

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS

5.1 Pengujian Tegangan Keluaran Mesin

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai *back emf* terhadap kecepatan. Kemudian fungsi ini akan digunakan untuk melakukan perhitungan secara teori dan simulasi. Perhitungan ini dilakukan untuk memeriksa kinerja sistem apakah sudah sesuai dengan yang direncanakan.

Pengujian ini dilakukan dengan cara memutar mesin arus searah tanpa sikat tanpa beban pada kecepatan bervariasi guna mendapatkan nilai tegangan keluaran dan frekuensi mesin (Arizky E H, 2015, p. 47). Kemudian dengan perhitungan, kecepatan linier ban yang dipasang pada mesin arus searah tanpa sikat dapat dicari melalui

$$v = 0.0006 \cdot \pi \cdot D \cdot n \dots\dots\dots (5-1)$$

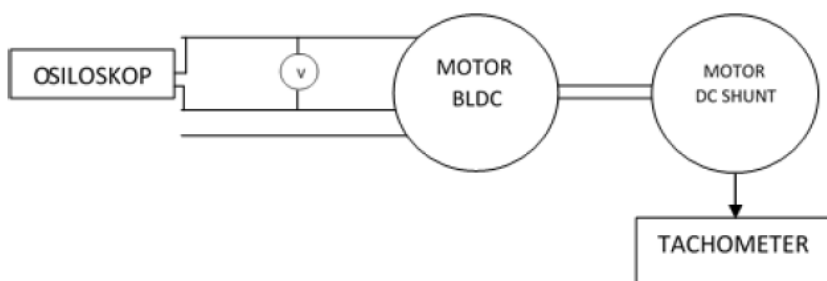
dengan:

- v = Kecepatan linier mobil (km/jam)
- D = Diameter luar ban mobil (cm)
- n = Putaran rotor BLDC (rpm)

Selain itu Pengujian ini juga difungsikan untuk menentukan konstanta elektrik mesin, konstanta elektrik ini nantinya digunakan untuk mengetahui persamaan torsi terhadap arus jangkar motor.

$$K_e = \frac{V_{emf, L-L}}{rpm} \dots\dots\dots (5-2)$$

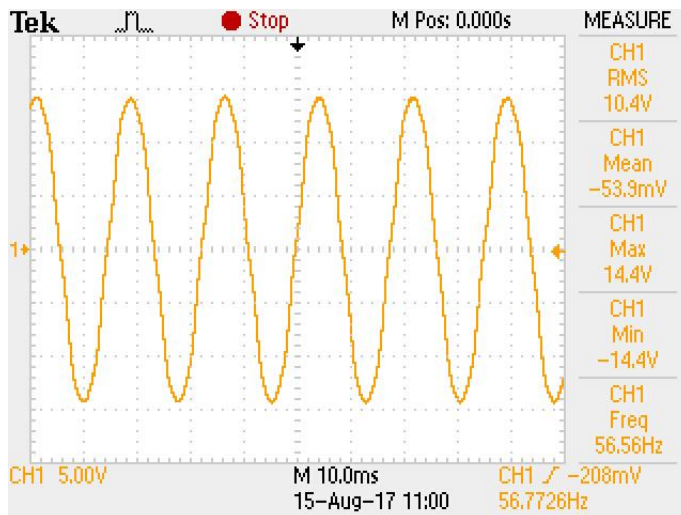
Peralatan yang digunakan dalam pengujian adalah 1 (satu) buah voltmeter digital, osiloskop digital, *tachometer*, motor DC *shunt*, dan motor BLDC. Konfigurasi rangkaian percobaan seperti terlihat pada gambar



Gambar 5.1 Rangkaian pengujian *back emf* BLDC motor

Tabel 5.1 Pengujian mesin arus searah tanpa sikat berbeban lampu pijar 100 W resistansi lampu 38,5 Ohm

Kecepatan rotor Motor Shunt (rpm)	Kecepatan rotor BLDC (rpm)	V_{ORMS} (V,L-L) (V)	V_{ORMS} (V,L-N) (V)	f (Hz)	V linier (km/h)	Konstanta Elektrik (Ke)	Arus Beban Lampu 100W (A)	Vin Motor (V)	I in Motor (A)
532,0	493,77	5,95	3,44	33,33	6,2173	0,012050	0,075	27,5	1,350
908,3	843,03	10,30	5,95	56,56	10,6151	0,012218	0,095	47,5	1,030
1366,0	1267,84	15,13	8,74	82,92	15,9651	0,011934	0,110	120,0	0,850
1822,0	1691,08	20,22	11,67	111,10	21,2932	0,011957	0,125	180,0	0,975
2221,0	2061,41	25,16	14,53	138,10	25,9562	0,012205	0,135	240,0	1,220



Gambar 5.2 gelombang tegangan *line to line* keluaran mesin arus searah
 Beban: $38,5 \Omega$, $V_{line\ to\ line} = 10,3V$

Maka konstanta elektrik rata-rata didapatkan

$$K_e = 0,012073$$

Dengan demikian maka hubungan $V_{emf,L-L}$ terhadap K_e adalah

$$V_{emf,L-L} = K_e \cdot nr \dots\dots\dots (5-3)$$

Persamaan terhadap torsi elektromagnetik terhadap arus jangkar dapat diturunkan sebagai berikut:

$$T_{em} = \frac{\sqrt{3}V_{emf,L-L}I_a}{\omega_r} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,012073 \cdot nr \cdot I_a}{2\pi \frac{nr}{60}}$$

Dengan demikian didapatkan persamaan torsi sebagai fungsi arus jangkar:

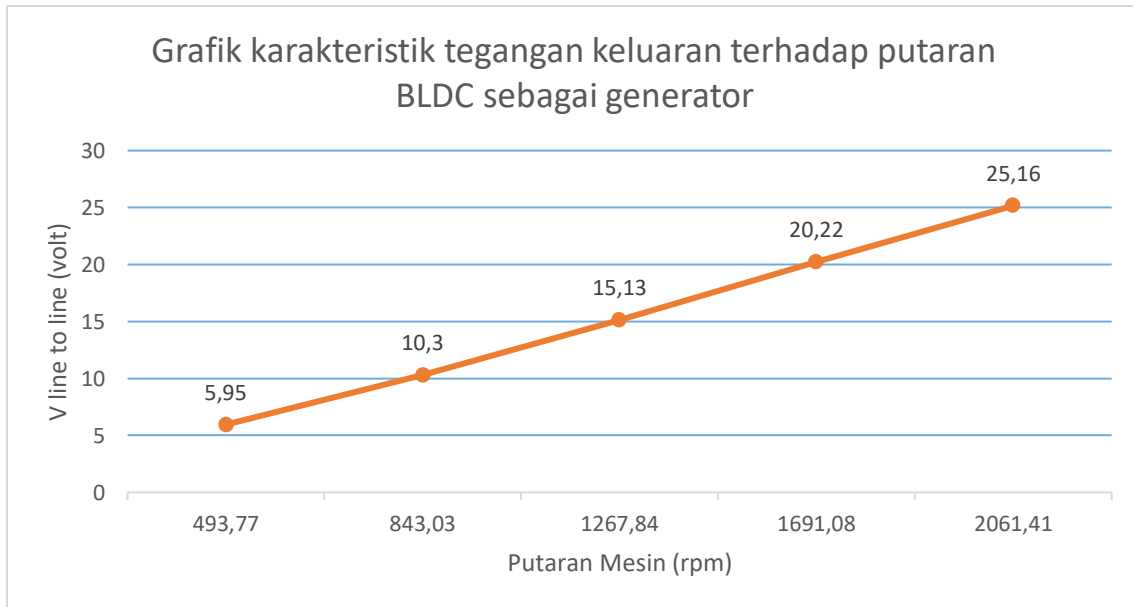
$$T_{em} = 0,1997 I_a \dots\dots\dots (5-4)$$

dengan:

$$I_a = \text{Arus jangkar motor (A)}$$

$$T_{em} = \text{Torsi elektromagnetik motor (Nm)}$$

Gambar kurva karakteristik *back emf* terhadap putaran motor ditunjukkan pada gambar



Gambar 5.3 Grafik karakteristik tegangan keluaran terhadap putaran rotor mesin arus searah tanpa sikat berbeban lampu pijar 100W

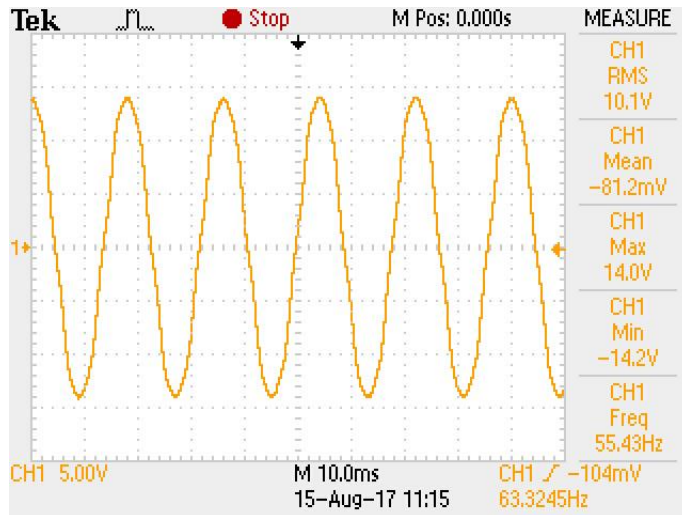
Jika pada pengujian ini dihitung nilai efisiensi BLDC sebagai generator terhadap catu daya motor DC shunt sebagai *prime mover* dari generator, bisa dilihat pada tabel berikut

Tabel 5.2 Tabel efisiensi pengujian berbeban *back emf* BLDC dioperasikan sebagai generator

V_{in} (V)	I_{in} (A)	S_{in} (VA)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	S_{out} (VA)	Efisiensi	Efisiensi (%)
27,5	1,350	37,125	5,95	0,075	0,4462	0,0120	1,2020
47,5	1,030	48,925	10,30	0,095	0,9785	0,0200	2,0000
120,0	0,850	102,000	15,13	0,110	1,6643	0,0163	1,6317
180,0	0,975	175,500	20,22	0,125	2,5275	0,0144	1,4402
240,0	1,220	292,800	25,16	0,135	3,3966	0,0116	1,1600
					Ef rata2	0,14868	1,48678

Tabel 5.3 Pengujian mesin arus searah tanpa sikat tanpa beban

Kecepatan rotor Motor Shunt (rpm)	Kecepatan rotor BLDC (rpm)	V_{ORMS} (V,L-L) (V)	V_{ORMS} (V,L-N) (V)	f (Hz)	Vlinier (km/h)	Konstanta Elektrik (Ke)	Vin Motor (V)	Iin Motor (A)
524,5	486,81	5,88	3,39	32,09	6,1297	0,012079	27,5	1,400
833,2	773,33	10,13	5,85	55,43	9,7374	0,013099	47,5	1,000
1332,0	1236,29	15,14	8,74	82,96	15,5667	0,012246	115,0	0,825
1785,0	1656,74	20,19	11,66	110,00	20,8608	0,012187	180,0	1,000
2215,0	2055,84	25,17	14,53	137,90	25,8861	0,012243	239,0	1,200



Gambar 5.4 Gambar gelombang tegangan *line to line* keluaran mesin arus searah tanpa beban, $V_{line\ to\ line} = 10,13\ V$

Maka konstanta elektrik rata-rata didapatkan

$$K_e = 0,012371$$

Dengan demikian maka hubungan $V_{emf,L-L}$ terhadap K_e adalah

$$V_{emf,L-L} = K_e \cdot nr \dots\dots\dots(5-5)$$

Persamaan terhadap torsi elektromagnetik terhadap arus jangkar dapat diturunkan sebagai

berikut:
$$T_{em} = \frac{\sqrt{3}V_{emf,L-L}I_a}{\omega r} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,012371 \cdot nr \cdot I_a}{2\pi \frac{nr}{60}}$$

Dengan demikian didapatkan persamaan torsi sebagai fungsi arus jangkar:

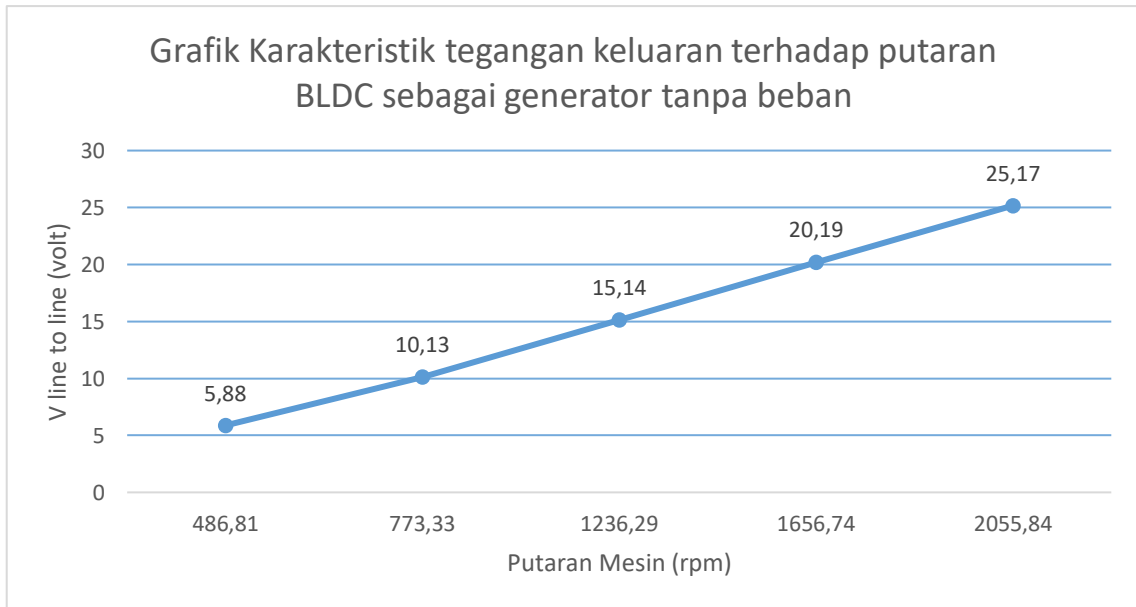
$$T_{em} = 0,2046 I_a \dots\dots\dots(5-6)$$

dengan:

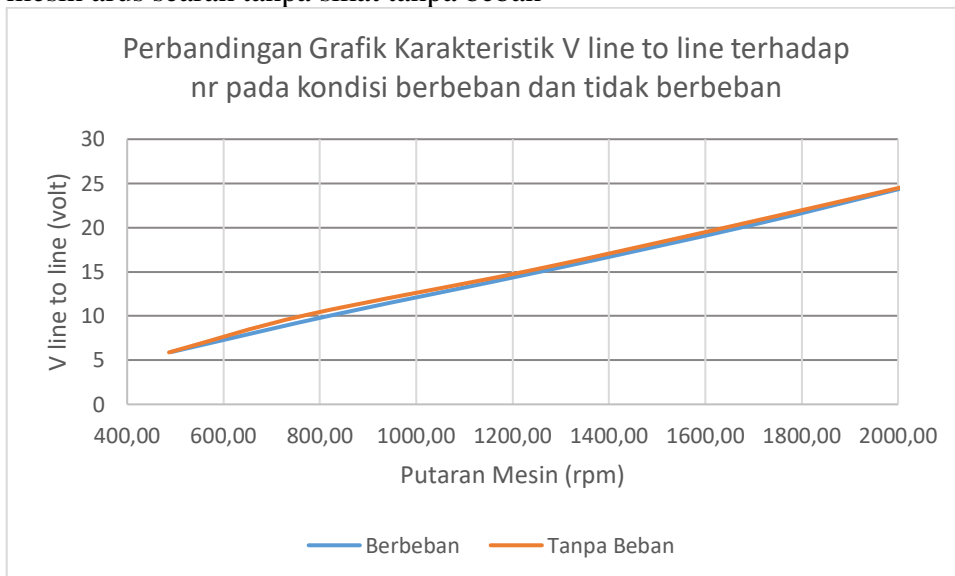
I_a = Arus jangkar motor (A)

T_{em} = Torsi elektromagnetik motor (Nm)

Gambar kurva karakteristik *back emf* terhadap putaran motor ditunjukkan pada gambar



Gambar 5.5 Grafik karakteristik tegangan keluaran terhadap putaran rotor mesin arus searah tanpa sikat tanpa beban



Gambar 5.6 Perbandingan $V_{line\ to\ line}$ pada kondisi berbeban dan tidak berbeban

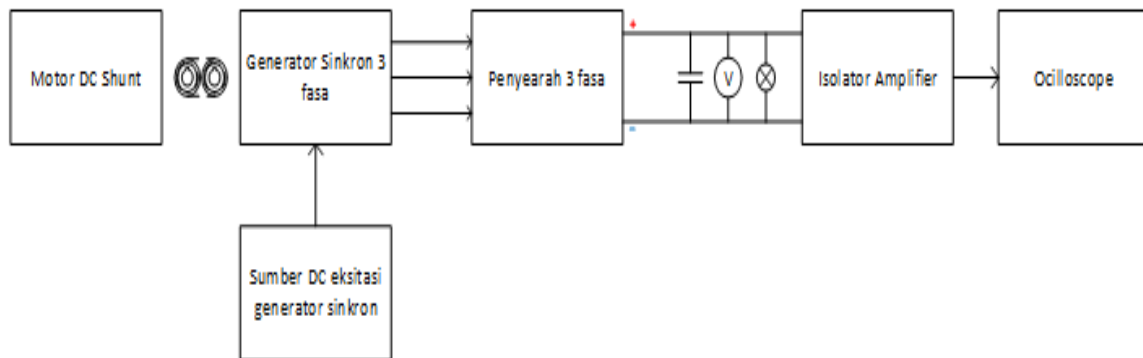
Pada grafik perbandingan diatas dapat disimpulkan bahwa data hasil pengujian *back emf line to line* pada kondisi berbeban maupun tidak berbeban terlihat ada perbedaan yang sangat kecil pada seluruh putarannya, perbedaan paling tinggi berada pada putaran sekitar 800 rpm. Perbedaan ini terjadi akibat pembebanan itu sendiri dan juga rugi alat ukur dan reinitansi dalam BLDC itu sendiri, namun perbedaan ini sangat kecil sehingga bisa diabaikan.

5.2 Pengujian Penyearah 3 Fasa Tak Terkontrol

Pada pengujian penyearah 3 fasa tak terkontrol ini bertujuan untuk mengetahui besar tegangan keluaran yang didapat dari proses penyearahan tegangan AC menjadi

tegangan DC murni tentunya dengan bantuan kapasitor perata. Keluaran tegangan penyearah ini nantinya akan digunakan sebagai masukan dari *buck-boost converter*.

Peralatan yang digunakan untuk pengujian ini antara lain rangkaian penyearah 3 fasa tak terkontrol, generator sinkron yang sudah dikopel dengan motor DC *shunt* sehingga diharapkan menyerupai BLDC dioperasikan sebagai generator, kapasitor perata 14,2 mF/150V, beban lampu 100 W/ 39,5 Ω , *isolation amplifier* dan *oscilloscope*.

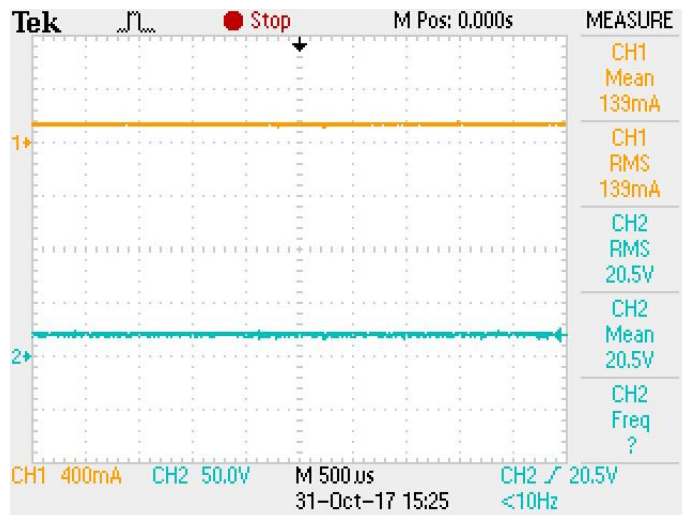


Gambar 5.7 Pengujian penyearah gelombang penuh 3 fasa

Hasil pengujian dari rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa pada tabel dibawah ini

Tabel 5.4 Hasil pengujian penyearah 3 fasa

Vin motor kopel (DC) (volt)	V eksitasi DC (volt rms)	Vin L-N (volt)	Vout rec (volt)	Iout (A)	Nr gen sinkron (rpm)	Frekuensi teg penyearah CD800A (Hz)	Perhitungan Manual	Eff (%)
90,6	6	10	3,00	0,05	2242	224,0	23,9	12,55230
90,5	12	20	10,12	0,10	2152	219,4	47,8	21,17155
90,5	18	30	25,32	0,13	2030	213,1	71,7	35,31381
122,6	18	40	27,25	0,14	2818	281,5	95,6	28,50418
122,6	22	50	42,00	0,17	2679	271,0	119,5	35,14644
122,6	27	60	59,20	0,21	2503	260,4	143,4	41,28312
137,0	30	70	70,90	0,22	2753	276,3	167,3	42,37896



Gambar 5.8 Gambar gelombang tegangan keluaran penyearah (biru) gelombang arus (oranye) pada saat $V_{\text{gen sinkron}} = 10 \text{ V}$

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa semakin besar putaran generator sinkron maka semakin besar pula tegangan keluaran penyearah 3 fasa yang dihasilkan. Efisiensi pada pengujian penyearah ini termasuk kecil dikarenakan pengujian dilakukan pada kondisi berbeban dan banyak bagian-bagian yang tidak ideal seperti generator sinkron 3 fasa, jika dilakukan pada sumber tegangan jala-jala sebesar 4 V maka didapat efisiensi 92 % dari perhitungan secara teori. Gambar gelombang tegangan penyearah 3 fasa (biru) tampak sudah menunjukkan hasil DC murni dikarenakan adanya kapasitor perata, ini terjadi pada frekuensi 37,5 Hz sehingga bisa disimpulkan bahwa kapasitor perata ini masih efektif sampai frekuensi sekian.

5.3 Pengujian Sensor Arus

Pengujian sensor arus bertujuan untuk mengkalibrasi nilai pembacaan sensor dengan nilai pembacaan multimeter pada *power supply* sehingga diperoleh hasil pembacaan yang sebenarnya. Kalibrasi disini bertujuan untuk menyamakan hasil pembacaan sensor ACS712 dengan pembacaan pada multimeter pada *power supply*.

5.3.1 Peralatan

Peralatan yang diperlukan dalam pengujian sensor arus ini adalah

1. Laptop
2. Arduino
3. DC *Power Supply* dengan indikator arus dan tegangan
4. ACS712
5. Kabel penghubung sesuai kebutuhan

5.3.2 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Membuat *listing* program untuk membaca analog *read* pada Arduino.
2. Hubungkan keluaran sensor arus ACS712 pada pin VCC ke 5V Arduino, pin GDN pada GND Arduino dan pin *out* ke analog A1 Arduino
3. Masukkan sumber dari *power supply* ke kaki *input* ACS712
4. Hubungkan kabel USB Arduino untuk melihat nilai ADC pada *serial monitor* di laptop kita
5. Catat hasil pembacaan ADC ACS712 dari *serial monitor* tiap kenaikan 0,1 A

5.3.3 Hasil Pengujian

Dari pengujian diatas didapatkan hasil pengujian sebagai berikut.

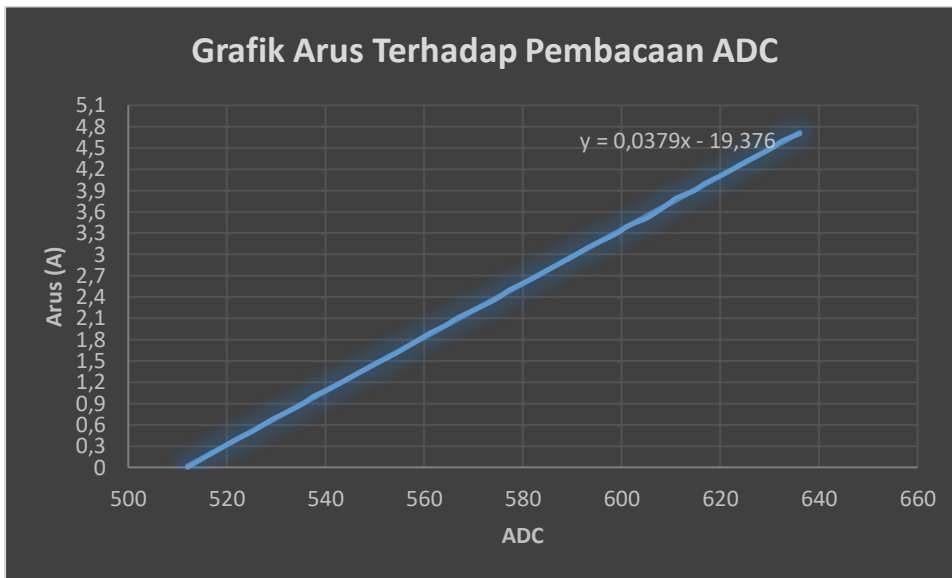
Tabel 5.5 Hasil pembacaan ADC ACS712

Arus (A)	Nilai ADC Arduino 10 bit (0-1023)
0,0	512,0
0,1	514,5
0,2	517,0
0,3	519,5
0,4	522,0
0,5	525,0
0,6	527,3
0,7	529,8
0,8	532,8
0,9	535,5
1,0	537,5
1,1	540,5
1,2	543,3
1,3	545,8
1,4	548,5
1,5	551,2
1,6	554,1
1,7	556,5
1,8	558,9
1,9	561,3
2,0	564,3

2,1	566,5
2,2	569,5
2,3	572,6
2,4	575,3
2,5	577,2
2,6	580,2
2,7	583,0
2,8	585,5
2,9	588,2
3,0	590,8
3,1	593,2
3,2	596,2
3,3	599,2
3,4	601,2
3,5	604,8
3,6	607,2
3,7	609,2
3,8	611,2
3,9	614,8
4,0	616,8
4,1	619,8
4,2	622,5
4,3	625,0
4,4	627,8
4,5	630,5
4,6	632,5
4,7	636,1

Tabel 5.5 menunjukkan hasil pembacaan nilai ADC dari sensor arus ACS712 setelah ditambahkan R C *low pass filter* untuk membuat keluaran bersih dari *noise*. Nilai adc yang dicatat merupakan nilai yang paling sering keluar saat pembacaan adc di *serial monitor*. Untuk mengkonversi nilai adc pada tiap pembacaan maka akan digunakan

metode regresi linier yang dilakukan dengan menggunakan *Microsoft office excel* dengan metode *trendline*.



Gambar 5.9 Grafik hasil regresi linier sensor arus

Grafik ini kemudian diregresi dengan menggunakan metode *trendline* sehingga didapatkan persamaan garis lurus nya. Setelah didapatkan persamaannya, maka dilakukan pengalihan pada program Arduino dengan persamaan pada grafik diatas sehingga yang akan ditampilkan nantinya langsung dikonversi menjadi nilai arus. Kemudian dilakukan perbandingan pembacaan sensor arus terhadap nilai multimeter sehingga didapatkan presentase kesalahan pembacaan.

Tabel 5.6 Tabel hasil pembacaan sensor beserta kesalahan pembacaannya

Arus (A)	Pembacaan (A)	Kesalahan (%)
0,0	-0,01	1%
0,1	0,10	0%
0,2	0,18	10%
0,3	0,29	3%
0,4	0,41	-2%
0,5	0,48	4%
0,6	0,60	0%
0,7	0,67	4%
0,8	0,79	1%
0,9	0,86	4%
1,0	0,98	2%
1,1	1,09	1%
1,2	1,17	3%

1,3	1,28	2%
1,4	1,39	1%
1,5	1,47	2%
1,6	1,55	3%
1,7	1,66	2%
1,8	1,77	2%
1,9	1,85	3%
2,0	1,96	2%
2,1	2,04	3%
2,2	2,19	0%
2,3	2,26	2%
2,4	2,34	3%
2,5	2,45	2%
2,6	2,57	1%
2,7	2,64	2%
2,8	2,76	1%
2,9	2,87	1%
3	2,99	0%
3,1	3,06	1%
3,2	3,14	2%
3,3	3,25	2%
3,4	3,36	1%
3,5	3,44	2%
3,6	3,55	1%
3,7	3,63	2%
3,8	3,74	2%
3,9	3,86	1%
4	3,93	2%
4,1	4,05	1%
4,2	4,12	2%
4,3	4,24	1%
4,4	4,31	2%
4,5	4,43	2%

4,6	4,54	1%
4,7	4,61	2%

Tabel 5.6 menampilkan hasil pembacaan tiap sensor disertai dengan kesalahan pembacaannya. Kesalahan pembacaan didapatkan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap pembacaan multimeter pada *power supply*. Kesalahan pembacaan masing-masing pengukuran relatif kecil, kesalahan pengukuran tertinggi terjadi pada pembacaan arus 0,2 A yaitu sebesar 10%.

5.3.4 Analisis Hasil Pengujian

Hasil pembacaan nilai ADC sensor arus ACS712 dipergunakan untuk melakukan perhitungan regresi linier, pada sensor ini didapatkan persamaan:

$$y = 0,0379x - 19,376 \dots\dots\dots(5-7)$$

dimana x = nilai adc

y = arus pada multimeter dc *power supply* (A)

Berdasarkan hasil pengujian sensor arus didapatkan nilai kesalahan pembacaan sensor sesuai dengan Tabel 5.6. Karena hasil pembacaan arus oleh sensor mendekati nilai aslinya maka kalibrasi sensor telah sesuai.

5.4 Pengujian Buck – Boost Converter dengan Supercapacitor 22V/1F

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon *supercapacitor* terhadap *charging* dari *buck – boost converter* sehingga diketahui berapa lama kapasitor akan penuh dengan sumber tegangan tertentu dan *dutycycle* tertentu.

5.4.1 Pengujian pada Periode Charging 1 Menit

Pada pengujian ini dilakukan dengan durasi 1 menit dengan sumber masukan tegangan DC sebesar 12 V konstan, *dutycycle* berubah dari 0,3 – 0,5, maka akan dicatat berapa perubahan tegangan kapasitor yang terjadi pada tiap 10 detik. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik tegangan kapasitor terhadap waktu.

5.4.1.1 Peralatan yang Dibutuhkan

Peralatan yang digunakan pada pengujian ini adalah:

1. DC *power supply*
2. *Buck – boost converter*
3. *Supercapacitor 22V/1F*
4. *Driver picu gate* dan Arduino
5. Kabel secukupnya dan *oscilloscope 4 channel*.

6. *Stopwatch* smartphone
7. *Probe* arus
8. Multimeter

5.4.1.2 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Membuat *listing* program *pwm* pada Arduino.
2. Hubungkan *input buck – boost converter* pada *dc power supply*, gunakan *supercapacitor* pada kapasitor *buck - boost converter*.
3. Hubungkan *output supercapacitor* ke *channel 4 oscilloscope*, V_{GS} ke *channel 1* untuk mengetahui *duty*, $V_{induktor}$ ke *channel 2* untuk mengetahui karakteristik *charging* dan *discharging* induktor, *probe* arus dipasangkan seri dengan induktor *buck - boost converter* untuk mengetahui arus yang mengalir pada induktor.
4. Pasang multimeter pada *supercapacitor*.
5. Hubungkan kabel USB Arduino ke PC untuk mengatur *dutycycle*.
6. Catat nilai tegangan *supercapacitor* pada tiap 10 detik selama 1 menit

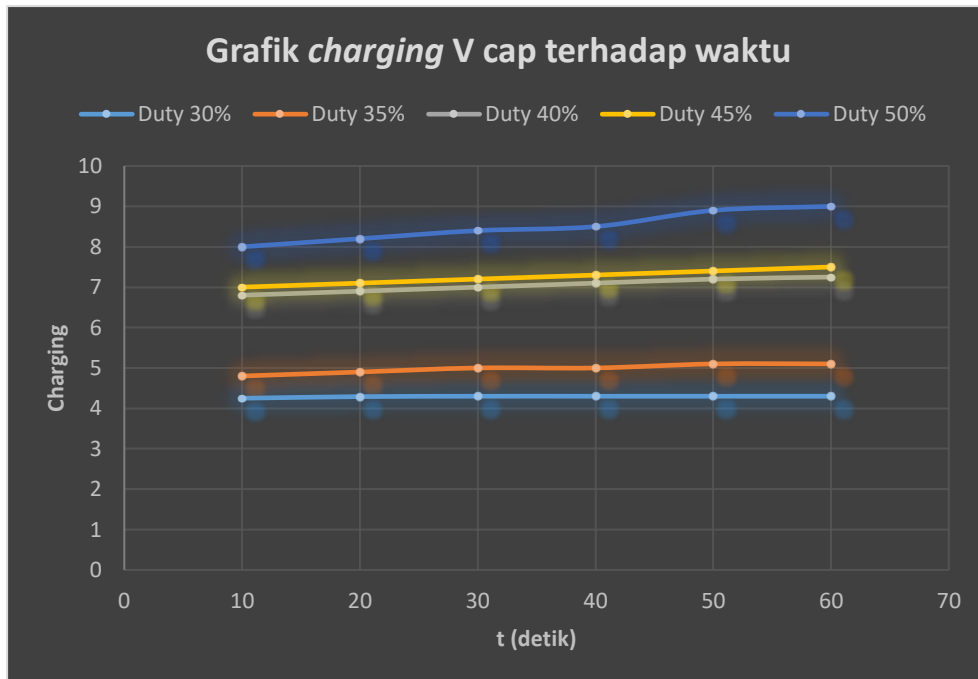
5.4.1.3 Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian diatas didapat hasil sebagai berikut:

Tabel 5.7 hasil pengujian *charging* selama 1 menit

DETIK (s)	Vc saat Duty (V)				
	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %
10	4,25	4,8	6,80	7,0	8,0
20	4,29	4,9	6,90	7,1	8,2
30	4,30	5,0	7,00	7,2	8,4
40	4,30	5,0	7,10	7,3	8,5
50	4,30	5,1	7,20	7,4	8,9
60	4,30	5,1	7,25	7,5	9,0

Tabel 5.7 menunjukkan hasil pengujian *charging supercapacitor* dengan durasi 1 menit, pada tabel diatas terlihat bahwa semakin besar *dutycycle* maka akan semakin besar pula tegangan kapasitor pada tiap sampelnya.



Gambar 5.10 Gambar charging supercapacitor terhadap waktu



Gambar 5.11 Gambar gelombang tegangan keluaran berturut turut V_{gs} , $V_{induktor}$, V_{cap} , I_{ind} pada duty 35%

5.4.1.4 Analisis Hasil Pengujian

Pada pengereman sebenarnya durasi yang terjadi mungkin hanya akan berlangsung beberapa detik saja, sehingga pada kejadian ini *supercapacitor* tetap aman namun untuk menghindari adanya tegangan keluaran melebihi tegangan *supercapacitor* maka akan dipasang sensor tegangan, sehingga proses *charging* bisa dihentikan apabila *supercapacitor* sudah penuh.

5.4.2 Pengujian pada Durasi 15 Menit dengan Sampel Tiap 1 Menit

Pada pengujian ini dilakukan dengan durasi 15 menit dengan sumber masukan tegangan DC sebesar 12V konstan, *dutycycle* berubah dari 0,3 – 0,5, maka akan dicatat berapa perubahan tegangan kapasitor yang terjadi pada tiap 1 menit. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik tegangan kapasitor terhadap waktu.

5.4.2.1 Peralatan yang Dibutuhkan

Peralatan yang digunakan pada pengujian ini adalah

1. DC *power supply*
2. *Buck – boost converter*
3. *Supercapacitor 22V/1F*
4. *Driver picu gate* dan Arduino
5. Kabel secukupnya dan *oscilloscope 4 channel*.
6. *Stopwatch smartphone*
7. *Probe arus*.
8. Multimeter.

5.4.2.2 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Membuat *listing* program *pwm* pada Arduino.
2. Hubungkan *input buck – boost converter* pada dc *power supply*, gunakan *supercapacitor* pada *buck - boost converter*.
3. Hubungkan *output supercapacitor* ke *channel 4 oscilloscope*, V_{GS} ke *channel 1* untuk mengetahui *dutycycle*, $V_{induktor}$ ke *channel 2* untuk mengetahui karakteristik *charging* dan *discharging* induktor, *probe arus* dipasangkan seri dengan induktor *buck-boost converter* untuk mengetahui arus yang mengalir pada induktor.
4. Pasang multimeter pada *supercapacitor*.
5. Hubungkan kabel USB Arduino ke PC untuk mengatur *dutycycle*.
6. Catat nilai tegangan *supercapacitor* pada tiap 1 menit sampai sekiranya kapasitor penuh atau sudah minimum perubahan.

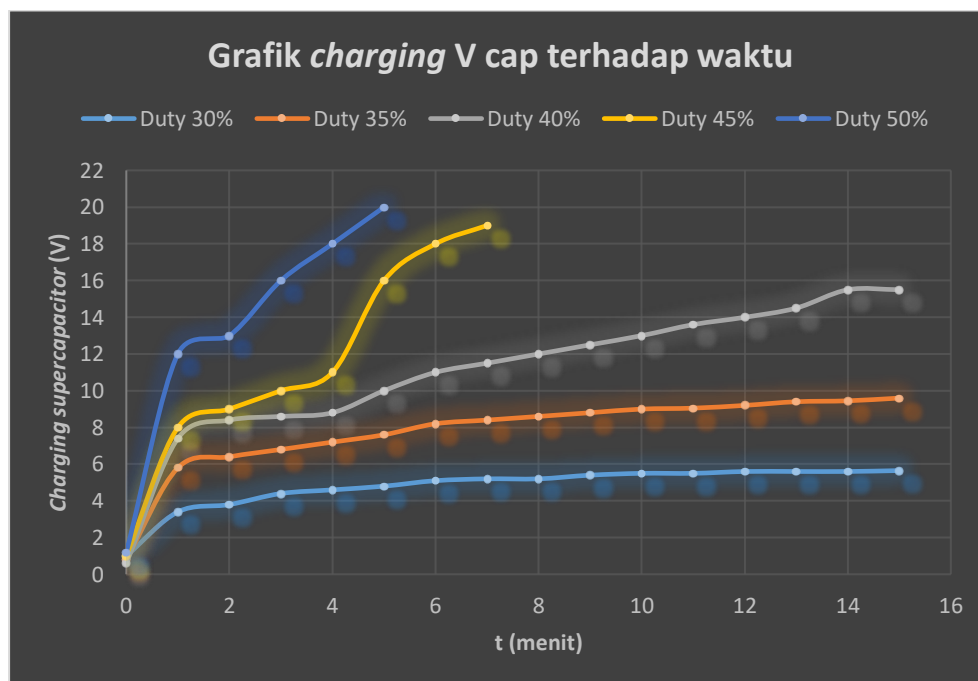
5.4.2.3 Hasil Pengujian

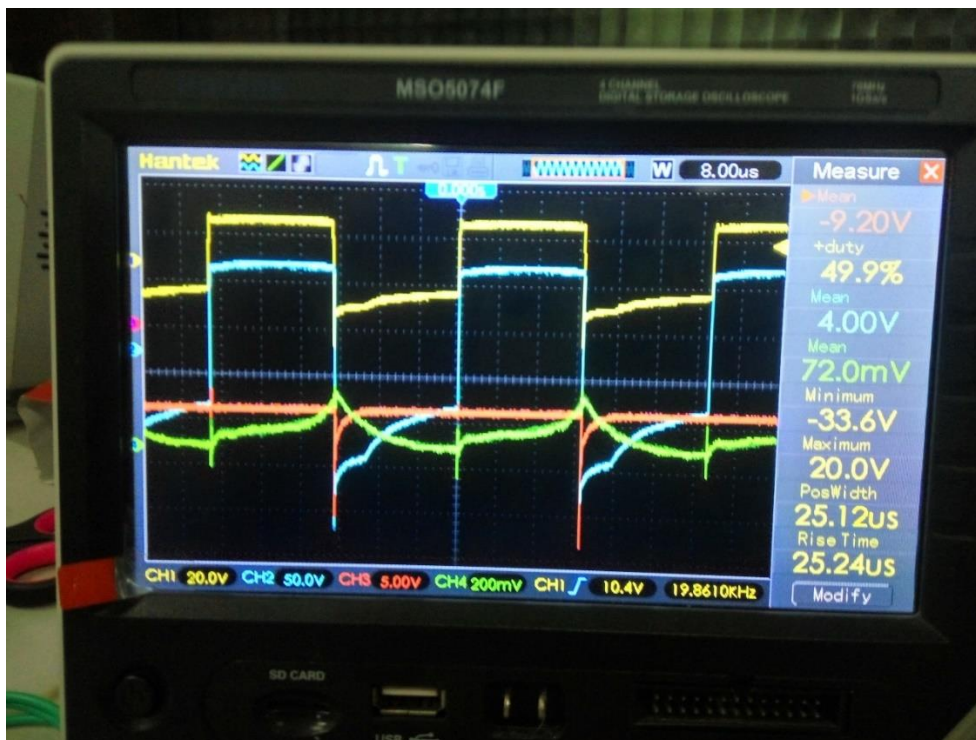
Dari hasil pengujian diatas didapat hasil sebagai berikut

Tabel 5.8 hasil pengujian *charging* selama 15 menit

Durasi (menit)	Vc saat <i>Duty</i> (V)				
	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %
0	1,00	0,80	0,60	1	1,2
1	3,40	5,80	7,40	8	12,0
2	3,80	6,40	8,40	9	13,0
3	4,40	6,80	8,60	10	16,0
4	4,60	7,20	8,80	11	18,0
5	4,80	7,60	10,00	16	20,0
6	5,10	8,20	11,00	18	
7	5,20	8,40	11,50	19	
8	5,20	8,60	12,00		
9	5,40	8,80	12,50		
10	5,50	9,00	13,00		
11	5,50	9,05	13,60		
12	5,60	9,20	14,00		
13	5,60	9,40	14,50		
14	5,60	9,45	15,50		
15	5,65	9,6	15,50		

Tabel 5.8 menunjukkan hasil pengujian *charging supercapacitor* dengan durasi 15 menit, pada tabel diatas memiliki karakteristik yang yang sama dengan kondisi sebelumnya hanya saja pada durasi yang lama dengan *dutycycle* 40% sudah bisa menghasilkan tegangan keluaran sampai 15,5 V dengan durasi 15 menit padahal secara teori harusnya tegangan *output* sebesar 8 V.

Gambar 5.12 Gambar *charging supercapacitor* terhadap waktu



Gambar 5.13 Grafik *ocilloscope* pada *dutycycle* 50 %

Pada Gambar 5.13 diatas *channel* 1 sampai 4 berturut turut merupakan *dutycycle*, tegangan induktor, tegangan kapasitor, arus induktor. Pada tegangan induktor tampak melakukan pengisian saat t_{on} sedangkan pada saat t_{off} maka tegangan induktor berbalik dan melepas eksponensial. Pada tegangan kapasitor masih tampak adanya lingkungan ini berarti kapasitor belum penuh sehingga tegangannya akan naik sampai pada kondisi gelombang tampak datar. Gelombang arus induktor juga sama pada saat t_{on} naik eksponensial saat t_{off} turun eksponensial. Pada tegangan *gate source* tampak *dutycycle* sebesar 49,9% ini mendekati nilai 50% seperti pada pengujian.

5.4.2.4 Analisis Hasil Pengujian

Pada pengujian durasi Panjang ini maka tegangan harus di Limit dengan sensor tegangan dikerenakan keluaran dari *buck - boost converter* jika menggunakan *supercapacitor* sangat berbeda dengan secara teori sehingga Limit diberikan sesuai dengan jenis superkapasitor yang akan digunakan nantinya, juka pada superkapasitor 22 V/ 1 F Limit sebaiknya pada 20 V dan juga selain dari program juga bisa ditambahkan dioda Zener sebagai pengaman tambahan.

5.5 Pengujian Sensor Tegangan

Pengujian sensor tegangan bertujuan untuk mengkalibrasi nilai pembacaan sensor dengan nilai pembacaan multimeter pada *power supply* sehingga diperoleh hasil pembacaan yang sebenarnya.

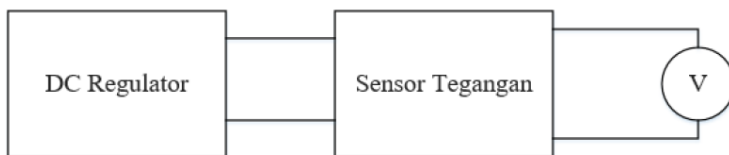
5.5.1 Pengujian Sensor Tegangan *Input*

Tujuan dari pengujian sensor tegangan adalah mengetahui performansi dan kemampuan dari sensor tegangan yang telah dibuat. Selain itu pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui keakuratan sensor tegangan sebagai masukan pembacaan pada ADC mikrokontroller.

5.5.1.1 Peralatan yang Digunakan

Adapun peralatan yang digunakan dalam pengujian ini yaitu antara lain DC regulator dan voltmeter. DC regulator yang digunakan dalam pengujian ini mampu menghasilkan tegangan keluaran hingga 30 V.

5.5.1.2 Prosedur Pengujian



Gambar 5.14 Rangkaian pengujian sensor tegangan *input*

Prosedur pengujian sensor tegangan yaitu:

1. Menghubungkan DC regulator dengan *port* masukan pada sensor tegangan.
2. Mengubah besar tegangan keluaran pada DC regulator.
3. Mengukur tegangan keluaran pada sensor tegangan menggunakan multimeter.

5.5.1.3 Hasil Pengujian

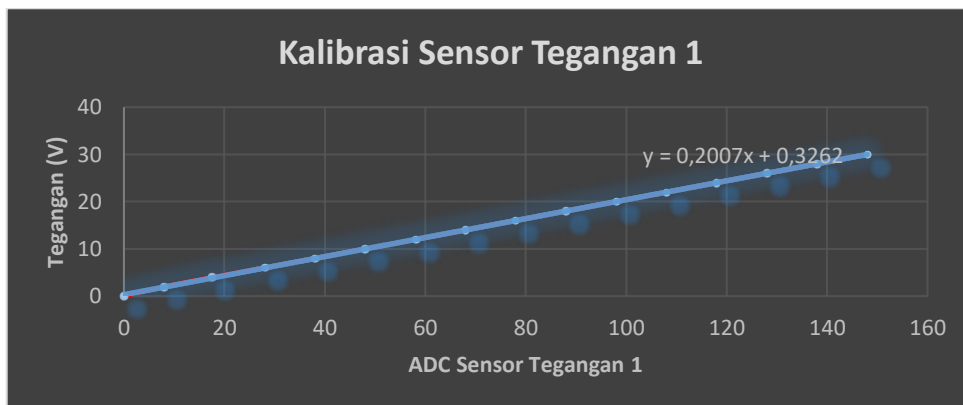
Hasil pengujian dari sensor tegangan ditunjukkan pada tabel dibawah

Tabel 5.9 Hasil pembacaan ADC sensor tegangan *input*

Tegangan Sumber	Pembacaan ADC Sensor tegangan <i>input</i>
0	0,0
2	8,0
4	17,5
6	28,0
8	38,0
10	48,0
12	58,2
14	68,0
16	78,0
18	88,0
20	98,0

22	108,0
24	118,0
26	128,0
28	138,0
30	148,0

Tabel 5.9 menunjukkan hasil pembacaan nilai ADC dari sensor tegangan *input*. Nilai adc yang dicatat merupakan nilai yang paling sering keluar saat pembacaan adc di *serial monitor*. Untuk mengkonversi nilai adc pada tiap pembacaan maka akan digunakan metode regresi linier yang dilakukan dengan menggunakan *Microsoft office excel* dengan metode *trendline*.



Gambar 5.15 Grafik hasil regresi linier sensor tegangan *input*

Grafik ini kemudian diregresi dengan menggunakan metode *trendline* sehingga didapatkan persamaan garis lurus. Setelah didapatkan persamaannya, maka dilakukan pengalihan pada program Arduino dengan persamaan pada grafik diatas sehingga yang akan ditampilkan nantinya langsung dikonversi menjadi nilai arus. Kemudian dilakukan perbandingan pembacaan sensor arus terhadap nilai multimeter sehingga didapatkan presentase kesalahan pembacaan.

Tabel 5.10 Pengujian sensor tegangan *input* setelah dikalibrasi

Tegangan Sumber (V)	Pembacaan Sensor (V)	Error (%)
0	0,33	33,0
2	1,93	3,5
4	3,94	1,5
6	5,96	0,7
8	7,95	0,6
10	9,96	0,4

12	11,97	0,2
14	13,97	0,2
16	15,98	0,1
18	17,99	0,1
20	19,99	0,1
22	22,00	0,0
24	24,00	0,0
26	26,02	0,1
28	28,02	0,1
30	30,03	0,1

Tabel 5.10 menampilkan hasil pembacaan sensor disertai dengan kesalahan pembacaannya. Kesalahan pembacaan didapatkan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap pembacaan multimeter pada *power supply*. Kesalahan pembacaan masing-masing pengukuran relatif kecil, kesalahan pengukuran tertinggi terjadi pada pembacaan tegangan 0 V yaitu sebesar 33%. Kesalahan ini dikarenakan nilai regresi yang digunakan adalah regresi linier yang memiliki nilai konstanta.

5.5.1.4 Analisis Hasil Pengujian

Hasil pembacaan nilai ADC sensor tegangan *input* dipergunakan untuk melakukan perhitungan regresi linier, pada sensor ini didapatkan persamaan:

$$y = 0,2007x + 0,3262 \quad (5-8)$$

dimana x = nilai adc

y = tegangan pada multimeter dc *power supply*

Berdasarkan hasil pengujian sensor tegangan *input* didapatkan nilai kesalahan pembacaan sensor sesuai dengan Tabel 5.10. Karena hasil pembacaan tegangan oleh sensor mendekati nilai aslinya maka kalibrasi sensor telah sesuai.

5.5.2 Pengujian Sensor Tegangan *Output*

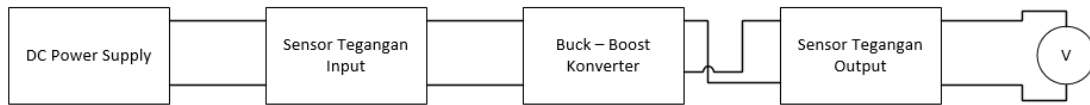
Tujuan dari pengujian sensor tegangan adalah mengetahui performansi dan kemampuan dari sensor tegangan yang telah dibuat. Selain itu pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui keakuratan sensor tegangan sebagai masukan pembacaan pada ADC mikrokontroller.

5.5.2.1 Peralatan yang Digunakan

Adapun peralatan yang digunakan dalam pengujian ini yaitu antara lain DC regulator, multimeter, sensor tegangan *input*, *buck – boost converter*, sensor tegangan

output. DC regulator yang digunakan dalam pengujian ini mampu menghasilkan tegangan keluaran hingga 30 V.

5.5.2.2 Prosedur Pengujian



Gambar 5.16 Rangkaian pengujian sensor tegangan *output*

Prosedur pengujian sensor tegangan yaitu:

1. Menghubungkan DC regulator dengan *port* masukan pada sensor tegangan *input*.
2. Menghubungkan sensor tegangan *input* dengan *buck – boost converter*.
3. Menghubungkan keluaran dengan polatitas terbalik ke sensor tegangan *output*.
4. Set tegangan DC *power supply* pada 10 V.
5. Mengubah besar tegangan keluaran pada *buck – boost converter* dengan mengatur *dutycycle*, *buck – boost converter* berbeban $R = 100 \Omega$.
6. Mengukur tegangan pada sensor tegangan *output* menggunakan voltmeter, nilai ADC yang dibaca pada sensor tegangan *output* menggunakan *serial monitor* Arduino.

5.5.2.3 Hasil Pengujian

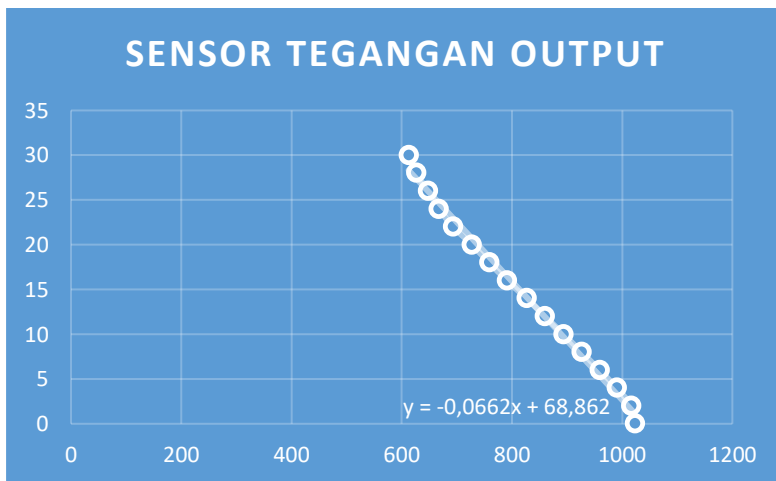
Hasil pengujian dari sensor tegangan ditunjukkan pada tabel dibawah

Tabel 5.11 Hasil pembacaan ADC sensor tegangan *input*

Tegangan <i>Output</i> Voltmeter	Pembacaan ADC Sensor tegangan <i>input</i>
0	1023,0
2	1016,5
4	990,0
6	959,0
8	926,5
10	893,5
12	860,0
14	826,5
16	791,2
18	758,5
20	727,5

22	693,5
24	667,5
26	648,0
28	626,0
30	612,5

Tabel 5.11 menunjukkan hasil pembacaan nilai ADC dari sensor tegangan *output*. Nilai ADC yang dicatat merupakan nilai yang paling sering keluar saat pembacaan ADC di *serial monitor*. Untuk mengkonversi nilai ADC pada tiap pembacaan maka akan digunakan metode regresi linier yang dilakukan dengan menggunakan *Microsoft office excel* dengan metode *trendline*.



Gambar 5.17 Grafik hasil regresi linier sensor tegangan *output*

Grafik ini kemudian diregresi dengan menggunakan metode *trendline* sehingga didapatkan persamaan garis lurus nya. Setelah didapatkan persamaannya, maka dilakukan pengalihan pada program Arduino dengan persamaan pada grafik diatas sehingga yang akan ditampilkan nantinya langsung dikonversi menjadi nilai arus. Kemudian dilakukan perbandingan pembacaan sensor arus terhadap nilai multimeter sehingga didapatkan presentase kesalahan pembacaan.

Tabel 5.12 Tabel pengujian sensor tegangan *output* setelah dikalibrasi

Tegangan Sumber (V)	Pembacaan Sensor (V)	Error (%)
0	1,14	-
2	1,67	16,5
4	3,32	17,0
6	5,51	8,2
8	7,56	5,5

10	9,68	3,2
12	11,96	0,3
14	14,05	0,4
16	16,23	1,4
18	18,22	1,2
20	20,40	2,0
22	22,48	2,2
24	24,35	1,5
26	26,64	2,5
28	28,72	2,6
30	30,80	2,7

Tabel 5.12 menampilkan hasil pembacaan sensor disertai dengan kesalahan pembacaannya. Kesalahan pembacaan didapatkan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap pembacaan multimeter pada keluaran *buck – boost converter*. Kesalahan pembacaan masing-masing pengukuran relatif kecil, kesalahan pengukuran tertinggi terjadi pada pembacaan tegangan 2 V yaitu sebesar 16%.

5.5.2.4 Analisis Hasil Pengujian

Hasil pembacaan nilai ADC sensor tegangan *output* dipergunakan untuk melakukan perhitungan regresi linier, pada sensor ini didapatkan persamaan:

$$y = -0,0662x + 68,862 \dots\dots\dots (5-9)$$

dimana x = nilai adc

y = tegangan multimeter pada keluaran *buck-boost converter*

Berdasarkan hasil pengujian sensor tegangan *output* didapatkan nilai kesalahan pembacaan sensor sesuai dengan Tabel 5.12. Karena hasil pembacaan tegangan oleh sensor mendekati nilai aslinya maka kalibrasi sensor telah sesuai.

5.6 Pengujian Rangkaian *Driver*

Pengujian rangkaian *driver* ini bertujuan untuk melihat gelombang keluaran yang dihasilkan dari IC *driver* TLP 250. Gelombang yang dihasilkan IC *driver* ini bertujuan untuk meneruskan gelombang PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler Arduino. Penambahan IC ini dilakukan karena *source* dari MOSFET tidak terhubung ke *ground* sehingga tegangan V_{gs} bisa sangat tinggi tergantung dengan tegangan *source* terhadap *ground* rangkaian.

5.6.1 Peralatan yang Digunakan

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini antara lain: catu daya 12 V baterai, Arduino, potensiometer, *probe* dan *ocilloscope*.

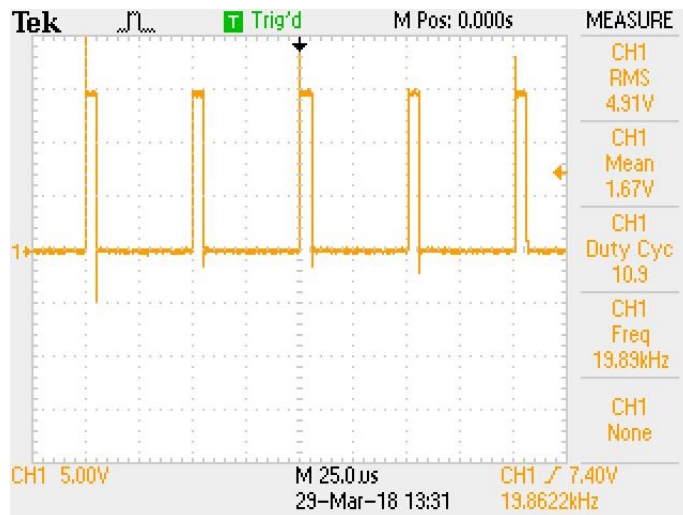
5.6.2 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian rangkaian *driver* yaitu

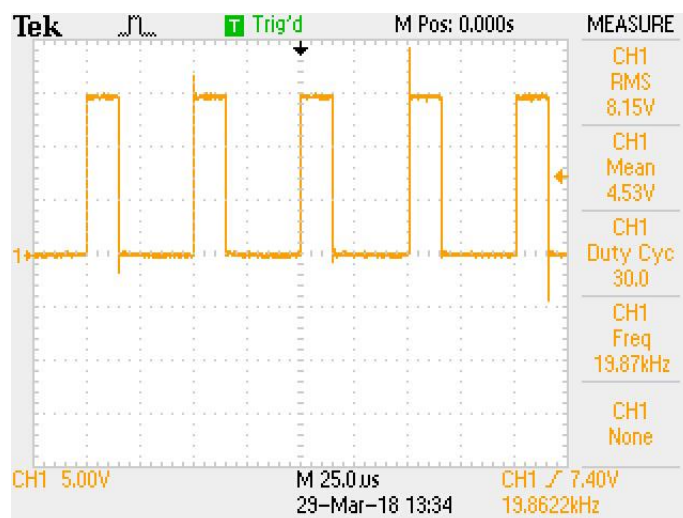
1. Menyusun rangkaian sesuai dengan Gambar 4.5
2. *Dutycycle* sinyal PWM Arduino diatur dari potensiometer
3. Baterai sebagai catu *driver* dihubungkan masing - masing + dan -
4. Menghubungkan pin HO dan VS ke masing - masing + dan - *probe*
5. Amati sinyal keluaran PWM

5.6.3 Hasil Pengujian

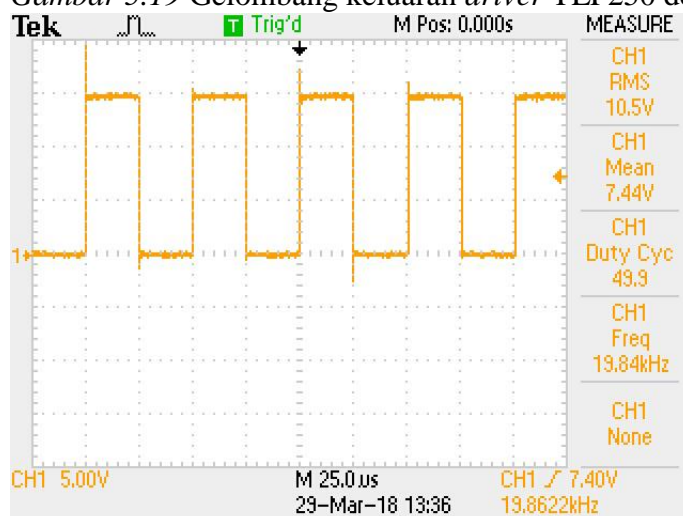
Hasil gelombang keluaran dari TLP 250 dengan berbagai variasi *dutycycle* ditunjukkan pada gambar berikut



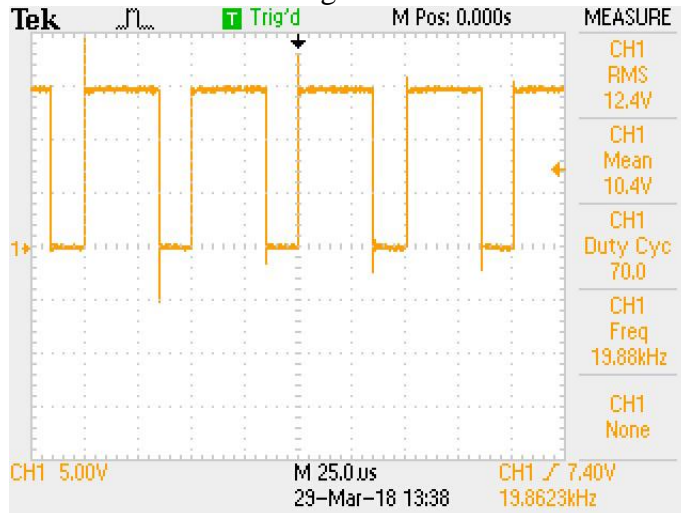
Gambar 5.18 Gelombang keluaran driver TLP250 dengan *dutycycle* 10%



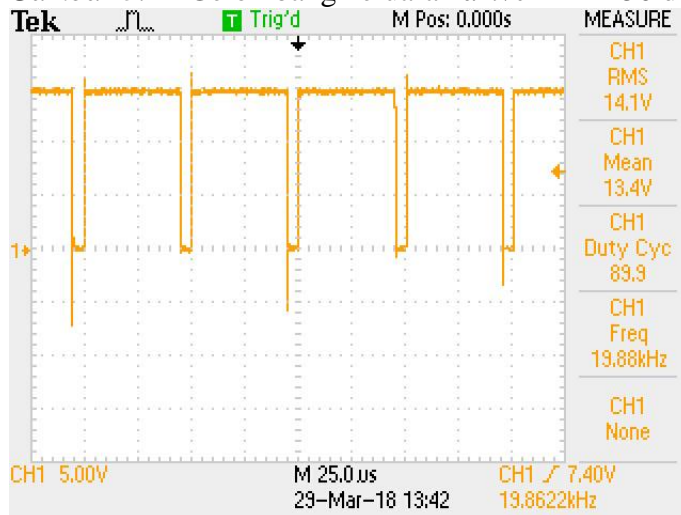
Gambar 5.19 Gelombang keluaran driver TLP250 dengan *dutycycle* 30%



Gambar 5.20 Gelombang keluaran *driver* TLP250 dengan *dutycycle* 50%



Gambar 5.21 Gelombang keluaran *driver* TLP250 dengan *dutycycle* 90%



Gambar 5.22 Gelombang keluaran *driver* TLP250 dengan *dutycycle* 90%

5.6.4 Analisis Hasil Pengujian

TLP250 sebagai IC *driver switching* tampak bekerja dengan baik. Seperti pada gambar rangkaian *driver* ini meneruskan sinyal PWM dari Arduino dengan baik dan berfungsi dari 0% hingga 100%. Frekuensi yang dihasilkan juga stabil ± 20 kHz sesuai dengan perhitungan dengan menggunakan metode *fast PWM* pada Arduino.

5.7 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem pada penelitian ini berakhir pada pengujian statis. Pada pengujian ini BLDC sebagai generator, penyearah 3 fasa, dan kapasitor perata di gantikan dengan sumber DC variabel dikarenakan mobil masih dalam perbaikan dan masih dibutuhkan penelitian lebih lanjut agar bisa diterapkan.

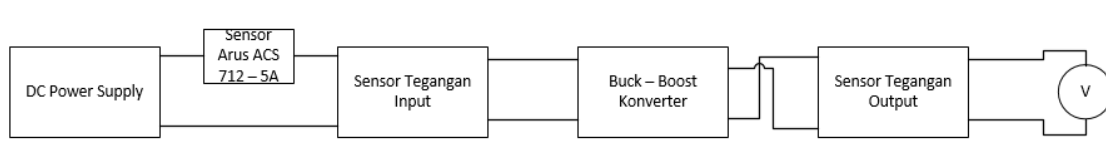
5.7.1 Peralatan

Peralatan yang dibutuhkan pada pengujian :

1. Laptop

2. Arduino
3. *Driver* MOSFET
4. *DC Power Supply*
5. Sensor Arus ACS 712 – 5A
6. Sensor Tegangan *Input*
7. *Buck – Boost Converter*
8. Sensor Tegangan *Output*
9. Multimeter
10. *Oscilloscope*
11. *Probe*

5.7.2 Prosedur Pengujian



Gambar 5.23 Rangkaian pengujian statis

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Rangkai peralatan seperti pada gambar diatas
2. Lakukan pengujian
 - a. Pengujian tegangan sumber > tegangan superkapasitor
 - b. Pengujian tegangan superkapasitor > tegangan sumber
 - c. Pengujian limit tegangan superkapasitor
 - d. Pengujian tegangan sumber berubah
3. Catat nilai *set point*, tegangan awal superkapasitor, tegangan akhir superkapasitor, tegangan sumber, arus sumber, durasi pengujian. Ambil grafik tegangan sumber dan tegangan superkapasitor pada *oscilloscope*.

5.7.3 Hasil Pengujian

5.7.3.1 Pengujian Tegangan Sumber > Tegangan Kapasitor

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem penurunan tegangan *charging* bekerja dengan baik. Sistem ini digunakan saat tegangan sumber lebih tinggi dari tegangan *charging* artinya mobil listrik sedang melaju dengan cepat sehingga *back emf* yang dihasilkan juga besar.

Tabel 5.13 Tabel pengujian $V_s > V_c$

Pengujian Sistem	Vsumber (V)	Waktu (s)	Energi Sumber (Ws)	V_{awal} cap (V)	V_{akhir} cap (V)	Energi kapasitor (Ws)	Efisiensi (%)	
Arus (A) <i>Set point</i>	1	5	14	70	0,6	4,0	7,82	11,17
	2	5	14	140	0,6	5,7	16,06	11,47
	3	5	14	210	0,6	6,0	17,82	8,48
Arus (A) <i>Set point</i>	1	10	14	140	1,1	7,9	30,60	21,85
	2	10	14	280	1,1	9,6	45,47	16,24
	3	10	14	420	1,1	10,5	54,52	12,98
Arus (A) <i>Set point</i>	1	15	14	210	1,2	8,9	38,88	18,51
	2	15	14	420	1,2	11,3	63,12	15,03
	3	15	14	630	1,2	13,0	83,78	13,31
Arus (A) <i>Set point</i>	1	20	14	280	1,2	10,0	49,28	17,60
	2	20	14	560	0,6	11,9	70,62	12,61
	3	20	14	840	1,2	14,0	97,28	11,58

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa pada percobaan ini semakin besar *set point* arus maka semakin besar tegangan akhir superkapasitor dengan durasi yang sama. Grafik pengisian dengan sumber 10 V *set point* arus 1 A dapat dilihat pada gambar dibawah.

Gambar 5.24 Grafik pengujian $V_s > V_c$ dengan $V_s = 10$ V, *set point* arus 1 A

5.7.3.2 Pengujian Tegangan Kapasitor > Tegangan Sumber

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem menaikkan tegangan *charging* bekerja dengan baik. Sistem ini digunakan saat tegangan sumber lebih rendah dari tegangan *charging* artinya mobil listrik sedang melaju dengan lambat sehingga *back emf* yang dihasilkan juga kecil.

Tabel 5.14 Tabel pengujian $V_c > V_s$

Pengujian Sistem	Vsumber (V)	Waktu (s)	Energi Sumber (Ws)	V _{awal} cap (V)	V _{akhir} cap (V)	Energi Kapasitor (Ws)	Effisiensi (%)	
Arus (A) Set point	1	5	40,0	200	10	15,00	62,5	31,25
	2	5	28,0	280	10	15,00	62,5	22,32
	3	5	12,0	180	10	15,00	62,5	34,72
Arus (A) Set point	1	10	48,0	480	12	18,00	90,0	18,75
	2	10	12,0	240	12	18,00	90,0	37,50
	3	10	7,2	216	12	18,00	90,0	41,67
Arus (A) Set point	1	4	120,0	480	8	14,25	69,5	14,48
	2	4	52,0	416	8	14,25	69,5	16,71
	3	4	48,0	576	8	14,25	69,5	12,07

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa semakin besar *set point* arus maka semakin cepat waktu pengisiannya dengan tegangan akhir superkapasitor yang sama. Grafik pengisian dengan sumber 10 V *set point* arus 3 A dapat dilihat pada gambar dibawah



Gambar 5.25 Grafik pengujian $V_c > V_s$ dengan $V_s = 10$ V, *set point* arus 3 A

5.7.3.3 Pengujian Limit Tegangan Kapasitor

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem Limit tegangan *charging* bekerja dengan baik. Sistem ini digunakan saat tegangan superkapasitor sudah mencapai tegangan nominal, yang artinya bahwa kapasitor sudah penuh. Saat sudah penuh maka proses *charging* harus dihentikan karena kalau tidak dapat merusak kapasitor itu sendiri. Gambar dibawah menunjukkan Limit tegangan kapasitor pada 19 V



Gambar 5.26 Grafik pengujian limit tegangan kapasitor pada 19 V, dengan $V_s = 10$ V, set point arus 2 A

Tabel 5.15 Pengujian limit tegangan

Pengujian Sistem		V_{sumber} (V)	Waktu (s)	Energi Sumber (Ws)	V_{awal} cap (V)	V_{akhir} cap (V)	Energi Kapasitor (Ws)	Effisiensi (Ws)
Arus (A) Set point	1	5	120	600	0,0	10	0,42	8,33
	2	5	24	240	7,8	12	2,84	28,37
	3	5	22	330	8,0	14	4,27	28,48
Arus (A) Set point	1	10	80	800	8,9	17	1,75	17,51
	2	10	28	560	12,0	19	6,23	31,16
	3	10	32	960	4,5	15	3,44	11,48

Pada tabel diatas dapat disimpulkan semakin besar *set point* yang diberikan maka semakin cepat pula waktu pengisian, selisih tegangan awal dan akhir kapasitor pengisian juga berpengaruh, jika semakin besar selisihnya maka pengisian akan semakin lama. Pada Gambar 5.26 terlihat bahwa proses *charging* langsung terhenti saat tegangan kapasitor menyentuh limit di 19 V.

5.7.3.4 Pengujian Tegangan Sumber Bervariasi

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem *charging* bekerja dengan baik (bisa mempertahankan *set point* arus) walaupun tegangan sumbernya berubah. Sistem ini akan mengatur nilai *dutycycle* agar bisa mempertahankan *set point* arus yang diberikan karena dalam kenyataannya bahwa tegangan sumber nantinya akan turun.

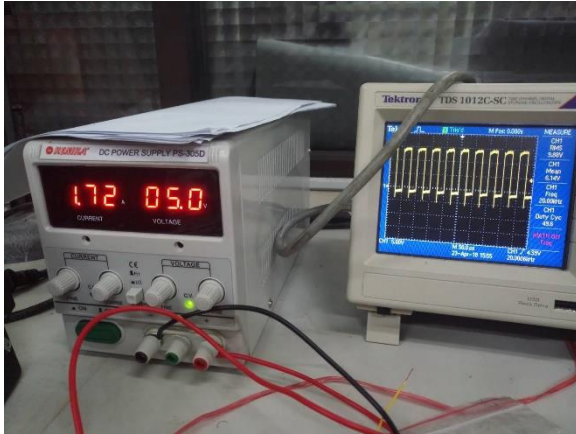
Tabel 5.16 Tabel pengujian tegangan sumber berubah

Pengujian Sistem	Vsumber (V)	Waktu (s)	V _{awal} cap (V)	V _{akhir} cap (V)	Energi Kapasitor (Ws)	Daya Kapasitor (W)
Set point Arus (A)	1 5-15	120	0	8,0	32,0	0,27
	1 5-10	120	5	8,0	19,5	0,16
	2 5-15	120	6	9,8	30,0	0,25

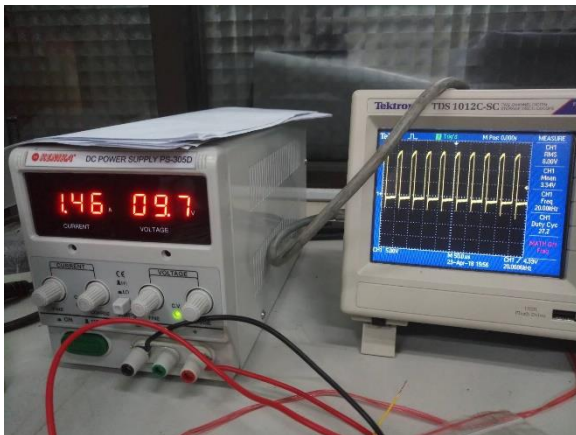
Pada percobaan tegangan sumber berubah pada tabel diatas terbukti proses *charging* tetap berjalan walaupun tegangan sumber berubah, tegangan kapasitor terjadi kenaikan sehingga proses transfer energi berhasil. Berikut gambar perubahan tegangan sumber pada *set point* 2 A beserta berserta perubahan *dutycycle* pada tiap tiap kenaikan tegangan.



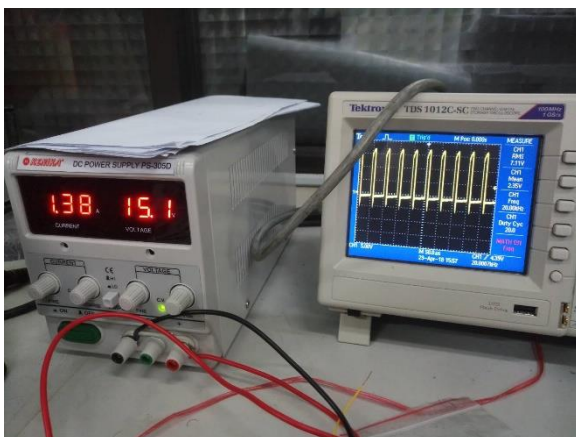
Gambar 5.27 Perubahan tegangan sumber pada *set point* 2 A



Gambar 5.28 Duty = 49,6 % saat tegangan sumber 5 V



Gambar 5.29 Duty = 27,2 % saat tegangan sumber 9,7 V



Gambar 5.30 Duty = 20 % saat tegangan sumber 15,1 V

5.7.4 Analisis Hasil Pengujian

Pada 4 pengujian ini dapat disimpulkan bahwa *set point* arus berpengaruh terhadap durasi *charging* dan tegangan *charging*, jika semakin besar *set point* arus yang diberikan maka semakin besar pula tegangan *charging* serta durasi *charging* yang semakin pendek. Pada pengujian statis keseluruhan sistem ini dapat disimpulkan juga bahwa pengereman ini sudah dapat bekerja dengan baik apabila nantinya diterapkan pada sistem sesungguhnya.