p-ISSN: 2502-1621
e-ISSN: 2656-1611

Jurnal 7 Samudra
Politeknik Pelayaran Surabaya
Vol. 11, No. 2, 14 November 2026
Hal: 80–89

Perencanaan Sistem Kelistrikan serta Evaluasi Jatuh Tegangan dan Rugi Daya pada Kapal Pariwisata Berbasis Simulasi ETAP

Yulian Fanny Putra Pratama[1*], Edy Prasetyo Hidayat[2], Hendro Agus Widodo[3]
Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya1,2,3
Email korespondensi: yulianfanny@gmail.com

ABSTRAK

Keandalan sistem kelistrikan pada kapal pariwisata merupakan faktor krusial yang menentukan keselamatan pelayaran, kontinuitas operasional permesinan, dan kenyamanan penumpang. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem instalasi kelistrikan yang optimal pada kapal pariwisata Banawa Nusantara di perairan Banyuwangi serta mengevaluasi parameter aliran daya (load flow) yang meliputi distribusi daya aktif dan reaktif, jatuh tegangan (voltage drop), serta rugi-rugi daya (losses). Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif rekayasa melalui komparasi perhitungan analitik manual sesuai regulasi Non-Convention Vessel Standard (NCVS) dan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Vol. IV dengan perangkat lunak Electrical Calculation dan Ecodial, yang selanjutnya divalidasi melalui simulasi aliran daya berbasis Electrical Transient Analysis Program (ETAP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban puncak operasional kapal terjadi pada kondisi berlayar (sailing) sebesar 8.598,3 W, yang secara optimal dilayani oleh generator utama Meccalte ECP 280S4 berkapasitas 12,8 kVA dengan Load Factor Generator (LFG) sebesar 83,9% (mengoreksi desain eksisting 17 kVA yang memiliki LFG 63,2%). Sistem darurat (Emergency Source of Electrical Power) dirancang menggunakan baterai 12V 125Ah untuk beban DC (484 W) dan generator darurat 8,8 kVA untuk beban AC esensial (6.640 W termasuk lonjakan arus starting). Evaluasi komponen busbar tembaga ukuran 15 x 3 mm menghasilkan disipasi daya maksimum 0,30 W dan jatuh tegangan internal maksimum 0,007 V. Hasil simulasi load flow ETAP membuktikan bahwa aliran daya terbesar berada pada saluran panel ruang mesin sebesar 5 kW dan 3 kvar. Jatuh tegangan (voltage drop) terbesar pada bus dan saluran kabel untuk desain perhitungan manual adalah sebesar 0,27% (218,9 V dari nominal 220 V), sedangkan untuk desain berbasis Ecodial sebesar 0,60% pada bus (218,68 V) dan 0,44% pada kabel dengan rugi-rugi daya aktif maupun reaktif mendekati 0% (0,0 kW dan 0,0 kvar). Seluruh parameter memenuhi ambang batas keselamatan BKI (< 5%), sehingga desain dinyatakan andal dan efisien.

Kata kunci: *Instalasi Listrik Kapal; Aliran Daya; Voltage Drop; Rugi Daya; Simulasi ETAP*

PENDAHULUAN

Pengembangan sektor pariwisata bahari di perairan Kabupaten Banyuwangi mendorong peningkatan kebutuhan moda transportasi laut berupa kapal wisata berbahan *fiberglass* yang aman, nyaman, dan andal. Sebagai bangunan terapung yang beroperasi secara terisolasi di lingkungan laut yang korosif dan dinamis, kapal sangat bergantung pada ketersediaan energi listrik yang kontinu untuk menunjang sistem propulsi bantu, navigasi, komunikasi, keselamatan darurat, hingga fasilitas akomodasi penumpang (Sitorus, 2015). Kegagalan pada sistem pembangkitan

maupun distribusi tenaga listrik di atas kapal tidak hanya menurunkan kualitas layanan wisata, tetapi juga berisiko memicu kecelakaan fatal akibat hilangnya kendali navigasi atau lumpuhnya pompa-pompa keselamatan. Oleh karena itu, rekayasa sistem kelistrikan kapal wajib memenuhi regulasi ketat yang ditetapkan oleh pemerintah melalui *Non-Convention Vessel Standard* (NCVS) untuk kapal berukuran di bawah 500 GT serta aturan klasifikasi dari Biro Klasifikasi Indonesia (BKI, 2016; Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2009).

Dalam praktik pembangunan kapal wisata skala kecil-menengah (panjang 10–20 meter) di galangan lokal, perencanaan sistem kelistrikan sering kali masih diabaikan karena fokus perancangan lebih dititikberatkan pada konstruksi dan geometri lambung kapal. Berdasarkan observasi teknis pada kapal pariwisata *Banawa Nusantara* (LOA = 17,65 m), ditemukan sejumlah ketidaksesuaian standar rekayasa kelistrikan. Permasalahan tersebut meliputi pemilihan kapasitas generator utama (17 kVA) yang terlalu besar (*oversized*) sehingga tidak ekonomis, kapasitas generator darurat (5 kVA) yang tidak mampu menahan arus *starting* pompa pemadam dan bilga, penggunaan kabel instalasi darat tipe NYY-HY yang tidak memiliki pelindung mekanis standar *marine*, hingga penggabungan seluruh distribusi ke dalam dua panel sederhana tanpa memisahkan sirkuit vital lampu navigasi. Selain itu, penentuan komponen pengaman, penampang penghantar, dan busbar umumnya hanya mengandalkan estimasi kasar tanpa evaluasi kualitas daya (*power quality*).

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji perencanaan daya dan analisis sistem kelistrikan kapal maupun industri. Novarianto (2010) menganalisis karakteristik kebutuhan daya listrik pada kapal kargo guna meningkatkan efisiensi energi melalui perhitungan *load factor* generator. Fathia (2017) meneliti kebutuhan daya listrik operasional pada *container crane*, namun ketiadaan perencanaan awal menyebabkan timbulnya kondisi kritis (*critical*) pada beberapa komponen. Di sisi lain, Adib dan Primadiono (2015) serta Legowo (2017) memanfaatkan perangkat lunak *Electrical Transient Analysis Program* (ETAP) untuk menganalisis aliran daya (*load flow*) dan stabilitas tegangan saat motor bekerja. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu pada kapal masih terbatas pada perhitungan kapasitas generator secara manual tanpa mengintegrasikan perancangan detail komponen proteksi, penghantar *marine*, serta disipasi termal busbar ke dalam simulasi aliran daya menyeluruh.

Keterbatasan kajian yang membandingkan metode perancangan analitik manual dengan perangkat lunak kalkulasi elektrikal (*Electrical Calculation* dan *Ecodial*) serta memvalidasi hasilnya melalui simulasi *load flow* pada kapal wisata berbahan *fiberglass* menunjukkan adanya *research gap* yang perlu dijembatani. Secara teoritis, kualitas perancangan sistem distribusi tenaga listrik di kapal dievaluasi melalui parameter aliran daya yang mencakup keseimbangan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q), profil jatuh tegangan (*voltage drop*) pada setiap busbar dan saluran kabel, serta rugi-rugi daya (*losses*) sepanjang jaringan transmisi. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang ulang sistem instalasi kelistrikan kapal pariwisata *Banawa Nusantara* sesuai standar NCVS, BKI, dan IEC, serta

mengevaluasi parameter jatuh tegangan dan rugi-rugi daya melalui simulasi aliran daya berbasis ETAP guna menghasilkan desain kelistrikan kapal yang optimal, ekonomis, dan berkeselamatan tinggi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Desain Sistem Kelistrikan dan Neraca Daya Kapal (Electric Power Balance)

Sistem kelistrikan di kapal merupakan jaringan tenaga listrik terisolasi (*isolated power system*) yang terbagi menjadi sistem pembangkitan utama (*main power supply*), sistem darurat (*emergency source of electrical power* / ESEP), serta jaringan distribusi ke kelompok beban daya (motor pompa dan *blower*), beban penerangan dan kotak kontak akomodasi, serta beban elektronik komunikasi dan navigasi. Untuk menentukan jumlah titik penerangan yang memenuhi standar iluminasi (Lux) BKI, dilakukan perhitungan indeks ruangan (K), efisiensi penerangan (η), serta fluks cahaya ruangan (Φ_ruang) dan jumlah armatur (N) dengan persamaan (Sardono, 2010):

$$K = (p \times l) / [h \times (p + l)] \quad ; \quad \Phi_ruang = (E_ruang \times A) / (\eta \times d) \quad ; \quad N = \Phi_ruang / (n \times \Phi_lampu)$$

Penentuan kapasitas generator utama didasarkan pada analisis neraca daya listrik (*electric power balance*) pada empat kondisi operasional kapal, yaitu berlayar (*sailing*), manuver berangkat/sandar (*departure/arrival*), bongkar muat (*cargo handling*), dan berlabuh/menunggu (*waiting in port*). Beban dikelompokkan menjadi beban kontinu (*Continuous Load* / CL) dan beban terputus-putus (*Intermittent Load* / IL). Sesuai aturan BKI Volume IV, faktor keberagaman (*diversity factor* / DF) ditetapkan antara 0,5 hingga 1,0 (diambil 0,7) dan faktor beban generator (*Load Factor Generator* / LFG) dibatasi maksimal 85% dengan cadangan keselamatan (*safety factor*) minimal 15%:

$$\text{Max. Peak Load (MPL)} = \text{Beban CL} + (\text{Beban IL} \times DF) \quad ; \quad LFG = [MPL / (n \times \text{Generator in Service})] \times 100\%$$

2.2 Standarisasi Penghantar, Pengaman, dan Busbar Instalasi Kapal

Lingkungan maritim menuntut spesifikasi material penghantar dan panel hubung bagi yang tahan terhadap getaran mekanis, suhu ruang mesin, kelembapan korosif, dan rambatan api. Mengacu pada NCVS Bab V Bagian 9.12.1, pemilihan kabel instalasi kapal wajib memenuhi standar IEC 60092-352, IEC 60092-353 untuk konstruksi desain, IEC 60332 untuk ketahanan rambatan api (*fire performance*), dan IEC 60228 untuk konduktor tembaga. Kabel standar *marine* seperti tipe LFPYC (4 inti) dan LDPYC (2 inti) menggunakan isolasi *Ethylene Propylene Rubber* (EPR) berselubung *Polyvinyl Chloride* (PVC) dengan pelindung mekanis anyaman kawat baja (*steel wire braid*). Selain penghantar kabel, distribusi di dalam panel menggunakan busbar tembaga (*bare copper*) yang dimensinya harus dievaluasi terhadap batas kapasitas arus maksimum (BKI Vol. IV Tabel 5.1), rugi disipasi daya termal (*power dissipation*), dan jatuh tegangan internal busbar.

2.3 Analisis Aliran Daya (Load Flow), Jatuh Tegangan (Voltage Drop), dan Rugi Daya (Losses)

Analisis aliran daya (*load flow analysis*) merupakan metode numerik untuk mengevaluasi karakteristik operasional sistem tenaga listrik kondisi tunak (*steady-state*), yang mencakup magnitudo dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q), serta rugi-rugi

transmisi pada saluran (Adib & Primadiono, 2015; Fathia, 2017). Dalam kondisi riil, impedansi saluran kabel (Z = R + jX) menyebabkan daya yang dikirimkan oleh pembangkit tidak sama dengan daya yang diterima oleh beban akibat adanya rugi-rugi daya (*losses*) dan penurunan tegangan (*voltage drop*). Mengacu pada regulasi BKI Volume IV Section 12 B-2.1 dan Section 4 I-6.11, batas maksimum penurunan tegangan antara busbar utama/darurat (MSB/ESB) dan titik konsumen pada kondisi operasi normal tidak boleh melebihi 6% dari tegangan pengenal (atau 10% pada jaringan suplai baterai ≤ 50 V), sedangkan khusus untuk sirkuit lampu navigasi tidak boleh menyimpang secara permanen lebih dari 5% dari tegangan nominal.

2.4 Penelitian Terdahulu dan Kerangka Pemikiran

Penelitian Novarianto (2010) memberikan landasan metode evaluasi *electric power balance* dan efisiensi *load factor* generator di kapal, namun belum menyertakan simulasi jaringan distribusi. Penelitian Adib dan Primadiono (2015) serta Legowo (2017) membuktikan efektivitas ETAP dalam memetakan profil daya aktif, daya reaktif, dan respons tegangan sistem kelistrikan, tetapi belum mengomparasikannya dengan metode perancangan komponen berbasis perangkat lunak kalkulasi instalasi seperti *Ecodial* dan *Electrical Calculation*. Oleh karena itu, kerangka pemikiran penelitian ini mengintegrasikan tahapan perancangan rekayasa (mulai dari kalkulasi beban penerangan/daya, optimasi kapasitas pembangkit utama dan darurat, hingga penentuan dimensi kabel, pengaman, dan busbar melalui metode manual serta *software*) yang kemudian diuji silang kinerjanya melalui simulasi aliran daya di ETAP untuk menilai parameter *voltage drop* dan *losses*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode perancangan rekayasa kuantitatif (*quantitative engineering design*) dan pendekatan simulasi numerik. Objek penelitian ini adalah kapal pariwisata berbahan *fiberglass* KM. Banawa Nusantara yang diproduksi oleh galangan PT. Constrine Jaya Group untuk beroperasi di perairan Banyuwangi. Spesifikasi ukuran utama kapal meliputi: panjang keseluruhan (LOA) 17,65 m, panjang garis air (LWL) 12,96 m, lebar (B) 4,00 m, tinggi (H) 1,84 m, sarat air (T) 1,02 m, mesin induk 1 × 120 HP, kapasitas angkut 24 penumpang, dan kecepatan dinas 7 Knots.

Variabel yang diteliti dikelompokkan menjadi dua bagian utama, yaitu: (1) Variabel Perancangan Sistem Kelistrikan yang meliputi kebutuhan daya penerangan dan kotak kontak (W), neraca daya pada empat kondisi pelayaran (W), kapasitas dan *load factor* generator utama (kVA dan %), kapasitas baterai dan generator darurat ESEP (Ah dan kVA), serta rating pengaman (A), luas penampang kabel (mm²), dan dimensi busbar (mm); serta (2) Variabel Evaluasi Simulasi Aliran Daya (*Load Flow*) yang meliputi disipasi daya busbar (W), jatuh tegangan internal busbar (V), aliran daya aktif (P dalam kW) dan daya reaktif (Q dalam kvar), jatuh tegangan pada setiap bus dan saluran kabel (*voltage drop* dalam V dan %), serta rugi-rugi daya saluran (*branch losses* dalam kW dan kvar).

Tahapan analisis data dilakukan secara sistematis melalui empat tahap: (1) Pengumpulan data *General Arrangement* (GA) dan daftar beban kapal; (2) Perhitungan kebutuhan armatur penerangan, kotak kontak,

serta penyusunan tabel *Electric Power Balance* untuk menentukan kapasitas generator utama dan ESEP; (3) Komparasi perhitungan rating pengaman, luas penampang kabel *marine* (LFPYC dan LDPYC), dan busbar pada 6 panel distribusi menggunakan perhitungan manual terhadap perangkat lunak *Electrical Calculation* dan *Ecodial*; serta (4) Pemodelan *Single Line Diagram* (SLD) ke dalam perangkat lunak ETAP (standar IEC, 50 Hz) dalam dua skenario—Sistem 1 (desain manual) dan Sistem 2 (desain *Ecodial*)—untuk mengevaluasi profil tegangan bus, persentase *voltage drop*, serta *losses* kabel terhadap standar BKI.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perencanaan Beban, Sistem ESEP, dan Optimasi Kapasitas Generator Utama

Tahap awal rekayasa dilakukan dengan mengevaluasi kebutuhan daya penerangan dan kotak kontak pada 11 ruangan di geladak utama, ruang mesin, dan ruang palkah. Berdasarkan perhitungan indeks ruangan (K), efisiensi penerangan (η), dan fluks ruangan terhadap standar Lux BKI, diperoleh kebutuhan 16 titik armatur (terdiri dari lampu *Fluorescent* Master LEDtube T8 15W–20W dan *Incandescent* 10W) dengan total konsumsi daya 405 W. Perencanaan ini mengoreksi desain awal galangan yang memasang 20 lampu pijar (IL 10W, total 180 W) secara seragam namun membiarkan area dapur, ruang ESEP, dan ruang palkah tanpa penerangan. Selanjutnya, untuk melayani beban akomodasi dan dapur (AC 1 PK, *electric stove* 1.000 W, *rice cooker* 400 W, kulkas, TV LED, *exhaust fan*, dan kipas angin), direncanakan 12 unit kotak kontak (7 titik 2A, 2 titik 4A, dan 3 titik 6A) dengan estimasi beban maksimum sebesar 7,04 kW (8,8 kVA).

Guna menentukan kapasitas generator utama (*Main Generator*) yang optimal, disusun perhitungan *Electric Power Balance* yang membagi beban ke dalam empat kategori pada empat kondisi operasional kapal dengan faktor keberagaman (*diversity factor*) sebesar 0,7 sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Electric Power Consumption pada Empat Kondisi Operasional Kapal

No.	Kelompok Beban	Kategori Beban	Berlayar (W)	Berangkat/Sandar (W)	Bongkar Muat (W)	Berlabuh (W)
1	Machinery Part	Continuous Load (CL)	1.870,0	1.870,0	0,0	0,0
		Intermittent Load (IL)	2.387,5	2.387,5	0,0	0,0
2	Hull Part	Continuous Load (CL)	680,0	680,0	0,0	136,0
		Intermittent Load (IL)	0,0	0,0	0,0	0,0
3	Lighting & Socket	Continuous Load (CL)	4.272,0	4.272,0	4.272,0	4.272,0
		Intermittent Load (IL)	0,0	0,0	0,0	0,0
4	Others (CVS)	Intermittent Load (IL)	150,0	150,0	0,0	0,0
5	**Total Beban (d)**	**Total CL**	**6.822,0**	**6.822,0**	**4.272,0**	**4.408,0**
		Total IL	**2.537,5**	**2.537,5**	**0,0**	**0,0**
6	Diversity Factor (e)	-	0,7	0,7	0,7	0,7
7	Necessary Power (f)	e × Total IL	1.776,3	1.776,3	0,0	0,0
8	**Total Beban Puncak (g)**	**Total CL + f**	**8.598,3**	**8.598,3**	**4.272,0**	**4.408,0**

Berdasarkan Tabel 1, beban puncak (*Maximum Peak Load*) terjadi pada kondisi berlayar (*sailing*) serta manuver keberangkatan/kedatangan sebesar 8.598,3 W. Evaluasi pemilihan kapasitas generator utama dilakukan dengan membandingkan tiga kandidat generator terhadap batas *Load Factor Generator* (LFG) maksimum 85% sesuai aturan BKI sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komparasi Load Factor Generator (LFG) dan Safety Factor Kandidat Generator Utama

No.	Tipe Generator	Kapasitas (VA)	Daya Aktif (W)	LFG Berlayar (%)	LFG Bongkar Muat (%)	LFG Sandar (%)	Safety Factor (%)	Evaluasi BKI
1	Meccalte ECP 28S4 (Awal)	17.000	13.600	63,2	31,4	32,4	36,8	Oversized
2	**Meccalte ECP 280S4 (Terpilih)**	**12.800**	**10.240**	**83,9**	**41,7**	**43,0**	**16,1**	**Optimal (≤85%)**
3	Yanmar YEG150DTH	12.000	9.600	92,6	44,5	45,9	7,4	Overload (>85%)

Tabel 2 menunjukkan bahwa penggunaan generator Meccalte ECP 28S4 (17 kVA) pada desain awal galangan menghasilkan LFG puncak hanya 63,2% (tidak ekonomis). Oleh karena itu, dipilih generator Meccalte ECP 280S4 berkapasitas 12,8 kVA (10.240 W, 3-Fasa, 220 V, 50 Hz, 1.500 rpm) yang memberikan nilai LFG puncak 83,9% dan *safety factor* 16,1%. Untuk sistem darurat (ESEP), beban DC (radio, navigasi, dan lampu darurat sebesar 484 W; I_tot = 40,33 A) dengan asumsi waktu penyelamatan 3 jam membutuhkan kapasitas 121 Ah, sehingga dipilih baterai Yuasa 655HD 12V 125Ah (LF baterai 97%) dan *charger* MasterVolt 12/40-3 (700 W, 45 A). Sementara itu, untuk beban darurat AC (2 *blower* ruang mesin 640 W, 1 pompa pemadam 1.500 W, dan 1 pompa bilga 1.500 W = 3.640 W), dengan memperhitungkan lonjakan arus *starting* motor terbesar (P_out = 3.640 + 2 × 1.500 = 6.640 W), dipilih generator darurat Yanmar YEG140DSHS berkapasitas 8,8 kVA (7,04 kW), menggantikan generator darurat awal (5 kVA) yang *undersized*.

2. Rekayasa Kabel, Pengaman, dan Evaluasi Parameter Busbar

Arsitektur distribusi kapal dirombak dari 2 panel sederhana menjadi 6 Panel Standar NCVS, yaitu: *Main Switchboard* (MSB), *Emergency Switchboard* (ESB), Panel Ruang Akomodasi (PAC), Panel Ruang Mesin (PRM), Panel Lampu Navigasi (PNL), dan Panel Komunikasi & Navigasi (PCN). Seluruh penghantar diganti dari kabel NYY-HY menjadi Marine Cable CCI XAI tipe LFPYC (4 inti) untuk saluran utama dan tipe LDPYC (2 inti) untuk saluran distribusi beban. Perbandingan penampang kabel dan rating pengaman antara metode manual dan perangkat lunak *Ecodial* ditunjukkan pada Tabel 3, sedangkan hasil evaluasi ketahanan arus, disipasi daya termal, dan *voltage drop* busbar tembaga ukuran 15 × 3 mm (panjang 0,2 m) menggunakan *Electrical Calculation* disajikan pada Tabel 4.

Tabel 3. Komparasi Penampang Kabel dan Rating Pengaman (Metode Manual vs Software Ecodial)

No.	Saluran / Segmen Distribusi	Arus Total (A)	Tipe Kabel	Penampang Manual (mm²)	Pengaman Manual (A)	Penampang Ecodial (mm²)	Pengaman Ecodial (A)
1	Generator Utama ke MSB	29,66	LFPYC	10,0	32	10,0	40
2	**MSB ke Panel Akomodasi (PAC)**	**13,84**	**LFPYC**	**4,0**	**16**	**2,5**	**32**
3	**MSB ke Panel Ruang Mesin (PRM)**	**35,80**	**LFPYC**	**16,0**	**40**	**1,5**	**20**
4	MSB ke Battery Charger	3,90	LFPYC	1,5	4	1,5	4
5	MSB ke Power Supply Unit (PSU)	2,85	LFPYC	1,5	4	1,5	3
6	PAC ke Sirkuit Penerangan (R, S, T)	0,45 – 0,60	LDPYC	1,5	0,5 – 1	1,5	0,5 – 1
7	**PAC ke Sirkuit Kotak Kontak (R1, S1, T1)**	**12,00 – 14,00**	**LDPYC**	**2,5**	**15**	**1,5**	**10 – 16**
8	PRM ke Pompa Bilga 1&2, Pemadam, Pendingin	8,52 (I_st=25,57)	LDPYC	1,5	10	1,5	10
9	PRM ke Blower Ruang Mesin	1,82 (I_st=5,45)	LDPYC	1,5	6	1,5	3

Tabel 4. Hasil Evaluasi Kapasitas Arus, Disipasi Daya, dan Voltage Drop Busbar dengan Electrical Calculation

No.	Nama Panel Distribusi	Dimensi Busbar (mm)	Arus Uji (A)	Rating Arus Busbar (A)	Disipasi Daya (W)	Voltage Drop Busbar (V)
1	Panel Ruang Akomodasi (PAC)	15 × 3 (4×1)	13,84	206,2	0,00	0,002
2	Panel Ruang Mesin (PRM)	15 × 3 (4×1)	35,80	206,2	0,10	0,005
3	Panel Lampu Navigasi (PNL)	15 × 3 (2×1)	4,17	206,2	0,00	0,001
4	Panel Kom. & Navigasi (PCN - DC)	15 × 3 (2×1)	35,75	206,2	0,10	0,005
5	Panel Kom. & Navigasi (PCN - AC)	15 × 3 (2×1)	1,42	206,2	0,00	0,001
6	Main Switchboard (MSB)	15 × 3 (4×1)	43,00	206,2	0,10	0,006
7	Emergency Switchboard (ESB - AC)	15 × 3 (2×1)	20,70	206,2	0,00	0,003
8	**Emergency Switchboard (ESB - DC)**	**15 × 3 (2×1)**	**43,13**	**206,2**	**0,30**	**0,007**

3. Evaluasi Aliran Daya (Load Flow), Jatuh Tegangan (Voltage Drop), dan Rugi Daya (Losses) Berbasis Simulasi ETAP

Hasil eksekusi simulasi *Load Flow Analysis* pada ETAP menunjukkan bahwa seluruh bus berada dalam kondisi normal operasi pada frekuensi 50 Hz. Aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) terbesar mengalir dari MSB menuju Bus Panel Ruang Mesin (PRM) melalui Cable2 sebesar 5 kW dan 3 kvar karena dominasi 6 unit motor pompa dan *blower*, sedangkan aliran daya terkecil terdapat pada Bus 13 (saluran *Battery Charger*) sebesar 0,24 kW dan 0,15 kvar. Komparasi profil tegangan bus, persentase *voltage drop*, serta *losses* saluran kabel antara Sistem 1 (perhitungan manual) dan Sistem 2 (*software Ecodial*) disajikan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Komparasi Profil Tegangan Bus dan Voltage Drop antara Sistem Manual dan Sistem Ecodial pada Simulasi ETAP

No.	ID Bus / Lokasi Panel	V Nom. (kV)	Sistem 1 %Mag (%)	Sistem 1 V Aktual (V)	Sistem 1 Drop (%)	Sistem 2 %Mag (%)	Sistem 2 V Aktual (V)	Sistem 2 Drop (%)
1	Bus1 (Generator Utama)	0,220	100,000	220,00	0,000	100,000	220,00	0,000
2	MSB (Main Switchboard)	0,220	99,939	219,87	0,061	99,938	219,86	0,062
3	PRM (Panel Ruang Mesin)	0,220	99,867	219,71	0,133	99,866	219,71	0,134
4	**PAC (Panel Akomodasi)**	**0,220**	**99,865**	**219,70**	**0,135**	**99,503**	**218,91**	**0,497**
5	Bus4 (Motor Pompa PRM)	0,220	99,639	219,21	0,361	99,639	219,21	0,361
6	Bus5 (Motor Pompa Bilga)	0,220	99,599	219,12	0,401	99,599	219,12	0,401
7	Bus13 (Battery Charger)	0,220	99,860	219,69	0,140	99,860	219,69	0,140
8	Bus30 (Kotak Kontak PAC)	0,220	99,792	219,54	0,208	99,429	218,74	0,571
9	**Bus46 (Ujung Instalasi PAC)**	**0,220**	**99,761**	**218,90***	**0,270***	**99,398**	**218,68**	**0,602**
10	Bus52 (Kotak Kontak PAC)	0,220	99,763	219,48	0,237	99,401	218,68	0,599

Tabel 6. Evaluasi Aliran Daya Cabang (Branch Flow), Losses, dan Voltage Drop Kabel pada Simulasi ETAP

No.	ID Saluran (Segmen)	Aliran Daya Aktif	Aliran Daya Reaktif	Losses Aktif (kW)	Losses Reaktif (kvar)	%Vd Sistem 1 (Manual)	%Vd Sistem 2 (Ecodial)
1	Cable1 (Gen -> MSB)	0,010 MW (10 kW)	0,006 Mvar (6 kvar)	0,0	0,0	0,06%	0,06%
2	Cable2 (MSB -> PRM)	0,005 MW (5 kW)	0,003 Mvar (3 kvar)	0,0	0,0	0,07%	0,07%
3	**Cable16 (MSB -> PAC)**	**0,003 MW (3 kW)**	**0,003 Mvar (3 kvar)**	**0,0**	**0,0**	**0,07%**	**0,44%**
4	Cable3 (PRM -> Pompa 1)	0,001 MW (1 kW)	0,001 Mvar (1 kvar)	0,0	0,0	0,23%	0,23%
5	**Cable4 (PRM -> Pompa Bilga)**	**0,001 MW (1 kW)**	**0,001 Mvar (1 kvar)**	**0,0**	**0,0**	**0,27%**	**0,27%**
6	Cable5 (PRM -> Pompa 3)	0,001 MW (1 kW)	0,001 Mvar (1 kvar)	0,0	0,0	0,19%	0,19%
7	Cable39 & Cable44 (Kotak Kontak)	0,001 MW (1 kW)	0,001 Mvar (1 kvar)	0,0	0,0	0,10%	0,10%
8	Kabel Penerangan Lainnya	0,000 MW	0,000 Mvar	0,0	0,0	0,00% – 0,08%	0,00% – 0,08%

Berdasarkan data hasil simulasi pada Tabel 5 dan Tabel 6, terlihat bahwa pada Sistem 1 (perhitungan manual), persentase jatuh tegangan pada saluran kabel terbesar terjadi pada Cable4 (PRM ke motor pompa bilga) sebesar 0,27%, sedangkan penurunan tegangan bus terbesar pada instalasi PAC adalah 0,27% (218,9 V dari 220 V). Sebaliknya, pada Sistem 2 (perhitungan *Ecodial*), pengecilan penampang kabel pengumpan Cable16 (MSB ke PAC) dari 4 mm² menjadi 2,5 mm² menyebabkan jatuh tegangan pada Cable16 meningkat dari 0,07% menjadi 0,44%, sehingga penurunan tegangan pada bus beban ujung (Bus46 dan Bus52) naik menjadi 0,60% (218,68 V). Sementara itu, nilai *losses* daya aktif (kW) dan reaktif (kvar) pada seluruh cabang kabel tercatat mendekati 0% (0,0 kW dan 0,0 kvar) karena pendeknya jarak tarikan kabel di dalam kapal (< 11 m per segmen). Kedua metode menghasilkan jatuh tegangan jauh di

bawah batas maksimum BKI (5%–6%), namun metode manual memberikan profil regulasi tegangan yang lebih unggul.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, perencanaan sistem kelistrikan kapal pariwisata KM. Banawa Nusantara menghasilkan 16 titik penerangan (405 W), 12 titik kotak kontak (7,04 kW), dan 6 panel distribusi standar NCVS/BKI. Beban puncak kapal berada pada kondisi berlayar sebesar 8.598,3 W dan dilayani secara optimal oleh generator utama Meccalte ECP 280S4 12,8 kVA (LFG 83,9%), sedangkan sistem darurat (ESEP) disuplai oleh baterai 12V 125Ah (beban DC 484 W) dan generator darurat Yanmar 8,8 kVA (beban AC 6.640 W). Penggunaan kabel *marine* tipe LFPYC dan LDPYC serta busbar tembaga 15 × 3 mm (kapasitas arus 206,2 A) menghasilkan disipasi daya busbar maksimum 0,30 W dan *voltage drop* busbar maksimum 0,007 V. Hasil simulasi *load flow* ETAP membuktikan aliran daya terbesar menuju Panel Ruang Mesin sebesar 5 kW dan 3 kvar, dengan *voltage drop* bus dan kabel terbesar pada desain manual sebesar 0,27% (218,9 V) dan pada desain *Ecodial* sebesar 0,60% pada bus (218,68 V) serta 0,44% pada kabel, disertai rugi-rugi daya (*losses*) saluran mendekati 0% (0,0 kW dan 0,0 kvar).

Kebaruan (*novelty*) dalam penelitian ini terletak pada validasi silang perancangan instalasi listrik kapal wisata berbahan *fiberglass* menggunakan komparasi metode analitik manual, perangkat lunak *Electrical Calculation*, serta *Ecodial* yang diuji secara komprehensif melalui simulasi *load flow* ETAP. Implikasi praktis dari penelitian ini adalah tersedianya acuan rekayasa bagi galangan kapal dalam mengoptimalkan kapasitas generator dan dimensi penghantar guna mencegah pemborosan investasi sekaligus menjamin kualitas daya yang memenuhi standar keselamatan pelayaran.

DAFTAR PUSTAKA

Adib, N. G., & Primadiono, Y. (2015). Analisis aliran daya sistem tenaga listrik pada bagian texturizing di PT Asia Pasific Fibers Tbk Kendal menggunakan Software ETAP Power Station 4.0. *Jurnal Teknik Elektro*, 7(1), 1–8.

Biro Klasifikasi Indonesia. (2016). *Rules for the classification and construction: Volume IV rules for electrical installations*. Jakarta: BKI.

Fathia, A. F. (2017). *Analisa kebutuhan daya listrik container crane dalam rangka elektrifikasi container crane untuk mengoptimalkan proses bongkar muat di Terminal Petikemas Surabaya* [Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. Surabaya: Fakultas Teknologi Kelautan ITS.

Hasanudin. (2016). *General ship design*. Surabaya: Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2009). *Standar kapal non-konvensi berbendera Indonesia (Non-Convention Vessel Standard / NCVS) Bab V*. Jakarta: Direktorat Jenderal Perhubungan Laut.

Legowo, E. (2017). *Analisis stabilitas tegangan pada sistem kelistrikan di kapal general cargo* [Tugas Akhir, Institut

Teknologi Sepuluh Nopember]. Surabaya: Fakultas Teknologi Kelautan ITS.

Novarianto. (2010). *Analisa karakteristik kebutuhan daya listrik pada kapal cargo dalam rangka efisiensi energi* [Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. Surabaya: Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK ITS.

Nugroho, A. S. (2014). *Perancangan kapal penyebrangan ferry ro-ro sebagai fasilitas pengangkut kereta api rute Jawa-Sumatera* [Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. Surabaya: Fakultas Teknologi Kelautan ITS.

Papanikolaou, A. (2014). *Ship design: Methodologies of preliminary design*. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8751-2

Sardono, S. (2010). *Modul instalasi listrik kapal*. Surabaya: Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Sitorus, B. (2015). Sistem kelistrikan dan ketahanan isolasi permesinan di atas kapal. *Jurnal Teknologi Maritim*, 12(2), 45–53.