

# 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 150 kV

Okma Noviana<sup>[1]</sup>, Dr. Ir. Hermawan, DEA<sup>[2]</sup>, Karnoto, S.T., M.T.<sup>[2]</sup>

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jln. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

## Abstract

Transmission of electric power from power plants to the load center or customer hold very important part. It is necessary to calculate power loss, voltage drop, and current-carrying capacity. Power loss refer to the heat generated in cable conducting parts (phase conductors, sheath, and armour) and in cable insulating part. Heating power in phase conductors, sheath, and armour mainly depend on current values. When dealing with underground power cable or submarine power cable, sheath circulating currents can be induced. These currents produce power loss in the sheath and decrease the ampacity (current-carrying capacity) of the cables.

This paper discussed the calculation and comparison of power loss, voltage drop, and current-carrying capacity in three phase single-core XLPE insulated cables and 3-cores oil filled cable of 150 kV rated voltage. Both of them had a same cross section of conductor ( $300 \text{ mm}^2$ ), with copper conductor. Two laying conditions (trefoil and flat formation) are considered for three phase single-core cables, sheaths are bonded solidly at both ends.

The smallest power loss occur in the conductors of the trefoil formation and the value is 107635,4536 watt at full load (300 A). The biggest power loss occur in the 3-cores oil filled cable with value 170608,7556 watt at full load (300 A). The percentage voltage drop reaches maximum of 0,13995 % in the 3-cores oil filled cable and the minimum of 0,07389 % in the leading phase of flat with separation formation without transposition. The leading phase cable of the flat-touching formation has a biggest current-carrying capacity and the value is 591,2766531 A. The 3-cores oil filled cable has a smallest current-carrying capacity with value 415,4620701 A.

Keywords : transmission, power loss, voltage drop, high voltage cable, insulation, current-carrying capacity

## I. PENDAHULUAN

Proses penyaluran daya listrik tidak dapat dipisahkan dari proses pembangkitan. Daya yang dibangkitkan pada pusat-pusat pembangkit akan disalurkan melalui saluran distribusi untuk jarak dekat dan saluran transmisi untuk jarak jauh. Penyaluran daya tersebut dapat dilakukan melalui saluran udara, saluran bawah tanah, dan saluran bawah laut.

Tujuan Tugas Akhir ini adalah berupa analisa perbandingan besarnya rugi-rugi daya, rugi-rugi tegangan (*voltage drop*), serta KHA yang terjadi pada saluran bawah laut Jawa – Madura antara kabel inti tunggal berisolasi XLPE dengan kabel minyak (*paper insulation in oil-filled cable*) 3 inti 150 kV.

Dalam tugas akhir ini, masalah dibatasi hanya pada perhitungan rugi daya, rugi tegangan (*voltage drop*), dan kemampuan hantar arus (KHA) pada kabel inti tunggal dan 3 inti. Tidak membahas struktur kimia isolasi XLPE dan kertas. Tidak membahas instalasi pemasangan kabel bawah laut secara spesifik dan perhitungan didasarkan pada asumsi bahwa sistem merupakan *single circuit*.

## II. DASAR TEORI

### 2.1 Fungsi Dasar Kabel

Kabel listrik adalah media untuk menyalurkan energi listrik. Kemampuan hantar sebuah kabel listrik ditentukan oleh KHA yang dimilikinya.

Secara sederhana kabel memiliki fungsi dasar sebagai berikut :

1. Media penghantar energi listrik
2. Memudahkan instalasi kelistrikan
3. Keamanan instalasi listrik

### 2.2 Rod, Wire, Konduktor, dan Kabel

Kabel tenaga yang digunakan sebagai media penghantar energi listrik dari pusat-pusat pembangkit ke pusat-pusat beban atau pelanggan dibuat melalui proses seperti di bawah ini :

ROD → Wire → Konduktor → Kabel  
1            2                    3

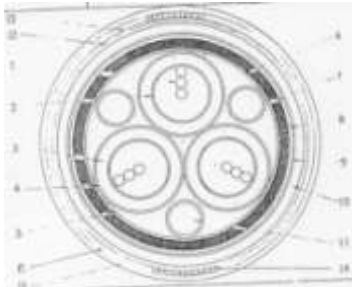
- 1 : *Drawing* (membentuk diameter yang dituju).
- 2 : *Stranding* (menggabungkan beberapa wire sehingga kabel menjadi fleksibel).
- 3 : *Extrude* (membungkus konduktor dengan isolasi sehingga kabel aman bagi pengguna).

[1] Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Diponegoro  
[2] Dosen Pengajar Teknik Elektro Universitas Diponegoro

### III. PERBANDINGAN SALURAN BAWAH LAUT JAWA – MADURA ANTARA KABEL INTI TUNGGAL ISOLASI XLPE DENGAN KABEL 3 INTI BERISI MINYAK ISOLASI KERTAS 150 KV

#### 3.1 Saluran Bawah Laut Menggunakan Kabel 3 Inti Berisi Minyak Isolasi Kertas

Kabel laut yang terpasang saat ini pada saluran transmisi bawah laut antara pulau Jawa dan pulau Madura menggunakan kabel 3 inti jenis kabel minyak (*oil filled cable*) merk BICC dari Inggris.



Gambar 1. Kabel laut merk BICC pada saluran bawah laut Jawa – Madura.

Tabel 1. Spesifikasi kabel laut 3 inti merk BICC pada saluran bawah laut Jawa – Madura.

No.	Bagian	Bahan	Satuan	Ukuran
1.	Konduktor	Tembaga	Penampang Diameter	300 mm <sup>2</sup> 22,5 mm
2.	Konduktor screen	Kertas karbon	Tebal Diameter	0,3 mm 23,1 mm
3.	Isolasi	Kertas	Tebal Diameter	12,5 mm 48,1 mm
4.	Isolasi screen	Kertas karbon dan non-ferrous metal tape/kertas	Tebal Diameter	0,4 mm 48,9 mm
5.	Laid-up cores	-	-	105,6 mm
6.	Binder	CWF tape	Tebal Diameter	0,32 mm 106,2 mm
7.	Sheath	Lead	Tebal Diameter	4,0 mm 114,2 mm
8.	Bedding	BP cotton tape	Tebal Diameter	0,3 mm 114,8 mm
9.	Reinforcement	Non ferrous metal tape	Tebal Diameter	2 x 0,18 mm 115,6 mm
10.	Binder	Fabric tape	Tebal Diameter	0,25 mm 116,1 mm
11.	Anti corrosion sheath	Extruded polymeric sheath (PE)	Tebal Diameter	2,96 mm 124,1 mm
12.	Anti toredo tape binder	Brass	Tebal Diameter	2 x 0,1 mm 124,5 mm
13.	Bedding	Hessian tapes	Tebal Diameter	1,5 mm 127,6 mm
14.	Armour wires	Galvanized steel wires	Jumlah wire Diameter	60 buah 6 mm

			wire Diameter	139,6 mm
15.	Binder	Fabric jute	Tebal Diameter	0,25 mm 140,1 mm
16.	Serving	Jute	Jumlah x Tebal Diameter	2 x 2,30 mm 149,3 mm
17.	Oil duct	Aluminium	Inner diameter Outer diameter	18 mm 20 mm

#### 3.2 Saluran Bawah Laut Kabel Inti Tunggal Berisolasi XLPE

Pada dasarnya saluran kabel laut tegangan tinggi (SKLT) hampir sama dengan saluran kabel tegangan tinggi (SKTT) atau lebih dikenal dengan saluran kabel bawah tanah tegangan tinggi. Perbedaannya hanya terletak pada lapisan perlindungan yang lebih banyak pada saluran kabel bawah laut.



Gambar 2. Konstruksi kabel inti tunggal berisolasi XLPE 150 kV.

Tabel 2. Spesifikasi kabel laut inti tunggal yang diasumsikan akan digunakan pada saluran bawah laut Jawa – Madura.

No.	Bagian	Bahan	Satuan	Ukuran
1.	Konduktor	Tembaga	Penampang Diameter	300 mm <sup>2</sup> 20,90 mm
2.	Konduktor screen	Semikonduktif polyethylene	Tebal Diameter	1,2 mm 23,3 mm
3.	Isolasi	XLPE	Tebal Diameter	19 mm 61,3 mm
4.	Isolasi screen	Semikonduktif polyethylene	Tebal Diameter	1,0 mm 63,3 mm
5.	Semiconductive water sealing	Kapas semikonduktif	Tebal Diameter	0,5 mm 64,3 mm
6.	Sheath	Lead	Tebal Diameter	2,4 mm 69,1 mm
7.	Semiconductive water sealing	Kapas semikonduktif	Tebal Diameter	0,5 mm 70,1 mm
8.	Wire armour	Tembaga	Diameter armour Diameter	5 mm 80,1 mm
9.	Selubung luar dan anti korosi	HDPE	Tebal Diameter	4,5 mm 89,1 mm

#### IV. ANALISA PERBANDINGAN RUGI DAYA, RUGI TEGANGAN, DAN KHA PADA SALURAN BAWAH LAUT JAWA - MADURA

Dalam perhitungan yang akan dilakukan, digunakan parameter-parameter seperti pada tabel di bawah ini :

Tabel 3. Parameter-parameter perhitungan kabel inti tunggal isolasi XLPE

No.	Parameter	Besaran	Satuan
1.	$V_{L-L}$	150	kV
2.	$\theta_0$	20	$^{\circ}\text{C}$
3.	$\theta_1$	85	$^{\circ}\text{C}$
4.	$\theta_{sh}$	50	$^{\circ}\text{C}$
5.	$\theta_{ar}$	45	$^{\circ}\text{C}$
6.	$\theta_L$	33/25	$^{\circ}\text{C}$
7.	$\theta_u$	30	$^{\circ}\text{C}$
8.	$\alpha_{cu}$	0,00393	$^{\circ}\text{C}$
9.	$\alpha_{pb}$	0,004	$^{\circ}\text{C}$
10.	$\rho_1$	3,5	$^{\circ}\text{C m/W}$
11.	$\rho_2$	6	$^{\circ}\text{C m/W}$
12.	$\rho_3$	3	$^{\circ}\text{C m/W}$
13.	$\rho_4$	1,2/0,7	$^{\circ}\text{C m/W}$
14.	$\epsilon_r$	2,4	-
15.	$\text{Tan } \delta$	0,0004	-
16.	$d_c$	20,90	mm
17.	$L_c$	300	$\text{mm}^2$
18.	$L_1$	1500	mm
19.	$L_2$	3000	mm
20.	$T_1$	19	mm
21.	$T_2$	4,5	mm
22.	$L$	4,04	km
23.	$\rho_o$	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \text{ m}$
24.	$C_s$	1	-
25.	$C_p$	0,8	-

##### 4.1 Tahanan Arus Searah

Tahanan DC pada temperatur operasi ( $20^{\circ}\text{C}$ ) per meter panjang kabel pada kabel inti tunggal dan kabel 3 inti<sup>[1], [6]</sup> :

$$R_{dc0} = \frac{\rho_0}{a} (1+Z)$$

$$R_{dc0} = \frac{1,7241 \cdot 10^{-8}}{300 \cdot 10^{-6}} (1+0,03) = 5,91941 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

Tahanan DC pada temperatur maksimum ( $85^{\circ}\text{C}$ ) per meter panjang kabel pada kabel inti tunggal dan 3 inti<sup>[1], [6]</sup> :

$$R_{dc1} = R_{dc0} [1 + \alpha_{cu} (\theta_1 - \theta_0)] = 7,43152 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

##### 4.2 Faktor Efek Kulit, Faktor Efek Pendekatan, dan Tahanan Arus Bolak-balik

- Kabel inti tunggal formasi trefoil

Parameter efek kulit pada kabel inti tunggal<sup>[6]</sup> :

$$X_s = 15,9 \cdot 10^{-4} \left( \frac{fCS}{Rdc_1} \right)^{1/2}$$

$$= 1,304197313$$

Faktor efek kulit pada kabel inti tunggal<sup>[1], [6]</sup> :

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

$$= 0,01489$$

Parameter efek pendekatan pada kabel inti tunggal<sup>[6]</sup> :

$$X_p = 15,9 \cdot 10^{-4} \left( \frac{fCp}{Rdc_1} \right)^{1/2}$$

$$= 1,166509539$$

Faktor efek pendekatan pada kabel inti tunggal dengan formasi trefoil dan flat bersentuhan<sup>[1], [6]</sup> :

$$S = 89,1 \text{ mm}$$

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

$$= 0,00223$$

Maka  $R_{ac1}$  pada kabel inti tunggal dengan formasi trefoil dan flat bersentuhan<sup>[1], [6]</sup> :

$$R_{ac1} = R_{dc1} (1 + Y_s + Y_p)$$

$$= 7,55875 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

Sedangkan faktor koreksi efek kulit pada kabel 3 inti diperoleh dengan cara sebagai berikut<sup>[1], [6]</sup> :

Dimana :

$$dc = 22,5 \text{ mm}$$

$$dcd = 11,13931752 \text{ mm}$$

$$C_s = \left[ \frac{dc-dcd}{dc+dcd} \right] \left[ \frac{dc+2dcd}{dc+dcd} \right]^2$$

$$= 0,3377203617 \times 1,771933218 = 0,59842$$

Dengan perhitungan yang sama dapat diperoleh tabel seperti di bawah ini :

Tabel 4. Perbandingan parameter-parameter kabel inti tunggal dan 3 inti

No.	Parameter	Kabel inti tunggal berisolasi XLPE tipe cm	Kabel 3 inti berisolasi kertas tipe hollow
1.	$R_{dc0}$	$5,91941 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$	$5,91941 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{m}$
2.	$Y_s$	0,01489	0,00537
3.	$Y_p$	Trefoil dan flat bersentuhan = 0,00223 Flat dengan pemisahan = 0,00056	0,00869
4.	$R_{dc1}$	$7,43152 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$	$7,43152 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$
5.	$R_{ac1}$	Trefoil dan flat bersentuhan = $7,55875 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$ Flat dengan pemisahan = $7,54634 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$	$7,53601 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$

### 4.3 Rugi-rugi Selubung (Sheath), Perisai (Armour), Tahanan Efektif, dan Rugi-rugi Konduktor

Tabel 5. Parameter-parameter perhitungan kabel inti tunggal isolasi XLPE

No.	Parameter	Besaran	Satuan
1.	d <sup>a</sup>	0,0751	m
2.	la	4040	m
3.	Aa	8,635 . 10 <sup>-4</sup>	m <sup>2</sup>
4.	As	502,6512	mm <sup>2</sup>
5.	psh	21,4 . 10 <sup>-8</sup>	Ωm
6.	θsh	50	°C
7.	t <sub>1</sub>	21,7	mm
8.	t <sub>2</sub>	0,5	mm
9.	t <sub>3</sub>	4,5	mm
10.	dc	20,90	mm
11.	Ds	69,1	mm
12.	D <sup>a</sup>	80,1	mm
13.	D	71,02	mm
14.	Dc	89,1	mm
15.	Wd	0,31307	W/m per fasa

#### • Kabel inti tunggal

Menghitung R<sub>armour</sub><sup>[1]</sup>:

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

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

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

Menghitung R<sub>s</sub><sup>[1]</sup>:

$$R_s = \frac{\rho_{\text{selubung timah hitam}}}{A_a \text{ selubung timah hitam}} [1 + \alpha_{20} \text{ selubung timah hitam} (\theta \text{ selubung timah hitam} - 20^\circ)]$$

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

R<sub>s</sub> paralel dengan R<sub>ar</sub><sup>[1]</sup>:

$$R_{\text{tot}} = \frac{R_a \times R_s}{R_a + R_s} = 2,88424 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

• Untuk formasi trefoil, selubung diikat pada kedua ujungnya<sup>[1]</sup>.

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

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

$$\lambda'_{\text{isa}} = \frac{R_{\text{tot}}}{R_{\text{ac1}}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{\text{tot}}}{X}\right)^2}$$

$$= 0,30545$$

Faktor rugi-rugi selubung dan armour :

$$\lambda_1 = \lambda'_{\text{isa}} \frac{R_a}{R_s + R_a}$$

$$= 0,01848$$

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

$$= 0,28697$$

Tahanan efektif pada kabel inti tunggal dengan formasi trefoil :

$$R_{\text{eff}} = R_{\text{ac1}} (1 + \lambda_1 + \lambda_2) = 9,86757 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

#### • Kabel 3 inti

Tabel 6. Parameter-parameter perhitungan kabel 3 inti isolasi kertas

No.	Parameter	Besaran	Satuan
1.	Ra	1,26760 . 10 <sup>-4</sup>	Ω/m
2.	Rs	1,73165 . 10 <sup>-4</sup>	Ω/m
3.	Re	7,31863 . 10 <sup>-5</sup>	Ω/m
4.	C	48,9	mm
5.	T	26,4	mm
6.	t <sub>1</sub>	13,2	mm
7.	t <sub>2</sub>	1,5	mm
8.	t <sub>3</sub>	4,6	mm
9.	Dc	22,5	mm
10.	Ds	114,2	mm
11.	D <sup>a</sup>	139,6	mm
12.	D	122,4601976	mm

Faktor rugi-rugi selubung dan perisai<sup>[1]</sup>:

$$\lambda''_1 = \lambda_2 = 1,23 \frac{Re}{R_{\text{ac1}}} \left(\frac{2c}{d}\right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 Re 10^6}{\omega}\right) + 1}$$

$$= 0,53773$$

Tahanan efektif pada kabel 3 inti :

$$R_{\text{eff}} = R_{\text{ac1}} (1 + \lambda_1 + \lambda_2) = 1,56407 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

Untuk R<sub>eff</sub> formasi lain pada kabel inti tunggal, dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 7. Perbandingan R<sub>eff</sub> antara kabel inti tunggal dan 3 inti

No.	Formasi Kabel	R <sub>eff</sub> (Ω/m)
1.	Trefoil	9,86757 . 10 <sup>-5</sup>
2.	Flat bersentuhan ditransposisi	1,00469 . 10 <sup>-4</sup>
3.	Flat bersentuhan tanpa transposisi	9,44791 . 10 <sup>-5</sup>
	Leading phase	1,06699 . 10 <sup>-4</sup>
	Lagging phase	9,55547 . 10 <sup>-5</sup>
4.	Flat dengan pemisahan ditransposisi	1,02621 . 10 <sup>-4</sup>
5.	Flat dengan pemisahan tanpa transposisi	9,98826 . 10 <sup>-5</sup>
	Leading phase	1,05645 . 10 <sup>-4</sup>
	Lagging phase	1,01437 . 10 <sup>-4</sup>
6.	3 inti	1,56407 . 10 <sup>-4</sup>

Perhitungan rugi-rugi konduktor (Wc) = I<sup>2</sup> R<sub>eff</sub>, Panjang saluran = 4040 m, Asumsi : I = 300 A

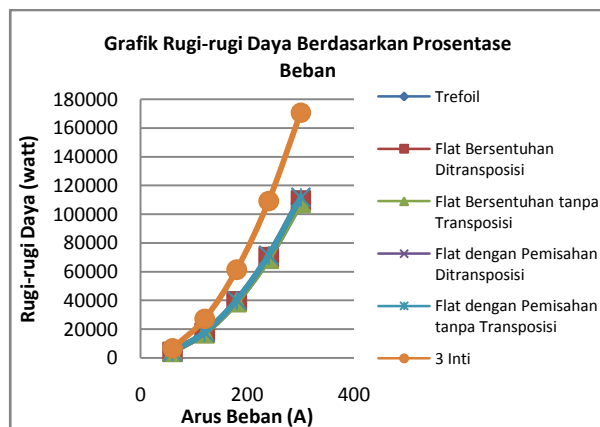
Tabel 8. Perbandingan rugi-rugi konduktor sistem 3 fasa pada kabel inti tunggal dan 3 inti

No.	Beban (%)	Arus (A)	Wc 3 fasa trefoil (watt)	Wc 3 fasa flat bersentuhan,
-----	-----------	----------	--------------------------	-----------------------------

No.	Beban (%)	Arus (A)	Wc 3 fasa flat bersentuhan tanpa transposisi (watt)	Wc 3 fasa flat dengan pemisahan transposisi (watt)
1.	20	60	4305,418143	4383,663408
2.	40	120	17221,67257	17534,65363
3.	60	180	38748,76329	39452,97067
4.	80	240	68886,69027	70138,61453
5.	100	300	107635,4536	109591,5852

No.	Beban (%)	Arus (A)	Wc 3 fasa flat dengan pemisahan tanpa transposisi (watt)	Wc 3 fasa 3 inti (watt)
1.	20	60	4315,681843	4477,559472
2.	40	120	17262,72737	17910,23789
3.	60	180	38841,13658	40298,03525
4.	80	240	69050,9095	71640,95155
5.	100	300	107892,0461	111938,9868



Gambar 3. Grafik perbandingan Wc antar kabel inti tunggal dengan kabel 3 inti

#### 4.4 Tahanan Panas

$T_1$  merupakan tahanan panas isolasi,  $T_2$  adalah tahanan panas bantalan,  $T_3$  merupakan tahanan panas selubung luar, dan  $T_4$  adalah tahanan panas di sekeliling kabel.

- Kabel inti tunggal formasi flat bersentuhan<sup>[1]</sup>

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot t_1}{dc} \right]$$

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

$$T_2 = \frac{\rho_2}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot t_2}{Ds} \right]$$

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

$$T_3 = \frac{\rho_3}{2\pi} \ln \left[ 1 + \left[ 1 + \frac{2 \cdot t_3}{D'a} \right] \right]$$

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

Di perairan dangkal :

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

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

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

Setelah dilakukan perhitungan diperoleh tabel sebagai berikut :

Tabel 9. Perbandingan nilai  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , dan  $T_4$  pada kabel inti tunggal dan 3 inti

No.	Formasi	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1.	Flat bersentuhan	0,62633	0,01373	0,05087	Dangkal : 1,98436 Pelayaran Laut : 1,38802
2.	Flat dengan pemisahan	0,62633	0,01373	0,05087	Dangkal : 1,88411 Pelayaran Laut : 1,33056
3.	Trefoil	0,78693	0,01725	0,06391	Dangkal : 2,05209 Pelayaran Laut : 1,42884
4.	3 Inti	1,19768	0,02477	0,06098	Dangkal : 0,70566 Pelayaran Laut : 0,48895

Tabel 10. Parameter-parameter hasil perhitungan lainnya

No.	C (F/m)	L ( $\mu\text{H/m}$ )	Wd (w/m per fasa)	$P_{IC}$ (w/fasa)
1.	Inti tunggal : $1,22543 \cdot 10^{-10}$ 3 inti : $1,91527 \cdot 10^{-10}$	Trefoil : 0,49114 Flat bersentuhan : 0,53729 Flat dengan pemisahan : 0,67577 3 inti : 0,37127	Inti tunggal : 0,11544 3 inti : 1,35314	Trefoil dan flat bersentuhan : 18,44889 Flat dengan pemisahan : 18,41867 3 Inti : 44,93088

#### 4.5 Kemampuan Hantar Arus (KHA)

Besarnya KHA pada kabel inti tunggal yang disusun dengan formasi trefoil di perairan dangkal dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut<sup>[1],[6]</sup> :

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - Wd(0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4))}{Rac_1 T_1 + nRac_1(1 + \lambda_1)T_2 + nRac_1(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

$$= 489,9071671 \text{ A}$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai KHA sebagai berikut :

Tabel 11. Perbandingan KHA kabel inti tunggal dengan 3 inti

No.	Formasi	KHA jika Ditanam di Perairan Dangkal (A)	KHA jika Ditanam di Jalur Pelayaran Laut (A)
1.	Inti tunggal		
	Trefoil	489,9071671	557,926198
	Flat bersentuhan ditransposisi	505,9275053	579,4765959
	Flat bersentuhan tanpa transposisi pada <i>leading phase</i>	518,5864786	592,8753303
	Flat bersentuhan tanpa transposisi pada <i>lagging phase</i>	493,6969459	566,4610459
	Flat bersentuhan tanpa transposisi pada <i>middle cable</i>	516,2431139	590,4006564
	Flat dengan pemisahan ditransposisi	512,0681136	583,8750777
	Flat dengan pemisahan tanpa transposisi pada <i>leading phase</i>	517,6558806	589,7770384
	Flat dengan pemisahan tanpa transposisi pada <i>lagging phase</i>	506,1037177	577,559829
	Flat dengan pemisahan tanpa transposisi pada <i>middle cable</i>	514,4616888	586,4049646
2.	Kabel 3 inti	364,6447095	416,3091159

#### 4.6 Voltage Drop pada Kabel<sup>[17]</sup>

Untuk menghitung besarnya *voltage drop* yang terjadi digunakan model transmisi saluran panjang. Dengan contoh perhitungan menggunakan formasi trefoil.

$$z = R + j 2\pi f L = 0,18308 \angle 57,39^\circ \Omega/\text{km}$$

$$y = 0 + j 2\pi f C = 3,84785 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ \text{ mho/km}$$

$$\gamma l = \sqrt{y z} l = 0,00301 + j 0,01029 = \alpha l + j\beta l$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = 68,97813 \angle -16,305^\circ \Omega$$

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

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

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

$$V_R^+ = \frac{V_R + I_R \cdot Z_c}{2} = 49959,20618 \angle -2,22^\circ \text{ V}$$

$$V_R^- = \frac{V_R - I_R \cdot Z_c}{2} = 36731,96654 \angle 3,02^\circ \text{ V}$$

Pada ujung titik kirim, dimana  $x = l$

$$V_S^+ = \frac{V_R + I_R \cdot Z_c}{2} e^{\alpha l} e^{j\beta l} = 50109,58339 \angle -1,63^\circ \text{ V}$$

$$V_S^- = \frac{V_R - I_R \cdot Z_c}{2} e^{-\alpha l} e^{-j\beta l} = 36621,73512 \angle 2,43^\circ \text{ V}$$

Tegangan saluran ke netral pada ujung titik kirim :

$$V_S = V_S^+ + V_S^- = 86678,20416 \angle 0,08^\circ \text{ V}$$

Tegangan saluran pada ujung titik kirim :

$$V_S = \sqrt{3} \times V_s = 150131,0535 \text{ V}$$

*Voltage drop* :

$$\Delta V = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_S|} \times 100\% = 0,08729\%$$

Sehingga dengan cara yang sama diperoleh perbandingan *voltage drop* sebagai berikut :

Tabel 12. Perbandingan *voltage drop* kabel inti tunggal dan 3 inti dengan arus beban 200 A

No.	Formasi	Voltage drop (%)
1.	<i>Trefoil</i>	0,08729
2.	Flat bersentuhan ditransposisi	0,08890
3.	Flat bersentuhan tanpa transposisi pada : <i>leading phase</i>	0,08344
	<i>lagging phase</i>	0,09446
	<i>middle cable</i>	0,08423
4.	Flat dengan pemisahan ditransposisi	0,08948
5.	Flat dengan pemisahan tanpa transposisi pada : <i>leading phase</i>	0,08717
	<i>lagging phase</i>	0,09251
	<i>middle cable</i>	0,08882
6.	3 Inti	0,14131

Tabel 13. Perbandingan *voltage drop* kabel inti tunggal dengan prediksi beban 110 MVA dan  $pf = 0,9$

No.	Formasi	Voltage drop (%)
1.	<i>Trefoil</i>	0,21194
2.	Flat bersentuhan ditransposisi	0,21689
3.	Flat bersentuhan tanpa transposisi pada : <i>leading phase</i>	0,20353
	<i>lagging phase</i>	0,23018
	<i>middle cable</i>	0,20581
4.	Flat dengan pemisahan ditransposisi	0,22144
5.	Flat dengan pemisahan tanpa transposisi pada : <i>leading phase</i>	0,21456
	<i>lagging phase</i>	0,22685
	<i>middle cable</i>	0,21856

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa *drop voltage* tertinggi terjadi pada formasi *flat* bersentuhan tanpa transposisi pada kabel *lagging phase* sebesar 0,23018 % dan *drop voltage* terendah terjadi pada formasi yang sama pada kabel *leading phase* sebesar 0,20353 %.

### III. PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

1.  $W_c$  terendah terjadi pada kabel inti tunggal formasi *trefoil*, yaitu sebesar 107635,4536 watt pada asumsi arus beban 300 A,  $W_c$  tertinggi terjadi pada kabel 3 inti dengan nilai 170608,7556 watt pada arus beban yang sama.
2. KHA terendah terjadi pada kabel 3 inti ketika ditanam di perairan dangkal yaitu sebesar 364,6447095 A dan di jalur pelayaran laut

sebesar 416,3091159 A, nilai KHA tertinggi terjadi pada kabel inti tunggal formasi *flat* bersentuhan tanpa transposisi pada kabel *leading phase*, ketika ditanam di perairan dangkal sebesar 518,5864786 A dan di jalur pelayaran laut sebesar 592,8753303 A.

3. Dengan arus beban 200 A diperoleh rugi tegangan tertinggi pada kabel 3 inti sebesar 0,14131 % dan rugi tegangan terendah pada kabel inti tunggal formasi *flat* bersentuhan tanpa transposisi pada kabel *leading phase* sebesar 0,08344 %, dan dengan prediksi beban sebesar 110 MVA dan faktor daya 0,9 diperoleh rugi tegangan tertinggi pada formasi *flat* bersentuhan tanpa transposisi pada *lagging phase* sebesar 0,23018 % dan rugi tegangan terendah pada formasi *flat* bersentuhan pada kabel *leading phase*, yaitu sebesar 0,20353 %.

## 1.2 Saran

1. Menggunakan perhitunganyang sama pada kabel bawah laut dengan jenis isolasi lain, seperti PVC, HEPR, dan PE.
2. Memperhitungkan besarnya tahanan panas pada kondisi tanah tidak seragam, serta memasukkan rugi-rugi daya total dan perubahan temperatur pada perhitungannya.
3. Menentukan jarak pemisahan optimum pada sistem 3 fasa formasi *flat* dengan pemisahan untuk meminimalkan rugi-rugi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anders, G. J., *Rating of Electric Power Cables*, IEEE PRESS, New York, 1997.
- [2] Anis, Y., *Studi Kemampuan Hantar Arus Kabel Laut 150 kv Jawa Madura*, Skripsi S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2006.
- [3] Balog, G., *Kabelteknologi for offshore windkraft*, <http://www.Nexanssubmarine/>, Oktober 2010.
- [4] Davies, T., *Protection of Industrial Power Systems*, Pergamon Press Ltd., Yarm, 1983.
- [5] Kendiq, H., *Konduktivitas Penghantar*, <http://www.konduktivitasbahan-bahanpenghantar/>, Oktober 2010.
- [6] King, S.Y., *Underground Power Cable*, Longman Inc., New York, 1982.
- [7] Lewis, W., and G. Allen, "Symmetrical Componen Circuit Constants and Neutral Circulating Currents for Concentric Neutral Underground Distribution Cables", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-97, No. 1, pp 191-199, 1978.
- [8] Lucas, J. R., *High Voltage Engineering*, University of Moratuwa, Sri Lanka, 2001.
- [9] Noviana, O., *Pengujian Kabel Tanah 3 Inti Berisolasi XLPE dan Berselubung PVC dengan Tegangan Pengenal 12/20 (24) kv Menggunakan SPLN 43-5-4 : 1995 dan 39-1 :*

1981. Laporan Kerja Praktek, Universitas Diponegoro, Semarang, 2010.

- [10] Papadopoulos, M., N. Boulaxis, M. Tsili, and S. Papathanasiou, "Interconnection of the Cycladic Islands to the Mainland Grid", National Technical University of Athens, Athens, 2010.
- [11] Paramita, I., *Analisis Pengaruh Jenis dan Kedalaman Tanah terhadap Kuat Medan Listrik serta Kapasitas Hantar Arus pada Kabel XLPE 20 kv dengan Metode Elemen Hingga*, Skripsi-S1, ITS, Surabaya, 2009.
- [12] SNI 04-0225-2000, *Peraturan Umum Instalasi Listrik 2000*, Jakarta, 2000.
- [13] SPLN 43-5-4 : 1995, Departemen Pertambangan dan Energi, Jakarta, 1995.
- [14] Trisno, B., *Kabel dan Teknik Penyambungan*, <http://kabeldanteknikpenyambungan/>, Oktober 2010.
- [15] Warne, D. F., *Newnes Electrical Power Engineer's Handbook*, 30 Corporate Drive, Burlington, 2005.
- [16] ---, *Konstruksi Kabel Tenaga*, <http://konstruksikabelbawahlaut/>, Oktober 2010.
- [17] ---, *Saluran Transmisi Panjang*, Transmission Slide, 2011.

## BIODATA PENULIS



Okma Noviana (L2F007059), lahir di Bogor, 20 Oktober 1988. Menempuh pendidikan di TK Bustanul Athfal Aisyiah Padangpanjang, SDN 09 Padangpanjang, MTsN Padangpanjang, SMAN 1 Cileungi – Bogor, dan pada tahun 2007 melanjutkan studi strata 1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, dan mengambil konsentrasi Teknik Energi Listrik.

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing I

**Dr. Ir. Hermawan, DEA**  
**NIP 196002231986021001**

Dosen Pembimbing II

**Karnoto, S.T., M.T.**  
**NIP 196907091997021001**