

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4. 1. Pendahuluan**

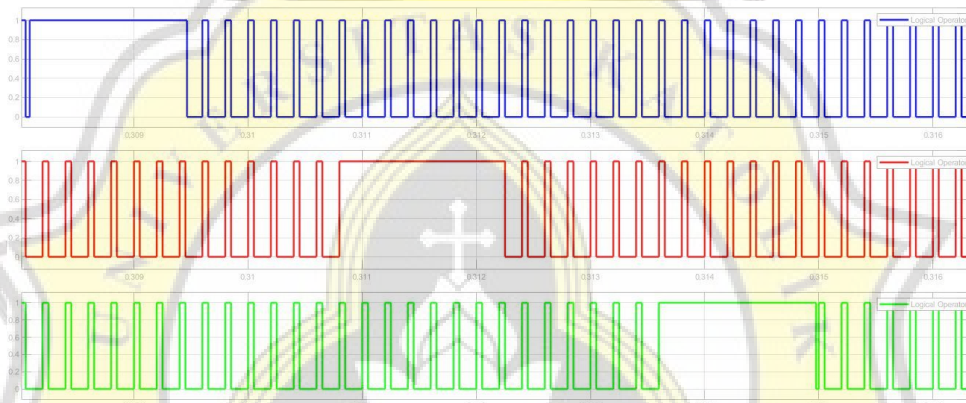
Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil simulasi dan hasil pengujian pengereman regeneratif SRM menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *Simulink MATLAB*. Setelah simulasi dilakukan, maka percobaan dilakukan berdasarkan hasil simulasi. Hasil gelombang arus fasa, tegangan fasa dan arus pengisian ke baterai akan ditampilkan menggunakan osiloskop *digital*. Hasil dari pengujian ini dilakukan untuk membuktikan pada implementasi alat sesuai dengan teori-teori yang telah dibahas sebelumnya.

#### **4. 2. Hasil Simulasi Menggunakan *Simulink***

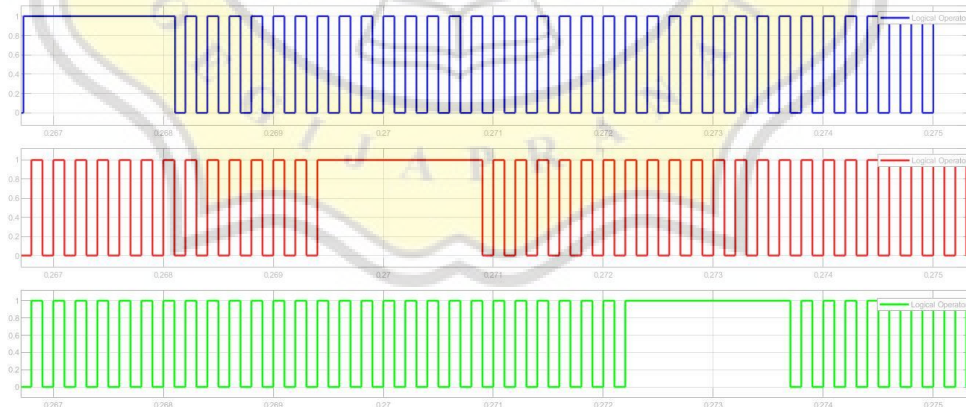
Sebelum melakukan pengujian pada *prototype*, dilakukan simulasi dengan menggunakan software *Simulink* pada *MATLAB*. SRM yang digunakan adalah SRM 3 fasa yang memiliki 6 kutub stator dan 4 kutub rotor. Pada simulasi, digunakan motor DC dengan kecepatan putar diatur pada 1800 RPM yang dihubungkan dengan poros rotor SRM.

Langkah awal pada simulasi pengereman regeneratif SRM dengan metode *magnetizing-demagnetizing* adalah dengan membangkitkan sinyal pola pensaklaran. Sesuai dengan teori, pola pensaklaran metode *magnetizing-*

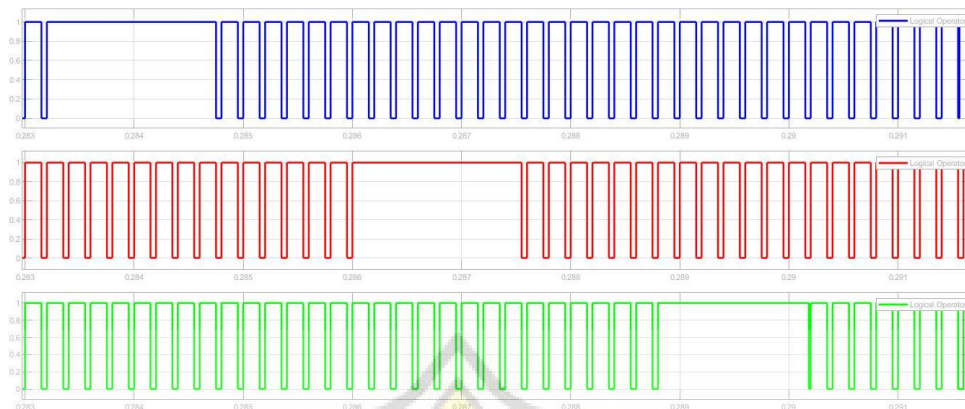
*demagnetizing* dilakukan dengan menggunakan fasilitas *PWM Generator* pada *Simulink*. Selain dapat membangkitkan sinyal PWM untuk pensaklaran, nilai *duty cycle* sinyal PWM dapat diatur. Pada penelitian ini akan digunakan tiga nilai *duty cycle* yaitu 25%, 50%, dan 75%. Sinyal pensaklaran metode *magnetizing-demagnetizing* dengan perubahan *duty cycle* dapat ditunjukkan pada Gambar-4.1 (*duty cycle* 25%), Gambar-4.2 (*duty cycle* 50%), dan Gambar-4.3 (*duty cycle* 75%).



**Gambar-4.1 Hasil simulasi sinyal pensaklaran tiap fasa pada *duty cycle* 25%**

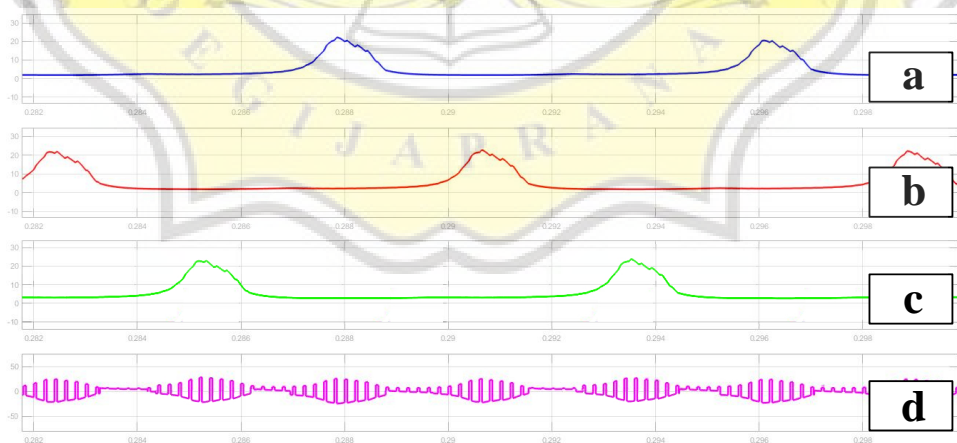


**Gambar-4.2 Hasil simulasi sinyal pensaklaran tiap fasa pada *duty cycle* 50%**



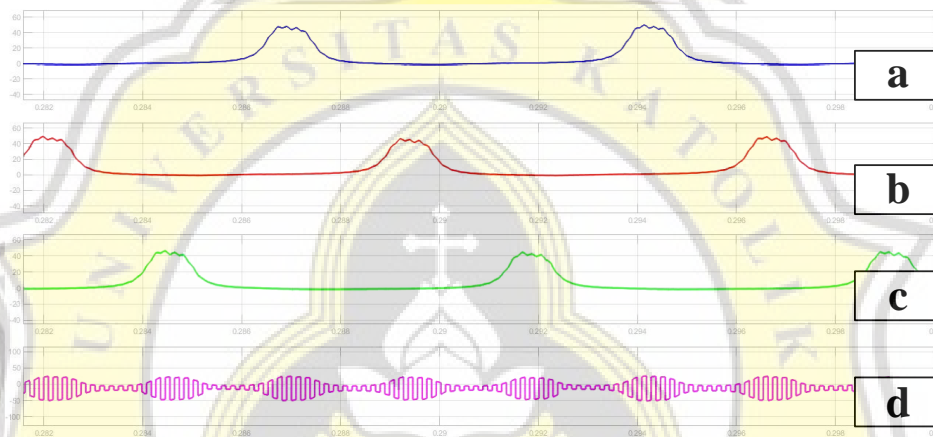
**Gambar-4.3 Hasil simulasi sinyal pensaklaran tiap fasa pada *duty cycle* 75%**

Berdasarkan hasil sinyal pensaklaran, maka simulasi dapat dibagi menjadi tiga kondisi. Kondisi pertama menggunakan sinyal pensaklaran metode *magnetizing-demagnetizing* dengan *duty cycle* 25%. Kondisi ini menghasilkan gelombang arus fasa yang tidak ideal dengan wilayah arus eksitasi hampir sama dengan wilayah arus *generating*. Berdasarkan arus fasa yang tidak ideal tersebut, arus pengisian ke baterai tidak optimal karena wilayah arus pengisian lebih sedikit. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar-4.4.



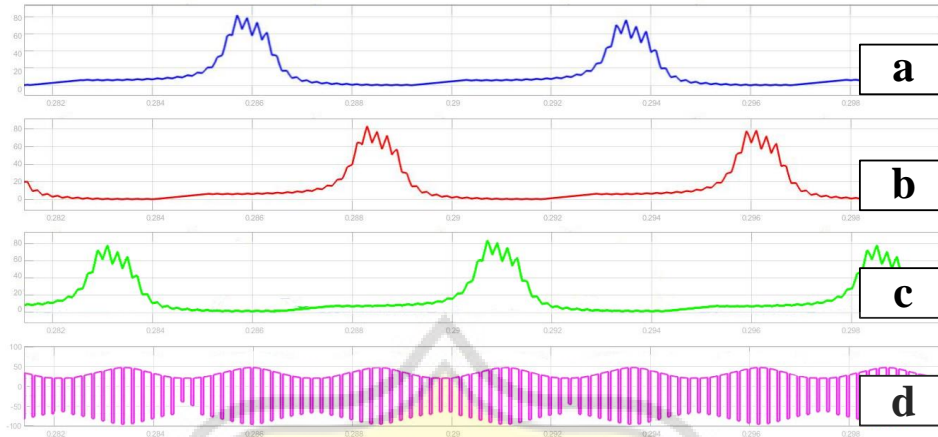
**Gambar-4.4 Hasil simulasi arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) pada *duty cycle* 25%**

Kondisi kedua menggunakan sinyal pensaklaran metode *magnetizing-demagnetizing* dengan *duty cycle* 50%. Kondisi ini menghasilkan gelombang arus fasa yang cukup baik dengan wilayah arus eksitasi lebih kecil dari wilayah arus *generating*. Berdasarkan gelombang arus fasa tersebut, arus pengisian ke baterai cukup baik karena wilayah arus pengisian sedikit lebih banyak. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar-4.5.



**Gambar-4.5 Hasil simulasi arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) pada *duty cycle* 50%**

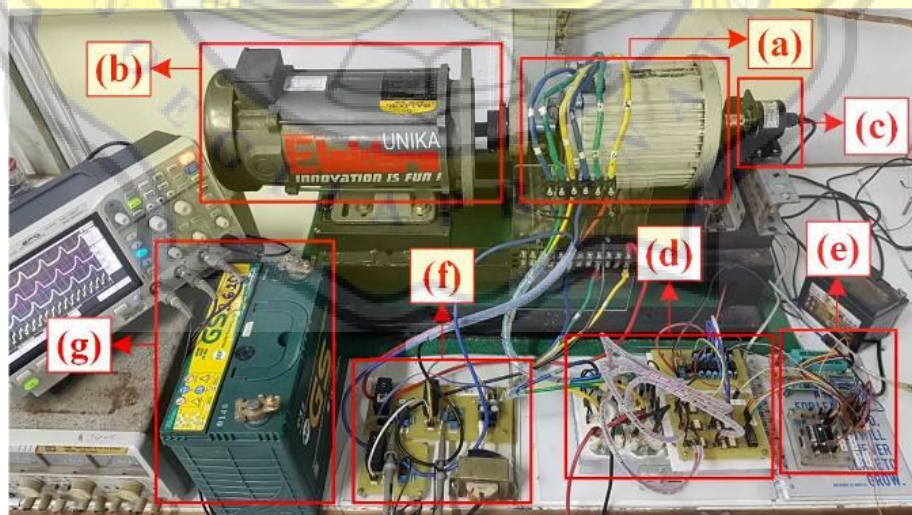
Kondisi ketiga menggunakan sinyal pensaklaran metode *magnetizing-demagnetizing* dengan *duty cycle* 75%. Kondisi ini menghasilkan gelombang arus fasa yang paling baik dengan wilayah arus eksitasi yang kecil dan wilayah arus *generating* yang besar. Berdasarkan gelombang arus fasa tersebut, dihasilkan arus pengisian ke baterai paling optimal karena wilayah arus pengisian ke baterai lebih banyak. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar-4.6. Berdasarkan simulasi pada ketiga kondisi tersebut, maka *duty cycle* 75% adalah yang paling optimal untuk pengereman regeneratif pada SRM menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing*.



**Gambar-4.6 Hasil simulasi arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) pada *duty cycle* 75%**

### 4. 3. Hasil Pengujian Alat

Berdasarkan hasil simulasi, dilakukan pengujian pada *prototype*. Pengujian sistem pengereman regeneratif menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* ini telah diimplementasikan pada *prototype* yang dapat dilihat pada Gambar-4.7.

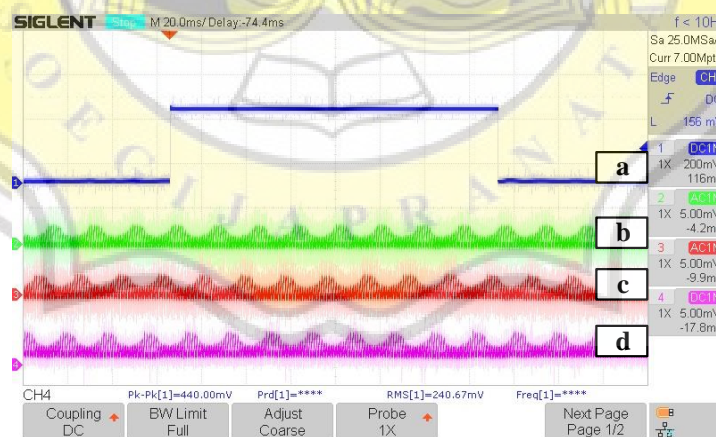


**Gambar-4.7 *Prototype* sistem pengereman regeneratif**

*Prototype* menggunakan (a) SRM dengan spesifikasi yang disajikan pada Tabel-3.1., (b) motor DC sebagai *prime mover*, (c) *Rotary Encoder* Autonics

E50S8-2500-3-V-5 sebagai perangkat deteksi posisi rotor, (d) IGBT Semikron SKM25GD125D dan *driver* (konverter *asymmetric*), (e) rangkaian mikrokontroler dsPIC30F4012, (f) sensor arus LEM LA 50-P, dan (g) baterai 12 VDC untuk suplai konverter.

Tahapan awal pengujian adalah dengan menentukan sudut eksitasi. Pada mode pengereman regeneratif, eksitasi diberikan ketika posisi rotor bergerak menjauhi stator atau ketika induktansi mulai menurun. Untuk mengetahui sudut untuk eksitasi diperlukan pemetaan. Langkah awal adalah dengan mengoperasikan motor DC untuk memutar rotor SRM. Langkah berikutnya adalah membuat impuls arus dengan memberikan pulsa dengan frekuensi tinggi dan amplitudo yang rendah pada salah satu belitan fasa stator. Pada Gambar-4.8, ditunjukkan hubungan impuls arus pada setiap fasa SRM setiap satu putaran. Karena SRM memiliki delapan rotor, maka setiap putaran akan menghasilkan delapan puncak impuls arus.

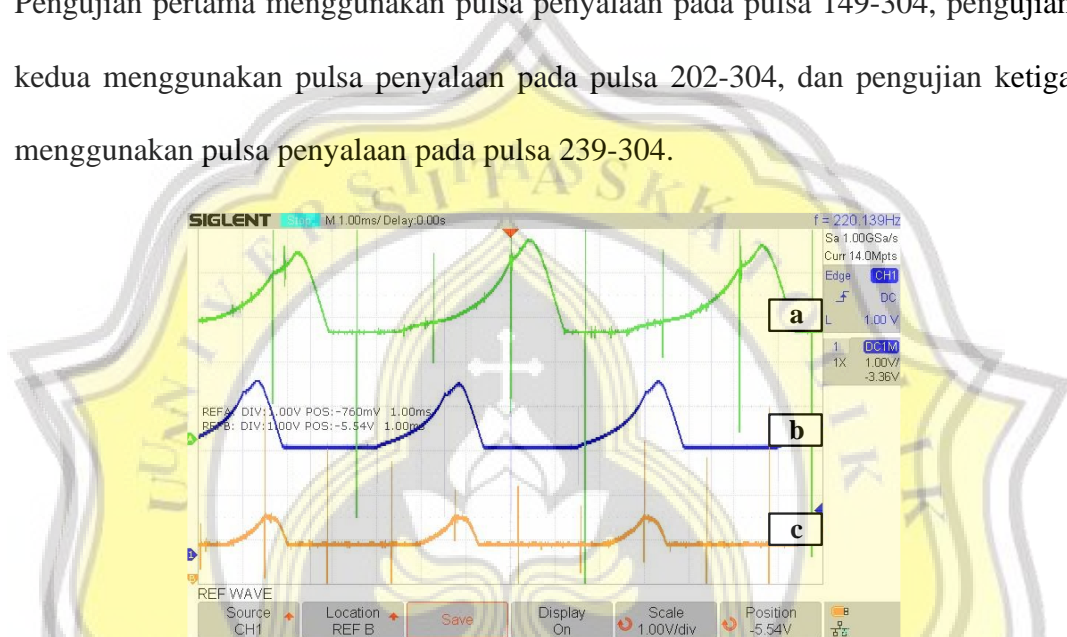


**Gambar-4.8 Hasil percobaan induktansi SRM setiap satu putaran *interrupt* Pin-Z (a), fasa 1 (b), fasa 2 (c), dan fasa 3 (d)**

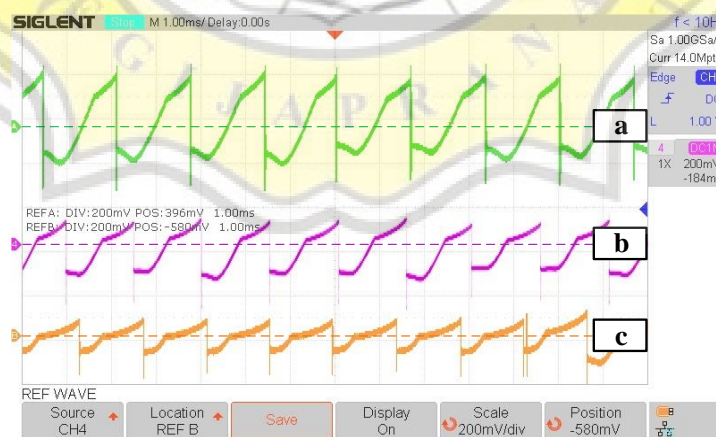
Dari gambar gelombang diatas, dapat diperoleh informasi posisi rotor dan karakteristik profil induktansi, dimana nilai profil induktansi berkebalikan dengan

nilai impuls arus. Berdasarkan profil induktansi tersebut, dapat diperoleh sudut eksitasi yang tepat untuk proses pengereman regeneratif.

Untuk mendapatkan sampel sudut eksitasi penyalan, akan dilakukan percobaan dengan mengubah nilai pulsa penyalan awal pada metode *single pulse*. Pengujian pertama menggunakan pulsa penyalan pada pulsa 149-304, pengujian kedua menggunakan pulsa penyalan pada pulsa 202-304, dan pengujian ketiga menggunakan pulsa penyalan pada pulsa 239-304.



**Gambar-4.9** Hasil percobaan arus fasa dengan *single pulse* diwakili oleh pulsa 149-304 (a), pulsa 202-304 (b), pulsa 239-304 (c)



**Gambar-4.10** Hasil percobaan arus baterai dengan *single pulse* diwakili oleh pulsa 149-304 (a), pulsa 202-304 (b), pulsa 239-304 (c)

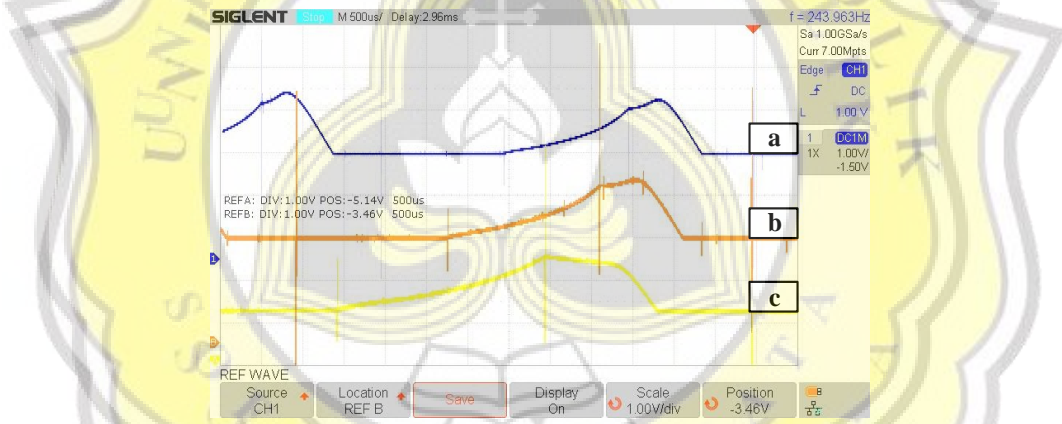
Pada Gambar-4.9 ditunjukkan pengaruh perubahan pulsa penyalan pada arus fasa SRM. Pada Gambar-4.9a, arus fasa mengalami kenaikan dengan jangkauan pulsa penyalan yang panjang (149-304), hal ini mengakibatkan terlalu banyak energi dari baterai yang digunakan untuk eksitasi awal, sehingga energi yang dikembalikan ke baterai tidak optimal. Pada Gambar-4.9b, arus fasa mengalami kenaikan dengan pulsa penyalan yang pendek (202-304), energi dari baterai yang digunakan untuk eksitasi awal tidak berlebihan, sehingga energi yang dikembalikan ke baterai optimal. Pada Gambar-4.9c, arus fasa mengalami kenaikan dengan pulsa penyalan yang sangat pendek (239-304), energi dari baterai yang digunakan untuk eksitasi awal terlalu sedikit, sehingga energi yang dikembalikan ke baterai tidak optimal.

Pada Gambar-4.10 ditunjukkan pengaruh perubahan pulsa penyalan pada arus pengisian baterai. Dengan meninjau luas wilayah arus *charging* dan *discharging* didapatkan nilai pulsa penyalan yang menghasilkan rata-rata arus *charging* yang paling optimal. Arus *charging* merupakan luasan dibawah titik nol horizontal gelombang, sedangkan arus *discharging* merupakan luasan diatas titik nol horizontal gelombang. Gambar-4.10a menunjukkan luasan arus *discharging* yang lebih besar dibandingkan arus *charging*, sehingga tidak ada arus yang mengisi baterai. Gambar-4.10b menunjukkan luasan arus *charging* yang lebih besar dibandingkan arus *discharging*, sehingga pengisian arus ke baterai optimal. Gambar-4.10c menunjukkan luasan arus *charging* yang hampir sama dengan arus *discharging*, sehingga pengisian arus ke baterai sangat kecil. Berdasarkan hasil pengujian diatas, digunakan pulsa penyalan yang paling efektif yang



menghasilkan arus fasa dan arus pengisian baterai yang optimal yaitu pada pulsa 202-304.

Nilai kecepatan putar awal *prime mover* yang digunakan untuk memutar rotor SRM akan mempengaruhi nilai arus fasa dan arus pengisian ke baterai. Untuk mendapatkan nilai kecepatan putar awal yang optimal akan dilakukan pengujian perubahan kecepatan pada metode *single pulse* dengan pulsa penyalan 202-304. Pengujian pertama menggunakan kecepatan awal 1800 RPM, pengujian kedua menggunakan kecepatan awal 1500 RPM, dan pengujian ketiga menggunakan kecepatan awal 1200 RPM



**Gambar-4.11 Hasil percobaan arus fasa dengan *single pulse* pada kecepatan awal 1800 RPM (a), 1500 RPM (b), 1200 RPM (c)**



**Gambar-4.12 Hasil percobaan arus baterai dengan *single pulse* pada kecepatan awal 1800 RPM (a), 1500 RPM (b), 1200 RPM (c)**

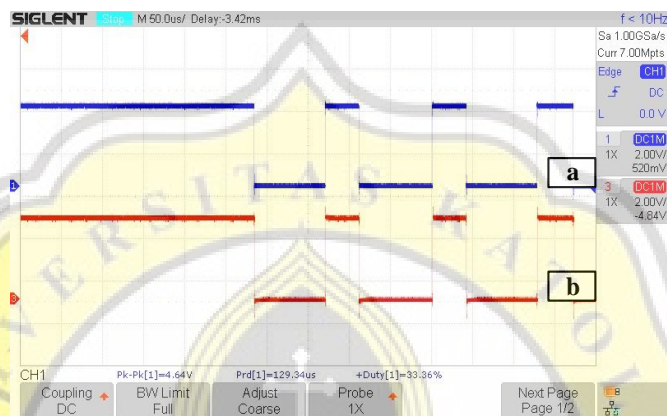
Pada Gambar-4.11 ditunjukkan pengaruh perubahan kecepatan awal pada arus fasa SRM. Gambar-4.11a menunjukkan pada kecepatan 1800 RPM, arus eksitasi pendek dan arus pembangkitan yang optimal, sehingga daya yang digunakan sangat efektif. Gambar-4.11b menunjukkan pada kecepatan 1500 RPM, arus eksitasi panjang dan arus pembangkitan yang optimal, sehingga daya yang digunakan kurang efektif. Gambar-4.11c menunjukkan menunjukkan pada kecepatan 1200 RPM, arus eksitasi sangat panjang dan arus pembangkitan yang tidak optimal, sehingga daya yang digunakan tidak efektif.

Pada Gambar-4.12 ditunjukkan pengaruh perubahan kecepatan awal pada arus pengisian baterai. Arus *charging* merupakan luasan dibawah titik nol horizontal gelombang, sedangkan arus *discharging* merupakan luasan diatas titik nol horizontal gelombang. Gambar-4.12a menunjukan luasan arus *charging* yang lebih besar dibandingkan arus *discharging*, sehingga pengisian arus ke baterai optimal. Gambar-4.12b menunjukan luasan arus *charging* hampir sama dengan arus *discharging*, sehingga pengisian arus ke baterai sangat kecil. Gambar-4.12c menunjukan luasan arus *discharging* yang lebih besar dibandingkan arus *charging*, sehingga tidak ada pengisian arus ke baterai. Berdasarkan hasil pengujian diatas, digunakan kecepatan awal 1800 RPM karena menghasilkan arus fasa dan arus pengisian baterai yang optimal.

Pada penelitian ini, digunakan tiga parameter *duty cycle* untuk memperoleh pengereman regeneratif yang optimal. Pengujian pertama menggunakan *duty cycle* 25%, pengujian kedua menggunakan *duty cycle* 50%, dan pengujian ketiga menggunakan *duty cycle* 75%.

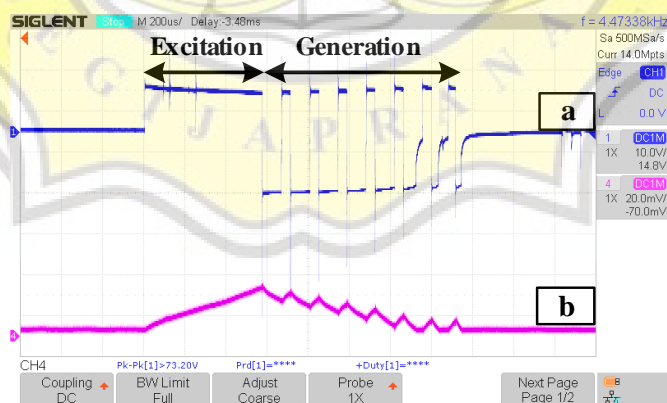
### 4.3.1. Hasil Pengujian Pada *Duty Cycle* 25 %

Pada pengujian pertama, digunakan metode *magnetizing-demagnetizing* dengan *duty cycle* bernilai 25 %. Kecepatan awal motor DC yang digunakan adalah 1800 RPM. Gambar-4.13 menunjukkan sinyal pensaklaran pada *duty cycle* 25%.



Gambar-4.13 Hasil percobaan sinyal pensaklaran saklar *high* (a) dan saklar *low* (b) pada *duty cycle* 25%

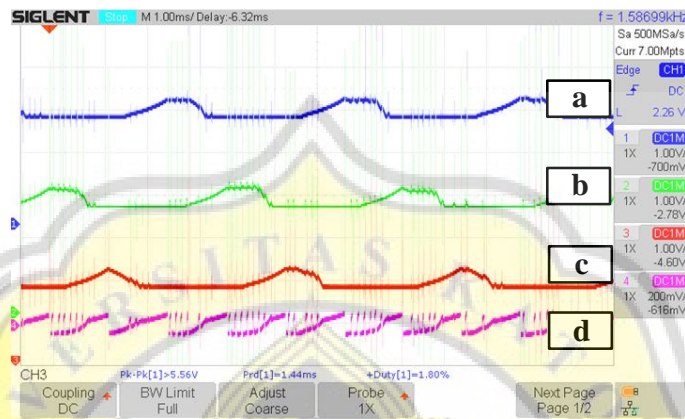
Pada Gambar-4.14 ditunjukkan gelombang tegangan dan arus salah satu fasa pada SRM. Pada gelombang arus fasa, luas wilayah *generating* hampir sama dengan luas eksitasi, sehingga arus pengisian ke baterai tidak optimal.



Gambar-4.14 Hasil percobaan tegangan fasa (a), dan arus fasa (b) menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada *duty cycle* 25%

Pada Gambar-4.15, ditunjukkan gelombang arus fasa 1, fasa 2, dan fasa 3 serta arus pengisian ke baterai yang dihasilkan oleh pengujian menggunakan *duty*

cycle 25 %. Arus dari fasa 1, fasa 2 dan fasa 3 mengalami penurunan. Walaupun kecepatan SRM menurun dari 1800 RPM menjadi 1742 RPM, pengereman regeneratif tidak optimal karena tidak ada arus yang mengisi ke baterai.



**Gambar-4.15** Hasil percobaan arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) dengan menggunakan *duty cycle* 25%

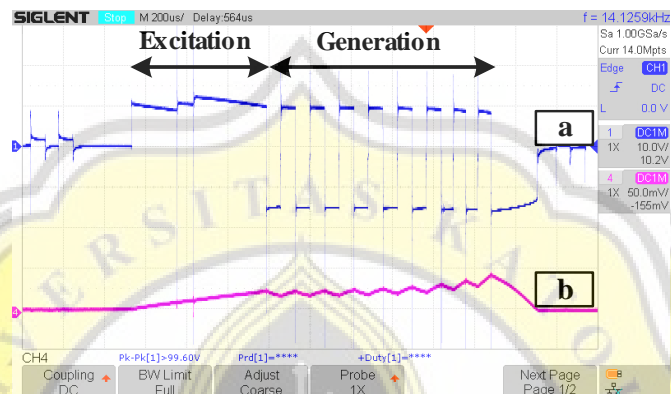
#### 4.3.2. Hasil Pengujian Pada *Duty Cycle* 50 %

Pada pengujian berikutnya, digunakan metode *magnetizing-demagnetizing* dengan *duty cycle* bernilai 50 %. Kecepatan awal motor DC yang digunakan tetap 1800 RPM. Gambar-4.16 menunjukkan sinyal pensaklaran pada *duty cycle* 50%.



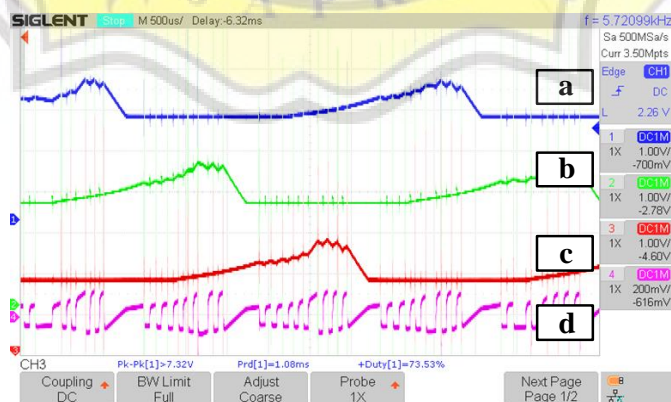
**Gambar-4.16** Hasil percobaan sinyal pensaklaran saklar *high* (a) dan saklar *low* (b) pada *duty cycle* 50%

Pada Gambar-4.17 ditunjukkan gelombang tegangan dan arus salah satu fasa pada SRM. Karena *duty cycle* yang digunakan adalah 50 %, maka tegangan fasa berfluktuasi dan aktif di sisi positif sama panjangnya dengan pada sisi negatif. Pada gelombang arus fasa, wilayah *generating* lebih besar dari wilayah eksitasi.



**Gambar-4.17** Hasil percobaan tegangan fasa (a), dan arus fasa (b) menggunakan metode *magnetizing-demagnetizing* pada *duty cycle* 50%

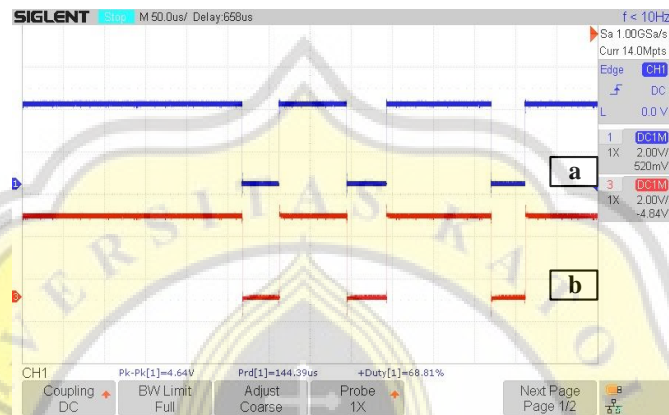
Pada Gambar-4.18, ditunjukkan gelombang arus fasa 1, fasa 2, dan fasa 3 serta arus pengisian ke baterai yang dihasilkan oleh pengujian menggunakan *duty cycle* 50 %. Arus dari fasa 1, fasa 2 dan fasa 3 mengalami kenaikan. Pengereman regeneratif optimal karena kecepatan SRM menurun dari 1800 RPM menjadi 1704 RPM dan terdapat arus pengisian ke baterai yaitu 0.074 Ampere.



**Gambar-4.18** Hasil percobaan arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) dengan menggunakan *duty cycle* 50%

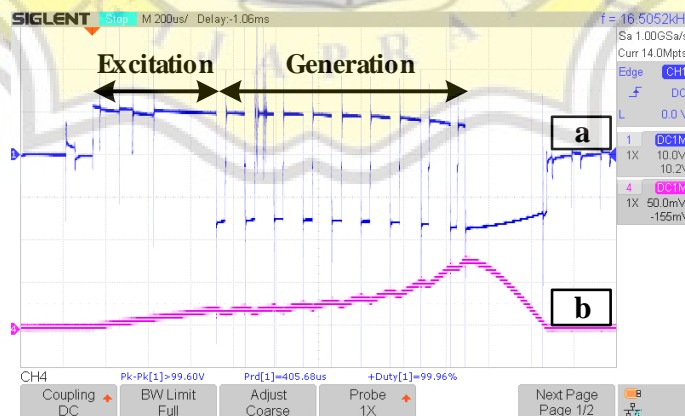
### 4.3.3. Hasil Pengujian Pada *Duty Cycle* 75 %

Pada pengujian terakhir, digunakan metode *magnetizing-demagnetizing* dengan *duty cycle* 75 %. Gambar-4.19 menunjukkan sinyal pensaklaran pada *duty cycle* 75%.



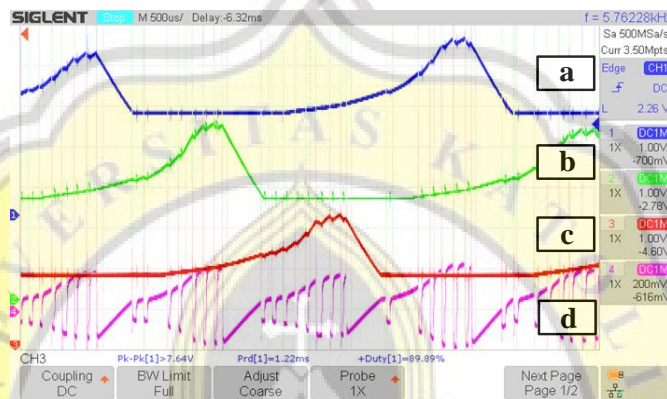
Gambar-4.19 Hasil percobaan sinyal pensaklaran saklar *high* (a) dan saklar *low* (b) pada *duty cycle* 75%

Pada Gambar-4.20 ditunjukkan gelombang tegangan dan arus salah satu fasa pada SRM. Karena *duty cycle* yang digunakan adalah 75 %, maka tegangan fasa berfluktuasi dan aktif di sisi positif lebih banyak dari pada sisi negatif. Pada gelombang arus fasa, wilayah *generating* pada *duty cycle* 75% adalah yang terbesar.



Gambar-4.20 Hasil percobaan tegangan fasa (a), dan arus fasa (b) menggunakan mode *magnetizing-demagnetizing* pada *duty cycle* 75%

Pada Gambar-4.21, ditunjukkan gelombang arus fasa 1, fasa 2, dan fasa 3 serta arus pengisian ke baterai yang dihasilkan oleh pengujian *duty cycle* 75 %. Arus dari setiap fasa mengalami kenaikan. Pengereman regeneratif optimal karena kecepatan SRM menurun dari 1800 RPM menjadi 1634 RPM dan terdapat arus pengisian ke baterai yaitu 0.372 Ampere.



**Gambar-4.21 Hasil percobaan arus fasa 1 (a), arus fasa 2 (b), arus fasa 3 (c), dan arus pengisian baterai (d) dengan menggunakan *duty cycle* 75%**

#### 4. 4. Pembahasan

Percobaan mengubah pengaturan nilai *duty cycle* menunjukkan perbedaan pada hasil simulasi maupun hasil percobaan pada *prototype*. Sudut eksitasi yang tepat dapat diperoleh dengan cara mengidentifikasi nilai induktansi SRM dengan menginjeksi pulsa frekuensi tinggi dan amplitudo rendah untuk menghasilkan impuls arus. Impuls arus memiliki karakteristik berkebalikan dengan induktansi SRM, sehingga posisi rotor dapat dideteksi. Eksitasi dilakukan ketika induktansi menurun atau ketika rotor menjauhi stator. Pemberian sudut eksitasi yang tepat dapat mempengaruhi efektifitas pengereman. Selain sudut eksitasi yang tepat, kecepatan putar SRM juga berpengaruh. Jika *prime mover* yang digunakan diputar

pada kecepatan yang terlalu rendah, maka pengereman akan menjadi tidak efektif. Sehingga diperlukan penentuan sudut eksitasi dan kecepatan putar awal yang sesuai.

Pada metode *magnetizing-demagnetizing*, pengaturan nilai *duty cycle* sangat mempengaruhi efektifitas pengereman regeneratif. Metode *magnetizing-demagnetizing* dilakukan dengan membangkitkan sinyal PWM sebagai sinyal pensaklaran. Saklar *high* dan *low* dioperasikan dengan logika PWM yang sama (mode *magnetizing* dan *demagnetizing*). Nilai arus fasa yang paling optimal untuk pengereman regeneratif, dapat diperoleh dengan membandingkan luas gelombang arus fasa. Berdasarkan hasil percobaan pada *duty cycle* 25%, wilayah arus eksitasi hampir sama besarnya dengan wilayah arus *generating*, sehingga nilai arus fasa pada metode *magnetizing-demagnetizing* adalah yang paling rendah, karena sedikit arus dari mode *magnetizing* dikembalikan ke baterai menggunakan mode *demagnetizing*. Pada *duty cycle* 50%, wilayah arus eksitasi kecil dan wilayah arus *generating* lebih besar, sehingga nilai arus fasa pada metode *magnetizing-demagnetizing* lebih besar dibandingkan pada *duty cycle* 25%, karena arus dari mode *magnetizing* sama dengan arus yang dikembalikan ke baterai menggunakan mode *demagnetizing*. Sedangkan pada *duty cycle* 75%, wilayah arus eksitasi kecil dan wilayah arus *generating* adalah yang terbesar, sehingga nilai arus fasa pada metode *magnetizing-demagnetizing* adalah yang paling tinggi, karena lebih banyak arus pada mode *magnetizing* yang dikembalikan ke baterai menggunakan mode *demagnetizing*.



Berdasarkan nilai arus masing-masing fasa, dapat diperoleh nilai arus pengisian baterai rata-rata. Berdasarkan hasil percobaan, pada *duty cycle* 25%, arus pengisian yang diperoleh wilayah *generating* pada arus fasa bernilai kecil, sehingga tidak menghasilkan arus pengisian dan baterai mengalirkan arus sebesar 0,176 Ampere. Pada *duty cycle* 50%, arus pengisian yang diperoleh wilayah *generating* pada arus fasa cukup besar, sehingga dihasilkan nilai arus pengisian ke baterai rata-rata sebesar 0,074 Ampere. Pada *duty cycle* 75%, arus pengisian yang diperoleh wilayah *generating* pada arus fasa adalah yang paling besar diantara *duty cycle* lainnya, sehingga dihasilkan nilai arus pengisian ke baterai rata-rata paling tinggi yaitu sebesar 0,372 Ampere.

Pada percobaan pengukuran kecepatan setelah pengereman, didapatkan hasil bahwa semakin besar nilai *duty cycle*, maka semakin besar perlambatan kecepatan untuk pengereman. Pada *duty cycle* 25% kecepatan menurun dari 1800 RPM menjadi 1742 RPM. Pada *duty cycle* 50% kecepatan menurun dari 1800 RPM menjadi 1704 RPM. Pada *duty cycle* 75% kecepatan menurun dari 1800 RPM menjadi 1634 RPM.

Berdasarkan percobaan pengaturan nilai *duty cycle*, semakin besar nilai *duty cycle* yang digunakan pada metode *magnetizing-demagnetizing*, maka pengereman regeneratif yang dihasilkan akan menjadi semakin optimal dari segi pengisian arus dan akhir kecepatan setelah pengereman. Sedangkan semakin kecil nilai *duty cycle* yang digunakan, maka pengereman regeneratif yang dihasilkan tidak optimal baik dari segi pengisian arus dan akhir kecepatan setelah pengereman.