



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Thrust, Torsi, dan Efisiensi Propeller B Series menggunakan Metode *Design of Experiments* (DOE)

Kanaka Balindra Santoso¹⁾, Berlian Arswendo Adietya²⁾, Hartono Yudo²⁾, Mahendra Indriaryanto³⁾

Laboratorium Teknologi Sistem dan Permesinan Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail : kanakbalindra@students.undip.ac.id

Abstrak

Penekanan emisi dalam lingkup industri maritim menjadi suatu tujuan bersama sebagai upaya mempertahankan kondisi lingkungan ditandai dengan ditetapkannya berbagai regulasi hukum internasional terkait tuntutan penurunan emisi maritim, sehingga dibutuhkan solusi dalam memaksimalkan efisiensi energi salah satunya melalui pengoptimalan desain sistem propulsi pada kapal sehingga efisiensi bahan bakar dan kinerja mesin kapal dapat dioptimalkan. Penelitian ini menganalisis suatu alternatif metode perhitungan dalam memprediksi nilai thrust, torsi, dan efisiensi propeller kapal displacement yang menggunakan propeller jenis b-series dengan metode *design of experiments*. Faktor-faktor yang mempengaruhi perhitungan performa propeller seperti jumlah daun, pitch/diameter, rasio luasan daun, dan advance coefficient divariasikan membentuk suatu perhitungan regresi yang menjadi alternatif dari metode perhitungan thrust, torsi, dan efisiensi propeller melalui basis data grafik diagram open water. Hasil dari perhitungan nilai performa propeller menunjukkan adanya selisih tertinggi sebesar 6% antara perhitungan regresi yang telah dibuat dan pengujian CFD terhadap propeller model, serta selisih tertinggi sebesar 4% antara perhitungan regresi dengan perhitungan grafik diagram open water, dengan hasil tersebut perhitungan regresi menggunakan metode *design of experiments* ini dapat menjadi suatu metode yang dapat dipertimbangkan sebagai alternatif dalam memprediksi nilai thrust, torsi, dan efisiensi kapal yang menggunakan propeller tipe b-series.

Kata Kunci : *Design of Experimental, Propeller Performance, Regression Equation, Wageningen b series*

1. PENDAHULUAN

Tuntutan dalam menekan emisi dalam dunia maritim semakin meningkat dengan ditetapkannya berbagai regulasi hukum internasional salah satunya oleh IMO yang terus mendorong penurunan emisi dan peningkatan efisiensi dalam berbagai bentuk operasional di laut. IMO memperkenalkan EEXI (*The Energy Efficiency Existing Ship Index*) untuk mengurangi gas efek rumah kaca dari emisi kapal, hal ini berhubungan dengan teknikal desain sebuah kapal, sehingga kapal harus memenuhi Indeks EEXI sekali dalam jangka waktu selamanya, inisiasi sertifikat ini telah disurvei pada periode pertama pada tahun 2023 [1]. Pada studi tahun 2023 dibuat tujuh skenario operasional dimana kapal dengan bahan bakar konvensional sulit memenuhi indeks EEXI tanpa adanya pembatasan *engine power limitation*,

namun kapal mampu menurunkan nilai EEXI dengan transisi bahan bakar menggunakan LNG atau metanol [2].

Terdapat juga EEDI (*Energy Efficiency Design Index*) merupakan regulasi yang sangat ketat menekan emisi dan meningkatkan efisiensi kapal baru dalam perancangannya. Dengan mereduksi emisi CO₂ dan bahan bakar fosil, EEDI mendorong optimasi pada bagian lambung, mesin, dan propeller kapal [3]. Pada penelitian terkait *slow steaming* menunjukkan bahwa pengurangan kecepatan kapal hingga 20% dapat menurunkan emisi CO₂ hingga 22% dan meningkatkan efisiensi operasional secara signifikan, yang sangat relevan dengan EEDI maupun EEXI [4].

Perancangan kapal modern saat ini menitik beratkan fokusnya pada penekanan emisi yang dirancang dalam konsep green shipping yang merupakan proses penurunan penggunaan energi

untuk menghasilkan emisi yang lebih rendah. sistem ini membutuhkan suatu manajemen energi yang komprehensif untuk mencapai distribusi daya antara dua energi yaitu dari mesin dan juga sistem pendukungnya seperti sistem propulsi [5]. ECMS atau *equivalent consumption minimization strategy* memainkan peran penting dalam optimalisasi efisiensi sistem tenaga kapal hybrid yang sekaligus mendukung target tercapainya pengurangan emisi dalam industri maritim [6].

Dalam upaya memenuhi tuntutan dalam penerapan efisiensi energi ini, dibutuhkan biaya serta penyesuaian terhadap sistem yang telah dibuat pada kapal konvensional. Oleh karena itu, diperlukan solusi alternatif yang dapat mendukung penekanan emisi ini. Berbagai penelitian telah dilakukan dan menunjukkan bahwa salah satu solusi yang efektif adalah melalui pengoptimalan kinerja sistem propulsi kapal, khususnya pada *propeller*. Penelitian oleh Vázquez Santos et al. menunjukkan bahwa optimalisasi geometri *propeller* dengan pendekatan algoritma genetika (NSGA-II) dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi kemungkinan kavitasi secara signifikan [7]. Selain itu penerapan NSGA II terhadap wake *propeller* meningkatkan efisiensi serta penyesuaian koefisien torsi melalui pengaturan spesifikasi *propeller* sehingga memungkinkan untuk dilakukan optimalisasi pada sistem propulsi [8].

Sistem propulsi menjadi salah satu aspek yang wajib direncanakan dengan baik dengan tujuan untuk mencapai fungsi kapal dalam mendapatkan kecepatan yang optimal, hal ini diimplementasikan dengan mengubah tenaga mekanik dari mesin kapal menjadi daya dorong sebesar mungkin dengan konsumsi energi seminimal mungkin.

Optimasi geometri *propeller* yang dilakukan pada kapal ro-ro pada 2024 mampu mengurangi konsumsi bahan bakar, mengurangi getaran, dan menurunkan emisi karbon secara nyata [9]. Penelitian oleh Yang, Qu dan Zhuo pada 2024 menunjukan optimasi sistem propulsi dengan pengaturan *pitch* dan kecepatan putaran (rpm) dapat meningkatkan efisiensi *thrust* dan menurunkan konsumsi energi [10].

Propeller yang menjadi komponen esensial pada sistem propulsi memiliki pengaruh besar dalam upaya konservasi energi serta reduksi emisi [11]. Studi oleh Tadros dan Boulougouris pada 2025 menunjukkan bahwa penambahan *cupping* dan *camber* pada bilah *propeller b series* meningkatkan efisiensi hingga 9,3% dibandingkan desain standar [12].

Dalam perencanaan *propeller* metode yang kerap digunakan adalah grafik *open water test* untuk mengetahui nilai torsi, *thrust* serta efisiensi

sebuah *propeller*. Namun perkembangan teknologi menghasilkan suatu pengembangan aplikasi pemodelan numerik berbasis CFD yang kini banyak digunakan untuk mengoptimalkan desain *propeller* secara akurat. Penelitian Nasiri pada 2023 menyatakan perubahan konfigurasi *tip-rake* secara strategis dapat meningkatkan performa hingga 1% dalam simulasi numerik [13]. Selain itu, perangkat tambahan seperti *Propeller Boss Cap Fins (PBCF)* juga telah terbukti mampu menekan vorteks dan meningkatkan efisiensi propulsi secara keseluruhan [14].

Pada penelitian ini metode alternatif prediksi nilai performa *propeller* dibuat melalui analisa nilai torsi, *thrust*, dan efisiensi menggunakan metode statistik. Acuan model menggunakan *propeller* untuk kapal dengan angka *froude number* di bawah 0,25 menggunakan *propeller wageningen b series*, pemilihan model *propeller* ini sesuai untuk kapal dengan nilai $Fn > 0,25$, dengan nilai $Fn > 0,25$ penggunaan *propeller* tipe *b series* merupakan pilihan yang paling sesuai dimana jenis *propeller* ini jauh lebih baik sebagai model *open propeller* sedangkan *propeller* tipe *kaplant* cocok untuk jenis *ducted propeller* [15]. Selain itu, pendekatan berbasis simulasi numerik seperti CFD dan desain berbantuan optimasi terbukti efektif dalam perancangan propulsi yang efisien [16].

Beberapa penelitian yang ada sebelumnya melakukan analisis *propeller* dengan tujuan mendapatkan performa terbaik yang diantaranya menganalisis dengan simulasi operasi *open water* untuk dievaluasi performanya pada kondisi air tenang dan dilakukan optimasi model menggunakan *matlab* serta aplikasi *navcad* untuk memilih jenis *propeller* yang optimal [17].

R.N Situmorang et al. Melakukan analisa optimum *thrust* pada *propeller* kapal *tugboat* dengan melakukan variasi diameter *propeller*, jumlah daun, dan kecepatan putaran *propeller* kemudian dicari variasi dari komponen pada *propeller* yang memiliki efisiensi tertinggi dengan melakukan perhitungan nilai *thrust* dan torsi *propeller* menggunakan metode analisis grafik *open water*, ditemukan hasil pada putaran *propeller* tetap dengan jumlah daun *propeller* sebanyak 5 daun dan berdiameter sebesar 2,2 m sebagai varisai dengan nilai KT tertinggi [18].

Dalam penelitian B.A. Aditya et al. dilakukan analisis prediksi nilai torsi *propeller* dengan studi kasus *propeller wageningen b series* tipe B3-50 dan B5 80 dengan metode *dimensional analysis* melalui variabel yang mempengaruhi performa *propeller* menggunakan kombinasi multivariat hasil perhitungan persamaan regresi yang divalidasi dengan nilai dari *open water diagram propeller wageningen b series* B3 50 dan

B5 80 dengan rumus persamaan $Y=0,9916x + 0,000835$ dan nilai R^2 sebesar 0,9931 [19].

Pada penelitian lain percobaan dilakukan analisa jenis *propeller* dengan perbedaan spesifikasi untuk menentukan jenis kombinasi spesifikasi yang paling tinggi nilai efisiensinya, dilakukan analisis performa *propeller* dan didapatkan efisiensi sistem propulsi yang berdampak pada kehematan bahan bakar sehingga dapat dimaksimalkan dalam optimalisasi sektor ekonomis operasional pelayaran dengan *propeller* jenis *b series* B3 61 dengan diameter 1,493 m, P/D 0,569 memiliki nilai efisiensi tertinggi yaitu sebesar 0,482 [20].

Propeller memiliki variabel koefisien yang mempengaruhi karakteristik performanya seperti jumlah daun/(Z) berpengaruh pada getaran, kebisingan serta efek kavitasi, umumnya kapal besar menggunakan *propeller* dengan empat hingga lima daun untuk menjaga *thrust* optimal serta kontrol terhadap getaran, pada kapal dengan kebutuhan tingkat kebisingan rendah, *propeller* dengan lebih dari lima daun menjadi solusi untuk mengurangi resiko kavitasi maupun noise akustik bawah laut [21]. Penelitian Liu et.al pada 2023 melakukan evaluasi efek jumlah daun terhadap kavitasi tip vortex dan ditemukan bahwa peningkatan jumlah daun menurunkan intensitas kavitasi meskipun dengan sedikit penurunan efisiensi [22]. Selain itu pada studi terhadap CPP *propeller* mengkonfirmasi bahwa peningkatan jumlah daun dari tiga menjadi lima dengan penyesuaian *pitch ratio* dan diameter menurunkan tingkat kavitasi pada kecepatan tinggi serta menjaga getaran tetap dalam batas aman operasional [23].

Expanded Area Ratio atau A_e/A_0 yang memiliki peranan penting dalam memperkecil efek kavitasi dapat diketahui semakin besar EAR *thrust* akan tersebar lebih banyak di area daun *propeller* dan berpengaruh pada efisiensi pada *propeller* itu sendiri [21]. Diameter *hub propeller* memiliki pengaruh dengan nilai paling efektif yaitu dengan radius 75-85% dari panjang bilah sedangkan pengaruh pada bagian hub *propeller* relatif lebih kecil terhadap *thrust* total sehingga penambahan diameter yang berlebihan pada bagian hub tidak memberikan dampak signifikan [24].

J atau *advance coefficient* merupakan parameter interaksi kecepatan antara rotasi *propeller* dan kecepatan kapal yang menjadi penanda atau acuan yang mempengaruhi nilai *thrust*, torsi, dan efisiensi suatu *propeller*, diameter yang mempengaruhi nilai momentum serta pertimbangan efisiensi dan besaran nilai viskos yang perlu direncanakan dengan baik pada saat proses desain.

Pitch/Diameter Ratio atau P/D merupakan variabel yang memberikan pengaruh terhadap efisiensi dan kecepatan serta *wake field* dan berakaitan dengan getaran serta kebisingan dengan sudut *pitch* yang bervariasi secara radial [25]. Untuk C/D yaitu rasio *chord length* dan diameter *propeller* sendiri merupakan perbandingan panjang garis lurus dari *leading edge* ke *trailing edge* dari penampang baling-baling yang pengaruhnya mencakup kavitasi dan beban mesin. *Propeller* yang direncanakan dengan baik akan memberikan efisiensi yang tinggi serta keandalan yang baik karena sebesar 7% biaya pembangunan sistem permesinan, *propeller* menjadi penyumbang biaya yang cukup besar [21].

Penelitian ini berfokus pada analisis performa *propeller* melalui eksperimen perhitungan torsi dan *thrust* dengan metode DOE melalui proses pendekatan statistik terhadap desain eksperimen, pada penelitian sebelumnya proses analisa dilakukan hanya pada koefisien torsi dengan *range* tipe *propeller* pada seri B3-50 hingga B5-80 sedangkan pada penelitian ini memiliki keterbaruan pada range perhitungan yaitu seri B2-30 hingga B7-100 range tersebut merupakan jumlah data terkecil dan terbesar yang tersedia dari *wageningen b series*.

Proses analisis bukan hanya menghitung nilai torsi saja namun dicari juga nilai *thrust* dengan persamaan regresi melalui metode DOE sehingga dapat diketahui sekaligus nilai efisiensinya dan menghasilkan perbandingan yang hasil nilai performanya dibandingkan antara perhitungan regresi, perhitungan *open water diagram*, serta hasil analisis model melalui metode CFD.

2. METODE

2.1. Metodologi Penelitian

Metode yang akan digunakan dalam pengolahan data analisis *thrust*, torsi dan efisiensi *propeller wageningen b series* adalah DOE dengan bantuan *dimensional analysis* dalam pemilihan input variabel yang mempengaruhi koefisien *thrust* dan torsi dari *propeller*, sehingga dipilih 16 variabel yang berpotensi berpengaruh pada output respons dari koefisien yang dicari selanjutnya diolah dengan metode DOE untuk membentuk kombinasi multi variat yang menghasilkan perhitungan regresi dengan output nilai KT dan KQ *propeller wageningen b series*.

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur serta pengumpulan data primer dan sekunder

terhadap objek penelitian yang melalui analisis diagram grafik *open water b series* yang di dalamnya mencakup variabel dari karakteristik performa sebuah *propeller*.

Pengolahan data input variabel yang sudah ditentukan diolah dengan metode *design of experimental* atau DOE melalui proses pendekatan statistik yang menghasilkan pendekatan yang objektif untuk analisis [26]. Metode DOE memiliki potensi untuk dikembangkan dengan berbagai algoritma sehingga dapat mengurangi biaya eksperimen serta mendeteksi interaksi variabel yang kompleks [27]. Dengan demikian kombinasi multivariat yang dibuat menghasilkan 16 kombinasi variabel perhitungan yang bertujuan untuk mendapatkan output respon dari komponen KT dan KQ.

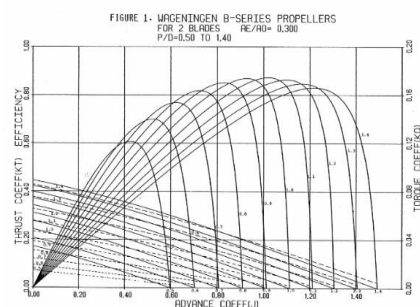
Perhitungan regresi didapatkan melalui kombinasi hubungan antar variabel yang mempengaruhi hasil koefisien data [28]. Pada konteks perancangan sistem propulsi, dapat diterapkan perhitungan yang memperkirakan koefisien *thrust* dan torsi berdasarkan parameter *propeller* dengan mempresentasikan hubungan sebab akibat variabel dalam tahapan desain awal [29]. Variabel yang mempengaruhi koefisien performa *propeller* dibuat dan dihasilkan suatu efek yang diGambarkan dalam diagram pareto dengan mengurutkan nilai efek variabel yang memiliki pengaruh signifikan dari yang tertinggi hingga terendah serta memperhatikan interaksi koefisien antar variabel serta dibentuknya suatu perhitungan regresi dari nilai koefisien masing-masing interaksi variabel [30]. Diagram pareto tidak hanya membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih tefokus tetapi juga memungkinkan pengelolaan data yang lebih efisien dengan cara yang terstruktur [31]. Melalui analisis dari data yang luas menuju ke bagian yang paling bermasalah dari sebuah proses dapat dilakukan percepatan analisis dalam suatu variabel serta mengarahkan fokus pada intervensi yang paling berdampak [32].

Untuk memvalidasi perhitungan regresi dilakukan perbandingan nilai *thrust*, torsi, dan efisiensi dengan model *propeller* serta grafik diagram *open water wageningen b series* serta perbandingan nilai *thrust* dan torsi dari pengujian model *CFD*.

2.3. Objek Penelitian

Batas pemilihan variasi *propeller* dengan tipe *wageningen b series* diambil dengan pertimbangan beragamnya variasi bentuk dan desain serta spesifikasi yang tersedia [33], yang memungkinkan untuk digunakan menyesuaikan dengan kebutuhan

spesifikasi kapal. Batas dan batas bawah pada *range* tipe *propeller* sangat mempengaruhi output perhitungan yang digunakan untuk mendapatkan rumus regresi melalui data *open water propeller b series* B2 30 hingga B7 100, data *open water* ini mengGambarkan karakteristik *propeller* yang berhubungan dengan gaya dan faktor momen yang bekerja pada *propeller* ketika beroperasi di sebuah aliran fluida yang seragam dan pembebanan yang stabil [34], serta interaksi dengan lambung yang membutuhkan data *thrust* torsi *open water test* untuk mengetahui kondisi aliran yang mungkin terpengaruh [35]. Contoh diagram grafik *open water* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Open Water

Perbandingan hasil akhir perhitungan digunakan sampel menggunakan 3 model *propeller* yang basis datanya berasal dari kapal displacement dengan analisis menggunakan metode *CFD* dan variabel yang ditetapkan yaitu jumlah bilah *propeller* dengan data ukuran utama dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Model *Propeller*

Seri	Blade	EAR	P/D	Diameter (m)	RPM
B4 60	4	0,60	0,824	2,00	322
B5 58	5	0,58	1,1	1,85	368
B6 80	6	0,80	1,2	7,56	85,16

Faktor kontrol yang mempengaruhi performa *propeller* sesuai dengan range yang direncanakan yaitu *propeller b series* tipe B2 30 hingga B7 100 beserta batas atas dan batas bawahnya disajikan melalui metode *dimensional analisis* dengan memasukan variabel yang mempengaruhi perhitungan *thrust* dan torsi *propeller* didapatkan hasil variabel diantaranya J yaitu *Advance Coefficient*, (V_a/D_n) , P/D yaitu *Pitch/Diameter Ratio*, A_e/A_o yaitu *Blade Area Ratio*, C_a/D yaitu *Chord Length/Diameter*, C/D yaitu *Camber/Diameter*.

Dari variabel yang telah ditentukan, dilakukan kombinasi faktorial DOE menggunakan *software*

Tabel 2. Data Faktor Kontrol dan Nilainya

Parameter	Simbol Parameter	Simbol Faktor	Batas Bawah	Batas Atas	Nilai Batas Bawah	Nilai Batas Atas
Jumlah Bilah	Z	A	-1	1	2	7
Rasio Luasan Bilah	Ae/Ao	B	-1	1	0,3	1,0
<i>Pitch/Diameter Ratio</i>	P/D	C	-1	1	0,5	1,2
<i>Camber/ Diameter Ratio</i>	C/D	D	-1	1	0,002	0,004
<i>Advance Coefficient</i>	J	E	-1	1	0,2	1,2

minitab yang dihitung dengan rumus KT KQ, dan Efisiensi yang disajikan sebagai berikut.

$$KQ = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (1)$$

$$KT = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2)$$

$$\eta_0 = \frac{T \cdot J}{2n \cdot Q} \quad (3)$$

Pada Tabel 2. ditentukan variabel pemengaruh yang memiliki faktor signifikansi pada perhitungan *thrust* dan torsi yang nilainya dapat ditemukan melalui deskripsi spesifikasi *propeller* serta dilihat pada grafik open water.

Koefisien yang disajikan mengkomputasi nilai *thrust* dan torsi sebagai fungsi dari standar karakteristik *propeller* [36]. Pada tahap selanjutnya diperoleh rumus regresi yang menghasilkan prediksi nilai *thrust* dan torsi *propeller* hasil perhitungan divalidasi dan dibandingkan dengan nilai KT dan KQ open water serta pengujian model *CFD* yang memungkinkan analisis nilai KT dan KQ melalui software numeca dengan penyelesaian berdasarkan pada identifikasi aliran fluida [37].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis dan Validasi Rumus Regresi dengan DOE

Data kombinasi faktor kontrol diolah menggunakan metode DOE dengan *software minitab* dan menghasilkan kombinasi faktorial yang ditunjukkan Tabel 3. Variabel A, B, C, D, dan E merupakan suatu variabel yang mewakili pemengaruh nilai torsi dan *thrust propeller* sedangkan variabel Y merupakan nilai dari KT serta KQ berdasarkan *high level* dan *low level* yang dihasilkan melalui kombinasi faktor *software minitab*.

Dengan mengacu pada diagram grafik *open water*, didapatkan nilai KT dan KQ sesuai dengan konfigurasi *run order* yang sudah dibuat, didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Hasil kombinasi faktorial yang telah dibuat dengan metode DOE menghasilkan 15

estimasi efek membentuk urutan secara visual mengGambarkan pengaruh penting terhadap perhitungan *thrust* dan torsi diGambarkan dalam bentuk grafik pareto.

Tabel 3. Kombinasi Faktorial DOE dengan *Software Minitab*

Run	A	B	C	D	E	Y
1	-1	-1	-1	-1	1	-
2	1	-1	-1	-1	-1	-
3	-1	1	-1	-1	-1	-
4	1	1	-1	-1	1	-
5	-1	-1	1	-1	-1	-
6	1	-1	1	-1	1	-
7	-1	1	1	-1	1	-
8	1	1	1	-1	-1	-
9	-1	-1	-1	1	-1	-
10	1	-1	-1	1	1	-
11	-1	1	-1	1	1	-
12	1	1	-1	1	-1	-
13	-1	-1	1	1	1	-
14	1	-1	1	1	-1	-
15	-1	1	1	1	-1	-
16	1	1	1	1	1	-

Melalui data variabel pada Tabel 6. dibuat rumus regresi nilai KQ dengan perhitungan sebagai berikut.

$$KQ = -0,05588 + 0,006537 (Z) - 0,002351 (Ae/Ao) + 0,07124 (P/D) + 4,217 (C/D) + 0,04552 (J) - 0,001625 (Z \cdot Ae/Ao) + 0,001068 (Z \cdot P/D) - 1,836 (Z \cdot C/D) - 0,000073 (Z \cdot J) + 0,03793 (Ae/Ao \cdot P/D) + 2,991 (Ae/Ao \cdot C/D) - 0,02616 (Ae/Ao \cdot J) + 4,045 (P/D \cdot C/D) - 0,07863 (P/D \cdot J) - 1,119 (C/D \cdot J).$$

Pada data variabel Tabel 6. dibuat rumus regresi untuk nilai KT dengan perhitungan sebagai berikut.

$$KT = -0,1970 + 0,03112(Z) - 0,09662 (Ae/Ao) + 0,5493 (P/D) + 8,682 (C/D) + 0,1478 (J) + 0,001714 (Z \cdot Ae/Ao) - 0,006571 (Z \cdot P/D) - 8,050 (Z \cdot C/D) - 0,001000 (Z \cdot J) + 0,1194 (Ae/Ao \cdot P/D) + 25,71 (Ae/Ao \cdot C/D) - 0,08786 (Ae/Ao \cdot J) + 7,857 (P/D \cdot C/D) - 0,4864 (P/D \cdot J) + 7,000 (C/D \cdot J).$$

Proses analisis nilai koefisien *thrust* dan koefisien torsi dilakukan melalui perhitungan

dengan rumus regresi yang telah dibuat melalui nilai koefisien efek yang telah diketahui, dihasilkan rumus perhitungan regresi yang digunakan untuk menghasilkan nilai KT dan KQ selanjutnya hasil dari perhitungan dibuat perbandingannya dengan hasil nilai koefisien *thrust* dan koefisien torsi yang didapatkan melalui analisa grafik *open water wageningen b series propeller*.

Tabel 4. Nilai KQ Kombinasi Faktorial DOE dengan *Software Minitab*

Run	Z	Ae/Ao	P/D	C/D	J	KQ
1	2	0,3	0,5	0,002	1,2	0,000
2	7	0,3	0,5	0,002	0,2	0,019
3	2	1	0,5	0,002	0,2	0,014
4	7	1	0,5	0,002	1,2	0,000
5	2	0,3	1,2	0,002	0,2	0,058
6	7	0,3	1,2	0,002	1,2	0,017
7	2	1	1,2	0,002	1,2	0,009
8	7	1	1,2	0,002	0,2	0,099
9	2	0,3	0,5	0,004	0,2	0,011
10	7	0,3	0,5	0,004	1,2	0,000
11	2	1	0,5	0,004	1,2	0,000
12	7	1	0,5	0,004	0,2	0,015
13	2	0,3	1,2	0,004	1,2	0,009
14	7	0,3	1,2	0,004	0,2	0,070
15	2	1	1,2	0,004	0,2	0,103
16	7	1	1,2	0,004	1,2	0,017

Hasil perbandingan nilai koefisien *thrust* dan torsi dapat dilihat pada Tabel 7. didapatkan selisih perhitungan KT regresi dengan analisis perhitungan menggunakan grafik *open water test* sebesar kurang dari 6 %, sedangkan selisih perhitungan KQ regresi dengan analisis perhitungan dengan grafik *open water test* memiliki hasil yang sama yaitu kurang dari 6 % sehingga nilai tersebut telah memenuhi batas penerimaan analisa perhitungan.

Tabel 5. Nilai KT Kombinasi Faktorial DOE dengan *Software Minitab*

Run	Z	Ae/Ao	P/D	C/D	J	KT
1	2	0,3	0,5	0,002	1,2	0,000
2	7	0,3	0,5	0,002	0,2	0,170
3	2	1	0,5	0,002	0,2	0,110
4	7	1	0,5	0,002	1,2	0,000
5	2	0,3	1,2	0,002	0,2	0,453
6	7	0,3	1,2	0,002	1,2	0,035
7	2	1	1,2	0,002	1,2	0,000
8	7	1	1,2	0,002	0,2	0,555
9	2	0,3	0,5	0,004	0,2	0,121
10	7	0,3	0,5	0,004	1,2	0,000
11	2	1	0,5	0,004	1,2	0,000
12	7	1	0,5	0,004	0,2	0,143
13	2	0,3	1,2	0,004	1,2	0,039
14	7	0,3	1,2	0,004	0,2	0,432
15	2	1	1,2	0,004	0,2	0,570
16	7	1	1,2	0,004	1,2	0,030

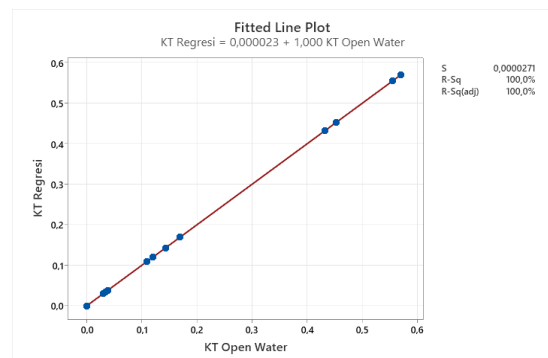
Tabel 6. Estimasi Efek KT dan KQ

Term	KQ Effect	KT Effect	KQ Coeff	KT Coeff
Const			0,02747	0,16610
A	0,00414	0,0090	0,00207	0,00450
B	0,00927	0,01975	0,00463	0,00988
C	0,04046	0,19625	0,02023	0,09813
D	0,00111	0,00150	0,00055	0,00075
E	-0,0420	-0,30630	-0,02100	-0,15310
A*B	-0,0028	0,00300	-0,00142	0,00150
A*C	0,00187	-0,01150	0,00093	-0,00575
A*D	-0,0092	-0,04025	-0,0046	-0,02013
A*E	-0,0009	-0,00250	-0,0001	-0,00125
B*C	0,00929	0,02925	0,00465	0,01462
B*D	0,00209	0,01800	0,00105	0,00900
B*E	-0,00916	-0,03075	-0,0046	-0,01537
C*D	0,00283	0,00550	0,00142	0,00275
C*E	-0,02752	-0,17025	-0,0138	-0,08512
D*E	-0,00112	0,00700	-0,0006	0,00350

Tabel 7. Perbandingan Nilai KT dan KQ Perhitungan Regresi DOE dan *Open Water*

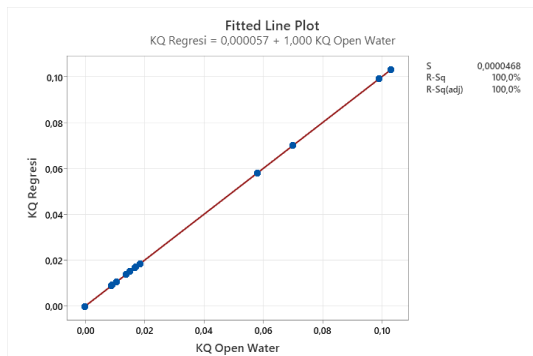
KQ Regresi	KT Regresi	KQ Open	KT Open	Diff KQ	Diff KT
0,000	0,000	0,000	0,000	0%	0%
0,019	0,170	0,019	0,170	0%	0%
0,014	0,110	0,014	0,110	1%	0%
0,000	0,000	0,000	0,000	0%	0%
0,058	0,453	0,058	0,453	0%	0%
0,017	0,035	0,017	0,035	0%	0%
0,009	0,000	0,009	0,000	1%	0%
0,099	0,555	0,099	0,555	0%	0%
0,011	0,121	0,011	0,121	0%	0%
0,000	0,000	0,000	0,000	0%	0%
0,000	0,000	0,000	0,000	0%	0%
0,015	0,143	0,015	0,143	1%	0%
0,009	0,039	0,009	0,039	0%	0%
0,070	0,432	0,070	0,432	0%	0%
0,103	0,570	0,103	0,570	0%	0%
0,017	0,030	0,017	0,030	1%	0%

Pada Gambar 2. disajikan grafik plot line untuk melihat perbandingan hasil perhitungan KT regresi dengan perhitungan melalui grafik open water dengan formula *equation* yaitu $Y=0,000023+1,000 X$ dengan nilai $R^2=1$.



Gambar 2. Diagram Line Plot KT

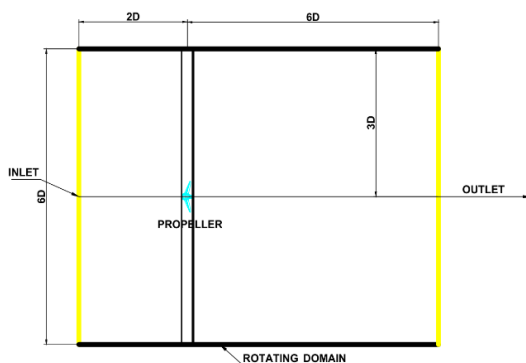
Untuk perhitungan KQ regresi dapat dilihat pada Gambar 3. Dengan *formula equation* yaitu $Y=0,000057+1,000X$ dengan nilai $R^2=1$. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 7. Dengan nilai perhitungan memiliki selisih yang lebih kecil dibandingkan penelitian sebelumnya.



Gambar 3. Diagram Line Plot KQ

3.2. Proses Analisis Model Propeller dengan CFD

Proses desain/modelling *propeller* dilakukan pada 3 model *propeller* yaitu B4 60, B5 58, dan B6 80 dengan principal dimension pada Tabel 1. Kemudian proses pembuatan model *propeller* dimulai dengan proses design dengan *software propcad* kemudian model disempurnakan dengan *software rhinoceros* karena terdapat beberapa bagian yang memiliki celah. Analisis CFD dengan *software numeca* dimulai dengan pemilihan mode *C Wizard open water* dan pengisian parameter yang dibutuhkan seperti *rpm design propeller*, *advance coefficient J* 0,1 hingga *J* 1,0.



Gambar 4. Boundary Condition

Boundary Condition ditetapkan dengan model solid yang didefinisikan sebagai bentuk *open water test* dengan kondisi *no slip*, bagian aliran masuk atau *inlet* pada silinder domain ditetapkan sebagai *far field* dan untuk *specified pressure* ditetapkan pada *boundary condition* bagian *outlet*, pada bagian *far field* diaplikasikan sebagai sebuah *cylindrical surface* sehingga seluruh bagian domain merupakan bagian yang memiliki

perputaran pada domain bagian ini harus bisa mengakomodir bagian *far field* yang memastikan tidak adanya pengaruh terhadap aliran yang berada pada bagian *propeller*.

Ukuran domain yang berbentuk silinder memiliki ukuran diameter sebesar 6D dan panjang sebesar 8D yang mengacu pada bagian yang simetris dari *propeller* serta bagian outlet berjarak 6D dari model *propeller* dan bagian inlet sejauh 2D dari model, *boundary condition* dapat dilihat pada Gambar 4.

Sebelum melakukan analisa CFD perlu adanya penyesuaian *meshing* model guna mendapatkan kualitas *mesh* yang terbaik dengan menggunakan *grid independence*. Variasi ditentukan dari masing-masing model dengan 4 variasi besaran *mesh* dengan tujuan mendapatkan *mesh* optimal dengan mempertimbangkan ketepatan nilai hasil pengujian dan durasi komputasi yang diperlukan. Untuk model B4 60 disajikan pada Tabel 8, model B5 58 pada Tabel 9. dan B6 80 pada Tabel 10.

Tabel 8. B4 60 Grid Independen

Tipe	Nilai Elemen	10Kq	Selisih
Coarse	847.935	0,271	-
Medium Coarse	1.026.751	0,268	0,95%
Medium	1.398.041	0,267	0,18%
Fine	2.447.361	0,267	0,15%

Tabel 9. B5 58 Grid Independen

Tipe	Nilai Elemen	10Kq	Selisih
Coarse	603.465	0,731	-
Medium Coarse	1.007.964	0,720	1,56%
Medium	1.444.190	0,714	0,86%
Fine	2.562.093	0,713	0,10%

Tabel 10. B6 80 Grid Independen

Tipe	Nilai Elemen	10Kq	Selisih
Coarse	520.115	0,3624	-
Medium Coarse	1.188.538	0,3558	1,84%
Medium	2.236.946	0,3540	0,52%
Fine	3.158.766	0,3527	0,36%

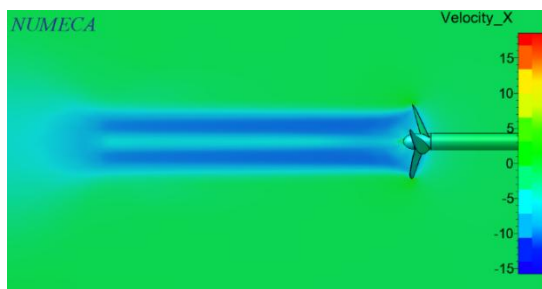
Melalui *grid independence* data pengujian tiap *mesh* yang konvergen tersaji dengan koreksi selisih grid kurang dari 2% sehingga tipe *mesh medium* dipilih dengan jumlah *mesh* model B4 60 sebesar 1.398.041, B5 58 sebesar 1.444.190, dan B6 80 sebesar 2.236.946, tipe *medium mesh* dipilih dengan pertimbangan hasil analisis yang tidak berbeda jauh dengan jenis *mesh* yang lebih besar namun memiliki waktu komputasi yang lebih cepat.

Solver setting pada analisis dengan *software numeca* ini memiliki beberapa variabel diantaranya proses *import* model yang menggunakan format *parasolid X.T.* kemudian menentukan arah rotasi

propeller dan memasukan variabel *rotational speed definition* yang mengacu pada *rpm design propeller* dan *flow speed* yang merupakan definisi dari *advance coefficient* atau *J* yang digunakan untuk mensimulasikan kecepatan *propeller* dan dipilih jenis dari fluida dalam hal ini dipilih air tawar pada suhu 30 derajat celcius kemudian dilanjutkan dengan proses *meshing*.

Pada proses *set up* sebelum proses *running* dijalankan terdapat beberapa komponen yang harus disesuaikan seperti *general parameter* yang menentukan aliran yang dipilih yaitu aliran *unsteady* karena jenis aliran ini lebih sesuai dengan karakter pengujian *open water* yang menghasilkan rotasi pusingan yang dinamis dan hasilnya berdasarkan pengukuran waktu yang nyata. Kemudian dipilih jenis analisis dengan EASM yang sesuai untuk aliran dengan efek rotasi yang kuat. Pada bagian *boundary condition* yang berfungsi untuk menjabarkan batasan pada simulasi dalam hal ini *blade propeller* terdefinisi sebagai *solid wall function*. Pada bagian *computational control variabel* dan *output* ditentukan jumlah iterasi dan *time step* yang hal ini mempengaruhi lama proses komputasi dan seberapa spesifik hasil dari tiap detiknya. Proses *running* dapat dimulai menghasilkan output berupa nilai torsi dan *thrust* model.

Visualisasi hasil *running CFD software numeca* dapat dilihat pada Gambar 5. dan Gambar 6.



Gambar 5. Visualisasi Velocity B4 60 J 0,1

Terlihat adanya kecepatan aliran yang bekerja pada nilai *J* yang rendah yaitu 0,1 dengan hasil distribusi kecepatan menunjukkan bahwa aliran di belakang *propeller* didominasi oleh area berwarna biru tua yang merepresentasikan nilai *velocity_x* negatif. Pola *wake* yang terbentuk tampak panjang dan terfokus, mengindikasikan bahwa *propeller* menghasilkan gaya dorong besar dengan mempercepat aliran ke arah belakang, pada kondisi ini efisiensi propulsi cenderung lebih rendah akibat tingginya kecepatan aliran di *wake (slipstream)* di belakang *propeller*.



Gambar 6. Visualisasi Velocity B4 60 J 0,8

Pada Gambar 6. nilai *velocity* berada pada *J* 0,8 dimana aliran yang lebih seragam dan didominasi oleh area berwarna hijau muda mengindikasikan bahwa kecepatan aliran di belakang *propeller* mendekati nol pada kondisi ini *propeller* beroperasi pada kondisi kapal bergerak maju dengan kecepatan tinggi, sehingga perubahan momentum aliran yang diinduksi propeler menjadi lebih kecil. Mode ini sesuai dengan kondisi *cruising*, di mana kebutuhan gaya dorong relatif rendah dan efisiensi propulsi umumnya lebih tinggi. Perbandingan ini menegaskan bahwa variasi *advance ratio* secara signifikan memengaruhi karakter aliran di sekitar propeler dan kinerja propulsi kapal secara keseluruhan.

3.3. Perbandingan Nilai Performa Model *Propeller* dengan Perhitungan Regresi, CFD, dan *Open Water*

Tabel 11. Hasil Nilai *Thrust* dan Torsi CFD
Propeller B4 60

<i>Advance Coeff (J)</i>	<i>Moments (Nm)</i>	<i>Force (N)</i>	<i>KQ</i>	<i>KT</i>
0,1	38341	147418	0,321	0,042
0,2	35702	134686	0,294	0,039
0,3	32452	119053	0,259	0,035
0,4	28711	101270	0,221	0,031
0,5	24540	81726	0,178	0,027
0,6	19972	60780	0,132	0,022
0,7	14876	38352	0,084	0,016
0,8	9224	13784	0,030	0,010
0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,000	0,000	0,000	0,000

Hasil dari analisis CFD pada model *propeller* didapatkan dalam satuan satuan *newton meter* yang selanjutnya diolah dengan menggunakan perhitungan (1) dan (2) untuk menghitung parameter kinerja *propeller*, hasil dari perhitungan tersebut tersaji pada Tabel 11, Tabel 12, dan Tabel 13, nilai *thrust*, torsi, dan efisiensinya dibandingkan dengan 3 model *propeller* studi kasus yang sama dengan rumus regresi serta grafik *open water propeller*.

Tabel 12. Hasil Nilai *Thrust* dan Torsi CFD
Propeller B5 58

<i>Advance Coeff (J)</i>	<i>Moments (Nm)</i>	<i>Force (N)</i>	<i>KQ</i>	<i>KT</i>
0,1	62542	199281	0,077	0,042
0,2	57943	190991	0,071	0,039
0,3	54774	179255	0,067	0,035
0,4	51028	165017	0,063	0,031
0,5	46807	148670	0,058	0,027
0,6	42103	130361	0,052	0,022
0,7	36831	110406	0,045	0,016
0,8	31350	89566	0,039	0,010
0,9	25209	67300	0,031	0,000
1,0	18324	43294	0,023	0,000

Tabel 13. Hasil Nilai *Thrust* dan Torsi CFD Propeller B6 80

<i>Advance Coeff (J)</i>	<i>Moments (Nm)</i>	<i>Force (N)</i>	<i>KQ</i>	<i>KT</i>
0,1	4935223	3505395	0,099	0,535
0,2	4753489	3372137	0,096	0,515
0,3	4527161	3185436	0,091	0,486
0,4	4181092	2927916	0,084	0,447
0,5	3840017	2655921	0,077	0,405
0,6	3474698	2359521	0,070	0,360
0,7	3085296	2039296	0,062	0,311
0,8	2673510	1696185	0,054	0,259
0,9	2225614	1337014	0,045	0,204
1,0	1752631	960822,5	0,035	0,147

Perbandingan nilai koefisien dorong (KT), koefisien torsi (KQ), dan efisiensi propeler tipe B4-60 dapat dilihat secara rinci pada Tabel 14, Tabel 15, dan Tabel 16.

Tabel 14. Perbandingan Nilai KT Regresi, CFD, dan Open Water B4 60

(J)	<i>KT Open</i>	<i>KT Reg</i>	<i>KT CFD</i>	<i>Open - Reg</i>	<i>CFD - Reg</i>	<i>CFD-Open</i>
0,1	0,326	0,330	0,321	1%	3%	1%
0,2	0,298	0,299	0,294	0%	2%	1%
0,3	0,262	0,269	0,259	3%	4%	1%
0,4	0,225	0,232	0,221	3%	5%	2%
0,5	0,180	0,189	0,178	5%	6%	1%
0,6	0,138	0,141	0,132	2%	6%	4%
0,7	0,089	0,088	0,084	1%	5%	6%
0,8	0,031	0,032	0,030	1%	6%	4%
0,9	0,000	0,000	0,000	-	-	-
1,0	0,000	0,000	0,000	-	-	-
Rata-Rata Selisih Nilai				2%	5%	3%

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh bahwa nilai rata-rata selisih terbesar untuk nilai KT *propeller* B4 60 adalah sebesar 5%.

Tabel 15. Perbandingan Nilai KQ Regresi, CFD, dan Open Water B4 60

(J)	<i>KQ Open</i>	<i>KQ Reg</i>	<i>KQ CFD</i>	<i>Open - Reg</i>	<i>CFD - Reg</i>	<i>CFD-Open</i>
0,1	0,041	0,044	0,042	7%	5%	2%
0,2	0,037	0,040	0,039	9%	4%	5%
0,3	0,034	0,037	0,035	8%	4%	4%
0,4	0,030	0,032	0,031	7%	3%	4%

0,5	0,026	0,028	0,027	7%	3%	3%
0,6	0,021	0,022	0,022	4%	0%	4%
0,7	0,016	0,016	0,016	0%	2%	1%
0,8	0,010	0,010	0,010	1%	4%	2%
0,9	0,000	0,000	0,000	-	-	-
1,0	0,000	0,000	0,000	-	-	-
Rata-Rata Selisih Nilai				5%	3%	3%

Sedangkan nilai rata-rata selisih terbesar untuk nilai KQ *propeller* B4 60 juga sebesar 5%, dan nilai rata-rata selisih efisiensi mencapai 5%.

Tabel 16. Perbandingan Nilai Efisiensi Regresi, CFD, dan Open Water B4 60

(J)	<i>ETA Open</i>	<i>ETA Reg</i>	<i>ETA CFD</i>	<i>Open - Reg</i>	<i>CFD - Reg</i>	<i>CFD-Open</i>
0,1	0,127	0,119	0,122	6%	3%	3%
0,2	0,256	0,236	0,240	8%	2%	6%
0,3	0,367	0,350	0,350	5%	0%	5%
0,4	0,477	0,459	0,449	4%	2%	6%
0,5	0,553	0,558	0,530	1%	5%	4%
0,6	0,628	0,633	0,581	1%	9%	7%
0,7	0,620	0,612	0,574	1%	7%	7%
0,8	0,387	0,364	0,381	6%	4%	2%
0,9	0,000	0,000	0,000	-	-	-
1,0	0,000	0,000	0,000	-	-	-
Rata-Rata Selisih Nilai				4%	4%	5%

Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa seluruh parameter kinerja propeler B4 60 masih berada dalam rentang batas penerimaan yang telah ditetapkan, yaitu dengan deviasi kurang dari 6%.

Tabel 17. Perbandingan Nilai KT Regresi, CFD, dan Open Water B5 58

(J)	<i>KT Open</i>	<i>KT Reg</i>	<i>KT CFD</i>	<i>Open - Reg</i>	<i>CFD - Reg</i>	<i>CFD-Open</i>
0,1	0,463	0,457	0,454	1%	1%	2%
0,2	0,435	0,440	0,435	1%	1%	0%
0,3	0,405	0,398	0,409	2%	3%	1%
0,4	0,370	0,356	0,376	4%	5%	2%
0,5	0,330	0,314	0,339	5%	7%	3%
0,6	0,290	0,272	0,297	6%	8%	2%
0,7	0,240	0,231	0,251	4%	8%	5%
0,8	0,196	0,189	0,204	4%	7%	4%
0,9	0,148	0,147	0,153	1%	4%	4%
1,0	0,099	0,105	0,098	6%	7%	0%
Rata-Rata Selisih Nilai				3%	5%	2%

Perbandingan nilai KT, KQ dan Efisiensi Propeller B5 58 dapat dilihat pada Tabel 17, Tabel 18, dan Tabel 19

Tabel 18. Perbandingan Nilai KQ Regresi, CFD, dan Open Water B5 58

(J)	<i>KQ Open</i>	<i>KQ Reg</i>	<i>KQ CFD</i>	<i>Open - Reg</i>	<i>CFD - Reg</i>	<i>CFD-Open</i>
0,1	0,073	0,079	0,077	8%	2%	6%
0,2	0,069	0,073	0,071	5%	2%	3%
0,3	0,065	0,066	0,067	2%	2%	3%
0,4	0,061	0,060	0,063	1%	4%	3%

0,5	0,056	0,054	0,058	3%	6%	3%
0,6	0,050	0,048	0,052	4%	8%	4%
0,7	0,044	0,042	0,045	5%	8%	3%
0,8	0,037	0,036	0,039	4%	8%	4%
0,9	0,030	0,029	0,031	1%	5%	5%
1,0	0,022	0,023	0,023	6%	3%	3%
Rata-Rata Selisih Nilai				4%	5%	4%

Nilai rata-rata selisih pada KT tertinggi adalah 5%, nilai rata-rata selisih KQ tertinggi sebesar 5%, dan nilai rata-rata selisih efisiensi sebesar 2%. Sehingga berada pada batas penerimaan dengan selisih kurang dari 6%.

Tabel 19. Perbandingan Nilai Efisiensi Regresi, CFD, dan Open Water B5 58

(J)	ETA Open	ETA Reg	ETA CFD	Open - Reg	CFD -Reg	CFD- Open
0,1	0,101	0,093	0,094	8%	1%	7%
0,2	0,200	0,193	0,194	3%	1%	3%
0,3	0,296	0,286	0,289	3%	1%	2%
0,4	0,386	0,376	0,381	3%	1%	1%
0,5	0,471	0,463	0,468	2%	1%	1%
0,6	0,554	0,543	0,547	2%	1%	1%
0,7	0,608	0,615	0,618	1%	0%	2%
0,8	0,674	0,675	0,673	0%	0%	0%
0,9	0,714	0,714	0,707	0%	1%	1%
1,0	0,716	0,718	0,696	0%	3%	3%
Rata-Rata Selisih Nilai				2%	1%	2%

Perbandingan nilai KT, KQ dan Efisiensi Propeller B6 80 dapat dilihat pada Tabel 20, Tabel 21, dan Tabel 22.

Tabel 20. Perbandingan Nilai KT Regresi, CFD, dan Open Water B6 80

(J)	KT Open	KT Reg	KT CFD	Open - Reg	CFD -Reg	CFD- Open
0,1	0,550	0,560	0,549	2%	2%	0%
0,2	0,523	0,529	0,515	2%	3%	1%
0,3	0,489	0,491	0,486	0%	1%	1%
0,4	0,450	0,448	0,447	0%	0%	1%
0,5	0,408	0,403	0,405	1%	1%	0%
0,6	0,361	0,350	0,360	3%	3%	0%
0,7	0,315	0,297	0,311	6%	5%	1%
0,8	0,260	0,243	0,259	6%	6%	0%
0,9	0,207	0,190	0,204	8%	7%	1%
1,0	0,150	0,137	0,147	9%	7%	2%
Rata-Rata Selisih Nilai				4%	3%	1%

Rata-rata selisih nilai pada koefisien *thrust* atau nilai KT *propeller* B6 80 memiliki nilai tertinggi sebesar 4%.

Tabel 21. Perbandingan Nilai KQ Regresi, CFD, dan Open Water B5 58

(J)	KQ Open	KQ Reg	KQ CFD	Open - Reg	CFD -Reg	CFD- Open
0,1	0,097	0,097	0,099	1%	2%	3%
0,2	0,092	0,094	0,096	2%	2%	4%
0,3	0,087	0,089	0,091	3%	2%	5%

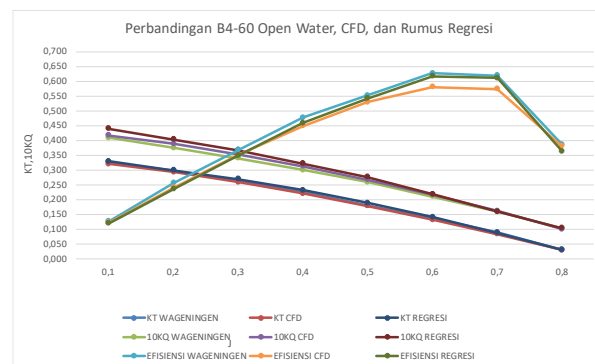
0,4	0,081	0,083	0,084	3%	2%	5%
0,5	0,074	0,075	0,078	1%	4%	5%
0,6	0,067	0,066	0,070	1%	5%	5%
0,7	0,060	0,058	0,062	2%	7%	5%
0,8	0,052	0,050	0,054	3%	7%	5%
0,9	0,043	0,042	0,045	3%	7%	4%
1,0	0,035	0,034	0,035	4%	5%	1%
Rata-Rata Selisih Nilai				2%	4%	4%

Nilai rata-rata selisih KQ tertinggi sebesar 4%, dan nilai rata-rata selisih efisiensi sebesar 5%. Sehingga berada pada batas penerimaan dengan selisih kurang dari 6%.

Tabel 22. Perbandingan Nilai Efisiensi Regresi, CFD, dan Open Water B5 58

(J)	ETA Open	ETA Reg	ETA CFD	Open - Reg	CFD -Reg	CFD- Open
0,1	0,091	0,091	0,088	1%	4%	3%
0,2	0,180	0,178	0,172	1%	3%	4%
0,3	0,269	0,272	0,254	1%	7%	6%
0,4	0,356	0,351	0,337	1%	4%	5%
0,5	0,437	0,430	0,416	1%	3%	5%
0,6	0,515	0,504	0,490	2%	3%	5%
0,7	0,590	0,569	0,557	4%	2%	6%
0,8	0,643	0,621	0,613	3%	1%	5%
0,9	0,690	0,653	0,651	5%	0%	6%
1,0	0,682	0,650	0,660	5%	1%	3%
Rata-Rata Selisih Nilai				3%	3%	5%

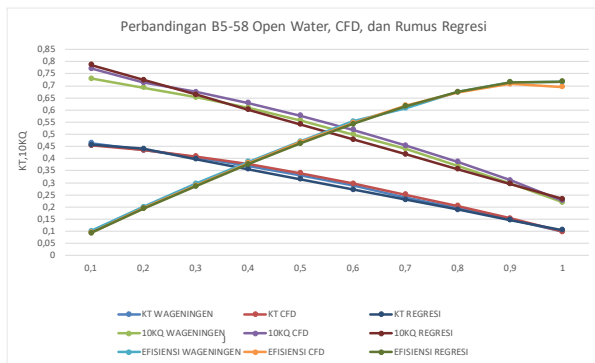
Perbandingan selisih KT, KQ, dan efisiensi pada model propeler disajikan dalam bentuk grafik untuk memperlihatkan perbedaan nilai koefisien di antara tiga metode perhitungan yang telah dilakukan. Grafik ini memudahkan analisis visual terhadap tingkat kesesuaian hasil perhitungan masing-masing metode. Penyajian grafik perbandingan untuk model propeler B4-60 dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram Perbandingan Rumus Regresi, CFD, dan Open Water *Propeller* B4 60

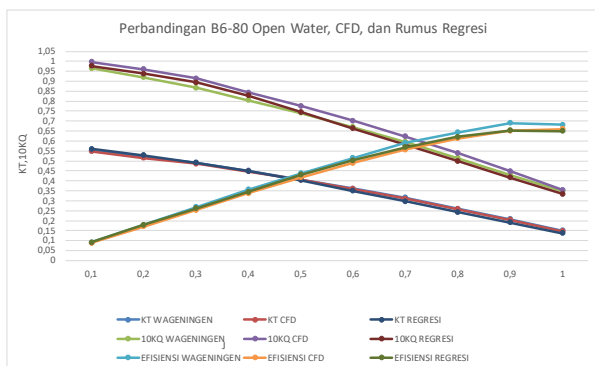
Pada model propeler B5-58 grafik perbandingan KT, KQ, dan Efisiensi disusun untuk menilai perbedaan nilai koefisien dari ketiga metode perhitungan yang digunakan. Visualisasi

ini memberikan gambaran yang jelas mengenai konsistensi dan akurasi hasil yang diperoleh. Grafik perbandingan untuk model propeler B5-58 disajikan pada Gambar 5.



Gambar 8. Diagram Perbandingan Rumus Regresi, CFD, dan Open Water *Propeller* B5 58

Selanjutnya, untuk model propeler B6-80, grafik perbandingan KT, KQ, dan efisiensi juga dibuat dapat dilihat pada Gambar 9. guna mengevaluasi perbedaan nilai koefisien antara ketiga metode perhitungan yang diterapkan.



Gambar 9. Diagram Perbandingan Rumus Regresi, CFD, dan Open Water *Propeller* B6 80

4. KESIMPULAN

Analisis yang telah dilakukan dengan mencari nilai koefisien thrust, torsi, dan efisiensi menggunakan rumus regresi hasil dari pengolahan data melalui metode DOE terhadap propeller model studi kasus dengan perbandingan nilai dari analisis 3 model yang diambil berdasarkan pertimbangan model tersebut merupakan propeller studi kasus pada kapal displacement dan dengan variabel blade yang tersedia dari B4 hingga B6 yang pada spesifikasi tersebut digunakan oleh kapal displacement serta telah dianalisis nilai performanya dari J 0,1 hingga J 0,2 dengan analisis CFD serta diagram open water wageningen b series yang menunjukkan hasil nilai analisis komponen koefisien thrust, torsi dan efisiensi memiliki selisih tertinggi sebesar 5 % pada perbandingan

perhitungan analisis CFD dengan rumus regresi dan selisih tertinggi sebesar 5% pada perbandingan perhitungan diagram open water dengan rumus regresi yang telah dibuat. Sehingga hasil tersebut sudah memenuhi batas penerimaan nilai analisis koefisien performa propeller yaitu dibawah 6%. Kesimpulan yang dapat diambil adalah rumus regresi ini dapat menjadi alternatif metode perhitungan untuk mendapatkan nilai koefisien performa propeller sehingga dapat menjadi implikasi terhadap analisis perkiraan nilai performa propeller pada kapal untuk membantu proses pemilihan spesifikasi propeller yang paling sesuai dengan karakteristik kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "EEXI _ Energy Efficiency Existing Ship Index", Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topic/s/eexi/>
- [2] M. Bayraktar and O. Yuksel, "A scenario-based assessment of the energy efficiency existing ship index (EEXI) and carbon intensity indicator (CII) regulations," *Ocean Eng.*, vol. 278, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114295.
- [3] A. TOKUŞLU, "Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) performance of a container ship," *Int. J. Environ. Geoinformatics*, vol. 7, no. 2, pp. 114–119, Aug. 2020, doi: 10.30897/ijegeo.703255.
- [4] V. Pelić, O. Bukovac, R. Radonja, and N. Degiuli, "The Impact of Slow Steaming on Fuel Consumption and CO2 Emissions of a Container Ship," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/jmse11030675.
- [5] Y. Xiao, Q. Li, J. Zheng, X. Liu, Y. Huangfu, and Z. peng Li, "Design and control studies of six-phase interleaved boost converter for integrated energy efficiency improvement of green ship," *J. Energy Storage*, vol. 96, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112549.
- [6] H. Kong and H. Zhao, "A Review of Energy Management Strategies for Ship Hybrid Power Systems," *International Journal of Education and Humanities*, vol. 19, no. 3, pp. 41–47, May 2025. doi: 10.54097/tv814c06
- [7] A. Vázquez-Santos, N. Camacho-Zamora, J. Hernández-Hernández, A. L. Herrera-May, L.

- del C. Santos-Cortes, and M. E. Tejeda-del-Cueto, "Numerical Analysis and Validation of an Optimized B-Series Marine Propeller Based on NSGA-II Constrained by Cavitation," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 2, Feb. 2024, doi: 10.3390/jmse12020205.
- [8] X. Liu, Q. Yao, C. Zhu, and H. Yang, "Optimization of wake propeller based on Gaussian approximation and NSGA-II," *Chinese J. Sh. Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 197–205, Aug. 2023, doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02892.
- [9] B. Bacalja Bašić, M. Krčum, and Z. Jurić, "Propeller Optimization in Marine Power Systems: Exploring Its Contribution and Correlation with Renewable Energy Solutions," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 5, May 2024, doi: 10.3390/jmse12050843.
- [10] Z. Yang, W. Qu, and J. Zhuo, "Optimization of Energy Consumption in Ship Propulsion Control under Severe Sea Conditions," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.3390/jmse12091461.
- [11] S. A. Chavan, A. Bhattacharyya, and O. P. Sha, "Open water performance of B-Series marine propellers in tandem configurations," *Ocean Eng.*, vol. 242, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110158.
- [12] M. Tadros and E. Boulougouris, "Performance Assessment of B-Series Marine Propellers with Cupping and Face Camber Ratio Using Machine Learning Techniques," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 7, p. 1345, Jul. 2025, doi: 10.3390/jmse13071345.
- [13] D. Anevlavi, S. Zafeiris, G. Papadakis, and K. Belibassakis, "Efficiency Enhancement of Marine Propellers via Reformation of Blade Tip-Rake Distribution," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.3390/jmse11112179.
- [14] C. Yin, C. K. Roseninge, M. P. Sandland, A. Ehlers, and K. W. Shin, "Improve Ship Propeller Efficiency via Optimum Design of Propeller Boss Cap Fins," *Energies*, vol. 16, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16031247.
- [15] B. A. Aditya, I. K. A. P. Utama, W. D. Aryawan, and Sutiyo, "CFD Analysis into the Effect of using Propeller Boss Cap Fins (PBCF) on Open and Ducted Propellers, Case Study with Propeller B-Series and Kaplan-Series," *CFD Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 32–42, Apr. 2022, doi: 10.37934/CFDL.14.4.3242.
- [16] A. Ivagnes, N. Demo, and G. Rozza, "A Shape Optimization Pipeline for Marine Propellers by means of Reduced Order Modeling Techniques," Jan. 2024, doi: 10.1002/nme.7426.
- [17] M. Tadros, M. Ventura, and C. G. Soares, "Design of propeller series optimizing fuel consumption and propeller efficiency," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/jmse9111226.
- [18] J. Hasil et al., "JURNAL TEKNIK PERKAPALAN," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 8, no. 3, 2020, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/nava>
- [19] B. A. Aditya, M. Indaryanto, S. S, and C. Kusuma, "DIMENSIONAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL DESIGN FOR PREDICTING THE CALCULATION OF THE VALUE OF THE TORQUE COEFFICIENT ON PROPELLER B-SERIES, CASE STUDY OF B3-50 AND B5-80," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 73–78, Mar. 2023, doi: 10.12962/j27745449.v3i3.581.
- [20] Suratno, I. M. Ariana, and B. Cahyono, "Optimization of Propeller Design Through Polynomial Approach to Optimize the Ship Energy Efficiency," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Sep. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/557/1/012051.
- [21] L. Birk, "Fundamentals of Ship Hydrodynamics: Fluid Mechanics, Ship Resistance and Propulsion. John Wiley & Sons., 2019
- [22] Y. Wang et al., "Effect of Blade Number on Tip Vortex Cavitation of Propeller," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 5, 2025, doi: 10.3390/jmse13050915.
- [23] M. D. Arifin, D. Faturachman, F. Octaviani, and K. A. Sulaeman, "Analysis of the Effect of Changes in Pitch Ratio and Number of Blades on Cavitation on CPP," *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 255–264, 2020, doi: 10.12962/j25481479.v5i4.8285.
- [24] E. Coşkun and M. H. Doğru, "Investigation of the hub diameter effect on propeller thrust," *Int. J. Mater. Eng. Technol.*, vol. 2022, no. 1,

- pp. 43–47, 2021, [Online]. Available: <http://dergipark.gov.tr/tijmet>
- [25] D. A. . Hudson, A. F. . Molland, and S. R. . Turnock, *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge University Press, 2011.
- [26] D. C. . Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, Inc., 2013. Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/duglas_c._montgomery-design_and_analysis_of_experiments-wiley_2012_edition_8.pdf
- [27] R. Fontana, A. Molena, L. Pegoraro, and L. Salmaso, “Design of experiments and machine learning with application to industrial experiments,” *Stat. Pap.*, vol. 64, no. 4, pp. 1251–1274, 2023, doi: 10.1007/s00362-023-01437-w.
- [28] D. Montgomery and E. Peck, “INTRODUCTION TO LINEAR REGRESSION ANALYSIS,” Feb. 2021. Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-16125104-1a3a7c5bd1.pdf>
- [29] Y. C. Kim, K. S. Kim, S. Yeon, Y. Y. Lee, G. Do Kim, and M. Kim, “Power Prediction Method for Ships Using Data Regression Models,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 10, 2023, doi: 10.3390/jmse11101961.
- [30] D. C. Montgomery and J. Wiley, “Sixth Edition Introduction to Statistical Quality Control.” John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [31] M. Alkiayat, “A Practical Guide to Creating a Pareto Chart as a Quality Improvement Tool,” *Glob. J. Qual. Saf. Healthc.*, vol. 4, no. 2, pp. 83–84, 2021, doi: 10.36401/jqsh-21-x1.
- [32] A. Kwilinski and M. Kardas, “the Role of the Pareto Principle in Quality Management Within Industry 4.0: a Comprehensive Bibliometric Analysis,” *Virtual Econ.*, vol. 7, no. 3, pp. 7–24, 2024, doi: 10.34021/ve.2024.07.03(1).
- [33] M. M. Bernitsas, et al., “KT, KQ and Efficiency Curves for the Wageningen B-series Propellers,” University of Michigan, 1981.
- [34] J.S. Carlton, “Marine Propellers and Propulsion.”, Second Edition, 2007, <https://doi-org.proxy.undip.ac.id/10.1016/B978-0-7506-8150-6.X5000-1>
- [35] E. V. . Lewis, *Principles of naval architecture*. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989.
- [36] M.W.C. Oosterveld, “Further computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series,” *International Shipbuilding Progress*. 1975;22(251):251-262. doi:10.3233/ISP-1975-2225102
- [37] T.J. Chung, “Computational Fluid Dynamics, Second Edition,” Sep. 2010. [Online]. Available: <http://www.uah.edu/CFD>.