

Disain Konverter Charge Pump Rasio Tinggi Untuk Aplikasi Mobil Listrik

Heri Suryoatmojo

Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: suryomgt@gmail.com

Priyo Edy Wibowo

Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: priyo10@mhs.ee.its.ac.id

Mochamad Ashari

Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: ashari@ee.its.ac.id

A. Musthofa.

Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: arif@ee.its.ac.id

Abstrak— Mobil listrik dengan penggerak motor induksi membutuhkan tegangan DC yang tinggi pada sisi masukan dari inverter. Sementara itu, baterai di pasaran saat ini memiliki keterbatasan pada tegangan keluaran. Oleh karena itu, DC-DC konverter diperlukan untuk mengubah tegangan DC dalam rasio konversi yang tinggi. Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan implementasi konverter *boost* dengan metode *charge pump*. Konverter ini dirancang untuk daya 5 kilo-watt dengan tegangan masukan 96 volt dan tegangan keluaran 550 volt. Hasil implementasi konverter *boost* dengan metode *charge pump* pada tegangan masukan 24 volt mampu menaikkan dua kali lipat tegangan dari konverter *boost* konvensional dengan error di bawah 4,6% untuk duty cycle kurang dari 50%. konverter ini memiliki efisiensi 76% pada duty cycle 30% - 65%.

Kata Kunci— konverter *boost*, *charge pump*, rasio konversi tinggi.

I. PENDAHULUAN

Penelitian tentang mobil dengan penggerak mesin listrik saat ini berkembang pesat. Sistem penggerak mobil listrik lebih sederhana jika dibandingkan dengan sistem penggerak mobil bahan bakar minyak yang memiliki lebih banyak komponen serta menimbulkan masalah polusi udara. Komponen utama mobil listrik adalah motor listrik sebagai penggerak, rangkaian elektronika daya dan baterai sebagai sumber energi listrik [1].

Penggerak pada mobil listrik umumnya menggunakan motor arus bolak-balik. Motor arus bolak-balik khususnya motor induksi tiga fasa memiliki kelebihan dibandingkan motor searah seperti konstruksinya yang sederhana dan kuat, mudah perawatannya karena tidak membutuhkan sikat arang yang selalu menekan komutator dan biaya yang lebih murah.

Baterai sebagai sumber energi pada mobil listrik menghasilkan tegangan searah sedangkan motor penggerak mobil listrik menggunakan motor arus bolak-balik, sehingga diperlukan inverter untuk mengubah arus searah menjadi arus bolak-balik. Motor induksi yang berkapasitas besar diperlukan tegangan masukan yang tinggi disisi inverter sedangkan

baterai di pasaran saat ini memiliki keterbatasan pada daya dan tegangan keluaran. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah konverter DC yang memiliki rasio konversi tinggi untuk menaikkan tegangan keluaran baterai sehingga motor induksi bisa bekerja secara optimal.

Saat ini telah banyak penelitian untuk menghasilkan konverter DC yang memiliki rasio konversi tegangan yang tinggi. Desain konverter tersebut pada umumnya menggunakan beberapa konverter yang diseri atau dengan konsep induktor coupling atau konsep *charge pump* atau mengkombinasikan konsep induktor coupling dan konsep *charge pump* [2]. Namun, desain konverter tersebut memiliki beberapa kekurangan. Kebanyakan desain yang ada hanya cocok untuk penggunaan daya yang rendah. Selain itu, desain tersebut menggunakan saklar dan komponen pasif dalam jumlah banyak yang bisa menyebabkan rangkaian semakin kompleks, sulit dikontrol dan efisiensi konverter menurun [2].

Penelitian ini memaparkan desain konverter DC dengan rasio konversi tegangan yang tinggi dengan mengkombinasikan konverter *boost* konvensional dengan konsep *charge pump*. Keuntungan dari desain yang diusulkan adalah konverter ini memiliki rangkaian yang sederhana dengan topologi mirip dengan rangkaian *boost* konvensional sehingga mudah untuk dikontrol.

II. TEKNOLOGI KONVERTER PADA MOBIL LISTRIK

A. Perkembangan Teknologi Mobil Listrik

Mobil listrik adalah kendaraan umum yang beroperasi di jalan raya yang tersusun atas motor listrik, konverter daya, dan sumber energi [3]. Mobil listrik satu dengan yang lainnya biasanya memiliki jenis penggerak motor listrik dan sumber energi yang berbeda beda. Salah satu contoh mobil listrik adalah GM Impact 4. GM Impact 4 menggunakan sebuah motor induksi 3 fasa dan 26 modul baterai dengan tegangan 312 volt. Mobil ini memiliki kecepatan hingga 128 km/jam dengan percepatan dari 0→96 km/jam selama 8.5 detik. Mobil

ini mampu menempuh 193 km dan menggunakan baterai timbal asam (Pb)[4].

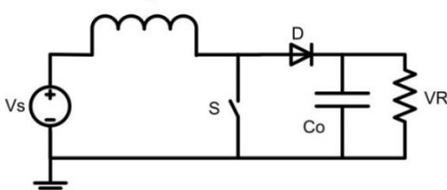
TABEL 1. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI MOBIL LISTRIK

Spesifikasi	Jenis Mobil Listrik			
	HKU U2001	Nissan FEV	BMW E1 / E2	GM Impact 4
Berat total (kg)	1973	900	915	1348
Kecepatan max (km/jam)	110	130	120	128
Percepatan (km/jam;detik)	0→48; 6.3	0→40; 3.6	0→50; 6	0→96; 8.5
Jarak tempuh (km)	176	160	155	193
Tipe Baterai	NiCd	NiCd	NaS	Pb
Berat Baterai (kg)	792	200	265	395
Tegangan Baterai (volt)	264	280	180	312
Kapasitas Energi (kWh)	37	11.6	28.8	16.8
Tipe Motor	Motor DC	Dua Motor Induksi	Motor DC	Motor induksi 3 fasa
Tipe Transmisi	Gear	Gear	Gear	Gear
Tipe Konverter	MOSFET / IGBT inverter	IGBT inverter	MOSFET / IGBT inverter	IGBT Inverter

Perkembangan teknologi mobil listrik mengacu pada teknologi yang digunakan [4] dapat dilihat pada tabel 1. Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa mobil listrik yang menggunakan motor induksi membutuhkan daya yang lebih kecil (16.8 kWh) dari pada motor DC (37 kWh).

B. Konverter Boost

Konverter *Boost* adalah perangkat elektronika daya yang dapat mengubah tegangan masukan DC menjadi tegangan keluaran DC yang memiliki level tegangan yang lebih tinggi. Skema rangkaian konverter *boost* dengan saklar semikonduktor ditunjukkan pada gambar 2. Komponen penyusun konverter ini adalah satu buah induktor L, satu buah dioda D, saklar semikonduktor S, resistor R sebagai beban dan satu kapasitor C_o. Prinsip konverter ini, memanfaatkan proses *charging* dan *discharging* arus induktor. Pada konverter *boost*, induktor tersusun seri dengan tegangan masukan dan terhubung langsung dengan tegangan masukan ketika saklar konduksi[5].



Gambar 2. Rangkaian konverter *boost*

Dalam rangkaian konverter *boost* konvensional terdapat dua mode operasi pensaklaran yaitu mode saat kondisi saklar

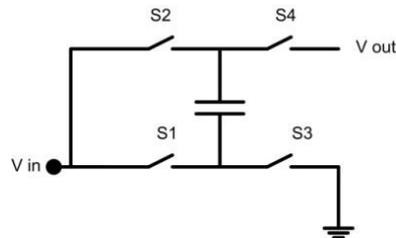
konduksi dan mode pada saat saklar padam. Pada saat saklar S konduksi, arus akan mengalir dari sumber dan mengisi induktor L. Kondisi ini disebut pula periode pengisian arus induktor (magnetisasi). Sedangkan ketika saklar padam, tegangan sumber tersusun seri dengan induktor L dan beban R. Pada kondisi ini, induktor yang semula dalam mode pengisian (magnetisasi) berubah menjadi mode pengosongan (demagnetisasi) dan berubah menjadi sumber arus atau sumber tegangan. Beban R dicatu oleh dua sumber yaitu tegangan sumber V_s dan tegangan induktor V_L. Konverter *boost* memiliki penguatan (*gain*) sebesar:

$$G = \frac{V_R}{V_s} = \frac{1}{(1-D)} \quad (1)$$

dimana: D = Duty cycle (%)

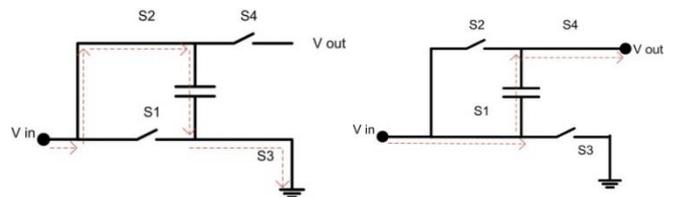
C. Charge Pumps

Charge Pump adalah rangkaian sederhana terdiri dari sebuah kapasitor tunggal yang menghasilkan tegangan DC yang lebih besar dari tegangan masukan yang diberikan [8]. Rangkaian *charge pump* bisa dilihat pada gambar 2.5. Rangkaian ini memanfaatkan kondisi *charging* dan *discharging* dari kapasitor dengan cara pengkombinasian saklar.



Gambar 3. Rangkaian *Charge Pump*

Cara kerja dari rangkaian *charge pump* yang ideal bisa dilihat pada gambar 4. Tanda panah pada gambar 4.a. merupakan aliran arus ketika saklar S2 dan saklar S3 konduksi sedangkan saklar S1 dan saklar S4 terbuka. Pada kondisi ini, Kapasitor C seolah-olah paralel dengan sumber tegangan sehingga kapasitor C mengalami *charging*. Tegangan pada kapasitor akan sama dengan tegangan sumber.



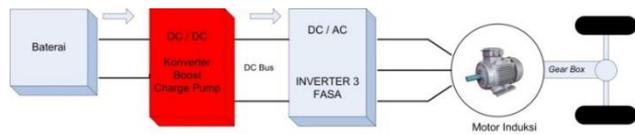
Gambar 4. Aliran arus rangkaian *charge pump*

Sedangkan pada saat saklar S1 dan saklar S4 konduksi serta saklar S2 dan saklar S3 padam, kapasitor C mengalami *discharging* dengan nilai tegangan sama dengan tegangan sumber [9]. Hal ini mengakibatkan tegangan output menjadi dua kali tegangan sumber.

III. DESAIN DAN PERENCANAAN KONVERTER BOOST DENGAN METODE CHARGE PUMP

Konfigurasi penggerak mobil listrik secara umum digambarkan seperti blok diagram pada gambar 5 yang terdiri atas motor penggerak, konverter daya, dan sumber energi[4]. Baterai sebagai sumber daya listrik menghasilkan tegangan dan arus searah, sedangkan motor penggerak mobil listrik menggunakan motor arus bolak-balik. Oleh karena itu diperlukan inverter yang mengubah daya listrik arus searah menjadi arus bolak-balik.

Motor arus bolak balik dipilih karena memiliki kelebihan dari pada motor arus searah. Kelebihan motor arus bolak balik dibandingkan motor arus searah diantaranya lebih kokoh dan sederhana, lebih murah, dan perawatannya lebih mudah .

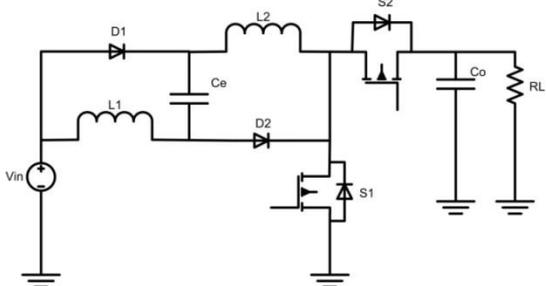


Gambar 5. Konfigurasi Penggerak Mobil Listrik

Motor induksi yang memiliki kapasitas besar diperlukan tegangan masukan yang tinggi disisi inverter sedangkan baterai di pasaran saat ini memiliki keterbatasan pada daya dan tegangan keluaran. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah konverter DC yang memiliki rasio konversi tinggi untuk menaikkan tegangan keluaran baterai sehingga motor induksi bisa bekerja secara optimal. Penelitian ini hanya meneliti tentang konverter DC-DC yaitu dengan mengusulkan desain konverter *boost charge pump*.

A. Pemodelan Konverter Boost Charge Pump

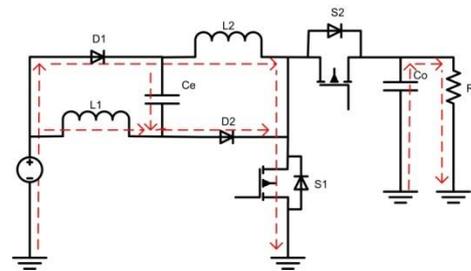
Pada penelitian ini konverter DC yang diusulkan merupakan modifikasi konverter *boost* konvensional dengan konsep *charge pump*. Rangkaian konverter terdiri atas dua buah induktor (L_1 dan L_2) dengan nilai induktansi yang sama, 2 buah saklar semikonduktor (S_1 dan S_2) yang paralel dengan dioda *free wheeling*, 2 buah dioda (D_1 dan D_2) dan 1 buah kapasitor *charge pump* (C_e). Pemodelan rangkaian konverter tersebut ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian konverter *boost* dengan metode *charge pump*.

B. Analisis saat saklar S_1 Konduksi dan saklar S_2 Padam

Pada saat saklar S_1 konduksi, saklar S_2 Induktor L_1 dan Induktor L_2 mengalami *magnetisasi* serta kapasitor C_e mengalami *charge*, kapasitor C_o *discharge*.



Gambar 7. Periode *charging*

Garis putus - putus pada gambar 7 merupakan arah aliran arus dari konverter. Pada periode ini, kapasitor *charge pump* (V_{C_e}) mengalami *charging* sehingga tegangan kapasitor C_e sama dengan tegangan sumber.

$$V_{C_e} = V_{in} \quad (2)$$

karena nilai dari induktor L_1 dan induktor L_2 adalah sama, arus yang melewati kedua induktor juga akan bernilai sama, oleh karena itu dapat dituliskan:

$$L = L_1 + L_2 \quad (3)$$

$$i_1 = i_2 = i \quad (4)$$

seperti kapasitor C_e , kedua induktor L_1 dan L_2 juga mengalami periode magnetisasi. Persamaan tegangan induktor L_1 dan L_2 menjadi:

$$V_{L_1} = V_{L_2} = V_{in} \quad (5)$$

$$V_{L_1} + V_{L_2} = 2 V_{in} \quad (6)$$

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} = 2 V_{in} \quad (7)$$

Sesuai persamaan (3) dan (4) maka persamaan (7) dapat ditulis:

$$L \frac{di}{dt} = 2 V_{in} \quad (8)$$

$$L di = 2 V_{in} t_{on} \quad (9)$$

Pada periode ini, kapasitor C_o mengalami periode *discharging* memberikan energi ke beban. Arus yang melewati beban dapat dituliskan:

$$i_r = i_{C_o} \quad (10)$$

$$-\frac{V_o}{R} = C_o \frac{dV_o}{dt} \quad (11)$$

dV_o merupakan *ripple* tegangan keluaran yang dikehendaki. Dari persamaan (11) nilai kapasitor C_o dapat dicari sebagai berikut:

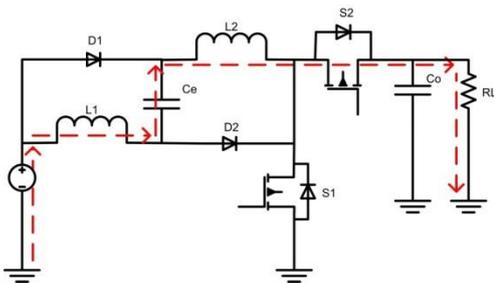
$$C_o = \frac{V_o t_{on}}{\Delta V_o R} \quad (12)$$

$$C_o = \frac{V_o D T}{\Delta V_o R} \quad (13)$$

$$C_o = \frac{V_o D}{\Delta V_o R f} \quad (14)$$

C. Analisis saat saklar S_1 Padam dan saklar S_2 Konduksi

Pada saat saklar S_1 dan saklar S_2 Konduksi, dioda D_1 maupun D_2 mengalami *reverse bias*.



Gambar 8. periode *discharging*

Analisis persamaan rangkaian pada kondisi ini dapat dituliskan sebagai berikut:

pada periode ini, induktor L_1 dan L_2 mengalami periode demagnetisasi dan bersama sumber mengirimkan energi ke beban. Disamping itu, kapasitor C_e juga mengalami *discharge*. Sehingga tegangan keluaran menjadi:

$$V_L + V_{in} + V_{ce} = V_o \quad (15)$$

sesuai persamaan (2), persamaan (16) dapat juga dituliskan:

$$V_L = V_o - 2V_{in} \quad (16)$$

$$L \frac{di}{dt} = V_o - 2V_{in} \quad (17)$$

$$L \frac{di}{t_{off}} = V_o - 2V_{in} \quad (18)$$

$$L di = (V_o - 2V_{in}) t_{off} \quad (19)$$

$$2V_{in} t_{on} = (V_o - 2V_{in}) t_{off} \quad (20)$$

$$2V_{in} D.T = (V_o - 2V_{in}) (1 - D) T \quad (21)$$

$$2V_{in} D = (V_o - 2V_{in}) (1 - D) \quad (22)$$

$$2V_{in} D = V_o - V_o D - 2V_{in} + 2V_{in} D \quad (23)$$

$$2V_{in} = V_o - V_o D \quad (24)$$

$$2V_{in} = V_o (1 - D) \quad (25)$$

Sehingga nilai tegangan keluaran dapat dicari dengan persamaan:

$$V_o = \frac{2}{(1-D)} V_{in} \quad (26)$$

D. Parameter Perancangan Konverter Boost dengan Metode Charge Pump

1. Kapasitas Daya

Dalam penelitian ini, konverter dirancang dengan kapasitas 5000 watt atau 6,7 HP.

2. Tegangan masukan

Tegangan masukan dari konverter sebesar 96 volt yang berasal dari accu. Sistem ini akan menggunakan 8 buah accu 12 volt 65 Ah.

3. Tegangan keluaran

Tegangan keluaran konverter merupakan tegangan masukan untuk inverter 3 fasa. Tegangan masukan minimal yang dibutuhkan inverter adalah:

$$\begin{aligned} V_{\text{masukan inverter}} &= \sqrt{2} V_{\text{keluaran inverter}} \\ &= \sqrt{2} 380 \text{ volt} = 537.4 \text{ volt} \end{aligned} \quad (27)$$

Pada penelitian ini tegangan keluaran ditetapkan sebesar 550 volt.

4. Duty Cycle

Bedasarkan persamaan (26) nilai *duty cycle* yang dibutuhkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$D = 1 - \frac{2V_{in}}{V_o} \quad (28)$$

$$D = 1 - \frac{2 \times 96}{550} = 0.65 \text{ atau } 65 \%$$

5. Frekuensi pensaklaran

Pada penelitian ini digunakan frekuensi pensaklaran sebesar 23.5 khz menyesuaikan kemampuan mikrokontroler untuk menghasilkan frekuensi sinyal PWM.

6. Nilai Resistor

Resistor dalam penelitian ini merupakan nilai pengganti dari besarnya beban atau asumsi dari resistansi rangkaian ekivalen motor. Pada penelitian ini, konverter di desain dengan kapasitas 5 kw. Nilai dari resistor dapat dicari sebagai berikut:

$$R = \frac{V^2_{out}}{P} \quad (29)$$

$$R = \frac{(550)^2}{5000} = 60,5 \text{ ohm}$$

7. Induktor L_1 dan L_2

Nilai dari induktor L_1 dan induktor L_2 yang diperlukan dapat dicari dari persamaan (9) dimana :

$$L = \frac{2V_{in} t_{on}}{di} \quad (30)$$

$$L = \frac{2V_{in} D}{\Delta f} \quad (31)$$

Sama seperti konverter boost konvensional, nilai induktor L dapat diperoleh apabila riak arus ΔI ditentukan terlebih dahulu. Estimasi yang baik untuk riak arus induktor adalah 20% sampai 40% dari arus keluaran[4].

$$\Delta I = (0.2 \text{ sampai } 0.4) \times I_{out} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (32)$$

Dimana:

ΔI = perkiraan riak arus pada induktor (A)

I_{out} = Arus maksimum yang dibutuhkan (A)

Pada penelitian ini, arus keluaran maksimum yang diinginkan sebesar 9 A, sehingga *riple arus* menjadi:

$$\Delta I = 0.2 \times 9 \times \frac{550}{96} = 7,734375 \text{ A}$$

Sehingga nilai L adalah:

$$L = \frac{2 \times 96 \times 0.65}{7.734375 \times 23500} = 686,62 \mu\text{H}$$

Dan diketahui bahwa $L = L_1 + L_2$ maka

$$L_1 = L_2 = 343,3 \mu\text{H}$$

Pada penelitian ini menggunakan induktor L_1 dan L_2 sebesar 360 μH

8. Kapasitor Charge Pump (C_e)

Untuk mendapatkan nilai dari kapasitor C_e dapat menggunakan persamaan berikut [13]:

$$C_e = \frac{V_{in} D}{\Delta V_{in} R f} \quad (33)$$

dengan asumsi resistansi motor sebesar 60.5 ohm dan ripple tegangan 1 volt maka kapasitor Ce didapat:

$$C_e = \frac{96 \cdot 0.65}{1 \cdot 60.5 \cdot 23500} = 4,3889 \times 10^{-4} \text{ F} = 438,9 \mu\text{F}$$

pada penelitian ini ditetapkan nilai kapasitor Ce sebesar 470µF sesuai yang terdapat dipasaran.

9. Kapasitor keluaran (Co)

Untuk menentukan nilai kapasitor pada konverter ini, digunakan persamaan arus pada kapasitor dan beban pada saat saklar S₁ konduksi dan saklar S₂ padam. Menggunakan persamaan (14) yaitu:

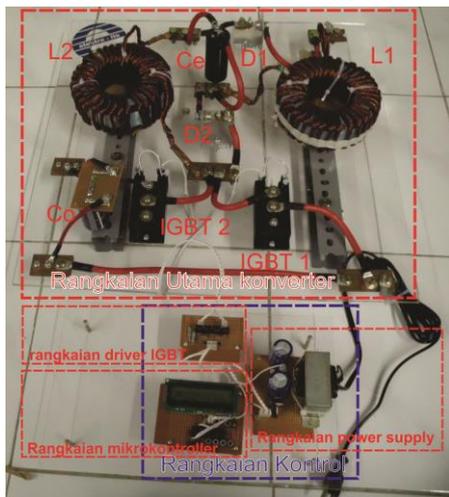
$$C_o = \frac{V_o D}{\Delta V_o R f} \tag{14}$$

$$C_o = \frac{550 \cdot 0.65}{60.5 \cdot 1 \cdot 23500}$$

$$C_o = 2,51 \times 10^{-4} \text{ F} = 251,45 \mu\text{F}$$

pada penelitian ini menggunakan kapasitor Co sebesar 270 uF sesuai yang ada dipasaran.

Gambar 9 merupakan hasil realisasi dari perancangan konverter boost dengan metode charge pump. Rangkaian konverter terdiri dari rangkaian utama konverter, rangkaian mikrokontroler yang menghasilkan sinyal PWM dan rangkaian driver IGBT/ Mosfet.



Gambar 9. hasil Implementasi Konverter Boost dengan metode Charge Pump

IV. ANALISIS DATA

A. Pengujian Rangkaian Konverter Boost Charge Pump dengan perubahan Duty Cycle (D)

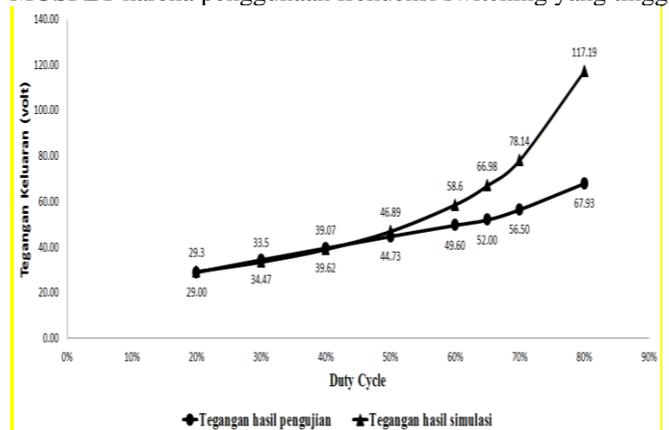
Hasil pengujian dari implementasi rangkaian Konverter Boost dengan konsep Charge Pump dengan tegangan sumber 11,73 volt dapat dilihat pada tabel 2. Pengujian konverter dimulai dengan menggunakan tegangan sumber yang kecil yaitu dengan menggunakan sumber satu buah accu.

TABEL 2. HASIL PENGUJIAN TEGANGAN KELUARAN KONVERTER BOOST DENGAN CHARGE PUMP TERHADAP PERUBAHAN DUTY CYCLE DENGAN SUMBER 11,73 VOLT

Duty Cycle (%)	Tegangan keluaran Hasil Pengujian Alat (Volt)	Tegangan Keluaran Hasil Simulasi (volt)	Error
20	29.00	29.3	-1.02%
30	34.47	33.5	2.89%
40	39.62	39.07	1.40%
50	44.73	46.89	-4.60%
60	49.60	58.6	-15.36%
65	52.00	66.98	-22.36%
70	56.50	78.14	-27.69%
80	67.93	117.19	-42.03%

Dari Tabel 2. dapat dilihat bahwa ketika duty cycle kurang dari 50 % nilai error relatif kecil dibawah 5%. Error terkecil ketika nilai duty cycle sebesar 20% yaitu error sebesar 1,02%. Error semakin besar ketika nilai duty cycle melebihi 50%. Nilai error terbesar ketika duty cycle 80%.

Error pada tegangan keluaran disebabkan karena adanya error pada duty cycle dari sinyal PWM baik sinyal PWM keluaran mikrokontroler maupun sinyal PWM keluaran Transistor Gate Driver yang berpengaruh pada waktu penyalaan MOSFET. Hal ini mengakibatkan tegangan keluaran tidak sesuai dengan yang diharapkan. Selain itu, error pada tegangan keluaran dapat disebabkan karena adanya rugi-rugi pada setiap komponen dan rugi-rugi switching pada MOSFET karena penggunaan frekuensi switching yang tinggi.



Gambar 10. Grafik tegangan keluaran hasil implementas alat dan hasil simulasi dengan tegangan sumber 11.73 volt

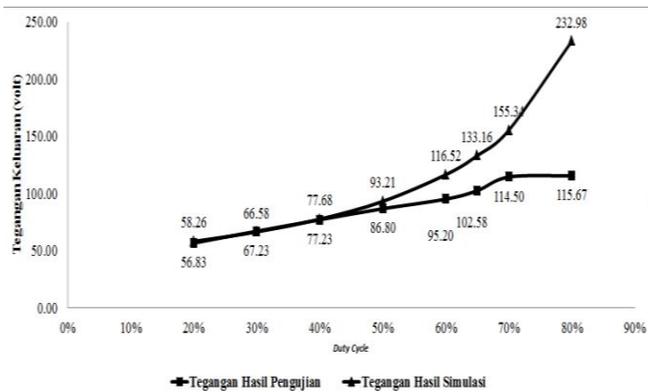
Saat duty cycle dinaikkan maka tegangan keluaran juga akan naik sesuai grafik pada gambar 10. Terlihat pada gambar ketika duty cycle 20% hingga 50 % grafik hampir berimpit yang menandakan error dari alat kecil. Sedangkan setelah duty cycle lebih dari 50% maka error hasil dari implementasi menjadi lebih besar.

Tabel 3 adalah hasil percobaan alat rangkaian Konverter boost dengan charge pump terhadap perubahan duty cycle dengan sumber tegangan sebesar 23,32 volt. Sumber tegangan tersebut didapat dari dua buah accu. Seperti pengujian sebelumnya dan simulasi, duty cycle yang digunakan dalam pengujian bekisar dari 20% hingga 80% dengan beban resistansi yang nilainya tetap sebesar 86,6Ω.

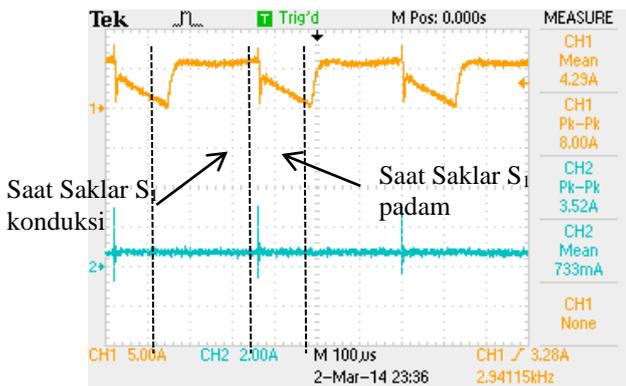
TABEL 3. HASIL PENGUJIAN TEGANGAN KELUARAN KONVERTER BOOST DENGAN CHARGE PUMP TERHADAP PERUBAHAN DUTY CYCLE DENGAN SUMBER 23,32 VOLT

Duty Cycle (%)	Tegangan keluaran Hasil Pengujian Alat (Volt)	Tegangan Keluaran Hasil Simulasi (volt)	Error
20	56.83	58.26	-2.45%
30	67.23	66.58	0.98%
40	77.23	77.68	-0.58%
50	86.80	93.21	-6.88%
60	95.20	116.52	-18.30%
65	102.58	133.16	-22.96%
70	114.50	155.34	-26.29%
80	115.67	232.98	-50.35%

Sama seperti hasil pengujian dengan tegangan sumber 11.73 volt, pengujian dengan sumber 23,32 ini didapat data bahwa nilai error akan bernilai kecil ketika duty cycle kurang dari 50%. Error terkecil terjadi ketika duty cycle 40% dengan nilai error sebesar 0.58%. error semakin besar ketika duty cycle lebih dari 50%. Nilai error mencapai nilai tertinggi di duty cycle 80% dengan nilai error sebesar 50,35%. Hal ini bisa disebabkan karena sinyal keluaran dari transistor Gate driver kurang baik.



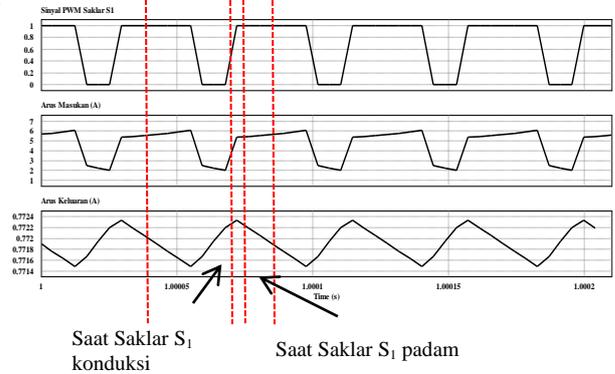
Gambar 11. Grafik tegangan keluaran hasil implementas alat dan hasil simulasi



Gambar 12. Bentuk gelombang Arus Sumber dan Arus keluaran hasil pengujian dengan duty cycle 65% dan tegangan sumber 11.73 volt

Gambar 12 merupakan bentuk gelombang arus masukan dan arus keluaran dari konverter dengan sumber tegangan sebesar 11.73 volt pada duty cycle 65%. Arus masukan terukur sebesar 4.29 A dan arus keluaran sebesar 733 mA. Ketika

saklar S_1 konduksi induktor akan mengalami magnetisasi dan kapasitor mengalami *charging* sehingga arus masukan akan naik. Sedangkan ketika saklar S_1 padam, kapasitor dan induktor melepaskan energinya ke beban sehingga arus masukan menjadi semakin kecil. Arus keluaran pada gambar terlihat lurus, hal ini dikarenakan arus keluaran memiliki *ripple* arus yang kecil.



Gambar 13. Bentuk gelombang Arus Sumber dan Arus keluaran hasil simulasi dengan duty cycle 65% dan tegangan sumber 11.73 volt

Bentuk gelombang arus masukan hasil pengujian memiliki bentuk yang sama seperti yang terlihat pada gambar 12 dan 13. Nilai arus yang didapatkan juga hampir sama yaitu 4,6 A hasil simulasi dan 4,29 A didapat dari pengujian. Bentuk arus keluaran hasil pengujian terlihat seperti garis lurus hal ini dikarenakan konverter bekerja jauh dibawah rating dayanya yang menyebabkan *ripple* arus menjadi sangat kecil. Terlihat dalam gambar 4.18 *ripple* arus sangat kecil hanya sebesar 2 mA.

B. Efisiensi Konverter

Tabel 4 memperlihatkan hasil pengujian konverter dengan mengambil data tegangan dan arus baik dari sisi sumber maupun keluaran. Tegangan sumber bernilai tetap sebesar 11,73 volt dengan beban dengan nilai 86,6Ω. Ketika nilai duty cycle dinaikkan, maka arus sumber maupun keluaran juga akan naik. Hal ini mengakibatkan daya konverter juga akan semakin besar.

TABEL 4. HASIL PENGUJIAN KONVERTER BOOST DENGAN CHARGE PUMP TERHADAP PERUBAHAN DUTY CYCLE.

D (%)	Vs (volt)	Is (A)	Vo (volt)	Io (A)	P in (Watt)	Pout (watt)	effisiensi i
20	11.73	1.46	29.00	0.381	17.16	11.06	64.45%
30	11.73	1.73	34.47	0.451	20.25	15.53	76.69%
40	11.73	2.55	39.62	0.524	29.93	20.74	69.29%
50	11.73	2.86	44.73	0.574	33.49	25.67	76.65%
60	11.73	3.54	49.60	0.638	41.56	31.64	76.14%
65	11.73	3.95	52.00	0.680	46.27	35.37	76.43%
70	11.73	5.00	56.50	0.719	58.67	40.62	69.24%
80	11.73	8.59	67.93	0.851	100.78	57.83	57.39%

Ketika duty cycle dibawah 30% energi yang disalurkan ke beban kecil. Hal ini dikarenakan kapasitor mengalami proses

charging yang cepat dibandingkan waktu *discharging*. Selain kapasitor, Induktor juga sedikit sekali menyimpan energi sehingga efisiensi menjadi lebih rendah dari pada saat konverter bekerja dalam *duty cycle* di atasnya.

Sedangkan ketika *duty cycle* di atas 50% rugi rugi disebabkan oleh saklar semikonduktor (MOSFET) yang memiliki resistansi dalam yang tinggi ketika konduksi. Selain itu, efek resistansi pada setiap komponen juga menyebabkan rugi rugi daya. Pengujian konverter jauh dibawah rating juga menyebabkan efisiensi menjadi jelek.

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan pengujian alat dilaboratorium, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Topologi konverter *boost* dengan metode *charge pump* secara ideal memiliki rasio konversi tegangan dua kali lebih besar dibandingkan dengan topologi konverter *boost* konvensional. Dari hasil pengujian rangkaian simulasi didapatkan tegangan keluaran sebesar 137.04 volt dari tegangan masukan sebesar 24 volt dengan *duty cycle* 0.65 dan didapat error yang relatif kecil yaitu sebesar 0.08%.
2. Kinerja Konverter *boost* dengan metode *charge pump* bekerja secara optimal pada *duty cycle* dibawah 50%. Hasil Pengujian menunjukkan *error* rasio konversi tegangan dibawah 5% pada *duty cycle* di bawah 50%.
3. Efisiensi konverter berkisar 64.45%- 76.65%. konverter bekerja paling efisien dalam *duty cycle* 50%. Hal ini disebabkan karena konverter diuji jauh dibawah kemampuan ratingnya dan terdapat efek resistansi yang besar pada setiap komponen di dalam konverter.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Happyanto, Dedid Cahya., "Sistem Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Untuk Dinamika Pergerakan Mobil Listrik Berbasis Teknologi Soft Computing". Prosiding Sidang terbuka doktor, pp.1-2, Surabaya, 2012
- [2] K.I. Hwu dan Y.T. Yau, " High Step-Up Converter Based on Charge Pump and Boost Converter", IEEE Transaction On Power Electronics vol.27, no.5, May 2012.
- [3] Kaloko, Bambang S., "Strategi Penentuan Kapasitas Baterai Timbal Pada Mobil Listrik Berbasis Radial Basis Function Neural Network", Prosiding Sidang Promosi Doktor, Surabaya, 2013.
- [4] Chan, C.C. dan Chau, K.T., "Modern Electric Vehicle Technology", Oxford Science Publications, New York, 2001.
- [5] ashari Mochamad, "Sistem Konverter DC, Desain Rangkaian Elektronika Daya", ITS Press, Surabaya, 2012
- [6] "Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage", Texas Instruments, November 2009
- [7] Rashid M.H., " Power Electronics Handbook", Academic Press, USA, 2001
- [8] Wu, Jieh-Tsong dan Chang, Kuen-Long., "MOS Charge Pumps for Low-Voltage Operation", IEEE Journal of Solid-State Circuit, Vol.33, No 4, April 1998.
- [9] Pylarinos, Louie., "Charge Pump: An Overview", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto.
- [10] Putra, Adhitya Iskandar., " Analisa Karakteristik Induktor Toroid Pada Rangkaian Boost Converter", Universitas Indonesia, 2012.
- [11] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/indtor.html>
- [12] Rashid M.H., " Rangkaian, Devais, dan Aplikasinya, Jilid 1", Diterjemahkan oleh Ir. Ary Prihatmanto M.S., PT. Prenhallindo, Jakarta, 1999.
- [13] Husni, Agus M., " DC-DC Step-Up Converter Rasio Tinggi Kombinasi Charge Pump dan Boost Converter untuk Catu Daya Motor Induksi Pada Mobil Listrik", ITS, 2013