

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan hasil pengujian yang dilakukan di laboratorium. Pengukuran gelombang telah dilakukan menggunakan osiloskop digital yang diverifikasi oleh simulasi *Simulink MATLAB*. Peralatan yang digunakan guna mendukung penelitian ini antara lain mikrokontroler dsPIC 30F4012, rangkaian *driver* TLP 250, konverter *asymmetric* menggunakan IGBT Semikron tipe SKM 40GD123D, *isolated power supply DC-DC*, sensor arus LEM HX-10P, *clamp on* Hantek CC-65, batere, dan osiloskop untuk menampilkan gelombang keluaran arus dan tegangan SRG.

Pada bab ini juga dijelaskan mengenai pengukuran gelombang keluaran arus dan tegangan pada setiap kondisi sudut penyalaaan dengan perubahan besar arus keluaran pada SRG. Melalui pergeseran sudut penyalaaan ini dapat dilihat perbedaan besaran arus keluaran yang dihasilkan.

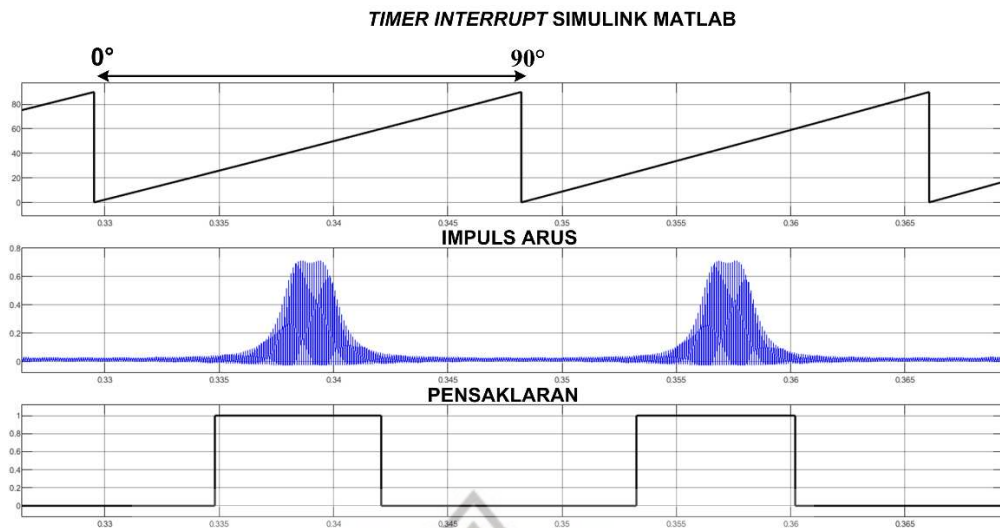
#### 4.2 Simulasi *Switched Reluctance Generator (SRG)* Menggunakan *Simulink MATLAB*

Sebelum melakukan pengujian pada *prototype* SRG dilakukan simulasi menggunakan *Simulink MATLAB*. Simulasi SRG yang dilakukan menggunakan *Simulink MATLAB* memiliki spesifikasi dan parameter seperti pada Tabel-4.1.

**Tabel-4. 1** Spesifikasi SRM pada *Simulink MATLAB*

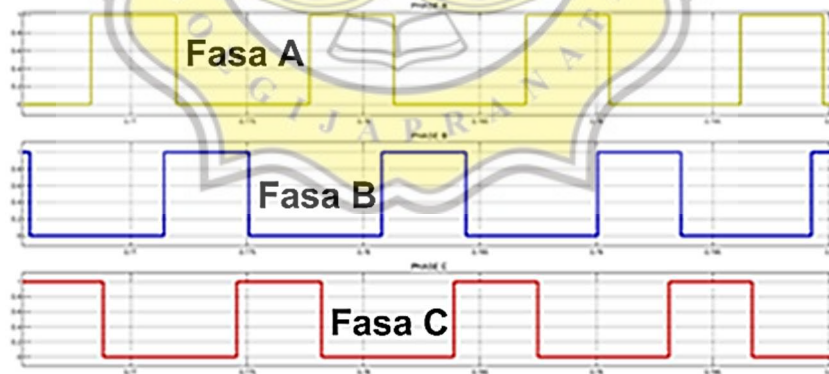
<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Unit</b>
Jumlah Fasa	3	-
Jumlah Stator	6	-
Jumlah Rotor	4	-
Tegangan	12	VDC
Resistansi	3.3	Ohm
Kecepatan	1750	RPM

Berdasarkan spesifikasi pada Tabel 2, dapat diketahui bahwa SRM yang tersedia pada *Simulink MATLAB* memiliki stator 6 kutub dan rotor 4 kutub. Simulasi SRG menggunakan rangkaian seperti pada rangkaian blok diagram Gambar-3.1. Untuk dapat menentukan profil induktansi pada simulasi, SRG akan diberikan sinyal modulasi pulsa pada pensaklaran diatur melalui *pulse generator Simulink MATLAB*. Berdasarkan pensaklaran tersebut maka dihasilkan impuls arus pada simulasi SRG. Simulasi SRG hanya dapat membangkitkan *timer interrupt* maksimal sebesar 90° derajat mekanik. Hasil keluaran impuls arus dan pembangkitan *timer interrupt* berdasarkan pensaklaran pada simulasi SRG ditunjukkan pada Gambar-4.1



**Gambar-4. 1** Hasil Keluaran Impuls Arus dan *Timer Interrupt* pada *Simulink MATLAB*

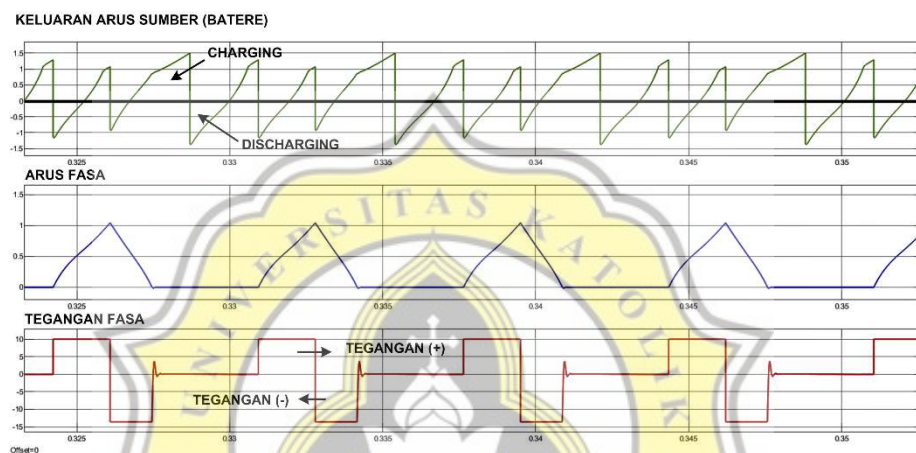
Impuls arus yang dihasilkan melalui pensaklaran tersebut, akan digunakan menentukan induktansi pada simulasi. Berdasarkan profil induktansi yang dihasilkan maka, dihasilkan pensaklaran pada simulasi SRG seperti Gambar-4.2.



**Gambar-4. 2** Hasil Pensaklaran Fasa A, B, dan C pada Simulasi *Simulink MATLAB*

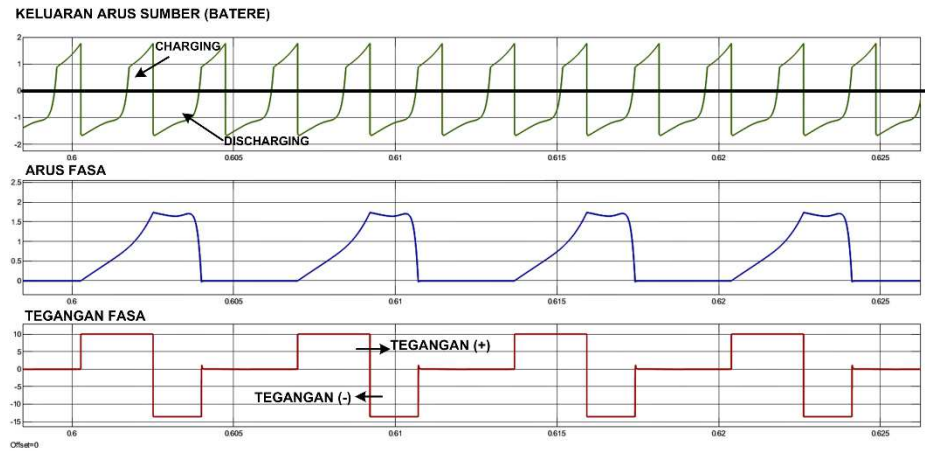
Simulasi SRG menggunakan sumber 12VDC dengan kecepatan 1750 RPM. Berdasarkan hasil pensaklaran pada Gambar-4.2 maka, dilakukan simulasi menjadi tiga kondisi. Kondisi pertama yaitu sudut penyalan simulasi SRG diaktifkan pada

$\theta_{on} = 15^\circ$  dan  $\theta_{off} = 65^\circ$ . Kondisi ini menghasilkan bentuk gelombang arus fasa yang tidak ideal dengan bagian wilayah yang tereksitasi lebih luas. Berdasarkan bentuk gelombang arus pada sumber, menghasilkan bagian wilayah arus yang diberikan pada beban ( arus *charging* ) memiliki luasan yang tidak teratur. Kondisi ini ditunjukkan seperti pada Gambar-4.3.



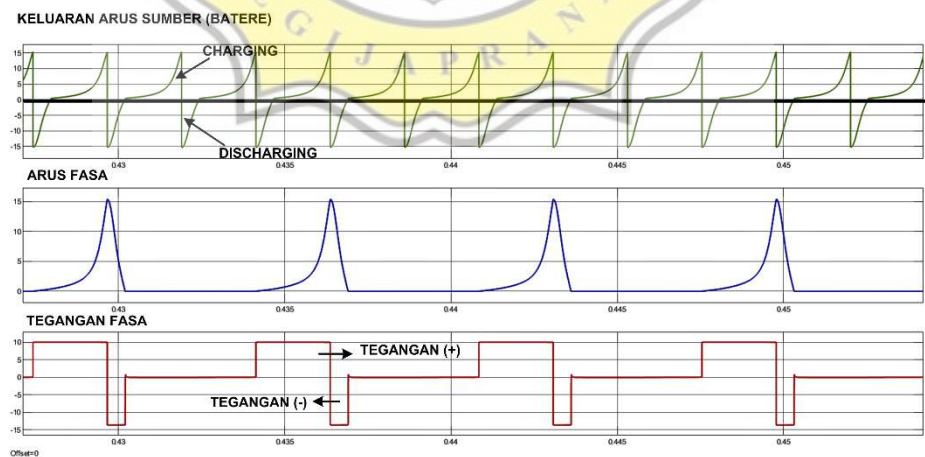
**Gambar-4. 3 Hasil Keluaran Gelombang pada Simulasi Kondisi Pertama**

Kondisi kedua simulasi SRG mengaktifkan sudut penyalan pada  $\theta_{on} = 20^\circ$  dan  $\theta_{off} = 80^\circ$ . Kondisi ini menghasilkan bentuk gelombang arus yang ideal. Hal ini ditandai dengan adanya puncak arus pada gelombang arus fasa. Bentuk gelombang arus *charging* yang dihasilkan memiliki luasan lebih sempit daripada arus yang dikembalikan ke sumber (arus *dicharging*). Berdasarkan hasil keluaran gelombang yang dihasilkan, kondisi ini memiliki kondisi dengan sudut penyalan yang optimal. Berikut ini ditunjukkan hasil keluaran pada kondisi kedua simulasi SRG.



**Gambar-4. 4 Hasil Keluaran Gelombang pada Simulasi Kondisi Kedua**

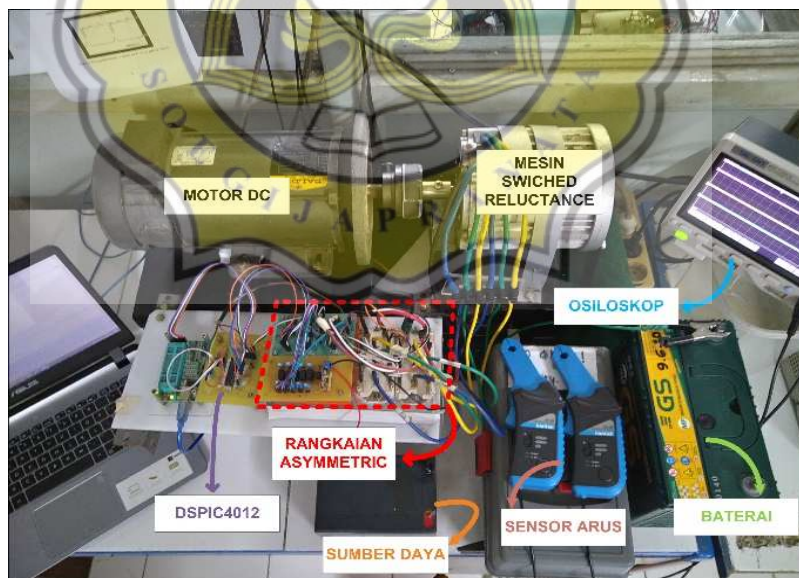
Kondisi ketiga simulasi SRG mengaktifkan sudut penyalan pada  $\theta_{on} = 10^\circ$  dan  $\theta_{off} = 40^\circ$ . Pada kondisi ini menghasilkan bentuk gelombang arus *charging* dan *discharging* memiliki luasan yang sama. Berdasarkan hasil keluaran gelombang arus fasa yang dihasilkan pada kondisi ini, arus yang dihasilkan cukup tinggi. Hasil keluaran gelombang pada kondisi ini ditunjukkan pada Gambar-4.4.



**Gambar-4. 5 Hasil Keluaran Gelombang pada Simulasi Kondisi Ketiga**

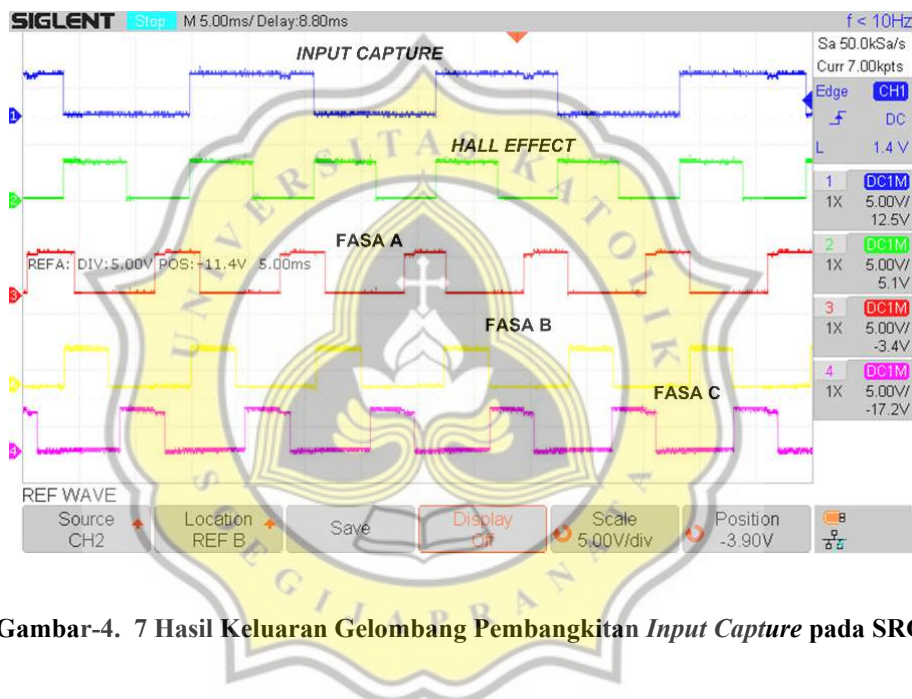
### 4.3 Hasil Pengujian Alat

Pada penelitian tugas akhir ini arus keluaran dan arus masukan yang dihasilkan SRG menggunakan mesin *switched reluctance* yang diputar oleh motor DC. Alat yang telah diuji ini merupakan alat dalam skala *prototype* sebagai pendukung pengambilan data dengan membandingkan antara teori dan hasil uji alat SRG menggunakan metode *single pulse* dengan *input capture*. Pada Gambar-4.6 ditampilkan *prototype Switched Reluctance Generator (SRG)* yang terdiri dari mesin SR, motor DC, mikrokontroler, *clamp on* Hantek CC-65, rangkaian *driver* TLP 250, *isolated power supply DC – DC* B1212s, sensor arus LEM-HX 10P, batere 12VDC, dan osiloskop sebagai penampil hasil keluaran gelombang arus dan tegangan SRG.



Gambar-4. 6 *Prototype SRG*

Tahap awal pada proses SRG adalah dengan memutar mesin *Switched Reluctance* (Mesin SR) dengan menggunakan motor DC sebagai pengganti energi kinetik. Selanjutnya SRG diputar untuk dapat menentukan posisi rotor dan stator melalui pembacaan sensor *hall effect* yang ada pada mesin SR. Hasil keluaran pembacaan sensor *hall effect* digunakan sebagai referensi untuk membangkitkan *input capture* fasilitas dsPIC 30F4012 seperti yang ditunjukkan pada Gambar-4.7.



**Gambar-4. 7 Hasil Keluaran Gelombang Pembangkitan *Input Capture* pada SRG**

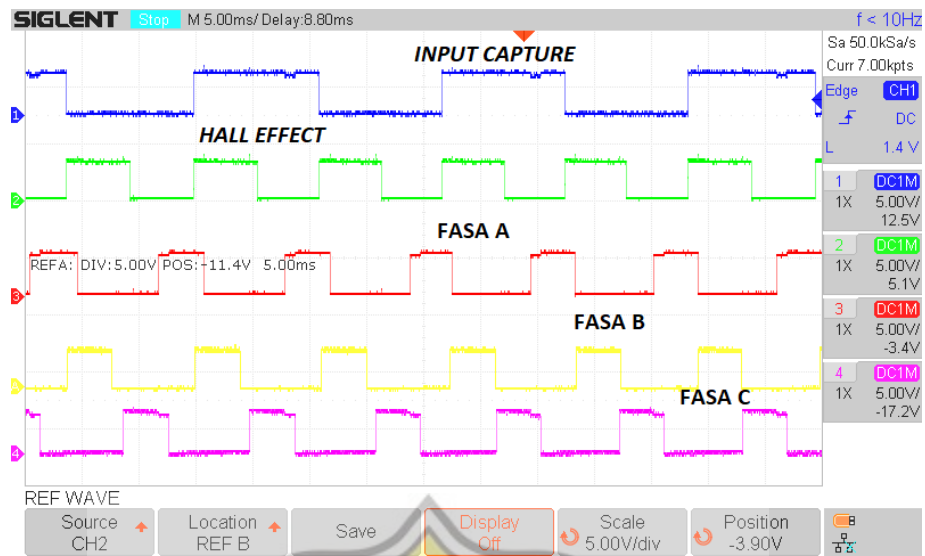
Untuk mendeteksi adanya induktansi pada SRG, mikrokontrol akan memberikan sinyal modulasi pulsa pada pensaklaran konverter [9]. Hasil keluaran dari pensaklaran konverter akan dideteksi oleh sensor arus LEM-HX 10P yang disebut impuls arus. Impuls arus inilah yang akan menjadi penentu induktansi pada SRG. Saat rotor bergerak mendekati stator, induktansi yang dihasilkan pada SRG akan meningkat. Rotor yang terletak sejajar dengan stator merupakan kondisi induktansi saat maksimal. Pada saat inilah SRG mulai diberi arus eksitasi sehingga

menghasilkan fluksi pada rotor dan stator. Fluksi tersebut akan menginduksi stator SRG sehingga menghasilkan *back-EMF*. Saat rotor mulai bergerak meninggalkan stator, SRG mulai dioperasikan sebagai *generating*. *Back-EMF* yang masih tersimpan pada belitan fasa akan dikembalikan ke sumber dalam mode *demagnetizing*.

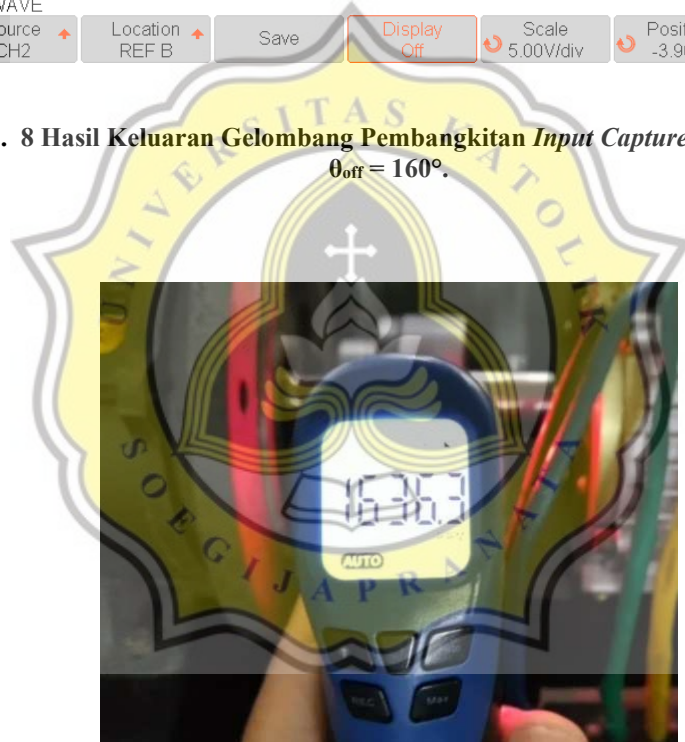
#### 4.3.1 Hasil Pengujian pada Sudut Penyalaan $\theta_{on} = 30^\circ$ dan $\theta_{off} = 160^\circ$

Dalam pengujian SRG metode *single pulse* dengan *input capture* fasilitas dsPIC 30F4012 menggunakan tiga kondisi sudut penyalaan. Kondisi pertama sudut penyalaan pada  $\theta_{on} = 30^\circ$  dan  $\theta_{off} = 160^\circ$ , kondisi kedua sudut penyalaan pada  $\theta_{on} = 40^\circ$  dan  $\theta_{off} = 170^\circ$ , dan kondisi ketiga pada  $\theta_{on} = 50^\circ$  dan  $\theta_{off} = 180^\circ$ . Pada pengujian ini penulis menggunakan parameter jarak interval antar fasa sama dengan menggeser setiap sudut sebesar  $10^\circ$  dari kondisi awal. Pada proses awal SRG diputar pada kecepatan 1636.3 RPM seperti Gambar-4.9 dengan tegangan 150VDC pada sudut penyalaan  $\theta_{on} = 30^\circ$  dan  $\theta_{off} = 160^\circ$  dan menghasilkan keluaran gelombang pensaklaran seperti pada Gambar-4.8. Pada Gambar-4.10 ditunjukkan hasil gelombang arus batere, arus fasa, dan tegangan fasa saat dilakukan pengujian.

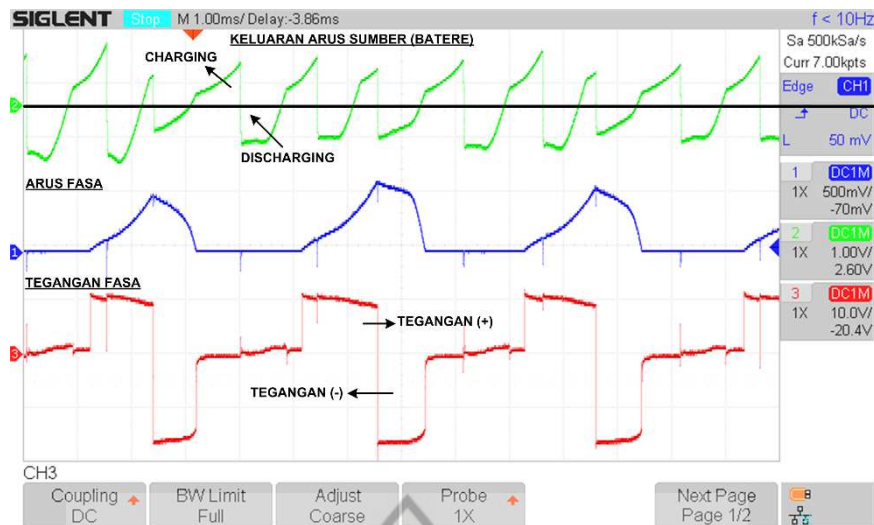




Gambar-4. 8 Hasil Keluaran Gelombang Pembangkitan *Input Capture* saat  $\theta_{on} = 30^\circ$  dan  $\theta_{off} = 160^\circ$ .



Gambar-4. 9 Referensi Kecepatan Saat SRG Dioperasikan  $\theta_{on} = 30^\circ$  dan  $\theta_{off} = 160^\circ$



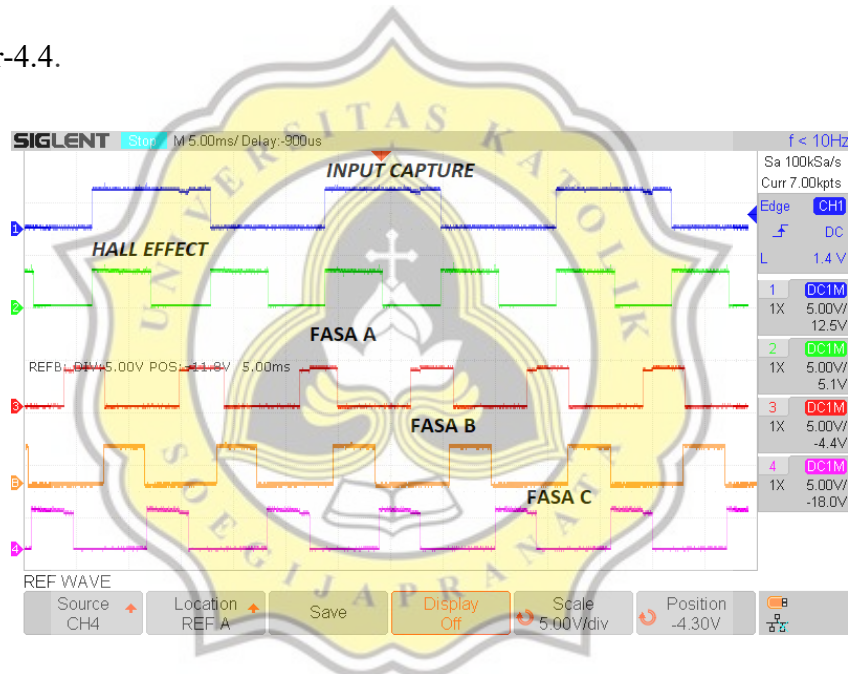
**Gambar-4. 10 Hasil Keluaran Gelombang pada Kondisi Pertama Pengujian Alat**

Bentuk arus batere yang dihasilkan memiliki bagian *charging* yang lebih luas daripada bagian *discharging*. Selain itu, bentuk gelombang arus fasa memiliki bagian yang tereksitasi cukup luas dengan puncak arus fasa yang tidak ideal. Pada kondisi sudut penyalan ini menghasilkan arus keluaran (*charging*) sebesar 5.2A dan arus yang dikembalikan ke sumber (*discharging*) sebesar 6.8A. Hasil tersebut diverifikasi oleh hasil simulasi *Simulink MATLAB* pada sudut penyalan  $\theta_{on} = 15^\circ$  dan  $\theta_{off} = 65^\circ$  yang ditunjukkan pada Gambar-4.3.

#### 4.3.2 Hasil Pengujian pada Sudut Penyalan $\theta_{on} = 40^\circ$ dan $\theta_{off} = 170^\circ$

Pada pengujian ini sudut penyalan digeser  $10^\circ$  dari kondisi awal dengan kecepatan 1647.1 RPM seperti pada Gambar-4.12 dan menghasilkan keluaran gelombang pensaklaran seperti pada Gambar-4.11. Berdasarkan hasil keluaran gelombang arus fasa memiliki bagian puncak arus yang cukup tinggi dan ideal yang

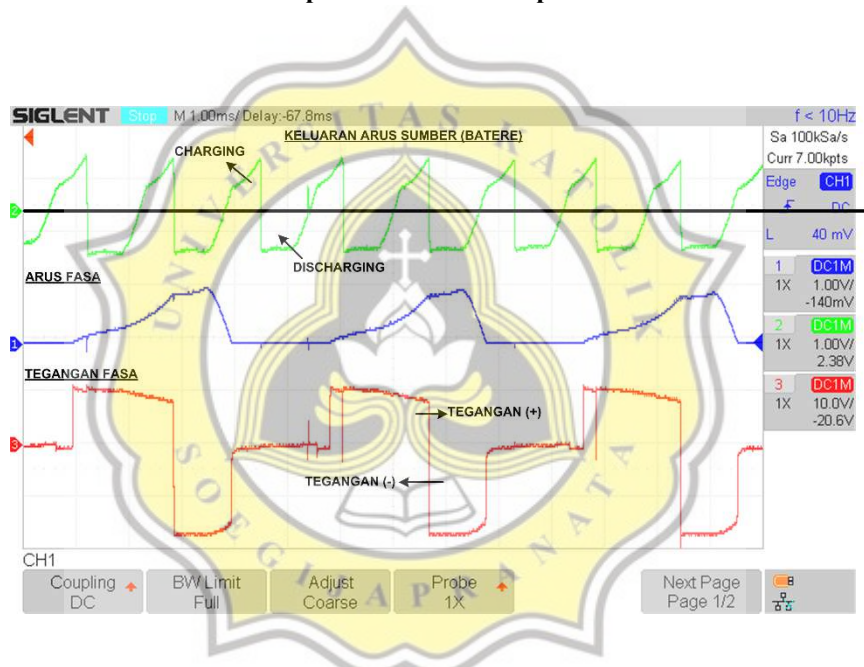
ditunjukkan pada Gambar-4.13. Gelombang arus *charging* memiliki bagian luasan yang lebih sempit daripada luasan arus *discharging*. Berdasarkan arus fasa yang ditunjukkan, bagian yang tereksitasi memiliki luasan yang lebih sempit daripada arus yang dibangkitkan. Sehingga dapat diketahui bahwa pada sudut penyalaan  $\theta_{on} = 40^\circ$  dan  $\theta_{off} = 170^\circ$  menghasilkan arus yang dikembalikan ke sumber paling optimal sebesar 7.6A dengan arus *charging* sebesar 5.2A. Hasil tersebut diverifikasi oleh hasil simulasi saat sudut penyalaan  $\theta_{on} = 40^\circ$  dan  $\theta_{off} = 170^\circ$  seperti pada Gambar-4.4.



**Gambar-4. 11 Hasil Keluaran Gelombang Pembangkitan *Input Capture* saat  $\theta_{on} = 40^\circ$  dan  $\theta_{off} = 170^\circ$**



Gambar-4. 12 Referensi Kecepatan Saat SRG Dioperasikan  $\theta_{on} = 40^\circ$  dan  $\theta_{off} = 170^\circ$

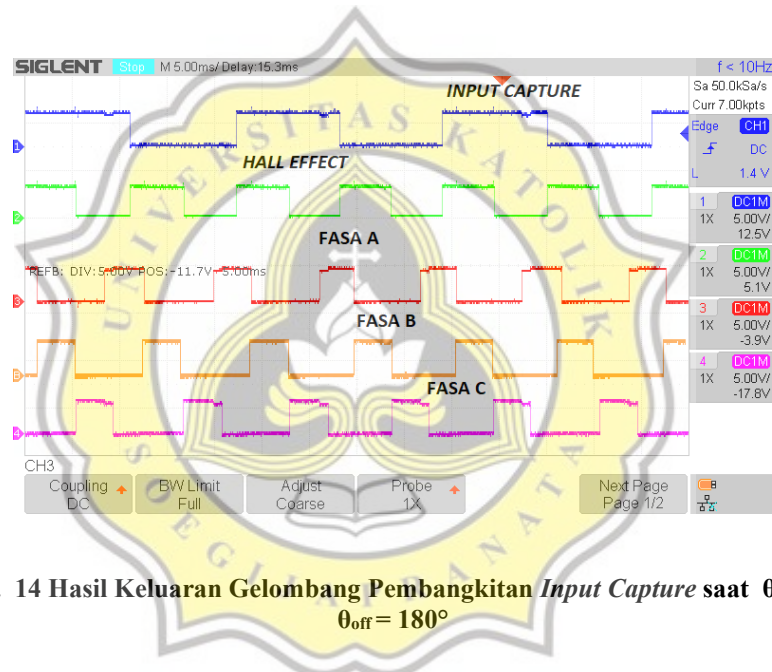


Gambar-4. 13 Hasil Keluaran Gelombang pada Kondisi Kedua Pengujian Alat

#### 4.3.3 Hasil Pengujian pada Sudut Penyalan $\theta_{on} = 50^\circ$ dan $\theta_{off} = 180^\circ$

Pada pengujian terakhir, sudut penyalan digeser sejauh  $20^\circ$  dari kondisi pertama. Sudut penyalan pada kondisi ketiga yaitu pada  $\theta_{on} = 50^\circ$  dan  $\theta_{off} = 180^\circ$  dengan kecepatan 1640.8 RPM yang ditunjukkan pada Gambar-4.15 dan menghasilkan keluaran gelombang pensaklaran seperti pada Gambar-4.14. Hasil keluaran gelombang arus batere menunjukkan bagian luasan arus *charging* dan arus

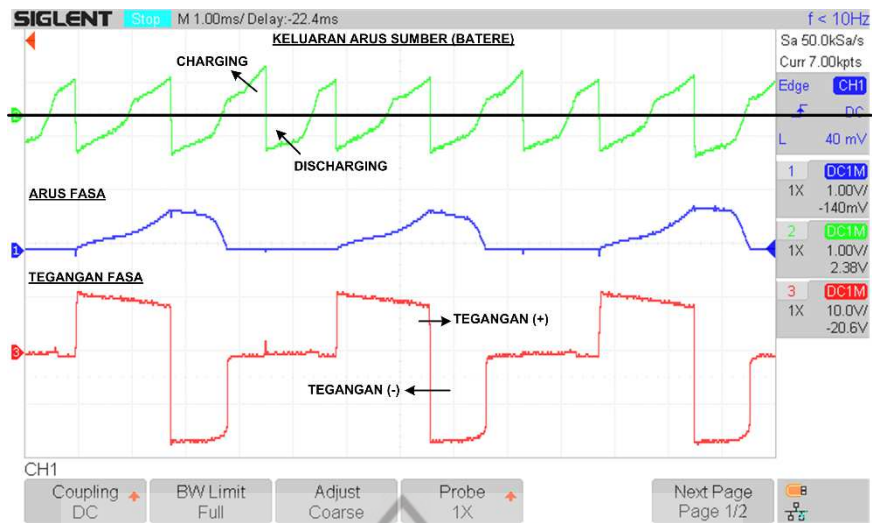
*discharging* memiliki luasan yang sama. Gelombang arus fasa yang ditunjukkan pada Gambar-4.16 memiliki bentuk puncak fasa turun dari kondisi sebelumnya. Pada gelombang arus fasa yang ditunjukkan, luasan arus yang tereksitasi memiliki luasan lebih luas daripada arus yang dibangkitkan. Arus *charging* dan arus *discharging* memiliki nilai yang hampir sama yaitu sebesar 5.2A dan 5.4A. Hal ini diverifikasi dengan hasil keluaran gelombang simulasi pada sudut penyalan  $\theta_{on} = 10^\circ$  dan  $\theta_{off} = 40^\circ$  seperti pada Gambar-4.5.



**Gambar-4. 14 Hasil Keluaran Gelombang Pembangkitan *Input Capture* saat  $\theta_{on} = 50^\circ$  dan  $\theta_{off} = 180^\circ$**



**Gambar-4. 15 Referensi Kecepatan Saat SRG Dioperasikan  $\theta_{on} = 50^\circ$  dan  $\theta_{off} = 180^\circ$**



Gambar-4. 16 Hasil Keluaran Gelombang pada Kondisi Ketiga Pengujian Alat

Berikut ini perubahan arus yang dihasilkan terhadap pergeseran sudut penyalaan yang ditunjukkan pada Tabel-4.2.

Tabel-4. 2 Perubahan Arus Pada Setiap Kondisi Sudut Penyalaan

Sudut Penyalaan Simulasi	Sudut Penyalaan Pengujian	Arus Charging Pengujian	Arus Discharging Pengujian
$\theta_{on} = 15^\circ$ dan $\theta_{off} = 65^\circ$	$\theta_{on} = 30^\circ$ dan $\theta_{off} = 160^\circ$	5.2A	6.8A
$\theta_{on} = 20^\circ$ dan $\theta_{off} = 80^\circ$	$\theta_{on} = 40^\circ$ dan $\theta_{off} = 170^\circ$	5.2A	7.6A
$\theta_{on} = 10^\circ$ dan $\theta_{off} = 40^\circ$	$\theta_{on} = 50^\circ$ dan $\theta_{off} = 180^\circ$	5.2A	5.4A

#### 4.4 Pembahasan

Saat ini *Switched Reluctance Generator* (SRG) mulai diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga angin. Hal ini karena SRG memiliki beberapa keunggulan seperti perawatan yang mudah dan desain sederhana. Keunggulan perawatan yang sederhana sangat sesuai jika diterapkan pada pembangkit listrik tenaga angin. Biasanya, pembangkit listrik tenaga angin sebelumnya menggunakan generator

yang memiliki belitan pada bagian stator dan rotornya. Belitan tersebut memerlukan *slip ring* dalam proses eksitasi. *Slip ring* akan habis seiring waktu sehingga dibutuhkan perawatan secara berkala.

Sudut penyalaan diatur dengan cara mengaktifkan  $\theta_{on}$  pada mode operasi *magnetizing* yaitu proses rotor diberi arus eksitasi. Sehingga SRG akan mengubah rotor menjadi magnet sesaat. Setelah rotor menjadi magnet sesaat, rotor akan menginduksi stator dan menghasilkan *back-EMF*. Saat rotor hendak bergerak menjauhi stator, sisa *back-EMF* yang masih tersimpan pada belitan fasa akan dikembalikan ke sumber dengan mematikan  $\theta_{off}$  melalui mode operasi *demagnetizing*.

Berdasarkan hasil pembangkitan *input capture* dengan referensi sensor *hall effect*,  $\theta_{on}$  dan  $\theta_{off}$  memiliki interval sebesar  $130^\circ$ . Pada setiap pengujian yang dilakukan, kondisi sudut penyalaan akan digeser sebesar  $10^\circ$  dari kondisi awal. Kondisi sudut penyalaan dibagi menjadi tiga kondisi yaitu

Pengujian ini dilakukan untuk mensimulasikan SRG menggunakan mesin *switched reluctance* yang diputar oleh energi kinetik menggunakan motor DC. Metode pensaklaran yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode *single pulse* dengan menggeser sudut penyalaan. Pergeseran sudut penyalaan akan diatur menggunakan *input capture* fasilitas dsPIC 30F4012. Kondisi pertama pada  $\theta_{on} = 30^\circ$  dan  $\theta_{off} = 160^\circ$ , kondisi kedua pada  $\theta_{on} = 40^\circ$  dan  $\theta_{off} = 170^\circ$ , dan kondisi ketiga pada  $\theta_{on} = 50^\circ$  dan  $\theta_{off} = 180^\circ$ . Kondisi pengujian ini telah diverifikasi dengan kondisi sudut penyalaan yang telah disimulasikan. Tiga kondisi sudut penyalaan

pada simulasi antara lain: kondisi pertama pada  $\theta_{on} = 15^\circ$  dan  $\theta_{off} = 65^\circ$ , kondisi kedua pada  $\theta_{on} = 20^\circ$  dan  $\theta_{off} = 80^\circ$ , dan kondisi ketiga pada  $\theta_{on} = 10^\circ$  dan  $\theta_{off} = 40^\circ$ .

Kondisi pertama  $\theta_{on} = 30^\circ$  dan  $\theta_{off} = 160^\circ$  memiliki arus *charging* sebesar 5.2A dengan arus *discharging* sebesar 6.8A. Kondisi kedua pada  $\theta_{on} = 40^\circ$  dan  $\theta_{off} = 170^\circ$  memiliki arus *charging* sebesar 5.2A dengan arus *discharging* sebesar 7.6A. Kondisi ketiga pada  $\theta_{on} = 50^\circ$  dan  $\theta_{off} = 180^\circ$  memiliki arus *charging* sebesar 5.2A dengan arus *discharging* 5.4A. SRG dapat diindikasikan berhasil jika arus *charging* memiliki nilai yang lebih kecil daripada arus *discharging* dengan bentuk gelombang arus ideal atau memiliki puncak arus pada gelombang.

