

STRATEGI OPTIMALISASI PEMILIHAN PROPELLER B-SERIES untuk KAPAL: STUDI KASUS KAPAL TANGKER

Desta Rifky Aldara¹, Triyanti Irmiyana¹, A Labib Fardany Faisal¹, Abdul Ghofur Ragil Insani²
Monika Retno Gunarti³

¹Politeknik Negeri Madura, Jurusan Teknologi Kemaritiman
Jl. Raya Camplong No.Km.4, Abacateh, Taddan, Kec. Camplong, Kabupaten Sampang,
Jawa Timur, 69281

²Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon, Jurusan Teknik Mesin Perkapalan
Jl. Sisingamangaraja No. 33 Lemahwungkuk, Panjunan, Kec. Lemahwungkuk, Kota Cirebon
Jawa Barat, 45111

³Politeknik Pelayaran Surabaya, Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal
Jl. Gunung Anyar Boulevard No. 1, Surabaya, Jawa Timur, 60155

Email: desta.rifky@poltera.ac.id

Abstrak

Pemilihan propeler merupakan proses yang penting karena mempengaruhi titik operasi mesin yang merepresentasikan kecepatan kapal hingga konsumsi bahan bakar. Diantara beberapa tipe propeller, B-Series Propeller merupakan seri propeller yang umum digunakan di kapal, karena B-Series propeller memiliki database yang cukup lengkap dan bervariasi, mulai dua hingga tujuh daun propeller. Dalam penelitian ini, program komputer berbasis pemrograman numerik dikembangkan untuk menentukan propeller B-Series yang paling optimum untuk kapal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempermudah proses desain awal propeller di kapal, sehingga pekerjaan desainer kapal lebih cepat dan efektif dalam mendapatkan propeller yang optimum dengan memperhatikan batasan – batasan seperti diameter maksimum propeller, kavitasi, gaya dorong propeller, dan koreksi bilangan Reynold. Dengan banyaknya objektif dalam proses pemilihan propeller, maka satu objektif utama dipilih dan objektif lainnya dijadikan variabel batasan dalam penelitian ini. Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan telah sesuai dengan teori kinerja propeller yang menyatakan bahwa jumlah daun propeller yang lebih kecil memiliki efisiensi yang lebih bagus dibandingkan dengan propeller dengan jumlah daun propeller lebih banyak.

Kata Kunci: Optimasi, Propeller, B-Series, Kavitasi, Program Komputer

Abstract

The preliminary design of a ship propeller is an important process because it affects the engine operating point which represents the ship's speed to fuel consumption. The B-Series Propeller is commonly used on ships, because the B-Series propeller has a fairly complete and varied database, from two to seven propeller blades. A computer program based on numerical programming was developed to obtain the optimal B-Series propeller for ships. The aim of this research is to simplify the preliminary design process of a ship's propeller so that the work of ship designers is faster and more effective in obtaining optimum propellers by considering the maximum propeller diameter, cavitation, propeller thrust force, and Reynolds number correction constraint. The preliminary design of a ship propeller is a complex process and handles multi-objective constraints. This paper will simplify the multi-objective constraints by selecting one main objective constraint and the other objectives were used as constraints variable. The simulation result indicated good agreement with propeller performance theory which states that a smaller number of propeller blades has better efficiency compared to a propeller with a larger number of propeller blades.

Keyword: Optimization, Propeller, B-Series, Cavitation, Computer program

1. PENDAHULUAN

Untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan oleh emisi pada industri perkapalan, *International Maritime Organization (IMO)* mengadopsi *Strategi Green House Gas (GHG)* dengan target pengurangan karbon sebesar 40 persen pada tahun 2030 dan 50% pada tahun 2050 [1]. Pada

1 Januari 2023, setiap kapal berkapasitas 400 *Gross Tonnage* wajib memiliki sertifikat *International Energy Efficiency (IEE)*. Untuk mendapatkan Sertifikat tersebut, masing-masing harus memenuhi persyaratan *Energy Efficiency Design Index (EEDI)*, *Energy Efficiency eXisting ship Index (EEXI)*, dan menerapkan *Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*. *EEDI*

merupakan Langkah teknis yang dikeluarkan oleh *IMO* untuk mengukur tingkat efisiensi energi kapal. *EEDI* bertujuan untuk memberikan batasan nilai kewajaran efisiensi kapal tergantung dari jenis dan ukuran kapal.

Peraturan organisasi internasional dan nasional terkait dengan dampak lingkungan yang diakibatkan oleh industri perkapalan semakin ketat diterapkan [2], sehingga berbagai solusi dan metode dipertimbangkan untuk memenuhi peraturan tersebut. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk memenuhi regulasi tersebut adalah dengan mengoptimalkan bagian-bagian kapal sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi kapal, mengurangi daya, dan mengurangi konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan kapal [3].

Propeller merupakan Salah satu bagian penting dalam sistem penggerak kapal yang terdiri dari mesin utama, poros transmisi, dan *propeller*. *Propeller* digunakan untuk menggerakkan kapal berdasarkan tenaga yang dihasilkan dan disalurkan dari mesin utama [4]. Pemilihan *propeller* merupakan proses yang penting karena mempengaruhi titik operasi mesin yang perrepresentasikan kecepatan kapal, tenaga mesin yang dibutuhkan, dan konsumsi bahan bakar. Semakin tinggi efisiensi *propeller*, maka kinerja mesin induk juga semakin optimal. Sehingga, pemilihan *propeller* mempengaruhi *EEDI* untuk kapal baru dan *EEXI* untuk kapal eksisting [5].

Terdapat dua metode yang umum digunakan dalam mendesain *propeller*. Metode pertama adalah dengan membaca diagram hasil *open water test* pada *series propeller*. Metode kedua adalah dengan mendesain *propeller* menggunakan *software* komputer tanpa adanya batasan geometri seperti pada *series propeller* [6]. Diantara beberapa *series propeller*, *B-Series Propeller* merupakan seri *propeller* yang umum digunakan di kapal, karena *B-Series propeller* memiliki *database* yang cukup lengkap dan bervariasi, mulai dua hingga tujuh daun *propeller*.

Penelitian yang berkaitan dengan metode pemilihan *propeller B-Series* telah dilakukan [7]. Dalam penelitian tersebut, algoritma pemilihan *propeller* dibuat untuk pemilihan *propeller B-series* kapal *twin screw*. Algoritma yang dikembangkan menggunakan metode Keller untuk menilai kavitasi pada *propeller*. Nilai dari *Advance Coefficient (J)*, *Pitch per Diameter (P/D)*, dan *Expanded blade Area Ratio (AE/A0)* masih dibatasi secara manual. Penelitian serupa juga telah dilakukan untuk mencari *propeller B-Series* untuk *Pure Sine Boat* [8]. Dalam penelitian tersebut, putaran *propeller* ditentukan sebagai variabel independen yang mempengaruhi variabel lainnya. Algoritma yang dikembangkan menggunakan metode Keller untuk membatasi nilai *AE/A0* sehingga jumlah iterasi menjadi berkurang.

Pemilihan *propeller* untuk kapal kontainer juga telah dilakukan [9]. Pada penelitian tersebut menggunakan metode Keller dan metode Burril untuk memverifikasi kavitasi pada *propeller*. Metode numerik untuk pemilihan *propeller* pada kapal patroli juga telah dilakukan [6].

Dalam penelitian ini, program komputer berbasis pemrograman numerik dikembangkan untuk menentukan *propeller B-Series* yang paling optimum pada kapal dengan menggunakan metode optimisasi *non-linear*. Proses desain awal *propeller* dengan menggunakan program komputer tersebut memperhitungkan batasan - batasan seperti diameter maksimum *propeller*, kavitasi, kekuatan material, gaya dorong *propeller*, dan koreksi bilangan *Reynold*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempermudah proses desain awal *propeller* di kapal, sehingga pekerjaan desainer kapal lebih cepat dan efektif dalam mendapatkan *propeller* yang optimum di kapal dengan memperhatikan batasan – batasan tertentu. Selain itu, *propeller* dengan efisiensi yang tinggi diharapkan dapat mengoptimalkan kinerja mesin Induk, sehingga bahan bakar yang dibutuhkan lebih efisien dan emisi yang dikeluarkan dapat memenuhi regulasi dari *statutory*.

2. METODE

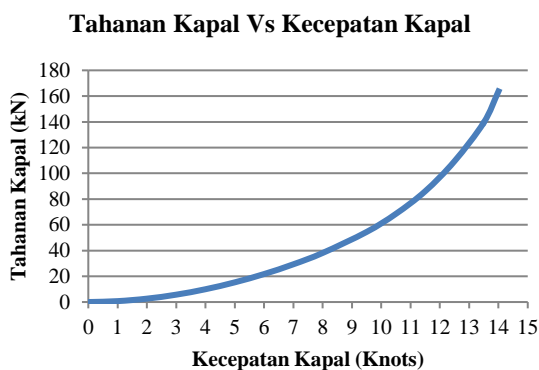
2.1 Data Kapal/Studi Kasus

Objek dalam penelitian ini adalah kapal Tanker dengan dimensi utama kapal yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tahanan kapal dalam penelitian ini dihitung dengan menggunakan metode Holtrop. Nilai tahanan total kapal yang dijadikan objek penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Nilai tahanan kapal pada kecepatan dinas 13,6 Knots adalah 139,47 kN.

Tabel 1. Dimensi Utama Kapal

Parameter	Nilai	Unit
Tipe Kapal	Oil Tanker	-
Length Between Perpendicular (Lpp)	101	m
Length Water Line (LWL)	104.03	m
Lebar (B)	16	m
Tinggi geladak (H)	8,05	m
Sarat air (T)	6,514	m
Kecepatan dinas (Vs)	13,5	knot
Kefisien Blok (CB)	0.704	-



Gambar 1. Tahanan Kapal

2.2 Performa Propeller B-Series

Propeller B-Series dikembangkan di Netherlands Ship Model Basin. Koefisien gaya dorong (KT) dan torsi (KQ) dapat dinyatakan sebagai fungsi dari jumlah daun propeller (Z), Expanded blade Area Ratio (AE/AO), pitch per diameter ratio (P/D), dan advance coefficient (J) seperti pada persamaan (1) [10].

$$K_T = \sum_{i=1}^{39} C_{Ti} \cdot J^{si} \left(\frac{P}{D}\right)^{ti} \cdot \left(\frac{AE}{AO}\right)^{ui} \cdot Z^{vi} \tag{1}$$

$$K_Q = \sum_{i=1}^{47} C_{Qi} \cdot J^{si'} \left(\frac{P}{D}\right)^{ti'} \cdot \left(\frac{AE}{AO}\right)^{ui'} \cdot Z^{vi'} \tag{2}$$

Di mana, C_{Ti} dan C_{Qi} adalah koefisien regresi gaya dorong dan koefisien torsi, masing-masing. Nilai dari masing – masing koefisien yang disebutkan pada persamaan (1). dan (2) dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3. Jika bilangan Reynolds pada 0,75R lebih besar dari 2×10^6 , maka nilai dari koefisien dorong dan torsi harus dikoreksi. Bilangan Reynold dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3).

$$(Rn)_{0.75R} = \frac{C_{0.75R} \cdot \sqrt{V_a^2 + (0.75\pi nD)^2}}{v} \tag{3}$$

Dimana, $C_{0.75R}$ adalah blade chord length pada 0.75R, V_A adalah advance velocity (m/s), n merupakan putaran propeller per detik, D adalah diameter propeller (meter), dan v adalah viskositas kinematik (m²/s).

Koreksi koefisien dorong (K_T) dan koefisien torsi (K_Q) akibat dari bilangan reynold dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4) dan (5).

$$\begin{aligned} \Delta K_T = & 0.000353485 \\ & -0.00333758(AE/AO)J^2 \\ & -0.00478125(AE/AO)(P/D)J \\ & +0.000257792(\log Rn-0.301)^2(AE/AO)J^2 \\ & +0.0000643192(\log Rn-0.301)(P/D)^6J^2 \\ & -0.0000110636(\log Rn-0.301)^2(P/D)^6J^2 \\ & -0.0000276305(\log Rn- \\ & 0.301)^2Z(AE/AO)J^2 \\ & +0.0000954(\log Rn- \\ & 0.301)Z(AE/AO)(P/D)J \\ & +0.0000032049(\log Rn- \\ & 0.301)Z^2(AE/AO)(P/D)^3J \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \Delta K_Q = & -0.000591412 \\ & +0.00696898(P/D) \\ & -0.0000666654Z(P/D)^6 \\ & +0.0160818(AE/AO)^2 \\ & -0.000938091(\log Rn-0.301)(P/D) \\ & -0.00059593(\log Rn-0.301)(P/D)^2 \\ & +0.0000782099(\log Rn-0.301)^2(P/D)^2 \\ & +0.0000052199(\log Rn- \\ & 0.301)Z(AE/AO)J^2 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 & -0.00000088528(\log Rn-0.301)^2Z(AE/A_0)(P/D)J \\
 & +0.0000230171(\log Rn-0.301)Z(P/D)^6 \\
 & -0.00000184341(\log Rn-0.301)^2Z(P/D)^6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -0.00400252(\log Rn-0.301)(AE/A_0)^2 \\
 & +0.000220915(\log Rn-0.301)^2(AE/A_0)^2
 \end{aligned}$$

Tabel 2. Koefisien Polinomial KT

$K_T =$	C	s J	t P/D	u A_E/A_0	v Z	$K_T =$	C	s J	t P/D	u A_E/A_0	v Z
1	0,00880496	0	0	0	0	21	0,010465	1	6	2	0
2	-0,204554	1	0	0	0	22	-0,00648272	2	6	2	0
3	0,166351	0	1	0	0	23	-0,00841728	0	3	0	1
4	0,158114	0	2	0	0	24	0,0168424	1	3	0	1
5	-0,147581	2	0	1	0	25	-0,00102296	3	3	0	1
6	-0,481497	1	1	1	0	26	-0,0317791	0	3	1	1
7	0,415437	0	2	1	0	27	0,018604	1	0	2	1
8	0,0144043	0	0	0	1	28	-0,00410798	0	2	2	1
9	-0,0530054	2	0	0	1	29	-0,000606848	0	0	0	2
10	0,0143481	0	1	0	1	30	-0,0049819	1	0	0	2
11	0,0606826	1	1	0	1	31	0,0025983	2	0	0	2
12	-0,0125894	0	0	1	1	32	-0,000560528	3	0	0	2
13	0,0109689	1	0	1	1	33	-0,00163652	1	2	0	2
14	-0,133698	0	3	0	0	34	-0,000328787	1	6	0	2
15	0,00638407	0	6	0	0	35	0,000116502	2	6	0	2
16	-0,00132718	2	6	0	0	36	0,000690904	0	0	1	2
17	0,168496	3	0	1	0	37	0,00421749	0	3	1	2
18	-0,0507214	0	0	2	0	38	0,0000565229	3	6	1	2
19	0,0854559	2	0	2	0	39	-0,00146564	0	3	2	2
20	-0,0504475	3	0	2	0						

Tabel 3. Koefisien Polinomial KQ

$K_Q =$	C	s J	t P/D	u A_E/A_0	v Z	$K_Q =$	C	s J	t P/D	u A_E/A_0	v Z
1	0,00379368	0	0	0	0	25	-0,0397722	0	3	2	0
2	0,00886523	2	0	0	0	26	-0,00350024	0	6	2	0
3	-0,032241	1	1	0	0	27	-0,0106854	3	0	0	1
4	0,00344778	0	2	0	0	28	0,00110903	3	3	0	1
5	-0,0408811	0	1	1	0	29	-0,000313912	0	6	0	1
6	-0,108009	1	1	1	0	30	0,0035985	3	0	1	1
7	-0,0885381	2	1	1	0	31	-0,00142121	0	6	1	1
8	0,188561	0	2	1	0	32	-0,00383637	1	0	2	1
9	-0,00370871	1	0	0	1	33	0,0126803	0	2	2	1
10	0,00513696	0	1	0	1	34	-0,00318278	2	3	2	1
11	0,0209449	1	1	0	1	35	0,00334268	0	6	2	1
12	0,00474319	2	1	0	1	36	-0,00183491	1	1	0	2
13	-0,00723408	2	0	1	1	37	0,000112451	3	2	0	2
14	0,00438388	1	1	1	1	38	-2.97E+00	3	6	0	2
15	-0,0269403	0	2	1	1	39	0,000269551	1	0	1	2
16	0,0558082	3	0	1	0	40	0,00083265	2	0	1	2
17	0,0161886	0	3	1	0	41	0,00155334	0	2	1	2
18	0,00318086	1	3	1	0	42	0,000302683	0	6	1	2
19	0,015896	0	0	2	0	43	-0,0001843	0	0	2	2
20	0,0471729	1	0	2	0	44	-0,000425399	0	3	2	2
21	0,0196283	3	0	2	0	45	8.69E+00	3	3	2	2
22	-0,0502782	0	1	2	0	46	-0,0004659	0	6	2	2
23	-0,030055	3	1	2	0	47	5.54E+00	1	6	2	2

$K_Q =$	C	s J	t P/D	u A _E /A _O	v Z	$K_Q =$	C	s J	t P/D	u A _E /A _O	v Z
24	0,0417122	2	2	2	0						

Dengan adanya koreksi akibat dari nilai Reynolds Number, maka nilai K_T dan K_Q ditunjukkan pada persamaan (6) dan (7).

$$K_T(R_n) = K_T(R_n = 2 \times 10^6) + \Delta K_T(R_n) \tag{6}$$

$$K_Q(R_n) = K_Q(R_n = 2 \times 10^6) + \Delta K_Q(R_n) \tag{7}$$

2.3 Fungsi Tujuan

Pemilihan propeller untuk kapal merupakan proses yang kompleks dan banyak objektif atau tujuan yang harus terpenuhi seperti: efisiensi, kavitasi, dan diameter propeller. Untuk melakukan optimasi pada pemilihan propeller, maka beberapa tujuan tersebut dirumuskan sebagai fungsi tujuan. Terdapat Dua cara untuk memecahkan permasalahan “*multi objective*” tersebut, kedua cara tersebut mengubah fungsi *multi objective* menjadi *single objective*. Kedua cara tersebut adalah:

- Satu tujuan utama dipilih dan tujuan lainnya dijadikan sebagai batasan permasalahan; dan
- Melakukan pembobotan pada semua fungsi untuk merumuskan fungsi optimasi.

Dalam penelitian ini, satu tujuan utama dipilih dan tujuan lainnya dijadikan variabel batasan. Tujuan utama dari pemilihan propeller adalah mendapatkan propeller dengan efisiensi tertinggi. Sehingga memaksimalkan efisiensi propeller dipilih menjadi tujuan utama dalam penelitian ini. Efisiensi propeller didapatkan melalui persamaan (8).

$$\eta = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \tag{8}$$

Dimana J adalah *advance coefficient*, K_T adalah *thrust coefficient*, dan K_Q adalah *torque coefficient*.

2.4 Batasan Advance Coefficient

Nilai dari *advance coefficient* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (9).

$$J = \frac{V_A}{nD} \tag{9}$$

Dimana, V_A adalah *advance speed*, n adalah putaran *propeller* dalam Satu detik, dan D adalah diameter propeller (m). Dalam penelitian ini, nilai dari putaran *propeller* telah ditentukan yaitu 255 RPM atau 4,17 RPS. Sedangkan nilai dari Diameter *propeller* merupakan salah satu objektif yang dicari. Akan tetapi nilainya dibatasi dengan diameter maksimum *propeller* yang dapat terpasang di kapal. Dengan nilai putaran *propeller* yang sama, semakin besar diameter *propeller* maka nilai dari *advance coefficient* semakin kecil. Begitu juga sebaliknya, semakin kecil diameter propeller, maka nilai dari *advance coefficient* semakin besar. Dengan adanya pembatasan nilai diameter maksimum, maka didapatkan nilai J minimum.

2.5 Metode Prodiksi Kavitasi

Kavitasi adalah fenomena umum dalam mekanika fluida dimana tekanan berkurang dengan tiba – tiba pada suatu cairan. Fenomena tersebut disebabkan oleh kecepatan aliran cairan yang tinggi, sehingga menyebabkan penguapan pada fluida meskipun suhunya kurang dari titik didih fluida tersebut. Kavitasi mengakibatkan terbentuknya gelembung gas atau uap pada cairan tersebut. Kavitasi dapat menyebabkan penurunan kecepatan dikarenakan sistem propulsi yang terganggu; terjadinya kerusakan pada propeller akibat dari korosi erosi; menyebabkan getaran dan kebisingan.

Kavitasi pada propeller perlu dipertimbangkan dalam mendesain propeller untuk menghindari kerugian yang muncul akibat dari kavitasi. Metode yang dapat

digunakan untuk mengevaluasi kavitasi pada tahap desain propeller adalah Metode Burril dan Metode Keller. Pada penelitian ini, kedua metode tersebut digunakan untuk mengevaluasi kavitasi di propeller.

Metode Keller

Metode Keller memprediksikan nilai AE/A0 minimum untuk meminimalkan risiko kavitasi kavitasi [11]. Nilai minimum AE/A0 dengan menggunakan metode keller ditujukan pada persamaan (10).

$$[AE/A0]_{min} = \frac{1.3 + 0.3Z}{(P_o - P_v)D^2} + K \quad (10)$$

Dimana, AE/A0 min adalah nilai minimum dari rasio luasan propeller, Z adalah jumlah daun propeller, P_o adalah *static pressure*, P_v adalah *vapor pressure*, D adalah diameter propeller, dan K adalah konstanta dengan nilai 0,2 untuk kapal single screw. Sedangkan untuk twin screw, nilai K bervariasi antara 0 untuk kapal cepat twin screw hingga 0,1 untuk kapal twin screw yang lebih lambat.

Metode Burril

Pendekatan kavitasi untuk digunakan pada tahap awal desain propeller diusulkan oleh Burril dan Emmerson. Burril dan Emmerson telah memetakan data dari percobaan *cavitation tunnel* dan menunjukkan batasan nilai τ_c untuk bilangan kavitasi tertentu (σ). *Thrust loading Coefficient* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (11) [12].

$$\tau_c = \frac{\frac{T}{A_P}}{\frac{1}{2}\rho[V_A^2 + (0.7\pi nD)^2]} \quad (11)$$

Estimasi nilai *Projected Area* (AP) dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan persamaan (12).

$$A_P = \left[1.067 - 0.229 \frac{P}{D} \right] A_E \quad (12)$$

Developed blade area (A_D) diasumsikan sama dengan *expanded blade area* (AE) untuk perhitungan praktis [4]. Dengan menggunakan metode burril, nilai P/D maksimum dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (13).

$$P/D_{max} = \frac{1.067 - (\frac{AP_{min}}{Ad})}{0.299} \quad (13)$$

2.6 Batasan Kekuatan Material

Untuk memastikan ketebalan dan kekuatan bilah propeller, persamaan (14) dapat digunakan untuk menentukan rasio minimum ketebalan bilah pada 0,7R terhadap diameter.

$$\left[\frac{t_{min}}{D} \right]_{0.7R} = 0.0028 + 0.21 \sqrt[3]{\frac{[3183.87 - 1508.15(\frac{P}{D})]SHP}{1266652.04nD^3(S_c + 20.9D^2n^2)}} \quad (14)$$

dimana, (P/D) adalah rasio *pitch* dan diameter baling-baling, SHP adalah daya poros, D adalah diameter baling-baling, n adalah kecepatan putar baling-baling dalam putaran per detik, S_c adalah tegangan ijin material dalam MPa.

2.7 Batasan Gaya Dorong

Gaya dorong baling-baling yang dihitung (T_{Cal}) harus sama dengan daya dorong yang dibutuhkan (T_R). Gaya dorong baling-baling dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (15) dan (16).

$$T_{CAL} = K_T \rho n^2 D^4 \quad (15)$$

$$T_R = \frac{R_T}{N_P(1 - t)} \quad (16)$$

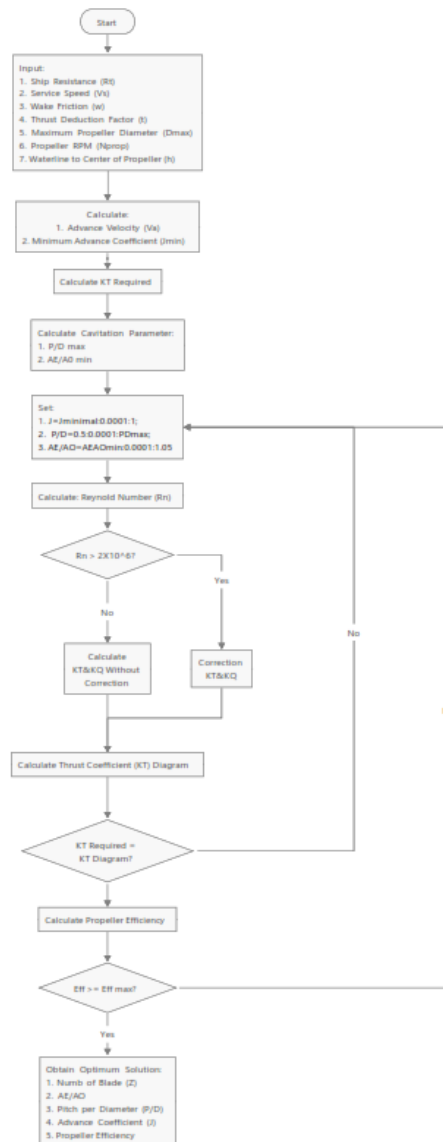
Dimana, R_T adalah hambatan total kapal, N_P adalah jumlah baling-baling dan t adalah *thrust deduction factor*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 PEMBUATAN PROGRAM KOMPUTER

Pembuatan program komputer dilakukan untuk menemukan *propeller B-series* yang optimal. Program komputer dibuat dengan menggunakan *software* MATLAB. Program ini dapat digunakan dalam desain awal pemilihan propeller B series untuk semua tipe kapal. Terdapat Empat batasan dalam program komputer ini, yaitu: Batasan gaya dorong (T_{CAL}), *Advance Coefficient* (J), AE/AO , P/D , dan *Reynold Number*.

Batasan *advance coefficient* merupakan fungsi dari diameter maksimum propeller. Sedangkan batasan AE/AO dan P/D merupakan fungsi dari kavitasi, batasan tersebut meminimalisir terjadinya kavitasi pada propeller yang terpilih. Bilangan reynold diperlukan untuk perhitungan koreksi dari nilai K_T dan K_Q . T_{CAL} dibutuhkan untuk mendapatkan gaya dorong yang sesuai dengan kebutuhan (T_R). Pada perpotongan T_{CAL} dan T_R diperoleh karakteristik propeller. Nilai tersebut dibandingkan untuk mendapatkan efisiensi tertinggi pada masing-masing variabel propeller. Program ini dimulai dari titik awal yaitu input parameter dan berlanjut menuju titik optimum sesuai langkah-langkah yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Pemrograman

3.2 Studi Kasus

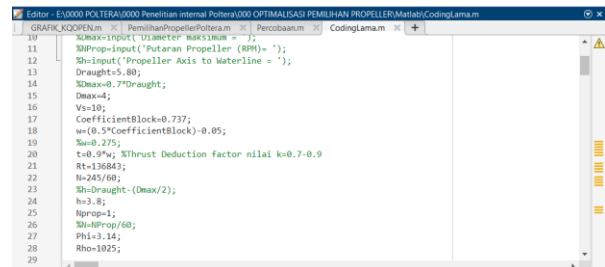
Pemrograman komputer dibuat berdasarkan diagram alir pada Gambar 2 dengan menggunakan aplikasi MATLAB. Model optimasi memadukan persamaan regresi seri Wageningen B dengan metode optimasi nonlinier. Karakteristik *propeller* seperti diameter, kecepatan putaran, jumlah daun *propeller*, *blade area ratio* (AE/AO), *pitch per diameter* (P/D) dioptimalkan untuk mendapatkan *propeller* dengan efisiensi tertinggi untuk kecepatan service tertentu dan tidak mengalami kavitasi berdasarkan pendekatan metode Keller dan Burril.

Data awal yang dimasukkan dalam program komputer yang telah dibuat adalah: tahanan kapal (R_T) pada kecepatan service, kecepatan service kapal (V_s), *wake friction* (w), *thrust deduction factor* (f), *draft* kapal (T), diameter maksimum propeller, Jumlah *Propeller* (N_p), putaran *propeller*, dan tinggi dari titik tengah *propeller* ke garis air. Data masukkan yang digunakan sebagai contoh dalam studi kasus ini adalah data kapal tanker seperti pada Tabel 4. Input data dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 4. Data Input untuk Simulasi

Parameter	Nilai	Satuan
Tahanan Kapal (R_T)	136.843	N
Kecepatan Service (V_s)	10	Knot
Wake Friction (W)	0,3185	-
Thrust Deduction Factor (F)	0,2867	-
Draft Kapal (T)	5,80	Meter
Jumlah Propeller	1	-

Diameter Maksimum Propeller	4	Meter
Putaran Propeller	245	RPM
Tinggi Dari Titik Tengah Propeller Ke Garis Air (h)	3,8	Meter



Gambar 3. Input Data

Untuk memastikan bahwa program dapat berjalan dengan baik sesuai dengan diagram alir yang telah dibuat, maka penulis memastikan dengan melakukan simulasi per jumlah daun propeller, yaitu propeller 3 *blade*, 4 *blade*, 5 *blade*, 6 *blade*, dan 7 *blade*. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Optimasi Pemilihan Propeller pada Masing – masing Jumlah Blade

Parameter	Jumlah Daun Propeller				
	3	4	5	6	7
Diameter Propeller (m)	3,191	3,057	2,898	2,810	2,688
Nilai AE/A0	0,425	0,475	0,575	0,650	0,700
Nilai P/D	0,570	0,610	0,680	0,720	0,790
Nilai J	0,367	0,383	0,404	0,417	0,436
Nilai KT	0,110	0,131	0,162	0,183	0,219
Nilai KQ	0,011	0,015	0,020	0,024	0,031
Efisiensi Propeller	56,28%	54,08%	52,68%	51,37%	49,77%
Torsi Propeller adalah (kN)	67,1787	69,9928	71,8736	73,6474	76,0586
DHP (kW)	1.757,8	1.831,5	1.880,7	1.927,1	1.990,2
SHP (kW)	1.793,7	1.868,9	1.919,1	1.966,4	2.030,8
BHP SCR (kW) at 85% MCR	1.793,7	1.868,9	1.919,1	1.966,4	2.030,8
BHP MCR (kW)	2.110,3	2.198,7	2.257,7	2.313,5	2.389,2

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa jumlah daun propeller yang lebih kecil memberikan efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan jumlah daun *propeller* yang lebih banyak. Dengan putaran propeller yang sama yaitu 245 RPM, menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah daun *propeller* maka diameter *propeller* semakin kecil. Selain itu, jumlah daun yang lebih besar menunjukkan bahwa torsi *propeller* menjadi semakin besar. Konsekuensi dari

besarnya torsi *propeller* pada *propeller* dengan jumlah daun lebih besar adalah daya yang dibutuhkan untuk memutar propeller menjadi semakin besar. Secara umum hasil dari simulasi yang telah dilakukan telah sesuai dengan teori kinerja *propeller* yang menyatakan bahwa jumlah daun *propeller* yang lebih kecil memiliki efisiensi yang lebih bagus dibandingkan dengan *propeller* dengan jumlah daun *propeller* lebih banyak.

4. KESIMPULAN

Pemilihan propeller merupakan proses yang kompleks dan memiliki banyak tujuan, akan tetapi dapat disederhanakan dengan memilih satu tujuan utama dan menjadikan tujuan lain sebagai batasan variabel. Dalam penelitian ini, program komputer untuk pemilihan propeller dikembangkan untuk memilih propeler yang optimum. *Propeller* yang optimum tidak hanya memiliki efisiensi tertinggi, tapi juga memperhatikan batasan – batasan lainnya seperti batasan diameter maksimal dan batasan akibat dari kavitasi. Program komputer yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat mempermudah pekerjaan dalam pemilihan *propeller* yang optimum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada seluruh Tim Peneliti dan pihak – pihak yang sudah berkontribusi dalam penelitian ini. Kepada Politeknik Negeri Madura

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Rutherford and B. Comer, ‘The International Maritime Organization’s initial greenhouse gas strategy’. 2018. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/1509482>
- [2] M. A. Budiyanto, A. Adha, and P. H. N. Prayoga, ‘Distribution of energy efficiency design index for tankers in Indonesia’, *5th Int. Conf. Renew. Energy Environ. Eng.*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.089>.
- [3] Roberto Vettor, Mina Tadros, Manuel Ventura, and Carlos Guedes Soares, ‘Influence of main engine control strategies on fuel consumption and emissions’, *Taylor Francis Group*, 2018, doi: 10.1201/9780429505294-19.
- [4] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*. UK: Butterworth-Heinemann: Oxford, 2007.
- [5] M. Tadros, M. Ventura, and C. G. Soares, ‘Design of Propeller Series Optimizing Fuel Consumption and Propeller Efficiency’, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2021, doi: doi.org/10.3390/jmse9111226.
- [6] C. Kusuma, I. M. Ariana, W. H. Nugroho, M. Indiyanto, and Aharudin Ali, ‘Development of Optimum Design B-Series Propeller with Engine Propeller Matching, A Case Study 60-Meters Patrol Boat’, *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 7, Jun. 2022.
- [7] M.M. Ghafary, H.S. El-Kilani, and M.M. Moustafa, ‘Optimum design of B-series marine propellers’, *Alex. Eng. J.*, 2011.
- [8] Aulia Windyandari, G. D. Haryadi, Suharto, and A. F. Zakki, ‘Optimization Procedure to Determine the Optimum Propeller of Traditional Purse Seine Boat’, *Int. J. Mech. Eng. Technol. IJMET*, vol. 9, no. 13, 2018.
- [9] M. Tadros, M. Ventura, and C. G. Soares, ‘Optimum design of a container ship’s propeller from Wageningen B-series at the minimum BSFC’, *Sustain. Dev. Innov. Mar. Technol. - Taylor Francis Group*, 2020.
- [10] Bernitsas M.M., Ray D, and Kinley P., ‘KT, KQ and Efficiency Curve’. 1981.
- [11] Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, and Dominic A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power*, 2nd ed. UK: Cambridge University Press, 2017. [Online]. Available: www.cambridge.org/9781107142060
- [12] Anirban Bhattacharya, ‘Lecture 25: Propeller Cavitation(Part-II)’, Indian Institute of Technology Kharagpur, 2022.