

PERANCANGAN SISTEM Pengereman Regeneratif pada Sepeda Listrik dengan Menggunakan DC-DC Boost Converter

Adinda Nur Hartanti^{1*)}, Jamila Istiqomah¹, Yuli Christyono¹, dan Ajub Ajulian¹

¹Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: adindanurhartanti6@gmail.com

Abstrak

Pertumbuhan penggunaan kendaraan listrik menjadi solusi alternatif di tengah kelangkaan Bahan Bakar Minyak (BBM) dan sebagai upaya mengurangi emisi karbon. Namun, optimalisasi energi pada kendaraan listrik seperti sistem pengereman regeneratif saat ini masih menjadi tantangan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengereman regeneratif pada sepeda listrik dengan memanfaatkan DC-DC boost converter. Sistem ini mengubah fungsi motor BLDC dioperasikan sebagai generator saat dilakukan pengereman, sehingga aliran daya akan mengalir dari motor menuju baterai dan melakukan pengisian yang dikendalikan oleh DC-DC boost converter. Pada penelitian ini difokuskan pada perancangan DC-DC boost converter sebagai regulator pengendali aliran daya yang dikontrol dengan driver MOSFET TLP250 sehingga dapat mempertahankan nilai tegangan keluaran yang stabil dan dapat mengisi daya ke baterai. Perancangan ini mencakup mengimplementasikan motor BLDC sebagai generator, penggunaan penyearah tiga fasa untuk mengubah keluaran AC menjadi DC, rangkaian DC-DC boost converter berbasis MOSFET TLP250 sebagai pengatur tegangan keluaran. Sistem ini dikendalikan oleh Arduino Nano yang menghasilkan sinyal PWM untuk pensaklaran MOSFET. Hasil pengujian menunjukkan bahwa DC-DC boost converter dapat bekerja dengan baik dan dapat menghasilkan tegangan keluaran maksimal 54 V dan arus keluaran 0,59 A pada frekuensi Switching 31,25 kHz. Nilai efisiensi rata-rata sistem tercatat sebesar 83,4 pada variasi beban 47 Ω , 94 Ω , 100 Ω , 147 Ω , dan 200 Ω .

Kata kunci: pengereman regeneratif, sepeda listrik, DC-DC boost converter, motor BLDC

Abstract

The increasing use of electric vehicles offers an alternative solution amidst the scarcity of fossil fuels and as an effort to reduce carbon emissions. However, energy optimization in electric vehicles, particularly in regenerative braking systems, remains a challenge. This study aims to design a regenerative braking system for electric bicycles utilizing a DC-DC boost converter. The system operates the BLDC motor as a generator during braking, allowing power to flow from the motor to the battery for charging, which is controlled by the DC-DC boost converter. This study focuses on designing a DC-DC boost converter as a power flow regulator controlled by a TLP250 MOSFET driver to maintain a stable output voltage and facilitate battery charging. The design involves implementing the BLDC motor as a generator, a three-phase rectifier to convert AC output into DC, and a DC-DC boost converter circuit based on the TLP250 MOSFET for voltage regulation. The system is managed by an Arduino Nano, which generates PWM signals to control the MOSFET switching. Testing results show that the DC-DC boost converter operates effectively, achieving a maximum output voltage of 54 V and an output current of 0.59 A at a switching frequency of 31.25 kHz. The system demonstrated an average efficiency of 83.4% under load variations of 47 Ω , 94 Ω , 100 Ω , 147 Ω , and 200 Ω .

Keywords: regenerative braking, electric bicycle, DC-DC boost converter, BLDC motor.

1. Pendahuluan

Kebutuhan manusia terhadap energi listrik akan semakin Bertambahnya jumlah penduduk di Indonesia semakin mengurangi ketersediaan energi fosil, yang dapat menimbulkan krisis energi. Krisis energi ini berdampak pada kelangkaan Bahan Bakar Minyak (BBM). Menurut data BP Statistical Review of World Energy tahun 2020, konsumsi harian BBM di Indonesia pada tahun 2019 meningkat 4,1% dibandingkan tahun sebelumnya,

mencapai 1.863 barel per hari [1]. Oleh karena itu, penggunaan sumber energi alternatif sebagai pengganti BBM harus dimulai, dan masyarakat perlu didorong untuk beralih ke sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Penggunaan kendaraan listrik muncul sebagai opsi solutif di tengah kelangkaan BBM, memberikan kontribusi pada penciptaan lingkungan dengan emisi dan polusi yang rendah. Perkembangan teknologi transportasi kendaraan listrik di Indonesia, khususnya pada sepeda listrik, terus mengalami kemajuan pesat. Meskipun sepeda listrik

dianggap sebagai solusi transportasi yang lebih berkelanjutan, efisiensi penggunaan energi pada kendaraan ini masih menjadi tantangan, terutama dalam konteks sistem pengereman. Saat ini, sistem pengereman pada sepeda listrik umumnya mengubah energi kinetik menjadi panas melalui pengereman mekanis. Optimalisasi pengereman dapat dicapai dengan memanfaatkan sistem pengereman regeneratif, dimana motor listrik pada sepeda tersebut berfungsi ganda sebagai generator. Dalam pengereman regeneratif, aliran daya dapat mengalir dari motor ke baterai kemudian terjadi proses pengisian energi [2].

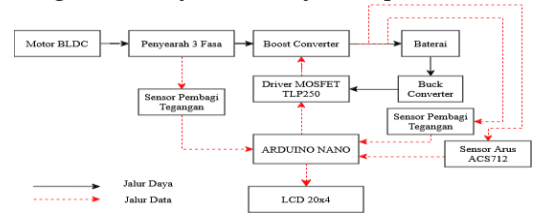
Sehingga, untuk mengatur kebutuhan beban dan mengontrol arus yang mengisi baterai, diperlukan suatu rangkaian konverter, yaitu DC-DC *boost converter* [3]. Fungsinya adalah untuk meningkatkan tegangan yang diinginkan dan menjaga nilai tegangan tetap konstan [4]. Proses pengereman bertujuan untuk mengurangi kecepatan, sehingga tegangan keluaran mesin berada di bawah nominal. Penelitian [4] membahas pengereman regeneratif menggunakan DC-DC *buck-boost converter* yang mampu mengalirkan daya untuk mengisi baterai dan dikendalikan menggunakan Arduino. Dalam penelitian [5][6], pengereman regeneratif menggunakan *buck converter* dibahas dengan menggunakan sinyal PWM untuk menghasilkan referensi yang akurat.

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan yang diuraikan, penelitian ini bertujuan merancang perangkat keras yang dapat mengalirkan daya saat pengereman dan mengontrol tegangan keluaran agar dapat mengisi baterai. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam bentuk perancangan dan implementasi DC-DC *boost converter* yang dioptimalkan pada sistem pengereman sepeda listrik. Konverter yang akan dibuat adalah konverter arus searah tipe *boost* karena tegangan yang dihasilkan dari pengereman regeneratif relatif kecil sehingga perlu *boost converter* untuk menaikkan tegangan agar dapat *charging* ke baterai. Konverter ini dirancang agar mampu bekerja pada rentang tegangan luas dengan efisiensi tinggi dan respon transien yang cepat. Sehingga pada converter ini menggunakan sinyal PWM yang dikendalikan oleh driver MOSFET TLP250 [7] berbasis mikrokontroler Arduino Nano Atmega328 [8]. Sebelum output DC dapat diproses oleh DC-DC *boost converter*, output dari motor 3-fasa (BLDC) masih berbentuk AC, kemudian diubah menjadi DC melalui *rectifier* 3-fasa. Untuk mengontrol proses pengereman regeneratif, digunakan driver MOSFET TLP250.

Kontribusi lain dari penelitian ini juga terletak pada penerapan Teknik kontrol PWM yang terintegrasi dengan desain konverter yang dirancang untuk mencapai regulasi tegangan yang stabil pada berbagai kondisi input yang berubah-ubah sehingga tegangan output tetap konstan.

2. Metode

Diagram blok system ditunjukkan pada Gambar 1

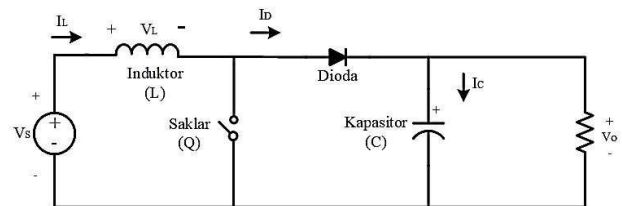


Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Sistem pengereman regeneratif ini dimulai ketika sepeda listrik dinyalakan dengan sumber dari baterai Lithium-Ion 36 V 13 Ah kemudian *throttle* diputar untuk menggerakkan motor BLDC. Motor BLDC ini akan dimanfaatkan sisa putaran motornya ketika gas *throttle* dilepas kemudian rem saklar di tekan sehingga dapat mengaktifkan sistem dan motor BLDC akan bekerja sebagai generator untuk menghasilkan tegangan. Tegangan yang dihasilkan dari sisa putaran motor dikonversikan menjadi tegangan DC menggunakan penyearah 3 fasa. Keluaran dari penyearah 3 fasa akan di baca oleh sensor pembagi tegangan sebagai masukan yang akan dikendalikan dengan Arduino Nano kemudian menghasilkan keluaran berupa *duty cycle* yang dapat mengatur saklar driver MOSFET TLP250 dalam rangkaian *boost converter*. Untuk mengaktifkan driver MOSFET yaitu mendapat suplai dari baterai kemudian diturunkan tegangannya menggunakan *buck converter* menjadi 12,5 V. Selanjutnya keluaran dari *boost converter* akan dibaca oleh sensor pembagi tegangan dan sensor arus sebagai umpan balik yang digunakan dalam proses pengisian baterai. Proses *charging* akan berlangsung ketika input minimal yang masuk ke DC-DC *boost converter* sebesar 10 V dan arus input minimal sebesar 0,2A. Hasil dari pengereman regeneratif akan dibaca dan ditampilkan pada LCD 20x4.

2.1 Perancangan Rangkaian Daya DC-DC Boost Converter

Pada penelitian ini menggunakan rangkaian daya DC-DC *boost converter* yang digunakan untuk menaikkan tegangan DC yang dihasilkan dari motor BLDC sehingga dapat melakukan pengecasan dan menjaga nilai tegangan baterai ketika proses *charging*. Bentuk rangkaian DC-DC *boost converter* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian DC-DC *boost converter*

Rangkaian DC-DC *boost converter* terdiri dari beberapa komponen yaitu kapasitor (C), induktor (L), dioda (D), sakelar (Q), dan beban [9]. Spesifikasi rangkaian DC-DC *boost converter* dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Spesifikasi rangkaian DC-DC *Boost Converter*

Spesifikasi Teknis	Nilai
Tegangan masukan minimal (V_{in})	10 V
Tegangan keluaran maksimal (V_o)	45 V
Duty cycle (D)	25 – 88%
Arus keluaran (I_o)	0 – 1 A
Frekuensi Switching (f_s)	31,25 kHz
Ripple tegangan (V_r)	0,01 V

Berdasarkan pada Tabel 1 rangkaian DC-DC *boost converter* yang akan dirancang tegangan *input* minimal sebesar 10 V kemudian menghasilkan tegangan *output* maksimal sebesar 42 V. Untuk meningkatkan nilai tegangan dari 10 V menjadi 42 V, digunakan frekuensi *switching* sebesar 31,25 kHz (*fast switching*) dengan rentang *duty cycle* antara 25% hingga 88%. Pada rangkaian DC-DC *boost converter* tersusun dari beberapa komponen yaitu induktor, kapasitor, MOSFET, resistor dan dioda. Komponen penyusun pada DC-DC *boost converter* yaitu sebagai berikut.

2.1.1 Induktor

Penentuan nilai induktor terdapat beberapa parameter yang harus dipertimbangkan untuk memastikan kinerja yang optimal. Nilai induktansi dapat dihitung menggunakan perhitungan nilai induktansi minimum pada Persamaan 1 berikut [9].

$$L_{min} = \frac{D \times (1-D)^2 \times R}{2 \times f} \quad (1)$$

Dimana L_{min} merupakan nilai induktansi minimum, D adalah *duty cycle*, R adalah resistansi, dan f adalah frekuensi. Maka besar nilai induktansi minimum sebagai berikut.

$$L_{min} = \frac{0,25 \times (1 - 0,25)^2 \times 30}{2 \times 31250}$$

$$L_{min} = 67,5 \mu H$$

Nilai minimum induktansi yang dihitung sebesar 67,5 μH , namun karena nilai ini tidak tersedia dipasaran maka nilai induktansi yang dipilih sebesar 80 μH .

2.1.2 Kapasitor

Kapasitor pada rangkaian DC-DC *boost converter* digunakan untuk menyimpan energi selama siklus kerja dan dapat memfilter tegangan sehingga mengurangi *ripple* tegangan yang disebabkan saat *switching* dari MOSFET.

Nilai kapasitansi minimum dapat dihitung dengan ,menggunakan Persamaan 2 berikut [10].

$$C_{min} = \frac{D}{\%V_r \times R \times f} \quad (2)$$

Dimana C_{min} merupakan nilai induktansi minimum, D adalah *duty cycle*, $\%V_r$ adalah, R adalah resistansi, dan f adalah frekuensi *switching*. Maka nilai kapasitansi minimum dapat dihitung sebagai berikut.

$$C_{min} = \frac{0,88}{0,01 \times 20 \times 31250 \text{ Hz}}$$

$$C_{min} = 140,8 \mu F$$

Nilai kapasitansi minimum yaitu sebesar 140,8 μF , akan tetapi karena nilai kapasitor tersebut tidak tersedia dipasaran maka kapasitor yang dipilih sebesar 470 μF dengan nilai tegangan operasional 63 V.

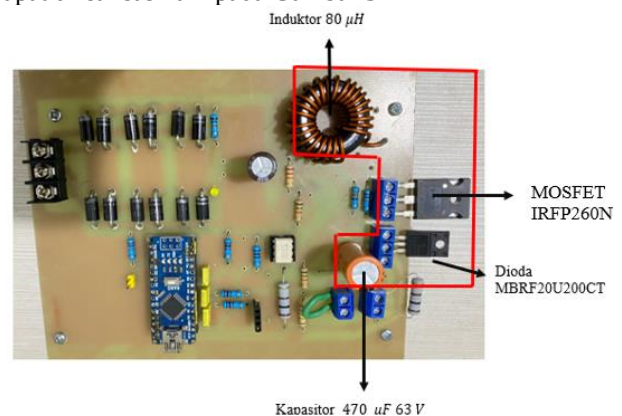
2.1.3 Dioda

Jenis dioda yang dipilih untuk merancang rangkaian *boost converter* yaitudioda MBRF20U200CT tipe *Schottky* karena dioda ini mampu mengalirkan arus 20 A, memiliki rating tegangan maksimum sebesar 200 V, dan memiliki fitur *fast recovery* dengan waktu pemilihan yang cepat 35ns [11] Dioda ini dirancang untuk menangani arus puncak yang tinggi sehingga dapat memberikan perlindungan terhadap lonjakan arus yang mungkin terjadi.

2.1.4 MOSFET

Pada implementasi rangkaian DC-DC *boost converter* ini dipilih MOSFET tipe IRFP260N[12]. MOSFET ini memiliki kecepatan *switching* yang tinggi dan dapat memberikan proteksi terhadap arus berlebih untuk menjaga keamanan dan kinerja perangkat. Tipe MOSFET ini juga memiliki toleransi tegangan yang tinggi sebesar 200 V dan arus drain maksimum sebesar 50 A [13].

Perancangan rangkaian daya DC-DC *boost converter* dapat direalisasikan pada Gambar 3



Gambar 3. Realisasi rangkaian DC-DC *boost converter*

2.2 Perancangan Rangkaian Kontrol

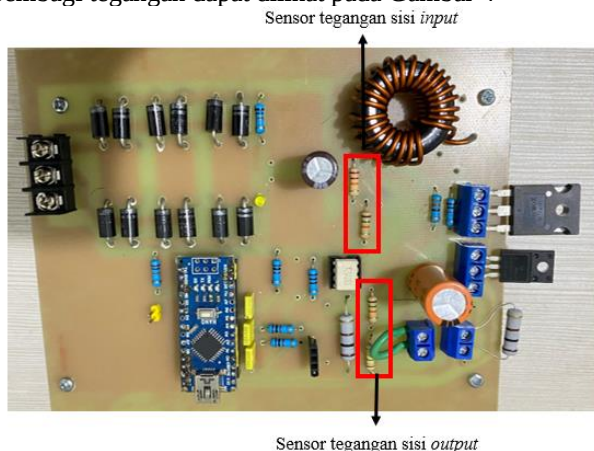
Perancangan rangkaian kontrol pada penelitian ini dibagi menjadi 3 bagian yaitu perancangan rangkaian pembangkit PWM menggunakan Arduino Nano [14], perancangan sensor tegangan dan sensor arus. Berikut merupakan penjelasan tiap bagian rangkaian control.

2.2.1 Arduino Nano

Arduino Nano digunakan pada Makalah ini untuk membangkitkan sinyal PWM melalui pin digital dan sebagai rangkaian pengendali pada sistem. Arduino Nano diprogram untuk menerima data yang terdeteksi oleh sensor tegangan dan sensor arus, baik pada sisi *input* maupun sisi *output* DC-DC *boost converter*. Hasil data tersebut akan diolah oleh Arduino Nano sebagai umpan balik kontrol, sehingga nilai PWM disesuaikan hingga tegangan dan arus mencapai nilai yang telah diatur. Pin yang digunakan untuk pembangkitan PWM pada Makalah ini yaitu pin 9 (Timer1). Pengaturan frekuensi PWM dapat diatur dengan menggunakan mode Fast PWM 9-bit. Keluaran PWM pada Arduino Nano diatur pada pin 9 OC1A (Timer1). Nilai TOP yang didapatkan sebesar 511 yang artinya nilai frekuensi PWM yang diatur pada Arduino Nano sebesar 31,25 kHz.

2.2.2 Sensor Tegangan

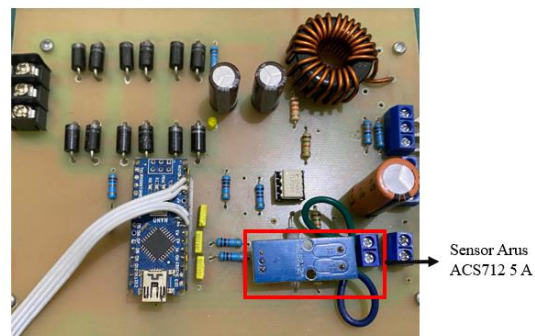
Rangkaian pembagi tegangan yang digunakan pada Makalah ini yaitu untuk mendeteksi tegangan dengan rentang 0 – 12,5V. pada sisi *input* dan pada sisi *output* 0 – 55 V. Besar nilai resistor R_1 dan R_2 yang digunakan pada sensor pembagi tegangan di sisi input bernilai 22 k Ω dan 15 k Ω , sedangkan besar nilai resistor yang digunakan pada sisi *output* bernilai 150 k Ω dan 15 k Ω . Realisasi rangkaian pembagi tegangan dapat dilihat pada Gambar 4



Gambar 4. Realisasi rangkaian pembagi tegangan

2.2.3 Sensor Arus

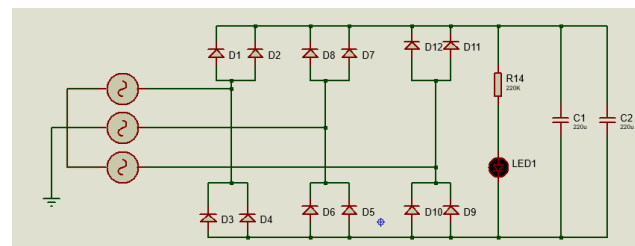
Sensor arus yang digunakan pada penelitian ini yaitu menggunakan modul ACS712 5 A yang dipasang pada sisi keluaran *boost converter*. Sensor ini dipilih karena nilai arus *output* maksimal yang dihasilkan dari *boost converter* sebesar 1 *Ampere* sehingga mampu untuk memonitor arus yang akan mengalir ke baterai. Sensor ACS712 memiliki tegangan kerja 5 A dengan sensitivitas sebesar 100 mV/A. Realisasi rangkaian sensor arus dapat dilihat pada Gambar 5



Gambar 5. Realisasi sensor arus ACS712 5A

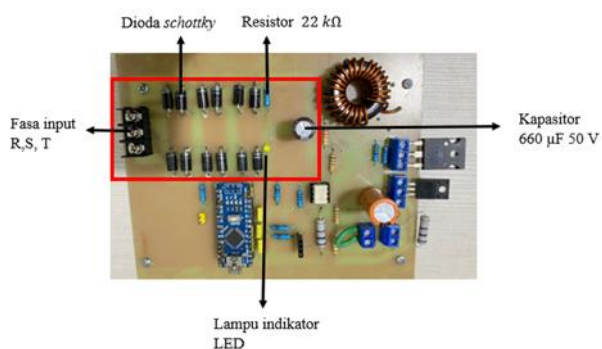
2.3. Rangkaian Penyearah Tiga Fasa Tak Terkendali

Jenis dioda yang digunakan pada rangkaian penyearah ini yaitu dioda Schottky 3 A yang berjumlah 12 dioda [15]. Dioda ini disusun membentuk rangkaian jembatan (*bridge rectifier*) yang dikelompokkan dalam dua set dan masing-masing berpasangan untuk setiap fasanya. Selain itu, pada rangkaian ini terdapat LED sebagai lampu indikator dan juga terdapat kapasitor untuk menyimpan tegangan dan mengurangi *ripple* tegangan yang dihasilkan dari penyearah. Rangkaian penyearah tiga fasa tak terkendali dapat dilihat pada Gambar 6



Gambar 6. Rangkaian penyearah tiga fasa tak terkendali

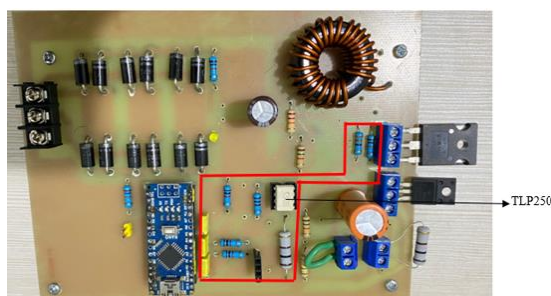
Realisasi rangkaian penyearah tiga fasa tak terkendali dapat dilihat pada Gambar 7



Gambar 7. Realisasi rangkaian penyearah tiga fasa tak terkendali

2.4 Driver MOSFET TLP250

Driver MOSFET TLP250 merupakan rangkaian kontrol yang digunakan untuk membangkitkan sinyal PWM melalui pin digital Arduino Nano. Driver MOSFET ini juga berfungsi sebagai pemisah rangkaian daya DC-DC *boost converter* dengan rangkaian kontrolnya. Rangkaian ini menggunakan IC TLP250 yang berfungsi sebagai switching MOSFET IRFP260N. Rangkaian ini juga menggunakan catu daya 12,5 V yang bersumber dari baterai dan masuk ke kaki *gate* dan *source*. Realisasi rangkaian driver MOSFET TLP250 dapat dilihat pada Gambar 8



Gambar 8. Realisasi rangkaian driver MOSFET TLP250

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Rangkaian Daya DC-DC Boost Converter

Pengujian rangkaian daya bertujuan untuk mengetahui bahwa kinerja *boost converter* yang telah dirancang sudah sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Penelitian Makalah ini akan dibagi menjadi beberapa bagian pengujian diantaranya sebagai berikut:

1. Pengujian rangkaian daya

Pengujian ini dilakukan untuk menguji rangkain DC-DC *boost converter* dengan variasi beban dan duty

cycle terhadap tegangan keluaran dan rangkaian DC-DC *boost converter* tersebut. Pengujian juga untuk menentukan DC-DC *boost converter* dapat bekerja untuk menaikkan tegangan keluaran sisa pengereman regeneratif yang sesuai spesifikasi agar dapat melakukan *charging* ke baterai.

2. Pengujian rangkaian kontrol

Pengujian ini dilakukan dengan mengukur sensor tegangan dan sensor arus dengan variasi nilai tegangan dan arus input untuk mengetahui performa dan perbandingan nilai aktual (terukur) dengan nilai yang terdeteksi oleh sensor

3. Pengujian rangkaian driver MOSFET TLP250

Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan nilai duty cycle dan menganalisis bentuk output gelombang menggunakan osiloskop digital.

4. Pengujian rangkaian penyearah tiga fasa

Pengujian ini dilakukan menggunakan osiloskop digital untuk mengetahui rangkaian yang dirancang ini dapat mengubah tegangan AC menjadi DC dan bekerja sesuai spesifikasi

5. Pengujian pengereman regeneratif

Pengujian ini dilakukan untuk menguji keseluruhan sistem yang dirancang agar saat dilakukan pengereman dapat efektif melakukan *charging* ke baterai

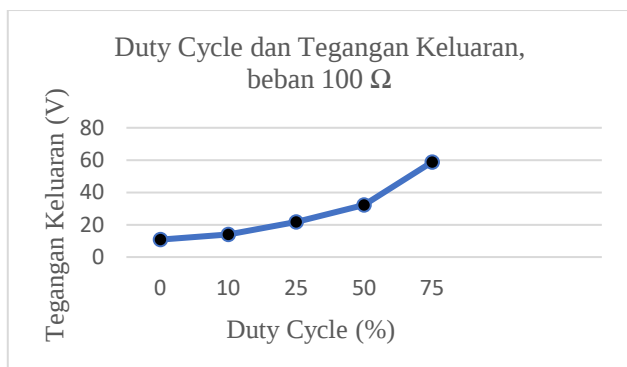
3.1.1. Pengujian dengan Beban 100 Ω

Pengujian rangkaian DC-DC *boost converter* ini dilakukan dengan cara mengirimkan sinyal PWM menggunakan Arduino Nano ke pin 9. Nilai tegangan input yang digunakan sebesar 12,5 V menggunakan DC *power supply*. Perubahan nilai tegangan keluaran pada rangkaian DC-DC *boost converter* ini dapat dilihat dengan menggunakan variasi *duty cycle* 0 - 75% dan menggunakan resistor batu 100 Ω sebagai beban pada Tabel 2

Tabel 2. Pengujian dengan Beban 100 Ω

Duty Cycle (%)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Eff (%)
0	12	0,11	10,8	0,10	81
10	12	0,19	14	0,14	86
25	12	0,48	21,8	0,22	84
50	12	1,06	32,3	0,32	82
75	12	3,34	58,8	0,59	85

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa nilai efisiensi rata-rata pada rangkaian DC-DC *boost converter* sebesar 83,6 %. Nilai efisiensi dari *converter* yang dirancang tidak bisa mencapai 100% karena adanya disipasi MOSFET, dioda, dan induktor saat rangkaian bekerja. Perbandingan variasi *duty cycle* dengan tegangan keluaran pengukuran ditunjukkan pada Gambar 9



Gambar 9. Grafik tegangan keluaran variasi *duty cycle* pada DC-DC boost converter

Pada Gambar 9 ditunjukkan grafik hubungan hasil pengukuran antara nilai *duty cycle* dengan nilai tegangan keluaran. Nilai *duty cycle* berbanding lurus dengan tegangan keluaran. Artinya ketika nilai *duty cycle* meningkat, maka tegangan keluaran pada DC-DC boost converter juga meningkat. Hal ini terjadi karena waktu switch lebih banyak dalam keadaan ON sehingga memungkinkan energi lebih banyak di simpan di induktor sebelum di lepaskan ke *output*.

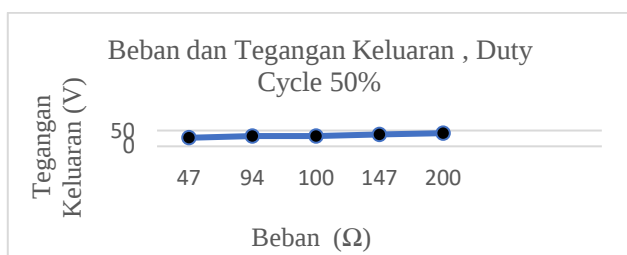
3.1.2. Pengujian dengan Variasi Beban

Pengujian dengan menggunakan nilai *duty cycle* 50% dengan variasi nilai beban menggunakan resistor batu pada sisi *output* bernilai 47 Ω, 94 Ω, 100 Ω, 147 Ω, dan 200 Ω ditunjukkan pada Tabel 3

Tabel 3. Pengujian dengan Variasi Beban

Duty Cycle (%)	Beban (Ω)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Eff (%)
50	47	12	1,62	27	0,57	80
50	94	12	1,08	32,1	0,34	84
50	100	12	1,07	32,3	0,32	81
50	147	12	0,92	37,1	0,25	85
50	200	12	0,83	41,7	0,21	87

Perbandingan variasi *duty cycle* dengan tegangan keluaran pengukuran ditunjukkan pada Gambar 10



Gambar 10 Grafik hubungan variasi beban dan tegangan keluaran pada DC-DC boost converter

Pada Gambar 10 grafik hubungan variasi nilai beban dan nilai tegangan keluaran pada rangkaian DC-DC boost converter dapat dilihat bahwa nilai perubahan beban berbanding lurus dengan nilai tegangan keluaran. Semakin besar nilai beban, maka nilai tegangan keluaran juga semakin besar.

3.2. Pengujian Rangkaian Kontrol Driver MOSFET TLP250

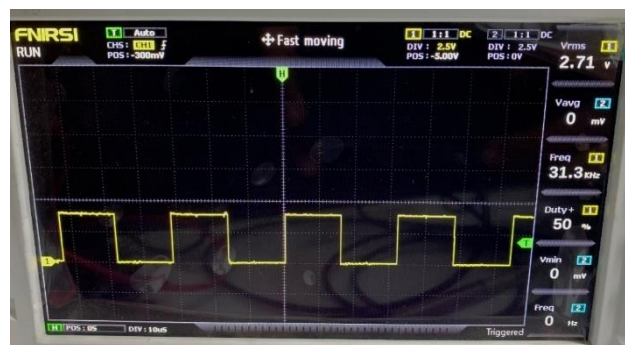
Pengujian rangkaian kontrol terdapat 3 pengujian yaitu pengujian rangkaian driver MOSFET TLP250, pengujian snsor arus, dan pengujian rangkaian pembagi tegangan. terdiri dari 2 bagian pengujian, yaitu pengujian rangkaian pembangkit PWM dan pengujian sensor tegangan. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui kinerja rangkaian kontrol dan ketelitian pembacaan sensor.

3.2.1. Pengujian Rangkaian Driver MOSFET TLP250

Pengujian driver MOSFET dilakukan dengan memvariasikan nilai *duty cycle* dengan senarai program yang disusun sedemikian rupa sehingga frekuensi sinyal PWM yang dibangkitkan bernilai 31,25 kHz. Nilai frekuensi, *duty cycle*, dan tegangan keluaran gelombang hasil pembangkitan sinyal PWM dapat dilihat pada layar osiloskop pada Gambar 11 sampai dengan Gambar 14



Gambar 11. Duty Cycle 25%



Gambar 12. Duty Cycle 50%



Gambar 13. Duty Cycle 75%

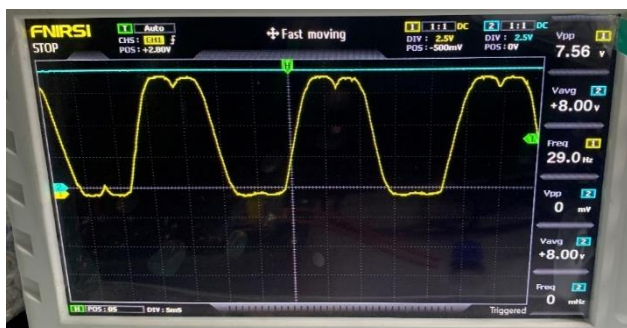


Gambar 14. Duty Cycle 88%

Pada Gambar 11 sampai dengan Gambar 14 dapat dilihat bahwa PWM yang dibangkitkan oleh pin 9 pada Arduino Nano sudah sesuai dengan nilai *duty cycle* dan frekuensi yang diharapkan untuk mengendalikan DC-DC *boost converter*.

3.3 Pengujian Rangkaian Penyearah Tiga Fasa

Pengujian penyearah 3 fasa dilakukan menggunakan osiloskop untuk mengetahui bentuk gelombang pada rangkaian penyearah 3 fasa yang dirancang yang ditunjukkan pada Gambar 15



Gambar 15. Hasil pengujian rangkaian penyearah tiga fasa menggunakan osiloskop

Hasil pengujian pada gambar 15 dapat dilihat bahwa gelombang yang ditampilkan pada osiloskop tampak seperti bentuk gelombang berdenyut dimana adanya puncak dan jeda di antara puncak-puncak tersebut. Hal ini

merupakan ciri dari rangkaian penyearah tiga fasa tak terkendali, dimana hanya pada bagian positif dari gelombang tiga fasa disearahkan. Gelombang menunjukkan 6 denyutan setiap siklus penuh dari sumber tiga fasa yang mengindikasikan bahwa penyearah ini telah bekerja dengan benar. Tegangan rata-rata keluaran DC yang dihasilkan dari penyearah sebesar 8 V.

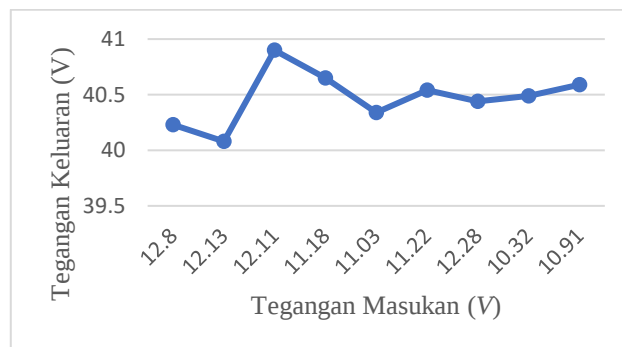
3.4 Pengujian Pengereman Regeneratif

Pengujian pengereman regeneratif dilakukan untuk mengetahui bahwa sistem yang dirancang sudah berfungsi dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Pengujian ini dilakukan dengan cara memonitor V_{in} , V_{out} , I_{in} , I_{out} dan P_{out} pada LCD 20x4 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4

Tabel 4. Pengujian pengereman regeneratif

V_{in} (V _{DC})	V_{out} (V _{DC})	I_{out} (A)	P_{out} (W)
12,58	40,23	0,53	21,32
12,13	40,08	0,23	9,21
12,11	40,90	0,43	17,59
11,18	40,65	0,52	21,14
11,03	40,34	0,32	12,90
11,22	40,54	0,56	22,70
12,28	40,44	0,46	18,60
10,32	40,49	0,39	15,80
10,91	40,59	0,43	17,45

Berdasarkan Tabel 4 hasil pengujian pengereman regeneratif, maka dapat dibuat grafik perbandingan antara nilai tegangan masukan dan tegangan keluaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16



Gambar 16. Grafik perbandingan tegangan masukan dan tegangan keluaran pengereman regeneratif

Berdasarkan Gambar 16 dapat dilihat bahwa nilai rentang V_{out} berada antara 40,08 V sampai 40,90 V yang

menunjukkan bahwa DC-DC *boost converter* yang dirancang dapat bekerja dengan baik dan efektif dalam mempertahankan nilai tegangan keluaran yang relatif stabil meskipun nilai tegangan masukan selalu bernilai fluktuatif (berubah-ubah).

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan DC-DC *boost converter* sebagai bagian dari sistem pengereman pada sepeda listrik. Konverter dirancang untuk mengatur tegangan dari hasil pengereman regeneratif agar sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan untuk pengisian baterai. Berdasarkan hasil pengujian pada rangkaian DC-DC *boost converter* dengan menggunakan beberapa variasi *duty cycle* pada beban 100 Ω maupun *duty cycle* menunjukkan bahwa nilai efisiensi rata-rata pada rangkaian DC-DC *boost converter* sebesar 83,6 %. Nilai efisiensi dari *converter* yang dirancang tidak bisa mencapai 100% karena adanya disipasi MOSFET, dioda, dan induktor saat rangkaian bekerja. Pada pengujian rangkaian DC-DC *boost converter* dengan variasi beban dihasilkan bahwa nilai perubahan beban berbanding lurus dengan nilai tegangan keluaran. Semakin besar nilai beban, maka nilai tegangan keluaran juga semakin besar. Pada pengujian rangkaian kontrol driver MOSFET TLP250 dengan variasi *duty cycle* 25%, 50%, 75% dan 88% yang ditampilkan pada osiloskop digital didapatkan bahwa PWM yang dibangkitkan oleh pin 9 pada Arduino Nano sudah sesuai dengan nilai *duty cycle* dan frekuensi yang diharapkan untuk mengendalikan DC-DC *boost converter*. Pada pengujian rangkaian penyearah tiga fasa yaitu gelombang yang ditampilkan pada osiloskop tampak seperti bentuk gelombang berdenyut dimana adanya puncak dan jeda di antara puncak-puncak tersebut. Hal ini merupakan ciri dari rangkaian penyearah tiga fasa tak terkendali, dimana hanya pada bagian positif dari gelombang tiga fasa disearahkan. Gelombang menunjukkan 6 denyutan setiap siklus penuh dari sumber tiga fasa yang mengindikasikan bahwa penyearah ini telah bekerja dengan benar. Tegangan rata-rata keluaran DC yang dihasilkan dari penyearah sebesar 8 V. DC-DC *boost converter* dapat bekerja dengan baik sebagai regulator pengendali aliran daya dan menjaga nilai tegangan keluaran yang relatif konstan untuk sistem pengereman regeneratif pada sepeda listrik. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai tegangan keluaran saat pengereman regeneratif dengan nilai tegangan rentang 40,08 V sampai dengan 40,90 V meskipun nilai tegangan masukan bersifat fluktuatif atau berubah-ubah. Nilai arus maksimal pada saat pengereman regeneratif bernilai 0,56 A. Hal ini menunjukkan bahwa sistem ini dapat mengisi daya ke baterai karena tegangan dan arus minimal untuk *charging* ke baterai bernilai 30 V dan 0,2 A.

Referensi

- [1] M. V. Sinitsyn, "End of Enegy Coal Era," *World Economy and International Relations*, vol. 65, no. 11, pp. 40–48, 2021, doi: 10.20542/0131-2227-2021-65-11-40-48.
- [2] S. Soeprapto, U. Wibawa, M. Sidiq, T. Utomo, and S. Yuniarti, "Pengereman Regeneratif Motor Arus Searah Tanpa Sikat (Blde) Untuk Mengisi Baterai Pada Sepeda Gowes," *Journal of Enviromental Engineering and Sustainable Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 112–120, 2016, doi: 10.21776/ub.jeest.2017.003.02.3.
- [3] M. Hushaini, H. Hasan, and M. Gapy, "Stabilisasi Tegangan DC Menggunakan Boost Konverter," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 128–136, 2019.
- [4] P. H. Simbolon and A. B. Pulungan, "Implementasi Buck-Boost Converter pada Proses Pengereman Regeneratif Motor BLDC," *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Manufaktur*, vol. 2, no. 2, pp. 79–88, 2020, doi: 10.48182/jtrm.v2i2.77.
- [5] A. B. Pulungan and T. Ramadhani, "Buck Converter Sebagai Regulator Aliran Daya Pada Pengereman Regeneratif," *Jurnal EECCIS*, vol. 12, no. 2, pp. 93–97, 2018.
- [6] Soepranto, M. Shidiq, U. Wibawa, and T. Utomo, "Jurnal Teknologi Elektro , Universitas Mercu Buana ISSN: 2086 - 9479 Pengereman Regeneratif Motor DC Tanpa Sikat (BLDC) Untuk Pengisian Baterai Pada Sepeda Elektrik Soeprapto Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro Unggul Wibawa Fakultas Teknik Pr," vol. 9, no. 1, pp. 1–9, 2018.
- [7] T. Inverter, I. For, A. Conditionor, P. Configuration, and T. Table, "Transistor Inverter Inverter For Air Conditionor IGBT Gate Drive Power MOS FET Gate Drive," vol. 5, pp. 1–8, 2004.
- [8] D. Sasmoko, *Arduino dan Sensor pada Project Arduino DIY*. 2021.
- [9] D. W. Hart, *Power Electronics*, vol. 166. Valpariso, Indiana: MCGraw-Hill, 2011.
- [10] *POWER ELECTRONICS Academic Press Series in Engineering*.
- [11] T. Data, "SEMICONDUCTOR SWITCHING TYPE POWER SUPPLY APPLICATION .," pp. 1–2, 2009.
- [12] S. T. Data, "SWITCHMODE TM Power Rectifiers," *Power*, pp. 1–7, 1996.

- [13] H. P. Mosfet and M. Units, “Irfp260N Irfp260N,” pp. 1–9.
- [14] Microchip, “ATmega48A / PA / 88A / PA / 168A / PA / 328 / P megaAVR ® Data Sheet ATmega48A / PA / 88A / PA / 168A / PA / 328 / P,” *Microchip*, vol. 4, no. 6, pp. 2186–2198, 2017, [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [15] D. Fewson, *Introduction to Power Electronics*, vol. 19, no. 9. 1999. doi: 10.1109/MPER.1999.785806.
- [16] C. P. Ragasudha and S. Hemamalini, “Performance Analysis of a High Gain Bidirectional DC-DC Converter Fed Drive for an Electric Vehicle With Battery Charging Capability During Braking,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 14499–14511, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3357726.
- [17] A. B. Fergiansyah, “Peningkatan Kinerja Buck Boost Converter Menggunakan Soft Switching Dengan Metode Close Loop Control System,” 2022.
- [18] P. K. Lalmalsawmi and Biswas, “Full-Bridge DC-DC Converter and Boost DC-DC Converter with Resonant Circuit For Plug-in Hybrid Electric Vehicles,” in *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSPP)*, Hyderabad, India, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICICCSPP53532.2022.9862426.
- [19] T. K. Arham, M. Ageng, M. Yusuf, A. Syakur, and M. Munadi, “IMPLEMENTASI KONVERTER BUCK SEBAGAI PENGKONDISI TEGANGAN INPUT PADA ZERO VOLTAGE SWITCHING (ZVS),” vol. 14, no. 1, pp. 7–16, 2025.
- [20] I. Yuwandra, S. Handoko, and D. Darjat, “Perancangan Konverter Arus Searah Tipe Boost Dengan Tegangan Keluaran Terkontrol Berbasis Mikrokontroler Arduino Nano,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 26–32, 2021, doi: 10.14710/transient.v10i1.26-32.
- [21] F. Nur Azizah, J. Sudharto, and K. UNDIP Tembalang, “Implementasi Mode Kontrol Mppt Statis Pada Panel Surya Kondisi Partial Shading Menggunakan Konverter Topologi Boost Berbasis Algoritma Firefly,” vol. 10, no. 3, pp. 2685–0206, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>