

ANALISIS ENGINE PROPELLER MATCHING PROPULSI KAPAL IKAN TRADISIONAL DENGAN PTO GENERATOR

Mohammad Abu Jami'in

Tenaga Pengajar (Dosen)
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal
jammy@ppns.ac.id

This paper presents an analysis of power take off (PTO) generator connected to main engine and its effects to engine overload and ship speed. The purposes of research is to determine the safe operation of PTO generator by adjusting the ship speed. The PTO generator is a generator coupled with main engine to drive a cooling machine. The analysis of engine propeller matching method is used to determine the working points of ship propulsion coupled with PTO generator. The results of simulation show that the output power of main engine decreases by 8.4% of maximum continuous rating (MCR) point with the maximum speed is 5.4 knots. When it is connected to PTO generator, the output power of main engine does not decrease. It can be operated to MCR point with the maximum speed is 5.1 knots.

Keywords: Ship Propulsion, Engine Propeller Matching, PTO Generator, Engine Overload.

1. PENDAHULUAN

Keterbatasan media pendingin es yang tidak dapat diperbaharui ketika di laut menyebabkan terbatasnya durasi waktu untuk melaut. Hal ini berpengaruh terhadap hasil tangkapan ikan dan ukuran kapal yang dibangun. Produksi galangan kapal dengan media pendingin es maksimal 30 ton ikan dengan durasi melaut hanya berkisar 3-4 minggu. Instalasi mesin pendingin akan mampu mengatasi keterbatasan melaut dan berimbas terhadap peningkatan ukuran kapal dan hasil tangkapan ikan. Selain itu, kapal yang dibangun dapat lebih besar dan mampu menjangkau daerah melaut sampai pada *zona territorial* laut ZEE, durasi melaut tidak lagi dibatasi oleh waktu. Dari sisi ekonomis, penggunaan mesin pendingin dapat meningkatkan kualitas ikan hasil tangkapan dibanding dengan media pendingin es dan juga menurunkan biaya operasional dari penggunaan es. Biaya pembelian es tetap ada pada saat melaut walaupun tidak terpakai karena mencair ketika tidak digunakan akibat kebocoran isolasi [1].

Industri teknologi pangan, telah mengembangkan metode pembekuan secara cepat sehingga bahan pangan membeku dalam waktu yang sangat pendek. Pembekuan cepat akan menghasilkan kristal es berukuran kecil sehingga akan meminimalkan kerusakan tekstur bahan yang dibekukan. Selain itu, proses pembekuan cepat juga menyebabkan terjadinya kejutan dingin (*freeze shock*) pada mikroorganisme sehingga tidak terjadi tahap adaptasi mikroorganisme dengan perubahan suhu untuk mengurangi resiko pertumbuhan mikroorganisme selama proses pembekuan berlangsung, dengan demikian kualitas produk yang dibekukan dapat dipertahankan [2].

Terdapat dua tipe mesin pendingin yaitu mesin pendingin pembekuan cepat dan mesin pendingin *cold storage*. Waktu yang di butuhkan untuk mendinginkan produk ikan sampai pada suhu yang di inginkan yaitu -15°C adalah waktu siklus pembekuan yaitu 3,5 jam sampai 5,5 jam [3,4,5]. Estimasi beban pembekuan cepat adalah untuk menentukan kapasitas pendingin dan peralatan pendingin yang diperlukan untuk mempertahankan kondisi suhu penyimpanan yang diinginkan. Desain beban didasarkan pada kondisi desain dalam dan luar pendinginan [6]. Mesin pendingin pembekuan cepat mendinginkan ikan dari kondisi suhu lingkungan 30°C sampai suhu bawah beku -15°C . Kapasitas daya motor untuk menggerakkan motor kompresor pendingin pembekuan cepat jauh lebih besar dibandingkan dengan mesin pendingin *cold storage* yang mana tergantung dengan jumlah atau berat ikan yang ditangkap. Mesin pendingin *cold storage* adalah mesin pendingin untuk mempertahankan suhu beku ikan dijaga sekitar -2°C sampai -5°C .

Penggunaan *PTO generator* secara ekonomis menguntungkan yaitu biaya investasi yang cukup rendah mengacu pada ketiganya yaitu instalasi, operasi dan pemeliharaan, keandalan dan *lifetime* yang panjang. Tingkat kebisingan *shaft generator* lebih rendah daripada gen-set konvensional. Selain itu, penggunaan *shaft generator* sangat sesuai jika diaplikasikan sebagai penggerak pembekuan cepat untuk menurunkan biaya investasi terhadap *diesel generator* / gen-set. Jika pembekuan cepat dibebankan pada gen-set maka pada saat gen-set tidak digunakan untuk penggerak pembekuan cepat, keluaran gen-set akan turun yang berakibat kapasitas lebih dari *main engine*. Kapasitas lebih dari *main engine* berakibat meningkatnya konsumsi bahan bakar spesifik [7].

Barkowski dkk melakukan reanalisis kinerja propulsi kapal akibat perubahan kondisi kapal karena muatan dan lingkungan. Kinerja kapal dalam pelayanan yang berbeda dari yang diperoleh selama uji coba *sea trial* yaitu kondisi muatan, pengaruh lingkungan, kondisi cuaca dan *fouling*, kerusakan permukaan lambung dan baling baling, adalah faktor yang harus diperhatikan untuk melakukan reanalisis dan koreksi atas kinerja sistem propulsi kapal. Hal ini disebabkan karena perubahan kondisi akan menghasilkan perubahan beban propulsi kapal yang berakibat pada perubahan kinerja sistem propulsi [8,9]. Perbedaan riset yang telah dilakukan oleh Barkowski dkk adalah dalam riset ini, reanalisis dan koreksi kinerja sistem propulsi akan diterapkan pada penggunaan *shaft generator* untuk penggerak pembekuan cepat mesin pendingin. Data analisis hasil pengukuran terhadap hasil tangkapan ikan digunakan sebagai acuan untuk menghitung kebutuhan daya pembekuan cepat.

Pada saat dikopel dengan *PTO generator*, daya keluaran mesin utama berkurang karena dibagi dengan *shaft generator*. Ketika dikopel dengan *PTO generator* titik kerja sistem propulsi kapal bergeser yang dapat mengakibatkan keluaran daya *main engine* menurun dari *maximum continuous rating* (MCR), sehingga beban *main engine* berlebih atau *overload*. Konsekuensinya adalah batasan kecepatan operasi kapal harus di set ulang untuk mencegah *overload main engine*. Metode *engine propeller matching* [10] digunakan untuk menganalisis unjuk kerja sistem propulsi kapal pada saat dikopel dengan *PTO generator* dan tidak dikopel. *Engine propeller matching* adalah menentukan titik kerja propulsi terhadap karakteristik kinerja mesin yang mana data ini diperoleh dari pengujian mesin yang dituangkan dalam data teknik *main engine*. Karakteristik kinerja mesin dapat dinyatakan dengan parameter hubungan antara kecepatan, torsi, konsumsi bahan bakar spesifik, dan daya keluaran mesin [11,12,13]. Nilai kebaruan dari riset ini adalah aplikasi metoda *engine propeller matching* untuk menganalisis kelebihan beban dan jatuhnya keluaran daya mesin utama ketika dikopel dengan *PTO generator* untuk penggerak pembekuan cepat.

2. METODE DAN BAHAN

Alur dan metoda analisis *engine propeller matching* terdiri dari dua bagian yaitu dengan tanpa dikopel *PTO generator* dan dengan dikopel *PTO generator*. Analisis *engine propeller matching* dengan tanpa dikopel *PTO generator* membutuhkan data: 1) ukuran utama kapal dan hasil pengujian model kapal dengan *towing test*, 2) spesifikasi *propeller* dan grafik kinerja *open water test propeller*, 3) spesifikasi motor penggerak kapal (*engine performance map*). Dengan menggunakan perhitungan analisis dimensi antara model dan ukuran kapal skala penuh maka dapat dihitung karakteristik hambatan kapal. Karakteristik hambatan kapal dan karakteristik *propeller* disubstitusikan untuk mendapatkan persamaan *propeller loading curve* (kurva pembebanan *propeller*). Kurva pembebanan *propeller* diplotkan terhadap karakteristik *open water test propeller* untuk memperoleh titik kerja pengoperasian *propeller* seperti efisiensi *propeller*, kecepatan putar *propeller*, momen torsi dan gaya thrust. Analisis untuk memperoleh titik kerja *propeller*, kami menggunakan software AN-LOVA (analisis *loading propeller curva*). Dengan menggunakan data titik kerja *propeller*, diturunkan karakteristik propulsi kapal melalui fungsi gaya thrust (fungsi gaya dorong *propeller*) atau fungsi gaya torsi. Karakteristik propulsi kapal diplotkan terhadap karakteristik kinerja *main engine* yang dinyatakan dalam *engine performance map* untuk mendapatkan titik kerja pengoperasian *main engine* seperti kecepatan putar dan konsumsi bahan bakar spesifik.

Analisis *engine propeller matching* dengan dikopel *PTO generator* langkahnya sama dengan analisis *engine propeller* tanpa dikopel dengan *PTO generator*, namun karakteristik daya propulsi kapal ditambahkan dengan beban *PTO generator*. Beban *PTO generator* adalah beban untuk pendingin ikan. Secara lengkap penjelasan alur metoda penelitian terdiri atas 3 bagian yaitu 1) perhitungan hambatan kapal, 2) perhitungan daya *PTO generator*, 3) perhitungan kinerja baling baling.

2.1 Perhitungan hambatan kapal.

Hambatan kapal dihitung menggunakan metode analisa dimensi *model scale*. Model kapal dibuat dan diuji di Laboratorium uji tarik. Dari hasil pengujian tersebut hambatan kapal dihitung menggunakan formulasi Frode

dan Le Besnerais. Bahan yang dibutuhkan untuk perhitungan hambatan kapal adalah hasil uji model kapal di Laboratorium towing test.

Metode perhitungan tahanan kapal tradisional dilakukan dengan menggunakan pengujian model kapal [14]. Metode experiment untuk menghitung hambatan kapal dengan uji tarik pada model kapal dengan skala yang telah ditentukan bersarkan analisis dimensi pada kapal dan model [15]. Hasil uji hambatan model kapal digunakan untuk melakukan estimasi hambatan pada kapal skala penuh. Spesifikasi model dan kapal ditunjukkan pada Tabel 1. Metode perhitungan hambatan kapal berdasarkan data hasil pengujian model menggunakan metode Frode dan Le Besnerais dalam persamaan 1.

$$R_f = \left(0,0087 + \frac{0,053}{8,8 + L}\right) \times S \times v^{1,825} \quad (1)$$

Dengan,

R_f = Tahanan gesek (lb)

L = Panjang kapal atau model (ft)

S = Wetted Surface Area (ft²)

V = Kecepatan (Knot).

Persamaan 1 berlaku pada kondisi suhu lingkungan pengujian yang dilakukan Froude yaitu 55⁰ F, untuk pengujian hambatan gesek kapal pada suhu berbeda, harus dilakukan koreksi nilai konstanta hambatan gesek Froude. Formulasi dari froude dimodifikasi oleh Le Besnerais dengan mendefinisikan konstanta hambatan gesek (dalam satuan Metrik) pada suhu 15⁰C yang dinyatakan dalam persamaan 2.

$$R_f = \left(0,1392 + \frac{0,258}{2,68 + L}\right) \times S \times v^{1,825} \quad (2)$$

dengan koreksi akibat adanya perbedaan suhu, $\lambda' = \lambda(1 + 0,0043\Delta t)$ dengan Δt adalah suhu lingkungan pengujian dikurangi 15⁰C.

Analisis dimensi antara model dengan prototipe kapal skala penuh digunakan sebagai acuan untuk menghitung tahanan sisa model yang ditunjukkan pada persamaan 3, perhitungan tahanan sisa kapal yang ditunjukkan pada persamaan 4. Persamaan 5 adalah hubungan skala kecepatan antara model versus prototipe, sedangkan persamaan 6 adalah perhitungan koefisien gesek kapal. Perhitungan karakteristik hambatan kapal dinyatakan dengan persamaan 7.

$$R_{rm} = R_{tm} - R_{fm} \quad (3)$$

$$R_{rk} = r^3 R_{rm} \quad (4)$$

$$V_s = V_m \sqrt{r} \quad (5)$$

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (6)$$

$$R_t = k V^2 \quad (7)$$

Dengan,

R_{rm} = Hambatan model (kg)

R_{tm} = Hamabatan total model kapal (kg)

R_{fm} = Hamabatan gesek model kapal (kg)

R_{rk} = Hambatan sisa kapal (kg)

V_s = Kecepatan kapal (m/s)

V_m = Kecepatan model kapal (m/s)

r = rasio geometris ukuran kapal dan model yaitu 8

C_f = Koefisien hambatan gesek kapal

R_t = Hambatan total kapal maupun model (kg)

Data model kapal ikan tradisional dan hasil pengujiannya di Laboratorium Hidrodinamika ITS pada kondisi sarat penuh ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Dalam Tabel 2 juga ditampilkan hasil regresi kapal dengan fungsi yang dinyatakan dalam persamaan 7.

Tabel 1: Dimensi kapal vs model

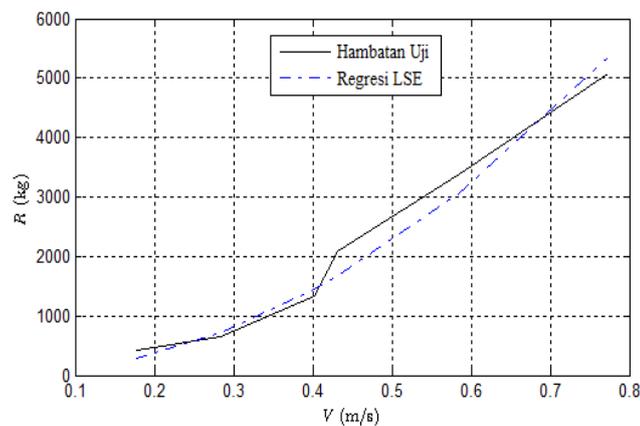
DIMENSI	KAPAL	MODEL
Loa (m)	11,4	1,425
Lwl (m)	10,73	1,34125
Lpp (m)	10,34	1,2925
B (m)	5,7	0,7125
H (m)	2	0,25
T (m)	1,8	0,225
Vs (knot)	7	
Prism Coef	0,643	0,643
Block coef	0,505	0,505

Tabel 2: Hasil pengujian model kapal sarat penuh

RUN KE	KEC, MODEL Vm (M/S)	KEC, KAPAL Vs (M/S)	HAMBATAN MODEL Rtm (KG)	HAMBATAN KAPAL Rts (KG)	HAMBATAN REG, Rs_reg (KG)
1	0,177	0,501	0,0634	423,67	357,49
2	0,284	0,803	0,0932	650,6	841,22
3	0,403	1,14	0,1914	1325,73	1588,47
4	0,432	1,222	0,3121	2094,88	1801,78
5	0,585	1,655	0,5013	3387,40	3123,59
6	0,773	2,186	0,7425	5070,71	5174,64

Hasil perhitungan hambatan dengan metode analisis dimensi antara model dan prototipe kapal sebenarnya ditunjukkan di Tabel.2 kolom 5. Selanjutnya dengan menggunakan teknik regresi kesalahan minimal yaitu metode *least square error algorithm* (LSE) [16,17] diturunkan hambatan kapal sebagai fungsi dari kecepatan kapal pada sarat penuh yang ditunjukkan pada persamaan 8. Hasil perhitungan hambatan kapal dengan metode regresi *linier*, hasilnya ditunjukkan di Tabel 2 pada kolom ke 6. Perbandingan antara nilai hambatan kapal dan hasil regresi hambatan kapal ditampilkan pada Gambar 1. Berdasarkan hasil analisis regresi diperoleh persamaan regresi yang dinyatakan dengan persamaan 8.

$$R_t = 8955.V^2 \tag{8}$$



Gambar 1: Hambatan kapal hasil analisis pengujian model vs hambatan kapal dengan regresi

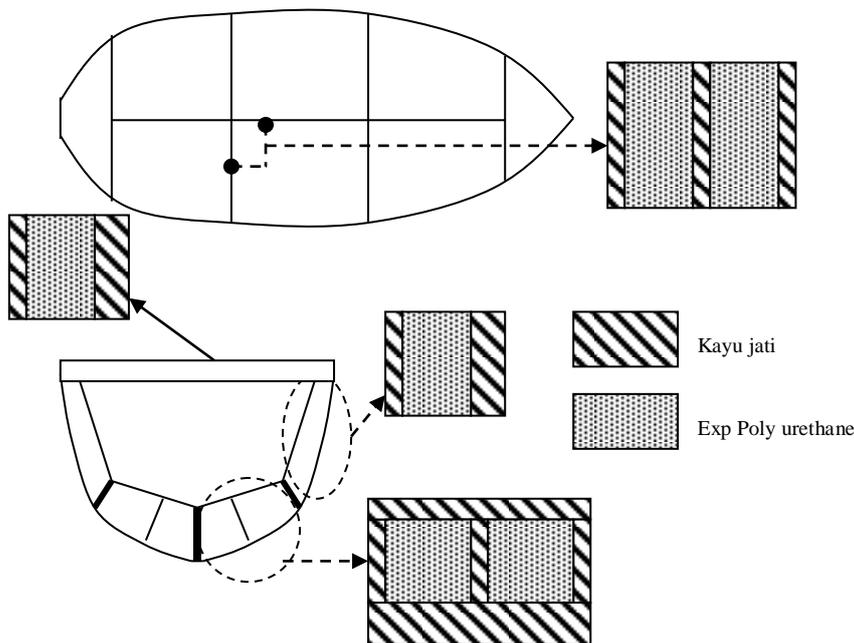
2.2 Perhitungan Daya PTO generator

PTO generator digunakan sebagai penggerak mesin pendingin pada saat proses pembekuan. Kami telah melakukan perhitungan beban mesin pendingin dan penggerak kompresor mesin pendingin dengan siklus kompresi uap standar. Bahan yang dibutuhkan adalah data hasil tangkapan ikan melalui wawancara dengan pelaut untuk sekali tangkap dan konstruksi muatan untuk penyimpanan ikan.

Pengawetan ikan melalui proses pendinginan adalah menurunkan suhu ikan sampai dibawah suhu bekunya (beban pembekuan), selanjutnya ikan disimpan pada ruang cold storage agar suhunya tetap di bawah suhu bekunya (beban *cold storage*). Sumber panas yang harus dibuang kalorinya di evaporatore pada saat proses pendinginan tersebut adalah:

1. Beban kebocoran isolasi
2. Beban panas oleh peralatan / perlengkapan mesin pendingin
3. Beban untuk membuang kalor latent, kalor spesifik, dan kalor respirasi ikan (*product Load*).

Beban kebocoran isolasi dihitung berdasarkan konstruksi ruang muat kapal ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Konstruksi ruang palkah penyimpanan ikan

Berdasarkan layout ruang muat palkah kapal yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan spesifikasi nilai konduktifitas bahan untuk isolasi ruang muat kapal yaitu insulasi kayu = 0.8, *Polyurethane* = 0.16, *Expanded Polystirena plain* = 0.25. Dengan menggunakan formulasi pada persamaan 9 dan persamaan 10, beban kebocoran isolasi dapat dihitung [18].

$$U = \frac{1}{\frac{1}{F_o} + \frac{Th_1}{K_1} + \frac{Th_2}{K_2} + \frac{Th_n}{K_n} + \frac{1}{F_i}} \quad (9)$$

Dengan,

Fo= Koef. lap. luar, 6 BTU/hr/°F/sq.ft

Fi= Koe. lap. dalam, 1.65 BTU/hr/°F/sq.ft

Th = Ketebalan isolasi, inch

K1, K2...,Kn = Konduktifitas termal, BTU/hr/°F/sq.ft

U= Total konduktifitas, BTU/hr/°F/sq.ft

Aliran rambatan kalor tiap jam (BTU/hr) dihitung dengan persamaan 10.

$$H = U.A.\Delta T \quad (10)$$

Kebocoran isolasi ruang muat ikan adalah total panas yang harus dibuang di isolasi bagian dasar kapal, bagian lambung kapal dan geladak cuaca. Spesifikasi konstruksi ruang muat adalah:

- Ketebalan kayu = $0.04 + 0.02 = 0.06 \text{ m} = 0.06 \times 39.4 = 2.364 \text{ inch}$.
- Ketebalan isolasi exp. *Polyurethane* = $5 \text{ cm} = 1.97 \text{ inch}$.
- Luas lambung kapal = $23.29 \text{ m}^2 = 250.6 \text{ sq.ft}$.
- Luas Geladak Cuaca = $21.768 \text{ m}^2 = 234.2 \text{ sq.ft}$.
- Luas sekat kamar mesin = 3.315 m^2 .
- Karakteristik ikan, Kalor jenis : $0.76 \text{ kalori/gr.}^\circ\text{C}$, Kalor laten beku : 56.4 kalori/gr , kalor jenis beku : $0.41 \text{ kalori/gr.}^\circ\text{C}$.
- Hasil tangkapan ikan rata rata adalah 1 ton
- Suhu awal ikan 32°C
- Titik beku = -2.2°C
- Teknik pembekuan cepat yaitu air pembekuan cepat menggunakan tiupan udara pada suhu -29°C sampai -40°C dengan kecepatan 2.5 m/s .
- Menggunakan Refrigerant R22, dengan karakteristik operasi -50°C sampai 10°C , titik didih -40.8°C , pada tekanan 1 atm, Suhu kondensasi 40°C .
- Spesifikasi mesin pendingin *cold storage* suhu evaporator -16°C , dan suhu kondensasi 40°C . Dengan spesifikasi pembekuan cepat suhu evaporatore -35°C , dan suhu kondensasi 40°C .

Berdasarkan bentuk ruang muat dan data spesifikanya, diperoleh daya penggerak kompresor yaitu,

- a. Daya untuk penggerak kompresor saat proses pembekuan 18.512 kWatt
- b. Daya penggerak kompresor saat penyimpanan ikan di *cold storage* adalah 1.585 kWatt .

Beban pada proses pembekuan bersifat sementara sesuai durasi waktu yang diperlukan untuk proses pembekuan yaitu antara 4 sampai 5.3 jam, sehingga dapat memanfaatkan *PTO generator*. Sedangkan, beban *cold storage* merupakan beban kontinyu, dan harus digunakan diesel generator secara terpisah. Mesin pendingin pada saat proses pembekuan digerakkan oleh *PTO generator*, maka diesel generator yang dibutuhkan satu buah dengan daya kontinyu 1.585 kWatt . Jika penggerak mesin pendingin tanpa *PTO generator*, maka penggerak diesel generator adalah dua buah, yaitu 18.512 kWatt untuk penggerak pembekuan cepat dan 1.585 kWatt untuk penggerak *cold storage*.

2.3 Perhitungan Kinerja Baling Baling

Kinerja baling-baling dihitung dalam dua kondisi pengoperasian mesin utama yaitu pengoperasian mesin utama tanpa dikopel *PTO generator*, dan pengoperasian mesin utama dikopel *PTO generator*. Edy prasetyo H dan M Abu Jami'in telah membuat *software* ANLOVA untuk perhitungan kinerja baling-baling dengan input variable nilai tahanan kapal dan atau spesifikasi kapal, spesifikasi *gearbox*, dan spesifikasi baling-baling seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Metode untuk menentukan titik kerja baling-baling adalah dengan mencari perpotongan antara grafik pembebanan baling-baling dan grafik open water test baling-baling, karakteristik *open water test* baling-baling didekati dengan formulasi *polynomial B series* baling-baling. Bahan yang dibutuhkan untuk perhitungan kinerja baling baling adalah spesifikasi data teknis baling-baling, *gearbox*, dan mesin utama.

Kurva pembebanan baling-baling adalah grafik yang melukiskan antara nilai konstanta thrust atau gaya dorong baling-baling terhadap konstanta *speed of advance* atau kecepatan maju baling-baling. Grafik tersebut diplotkan terhadap grafik *open water test* baling-baling untuk menentukan titik operasi baling-baling, informasi yang diperoleh adalah efisiensi baling-baling, kavitasi baling-baling, konstanta torsi baling-baling [19]. Konstanta torsi baling-baling digunakan sebagai acuan untuk menghitung daya penggerak baling-baling atau disebut DHP (*Delivered Horse Power*).

Pada saat mesin utama dikopel *PTO generator*, maka besar daya yang di kirimkan ke baling-baling (DHP) akan berkurang dan menyebabkan titik kerja baling-baling juga berubah. Persamaan dinamika baling-baling adalah grafik *open water test* baling-baling yang direpresentasikan dalam besaran / konstanta [20], yaitu: koefisien *thrust* yang dinyatakan dengan persamaan 11, koefisien torsi oleh persamaan 12, persamaan 13 menyatakan koefisien maju, dan efisiensi baling baling dinyatakan dengan persamaan 14.

$$K_t = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \tag{11}$$

$$Kq = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 D^5} \quad (12)$$

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{Kt \cdot J}{2\pi \cdot Kq} \quad (14)$$

Substitusi dari persamaan-persamaan di atas diperoleh persamaan 15 yang disebut kurva pembebanan baling-baling.

$$Kt = \frac{c}{\rho \cdot (1-t) \cdot (1-w)^2 \cdot D^2} \left[\frac{V_a}{n \cdot D} \right]^2 \quad (15)$$

Daya mesin utama kapal dapat dihitung dengan formulasi yang dinyatakan dalam persamaan 16.

$$DHP = Kq \rho n^3 D^5 \quad (16)$$

Software ANLOVA adalah representasi dari metode analisis kinerja *propeller* yang ditunjukkan pada Gambar 3, yang merupakan hasil running tanpa dikopel dengan *PTO generator*. Efisiensi baling baling dihitung pada saat kapal kondisi sarat penuh dan mesin utama tidak dikopel *PTO generator*. Dengan spesifikasi sistem penggerak yaitu spesifikasi mesin utama, baling-baling, dan *gearbox* ditetapkan, maka analisa perubahan kinerja baling-baling dilakukan. Analisa tersebut digunakan untuk mengetahui efisiensi baling-baling dan kelebihan beban mesin utama. Optimasi untuk penentuan diameter baling-baling dibatasi oleh bentuk buritan kapal. Sebagai patokan kasar diameter baling-baling diambil lebih kurang 70% dari kedalaman sarat air kapal muatan penuh (*draft*). Umumnya ukuran baling-baling dibatasi oleh tiga factor yaitu tenaga yang dibutuhkan, ukuran dan tipe mesin penggerak, dan tinggi sarat kapal.

Pada saat mesin utama dikopel *PTO generator*, maka beban mesin utama bertambah dan menyebabkan naiknya daya yang diserap poros motor. Akibatnya terjadi kelebihan beban motor, untuk menghindari terjadinya kelebihan beban maka kecepatan kapal harus diturunkan untuk mengurangi beban propulsi kapal. Berkurangnya beban propulsi menyebabkan terjadinya perubahan titik kerja baling-baling dan berpengaruh pada kinerja baling-baling.

3. HASIL DAN DISKUSI

Data yang diperlukan dalam perhitungan dan analisis kinerja baling-baling adalah:

Data Spesifikasi baling-baling:

- Tipe B Series Baling-baling
- Jumlah Baling-baling = dua buah
- Jumlah daun = 3 daun
- Expanded area ratio = 0.5
- Pitch per diameter = 0.8
- Diameter = 0.5 meter
- Bahan baling baling = bronze alloy (campuran tembaga dengan timah)

Data Mesin utama:

- Tipe Motor = Deutz KHD F3L912
- Jumlah Mesin utama = 2 buah
- Daya MCR = 45 kWatt.

Data *Gearbox*:

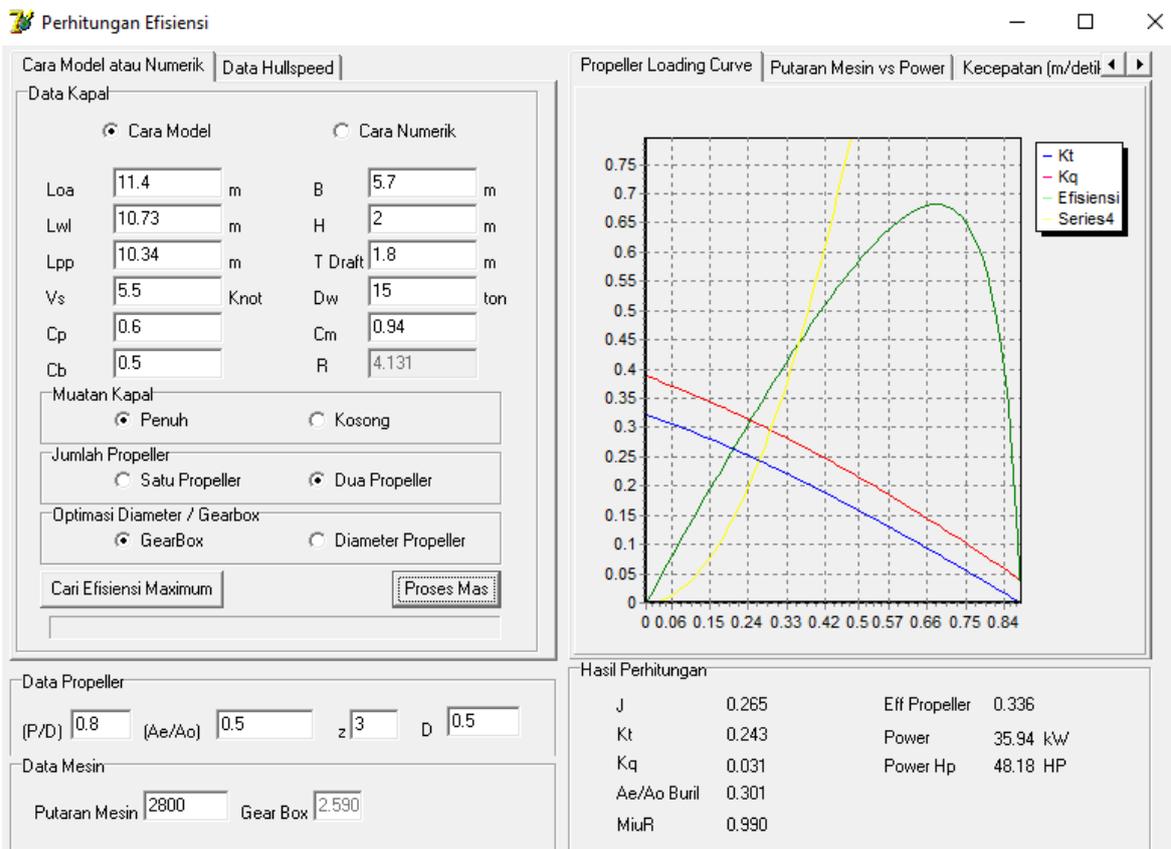
- Rasio *Gearbox* = 2.5:1

Spesifikasi *Generator*:

- Manufacturer: Greaves power
- Output MCR :13.2 kW

- Output Genset: 10kVA, 10kW
- Type, voltage, frequency : 4 pole, 330-440 Volt, 50 Hz, 3 fasa

Hasil plotting kurva pembebanan baling-baling terhadap *open water test* baling-baling menggunakan *software* ANLOVA ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Hasil running software ANLOVA tanpa PTO generator

Hasil running software ANLOVA pada Gambar.5 dapat diketahui:

- Efisiensi baling-baling = 0.336.
- Baling-baling tidak terjadi kavitasi.
- Rpm = 2800/2.59 = 1081 rpm
- Rpm motor dengan rasio gearbox 2.5 = 2700

Dengan menggunakan persamaan 16, diperoleh persamaan karakteristik power vs rpm propulsi kapal yaitu $DHP = 0.00615 \cdot N_{sp}^3$ kW. Rugi gesekan mekanis sistem transmisi diasumsikan 3%, maka daya pada poros motor atau *shaft horse power* (SHP) adalah $SHP = DHP/eff_{mekanis} = 0.00634 \cdot N_{sp}^3$, dengan N_{sp} adalah kecepatan propeller dalam putaran perdetik. Dengan rasio gearbox 2.5, maka karakteristik propulsi sebagai fungsi dari rpm propeller dinyatakan dengan persamaan 17.

$$SHP = 0.00634 \cdot \left(\frac{Np}{60}\right)^3 = 2.935 \cdot 10^{-8} \cdot Np^3 \tag{17}$$

Dengan rasio gearbox 2.5, maka karakteristik propulsi sebagai fungsi dari rpm motor dinyatakan dengan persamaan 18.

$$SHP = 2.935.10^{-8} \left(\frac{Nm}{2.5} \right)^3 = 1.88.10^{-9} .Nm^3 \tag{18}$$

Pada saat poros motor dikopel dengan PTO, maka persamaan karakteristik daya poros motor (SHP) menjadi $SHP = SHP_{nonPTO} + PTO$ yang dinyatakan dengan persamaan 19.

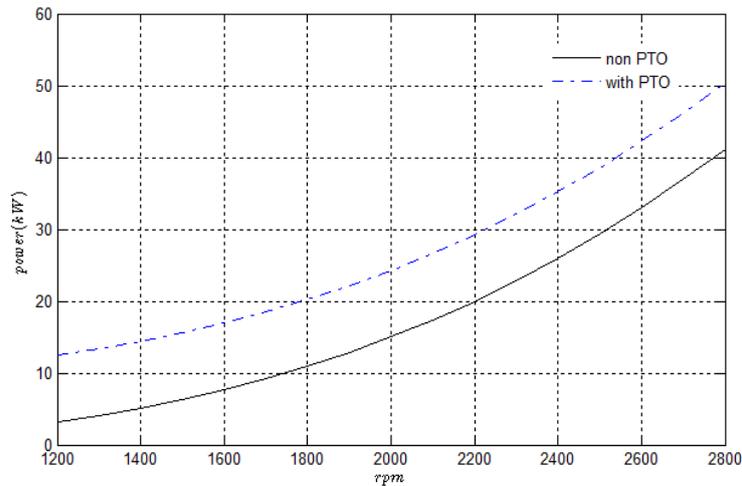
$$SHP = 1.88.10^{-9} .Nm^3 + 9.256 \tag{19}$$

dimana,

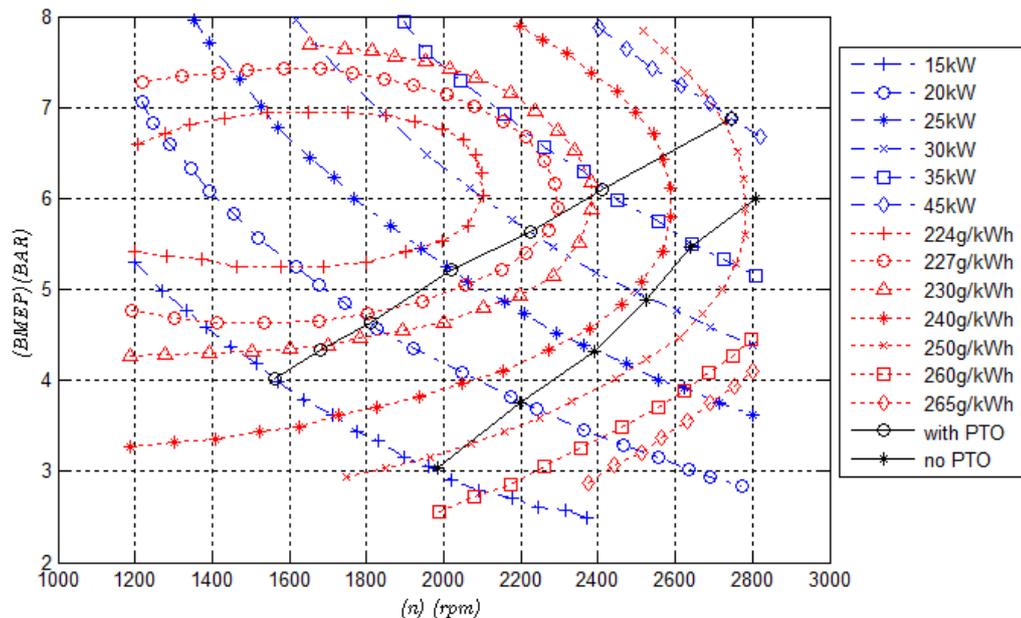
N_p = Kecepatan putar baling-baling (Rpm)

N_m = Kecepatan putar motor (Rpm)

SHP= Daya poros motor (kW)



Gambar 4: Karakteristik propulsi kapal dengan dan tanpa dikopel PTO generator



Gambar 5: Plotting karakteristik daya propulsi terhadap karakteristik motor

Karakteristik propulsi rpm vs daya poros motor (SHP) ditunjukkan pada Gambar 4. Plotting karakteristik propulsi kapal terhadap engine performance map dengan motor tipe KHD F3L912 ditunjukkan pada Gambar 5. Kurva bagian bawah menunjukkan grafik propulsi saat mesin utama tidak dikopel PTO, dan graf-

ik kinerja mesin utama saat di kopel PTO ditunjukkan pada kurva bagian atas pada Gambar 5. Berdasarkan hasil analisa *engine propeller matching* yang ditunjukkan pada Gambar 5, dihasilkan sebagai berikut,

Mesin utama tanpa PTO:

1. Daya maksimum yang dihasilkan motor adalah 41.2 kWatt (8.4%MCR (*maximum Continuous Rating*)), pada kecepatan 2800 rpm
2. Daya minimal yang dihasilkan motor adalah 15 kWatt pada kecepatan 2000 rpm

Mesin utama dikopel dengan PTO:

1. Daya maksimum yang dihasilkan motor adalah 45 kWatt (100% MCR), pada kecepatan 2670 rpm.
2. Daya *minimal* yang dihasilkan motor adalah 15 kWatt pada kecepatan 1450 rpm.

Pengoperasian motor pada daya *continuous rating* adalah 85% dari MCR. Untuk pengoperasian motor tanpa dikopel PTO terjadi drop keluaran daya motor, sehingga terjadi penurunan keluaran daya motor menjadi 41.2 kWatt, dan titik *service continuous rating* (SCR) motor 35 kWatt pada 2400 rpm. Sedangkan titik MCR pada motor yang dikopel dengan PTO adalah 85%MCR = 38.25 kWatt. Dan hubungan antara kecepatan kapal (m/s) vs daya motor (kWatt) ditunjukkan pada Tabel 3.

Hasil analisa *engine propeller matching* pada Tabel 4. dapat disimpulkan bahwa:

Pengoperasian motor tanpa PTO :

- Terjadi drop keluaran daya motor sebesar 8.4% yaitu dari 38.61 kWatt (85%MCR motor) turun menjadi 35 kWatt, 2650 rpm.
- Kecepatan kapal pada saat motor bekerja 85%MCR = 38.61 adalah 5.58 knot, sedangkan pada saat terjadi drop keluaran daya motor, kecepatan kapal turun menjadi 5.4 knot yang berarti kecepatan kapal berkurang 3.4%.

Pengoperasian motor dikopel PTO :

- Pada kondisi SCR kecepatan kapal 5.1 knot, 2500 rpm dan 38.58 kWatt.
- Tidak terjadi drop keluaran daya motor, sehingga daya keluaran motor 100%MCR.

Tabel 3: Hasil analisa *engine propeller matching* (plotting karakteristik propulsi kapal terhadap *performance map*)

ROTATION SPEED	SHIP SPEED	NON PTO	WITH PTO	ROTATION SPEED	SHIP SPEED	NON PTO	WITH PTO
1200	2,44	-	-	2200	4,48	19,99	29,24
1300	2,65	-	-	2300	4,69	22,84	32,09
1400	2,85	-	-	2400	4,89	25,95	35,2
1450	2,95	-	14,98	2500	5,09	29,33	38,58
1500	3,06	-	15,59	2600	5,3	32,99	42,25
1600	3,26	-	16,94	2650	5,4	34,93	44,19
1700	3,46	-	18,48	2670	5,44	35,73	44,98
1800	3,67	-	20,2	2700	5,5	36,94	-
1900	3,87	-	22,13	2740	5,58	38,61	-
2000	4,07	15,02	24,27	2800	5,7	41,2	-
2100	4,28	17,38	26,64				

4. KESIMPULAN

Sistem penggerak kapal tradisional memiliki dua mode operasi yaitu mode operasi tanpa dikopel dengan *PTO generator* dan mode operasi yang dikopel dengan *PTO generator*. Tujuan dari riset ini adalah untuk menentukan pengoperasian mesin utama yang aman tanpa mengalami kelebihan beban dengan mengatur kecepatan kapal. Analisis *engine propeller matching* digunakan untuk untuk menentukan titik pengoperasian yang aman dari mesin utama. Berdasarkan hasil analisis *engine propeller matching* kinerja mesin utama akan lebih baik pada saat dikopel dengan *PTO generator* dibandingkan tanpa dikopel dengan *PTO generator*. Mesin utama mampu beroperasi sampai pada titik MCR nya pada saat dikopel dengan *PTO generator*. Pada saat tanpa dikopel dengan *PTO*, mesin utama mengalami penurunan daya keluaran sebesar 8.4% dari titik

MCR nya. Pengoperasian aman *service continuous rating* (SCR) pada saat dikopel dengan dengan *PTO generator* adalah kecepatan kapal tidak boleh melebihi 5.1 knot, sedangkan kecepatan aman kapal pada saat tidak dikopel dengan *PTO generator* adalah tidak boleh melebihi 5.58 knot.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] JULIANTO, E., JAMI'IN, M. A., *Desain Compound System Blast Freezer dan Cold Storage untuk Peningkatan Performance Refrigeration*. 2005.
- [2] DERMAWAN, E., SYAWALUDDIN, S., ABRORI, M. R., NELFIYANTI, N., RAMADHAN, A. I., "Analisa Perhitungan Beban Kalor Dan Pemilihan Kompresor Dalam Perancangan Air Blast Freezer Untuk Membekukan Adonan Roti," *Tek. Eng. Sains J.*, vol. 1, no. 2, pp. 141–144, 2017.
- [3] DIMA, J. B., SANTOS, M. V., BARON, P. J., CALIFANO, A., ZARITZKY, N. E., "Experimental study and numerical modeling of the freezing process of marine products," *Food Bioprod. Process.*, vol. 92, no. 1, pp. 54–66, 2014.
- [4] LAKSHMISHA, I. P., RAVISHANKAR, C. N., NINAN, G., MOHAN, C. O., GOPAL, T. K. S., "Effect of freezing time on the quality of Indian mackerel (*Rastrelliger kanagaruta*) during frozen storage," *J. Food Sci.*, vol. 73, no. 7, pp. S345–S353, 2008.
- [5] CUESTA, F., SÁNCHEZ-ALONSO, I., NAVAS, A., CARECHE, M., "Calculation of full process freezing time in minced fish muscle," *MethodsX*, vol. 8, p. 101292, 2021.
- [6] WANG, G., ZOU, P., "Mathematical Modeling of Food Freezing in Air-Blast Freezer'," *Int. J. Mater. Mach. Manuf.*, vol. 2, no. 4, 2014.
- [7] PROUSALIDIS, J., PATSIOS, C., KANELLOS, F., SARIGIANNIDIS, A., TSEKOURAS, N., ANTONOPOULOS, G., "Exploiting shaft generators to improve ship efficiency," in *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2012, pp. 1–6.
- [8] BORKOWSKI, T., KOWALAK, P., MYŚKÓW, J., "Vessel main propulsion engine performance evaluation," *J. KONES*, vol. 19, pp. 53–60, 2012.
- [9] MIN, K.-S., KANG, S.-H., "Study on the form factor and full-scale ship resistance prediction method," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 108–118, 2010.
- [10] REN, H., DING, Y., SUI, C., "Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship–Engine–Propeller Matching," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 12, p. 425, 2019.
- [11] Gunawan, C., Siswanto, E., Yuliati, L., "Pengaruh Penambahan Langkah Kerja terhadap Unjuk Kerja Motor Bakar," *Rekayasa Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 209–216, 2019.
- [12] SASONGKO, M. N., ZUHRI, A. A., "Uji Performa Mesin Bensin dengan Sistem Injeksi Berbahan Bakar HCNG," *Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 69–77, 2021.
- [13] RAZI, M., SISWANTO, E., WIJAYANTI, W., "Pengaruh Derajat Pengapian terhadap Kinerja Motor Bakar 6 Langkah Berbahan Bakar Etanol," *Rekayasa Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 299–308, 2019.
- [14] SANTOSA, M. G. G., "Propulsi Kapal dalam Tinjauan Uji Model," *Wave J. Ilm. Teknol. Marit.*, vol. 10, no. 1, pp. 25–30, 2016.
- [15] CARLTON, J., *Marine propellers and propulsion*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [16] JAMI'IN, M.A., PRASETYO HIDAYAT, E., MUJIONO, U., JULIANTO, E., SINDHU ASMARA, I. P., "Analisa Data Hasil Pelatihan Pengukuran Kapal di Brondong dengan Pendekatan Fungsi Polinomial," in *Seminar MASTER*, 2017, pp. 181–186.
- [17] PRAHARSI, Y., JAMI'IN, M. A., SUHARDJITO, G., WEE, H.-M., "Modeling a traditional fishing boat building in East Java, Indonesia," *Ocean Eng.*, vol. 189, p. 106234, 2019.
- [18] AL-YASIRI, Q., AL-FURAJI, M. A., ALSHARA, A. K., "Comparative Study of Building Envelope Cooling Loads in Al-Amarah City, Iraq," *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 51, no. 5, pp. 632–648, 2019.
- [19] ESMAILIAN, E., GHASSEMI, H., ZAKERDOOST, H., "Systematic probabilistic design methodology for simultaneously optimizing the ship hull–propeller system," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 246–255, 2017.
- [20] LI, J., ZHAO, D., WANG, C., SUN, S., YE, L., "Method for the Calculation of the Underwater Effective Wake Field for Propeller Optimization," *Water*, vol. 11, no. 1, p. 165, 2019.