

# ***Lithium-ion Battery Charger for BEV Applications Based on MF Full-bridge DC-DC Converter***

**BUDHI ANTO, DAFA BAGUS PRATAMA**

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Riau, Indonesia  
Email: [budhianto@eng.unri.ac.id](mailto:budhianto@eng.unri.ac.id)

*Received* 19 Juni 2023 | *Revised* 14 Agustus 2023 | *Accepted* 18 September 2023

## **ABSTRAK**

*Artikel ini memaparkan rancang bangun suatu alat pengisi muatan baterai (battery charger) kendaraan listrik jenis lithium-ion. Baterai yang digunakan berkapasitas 20-Ah dengan tegangan pengenal 48-V. Rangkaian battery charger menggunakan susunan kombinasi dari konverter AC-DC topologi penyearah satu-fasa jembatan dioda dan konverter DC-DC topologi jembatan-penuh yang dioperasikan pada frekuensi menengah (MF) yaitu sebesar 1 kHz. Rangkaian konverter jembatan-penuh dikendalikan oleh IC SG3526 yang mengatur lebar pulsa sinyal PWM yang diberikan kepada keempat MOSFET yang menyusun konverter tersebut. Karena dioperasikan pada frekuensi 1 kHz, konverter jembatan-penuh dapat menggunakan transformator yang intinya berbahan baja silikon berbentuk pelat tipis terlamniasi atau lebih dikenal dengan inti pelat E-I. Pengujian fungsional alat dilakukan dengan mengisi muatan baterai pada keadaan kapasitas awal 50% hingga penuh, menggunakan metode arus pengisian tetap sebesar 5-A. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa diperlukan waktu 80 menit untuk mengisi baterai hingga penuh pada kondisi tersebut.*

**Kata kunci:** *alat pengisi muatan baterai lithium-ion, kendaraan listrik, full-bridge DC-DC converter, frekuensi menengah, transformator inti baja silikon*

## **ABSTRACT**

*This manuscript describes the designing and making of a lithium-ion battery charger for battery electric vehicle applications. The battery has a capacity of 20-Ah with 48-V nominal voltage. The battery charger circuit uses the combination of an AC-DC converter in the form of a single-phase diode bridge rectifier and a full-bridge DC-DC converter, operating in medium frequency (MF) at 1 kHz. The full-bridge converter is controlled by a PWM controller SG3526 that sends its output to the 4 MOSFETs that built the converter. Due to operation at frequency of 1 kHz, the transformer's core can use the laminated silicon steel sheet that is known as the E-I core. The battery is charged using the constant-current method by maintaining the charging current at a constant value. The functional test of the battery shows that by using 5-A constant current charging, the battery takes 80 minutes to its full condition from 50% capacity at the beginning.*

**Keywords:** *lithium-ion battery charger, battery electric vehicles, medium frequency full-bridge DC-DC converter, silicon steel-core transformer*

## 1. PENDAHULUAN

Kendaraan listrik (*electric vehicles*) semakin populer sekarang ini. Secara definisi kendaraan listrik adalah suatu kendaraan yang menggunakan satu atau lebih motor listrik sebagai penggerak. Berdasarkan sumber energi dan jenis mesin penggerakannya, kendaraan listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu *pure electric vehicle* (PEV), *hybrid electric vehicle* (HEV), dan *fuel-cell electric vehicle* (FEV). Sumber energi pada PEV berasal dari baterai, dan motor listrik digunakan sebagai penggerak kendaraan. Pada HEV, sumber energi kendaraan berasal dari baterai dan bahan bakar minyak, sedangkan sebagai penggerak kendaraan adalah susunan kombinasi motor listrik dan jentera (*internal combustion engine*). Pada FEV, sumber energi kendaraan berasal dari hidrogen, dan sebagai penggerak kendaraan adalah motor listrik **(Chau, 2015) (Aziz, dkk, 2020)**. Karena menggunakan baterai sebagai sumber energi kendaraan, PEV dinamakan juga *battery electric vehicle* (BEV) atau kendaraan listrik berbasis baterai. Saat ini terdapat tiga bentuk teknologi HEV yang berkembang yaitu *plug-in hybrid electric vehicle* (PHEV), *hybrid electric vehicle* (HEV), dan *extended-range electric vehicle* (ER-EV) **(Sanguesa, dkk, 2021) (Halim, dkk, 2022)**. Pada PHEV, baterai yang mencatu motor listrik dapat diisi ulang menggunakan sumber energi listrik dari jaringan listrik perusahaan utilitas seperti PLN atau sumber energi listrik lainnya seperti pembangkit listrik tenaga surya. Berbeda dengan PHEV, baterai pada HEV tidak bisa diisi ulang muatannya menggunakan sumber energi eksternal kendaraan. Baterai pada HEV hanya diisi ulang oleh jentera kendaraan dengan suatu mekanisme tertentu. Pada ER-EV, baterainya dapat diisi ulang dari sumber listrik eksternal (seperti jaringan listrik PLN), sedangkan jentera tidak digunakan sebagai penggerak kendaraan, melainkan digunakan untuk mengisi muatan baterai untuk menambah kemampuan jelajah kendaraan listrik.

Baterai merupakan bagian penting dari suatu kendaraan listrik jenis BEV, karena merupakan sumber energi untuk menggerakkan motor listrik penggerak BEV dan untuk mencatu sistem instrumentasi kendaraan. Terdapat beberapa jenis baterai yang digunakan pada kendaraan listrik yaitu baterai asam-timbal (*lead-acid batteries*), baterai berbasis nikel (*nickel-based batteries*), baterai berbasis perak (*silver batteries*), baterai natrium-sulfur (*sodium-sulphur battery*), dan baterai lithium-ion (*Li-ion batteries*) **(Ahasan Habib, dkk, 2019) (Hoque, dkk, 2017) (Sun, dkk, 2020) (Rospawan, dkk, 2021)**. Baterai Li-ion adalah jenis baterai yang paling banyak digunakan pada kendaraan listrik **(Ahasan Habib, dkk, 2021) (Ahmadian, dkk, 2020)**. Terdapat beberapa keunggulan yang dimiliki oleh baterai Li-ion yang menjadikannya pilihan sebagai sumber energi penggerak kendaraan listrik dibandingkan dengan jenis baterai lainnya yaitu ringan dan memiliki kerapatan energi yang tinggi, mempunyai efisiensi yang tinggi pada saat proses pengisian ulang muatannya (*charging*), mempunyai daur pengisian-pelepasan muatan yang panjang, mempunyai tegangan sel yang tinggi yaitu sekitar 3,7 volt, serta memiliki tingkat *natural-discharge* atau *self-discharge* yang rendah, sehingga baterai ini paling baik dibanding baterai lain dalam mempertahankan kemampuan menahan muatan penuhnya. Namun demikian terdapat beberapa kelemahan baterai ini yang seharusnya menjadi perhatian penting ketika menggunakannya, yaitu memiliki resiko-meledak jika penggunaannya tidak tepat, biaya produksinya masih tinggi, proses *discharging* sampai baterai kosong akan merusak baterai, sensitif terhadap temperatur tinggi dan memiliki usia pakai yang singkat yaitu 2 sampai 3 tahun dari waktu pembuatannya **(Pramanik, dkk, 2019) (Feng, dkk, 2019) (Kong, dkk, 2018)**.

Alat pengisi ulang muatan baterai (*battery charger*) diperlukan untuk mengisi ulang muatan baterai Li-ion. Rangkaian *battery charger* dibuat berdasarkan bentuk tegangan masukannya dan jenis metode *charging* yang digunakan. Jika tegangan sumber berbentuk tegangan

bolak-balik seperti halnya tegangan jaringan listrik PLN, maka rangkaian *battery charger* dapat menggunakan konverter AC-DC yang tegangan keluarannya dapat dikendalikan. Jika tegangan sumber berbentuk tegangan searah seperti halnya tegangan yang dihasilkan oleh panel surya, maka rangkaian *battery charger* dapat menggunakan konverter DC-DC yang tegangan keluarannya dapat dikendalikan. Terdapat beberapa metode *charging* baterai Li-ion, yaitu (1) metode *constant trickle current* (CTC), (2) metode *constant current* (CC), (3) metode *constant voltage* (CV), dan metode *constant current constant voltage* (CCCV) **(Zhang, dkk, 2014)**.

Penelitian-penelitian untuk membuat sistem *battery charger* untuk baterai lithium-ion kendaraan listrik menggunakan instalasi listrik rumah telah menarik minat banyak peneliti dan alatnya juga telah dipasarkan. Rusli dkk. telah membuat sistem *battery charger* yang terdiri dari susunan kombinasi konverter AC-DC yang dilengkapi dengan rangkaian perbaikan faktor daya berbasis *boost converter* dan konverter DC-DC dalam bentuk *buck converter*. Mereka menggunakan metode pengisian muatan jenis CCCV **(Rusli, dkk, 2019)**. Kim dkk. telah membuat sistem *battery charger* untuk baterai lithium-ion untuk kendaraan listrik ringan (*light electric vehicles*) menggunakan rangkaian kombinasi konverter AC-DC dan konverter DC-DC topologi *LLC resonant full-bridge converter* **(Kim, dkk, 2019)**. Mereka juga menggunakan metode pengisian jenis CCCV.

Pada penelitian ini, sistem *battery charger* untuk baterai lithium-ion dicatu oleh sumber tegangan satu-fasa 220-V 50-Hz dan mempunyai kapasitas daya 1000-W. Baterai yang digunakan mempunyai kapasitas penyimpanan 20-Ah dengan tegangan pengenal (*nominal voltage*) 48-V. Baterai ini digunakan sebagai sumber energi penggerak mobil listrik Parameswara Universitas Riau (mobil listrik tim Fakultas Teknik Universitas Riau) untuk dilombakan pada ajang *Formula Electric Student Championship-Indonesia International Motor Show* (FESC-IIMS) di Jakarta pada tahun 2022 **(Tempo.co, 2022)**. Adapun penggunaan baterai dengan tegangan pengenal 48-V merupakan salah satu persyaratan spesifikasi kendaraan listrik peserta lomba tersebut.

Rangkaian *battery charger* yang dibuat menggunakan susunan kombinasi konverter AC-DC dan konverter DC-DC. Konverter AC-DC menggunakan penyearah satu-fasa jembatan dioda, dan konverter DC-DC menggunakan topologi *full-bridge converter*. Adapun pemilihan *full-bridge converter* didasari oleh beberapa pertimbangan yaitu, (1) untuk memisahkan secara galvanis rangkaian masukan dan rangkaian keluaran sistem *battery charger*, (2) *full-bridge converter* mempunyai karakteristik pengaturan linier, dan (3) *full-bridge converter* merupakan topologi yang paling tepat untuk penggunaan konverter DC-DC berdaya besar **(Pressman, dkk, 2009)**.

Pada umumnya *full-bridge DC-DC converter* dioperasikan pada frekuensi pensaklaran di atas 20 kHz atau beroperasi pada frekuensi tinggi. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan ukuran komponen-komponen magnetik (yaitu, transformator dan induktor) yang tidak besar. Untuk peroperasian pada frekuensi tinggi, maka transformator dan induktor menggunakan inti berbahan ferit. Namun demikian ukuran inti ferit yang tersedia di pasaran hanya dapat digunakan untuk *full-bridge converter* sampai daya tertentu saja, sehingga untuk pembuatan konverter berdaya besar, diperlukan inti ferit dengan pesanan khusus sehingga harganya menjadi sangat mahal.

Selain ferit, inti transformator dapat menggunakan bahan pelat tipis baja silikon yang dilaminasi. Pelat-pelat tipis tersebut biasanya dipotong menjadi bentuk-bentuk tertentu yang menyerupai huruf-E dan huruf-I, sehingga dikenal dengan nama inti pelat E-I. Untuk memperoleh dimensi inti transformator yang sesuai dengan hasil proses perancangan, pelat-

pelat E-I dengan ukuran tertentu telah ditumpuk sehingga diperoleh inti transformator dengan ketebalan yang diinginkan. Berbeda dengan inti ferit, inti pelat E-I tersedia di pasaran dengan berbagai ukuran sampai daya puluhan kVA. Namun demikian, transformator dengan inti baja silikon hanya dapat dioperasikan pada frekuensi di bawah 10 kHz (**Nasar, 1987**).

Mempertimbangkan tingkat ketersediaannya di pasaran dan harga yang relatif murah, inti pelat E-I berpotensi menggantikan inti ferit untuk penggunaan pada konverter DC-DC berdaya besar. Untuk mencapai tujuan tersebut, maka frekuensi pensaklaran konverter DC-DC harus diturunkan menjadi di bawah 10 kHz.

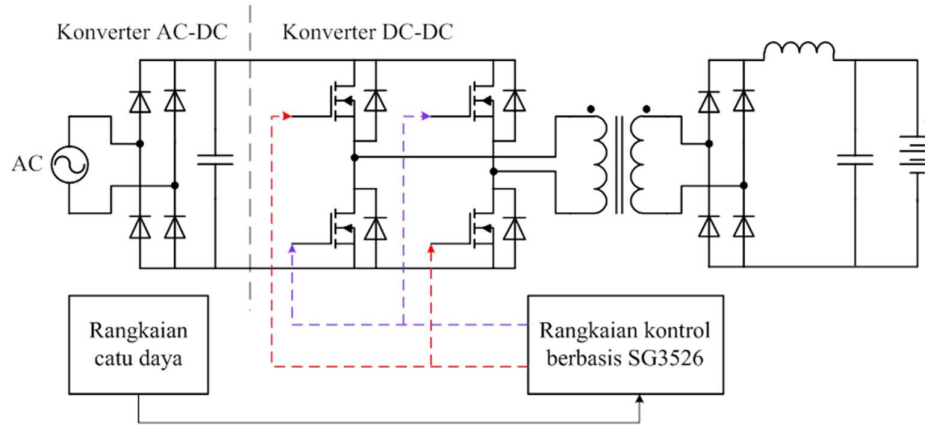
Pengoperasian *full-bridge DC-DC converter* pada frekuensi di bawah 20 kHz (400 Hz – 10 kHz) dinamakan pengoperasian pada frekuensi menengah (*medium frequency*) (**Balci, dkk, 2014**). Sedangkan transformator yang digunakan pada konverter DC-DC tersebut dinamakan *medium frequency transformer* (MFT). Penelitian-penelitian tentang penggunaan MFT pada konverter DC-DC telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Du dkk. telah membuat MFT yang bekerja pada frekuensi 3 kHz menggunakan material amorphous dengan merk Metglas untuk aplikasi pada *bidirectional DC-DC converter* (**Du, dkk, 2010**). Huang dkk. telah membuat MFT yang beroperasi pada frekuensi 1 kHz menggunakan material baja silikon dengan ketebalan 0,18 mm (**Huang, dkk, 2017**).

Penelitian-penelitian tersebut di atas telah memunculkan ide untuk menggunakan MFT berinti pelat E-I pada *full-bridge DC-DC converter* dan mengoperasikannya pada frekuensi pensaklaran di bawah 10 kHz. Meneruskan penelitian yang dilakukan oleh Huang dkk., kami mengusulkan pengoperasian *full-bridge DC-DC converter* pada frekuensi 1 kHz. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menggunakan pelat E-I sebagai material inti transformator dan inti induktor yang digunakan pada *full-bridge DC-DC converter* yang dioperasikan pada frekuensi menengah sebesar 1 kHz. Penelitian ini akan dapat memberi solusi terhadap masalah ketersediaan inti transformator dan inti induktor yang digunakan pada konverter DC-DC berdaya besar.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini kami telah merancang dan membuat suatu sistem *battery charger* untuk baterai lithium-ion yang akan digunakan pada kendaraan listrik jenis BEV. Tahap perancangan dimulai dengan membagi sistem *battery charger* menjadi subsistem-subsistem tertentu. Kemudian dilanjutkan dengan perancangan setiap subsistem. Pada perancangan subsistem, persamaan-persamaan perancangan akan dijelaskan, demikian juga prosedur perancangan subsistem. Setelah tahap perancangan, proses penelitian dilanjutkan dengan pembuatan subsistem-subsistem. Proses pembuatan subsistem-subsistem dilakukan berdasarkan persamaan-persamaan perancangan dan prosedur perancangan yang telah dijelaskan pada tahap perancangan. Setelah tahap pembuatan subsistem-subsistem, kemudian dilanjutkan dengan integrasi subsistem-subsistem menjadi sistem yang lengkap. Setelah tahap integrasi, kemudian dilanjutkan dengan pengujian sistem *battery charger* untuk mengisi muatan baterai lithium-ion.

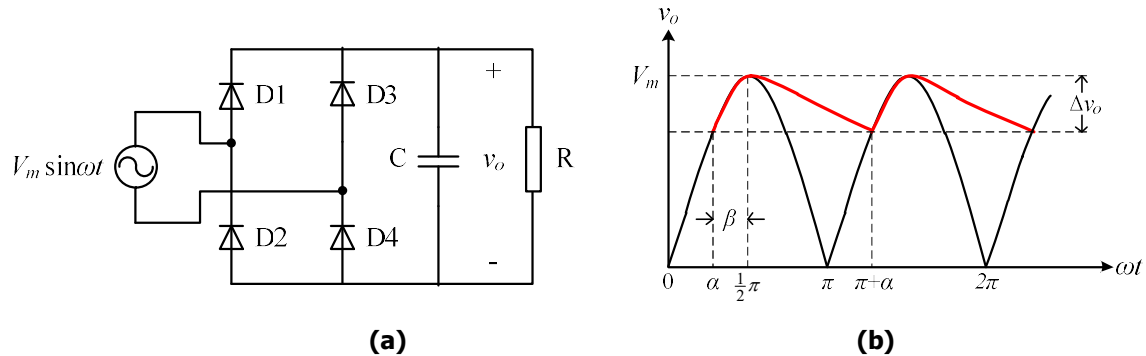
Sistem *battery charger* untuk baterai lithium-ion yang dibuat mempunyai 4 bagian utama yaitu, (1) Konverter AC-DC dari jenis penyearah satu-fasa dengan jembatan dioda, (2) Konverter DC-DC topologi *full-bridge converter*, (3) Rangkaian kendali konverter DC-DC, (4) Rangkaian catu daya untuk rangkaian kendali konverter DC-DC. Diagram rangkaian sistem *battery charger* diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Rangkaian Sistem *Battery Charger* untuk Baterai Lithium-ion

## 2.1 Penyearah Satu-Fasa Jembatan Dioda

Penyearah satu-fasa jembatan dioda berfungsi untuk menyearahkan tegangan bolak-balik satu-fasa 220-V 50-Hz untuk seterusnya menjadi masukan bagi rangkaian konverter DC-DC. Rangkaian penyearah tersebut terdiri atas 4 dioda yang dirangkai dalam hubungan jembatan dan dilengkapi dengan kapasitor yang terpasang pada terminal-terminal keluaran rangkaian penyearah. Fungsi kapasitor adalah untuk meratakan tegangan keluaran rangkaian penyearah. Bentuk rangkaian penyearah satu-fasa jembatan dioda diperlihatkan pada Gambar 2(a), dimana  $v_o$  adalah tegangan keluaran penyearah dan beban rangkaian penyearah diwakili oleh resistor R. Gambar 2(b) memperlihatkan bentuk tegangan keluaran penyearah dengan menganggap dioda adalah ideal dan induktansi sumber tegangan bolak-balik diabaikan.



Gambar 2. (a) Skematik Rangkaian Penyearah Satu-Fasa Jembatan Dioda dengan Kapasitor Perata Tegangan, (b) Bentuk Tegangan Keluaran

Nilai kapasitansi kapasitor perata tegangan ( $C$ ) yang digunakan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Mondal, dkk, 2007),

$$C = \left( \frac{1}{2f} - t_c \right) \times \frac{2P}{(V_{o-max}^2 - V_{o-min}^2)} \quad (1)$$

Pada Persamaan (1) di atas,  $f$  adalah frekuensi sumber tegangan bolak-balik,  $P$  adalah daya beban rangkaian penyearah,  $V_{o-max}$  adalah nilai maksimum tegangan keluaran penyearah dan  $V_{o-min}$  adalah nilai minimum tegangan keluaran penyearah.

Nilai  $t_c$  dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$t_c = \frac{\cos^{-1} \beta}{2\pi f} \quad (2)$$

Pada Persamaan (2),  $\beta$  adalah faktor riak tegangan keluaran penyearah yang didefinisikan sebagai berikut,

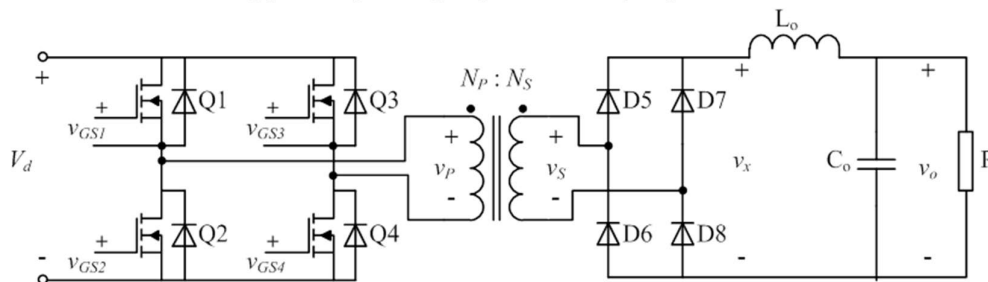
$$\beta = \frac{V_{o-min}}{V_{o-max}} \quad (3)$$

Dalam prakteknya, nilai  $\beta$  diambil berkisar 0,8 – 0,9.

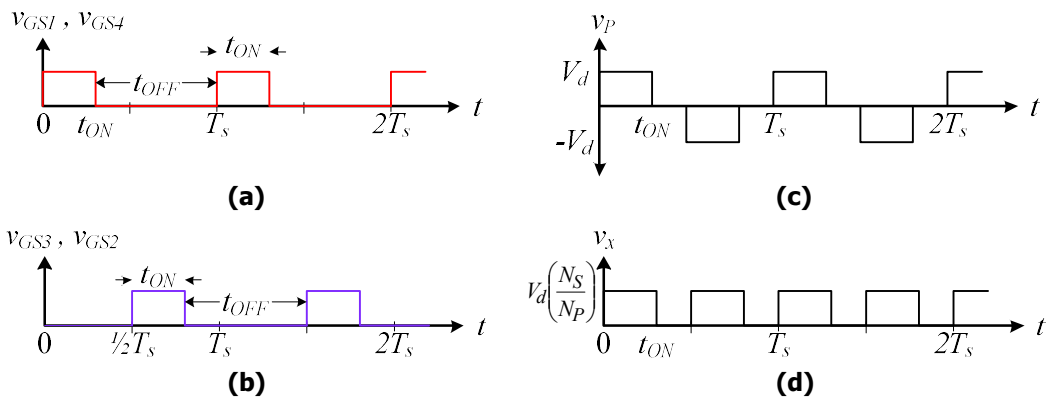
## 2.2 Konverter DC-DC Topologi *Full-bridge Converter*

Konverter DC-DC diperlukan untuk menurunkan level tegangan keluaran konverter AC-DC sehingga diperoleh level tegangan yang sesuai untuk keperluan *charging* baterai lithium-ion. Suatu topologi *full-bridge converter* diperlihatkan pada Gambar 3. Pada rangkaian masukan terdapat 4 saklar terkendali yang berupa MOSFET Q1, Q2, Q3 dan Q4 yang dirangkai dalam hubungan jembatan. Pada rangkaian keluaran terdapat 4 dioda cepat D5, D6, D7 dan D8, yang dirangkai dalam hubungan jembatan. Kemudian terdapat rangkaian filter L-C untuk meratakan arus dan tegangan keluaran *full-bridge converter*. Antara rangkaian masukan dan rangkaian keluaran diisolasi secara listrik menggunakan transformator. Transformator yang digunakan pada penelitian ini menggunakan inti dari bahan pelat tipis baja silikon yang dipotong menyerupai huruf E dan huruf I, atau lebih dikenal dengan istilah inti E-I.

*Full-bridge converter* yang digunakan pada *battery charger* ini dioperasikan sebagai konverter penurun tegangan. Dasar operasi *full-bridge converter* melibatkan 2 pasang saklar (Q1 – Q4 dan Q3 – Q2) yang ON dan OFF secara bergantian, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4. Ketika Q1 dan Q4 ON dan Q3 dan Q2 OFF, tegangan pada sisi primer transformator ( $v_p$ ) sama dengan tegangan masukan konverter DC-DC ( $V_d$ ). Ketika Q1 – Q4 OFF dan Q3 – Q2 OFF, tegangan pada sisi primer transformator sama dengan nol,  $v_p = 0$ . Ketika Q3 dan Q2 ON dan Q1 dan Q4 OFF, tegangan pada sisi primer transformator ( $v_p$ ) sama dengan  $-V_d$ . Dengan demikian bentuk tegangan pada sisi primer transformator adalah tegangan bolak-balik yang berbentuk kotak. Bentuk tegangan pada belitan-belitan sekunder transformator juga adalah tegangan bolak-balik yang berbentuk kotak. Tegangan bolak-balik tersebut kemudian disearahkan oleh jembatan dioda, sehingga menghasilkan tegangan searah ( $v_x$ ) yang bentuknya diperlihatkan pada Gambar 4d. Selanjutnya tegangan  $v_x$  kemudian diratakan sehingga menjadi tegangan searah yang rata oleh filter L-C.



**Gambar 3. Konverter DC-DC Topologi *Full-bridge Converter***



**Gambar 4. Bentuk-bentuk Tegangan pada Konverter DC-DC Topologi Full-bridge**

Berdasarkan bentuk tegangan  $v_x$  pada Gambar 4(d), nilai rata-rata  $v_x$  (atau  $V_o$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$V_o = 2 \times \left( \frac{N_s}{N_p} \right) \times D \times V_d \quad (4)$$

Pada Persamaan (4) diatas,  $N_s$  dan  $N_p$  masing-masing adalah jumlah lilitan belitan sekunder dan jumlah belitan lilitan primer transformator,  $V_d$  adalah tegangan masukan konverter DC-DC dan  $D$  adalah *duty cycle* yang didefinisikan sebagai berikut,

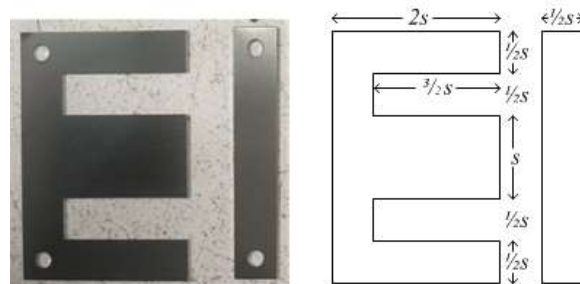
$$D = \frac{t_{ON}}{T_s} \quad (5)$$

Pada Persamaan (5) di atas,  $t_{ON}$  adalah durasi MOSFET ON dan  $T_s$  adalah periode ON-OFF MOSFET atau disebut juga periode pensaklaran MOSFET.

Dari Persamaan (4) di atas, terlihat bahwa untuk mendapatkan nilai  $V_o$  yang konstan pada nilai  $V_d$  yang berubah-ubah, maka nilai  $D$  harus diubah-ubah mengikuti perubahan nilai  $V_d$ . Jika nilai  $V_d$  naik, maka nilai  $D$  harus dibuat turun, sebaliknya jika  $V_d$  turun, maka nilai  $D$  harus dibuat naik. Pengaturan nilai  $D$  dilakukan oleh rangkaian terintegrasi (IC) pengendali PWM (*pulse-width modulation*) yang dapat bekerja pada sistem kendali *open-loop* maupun *close-loop*. Masih pada Persamaan (4), pada nilai  $V_d$  tertentu, nilai  $V_o$  berbanding lurus dengan nilai  $D$ . Jika nilai  $D$  naik, maka nilai  $V_o$  juga naik, dan jika nilai  $D$  turun, maka nilai  $V_o$  juga turun. Dengan demikian, tegangan keluaran *full-bridge converter* berbanding lurus dengan nilai  $D$ , sehingga *full-bridge converter* disebut mempunyai karakteristik pengaturan linier.

### 2.2.1 Perancangan transformator

Pada penelitian ini, transformator yang dibuat menggunakan inti E-I. Inti E-I beserta keterangan dimensinya diperlihatkan pada Gambar 5.



**Gambar 5. Inti E-I dan Keterangan Dimensinya**

Perancangan transformator bertujuan untuk mendapatkan dimensi inti transformator, menentukan jumlah lilitan belitan primer dan jumlah lilitan belitan sekunder, dan menentukan ukuran kawat konduktor dari belitan-belitan transformator. Perancangan transformator untuk *full-bridge converter* dilakukan menggunakan metode *Area-Product* (Umanand & Bhat, 2001) (McLyman, 2011). Prosedur perancangan transformator dijelaskan sebagai berikut,

1. Menghitung daya keluaran *full bridge converter* ( $P_o$ ) menggunakan persamaan berikut,

$$P_o = (V_o + V_{rI} + 2V_D) \times I_o \quad (6)$$

dimana,  $V_o$  adalah nilai tegangan keluaran konverter,  $V_{rI}$  adalah jatuh tegangan pada belitan-belitan transformator,  $V_D$  adalah jatuh tegangan pada dioda, dan  $I_o$  adalah arus keluaran konverter.

2. Menghitung nilai *area-product* transformator ( $A_{pTr}$ ) menggunakan persamaan berikut,

$$A_{pTr} = \frac{P_o \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)}{4k_w J B_m f_s} \quad (7)$$

dimana  $\eta$  adalah efisiensi transformator,  $k_w$  adalah faktor pengisian area jendela inti transformator,  $J$  adalah rapat arus konduktor belitan transformator,  $B_m$  adalah maksimum nilai rapat fluks magnet dari material inti transformator, dan  $f_s$  adalah frekuensi pensaklaran *full-bridge converter*.

3. Memilih ukuran inti E-I yang sesuai berdasarkan nilai *area-product* yang dihitung menggunakan persamaan (7). Ukuran inti yang dipilih adalah yang mempunyai nilai *area-product* lebih besar daripada yang dihitung menggunakan Persamaan (7). Ukuran inti E-I beserta nilai *area-product*-nya diperlihatkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Ukuran Inti E-I Beserta Nilai  $A_c$ ,  $A_w$  dan *Area-product* ( $A_p$ )**

Ukuran inti E-I (mm)	$s$	Tebal inti trafo $d = 1,618 \times s$ (mm)	$A_c$ ( $s \times d$ ) (mm <sup>2</sup> )	$A_w$ ( $0,75 \times s^2$ ) (mm <sup>2</sup> )	$A_p$ ( $A_c \times A_w$ ) (mm <sup>4</sup> )
16	16	26	416	192	79.872
19	19	31	589	270,75	159471,75
22	22	36	792	363	287.496
25	25	41	1025	468,75	480.468,75
28	28	45	1260	588	740.880
32	32	52	1664	768	1.277.952
35	35	57	1995	918,75	1.832.906,25
38	38	62	2356	1083	2.551.548
44	44	71	3124	1452	4.536.048
51	51	83	4233	1950,75	8.257.524,75
57	57	92	5244	2436,75	12.778.317

4. Menghitung jumlah lilitan belitan primer ( $N_p$ ) menggunakan persamaan berikut,

$$N_p = \frac{V_{dmax}}{4A_c B_m f_s} \quad (8)$$

dimana  $V_{dmax}$  adalah maksimum nilai tegangan masukan konverter, dan  $A_c$  adalah luas penampang inti transformator tempat melilitkan belitan-belitan.

5. Menghitung jumlah lilitan belitan sekunder ( $N_s$ ) menggunakan persamaan berikut,

$$n = \frac{N_s}{N_p} = \frac{V_o'}{2D_{max} \times V_{dmin}} = \frac{V_o + V_{rI} + 2V_D}{2D_{max} \times V_{dmin}} \quad (9)$$



dimana  $n$  adalah rasio jumlah lilitan belitan sekunder terhadap jumlah lilitan belitan primer,  $D_{max}$  adalah maksimum nilai *duty cycle* yang dihasilkan oleh IC pengendali PWM, biasanya berkisar 0,4 – 0,45.  $V_{dmin}$  adalah minimum nilai tegangan masukan konverter.

- Menentukan ukuran kawat belitan primer dan kawat belitan sekunder. Ukuran kawat belitan primer dan kawat belitan sekunder dinyatakan oleh luas penampang kawat dan dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut,

$$a_s = \frac{I_o \sqrt{2D_{max}}}{J} \quad (10)$$

$$a_p = \frac{n I_o \sqrt{2D_{max}}}{J} \quad (11)$$

dimana  $a_s$  dan  $a_p$  masing-masing adalah luas penampang kawat belitan sekunder dan luas penampang kawat belitan primer, dan  $J$  adalah rapat arus kawat belitan-belitan transformator.

### 2.2.2 Perancangan filter L-C

Filter L-C berfungsi untuk meratakan tegangan keluaran dan arus keluaran *full-bridge converter*. Nilai induktansi induktor ( $L_o$ ) dihitung menggunakan persamaan berikut (**Umanand & Bhat, 2001**),

$$L_o = \frac{V_o(1-D_{max})}{2 \times \Delta i_L \times f_s} \quad (12)$$

Pada Persamaan (12) diatas,  $\Delta i_L$  adalah riak arus induktor pada kondisi arus keluaran nominal ( $I_o$ ), nilainya berkisar 0.01 – 0,1 $I_o$ .

Nilai kapasitansi kapasitor ( $C_o$ ) dihitung menggunakan persamaan berikut (**Umanand & Bhat, 2001**) (**Kularatna, 2012**),

$$C_o = \frac{1}{16} \frac{(1-2D_{max})}{r_v \times L_o \times f_s^2} \quad (13)$$

Pada Persamaan (13) diatas,  $r_v$  adalah faktor riak tegangan keluaran konverter, yang didefinisikan sebagai berikut,

$$r_v = \frac{\Delta V_o}{V_o} \quad (14)$$

Sama seperti pada transformator, induktor yang akan dibuat juga menggunakan inti E-I. Perancangan induktor juga dilakukan menggunakan metode *Area-Product*. Prosedur perancangan induktor dijelaskan sebagai berikut,

- Menghitung kebutuhan *area-product* dari induktor ( $A_{pL}$ ) yang akan dibuat, menggunakan persamaan berikut,

$$A_{pL} = \frac{2E}{k_c k_w J B_m} \quad (15)$$

dimana  $E$  adalah energi maksimum yang tersimpan pada induktor,  $k_c$  adalah *crest factor*,  $k_w$  adalah faktor pengisian area jendela inti induktor,  $J$  adalah rapat arus konduktor belitan induktor, dan  $B_m$  adalah maksimum nilai rapat fluks magnet dari material inti induktor. Nilai  $E$  dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$E = \frac{1}{2} L_o I_{Lmax}^2 \quad (16)$$

$$I_{Lmax} = I_o + \frac{1}{2} \Delta i_L \quad (17)$$

Pada Persamaan (16) dan Persamaan (17),  $I_{Lmax}$  adalah nilai maksimum arus induktor.

2. Memilih ukuran inti E-I yang sesuai berdasarkan nilai  $A_{pl}$  yang dihitung menggunakan Persamaan (15). Ukuran inti yang dipilih adalah yang mempunyai nilai  $A_p$  lebih besar daripada nilai  $A_{pl}$  yang dihitung menggunakan Persamaan (15). Pemilihan ukuran inti E-I untuk induktor adalah menggunakan Tabel 1.
3. Menentukan jumlah lilitan induktor, menggunakan persamaan berikut,

$$N = \frac{L_o \times I_{Lmax}}{A_c B_m} \quad (18)$$

dimana  $A_c$  adalah luas penampang bagian inti E-I tempat melilitkan belitan induktor.

4. Menentukan ukuran kawat belitan induktor. Ukuran kawat belitan induktor dinyatakan oleh besaran luas penampang kawat ( $a_L$ ) dan dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut,

$$I_{rms} = \sqrt{I_o^2 + \Delta i_L^2} \quad (19)$$

$$a_L = \frac{I_{rms}}{J} \quad (20)$$

5. Menentukan lebar celah udara pada inti induktor ( $l_g$ ), menggunakan persamaan berikut,

$$l_g = \frac{\mu_o N^2 A_c}{L_o} \quad (21)$$

dimana  $\mu_o$  adalah permeabilitas ruang hampa yaitu sebesar  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

### 2.3 Rangkaian Kendali Konverter DC-DC

Rangkaian kendali *full-bridge converter* berfungsi mengendalikan kerja *full-bridge converter* dengan cara memvariasikan nilai *duty cycle* dari sinyal PWM yang dihasilkannya, sehingga menghasilkan tegangan keluaran atau arus keluaran yang diinginkan. Rangkaian kendali konverter dibuat dengan menggunakan sirkuit terintegrasi SG3526 (**Microsemi, 2014**).

SG3526 adalah pengendali berbasis sinyal PWM yang bekerja dengan frekuensi tetap. SG3526 menghasilkan 2 sinyal PWM pada terminal-terminal keluarannya. Kedua sinyal PWM tersebut berbeda fasa 180 derajat. Sinyal-sinyal PWM keluaran SG3526 diisolasi secara optik dari kaki-kaki *gate-source* setiap MOSFET menggunakan sirkuit terintegrasi TLP250 (**Toshiba, 2004**).

### 2.4 Rangkaian Catu Daya

Rangkaian catu daya berfungsi menyediakan tegangan yang konstan untuk mencatu SG3526 dan rangkaian TLP250. Terdapat 2 level tegangan yang digunakan pada rangkaian kendali konverter DC-DC, yaitu 5-V dan 12-V. Rangkaian catu daya menggunakan sirkuit terintegrasi regulator tegangan linier LM7805 untuk catu daya 5-V dan LM7812 untuk catu daya 12-V.

### 2.5 Kemasan Baterai Lithium-ion (*Battery Pack*)

Baterai lithium-ion yang digunakan pada kendaraan listrik biasanya dibangun dari sejumlah sel baterai yang disusun secara hubungan seri dan paralel. Kemasan sel-sel baterai tersebut dinamakan *battery pack*. Sel baterai yang digunakan berbentuk silinder berukuran diameter 18,40 mm dan panjang 65 mm, sehingga lebih dikenal dengan sebutan sel baterai 18650. Spesifikasi sel baterai 18650 ditampilkan pada Tabel 2 (**Samsung SDI, 2011**).

**Tabel 2. Spesifikasi Sel Baterai 18650**

Pabrikan	Samsung SDI
Model	INR18650-20R
Kapasitas	2000 mAh
Tegangan nominal	3,6 V
Tegangan <i>charging</i>	4,2 ± 0,05 V
Maksimum arus <i>charging</i>	4.0 A
Dimensi	Ø18,4 x 65 mm

Keadaan muatan listrik di dalam sel baterai lithium-ion 18650 dinyatakan oleh nilai *state of charge* (SoC). SoC 100% menyatakan baterai pada kondisi penuh, sedangkan SoC 0% menyatakan baterai pada kondisi kosong. Proses *charging* menyebabkan muatan listrik di dalam sel baterai meningkat, yang berarti nilai SoC baterai tersebut juga meningkat. Sebaliknya, proses *discharging* menyebabkan nilai SoC baterai menurun.

Nilai SoC suatu sel baterai dapat diketahui berdasarkan pengukuran tegangan terminal baterai pada kondisi baterai tersebut tidak terhubung ke beban atau pada kondisi rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*, OCV). Tipikal hubungan antara nilai OCV dan nilai SoC dari sel baterai 18650 ditampilkan pada Tabel 3 (**Baccouche, dkk, 2018**).

**Tabel 3. Beberapa Nilai SoC Terhadap Nilai OCV Sel Baterai Lithium-ion**

SoC (%)	OCV (volt)
100	4,20
90	4,10
80	3,95
70	3,85
60	3,75
50	3,65
40	3,58
30	3,51
20	3,49
10	3,45
0	3,40

Tegangan pengenal *battery pack* ditentukan berdasarkan jumlah sel baterai yang dirangkai seri. Misalkan pada suatu *battery pack* terdapat 5 sel baterai 18650 dengan tegangan pengenal 3,6 V dirangkai seri, maka tegangan pengenal *battery pack* adalah 18 V.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem *battery charger* yang dibuat digunakan untuk mengisi ulang muatan *battery pack* lithium-ion yang mempunyai tegangan pengenal 48 V dan berkapasitas 20 Ah. Untuk mencapai tegangan pengenal *battery pack*, sejumlah 13 sel 18650 telah dirangkai seri sehingga menghasilkan tegangan pengenal 46,8 V. Meskipun tegangan pengenal *battery pack* masih lebih kecil daripada yang dipersyaratkan, namun jika menggunakan 14 sel yang dirangkai seri, maka tegangan pengenal *battery pack* menjadi 50,4 V yang berarti lebih besar daripada yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, *battery pack* yang dibuat menggunakan 13 sel baterai 18650 yang dirangkai secara seri. Kemudian untuk mencapai kapasitas penyimpanan 20 Ah, 10 sel baterai telah dirangkai secara paralel. Dengan demikian *battery pack* yang dibuat terdiri dari 130 sel baterai 18650. Sel-sel baterai tersebut disusun menjadi 13 kelompok sel yang dirangkai seri, dan setiap kelompok tersusun oleh 10 sel dirangkai paralel atau dikenal dengan susunan 13s10p.

*Battery pack* dilengkapi dengan rangkaian *battery management system* (BMS) yang berfungsi mengatur distribusi arus pada setiap sel baterai saat kondisi *discharging* maupun saat kondisi *charging*, dan juga melindungi *battery pack* dari kejadian tegangan-lebih saat proses *charging* dengan cara memutus arus pengisian ketika tegangan terminal *battery pack* lebih dari 53 V.

*Battery charger* yang dibuat dicatu oleh sumber tegangan 1-fasa 220-V 50-Hz. Tegangan keluaran nominal *battery charger* adalah 54,6 V. Angka ini berasal dari nilai OCV setiap sel baterai pada kondisi SoC 100% dikali dengan jumlah sel yang dirangkai seri. Arus keluaran nominal *battery charger* adalah 20 A. Spesifikasi *battery charger* ditampilkan pada Tabel 4.

**Tabel 4. Spesifikasi *Battery Charger***

Parameter	Nilai
Tegangan masukan	220V±10%, 50-Hz
Tegangan keluaran	54,6 Vdc
Arus keluaran	20A

Tegangan bolak-balik dari jaringan listrik 1-fasa tegangan rendah diubah menjadi tegangan searah oleh modul penyearah 1-fasa jembatan dioda GBJ2510. Modul ini mempunyai maksimum tegangan panjar mundur ( $V_{RRM}$ ) sebesar 1000 V dan maksimum arus rata-rata ( $I_{FAV}$ ) sebesar 25 A. Ukuran kapasitor filter dihitung menggunakan persamaan (1), persamaan (2), dan persamaan (3), dengan menggunakan kondisi tegangan masukan terendah. Dengan menggunakan nilai-nilai  $V_{omax} = 0,9 \times 220 \times \sqrt{2} = 280V$ ,  $\beta = 0,9$ ,  $f = 50Hz$  dan  $P = 63,06 \times 20 = 1261,2$  W, maka diperoleh  $C = 1451$   $\mu F$ . Sebagai catatan nilai  $P = 1261,2$  W dihitung berdasarkan daya masukan dari konverter DC-DC. Pada penelitian ini telah digunakan 4 unit kapasitor elektrolit 10000  $\mu F$ , 100 V yang dirangkai secara hubungan seri.

Tegangan keluaran konverter AC-DC masuk ke rangkaian konverter DC-DC berbasis *full-bridge converter*. Rangkaian masukan *full-bridge converter* menggunakan 4 unit MOSFET tipe 2SK4107 yang mempunyai nilai tegangan  $V_{DSS} = 500$  V dan arus drain ( $I_D$ ) sebesar 15 A. Rangkaian keluaran konverter menggunakan 4 unit dioda cepat RHRP3060 yang dirangkai dalam hubungan jembatan. Dioda tersebut mempunyai maksimum tegangan panjar mundur ( $V_{RRM}$ ) sebesar 600 V dan maksimum arus rata-rata ( $I_{FAV}$ ) sebesar 30 A.

Perancangan transformator memerlukan beberapa parameter sebagaimana ditampilkan pada Tabel 5. Dengan memasukkan data-data dari Tabel 5 ke persamaan (6), diperoleh  $P_o = 1261,2$  W. Kemudian dengan memasukkan nilai-nilai  $P_o$ ,  $\eta$ ,  $B_m$ ,  $J$ ,  $k_w$ ,  $f_s$  ke persamaan (7), diperoleh nilai  $A_{pTr} = 985312,5$  mm<sup>4</sup>. Dengan menggunakan Tabel 1, ukuran inti E-I yang digunakan adalah ukuran 32, dengan data-data sebagai berikut,  $A_c = 1664$  mm<sup>2</sup>,  $A_w = 768$  mm<sup>2</sup> dan  $A_p = 1.277.952$  mm<sup>4</sup>. Selanjutnya jumlah lilitan belitan primer ( $N_p$ ) dihitung menggunakan persamaan (8). Dengan memasukkan ke persamaan (8), nilai  $V_{dmax} = 1,1 \times 220 \times \sqrt{2} = 342$  V, nilai  $A_c = 1664 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>, dan nilai-nilai  $B_m$  dan  $f_s$  dari Tabel 5, diperoleh nilai  $N_p = 86$  lilitan. Selanjutnya jumlah lilitan belitan sekunder ( $N_s$ ) dihitung menggunakan persamaan (9). Dengan memasukkan ke persamaan (9), nilai  $N_p = 86$ , nilai  $V_{dmin} = 0,9 \times 220 \times \sqrt{2} = 280$  V, nilai  $D_{max} = 0,45$  dan nilai-nilai  $V_{or}$ ,  $V_{rl}$  dan  $V_D$  dari Tabel 4, diperoleh nilai  $N_s = 22$  lilitan. Selanjutnya ukuran kawat konduktor belitan primer ( $a_p$ ) dan ukuran kawat konduktor belitan sekunder ( $a_s$ ) dihitung menggunakan persamaan (11) dan persamaan (10), sehingga diperoleh  $a_p = 1,583$  mm<sup>2</sup> dan  $a_s = 6,32$  mm<sup>2</sup>. Data-data rancangan transformator ditampilkan pada Tabel 6.

**Tabel 5. Parameter Perancangan Transformator untuk Full-bridge Converter**

Parameter	Simbol	Nilai	Keterangan
Tegangan keluaran konverter	$V_o$	54,6 V	
Jatuh tegangan pada transformator	$V_{rl}$	5,46 V	$0,1 \times V_o$
Jatuh tegangan pada jembatan dioda	$V_D$	1,5 V	
Arus keluaran konverter	$I_o$	20 A	
Rapat fluks magnet maksimum	$B_m$	0,6 T	
Rapat arus	$J$	$3 \times 10^6$ A/m <sup>2</sup>	
Faktor pengisian area jendela inti	$k_w$	0,4	
Frekuensi pensaklaran konverter	$f_s$	1000 Hz	
Efisiensi transformator	$\eta$	0,8	

**Tabel 6. Data-data Rancangan Transformator untuk Full-bridge Converter**

Parameter	Simbol	Nilai
Ukuran inti E-I		32 mm
Tebal inti E-I	$d$	52 mm
Jumlah lilitan belitan primer	$N_p$	86 lilitan
Jumlah lilitan belitan sekunder	$N_s$	22 lilitan
Ukuran kawat belitan primer	$a_p$	1,583 mm <sup>2</sup>
Ukuran kawat belitan sekunder	$a_s$	6,32 mm <sup>2</sup>

Penentuan nilai induktansi dan kapasitansi filter L-C dilakukan menggunakan persamaan (12) dan persamaan (13). Dengan memasukkan ke persamaan (12) nilai  $\Delta i_L = 0,05 \times 20 = 1$  A dan nilai-nilai  $V_o$ ,  $D_{max}$  dan  $f_s$  yang bersesuaian, diperoleh nilai  $L_o = 2,73$  mH. Selanjutnya dengan memasukkan ke persamaan (13) nilai  $r_v = 0,05\%$ , diperoleh nilai  $C_o = 457,9$   $\mu$ F. Pada penelitian ini, filter L-C telah menggunakan kapasitor elektrolit 1200  $\mu$ F, 100V.

Perancangan induktor pada filter L-C dilakukan menggunakan persamaan (15) sampai persamaan (21). Parameter perancangan induktor ditampilkan pada Tabel 7. Dengan memasukkan nilai  $I_o = 20$  A dan nilai  $\Delta i_L = 0,05 \times I_o = 1$  A ke persamaan (17), diperoleh  $I_m = 20,5$  A. Selanjutnya dengan menggunakan persamaan (16), diperoleh  $E = 0,5736$  J. Selanjutnya dengan memasukkan nilai  $E$  tersebut dan parameter-parameter perancangan induktor ke persamaan (15), diperoleh nilai  $A_{pL} = 2.124.444,4$  mm<sup>4</sup>. Dengan menggunakan Tabel 1, maka digunakan inti E-I ukuran 38, yang mempunyai data-data dimensi sebagai berikut,  $A_c = 2356$  mm<sup>2</sup>,  $A_w = 1083$  mm<sup>2</sup> dan  $A_p = 2.551.548$  mm<sup>4</sup>. Selanjutnya dengan menggunakan persamaan (18), diperoleh jumlah lilitan induktor,  $N = 40$  lilitan. Dengan menggunakan persamaan (19) dan persamaan (20), diperoleh ukuran kawat induktor,  $a_L = 6,675$  mm<sup>2</sup>. Selanjutnya lebar celah udara dihitung menggunakan persamaan (21), sehingga diperoleh nilai  $l_g = 1,73$  mm. Pada penelitian ini telah digunakan celah udara sebesar 1 mm. Data-data rancangan induktor ditampilkan pada Tabel 8.

**Tabel 7. Parameter Perancangan Induktor untuk Filter L-C Full-bridge Converter**

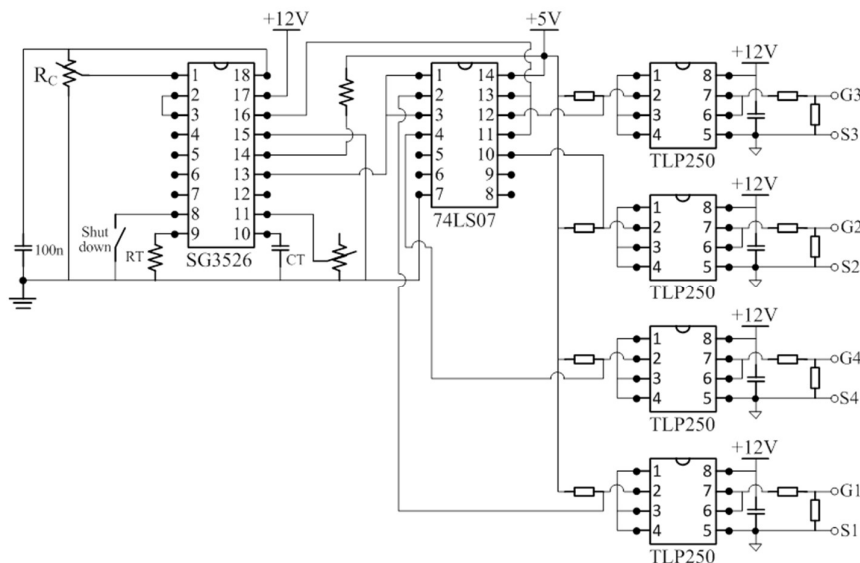
Parameter	Simbol	Nilai
Rapat fluks magnet maksimum	$B_m$	0,6 T
Rapat arus	$J$	$3 \times 10^6$ A/m <sup>2</sup>
Faktor pengisian area jendela inti	$k_w$	0,3
Crest factor	$k_c$	1

**Tabel 8. Data-data Rancangan Induktor untuk Filter L-C *Full-bridge Converter***

Parameter	Simbol	Nilai
Ukuran inti E-I		38 mm
Tebal inti E-I	$d$	62 mm
Jumlah lilitan	$N$	40 lilitan
Ukuran kawat belitan	$a_L$	6,675 mm <sup>2</sup>
Lebar celah udara	$l_g$	1 mm

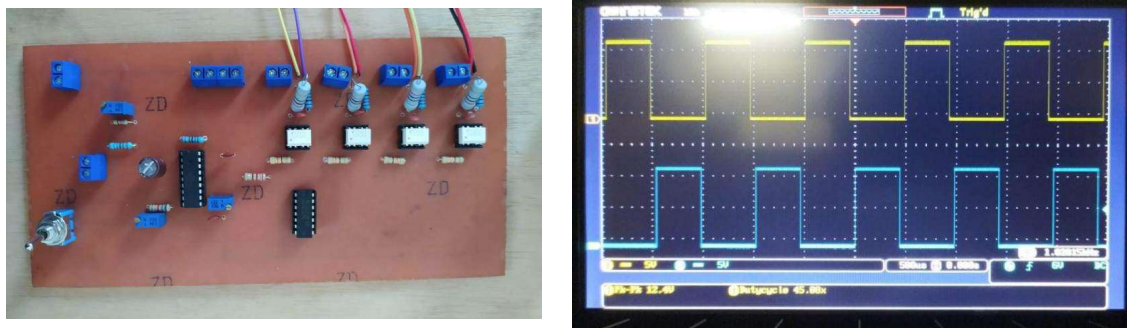
Rangkaian kendali *full-bridge converter* menggunakan sirkuit terintegrasi SG3526. Sistem kendali menggunakan metode pengaturan lup-terbuka (*open-loop mode*) dimana pengaturan *duty cycle* dari sinyal PWM yang diberikan ke kaki-kaki MOSFET dilakukan secara manual dengan memutar potensiometer  $R_C$  yang terdapat pada papan rangkaian kendali. Pengaturan *duty cycle* dilakukan untuk menjaga agar proses *charging* baterai lithium-ion terjadi pada arus pengisian konstan.

Sinyal PWM yang berasal dari SG3526 kemudian diteruskan ke kaki-kaki *gate-source* MOSFET melalui sirkuit terintegrasi TLP250, yang merupakan rangkaian penggerak MOSFET yang dilengkapi isolasi optikal antara bagian masukan dan bagian keluarannya. Sebelum masuk ke TLP250, sinyal PWM dari SG3526 masuk ke sirkuit *buffer* 74LS07 untuk dikondisikan terlebih dahulu. Rangkaian kendali *full-bridge converter* menggunakan 4 unit TLP250, di mana setiap TLP250 terhubung ke kaki-kaki *gate-source* setiap MOSFET. Skematik rangkaian kendali *full-bridge converter* diperlihatkan pada Gambar 6. Gambar 7(a) memperlihatkan rangkaian kendali *full-bridge converter* yang terangkai pada papan pcb. Gambar 7(b) memperlihatkan bentuk-bentuk sinyal PWM keluaran rangkaian kendali yang diberikan ke MOSFET Q1 dan Q3. Terlihat bahwa kedua sinyal tersebut berbeda fasa 180 derajat dan mempunyai frekuensi pensaklaran sebesar 1020 Hz.



**Gambar 6. Skematik Rangkaian Kendali *Full-bridge Converter***

Informasi tentang komponen-komponen utama yang digunakan pada sistem *battery charger* ini ditampilkan pada Tabel 9. Gambar 8 memperlihatkan sistem *battery charger* yang dibuat secara keseluruhan.

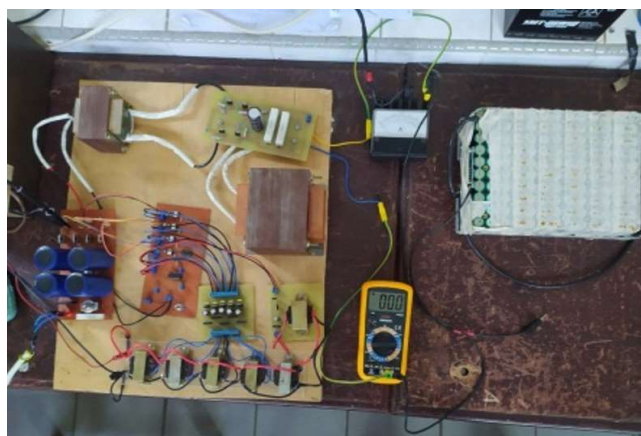


(a) (b)

**Gambar 7. (a) Rangkaian Kendali Full-bridge Converter Yang Terpasang Pada Papan PCB, (b) Sinyal PWM untuk MOSFET Q1 dan Q3**

**Tabel 9. Data Komponen-komponen Utama Sistem *Battery Charger***

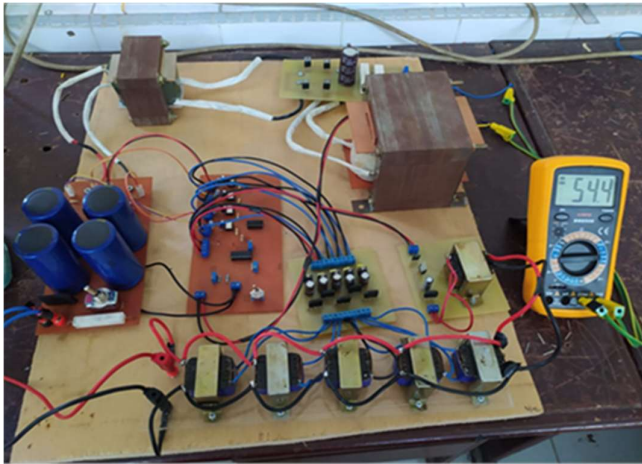
Parameter	Nilai
<b>Konverter AC-DC</b>	
Tegangan masukan	220 V ± 10% , 50 Hz
Modul jembatan dioda	GBJ2510
Kapasitor filter	2500 µF, 400 V
<b>Konverter DC-DC</b>	
Tegangan masukan	311 V ± 10%
Tegangan keluaran	54,6 V
Arus keluaran	20 A
Frekuensi pensaklaran	1000 Hz
Saklar elektronik Q1, Q2, Q3, Q4	MOSFET 2SK4107
Transformator	$N_p : N_s = 86 : 22$
Dioda penyearah D5, D6, D7, D8	Hyperfast diode RHRP3060
Induktor filter	2,73 mH
Kapasitor filter	1200 µF, 100 V



**Gambar 8. Sistem *Battery Charger* untuk Pengisian Muatan Baterai Lithium-ion**

Pengujian terhadap sistem *battery charger* dilakukan pada beberapa kondisi. Pada kondisi pertama, sistem *battery charger* tidak dihubungkan ke baterai lithium-ion atau disebut pada kondisi tanpa-beban. Pengujian ini untuk mendapatkan hubungan antara nilai *duty cycle* dengan tegangan keluaran *battery charger*. Nilai *duty cycle* dinaikkan sampai tegangan keluaran *battery charger* sekitar nilai nominalnya yaitu sebesar 54,40 V. Dari hasil pengukuran dengan osiloskop diperoleh *duty cycle* pada kondisi tersebut adalah sebesar

23,20%. Rangkaian pengujian diperlihatkan pada Gambar 9(a) dan sinyal PWM keluaran rangkaian kendali pada kondisi tersebut diperlihatkan pada Gambar 9(b).



(a)



(b)

**Gambar 9. (a) Rangkaian Pengujian *Battery Charger* Pada Kondisi Tanpa-beban, (b) Sinyal PWM pada Pengujian Tanpa-beban, Tegangan Keluaran 54,40 V**

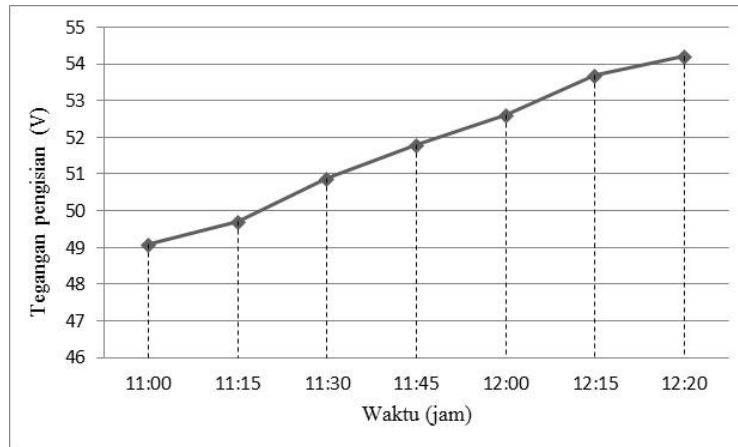
Pengujian yang kedua adalah pengujian fungsional yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem *battery charger* dalam mengisi ulang muatan *battery pack*. Pengujian fungsional dilakukan pada kondisi *battery pack* mempunyai SoC awal 50%. Dari Tabel 3 diketahui bahwa nilai OCV *battery pack* pada kondisi tersebut adalah  $13 \times 3,65 \text{ V} = 47,45 \text{ V}$ . Untuk mencapai kondisi ini, *battery pack* telah di-*discharge* selama beberapa jam sehingga tegangan terminalnya pada keadaan *open-circuit* sebesar 47,45 V. *Battery pack* kemudian diisi ulang muatannya dengan arus pengisian konstan sebesar 5-A. Arus pengisian dijaga konstan dengan cara mengatur *duty-cycle* sinyal PWM keluaran rangkaian kendali selama proses pengisian. Ketika *battery pack* di-charge maka setelah beberapa waktu tegangan terminal *battery pack* akan naik, sehingga menyebabkan arus pengisian menurun. *Duty cycle* harus dinaikkan untuk mengembalikan arus pengisian ke angka 5-A. Proses pengisian dihentikan ketika tegangan terminal baterai telah mencapai 54,40 V atau ketika arus pengisian *battery pack* telah diputus secara otomatis oleh unit BMS yang terpasang pada *battery pack*. Hasil pengujian fungsional ditampilkan pada Tabel 10.

**Tabel 10. Data Pengujian Pengisian Muatan *Battery Pack*, SoC awal 50%**

Waktu	Tegangan terminal <i>battery pack</i> (V)	<i>Duty cycle</i> (%)
11:00	49,10	32,23
11:15	49,70	33,48
11:30	50,90	34,09
11:45	51,80	34,64
12:00	52,60	34,90
12:15	53,70	35,45
12:20	54,20	35,83

Pada Tabel 10 dapat diketahui bahwa proses *charging* dimulai pada pukul 11:00 dan selesai pada pukul 12:20, atau berlangsung selama sekitar 80 menit. Sebelum proses *charging*, tegangan terminal *battery pack* adalah 47,45 V. Ketika *battery pack* dihubungkan ke *battery charger*, tegangan terminal *battery pack* naik menjadi 49,10 V. Hal ini disebabkan adanya resistansi internal *battery pack* sehingga menghasilkan jatuh tegangan ketika dialiri arus listrik. Dalam hal ini, besar jatuh tegangan tersebut adalah 1,65 V.





**Gambar 10. Profil Tegangan Pengisian *Battery Pack* Terhadap Waktu**

Selama proses *charging*, tegangan terminal *battery pack* menaik sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 10. Seharusnya proses *charging* dihentikan ketika tegangan terminal *battery pack* mencapai 56,25 V, tetapi karena *battery pack* dilengkapi dengan unit BMS, maka sambungan ke *battery pack* secara otomatis diputus oleh BMS ketika tegangan terminal *battery pack* mencapai 54,20 V. Hasil pengujian fungsional sebagaimana yang disajikan pada Gambar 10, memperlihatkan bahwa sistem *battery charger* yang dibuat telah dapat mengisi muatan baterai lithium-ion sampai penuh pada arus pengisian konstan sebesar 5 A.

#### **4. KESIMPULAN**

Suatu sistem *battery charger* untuk baterai lithium-ion yang digunakan pada kendaraan listrik berbasis baterai telah dibuat pada penelitian ini. Sistem *battery charger* tersebut dicatu oleh jaringan listrik 1-fasa 220-V 50-Hz. Rangkaian *battery charger* disusun dari kombinasi konverter AC-DC dan konverter DC-DC. Konverter AC-DC menggunakan topologi penyearah 1-fasa jembatan dioda, sedangkan konverter DC-DC menggunakan topologi *full-bridge converter*. *Full-bridge converter* tersebut bekerja pada frekuensi pensaklaran medium yaitu sebesar 1 kHz. Material baja silikon dalam bentuk inti E-I telah digunakan untuk menyusun inti transformator dan inti induktor yang digunakan pada rangkaian daya *full-bridge converter*. Sistem *battery charger* tersebut telah dirancang untuk mengisi baterai lithium-ion dengan kapasitas penyimpanan 20-Ah dan tegangan pengenalan 48-V. Pengujian fungsional dengan mengisi baterai pada kondisi awal SoC 50% dan menggunakan arus pengisian konstan sebesar 5 A, menghasilkan bahwa pengisian muatan baterai hingga penuh memerlukan waktu 80 menit.

#### **DAFTAR RUJUKAN**

- Ahasan Habib, A. K. M., Hasan, M. K., Mahmud, M., Motakabber, S. M. A., Ibrahimya, M. I., & Islam, S. (2021). A review: Energy Storage System and Balancing Circuits for Electric Vehicle Application. *IET Power Electronics*, 14, 1 – 13.
- Ahasan Habib, A. K. M., Motakabber, S. M. A., & Ibrahimy, M. I. (2019). A Comparative Study of Electrochemical Battery for Electric Vehicles Applications. *IEEE Int. Conf. on Power, Electrical, and Electronics and Industrial Application*, (pp. 43 – 47).

- Ahmadian, A., Mohammadi-Ivatloo, B., & Elkamel, A. (2020). A Review on Plug-in Electric Vehicles: Introduction, Current Status, and Load Modeling Techniques. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(3), 412–425.
- Aziz, M., Marcellino, Y., Rizki, I. A., Ikhwanuddin, S. A., & Simatupang, J. W. (2020). Studi Analisis Perkembangan Teknologi dan Dukungan Pemerintah Indonesia Terkait Mobil Listrik. *TESLA: Jurnal Teknik Elektro, UNTAR*, 22(1), (pp. 45 – 55).
- Baccouche, I., Manai, B., Jemmali, S., & Essoukri ben Amara, N. (2018). Implementation of An Improved Coulomb-counting Algorithm Based on A Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-ion Battery. *International Journal of Renewable Energy Research*. 8(1), 178-187.
- Balci, S., Sefa, I., & Bayram, M. B. (2014). Core Material Investigation of Medium-Frequency Power Transformers. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, (pp. 861 – 866).
- Chau, K. T. (2015). *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*. Singapore: John Wiley & Sons, Inc.
- Du, S. B. Y., Wang, G., & Bhattacharya, S. (2010). Design Considerations of High Voltage and High Frequency Transformer for Solid State Transformer Application. *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, (pp.1 – 6).
- Feng, C., & Yang, X. (2019). Explosion Mechanism and Prevention of Lithium-ion Batteries. *2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, (pp. 969-974).
- Halim, A. A. B. A., Eid-Bayoumi, E. H., El-Khattam, W., & Ibrahim, A. M. (2022). Electric Vehicles: A Review of Their Components and Technologies. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 13(4), 2041 – 2061.
- Hoque, M. M., Hannan, M. A., Mohamed, A., & Ayob, A. (2017). Battery Charge Equalization Controller in Electric Vehicle Applications: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, 75(C), 1363–1385.
- Huang, P., Mao, C., Wang, D., Wang, L., Duan, Y., Qiu, J., Xu, G., & Cai, H. (2017). Optimal Design and Implementation of High-voltage High-power Silicon Steel Core Medium Frequency Transformer. *IEEE Trans. of Industrial Electronics*, 64(6), 4391- 4401.
- Kim, D. H., Kim, M. S., Nengroo, S. H., Kim, C. H., & Kim, H. J. (2019). LLC Resonant Converter for LEV (Light Electric Vehicle) Fast Chargers. *Electronics*, 8, 1 – 14.
- Kong, L., Li, C., Jiang, J., & Pecht, M. G. (2018). Li-ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies. *Energies*, 11(9), 1 – 11.

- Kularatna, N. (2012). *DC Power Supplies Power Management and Surge Protection for Power Electronic Systems*. CRC Press.
- McLyman, T. (2011). *Transformer and Inductor Design Handbook*. Fourth Edition. CRC Press.
- Microsemi. (2014). *SG1526/SG2536/SG3526, Regulating Pulse Width Modulator: Datasheet*.
- Mondal, N., Biswas, S. K., Sinha, S., & Deb, N. K. (2007). Selection of The Filter Capacitor for Power Supplies Using 1-phase Diode Rectifier. *Proceeding of 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2007*, Bangkok, Thailand.
- Nasar, S. A. (1987). *Handbook of Electric Machines*. New York: McGraw-Hill.
- Pramanik, P. K. D., Sinhababu, N., Mukherjee, B., Padmanaban, S., Maity, A., Upadhyaya, B. K., Holm-Nielsen, J. B., & Choudhury, P. (2019). Power Consumption Analysis, Measurement, Management, and Issues: A State-of-the-art Review of Smartphone Battery and Energy Usage. *IEEE Access*, 7, 182113 - 182172.
- Pressman, A. I., Billings, K., & Morey, T. (2009). *Switching Power Supply Design*. Third Edition. McGraw-Hill.
- Rospawan, A., & Simatupang, J. W. (2021). Microcontroller-Based Lead-Acid Battery Balancing System for Electric Vehicle Applications. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi (JET)*, 21(2), (pp. 128 – 139).
- Rusli, M. R., Mukhlisin, A., Raharjo, J., Yuniarto, M. N., Wikarta, A., & Haerudin, H. (2019). Design and Consideration of Off-board Lithium-ion Battery Charger for Electric Vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*, 1517, (pp. 1 - 8).
- Sanguesa, J. A., Torres, V., Garrido, P., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities* 4(1), 372 – 404.
- Samsung SDI. (2011). *Specification of Product: Lithium-ion Rechargeable Cell for Power Tools, Model INR18650-20R*.
- Sun, X., Li, Z., Wang, Z., & Li, C. (2020). Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies*, 13(1), 1 – 29.
- Tempo.co. (2022). *Mobil Listrik Tim UNRI Juara Dua IIMS Hybrid FRESC 2022, Lihat Speknnya*. Retrieved from <https://otomotif.tempoco.com/read/1581373/mobil-listrik-tim-unri-juara-dua-iims-hybrid-fresc-2022-lihat-speknnya>.
- Toshiba. (2004). *TLP250, Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC: Datasheet*.
- Umanand, L., & Bhat, S. R. (2001). *Design of Magnetic Components for Switched Mode Power Converters*. Second Edition. New Delhi: New Age International.
- Zhang, S., Zhang, C., Xiong, R., & Zhou, W. (2014). Study on the Optimal Charging Strategy for Lithium-Ion Batteries Used in Electric Vehicles. *Energies*, 7(10), 6783 - 6797.