

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Modul yang telah dibuat terdiri dari beberapa rangkaian diantaranya rangkaian *driver*, *Inverter lima tingkat* satu fasa yang menggunakan MOSFET tipe IRFP260N. Pengujian ini menggunakan masukan sinyal referensi dan masukan sinyal aktual. Sinyal referensi arus gelombang sinusoidal menggunakan *Audio Function Generator* (AFG) dan untuk memasukan arus aktualnya menggunakan sensor arus tipe LEM HX 10-P.

Pada bab ini menjelaskan tentang hasil pengujian dan simulasi dari implementasi sistem kendali proporsional integral (PI). Hasil yang ditampilkan berupa hasil pengukuran dari sinyal keluaran pada perangkat keras yang telah dibuat. Pertama-tama membuat simulasi dengan menggunakan Rangkaian analog yang diimplementasikan pada *C Block* dalam *software Power Simulation* (PSIM) untuk mendapatkan gambaran hasil yang mendekati kondisi sebenarnya. Analisa dilakukan pada simulasi yang telah dibuat. Langkah selanjutnya dengan melakukan pengujian pada perangkat keras menggunakan mikrokontroler Arduino Due. Prototipe dilakukan dengan cara membuat rangkaian.

4.2 Hasil Simulasi *Power Simulation* (PSIM)

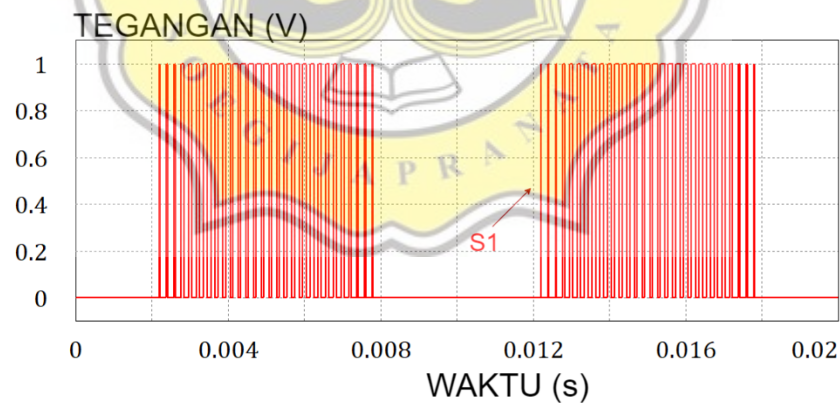
Simulasi dilakukan dengan membuat rangkaian analog dan diimplementasikan ke dalam *C Block*. *C Block* berfungsi sebagai mikrokontroler

pada *software Power Simulation* PSIM. Keluaran sinyal dari *C Block* digunakan untuk setiap saklar daya pada *inverter* lima tingkat satu fasa. Simulasi ini bertujuan sebagai tolak ukur serta gambaran hasil dalam pembuatan perangkat keras. Parameter yang dipakai pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Nilai Parameter Simulasi.

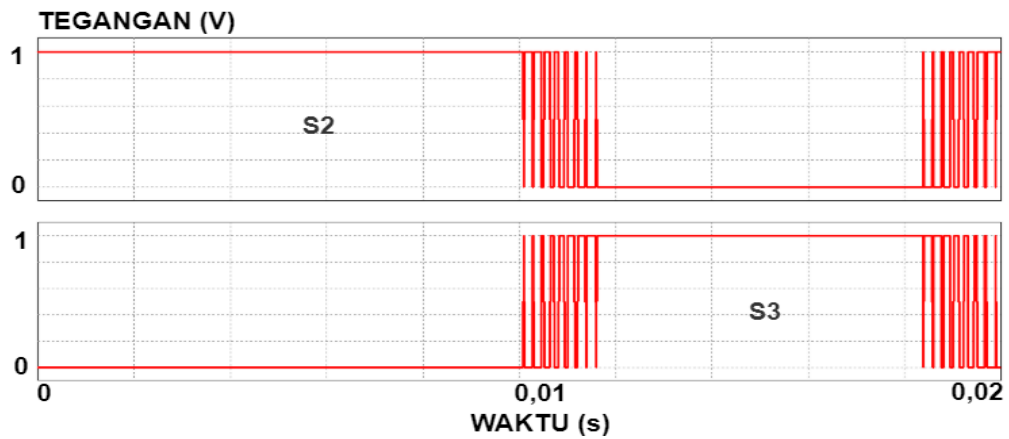
PARAMETER	NILAI
V1	35V
V2	35V
Induktor	2mh
Frekuensi Pensaklaran	5KHz

Hasil sinyal perbandingan pada saklar daya S1 *Open Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.1. Sinyal pada pensaklaran S1 didapatkan dari perbandingan dua sinyal sinusoidal dan dua sinyal pembawa yang diberi gerbang logika OR



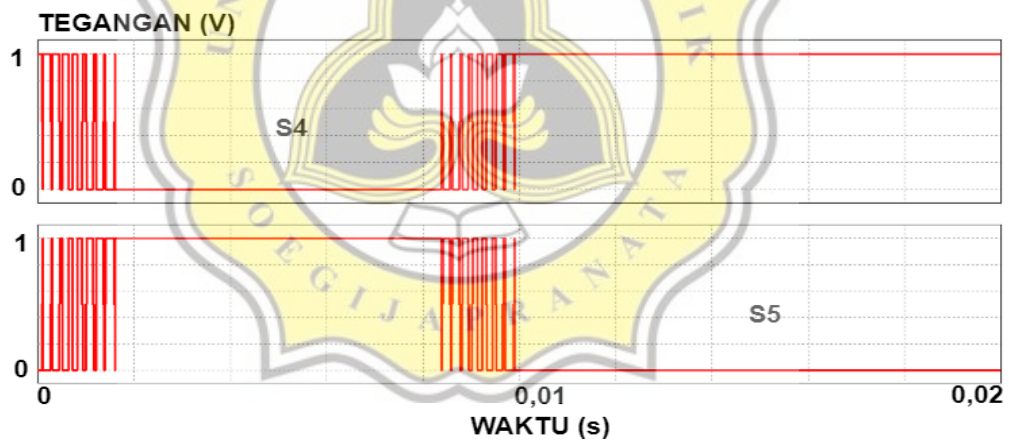
Gambar 4.1. Pensaklaran Pada Saklar Daya S1 *Open Loop*

Hasil sinyal perbandingan pada saklar daya S2 dan S3 *Open Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.2. Sinyal yang dihasilkan S2 dan S3 saling berlawanan untuk menghindari *short circuit* pada rangkaian.



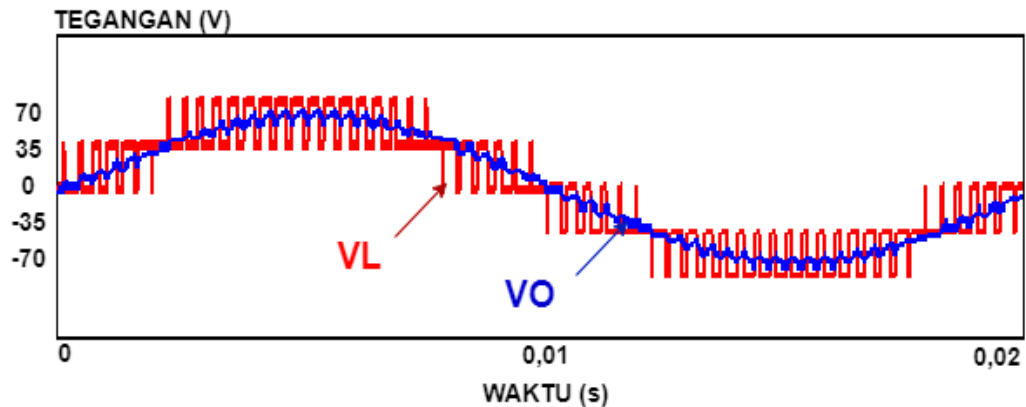
Gambar 4.2. Pensaklaran Pada Saklar Daya S2 dan S3 *Open Loop*

Hasil sinyal perbandingan pada saklar daya S4 dan S5 *Open Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.3. Sinyal yang dihasilkan S4 dan S5 saling berlawanan untuk menghindari *short circuit* pada rangkaian.



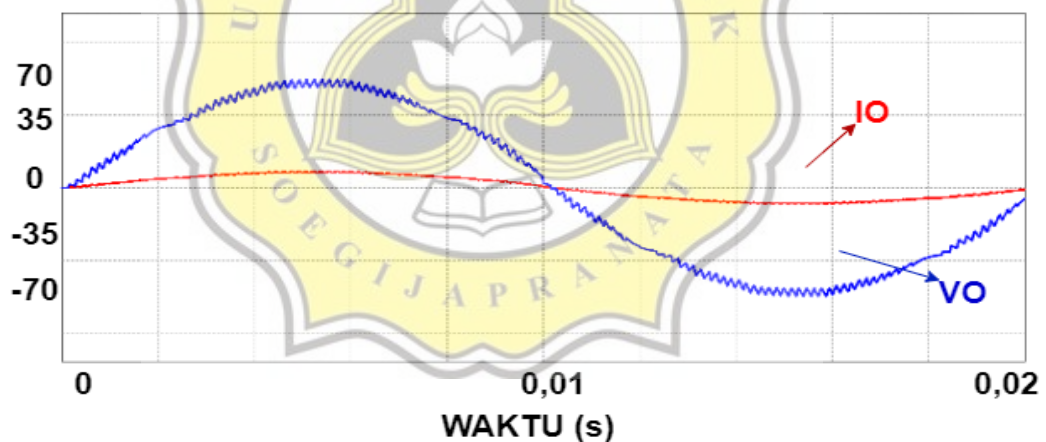
Gambar 4.3. Pensaklaran pada saklar daya S4 dan S5 *Open Loop*

Tapis induktor digunakan sebagai *filter* pada keluaran *inverter* lima tingkat. Keluaran tegangan sebelum dan sesudah induktor *Open Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Bentuk Simulasi Gelombang Tegangan Keluaran *Inverter Lima Tingkat* Sebelum Induktor (VL) dan Sesudah Induktor (VO) *Open Loop*

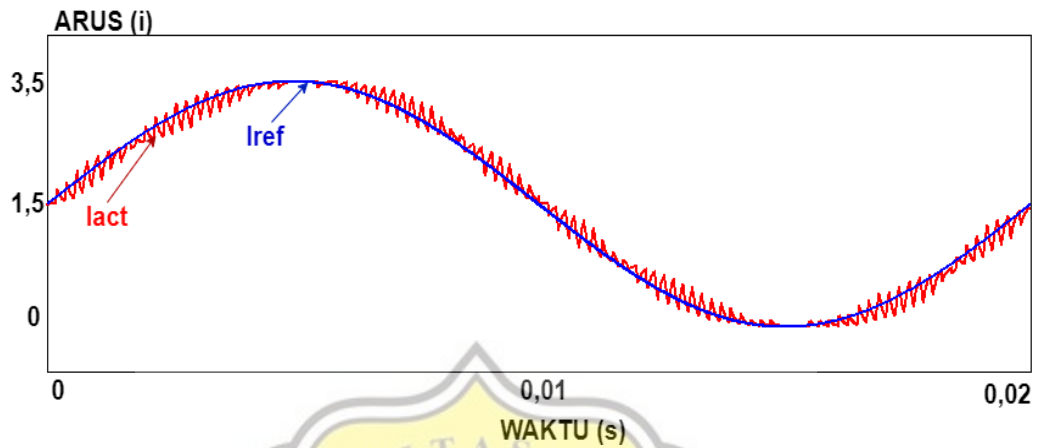
Bentuk Simulasi Gelombang Arus dan Tegangan *Open Loop* terdapat pada Gambar 4.5. Hasil simulasi gelombang arus (IO) dan gelombang tegangan (VO) sebelum ditambah kendali proporsional integral (PI).



Gambar 4.5. Bentuk Simulasi Gelombang Arus dan Tegangan *Open Loop*

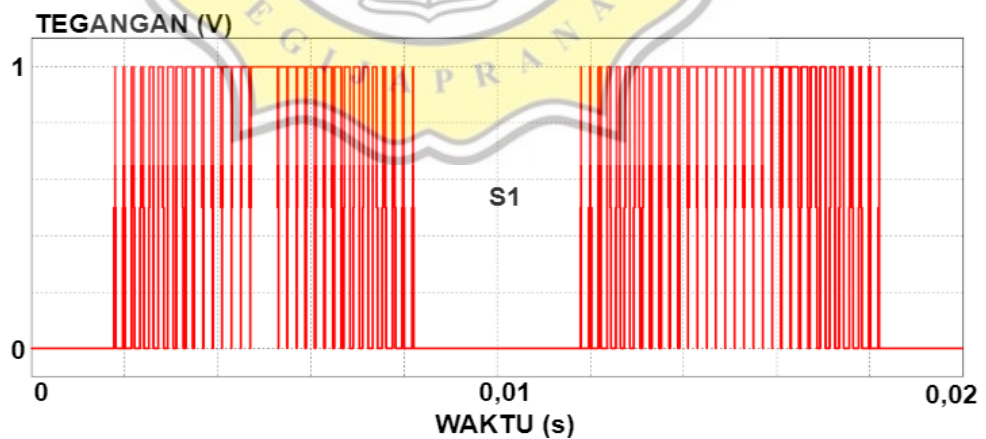
Kontrol *unipolar* yang telah dibuat, digabungkan dengan kontrol kendali arus. Sinyal referensi dikurangi sinyal aktual akan menghasilkan sinyal *error*, lalu diolah dengan kontroler jenis PI dan menghasilkan sinyal kontrol. Sinyal kontrol tersebut dimodulasi dengan sinyal pembawa sehingga menghasilkan modulasi lebar

pulsa sinusoidal. Bentuk simulasi gelombang arus aktual dan arus referensi *inverter* lima tingkat dapat dilihat pada Gambar 4.6.



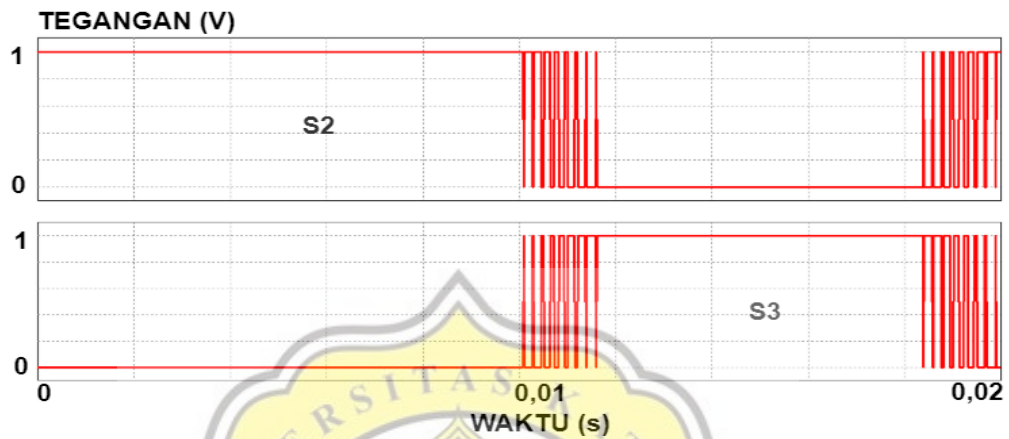
Gambar 4.6. Bentuk Simulasi Gelombang Arus Aktual (biru) dan Referensi Arus *Inverter* Lima Tingkat

Setelah arus aktual mengikuti arus referensi, maka selanjutnya dilihat pensaklaran pada setiap saklar daya. Pensaklaran Pada Saklar Daya S1 *Closed Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.7.



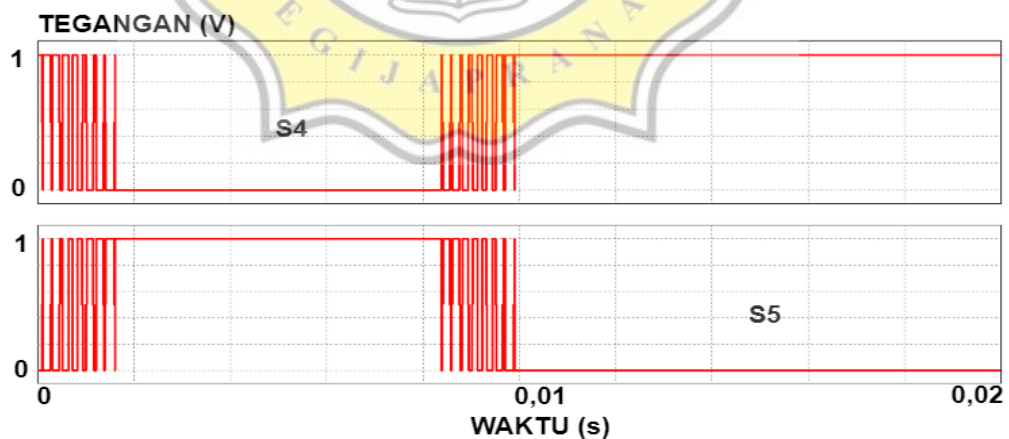
Gambar 4.7. Pensaklaran Pada Saklar Daya S1 *Closed Loop*

Pensaklaran Pada Saklar Daya S2 dan S3 *Closed Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.8. Sinyal yang dihasilkan S2 dan S3 saling berlawanan untuk menghindari *short circuit* pada rangkaian.



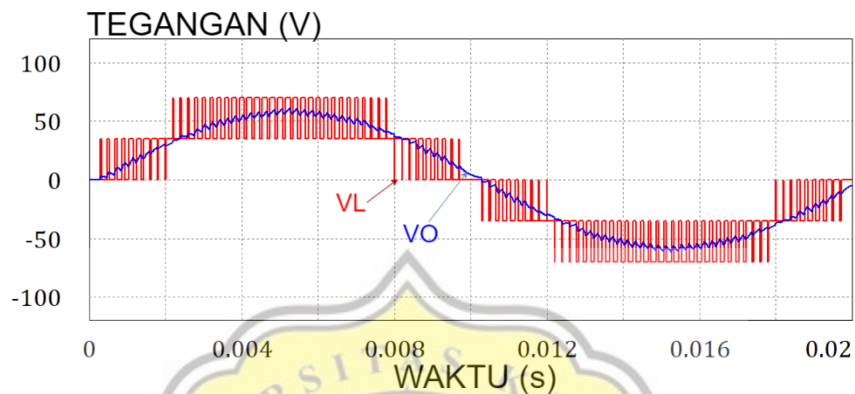
Gambar 4.8. Pensaklaran Pada Saklar Daya S2 dan S3 *Closed Loop*

Hasil sinyal perbandingan pada saklar daya S4 dan S5 *Closed Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.9. Sinyal yang dihasilkan S4 dan S5 saling berlawanan untuk menghindari *short circuit* pada rangkaian.



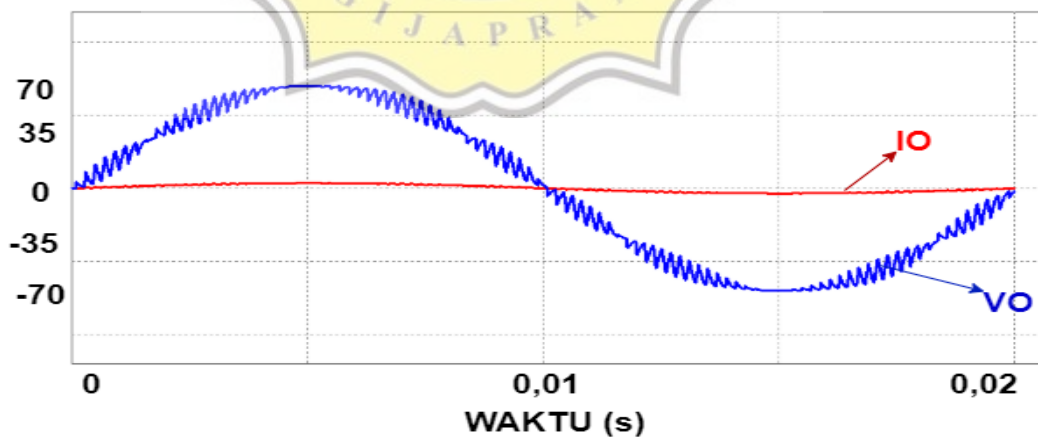
Gambar 4.9. Pensaklaran pada saklar daya S4 dan S5 *Closed Loop*

Tapis induktor digunakan sebagai *filter* pada keluaran *inverter* lima tingkat. Keluaran tegangan sebelum dan sesudah induktor *Closed Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Bentuk Simulasi Gelombang Tegangan Keluaran *Inverter* Lima Tingkat Sebelum Induktor (VL) dan Sesudah Induktor (VO) *Closed Loop*

Keluaran tegangan (VO) *inverter* dan arus keluaran dari *inverter* (IO) dapat dilihat pada Gambar 4.11. Hasil keluaran sudah digunakan kendali proporsional integral (PI).



Gambar 4.11. Bentuk Simulasi Gelombang Arus dan Tegangan *Closed Loop*

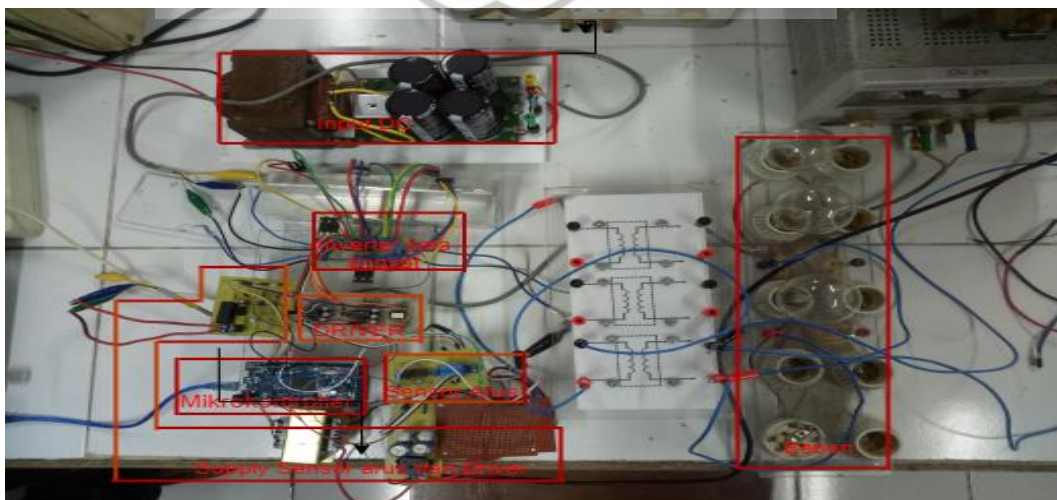
Hasil simulasi THD arus *inverter* lima tingkat dapat dilihat pada Gambar 4.12. Hasil THD arus sebesar 4.05%.

THD	
Fundamental Frequency	5.000000e+001 HZ
VO	4.0506571e-002

Gambar 4.12. Hasil Simulasi THD Arus *Inverter* Lima Tingkat

4.3 Hasil Pengujian Perangkat Keras

Simulasi yang sudah dibuat kemudian diimplementasikan menjadi sebuah perangkat keras. Perangkat keras ini terdiri dari 2 buah sumber, rangkaian catu daya, rangkaian *driver*, mikrokontroler, rangkaian sensor arus dan rangkaian *inverter* lima tingkat satu fasa. Beban yang dipakai yaitu beban bohlam.



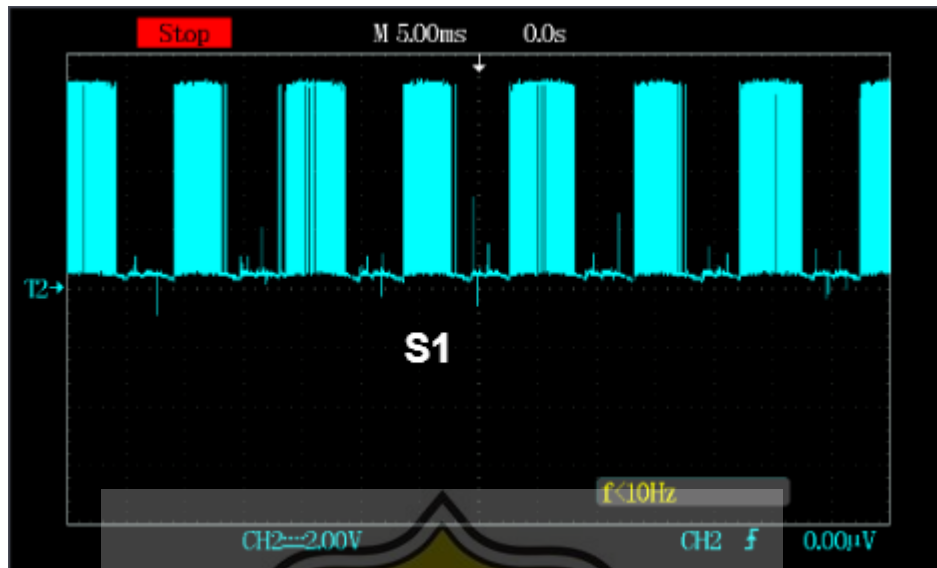
Gambar 4.13. Perangkat Keras *Inverter* Lima Tingkat

Strategi kontrol *unipolar* yang diajukan di implementasi pada perangkat keras pada Gambar 4.13 dengan menggunakan dua buah buah *input* DC, DC-DC konverter B1212S-1W, *driver* yang terdiri dari ir2110 dan tlp 250. Sensor arus yang digunakan LEM HX 10-P dan menggunakan mikrokontroler Arduino Due. Beban tiga bohlam 100 Watt digunakan. Untuk implementasi *inverter* lima tingkat satu fasa, digunakan beberapa parameter dalam pembuatan perangkat keras ini. Nilai parameter implementasi dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Nilai Parameter Implementasi.

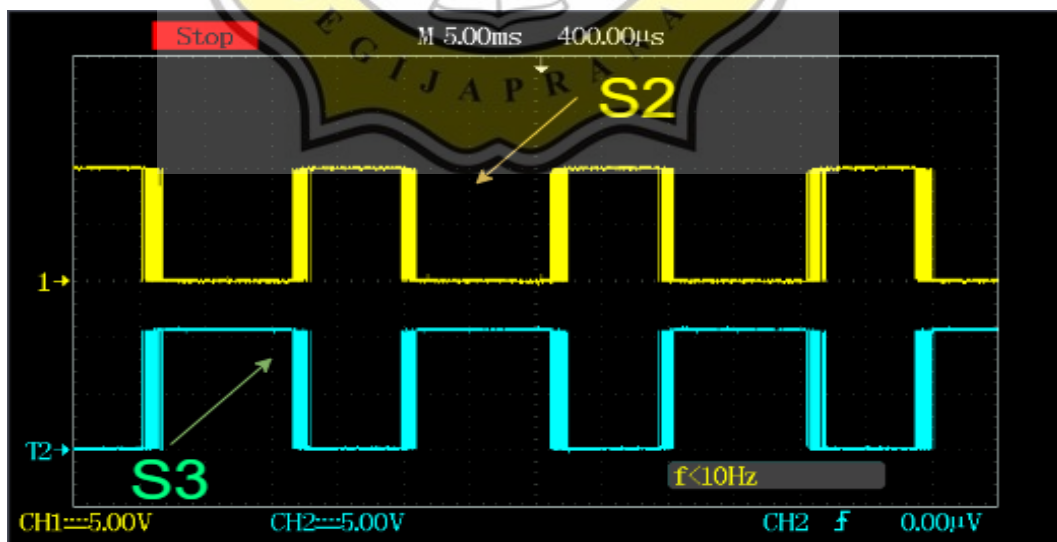
PARAMETER	NILAI
V1	35V
V2	35V
Induktor	2mh
Bohlam	100W
Frekuensi Pensaklaran	5KHz

Implementasi dari perbandingan gelombang sinyal sinusoidal dan sinyal pembawa yang telah dilakukan menghasilkan modulasi lebar pulsa sinusoidal. Hasil ini digunakan untuk pensaklaran pada setiap saklar daya. Implementasi sinyal pensaklaran pada *S1 Open Loop* terdapat pada Gambar 4.14. Sinyal ini sama dengan simulasi sinyal pensaklaran pada *S1 open loop* yang telah dibuat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.14. Sinyal Pensaklaran Pada S1 *Open Loop*

Sinyal pensaklaran pada S2 dan S3 *open loop* dapat dilihat pada Gambar 4.15. Sinyal ini sama dengan simulasi sinyal pensaklaran pada S2 dan S3 *open loop* yang telah dibuat pada Gambar 4.2.



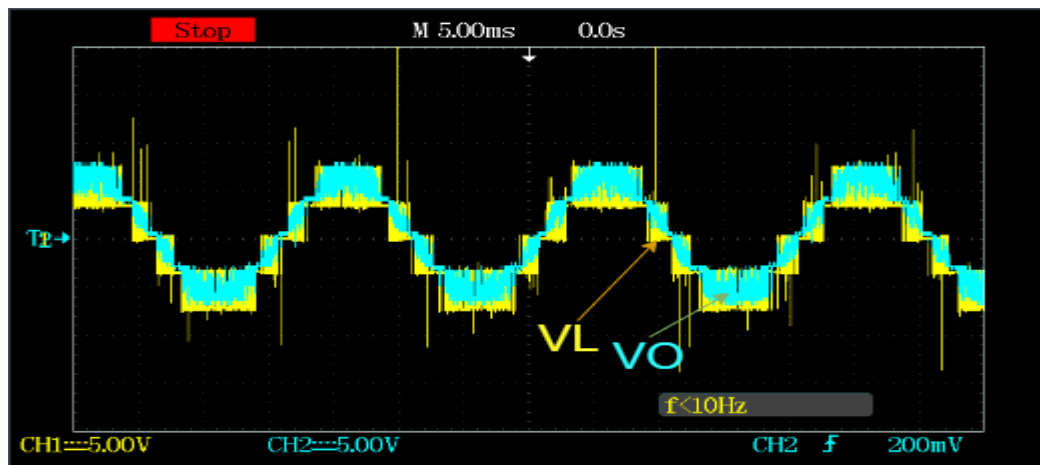
Gambar 4.15. Sinyal Pensaklaran Pada S2 dan S3 *Open Loop*

Sinyal pensaklaran pada S4 dan S5 *Open Loop* dapat dilihat pada Gambar 4.16. Sinyal ini sama dengan simulasi sinyal pensaklaran pada S4 dan S5 *open loop* yang telah dibuat pada Gambar 4.3.



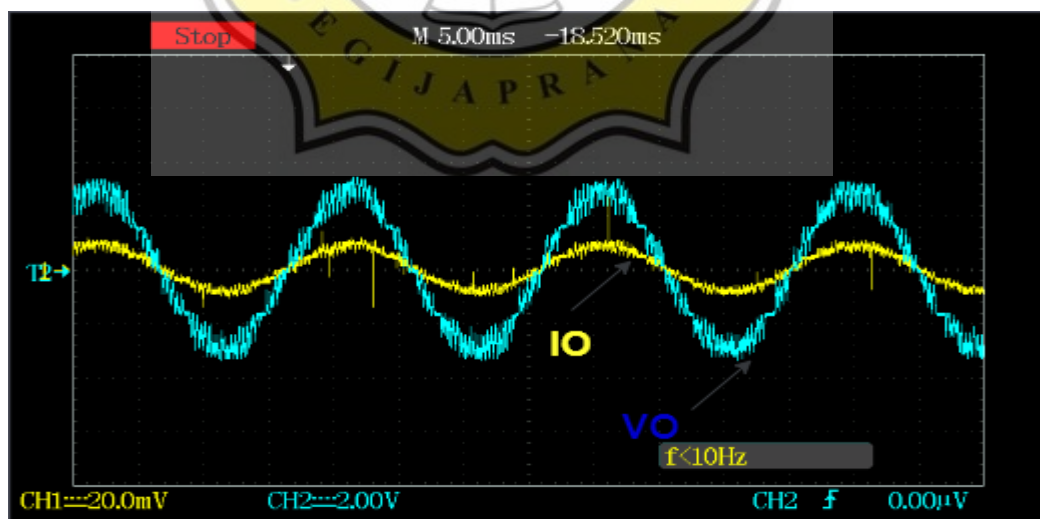
Gambar 4.16. Sinyal Pensaklaran Pada S4 dan S5 *Open Loop*

Keluaran tegangan antar lengan membentuk tingkatan tegangan, hal ini terjadi karena sinyal modulasi lebar pulsa sinusoidal diimplementasikan pada semua saklar daya. Tingkatan tegangan yang dihasilkan yaitu $2E$ dan E pada keluaran antar lengan. Tegangan $2E$ didapat dari penjumlahan tegangan $V1$ dan $V2$. Tegangan E didapatkan dari nilai tegangan $V2$. Tapis induktor digunakan pada keluaran *inverter* lima tingkat. Bentuk gelombang tegangan *inverter* sebelum dan sesudah induktor *open loop* dapat dilihat pada Gambar 4.17. Hasil ini sama dengan simulasi bentuk gelombang tegangan sebelum dan sesudah induktor *open loop* yang terdapat pada Gambar 4.4.



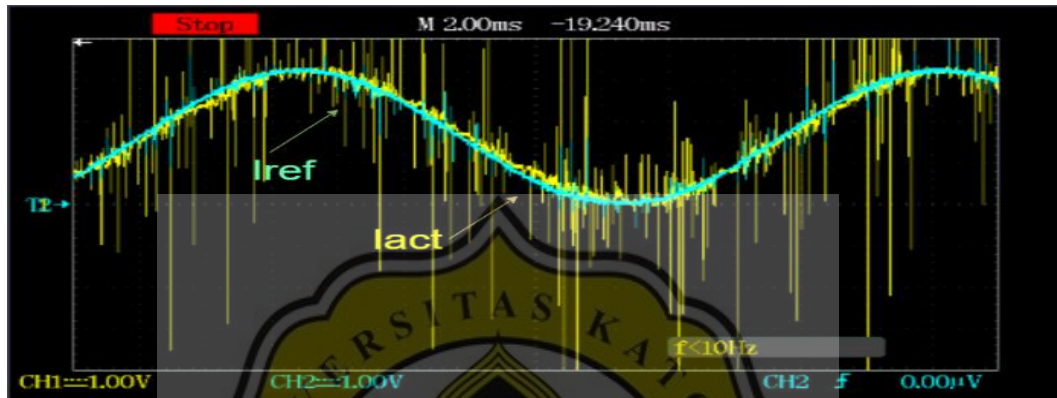
Gambar 4.17. Bentuk Gelombang Tegangan *Inverter* Lima Tingkat Sebelum (kuning) dan Sesudah Induktor (hijau) *Closed Loop*.

Hasil keluaran arus dan tegangan *inverter* lima tingkat *open loop* dapat dilihat pada Gambar 4.18. Nilai arus keluaran *inverter* lima tingkat sebesar 0,7 Ampere dan tegangan keluaran *inverter* lima tingkat sebesar 70 VPP. Hasil ini sesuai dengan simulasi gelombang arus aktual dan arus referensi *open loop* yang terdapat pada Gambar 4.5.



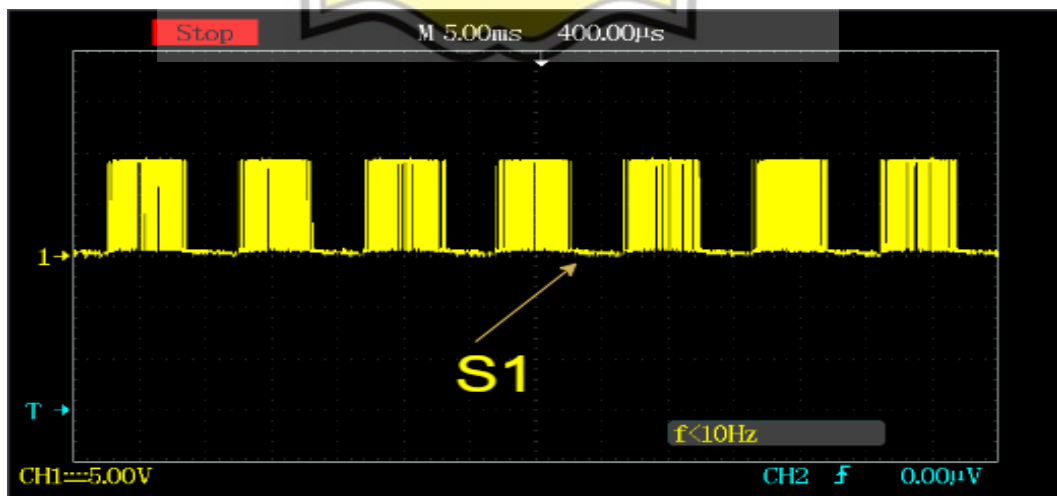
Gambar 4.18. Bentuk Gelombang Arus (kuning) dan Tegangan (hijau) *Inverter* Lima Tingkat *Open Loop*.

Hasil implementasi pada perangkat keras membuktikan bahwa arus aktual mengikuti arus referensi yang ditunjukkan pada Gambar 4.19. Nilai arus aktual sebesar 2.24 VRMS dan arus referensi sebesar 2.12 VRMS. Hasil ini sesuai dengan simulasi gelombang arus aktual dan arus referensi yang terdapat pada Gambar 4.6.



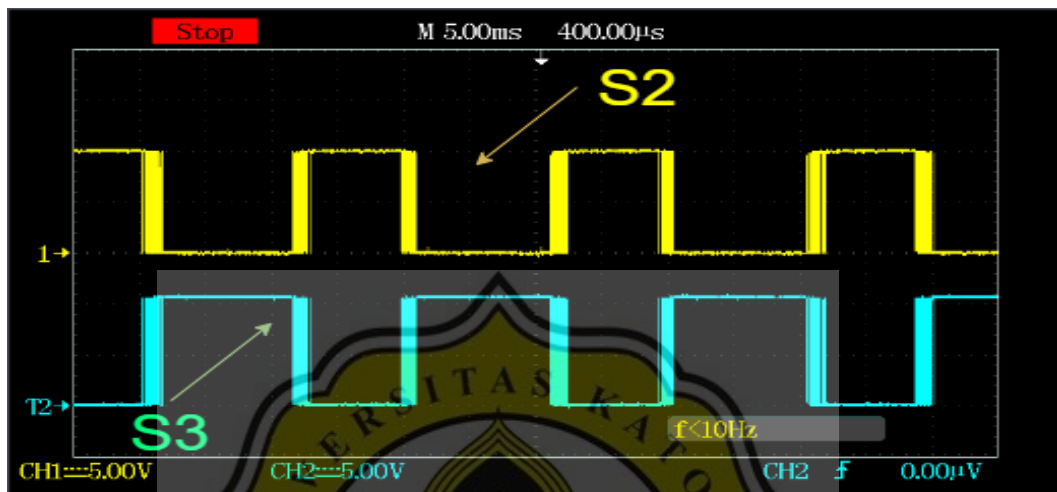
Gambar 4.19. Bentuk Gelombang Arus Aktual (kuning) dan Arus Referensi *Inverter Lima Tingkat Closed Loop*.

Implementasi sinyal pensaklaran pada S1 *closed Loop* terdapat pada Gambar 4.20. Sinyal ini sama dengan simulasi sinyal pensaklaran pada S1 *closed loop* yang telah dibuat pada Gambar 4.7.



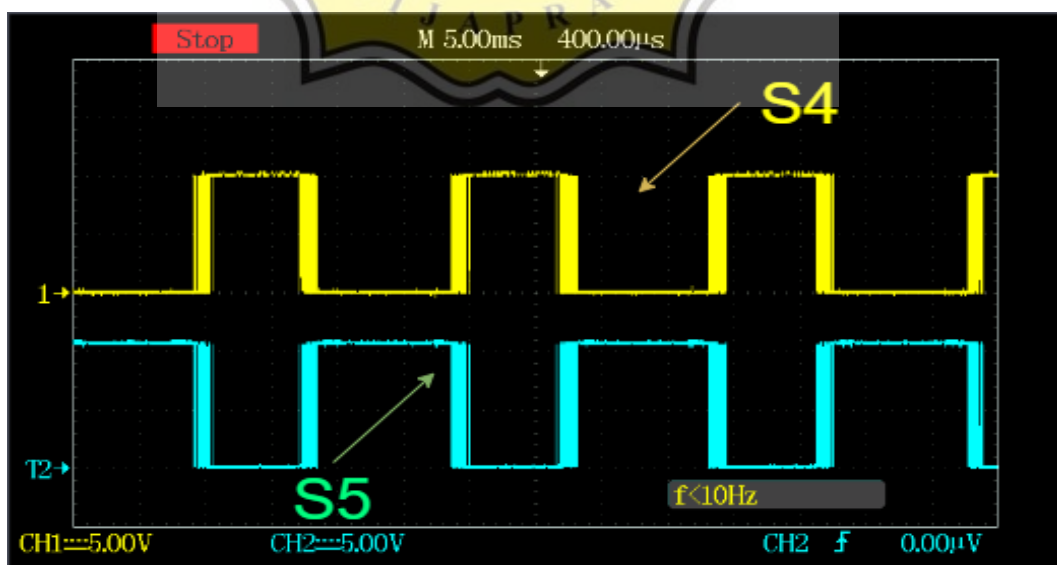
Gambar 4.20. Sinyal Pensaklaran Pada S1 *Closed Loop*

Sinyal pensaklaran pada S2 dan S3 *closed loop* dapat dilihat pada Gambar 4.21. Sinyal ini sama dengan simulasi yang telah dibuat. Simulasi sinyal pensaklaran S2 dan S3 *closed loop* terdapat pada Gambar 4.8.



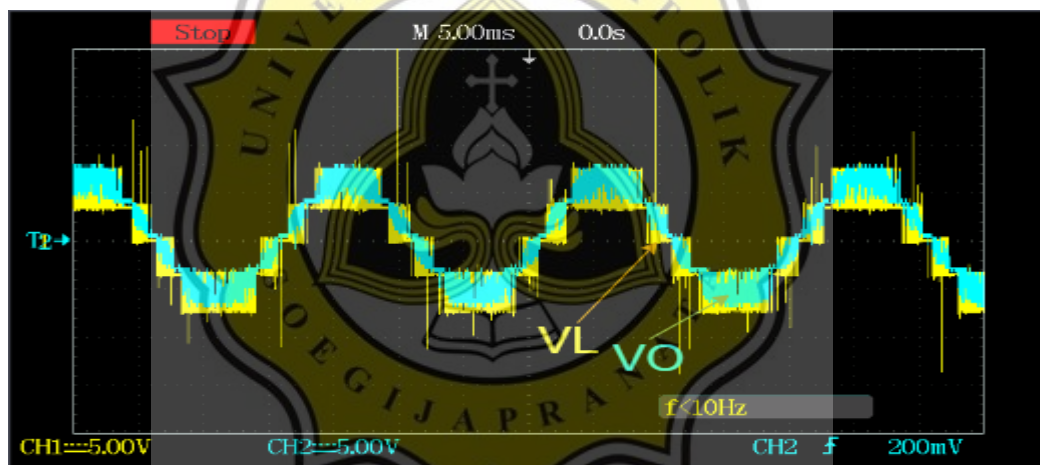
Gambar 4.21. Sinyal Pensaklaran Pada S2 dan S3 *Closed Loop*

Sinyal pensaklaran pada S4 dan S5 *closed loop* dapat dilihat pada Gambar 4.22. Sinyal ini sama dengan simulasi yang telah dibuat. Simulasi sinyal pensaklaran S4 dan S5 *closed loop* terdapat pada Gambar 4.9.



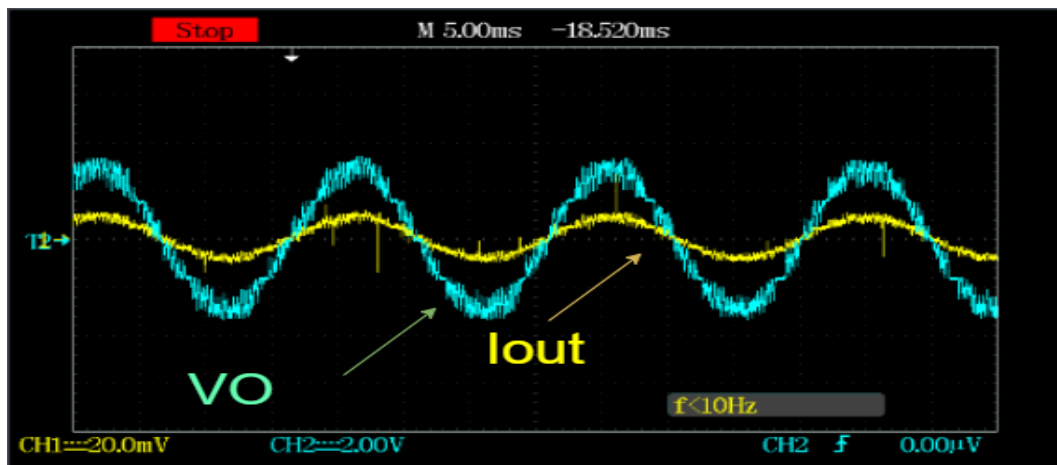
Gambar 4.22. Sinyal Pensaklaran Pada S4 dan S5 *Closed Loop*

Keluaran tegangan antar lengan membentuk tingkatan tegangan, hal ini terjadi karena sinyal modulasi lebar pulsa sinusoidal diimplementasikan pada semua saklar daya. Tingkatan tegangan yang dihasilkan yaitu 2E dan E pada keluaran antar lengan. Tegangan 2E didapat dari penjumlahan tegangan V1 dan V2. Tegangan E didapatkan dari nilai tegangan V2. Tapis induktor digunakan pada keluaran *inverter* lima tingkat. Bentuk gelombang tegangan *inverter* sebelum dan sesudah induktor *closed loop* dapat dilihat pada Gambar 4.23. Hasil ini sama dengan simulasi bentuk gelombang tegangan sebelum dan sesudah induktor *closed loop* yang terdapat pada Gambar 4.10.



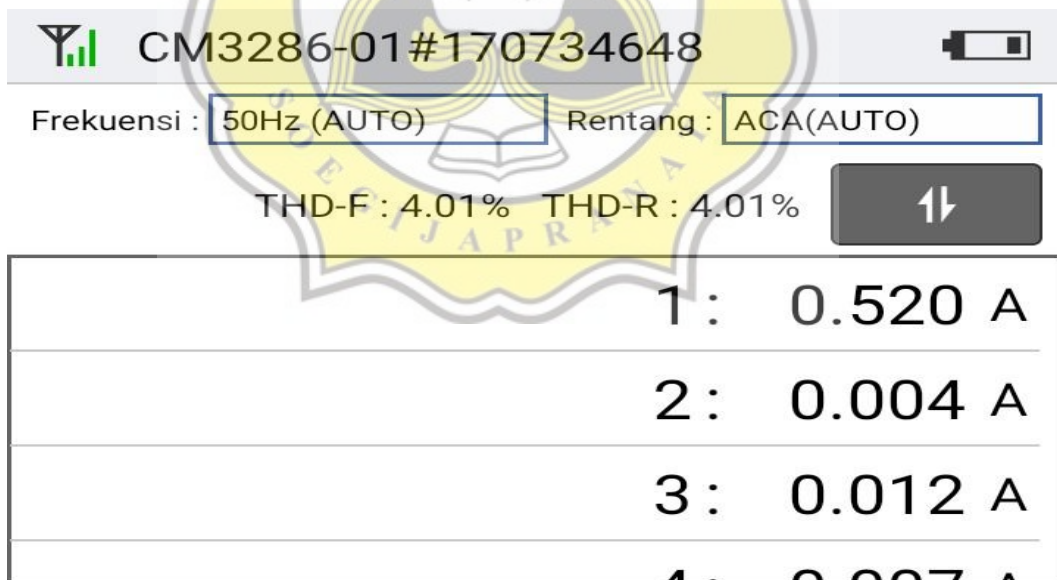
Gambar 4.23. Bentuk Gelombang Tegangan *Inverter* Lima Tingkat Sebelum (kuning) dan Sesudah Induktor (hijau) *Closed Loop*.

Hasil keluaran arus dan tegangan *inverter* lima tingkat dapat dilihat pada Gambar 4.24. Nilai arus keluaran *inverter* lima tingkat sebesar 0,5 Ampere dan tegangan keluaran *inverter* lima tingkat sebesar 70 VPP. Hasil ini sesuai dengan simulasi gelombang arus aktual dan arus referensi *closed loop* yang terdapat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.24. Bentuk Gelombang Arus (kuning) dan Tegangan (hijau) *Inverter Lima Tingkat Closed Loop*.

Hasil implementasi THD arus *inverter* lima tingkat dapat dilihat pada Gambar 4.15. Hasil THD arus sebesar 4.01%. Dengan hasil ini maka sudah sesuai dengan standar IEEE 519 dengan maksimal 5%.



Gambar 4.25. Implementasi THD Arus *Inverter Lima Tingkat*.

4.4 Pembahasan

Sistem kendali proporsional integral (PI) diimplementasikan pada perangkat keras *inverter* lima tingkat satu fasa dengan nilai konstanta P sebesar satu dan konstanta I sebesar 0.1 untuk membuat arus aktual mengikuti arus referensi [23]. *Inverter* lima tingkat dengan menggunakan lima buah saklar daya yang dikendalikan arus keluarannya memiliki kandungan THD arus sebesar 4.01% dan memenuhi *standar* IEEE 519 sebesar 5%.

