

**DESAIN DAN PEMODELAN SISTEM PROPULSI
DAN STAND ALONE SISTEM KONTROL
PROPULSI KAPAL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Bidang Studi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

M. DAKKA KRISMA DWIKADE

NRP: 2109106006

Disetujui oleh Penguji Tugas Akhir:

1. Arif Wahjudi, ST, MT, Ph.D (Pembimbing I)
2. Hendro Nurhadi, Dipl-Ing., Ph.D (Pembimbing II)
3. Ir. Bambang Pramujati, MSc., Ph.D (Penguji I)
4. M. Khoirul Effendi, ST, MSc. (Penguji II)



**Surabaya
Januari, 2014**

Desain dan Pemodelan Sistem Propulsi dan *Stand Alone* Sistem Kontrol Propulsi Kapal

Nama Mahasiswa : M. Dakka Krisma Dwikade
NRP : 2109 106 006
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D.
Hendro Nurhadi, Dipl-Ing., Ph.D.

Abstrak

Mayoritas beberapa jenis kapal yang kita miliki merupakan hasil pembelian dari pihak luar negeri. Guna mengurangi ketergantungan produk dari pihak luar negeri serta menunjang kemandirian industri teknologi dibidang perkapalan, maka penelitian perlu dilakukan guna menunjang dan mewujudkan hal tersebut. Penelitian ini dilakukan pada sistem penggerak yang merupakan bagian dari platform kapal dengan cakupan desain dan pemodelan sistem propulsi dan stand alone sistem kontrol propulsi kapal. Penelitian pertama dimulai dari desain sistem propulsi kapal berupa pemilihan spesifikasi prime mover, sistem transmisi dan propeller berdasarkan data spesifikasi kapal yang ditentukan serta analisa karakteristik kapal. Kedua adalah desain dan pemodelan stand alone sistem kontrol propulsi kapal berupa kontrol kecepatan propeller, kontrol pitch propeller, dan platform kapal dengan masukan pitch propeller dan kecepatan propeller dengan keluaran kecepatan kapal yang menghasilkan persamaan matematis, pemodelan dengan kontroler PID, simulasi pada matlab, dan analisa kestabilan dengan root locus. Dari penelitian yang dilakukan didapatkan desain sistem propulsi berupa mesin diesel sebagai prime mover dengan spesifikasi daya 2x23850 kW dan controllable pitch propeller sebagai propeller dengan type screw series B5-60 dengan diameter 3,752 m serta kondisi operasional

pitch propeller 0,975 dan kecepatan propeller 4,8. Sedangkan desain sistem kontrol propulsi didapatkan pemodelan sistem dan simulasi dengan nilai settling time yang memenuhi kriteria desain kecepatan propeller dan pitch propeller kurang dari 23 s yaitu sebesar 19 s untuk kontrol kecepatan propeller dan stabil dengan nilai kestabilan $K < 0,69$ dan 2,09 s untuk kontrol pitch propeller dan stabil dengan nilai kestabilan $K < 169$ serta kecepatan kapal 30 knots dengan settling time 30,61 s.

Design and Modeling Propulsion System and Stand Alone Propulsion Control System of Ship

Student : M. Dakka Krisma Dwikade
Number : 2109 106 006
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Supervisor : Arif Wahjudi, ST., MT., PhD.
Hendro Nurhadi, Dipl-Ing., Ph.D.

Abstrack

Currently, most of the ships we have are purchasing from foreign parties. In order to reduce dependence technology and to support independence of shipbuilding industry then research have to be done to support and realize it. The first step is design deals with propulsion system that are part of the ship platform with scope design and modeling propulsion system and stand alone propulsion control system First, research started from design of propulsion system those are determination of prime mover, transmission, and propeller spesifications. Then the second is design and modeling stand alone control of propulsion system those are control of propeller speed, pitch propeller, and platform ship. Pitch propeller and propeller speed as a input and ship speed as a output. This control design produce mathematic equations, model with PID controller, MatLab simulation, and stability analisys. The results from this research are design of propulsion system like diesel engine as prime mover with power spesification is 2x23850 kW and controllable pitch propeller as propeller with spesifications are B screw series B5-60, diameter 3,752 and pitch propeller in operational condition 0,975 and propeller operational condition 4,8 m/s. While design propulsion control system obtained modeling and simulation with value of settling time statisfies the criteria design of pitch propeller and

propeller speed is less than 23 s, 19 for propeller speed control and stable with stability value $K < 0,69$, 2,09 s for pitch propeller control and stable with stability value $K < 169$ and ship speed 30 knots with settling time 30,61 s.

DAFTAR SIMBOL

L_{pp}	<i>Length between perpendicular (m)</i>
L_{DSP}	<i>Length of displacement (m)</i>
L_{WL}	<i>Length on water line (m)</i>
L_{OA}	<i>Length over all (m)</i>
B	<i>Breadth (m)</i>
H	<i>Depth (m)</i>
T	<i>Draft (m)</i>
w	<i>Wake fraction</i>
A_m	<i>Luas midship (m²)</i>
C_b	<i>Koefisien block</i>
C_p	<i>Koefisien prismatic</i>
C_M	<i>Koefisien midship</i>
t	<i>Trusht deduction factor</i>
V_a	<i>Kecepatan advanced dari fluida yg melintasi propeller (m/s)</i>
V_s	<i>Kecepatan service kapal (m/s)</i>
R_T	<i>Tahanan kapal (N)</i>
EHP	<i>Efektif Horse Power (kW)</i>
THP	<i>Trusht Horse Power (kW)</i>
DHP	<i>Delivered Horse Power (kW)</i>
SHP	<i>Shaft Horse Power (kW)</i>
BHP_{scr}	<i>Brake Horse Power in service continous rate (kW)</i>
BHP_{mcr}	<i>Brake Horse Power in maximum continous rate (kW)</i>
η_{rr}	<i>Efisiensi relatif rotatif</i>
η_p	<i>Efisiensi propulsif</i>
η_H	<i>Efisiensi lambung</i>
η_G	<i>Efisiensi sistem transmisi</i>
P_c	<i>Koefisien propulsif</i>
B_p	<i>Power Absorbtion</i>
D_o	<i>Diameter propeller optimum (m)</i>
$(P/D)_o$	<i>Pitch per diameter ratio optimum</i>
$(P/D)_b$	<i>Pitch per diameter ratio behind ship</i>

P/D	Pitch per diameter ratio
D_B	Diameter propeller behind ship (m)
D	Diameter propeller (m)
$R_{T-trial}$	Tahanan kapal pada kondisi trial (N)
$R_{T-service}$	Tahanan kapal pada kondisi service (m)
K_T	Koefisien Gaya Dorong (<i>Thrust</i>) propeller
$K_{T-trial}$	Koefisien Gaya Dorong (<i>Thrust</i>) propeller pada kondisi trial
$K_{T-service}$	Koefisien Gaya Dorong (<i>Thrust</i>) propeller pada kondisi service
T_{prop}	Gaya dorong propeller (N)
K_Q	Koefisien Torsi propeller
$K_{Q-trial}$	Koefisien Torsi propeller pada kondisi trial
$K_{Q-service}$	Koefisien Torsi propeller pada kondisi service
Q_{prop}	Propeller torque (Nm)
J	Koefisien advance propeller
N_{prop}	Kecepatan propeller (m/s)
M_p	Massa piston (kg)
C_p	Redaman spool ($N \cdot \frac{s}{m}$)
F_p	Gaya yang dibangkitkan piston
Q	Laju Aliran (m^3/s)
x	Pergeseran spool (m)
ΔP	Perbedaan tekanan beban (N/m^2)
K_1	Konstanta gradien x
K_2	Konstanta gradien ΔP
Y	Pergeseran piston (m)
θ	Sudut crank
r	Radius crank (m)
N_{engine}	Kecepatan engine (rpm)
\dot{m}	Massa bahan bakar yang mengalir persatuan waktu
C_1	Konstanta gradient fungsi bahan bakar (\dot{m})
C_2	Konstanta gradien fungsi torsi engine (T)
Q_1	Konstanta gradien torsi propeller fungsi pitch propeller (P/D)

Q_2	Konstanta gradien torsi propeller fungsi koefisien advance (J)
T_1	Konstanta gradien gaya dorong propeller fungsi pitch propeller (P/D)
T_2	Konstanta gradien gaya dorong propeller untuk koefisien advance (J)
T_L	Torsi beban propeller (N)
ρ	Berat jenis fluida (kg/m^3)

(Sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Propulsi Kapal

Dalam operasinya di laut, suatu kapal harus memiliki kemampuan untuk mempertahankan kecepatan servis (V_S) seperti yang direncanakan. Hal ini mempunyai arti bahwa, kapal haruslah mempunyai rancangan sistem penggerak yang dapat mengatasi keseluruhan gaya-gaya hambat yang terjadi agar memenuhi standar kecepatan servisnya. Secara umum, Sistem Penggerak Kapal terdiri dari 3 (tiga) komponen utama, antara lain:

- Penggerak Utama (*prime mover*)
- Sistem Transmisi (*transmission system*)
- Alat Gerak (*propeller*).

Ketiga komponen utama ini merupakan suatu kesatuan yang di dalam proses perencanaannya tidak dapat ditinjau secara terpisah. Kesalahan di dalam perancangan, akan membawa konsekuensi yang sangat besar terhadap kondisi-kondisi sebagai berikut:

- Tidak tercapainya kecepatan service kapal yang direncanakan.
- Konsumsi bahan bakar yang tidak efisien.
- Turunnya nilai ekonomis dari kapal tersebut, dll.

Konfigurasi dari ketiga komponen utama sistem propulsi ini sangat dipengaruhi oleh rancangan fungsi kapal itu sendiri, serta bagaimana misi yang harus dijalankan dalam operasionalnya di laut. Sebagai contoh, kapal patroli, kapal pengamanan garis perhubungan laut, kapal SAR, dimana masing – masing memiliki karakteristik sendiri – sendiri.

2.1.1 Prime Mover

a. Gas turbin

Gas Turbine telah dikembangkan dalam dunia propulsi kapal yang mana bahan bakar (*fuel*) dibakar

melalui proses udara yang dikompresikan, dan gas panas hasil pembakaran tersebut digunakan untuk memutar turbine.

b. *Internal Combustion Engine*

Internal Combustion Engines yang digunakan dalam propulsi kapal, pada umumnya adalah *reciprocating engines* yang beroperasi dengan prinsip -prinsip diesel (*compression ignition*) yang mana kemudian dikenal dengan nama *diesel engine*.

2.1.2 Sistem Transmisi

Dalam sistem penggerak kapal, sistem transmisi dapat diartikan sebagai bagian yang menghubungkan antara *prime mover* sebagai penggerak utama dan propeller sebagai alat geraknya. Terdapat 3 (tiga) sistem transmisi yang digunakan pada sistem penggerak kapal:

a. *Direct drive*

Direct drive merupakan sistem transmisi dimana tenaga dari *prime mover* langsung ditransmisikan ke propeller sebagai penggerak kapal.

b. *Gear drive*

Gear drive merupakan sistem transmisi dimana tenaga dari *prime mover* ditransmisikan melalui *reduction gear box* sehingga memungkinkan sistem pengaturan kecepatan dan gerak kapal melalui *reduction gear box*.

c. *Electrical drive*

Electrical drive merupakan sistem transmisi dimana tenaga dari *prime mover* ditransmisikan melalui tenaga listrik.

2.1.3 Propeller

a. *Fixed Pitch Propellers (FPP)*

Merupakan bentuk dari propeller dengan sudut pitch yang tetap. Biasanya propeller jenis ini telah

- memenuhi proporsi yang tepat terutama pada jenis rancangannya. Salah satu keunggulan propeller jenis ini adalah mudah dalam pembuatannya.
- b. *Controllable Pitch Propellers (CPP)*
Merupakan bentuk dari propeller dengan sudut pitch yang dapat diatur. Alasan pemilihan propeller CPP dibandingkan dengan FPP adalah karena kebutuhan operasional yang mengharuskan lebih fleksibel.
 - c. *Azimuth Podded Propulsion System*
Sistem propulsi jenis ini memiliki tingkat olah-gerak kapal dan efisiensi yang tinggi, serta tingkat kebisingan dan kavitasi yang relatif rendah. Pengguna terbanyak dari sistem *pod units* ini adalah kapal-kapal *cruise liner*.

2.2 Penelitian Terdahulu

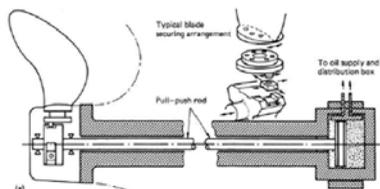
Penelitian tentang perancangan sistem propulsi kapal pernah dilakukan oleh **Alfan Dicky Firmansyah** (2012) yaitu tentang Perancangan Controllable Pitch Propeller Pada Kapal *Offshore Patroli Vessel 80*. Penelitian dilakukan dengan penghitungan daya mesin dan pemilihan jenis propeller dengan analisa engine propeller matching berupa pembuatan grafik KT-J, grafik open water, dan grafik beban propeller. Hasil akhir yang dicapai adalah jenis propeller yang digunakan, range rasio pitch dari nilai terendah sampai nilai rasio pitch tertinggi, dan nilai rasio pitch optimum.

Sedangkan penelitian tentang perancangan sistem kontrol propulsi kapal pernah dilakukan oleh **F.P.M. Dullens** (2009) yaitu tentang *Modelling and Control of a Controllable Pitch Propeller*. Dijelaskan penelitian dilakukan dimulai dengan modeling controllable pitch propeller berupa pemodelan aktuator, katub kontrol, torsi propeller, dan aktuasi pitch. Selanjutnya Dullens melakukan observasi desain dengan melakukan simulasi dan analisa *respon time*.

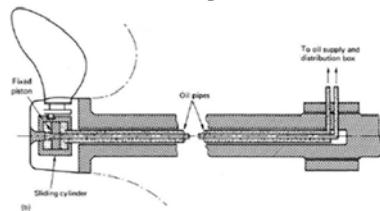
2.3 *Controllable Pitch Propeller*

Sistem pendorongan ini memungkinkan pengguna untuk mengatur sudut *blade* propeller pada posisi tertentu antara maju penuh dan mundur penuh, yang mana tidak perlu membalik putaran shaft propeller untuk merubah arah dari maju ke mundur. Dengan sistem ini memungkinkan kapal lebih cepat dan lebih responsif serta lebih ekonomis pengoperasiannya.

Keuntungan dari adanya *controllable pitch* adalah pengaturan kecepatan mesin yang disesuaikan dengan sudut daun propeller sehingga dapat membuat daya pendorongan menjadi digunakan secara penuh. Sebagai contoh, pada saat situasi darurat jarak berhenti dan waktu berhenti akan menjadi lebih pendek dibandingkan apabila kita menggunakan FPP. Bagaimanapun juga perbandingan efisiensinya adalah sangat rendah ketika kita akan maju, dibanding dengan menggunakan FPP. Pada umumnya CPP terdiri dari dua mekanisme, yaitu *pull-push rod* dan mekanisme *hub piston* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 dibawah ini.



(a) *Pull push rod*

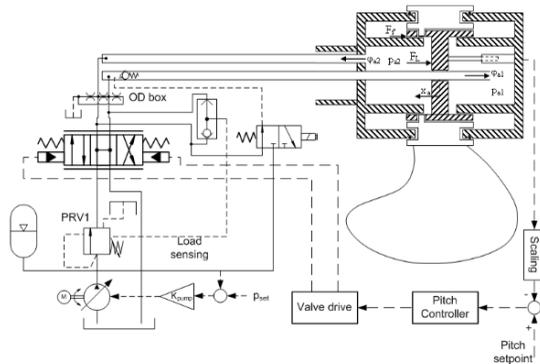


(b) *Hub piston*

Gambar 2.1 Mekanisme pengaturan pitch propeller (John Carlton, *Marine Propeller Propulsion*, Hal 91)

Sistem hidrolik adalah yang paling banyak digunakan dalam pengaturan pitch propeller. Gambar 2.1 menunjukkan dua mekanisme pengaturan pitch propeller dengan menggunakan tenaga hidrolik. Pada sistem hidrolik, aktuasi gaya diperlukan untuk merubah pitch propeller yang ditransmisikan ke *blade* dari propeller oleh piston dalam sebuah *servo motor*. Pada mekanisme pull-push rod piston terletak pada shaft propeller dimana tenaga ditransmisikan ke *blade* melalui sebuah *connecting rod*. Sedangkan untuk jenis *hub piston* terletak pada hub propeller.

Mekanisme *hub piston* adalah yang paling sering digunakan pada aplikasi pengaturan pitch propeller. Gambar 2.2 dibawah ini menunjukkan sistem daya hidrolik dari pengontrolan pitch propeller.



Gambar 2.2 Sistem daya hidrolik sederhana CPP
(Dullens, FPM. *Modelling and Control of Controllable Pitch Propeller*. Hal.10)

Sistem pengontrolan pitch CPP yang ditunjukkan Gambar 2.2 diatas merupakan sebuah mekanisme sistem daya hidrolik jenis hub piston. Dimana aktuator yang digunakan adalah sebuah *servo piston* yang dikontrol oleh sebuah *elektro-hidrolik servo valve*. Sedangkan sebuah *driver* menentukan seberapa arus listrik yang diberikan kepada *servo valve* berdasarkan inputan *pitch setpoint*.

2.4 *Diesel Engine*

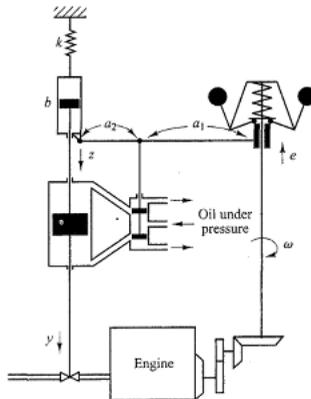
Jenis mesin – mesin yang terdapat pada sebuah kapal dapat dibagi atas 3 kelompok diantaranya:

- *Main engine / Prime mover*
- Generator set
- Pesawat bantu

Agar kapal dapat bergerak dan berlayar diperlukan *prime mover* sebagai tenaga penggerak kapal. Mesin diesel merupakan salah satu jenis *prime mover* yang paling sering digunakan baik untuk kapal – kapal niaga maupun kapal patroli cepat karena memiliki keunggulan diantaranya adalah:

- Mudah dalam pengoperasiannya.
- Warming up yang lebih singkat jika dibandingkan dengan turbine.

Secara mendasar prinsip kerja mesin diesel kapal sama dengan mesin diesel di darat yang sering digunakan yaitu dengan udara terkompresi di ruang bakar dan bahan bakar diesel diinjeksikan kedalam ruang bakar dengan tekanan tinggi melalui *nozzle* supaya bercampur dengan udara panas yang bertekanan tinggi. Hasil pencampuran ini akan menyala dan membakar dengan cepat sehingga mengakibatkan gaya dorong kepada piston. Dan crankshaft akan mengubah gerak linear piston menjadi gerak putar. Sehingga dapat dikatakan bahwa cara pengaturan kecepatan mesin diesel adalah dengan pengaturan jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar. Dibawah ini ditunjukkan diagram operasi sistem kontrol kecepatan dengan menggunakan sistem hidrolika untuk pengaturan jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar.



Gambar 2.3 Sistem pengontrolan kecepatan
(Katsuhiko Ogata, Teknik Kontrol Automatik Jilid 1, Hal.257)

Dari Gambar 2.3 diatas dapat dijelaskan bahwa jika kecepatan mesin meningkat, maka lengan dari pengatur *flywell* akan bergerak keatas. Gerakan ini merupakan masukan dari kontroler hidrolika. Sinyal kesalahan positif (gerakan keatas dari lengan) menyebabkan torak daya bergerak ke bawah, mengurangi bukaan katub bahan bakar, dan menurunkan kecepatan mesin.

2.5 Karakteristik Daya Sistem Propulsi

2.5.1 *Wake Fraction*

Wake Fraction adalah perbedaan antara kecepatan kapal dengan kecepatan aliran air menuju propeller. Pada saat kapal bergerak, gesekan air pada permukaan lambung menimbulkan lapisan air yang mengikuti arah gerak kapal. Membagi perbedaan ini dengan kecepatan kapal atau dengan kecepatan aliran air menghasilkan dua harga koefisien *wake fraction*. Pendapat ini dikemukakan oleh Taylor dan Froude.

$$w = (0,5 \times C_b) - 0,05 \quad \text{untuk } \textit{single screw} \dots (2.1)$$

$$w = (0,5 \times C_b) - 0,20 \quad \text{untuk } \textit{twin screw} \dots (2.2)$$

2.5.2 *Thrust Deduction Factor*

Gaya dorong yang diperlukan untuk mendorong kapal pada kecepatan tertentu akan lebih besar dari pada tahanan R_T yang akan dialami kapal bila ditarik dengan kecepatan yang sama. Kehilangan gaya dorong ($T - R_T$) ini dinyatakan dalam *thrust deduction factor*. Adapaun persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$t = w \times K \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana nilai $K = 0,7 - 0,9$

2.5.3 *Speed Of Advance*

Speed of advance merupakan nilai kecepatan air yang masuk melewati propeller. Adapaun persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$V_a = (1 - \omega) \times V_S \dots\dots\dots (2.4)$$

2.5.4 **Daya Sistem Propulsi Kapal**

- a. *Efektif Horse Power* (EHP) adalah besarnya daya yang dibutuhkan untuk mengatasi gaya hambat dari badan kapal, agar kapal dapat bergerak dari satu tempat ke tempat yang lain dengan kecepatan sebesar V_S . EHP ini merupakan fungsi dari besarnya gaya hambat total dan kecepatan kapal. Untuk mendapatkan besarnya EHP kapal, dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$EHP = R_T \times V_S \dots\dots\dots (2.5)$$

- b. *Thrust Horse Power* (THP) adalah besarnya daya yang dihasilkan oleh propeller untuk mendorong badan kapal. THP merupakan fungsi dari gaya dorong dan laju aliran fluida yang terjadi saat alat gerak bekerja. Adapun persamaan THP dapat dituliskan sebagai berikut.

$$THP = \frac{EHP}{\eta_H} \dots\dots\dots (2.6)$$

- c. *Delivered Horse Power* (DHP) adalah daya yang diserap oleh baling – baling kapal guna menghasilkan daya dorong sebesar THP, atau dengan kata lain, DHP merupakan daya yang dirubahnya menjadi daya dorong kapal (THP). Adapun persamaan DHP dapat dituliskan sebagai berikut.

$$DHP = \frac{EHP}{P_C} \dots\dots\dots (2.7)$$

- d. *Shaft Horse Power* (SHP) adalah daya yang terukur hingga daerah didepan bantalan tabung poros (stern tube) dari sistem perporosan penggerak kapal. Sehingga besarnya SHP tergantung dari panjang sistem perporosan dalam hal ini adalah letak meson terhadap propeler, dimana untuk peletakan mesin dibelakang memiliki losess 2%, dan pada midship losess sebesar 3%.

$$SHP = \frac{DHP}{\eta_s \eta_b} \dots\dots\dots (2.8)$$

- e. *Brake Horse Power* (BHP) adalah daya yang dihasilkan oleh motor penggerak kapal.

$$BHP_{scr} = \frac{SHP}{\eta_G}$$

$$BHP_{mcr} = \frac{BHP_{scr}}{0,85} \dots\dots\dots (2.9)$$

2.6 Pemilihan Propeller

Pemilihan propeler adalah menentukan karakteristik propeler yang sesuai dengan karakteristik badan kapal dan besarnya daya yang dibutuhkan sesuai dengan kebutuhan misi kapal. Dalam melakukan desain propeler, pertama kali yang harus

dipahami adalah mengenai beberapa definisi yang mempunyai korelasi langsung terhadap perancangan, yang mana meliputi daya, kecepatan, gaya, dan efisiensi. Ada tiga parameter utama yang digunakan dalam desain propeler, diantaranya adalah: *Delivered Horse Power* (DHP), *Rate of rotation* (N), dan *Speed of Advance* (V_a).

Prosedur perancangan yang dikembangkan oleh Taylor adalah prosedur penentuan dan pemilihan type propeler dilakukan dengan pembacaan $B - \delta$ setelah melalui langkah – langkah berikut:

- a. Menentukan *Power Absorbtion* (B_p)

Dimana nilai B_p diperoleh dengan rumusan:

$$B_p = \frac{N_{prop} \times P^{0,5}}{V_a^{2,5}} \dots\dots\dots (2.10)$$

- b. Pembacaan diagram B_p-1

Pada pembacaan B_p-1 , nilai B_p harus dikonversikan terlebih dahulu dengan rumusan:

$$B_{p1} = 0,1739 \times \sqrt{B_p} \dots\dots\dots (2.11)$$

- c. Menentukan nilai P/D dan δ_0 dari pembacaan diagram $B_p-\delta$.

- d. Menentukan nilai diameter optimum (D_o) dari pembacaan diagram $B_p-\delta$. Atau nilai D_o pada kondisi *open water test* dapat dihitung dengan formulasi berikut:

$$D_o = \frac{\delta_o \times V_a}{N_{prop}} \dots\dots\dots (2.12)$$

- e. Menentukan nilai Pitch Propeller (P_o)

Nilai P_o dapat diperoleh dengan rumusan.

$$\left(\frac{P}{D}\right)_o = 0,79 \dots\dots\dots (2.13)$$

- f. Menentukan nilai diameter *behind ship* (D_B)
 Nilai D_B dapat diperoleh dengan rumusan:

$$\begin{aligned} D_B &= 0,95 \times D_O \\ D_B &= 0,97 \times D_O \dots\dots\dots (2.14) \end{aligned}$$

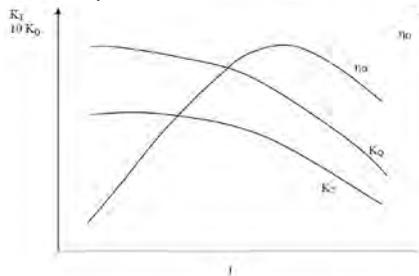
- g. Menentukan nilai δ_B
 Nilai δ_B dapat diperoleh dengan rumusan:

$$\delta_B = \frac{D_B \times N_{prop}}{V_a} \dots\dots\dots (2.15)$$

- h. Menghitung nilai $(P/D)_B$
 Setelah nilai δ_B Didapatkan maka langkah selanjutnya adalah memplotkan nilai tersebut ke diagram B_p - δ . Sehingga didapatkan nilai $(P/D)_B$.
- i. Menentukan efisiensi masing – masing type propeler

2.7 Karakteristik Propeller

Secara umum karakteristik dari propeller kapal pada kondisi *open water test* adalah seperti yang direpresentasikan pada Diagram $K_T - K_Q - J$.



Gambar 2.4 Diagram $K_T - K_Q - J$ (*Openwater test*)
 (Suryo W Adji, Engine propeller Matching)

Gambar 2.4 merupakan contoh gambar diagram $K_T - K_Q - J$ untuk propeller tipe tertentu. Dimana setiap tipe dari masing-masing propeller, memiliki karakteristik kurva kinerja yang berbeda-beda. Sehingga kajian terhadap karakteristik propeller kapal tidak dapat diumumkan untuk keseluruhan bentuk atau tipe dari propeller.

Model persamaan untuk karakteristik kinerja propeller adalah sebagai berikut:

$$K_T = \frac{T_{prop}}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$K_Q = \frac{Q_{prop}}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\eta_o = \frac{J \cdot K_T}{2n \cdot K_Q} \dots\dots\dots (2.19)$$

(Engine Propeller Matching, Suryo W. Adji)

Pada putaran mesin (n) merupakan titik operasi putaran motor penggerak yang sesuai dengan kondisi beban propeller, sebab daya yang dihasilkan oleh motor penggerak adalah sama dengan daya yang diabsorb oleh propeller (P). Hal ini tentunya akan memberikan konsekuensi yang optimal terhadap pemakaian konsumsi bahan bakar dari motor penggerak kapal terhadap kecepatan servis kapal yang diinginkan.

Seperti diketahui bersama bahwa di kapal yang dapat dilihat adalah indikator putaran mesin (rpm atau rps) dan kecepatan kapal (knots). Sehingga penetapan putaran operasi dari *prime mover*, merupakan kunci kesuksesan dalam operasional sistem propulsi kapal secara keseluruhan.

2.7.1 Interaksi Lambung Kapal dan Propeller

Interaksi lambung kapal dan propeller merupakan upaya-upaya pendekatan diatas kertas untuk mendapatkan karakteristik kinerja propeller saat beroperasi untuk kondisi *behind the ship*.

Metodenya adalah dengan mengolah Persamaan (2.20) dan Persamaan (2.21), sebagai berikut:

$$T_{ship} = \frac{\alpha V_A^2}{(1-t)(1-w)^2} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$T_{prop} = K_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \dots\dots\dots (2.21)$$

$$T_{prop} = T_{ship}$$

$$K_T = \frac{\alpha V_A^2}{(1-t)(1-w)^2 \rho n^2 D^4} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\text{Jika } \beta = \alpha / (1-t)(1-w)^2 \rho D^2$$

Maka persamaan menjadi,

$$K_T = \beta \frac{V_A^2}{n^2 D^2} \dots\dots\dots (2.23)$$

Sehingga didapatkan hubungan persamaan sebagai berikut:

$$K_T = \beta \cdot J^2 \dots\dots\dots (2.24)$$

Jika ditambahkan untuk kebutuhan *hull service margin*, yaitu kebutuhan yang dikarenakan dalam perhitungan perencanaan, yang mana analisisnya dikondisikan untuk kondisi ideal, antara lain tidak ada kerak pada permukaan lambung dan propeller kapal, kondisi laut dan angin yang tenang maka perlu ditambahkan *allowance* sebesar $\pm 20\%$ dari nilai K_T tersebut.

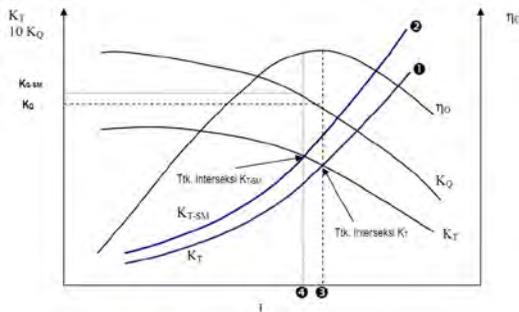
$$K_{T-SM} = 120\% \cdot \beta \cdot J^2 \dots\dots\dots (2.25)$$

Langkah berikutnya adalah dengan membuat tabulasi dari Persamaan (2.24) dan Persamaan (2.25). Harga J diambil dari diagram *open water test* propeller yang akan digunakan pada kapal, yaitu dari angka terendah bergerak ke angka tertinggi. Kemudian hasilnya diplotkan pada *diagram open water test*

propeller tersebut seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6 berikut ini:

J	J ²	K _T	K _{T-SM}
Min			
.....			
.....			
.....			
.....			
Max			

Gambar 2.5 Contoh tabel perhitungan K_T & K_{T-SM}
(Suryo W Adji, *Engine propeller Matching*)



Gambar 2.6 Contoh Plotting K_T & K_{T-SM} pada Kurva Openwater Test Propeller
(Suryo W Adji, *Engine propeller Matching*)

Gambar 2.5 merupakan contoh tabel perhitungan K_T & K_{T-SM} berdasarkan nilai J yang ditentukan dari nilai terendah ke tertinggi dan dihitung dengan Persamaan (2.24) dan Persamaan (2.25). Hasil dari perhitungan tersebut selanjutnya diplotkan pada grafik *open water test*. Pada Gambar 2.6 terlihat bentuk interaksi dari kinerja propeller pada kondisi di *behind the ship*, yang mana pada *kurva* merupakan *trendline* koefisien gaya dorong propeller untuk kondisi trial. Dan dengan melihat keadaan kurva J, diperoleh harga koefisien torsi propeller K_Q pada kondisi trial. Sedangkan, kurva adalah *trendline* dari gaya dorong propeller *coefficient* pada kondisi *hull service margin* dan dengan menarik

kurva J sedemikian hingga melewati titik KT-SM, maka diperoleh koefisien torsi propeller, K_{Q-SM} , pada kondisi *hull service margin*. Selanjutnya, kedua angka K_Q dan K_{Q-SM} inilah yang digunakan untuk menentukan karakteristik beban.

2.7.2 Karakteristik Beban Propeller

Didalam mengembangkan trend karakteristik beban propeller, variabel yang terlibat adalah torsi propeller dan kecepatan propeller. Untuk torsi propeller merupakan hasil pengolahan secara grafis dari interaksi propeller dan lambung, yaitu K_Q dan K_{Q-SM} yang kemudian dikembangkan seperti persamaan dibawah ini:

$$Q_{prop} = K_Q \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5 \dots\dots\dots (2.26)$$

Dan

$$Q_{prop-SM} = K_{Q-SM} \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5 \dots\dots\dots (2.27)$$

Jika K_Q , K_{Q-SM} , dan D adalah konstan, maka Persamaan (2.26) dan Persamaan (2.27) dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$Q_{prop} = \gamma \cdot n^2 = f_1(n^2) \dots\dots\dots (2.28)$$

$$Q_{prop-SM} = \gamma \cdot n^2 = f_2(n^2) \dots\dots\dots (2.29)$$

Dari kedua Persamaan (2.28) dan Persamaan (2.29) tersebut diatas, maka trend karakteristik *propeller power (propeller load)* dapat diperoleh sebagai berikut:

$$[power] = [Torque] \cdot [Speed]$$

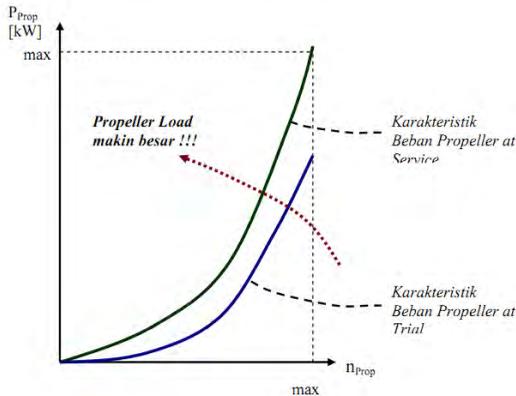
$$P_{prop} = Q_{prop} \cdot n = \gamma \cdot n^3 = f_1(n^3) \dots\dots\dots (2.30)$$

$$P_{prop-SM} = Q_{prop-SM} \cdot n = \gamma \cdot n^3 = f_2(n^3) \dots\dots\dots (2.31)$$

Tahap berikutnya adalah mentabulasikan dan membuat diagram beban propeller seperti ditunjukkan Gambar 2.7 dan Gambar 2.8 berikut ini:

n_P	$(n_P)^3$	P_{Prop}	P^*_{Prop}
Min			
.....			
.....			
.....			
.....			
Max			

Gambar 2.7 Contoh tabel perhitungan beban propeller
(Suryo W Adji, *Engine propeller Matching*)



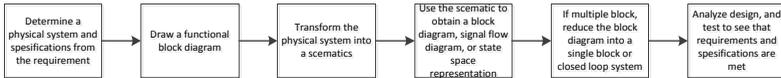
Gambar 2.8 Contoh plotting karakteristik beban propeller
kondisi trial dan service
(Suryo W Adji, *Engine propeller Matching*)

Gambar 2.7 menunjukkan contoh tabulasi daya propeller yang dihitung dari Persamaan (2.30) dan Persamaan (2.31) dengan inputan kecepatan propeller yang diperoleh dari putaran mesin setelah diturunkan oleh *gear*. Hasil dari perhitungan tersebut selanjutnya dibuat grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8.

2.8 Proses Desain Sistem Kontrol

Dalam sebuah desain sistem kontrol, hal – hal yang perlu diperhatikan diantaranya adalah langkah desain sistem kontrol. Norman S. Nise menjelaskan langkah – langkah yang digunakan dalam proses desain dimulai dari penentuan sistem fisik sampai

dengan analisa sistem. Gambar 2.9 dibawah ini menunjukkan langkah – langkah proses desain sistem kontrol.



Gambar 2.9 Proses desain sistem kontrol

(Norman S. Nise, Control System Engineering sixth edition, Hal.15)

Step 1

Langkah pertama adalah mengubah apa yang dibutuhkan dalam sistem fisik. Dengan menggunakan semua kebutuhan tersebut , spesifikasi desain, seperti respon yang diinginkan dan akurasi *steady state*.

Step 2

Langkah kedua adalah mendeskripsikan sistem kedalam sebuah blok diagram yang menggambarkan komponen – komponen dalam sistem.

Step 3

Langkah ketiga setelah mendeskripsikan sistem fisik selanjutnya adalah mentransform sistem fisik kedalam diagram skematik dengan mengabaikan beberapa fenomena.

Step 4

Langkah keempat adalah melakukan pemodelan matematika sesuai dengan hukum fisik yang digunakan.

Step 5

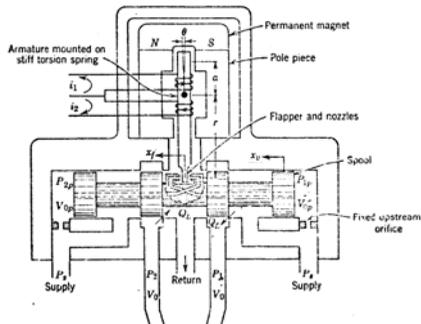
Langkah kelima adalah mengevaluasi sistem respon dengan melakukan penyederhanaan blok diagram yang besar menjadi satu blok diagram dengan pendeskripsian matematika yang merepresentasikan sistem dari input ke output.

Step 6

Langkah keenam adalah analisa dan desain. Pada langkah ini kita menganalisa sistem untuk melihat spesifikasi respon dan performa.

2.9 Model Servo Valve

Pada sebuah sistem hidrolik, *valve* sangat penting pada keseluruhan sistem untuk menentukan seberapa banyak fluida yang akan keluar dan masuk ke dalam aktuator. Salah satu jenis *servo valve* adalah *two stage servo valve* seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4 dibawah ini.

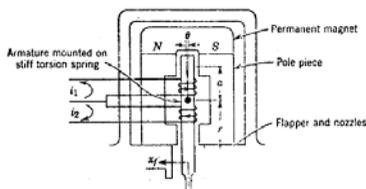


Gambar 2.10 *Two stage servo valve*

(Herbert E. Merrit, *Hydraulic Control System*, hal.202)

Gambar 2.10 diatas adalah sebuah *elektro hidrolik servo valve* jenis *two stage servo valve* yang terdiri dari beberapa elemen dibawah ini:

- Torsi motor
- Dinamika spool



Gambar 2.11 Torsi motor

(Herbert E. Merrit, *Hydraulic Control System*, hal.202)

Torsi motor yang digambarkan pada Gambar 2.11 diatas adalah jenis yang paling banyak digunakan pada sebuah peralatan elektro-mekanik pada sistem ini. Torsi motor menghasilkan gerak

putar, dimana putaran yang dihasilkan adalah proporsional dengan jumlah arus yang diberikan.

Karena torsi motor bekerja berdasarkan jumlah arus yang diberikan, maka pada sebuah pengontrolan torsi motor diperlukan sebuah *driver*. *Driver* ini akan mengubah sinyal kontrol yang berupa tegangan listrik menjadi sebuah arus listrik. *Driver* dapat diibaratkan sebagai sebuah rangkaian tahanan (R) dan induktansi (L).

$$\frac{I(s)}{E(s)} = \frac{1}{Ls+R} \dots\dots\dots (2.32)$$

(Vijaya Sagar. Tenali, *DSP Simulation of Electro-Hydraulic Servo Actuator*)

Gaya yang dapat dibangkitkan torsi motor akibat adanya perubahan arus adalah sebagai berikut:

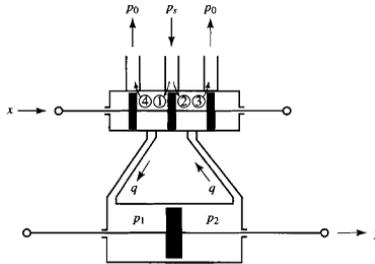
$$F = Bp.I \dots\dots\dots (2.33)$$

Sedangkan dinamika spool merupakan pengaruh dari massa spool, pegas, dan redaman yang terjadi akibat fluida. Sehingga persamaan untuk dinamika spool dapat dituliskan berikut:

$$F = Mx^2 + Cx + K \dots\dots\dots (2.34)$$

2.10 Model Servo Motor Hidrolika

Pada dasarnya *servo motor hidrolika* merupakan penguat daya hidrolika dengan *valve* dan aktuatur. *Valve* yang disebut juga *valve*imbang, dalam arti bahwa semua gaya tekan yang bekerja padanya adalah seimbang. Keluaran daya yang sangat besar dapat dikontrol dengan katup yang posisinya dapat diatur dengan daya yang sangat kecil.



Gambar 2.12 Skema *servo motor hidrolika*
 (Katsuhiko Ogata, Teknik Kontrol Automatik Jilid 1, hal 155)

Dari Gambar 2.12 dapat dilihat bahwa Q merupakan fungsi dari x dan ΔP . Sehingga secara umum hubungan variabel tersebut dapat diberikan oleh persamaan.

$$Q = f(x, \Delta P) \dots\dots\dots (2.35)$$

Maka linearisasi persamaan tersebut menjadi:

$$Q = K_1x - K_2\Delta P$$

Dengan mengabaikan compressibilitas fluida yang digunakan maka didapatkan:

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

Persamaan sekarang dapat ditulis.

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

Sehingga:

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

Gaya yang dibangkitkan oleh piston daya:

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

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

Gaya yang dibangkitkan oleh piston daya pada massa dan gesekan:

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

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

Dengan menganggap perpindahan katup x adalah masukan dan perpindahan piston daya y adalah keluaran, maka didapatkan fungsi alih dari persamaan adalah sebagai berikut.

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

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{(Ts + 1)s}$$

Dengan,

$$K = \frac{1}{\frac{b \cdot K_2}{A \cdot K_1} + \frac{A \cdot \rho}{K_1}}$$

$$T = \frac{m \cdot K_2}{b \cdot K_2 + A^2 \cdot \rho}$$

Bila rasio $(m \cdot K_2 / b \cdot K_2 + A^2 \cdot \rho)$ diabaikan atau konstanta waktu T diabaikan, maka fungsi alih dapat disederhanakan menjadi.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{s} \dots\dots\dots (5.3)$$

(Katsuhiko Ogata, Teknik Kontrol Automatik Jilid 1)

2.11 Model *Diesel Engine*

Pada dasarnya kecepatan *engine* dapat dikontrol dengan merubah jumlah suplay bahan bakar yang masuk kedalam ruang bakar. Untuk mendapatkan kecepatan (N) dari motor diesel maka dapat diturunkan dari persamaan matematis sebagai berikut:

$$P_{engine} = \dot{m}_f \cdot C_V \dots\dots\dots (2.36)$$

sehingga didapatkan bahwa kecepatan *engine* adalah,

$$T_{engine} \cdot N_{engine} = C_V \cdot \dot{m}$$

$$N_{engine} = \frac{C_V \cdot \dot{m}}{T}$$

Kecepatan (N_{engine}) dari diesel merupakan fungsi bahan bakar yang disuplai ke silinder *diesel engine* m dan torsi mesin T, yaitu:

$$T_{engine} = f(m, T)$$

maka linearisasi dari persamaan tersebut adalah:

$$N_{engine} = C_1 \cdot \dot{m} - C_2 \cdot t$$

sehingga dalam laplace domain menjadi:

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

Untuk T_{engine} yang konstan maka kecepatan N_{engine} bertambah sehingga harga C_1 bergarga positif sedangkan untuk m yang konstan maka N_{engine} akan berkurang apabila torsi bertambah sehingga C_2 akan bernilai negatif.

Torsi T_{engine} yang dihasilkan oleh *diesel engine* dikurangi torsi beban T_L adalah suatu torsi bersih yang dipergunakan oleh *diesel*

engine untuk menghasilkan percepatan sudut yang dipersamakan secara matematis sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Sigma F &= m \cdot a \\ \Sigma F &= I \cdot \alpha \\ T_{engine} - T_L &= J \cdot a \dots\dots\dots (2.37)\end{aligned}$$

Sehingga secara sederhana dapat diketahui bahwa kecepatan *engine* merupakan pengaruh dari *torsi engine* yang dihasilkan dikurangi dengan torsi beban yang diterima.

2.12 Kontrol PID

Salah satu jenis *controller* yang paling banyak digunakan dalam aplikasi sistem kendali adalah kendali *Proporsional-Integral-Derivatif* (PID) dikarenakan mampu menghasilkan stabilitas yang baik dan dapat diterapkan pada *high-order plant*. Kendali PID memiliki beberapa kelebihan di antaranya adalah mudah dirancang, memiliki harga yang murah, perawatan yang tidak mahal, serta tidak memerlukan keahlian khusus bagi operator.

Persamaan kendali PID dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \dots\dots\dots (2.38)$$

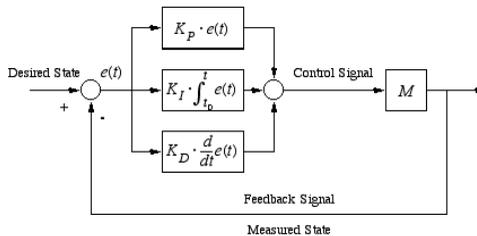
Dengan menerapkan Transformasi Laplace maka diperoleh:

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \dots\dots\dots (2.39)$$

Sistem kendali PID merupakan sistem kendali loop tertutup yang cukup sederhana dan memiliki performa yang bagus. Namun kendali ini tidak dapat bekerja dengan baik apabila terjadi ketidakpastian dan ketidaklinieran pada sistem. Meskipun

demikian sistem kendali PID memiliki kompatibilitas dengan sistem kendali lainnya, sehingga dapat dikombinasikan dengan sistem kendali lain seperti *fuzzy control*, *adaptive control*, *sliding mode control*, dan *robust control* untuk menghasilkan performa yang lebih baik.

Sistem kendali PID terdiri dari tiga macam kendali, yaitu kendali P (*Proportional*), D (*Derivatif*) dan I (*Integral*), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Tujuan penggabungan ketiga jenis kendali tersebut adalah untuk menutupi kekurangan dan menonjolkan kelebihan dari masing-masing jenis kendali.



Gambar 2.13 Diagram blok sistem kendali PID

Gambar 2.10 menunjukkan diagram blok sistem kendali PID. Dalam perancangan sistem kendali PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter K_p , K_i , dan K_d agar respon sinyal keluaran sistem terhadap masukan memiliki harga tertentu sebagaimana yang diinginkan.

2.13 Tuning PID

Terdapat beberapa metode *tuning* PID yang digunakan, yaitu metode *trial and error*, metode Ziegler-Nichols, metode Quarter-Decay. Metode ini berfungsi untuk menentukan parameter K_p , K_i , K_d .

2.13.1 Metode *Trial and Error*

Untuk merancang sistem kendali PID, kebanyakan dilakukan dengan metode coba-coba (*trial and error*). Hal ini

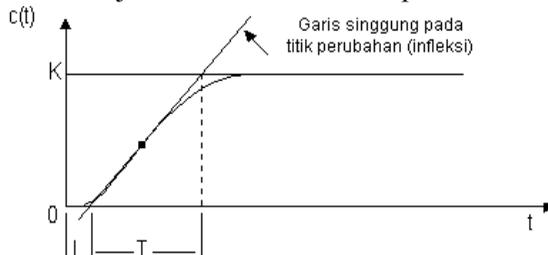
disebabkan karena parameter K_p , K_i dan K_d tidak independen. Untuk mendapatkan aksi kendali yang baik diperlukan langkah coba-coba dengan kombinasi antara P, I dan D sampai ditemukan nilai K_p , K_i , dan K_d seperti yang diinginkan.

2.13.2 Metode Ziegler -Nichols

Metode yang juga digunakan dalam menentukan nilai dari K_p , K_i , K_d adalah Metode Ziegler-Nichols. Metode ini dilakukan berdasarkan model matematika suatu *plant*/sistem. Jika model tidak diketahui, dapat dilakukan eksperimen terhadap sistem. Terdapat dua macam metode Ziegler-Nichols, yaitu metode Ziegler-Nichols loop terbuka dan metode Ziegler-Nichols loop tertutup. Prosedur praktis yang dapat dilakukan untuk kedua metode Ziegler-Nichols adalah sebagai berikut:

a. Metode Ziegler-Nichols loop terbuka

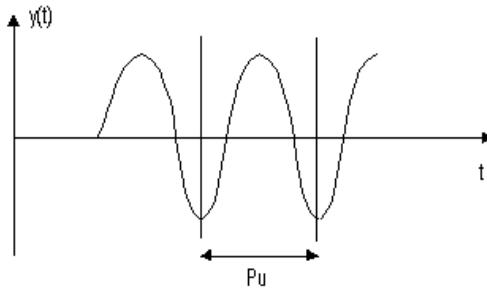
Metode ini didasarkan terhadap reaksi sistem loop terbuka. Metode ini hanya dapat dilakukan pada sistem yang tidak memiliki integrator dan pole-pole kompleks. Proses yang dilakukan adalah sebagai berikut : (1) memberikan input step pada sistem, (2) Dapatkan kurva respon berbentuk S, (3) Menentukan nilai L dan T, (4) memasukkan nilai L dan T kedalam persamaan Ziegler-Nichols loop terbuka untuk mendapatkan nilai K_p , T_i , dan T_d , (5) memasukkan nilai K_p , T_i , dan T_d ke dalam persamaan dalam *PID controller*, sehingga nilai K_p , K_i , dan K_d didapatkan. Gambar 2.14 dibawah ini ditunjukkan contoh kurva respon sistem.



Gambar 2.14 Kurva respon berbentuk S

b. Metode Ziegler-Nichols Loop tertutup

Metode ini didasarkan pada reaksi sistem loop tertutup. Berkebalikan dengan Metode Ziegler-Nichols loop terbuka, proses ini dapat dilakukan pada sistem yang memiliki integrator ($1/s$). Proses yang dilakukan adalah sebagai berikut : (1) membuat sistem loop tertutup dengan controller P dan plant di dalamnya, (2) Tambahkan nilai K_p sampai sistem berosilasi berkesinambungan, (3) Dapatkan responnya, tentukan nilai K_{cr} dan P_{cr} , dimana nilai K_{cr} adalah nilai penguatan proportional pada saat sistem mencapai kondisi *sustained oscillation*, dan P_{cr} merupakan periode dari *sustained oscillation* (4) Tentukan nilai K_p , T_i , dan T_d , (5) memasukkan nilai K_p , T_i , dan T_d ke dalam persamaan dalam *PID controller*, sehingga nilai K_p , K_i , dan K_d didapatkan. Gambar 2.15 dibawah ini ditunjukkan contoh kurva respon sistem.

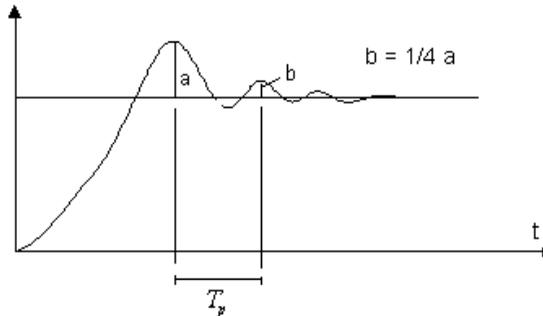


Gambar 2.15 Kurva respon *sustain oscillation*

2.13.3 Quarter-Decay

Metode ketiga yang dapat digunakan untuk menentukan K_p , T_i , dan T_d adalah metode Quarter-Decay. Karena tidak semua proses dapat mentolerir keadaan osilasi dengan amplitudo tetap, *Cohen-coon* berupaa memperbaiki metode osilasi dengan metode *quarter amplitude decay*. Tanggapan untaian tertutup sistem, pada metode ini, dibuat sehingga respon berbentuk *quarter amplitude decay*. *Quarter amplitude decay* didefinisikan sebagai respon

transien yang amplitudonya dalam periode pertama memiliki perbandingan sebesar seperempat ($1/4$).



Gambar 2.16 Kurva respon *quarter amplitude decay*

Gambar 2.16 diatas ditunjukkan contoh kurva respon sistem dengan metode tuning *quarter decay*. Kontroler proportional K_p (proportional gain waktu amplitudo maximum) ditala hingga diperoleh tanggapan *quarter amplitude decay*, periode pada saat tanggapan ini disebut T_p dan parameter T_i dan T_d dihitung dari hubungan. Sedangkan penalaan parameter kontroler PID adalah sama dengan yang digunakan pada metode Ziegler-Nichols.

2.11 Analisa Kestabilan Sistem

Stabilitas merupakan kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami sebuah gangguan. Suatu sistem dikatakan stabil adalah jika respon natural mendekati nol dalam waktu yang mendekati tak terhingga. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengetahui perilaku kestabilan sistem diantaranya adalah stabilitas suatu sistem berdasarkan persamaan matematik dan tempat kedudukan akar yaitu root locus.

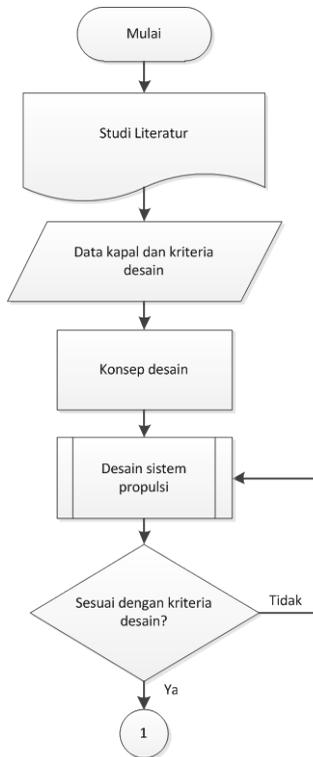
Root locus merupakan metode analisa kestabilan sistem berdasarkan tempat kedudukan akar dengan cara menggambar letak akar – akar persamaan karakteristik dari suatu sistem loop tertutup. Penggambaran *root locus* dapat dilakukan dengan cara

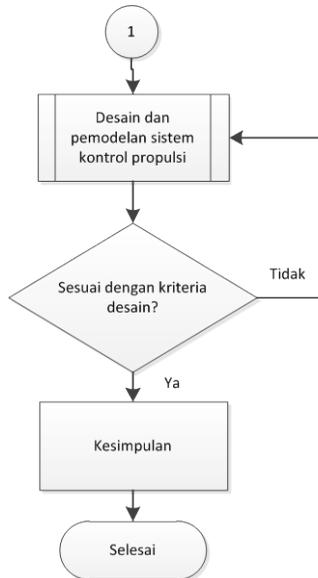
mencari akar-akar persamaan karakteristik pada tiap kenaikan harga K (*gain*). Berdasarkan analisa root locus, sistem yang dikatakan stabil adalah suatu sistem yang memiliki letak pole – pole di kiri bidang-S.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini tahapan-tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan dijelaskan dalam sebuah diagram alir metodologi penelitian seperti ditunjukkan Gambar 3.1 dibawah ini.





Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

Agar penelitian dapat dilakukan dengan terarah dan baik, dibawah ini dijelaskan tahapan - tahapan penelitian yang sebelumnya digambarkan dalam diagram alir metodologi penelitian.

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur mengenai sistem propulsi kapal dan pemodelan sistem kontrol propulsi melalui buku – buku referensi maupun wawancara dengan pembimbing dan pihak yang terkait.

3.2.2 Data Kapal dan Kriteria Desain

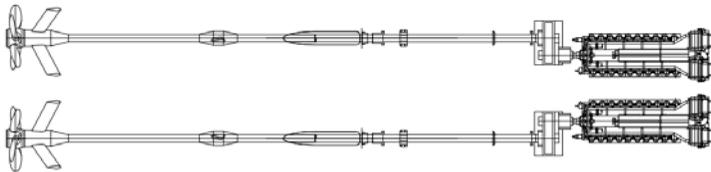
Dibawah ini dijelaskan tentang data kapal yang akan dilakukan desain dan pemodelan untuk sistem propulsi dan *stand alone* sistem kontrol propulsi.

1. Data Kapal

Ukuran dimensi utama :

- Length (Loa) : 106 m
- Length (Lwl) : 101,07 m
- Breadth : 18 m
- Depth : 3,7 m
- Tahanan kapal (R_T) : 1701,245 kN

Dengan skema *propulsion plant* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2 dibawah ini:



Gambar 3.2 *Propulsion plant*

Gambar 3.2 m enunjukkan sistem propulsi pada kapal jenis ini memiliki dua buah propeller (*twin propeller*) dengan propeller kanan bergerak searah jarum jam dan propeller kiri bergerak berlawanan arah jarum jam dimana masing – masing propeller digerakkan oleh satu mesin melalui sebuah sistem transmisi gearbox.

2. Kriteria Desain

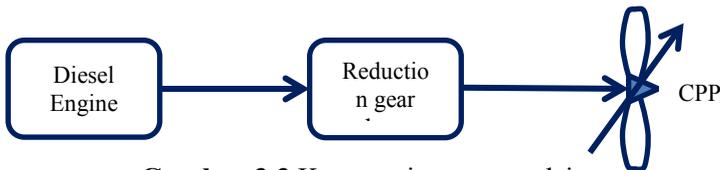
Kriteria desain sistem propulsi dan *stand alone* sistem kontrol propulsi yang akan digunakan sebagai acuan desain diantaranya adalah sebagai berikut:

- Misi kapal adalah:
 - *Marimite search* dan patroli.
 - Pengamanan garis perhubungan laut.
 - SAR (*Search And Rescue*) di laut.
- Kecepatan desain kapal yang diinginkan adalah 30 knots.

- Kontrol yang akan diimplementasikan adalah *stand alone system* sehingga masing – masing propulsi memiliki kontrol yang berdiri sendiri. Dimana antara satu propulsi dan propulsi yang lain bergerak sama.
- Input yang digunakan pada sistem kontrol ini adalah pitch propeller dan kecepatan propeller yang diinginkan dengan keluaran kecepatan kapal.
- Kriteria sistem kontrol dengan *settling time* pitch propeller dan kecepatan propeller kurang dari 23 sec.

3.2.3 Konsep Desain

Konsep desain untuk sistem propulsi dan *stand alone* sistem kontrol propulsi kapal dijelaskan melalui penjelasan singkat dan diagram blok dibawah ini.



Gambar 3.3 Konsep sistem propulsi

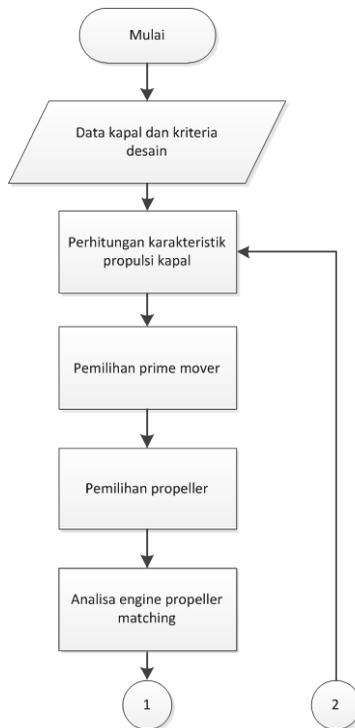
Pada sistem propulsi dan *stand alone* sistem kontrol propulsi, *diesel engine* sebagai *prime mover* yang berfungsi sebagai penggerak utama yang menggerakkan propeller sebagai sistem pendorong kapal. Sedangkan *reduction gearbox* sebagai sistem transmisi yang merupakan suatu bagian yang menghubungkan antara penggerak utama kapal dengan *Controllable Pitch Propeller* (CPP) sebagai propeller.

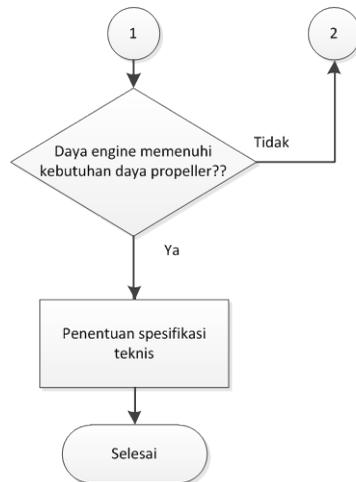
Untuk mencapai fungsi keseluruhan sistem propulsi dari masing – masing komponen berdasarkan kriteria desain yang telah ditentukan, maka diperlukan *prime mover* sebagai penggerak utama kapal yang mampu memenuhi kebutuhan tenaga pada kapal, sistem transmisi yang mampu mentransmisikan daya secara efisien dari *prime mover* ke propeller, dan propeller yang mampu memberikan daya dorong optimal.

Sedangkan untuk mencapai fungsi keseluruhan *stand alone* sistem kontrol propulsi, maka diperlukan suatu desain kontrol yang meliputi pemodelan kontrol kecepatan propeller, pitch propeller, dan platform kapal, penentuan kontroler yang mampu memenuhi kriteria desain yang diinginkan.

3.3.4 Desain Sistem Propulsi

Desain sistem propulsi sendiri dilakukan melalui beberapa tahapan. Tahapan yang dilakukan dalam proses desain sistem propulsi digambarkan melalui diagram alir dibawah ini.





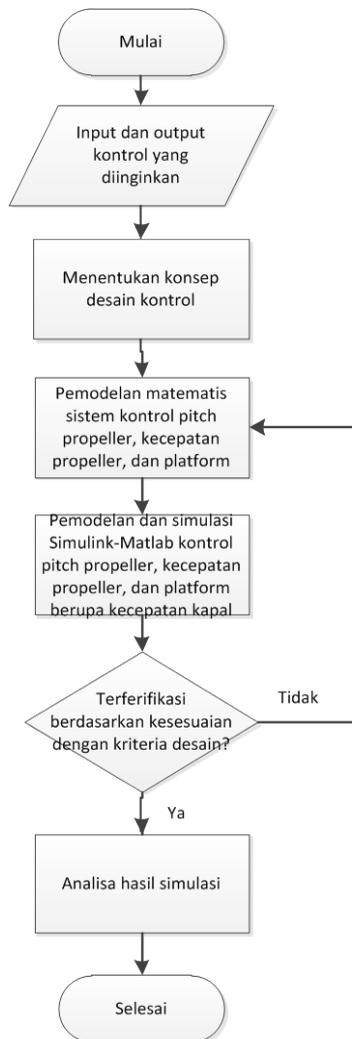
Gambar 3.4 Diagram alir desain sistem propulsi

Gambar 3.4 menunjukkan diagram alir tahapan desain sistem propulsi. Pada tahap ini dilakukan desain sistem propulsi kapal berdasarkan data kapal dan kriteria desain berupa perhitungan karakteristik propulsi kapal, pemilihan *prime mover* yaitu jenis *diesel engine*, pemilihan propeller yaitu jenis *Controllable Pitch Propeller (CPP)*, analisa *engine propeller matching* dan kesesuaian antara daya yang dibutuhkan propeller dengan daya yang dihasilkan mesin

. Dari tahapan perhitungan dan pemilihan yang dilakukan sehingga menghasilkan spesifikasi teknis *diesel engine*, *reduction gearbox*, dan *Controllable Pitch Propeller (CPP)* yang sesuai dengan kriteria desain.

3.2.5 Desain dan Pemodelan Sistem Kontrol Propulsi

Desain dan pemodelan sistem kontrol propulsi sendiri dilakukan dalam beberapa tahapan. Tahapan yang dilakukan digambarkan melalui diagram alir dibawah ini.



Gambar 3.5 Diagram alir desain dan pemodelan sistem kontrol propulsi

Gambar 3.5 menunjukkan diagram alir tahapan yang perlu dilakukan untuk desain dan pemodelan sistem kontrol

propulsi. Pada tahap ini dilakukan desain dan pemodelan sistem kontrol propulsi berdasarkan input dan output kontrol yang diinginkan sesuai dengan kriteria desain yang telah dijelaskan sebelumnya. Selanjutnya adalah penentuan konsep desain kontrol yang digambarkan dalam diagram blok, sehingga dapat dilakukan pemodelan matematis komponen yang berpengaruh terhadap pengontrolan pitch propeller, kecepatan propeller, dan platform kapal berupa kecepatan kapal. Pemodelan matematis yang dihasilkan selanjutnya dilakukan pemodelan pada MatLab – Simulink untuk dilakukan simulasi. Simulasi dilakukan dengan langkah – langkah berikut:

- Pengumpulan data dan parameter kontrol
- Simulasi untuk sistem loop terbuka
- Penentuan parameter K_p , K_i , K_d untuk kontroler PID melalui tuning PID.
- Simulasi untuk sistem loop tertutup dengan kontroler PID.

Dari simulasi yang dihasilkan selanjutnya diverifikasi berdasarkan kesesuaian dengan kriteria desain untuk sistem kontrol pitch propeller dan kecepatan propeller yaitu *settling time* kurang dari 23 s dan analisa hasil serta analisa kestabilan sistem.

3.2.6 Kesimpulan

Pada tahap ini disimpulkan hasil yang didapatkan dari desain sistem propulsi dan desain dan pemodelan sistem kontrol propulsi yang telah dilakukan.

BAB IV

DESAIN SISTEM PROPULSI

Bab sebelumnya telah menunjukkan konsep desain sistem propulsi yang terdiri dari tiga komponen utama yaitu *prime mover*, sistem transmisi, dan propeller. Langkah selanjutnya adalah perhitungan untuk menentukan daya *engine*, rasio transmisi, dan propeller yang akan diinstal pada kapal seperti yang ditunjukkan dalam diagram alir desain sistem propulsi. Perhitungan dilakukan dengan beberapa langkah seperti ditunjukkan dibawah ini.

4.1 Perhitungan Karakteristik Propulsi Kapal

1. Perhitungan *Coefisien Block* (C_b)

Merupakan nilai perbandingan antara volume balok pembanding dengan volume lambung kapal.

Volume balok pembanding:

$$\begin{aligned}L_{wl} &: 101,07 \text{ m} \\ B &: 14 \text{ m} \\ T &: 3,7 \text{ m}\end{aligned}$$

Volume lambung yang tercelup

$$V = 2423 \text{ ton}$$

Sehingga nilai *coefisien block* dapat dicari

$$\begin{aligned}C_b &= \frac{V}{L_{wl} \cdot B \cdot T} \\ C_b &= \frac{2363,9}{101,07 \times 14 \times 3,7} \\ C_b &= 0,45\end{aligned}$$

2. Perhitungan *wake fraction* (w)

$$\begin{aligned}w &= (0,5 \times C_b) - 0,05 && \text{untuk twin screw} \\ w &= (0,5 \times 0,45) - 0,05 \\ w &= 0,175\end{aligned}$$

3. Perhitungan *Trust Deduction Factor* (t)

Ditentukan dengan menghitung nilai *coefisien prismatic*, dimana nilainya dapat dihitung dibawah ini.

$$Cp = \frac{Am}{B \cdot T}$$

$$Am = 34,75 \text{ m}^2$$

$$Cp = \frac{34,75}{14 \times 3,7}$$

$$Cp = 0,67$$

$$t = (0,5 \times Cp) - 0,19 \quad \text{untuk } twin \text{ screw}$$

$$t = (0,5 \times 0,67) - 0,19$$

$$t = 0,145$$

4. Perhitungan *Speed Of Advance* (V_a)

$$1 \text{ knot} = 0,514 \text{ m/s}$$

$$30 \text{ knot} = 15,43 \text{ m/s}$$

$$Va = (1 - w) \times Vs$$

$$Va = (1 - 0,175) \times 15,43$$

$$Va = 12,81 \text{ m/s}$$

5. Perhitungan Efisiensi Propulsif

- **Efisiensi relatif propulsif (η_{rr})**

Desain yang dilakukan adalah kapal dengan propeller ganda. Untuk kapal *twin screw* $\eta_{rr} = 0,95 - 1,0$. Dalam perancangan nilai *efisiensi relatif rotatif* diambil 1,0.

(*Principles Of Naval Architecture*)

- **Efisiensi propulsif (η_p)**

Nilainya antara 0,4 - 0,7, η_p diasumsikan 0,68

- **Efisiensi lambung (η_H)**

$$\eta_H = (1 - t)/(1 - w)$$

$$\eta_H = (1 - 0,145)/(1 - 0,175)$$

$$\eta_H = 1,036$$

6. Koefisien Propulsif

$$P_c = \eta_r \times \eta_p \times \eta_H$$

$$P_c = 1,0 \times 0,68 \times 1,036$$

$$P_c = 0,704$$

4.2 Pemilihan *Prime Mover*

1. Perhitungan Karakteristik Daya Mekanis Sistem

a. Perhitungan *Delivery Horse Power* (DHP)

Dari nilai EHP maka dapat ditentukan DHP, dimana pada transmisi daya dari EHP menjadi DHP akan mengalami *losses* efisiensi mekanik yang meliputi *losses bearing* dan *sterntube* dimana harga efisiensi bantalan dan tabung baling – baling adalah 0,97 sehingga besarnya *delivery power* adalah:

$$DHP = \frac{EHP}{P_c}$$

$$DHP = \frac{26600,16}{0,704}$$

$$DHP = 37784,31 \text{ kW}$$

b. Perhitungan *Shaft Horse Power* (SHP)

Untuk kapal dengan peletakan kamar *engine* berada di belakang kapal, kerugian mekanis sebesar 2%. Akan tetapi apabila peletakan kamar mesin berada di tengah kapal maka kerugian mekanis yang ditimbulkan adalah 3%. Dalam perencanaan ini, kamar mesin berada di belakang kapal sehingga kerugian mekanisnya adalah 2%.

$$SHP = \frac{DHP}{\eta_s \eta_b}$$

$$SHP = \frac{37784,31}{0,98}$$

$$SHP = 38555,43 \text{ kW}$$

c. Perhitungan Daya Pada Kondisi *Service Continuous Rating (SCR)*

Karena efek transmission sistem efisiensi (η_G), kapal ini menggunakan *single reduction gear*, maka nilai $\eta_G = 0,98$

$$BHP_{SCR} = \frac{SHP}{\eta_G}$$

$$BHP_{SCR} = \frac{38555,43}{0,98}$$

$$BHP_{SCR} = 39342,26 \text{ kW}$$

d. Perhitungan Daya Pada Kondisi *Maximum Continuous Rating (MCR)*

BPR-scr adalah daya output motor penggerak pada kondisi SCR, yaitu daya pada kondisi 80-85% dari MCR nya. Artinya daya yang dibutuhkan kapal agar mampu beroperasi dengan kecepatan service V_s adalah cukup diatasi oleh 80 – 85% daya *engine* dan pada kisaran 100% putaran motor.

$$BHP_{MCR} = \frac{BHP_{SCR}}{0,85}$$

$$BHP_{MCR} = \frac{39342,26}{0,85}$$

$$BHP_{MCR} = 46285,02 \text{ kW}$$

2. Pemilihan *Prime Mover*

Berdasarkan hasil perhitungan daya penggerak yang didapatkan maka dapat ditentukan mesin yang akan digunakan.

$$BHP_{MCR} = 46285,02 \text{ kW}$$

Pada perencanaan ini kapal di desain *menggunakan twin screw*. Sehingga digunakan dua mesin, maka daya tiap mesin yang diperlukan adalah 23142,5 kW.

Prime Mover

Type : S.M.E.T. Pielstick 18 PC4-2B
 Daya : 23850 kW
 Kecepatan mesin : 600 rpm

Gearbox

Kecepatan maksimum : 600 rpm
 Daya maksimum : 23850 kW
 Ratio : 2,082

4.3 Pemilihan Propeller

Langkah – langkah pemilihan propeller dapat dijelaskan dibawah ini:

1. Perhitungan Ulang Daya Kapal

Menghitung ulang karakteristik daya mekanis sistem propulsi berdasarkan daya *prime mover* yang baru.

a. Daya pada kondisi MCR

$$BHP_{MCR} = 23850 \text{ kW}$$

b. Perhitungan daya pada kondisi SCR

$$BHP_{SCR} = BHP_{MCR} \times 0,85$$

$$BHP_{SCR} = 23850 \times 0,85$$

$$BHP_{SCR} = 20272,5 \text{ kW}$$

c. Perhitungan *Shaft Horse Power* (SHP)

$$SHP = BHP_{SCR} \times \eta_G$$

$$SHP = 20272,5 \times 0,98$$

$$SHP = 19867,05 \text{ kW}$$

- d. Perhitungan *Delivery Horse Power* (DHP)

$$DHP = SHP \times \eta s \eta b$$

$$DHP = 19867,05 \times 0,98$$

$$DHP = 19469,709 \text{ kW}$$

- e. Perhitungan *Effective Horse Power* (EHP)

$$EHP = DHP \times Pc$$

$$EHP = 19469,709 \times 0,704$$

$$EHP = 13706,675 \text{ kW}$$

2. Pemilihan Propeller Dengan Metode B Screw Series

Berdasarkan langkah pemilihan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, maka dibawah ini ditunjukkan Tabel 4.1 pemilihan propeller dengan metode B Screw Series.

Tabel 4.1 Perhitungan propeller

Unit	Type Propeller					
		B5-45	B5-60	B5-75	B5-90	B5-105
Pemilihan propeller B Screw Series						
N. Engine	(rpm)	600,000	600,000	600,000	600,000	600,000
N. Propeller	(rpm)	288,184	288,184	288,184	288,184	288,184
Vs	(knot)	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000
Va	(knot)	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750
Bp		15,287	15,287	15,287	15,287	15,287
0,7139(Bp ²)		0,680	0,680	0,680	0,680	0,680
(P/D)o		0,965	0,945	0,950	0,980	1,030
1/Jo		1,465	1,490	1,490	1,465	1,430
do		148,354	150,886	150,886	148,354	144,810
Do	(feet)	12,741	12,958	12,958	12,741	12,437
Db	(feet)	12,104	12,311	12,311	12,104	11,815
(P/D)b		1,005	0,975	0,980	1,015	1,065
1/Jb		1,392	1,416	1,416	1,392	1,359
db		140,937	143,342	143,342	140,937	137,570
η		0,650	0,657	0,655	0,645	0,631

Berdasarkan hasil dari perhitungan diatas maka dipilih propeller type B5-60 dengan spesifikasi sebagai berikut:

Propeller

Type propeller : B *screw series*
 Jumlah blade : 5
 Ae/Ao : 0,6
 Diameter : 12,311 feet = 3,752 m
 N. Propeller : 288,184 rpm
 Dengan pertimbangan memiliki efisiensi terbesar yaitu 65,7%.

4.4 Analisa Engine Propeller Matching

Tahanan total kapal yang diketahui dengan eksperimen melalui uji tarik pada towing tank dengan menggunakan model adalah seperti ditunjukkan Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.2 Tahanan kapal

Run Ke	V (knot)	Rt (KN)
1	18	383,440
2	20	582,930
3	22	703,796
4	24	822,516
5	26	1015,564
6	28	1435,833
7	30	1701,245

Tahanan total kapal pada saat *clean hull*

$$R_{T\text{-trial}} = 1701,245 \text{ kN}$$

Tahanan total kapal pada saat *rough hull*

$$R_{T\text{-service}} = R_{T\text{-trial}} \times 1,15 \text{ (sea margin)}$$

$$R_{T\text{-service}} = 1956,432 \text{ kN}$$

Sehingga nilai konstanta α dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 R_T &= \alpha \times V S^2 \\
 \alpha - trial &= \frac{R_{T-trial}}{V S^2} \\
 &= \frac{1701,245}{15,43^2} \\
 &= 7145,539 \\
 \alpha - service &= \frac{R_{T-service}}{V S^2} \\
 &= \frac{1956,432}{15,43^2} \\
 &= 8217,371
 \end{aligned}$$

Serta nilai konstanta β dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \beta &= \frac{\alpha}{(1-t)x(1-w)^2 \times \rho \times D^2} \\
 \beta - trial &= \frac{\alpha - trial}{(1-t)x(1-w)^2 \times \rho \times D^2} \\
 &= \frac{7145,539}{(1-0,145)x(1-0,175)^2 \times 1025 \times 3,752^2} \\
 &= 0,851 \\
 \beta - service &= \frac{\alpha - service}{(1-t)x(1-w)^2 \times \rho \times D^2} \\
 &= \frac{8217,371}{(1-0,145)x(1-0,175)^2 \times 1025 \times 3,752^2} \\
 &= 0,978
 \end{aligned}$$

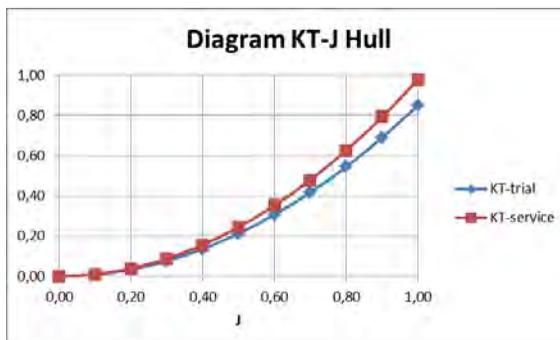
Maka kurva K_{T-J} dapat dibuat dengan perumusan dibawah ini:

$$K_T = \beta \times J^2$$

Dimana nilai J untuk B5-60 antara 0 – 1, setelah itu dibuat Tabel 4.3 dan selanjutnya di plot ke dalam grafik seperti ditunjukkan Gambar 4.1 berikut.

Tabel 4.3 K_T - J propeller type B5-60 kondisi *trial* dan *service*

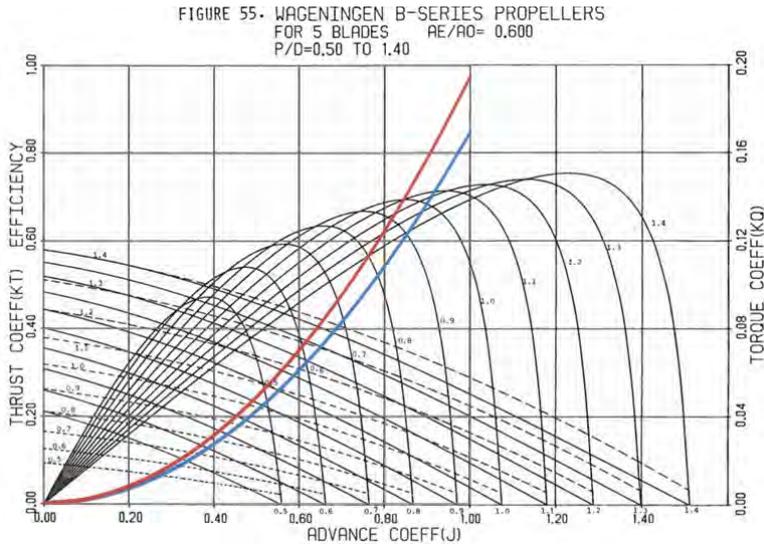
J	J^2	KT-trial	KT-service
0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	0,01	0,01	0,01
0,20	0,04	0,03	0,04
0,30	0,09	0,08	0,09
0,40	0,16	0,14	0,16
0,50	0,25	0,21	0,24
0,60	0,36	0,31	0,35
0,70	0,49	0,42	0,48
0,80	0,64	0,54	0,63
0,90	0,81	0,69	0,79
1,00	1,00	0,85	0,98



Gambar 4.1 Kurva K_T - J kondisi *trial* dan *service*

Selanjutnya untuk mendapatkan titik operasi, maka kurva K_T - J seperti ditunjukkan Gambar 4.1 diplotkan ke dalam kurva *open water test*. Pada langkah ini dibutuhkan grafik *open water test* untuk type propeller yang dipilih yaitu B5-60. Setelah itu dicari nilai masing – masing dari K_T , K_Q , dan η *behind the ship*

dengan berpatokan pada nilai $(P/D)_b$ berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 berikut:



Gambar 4.2 Kurva *open water test* B series B5-60
(Wageningen B Screw Series)

Gambar 4.2 merupakan gambar kurva *open water test* yang diplot kan dengan grafik K_T - J kondisi *trial* dan *service*. Pada kasus ini metode perhitungan *engine propeller matching* menggunakan variasi P/D , untuk mengetahui P/D optimum dari propeller yang akan digunakan. Pada tahap ini P/D divariasikan dari P/D sampai pada harga P/D optimum propeller. Berdasarkan pembacaan grafik diatas maka didapatkan hasil nilai K_T , K_Q dan η seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4 sebagai berikut:

Tabel 4.4 K_T , K_Q , η pada variasi P/D saat kondisi *trial* dan *service*

P/D	Trial			Service		
	K_T	K_Q	η	K_T	K_Q	η
0,5	0,062	0,024	0,418	0,075	0,028	0,390
0,6	0,084	0,032	0,450	0,095	0,032	0,428
0,7	0,118	0,038	0,468	0,120	0,038	0,440
0,8	0,142	0,044	0,480	0,150	0,046	0,472
0,9	0,180	0,050	0,510	0,185	0,052	0,482
1,0	0,220	0,055	0,515	0,235	0,058	0,498
1,1	0,260	0,062	0,500	0,275	0,064	0,500
1,2	0,310	0,068	0,520	0,315	0,070	0,525
1,3	0,360	0,072	0,500	0,375	0,074	0,520
1,4	0,410	0,078	0,520	0,420	0,080	0,500

Di dalam mengembangkan karakteristik beban propeller, variable yang terlibat adalah torsi propeller dan kecepatan propeller. Untuk torsi propeller merupakan hasil dari pengolahan secara grafis dari interaksi hull dan propeller, yaitu koefisien torsi pada kondisi *trial* dan *service* berdasarkan persamaan dibawah ini:

$$Q_{prop-trial} = K_{Q-trial} \times \rho \times n^2 \times D^5$$

$$Q_{prop-service} = K_{Q-service} \times \rho \times n^2 \times D^5$$

Kemudian dari nilai *torque* tersebut dapat diketahui besarnya daya yang ditransmisikan ke propeller berdasarkan persamaan dibawah ini:

$$P_{prop-trial} = Q_{prop-trial} \times n$$

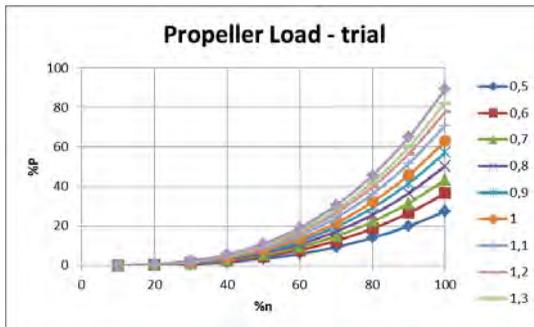
$$P_{prop-service} = Q_{prop-service} \times n$$

Dimana nilai P propeller kondisi *trial* untuk variasi kecepatan propeller dapat dibuat tabel seperti ditunjukkan Tabel

4.5 dan selanjutnya dibuat grafik seperti ditunjukkan Gambar 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.5 Karakteristik beban propeller pada variasi kecepatan *engine* dan P/D pada kondisi *trial*

%n	n prop (rpm)	%P									
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
10	28,8184	0,027467	0,036623	0,04349	0,050356	0,057223	0,062945	0,070957	0,077823	0,082401	0,089268
20	57,6368	0,219737	0,292982	0,347917	0,402851	0,457785	0,503563	0,567653	0,622587	0,65921	0,714144
30	86,4552	0,741612	0,988815	1,174218	1,359621	1,545024	1,699526	1,91583	2,101233	2,224835	2,410237
40	115,2736	1,757894	2,343859	2,783332	3,222806	3,662279	4,028507	4,541226	4,9807	5,273682	5,713155
50	144,092	3,433387	4,577849	5,436196	6,294542	7,152889	7,868178	8,869582	9,727929	10,30016	11,15851
60	172,9104	5,932892	7,910523	9,393746	10,87697	12,36019	13,59621	15,32664	16,80986	17,79868	19,2819
70	201,7288	9,421213	12,56162	14,91692	17,27222	19,62753	21,59028	24,33813	26,69344	28,26364	30,61894
80	230,5472	14,06315	18,75087	22,26666	25,78245	29,29823	32,22806	36,32981	39,8456	42,18946	45,70524
90	259,3656	20,02351	26,69801	31,70389	36,70977	41,71565	45,88721	51,7274	56,73328	60,07053	65,07641
100	288,184	27,46709	36,62279	43,48956	50,35634	57,22311	62,94542	70,95666	77,82343	82,40128	89,26805

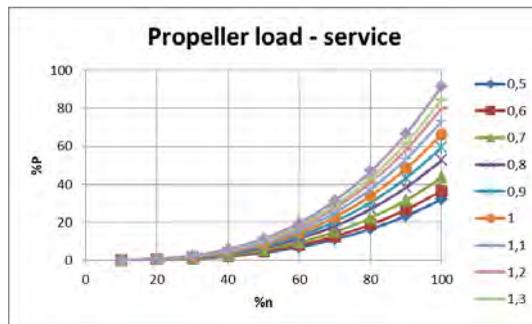


Gambar 4.3 Kurva beban propeller pada kondisi *trial*

Sedangkan nilai P propeller kondisi *service* untuk variasi kecepatan propeller dapat dibuat tabel seperti ditunjukkan Tabel 4.6 dan selanjutnya dibuat grafik seperti ditunjukkan Gambar 4.4 sebagai berikut:

Tabel 4.6 Karakteristik beban propeller pada variasi kecepatan *engine* dan P/D pada kondisi *service*

%n	n prop (rpm)	P									
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
10	28,8184	0,032045	0,036623	0,04349	0,052645	0,059512	0,066379	0,073246	0,080112	0,08469	0,091557
20	57,6368	0,25636	0,292982	0,347917	0,421162	0,476096	0,53103	0,585965	0,640899	0,677522	0,732456
30	86,4552	0,865213	0,988815	1,174218	1,421422	1,606825	1,792228	1,977631	2,163034	2,286636	2,472038
40	115,2736	2,050876	2,343859	2,783332	3,369297	3,80877	4,248244	4,687717	5,127191	5,420173	5,859647
50	144,092	4,005618	4,577849	5,436196	6,580658	7,439004	8,297351	9,155698	10,01404	10,58628	11,44462
60	172,9104	6,921708	7,910523	9,393746	11,37138	12,8546	14,33782	15,82105	17,30427	18,29308	19,77631
70	201,7288	10,99142	12,56162	14,91692	18,05733	20,41263	22,76793	25,12323	27,47854	29,04874	31,40404
80	230,5472	16,40701	18,75087	22,26666	26,95437	30,47016	33,98595	37,50174	41,01753	43,36138	46,87717
90	259,3656	23,36076	26,69801	31,70389	38,3784	43,38427	48,39015	53,39603	58,40191	61,73916	66,74504
100	288,184	32,04494	36,62279	43,48956	52,64526	59,51204	66,37881	73,24558	80,11236	84,6902	91,55698



Gambar 4.4 Kurva beban propeller pada kondisi *service*

Dari grafik beban propeller yang dihasilkan yaitu Gambar 4.4 yang menunjukkan beban propeller saat kondisi *trial* atau kondisi *clean hull*, dan Gambar 4.4 yang menunjukkan beban propeller saat kondisi *service* atau kondisi *rough hull*. Dari hasil yang didapatkan dapat diketahui bahwa trendline grafik yang terus meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan propeller dan perubahan P/D propeller dengan nilai beban maksimal sebesar 89% untuk kondisi *trial* dan 91% untuk kondisi *service*. Tidak ketepatan penggunaan keseluruhan daya ini adalah dikarenakan ketersediaan daya mesin yang digunakan disesuaikan dengan *engine* yang tersedia dilapangan.

(Sengaja dikosongkan)

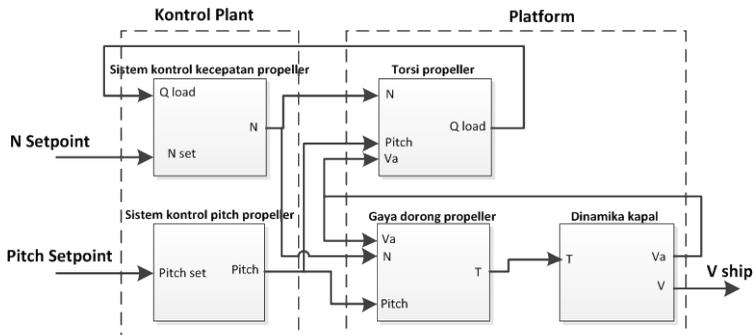
BAB V

DESAIN DAN PEMODELAN SISTEM KONTROL PROPULSI

Bab sebelumnya telah menunjukkan konsep desain dan pemodelan sistem kontrol propulsi meliputi pemodelan kontrol kecepatan propeller, pitch propeller, dan platform kapal dan langkah – langkah yang akan dilakukan dalam sebuah diagram alir. Proses desain dan pemodelan dilakukan dengan beberapa langkah berikut ini

5.1 Konsep Desain Sistem Kontrol Propulsi

Secara global konsep desain kontrol yang akan diimplementasikan pada sistem propulsi ini digambarkan berdasarkan diagram blok dibawah ini.



Gambar 5.1 Konsep desain kontrol

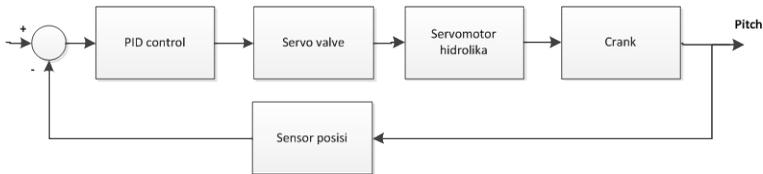
Berdasarkan konsep desain kontrol pada Gambar 5.1 diatas dan kriteria desain yang telah ditentukan maka dapat diketahui bahwa input yang digunakan adalah pitch propeller dan kecepatan propeller yang diinginkan. Selanjutnya kontrol pitch propeller akan menentukan pitch propeller aktual dan kontrol

kecepatan akan menentukan kecepatan propeller aktual. Keluaran dari pitch propeller dan kecepatan propeller akan digunakan sebagai masukan platform yang merupakan karakteristik propeller dan kapal berupa torsi propeller, gaya dorong propeller, dan dinamika kapal dengan keluaran kecepatan kapal.

5.2 Pemodelan Matematika Sistem

5.2.1 Pemodelan Kontrol Pitch Propeller

Berdasarkan uraian tentang teori *Controlable Pitch Propeller* (CPP) pada bab sebelumnya maka dapat ditentukan komponen – komponen penting yang berperan dalam sistem operasi pengaturan sudut pitch propeller. Diantaranya dapat digambarkan dengan diagram blok sistem kontrol pitch propeller pada Gambar 5.2 berikut:



Gambar 5.2 Diagram blok sistem kontrol pitch propeller

1. Pemodelan *Servo Valve*

Pada sebuah sistem hidrolik, *valve* sangat penting pada keseluruhan sistem untuk menentukan seberapa banyak fluida yang akan keluar dan masuk ke dalam aktuator. Jika pada sebuah kapal dengan penggunaan *Controllable Pitch Propeller* (CPP), *servo valve* adalah sangat penting untuk mengatur sudut pitch propeller. Berdasarkan penjelasan sebelumnya *servo valve* terdiri dari dua elemen:

- Torsi motor

Torsi motor merupakan sebuah *driver* yang terdiri dari rangkaian tahanan (R) dan induktansi

(L), dengan *transfer function* dituliskan berikut ini:

$$\frac{I(s)}{E(s)} = \frac{1}{Ls+R} \dots\dots\dots (5.1)$$

(Vijaya Sagar. Tenali, *DSP Simulation of Electro-Hydraulic Servo Actuator*)

- Dinamika spool
Gaya (F_p) yang dapat dibangkitkan oleh torsi motor dengan adanya perubahan arus (I).

$$F_p = Bp \cdot I$$

Dikarenakan adanya gaya pegas yang diakibatkan oleh kompresibilitas *fluida*, selanjutnya gaya yang terjadi pada *spool* dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$F_p = M_p \frac{dx^2}{dt^2} + C_p \frac{dx}{dt} + k_p x$$

$$Bp \cdot I = M_p \frac{dx^2}{dt^2} + C_p \frac{dx}{dt} + k_p x$$

Dalam laplace domain menjadi,

$$Bp \cdot I(s) = (M_p s^2 + C_p s + k_p) X(s)$$

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{Bp}{M_p s^2 + C_p s + k_p} \dots\dots\dots (5.2)$$

Dimana (x) pergeseran *spool*, (B_p) koefisien gaya akibat perubahan arus, (M_p) massa *spool*, (C_p) koefisien redaman *spool*, dan (K_p) adalah koefisien pegas.

2. **Pemodelan Servo Motor Hidrolika**

Berdasarkan penjelasan pada bab sebelumnya, *servo motor hidrolik* merupakan sebuah penguat daya hidrolika berupa piston daya pada hub propeller yang nantinya akan menentukan sudut pitch pada *Controllable Pitch Propeller (CPP)*.

Laju aliran (Q) merupakan fungsi pergeseran *spool* (x) dan perbedaan tekanan (ΔP) sehingga dapat ditulis persamaan berikut:

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

Maka:

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

Dimana (K_1) merupakan konstanta gradien fungsi (x) dan (K_2) merupakan konstanta gradien fungsi (P/D) Gaya (F) yang dibangkitkan oleh piston daya pada massa (m) dan gesekan (f):

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

Sehingga *transfer function* untuk sistem *servo motor hidrolika* yang menghasilkan pergeseran piston daya (Y) berdasarkan masukan pergeseran *spool* (X) dituliskan berdasarkan persamaan berikut:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{s} \dots\dots\dots (5.3)$$

(Katsuhiko Ogata, Teknik Kontrol Automatik
Jilid 1)

Dimana,

$$K = \frac{1}{\frac{b \cdot K_2}{A \cdot K_1} + \frac{A \cdot \rho}{K_1}}$$

3. Pemodelan Crank

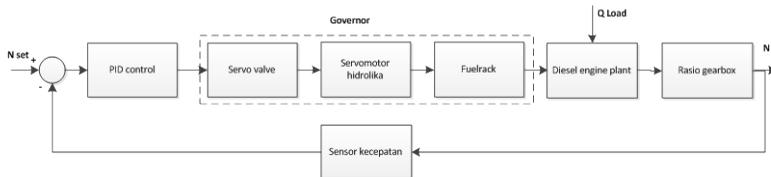
Pemodelan crank dapat disederhanakan dengan prinsip roda gigi, dimana hubungan antara ram displacement dan sudut pitch yang dihasilkan dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{Y}{2\pi r} &= \frac{\theta}{2\pi} \\ \frac{\theta(s)}{Y(s)} &= \frac{2\pi}{2\pi r} \\ \frac{\theta(s)}{Y(s)} &= \frac{1}{r} \dots\dots\dots (5.4) \end{aligned}$$

Dimana (θ) sudut crank, (Y) pergeseran piston daya, dan (r) radius crank.

5.2.2 Pemodelan Kontrol Kecepatan Propeller

Berdasarkan uraian tentang teori *diesel engine* pada bab sebelumnya maka dapat ditentukan komponen – komponen yang berperan dalam sistem operasi pengaturan kecepatan *engine*. Diantaranya dapat digambarkan dengan diagram blok sistem kontrol kecepatan propeller sebagai berikut:



Gambar 5.3 Diagram blok sistem kontrol kecepatan propeller

Gambar 5.3 diatas menunjukkan diagram blok sistem kontrol kecepatan propeller. Pemodelan kontrol kecepatan propeller merupakan bagian dari pengontrolan kecepatan *engine*. Pemodelan *diesel engine* yang diuraikan disini secara mendasar merupakan persamaan dinamik yang menghubungkan antara gerak *fuel rack* bahan bakar dengan kecepatan diesel yang dihasilkan karena adanya gerak *fuel rack* tersebut.

1. Pemodelan Servo Valve

Pada sebuah pengontrolan kecepatan *engine*, *servo valve* merupakan bagian dari governor yang menentukan jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam *diesel engine*.

Berdasarkan penjelasan sebelumnya *servo valve* terdiri dari dua elemen:

- Torsi motor

Torsi motor merupakan sebuah driver yang terdiri dari rangkaian tahanan (R) dan induktansi (L), dengan *transfer function* dituliskan berikut ini:

$$\frac{I(s)}{E(s)} = \frac{1}{Ls+R} \dots\dots\dots (5.5)$$

(Vijaya Sagar. Tenali, *DSP Simulation of Electro-Hydraulic Servo Actuator*)

- Dinamika spool

Gaya (F_p) yang dapat dibangkitkan oleh torsi motor dengan adanya perubahan arus.

$$F_p = Bp \cdot I$$

Dikarenakan adanya gaya pegas yang diakibatkan oleh kompresibilitas *fluida*, selanjutnya gaya yang terjadi pada *spool* dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$F_p = M_p \frac{dx^2}{dt^2} + C_p \frac{dx}{dt} + k_p x$$

$$Bp.I = M_p \frac{dx^2}{dt^2} + C_p \frac{dx}{dt} + k_p x$$

Dalam laplace domain menjadi,

$$Bp.I(s) = (M_p s^2 + C_p s + k_p)X(s)$$

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{Bp}{M_p s^2 + C_p s + k_p} \dots\dots\dots (5.6)$$

Dimana (x) pergeseran *spool*, (B_p) koefisien gaya akibat perubahan arus, (M_p) massa *spool*, (C_p) koefisien redaman *spool*, dan (K_p) adalah koefisien pegas.

2. **Pemodelan Servo Motor Hidrolika**

Berdasarkan penjelasan pada bab sebelumnya, *servo motor hidrolik* merupakan sebuah penguat daya hidrolika berupa piston daya yang merupakan bagian dari governor untuk menentukan jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam *diesel engine*.

Laju aliran (Q) merupakan fungsi pergeseran *spool* (x) dan perbedaan tekanan (ΔP), sehingga dapat ditulis persamaan berikut:

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

Maka:

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

Dimana (K_1) merupakan konstanta gradien fungsi pergeseran *spool* (x) dan (K_2) merupakan konstanta gradien fungsi (P/D).

Gaya (F) yang dibangkitkan oleh piston daya pada massa (m) dan gesekan (f):

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

Sehingga *transfer function* untuk sistem servo motor hidrolika yang menghasilkan pergeseran piston daya (Y) berdasarkan masukan pergeseran *spool* (X) dituliskan berdasarkan persamaan berikut:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{s} \dots\dots\dots (5.7)$$

(Katsuhiko Ogata, Teknik Kontrol Automatik Jilid 1)

Dimana,

$$K = \frac{1}{\frac{b \cdot K_2}{A \cdot K_1} + \frac{A \cdot \rho}{K_1}}$$

3. **Pemodelan *Fuel Rack***

Merupakan nilai jumlah bahan bakar yang mampu dikeluarkan terhadap setiap pergerakan *fuel rack*.

4. **Pemodelan *Diesel Engine Plant***

Dalam sebuah pengontrolan kecepatan propeller, *diesel engine* merupakan penggerak propeller yang digunakan dalam penelitian ini. berdasarkan penjelesan pada bab sebelumnya tentang *model diesel engine*, maka untuk mendapatkan kecepatan *diesel engine* ditulis persamaan berikut:

$$P_{engine} = T_{engine} \cdot N_{engine} = C_V \cdot \dot{m}$$

Kecepatan (N_{engine}) dari diesel merupakan fungsi bahan bakar yang disuplai ke silinder diesel engine (m) dan torsi engine (T_{engine}), yaitu:

$$T_{engine} = f(m, \dot{T})$$

maka persamaan dapat ditulis,

$$N_{engine} = C_1 \cdot \dot{m} - C_2 \cdot t$$

sehingga dalam laplace domain menjadi:

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

Dimana (N_{engine}) kecepatan *engine*, (C_1) konstanta gradien fungsi bahan bakar (m), dan (C_2) konstanta gradien fungsi torsi (T).

Torsi (T_{engine}) yang dihasilkan oleh *diesel engine* dikurangi torsi beban (T_L) adalah suatu torsi bersih yang dipergunakan oleh *diesel engine* untuk menghasilkan percepatan sudut yang dipersamakan secara matematis sebagai berikut:

$$T_{engine} - T_L = J \cdot a = J \frac{dN_{engine}}{dt}$$

sehingga dalam laplace domain menjadi:

$$T_{engine} - T_L = J \cdot N_{engine}(s)s$$

substitusi persamaan tersebut menghasilkan:

$$\frac{C_1 \cdot \dot{m}(s) - \dot{N}_{engine}(s)}{C_s} = J \cdot ns(s) + T_L$$

$$\begin{aligned}
 C_1 \cdot \dot{m}(s) - N_{engine}(s) &= (J \cdot ns(s) + T_L)C_2 \\
 C_1 \cdot \dot{m}(s) - N_{engine}(s) &= (J \cdot ns(s) \cdot C_2) + (T_L \cdot C_2) \\
 C_1 \cdot \dot{m}(s) - T_L \cdot C_2 &= N_{engine}(s)[J \cdot s \cdot C_2 + 1] \\
 \frac{C_1 \cdot \dot{m}(s) - T_L \cdot C_2}{[J \cdot s \cdot C_2 + 1]} &= N_{engine}(s)
 \end{aligned}$$

Jika

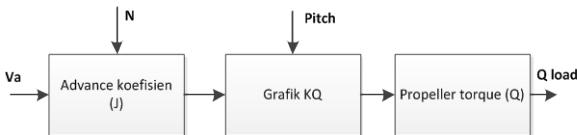
$$\tau_1 = C_2 \cdot J$$

maka didapatkan :

$$\begin{aligned}
 \frac{C_1 \cdot \dot{m}(s) - T_L \cdot C_2}{1 + \tau_1 \cdot s} &= N_{engine}(s) \\
 N_{engine}(s) &= \frac{C_1 \cdot \dot{m}(s)}{1 + \tau_1 \cdot s} \left[\dot{m} - \frac{C_2}{C_1} T_L \right] \dots\dots\dots (5.8)
 \end{aligned}$$

5.2.3 Pemodelan Torsi Propeller

Torsi yang diakibatkan oleh propeller dapat dimodelkan berdasarkan diagram blok yang digambarkan pada Gambar 5.4 dibawah ini.



Gambar 5.4 Diagram blok torsi propeller

1. Pemodelan kurva K_Q-J

Untuk mendapatkan nilai K_Q, maka terlebih dahulu dibuat grafik K_Q-J didapatkan dari grafik K_T-K_Q-J dengan menggunakan J reference. Selanjutnya dibuat grafik K_Q-P/D. Untuk mendapatkan nilai K_Q maka dilakukan linearisasi dari persamaan tersebut, sehingga dapat diketahui bahwa (K_Q) koefisien torsi

propeller merupakan fungsi (P/D) pitch propeller dan (J) koefisien advance.

$$K_Q = f(P/D, J)$$

maka persamaan dapat ditulis:

$$K_Q = Q_1 P/D + Q_2 J \dots\dots\dots (5.9)$$

Dimana (K_Q) koefisien torsi propeller yang didapatkan dari kurva *open water test* propeller type wageningen B5-60, (Q_1) konstanta gradien fungsi pitch propeller (P/D) saat koefisien advance (J) dijaga konstan pada kondisi operasionalnya, dan (Q_2) konstanta gradien fungsi (J) saat pitch propeller (P/D) dijaga konstan pada kondisi operasionalnya.

Sedangkan nilai J didapatkan dari persamaan matematis sebagai berikut:

$$J = \frac{v_a}{N_{prop} \cdot D} \dots\dots\dots (5.10)$$

Dimana (J) koefisien advance, (N_{prop}) kecepatan propeller, dan (D) diameter propeller.

2. Torsi propeller

Untuk mendapatkan nilai torsi propeller didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$K_Q = \frac{Q_{prop}}{\rho \cdot N_{prop}^2 \cdot D^5}$$

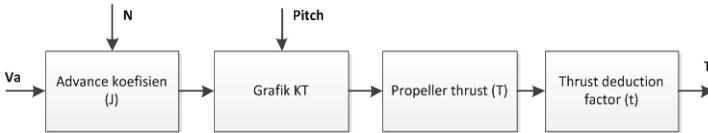
Sehingga,

$$Q_{prop} = K_Q \cdot \rho \cdot N_{prop}^2 \cdot D^5 \dots\dots\dots (5.11)$$

Dimana (Q_{prop}) torsi yang dibangkitkan oleh propeller, (K_Q) Koefisien torsi propeller berdasarkan pitch propeller (P/D) dan koefisien advance (J), (N_{prop}) kecepatan propeller, dan (D) diameter propeller.

5.2.4 Pemodelan Gaya Dorong Propeller

Gaya dorong yang diberikan propeller kepada kapal dapat dimodelkan berdasarkan diagram blok yang digambarkan pada Gambar 5.5 dibawah ini.



Gambar 5.5 Diagram blok gaya dorong propeller

1. Pemodelan kurva K_T - J

Untuk mendapatkan nilai K_T , maka terlebih dahulu dibuat grafik K_T - P/D didapat dari grafik K_T - K_Q - J dengan menggunakan J *reference*. Selanjutnya dibuat grafik K_T - P/D . Untuk mendapatkan nilai K_T maka di linearisasi dari grafik tersebut, maka (K_T) koefisien gaya dorong propeller merupakan fungsi dari (P/D) pitch propeller dan (J) koefisien advance.

$$K_T = f(P/D, J)$$

maka persamaan dapat ditulis:

$$K_T = T_1 P/D + T_2 J \dots\dots\dots (5.12)$$

Dimana (K_T) koefisien gaya dorong kapal yang didapatkan dari kurva *open water test* propeller type wageningen B5-60, (T_1) konstanta gradien fungsi pitch propeller (P/D) yang didapatkan saat *koefisien advance* (J) dijaga konstan pada kondisi operasionalnya, dan (T_2) konstanta gradien fungsi *koefisien advance* (J) yang didapatkan saat pitch propeller (P/D) dijaga konstan pada kondisi operasionalnya.

Sedangkan nilai J didapatkan dari persamaan matematis sebagai berikut:

$$J = \frac{V_a}{N_{prop} \cdot D} \dots\dots\dots (5.13)$$

Dimana (J) *koefisien advance*, (V_a) kecepatan advance kapal, (N_{prop}) kecepatan putar propeller, dan (D) diameter propeller.

2. Gaya Dorong Propeller

Untuk mendapatkan nilai gaya dorong propeller didapatkan dari persamaan dibawah ini:

$$K_T = \frac{T_{prop}}{\rho \cdot N_{prop}^2 \cdot D^4}$$

Sehingga,

$$T_{prop} = K_T \cdot \rho \cdot N_{prop}^2 \cdot D^4 \dots\dots\dots (5.14)$$

Dimana (T_{prop}) gaya dorong yang dibangkitkan oleh propeller, (K_T) Koefisien gaya dorong propeller berdasarkan pitch propeller (P/D) dan (J) *koefisien advance*, (N_{prop}) kecepatan putar propeller, dan (D) diameter propeller.

3. Thrust Deduction Factor

Untuk mendapatkan nilai gaya dorong propeller didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$T_E = t \cdot T_{prop}$$

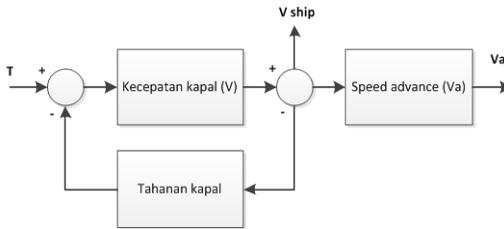
Sehingga,

$$\frac{T_E}{T_{prop}} = t \dots\dots\dots (5.15)$$

Dimana (t) *thrust deduction factor*, (T_{prop}) gaya dorong propeller, (T_E) torsi yang diberikan ke kapal.

5.2.5 Pemodelan Dinamika Kapal

Dinamika kapal dapat dimodelkan berdasarkan diagram blok yang digambarkan pada Gambar 5.6 dibawah ini.



Gambar 5.6 Diagram blok dinamika kapal

1. Kecepatan Advance

Nilai *wake fraction* didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$V_a = V_s(1 - w)$$

Sehingga didapatkan fungsi alih:

$$\frac{V_a}{V_s} = (1 - w) \dots\dots\dots (5.16)$$

Dimana (V_a) kecepatan *advance*, (V_s) kecepatan *service*, (w) *wake fraction*.

2. Kecepatan kapal

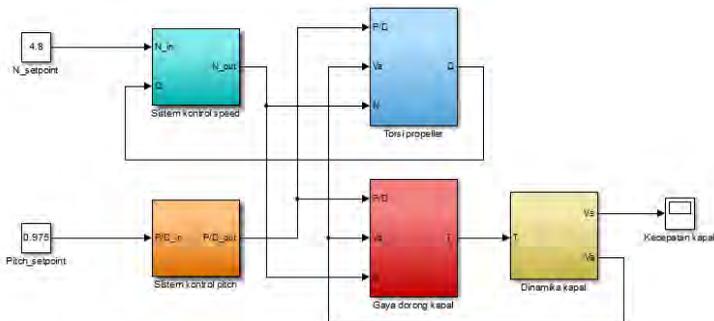
Untuk mendapatkan kecepatan kapal maka dapat diturunkan dengan menggunakan Hukum newton II seperti dibawah ini:

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m \cdot a \\ T - R &= m \cdot a \dots\dots\dots (5.17) \end{aligned}$$

Dimana (T) *thrust* (gaya dorong kapal), (R) tahanan kapal, (m) massa kapal, (a) percepatan kapal.

5.3 Pemodelan MatLab - Simulink

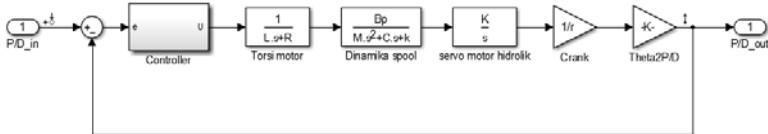
Dari konsep desain kontrol sistem propulsi dan pemodelan matematika sistem yang telah dijelaskan diatas, maka untuk mendapatkan simulasi dibuat pemodelan desain sistem kontrol propulsi kapal pada MatLab – Simulink seperti ditunjukkan Gambar 5.7 dibawah ini:



Gambar 5.7 Sistem kontrol propulsi kapal

5.3.1 Sub Sistem Kontrol Pitch Propeller

Dari gambar pemodelan diatas dapat dilihat bahwa sistem kontrol propulsi dibagi menjadi beberapa sub sistem, diantaranya adalah sub sistem kontrol pitch propeller seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.

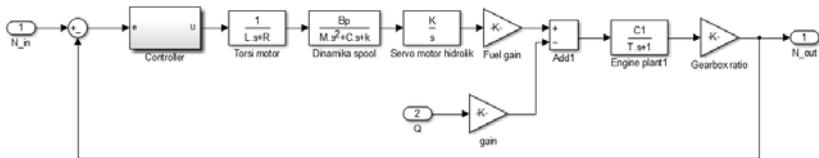


Gambar 5.8 Sub sistem kontrol pitch propeller

Gambar 5.8 diatas merupakan sub sistem pengontrolan sudut pitch propeller yang dimodelkan pada MatLab – Simulink berdasarkan Persamaan (5.1), Persamaan (5.2), Persamaan (5.3), dan Persamaan (5.4)

5.3.2 Sub Sistem Kontrol Kecepatan Propeller

Dari gambar pemodelan diatas dapat dilihat bahwa sistem kontrol propulsi dibagi menjadi beberapa sub sistem, diantaranya adalah sub sistem kontrol kecepatan propeller seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.

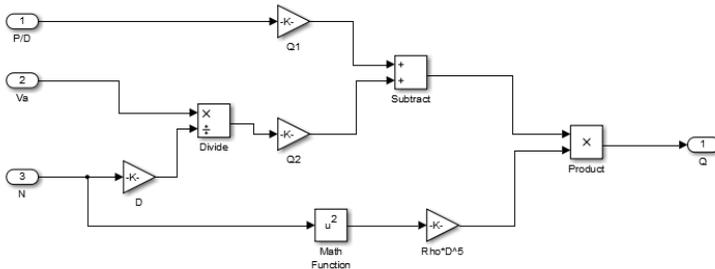


Gambar 5.9 Sub sistem kontrol kecepatan propeller

Gambar 5.9 diatas merupakan sub sistem pengontrolan kecepatan propeller yang dimodelkan pada MatLab - Simulink berdasarkan Persamaan (5.5), Persamaan (5.6), Persamaan (5.7), dan Persamaan (5.8).

5.3.3 Sub Sistem Torsi Propeller

Dari gambar pemodelan diatas dapat dilihat bahwa sistem kontrol propulsi dibagi menjadi beberapa sub sistem, diantaranya adalah sub sistem torsi propeller seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.

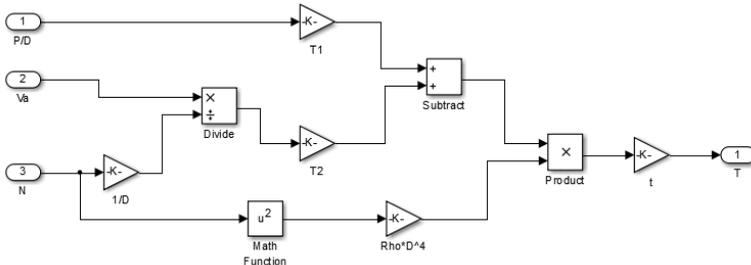


Gambar 5.10 Sub sistem kontrol torsi propeller

Gambar 5.10 diatas merupakan sub sistem yang menunjukkan unjuk kerja torsi propeller yang dimodelkan pada MatLab – Simulink berdasarkan Persamaan (5.9), Persamaan (5.10), dan Persamaan (5.11).

5.3.4 Sub Sistem Gaya Dorong Propeller

Dari gambar pemodelan diatas dapat dilihat bahwa sistem kontrol propulsi dibagi menjadi beberapa sub sistem, diantaranya adalah sub sistem gaya dorong propeller seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.

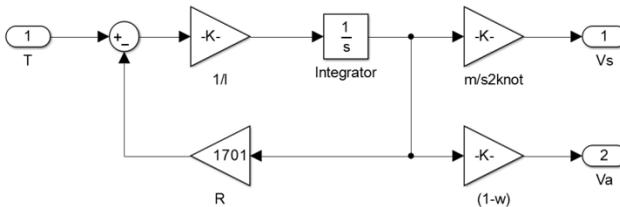


Gambar 5.11 Sub sistem kontrol gaya dorong propeller

Gambar 5.11 tersebut merupakan sub sistem yang menunjukkan unjuk kerja gaya dorong propeller yang dimodelkan pada MatLab – Simulink berdasarkan Persamaan (5.12), Persamaan (5.13), Persamaan (5.14), dan Persamaan (5.15).

5.3.5 Sub Sistem Dinamika Kapal

Dari gambar pemodelan diatas dapat dilihat bahwa sistem kontrol propulsi dibagi menjadi beberapa sub sistem, diantaranya adalah sub sistem dinamika kapal seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 5.12 Sub sistem dinamika kapal

Gambar 5.12 diatas merupakan sub sistem yang menunjukkan dinamika kapal yang dimodelkan pada MatLab – Simulink berdasarkan Persamaan (5.16) dan Persamaan (5.17).

BAB VI

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pemodelan matematis dan pemodelan pada MatLab – Simulink yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, selanjutnya dilakukan simulasi dan analisa hasil dengan beberapa langkah berikut ini:

6.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan untuk proses simulasi sistem kontrol propulsi diantaranya adalah:

1. Data Teknis Mesin Diesel

Dari proses pemilihan daya mesin yang dijelaskan pada Bab IV didapatkan jenis mesin dengan spesifikasi berikut:

Tipe mesin = S.M.E.T Pielstick 18 PC4-2B

Daya = 23850 kW

Kecepatan mesin = 600 rpm

Gradien kurva perubahan kecepatan pada setiap perubahan bahan bakar

$(C_1) = 3,773$

Gradien kurva perubahan kecepatan pada setiap perubahan torsi

$(C_2) = 0,01942$

Gradien kurva laju aliran bahan bakar terhadap pergerakan fuel rack adalah 175 g/kWh

2. Data Teknis Controllable Pitch Propeller (CPP)

Dari proses pemilihan propeller yang dijelaskan pada Bab IV didapatkan jenis propeller dengan spesifikasi berikut:

Tipe = B Screw series

Jumlah blade = 5

Diameter propeller = 3,752 m
 N. Propeller = 288,184 rpm = 4,8 rps
 Jumlah propeller = 2 buah

3. Data Servo Valve

Servo valve yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Induktansi (L) = 0,6 H
 Resistansi (R) = 200 ohm
 Koefisien selenoid (Bp) = 5.5
 Massa spool (M_{sp}) = 2,2 kg
 Redaman (C) = 55 $N \cdot s/m$
 Spring (K) = 110 N.m

4. Data Teknis Aktuator

Pada sebuah pengontrolan Controllable Pitch Propeller (CPP) aktuator merupakan sebuah piston daya yang terintegrasi dengan body hub propeller. Hub propeller yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Panjang rood (L_r) = 0,3 m
 Diameter piston (D_p) = 0,6 m
 Area piston (A_p) = 1,13 m
 Massa jenis fluida (ρ) = 899 kg/m^3
 Konstanta (K_1) = 40
 Konstanta (K_2) = 0,0001

5. Data Teknis Gearbox Ratio

Gearbox yang berfungsi untuk mereduksi kecepatan mesin agar sesuai dengan kecepatan propeller yang dibutuhkan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Rasio gearbox (RG) = 2,082

6. Torsi Propeller

Pada bab sebelumnya Persamaan (5.9) dijelaskan bahwa,

$$K_Q = f(P/D, J)$$

$$K_Q = Q_1 P/D + Q_2 J$$

Sehingga untuk mendapatkan nilai K_Q maka dilakukan linearisasi kurva open water test B series B5-60 K_T - K_Q - J

Untuk, $K_Q = f(P/D)$ dengan asumsi J pada kondisi operasional dijaga konstan $J_b = 0,7$ maka didapatkan

$$Q_1 = 0,0424$$

Untuk, $K_Q = f(J)$ dengan asumsi P/D pada kondisi operasional dijaga konstan $(P/D)_b = 0,975$ maka didapatkan

$$Q_2 = 0,069$$

7. Gaya Dorong Kapal

Pada bab sebelumnya pada Persamaan (5.12) dijelaskan bahwa,

$$K_T = f(P/D, J)$$

$$K_T = T_1 P/D + T_2 J$$

Sehingga untuk mendapatkan nilai K_Q maka dilakukan linearisasi kurva open water test B series B5-60 K_T - K_Q - J

Untuk, $K_T = f(P/D)$ dengan asumsi J pada kondisi operasional dijaga konstan $J_b = 0,7$ maka didapatkan

$$T_1 = 0,2093$$

Untuk, $K_T = f(J)$ dengan asumsi P/D pada kondisi operasional dijaga konstan $(P/D)_b = 0,975$ maka didapatkan

$$T_2 = 0,276$$

Thrust deduction factor (t) = 0,145

8. Dinamika Kapal

Dari perhitungan karakteristik propeller pada Bab IV didapatkan parameter yang digunakan pada pemodelan sistem diantaranya sebagai berikut:

Tahanan kapal (R) = 1701,245 kN

Massa kapal (M_S) = 2423 ton

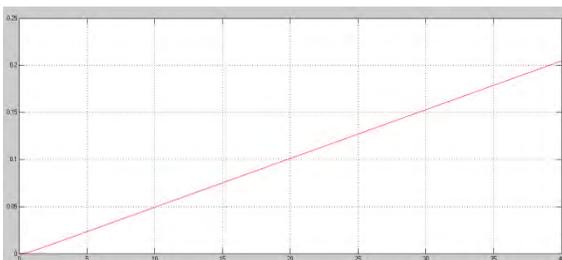
Wake (w) = 0,175

6.2 Analisa Simulasi Loop Terbuka

Simulasi loop terbuka pada sistem kontrol propulsi dilakukan pada sub sistem kontrol kecepatan propeller yang menghasilkan respon kecepatan propeller, sub sistem kontrol pitch propeller yang menghasilkan respon pitch propeller, dan sistem kontrol propulsi yang menghasilkan respon kecepatan kapal.

6.2.1 Kontrol Pitch Propeller

Dari simulasi loop terbuka yang dilakukan pada sub sistem kontrol pitch propeller dengan masukan step pada kondisi operasional pitch propeller (P/D) yaitu 0,975 dihasilkan respon sistem seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.

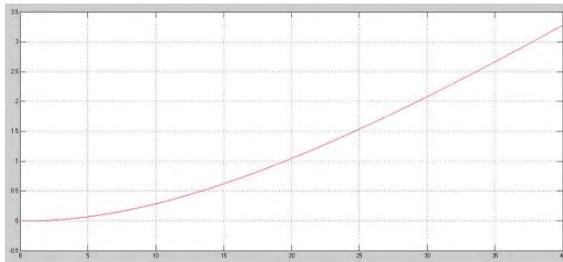


Gambar 6.1 Simulasi loop terbuka kontrol pitch propeller

Dari Gambar 6.1 diatas dapat diketahui bahwa pitch propeller tidak stabil dan tidak mampu mencapai keadaan yang diinginkan karena nilai yang terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu. Hal ini dikarenakan berdasarkan model yang dihasilkan dan simulasi yang dilakukan sistem terus berjalan seiring waktu. Sehingga perlu ditambahkan kontroller untuk mendapatkan respon yang sesuai dengan keadaan yang diinginkan.

6.2.2 Kontrol Kecepatan Propeller

Dari simulasi loop terbuka yang dilakukan pada sub sistem kontrol kecepatan propeller dengan masukan step pada kondisi operasional kecepatan propeller (N_{prop}) yaitu 4,8 m/s dihasilkan respon sistem seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.

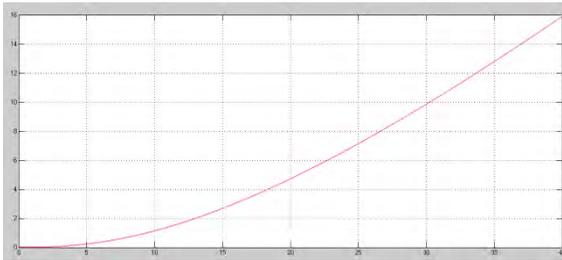


Gambar 6.2 Simulasi loop terbuka kontrol kecepatan propeller

Dari Gambar 6.2 diatas dapat diketahui bahwa kecepatan propeller tidak stabil dan tidak mampu mencapai keadaan yang diinginkan karena nilai yang terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu. Hal ini dikarenakan berdasarkan model yang dihasilkan dan simulasi yang dilakukan sistem terus berjalan seiring waktu. Sehingga perlu ditambahkan kontroller untuk mendapatkan respon yang sesuai dengan keadaan yang diinginkan.

6.2.3 Kontrol Kecepatan Kapal

Dari simulasi loop terbuka yang dilakukan sistem kontrol propulsi dengan masukan step pada kondisi operasional kapal yaitu pitch propeller (P/D) 0,975 dan kecepatan propeller (N_{prop}) 4,8 m/s dihasilkan respon sistem seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 6.3 Simulasi loop terbuka kontrol kecepatan kapal

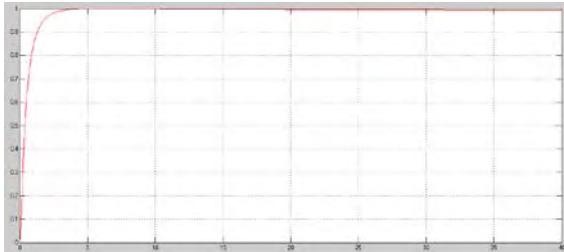
Dari Gambar 6.3 diatas dapat diketahui bahwa kecepatan kapal tidak stabil dan tidak mampu mencapai keadaan yang diinginkan karena nilai yang terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu. Hal ini dikarenakan berdasarkan model yang dihasilkan dan simulasi yang dilakukan sistem terus berjalan seiring waktu.

6.3 Analisa Simulasi Loop Tertutup Dengan Kontroler PID

Pada sebuah sistem loop tertutup, kontroler PID digunakan untuk mengurangi kesalahan dari perbedaan antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik dan membawa keluaran sistem ke nilai yang dikehendaki. Simulasi loop tertutup pada sistem kontrol propulsi dilakukan pada sub sistem kontrol kecepatan propeller yang menghasilkan respon kecepatan propeller, sub sistem kontrol pitch propeller yang menghasilkan respon pitch propeller, dan sistem kontrol propulsi yang menghasilkan respon kecepatan kapal.

6.3.1 Kontrol Pitch Propeller

Dari simulasi loop tertutup yang dilakukan pada sub sistem kontrol pitch propeller dengan masukan step pada kondisi operasional pitch propeller (P/D) yaitu 0,975 dihasilkan respon sistem seperti ditunjukkan gambar berikut.



Gambar 6.4 Simulasi loop tertutup kontrol pitch propeller

Dari Gambar 6.4 dapat diketahui bahwa kontrol pitch mampu mencapai posisi yang diharapkan sesuai dengan set point yaitu nilai pitch operasional 0,975 dengan melakukan penambahan kontroler PID pada sistem loop tertutup dengan nilai settling time sesuai dengan kriteria desain yang diinginkan yaitu kurang dari 23 s. Artinya blade pitch propeller mampu bergerak dari P/D 0 ke P/D 0,975 yaitu dengan waktu 2,09 s. Dibawah ini ditunjukkan tabel watak yang didapatkan dari simulasi.

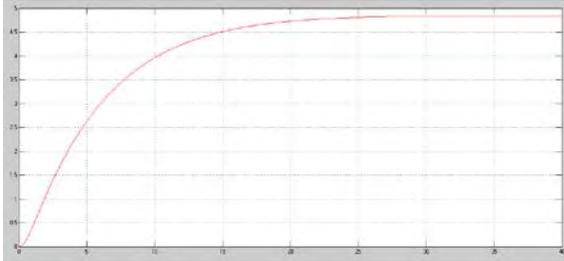
Tabel 6.1 Hasil simulasi loop tertutup kontrol pitch propeller

Watak	Respon PID
Settling time	2,09 s
Rise time	1,12 s
Overshot	0,886 %
Steady state error	0,01

6.3.2 Kontrol Kecepatan Propeller

Dari simulasi loop tertutup yang dilakukan pada sub sistem kontrol kecepatan propeller dengan masukan step pada

kondisi operasional kecepatan propeller (N_{prop}) yaitu 4,8 m/s dihasilkan respon sistem seperti ditunjukkan gambar berikut.



Gambar 6.5 Simulasi loop tertutup kontrol kecepatan propeller

Dari Gambar 6.5 dapat diketahui bahwa kontrol kecepatan propeller mampu mencapai kecepatan yang diharapkan sesuai dengan set point yaitu nilai kecepatan propeller pada kondisi operasional 4,8 m/s dengan melakukan penambahan kontroler PID pada sistem loop tertutup dengan nilai settling time sesuai dengan kriteria desain yang diinginkan yaitu kurang dari 23 s. Artinya kecepatan propeller dalam hal ini melalui diesel engine mampu bergerak dari kecepatan putar 0 ke 4,8 m/s dalam waktu 19 s. Dibawah ini ditunjukkan tabel watak yang didapatkan dari simulasi.

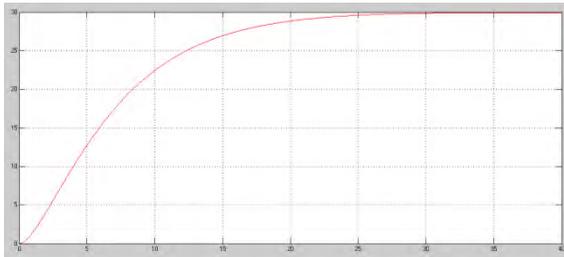
Tabel 6.2 Hasil simulasi loop tertutup kontrol kecepatan propeller

Watak	Respon PID
Settling time	19 s
Rise time	11,8 s
Overshot	0,835 %
Steady state error	0,01

6.3.3 Kontrol Kecepatan Kapal

Dari simulasi loop tertutup yang dilakukan pada sistem kontrol propulsi dengan masukan step pada kondisi operasional

kapal yaitu pitch propeller (P/D) 0,975 dan kecepatan propeller (N_{prop}) 4,8 m/s dihasilkan respon sistem seperti ditunjukkan gambar berikut.



Gambar 6.6 Simulasi loop tertutup kontrol kecepatan kapal

Dari grafik Gambar 6.6 dapat diketahui bahwa dengan melakukan penambahan kontroler PID pada sub sistem kontrol kecepatan propeller dengan masukan step pada kondisi operasional kecepatan propeller (n) 4,8 dan sub sistem kontrol pitch propeller dengan masukan step pada kondisi operasional pitch propeller (P/D) 0,97 mampu mencapai kecepatan kapal sesuai dengan kriteria desain yang diinginkan yaitu 30 k nots. Artinya kapal dapat bergerak dengan kecepatan 30 sj ika diberikan kecepatan propeller 4,8 m/s dan pitch propeller (P/D) 0,97 dengan waktu bergerak dari kecepatan 0 ke 30 knots dalam waktu 30,61 s . Dibawah ini ditunjukkan tabel watak yang didapatkan dari simulasi.

Tabel 6.3 Hasil simulasi loop tertutup kontrol kecepatan propeller

Watak	Respon
Settling time	30,61 s
Rise time	15 s
Overshot	0 %
Steady state error	0

6.4 Analisa Kestabilan Sistem

Kestabilan merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh desain sistem kontrol. Dibawah ini ditunjukkan analisa kestabilan sistem berdasarkan root locus yang dilakukan pada sistem kontrol pitch propeller dan kecepatan propeller.

Dari pemodelan dan penyederhanaan subsistem yang telah dilakukan, maka didapatkan loop terbuka *transfer function plant* untuk sistem kontrol pitch propeller seperti ditunjukkan dibawah ini.

$$TF_{pitch\ propeller} = \frac{144,3}{1,32s^4 + 473s^3 + 11066s^2 + 22000s}$$

Dengan penambahan kontroler, maka didapatkan loop tertutup *transfer function* dengan *unity feedback* untuk sistem kontrol pitch propeller seperti ditunjukkan dibawah ini

$$TF_{pitch\ propeller} = \frac{20580s^2 + 38900s + 823,3}{1,32s^5 + 473s^4 + 11066s^3 + 42580s^2 + 38900s + 823,3}$$

Dari nilai tersebut dapat digambarkan root locus dengan bantuan software MatLab, seperti ditunjukkan dibawah ini.

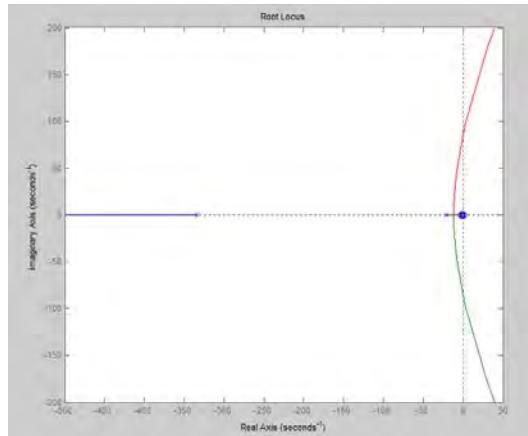
```
>> clf
>> TF_pitch=tf([2.058e04 3.89e04 823.3],[ 1.32 473 11066 42580 3.89e04 823.3])
TF_pitch =

          20580 s^2 + 38900 s + 823.3
-----
 1.32 s^5 + 473 s^4 + 11066 s^3 + 42580 s^2 + 38900 s
      + 823.3

Continuous-time transfer function.

>> rlocus(TF_pitch)
/;>>
```

Menghasilkan gambar root locus seperti ditunjukkan gambar berikut ini.



Gambar 6.7 Root locus sistem kontrol pitch propeller

Dengan letak pole - pole seperti ditunjukkan dibawah ini.

Tabel 6.4 Letak pole – pole sistem kontrol pitch propeller

Pole
-333.4840
-20.3148
-3.1752
-1.3376
-0.0217

Dari Gambar 6.7 diketahui root locus memotong sumbu imajiner di $\omega = \pm 86,1$ sehingga diketahui nilai gain K yang memotong sumbu imajiner tersebut adalah $K = 169$. Berdasarkan gambar root locus dan letak pole – pole yang berada disebelah kiri bidang S maka dapat disimpulkan bahwa sistem stabil dengan kriteria kestabilan gain K untuk sistem stabil adalah $K < 169$ dan sistem tidak stabil jika $K > 169$. Dari nilai gain K yang diketahui maka dapat dikatakan bahwa sistem mampu stabil sampai gain $K < 169$.

Sedangkan pemodelan dan penyederhanaan subsistem yang dilakukan pada sistem kontrol kecepatan propeller, menghasilkan loop terbuka *transfer function plant* seperti ditunjukkan dibawah ini.

$$TF_{kec\ propeller} = \frac{-12,54s^6 - 2404s^5 - 53020s^4 - 107600s^3 + 27350s^2 + 1992s + 0,3322}{25,08s^6 + 4808s^5 + 106007s^4 + 214566s^3 + 11000s^2}$$

Dengan penambahan kontroler, maka didapatkan loop tertutup *transfer function* dengan *unity feedback* untuk sistem kontrol kecepatan propeller seperti ditunjukkan dibawah ini

$$TF_{kec\ propeller} = \frac{-12,54s^6 - 2404s^5 - 53020s^4 - 107600s^3 + 27350s^2 + 1992s + 0,3322}{12,54s^6 + 2404s^5 + 52987s^4 + 106966s^3 + 38350s^2 + 1992s + 0,3322}$$

Dari nilai tersebut dapat digambarkan root locus dengan bantuan software MatLab, seperti ditunjukkan dibawah ini.

```
>> clf
>> TF_speed=tf([-12.54 -2404 -5.302e04 -1.076e05 2.735e04 1992 0.3322],[12.54 2404 52987 106966 38350 1992 0.3322])

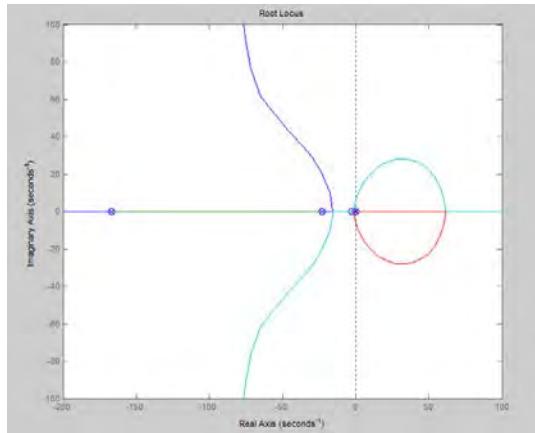
TF_speed =

    -12.54 s^6 - 2404 s^5 - 53020 s^4 - 107600 s^3 + 27350 s^2 + 1992 s + 0.3322
-----
    12.54 s^6 + 2404 s^5 + 52987 s^4 + 106966 s^3 + 38350 s^2 + 1992 s + 0.3322

Continuous-time transfer function.

>> rlocus(TF_speed)
f0 >> |
```

Menghasilkan gambar root locus seperti ditunjukkan gambar berikut ini.



Gambar 6.8 Root locus sistem kontrol kecepatan propeller

Dengan letak pole - pole seperti ditunjukkan dibawah ini.

Tabel 6.5 Letak pole – pole sistem kontrol kecepatan propeller

Pole
-166.6592
-22.8470
-1.7582
-0.3797
-0.0623
-0.0002

Dari Gambar 6.8 diketahui root locus memotong sumbu imajiner di $\omega = \pm 5,87$ sehingga diketahui nilai gain K yang memotong sumbu imajiner tersebut adalah $K = 0,96$. Berdasarkan gambar root locus dan letak pole – pole yang berada disebelah kiri bidang S maka dapat disimpulkan bahwa sistem stabil dengan kriteria kestabilan gain K untuk sistem stabil adalah $K < 0,96$ dan sistem tidak stabil jika $K > 0,96$. Dari nilai gain K yang diketahui maka dapat dikatakan bahwa sistem hanya mampu stabil sampai gain $K < 0,96$.

(Sengaja dikosongkan)

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari desain sistem propulsi dan desain dan pemodelan stand alone sistem kontrol propulsi yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Diperoleh komponen sistem propulsi kapal berupa mesin diesel sebagai prime mover dengan spesifikasi daya 2x23850 kW dan kecepatan 600 rpm, gearbox sebagai sistem transmisi dengan spesifikasi rasio 2,082 dan controllable pitch propeller sebagai propeller dengan spesifikasi type propeller screw series B5-60, diameter 3,752 m, dan jumlah blade 5 buah yang memiliki efisiensi 65,7%. Serta untuk mencapai kecepatan kapal 30 knot didapatkan kondisi operasional pitch propeller (P/D) sebesar 0,975 dan kecepatan propeller (n) sebesar 4,8 m/s dengan karakteristik beban propeller maksimal sebesar 89,26% pada kondisi trial dan 91,55% pada kondisi service.
2. Diperoleh pemodelan sistem kontrol kecepatan propeller dan simulasi dengan nilai settling time yang memenuhi kriteria desain kurang dari 23 s yaitu sebesar 19 s, rise time 11,8 s, overshoot 0,835%, dan steady state error 0,03 pada kondisi loop tertutup dengan controller PID. Serta analisa sistem yang stabil berdasarkan analisa kestabilan root locus dengan kriteria kestabilan $K < 0,69$.
3. Diperoleh pemodelan sistem kontrol pitch propeller dan simulasi dengan nilai settling time yang memenuhi kriteria desain kurang dari 23 s yaitu sebesar 2,09 s, rise time 1,12 s, overshoot 0,886%, dan steady state error 0,01 pada kondisi loop tertutup dengan controller PID. Serta analisa sistem yang stabil berdasarkan analisa kestabilan root locus dengan kriteria kestabilan $K < 160$.

4. Diperoleh pemodelan sistem kontrol propulsi berupa torsi propeller, gaya dorong propeller, dan dinamika kapal serta simulasi dengan hasil memenuhi kriteria desain kecepatan kapal yaitu 30 knot dengan settling time 30,61 s, rise time 15 s, overshoot 0 dan steady state error 0.

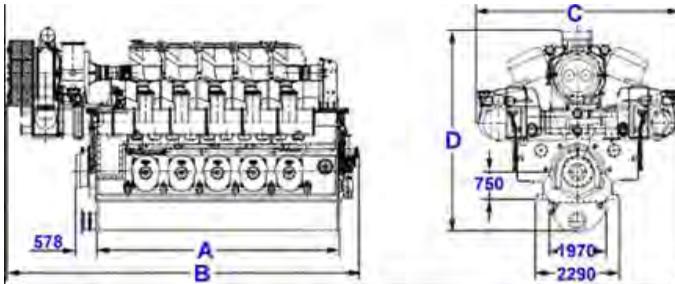
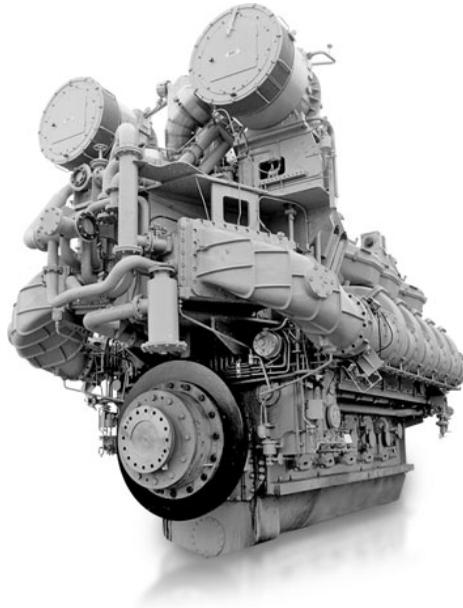
6.2 Saran

Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan pemodelan kurva kombinasi pitch dan propeller sehingga didapatkan suatu sistem kontrol propulsi dengan masukan kecepatan kapal dan keluaran kecepatan kapal pada kondisi ahead dan astern dengan disturbance berupa gangguan laut.

LAMPIRAN

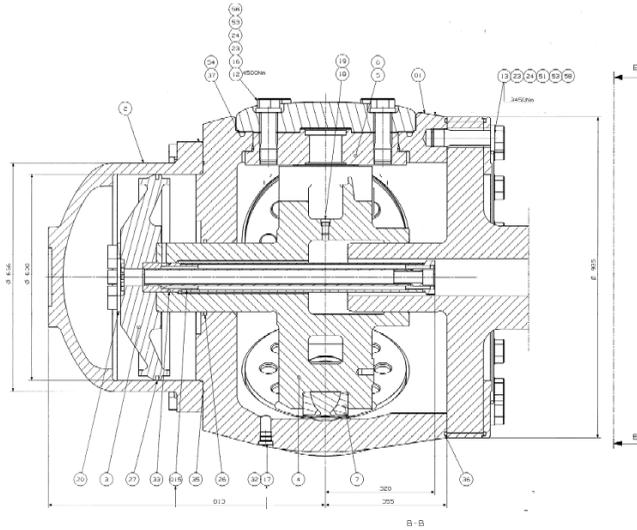
MARINE DIESEL ENGINE

S.E.M.T. Pielstick PC4-2B



CYL.	A	B	C	D	kw (520 / 600 RPM)	TONS (metric)
10V	6580	9517	5350	5475	12500 / 13250	207
12V	7560	9599	5350	6476	15000 / 15900	239
16V	9520	11795	5690	6396	20000 / 21200	302
18V	10500	13370	5690	6396	22500 / 23850	330

HUB PROPELLER



Keterangan:

1. Hub body
2. Hub cylinder
3. Piston
4. Piston rod
26. Piston rod sealing
27. Piston sealing

(Sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Nama	: M. Dakka Krisma Dwikade
TTL	: Ponorogo/1 Maret 1988
Agama	: Islam
Status	: Belum Menikah
Email	: m.dakka.kd@gmail.com m_dakka_kd@yahoo.com
Alamat	: Ponorogo, Jawa Timur

Universitas	Jurusan	Jenjang
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya	Teknik Mesin (Desain Kontrol Manufaktur)	S1
Judul: “ <i>Desain dan Pemodelan Sistem Propulsi dan Stand Alone Sistem Kontrol Propulsi Kapal</i> ”		
Politeknik Manufaktur Negeri Bandung	Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika (Mekatronika)	D3
Judul : “ <i>Perancangan Dan Pembuatan Software ERP (Enterprise Resource Planning) Sebagai Sistem Penyedia Informasi Produksi Di PT. Mada Wikri Tunggal Dengan Menggunakan Visual Basic 6.0</i> ”		
Community College Mekatronika	Mekatronika (Elektronika Industri)	D1
SMK Negeri 1 Jenangan Ponorogo	Listrik (Listrik Arus Kuat)	
SMP Negeri 1 Ponorogo SD Negeri Padas		

Perusahaan	Posisi	Masa kerja
PT. Mada Wikri Tunggal	<i>Intership Program for Academy Student (Maintenance)</i>	2008-2009