

APLIKASI PENGGUNAAN ZERO CURRENT SWITCHING (ZCS) UNTUK CATU DAYA MOTOR ARUS SEARAH

Vitra Yudarma Guskha^{*)}, Mochammad Facta, dan Tejo Sukmadi

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia
^{*)}E-mail : vitrayudarma@gmail.com

Abstrak

Seiring dengan kemajuan teknologi penggunaan auto transformer untuk mencatu daya motor arus searah mulai berkurang dan beralih pada metode alternatif dengan menggunakan perangkat elektronika daya seperti konverter arus searah (DC). DC-DC konverter beroperasi berdasarkan mode pensaklaran yang dipicu dengan rangkaian kontrol PWM. Keadaan ini saat seluruh arus beban mengalir ketika saklar menyala dan mati selama mode pensaklaran berlangsung. Salah satu komponen yang dapat dikontrol dengan pensaklaran adalah MOSFET. Mode pensaklaran ini dapat menimbulkan rugi-rugi pensaklaran. Untuk mengatasi rugi-rugi tersebut digunakan metode soft switching yaitu Zero Current Switching (ZCS) atau pensaklaran saat arus nol. Teknik ini dapat meminimalkan rugi-rugi pensaklaran sehingga efisiensi sistem menjadi lebih baik. Penelitian ini merancang DC-DC konverter menggunakan mode pensaklaran Zero Current Switching (ZCS) untuk catu daya motor arus searah. Tegangan tertinggi yang dihasilkan saat keadaan motor tidak berbeban yaitu 30,74 V duty cycle 90% dan saat keadaan motor berbeban yaitu 28,46 V duty cycle 90%. Efisiensi tertinggi saat keadaan motor tidak berbeban yaitu 98,39 % dan saat berbeban 85,8%.

Kata Kunci: DC-DC konverter, MOSFET, soft switching, Zero Current Switching (ZCS), motor arus searah.

Abstract

Along with technology the advanced of the use of auto transformer to supply direct current motor power begins to decrease and switch as to alternative methods using power electronics devices such as direct current converter. DC-DC converter operates based on switching mode triggered with PWM control circuit. This is the case the entire load current flows when the switch turns on and off during the switching mode. One of the components that can be controlled by switching is MOSFET. This switching mode can cause losses. To overcome the loss, is applied the soft switching method called Zero Current Switching (ZCS). This technique can minimize switching losses so that the efficiency becomes better. In this research the design of DC-DC converter uses Zero Current Switching (ZCS) switching mode for direct current motor power supply. The highest voltage generated when the motor condition is not burdened is 30.74 V 90% duty cycle and when the motor state load is 28.46 V 90% duty cycle. The highest efficiency when motor conditions are not burdened is 98.39% and when 85.8% burden.

Keywords: DC-DC converter, MOSFET, soft switching, Zero Current Switching (ZCS), direct current motor.

1. Pendahuluan

Dalam dunia industri dan kehidupan sehari – hari motor listrik merupakan alat dan aplikasi yang populer digunakan selain motor bakar konvensional. Motor listrik merupakan alat yang merubah energi listrik menjadi energi mekanik. Salah satu jenis dari motor listrik yang paling banyak digunakan adalah motor arus searah (DC). Motor arus searah memiliki keunggulan seperti torsi awal yang besar dan metode pengendalian putaran yang sederhana[1]. Motor arus searah membutuhkan catu daya arus searah (DC) agar dapat berputar. Pada mulanya, *auto transformer* banyak digunakan

sebagai catu daya motor arus searah yang sekaligus digunakan sebagai pengatur tegangan keluaran. Namun, penggunaan *auto transformer* memiliki kelemahan, salah satunya dari segi ekonomis.

Seiring dengan kemajuan teknologi penggunaan *auto transformer* untuk mencatu daya motor arus searah mulai berkurang dan beralih pada metode alternatif dengan menggunakan perangkat elektronika daya. Perangkat elektronika daya yang digunakan dapat berupa penyearah terkontrol (*controlled rectifier*)[2][3] atau menggunakan konverter arus searah (DC chopper)[4][5][6]. DC-DC

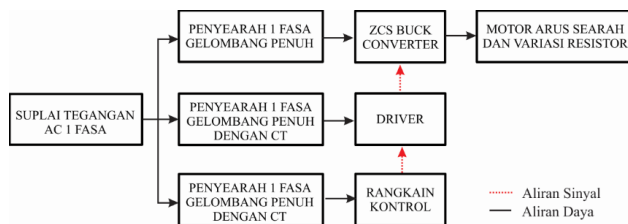
Konverter beroperasi berdasarkan mode pensaklaran yang dipicu dengan rangkaian kontrol *Pulse Width Modulation* (PWM). Keadaan ini saat seluruh arus beban mengalir ketika saklar menyala dan mati selama mode pensaklaran berlangsung[7]. Salah satu komponen yang dapat dikontrol dengan pensaklaran adalah MOSFET[8]. Mode pensaklaran ini dapat menimbulkan rugi-rugi pensaklaran.

Untuk mengatasi rugi-rugi tersebut digunakan metode *soft switching*[9]. Salah satunya teknik *soft switching* adalah *quasi resonant* dengan menghubungkan komponen resonansi, yaitu induktor dan kapasitor, dengan rangkain pensaklaran seperti konverter arus searah sehingga dapat dicapai fenomena pensaklaran yang terjadi pada kondisi arus nol atau tegangan nol. Teknik ini dapat meminimalkan rugi-rugi pensaklaran sehingga efisiensi sistem menjadi lebih baik.

Pada penelitian ini akan menggunakan salah satu metode *soft switching* yaitu *Zero Current Switching* (ZCS) atau pensaklaran saat arus nol yang di aplikasikan untuk catu daya motor arus searah. Pada penelitian sebelumnya[7], metode *soft switching* yaitu *Zero Current Switching* (ZCS) atau pensaklaran saat arus nol belum ada pengaplikasiannya dengan menggunakan motor arus searah. Sehingga pada penelitian ini akan dirancang modul perangkat keras aplikasi *Zero Current Switching* (ZCS) untuk catu daya motor arus searah.

2. Metode

Gambar 1 menunjukan blok diagram perancangan perangkat keras.



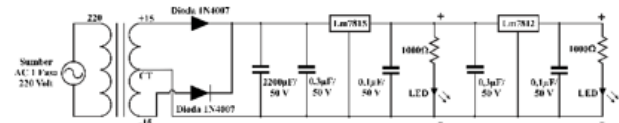
Gambar 1. Blok diagram perancangan alat

Blok diagram perancangan perangkat keras terbagi menjadi 3 blok yaitu, blok rangkaian penyearah, blok rangkain kontrol dan blok ZCS *Buck Converter*. Sumber tegangan AC satu fase menjadi sumber utama pada rangkaian. Transformator CT 1A digunakan untuk menurunkan tegangan dari 220 volt ke 12 V dan 15 V dan sebagai sumber regulator arus searah 12V dan 15 V. Transformator CT 5A digunakan untuk menurunkan tegangan dari 220V ke 35.35 V sebagai sumber rangkaian ZCS *Buck Converter* untuk mencatu daya motor arus searah. Terdapat 2 jenis aliran arus

pada perancangan perangkat keras ini yaitu aliran daya dan aliran sinyal dengan arah yang sudah tertera pada Gambar 1.

2.1. Penyearah Rangkaian Kontrol PWM

Perancangan ini menggunakan penyearah gelombang penuh satu fase dengan *center tap* (CT) untuk sumber tegangan rangkaian kontrol IC TL494, rangkain MOSFET *driver* TLP250, dan kipas pendingin.

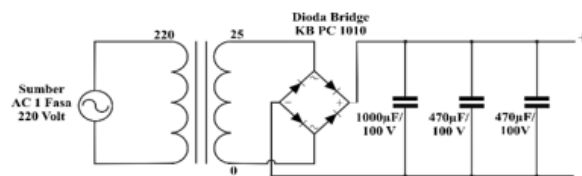


Gambar 2. Penyearah gelombang penuh satu fase CT

Penyearah gelombang penuh dengan CT menggunakan 2 dioda untuk beroperasi. Tegangan keluaran penyearah ini adalah 12 V dan 15 V. Kapasitor digunakan sebagai tapis tegangan untuk mengurangi *ripple* tegangan pada keluaran dioda.

2.2. Penyearah Rangkaian Daya ZCS Buck Converter

Penyearah rangkaian daya menggunakan penyearah gelombang penuh satu fase non CT untuk sumber rangkain ZCS *Buck Converter*.

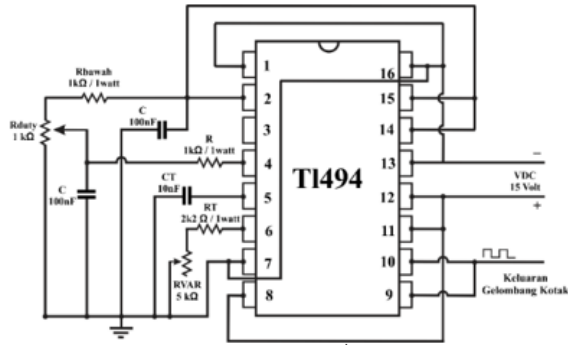


Gambar 3. Penyearah gelombang penuh satu fase non CT

Penyearah gelombang penuh satu fase non CT menggunakan dioda *bridge* untuk beroperasi. Tegangan keluaran penyearah ini adalah 35.35 V. Kapasitor digunakan sebagai tapis tegangan untuk mengurangi *ripple* tegangan pada keluaran dioda.

2.3. Rangkaian Kontrol IC TL494

Rangkaian kontrol dibuat dengan menggunakan 1 buah IC untuk kontrol PWM yaitu IC TL494. Gambar 4 adalah rangkaian kontrol keseluruhan IC TL494.

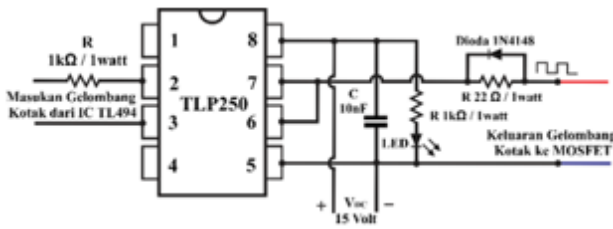


Gambar 4. Rangkaian kontrol IC TL494

Keluaran gelombang kotak terdapat pada pin 9 dan 10. IC TL494 akan bekerja secara *single-ended*, yaitu terdapat satu jenis keluaran gelombang kotak jika pin 13 dihubungkan dengan *ground*. Perancangan ini menggunakan frekuensi 18 kHz – 45 kHz untuk pensaklaran MOSFET pada *DC-DC converter*. Keluaran gelombang kotak IC TL494 membutuhkan rangkaian *driver* untuk memperkuat sinyal keluaran dan sebagai pemisah antara rangkaian daya dan rangkaian kontrol.

2.4. Rangkaian MOSFET Driver TLP250

Rangkaian TLP250 digunakan untuk mengisolasi dan menguatkan sinyal dari keluaran PWM (*Pulse Width Modulation*), tegangan yang dihasilkan PWM dapat dibangkitkan menjadi level tegangan yang sama, lebih rendah maupun lebih tinggi dengan sistem *ground* terpisah.

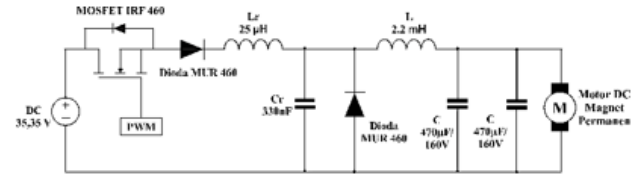


Gambar 5. Rangkaian MOSFET Driver TLP250

Gambar 5 memperlihatkan terdapat sumber yang akan digunakan untuk MOSFET driver TLP250 bernilai 15 V. Adanya kapasitor *bypass* antara *power supply* (pin 8) dan *ground* (pin 6) pada IC TLP250 berfungsi untuk menstabilkan operasi dari penguat linier berpenguatan tinggi (*high gain linier amplifier*). Nilai kapasitor sebesar 10nF sesuai *datasheet* IC TLP250, penambahan LED digunakan sebagai indikator rangkaian dalam keadaan bekerja.

2.5. Perancangan Rangkaian ZCS Buck Converter

Perancangan *DC-DC converter* tipe *ZCS Buck Converter* digunakan sebagai catu daya untuk motor arus searah. Rangkaian lengkap *ZCS Buck Converter* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian ZCS Buck Converter

Komponen-komponen penyusun yang digunakan pada *DC-DC converter* tipe *Zero Current Switching Buck Converter* antara lain :

1. Sumber tegangan arus searah

Tegangan sumber didapat dari Penyearah gelombang penuh satu fase non CT dengan keluaran tegangan 35.35V.

2. MOSFET

Komponen pensaklaran yang digunakan pada *DC-DC converter* pada penelitian ini adalah MOSFET. Pemilihan MOSFET harus mempertimbangkan nilai tegangan dan arus operasi. Tegangan masukan *DC-DC converter* adalah 35,35 volt. MOSFET yang dipakai adalah MOSFET IRF 460 yang mempunyai tegangan Breakdown Drain-Source $V_{(BR)DS}$ adalah 500 volt dan kemampuan arus drain maksimal 20 ampere, sehingga pemakaian MOSFET tipe IRF 460 ini aman untuk dipakai karena arus rata-rata yang dialirkan rangkaian daya yaitu 1 A [10].

3. Induktor resonansi (L_r) dan kapasitor resonansi (C_r)

Komponen C_r dan L_r dapat dihitung dengan menentukan frekuensi pensaklaran dan frekuensi resonansi dengan syarat berdasarkan Persamaan 1. [11]

$$f_o \geq f_s \quad (1)$$

Pada penelitian ini frekuensi pensaklaran (f_s) yang digunakan adalah sebesar 15 kHz–45 kHz, dan ditetapkan frekuensi resonansi (f_o) sebesar 55 kHz. Nilai C_r diasumsikan dengan pertimbangan nilai komponen kapasitor yang ada di pasaran untuk memudahkan pengerjaan perangkat keras. Nilai C_r ditetapkan sebesar 330 nF. Maka nilai L_r dapat dihitung berdasarkan Persamaan 2 [12].

$$L_r = \frac{1}{2\pi f_o C_r} \quad (2)$$

$$L_r = \frac{1}{(2\pi \times 55 \times 10^3)^2 \times 330 \times 10^{-9}}$$

$$L_r = 25,374 \mu H$$

Untuk nilai $f_o = 55$ kHz dan $C_r = 330$ nF, maka diperoleh nilai L_r sebesar 25,374 μH .

4. Dioda D1 dan D2

Dioda yang digunakan adalah MUR 460. Dioda ini dipilih karena mempunyai sifat *Fast Recovery* dengan waktu pemulihan 75ns. Dioda MUR460 memiliki kemampuan menghantarkan arus sampai 4 ampere dan tegangan sebesar 600 volt [13].

5. Induktor (L) dan tapis kapasitor (C)

Komponen induktor (L) dan tapis kapasitor (C) yang dipakai mempunyai nilai yang relatif cukup besar jika dibandingkan dengan nilai komponen resonansinya. Kapasitor yang digunakan ada 2 yang dirangkai secara paralel sebesar 470 μF / 160 V dan Induktor yang digunakan sebesar 2,2 mH

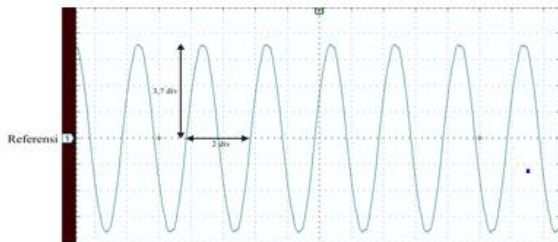
6. Beban motor arus searah

Pada perancangan ini beban yang digunakan adalah Motor arus searah yang memiliki rating tegangan 24 V dengan kecepatan putar tanpa beban 2200 rpm.

3. Hasil dan Analisa

3.1. Pengujian Sumber Tegangan AC Satu Fase

Pengujian dilakukan adalah mengukur nilai sumber tegangan jala-jala PLN satu fase 220 V yang diturunkan tegangannya menjadi 25 V menggunakan trafo. Bentuk dan besarnya tegangan dapat dilihat pada Gambar 7 sebagai berikut:



Gambar 7. Gelombang keluaran sumber tegangan

Pengukuran tegangan pada trafo menggunakan osiloskop. Dari hasil pengukuran tegangan line - netral pada sumber satu fasa didapatkan tegangan puncak sebesar 3,7 div, maka dapat dihitung tegangan keluarannya sebesar:

$$\begin{aligned}
 V_p &= 3,7 \text{ div} \times 10 \text{ v/div} = 37 \text{ V} \\
 \text{Maka tegangan rata-ratanya adalah:} \\
 V_{rms} &= V_p / \sqrt{2} \\
 V_{rms} &= 37 / \sqrt{2} = 26,16 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Dengan menggunakan Persamaan 3 dapat diperoleh nilai tegangan efektif yaitu sebesar 26.16 V. Sumber tegangan ini akan digunakan sebagai suplai rangkaian daya ZCS *Buck Converter*.

3.2. Pengujian Rangkain Pnyearah Kontrol PWM

Pengujian ini, tegangan keluaran diambil pada rangkaian regulator IC LM7815 terhadap *ground*. Regulator tegangan

ini digunakan sebagai sumber IC TL494, MOSFET *driver* TLP250 dan kipas pendingin. Gelombang keluaran tegangan dari regulator 15 V terdapat pada Gambar 8.



Gambar 8. Gelombang keluaran sumber tegangan searah

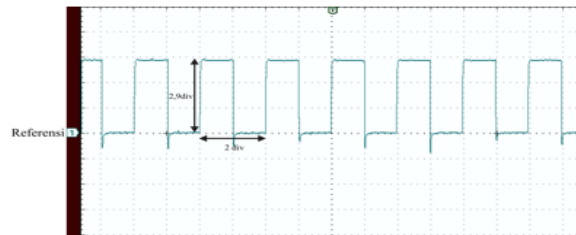
Gambar 8 menunjukkan besar tegangan keluaran regulator sebesar 3 div sehingga dengan perhitungan didapat nilai tegangan keluaran penyearah sebagai berikut:

$$V_{DC} = 3 \text{ div} \times 5 \text{ V/div} = 15 \text{ Volt}$$

Nilai tegangan keluaran (V_{DC}) yang terukur dari penyearah ini sudah sesuai dengan karakteristik tegangan keluaran pada *datasheet* IC LM7815 [14], yaitu tegangan keluaran sebesar 15 V.

3.3. Pengujian Rangkain Kontrol PWM

Rangkaian kontrol pemicuan MOSFET menggunakan IC TL494 yang kemudian masuk rangkaian *driver* MOSFET TLP 250. Tegangan dan bentuk gelombang rangkaian kontrol PWM diukur pada keluaran TLP250. Tegangan maksimum TLP250 pada adalah 15V. Hasil tegangan keluaran TLP250 dapat lebih besar maupun lebih kecil dari nilai tegangannya. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan *probe* tegangan pada pin 6 TLP250 yaitu pin tegangan keluaran dan pin 5 sebagai *ground*. Hasil gelombang keluaran kontrol pemicuan dapat dilihat pada Gambar 9 berikut:



Gambar 9. Gelombang keluaran kontrol PWM

Pengukuran menggunakan osiloskop dengan *probe* x1 dengan frekuensi sebesar 25 kHz didapat 2,95 div. Nilai tegangan *peak to peak* (V_{pp}) dapat dihitung sebagai berikut:

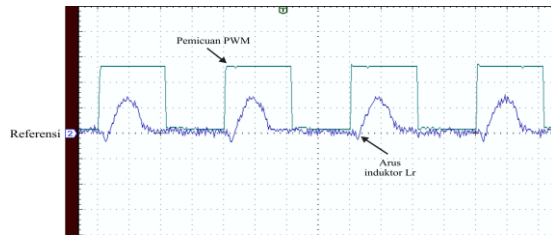
$$V_{pp} = 2,95 \text{ div} \times 5 \text{ v/div} = 14,75 \text{ V}$$

Nilai keluaran dari driver MOSFET menggunakan TLP250 adalah 14,75 V. Tegangan 14,75 V sudah dapat memicu MOSFET karena sudah diatas nilai tegangan *threshold* 4 V dan dibawah tegangan maksimal *gate to source* sebesar 20V[8].

3.4. Pengujian Rangkain ZCS Buck Converter

3.4.1. Pengujian Pensaklaran ZCS Buck Converter

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui proses pensaklaran ZCS Buck Converter yaitu pensaklaran saat arus nol. Gelombang yang diamati adalah gelombang keluaran pemucuan IC TL 494 dan gelombang arus pada komponen induktor L_r dapat dilihat pada Gambar 10.



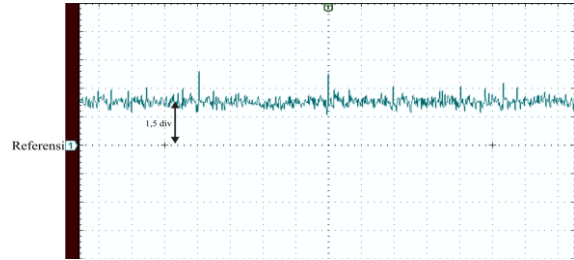
Gambar 10. Gelombang keluaran kontrol PWM dan arus induktor L_r

Gambar 10 Merupakan gelombang pensaklaran ZCS Buck Converter saat beban resistor 200 Ω dengan *duty cycle* 50 % dan frekuensi 25 kHz. Dari gelombang dapat diamati pensaklaran saat arus nol terjadi pada proses saklar *on*, sedangkan proses saklar *off* tidak terjadi saat arus nol. Bentuk gelombang arus berupa setengah gelombang periode positif saat saklar menutup atau *on* dan selanjutnya bernilai nol saat saklar membuka atau *off*.

3.4.2. Pengukuran Tegangan dan arus ZCS Buck Converter Dengan Beban Resistor



Gambar 11. Gelombang tegangan keluaran ZCS Buck Converter beban R 200 Ω , D = 50 %, f = 25 kHz



Gambar 12. Gelombang arus keluaran ZCS Buck Converter beban R 200 Ω , D = 50 %, f = 25 kHz

Gambar 11 dan Gambar 12 merupakan gelombang keluaran tegangan dan arus ZCS Buck Converter dengan beban resistor gelombang diamati saat beban resistor 200 Ω dengan *duty cycle* 50 % dan frekuensi 25 kHz. Hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 1.

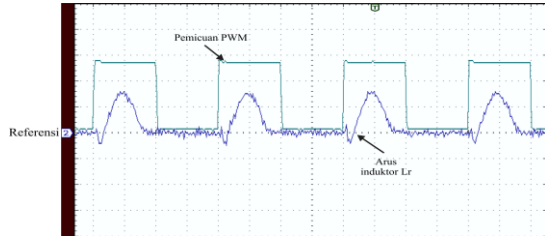
Tabel 1. Hasil pengujian tegangan dan arus keluaran ZCS Buck Converter dengan beban resistor

D (%)	Resistor 200 Ω				Resistor 10 Ω			
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)
10	32,6	0,109	22,5	0,107	31,9	0,193	4,5	0,363
20	32,4	0,149	30,2	0,147	30,3	0,473	9,7	0,953
30	32,3	0,151	30,4	0,148	29,7	0,619	11,8	1,167
40	32,3	0,151	30,4	0,148	29,7	0,647	12,0	1,189
50	32,3	0,151	30,4	0,149	29,6	0,702	12,3	1,215
60	32,2	0,151	30,5	0,149	28,3	0,916	13,5	1,321
70	32,2	0,153	30,9	0,152	26,8	1,361	16,8	1,652
80	32,9	0,154	31,4	0,152	26,3	1,509	17,7	1,743
90	32,6	0,154	31,5	0,153	25,2	1,720	18,4	1,825

Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran dari ZCS Buck Converter dengan beban resistor. Dapat diamati hubungan antara *duty cycle* dengan tegangan dan arus keluaran adalah berbanding lurus. Semakin besar nilai variasi *duty cycle* maka nilai tegangan dan arus keluaran akan semakin besar. Pada variasi beban resistor memperlihatkan bahwa dengan *duty cycle* yang sama, nilai beban yang lebih besar akan menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dan berbanding terbalik dengan arus keluaran.

3.5. Pengujian Pensaklaran Rangkain ZCS Buck Converter Untuk Catu Daya Motor arus Searah

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui proses pensaklaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah. Gelombang yang diamati adalah gelombang keluaran pemucuan IC TL494 dan gelombang arus pada komponen induktor L_r dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Gelombang pensaklaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah

Gambar 13 Merupakan gelombang pensaklaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah ketika *duty cycle* 50 % dan frekuensi 25 kHz. Dari gelombang dapat diamati pensaklaran saat arus nol terjadi pada proses saklar *on*, sedangkan proses saklar *off* tidak terjadi saat arus nol. Bentuk gelombang arus berupa setengah gelombang periode positif saat saklar menutup atau *on* dan selanjutnya bernilai nol saat saklar membuka atau *off*. Dari gelombang juga dapat diamati pensaklaran ZCS saat mencatu daya motor arus searah dan saat menggunakan beban resistor yang terlihat pada Gambar 10 memiliki keadaan yang sama yaitu pensaklaran saat arus nol.

Dari pengujian juga dapat dilihat gelombang tegangan dan arus keluaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah pada gambar 14 dan Gambar 15.



Gambar 14. Gelombang tegangan keluaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah, $D = 50\%$, $f = 25\text{ kHz}$



Gambar 15. Gelombang arus keluaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah, $D = 50\%$, $f = 25\text{ kHz}$

Dari Gambar 14 gelombang tegangan keluaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah sama dengan saat menggunakan beban resistor. Sedangkan pada gelombang arus keluaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah berbeda dengan saat menggunakan beban resistor. Terlihat gelombang arus keluaran saat mencatu daya motor arus searah tidak rata yang disebabkan oleh arus balik di armature[15].

3.6. Pengujian ZCS Buck Converter Saat Motor arus Searah keadaan berbeban dan tidak berbeban

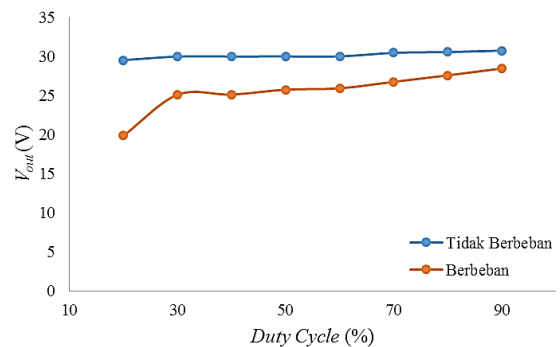
3.6.1. Pengukuran tegangan dan arus keluaran ZCS Buck Converter saat motor arus searah keadaan tidak berbeban dan berbeban

Pengukuran dilakukan untuk mengetahui tegangan dan arus keluaran dari ZCS Buck Converter saat motor arus searah keadaan tidak berbeban dan keadaan berbeban. Keadaan berbeban saat motor arus searah di *couple* dengan generator arus searah yang diibaratkan sebagai beban mekanis. Data tegangan dan arus keluaran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian tegangan dan arus keluaran ZCS Buck Converter saat motor arus searah keadaan berbeban dan tidak berbeban.

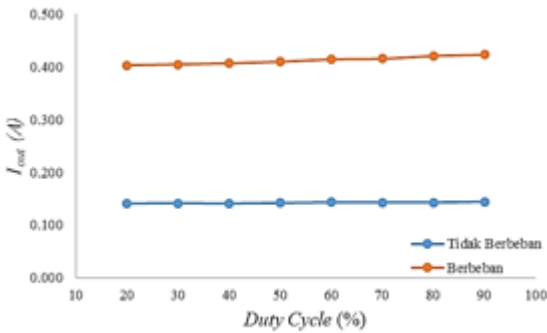
D (%)	Tidak Berbeban					Berbeban			
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)		V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)
20	32,0	0,138	29,53	0,141		29,87	0,404	19,85	0,403
30	32,0	0,138	29,98	0,141		29,87	0,405	25,10	0,405
40	31,9	0,139	29,99	0,141		29,88	0,407	25,12	0,407
50	31,9	0,139	30,00	0,142		30,16	0,407	25,75	0,410
60	31,9	0,141	30,01	0,143		30,20	0,407	25,92	0,414
70	31,9	0,141	30,46	0,143		30,21	0,410	26,75	0,415
80	31,9	0,142	30,56	0,143		30,26	0,411	27,58	0,421
90	31,8	0,142	30,74	0,144		30,30	0,415	28,46	0,423

Dari Tabel 2 Pengukuran tegangan dan arus keluaran terhadap *duty cycle* dapat disajikan dalam grafik pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. Grafik hubungan tegangan keluaran terhadap variasi *duty cycle*

Dari Grafik dapat dilihat hubungan tegangan keluaran dengan variasi *duty cycle* adalah berbanding lurus. Semakin besar nilai *duty cycle* maka tegangan keluaran akan semakin besar. Pada variasi pembebanan memperlihatkan bahwa dengan *duty cycle* yang sama, saat keadaan motor tidak berbeban memiliki tegangan keluaran yang lebih besar dibandingkan dengan saat motor di diberi beban.



Gambar 17. Grafik hubungan arus keluaran terhadap variasi *duty cycle*

Dari Grafik dapat dilihat hubungan arus keluaran dengan variasi *duty cycle*, semakin besar nilai *duty cycle* maka tegangan keluaran akan semakin besar. Pada variasi pembebanan memperlihatkan bahwa dengan nilai *duty cycle* yang sama, saat keadaan motor diberi beban memiliki arus keluaran yang lebih besar dibandingkan dengan saat motor tidak beban. Hal ini berbanding terbalik dengan tegangan keluaran.

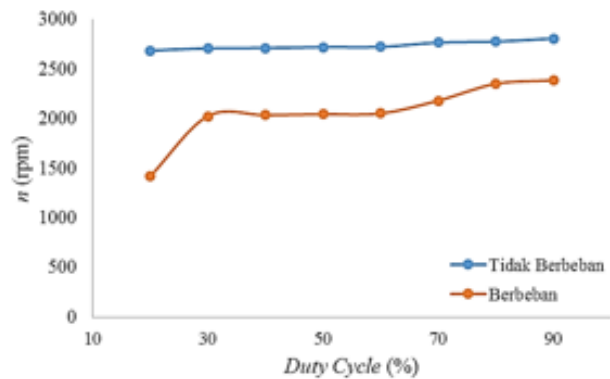
3.6.2. Pengaruh variasi *duty cycle* terhadap kecepatan motor arus searah saat keadaan tidak berbeban dan berbeban

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan kecepatan motor arus searah dengan variasi *duty cycle* saat motor arus searah keadaan tidak berbeban dan berbeban. Hasil Pengujian ini dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian kecepatan putar saat motor arus searah keadaan berbeban dan tidak berbeban terhadap variasi *duty cycle*

D (%)	Tidak Berbeban		Berbeban	
	$V_{out}(V)$	n (rpm)	$V_{out}(V)$	n (rpm)
20	29,53	2689	19,85	1421
30	29,98	2712	25,10	2028
40	29,99	2715	25,12	2039
50	30,00	2724	25,75	2047
60	30,01	2726	25,92	2055
70	30,46	2770	26,75	2185
80	30,56	2779	27,58	2355
90	30,74	2812	28,46	2389

Pada Tabel 3 Menunjukkan hubungan kecepatan putar motor arus searah dengan variasi *duty cycle* dan disajikan dalam grafik Gambar 18.



Gambar 18. Grafik hubungan kecepatan putar motor arus searah saat keadaan tidak berbeban dan berbeban pada variasi *duty cycle*

Dari grafik dapat dilihat hubungan kecepatan putar motor arus searah keadaan tidak berbeban dan berbeban dengan variasi *duty cycle* adalah berbanding lurus. Dimana semakin besar nilai variasi *duty cycle* maka kecepatan putar motor arus searah juga semakin besar. Dalam keadaan ini semakin besar kecepatan motor arus searah maka tegangan keluaran juga akan semakin besar. Pada variasi pembebanan, pada keadaan motor tidak berbeban memiliki kecepatan putar yang lebih besar dibandingkan dengan saat motor keadaan berbeban.

3.6.3. Pengaruh variasi *duty cycle* terhadap torsi motor arus searah saat keadaan tidak berbeban dan berbeban

Pada pengujian ini dilakukan perhitungan nilai torsi pada motor arus searah dengan menggunakan Persamaan 4 [16] dengan menggunakan data yang telah diukur.

$$\tau = \frac{P \times 9,55}{n} \tag{4}$$

Dimana:

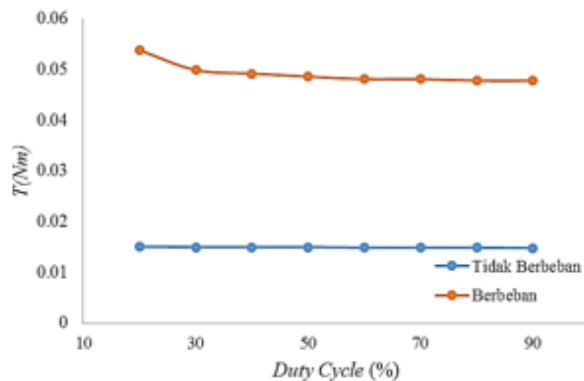
- P = Daya arus searah (watt)
- n = Kecepatan motor (rpm)

Dari Persamaan 4 Torsi dapat dihitung dan dibuat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan torsi saat motor arus searah keadaan berbeban dan tidak berbeban terhadap variasi *duty cycle*

D (%)	Tidak Berbeban			Berbeban		
	P _{out} (watt)	n (rpm)	T (Nm)	P _{out} (watt)	N (rpm)	T (Nm)
20	4,16	2689	0,0151	8,01	1421	0,0538
30	4,24	2712	0,0150	10,16	2028	0,0499
40	4,23	2715	0,0150	10,22	2039	0,0492
50	4,26	2724	0,0150	10,55	2047	0,0486
60	4,29	2726	0,0149	10,74	2055	0,0481
70	4,35	2770	0,0149	11,11	2185	0,0481
80	4,36	2779	0,0149	11,60	2355	0,0478
90	4,43	2812	0,0148	12,04	2389	0,0478

Dari Tabel 4 Menunjukkan hubungan hubungan variasi *duty cycle* dengan torsi motor arus searah. Untuk mempermudah analisis dibuat grafik pada Gambar 19.



Gambar 19. Grafik hubungan torsi motor arus searah saat keadaan tidak berbeban dan berbeban pada variasi *duty cycle*

Dari grafik menunjukkan hubungan variasi *duty cycle* dengan torsi saat motor arus searah keadaan tidak berbeban dan berbeban adalah berbanding terbalik. Semakin besar nilai variasi *duty cycle* maka torsi motor arus searah akan semakin kecil. Pada variasi pembebanan saat *duty cycle* yang sama, saat keadaan motor tidak berbeban memiliki torsi yang lebih kecil dibandingkan dengan saat keadaan motor berbeban. Hal ini sesuai dengan Persamaan 4.

3.7. Efisiensi Rangkaian ZCS Buck Converter

3.7.1. Efisiensi rangkaian ZCS Buck Converter dengan beban resistor

Efisiensi rangkaian diketahui dari perbandingan perhitungan daya masuk dengan daya yang keluar dari rangkaian ZCS Buck Converter. Efisiensi ini saat rangkaian ZCS Buck Converter diuji saat diberi beban resistor. Efisiensi dapat dihitung dengan Persamaan 5 [16].

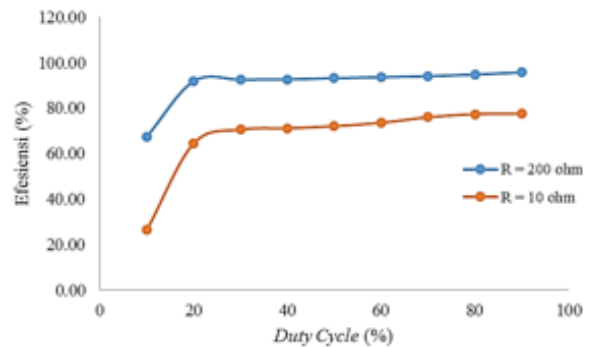
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

Dari Persamaan 5 efisiensi rangkaian ZCS Buck Converter dapat dihitung dan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan efisiensi rangkaian ZCS Buck Converter saat diberi beban resistor

D (%)	Resistor 200 Ω			Resistor 10 Ω		
	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η (%)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η (%)
10	3,54	2,39	67,48	6,13	1,62	26,41
20	4,83	4,43	91,86	14,34	9,25	64,50
30	4,87	4,51	92,57	18,41	13,73	70,56
40	4,87	4,51	92,65	19,21	14,25	71,15
50	4,86	4,53	93,21	20,73	14,94	72,06
60	4,85	4,54	93,63	25,93	17,79	73,59
70	4,93	4,68	94,04	36,43	27,68	75,99
80	5,06	4,76	94,80	39,70	30,80	77,41
90	5,03	4,81	95,74	43,28	33,51	77,58

Dari data hasil perhitungan efisiensi pada Tabel 5 dapat dibuat grafik hubungan antara *duty cycle* dengan efisiensi seperti Gambar 20.



Gambar 20. Grafik hubungan *duty cycle* dengan efisiensi Rangkaian ZCS Buck Converter saat beban resistor

Dari grafik memperlihatkan bahwa nilai efisiensi akan mengalami kenaikan ketika nilai variasi *duty cycle* dinaikkan. Untuk variasi beban resistor yang diuji efisiensi akan mengalami peningkatan seiring dengan semakin besarnya beban yang digunakan [7].

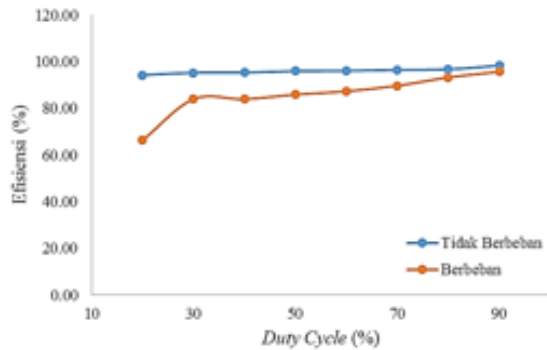
3.7.2. Efisiensi rangkaian ZCS Buck Converter Saat mencatu motor arus searah keadaan tidak berbeban dan berbeban.

Efisiensi didapatkan saat rangkaian ZCS Buck Converter dicatu daya dengan motor arus searah saat keadaan motor arus searah tidak berbeban dan berbeban. Efisiensi dapat dihitung dengan Persamaan 5 dan disajikan dalam bentuk Tabel 6.

Tabel 6. Hasil perhitungan efisiensi rangkain ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah keadaan tidak berbeban dan berbeban.

D (%)	Tidak Berbeban			Berbeban		
	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
20	4,41	4,16	94,32	12,07	8,01	66,35
30	4,41	4,24	95,31	12,10	10,16	83,98
40	4,44	4,23	95,38	12,16	10,22	84,00
50	4,44	4,26	96,01	12,27	10,55	85,95
60	4,50	4,29	96,12	12,29	10,74	87,34
70	4,50	4,35	96,49	12,38	11,11	89,75
80	4,52	4,36	96,77	12,44	11,60	93,29
90	4,51	4,43	98,39	12,57	12,04	95,72

Dari data hasil perhitungan efisiensi pada Tabel 5 dapat dibuat grafik hubungan antara *duty cycle* dengan efisiensi seperti Gambar 21.



Gambar 21. grafik hubungan *duty cycle* dengan efisiensi Rangkain ZCS Buck Converter saat motor keadaan tidak berbeban dan berbeban

Dari grafik menunjukkan bahwa nilai efisiensi rangkain ZCS Buck Converter akan mengalami kenaikan ketika nilai variasi *duty cycle* dinaikkan. Untuk variasi pembebanan dengan nilai *duty cycle* yang sama, efisiensi rangkain ZCS Buck Converter pada saat keadaan motor tidak berbeban lebih besar dibandingkan saat keadaan motor berbeban.

4. Kesimpulan

Pengaplikasian DC – DC Converter jenis ZCS Buck Converter telah berhasil dibuat untuk catu daya motor arus searah. Saat pengujian pensaklaran ZCS Buck Converter beroperasi pada saat arus nol baik ketika diuji dengan beban resistor dan untuk catu daya motor arus searah keadaan tidak berbeban dan berbeban. Saat pengujian ZCS Buck Converter dengan beban resistor, hubungan tegangan dan arus keluaran dengan variasi *duty cycle* adalah berbanding lurus. Semakin besar variasi *duty cycle* maka tegangan dan arus keluaran juga akan semakin besar. Untuk variasi beban resistor dengan *duty cycle* yang sama, semakin besar nilai beban resistor

maka semakin besar nilai tegangan keluaran dan berbanding terbalik dengan arus keluaran. Pada saat pengujian ZCS Buck Converter untuk catu daya motor arus searah, gelombang arus keluaran dari DC-DC Converter tidak rata yang disebabkan karena adanya arus balik di armature motor. Hubungan tegangan dan arus keluaran ZCS Buck Converter saat mencatu daya motor arus searah saat keadaan tidak berbeban dan berbeban adalah berbanding lurus. Pada variasi pembebanan dengan *duty cycle* yang sama, saat keadaan tidak berbeban memiliki tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan keadaan berbeban dan berbanding terbalik dengan arus. Hubungan variasi *duty cycle* dengan kecepatan motor arus searah, semakin besar nilai variasi *duty cycle* maka kecepatan motor arus searah juga akan semakin besar. Saat variasi pembebanan, kecepatan motor arus searah saat keadaan tidak berbeban lebih cepat dibandingkan dengan saat berbeban. Hubungan torsi dengan variasi *duty cycle*, semakin besar variasi *duty cycle* maka torsi akan semakin kecil. Pada perhitungan efisiensi rangkain ZCS Buck Converter dengan diberi beban resistor, efisiensi akan mengalami peningkatan seiring dengan semakin besarnya beban resistor yang digunakan. Saat pengujian rangkain ZCS Buck Converter untuk catu daya motor arus searah, pada saat motor keadaan tidak berbeban rangkain ZCS Buck Converter memiliki efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan saat motor berbeban.

Referensi

- [1] M. El Sharkawi, "Fundamentals of Electric Drives." Brooks/Cole Publishing Company, 2000.
- [2] P. Tawakal, A. Nugroho, and M. Facta, "Penyearah Terkontrol Penggerak Motor Arus Searah Pada Purwarupa Konveyor," *Transient*, vol. 5, no. 3, pp. 389–394, 2016.
- [3] B. Suhardianto, M. Facta, and A. Nugroho, "Pembuatan DC-DC Konverter 300 Volt Jenis Buck," *Transient*, vol. 4, no. 2, pp. 296–303, 2015.
- [4] C. Ibrahim, T. Sukmadi, and A. Nugroho, "Perancangan Pengontrolan Motor DC Menggunakan DC – DC Konverter Class C Mode Motoring Dan Regenerative Breaking Untuk Simulasi Kendaraan Listrik," *Transient*, vol. 5, no. 3, pp. 338–344, 2016.
- [5] P. Margayu, A. Nugroho, and M. Facta, "Catu Daya Arus Searah Terkontrol Jenis Buck Converter Untuk Pemisah Magnetik Dalam Konveyor," *Transient*, vol. 5, no. 3, pp. 299–307, 2016.
- [6] M. I. Romadhon, T. Andromeda, and M. Facta, "Konverter Arus Searah Ke Arus Searah Tipe Penaik Tegangan Dengan dan Tanpa Mosfet Sinkronisasi," *Transmisi*, vol. 18, no. 3, pp. 101–107, 2016.
- [7] R. Marsal, M. Facta, and Karnoto, "Perancangan DC-DC Converter buck Quasi Resonant Dengan Mode Pensaklaran Zero Current Switching (ZCS) Dan Zero Voltage Switching (ZVS)," *Transient*, vol. 3, no. 3, pp. 294–300, 2014.
- [8] Daniel W.Hart, *Power Electronics*, 1st ed. Indiana, United States: McGraw-Hill Companies, 2011.

- [9] C. T. Tsai and W. M. Chen, "Buck Converter with With Soft-Switching Cells For PV Panel Applications," *Eenergies*, vol. 9, 2016.
- [10] N. P. Mosfet, N. High, and P. Products, "IRF460 Series IRF460 Series," pp. 1–7.
- [11] M. H.Rashid, *Power Electronics*, 3rd ed. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2011.
- [12] .M.K Kazimierczuk and D. Czarkowski, *Resonant Power Converters*, 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [13] S. T. Data, "MUR420 and MUR460," *Motorola*, pp. 1–6, 1996.
- [14] Fairchild Semiconductor, "LM78XX Fixed Voltage Regulator," p. 6, 1999.
- [15] P. . Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, Second. New york: John Wiley & Sons, 1996.
- [16] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, Fifth. New Jersey: Prentice Hall, 2002.