

Perencanaan Kendali Kemudi Kapal Cepat berbasis pada Sistim Penggerak dengan Aktuator Propulsion-Engine

Hendro Nurhadi¹, Muhammad Razi², Yunarko Triwinarno³

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember,
Surabaya-Indonesia

hdnurhadi@me.its.ac.id, Razi_ahazy@yahoo.com

Abstrak

Indonesia sebagai salah satu Negara kepulauan dengan luas wilayah lautan lebih luas dibandingkan daratannya, pertahanan wilayah bahari harus menjadi prioritas utama. Sayangnya ketergantungan Negara kita terhadap ALUTSISTA matra laut dari pihak luar masih sangat besar, Mayoritas kapal perang yang digunakan oleh pihak TNI-AL saat ini merupakan hasil pembelian dari pihak asing, kondisi ini sangat tidak menguntungkan bagi pertahanan-keamanan Negara kita mengingat mudahnya pihak asing membaca kemampuan pertahanan Indonesia. Guna mengurangi ketergantungan teknologi dari pihak luar serta menunjang kemandirian teknologi dibidang pertahanan - keamanan, maka penelitian yang berfokus pada pengembangan kapal perang merupakan suatu hal yang mutlak harus dilakukan oleh anak-anak bangsa.

Penelitian ini dilakukan pada drive system yang merupakan bagian dari platform kapal dengan cakupan desain dan modeling stand alone drive system dengan spesifikasi kapal: $L_{OA} = 90,71$ m; $L_{wl} = 83,52$ m; $B = 14,02$ m; $T = 3,60$ m; $V_s = 25 - 40$ knot. Penelitian difokuskan pada desain dan modeling propeler battleship berupa perhitungan tahanan kapal, perhitungan daya penggerak kapal, perhitungan daya maneuver kapal, batas maksimum dan minimum yaw steering, sistem steering control yang digunakan, pemilihan propeler, sistem keseimbangan antara kecepatan rotasi propulsion dengan sudut putar rudder pada saat bermanuver Serta desain dan modeling drive system berupa pemodelan sistem yang menghasilkan persamaan fisik dan transfer function dengan pemodelan pada matlab.

Capaian yang diinginkan dari penelitian ini adalah didapatkannya jenis dan type propeler yang sesuai digunakan pada spesifikasi kapal yang telah ditentukan, daya penggerak yang digunakan serta pemodelan sistem kontrol speed dan position dan sistem kontrol steering yang sesuai digunakan pada kapal jenis ini.

Keyword : *Propulsion, motor penggerak, steering control sistem, matlab, Maxsurf, Hullspeed transfer function.*

1. Pendahuluan

Dalam melakukan operasinya dilautan, kapal cepat harus memiliki kemampuan untuk mempertahankan kecepatan dinas (V_s) seperti yang telah direncanakan, kemampuan untuk mempertahankan kecepatan dinas suatu kapal sangatlah tergantung pada desain awal dari kapal itu sendiri. Adapun yang menjadi perhatian utama dalam mendesain sebuah kapal cepat haruslah memperhatikan hal-hal sebagai berikut; pemilihan engine yang sesuai dengan kebutuhan daya dan daerah jelajahan kapal, mendesain dan membangun bodi kapal yang aerodinamis, perencanaan dan pemilihan system propulsi kapal, perencanaan dan pemilihan rudder,

dan perencanaan system control yang sesuai dengan kebutuhan kapal.

Dalam makalah ini lebih ditekankan pada system propulsi kapal cepat, karena system ini memegang peranan penting dalam menjaga kestabilan kapal cepat. Kapal yang didesain dengan kecepatan khusus haruslah mempunyai rancangan system propulsi (penggerak) yang dapat mengatasi keseluruhan gaya-gaya hambat (*total resistance*) yang terjadi agar bisa memenuhi standart kecepatan dinasnya [2], secara umum system propulsi kapal terdiri dari 3 (tiga) komponen utama, yaitu; (a) Motor penggerak utama (*main engine*), (b) Sistem transmisi (*transmission system*), (c) dan alat gerak (*Propulsor*). Ketiga komponen utama ini

merupakan suatu kesatuan yang tidak bisa dipisahkan dalam proses perencanaannya. Kesalahan didalam desain akan membawa pengaruh yang sangat besar terhadap kondisi-kondisi berikut ini:

1. Tidak terpenuhinya kecepatan servis yang direncanakan.
2. Fuel oil consumption yang tidak efisien
3. Turunnya nilai ekonomis dari kapal tersebut
4. Pengaruh pada tingkat vibrasi yang terjadi pada badan kapal.

Konfigurasi dari ketiga komponen utama system propulsi ini sangat dipengaruhi oleh rancangan fungsi kapal itu sendiri, serta bagaimana misi yang harus dijalankan dalam operasionalnya dilaut.

2. Metoda Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan dua metode yaitu;

- a. Pengambilan data dan perhitungan teknis
Data – data yang diperlukan untuk melakukan perhitungan teknis didapat dengan melakukan survey dan wawancara langsung dengan awak kapal perang TNI-AL KRI Hasanuddin, data-data yang didapat kemudian diproses untuk mengetahui tahanan total kapal, mengetahui efisiensi dari propulsi kapal berdasarkan main engine yang digunakan. Kemudian dari pengolahan data tersebut dapat ditentukan jenis dan diameter propeller yang sesuai digunakan pada kapal cepat dengan kecepatan maksimum 38 knots.
- b. Membuat permodelan system propulsion berdasarkan data-data teknis yang didapatkan dari hasil survey, kemudian model system propulsi tersebut disimulasikan menggunakan software Maxsurf dan Hullspeed, kemudian dibandingkan dengan software Matlab R-2008a, hasil simulasi ini dibandingkan dengan perhitungan yang didapatkan dari hasil survey lapangan.

3. Data Teknis

Yang menjadi acuan dasar dalam perencanaan system propulsi dalam penelitian ini adalah kapal perang KRI Hasanuddin, kapal korvet SIGMA class, peneliti telah melakukan survey lapangan, dan dari hasil survey didapatkan data teknis sebagai berikut;

Tabel 1. DATA POKOK KRI HASANUDDIN

1. Nama kapal – No lambung :	KRI HASANUDIN - 366
Jenis (TYPE) :	KORVET SIGMA CLASS
2. Thn pembuatan :	AGUSTUS 2004
3. Pabrik/Galangan/Shipyard :	ScheldeNavalShipbuilding
4. Masuk TNI-AL :	2008
Ref. General Guidance & Administration Chapter 0 Corvette for TNI AL	
5. Material bakap (material shipbuilding) :	Plat Baja Ringan (Mild Steel)
6. Panjang maks (length over all/loa) :	90.71 m
7. Panjang deck 2 (length 2-deck) :	86.40 m
8. Panjang antara garis tegak (length between perpendiculars/lpp) :	83.52 m
9. Lebar maks (max breadth/boa moulded):	13.02 m
10. Lebar pd garis air (breadht waterline) :	12.04 m
11. Berat kapal kosong (netto tonage) :	1444 ton
12. Displace. At design/scantling draught :	1694 ton/1819 ton
13. Design (dwl)/scantling draught :	3.6 M/3.75 M
14. Kecepatan ekonomis :	12 knots
15. Kecepatan jelajah – range :	14-18 knots - 4700/3600 nm
16. Kecepatan maximum (trial condition) :	38 k nots
17. Kapasitas tk. Bb full / jenis :	218 m ³ / hsd
18. Kapasitas tk. Ml full / jenis :	shell sirius 40
Kapasitas olie di carter :	1620 ltr
19. Kapasitas tk. At full (f.w. Capacity) :	34 m ³ = 34.000 ltr
20. Pendorong pokok (main engine) :	diesel (pielstick 20 pa6 b stc)
21. Jumlah propeller (number of propeller) :	2 unit @ 5 blade

Table 1. Data teknis KRI-Hasanuddin [1]

4. Sistem propulsi kapal

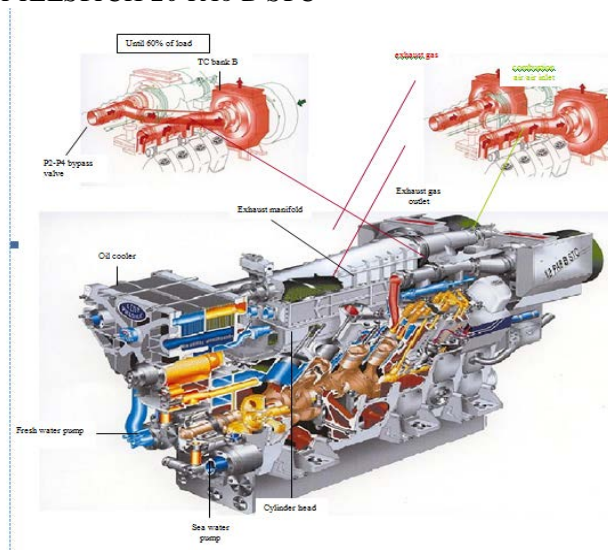
Sistem penggerak kapal yang digunakan pada zaman modern ini umumnya sistem penggerak mekanik, pada dasarnya sistem penggerak mekanik terdiri dari tiga komponen utama yaitu; a) Motor penggerak utama (*prime mover*), (b) Sistem transmisi (*transmission system*), (c) dan alat gerak (*Propulsor*).

4.1. Motor penggerak utama (*prime mover*)

a. Internal Cumbustion Engine

Internal Combustion Engines yang digunakan dalam propulsi kapal, pada umumnya adalah *Reciprocating engines* yang beroperasi dengan prinsip-prinsip diesel (*compression ignition*)

yang lebih populer dengan nama *Diesel Engines*. Berbagai ukuran *Diesel Engines* ini kemudian dibuat, mulai dari kebutuhan untuk *pleasure boats* hingga ke *modern supertankers* dan *passenger liners*. *Engine* ini dapat dikembangkan hingga memberikan lebih dari 2500 kW per cylinder, maka *output power* bisa mencapai 30,000 kW untuk 12 cylinders (40,200 HP). Torsi yang diproduksi oleh *Diesel Engine* dibatasi oleh *maximum pressure* dari masing-masing silinder-nya. Sehingga, ketika *engine* memproduksi *maximum torque*, maka *maximum power* hanya dapat dicapai pada kondisi *maximum RPM*. *Diesel Engine* secara konsekuensi, memproduksi *power* sedemikian hingga proporsional dengan *RPM* untuk masing-masing *throttle setting*-nya. Pembatasan ini kemudian menyebabkan masalah tersendiri didalam melakukan *matching* antara *Diesel Engine* dan *Propeller*. Pada kapal perang KRI-Hasanuddin menggunakan *Diesel Engine type PIELSTICK 20 PA6 B STC*



Gambar 1. *Diesel Engine type PIELSTICK 20 PA6 B STC* [1]

b. *Gas turbin*

Gas Turbine juga telah dikembangkan dalam dunia *ship propulsion* dimana bahan bakar (*fuel*) dibakar melalui proses udara yang dikompresikan, dan gas panas hasil pembakaran tersebut digunakan untuk memutar turbine. *Gas turbine* umumnya diaplikasikan pada dunia kedirgantaraan, dan perkembangannya sangat tergantung pada teknologi metal yang mampu menahan terhadap tekanan dan temperatur yang

tinggi. Keunggulan dari *gas turbine* ini terletak pada ukuran dan kapasitas power yang dihasilkan dibandingkan dengan tenaga penggerak lainnya. Selain itu, kesiapannya untuk beroperasi pada kondisi full load sangat cepat, yaitu berkisar 15 menit untuk *warming-up period*. *Marine Gas Turbine* paling banyak dijumpai pada kapal-kapal perang jenis, frigates; destroyers; patrol crafts; dsb. Instalasinya pun kadang merupakan kombinasi dengan tipe permesinan yang lainnya, yakni : *Diesel engines*. Beragam macam dari tipe *marine engines*, tidak semuanya di-rate pada basis. Sebagai contoh, internal *Combustion Engine* di rate dalam bentuk *indicated power* atau juga , *Brake Power* (P_B); dan *turbine* dalam bentuk *Shaft Power* (P_S). Bentuk *Horse Power* masih tetap digunakan, dimana 1 H P = 0.7457 kW [2]. *Brake Power* (P_B) adalah *power* yang diukur pada *crank-shaft coupling*, daya ini dikenal juga dengan daya poros (P_S) dimana persamaanya adalah sebagai berikut;

$$P_B = 2\pi.Q.N \text{ (watt)} \quad (1)$$

Dimana Q adalah *Brake Torque* (kN-m), dan n merupakan *revolutions per sec*.

Shaft power (P_S) merupakan *power* yang ditransmisikan melalui poros ke propeller. Pengukuran dilaksanakan dikapal, dengan lokasi ukur sedekat mungkin dengan propeller. Pengukuran dilakukan dengan bantuan suatu instruments (*torsionmeter*), yang mengukur sudut *twist* antara dua *section* poros propeller tersebut. *Shaft power* dapat dihitung dengan persamaan berikut ini;

$$P_S = \frac{\pi d_s^4 G \theta n}{32 L} \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

Dimana d_s adalah diameter *shaft* (m); G adalah shear modulus of elasticity dari material poros (kN/m); θ merupakan sudut twist yang terukur (derajat); L_s merupakan panjang *shaft* hingga di titik dimana twist tersebut diukur (m); dan n adalah revolution per sec. Harga shear modulus untuk poros baja adalah sebesar 8.35×10^7 kN/m².

4.1.1 Daya motor yang di-instal

Daya motor penggerak kapal (PB) yang dimaksud adalah Daya Rem (*Brake Power*) atau daya yang diterima oleh poros transmisi sistem penggerak kapal (PS), yang selanjutnya dioperasikan secara kontinyu untuk menggerakkan kapal pada kecepatan servisnya (VS). Jika besarnya efisiensi mekanis pada susunan gearbox, yang berfungsi untuk me-*reduce* dan me-*reverse* putaran motor penggerak, adalah 98 persen (seperti ditunjukkan pada Gambar 2). Maka daya motor penggerak kapal dapat dihitung, seperti persamaan dibawah ini ;

$$P_{B-CSR} = P_S / 0,98 \quad (3)$$

PB-CSR adalah daya output dari motor penggerak pada kondisi *Continues Service Rating* (CSR), yaitu daya motor pada kondisi 80 - 85% dari *Maximum Continues Rating* (MCR)-nya. Artinya, daya yang dibutuhkan oleh kapal agar mampu beroperasi dengan kecepatan servis VS adalah cukup diatasi oleh 80 - 85% daya motor (*engine rated power*) dan pada kisaran 100% putaran motor (*engine rated speed*). Sehingga untuk menentukan besarnya daya motor yang harus di-*instal* di kapal, adalah seperti yang ditunjukkan oleh persamaan sebagai berikut ;

$$P_{B-MCR} = \frac{P_{B-CSR}}{0,85} \quad (4)$$

Daya pada **P_B-MCR** inilah yang selanjutnya dapat digunakan sebagai (acuan) dalam melaksanakan proses *pemilihan* motor penggerak (*Engine Selection Process*) [3].

4.2. Efisiensi pada transmission system

Sistem penggerak kapal memiliki beberapa definisi tentang daya yang ditransmisikan mulai dari daya yang dikeluarkan oleh motor penggerak hingga daya yang diberikan oleh alat gerak kapal ke fluida sekitarnya. Rasio dari daya-daya tersebut sering dinyatakan dengan istilah *efisiensi*, meskipun untuk beberapa hal sesungguhnya bukanlah suatu nilai konversi daya secara langsung.

Efisiensi Lambung, η_{HULL} , adalah rasio antara daya efektif (PE) dan daya dorong (PT). Efisiensi Lambung ini merupakan suatu bentuk ukuran kesesuaian rancangan lambung (*stern*) terhadap *propulsor arrangement*-nya, sehingga efisiensi ini bukanlah bentuk *power conversion* yang sebenarnya. Maka nilai Efisiensi Lambung inipun dapat *lebih dari satu*, pada umumnya diambil angka sekitar 1,05.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi lambung adalah;

$$\eta_{HULL} = (1-t)/(1-w) \quad (5)$$

t dan w merupakan *propulsion parameters*, dimana t adalah *Thrust Deduction Factor* yang dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut ;

$$t = 1 - R/T \quad (6)$$

$t_{standar} = 0.5 \times C_p - 0.12$; untuk kapal dengan *baling-baling tunggal*.

dimana C_p = Koefisien Prismatic =

$$\forall / L. B. T. C_m = \forall / L. A_m \quad (7)$$

Sedangkan, w adalah *wake fraction* yang dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$w = 1 - V_A/V_s \quad (8)$$

$w_{standar} = 0.70 \cdot C_p$; *single screw ship with normal stern*
 $= 0.50 \cdot C_p$; *single screw ship with stern bulb*

Efisiensi Baling-baling (*Propeller Efficiency*), η_{PROP}

adalah rasio antara daya dorong (P_T) dengan daya yang disalurkan (P_D). Efisiensi ini merupakan *power conversion*, dan perbedaan nilai yang terjadi adalah terletak pada dimana pengukuran *Torsi Balingbaling* (*Propeller Torque*) tersebut dilakukan. Yakni, apakah pada kondisi *open water* (Q_o) atau pada kondisi *behind the ship* (Q_D). Persamaan berikut ini menunjukkan kedua kondisi dari *Efisiensi Baling-baling*, sebagai berikut ;

Efisiensi baling-baling (open water) :

$$\eta_o = \frac{T \times V_a}{2\pi Q_o n} \quad (9)$$

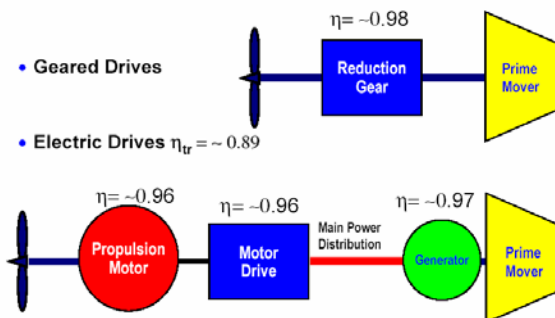
Efisiensi baling-baling (behind the ship) :

$$\eta_B = P_T / P_D = T \times V_a / 2\pi Q_D n \quad (10)$$

Efisiensi Transmisi Poros (Shaft Transmission Efficiency), η_s , secara mekanis umumnya dapat didefinisikan dengan lebih dari satu macam tipe efisiensi, yang mana sangat tergantung dari bentuk konfigurasi pada *stern arrangement*-nya. Efisiensi ini merupakan *product* dari keseluruhan efisiensi masing-masing individual komponen terpasang. Efisiensi ini dapat dinyatakan seperti persamaan, sebagai berikut ;

$$\eta_s = \frac{P_D}{P_S} \quad (11)$$

Berikut ini adalah beberapa *arrangement* dari transmisi daya yang sering digunakan pada sistem penggerak kapal,



Gambar 2. Efisiensi pada Komponen Transmisi dari Sistem Propulsi Kapal.[3]

Efisiensi Keseluruhan (Overall Efficiency, η_p), yang dikenal juga dengan sebutan **Propulsive Efficiency**, merupakan hasil dari keseluruhan efisiensi di masing-masing *phrase* daya yang terjadi pada sistem propulsi kapal (*sistem penggerak kapal*). Efisiensi Keseluruhan dapat diperoleh dengan persamaan, sebagai berikut ;

$$\eta_p = \frac{P_E}{P_T} = \frac{P_T}{P_D} = \frac{P_D}{P_S} = \eta_{Hull} \times \eta_{pX} \times \eta_s \quad (12)$$

4.3. Daya yang bekerja pada kapal.

Beberapa analisa daya yang diperlukan dalam mendesain sebuah kapal cepat, daya yang sering digunakan untuk melakukan estimasi terhadap kebutuhan daya pada sistem penggerak kapal, antara lain;

Daya Efektif (P_E) adalah besarnya daya yang dibutuhkan untuk mengatasi gaya hambat dari badan kapal (*hull*), agar kapal dapat bergerak dari satu tempat ke tempat yang lain dengan kecepatan servis sebesar V_s . Daya Efektif ini merupakan fungsi dari besarnya gaya hambat total dan kecepatan kapal. besarnya daya efektif dapat dihitung dengan persamaan berikut;

$$P_E = R_T \times V_s \quad (13)$$

Daya dorong (P_T) adalah besarnya daya yang dihasilkan oleh kerja dari alat gerak kapal (*propulsor*) untuk mendorong badan kapal. Daya Dorong merupakan fungsi dari gaya dorong dan laju aliran fluida yang terjadi saat alat gerak kapal bekerja. Adapun persamaan Daya Dorong dapat dituliskan sebagai berikut;

$$P_T = T \times V_a \quad (14)$$

, dimana :

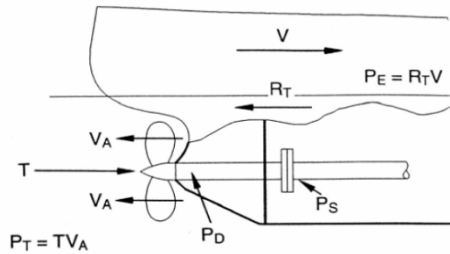
P_T = Daya Dorong, dlm. satuan kWatt

T = Gaya Dorong, dlm. satuan kN

V_a = Kecepatan *advanced aliran fluida di bagian Buritan kapal* [m/det]
= $V_s (1 - w)$; yangmana w adalah *wake fraction* (fraksi arus ikut)

Daya yang disalurkan (P_D) adalah daya yang diserap oleh baling-baling kapal guna menghasilkan Daya Dorong sebesar P_T , atau dengan kata lain, P_D merupakan daya yang disalurkan oleh motor penggerak ke baling-baling kapal (*propeller*) yang kemudian dirubahnya menjadi Daya Dorong kapal (P_T). Variabel yang berpengaruh pada daya ini adalah **Torsi Yang Disalurkan** dan **Putaran** baling-baling, sehingga persamaan untuk menghitung P_D adalah sebagai berikut ;

$$P_D = 2\pi Q_D n_p \quad (15)$$



Gambar 3. Gaya-gaya yang bekerja pada sistem penggerak kapal [3]

5. Tahanan Kapal dan Kecepatan Servis

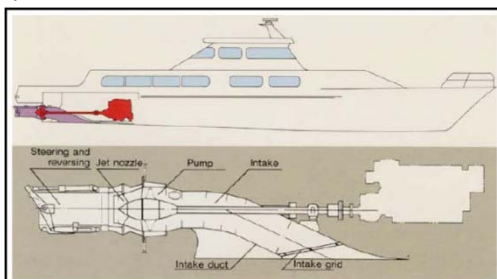
Tahanan kapal merupakan gaya hambat dari fluida yang bekerja pada badan kapal yang sedemikian rupa yang arahnya berlawanan dengan gerak kapal. tahanan kapal didefinisikan sebagai;

$$R_T = \frac{1}{2} \rho C_T S V_s^2 \quad (16)$$

Dimana ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), C_T merupakan koefesien tahanan total kapal, S adalah luasan permukaan basah dari badan kapal (m^2), dan V_s adalah kecepatan servis kapal (knots).

6. Sistem Propulsi Water-jet

Pada sistem propulsi waterjet, adanya aksi gaya dorong menyebabkan kapal dapat bergerak dengan kecepatan tertentu dan reaksi dari fluida akan menyebabkan tahanan kapal.



Gambar 4. Sistem propulsi water jet

Gaya dorong adalah aksi dari pompa yang mengakibatkan fluida mengalir melalui saluran dengan memberikan energi pada sistem, kemudian dirubah oleh nossel sehingga terjadi kenaikan momentum aliran.

7. Analisa kapal pada saat beroperasi

Dalam melakukan operasi di lautan, kapal cepat dirancang mampu beroperasi pada

beberapa kondisi kecepatan, umumnya ada tiga jenis kecepatan yang sering dioperasikan pada kapal cepat, yaitu;

1. Kecepatan pada saat melakukan patroli.

Pada saat melakukan patrol kapal dioperasikan pada kecepatan 24-30 knots. Pada kecepatan ini analisa yang dilakukan meliputi perhitungan *engine propeller matching* yang mengacu pada kecepatan saat patrol serta penentuan kebutuhan listrik, analisa dilakukan untuk menentukan tipe *main engine* dan tipe *auxiliary engine* yang akan digunakan pada saat kapal *korvet class sigma* melakukan patroli[4].

2. Kecepatan pada saat melakukan pengejaran.

Saat melakukan pengejaran kapal dioperasikan pada kecepatan pada kecepatan 35 knots. Analisa yang dilakukan pada kecepatan ini meliputi perhitungan *engine propeller matching* serta penentuan kebutuhan listrik. Analisa dilakukan dengan perhitungan manual dan perbandingan simulasi, analisa ini untuk menentukan tipe *main engine*, *auxiliary engine*, spesifikasi water jet serta motor listrik.

3. Kecepatan jelajah.

Kecepatan kapal pada saat melakukan penjelajahan ini dilakukan pada kecepatan 14 - 18 knots. Analisa yang dilakukan meliputi perhitungan *engine propeller matching* yang mengacu pada kecepatan saat melakukan pengintaian, serta kebutuhan listrik yang diperlukan kapal.

8. Pembahasan

Perhitungan tahanan kapal.

Perhitungan tahanan kapal didasarkan pada tiga kondisi operasi kapal, yaitu pada saat melakukan penjelajahan, pada saat melakukan pengejaran dan pada saat melakukan pengintaian. Perhitungan tahanan kapal dilakukan berdasarkan spesifikasi kapal.

Spesifikasi kapal

Spesifikasi kapal cepat yang akan digunakan untuk menganalisa tahanan kapal adalah sebagai berikut;

- Panjang maks (length over all/loa) : 90.71 m
- Panjang deck 2 (length 2-deck) : 86.40 m
- Panjang antara garis tegak (length between perpendiculars/lpp) : 83.52 m
- Lebar maks (max breadth/boa moulded): 13.02 m

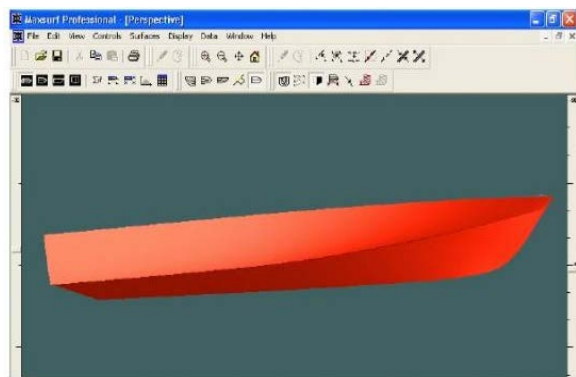
- Lebar pd garis air (breadht waterline) : 12.04 m
- Berat kapal kosong (netto tonage) : 1444 ton
- Displace. At design/scantling draught : 1694 ton/1819 ton
- Design (dwl)/scantling draught : 3.6 M/3.75 M
- Kecepatan ekonomis : 12 knots
- Kecepatan jelajah – range : 14-18 knots
4700/3600 nm
- Kecepatan maximum : 38 knots (trial condition)
- Block coef : 0.4
- Prismatic coef : 0.736
- Wetted area : 788,6 m²

Berdasarkan data dan model kapal korvet yang telah didapatkan, maka perhitungan terhadap tahanan dan propulsi kapal dapat ditentukan.

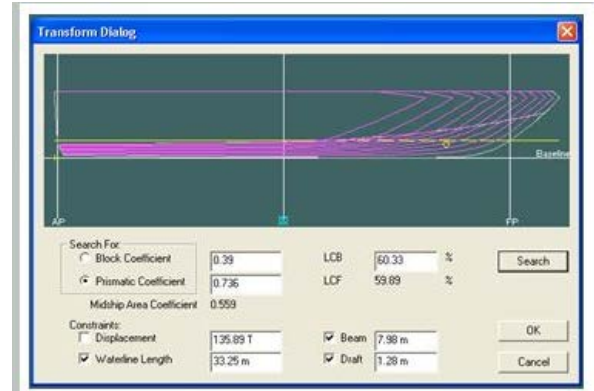


Gambar 5. Model kapal korvet yang digunakan untuk analisa

Dengan memanfaatkan software Maxsurf pro 7.16 model lambung kapal cepat dapat dimodelkan sebagai berikut;



Gambar 6. Tampilan prospektif bentuk lambung kapal cepat korvet

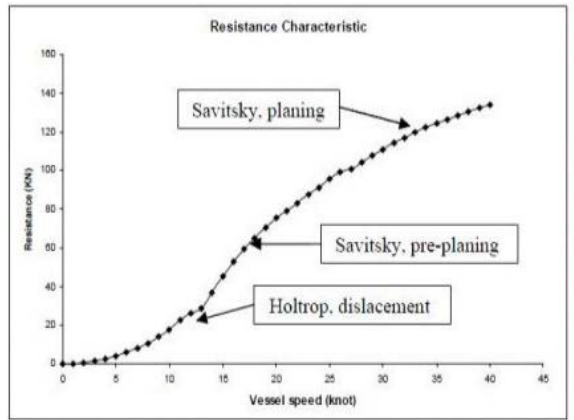


Dengan menggunakan software Hullspeed terhadap tiga kondisi operasi dan dengan tiga metode yang berbeda perhitungan tahanan kapal dapat dihitung, seperti terlihat pada table 2 berikut.

No		Value	Units	Savitsky Pre-planing	Savitsky planing	Holtrop
1	Lwl	83,52	m	83,52	83,52	83,52
2	Beam	13.02	m	13.02	13.02	13.02
3	Draft	5.2	m	--	--	5.2
4	Displaced volume	125.46	m ³	125,465	125,465	125,46
5	Wetted area	788.6	m ²	788.6	788.6	788.6
6	Prismatic coef	0.736		--	--	0.736
7	Waterplane are coef	0.755		--	--	0.755
8	½ angle of entrance	13.87	deg	13.87	--	--
9	LCG from midship	-5.869	m		-5.869	-5.869
10	Transom area	2.732	m ²	2.732	2.732	2.732
11	Max sectional area	5.437	m ²	5.437	--	--
12	Bulb transver area	0	m ²	--	--	0
13	Bulb height from keel	0	m	--	--	0
14	Draft at FP	5.2	m	--	--	5.2
15	Deadrise at 50% Lwl	16.15	deg	--	16.15	--
16	Frontal area	0	m ²			
17	headwind	0				
18	Drag coef	0				
19	Air density	0.001	Tonne/m ³			
20	Appendage factor	1				
21	Nominal app.length	0				
22	Correlation allow	0.006				
23	Kinematic viscosity	0.000011	m ² /s			
24	Water density	1.026	Tonne/m ³			

Tabel 2. Ukuran utama kapal cepat korvet

Karakteristik tahanan kapal yang dihasilkan software Hullspeed terhadap reference data hasil modelisasi kapal cepat dengan software Maxsurf, terlihat seperti gambar 6 berikut ini.



Gambar 7. Kurva karakteristik tahanan kapal.

Perhitungan Gaya Dorong Kapal

Gaya dorong kapal yang dibutuhkan untuk menggerakkan kapal sangat tergantung dari tahanan kapal pada kecepatan yang direncanakan, serta fraksi deduksi gaya dorong seperti persamaan dibawah ini[4].

$$T = R_T / (1 - t) \quad (17)$$

Dimana T merupakan gaya dorong kapal (N), R_T adalah tahanan total kapal (N) dan t merupakan fraksi deduksi gaya dorong. Besarnya fraksi deduksi gaya dorong kapal untuk kecepatan tinggi dengan sistem propulsi water jet ± 0.05 (Blount, 1997). Dengan menggunakan persamaan tersebut diatas maka kebutuhan daya dorong untuk sistem propulsi water jet (T dalam newton) dapat dilihat pada table 3, dibawah ini.

Vs (Knt)	Vs (m/s)	t	Rt (KN)	Tnet (N)	Tnet/2 (N)
0	0.000	0.050	0	0	0
2	1.028	0.050	0.75	789.47	394.73
4	2.056	0.050	2.70	2842.10	1421.05
6	3.084	0.050	5.89	6200	3100
8	4.112	0.050	10.77	11336.84	5668.42
10	5.140	0.050	17.59	18515.78	9257.89
12	6.168	0.050	25.96	27326.31	13663.15
14	7.196	0.050	36.97	38915.78	19457.89
16	8.224	0.050	52.76	55536.84	27768.42
18	9.252	0.050	65.03	68452.63	34226.31
20	10.280	0.050	75.29	79252.63	39626.31
22	11.308	0.050	83.24	87621.05	43810.52
24	12.336	0.050	91.06	95852.63	47926.31

26	13.364	0.050	99.35	104578.94	52289.47
28	14.392	0.050	104.33	109821.05	54910.52
30	15.420	0.050	110.94	116778.94	58389.47
32	16.448	0.050	116.86	123010.52	61505.26
34	17.476	0.050	122.02	128442.10	64221.05
36	18.504	0.050	126.48	133136.84	66568.42
38	19.532	0.050	130.35	137210.52	68605.26
40	20.560	0.050	133.80	140842.10	70421.05

Tabel 3. Kebutuhan gaya dorong kapal cepat.

Perencanaan sistem propulsi propeller

- Pemilihan diameter optimum

Proses pemilihan diameter optimum dan blade area menggunakan diagram *Troost B Series* dan *Van Manen series* untuk single dan double screw propeller. Parameter awal yang digunakan dalam perhitungan adalah akar dari nilai B_u untuk setiap variasi kecepatan putaran propeller dapat dilihat pada table 4 berikut ini;

EngineType	Engine Rating		V_A (Knot)	Propeller Rev.(RPM)	THP (HP)	B_u	$B_{u0.5}$
	(KW)	(RPM)					
16V396TB94	2450	2100	38	1419.878	1758.652	6.68932	2.58637
16V4000M80	2320	2000	38	1352.265	1758.652	6.37078	2.52404
12V396TE94	1948	2000	38	1352.265	1758.652	6.37078	2.52404

Table 4. nilai B_u untuk setiap kecepatan propeller

Hasil plotting nilai \sqrt{Bu} pada diameter optimum dan blade *area chart propeller Van Manen* dan *Troost series-B*, untuk twin screw 3 a tau 5 blades, didapatkan seri propeller dengan efisiensi tertinggi sebagai berikut;

Series	Bu	δ	η_p	Va	N	Kt	Kq	J	Ku	D	D(m)
Troost	6.689	112	0.74	38	1419.878	0.172	0.033	0.904	0.210	2.997	0.914
B 4-40	6.371	106	0.75	38	1352.265	0.194	0.039	0.956	0.213	2.979	0.908
	6.371	106	0.75	38	1352.265	0.194	0.039	0.956	0.213	2.979	0.908

Table 5. diameter optimum propeller series B

Hasil pemilihan propeller dengan diameter optimum yang memenuhi criteria Burril adalah sebagai berikut;

Tipe : Troost B4-40
Diameter : 0,908 m
Jumlah blade : 4
Efisiensi : 0.75
Pitch ratio : 1.18
Blade area ratio : 0.64

Dalam memilih propeller berdasarkan table 5, propeller yang dipilih merupakan propeller dengan efisiensi tinggi dan diameter propulsor yang lebih kecil, ukuran propulsor juga berpengaruh dalam meningkatkan performance propulsi.

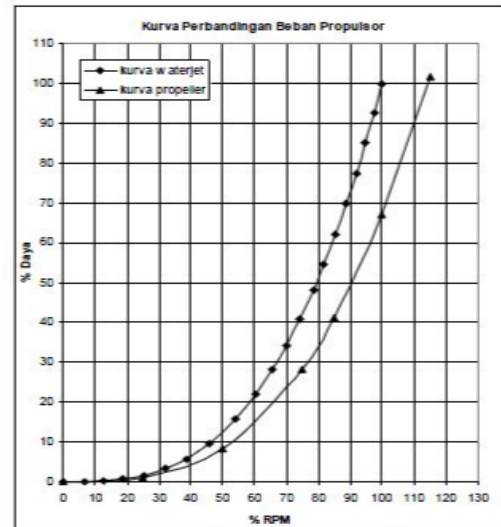
Analisa perbandingan sistem propulsi

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan pada masing-masing tipe propulsi. Besarnya nilai efisiensi dan daya dari masing-masing propulsi yang ditinjau, maka dapat dibuat perbandingan dan analisa untuk menentukan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing sistem. Gambar 8 merupakan analisa performa propeller dan waterjet. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa daya yang diperlukan oleh propeller dan waterjet untuk kecepatan yang sama ternyata berbeda.

Perbedaan terbesar terjadi pada kecepatan rotasional propulsor maksimum (100 % RPM) atau pada kecepatan desain kapal 40 knots. Pada kecepatan 100 % RPM propeller membutuhkan daya sebesar 68 % sedangkan waterjet membutuhkan daya sampai 100 % dari keseluruhan daya (100%). Ini berarti pada

kecepatan maksimal ada perbedaan kebutuhan daya sebesar 32 % antara sistem propulsi propeller dan sistem propulsi waterjet.

pada



Gambar 8. Grafik BHP vs RPM propulsor

Pada kecepatan rotasional propulsor 60 % , besarnya daya yang diperlukan oleh propulsi propeller lebih kecil 6 % dari kebutuhan daya propulsi waterjet atau sebesar 15 % dari 21% daya yang dibutuhkan oleh sistem propulsi waterjet. Namun jika kapal berlayar pada kecepatan rendah dibawah 20 % putaran propulsor, maka tidak terlihat perbedaan yang significant antara kedua sistem propulsi ini.

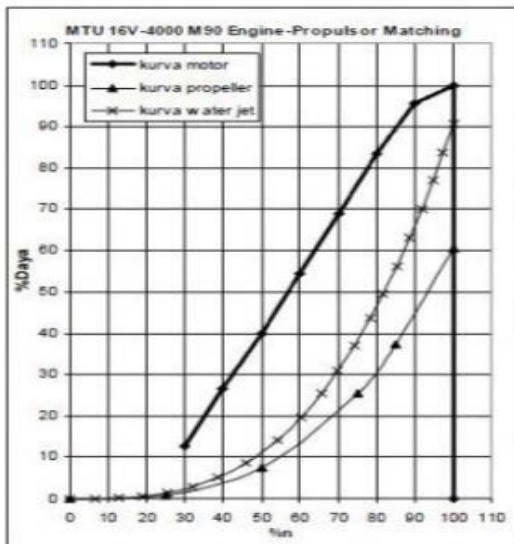
Selisih kebutuhan daya antara waterjet dan submerged propeller karena adanya perbedaan nilai efisiensi propulsi antara kedua sistem ini.

Engine Propulsor Matching

Penentuan daerah kerja service motor bergantung pada spesifikasi mesinnya. Untuk memenuhi kisaran kebutuhan daya sistem propulsi water jet, maka dipilih mesin dari type 20 PA6 B STC buatan S.E.M.T Pielstick dengan keluaran daya 8.100 kW pada kecepatan 1.050 rpm. Hasil dari engine-propulsor matching untuk mesin 20 PA6 B STC ini dapat dilihat pada gambar 9.

Bila titik kritis pertama ditentukan pada kondisi putaran maksimum, yaitu pada titik perpotongan beban propulsor dengan rated speed motor induk (100% rpm), maka daya yang dibutuhkan propulsor water jet adalah 90% daya

BHP engine, hal ini memenuhi kriteria engine margin yang besarnya ditentukan antara 0.8-0.9. Berbeda dengan kebutuhan daya water jet yang memenuhi engine margin, pada propulsor propeller, besarnya daya yang dibutuhkan pada kondisi ini hanya 60% dari BHP engine, jauh dibawah engine margin. Hal ini mengakibatkan penggunaan engine ini pada propulsor propeller menjadi tidak efisien.



Gambar 9. 20 PA6 B STC engine propulsor matching.

Pada penentuan titik kritis saat kondisi cruising (85%RPM), besarnya daya yang dikeluarkan motor untuk water jet adalah sebesar 58% dari BHP engine dan untuk propeller adalah 38% dari BHP engine, kondisi ini masih dalam daerah yang aman untuk dapat digunakan secara terus menerus. Bila besarnya daya pada kondisi 40-50% RPM merupakan titik-titik kritis yang menentukan besarnya power differential, maka untuk kedua propulsor, pada kondisi ini besarnya cukup besar 19%, sehingga kapal akan mampu untuk mencapai kondisi planing.

Permodelan Numerik (Matlab)

a. Platform

b. Pemodelan Diesel engine

Pemodelan diesel engine yang diuraikan disini merupakan persamaan dinamik yang menghubungkan antara gerak fuel rack bahan bakar dengan kecepatan motor diesel yang dihasilkan karena adanya gerak fuel rack

tersebut. Untuk mendapatkan kecepatan N dari motor diesel maka dapat diturunkan dari rumus matematis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{engine} &= (engine\ torque) \cdot (engine\ speed) \\ &= (MEP) \cdot (L \cdot A \cdot N \cdot z) = \dot{m}_f \cdot C_v \end{aligned}$$

sehingga didapatkan:

$$\begin{aligned} T \cdot N &= C_v \cdot \dot{m} \\ N &= \frac{C_v \cdot \dot{m}}{T} \end{aligned}$$

Kecepatan N dari diesel merupakan fungsi bahan bakar yang disuplai ke silinder diesel engine m dan torsi mesin T, yaitu:

$$T = f(m, T)$$

maka linearisasi dari persamaan tersebut adalah:

$$n = C_1 \cdot \dot{m} - C_2 \cdot T$$

sehingga dalam laplace domain menjadi:

$$n(s) = C_1 \cdot \dot{m}(s) - C_2 \cdot T(s)$$

Untuk T yang konstan maka kecepatan N bertambah sehingga harga c1 berharga positif sedangkan untuk m yang konstan maka N akan berkurang apabila torsi bertambah sehingga C2 akan bernilai negatif.

Torsi T yang dihasilkan oleh motor diesel dikurangi torsi beban TL adalah suatu torsi bersih yang dipergunakan oleh diesel engine untuk menghasilkan percepatan sudut yang dirumuskan secara matematis sebagai berikut:

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$\Sigma F = I \cdot \alpha$$

$$T - T_L = J \cdot a$$

$$T - T_L = J \cdot a = J \frac{dn}{dt}$$

sehingga dalam laplace domain menjadi:

$$T - T_L = J \cdot n(s)s$$

substitusi persamaan tersebut menghasilkan:

$$\frac{C_1 \cdot \dot{m}(s) - n(s)}{C_s} = J \cdot n(s)s + T_L$$

$$C_1 \cdot \dot{m}(s) - n(s) = (J \cdot n(s)s + T_L)C_s$$

$$C_1 \cdot \dot{m}(s) - n(s) = (J \cdot n(s)s \cdot C_s) + (T_L \cdot C_s)$$

$$C_1 \cdot \dot{m}(s) - T_L \cdot C_s = n(s)[J \cdot s \cdot C_s + 1]$$

$$\frac{C_1 \cdot \dot{m}(s) - T_L \cdot C_s}{[J \cdot s \cdot C_s + 1]} = n(s)$$

Jika

$$\tau_1 = C_s \cdot J$$

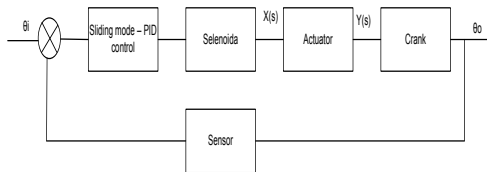
maka didapatkan :

$$\frac{C_1 \cdot \dot{m}(s) - T_L \cdot C_s}{1 + \tau_1 \cdot s} = n(s)$$

$$n(s) = \frac{C_1 \cdot \dot{m}(s)}{1 + \tau_1 \cdot s} \left[\dot{m} - \frac{C_2}{C_1} T_L \right]$$

c. Pemodelan controlable pitch propeller

Dibawah ini ditunjukkan diagram blok sistem pengaturan pitch pada controlable pitch propeler.



Gambar 10. diagram blok sistem pengaturan pitch

1. Pemodelan Actuator

Actuator dikelompokkan menjadi beberapa bagian berdasarkan aksi yang ditimbulkan yaitu aksi proporsional integral.

Jika diberikan perpindahan tangga pada posisi torak x , selanjutnya perpindahan y menjadi sama dengan x pada saat yang sama. Karena gaya pegas, minyak akan mengalir melalui tahanan R sehingga silinder akan kembali ke titik semula. Untuk menurunkan fungsi alih antara perpindahan y dan perpindahan x , terlebih dahulu didefinisikan tekanan pada sisi atas dan bawah torak, masing – masing adalah P_1 dan P_2 dengan asumsi gaya inersia yang terlibat diabaikan. Sehingga gaya yang bekerja pada torak harus menyeimbangkan gaya pegas. Jadi:

$$A(P_2 - P_1) = k \cdot y$$

Dan laju aliran

$$q = \frac{P_2 - P_1}{R}$$

Karena melalui penghalang selama dt detik harus sama dengan perubahan berat minyak kesebelah kanan torak selama dt detik yang sama maka diperoleh:

$$q dt = A \rho (dx - dy)$$

jika p konstan maka:

$$\frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} = \frac{q}{A \rho}$$

Substitusi persamaan tersebut adalah:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} + \frac{k \cdot y}{R \cdot A^2 \cdot \rho}$$

dalam laplace domain:

$$sX(s) = sY(s) + \frac{k}{RA^2\rho} Y(s)$$

$$sX(s) = Y(s) \left(s + \frac{k}{RA^2\rho} \right)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s}{s + \frac{k}{RA^2\rho}}$$

Sedangkan penurunan fungsi alih dari bagian plot valve diuraikan seperti dibawah ini:
Laju aliran masa fluida menuju silinder:

$$Q = f(x, \Delta P)$$

Kemudian dibuat linearisasi dari persamaan tersebut, sehingga :

$$Q - \bar{Q} = K_1(x - \bar{x}) - K_2(\Delta P - \bar{\Delta P})$$

Jika $\bar{Q} = 0, \bar{x} = 0, \bar{\Delta P} = 0$, maka:

$$Q = K_1 x - K_2 \Delta P$$

Dengan mengabaikan compresibilitas fluida yang digunakan maka didapatkan:

$$Q \cdot dt = A \cdot \rho \cdot dy$$

Dari persamaan sebelumnya:

$$Q = K_1 x - K_2 \Delta P$$

$$K_2 \cdot \Delta P + Q = K_1 \cdot x$$

$$K_2 \cdot \Delta P = K_1 \cdot x - Q$$

$$\Delta P = \frac{1}{K_2} (K_1 \cdot x - Q)$$

Sehingga:

$$\Delta P = \frac{1}{K_2} \left(K_1 \cdot x - \frac{A \cdot \rho \cdot dy}{dt} \right)$$

Gaya yang dibangkitkan oleh torak:

$$F = A \cdot \Delta P$$

$$F = \frac{A}{K_2} \cdot \left(K_1 \cdot x - \frac{A \cdot \rho \cdot dy}{dt} \right)$$

Gaya yang dibangkitkan oleh torak pada massa dan gesekan beban:

$$m\ddot{y} + fy = \frac{A}{K_2} \left(K_1 - \frac{A \cdot \rho \cdot dy}{dt} \right)$$

$$m\ddot{y} + \left(f + \frac{A \cdot \rho}{K_2} \right) \dot{y} = \frac{A}{K_2} K_1$$

Dengan transformasi laplace domain menjadi:

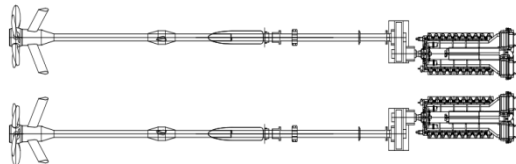
$$m \cdot s^2 \cdot Y(s) + \left(f + \frac{A \cdot \rho}{K_2} \right) s \cdot Y(s) = \frac{A}{K_2} K_1 \cdot X(s)$$

$$\left(m \cdot s + \frac{fK_2}{K_2} + \frac{A^2 \cdot \rho}{K_2} \right) s \cdot Y(s) = \frac{A \cdot K_1}{K_2} \cdot X(s)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{A \cdot K_1}{K_2}}{\left(m \cdot s + \frac{fK_2}{K_2} + \frac{A^2 \cdot \rho}{K_2} \right) s}$$

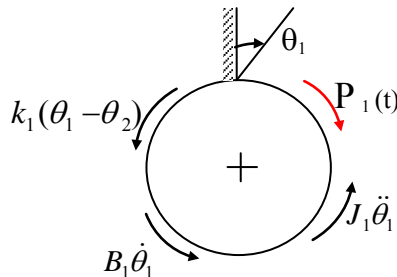
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\left(\frac{(m \cdot K_2)s + f \cdot K_2 + A^2 \cdot \rho}{A \cdot K_1} \right) s}$$

Permodelan matematis sistem propulsion



Gambar 11. permodelan sistem propulsion

FBD BODY 1



Persamaan Gerak FBD 1

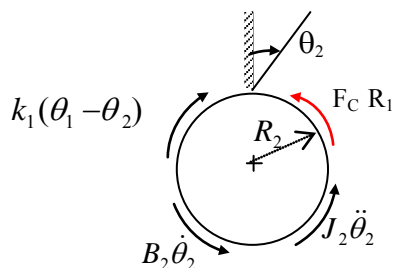
$$J_1 \ddot{\theta}_1 + B_1 \dot{\theta}_1 + k_1(\theta_1 - \theta_2) - \tau_1(t) = 0$$

$$\dot{\theta}_1 = \omega_1$$

$$J_1 \dot{\omega}_1 + B_1 \omega_1 + k_1 \theta_1 - k_1 \theta_2 - \tau_1(t) = 0$$

$$\dot{\omega}_1 = \frac{1}{J_1} [-B_1 \omega_1 - k_1 \theta_1 + k_1 \theta_2 + P(t)]$$

FBD BODY 2



Persamaan Gerak FBD 2

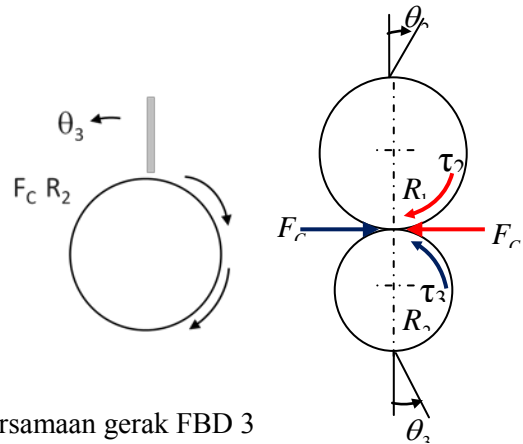
$$J_2 \ddot{\theta}_2 + B_2 \dot{\theta}_2 - k_1(\theta_1 - \theta_2) + F_c R_1 = 0$$

$$\dot{\theta}_2 = \omega_2$$

$$J_2 \dot{\omega}_2 + B_2 \omega_2 - k_1 \theta_1 + k_1 \theta_2 + F_c R_1 = 0$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{1}{J_2} [-B_2 \omega_2 + k_1 \theta_1 - k_1 \theta_2 - F_c R_1]$$

$$F_c = \frac{1}{R_2} [-J_2 \dot{\omega}_2 - B_2 \omega_2 + k_1 \theta_1 - k_1 \theta_2]$$



Persamaan gerak FBD 3

$$-J_3 \ddot{\theta}_3 - k_2(\theta_3 - \theta_4) + F_c R_3 = 0$$

$$F_c = \frac{1}{R_3} [-J_3 \dot{\omega}_3 - k_2 \theta_3 + k_2 \theta_4]$$

$$\dot{\theta}_3 = \omega_3$$

$$-J_3 \dot{\omega}_3 - k_2 \theta_3 + k_2 \theta_4 + F_c R_2 = 0 \dots \dots \dots 3)$$

Persamaan 3-2

$$1/R_3 (-J_3 \dot{\omega}_3 - k_2 \theta_3 + k_2 \theta_4) = \frac{1}{R_2} [J_2 \dot{\omega}_2 + B_2 \omega_2 - k_1 \theta_1 + k_1 \theta_2]$$

$$R_3/R_2 [J_2 \dot{\omega}_2 + B_2 \omega_2 - k_1 \theta_1 + k_1 \theta_2] = [-J_3 \dot{\omega}_3 - k_2 \theta_3 + k_2 \theta_4]$$

$$N [J_2 \dot{\omega}_2 + B_2 \omega_2 - k_1 \theta_1 + k_1 \theta_2] = [-J_3 \dot{\omega}_3 - k_2 \theta_3 + k_2 \theta_4]$$

$$N J_2 \dot{\omega}_2 + N B_2 \omega_2 - N k_1 \theta_1 + N k_1 \theta_2 + J_3 \dot{\omega}_3 + k_2 \theta_3 - k_2 \theta_4 = 0$$

$$N^2 J_2 \dot{\omega}_2 + N^2 B_2 \omega_2 - N^2 k_1 \theta_1 + N^2 k_1 \theta_2 + J_2 \dot{\omega}_2 + k_2 \theta_2 - k_2 \theta_4 = 0$$

$$(N^2 J_2 + J_2) \dot{\omega}_2 + N^2 B_2 \omega_2 + (N^2 k_2 + k_2) \theta_2 - N^2 k_1 \theta_1 - N k_2 \theta_4 = 0$$

$$J_{eq} = N^2 J_2 + J_2$$

$$k_{eq} = N^2 k_2 + k_2$$

$$B_{eq} = N^2 B_2$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{1}{J_{eq}} [-B_{eq} \omega_2 - k_{eq} \theta_2 + N k_2 \theta_4 + N^2 k_1 \theta_1]$$

Kesimpulan

Dari analisa dan simulasi yang dilakukan terhadap perencanaan sistem kendali kemudi pada sistem propulsi submerged propeller dan sistem propulsi water jet untuk kapal cepat jenis korvet dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain:

1. Sistem propulsi submerge propeller memiliki efisiensi propulsif yang lebih besar dibandingkan dengan sistem propulsi water jet. Hal ini menyebabkan perbedaan jumlah daya yang diperlukan untuk mencapai kecepatan yang sama. Perbedaan

kebutuhan daya paling besar terjadi pada kondisi 100%RPM propulsor atau pada kecepatan desain kapal 40 knot yaitu sebesar 32%.

2. Sistem propulsi submerged propeller memiliki efisiensi propulsif 0.664 pada diameter 0.907 m untuk seri propeller Troost B 4-40, rasio pitch 1.18, rasio blade area 0.64, rasio blade thickness 0.045 dan putaran sebesar 1352 rpm. Sedangkan sistem propulsi water jet memiliki efisiensi propulsif 0.60 pada luasan inlet 0.3422 m^2 , diameter inlet 0.6602 m, elevasi nosel pada permukaan air, dan sudut masuk inlet sebesar 25° .
3. Bila efisiensi propulsif merupakan pertimbangan utama dalam memilih sistem propulsi yang akan dicapai, maka penggunaan submerge propeller merupakan sistem propulsi yang paling tepat, karena memiliki efisiensi propulsif yang lebih besar dibandingkan dengan water jet.
4. Pada model simulasi cepat torsional maksimum sebesar 1100 rpm diperoleh pada daya yang diberikan sebesar 8000 kW.

Ucapan Terima kasih

Terimakasih kepada bapak Hendro Nurhadi, MSc, PhD yang telah banyak memberikan bimbingan. Kepada Istri tercinta dr. Samsumarni yang telah setia mendampingi, kepada dua buah hati tersayang Muhammad Sulthany Ar-Razi dan Siti Salsabila Ar-razy. Semoga kalian menjadi anak-anak yang saleh dan salehah. Amin. Dan kepada rekan – rekan lab MBP.

Nomenklatur

P_B	Brake Power (watt)
Q	Brake Torque (kN-m)
N	Revolution per sec
d	Shaft diameter (m)
G	Shear modulus elasticity (kN/m ²)
Θ	Sudut twist (derajat)
n	Revolution (rps)
P_S	Shaft power (k Watt)
L_s	Panjang shaft (m)
P_{B-CSR}	Daya motor yang diinstall
η_{Hull}	Efisiensi lambung
T	Gaya dorong (kN)

V_s	Kecepatan servis kapal (m/s)
w	Wake fraction
t	Thrust deduction factor
V_A	Kecepatan <i>advance</i> dari fluida (m/s)
C_P	Koefisien prismatic
η_O	Efisiensi baling-baling
P_T	Daya dorong kapal (kN)
P_D	Daya yang disalurkan (kN)
Q_D	Torsi baling-baling (N-m)
Q_O	Torsi baling-baling kondisi open water
η_B	Efisiensi baling-baling
η_S	Efisiensi transmisi poros
R_T	Gaya hambat total kN
S	Luasan permukaan basah badan kapal(m ²)
ρ	Massa jenis (kg/m ³)
C_T	Koefisien tahanan total
A	luas penampang (m ²)
a	percepatan (m/s ²)
m	massa benda (kg)
f	frekwensi (hz)
k	konstanta pegas
C	konstanta redaman
ΔP	perubahan tekanan (watt)

Greek letters

\square	heat transfer coefficient (W m ⁻²)
\square	viscosity (Pas)

Subscripts

rpm	Rotation per minute
turb	Turbulent
BHP	bruto horse power

Referensi

TNI AL dokumen, Introduksi kapal korvet SIGMA class , Surabaya 2011.

S.W. Adji. Pengenalan system propulsi kapal, 2006.

S.W. Adji. *Engine Propeller Matching*, 2005.

Kotink. Analisa teknis perencanaan system propulsi ferry cepat 200 penumpang rute padang bai-lembar, 2011

Harvald Sv. Aa. *Resistance and Propulsion of ships*, 1983

Eddy S.K, dkk. Aplikasi system propulsi hybrid shaft generator (propeller dan waterjet pada kapal patroli trimaran. 2011

Carlton J.S, *Marine propeller and propulsion*, Butterworth-Heinmann Ltd, London 1994.

Kiyoshi Matsumoto, *Optimation of design parameters of water jet propulsions system*, fast' 93 Japan 1993.

Charles M Close, dkk. *Modeling and analysis of dynamic system*, third edition, 1994