

PENGEMBANGAN MODEL DAN UJI EKSPERIMENTAL PENGATURAN PUTARAN MOTOR LISTRIK DC

Lewi, Andareas Pangkung, Remigius Tandioga¹⁾

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan model matematika motor DC dan program simulasinya. Respon transien motor dc sangat cepat sehingga sulit diamati dengan pengukuran secara langsung. Untuk itu diperlukan suatu simulasi untuk mengamatinnya, sehingga dibutuhkan pemodelan dari motor dc tersebut. Berhubung banyak motor yang tidak dilengkapi dengan data parameter yang diperlukan dalam simulasi, maka dibutuhkan suatu pengujian untuk mendapatkan parameter-parameter motor dc tersebut. Dalam penelitian ini digunakan motor DC eksitasi terpisah pada kondisi arus eksitasi yang konstan. Parameter yang akan dicari adalah tahanan kumparan jangkar, R_a , induktansi kumparan jangkar, L_a , konstanta torsi motor, K_m , momen inersia, J , dan koefisien gesekan liat, B . R_a dan L_a ditentukan dari pengujian statis, K_m dan B ditentukan dari pengujian dinamis, dan J diperoleh dari data sheet motor DC. Hasil yang diperoleh $R_a = 3,028 \text{ } [\Omega]$, $L_a = 0,028 \text{ } [H]$, $J = 0,0094 \text{ } [kg\cdot m^2]$, $B = 0,0058 \text{ } [Nm/s]$ dan $K_m = 0,955 \text{ } [Nm/A]$ pada arus eksitasi 0,3 A. Pada kondisi nominal $B = 0,0007 \text{ } [Nm/s]$ dan $K_m = 1,137 \text{ } [Nm/A]$. Dari hasil simulasi pada kondisi berbeban dengan variasi torsi beban diperoleh perbedaan kecepatan putaran motor DC hasil pengukuran dan hasil simulasi rata-rata 1,449%. Dengan simulasi model motor DC, kondisi transient, seperti arus start yang besar dan cepat dapat diamati.

Kata kunci: Pemodelan, motor DC, program simulasi.

I. PENDAHULUAN

Motor dc merupakan salah satu mesin penggerak yang biasa digunakan di industri. Pada penggunaan motor arus searah diperlukan kontrol torsi dan kecepatan dengan rentang yang lebar untuk memenuhi kebutuhan aplikasi.

Suatu sistem dapat dipelajari dengan pengamatan langsung atau pengamatan pada model sistem tersebut. Karena respon transien motor dc sangat cepat, sehingga sulit diamati dengan pengukuran secara langsung. Untuk itu diperlukan suatu simulasi untuk mengamatinnya. Dengan demikian dibutuhkan pemodelan dari motor dc tersebut. Banyak motor yang digunakan di industri, termasuk yang ada di Lab. Teknik Konversi Energi tidak dilengkapi dengan data parameter yang diperlukan dalam simulasi. Oleh sebab itu dibutuhkan suatu pengujian untuk mendapatkan parameter-parameter motor dc tersebut.

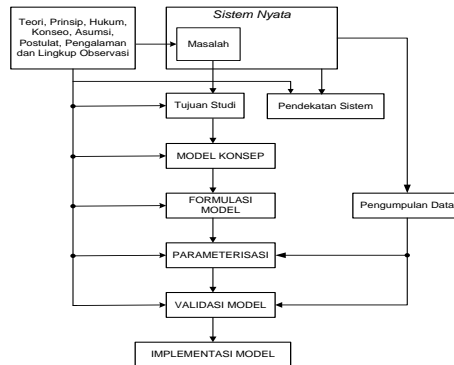
¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

A. Pemodelan Sistem

Menurut Sridadi (2009), model adalah suatu representasi atau formalisasi dalam bahasa tertentu dari suatu system nyata (realitas). Model berisi informasi tentang suatu sistem yang dibuat dengan tujuan untuk mempelajari perilaku sistem yang sebenarnya. Kebanyakan model untuk simulasi biasanya dalam bentuk matematika. Sebelum dapat mensimulasikan sistem maka terlebih dahulu harus dikembangkan model dari sistem yang bersangkutan. Tujuan dari studi pemodelan adalah menentukan informasi (variabel dan parameter) yang dianggap penting untuk dikumpulkan, sehingga tidak ada model yang unik.

Menurut Santoso (2002), pemodelan (*modelling*) berarti mengubah sistem dalam dunia nyata (*real world*) menjadi bentuk persamaan matematika. Modelling juga dapat diartikan sebagai usaha menirukan kelakuan proses "real world system" dalam usaha untuk memahaminya. Hal tersebut dilakukan dengan menyusun hubungan-hubungan fisik dari sistem sesungguhnya dengan menggunakan hukum-hukum ilmu alam (fisika dan atau kimia). Tanggapan sistem dinamik dapat diperoleh, jika persamaan differensial tersebut dicari solusinya. Banyak metode untuk mencari solusi persamaan differensial sistem, misalnya dengan menggunakan metode Transformasi Laplace atau metode ruang keadaan (*state space*).

Menurut Sridadi (2009), langkah-langkah pengembangan model seperti pada Gambar 1.

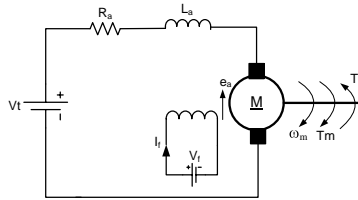


Gambar 1. Langkah-langkah pengembangan model

Penggunaan model matematika memungkinkan kita dapat mengembangkan teori kontrol yang menyatu. Untuk mengembangkan suatu sistem maka sebelum diimplementasikan pertama harus memformulasikan model matematikanya sesuai dengan komponen dan tujuan kinerja sistem, kemudian menterjemahkan model tersebut ke dalam program komputer untuk mensimulasikan sistem tersebut. Dari simulasi tersebut, kita dapat menentukan ukuran komponen yang diperlukan.

B. Motor Listrik DC

Gambar 2 memperlihatkan diagram skematik motor dc yang dikontrol melalui jangkarnya (mengatur tegangan terminalnya).



Gambar 2. Diagram skematik motor dc eksitasi terpisah

Keterangan:

- ω_m : kecepatan sudut dari poros motor, [rad/s]
- R_a : tahanan kumparan jangkar, [Ω]
- L_a : induktansi kumparan jangkar, [H]
- i_a : arus kumparan jangkar, [A]
- i_f : arus medan / eksitasi, [A]
- V_t : tegangan yang diberikan (tegangan jangkar), [V]
- e_a : gaya gerak listrik (emf) balik, [V]
- T_m : torsi yang diberikan motor, [N-m]
- K_m : konstanta torsi motor, [Nm/A]
- K_b : konstanta emf balik, [V/(rad/s)]
- J : momen inersia dari beban, [kg-m²]
- B : koefisien gesekan liat, [Nm/s]

Torsi T_m yang dihasilkan motor adalah berbanding lurus dengan hasil kali dari arus kumparan I_a dan fluks celah udara. Karena arus medan konstan, maka fluks celah udara konstan, sehingga torsi yang dihasilkan motor sebanding dengan arus jangkar i_a :

$$T_m = K_{t_f} \cdot i_a = K_m i_a \tag{1}$$

Bila kumparan magnet berputar, maka tegangan induksi balik sebanding dengan hasil kali fluks dan kecepatan sudut. Untuk fluks yang konstan, tegangan induksi e_a berbanding lurus dengan kecepatan sudut ω_m atau:

$$e_a = K_b \cdot \omega_m = K_m \omega_m \tag{2}$$

Kecepatan motor dc dikontrol oleh tegangan kumparan jangkar V_t . Persamaan diferensial rangkaian listriknya :

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a = V_t \tag{3}$$

Persamaan dinamik untuk sistem mekanik adalah:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L = T_m = K_m i_a \tag{4}$$

Dengan menganggap bahwa semua syarat awal nol, maka transformasi Laplace persamaan (3) dan (4) adalah:

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + K_m \cdot \Omega_m(s) = V_t(s) \tag{5}$$

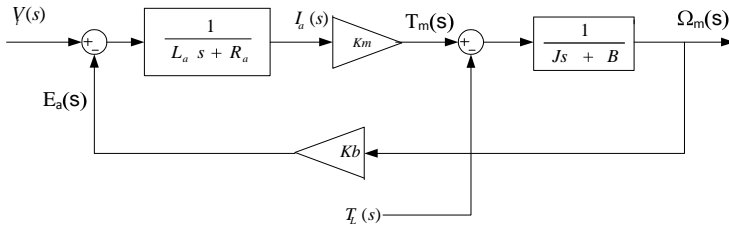
$$(J s + B) \Omega_m(s) + T_L(s) = K_m I_a(s) \tag{6}$$

Persamaan ini dapat dimodifikasi menjadi :

$$I_a(s) = \frac{1}{L_a s + R_a} [V_t(s) - E_a(s)] \quad (7)$$

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{(J s + B)} [T_m(s) - T_L(s)] \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan (7) dan (8) diperoleh diagram blok motor DC seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram blok motor dc

Dengan mengambil i_a dan ω_m sebagai output (y_1 dan y_2), dan V_t dan T_L sebagai input (u_1 dan u_2), maka persamaan diferensial pada persamaan (3) dan (4) dapat diturunkan persamaan keadaannya sebagai berikut.

Misalnya: $y_1 = x_1$, $y_2 = x_2$; maka:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} x_1 - \frac{K_m}{L_a} x_2 + \frac{1}{L_a} u_1$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{K_m}{J} x_1 - \frac{B}{J} x_2 - \frac{1}{J} u_2$$

sehingga diperoleh persamaan keadaan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_m}{L_a} \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

dan persamaan outputnya adalah:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

C. MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory), merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh The Matwork.Inc. MATLAB menggunakan teknik-teknik khusus *berbasis matriks* untuk menyelesaikan persoalan. Dengan cara ini ternyata banyak kemudahan yang diperoleh pemakai, selain cara pemrogramannya yang tidak rumit, solusi masalah yang dinyatakan MATLAB adalah mirip dengan apa yang

dituliskan secara matematis. Melalui kemampuan grafisnya, MATLAB menyediakan banyak pilihan untuk visualisasi data. MATLAB juga menyediakan sekelompok alat penyelesaian masalah untuk problem-problem khusus yang dinamakan *Toolbox*.

Simulink adalah sebuah tool dalam MATLAB untuk memodelkan, menganalisa dan mensimulasikan sistem-sistem fisik dan matematik, termasuk sistem yang memiliki elemen nonlinier serta sistem kontinyu dan sistem diskrit. Sebagai sebuah tool yang istimewa dalam MATLAB, simulink menambahkan banyak kemampuan yang spesifik untuk sistem dinamik yang bisa menerima semua fungsi utama MATLAB.



Gambar 5. Menu Simulink yang dapat digunakan untuk simulasi sistem kontinyu

Beberapa peralatan listrik, termasuk motor listrik (sub-sistem listriknya) dapat dimodelkan dengan elemen resistor dan induktor. Lewi (2003) telah membuat pemodelan beban-beban listrik yang dimodelkan dengan elemen resistor, induktor dan kapasitor, dan mensimulasikannya menggunakan program Matlab. Hawe (2003) telah mengevaluasi respon transient motor dc dengan menggunakan SIMULINK MATLAB. Respon motor dc dianalisis dengan menggunakan model motor dalam bentuk diagram kotak. Harifuddin (2008), melakukan pemodelan dan pengendalian pada motor DC yang telah diketahui parameternya.

Berdasarkan hasil-hasil yang telah diperoleh sebelumnya, maka perlu dilakukan penelitian lanjut untuk mendapatkan model motor DC yang belum diketahui parameternya. Parameter motor DC dicari melalui pengujian statis dan beban nol, kemudian menentukan model simulasinya. Hasil simulasi dibandingkan dengan hasil pengujian.

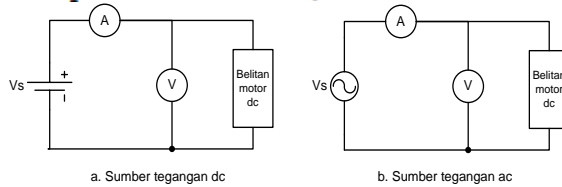
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Sistem Kontrol Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang pada bulan Mei s.d. November 2012. Penelitian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

Tahap pertama, melakukan pengujian statis berupa pengukuran tegangan dan arus pada belitan motor. Rangkaian pengujian seperti pada Gambar 6. Dari data hasil

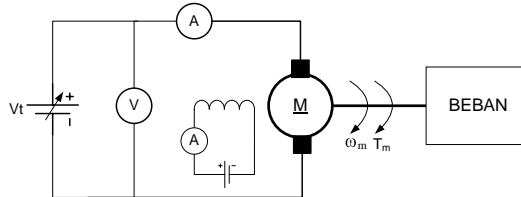
pengukuran Gambar 6a, diperoleh tegangan V_1 dan I_1 , dan hasil pengukuran Gambar 6b, diperoleh V_2 dan I_2 . Berdasarkan data tersebut parameter R_a dan L_a dihitung dengan persamaan (11).

$$R_a = \frac{V_1}{I_1} \text{ dan } L_a = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_2}{I_2}\right)^2 - R_a^2}}{2\pi f} \quad (11)$$



Gambar 6. Rangkaian pengukuran tegangan dan arus pada belitan motor dc

Tahap kedua, pengujian motor dalam keadaan tanpa beban dan berbeban dengan rangkaian seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian pengujian dinamis motor dc dalam keadaan tanpa beban dan berbeban.

Dari pengujian beban nol pada kondisi arus eksitasi yang konstan, diperoleh tegangan jangkar (V_t), arus jangkar (I_a) dan putaran (n). Berdasarkan data tersebut, dengan menggunakan Persamaan (1), (2), (3) dan (4), parameter K_m dan B dapat dihitung.

Tahap ketiga, pembuatan dan pengujian program simulasi model konsep motor dc.

Indikator pencapaian: simulasi dianggap bagus (diterima) jika perbedaannya dengan hasil pengukuran kurang dari 5%. Jika hasil simulasi tidak sesuai dengan hasil pengujian maka model sistem yang diperoleh sebelumnya, dimodifikasi sampai hasil simulasi model sama dengan hasil pengujian.

Tahap keempat, pembuatan dan pengujian program simulasi model motor dc berdasarkan data *name plate* motor.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian

Data Motor Listrik yang Diuji

Supply voltage 400 V

Rated Current	14,2 A
Rated Power	5 kW
Rated exc. Current	0,56 A
Rated speed	3000 rpm
Insulation class	F

1. Pengukuran Tegangan dan Arus pada Belitan Motor DC

Berdasarkan rangkaian pengukuran tegangan dan arus pada belitan jangkar motor dc seperti pada Gambar 6, diperoleh data sebagai berikut.

Tabel 1. Metode volt-ampmeter dengan sumber tegangan DC

$V_1[V]$	$I_1[A]$	$R_a[\Omega]$
3,4	1	3,400
4,4	1,5	2,933
5,5	2	2,750
Rata-rata		3,028

Tabel 2. Metode volt-ampmeter dengan sumber tegangan AC

$V_2[V]$	$I_2[A]$	$L_a [H]$
5	0,65	0,023
10	1,1	0,027
15	1,6	0,028
20	2,05	0,030
25	2,5	0,030
30	2,95	0,031
35	3,45	0,031
40	4,35	0,028
Rata-rata		0,028

Keterangan:

R_a dan L_a dihitung dengan Persamaan (11).

2. Pengujian Dinamis

Pengujian dilakukan pada kondisi arus eksitasi motor konstan, $I_f = 0,3 A$.

a. Pengujian Beban Nol

Tabel 3. Data Pengujian pada Kondisi Beban Nol

No.	$V_t [V]$	$I_a [A]$	$n (rpm)$
1.	60	0,65	610
2.	90	0,7	890
3.	120	0,725	1170
4.	150	0,745	1480
5.	180	0,775	1730
6.	210	0,825	2020

b. Pengujian pada Kondisi Berbeban

Tabel 4. Data Pengujian pada Kondisi Berbeban

No.	Motor DC			Generator DC			
	$V_t [V]$	$I_a [A]$	$n (rpm)$	$V_{ex} [V]$	$I_{ex} [A]$	$V_g [V]$	$I_g [A]$
1.	210	0,95	2010	165	0,3	180	0
2.	210	2,15	1970	117	0,235	174	1,65
3.	210	3,1	1940	117	0,235	165	3,45
4.	210	3,9	1930	117	0,235	165	5,5
5.	210	5	1900	117	0,235	156	7
6.	210	5,8	1880	117	0,235	153	8,6
7.	210	6,6	1860	117	0,235	147	8,9

B. Pembahasan

1. Penentuan Parameter Motor DC

Berdasarkan pengujian statis motor DC, diperoleh parameter $R_a = 3,028 \Omega$, dan $L_a = 0,028 H$. Dari data percobaan dinamis beban nol, dengan menggunakan Persamaan (1), (2), (3) dan (4), parameter K_m dan B dapat dihitung, sebagai berikut.

Pada kondisi *steady state*, Persamaan (3) dapat ditulis $e_a = V_t - I_a \cdot R_a$.

Dengan menggunakan data No.1, diperoleh: $e_a = 60 - 0,65 \cdot 3,028 = 58,032 V$.

Dengan menggunakan Persamaan (2), diperoleh:

$$K_m = K_b = e_a / \omega_m = 58,032 / (2\pi \cdot 610 / 60) = 0,909.$$

Dengan menggunakan Persamaan (1), diperoleh:

$$T_m = K_m \cdot I_a = 0,909 \cdot 0,65 = 0,591 \text{ Nm}$$

Pada kondisi *steady state*, Persamaan (4) dapat ditulis:

$$B = (T_m - T_L) / \omega_m = 0,591 / (2\pi \cdot 610 / 60) = 0,0093.$$

Hasil selengkapnya diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan parameter K_m dan B motor DC

No.	$V_t [V]$	$I_a [A]$	$n (rpm)$	$w [rad/s]$	E_a	K_b	P_m	T	K_m	B
1.	60	0,65	610	63,847	58,032	0,909	37,721	0,591	0,909	0,0093
2.	90	0,7	890	93,153	87,880	0,943	61,516	0,660	0,943	0,0071
3.	120	0,725	1170	122,460	117,805	0,962	85,408	0,697	0,962	0,0057
4.	150	0,745	1480	154,907	147,744	0,954	110,069	0,711	0,954	0,0046
5.	180	0,775	1730	181,073	177,653	0,981	137,681	0,760	0,981	0,0042
6.	210	0,825	2020	211,427	207,502	0,981	171,189	0,810	0,981	0,0038
<i>Rata-rata</i>						0,955			0,955	0,0058

B rata-rata = **0,0058 [Nm/s]**, $K_m[\text{Nm/A}] = K_b[\text{Vs/rad}]$ sama dengan **0,955**.

Berdasarkan data sheet motor DC (Howe, 2003) dipilih $J = 0,0094 [\text{kg/m}^2]$.

Dari hasil ini, diperoleh model matematika motor DC sebagai berikut.

$$I_a(s) = \frac{1}{0,028s + 3,028} \left[V_t(s) - E_a(s) \right], \quad E_a(s) = 0,955 \cdot \Omega_m(s).$$

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{(0,0094s + 0,0058)} \left[T_m(s) - T_L(s) \right], \quad T_m(s) = 0,955 \cdot I_a(s)$$

di mana besaran input adalah V_t dan T_L , dan besaran output adalah I_a dan ω_m .

Dengan mengambil I_a dan ω_m sebagai output (y_1 dan y_2), dan V_t dan T_L sebagai input (u_1 dan u_2), maka persamaan model motor DC dalam bentuk ruang keadaan (*state space*) adalah sebagai berikut.

Persamaan keadaannya adalah:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,028 & -0,955 \\ 0,028 & 0,028 \\ 0,955 & -0,0058 \\ 0,0094 & 0,0094 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0,028 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0,0094 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

dan persamaan outputnya adalah:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

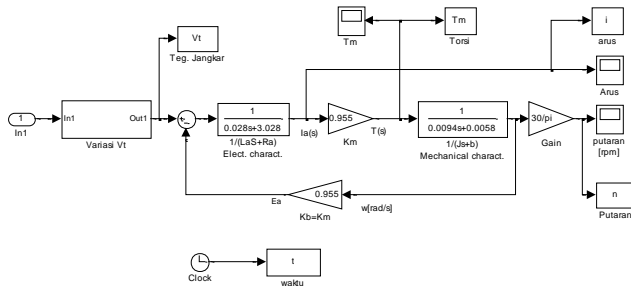
atau

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 30/\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

jika putaran dalam satuan rpm.

2. Simulasi Model Motor DC pada Kondisi Beban Nol dengan Variasi Tegangan Jangkar

Berdasarkan parameter motor DC yang telah diperoleh maka disusun model simulasi motor DC pada kondisi beban nol dengan variasi tegangan jangkar, seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Simulasi model Motor DC pada kondisi beban nol dengan variasi tegangan jangkar

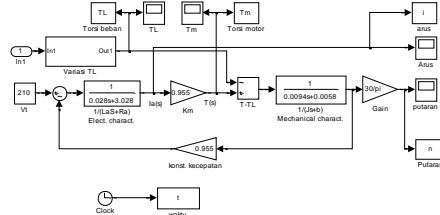
Tabel 6. Perbandingan kecepatan putaran motor DC hasil pengukuran (n) dan hasil simulasi (ns) dengan variasi tegangan jangkar

No.	Vt [V]	n (rpm)	ns (rpm)	□n [%]
1.	60	610	588,4	3,541
2.	90	890	882,6	0,831
3.	120	1170	1176,9	0,590
4.	150	1480	1471,1	0,601
5.	180	1730	1765,3	2,040
6.	210	2020	2059,5	1,955
Rata-rata				1,593

Dari hasil simulasi pada kondisi beban nol dengan variasi tegangan jangkar diperoleh perbedaan kecepatan putaran motor DC hasil pengukuran (n) dan hasil simulasi (ns) rata-rata 1,593%.

3. Simulasi Model Motor DC pada Kondisi Berbeban dengan Variasi Torsi Beban

Dengan menggunakan parameter yang telah diperoleh pada pengujian statis dan pengujian dinamis pada kondisi beban nol, maka pada kondisi berbeban (variasi torsi beban TL) diperoleh model simulasi seperti pada Gambar 9.



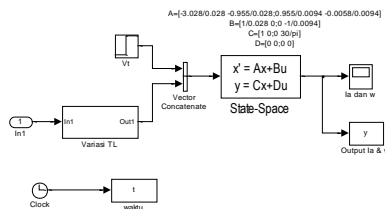
Gambar 9. Simulasi model Motor DC pada kondisi berbeban dengan variasi torsi beban

Dari hasil simulasi pada kondisi berbeban dengan variasi torsi beban diperoleh perbedaan kecepatan putaran motor DC hasil pengukuran (n) dan hasil simulasi (ns) rata-rata 1,449%.

Tabel 7. Perbandingan kecepatan putaran motor DC hasil pengukuran (n) dan hasil simulasi (ns) dengan variasi torsi beban

No.	TL [Nm]	n (rpm)	ns (rpm)	□n [%]
1.	0	2010	2059,5	2,463
2.	1,392	1970	2015,1	2,289
3.	2,803	1940	1971,5	1,624
4.	4,492	1930	1918	0,622
5.	5,491	1900	1885,8	0,747
6.	6,687	1880	1848,3	1,686
7.	6,720	1860	1846,8	0,710
<i>Rata-rata</i>				1,449

Dalam bentuk ruang keadaan (*state space*), model motor DC pada Gambar 9 ditunjukkan pada Gambar 10. Dari hasil simulasi motor DC dalam bentuk ruang keadaan pada kondisi berbeban dengan variasi torsi beban diperoleh perbedaan kecepatan putaran motor DC hasil pengukuran (n) dan hasil simulasi (ns) rata-rata 1,372%.



Gambar 10. Simulasi model Motor DC pada kondisi berbeban dengan variasi torsi beban dalam bentuk ruang keadaan.

Tabel 8. Perbandingan kecepatan putaran motor DC dalam bentuk ruang keadaan, hasil pengukuran (n) dan hasil simulasi (ns) dengan variasi torsi beban

No.	TL [Nm]	n (rpm)	ns (rpm)	□n [%]
1.	0	2010	2060,4	2,507
2.	1,392	1970	2016,7	2,371
3.	2,803	1940	1972,7	1,686
4.	4,492	1930	1920,1	0,513
5.	5,491	1900	1889,4	0,558
6.	6,687	1880	1852	1,489
7.	6,720	1860	1851,1	0,478
Rata-rata				1,372

4. Simulasi Model Motor DC Berdasarkan Data Name-Plate dengan Variasi Torsi beban

Berdasarkan data nominal motor listrik yang diuji maka beberapa parameter dapat dihitung sebagai berikut.

$$\text{Torsi output/beban nominal } T_L = \frac{5,5 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 3000 / 60} = 15,924 \text{ [N.m]}$$

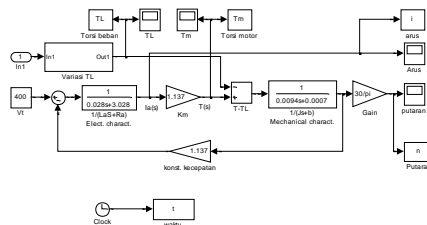
$$\text{Torsi motor, } T_m = \frac{E_a I_a}{2\pi n / 60} = \frac{(V_t - I_a \cdot R_a) I_a}{2\pi n / 60} = \frac{(400 - 14,2 \cdot 2,3 \cdot 208) \cdot 14,2}{2\pi \cdot 3000 / 60} = 16,145 \text{ [N.m].}$$

Berdasarkan Persamaan (1), $K_m = T_m / I_a = 16,145 / 14,2 = 1,137 \text{ [Nm/A]}$. Nilai ini berbeda dengan hasil pengujian, karena arus eksitasi yang digunakan adalah 0,3 A (arus eksitasi nominal 0,56 A). Berdasarkan Persamaan (4), $J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L = T$, dalam kondisi mantap (*steady state*), $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$, sehingga:

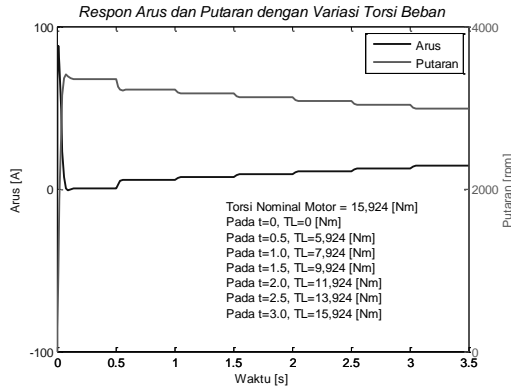
$B = (T - T_L) / \omega_m = (16,145 - 15,924) / (2\pi \cdot 3000 / 60) = 0,0007 \text{ [Nm/s]}$. Nilai ini berbeda dengan hasil pengujian, karena posisi motor listrik yang kurang ideal yang mengakibatkan besarnya rugi gesekan.

Gambar 11 memperlihatkan model motor DC berdasarkan data nominal motor dengan variasi torsi beban (besaran yang diamati adalah torsi motor, arus jangkar dan putaran motor). Gambar 12 memperlihatkan respon arus dan putaran dengan tegangan input 400 V, dengan variasi torsi beban sampai beban nominal.

Berdasarkan respon arus dan putaran motor DC, seperti pada gambar 12, nampak bahwa besarnya arus dan putaran hasil simulasi sama dengan nilai nominal arus dan putaran pada *name plate* motor.



Gambar 11. Simulasi model Motor DC berdasarkan data nominal motor dengan variasi torsi beban.



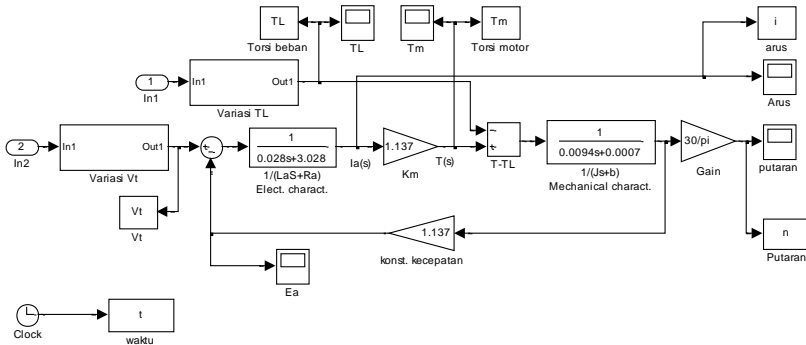
Gambar 12. Respon arus dan putaran motor DC dengan tegangan input nominal

5. Simulasi Model Motor DC Berdasarkan Data Name-Plate dengan Variasi Tegangan Jangkar

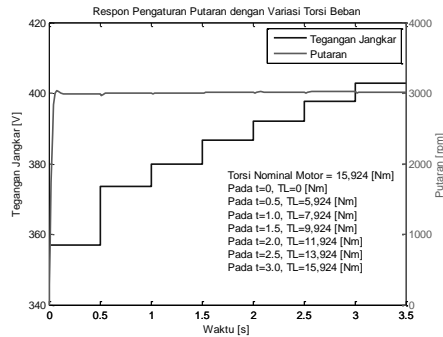
Jika diinginkan putaran motor konstan 3000 rpm dengan variasi torsi beban maka tegangan jangkar harus divariasikan.

Persamaan (3), $L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a = V_t$ pada kondisi tunak dapat ditulis:

$V_t = E_a + R_a \cdot I_a = K_b \cdot \omega + R_a \cdot I_a$. Berdasarkan persamaan ini maka V_t dapat diatur untuk mendapatkan putaran yang konstan. Model motor DC pada gambar 11 diubah menjadi seperti gambar 13. Hasil respon simulasinya diperlihatkan pada gambar 14.



Gambar 13. Simulasi model Motor DC berdasarkan data nominal motor dengan variasi torsi beban dan tegangan jangkar



Gambar 14. Respon putaran motor DC dengan dengan variasi torsi beban dan tegangan jangkar

Dari hasil respon putaran motor DC pada gambar 14, nampak bahwa putaran motor dapat diatur konstan dengan mengatur tegangan jangkar.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Model motor DC terdiri atas dua bagian utama, yaitu sub-sistem listrik dan sub-sistem mekanik. Bentuk transformasi Laplace sub-sistem listrik adalah

$$I_a(s) = \frac{1}{L_a s + R_a} \left[V_t(s) - E_a(s) \right] \quad \text{dan} \quad \text{sub-sistem mekanik adalah}$$

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{(Js + B)} \left[T_m(s) - T_L(s) \right]$$

2. Dalam penelitian diperoleh $R_a = 3,028 \Omega$, $L_a = 0,028 \text{ H}$, $B = 0,0058 \text{ [Nm/s]}$, $J = 0,0094 \text{ [kg/m}^2\text{]}$, $K_m[\text{Nm/A}] = K_b[\text{Vs/rad}]$ sama dengan 0,955 (penelitian dilakukan pada arus eksitasi 0,3 A). Pada kondisi nominal (arus eksitasi 0,56 A), $K_m[\text{Nm/A}] = K_b[\text{Vs/rad}]$ sama dengan 1,137 dan $B = 0,0007 \text{ [Nm/s]}$.
3. Perbedaan putaran motor hasil simulasi dengan hasil pengujian rata-rata hanya 1,5%. Dengan simulasi model motor DC, kondisi *transient*, seperti arus start yang besar dan cepat dapat diamati.

B. Saran-Saran

Perlu penelitian lebih lanjut mengenai hal-hal yang mempengaruhi perubahan parameter-parameter dari model motor DC.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Harifuddin. 2008. Pemodelan dan Pengendalian Motor DC Terkendali Jangkar. Jurnal Media Elektrik. Vol.3 No. 1.
- Hartanto, Thomas Wahyu Dwi & Y. Wahyu Agung Prasetyo. 2003. *Analisis dan Desain Sistem Kontrol dengan MATLAB*. Yogyakarta: ANDI.
- Howe, Tan Kiong. 2003. Evaluation of the Transient Response of a DC Motor using MATLAB/SIMULINK. Thesis. University of Queensland.
- Lewi. 2003. Pemodelan dan Simulasi Numerik Rangkaian Listrik. Jurnal Elekrika. Thn. I Ed.1.
- Santoso, Fendy. 2002. Pemodelan dan Simulasi Weight Feeder Clinker Di Finish Mill Area II-41 PT. Semen Gresik (Persero), Tbk. [Suatu Studi Kasus]. Jurnal Teknik Elektro. Vol. 2 No. 2. Surabaya.
- Sridadi, Bambang. 2009. Pemodelan dan Simulasi Sistem. Bandung: Informatika Bandung.
- Sutrisno, Imam. 2009. *Pemrograman Komputer dengan Software MATLAB*. Surabaya: ITS Press.
- The MathWorks. 2010. *Getting Started with MATLAB*. The MathWorks, Inc.
- The University of Michigan. Digital DC Motor Speed Control with PID Control. <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/>. Diakses 6 Desember 2007