaan 3 dan 4, nilai dari hasil perhitungan faktor kulit (*skin effect*) X_s dan Y_s pada kabel isolasi minyak adalah $X_s = 1,319 \Omega$ dan $Y_s = 1,558 \times 10^{-2}$.

Perhitungan Efek Pendekatan (Proximity Effect)

Perhitungan efek pendekatan dapat digunakan persamaan untuk mengetahui nilai X_p dan Y_p pada kabel *three core* isolasi minyak dengan kabel isolasi XLPE. Prhitungan efek pendekatan dapat menggunakan persamaan 5 dan 6.

$$X_p = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{dc}}} \cdot 10^{-7} \cdot K_p \tag{5}$$

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8 \cdot X_p^4} \cdot \left(\frac{dc}{s}\right) \cdot \left[0,312 \left(\frac{dc}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_p^4}{(192 + 0,8 \cdot X_p^4)} + 0,27}\right] \tag{6}$$

Dengan menggunakan persamaan 5 dan 6, nilai dari hasil perhitungan efek pendekatan (*Proximity Effect*) X_p dan Y_p dengan nilai $K_p = 0,8$ adalah $X_p = 1,18 \Omega$ dan $Y_p = 1,5636 \times 10^{-2}$. Sedangkan nilai dari hasil perhitungan efek pendekatan (*Proximity Effect*) X_p dan Y_p dengan nilai $K_p = 1$ adalah $X_p = 1,3193 \Omega$ dan $Y_p = 2,6540 \times 10^{-2}$.

Perhitungan Tahanan Arus Bolak-balik

Untuk mengetahui nilai tahanan arus bolak balik maka dilakukan perhitungan dengan persamaan 7.

$$R_{AC} = R_{DC} (1 + Y_s + Y_p) \tag{7}$$

Dengan menggunakan persamaan 7, maka diperoleh nilai R_{AC} pada kabel isolasi minyak adalah $7,440 \cdot 10^{-5} \Omega/m$. Sedangkan nilai R_{AC} pada kabel isolasi XLPE adalah $7,5190 \cdot 10^{-5} \Omega/m$.

Dari perhitungan di atas maka didapatkan parameter listrik antara kabel laut *three core* isolasi minyak dan *three core* isolasi XLPE maka didapatkan perbandingan tahanan arus searah, faktor kulit, efek pendekatan dan tahanan arus bolak balik dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan nilai parameter kabel

Parameter	Kabel Laut <i>Three core</i> isolasi minyak	Kabel Laut <i>Three core</i> isolasi XLPE
R_{dc0}	$5,747 \cdot 10^{-5} \Omega/m$	$5,747 \cdot 10^{-5} \Omega/m$
Y_s	$1,558 \cdot 10^{-2}$	$1,5586 \cdot 10^{-2}$
Y_p	$1,5636 \cdot 10^{-2}$	$2,6540 \cdot 10^{-2}$
R_{dc1}	$7,215 \cdot 10^{-5}$	$7,215 \cdot 10^{-5}$
R_{ac}	$7,440 \cdot 10^{-5}$	$7,5190 \cdot 10^{-5}$

Kemampuan Penyaluran Daya

Kemampuan dalam penyaluran daya tidak terlepas dari Kemampuan Hantar Arusnya (KHA) dikarenakan ada pengaruh oleh arus yang membawa tegangan listrik.

Kemampuan Hantar Arus

Nilai kemampuan hantar arus dapat dicari dengan menggunakan persamaan 8.

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - Pd(0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4))}{R_{ac}[T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \cdot 0,5 \tag{8}$$

Dengan menggunakan persamaan 8, diperoleh nilai kemampuan KHA pada kabel isolasi minyak adalah

Perbandingan Penggunaan Kabel Isolasi Minyak (*Paper Insulation In Oil-Filled Cable*) Dengan Kabel Isolasi XLPE Terhadap Kemampuan Penyaluran Daya dan Efisiensi pada Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 150kV Jawa-Bali

612 A. Sedangkan perhitungan kemampuan hantar arus pada kabel isolasi XLPE adalah 790,77 A.

Daya sisi kirim

Untuk menghitung daya sisi kirim kabel (P_s) bawah laut *three core* isolasi minyak dengan isolasi XLPE ditentukan dengan menggunakan persamaan 9.

$$P_s = \sqrt{3} \cdot V_H \cdot I \cdot \cos\phi \quad (9)$$

Dengan menggunakan persamaan 9, diperoleh daya sisi kirim pada kabel isolasi minyak adalah $P_s = 158,84$ MW. Sedangkan daya sisi kirim pada kabel isolasi XLPE adalah $P_s = 205,22$ MW

Rugi Daya Kabel

Untuk mengetahui rugi daya pada kabel maka menggunakan persamaan 10 dan persamaan 11.

$$P_p = I^2 \cdot R_{eff} \quad (10)$$

$$R_{eff} = R_{ac}(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (11)$$

Dengan menggunakan persamaan 10 dan 11, diperoleh nilai rugi daya kabel isolasi minyak adalah $P_p = 139,54$ Watt/m/phase dan nilai rugi daya kabel isolasi XLPE adalah $P_{ic} = 233,03$ Watt/m/phase.

Rugi Daya Total Kabel

Rugi daya total pada kabel dapat dihitung dengan menjumlahkan nilai P_p dan P_{ic} menggunakan persamaan 12.

$$P_{loss} = P_p + P_{ic} \quad (12)$$

Dengan menggunakan persamaan 12, nilai rugi daya total adalah $P_{loss} = 362,57$ Watt = 0,000362,57 MW.

Daya Sisi Terima Kabel

Nilai daya yang dapat diterima pada sisi terima kabel isolasi minyak dan isolasi XLPE dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 13.

$$P_r = P_s - P_{loss} \quad (13)$$

Dengan menggunakan persamaan 13, daya sisi terima kabel isolasi minyak adalah $P_r = 158,83$ MW. Dan daya sisi terima kabel isolasi XLPE adalah $P_r = 205,21$ MW

Efisiensi Saluran Kabel Bawah Laut

Untuk mengetahui nilai efisiensi saluran kabel *three core* bawah laut diketahui pada Tabel 6 parameter,

hasil nilai parameter akhir kabel isolasi minyak dan isolasi XLPE.

Tabel 6. Nilai Parameter perbandingan antara kabel bawah laut *three core* isolasi minyak dan *three core* isolasi XLPE

Parameter	Kabel Isolasi Minyak (Paper Insulation In Oil Filled Cable)	Kabel Isolasi XLPE
Tegangan Kerja	150 V	150 V
Tahanan Bolak-balik AC	$7,440 \cdot 10^{-5}$	$7,5190 \cdot 10^{-5}$
Tahanan AC (R_{eff})	$37,34 \cdot 10^{-4} \Omega/m$	$37,73 \cdot 10^{-4} \Omega/m$
Kemampuan Hantar Arus (KHA)	612 A	790,77 A
Daya sisi kirim (P_s)	158,83 MW	205,21 MW
Daya sisi terima (P_r)	158,83 MW	205,21 MW
Efisiensi Saluran Transmisi	99,9937043 %	99,9951271 %

Perhitungan efisiensi pada kabel bawah laut dapat dihitung menggunakan persamaan 14.

$$\pi = \frac{P_r}{P_s} \times 100\% \quad (14)$$

Dengan menggunakan persamaan 13, nilai efisiensi pada kabel laut isolasi minyak adalah $\pi = 99,9937043$ %. Dan nilai efisiensi pada kabel laut isolasi XLPE $\pi = 99,9951271$ %.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan serta dilihat dari rumusan masalah yang ada, maka dapat ditarik simpulan sebagai berikut. Pada lembar tabel 6 dapat diamati hasil nilai parameter akhir yang digunakan untuk membandingkan kabel *three core* isolasi minyak dengan kabel *three core* isolasi XLPE menunjukkan bahwa kabel isolasi XLPE lebih unggul karena mempunyai nilai kemampuan hantar arus (KHA), daya sisi kirim, daya sisi terima, dan efisiensi yang lebih tinggi mengacu pada nilai parameternya dibandingkan kabel isolasi minyak. Berdasarkan perhitungan nilai parameter listrik dan hasil perbandingan, maka penggunaan kabel *three core* isolasi XLPE lebih unggul untuk digunakan pada

sistem interkoneksi Jawa-Bali daripada kabel laut *three core* isolasi minyak.

Saran

Di akhir penelitian penulis memberi saran kepada PT. PLN (Persero) CH Ketapang, PT. PLN UIT JBM, PT. PLN UP2B Jawa Timur, PT. PLN UP2B Bali agar dapat melakukan upaya peningkatan dan penambahan unit kabel *three core* isolasi XLPE untuk mengantisipasi pertumbuhan konsumsi tenaga listrik pada Pulau Jawa dan Pulau Bali pada tahun 2049 dan siap dioperasikan pada tahun 2050. Pergantian kabel yang telah rusak seperti kabel *single core merk* Furukawa 1 dan 2 pada CH Ketapang agar dapat memaksimalkan penyaluran daya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardelean. Mircea dan Minnebo. Philip. 2015. *HVDC Submarine Power Cables in The World*. Institute for Energy and Transport. ISSN 1831-9424.
- George. Sujo P dan Ashok. S. 2021. *Adaptive Distance Protection For Grid-Connected Wind Farms Based on Optimal Quadrilateral Characteristics*. Electrical Engineering Department, National Institute of Technology Calicut, Kerala, India. Volume 93.
- Hsieh. Meng-Chang, Chen. Bang-Fuh, Wang. Yanyang, Chang. Hsun-Cheng, Liu. Wen-Hsiu dan Hsu. Hung-Lin. 2022. *Determining Optimal Number Of Cores in a Submarine Power Cable*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering (IJNAOE).
- Leibfried. Thomas dan Zöller. Thomas. 2010. *Transmission of Electrical Power Through Subsea-Cables Over Long Distances*. EMBT Conference. Karlsruhe Institute of Technology, International EMBT Conference.
- Mulia. Sandy Bhawana dan Hidayat. Syarif. 2014. *Analisis Kekuatan Mekanis Dari Kabel Power Bawah Laut*. Jurnal S1 Teknik Elektro. Fakultas Teknik Elektro dan Informatika. Jurnal Electrans Vol 13, No 2. Institut Teknologi Bandung.
- Nadolny. Zbigniew. 2022. *Electric field distribution and dielectric losses in XLPE insulation and semiconductor screens of high-voltage cables*. Division of High Voltage and Electrotechnical Materials, Institute of Electric Power Engineering, Faculty of Environmental Engineering and Energy, Poznan University of Technology, 60-965 Poznan, Poland
- Noviana. Okma, Hermawan dan Karnoto. 2011. *Perbandingan Rugi Daya, Rugi Tegangan, Dan KHA Pada Saluran Bawah Laut Jawa – Madura Antara Kabel Inti Tunggal Isolasi XLPE dengan Kabel Minyak (Paper Insulation In Oil-Filled Cable) 3 Inti 150kV*. Artikel Ilmiah S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- Tim Maintenance PT. PLN (Persero) Cable Head Banyuwangi. 2022. *Data Konstruksi Dan Spesifikasi Kabel Laut Three Core*. Banyuwangi. PT. PLN (Persero). Indonesia.
- PT. PLN (Persero). 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Saluran Kabel Tegangan Tinggi dan Saluran Kabel Laut Tegangan Tinggi (SKTT/SKLT)*. Jakarta Selatan 12160. No.0520-1.K/DIR/2014.
- Resner. Lezek dan Paszkiewicz. Sandra. 2021. *Radial Water Barrier in Submarine Cables, Current Solutions and Innovative Development Directions*. Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics. Journal Volume 14, 2761. West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Poland
- Sanjaya. Martin. 2018. *Analisis Kapasitas Kabel Bawah Laut Terhadap Pertumbuhan Beban Pulau Bali Menggunakan Back propagation neural Network*. Skripsi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember.
- Thomas. Worzyk. 2009. *Submarine Power Cables : Design, Installation, Repair, Environmental Aspects*. Springer. Sweden.
- Viespoli. Luigi Mario, Johanson. Audun, Alvaro. Antonio, Nyhus. Bard dan Berto. Filippo. 2020. *Subsea Power Cable Sheathing: An Investigation of Lead Fatigue Performance*. Departement of Mechanical and Industrial Engineering, Norwegian University of Science and Technology. Journal Volume 28, Pages 344-351.
- Wang. Changlong, Dargaville. Roger dan Jeppesen. Matthew. 2018. *Power System Decarbonisation With Global Energy Interconnection – A Case Study On The Economic Viability Of International transmission network in Australasia*. The University of Melbourne, Carlton, Victoria 3100, Australia. KeAi Journal. Volume 1, No. 4, 507-519.