

Pengendalian Kecepatan Motor DC Magnet Permanen Dengan Menggunakan Sensor Kecepatan Rotari

M. Wildan Hilmi, Soeprapto, dan Hery Purnomo

Abstrak— Pengendalian kecepatan motor dengan cara motor dikondisikan agar tidak mencapai torsi dan kecepatan maksimal merupakan salah satu cara untuk mendapatkan efisiensi konsumsi daya baterai pada suatu sistem sepeda listrik. Pada penelitian ini pengendalian kecepatan motor dilakukan dengan mengaktifkan motor dimana roda sepeda disimulasikan telah berputar pada kecepatan tertentu, sehingga motor tidak perlu berbeban besar seperti pada saat roda sepeda pertama kali berputar. Simulasi ini dilakukan dengan pengaturan kecepatan motor DC magnet permanen. Dimana pengaturan kecepatan suatu motor DC magnet permanen dilakukan dengan mengatur tegangan masukan motor. Besar tegangan diatur secara variabel sesuai dengan besar *duty cycle* (D). Karena besar V_{out} adalah hasil kali dari *duty cycle* dengan V_{in} . Sehingga dengan alat pengaturan kecepatan motor dc magnet permanen dengan menggunakan sensor kecepatan rotari ini dapat tercapai efisiensi konsumsi daya baterai pada sistem sepeda listrik.

Kata Kunci — Motor DC magnet permanen, *pulse width modulation*, *duty cycle*, DC Chopper.

I. PENDAHULUAN

ISU mengenai krisis bahan bakar fosil dan krisis energi menyebabkan maraknya pengembangan teknologi di segala bidang, terutama bidang transportasi. Karena di bidang transportasi ini merupakan pengkonsumsi bahan yang besar. Pada penelitian ini mencoba untuk membuat salah satu inovasi mengenai sepeda listrik. Dengan inovasi berupa *hybrid* energi antara energi kayuhan pengendara dengan putaran motor. Perbedaan inovasi ini dengan sepeda listrik yang lama adalah pada sisi efisiensi baterai dan efisiensi energi yang dikeluarkan oleh motor. Disini motor tidak perlu berada pada kondisi torsi maksimum, sebab motor aktif berputar pada saat roda berada pada kondisi berputar pula. Pada sisi kecepatan, motor juga tidak perlu bekerja penuh sesuai dengan kecepatan yang diinginkan pengendara, karena untuk mendapatkan kecepatan yang lebih, motor hanya perlu menghasilkan sedikit putaran.

M. Wildan Hilmi adalah kandidat dari Program Sarjana Strata-1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang (e-mail: wildanhilmi36@yahoo.com).

Soeprapto, dan Hery Purnomo merupakan staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang (e-mail: prapto1056@gmail.com; heryp@ub.ac.id)

Hal ini disebabkan motor aktif pada saat pengendara telah mencapai kecepatan tertentu. Dengan ini, berarti motor telah

bekerja lebih efisien. Dengan tercapainya kerja motor yang lebih efisien, maka efisiensi pada baterai juga tercapai, karena catu daya yang diberikan baterai untuk motor terminimalisir dengan kerja motor yang lebih efisien.

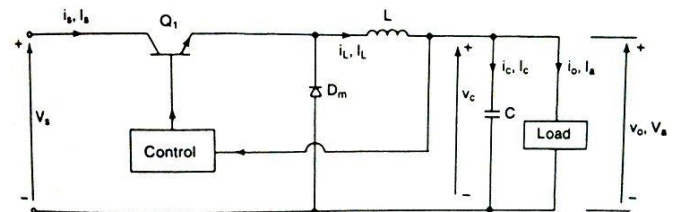
Sedangkan beberapa hal yang mejadi batasan masalah penelitian adalah :

- Perancangan ini hanya sampai pada perancangan alat pengaturan kecepatan motor DC magnet permanen dengan sensor kecepatan rotari.
- Tidak membahas mengenai penerapan langsung terhadap sepeda listrik.
- Tidak membahas mengenai penerapan langsung terhadap sepeda listrik.
- Motor yang digunakan adalah motor DC magnet permanen 12 V.
- Penggunaan motor DC magnet permanen 12V pada perancangan ini hanya digunakan untuk simulasi alat, bukan sebagai penggerak pada sepeda yang sebenarnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Driver Motor

Driver motor berfungsi sebagai rangkaian yang mengendalikan arus dan tegangan sebelum sinyal masuk sebagai masukan dari motor. Didalam suatu *driver* terdapat berbagai jenis dan metode pengaturan yang bertujuan mengatur keluaran dari rangkaian agar sesuai dengan apa yang dibutuhkan oleh motor. Di dalam *driver* motor terdapat rangkaian DC *chopper* yang berfungsi merubah tegangan DC yang konstan menjadi tegangan DC yang variabel.



Gb. 1 Rangkaian Umum DC Chopper Buck Regulator

Gb.1 merupakan rangkaian umum dari DC *chopper buck regulator*. Rangkaian *buck regulator* merupakan aplikasi dari rangkaian DC *chopper step down*. Dalam suatu *buck regulator*, nilai keluaran tegangan rata-rata V_a selalu lebih kecil dari pada nilai tegangan masukan V_s . Cara kerja dari rangkaian DC *chopper buck regulator* berada pada 2 mode operasi. Mode operasi dari rangkaian DC *chopper buck*

regulator ditunjukkan oleh gambar 2.14. Mode 1 bekerja ketika MOSFET Q1 kondisi *On*. Pada kondisi ini, arus mengalir dari sumber ke beban melewati induktor dan kapasitor, sehingga terjadi pengisian muatan (*charging*) pada induktor dan kapasitor tersebut. Sedangkan mode 2 bekerja ketika MOSFET Q1 berada pada kondisi *off*. Pada kondisi ini terjadi pelepasan muatan (*discharging*) oleh induktor berupa arus menuju beban melewati dioda *freewheel* (D_m). Pada kondisi ini arus disebut kontinyu, karena arus mengalir tanpa kembali melewati sumber. Sehingga arus mengalir kembali melewati induktor, kapasitor, dan beban, kemudian mengalir kembali melewati diode *freewheel* (D_m). Proses *discharging* ini terus berlangsung selama MOSFET berada pada kondisi *off*. [1]

Dengan asumsi arus pada induktor linear dari I_1 ke I_2 dalam selang waktu kT , maka:

$$\begin{aligned} V_s - V_a &= L \frac{I_2 - I_1}{t_1} \\ V_s - V_a &= L \frac{(\Delta I)}{t_1} \\ t_1 &= \frac{(\Delta I)L}{V_s - V_a} \end{aligned} \quad (1)$$

Ketika induktor mengalir secara linear dari I_2 ke I_1 dalam selang waktu $(T - kT)$, maka:

$$\begin{aligned} V_a &= L \frac{(\Delta I)}{t_2} \\ t_2 &= \frac{(\Delta I)L}{V_a} \end{aligned} \quad (2)$$

Dari persamaan 2.13 dan 2.14, maka:

$$\Delta I = \frac{(V_s - V_a)t_1}{L} = \frac{V_a t_2}{L} \quad (3)$$

Dengan mensubstitusikan $t_1 = kT$ dan $t_2 = (1-k)T$, maka hasil tegangan keluaran adalah:

$$V_a = k \cdot V_s \quad (4)$$

Dengan mengasumsikan tidak ada rugi daya pada MOSFET, $V_s \cdot I_s = V_a \cdot I_a = k \cdot V_s \cdot I_a$, maka arus rata-rata sumber adalah:

$$I_s = k \cdot I_a \quad (5)$$

Periode pensaklaran (T) dapat ditunjukkan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} T &= 1/f \\ &= t_1 + t_2 \\ &= \frac{(\Delta I)L}{V_s - V_a} + \frac{(\Delta I)L}{V_a} \\ &= \frac{(\Delta I)L V_s}{V_a (V_s - V_a)} \end{aligned} \quad (6)$$

Sehingga *peak to peak ripple* dari arus rata-rata didapatkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta I &= \frac{V_s (V_s - V_a)}{f L V_s} \\ &= \frac{V_s k (1-k)}{f L} \end{aligned} \quad (7)$$

Menggunakan hukum kirchoff, arus beban dapat dituliskan sebagai berikut:

$$i_L = i_c + i_o$$

Apabila mengasumsikan *ripple* arus beban, ΔI_o sangat kecil, $\Delta I_L = \Delta I_C$, arus rata-rata pada kapasitor yang mengalir dari $t_1/2 + t_2/2 = T/2$, adalah:

$$I_c = \frac{\Delta I}{4}$$

Sehingga didapatkan tegangan kapasitor sebagai berikut:

$$v_c = \frac{1}{C} \int \frac{\Delta I}{4} dt + v_c(t=0)$$

Maka, tegangan kapasitor pada kondisi *peak to peak*:

$$\begin{aligned} v_c &= \frac{1}{C} \int i_c dt + v_c(t=0) \\ &= \frac{1}{C} \int_0^T \frac{\Delta I}{4} dt \\ &= \frac{\Delta I T}{8C} \\ &= \frac{\Delta I}{8fC} \end{aligned} \quad (8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.18, 2.19, 2.20, maka didapatkan:

$$\Delta V_c = \frac{V_s (V_s - V_a)}{8LCf^2 V_s} \quad (9)$$

atau

$$\Delta V_c = \frac{V_s k(1-k)}{8LCf^2}$$

Penyalan MOSFET dalam suatu *converter* harus dilakukan secepat mungkin, agar kerugian daya yang terjadi pada saat switching sekecil mungkin. MOSFET dapat dinyalakan dengan tegangan yang ada di *Source*. Bila tegangan $V_{GS} > V_{GS \text{ Threshold}}$, maka MOSFET akan on dan arus I_d mengalir dari drain ke source. Untuk pemadaman MOSFET, tegangan V_{GS} harus dibuat lebih kecil dari tegangan $V_{GS \text{ Threshold}}$ atau nol. Bila berlaku kondisi $V_{GS} < V_{GS \text{ Threshold}}$, maka MOSFET menjadi tidak konduksi atau off.

Dimana $T = t_{on} + t_{off}$ adalah frekuensi pemotongan yang bernilai $1/T$. Karakteristik pengaturan untuk rangkaian DC Chopper dinyatakan dengan suatu persamaan:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = f \frac{t_{on}}{T} \quad (10)$$

$$D = \frac{t_{on}}{T} \times 100\% \quad (11)$$

Berdasarkan rangkaian pada Gb.1, dapat diasumsikan terdapat kondisi MOSFET On dan Off, maka:

$$\begin{aligned} V_{Lon} \cdot t_{on} + V_{Loff} \cdot t_{off} &= 0 \\ (V_s - V_o)(DT) + (-V_o)(1-D)T &= 0 \\ V_s D - V_o &= 0 \\ V_o &= D \cdot V_s \end{aligned} \quad (12)$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini didasarkan pada masalah yang bersifat aplikatif, yang dapat dirumuskan menjadi 4 permasalahan utama, yaitu bagaimana mengatur kecepatan motor DC magnet permanen dengan menggunakan sensor rotari, bagaimana pemilihan motor yang cocok digunakan sebagai penggerak utama, bagaimana merancang *chopper buck* regulator, serta bagaimana cara pengendalian motor agar cocok untuk diterapkan dengan tenaga *hybrid* tenaga dalam sepeda listrik.

A. Perancangan dan Pembuatan Alat

Perancangan ini dilakukan secara matematis dan sesuai dengan materi yang didapatkan dari studi pustaka. Perancangan ini meliputi semua aspek yang menunjang perancangan ini. Meliputi elektrik, mekanik, serta *software*.

Pengendalian dari kecepatan motor ini dilakukan dengan menyesuaikan kebutuhan kecepatan sensor dengan berapa besar kecepatan motor yang diinginkan untuk membantu kecepatan putar dari sensor itu sendiri. Algoritma

pengendalian selanjutnya dilakukan dalam bentuk penyusunan program perangkat lunak pada mikrokontroler.

B. Pengujian dan Analisis

Pengujian pada penelitian ini dilakukan tiap bagian maupun secara keseluruhan. Untuk pengujian tiap bagian meliputi perangkat sebagai berikut:

1. Pengujian sensor
2. Pengujian catu daya
3. Pengujian *driver* motor
4. Pengujian rangkaian PWM
5. Pengujian motor
6. Pengujian keseluruhan

IV. PERANCANGAN ALAT PENGENDALI KECEPATAN MOTOR

A. Karakteristik Motor yang Digunakan

Pada aplikasi pengaturan kecepatan motor DC dengan menggunakan sensor rotari ini dibutuhkan motor dengan kecepatan tinggi sehingga pemilihan motor harus mementingkan kecepatan yang tinggi.



Gb. 2 Motor Penggerak Utama

Motor penggerak utama ditunjukkan oleh Gb.3. Dimana motor ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Tegangan : 12 V_{DC}
 Arus : 3 A
 Daya motor : 40 W
 Kecepatan : 2350 rpm
 Torsi : 140 Ncm



Gb. 3 Motor Penggerak Sensor

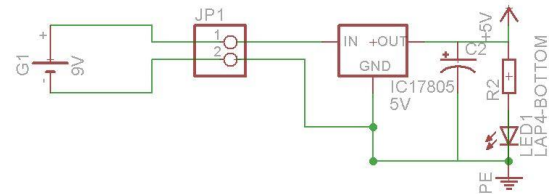
Sedangkan motor penggerak sensor dibutuhkan untuk memutar sensor dengan tujuan mensimulasikan putaran roda. Motor penggerak sensor ditunjukkan oleh Gb.4. Dimana spesifikasi motor ini sendiri adalah sebagai berikut:

- Tegangan : 12 V_{DC}

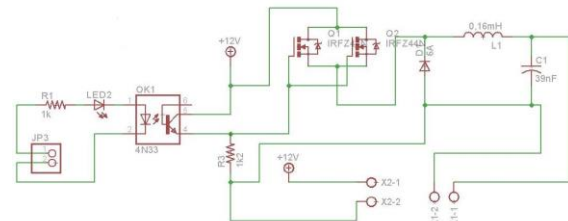
- Arus : 2 A
 Daya motor : 24 W
 Kecepatan : 500 rpm
 Torsi : 25 N cm

B. Sistem Pengendalian

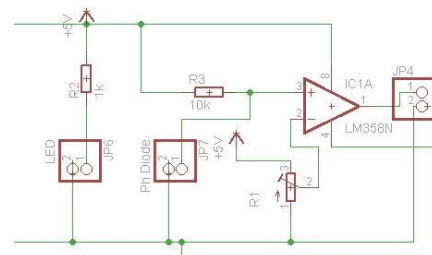
Sistem pengendali kecepatan motor DC magnet permanen ini terdiri dari rangkaian catu daya, rangkaian komparator dan sensor, rangkaian *driver* motor, serta rangkaian DC *Chopper* yang ditunjukkan oleh Gb.4, Gb.5, Gb.6 berikut.



Gb. 4 Rangkaian Catu Daya Sensor, Mikrokontroler



Gb. 5 Rangkaian *Driver* Motor dan Chopper



Gb. 6 Rangkaian Komparator dan Sensor

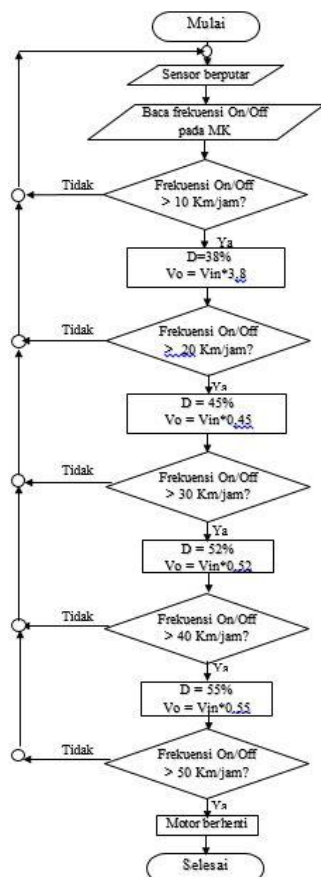
Program perangkat lunak direalisasikan berdasarkan algoritma yang disusun untuk membentuk alur kerja sistem crane. *Flowchart* pergerakan crane ditunjukkan pada Gb. 7

V. HASIL UJI DAN PEMBAHASAN

Pengujian dari masing-masing komponen dari sistem dilakukan untuk mengetahui apakah ada kesalahan dari masing-masing komponen itu sendiri.

A. Pengujian Catu Daya

Pengamatan besarnya keluaran catu daya menggunakan multimeter CD800A. Hasil pengujian rangkaian catu daya 5 dan 12 V_{DC} ditunjukkan oleh TABEL I.



Gb. 7 Diagram Alir Pembacaan Frekuensi dan Penambahan *Duty Cycle* Sistem

TABEL I
HASIL KELUARAN TEGANGAN CATU DAYA

Rangkaian	Masukan (V_{DC})	Keluaran (V_{DC})
Catu Daya $5V_{DC}$	12V	5V
Catu Daya $12V_{DC}$	12V	12V

B. Pengujian Sensor

Tegangan hasil keluaran sensor diamati pada posisi sensor tertutup dan terbuka. Tegangan diamati dengan *multimeter*. Pengujian ini bertujuan untuk menguji apakah tegangan keluaran sensor sesuai untuk masukan mikrokontroler dan dapat dibaca *high* dan *low* oleh mikrokontroler. Hasil pengujian ditunjukkan oleh TABEL II berikut.

TABEL II
HASIL KELUARAN TEGANGAN SENSOR

No.	Posisi Sensor	Keluaran (V)
1	Terbuka	0
2	Tertutup	3,75V

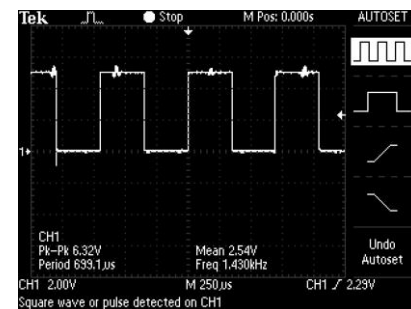
C. Pengujian Rangkaian PWM

Pengujian rangkaian PWM bertujuan untuk mengetahui sinyal keluaran dari *optocoupler* 4N33 dan MOSFET IRFZ44N dengan masukan berupa *duty cycle* yang bervariasi

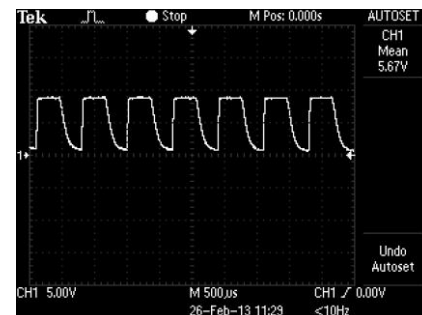
dari keluaran mikrokontroler ATMEGA 8. PIN yang ditentukan sebagai keluaran dari mikrokontroler adalah OCR1B. Hasil Pengujian rangkaian PWM ditunjukkan dengan TABEL III berikut.

TABEL III
PENGARUH VARIASI *DUTY CYCLE* TERHADAP KELUARAN RANGKAIAN PWM

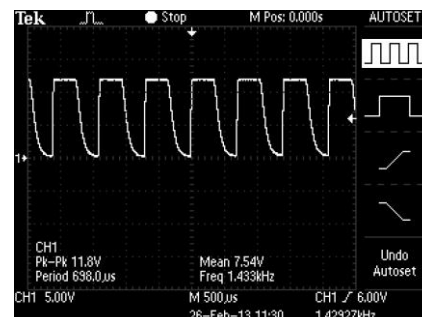
No.	Duty cycle (%)	Keluaran OCR1B (%)	Keluaran Octocoupler (%)	Keluaran MOSFET (%)
1	0	0	26,1	0
2.	10	10,2	41,7	0
3.	20	20,3	51,5	0
4.	30	30,1	60,7	2,2
5.	40	40,2	70,5	13,6
6.	50	50,0	78,7	23,8
7.	60	60,2	86,2	33,7
8.	70	69,9	92,4	44,0
9.	80	80,1	97,3	54,2
10	90	89,8	98,8	62,6
12	100	100,0	100,0	74,4



Gb. 8 Keluaran Tegangan Mikrokontroler



Gb. 9 Keluaran Tegangan MOSFET



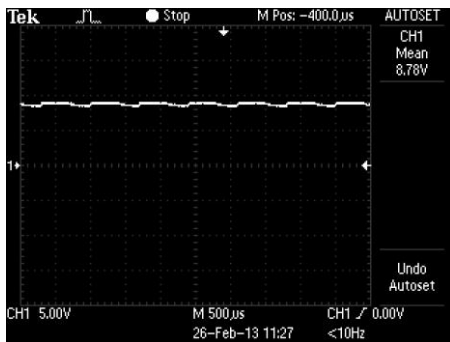
Gb. 10 Keluaran *Optocoupler*

D. Pengujian Rangkaian DC Chopper

Pengujian pada rangkaian ini bertujuan untuk mengetahui keluaran dari rangkaian chopper. Pengujian ini dilakukan dengan tegangan pada kondisi *duty cycle* yang bervariasi hasil dari keluaran MOSFET. Berikut hasil pengujian rangkaian DC chopper yang ditunjukkan oleh TABEL IV.

TABEL IV
PENGUJIAN RANGKAIAN DC CHOPPER

No.	Sumber Tegangan (V)	Tegangan Keluaran MOSFET (V)	Tegangan Keluaran Chopper (V)
1	1	0,556	0
2.	2	1,02	0
3.	3	1,45	0
4.	4	1,99	0
5.	5	2,90	1,7
6.	6	3,90	2,55
7.	7	4,3	3,8
8.	8	5,5	4,6
9.	9	6,15	5,38
10	10	6,89	6,38
11	11	7,86	7,28
12	12	8,93	8,45



Gb. 11 Tegangan Keluaran DC Chopper pada Duty Cycle 50%

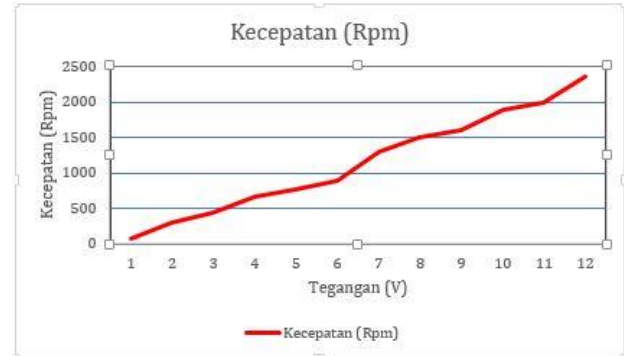
E. Pengujian Motor

Pengujian motor dilakukan yang bertujuan untuk mendapatkan parameter-parameter motor sehingga proses perhitungan arus dan tegangan pada motor dapat dilakukan dengan baik. TABEL V merupakan hasil pengujian dari motor pada tiap tegangan.

TABEL V
HASIL PENGUJIAN MOTOR PENGGERAK UTAMA

No.	Sumber Tegangan (V)	Arus (A)	Kecepatan (rpm)
1	1	1	70
2.	2	1,25	210
3.	3	1,4	400
4.	4	1,6	580
5.	5	1,63	760
6.	6	1,69	890

7.	7	1,74	1290
8.	8	1,9	1500
9.	9	2,1	1600
10	10	2,5	1880
11	11	2,7	2000
12	12	3	2350



Gb. 12 Kurva Kecepatan Fungsi Tegangan Pada Motor DC Magnet Permanen

Dari data TABEL V yang kemudian diubah menjadi sebuah kurva, didapatkan sebuah garis yang relatif *linear*. Garis tersebut mewakili sebuah fungsi yang merupakan kecepatan fungsi dari tegangan. Dengan teknik meregresi garis miring maka akan didapatkan sebuah rumus untuk mencari persamaan garis *linear* nya, yaitu:

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \quad (13)$$

$$\frac{y-70}{2350-70} = \frac{x-1}{12-1}$$

$$y = 207,27 x - 137,27 \quad (14)$$

Dari 2 persamaan diatas terdapat korelasi yang formulasinya menghasilkan nilai konstanta motor :

$$K_e = \frac{A}{B} = \frac{K_T}{R_a \cdot T_{fd}} = 0,662 \quad (15)$$

K_e telah diketahui, selanjutnya mencari nilai *fluks* pada medan magnet motor. Karena keterbatasan alat yang tersedia, maka dengan menggunakan rumus torsi (T) dan mengasumsikan arus menggunakan besaran yang tertera di motor, *fluks* dapat dihitung.

$$T = K_e \Phi I_a \quad (16)$$

$$1,4 \text{ N.m} = 0,662 \cdot \Phi \cdot 3 \text{ A}$$

$$\Phi = 0,705 \text{ Weber}$$

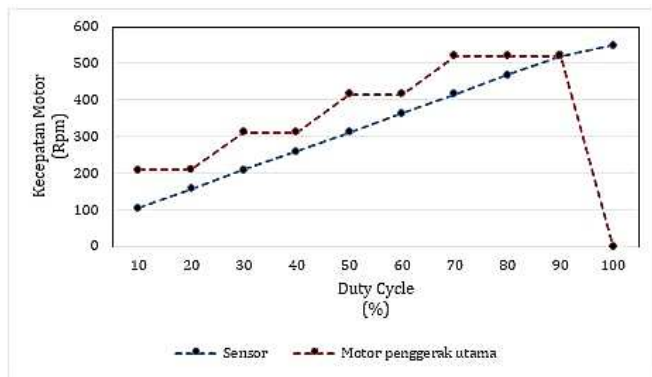
Fluks telah diketahui dengan besar 0,705 Weber, sehingga untuk menghasilkan torsi pada motor dengan menggunakan rumus yang sama merupakan fungsi dari arus jangkar ($T=f(I_a)$). Hal ini menyebabkan hanya arus jangkar yang akan mempengaruhi perubahan torsi yang berbanding lurus karena nilai konstanta dan *fluks* tetap tidak berubah.

F. Pengujian Alat Secara Keseluruhan

Pengujian secara keseluruhan dilakukan dengan mengoperasikan motor penggerak sensor pada kecepatan tertentu hingga mengaktifkan motor penggerak utama untuk berputar dan dapat mensimulasikan pergerakan motor penggerak utama dalam membantu putaran roda sepeda. Hasil pengujian keseluruhan ditunjukkan oleh Gb.14, TABEL VI berikut.

TABEL VI
PENINGKATAN KECEPATAN MOTOR DAN SENSOR TIAP
PERTAMBAHAN *DUTY CYCLE*

No	Duty cycle (%)	Tegangan Chopper (V)	Kecepatan		Penambahan Kecepatan (Rpm)
			Sensor (rpm)	Motor Penggerak Utama (rpm)	
1	38%	1,3	105	208	103
2	41%	1,7	156	208	52
3	45%	2	209	312	103
4	47%	2,3	260	312	52
5	52%	2,7	313	416	103
6	54%	3	364	416	52
7	55%	3,3	417	520	103
8	57%	3,6	468	520	52
9	60%	3,9	521	520	0
10	64%	4,1	550	0	0



Gb. 13 Kurva Kecepatan Motor dan Sensor Terhadap *Duty Cycle*

Dari tabel VI dan Gb.13 dapat dilihat bahwa mikrokontroler mengatur putaran motor penggerak utama berputar pada kondisi tetap pada setiap penambahan kecepatan sensor di luar batasan kecepatan yang telah ditentukan. Sedangkan apabila sensor telah menunjukkan kecepatan melebihi 520 rpm, atau lebih dari 50 km/ jam, maka mikrokontroler mengatur *duty cycle* menjadi 0. Dari tabel 5.7 dan kurva pada gambar 5.12 menunjukkan bahwa untuk mencapai kecepatan maksimum yang diinginkan sebesar 50 km / jam, baterai tidak perlu bekerja maksimum dalam penggunaannya. Hal ini dikarenakan *duty cycle* dari keadaan kecepatan maksimum hanya 55%. Sehingga baterai hanya perlu mencatu hingga 7 V dan Arus sebesar 1,74 A perjam. Dimana tegangan maksimal baterai adalah 12 V dan arus maksimal dari baterai adalah 3,5 A. Di sisi putaran sensor, sensor hanya perlu berputar sebesar 105 rpm untuk mencapai kecepatan 208 rpm. Karena putaran sensor mensimulasikan putaran roda sepeda, sehingga didapatkan kondisi bahwa pengendara hanya perlu memutar roda sebesar 105 rpm untuk mencapai kecepatan 208 rpm.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari hasil dari analisis dan pengujian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Alat pengatur kecepatan motor DC magnet permanen dengan menggunakan sensor rotari berhasil dibuat sesuai dengan rancangan dan dapat berfungsi sesuai spesifikasi yang telah ditentukan.
- Fungsi motor sebagai penggerak diperoleh dengan memanfaatkan konverter daya MOSFET yang ditunjang oleh *octocoupler* dan rangkaian DC Chopper yang dikendalikan oleh sinyal keluaran mikrokontroler.
- Fungsi *hybrid* untuk memperkecil konsumsi baterai diperoleh dengan mengatur putaran motor dan konsumsi dari penggunaan motor dari mikrokontroler.

B. Saran

Dalam perancangan ini, tentunya banyak kekurangan yang terjadi. Oleh karena itu untuk menyempurnakan perancangan berikutnya, terdapat beberapa saran yang perlu dilakukan, sebagai berikut :

Struktur mekanik untuk simulator roda dibuat semirip mungkin dengan struktur sepeda listrik agar lebih presisi dalam pengambilan data dan lebih menyerupai sepeda listrik yang sebenarnya.

REFERENCES

- [1] Rashid, Muhammad H. 1988. Power Electronics Circuits, Devices and Applications. New Jersey: Prentice-Hall International.