

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

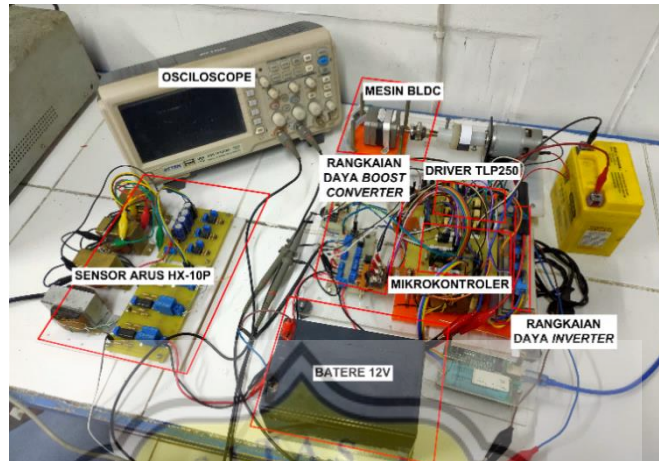
Pada bab ini membahas tentang hasil pengujian yang dilakukan di laboratorium. Pengukuran gelombang dilakukan dengan menggunakan osiloskop digital pada setiap modul yang terpasang pada alat. Modul yang terpasang adalah sistem minimum dari mikrokontroler dsPIC30F4012, rangkaian daya menggunakan MOSFET IRFP460 dan rangkaian driver menggunakan *photoelectric coupler* TLP250. Simulasi energi kinetik pada kendaraan listrik dilakukan dengan cara mesin BLDC diputar menggunakan mesin DC. Pembacaan arus keluaran konverter yang masuk ke baterai menggunakan sensor arus LEM HX 10-P.

Hasil pengukuran yang akan dibahas pada bab ini adalah gelombang keluaran dari setiap modul dan kecepatan mesin BLDC. Pengukuran dilakukan untuk membuktikan prototipe yang dibuat oleh penulis sesuai dengan teori dan rancangan alat pada BAB II dan BAB III.

4.2 Hasil Pengujian Alat

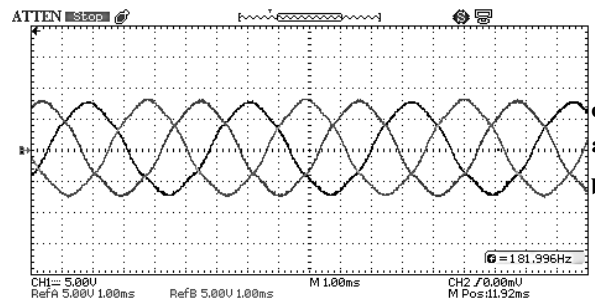
Implementasi perangkat keras pengereman regeneratif menggunakan *cascaded boost converter* disajikan pada Gambar-4.1 yang terdiri dari mesin BLDC, baterai 12V, rangkaian daya inverter, rangkaian daya *boost converter*,

sensor arus LEM HX-10P, *driver* TLP250, dan osiloskop. Pengujian perangkat keras dilakukan dengan mengoperasikan mesin BLDC saat kondisi pengereman.



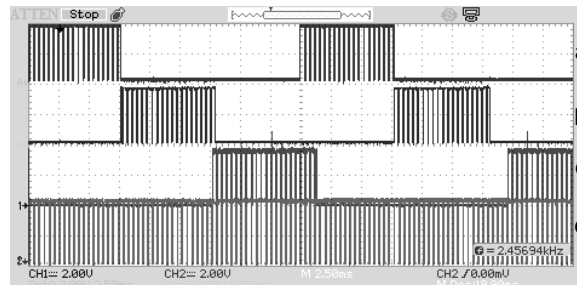
Gambar-4. 1 Implementasi perangkat keras pengereman regeneratif menggunakan *cascaded boost converter*

Pengujian awal dilakukan dengan melakukan pengukuran GGL keluaran generator yang disajikan dalam Gambar-4.2. Setiap fasa GGL keluaran generator memiliki jarak 120° elektrik dari fasa yang lain. Pengukuran GGL keluaran generator dilakukan dengan menggunakan *virtual neutral* yang terpasang pada setiap fasa.



Gambar-4. 2 Hasil percobaan GGL fasa a, b, dan c generator BLDC

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan mengamati gelombang pensaklaran pada konverter yang disajikan pada Gambar-4.3.



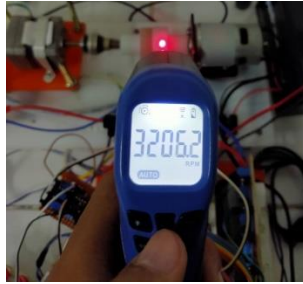
Gambar-4. 3 Pensaklaran pada konverter (a) saklar dua (b) saklar empat (c) saklar lima (d) saklar enam – (probe x1, skala 2.5ms/div, CH1 2V/div, CH2 2V/div, RefA 2V/div, RefB 2V/div)

Pensaklaran pada puncak fasa dilakukan agar energi dapat mengisi energi pada batere secara maksimal yang disajikan pada Gambar-4.4.



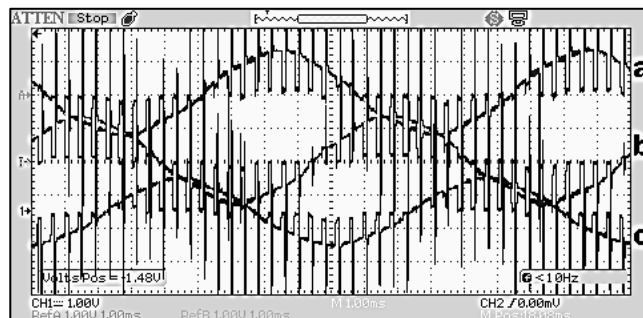
Gambar-4. 4 (a) pensaklaran pada puncak fasa (b) fasa keluaran generator BLDC – (probe x1, RefB skala 250us/div, 5V/div, RefB skala 250us/div, 2V/div)

Kecepatan awal mesin BLDC saat mode akselerasi yaitu 3206 rpm yang disajikan dalam Gambar-4.5.

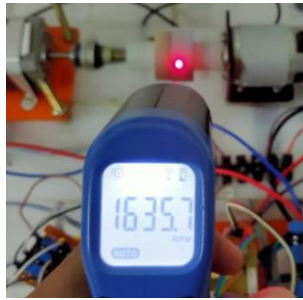


Gambar-4. 5 Referensi kecepatan awal mesin BLDC saat mode akselerasi

Pada percobaan ini dilakukan dengan memberikan *Pulse Width Modulation* (PWM) pada setiap saklar sesuai dengan mode operasi. Percobaan menggunakan perubahan lebar pulsa dari 30%, 50%, dan 80% dengan tujuan mengetahui perubahan arus batere dan kecepatan pada mesin BLDC. Selain perubahan pada arus batere dan kecepatan mesin, pengaturan lebar pulsa juga berpengaruh pada EMF balik masing-masing fasa. *Distorsi* EMF balik ini terjadi karena *switching* yang berlangsung pada PWM konverter. Perubahan EMF balik saat *duty cycle* sama dengan 30% disajikan dalam Gambar-4.6. Perubahan kecepatan menjadi 1635 rpm saat *duty cycle* sama dengan 30% disajikan dalam Gambar-4.7.

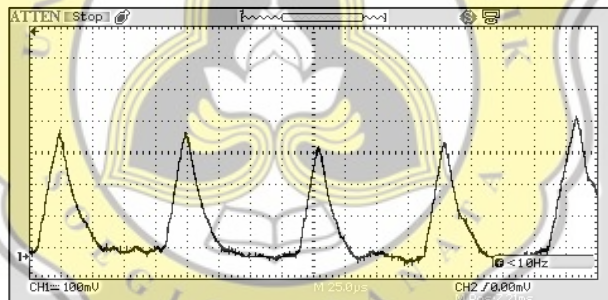


Gambar-4. 6 (a) EMF balik fasa-a (b) EMF balik fasa-b (c) EMF balik fasa-c pada saat *duty cycle* 30% - (probe x1, skala 1ms/div, CH1 1V/div, RefA 1V/div, RefB 1V/div)

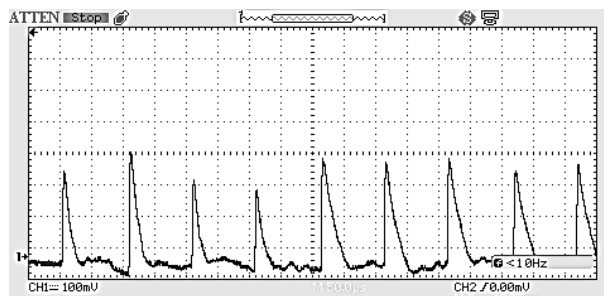


Gambar-4. 7 Perubahan kecepatan menjadi 1635 rpm saat *duty cycle* sama dengan 30%

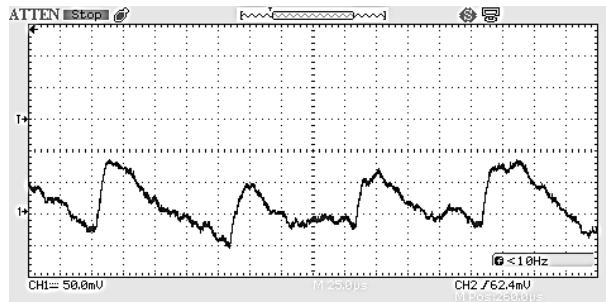
Perubahan arus pada induktor dua (L2) saat *duty cycle* sama dengan 30% disajikan dalam Gambar-4.8. Perubahan arus pada dioda *ultrafast* (D8) saat *duty cycle* sama dengan 30% disajikan dalam Gambar-4.9. Perubahan arus pada batere saat *duty cycle* sama dengan 30% disajikan dalam Gambar-4.10.



Gambar-4. 8 Perubahan arus pada induktor dua (L2) saat *duty cycle* sama dengan 30% - (probe x1, CH1 100mV/div, skala 25us/div)



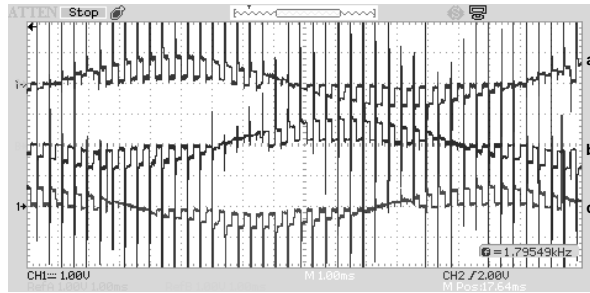
Gambar-4. 9 Perubahan arus pada dioda *ultrafast* (D8) saat *duty cycle* sama dengan 30% - (probe x1, CH1 100mV/div, skala 50us/div)



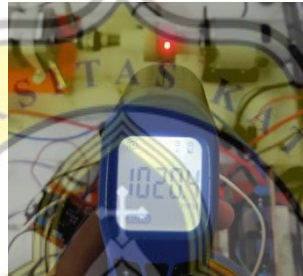
Gambar-4. 10 Perubahan arus pada batere saat duty cycle sama dengan 30% - (probe x1, skala 25us/div, CH1 50mV/div)

Pada *duty cycle* 30% menunjukkan penurunan kecepatan yang signifikan, yaitu dari kecepatan awal 3206 rpm menjadi 1635 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa dengan *duty cycle* 30% kecepatan mesin dapat berkurang 40% atau 1571 rpm dari kecepatan awal. Arus pada induktor dua (L2) dan dioda *ultrafast* menunjukkan bahwa ada perpindahan energi dari generator BLDC ke beban.

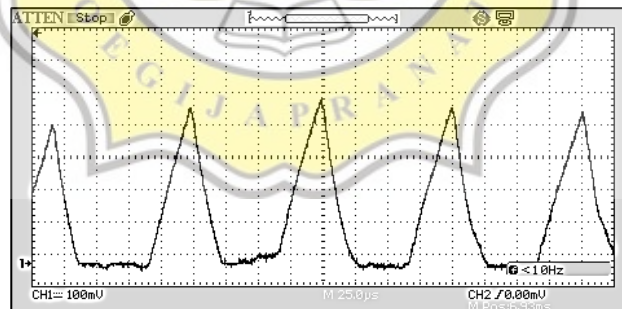
Perubahan EMF balik saat *duty cycle* sama dengan 50% disajikan dalam Gambar-4.11. Perubahan kecepatan menjadi 1020 rpm saat *duty cycle* sama dengan 50% disajikan dalam Gambar-4.12. Perubahan arus pada induktor dua (L2) saat *duty cycle* sama dengan 50% disajikan dalam Gambar-4.13. Perubahan arus pada dioda *ultrafast* (D8) saat *duty cycle* sama dengan 50% disajikan dalam Gambar-4.14. Perubahan arus pada batere saat *duty cycle* sama dengan 50% disajikan dalam Gambar-4.15.



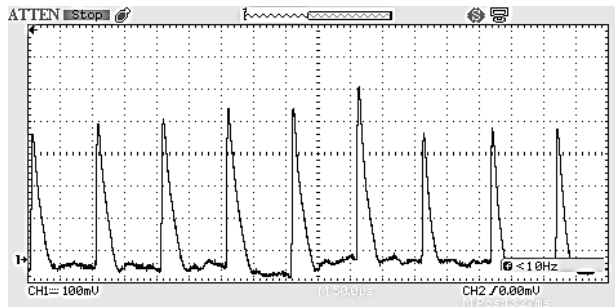
Gambar-4. 11 (a) EMF balik fasa-a (b) EMF balik fasa-b (c) EMF balik fasa-c pada saat duty cycle 50% - (probe x1, skala 1ms/div, CH1 1V/div, RefA 1V/div, RefB 1V/div)



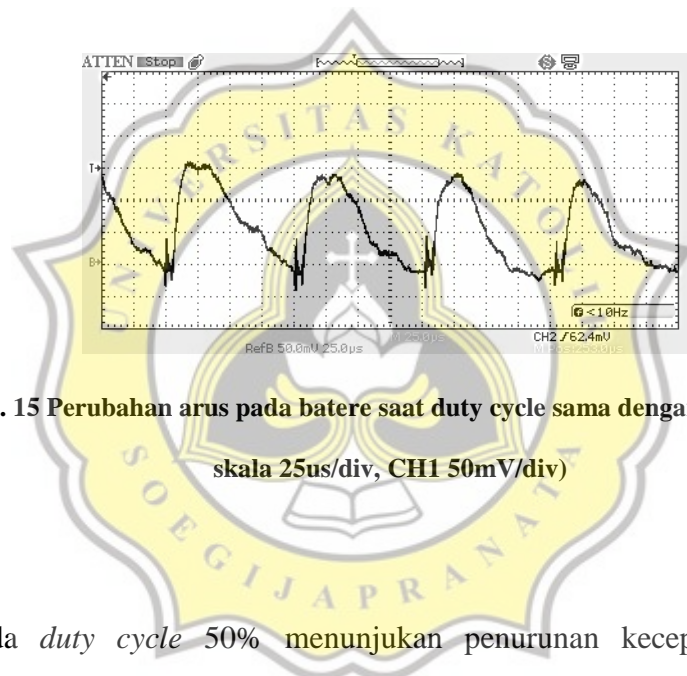
Gambar-4. 12 Perubahan kecepatan menjadi 1020 rpm saat *duty cycle* sama dengan 50%



Gambar-4. 13 Perubahan arus pada induktor dua (L2) saat *duty cycle* sama dengan 50% - (probe x1, CH1 100mV/div, skala 25us/div)



Gambar-4. 14 Perubahan arus pada dioda ultrafast (D8) saat duty cycle sama dengan 50% - (probe x1, CH1 100mV/div, skala 50us/div)

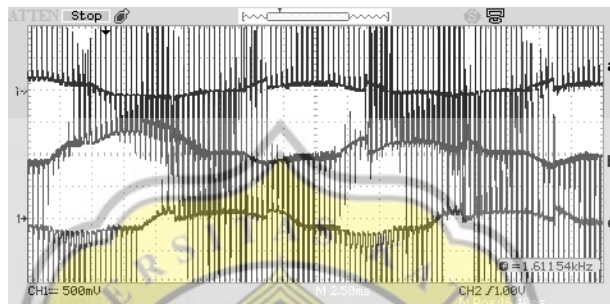


Gambar-4. 15 Perubahan arus pada batere saat duty cycle sama dengan 50% - (probe x1, skala 25us/div, CH1 50mV/div)

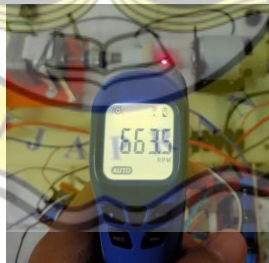
Pada *duty cycle* 50% menunjukkan penurunan kecepatan yang lebih signifikan dibandingkan dengan *duty cycle* 30%, yaitu dari kecepatan awal 3206 rpm menjadi 1020 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa dengan *duty cycle* 50% kecepatan mesin dapat berkurang 68% atau 2186 rpm dari kecepatan awal. Arus pada induktor dua (L2) dan dioda *ultrafast* menunjukkan bahwa ada perpindahan energi dari generator BLDC ke beban yang semakin besar.

Perubahan EMF balik saat *duty cycle* sama dengan 80% disajikan dalam Gambar-4.16. Perubahan kecepatan menjadi 663 rpm saat *duty cycle* sama dengan

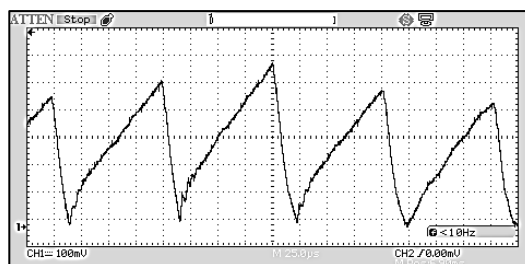
80% disajikan dalam Gambar-4.17. Perubahan arus pada induktor dua (L2) saat *duty cycle* sama dengan 80% disajikan dalam Gambar-4.18. Perubahan arus pada dioda *ultrafast* (D8) saat *duty cycle* sama dengan 80% disajikan dalam Gambar-4.19. Perubahan arus pada batere saat *duty cycle* sama dengan 80% disajikan dalam Gambar-4.20.



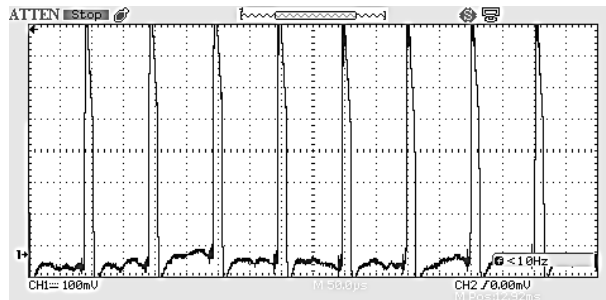
Gambar-4. 16 (a) EMF balik fasa-a (b) EMF balik fasa-b (c) EMF balik fasa-c pada saat duty cycle 80% - (probe x1, skala 2.5ms/div, CH1 500mV/div, RefA 500mV/div, RefB 500mV/div)



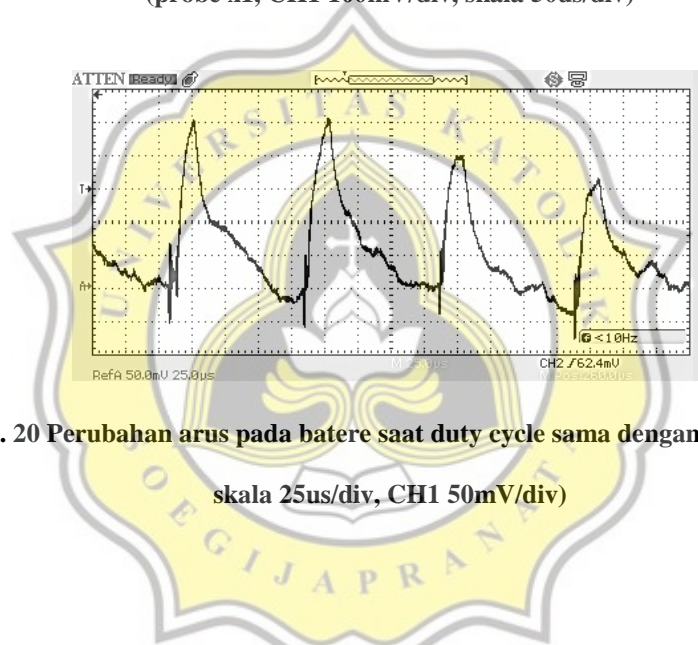
Gambar-4. 17 Perubahan kecepatan menjadi 663 rpm saat duty cycle sama dengan 80%



Gambar-4. 18 Perubahan arus pada induktor dua (L2) saat duty cycle sama dengan 80% - (probe x1, CH1 100mV/div, skala 25us/div)



Gambar-4. 19 Perubahan arus pada dioda ultrafast (D8) saat duty cycle sama dengan 80% - (probe x1, CH1 100mV/div, skala 50us/div)



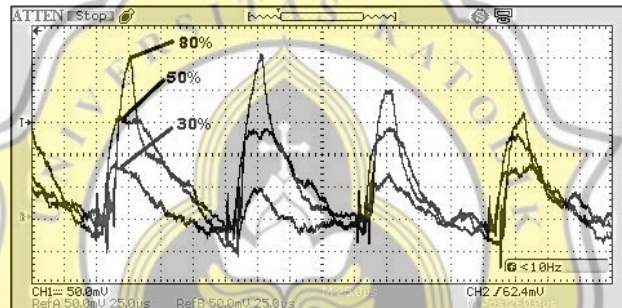
Gambar-4. 20 Perubahan arus pada batere saat duty cycle sama dengan 80% - (probe x1, skala 25us/div, CH1 50mV/div)

Pada *duty cycle* 80% menunjukkan penurunan kecepatan dari 3206 rpm menjadi 663 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa dengan *duty cycle* 80% kecepatan mesin dapat berkurang 80% atau 2543 rpm dari kecepatan awal. Arus pada induktor dua (L2) dan dioda *ultrafast* menunjukkan bahwa ada perpindahan energi dari generator BLDC ke beban yang semakin besar.

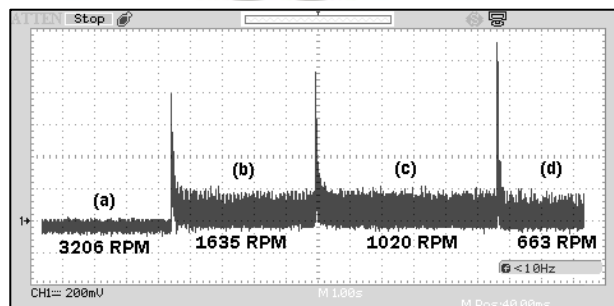
Dari percobaan perbedaan *duty cycle* dapat dilihat bahwa semakin besar *duty cycle* maka EMF balik masing-masing fasa akan semakin landai, kecepatan

mesin semakin berkurang, arus induktor akan berlaku *continuous*, dan arus dioda *ultrafast* akan semakin tinggi.

Hasil percobaan perbandingan arus batere terhadap perubahan *duty cycle* disajikan dalam Gambar-4.21. Pada Gambar-4.21. dapat dilihat bahwa semakin besar *duty cycle* maka arus yang mengalir ke batere akan semakin tinggi. Hal ini terbukti berdasarkan persamaan (3-6), semakin tinggi tegangan keluaran konverter maka arus yang mengalir ke batere akan semakin tinggi. Intensitas arus yang mengalir ke batere disajikan dalam Gambar-4.22.



Gambar-4. 21 Hasil percobaan arus batere terhadap perubahan *duty cycle* 30%, 50% dan 80% - (probe x1, skala 25us/div, CH1 50mV/div, RefA 50mV/div, RefB 50mV/div)



Gambar-4. 22 Hasil percobaan intensitas arus yang mengalir ke batere

4.3 Pembahasan

Pengereman regeneratif diaplikasikan pada kendaraan listrik untuk meningkatkan jarak tempuh dan mengurangi energi yang terbuang saat pengereman. Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan energi kinetik pada mesin BLDC menggunakan motor DC. EMF balik dari mesin BLDC ketika diputar dengan motor DC berbentuk *trapezoidal*. Penguatan tegangan keluaran dilakukan sebanyak dua kali, penguatan pertama dengan cara mengoperasikan konverter *bidirectional* menjadi *boost rectifier* dan penguatan kedua dilakukan dengan cara menambah parameter *chopper* kedua.

Pensaklaran pada konverter dilakukan dengan metode pensaklaran *simultant*. Pensaklaran hanya dilakukan ketika EMF balik dalam kondisi puncak, hal ini dilakukan agar terjadi pengiriman daya secara maksimal. Percobaan dilakukan dengan kecepatan mesin BLDC mula-mula 3206 rpm. Kecepatan akan semakin berkurang jika *duty cycle* pada setiap saklar semakin besar. Parameter *duty cycle* dilakukan dengan tiga nilai referensi yaitu 30%, 50%, dan 80%. Perubahan kecepatan dapat dilihat pada Tabel-4.1. Penurunan kecepatan pada mesin BLDC akibat pengereman regeneratif menandakan sistem berfungsi dengan baik. Semakin tinggi *duty cycle* maka arus batere akan semakin meningkat.

Tabel-4. 1 Hasil Percobaan Pengurangan Kecepatan akibat perubahan duty cycle

No	<i>Duty cycle</i>	Kecepatan (rpm)
1.	0%	3206
2.	30%	1635
3.	50%	1020
4.	80%	663