

PENGEREMAN REGENERATIF MOTOR ARUS SEARAH TANPA SIKAT (BLDC) UNTUK MENGENGISI BATERAI PADA SEPEDA GOWES

¹Soeprapto, ²Unggul Wibawa, ³Mahfudz Sidiq, ⁴Teguh Utomo, ⁵Sari Yuniarti

^{1,2,3,4}Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, ⁵Dosen Fakultas Ekonomi Universitas Merdeka
email: prapto1056@gmail.com

ABSTRACT

To improve the efficiency of electric bike, it takes a regenerative braking system to replace the mechanical braking system for regenerative braking can convert the kinetic energy to be dumped into heat through the brake into electrical energy that can be used to charge the battery.

To realize this tool, it takes a bicycle, engine direct current brushless, three-phase uncontrolled rectifier, boost converter, a battery, and a controller. Braking torque on the engine influenced by the current output of the machine. The regenerative braking system is controlled by a microcontroller which will vary in value duty cycle boost converter so that the value of the input current boost converter is always directly proportional to the output current value of the machine can be changed.

Based on test results obtained average energy of 0.0048360 Wh for the initial speed of 30 km / h and 0.0100300 Wh for the initial speed of 40 km / h with the engine inertia loads only.

Keywords : Regenerative braking, direct current brushless machine, rectifier, boost converters, controllers, batteries, bicycles.

1. PENDAHULUAN

Mayoritas penduduk Indonesia menggunakan kendaraan roda 2 berbahan bakar minyak untuk sarana transportasi dalam kota, kendaraan tersebut dapat digantikan dengan sepeda listrik. Sepeda listrik biasanya menggunakan motor BLDC (*brushless direct current*) sebagai penggerak utama dan baterai sebagai sumber energinya.

Kontur jalan, khususnya di Malang begitu banyak naik dan turun. Pada saat jalanan turun biasanya kita menggunakan sistem pengereman mekanik dengan kampas rem untuk mengubah energi kinetik sisa menjadi energi panas. Sistem

pengereman ini tidak efisien jika digunakan dalam sepeda listrik karena sepeda listrik dilengkapi dengan mesin listrik yang dapat melakukan pengereman regeneratif.

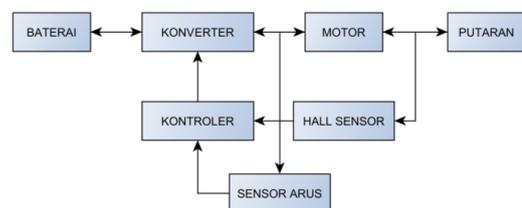
Pengereman regeneratif dapat dilakukan jika mesin dioperasikan sebagai generator dan hasil energinya dapat disimpan ke baterai, sehingga sistem pengereman ini membuat sepeda listrik lebih efisien dibandingkan dengan sistem pengereman mekanik.

Tujuan akhir yang diharapkan dalam penelitian ini adalah merencanakan dan merealisasikan alat yang mampu melakukan pengereman regeneratif pada sepeda listrik.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem penggerak listrik yang menggunakan mesin arus searah tanpa sikat

Sebagai penggerak dari kendaraan listrik, khususnya sepeda listrik maka mesin listrik dituntut harus dapat berputar dengan kecepatan variabel. Untuk merubah kecepatan mesin agar sesuai dengan keinginan dibutuhkan sebuah kontroler dan konverter. Dengan bermacam-macamnya jenis mesin yang ada dipasaran (mesin arus bolak balik dan mesin arus searah) maka kontroler dan konverternya juga bermacam-macam.

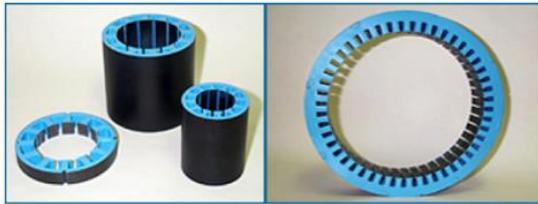


Gambar 1. Sistem penggerak kendaraan listrik sederhana yang menggunakan mesin arus searah tanpa sikat

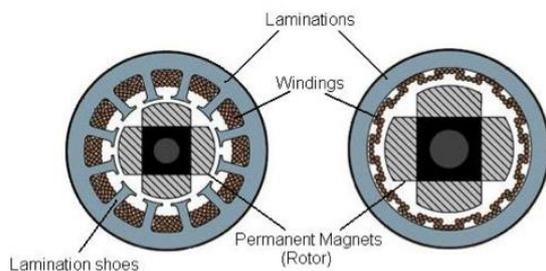
2.2. Motor arus searah tanpa sikat

Stator dari motor arus searah tanpa sikat terbuat dari laminasi besi yang dililit oleh

tembaga. Belitan pada motor ini dapat disusun dengan dua cara layaknya motor arus bolak-balik yaitu bintang atau delta.



Gambar 2. Laminasi besi pada stator
 Sumber: Pushek Madaan (2013: 1)



Gambar 3. Inti besi beralur (kiri) dan tanpa alur (kanan)
 Sumber: Pushek Madaan (2013: 1)

Rotor dari motor ini menggunakan magnet permanen. Banyaknya kutub pada rotor akan mempengaruhi besar torsi dan kecepatan motor. Jika kutub rotor diperbanyak, maka besar torsi motor tersebut akan besar dan kecepatan akan turun. Selain itu, bahan dari magnet permanen juga mempengaruhi besar dari torsi yang dihasilkan motor. Dengan magnet yang mempunyai kerapatan fluksi yang besar, maka torsi motor akan besar.

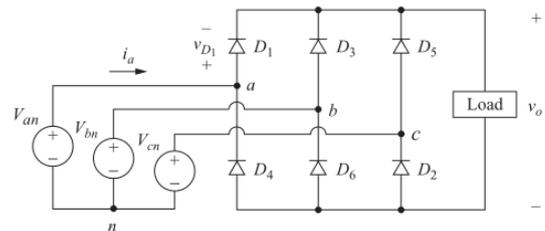
2.3. Mesin arus searah tanpa sikat dioperasikan sebagai generator

Pengereman regeneratif dapat dilakukan dengan cara mengoperasikan mesin listrik sebagai generator. Mesin arus searah tanpa sikat juga biasa disebut mesin sinkron magnet permanen, maka dari itu keluarannya-pun saat dioperasikan sebagai generator akan mirip dengan keluaran generator sinkron 3 fasa.

Saat rotor dari mesin arus searah tanpa sikat diputar, maka pada terminalnya akan timbul tegangan. Jika terminal tersebut diberi beban maka akan arus pada beban dan timbul torsi lawan pada mesin tersebut, sehingga mesin terasa seperti melakukan pengereman.

2.4. Penyearah 3 fasa tak terkontrol

Penyearah tiga fasa tak terkontrol adalah suatu konverter elektronika daya yang mengubah tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC. Penyearah tersebut membutuhkan 6 dioda yang disusun seperti gambar 4. Rangkaian ini mempunyai sifat bahwa dioda dengan nomor ganjil akan konduksi bila tegangan anodanya mempunyai harga yang paling tinggi dibandingkan dengan tegangan anoda dari komponen-komponen dengan nomor ganjil yang lain.

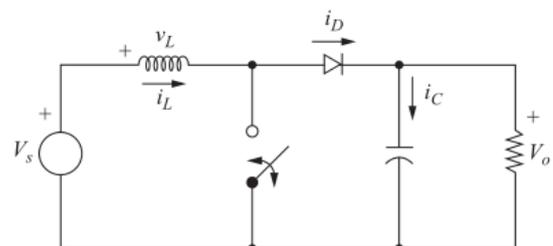


Gambar 4. Rangkaian penyearah tiga fasa tak terkontrol
 Sumber: Daniel W. Hart (2011: 144)

Nilai tegangan keluaran penyearah 3 fasa tak terkontrol dapat dicari dengan persamaan:
 $V_o \text{ av} = 0,955 V_{i \text{ maks, L-L}} \dots\dots\dots(\text{persamaan 1})$

2.5. Boost converter

Boost converter adalah konverter elektronika daya dengan masukan tegangan DC dan keluaran tegangan DC dimana nilai tegangan keluarannya akan lebih besar daripada tegangan sumbernya. Konverter ini menggunakan induktor, dioda, kapasitor, dan MOSFET yang dirangkai seperti gambar berikut.



Gambar 5. Rangkaian *boost converter*
 Sumber: Daniel W. Hart (2011: 221)

Nilai tegangan keluaran *boost converter* dapat dicari dengan persamaan:

$V_o = V_i/(1-D) \dots\dots\dots(\text{persamaan 2})$

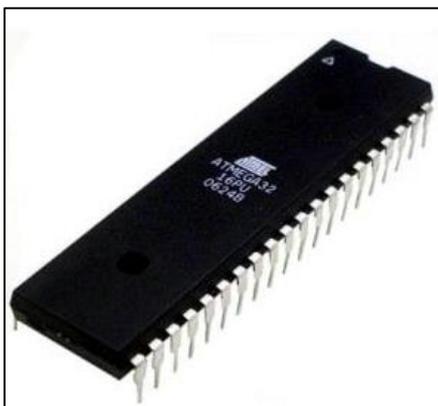
2.6. Penyimpanan energi listrik

Energi listrik dapat disimpan dengan menggunakan baterai. Baterai hanya dapat menyimpan energi listrik dalam bentuk DC. Beberapa jenis baterai yang ada dipasaran adalah baterai Ni-Cd, Lithium-Ion, Lithium Polymer, Lithium Phosfat, dan Valve Regulated Lead Acid. Baterai yang paling murah dan mudah didapatkan dipasaran adalah baterai jenis VRLA.

2.7. Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah piranti elektronik berupa IC (*integrated circuit*) yang memiliki kemampuan manipulasi data (informasi) berdasarkan suatu urutan instruksi (program). Dalam sebuah struktur mikrokontroler akan kita temukan juga komponen-komponen seperti *processor, memory, clock*, dll.

Salah satu arsitektur mikrokontroler yang terdapat di pasaran adalah jenis AVR (*Advanced Virtual RISC*). Arsitektur mikrokontroler jenis AVR ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1996 oleh dua orang mahasiswa Norwegian Institute of Technology yaitu Alf-Egil Bogen dan Vegard Wollan. Dalam perkembangannya, AVR dibagi menjadi beberapa varian yaitu AT90Sxx, ATmega, dan AT86RFxx. Pada dasarnya yang membedakan masing-masing varian adalah kapasitas memori dan beberapa fitur tambahan saja.



Gambar 6. Bentuk fisik mikrokontroler ATMEGA32

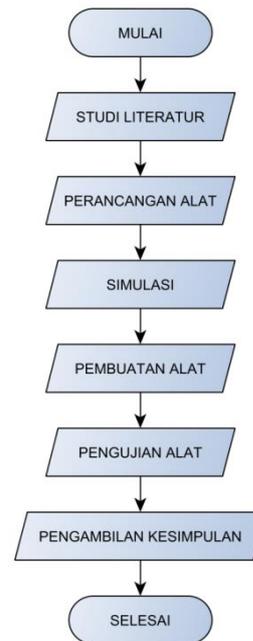
Sumber : ATMEGA32 datasheet (2011:2)

Pemrograman mikrokontroler AVR ATMEGA32 dapat menggunakan *low level language (assembly)* dan *high level language*

(C, Basic, Pascal, JAVA, dll) tergantung compiler yang digunakan.

3. METODE PENELITIAN

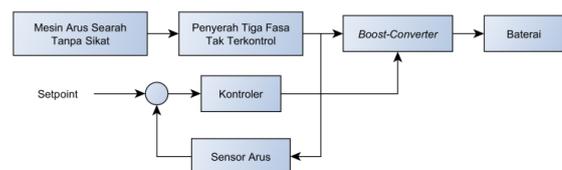
Secara umum metode penelitian dalam rancang bangun sistem pengereman regeneratif untuk mengisi baterai ditunjukkan oleh gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir metode penelitian

4. PERANCANGAN ALAT DAN SIMULASI

Pengereman regeneratif adalah suatu metode pengereman dengan mengembalikan energi sisa (energi kinetik) pada kendaraan untuk mengisi baterai. Saat mengisi baterai, maka akan timbul arus pada mesin listrik yang dioperasikan sebagai generator dan akan timbul torsi lawan di dalam mesin sehingga mesin tersebut seperti melakukan sebuah pengereman. Blok diagram sistem pengereman regeneratif untuk mengisi baterai yang akan dibangun pada penelitian ini adalah seperti gambar berikut.



Gambar 8. Diagram balok sistem pengereman regeneratif

Pada blok diagram diatas terlihat bahwa mesin yang digunakan dalam sistem pengereman ini adalah mesin arus searah tanpa sikat. Baterai yang ada dipasaran saat ini hanya dapat menyimpan energi dalam bentuk arus searah, sedangkan mesin arus searah tanpa sikat saat dioperasikan sebagai generator akan menghasilkan tegangan bolak balik 3 fasa seimbang.

Maka dari itu, dibutuhkan sebuah penyearah tiga fasa tak terkontrol untuk merubah tegangan bolak balik tersebut menjadi tegangan searah. Namun nilai tegangan keluaran mesin arus searah tanpa sikat berubah-ubah sesuai dengan nilai putaran sinkron mesin tersebut. Agar dapat mengisi baterai, nilai tegangan masukan baterai harus lebih besar daripada tegangan baterai itu sendiri.

Pada hakikatnya, pengereman dilakukan untuk mengurangi kecepatan dan dilakukan pada kecepatan dibawah nominal mesin itu sendiri, sehingga tegangan keluaran mesin tersebut juga dibawah nominal. Agar mesin dapat melakukan pengereman dan mengisi baterai pada kecepatan sinkron dibawah nominal, maka dibutuhkan sebuah konverter untuk menaikkan tegangan keluaran mesin yakni *boost-converter*.

4.1. PERANCANGAN KONVERTER

Konverter yang dirancang pada penelitian ini adalah penyearah 3 fasa gelombang penuh tak terkontrol dan boost converter.

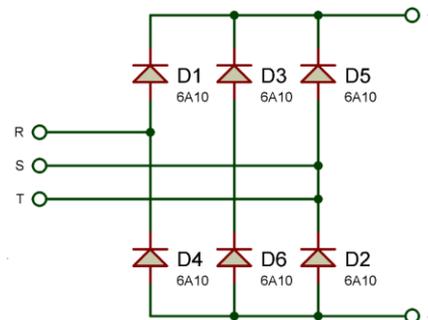
PENYEARAH 3 FASA GELOMBANG PENUH TAK TERKONTROL

Penyearah tak terkontrol 3 fasa menggunakan 6 dioda yang disusun seperti gambar 9. Penyearah ini akan mengalirkan arus keluaran rata-rata maksimal sebesar 5A dan dioda harus mampu memblokir tegangan balik maksimal sebesar 68,88 V (48 V_{RMS}).

Dari hasil pengujian tegangan keluaran mesin saat dioperasikan sebagai generator tanpa beban, didapatkan bahwa frekuensi motor saat dicapai tegangan nominal adalah 405,5 Hz. Dengan nilai frekuensi tersebut, jenis dioda yang digunakan pada konverter ini adalah jenis dioda biasa (*general purpose diode*).

Dioda biasa dengan arus besar yang dapat ditemukan oleh peneliti dipasaran adalah dioda tipe 6A05 dan 6A10. Setelah melihat spesifikasi

dari kedua dioda tersebut, maka diode yang digunakan adalah diode tipe 6A10 dengan kemampuan memblokir tegangan maksimal 1000 V dan arus keluaran rata-rata maksimal sebesar 6 A.



Gambar 9. Rangkaian penyearah 3 fasa tak terkontrol yang telah dirancang

BOOST CONVERTER

Boost converter yang akan dirancang pada penelitian ini adalah *boost converter* dengan sumber tegangan searah 10 V s/d 25 V, tegangan keluarannya 60 V, dan arusnya masukan maksimalnya adalah 5 A.

Diketahui:

$$V_s = 10 \text{ V s/d } 50 \text{ V}; V_o = 60 \text{ V}; I_L = 5 \text{ A}; f = 50 \text{ kHz.}$$

Perhitungan:

Dengan berasumsi semua komponen adalah komponen ideal, maka:

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{10}{60}$$

$$D = 0,8333$$

$$V_o (V_o/R) = V_s I_s$$

$$60 (60/R) = 10 (5)$$

$$R = 72 \Omega$$

Dengan toleransi variasi arus induktor 40%, maka $\Delta I_L = 0,4(5) = 2 \text{ A}$.

$$L = \frac{V_s D}{\Delta I_L f}$$

$$L = \frac{10 (0,8333)}{2 (50000)}$$

$$L = 83,333 \mu\text{H}$$

$$C = \frac{D}{R (\Delta V_o/V_o) f}$$

$$C = \frac{0,8333}{72 (0,02) 50000}$$

$$C = 11,5741 \mu\text{F}$$

Nilai induktor dan kapasitor pada

perhitungan adalah nilai minimum yang dibutuhkan. Untuk menjaga arus dan tegangan tetap kontinu, maka paling tidak nilai induktor dan kapasitor dinaikkan 25 %.

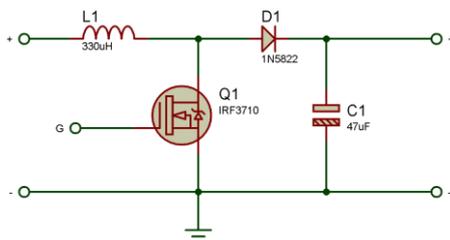
$$L = 1,25 (83,3333) = 104,1667 \text{ uH}$$

$$C = 1,25 (11,5741) = 14,4676 \text{ uF}$$

Dengan cara yang sama, nilai kapasitor dan induktor yang dibutuhkan untuk tegangan masukan 10 s/d 50 V dapat dicari.

Setelah dihitung secara lengkap, dapat disimpulkan bahwa nilai induktor dan kapasitor terbesar yang dibutuhkan adalah 187,5 uH dan 26,04 uF. Setelah nilai tersebut dicocokkan dipasaran, maka nilai kapasitor yang digunakan adalah 47 uF dan nilai induktor adalah 330 uH (pembulatan keatas).

Dalam penelitian ini, MOSFET yang digunakan adalah IRF3710 dengan $V_{DSS} = 100 \text{ V}$ dan $I_D = 57 \text{ A}$. Dioda yang digunakan pada *boost converter* adalah dioda schottky tipe 1N5822.



Gambar 10. Rangkaian *boost converter* yang telah dirancang

4.2. PERANCANGAN PERANGKAT KERAS KONTROLER

Sistem pengendalian pengereman regeneratif adalah melalui pengaturan arus keluaran mesin saat dioperasikan menjadi generator. Kontroler pada penelitian ini menggunakan ATMEGA32. Beberapa *port* pada kontroler ini dapat dioperasikan sebagai pembaca nilai tegangan arus searah analog (bukan tegangan logika) dengan nilai tegangan maksimal 5 V. *Port* inilah yang dapat digunakan untuk mendeteksi nilai tegangan yang akan dibandingkan dengan nilai *setpoint*.

Dengan spesifikasi kontroler seperti itu, maka dibutuhkan sensor arus yang mampu mengubah nilai arus menjadi tegangan (maksimal 5V) agar dapat diumpun balikkan ke kontroler. Sensor arus yang digunakan sebaiknya mempunyai resistansi konduktor sekecil mungkin karena saat arus mengalir pada sensor akan timbul daya yang terbuang ($P = I^2.R$) dan jatuh tegangan ($V = R.I$) pada sensor yang nilainya akan sebanding dengan nilai I

yang akan merugikan konverter elektronika daya.

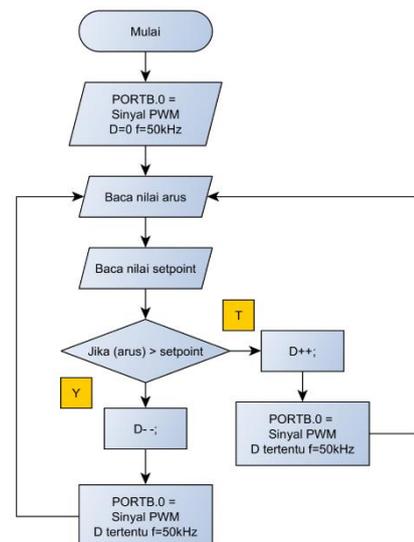
Pada penelitian ini akan digunakan sensor arus ACS712ELCTR-20A-T dengan resistansi konduktor 1,2 mΩ dan sensitivitas 100 mV / A. Menurut *datasheet*, sensor ini membutuhkan catu daya 5 V agar dapat beroperasi. Sensor arus ini akan dipasang pada arus masukan *boost converter* karena arus pada *boost converter* berupa arus searah yang nilainya sebanding dengan nilai arus keluaran mesin arus searah tanpa sikat.

Nilai *setpoint* yang akan dibandingkan dengan nilai arus masukan *boost converter* dapat dibangkitkan dari sebuah potensio meter.

4.2. PERANCANGAN PERANGKAT LUNAK KONTROLER

Perangkat lunak dari kontroler sistem pengereman ini pada dasarnya hanya membandingkan nilai arus masukan *boost converter* yang telah dikonversi menjadi tegangan melalui sensor arus dengan nilai tegangan pada *setpoint* (potensio).

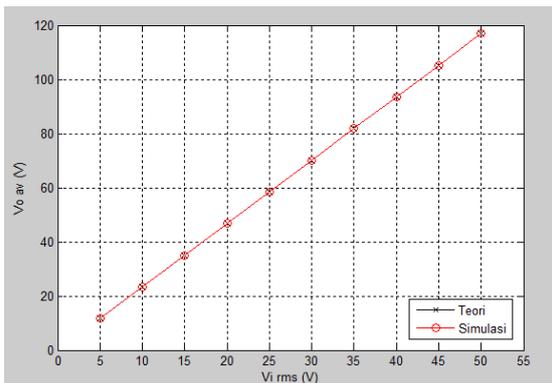
Gelombang keluaran dari kontroler ini adalah gelombang PWM dengan frekuensi 50 kHz yang *duty cycle* nya dapat berubah mengikuti nilai arus dan *setpoint* yang ada. Jika nilai yang dihasilkan oleh sensor arus kurang dari nilai yang dihasilkan oleh *setpoint*, maka *duty cycle* harus ditambah dan sebaliknya.



Gambar 11. Diagram alir perangkat lunak kontroler sistem pengereman regeneratif

4.3. SIMULASI PENYEARAH TIGA FASA TAK TERKONTROL

Simulasi pada penyearah tiga fasa tak terkontrol dilakukan dengan memberi tegangan masukan yang bervariasi dengan nilai beban yang tetap untuk mengetahui karakteristik tegangan masukan terhadap tegangan keluaran penyearah. Dari hasil pengujian dan perhitungan secara teori menggunakan persamaan 1, didapatkan hasil seperti pada grafik berikut.

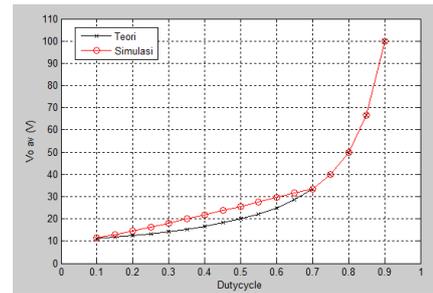


Gambar 12. Karakteristik tegangan masukan terhadap tegangan keluaran penyearah 3 fasa tak terkontrol secara teori dan simulasi dengan beban 212 ohm

Dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai tegangan masukan penyearah, maka nilai tegangan keluaran juga semakin besar pula.

4.4. SIMULASI BOOST CONVERTER

Simulasi pada boost converter dilakukan dengan memberi tegangan sumber dan resistansi yang tetap pada dutycycle yang bervariasi. Dari hasil pengujian dan perhitungan secara teori menggunakan persamaan 2 didapatkan hasil seperti pada grafik berikut.



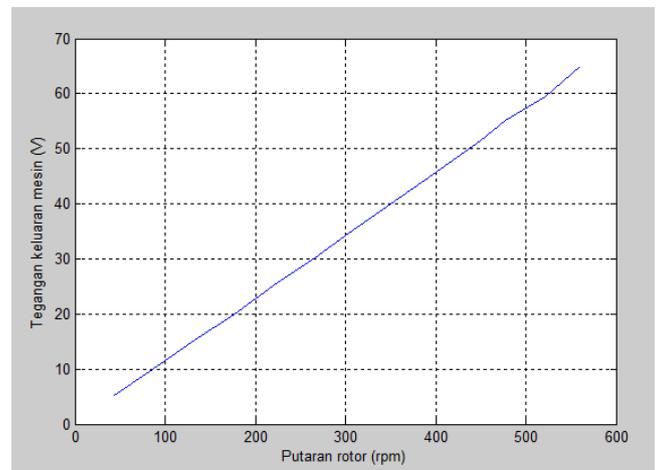
Gambar 13. Karakteristik *dutycycle* terhadap tegangan keluaran *boost converter* secara teori dan simulasi dengan beban 531 ohm

Dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai *dutycycle*, maka nilai tegangan keluaran akan semakin besar juga.

5. PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT

5.1. Pengujian tegangan keluaran mesin

Pengujian ini dilakukan dengan cara memutar mesin arus searah tanpa sikat tanpa beban pada kecepatan bervariasi.

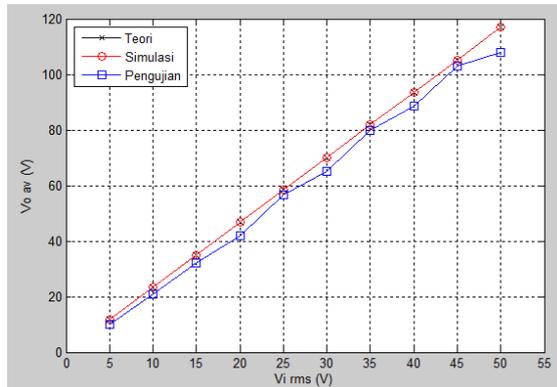


Gambar 14 Karakteristik putaran rotor terhadap tegangan keluaran mesin arus searah tanpa sikat tanpa beban

Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa kenaikan nilai putaran rotor mesin mengakibatkan kenaikan pada tegangan keluaran mesin, kenaikan tersebut bersifat linier.

5.2. Pengujian penyearah 3 fasa tak terkontrol

Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan tegangan masukan tiga fasa yang berbeda-beda ke penyearah tiga fasa tak terkontrol dengan beban yang tetap.

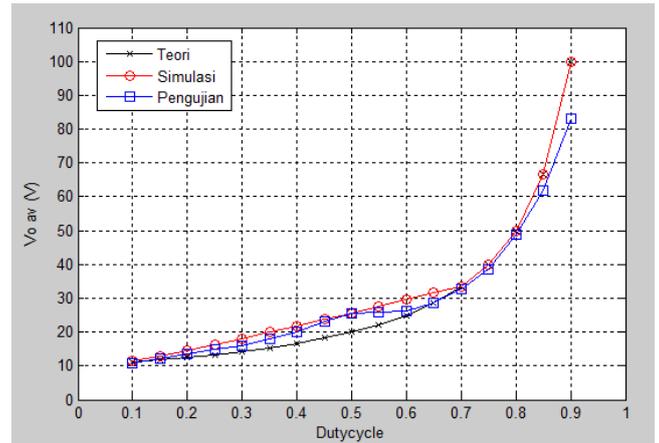


Gambar 15. Karakteristik tegangan masukan terhadap tegangan keluaran penyearah 3 fasa tak terkontrol secara teori, simulasi, dan pengujian dengan beban 212 ohm

Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa kenaikan nilai tegangan masukan penyearah membuat tegangan keluaran penyearah naik pula secara linier. Hasil simulasi dan pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa tersebut sedikit berbeda karena adanya resistansi (R_{on}) pada dioda saat konduksi. Saat ada arus yang melewati dioda sebesar I , maka akan ada jatuh tegangan pada dioda sebesar $V = R_{on} I$, jatuh tegangan pada dioda tersebut akan menyebabkan turunnya tegangan keluaran pada penyearah.

5.3. Pengujian boost converter

Pengujian *boost converter* ini dilakukan dengan cara mengatur nilai *duty cycle* secara manual pada tegangan masukan yang tetap dengan beban resistor. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik *duty cycle* terhadap tegangan keluaran *boost converter* pada sumber tegangan dan beban yang tetap.



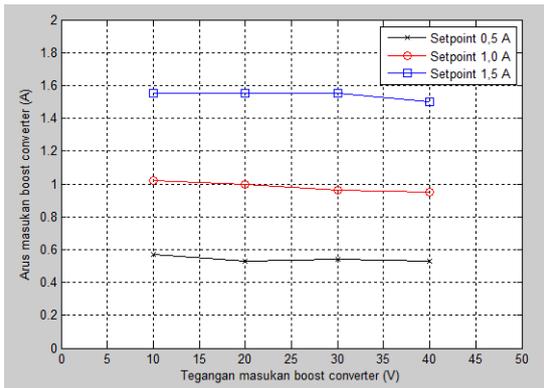
Gambar 16. Karakteristik *duty cycle* terhadap tegangan keluaran *boost converter* secara teori, simulasi, dan pengujian dengan beban 531 ohm

Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa semakin bertambahnya nilai *duty cycle* akan mengakibatkan semakin bertambahnya tegangan keluaran *boost converter*, namun pertambahan tersebut tidak linier. Pada *duty cycle* rendah, ada perbedaan yang cukup besar antara hasil teori dengan pengujian dan simulasi, hal tersebut disebabkan oleh arus beban yang terlalu ringan karena saat *duty cycle* rendah, tegangan keluaran akan rendah dan otomatis arus beban akan rendah jika resistansi beban tetap ($V=R I$).

Dari gambar di atas terlihat bahwa adanya perbedaan antara hasil simulasi dan pengujian karena komponen pada *boost converter* tidak ideal (adanya resistansi pada MOSFET, dioda, dan kapasitor).

5.4. Pengujian sistem pengendalian loop tertutup boost converter

Pengujian *boost converter* dengan pengendalian *loop* tertutup ini dilakukan dengan cara memberikan nilai tegangan masukan berbeda-beda dengan resistansi beban sebesar 100 ohm dan nilai *setpoint* arus tertentu.

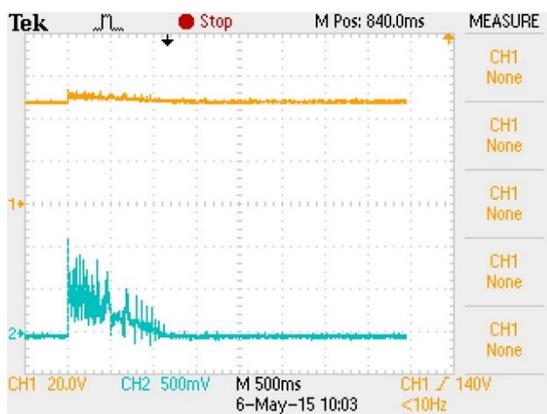


Gambar 17. Karakteristik tegangan masukan terhadap arus masukan *boost converter* dengan nilai *setpoint* tertentu

Dari gambar sebelumnya dapat disimpulkan bahwa pada sistem *loop* tertutup ini terjadi *error* yang diakibatkan terlalu kecilnya sensitifitas sensor arus ACS712ELCTR-20A-T sehingga menyebabkan kontroler menjadi kesulitan untuk mendeteksi nilai tegangan yang dikeluarkan sensor secara teliti.

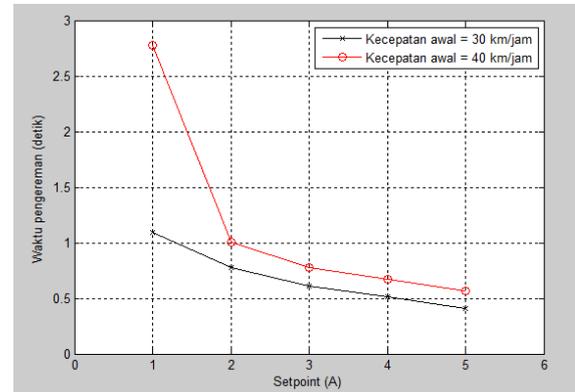
5.5. Pengujian keseluruhan sistem pengereman regeneratif

Setelah semua blok berjalan dengan semestinya, tiap blok tersebut dirangkai menjadi suatu kesatuan sistem pengereman regeneratif. Pengujian sistem ini dilakukan dengan cara memberi kecepatan awal tertentu dan di rem dengan *setpoint* arus yang berbeda-beda.



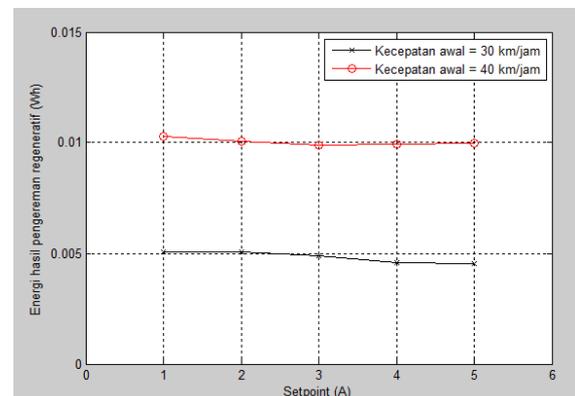
Gambar 18. Bentuk gelombang tegangan (atas) dan arus (bawah) pada baterai VRLA 12V 7Ah X 4 (seri) dengan *setpoint* 1A dan kecepatan awal 30 km/jam

Dengan cara yang sama, didapatkan nilai tegangan, arus, waktu pengereman, dan energi hasil dari pengereman regeneratif pada nilai kecepatan awal mesin dan *setpoint* yang berbeda-beda.



Gambar 19. Karakteristik *setpoint* terhadap daya pengereman regeneratif dengan variasi kecepatan awal mesin

Dari hasil pengujian di atas dapat disimpulkan bahwa dengan menaikkan *setpoint* arus masukan *boost converter*, maka waktu pengereman akan lebih singkat. Dan saat kecepatan awal roda dinaikkan, maka waktu pengereman akan lebih lama.



Gambar 20. Karakteristik *setpoint* terhadap energi pengereman regeneratif dengan variasi kecepatan awal mesin

Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa nilai *setpoint* arus masukan *boost converter* tidak mempengaruhi besar energi hasil pengereman regeneratif. Namun saat kecepatan awal roda dinaikkan, maka besar energi hasil pengereman regeneratif akan naik juga.

6. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. KESIMPULAN

Pengereman regeneratif untuk mengisi baterai pada mesin arus searah tanpa sikat dilakukan dengan cara menyearahkan tegangan keluaran mesin menggunakan penyearah, lalu menaikkan tegangan hasil penyearahan dengan boost converter agar tegangan tersebut dapat mengisi baterai.

Pengontrolan pengereman regeneratif dilakukan dengan mengendalikan nilai arus keluaran mesin arus searah tanpa sikat. Hal tersebut menyebabkan perubahan besar perlambatan kecepatan angular yang dirasakan oleh ban. Semakin besar nilai arus keluaran mesin maka perlambatan kecepatan angular mesin semakin besar pula. Nilai arus keluaran mesin selalu berbanding lurus dengan nilai arus masukan boost converter, maka dari itu torsi pengereman mesin dapat dikendalikan dengan mengatur nilai arus masukan boost converter. Untuk mengendalikan nilai arus masukan boost converter dapat dilakukan dengan merubah nilai dutycycle pada boost converter. Semakin tinggi nilai dutycycle maka nilai arus masukan boost converter akan semakin tinggi pula jika nilai resistansi beban dijaga konstan.

Dengan merubah nilai arus keluaran mesin maka waktu pengereman dan besar daya rata-rata yang dihasilkan akan berubah pula. Semakin besar nilai arus keluaran mesin, semakin besar pula nilai daya rata-rata yang dihasilkan oleh mesin dan waktu pengereman akan semakin singkat. Nilai energi yang dihasilkan dari pengereman regeneratif tidak dipengaruhi oleh nilai arus keluaran mesin.

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan energi rata-rata sebesar 4,836 mWh untuk kecepatan awal 30 km/jam dan 10,030 mWh untuk kecepatan awal 40 km/jam dengan beban inersia mesin saja.

7. SARAN

Pada gambar 17 terlihat bahwa sistem pengendalian arus yang dibuat pada penelitian ini tidak selalu mendapatkan nilai yang sesuai dengan nilai *setpoint* (terjadi *error*). Hal tersebut mengakibatkan besar torsi pengereman akan berubah-ubah sesuai nilai arus yang salah tersebut. Maka dari itu dibutuhkan rangkaian dan algoritma pengendalian arus yang lebih baik untuk menjaga nilai *setpoint* selalu sama dengan nilai arus kenyataan pada masukan *boost converter*.

7. DAFTAR PUSTAKA

- Chilikin, M. 1978. *Electric Drive*. Moscow: Mir Publishers.
- Fitzgerald, Arthur E. 2003. *Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill.
- Hart, Daniel W. 2011. *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill.
- Pillai, SK. 1989. *A First Course on Electric Drives*. New Delhi: Wiley Eastern Limited.
- Rashid, Muhammad H. 2001. *Power Electronics*. California: Academic Press.
- Sen, Paresh C. 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.