

PERANCANGAN RANGKAIAN *H-BRIDGE CHOPPER* UNTUK SIMULASI KENDARAAN LISTRIK DENGAN PEMICUAN PWM ANALOG DAN DIGITAL

Meicky Ari Wibowo^{*)}, Agung Warsito, and Tejo Sukmadi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

^{*)}Email :meickyariwibowo@gmail.com

Abstrak

Konverter DC-DC atau DC Chopper adalah aplikasi dari rangkaian elektronika daya. Salah satu tipe dari DC Chopper yaitu H-Bridge Chopper. H-Bridge Chopper dapat di aplikasikan pada kendaraan listrik karena dapat bekerja secara bidirectional pada arus maupun tegangan kerjanya. Kendaraan listrik membutuhkan rangkaian kendali (controller) yang digunakan untuk mengontrol kecepatan kendaraan listrik. Pada penelitian tugas akhir ini telah dirancang konverter DC-DC untuk simulasi kendaraan listrik bertopologi H-Bridge Chopper menggunakan controller pembangkitan PWM analog dan digital. Penelitian ini membahas mengenai kuadran kerja dari H-Bridge Chopper dan membahas metode pembangkitan sinyal pemicuan PWM menggunakan controller analog dengan berbasis IC TL 494 dan controller digital dengan berbasis mikrokontroler ATmega8535. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan kontrol PWM digital dengan duty cycle maksimal 80% di dapatkan efisiensi sebesar 89,67% pada mode forward motoring dan saat mode reverse motoring dengan hasil 79,41% serta dapat menghasilkan tegangan charging sebesar 9,12 V. Pada pengujian menggunakan kontrol PWM analog dengan duty cycle maksimal 80% didapatkan efisiensi sebesar 87,49% pada mode forward motoring, 80,5% pada mode reverse motoring serta dapat menghasilkan tegangan charging sebesar 9,07 V.

Kata kunci: Kendaraan listrik, H-Bridge Chopper, Rangkaian Kontrol PWM

Abstract

DC-DC Converter or DC Chopper is one of application from power electronic circuit. H-Bridge Chopper is a variant of DC chopper. H-Bridge Chopper can be applied to electric vehicle because it can work bidirectional in current and voltage. H-Bridge Chopper need PWM generation controller to control the magnitude output voltage. The final project has been designed a simulation module of electric vehicles used H-Bridge Chopper topology with analog and digital PWM generation controller. This research was discussed the work quadrant of the H-Bridge Chopper and the comparison between the generation of PWM signals used analog controller with IC TL 494 and digital controller with microcontroller ATmega8535. Based on the experimental result, a digital PWM control with maximum duty cycle 80% got the efficiency of 89.67% in the forward motoring mode, 79.41% in reverse motoring mode and produced charging voltage of 9,12V. When used an analog PWM control with maximum duty cycle 80% got the maximum efficiency of 87,49% in the forward motoring mode, 80,5% in reverse motoring mode and produced charging voltage of 9,07A.

Keywords: Electric vehicle, the H-Bridge Chopper, PWM generation controller

1. Pendahuluan

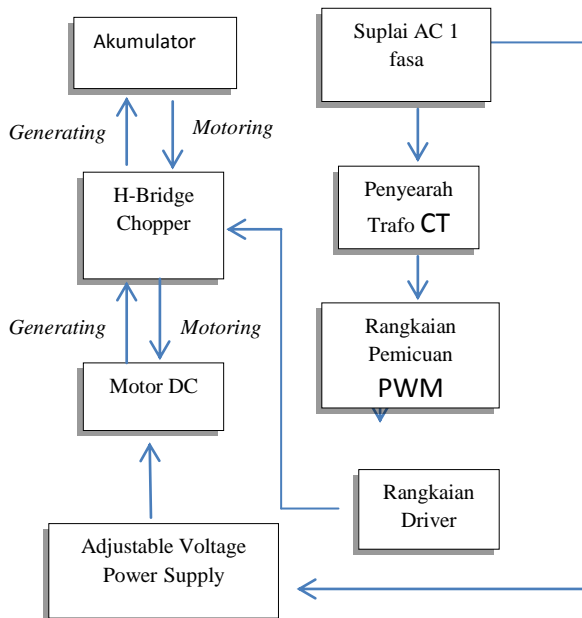
Konverter DC-DC atau DC *Chopper* adalah aplikasi dari rangkaian elektronika daya. DC *Chopper* sering digunakan sebagai regulator tegangan. Untuk menurunkan nilai tegangan DC maupun menaikkan nilai tegangan DC, sesuai dengan tipenya. Salah satu tipe dari DC *Chopper* yaitu *H-Bridge Chopper*. *H-Bridge Chopper* merupakan DC *Chopper* yang dapat bekerja secara *bidirectional* pada arus maupun tegangan kerjanya atau memiliki 4 kuadran

kerja, sehingga dapat di aplikasikan pada kendaraan listrik. Kendaraan listrik (*electric vehicle*) adalah kendaraan yang menggunakan satu atau lebih motor listrik sebagai tenaga penggerakannya. Secara umum kendaraan listrik (*electric vehicle*) terdapat beberapa komponen utama yaitu baterai (akumulator), motor listrik, rangkaian kendali (*controller*) dan rangkaian elektronika daya (converter/inverter). Kendaraan listrik (*electric vehicle*) membutuhkan rangkaian kendali (*controller*) yang digunakan untuk mengatur kecepatan dari kendaraan

listrik. Pada tugas akhir ini telah dirancang konverter DC-DC berbasis rangkaian *H-Bridge Chopper* dengan menggunakan controller pemucuan PWM analog dan digital untuk simulasi kendaraan listrik. Penelitian membahas mengenai kinerja dari rangkaian *H-Bridge Chopper* dengan beban motor listrik DC magnet permanen dan membahas pemucuan PWM menggunakan *controller* analog dengan IC TL 494 dan *controller* digital dengan mikrokontroler ATmega8535.

2. Metode

Perancangan tugas akhir ini terdiri dari rangkaian penyearah (*rectifier*) trafo CT, *Adjustable voltage power supply*, rangkaian *H-Bridge Chopper*, rangkaian kontrol PWM (Mikrokontroler ATmega8535 dan IC TL 494), rangkaian driver dan isolator pulsa (TLP 250 dan Rangkaian Totempole), Akumulator dan motor DC.

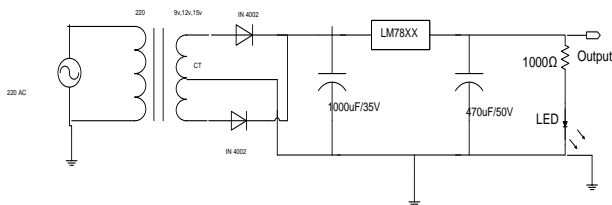


Gambar 1. Blok diagram perancangan alat

2.1. Perancangan Rangkaian Kontrol

2.1.1. Perancangan Penyearah Gelombang Penuh Satu Fasa dengan *Center Tap*

Pada rangkaian ini terdapat 2 penyearah satu fasa dengan CT, dioda, regulator tegangan, kapasitor, resistor dan LED seperti yang tertera pada Gambar 2.

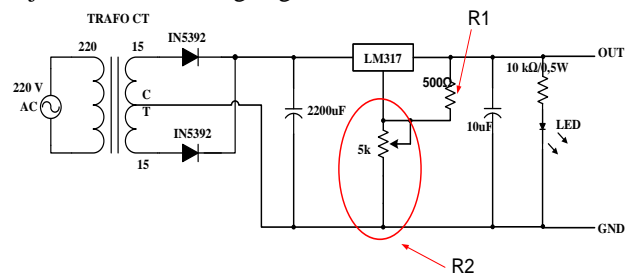


Gambar 2. Penyearah gelombang penuh satu fasa CT.

Rangkaian ini menghasilkan sumber tegangan DC 9V, 12V dan 15V. Tegangan 9V berfungsi sebagai suplai untuk rangkaian mikrokontroler, 12V untuk suplai rangkaian pemucuan PWM analog IC TL 494 dan rangkaian driver totem-pole transistor sedangkan tegangan 15V berfungsi sebagai *supply* rangkaian driver TLP250.

2.1.2. Adjustable Voltage Power Supply

Rangkaian *adjustable voltage power supply* merupakan rangkaian *power supply* dengan tegangan keluaran searah/DC (*Direct Current*) yang dapat diatur besarnya melalui nilai potensiometer yang terletak di antara kaki adjust IC LM317 dengan ground.



Gambar 3. Penyearah *adjustable voltage power supply*.

Rangkaian ini digunakan untuk menyuplai salah satu motor DC sebagai penggerak beban motor DC yang terhubung pada rangkaian *H-Bridge Chopper* yang bertujuan untuk simulasi saat kendaraan berada pada jalan yang menurun atau pada saat mode *generating*. Nilai tegangan keluaran dapat dihitung menggunakan Persamaan (1)^[2]

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (1)$$

Dengan V_{ref} adalah 1,25V didapat^[2]

$$V_{out}(\min) = 1,25 \times \left(1 + \frac{0}{220} \right)$$

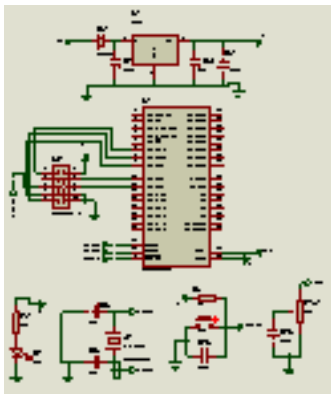
$$= 1,25V$$

$$V_{out}(\max) = 1,25 \times \left(1 + \frac{5000}{220} \right)$$

$$= 13,75V$$

2.1.3. Mikrokontroler ATmega8535

Sistem minimum mikrokontroler adalah sebuah rangkaian elektronika sederhana yang terdiri dari komponen-komponen dasar yang dibutuhkan oleh sebuah mikrokontroler agar IC mikrokontroler ATmega8535 dapat berfungsi dengan baik. Komponen dasar yang dibutuhkan antara lain adalah rangkaian *power supply*, rangkaian sumber clock, dan rangkaian RESET.



Gambar 4. Sistem minimum mikrokontroler ATmega8535

Nilai frekuensi sinyal pemicuan PWM secara digital yang dapat dibangkitkan Timer1 pada mikrokontroler ATmega8535 dapat dihitung menggunakan persamaan (2)

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk}}{2 \times N \times TOP} \quad (2)$$

Dengan menggunakan nilai $Xtal$ 4059200Hz dan N (faktor *prescaler*) 1 didapat

$$f_{PWM} = \frac{4059200}{2 \times 1 \times 256} = 7928Hz$$

2.1.4. Liquid Cristal Display dan Keypad

Liquid Crystal Display/LCD merupakan suatu media untuk menampilkan informasi dalam bentuk tulisan atau grafik secara visual. LCD 16x2 ini hanya dapat menampilkan karakter sebanyak 16 karakter pada baris 1 dan 2. Keypad yang digunakan yaitu keypad 4x4 sebagai *input* nilai PWM

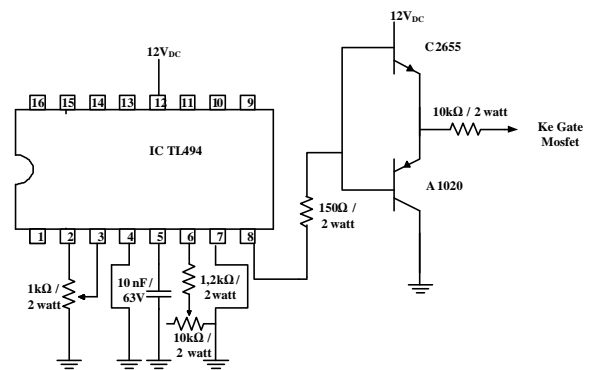
Tampilan LCD akan menampilkan PWM dan timer



Gambar 5. Tampilan PWM dan Timer pada pemicuan PWM digital

2.1.5. Pemicuan PWM Analog (IC TL494)

Rangkaian PWM H-Bridge Chopper menggunakan IC TL494.

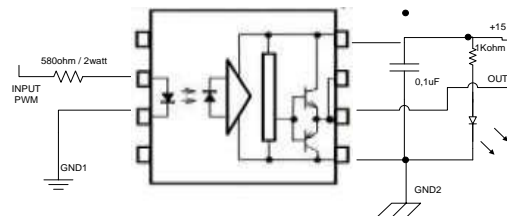


Gambar 6. Rangkaian Pemicuan PWM Analog (IC TL494)

Keluaran IC TL494 dihubungkan dengan rangkaian totempole untuk memperkuat sinyal PWM yang dihasilkan lalu dihubungkan ke gate MOSFET

2.1.5. Rangkaian Driver Rangkaian TLP250

Rangkaian TLP 250 digunakan untuk mengisolasi dan menguatkan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) level tegangan 5volt yang dibangkitkan mikrokontroler menjadi level tegangan yang lebih tinggi dengan sistem ground terpisah (level tegangan 15v) dan cukup untuk memicu MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).



Gambar 7. Rangkaian TLP250

2.2. Perancangan Rangkaian Daya

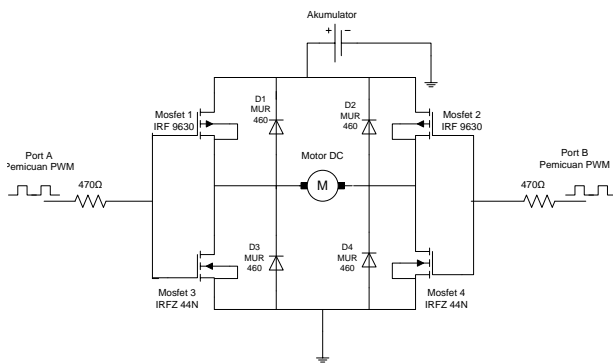
2.2.1. Perancangan Supply Daya H-Bridge Chopper

Dalam perancangan rangkaian supply utama saat mode *motoring* dibutuhkan sumber tegangan DC yang berasal dari akumulator 12V serta battery 9V pada saat mode *generating*.

2.2.2. H-Bridge Chopper

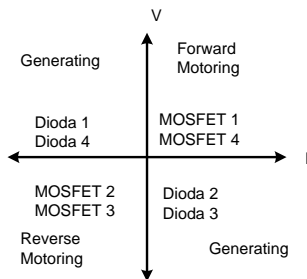
DC Chopper yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *H-Bridge Chopper*. Chopper tipe *H-Bridge* yang mempunyai karakteristik tegangan keluaran lebih kecil dari tegangan masukan dan mempunyai 4 kuadran kerja. Spesifikasi H-Bridge Chopper adalah sebagai berikut :

- Tegangan masukan : 12 Vdc
- Tegangan keluaran : 12 Vdc
- Frekuensi *Switchin* : 7,9-9,2 kHz
- Beban : Motor DC



Gambar 8. Rangkaian H-Bridge Chopper

Pada gambar 8 terlihat GATE MOSFET 1 dan MOSFET 3 terhubung menjadi satu begitu pula GATE MOSFET 2 dan MOSFET 4. Hal ini bertujuan menyederhanakan port pemecuan menjadi 2 port saja yang bekerja bergantian yang diatur oleh switch (saklar) karena kedua MOSFET mempunyai karakteristik tegangan *gate* yang sama. Serta dapat menghindari MOSFET 1 dan 3 tidak bekerja secara bersama karena dapat menyebabkan hubung singkat (*short circuit*), hal yang sama juga di lakukan pada MOSFET 2 dan 4.

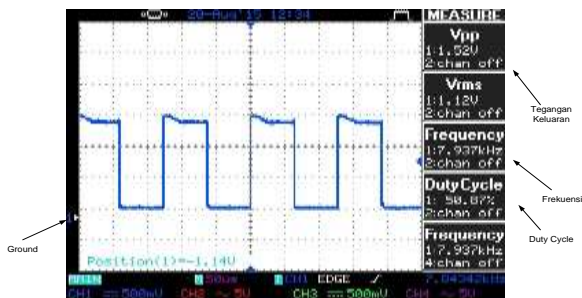


Gambar 9. Kuadran kerja Rangkaian H-Bridge Chopper

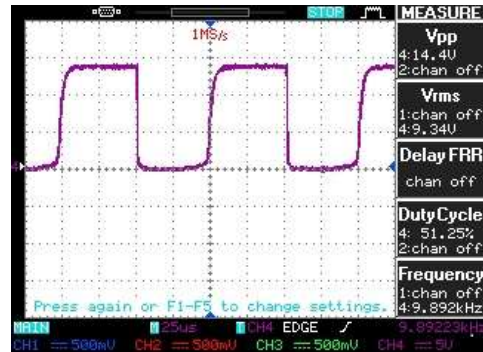
3. Hasil dan Analisa

3.1. Pengujian Rangkaian Kontrol

Pengujian rangkaian kontrol meliputi pengujian keluaran gelombang PWM ATmega8535 (digital) dan IC TL494(Analog).



Gambar 10. Sinyal PWM ATmega8535 probe x10



Gambar 11. Sinyal PWM IC TL494 probe x1

Gambar 10 dan 11 menunjukkan gelombang keluaran PWM digital dan analog dapat diketahui tegangan maksimal sudah di atas tegangan kerja MOSFET (*gate source voltage /V_{GS}*) yaitu 4 Volt. Ini sudah cukup untuk memicu MOSFET bekerja.

3.2. Pengujian H-Bridge Chopper

3.2.1. Pemicuan PWM Digital (Mode Motoring)

Pengujian yang dilakukan pada mode ini yaitu mengukur tegangan keluaran, arus keluaran, tegangan masukan, arus masukan dan kecepatan putar menggunakan tachometer dengan variasi *duty H-Bridge Chopper* saat bekerja pada mode motoring baik saat putaran maju (*forward*) dan mundur (*reverse*).

Hasil pengujian *H-Bridge Chopper* pada mode motoring forward dapat disajikan dalam bentuk tabel seperti terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 1. Pengujian H-Bridge Chopper mode motoring maju (forward) pemicuan PWM Digital

No	Duty Cycle (%)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _o (V)	I _o (A)	N (Rpm)
1	10	10,7	0,1	0,77	0,1	0
2	20	10,49	0,15	1,85	0,23	112
3	30	10,37	0,18	2,94	0,24	347,2
4	40	10,25	0,23	4	0,25	493,6
5	50	10,16	0,28	5,01	0,28	694,2
6	60	10,12	0,31	6,06	0,32	786,4
7	70	10,03	0,32	7,05	0,36	886,4
8	80	10,05	0,36	8,16	0,39	1025
9	90	10,07	0,4	8,81	0,41	1272

Tabel 2. Pengujian H-Bridge Chopper mode motoring maju (forward) pemicuan PWM Analog

No	Duty Cycle (%)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _o (V)	I _o (A)	N (Rpm)
1	10,91	9,92	0,08	0,59	0,06	0
2	20,6	9,08	0,1	1,09	0,17	85
3	29,75	8,6	0,14	1,93	0,24	326,7
4	41,63	7,71	0,17	2,54	0,26	357,9
5	50,4	7,53	0,19	3,08	0,27	428,7
6	61,4	6,98	0,22	3,57	0,28	587,6
7	70,3	6,67	0,26	4,68	0,29	708,4
8	85,6	6	0,26	5,13	0,29	987,2

Berdasarkan Tabel 1 dan 2 terlihat bahwa pada kenaikan duty cycle mempengaruhi nilai dari tegangan dan arus keluaran konverter *H-Bridge Chopper* serta putaran motor DC. Hal tersebut juga berlaku pada data pengujian mode motoring mundur (*reverse*) yang akan di tampilkan pada Tabel 3 dan 4 sebagai berikut :

Tabel 3. Pengujian H-Bridge Chopper mode motoring mundur (reverse) pemucuan PWM Digital

No	Duty Cycle (%)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _o (V)	I _o (A)	N (Rpm)
1	10	10,75	0,14	-0,063	-0,05	0
2	20	10,43	0,2	-1,33	-0,23	30
3	30	10,33	0,24	-2,64	-0,25	182
4	40	10,12	0,26	-3,68	-0,27	215,7
5	50	9,95	0,27	-4,54	-0,29	414,2
6	60	9,78	0,28	-5,6	-0,32	613,6
7	70	9,52	0,3	-6,1	-0,33	788,9
8	80	8,79	0,35	-6,98	-0,35	827,6
9	90	8,5	0,36	-7,26	-0,36	957,3

Tabel 4. Pengujian H-Bridge Chopper mode motoring mundur (reverse) pemucuan PWM Analog

No	Duty Cycle (%)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _o (V)	I _o (A)	N (Rpm)
1	9,73	9,76	0,09	-0,42	-0,07	0
2	20,3	9,05	0,1	-1,02	-0,21	24
3	29,87	7,99	0,16	-1,39	-0,23	162,4
4	41,63	7,84	0,17	-2,5	-0,24	198,7
5	50,4	7,35	0,19	-2,98	-0,25	386,8
6	61,91	6,99	0,21	-3,74	-0,27	450,6
7	70,3	6,67	0,25	-4,61	-0,26	656,9
8	80,3	6	0,26	-5,68	-0,26	734,8

Berdasarkan hasil pengujian di atas terlihat bahwa pada kenaikan duty cycle mempengaruhi nilai dari tegangan dan arus keluaran konverter *H-Bridge Chopper*. Hal ini sesuai dengan teori pada persamaan (3):

$$V_o = V_i \cdot D \tag{3}$$

dimana:

V_o = tegangan output

V_i = tegangan input

D = duty cycle

Artinya apabila tegangan input mendekati konstan, maka tegangan output akan meningkat proporsional terhadap kenaikan *duty cycle*

3.2.2. Perhitungan Efisiensi H-Bridge Chopper PWM Digital

Berdasarkan hasil pengujian pada mode motoring dapat dilakukan perhitungan efisiensi *H-Bridge Chopper* , dengan menggunakan Persamaan (4).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{4}$$

Dimana:

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in}$$

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out}$$

Hasil perhitungan efisiensi pada percobaan mode motoring maju (*forward*) pada pemucuan PWM Digital untuk percobaan dengan variasi *duty cycle* yang lain dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah ini:

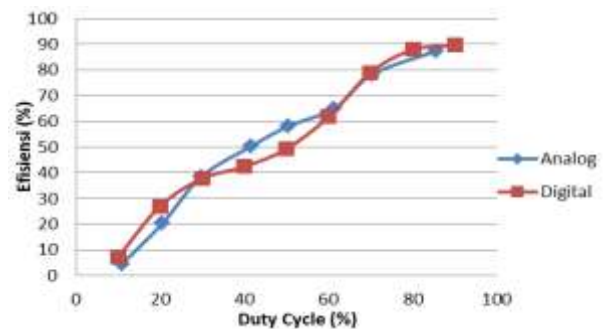
Tabel 5. Perhitungan efisiensi H-bridge chopper mode motoring forward pemucuan digital

No	Duty Cycle (%)	Pin (W)	Pout (W)	Efisiensi (%)
1	10	1,07	0,077	7,20
2	20	1,5735	0,4255	27,04
3	30	1,8666	0,7056	37,80
4	40	2,3575	1	42,42
5	50	2,8448	1,4028	49,31
6	60	3,1372	1,9392	61,81
7	70	3,2096	2,538	79,08
8	80	3,618	3,1824	87,96
9	90	4,028	3,6121	89,67

Begitu juga hasil perhitungan efisiensi pada percobaan mode motoring mundur (*reverse*) pada pemucuan PWM Digital untuk percobaan dengan variasi *duty cycle* yang lain dapat dilihat pada Tabel 4 di bawah ini:

Tabel 6. Perhitungan efisiensi H-bridge chopper mode motoring reverse pemucuan digital

No	Duty Cycle (%)	Pin (W)	Pout (W)	Efisiensi (%)
1	10	1,505	0,00315	0,21
2	20	2,086	0,3059	14,66
3	30	2,4792	0,66	26,62
4	40	2,6312	0,9936	37,76
5	50	2,6865	1,3166	49,01
6	60	2,7384	1,792	65,44
7	70	2,856	2,013	70,48
8	80	3,0765	2,443	79,41
9	90	3,06	2,6136	85,41



Gambar 12. Grafik perbandingan efisiensi PWM Analog dan Digital mode Forward Motoring

Berdasarkan Gambar 12 terlihat bahwa kurva efisiensi *H-Bridge Chopper* pada mode motoring yaitu proporsional terhadap *duty cycle* efisiensi terbaik didapat dari pengujian *duty cycle* 0,9 yaitu sebesar 89,67 % pada mode *forward motoring* dan sebesar 85,41 % pada mode *reverse motoring*.

3.2.3. Perhitungan Efisiensi H-Bridge Chopper Pemicuan PWM Analog

Hasil perhitungan efisiensi pada percobaan mode motoring maju (*forward*) pada pemicuan PWM Analog untuk percobaan dengan variasi *duty cycle* yang lain dapat dilihat pada Tabel 7 di bawah ini:

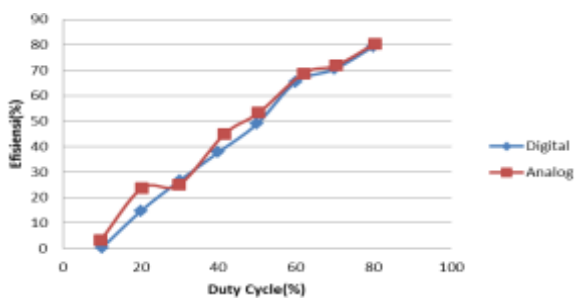
Tabel 7. Perhitungan efisiensi mode motoring forward pemicuan PWM analog

No	Duty Cycle (%)	Pin (W)	Pout (W)	Efisiensi (%)
1	10,91	0,7936	0,0354	4,46
2	20,6	0,908	0,1853	20,40
3	29,75	1,204	0,4632	38,47
4	41,63	1,3107	0,6604	50,38
5	50,4	1,4307	0,8316	58,12
6	61,4	1,5356	0,9996	65,09
7	70,3	1,7342	1,3572	78,26
8	80,3	1,7004	1,4877	87,49

Begitu juga hasil perhitungan efisiensi pada percobaan mode motoring mundur (*reverse*) pada pemicuan PWM Digital untuk percobaan dengan variasi *duty cycle* yang lain dapat dilihat pada Tabel 8 di bawah ini:

Tabel 8. Perhitungan efisiensi mode motoring reverse pemicuan PWM analog

No	Duty Cycle (%)	Pin (W)	Pout (W)	Efisiensi (%)
1	9,73	0,8784	0,0294	3,34
2	20,3	0,905	0,2142	23,66
3	29,87	1,2784	0,3197	25,00
4	41,63	1,3328	0,6	45,01
5	50,4	1,3965	0,745	53,34
6	61,91	1,4679	1,0098	68,79
7	70,3	1,6675	1,1986	71,88
8	80,3	1,56	1,3468	80,5



Gambar 13. Grafik perbandingan efisiensi PWM analog dan digital mode reverse motoring

Berdasarkan Gambar 13 terlihat bahwa kurva efisiensi *H-Bridge Chopper* pada mode motoring yaitu proporsional terhadap *duty cycle* yang digunakan. Semakin besar *duty cycle* semakin tinggi efisiensi *H-Bridge Chopper*, oleh karena itu efisiensi terbaik didapat dari pengujian *duty cycle* 0,80 yaitu sebesar 87,49% pada mode *forward motoring* dan 80,5 % pada mode reverse motoring.

3.2.4. Pengujian Mode Generating

Penyearah *Adjustable Voltage Power Supply*. pengujian juga menggunakan variasi *duty cycle*. digunakan untuk membuktikan kinerja rangkaian *H-Bridge Chopper* dapat mengalirkan arus *charging* saat simulasi kendaraan berjalan pada jalan turunan.

Hasil pengujian generating *H-Bridge Chopper* ditampilkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 9. Pengujian H-Bridge Chopper mode generating pemicuan PWM Digital

No	Duty Cycle (%)	V _{in LM 317} (V)	V _{Charging} (V)	I _{Charging} (V)	N (Rpm)
1	80	8,63	7,82	-0,03	773
2	80	9,41	8	-0,03	884
3	80	10	8,25	-0,04	989
4	80	10,57	8,41	-0,04	1045
5	80	11,04	8,8	-0,05	1195
6	80	11,59	8,9	-0,08	1220
7	80	12,15	9	-0,11	1431
8	80	12,83	9,12	-0,13	1686

Tabel 10. Pengujian H-Bridge Chopper mode generating pemicuan PWM Analog

No	Duty cycle (%)	V _{LM317} (V)	V _{Charging} (V)	I _{Charging} (A)
1	80	9,18	7,9	-0,01
2	80	9,68	8	-0,03
3	80	10,59	8,04	-0,03
4	80	10,83	8,29	-0,04
5	80	11,75	8,61	-0,08
6	80	12,29	8,85	-0,1
7	80	12,54	9,07	-0,12
8	80	11,75	8,61	-0,08

Efisiensi terbaik pada pemicuan PWM digital didapat dari pengujian *duty cycle* 0,8 yaitu sebesar 14,43% pada pemicuan PWM analog didapat dari pengujian *duty cycle* 0,8 diperoleh nilai efisiensi yaitu sebesar 12,76 %.

4. Kesimpulan

Perancangan, pengujian dan analisa Modul Praktikum *H-Bridge Chopper* Dengan Pemicuan PWM Analog dan Digital Untuk Simulasi Kendaraan Listrik (*Electric Vehicle*), maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Rangkaian *H-Bridge Chopper* dapat melakukan kuadran kerja motoring yaitu mode maju (*forward*) dan mundur (*reverse*) serta dapat melakukan kuadran kerja *generating* saat simulasi kendaraan pada jalan turunan.
2. Efisiensi dari Rangkaian *H-Bridge Chopper* berbanding lurus terhadap *duty cycle*. Semakin besar nilai *duty cycle* maka akan semakin besar pula tegangan keluaran dan arus keluaran rangkaian *H-Bridge Chopper* serta putaran motor DC.

3. Pembangkitan PWM Digital pada mikrokontroler ATmega8535 dilakukan dengan mode yang dapat diatur seperti *fast PWM* dan *fast correct PWM* sedangkan pembangkitan PWM analog pada IC TL494 dilakukan dengan membandingkan gelombang gigi gergaji sebagai tegangan *carrier* dengan gelombang DC sebagai tegangan referensi .
4. Pada pengujian menggunakan kontrol PWM digital dengan range *duty cycle* 10-80% di dapatkan efisiensi maksimal yaitu sebesar 89,67% pada mode *forward motoring* pada tegangan 8,16 V dan arus 0,39 A dan sebesar 79,41 % pada tegangan -7,26 V dan arus -0,36 A saat mode *reverse motoring*. Serta dapat menghasilkan tegangan charging maksimal sebesar 9,12 V dan arus *charging* sebesar -0,13 A.
5. Pada pengujian menggunakan kontrol PWM Analog dengan range *duty cycle* 10-80% di dapatkan efisiensi maksimal yaitu sebesar 87,49% pada mode *forward motoring* pada tegangan 5,13 V dan arus 0,29 A dan 80,5% tegangan -5,68 V dan arus -0,26 A pada mode *reverse motoring* serta dapat menghasilkan tegangan charging maksimal sebesar 9,07 V arus *charging* sebesar -0,12 A.

Referensi

- [1]. Anair, Don. Mahmassani, Amine. "Electric Vehicle Global Warming Emissions and Fuel-Cost Savings across the United States". Union of Concerned Scientists, 2012.
- [2]. Archer, Greg. Fergusson, Malcom, "Electric Vehicles in 2013: a Progress Report", Transport And Environment, 2014.
- [3]. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, "Freedom car and vehicle technologies program", U.S. Departement of Energy, 2003
- [4]. Global EV Outlook, "Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020", Clean Energy Ministerial, 2013.
- [5]. Y.Kwe, W.Caisheng, W.Le Yi, S.Kai, "Electric Vehicle Battery Technologies", Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, 2013
- [6]. Sustainable Energy Authority of ireland , "A Guide to Electrical Vehicle", SEAI ireland
- [7]. Mckinsey & Company, "Electric Vehicle in Europe", Amsterdam Roundtable Foundation, 2014
- [8]. Mansour, Amari., Faouzi, Bacha., Jamel, Ghouili., Ismahen, Elgharbi. "Design and analysis of a high frequency DC-DC converters for fuel cell and super-capacitor used in electrical vehicle", Unite´ de Recherche en Automatique et en Informatique Industrielle (URAI), Universite´ de Tunis, Montfleury, Tunis 1008, Tunisia, 2013
- [9]. Asachi, George. "Four-Quadrant Full-Bridge Choppers PWM Controlled With Bipolar Voltage Switching". Technical University of Iasi, Power Electronics Laboratory, 2008.
- [10]. F.Nemry, G.Leduc, A.Munoz. "State of the Research and Development and Comparative Analysis of Energy and Cost Efficiency", Institute for Prospective Technological Studies, 2009.
- [11]. J.Larminie dan J.Lowry, "Electric Vehicle Technology Explained", John Wiley&Sons, Ltd.England, 2003
- [12]. Rashid, M, "Power Electronics Circuit, Device, and Application 2nd", Prentice-Hall International Inc, 1988.
- [13]. Gunawan, Putu Nopa, "Penyearah dan Filter".Teknik Elektro Universitas Hasanudin.2012
- [14]. Texas Instruments. "TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits Datasheet".2002
- [15]. Atmel Corporation. "8-bit AVR Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash ATmega8535/8535L (Summary)". (www.atmel.com). Datasheet, 2006.
- [16]. Atmel Corporation. "8-bit AVR Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash ATmega8535/8535L (8-bit Timer/Counter0 with PWM)". (www.atmel.com). Datasheet, 2006.
- [17]. Toshiba Photocoupler GaAlAs IRED+Photo IC. TLP250, Sheet No: DIN-EN60747-5-2. Jan. (2007).
- [18]. Maulana, Eka."Teori Dasar Mosfet", Universitas Brawijaya,2014.
- [19]. Wildi, Theodore."Electrical Machines, Drives, and Power Systems Fifth Edition", Pearson Education Inc, 2002
- [20]. NewTec Display Corporation,Ltd. "16x2 Character LCD Module". Module No:NC1602B-serise.
- [21]. M. U. Nasih, "Prototipe Alat Pengaman Kendaraan Bermotor Menggunakan Password Dan Sms Berbasis Mikrokontroler At89s52," Teknik Informatika STMIK EL RAHMA, 2013.
- [22]. National Semiconductor. "LM 78XX Voltage Regulator series Datasheet", 2006
- [23]. Texas Instruments. "IC LM317 Datasheet", 2004