

Kajian Penggunaan Motor Listrik DC Sebagai Penggerak Speedboat

Muhammad Afnan Habibi, Soemarwanto, Hery Purnomo

Teknik Elektro Universitas Brawijaya

Jalan M.T Haryono No.167 Malang 65145 Indonesia

Email : afnan.habibi@gmail.com

Abstrak— Transportasi laut dibagi menjadi transportasi penumpang dan transportasi barang. Perahu adalah salah satu jenis transportasi laut. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pengkajian penggunaan motor listrik DC sebagai penggerak speedboat dengan membuat simulasi sehingga dapat menentukan motor listrik yang sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik dari speedboat. Data speedboat yang digunakan dalam penelitian ini adalah: $\nabla = 0,969$ ton, $V = 0,946$ m³, $v_s = 7$ knot, $L_{wl} = 7,89$ m, $S = 4,59$ m², $A = 0,158$ m², $C_b = 0,567$, $h = 0,3$ m. Dari hasil simulasi, kapasitas motor DC shunt yang diperlukan untuk menggerakkan speedboat adalah $P_m = 2200$ W, $n_m = 1800$ rpm, $\eta_m = 0,9771$, $V_t = 24$ V, $D = 0,1217$ m, $L = 0,1338$ m, $I_f = 0,2488$ A, $I_a = 130,7036$ A, $T_a = 16,292$ Nm. Kapasitas akumulator yang diperlukan selama satu jam adalah 246,8 Ah. Energi baterai dalam satu jam adalah 5923,1 W jam. Sehingga membutuhkan empat buah baterai 24 V 65 Ah terhubung paralel dan tiga buah panel surya 200 Wp.

Kata Kunci—Motor DC Shunt, Baterai, Speedboat, Kapasitas Daya, Energi.

I. PENDAHULUAN

Kapal speedboat merupakan kategori kapal cepat yang mempunyai kecepatan lebih yang digunakan oleh petugas dalam rangka memberikan pertolongan bila terjadi kecelakaan, dan atau inspeksi/pemeriksaan di pantai, sungai, danau dan penyeberangan. Karakteristik speedboat sebagai berikut: (Eko Sasmito Hadi, 2012: 6)

- Digunakan untuk membantu kelancaran operasional di alur pantai, sungai, danau dan penyeberangan.
- Kecepatan dapat mencapai 20 knot atau lebih.
- Area navigasi pada suatu kawasan yang tidak lebih dari radius 30 mil dari garis pantai.

Masih banyak perahu-perahu di Indonesia yang belum menggunakan motor listrik sebagai penggerak. Motor diesel tidak hanya mengkonsumsi bahan bakar, tetapi juga menyebabkan polusi udara sebagai akibat dari emisi gas buang dari motor. Efisiensi motor diesel terbilang rendah. Selain itu, motor diesel juga menimbulkan getaran-getaran dan suara bising. Oleh sebab itu, hanya tersisa sedikit energi yang terkonversi menjadi energi gerak. Berbeda halnya dengan motor listrik, rugi-rugi energi yang paling utama pada motor listrik adalah energi panas.

“Lima tahun lagi, mobil listrik diperkirakan akan kompetitif seperti kendaraan bermotor bensin atau diesel.” Demikian dikatakan oleh Menteri Energi Amerika Serikat Prof. Dr. Steven Chu. Oleh karena itu,

motor listrik adalah salah satu alternatif penggerak kapal. Keunggulan dari motor listrik DC yang motor diesel tidak dapat melakukan keunggulan ini, yakni putaran motor listrik dapat diatur sedemikian sehingga motor tersebut bergerak sesuai dengan yang diinginkan.

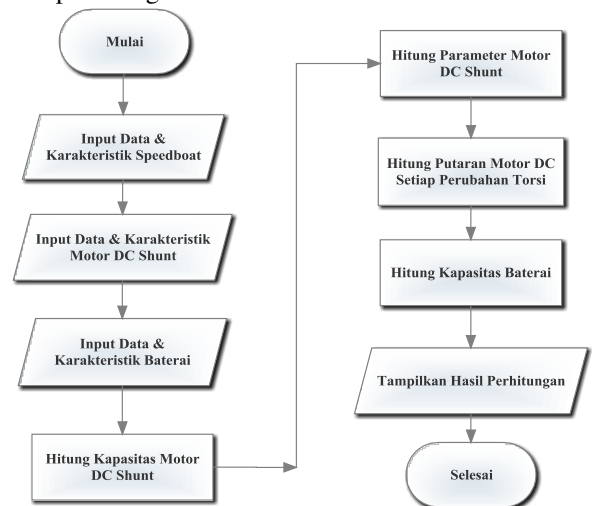
Sehubungan dengan latar belakang yang telah dipaparkan, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Seberapa kapasitas motor DC yang diperlukan untuk menggerakkan speedboat.
2. Bagaimana pengaruh torsi terhadap kecepatan putar dari motor DC.
3. Seberapa kapasitas akumulator yang diperlukan untuk memberikan suplai daya ke motor DC.

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pengkajian penggunaan motor listrik DC sebagai penggerak speedboat sehingga dapat menentukan motor listrik yang sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik dari speedboat. Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan penggunaan motor listrik sebagai penggerak speedboat dalam meningkatkan upaya penghematan bahan bakar.

II. METODE PENELITIAN

Langkah-langkah dalam analisis secara umum dapat dilihat pada diagram alir Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Pengerjaan Penelitian

A. Karakteristik penggerak kapal

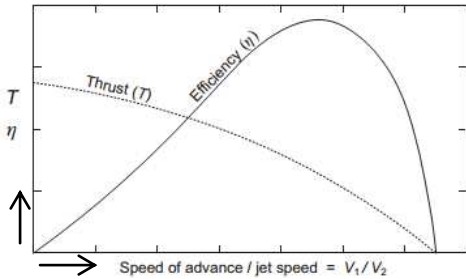
Semua penggerak bekerja pada prinsip memberikan momentum kepada fluida. Kecepatan fluida yang bergerak melalui propulsor bertambah dari v_1 ke v_2 . Gaya dorong T yang dihasilkan adalah:

$$T = \dot{m}(v_2 - v_1)$$

Dengan \dot{m} : massa per unit waktu

Penggerak kapal yang menggunakan motor diesel, membutuhkan gaya dorong T yang tinggi untuk menggerakkan kapal dari keadaan diam. Kemudian T berkurang sedikit saat terjadi penambahan kecepatan v_1 yang sedikit. Sehingga saat kecepatan maksimum $v_1=v_2$, gaya dorong T yang dibutuhkan adalah nol. Gambar 2.3 menunjukkan karakteristik gaya dorong T dan efisiensi penggerak kapal terhadap rasio kecepatan v_1/v_2 .

Penggerak kapal mempunyai karakteristik sebagai berikut:

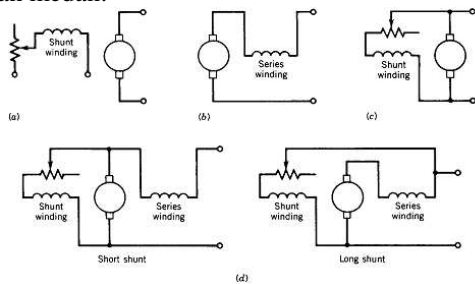


Gambar 2. Karakteristik penggerak kapal

Mesin penggerak kapal dapat dibagi berdasarkan kecepatan putarnya. Kecepatan rendah (90-130 rpm), kecepatan sedang (400-600 rpm), dan kecepatan tinggi (1000-1800 rpm).

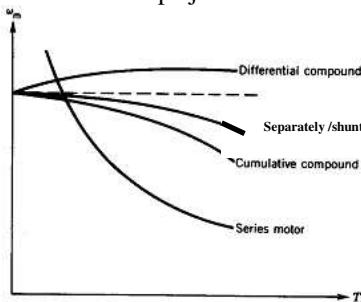
B. Motor DC

Jenis-jenis motor DC berdasarkan penguatan belitan medan:



Gambar 3. Jenis motor DC

Karakteristik beberapa jenis motor dc adalah:



Gambar 4. Karakteristik motor dc

Jika sebuah konduktor l bergerak pada kecepatan linier v dalam sebuah medan magnet B , tegangan terinduksi pada konduktor adalah: (P.C. Sen, 1997: 122)

$$e = B l v$$

Untuk konduktor yang teraliri arus i , Arah gaya ditentukan dengan menggunakan kaidah tangan kanan sekrup, gaya Lorentz yang dihasilkan pada konduktor adalah: (P.C. Sen, 1997: 123)

$$f = B l i$$

Ada dua bagian utama dari mesin: stator dan rotor. Stator adalah bagian dari mesin tidak bergerak, umumnya bingkai luar mesin. Rotor adalah bagian dari mesin bebas bergerak, umumnya bagian dalam mesin.

Beberapa konduktor diletakkan pada alur dari stator atau rotor untuk membentuk belitan. Belitan dengan tegangan dapat terinduksi disebut belitan *armature* (jangkar). Belitan yang dialiri arus untuk menghasilkan sumber primer dari medan pada mesin disebut belitan *field* (medan).

Selama jangkar berputar pada medan magnet yang dihasilkan oleh kutub stator, dihasilkan tegangan terinduksi pada belitan jangkar. Kita dapat memulai dengan memperhatikan tegangan terinduksi pada lilitan disebabkan perubahan *flux* Φ , (hukum Faraday). Persamaan tegangan terinduksi E_a :

$$E_a = K_a \Phi \omega_m \quad (1)$$

Dengan K_a : Konstanta jangkar

ω_m : Kecepatan sudut (rad/s) = $2 \pi n_m$

Semua konduktor pada belitan jangkar menghasilkan torsi dengan arah yang sama. Total torsi T yang dihasilkan:

$$T = \frac{N \Phi p}{\pi a} I_a = K_a \Phi I_a \quad (2)$$

Dengan N : Lilit konduktor

p : Jumlah kutub

a : Jumlah jalur paralel pada konduktor

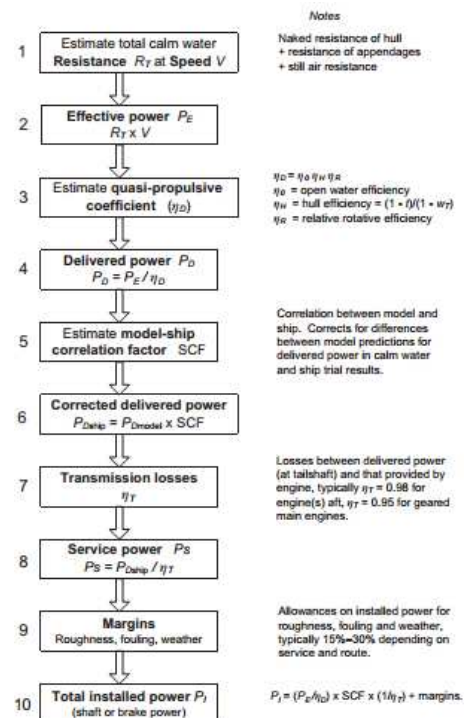
I_a : Arus jangkar (A)

Pada motor, dengan mengabaikan rugi poros terhadap bantalan, daya jangkar ($E_a I_a$) ke medan magnet dengan sistem elektrik sama dengan daya mekanik ($T \omega_m$). Dari persamaan :

$$P_a = E_a I_a = T \omega_m = K_a \Phi I_a \omega_m \quad (3)$$

C. Perhitungan kapasitas penggerak kapal

Kapasitas daya dihitung sesuai dengan kebutuhan dan fungsi kapal. Untuk memperkirakan seberapa besar daya yang digunakan oleh penggerak, diperlukan penentuan kecepatan kapal, koefisien-koefisien, margin, faktor korelasi kapal dan berbagai macam efisiensi seperti Gambar 2.



Gambar 5. Komponen perkiraan daya kapal

Tahanan total merupakan jumlah tahanan gesek R_F , tahanan residu R_R , dan tahanan udara R_A :

$$R_T = R_F + R_R + R_A \quad (6)$$

Persamaan masing-masing komponen tahanan:

$$R_F = 1/2 C_F \rho_w S V_s^2 \quad (5)$$

$$R_R = 1/2 C_R \rho_w S V_s^2 \quad (6)$$

$$R_A = 1/2 \rho_a C_D A_P V_A^2 \quad (7)$$

Dengan ρ_w : massa jenis air = 1,025 ton/m³
 ρ_a : massa jenis udara 1 atm = 1,23
 S : area garis air (m²)
 v_s : kecepatan kapal (m/s)

Persamaan koefisien *quasi propulsive*:

$$\eta_D = \eta_O \eta_H \eta_R \quad (8)$$

Dengan η_O : efisiensi *open water* = 0,3575

η_H : efisiensi lambung = 1,1219

η_R : efisiensi rotasional relatif = 0,9502

Persamaan torsi penggerak kapal Q_P : (Anthony F. Molland, 2011: 155)

$$Q_P = K_Q \rho_w d^5 n_p^2 \quad (9)$$

Dengan K_Q : konstanta torsi = 0,0748

d : diameter penggerak = 0,02 L_{wl}

n_p : putaran motor = 42 rps

D. Perhitungan parameter motor DC shunt

Persamaan diameter maksimal D_{maks} adalah: (A.K.Sawhney, 1970: 468)

$$D_{maks} = v_a / (\pi n_m) \quad (10)$$

Persamaan diameter jangkar D adalah: (A.K.Sawhney, 1970: 493)

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_a \psi}{C_D \pi n_m}} \quad (11)$$

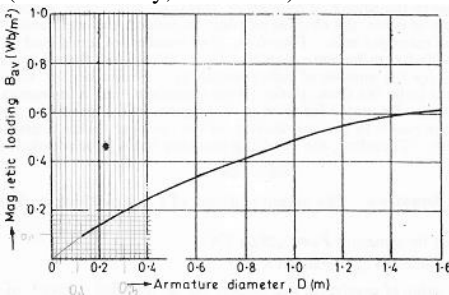
Dengan P_a : Daya jangkar = $P_m = 2200W$

C_D : Koefisien keluaran = $\pi^2 B_{av} ac$

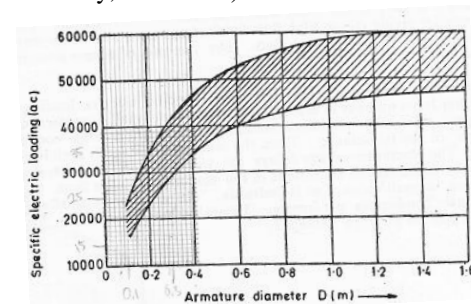
ψ : Rasio busur kutub = 0,7

n_m : putaran motor = 30 rps

Pembebanan magnetik B_{av} ditentukan melalui grafik: (A.K.Sawhney, 1970: 494)

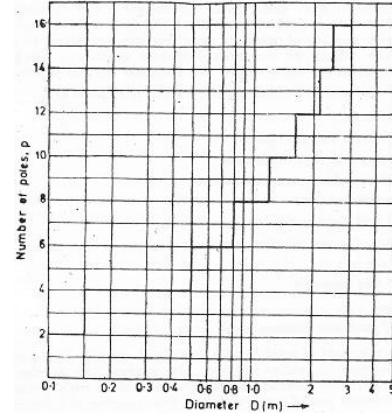


Gambar 6. Pembebanan magnetik terhadap diameter Pembebanan elektrik ac ditentukan melalui grafik: (A.K.Sawhney, 1970: 495)

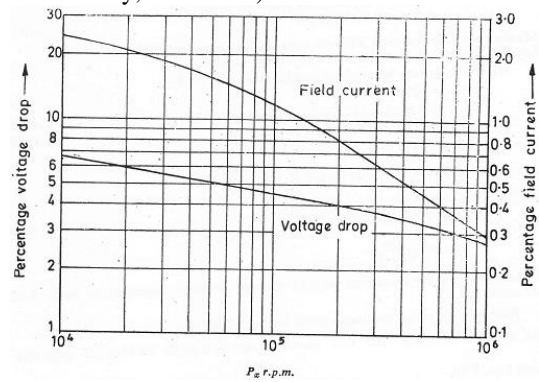


Gambar 7. Pembebanan magnetik terhadap diameter

Jumlah kutub ditentukan dengan grafik: (A.K. Sawhney, 1970: 504)



Gambar 8. Jumlah kutub terhadap diameter Persentase tegangan jatuh dan arus medan adalah: (A.K.Sawhney, 1970: 521)



Gambar 9. Persentase tegangan drop dan arus medan Persamaan panjang jangkar L adalah: (A.K.Sawhney, 1970: 493)

$$L = \psi \tau \quad (12)$$

Dengan τ : Persamaan kisar kutub = $\frac{\pi D}{p}$ (m)

ditentukan persen $I_f = 0,19/100$

persen $V_{Ra} = 2,1/100$.

Persamaan tegangan jatuh V_{Ra} adalah: (A.K.Sawhney, 1970: 521)

$$V_{Ra} = \text{persen } V_{Ra} V_t \quad (13)$$

$$I_f = \text{persen } I_f I_t \quad (14)$$

Persamaan arus terminal I_t adalah:

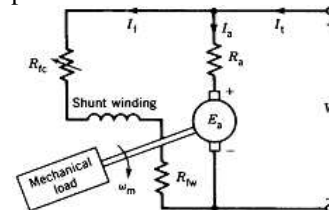
$$I_t = P_m / (\eta_m * V_t) \quad (15)$$

Persamaan fluksi per kutub Φ :

$$\Phi = B_{av} \tau L \quad (17)$$

E. Perhitungan torsi dan kecepatan motor DC shunt

Sebuah diagram skematik dari motor dc *shunt* ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Rangkaian ekivalen motor DC shunt

Motor mendapat daya dari sumber dc, oleh karena itu I_t mengalir ke mesin dari terminal positif sumber dc. Karena rangkaian medan dan rangkaian jangkar dihubungkan ke sumber dc tegangan konstan, hubungan untuk penguat terpisah dan penguat *shunt* sama.

Perilaku dari rangkaian medan tergantung dari rangkaian jangkar. Persamaan operasi *steady-state* motor dc adalah sebagai berikut: (P.C. Sen, 1997: 168)

$$I_t = I_a + I_f \quad (18)$$

Dengan I_t : Arus terminal (A)

I_a : Arus jangkar (A)

I_f : Arus medan (A)

Persamaan tegangan induksi jangkar E_a :

$$E_a = K_a \Phi \omega_m = V_t - I_a R_a \quad (19)$$

Dengan K_a : Konstanta jangkar

Φ : Fluksi per kutub (Wb)

ω_m : Kecepatan sudut motor (rad/s)

V_t : Tegangan terminal = 24 V

R_a : Tahanan jangkar (Ω)

Dari persamaan 10,

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \Phi} \quad (20)$$

Dari persamaan 2 dan 11,

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \Phi} - \frac{R_a}{(K_a \Phi)^2} T \quad (21)$$

F. Perhitungan kapasitas baterai.

Standar nominal baterai adalah tergantung dari nominal tegangan baterai lead-acid 2.0 V dan nikel-cadmium 1.2 V. Sedang nominal kapasitas baterai (Ah) berdasarkan nominal arus pelepasan (A) selama satu jam (h). Jika nominal tegangan baterai adalah 24 V, maka terdapat 12 sel baterai lead-acid tersusun seri, atau terdapat 19 atau 20 sel baterai nikel-cadmium tersusun seri. Daftar nominal baterai yang dapat digunakan bervariasi dari 12 V/6,5 Ah sampai dengan 24 V/65 Ah (David G. Vutetakis, 2001: Chapter 10)

Energi pada n-sel baterai adalah: (Allen Fuhs: 102) untuk n-sel terhubung seri

$$E = (nV_o)C_o = VC_o \quad (22)$$

untuk n-sel terhubung parallel

$$E = (nC_o)V_o = CV_o \quad (23)$$

Hukum *Peukert* menghubungkan nominal kapasitas baterai untuk melepaskan muatan: (ECEN 4517/5517)

$$C_p = I^k t \quad (24)$$

Setelah menentukan kapasitas beban baterai, maka besar energi yang disuplai oleh panel surya adalah sebesar:

$$E_{PS} = 30\% E_B \quad (25)$$

Dengan E_{PS} : Energi beban (Wh)

E_B : Energi baterai (Wh)

Asumsi rugi-rugi (losses) pada sistem dianggap sebesar 15%, maka total energi sistem E_T adalah:

$$E_T = E_{PS} + \text{rugi-rugi sistem} \\ = E_{PS} + 15\% E_{PS} \quad (26)$$

Kapasitas panel surya dihitung dengan mempertimbangkan faktor kebutuhan energi, insolasi matahari, dan faktor penyesuaian. Diambil data insolasi terendah matahari (bulan Januari sebesar 3,91) dari grafik insolasi daerah Jakarta. agar panel surya dapat memenuhi kebutuhan beban setiap saat.

Faktor penyesuaian f_p pada kebanyakan instalasi panel surya adalah 1,1. Kapasitas panel surya C_{PS} yang dihasilkan adalah:

$$C_{PS} = f_p \cdot (E_T / \text{insolasi matahari}) \quad (27)$$

Kapasitas berat B_S yang mampu dibawa oleh speedboat adalah:

$$B_S = \nabla - B_m - B_B - B_{PS} \quad (28)$$

Dengan B_S : berat speedboat (kg); ∇ : displacement (kg); B_m : berat motor dc (kg); B_B : berat baterai (kg); B_{PS} : berat panel surya (kg).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data speedboat

Data *speedboat* [1] yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- *Displacement*: $\nabla = 0,969$ ton
- *Volume*: $V = 0,946$ m³
- *Kecepatan kapal*: $v_s = 7$ knot
- *Panjang garis air*: $L_{wl} = 7,89$ m
- *Area garis air*: $S = 4,59$ m²
- *Luas daerah melintang*: $A = 0,158$ m²
- *Konstanta blok*: $C_b = 0,567$
- *Kedalaman kapal terbenam*: $h = 0,3$ m

B. Penentuan jenis motor DC

Penggerak kapal yang menggunakan motor diesel, membutuhkan gaya dorong T yang tinggi untuk menggerakkan kapal dari keadaan diam. Kemudian T berkurang sedikit saat terjadi penambahan kecepatan v_1 yang sedikit. Sehingga saat kecepatan maksimum $v_1 = v_2$, gaya dorong T yang dibutuhkan adalah nol. Gambar 2 menunjukkan karakteristik gaya dorong T dan efisiensi penggerak kapal terhadap rasio kecepatan v_1/v_2 .

Pada Gambar 4 dijelaskan bahwa motor DC *shunt* berputar dengan kecepatan ω_m dan menghasilkan torsi T . Pada kecepatan maksimum, nilai torsi adalah nol. Sedangkan pada kecepatan nol, nilai torsi adalah maksimum. Torsi tersebut menghasilkan gaya dorong T melalui propeler. Motor DC *shunt* dapat memenuhi beban *speedboat*. Jika *speedboat* membutuhkan torsi yang tinggi saat akan bergerak, maka motor DC *shunt* dapat menghasilkan torsi yang tinggi untuk membuat *speedboat* bergerak. Begitu juga sebaliknya, jika *speedboat* membutuhkan kecepatan tinggi, maka motor DC *shunt* dapat mengurangi torsi beban untuk mendapatkan kecepatan yang tinggi.

C. Perhitungan kapasitas motor DC

Dari data *speedboat* yang didapat, maka perlu dihitung dahulu daya efektif P_E menggunakan persamaan pada Gambar 2 nomor 2:

$$P_E = R_T v_s$$

Komponen tahanan kapal R_T pada persamaan (4) adalah penjumlahan tahanan gesek R_f , tahanan residu R_R , dan tahanan udara R_a .

$$R_T = R_f + R_R + R_a$$

Tahanan gesek R_f dihitung menggunakan persamaan (5):

$$R_f = C_f 0,5 \rho_w v_s^2 S$$

Konstanta gesek C_f ditentukan

$$C_f = 0,0028$$

Dengan $\rho_w = 1,025$ ton/m³, dan area garis air $S = 4,599$ m²

$$R_f = 0,0028 \cdot 0,5 \cdot 1,025 \cdot 3,6008^2 \cdot 4,599 = 0,0856$$
 kN

Tahanan residu R_R dihitung menggunakan persamaan (6):

$$R_R = C_R 0,5 \rho_w v_s^2 S$$

Konstanta residu C_R ditentukan

$C_R = 0,0035$
 Maka
 $R_R = 0,0035 \cdot 0,5 \cdot 1,025 \cdot 3,6008^2 \cdot 4,599 = 0,1070 \text{ kN}$
 Tahanan udara R_a dihitung dengan menggunakan persamaan (7):
 $R_a = C_a \cdot 0,5 \rho_a v_w^2 A$
 Ditentukan $C_a = 0,9$ dan kecepatan udara Beaufort pada air tenang $v_w = 0,3 \text{ m/s}$. Dengan luas melintang $A = 0,158$, dan massa jenis udara $= 1,23 \text{ atm}$,
 $R_a = 0,9 \cdot 0,5 \cdot 1,23 \cdot 0,3^2 \cdot 0,158 = 0,0079 \text{ kN}$
 Maka
 $R_T = R_f + R_R + R_a = 0,0856 + 0,1070 + 0,0079 = 0,2004 \text{ kN}$
 $P_E = R_T v_s = 0,2004 \cdot 3,6008 = 0,7216 \text{ kW}$
 Daya terkirim P_D dihitung menggunakan persamaan Gambar 2 nomor 4:
 $P_D = P_E / \eta_D$
 Efisiensi *quasi-propulsive* η_D dihitung menggunakan persamaan pada Gambar 2 nomor 3.
 $\eta_D = \eta_O \eta_H \eta_R$
 Dengan $\eta_O = 0,3575$, $\eta_H = 1,1219$, $\eta_R = 0,9502$, maka,
 $\eta_D = \eta_O \eta_H \eta_R = 0,3575 \cdot 1,1219 \cdot 0,9502 = 0,3811$
 Maka
 $P_D = P_E / \eta_D = 0,7216 / 0,3811 = 1,8934 \text{ kW}$
 Ditentukan SCF = 1 untuk $L < 122 \text{ m}$,
 $P_D = P_D \text{ SCF} = 1,8934 \cdot 1 = 1,8934 \text{ kW}$
 Digunakan gear untuk menyesuaikan putaran motor dengan putaran propeler, maka efisiensi transmisi η_T dengan menggunakan gear = 0,95.
 Daya saluran P_S dihitung menggunakan persamaan pada Gambar 2 nomor 8.
 $P_S = P_D / \eta_T = 1,8934 / 0,95 = 1,9931 \text{ kW}$
 Nilai margin berkisar antara 0,15-0,3. Ditentukan margin = 0,15,
 Daya poros P_I dihitung menggunakan persamaan pada Gambar 2 nomor 10.
 $P_I = (P_E / \eta_D) \text{ SCF} (1/\eta_T) + \text{margin} = P_S + \text{margin} = 1,9931 + 0,15 = 2,1431 \text{ kW}$
 Torsi propeler Q_p dihitung dengan menggunakan persamaan (9):
 $Q_p = K_{Qp} \rho_w d^5 n_p^2$
 Dengan $K_{Qp} = 0,0748$, $d = 0,1578$, $n_p = 42$,
 Maka
 $Q_p = K_{Qp} \rho_w d^5 n_p^2 = 0,0748 \cdot 1,025 \cdot 0,1578 \cdot 42 = 0,0132 \text{ kNm}$

D. Perhitungan parameter motor DC shunt

Dalam kasus perhitungan parameter motor, maka diperlukan data utama motor DC *shunt*:
Daya motor $P_m \geq$ daya terpasang P_i , P_m ditentukan menggunakan Tabel 2.9.
 $P_m = 2200 \text{ W}$
 Putaran motor nominal = 1800 rpm
 Tegangan terminal $V_t = 24 \text{ V}$, mengikuti tegangan nominal dari baterai lead acid.
 Ditentukan efisiensi motor $\eta_m = 0,7$.
 $n_m = \text{rpm}/60 = 1800/60 = 30 \text{ rps}$
 Diameter maksimal D_{maks} dihitung menggunakan persamaan (10):
 $D_{maks} = v_a / (\pi n_m)$
 Ditentukan kecepatan linier motor $v_a = 13,25 \text{ m/s}$.
 $D_{maks} = 13,25 / (3,1416 \cdot 30) = 0,1406 \text{ m}$

Koefisien keluaran motor C_O dihitung menggunakan persamaan:
 $C_O = \pi^2 B_{av} ac$
 Beban magnetik B_{av} sebagai fungsi D ditentukan menggunakan Gambar 6. Dengan $D_{maks} = 0,1406 \text{ m}$,
 $B_{av} = 0,125$
 Beban elektrik ac sebagai fungsi D ditentukan menggunakan Gambar 7. Dengan $D_{maks} = 0,1406 \text{ m}$,
 $ac = 30000$;
 Maka
 $C_O = 3,1416^2 \cdot 0,125 \cdot 30000 = 37011$
 Jumlah kutub sebagai fungsi D ditentukan menggunakan Gambar 8. Dengan $D_{maks} = 0,1406$, jumlah kutub $p = 2$.
 Diameter jangkar dihitung menggunakan persamaan (11):

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_a p}{C_O \pi \psi n_m}}$$

 Daya jangkar $P_a =$ daya motor mekanik $P_m = 2200 \text{ W}$. Ditentukan $\psi = 0,7$.

$$D = \sqrt[3]{\frac{2200 \cdot 2}{37011 \cdot 3,1416 \cdot 0,7 \cdot 30}} = 0,1217 \text{ m}$$

 Kisar kutub τ dihitung menggunakan persamaan:
 $\tau = \pi D / p = 3,1416 \cdot 0,1217 / 2 = 0,1911 \text{ m}$
 Panjang jangkar dihitung menggunakan persamaan (12):
 $L = \psi \tau = 0,7 \cdot 0,1911 = 0,1338 \text{ m}$
 Tegangan terinduksi jangkar E_a dihitung menggunakan persamaan (19):
 $E_a = V_t - V_{Ra}$
 Tegangan jatuh jangkar V_{Ra} dihitung menggunakan persamaan (13):
 $V_{Ra} = \text{persen } V_{Ra} V_t$
 Persentase arus medan I_f dan tegangan drop jangkar V_{Ra} menggunakan gambar 9.
 $\text{Parpm} = P_a \cdot \text{rpm} = 3960000$
 $\text{persen } I_f = 0,19/100$ dan $\text{persen } V_{Ra} = 2,1/100$.
 $V_{Ra} = \text{persen } V_{Ra} V_t = (2,1/100) \cdot 24 = 0,5040 \text{ V}$
 Maka tegangan induksi jangkar E_a ,
 $E_a = V_t - V_{Ra} = 24 - 0,5040 = 23,4960 \text{ V}$
 I_f dihitung menggunakan persamaan (14):
 $I_f = \text{persen } I_f I_t$
 Dengan mengabaikan I_f maka arus jangkar I_a sama dengan arus terminal. Arus terminal I_t dihitung menggunakan persamaan (15):
 $I_t = P_m / (\eta_m \cdot V_t) = 2200 / (0,7 \cdot 24) = 130,9524 \text{ A}$
 $I_f = (0,19/100) \cdot 130,9524 = 0,2488 \text{ A}$
 Arus jangkar I_a dihitung menggunakan persamaan (18):
 $I_a = I_t - I_f = 130,7036 \text{ A}$
 Fluksi per kutub Φ dihitung menggunakan persamaan (17):
 $\Phi = B_{av} \tau L$
 $= 0,125 \cdot 0,1911 \cdot 0,1338$
 $= 0,0032 \text{ Wb}$
 Resistansi jangkar R_a :
 $R_a = V_{Ra} / I_a$
 $= 0,5040 / 130,7036$
 $= 0,0039 \Omega$
 Effisiensi motor η_m menjadi:
 $\eta_m = P_{out} / P_{in} = (E_a I_a) / (V_t I_t)$
 $= 23,496 \cdot 130,7036 / 24 \cdot 130,9524$
 $= 0,97714$

E. Perhitungan torsi dan kecepatan motor DC shunt

Konstanta jangkar K_a dihitung menggunakan persamaan (3):

$$P_a = E_a I_a = T \omega_m = K_a \Phi I_a \omega_m$$

Dengan mengabaikan rugi poros dengan bantalan,

$$P_a = E_a I_a = 23,4960 \cdot 130,7036 = 3071 \text{ W}$$

$$T_a = P_a / (2 \pi n_m)$$

$$= 3071 / (2 \cdot 3,1416 \cdot 30) = 16,292 \text{ Nm}$$

$$K_a = T_a / (\Phi I_a)$$

$$= 16,292 / (0,0043 \cdot 130,7036) = 38,9891$$

Kecepatan sudut ω_m dihitung menggunakan

persamaan (21).

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \Phi} - \frac{E_a}{(K_a \Phi)^2} T_a$$

Peningkatan T adalah 0,1 Nm secara bertahap.

Maka T berturut-turut adalah 16,392; 16,492; 16,592; dst.

Pada iterasi 1, T = 16,392 Nm, maka ω , n, dan I adalah:

$$\omega = 188,47 \text{ rad/s}$$

$$n = 60\omega / (2\pi) = 60 \cdot 188,47 / (2 \cdot 3,1416) = 1799,8 \text{ rpm}$$

$$I = T / (K_a \Phi) = 16,392 / (38,989 \cdot 0,0032) = 131,51 \text{ A}$$

Pada iterasi ke-2, T = 16,492 Nm, maka ω , n, dan I

adalah:

$$\omega = 188,45 \text{ rad/s}$$

$$n = 60\omega / (2\pi) = 60 \cdot 188,45 / (2 \cdot 3,1416) = 1799,5 \text{ rpm}$$

$$I = T / (K_a \Phi) = 16,492 / (38,989 \cdot 0,0032) = 132,31 \text{ A}$$

Pada iterasi ke-3, T = 16,592 Nm, maka ω , n, dan I

adalah:

$$\omega = 188,42 \text{ rad/s}$$

$$n = 60\omega / (2\pi) = 60 \cdot 188,42 / (2 \cdot 3,1416) = 1799,3 \text{ rpm}$$

$$I = T / (K_a \Phi) = 16,592 / (38,989 \cdot 0,0032) = 133,11 \text{ A}$$

Peningkatan torsi menyebabkan peningkatan arus jangkar. Ketika I telah mencapai 125% dari I_a , maka motor harus dalam keadaan trip. Oleh karena itu, proses perhitungan berhenti saat $I \leq 125\% I_a$.

Proses perhitungan berhenti pada iterasi ke-40, dengan T=20,292 Nm, maka ω , n, dan I adalah:

$$\omega = 187,5 \text{ rad/s}$$

$$n = 60\omega / (2\pi) = 60 \cdot 187,5 / (2 \cdot 3,1416) = 1790,5 \text{ rpm}$$

$$I = T / (K_a \Phi) = 20,292 / (38,989 \cdot 0,0032) = 162,79 \text{ A}$$

Hasil dari perhitungan iterasi dapat dilihat dalam Tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4.1. Hasil Perhitungan Iterasi

i	T(Nm)	I(A)	ω (rad/s)	n(rpm)
1	16.392	131.51	188.47	1799.8
2	16.492	132.31	188.45	1799.5
3	16.592	133.11	188.42	1799.3
4	16.692	133.91	188.40	1799.1
5	16.792	134.71	188.37	1798.8
6	16.892	135.52	188.35	1798.6
7	16.992	136.32	188.32	1798.3
8	17.092	137.12	188.30	1798.1
9	17.192	137.92	188.27	1797.9
10	17.292	138.73	188.25	1797.6

11	17.392	139.53	188.22	1797.4
12	17.492	140.33	188.20	1797.2
13	17.592	141.13	188.17	1796.9
14	17.692	141.94	188.15	1796.7
15	17.792	142.74	188.12	1796.4
16	17.892	143.54	188.10	1796.2
17	17.992	144.34	188.07	1796.0
18	18.092	145.14	188.05	1795.7
19	18.192	145.95	188.02	1795.5
20	18.292	146.75	188.00	1795.3
21	18.392	147.55	187.97	1795.0
22	18.492	148.35	187.95	1794.8
23	18.592	149.16	187.92	1794.5
24	18.692	149.96	187.90	1794.3
25	18.792	150.76	187.88	1794.1
26	18.892	151.56	187.85	1793.8
27	18.992	152.36	187.83	1793.6
28	19.092	153.17	187.80	1793.4
29	19.192	153.97	187.78	1793.1
30	19.292	154.77	187.75	1792.9
31	19.392	155.57	187.73	1792.7
32	19.492	156.38	187.70	1792.4
33	19.592	157.18	187.68	1792.2
34	19.692	157.98	187.65	1791.9
35	19.792	158.78	187.63	1791.7
36	19.892	159.58	187.60	1791.5
37	19.992	160.39	187.58	1791.2
38	20.092	161.19	187.55	1791.0
39	20.192	161.99	187.53	1790.8
40	20.292	162.79	187.50	1790.5
41	20.392	163.60	187.48	1790.3

Dari tabel 4.1, dapat diperoleh karakteristik putaran sebagai fungsi dari torsi motor dc shunt seperti terlihat pada Gambar 4.1. Penambahan torsi pada motor menyebabkan putaran motor berkurang.



Gambar 4.1. Karakteristik Putaran-Torsi Motor DC Shunt

F. Perhitungan kapasitas baterai

$$I_t = I_f + I_a = 130,95 \text{ A}$$

Ditentukan $k = 1,13$ dan $t = 1$ jam. Maka kapasitas baterai C dihitung menggunakan persamaan (24):

$$C = t I_t^k = 246,8 \text{ Ah}$$

Energi total E_t dalam 1 jam adalah $V_t C = 5923,1$ watt Jam

Energi total $E_t =$ energi baterai $= E$. Jika digunakan baterai dengan tegangan $V_0 = 24 \text{ V}$ dan kapasitas $C_0 = 65 \text{ Ah}$, tegangan motor = tegangan baterai $= V_0$, maka jumlah baterai N yang terhubung paralel, dihitung menggunakan persamaan (23):

$$E = (N C_0) V_0 = C V_0$$

$$N = 3,7969 = 4 \text{ buah}$$

Setelah menentukan kapasitas beban baterai, maka besar energi yang disuplai oleh panel surya dihitung menggunakan persamaan (25):

$$E_{PS} = 30\% E_B = 0,3 \cdot 5923,1$$

$$E_{PS} = 1776,9 \text{ Watt jam}$$

Asumsi rugi-rugi (losses) pada sistem dianggap sebesar 15%, maka total energi sistem panel surya E_T dihitung menggunakan persamaan (26):

$$E_T = E_{PS} + 15\% E_{PS} = 1776,9 + 0,15 \cdot 1776,9$$

$$E_T = 2043,5 \text{ Watt jam}$$

Diambil data insolasi terendah matahari adalah 3,91 jam. Faktor penyesuaian f_p pada kebanyakan instalasi panel surya adalah 1,1. Kapasitas panel surya C_{PS} dihitung menggunakan persamaan (27):

$$C_{PS} = f_p \cdot (E_T / \text{insolasi matahari}) = 1,1 \cdot (2043,5 / 3,91)$$

$$C_{PS} = 574,89 \text{ Wp}$$

Dengan menggunakan panel surya 200Wp, jumlah panel surya yang dibutuhkan adalah:

$$N_{PS} = C_{PS} / 200$$

$$N_{PS} = 2,8744 = 3 \text{ buah}$$

Berat motor $B_m = 7 \text{ kg}$, Berat baterai $B_B = 4 \cdot 15 = 60 \text{ kg}$, Berat panel surya $= 3 \cdot 17 = 51 \text{ kg}$. Kapasitas berat speedboat B_S dihitung menggunakan persamaan (28):

$$B_S = \nabla - B_m - B_B - B_{PS}$$

$$= 969 - 7 - 60 - 51$$

$$= 851 \text{ kg}$$

Asumsi berat 1 orang $= 100 \text{ kg}$, maka jumlah penumpang N_p adalah:

$$N_p = B_S / 100 = 851 / 100$$

$$= 8,51 = 8 \text{ orang}$$

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah:

1. Kapasitas motor DC shunt yang diperlukan untuk menggerakkan speedboat:
 - Daya nominal $P_m = 2200 \text{ W}$
 - Putaran nominal $= 1800 \text{ rpm}$
 - Tegangan $V_t = 24 \text{ V}$
 - Diameter $D = 0,1217 \text{ m}$
 - Panjang $L = 0,1338 \text{ m}$
 - Arus medan $I_f = 0,2488 \text{ A}$
 - Tegangan jatuh jangkar $V_{Ra} = 0,5040 \text{ V}$
 - Arus beban penuh $I_a = 130,7036 \text{ A}$
 - Resistansi jangkar $R_a = 0,0039 \Omega$
 - Efisiensi motor $= 0,9771$
2. Pada kondisi beban penuh, putaran motor 1800 rpm, arus jangkar motor 130,7036 A dan torsi motor 16,292 Nm. Pada kondisi arus jangkar maksimal 163,3795 A, diperoleh torsi maksimal 20,292 Nm dan putaran motor menjadi 1790,5 rpm.
3. Kapasitas akumulator yang diperlukan untuk memberikan suplai daya ke motor DC shunt selama satu jam adalah 246,8 Ah. Energi baterai dalam satu jam adalah 5923,1 W jam. Sehingga membutuhkan empat buah baterai 24 V 65 Ah terhubung paralel dan tiga buah panel surya 200 Wp.

B. Saran

Penelitian ini masih kurang sempurna dikarenakan tidak adanya pengukuran secara langsung sehingga nilai parameter-parameter dari motor kurang akurat. Selain itu keterbatasan alat juga menjadi kendala pada penelitian ini, sehingga tidak dapat dilakukan analisis transien dari motor dc.

REFERENSI

- [1] Chandra, H., 2010, *Kajian Aplikasi Sel Surya Sebagai Sumber Tenaga Penggerak Kapal Tanpa Bbm*, BPPKP Kementerian Kelautan dan Perikanan: Jakarta.
- [2] ECEN 4517/5517, *Lecture: Lead-acid batteries*.
- [3] Fuhs, Allen., *Chapter 6: Multifaceted Complexity of Batteries*.
- [4] Karlsten, A.T., 2012, *On Modeling of a Ship Propulsion System for Control Purposes*, Norwegia.
- [5] Man Diesel & Turbo, 2011, *Basic Principles of Ship Propulsion*, Denmark.
- [6] Molland, A. F., 2011, *Ship Resistance and Propulsion*, Cambridge University Press: United States of America.
- [7] Sawhney, A. K., 1970, *Electrical Machine Design*, D. R. Printing Service: Delhi.
- [8] Sen, P. C., 1997, *Principles of Electrical Machines and Power Electronics*, Lehigh Press: United States of America.
- [9] Vutetakis, D. G., 2001, *The Avionics Handbook Ch. 10: Batteries*, CRC Press: LLC.