

Rancang Bangun Inverter 3 Fasa Berbasis Bipolar *Sinusoidal Pulse Width Modulation*

Rendy Muhammad¹, Dwi Septiyanto², Nanang Mulyono³

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : rendy.muhammad.tlis19@polban.ac.id

²Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : dwi.septianto@polban.ac.id

³Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : nanang_mulyono@yahoo.com

ABSTRAK

Pemanfaatan elektronika daya mengalami perkembangan yang semakin beragam khususnya dalam bidang industry. Inverter digunakan untuk mengubah sumber DC menjadi AC. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan inverter 3 fasa menggunakan metode SPWM. Metode SPWM menggunakan sinyal sinusoidal sebagai *reference* dan sinyal segitiga sebagai *carrier*. Inverter 3 fasa ini terdiri dari kumpulan modul. Modul osilator untuk membangkitkan sinyal sinusoidal bipolar 50 Hz dan sinyal segitiga bipolar dengan frekuensi variabel. Modul buffer berfungsi sebagai penyangga karena setiap modul memiliki impedansi yang berbeda. Sinyal sinusoidal tersebut digeserkan sebesar 120° antar fasanya oleh modul penggeser fasa sehingga terdapat sinyal 3 fasa. Sinyal sinusoidal 3 fasa dibandingkan dengan sinyal segitiga pada modul komparator sehingga menghasilkan sinyal kotak. Sinyal kotak 3 fasa dibeda polaritaskan karena bentuk sinyal masih bipolar dan SPWM dapat bekerja ketika siklus positif dan negatif. SPWM 3 fasa digunakan pada MOSFET untuk *switching* dan optocoupler berfungsi sebagai driver MOSFET yang mengisolasi antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya. Pengujian menggunakan sumber DC 12 V dan beban resistif 5 watt. Nilai tegangan *output* mendapatkan hasil tegangan antar fasa sebesar 230.9, 251.1, dan 305 V. Terdapat selisih nilai tegangan antar fasa karena frekuensi dan bentuk sinyal *reference* tidak stabil. Frekuensi yang dihasilkan sebesar 49.76 Hz.

Kata Kunci

Inverter 3 fasa, SPWM, bipolar

1. PENDAHULUAN

Inverter merupakan rangkaian elektronika untuk mengubah sumber DC menjadi sumber AC. Inverter digunakan dalam aplikasi seperti, pengatur kecepatan motor induksi, uninterruptible power supplies (UPS), filter aktif, flexible ac transmission systems (FACTS), dan masih banyak lagi [1], [2]. Untuk mengendalikan inverter digunakan teknik PWM. digunakan untuk modulasi lebar pulsa. Teknik PWM dapat menghasilkan THD yang lebih rendah, daya yang hilang akibat *switching*, reduksi EMI, dan harmonik yang lebih baik [2]. Terdapat banyak jenis teknik PWM untuk diaplikasikan pada inverter diantaranya, Single-pulse width modulation (PWM), Multiple-pulse width modulation (MPWM), dan Sinusoidal pulsewidth modulation (SPWM). Teknik.

Single-pulse width modulation (PWM) membandingkan sinyal referensi kotak dan sinyal *carrier* segitiga. Teknik Multiple-pulse width modulation terdapat beberapa jumlah pulsa dalam setengah siklus tegangan output, lebar pulsa dapat diubah sesuai sinyal *carrier*. Frekuensi sinyal *carrier* menentukan

jumlah pulsa per setengah siklus. Teknik Sinusoidal-pulse width modulation (SPWM) membandingkan sinyal referensi

sinusoidal dengan sinyal *carrier* segitiga, frekuensi sinyal modulasi menentukan frekuensi tegangan keluaran [3].

2. LANDASAN TEORI

2.1 Inverter 3 Fasa

Inverter 3 fasa membutuhkan 6 sinyal PWM untuk mengendalikan 6 komponen *switching*. Apabila transistor 1 *on* maka terminal a terhubung ke terminal negatif sumber DC. Apabila transistor 4 *On* maka terminal a dihubungkan ke terminal negatif sumber DC. Pada umumnya, inverter diklasifikasikan menjadi 2 tipe yaitu, VSI (Voltage Source Inverter) dan CSI (Current Source Inverter). Inverter VSI menghubungkan sumber DC secara paralel dengan kapasitor besar untuk mempertahankan tegangan *input* dan bentuk gelombang arus beban serta besarnya tergantung pada sifat impedansi beban. Inverter CSI menggunakan sumber DC dengan arus *input* dijaga konstan dan besarnya tegangan *output* dan bentuk gelombangnya tergantung pada sifat impedansi beban [4], [5]

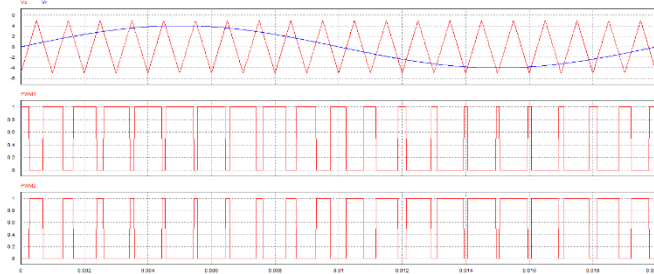
Tabel 1 Interval *Switching* Inverter 3 Fasa

Interval	0°-60°	60°-120°	120°-180°	180°-240°	240°-300°	300°-360°
Sakelar						
S1	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
S2	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
S3	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
S4	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
S5	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
S6	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON

Tabel diatas menunjukan *timing* diagram pada *switching* inverter 3 fasa, masing masing waktu pergesaran sebesar 60°. Contohnya ketika S1 *on* maka S2 akan *on* pada 60° di periode berikutnya. MOSFET memiliki waktu tunda untuk *on* atau *off*, namun idealnya saklar menutup selama periode sebesar 180° sehingga perlu disesuaikan dengan spesifikasi komponen *switching* yang akan digunakan.

2.2 Modulasi Lebar Pulsa Sinusoidal Tiga Fasa

Modulasi lebar pulsa (PWM) menggunakan pulsa persegi panjang yang lebar pulsanya dimodulasi yang akan membentuk nilai tegangan rata-rata (V_{rms}) gelombang. Untuk menghasilkan PWM membutuhkan bentuk gelombang *reference* dan gelombang *carrier* segitga. Ketika nilai gelombang *reference* lebih besar dari nilai gelombang *carrier* maka sinyal PWM berada pada keadaan maksimum dan sebaliknya [3].



Gambar 1 Sistem Modulasi Lebar Pulsa Sinusoidal

Puncak gelombang modulasi sinusoidal lebih rendah dari puncak gelombang segitga. Ketika bentuk gelombang sinusoidal lebih tinggi dari bentuk gelombang segitga, sakelar atas *On* dan sakelar bawah *Off*, begitu pula sebaliknya. SPWM 3 fasa membandingkan gelombang segitga dengan gelombang sinusoidal (fasa R, fasa S, fasa T) yang berbeda fasa 120° antar fasa. Setelah didapatkan titik potong gelombang segitga dan sinusoidal. [3], [4]

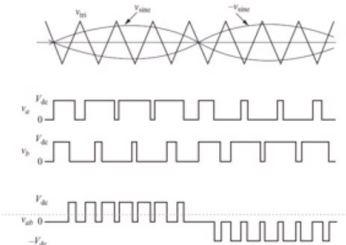
Pulsa keluaran SPWM dapat dikendalikan dengan memperhatikan faktor sebagai berikut:

1. Tegangan sinyal *carrier* mengendalikan frekuensi SPWM
2. Tegangan sinyal *reference* mengendalikan lebar pulsa SPWM

Pemangkit sinyal SPWM 3 fasa menggunakan rangkaian analog dan terdapat V reference dengan bentuk gelombang sinusoidal yang berbeda fasa sebesar 120° antar fasanya dan satu V carrier dengan bentuk gelombang segitga.

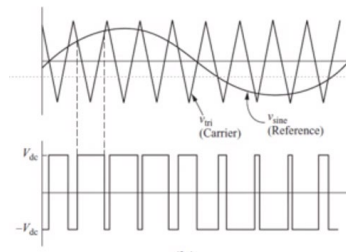
2.3 Penyulutan Pulsa Bipolar dan Unipolar

Penyulutan unipolar menggunakan satu sinyal *carrier* segitga dan dua sinyal *reference* sinusoidal. Metode ini membandingkan sinyal *reference* dan sinyal *carrier* yang sudutnya digeser sebesar 180° untuk menghasilkan sinyal kontrol ke *switch* inverter. Dari bentuk gelombang yang diamati bahwa gelombang tegangan *output* dialihkan antara 0 ke- V atau 0 ke + V , sehingga terdapat 3 *output* [6]



Gambar 2 Penyulutan Pulsa Unipolar

Penyulutan unipolar menggunakan satu sinyal *carrier* segitga dan sinyal *reference* sinusoidal. Metode ini membandingkan sinyal *reference* dan sinyal *carrier* untuk menghasilkan sinyal kontrol ke *switch* inverter. Dari bentuk gelombang yang diamati bahwa gelombang tegangan *output* beralih dari - V ke + V atau + V ke- V , sehingga hanya terdapat 1 *output*.



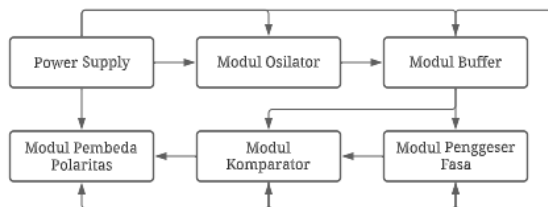
Gambar 3 Penyulutan Pulsa Bipolar

3. METEDOLOGI



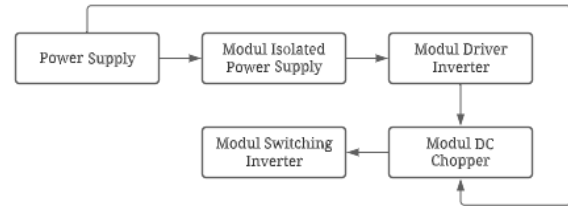
Gambar 4 Diagram Alir

Pada diagram alir dijelaskan langkah dalam perancangan dimulai dari pencarian jurnal-jurnal sebagai acuan dalam perancangan alat. Perancangan dilakukan dengan perhitungan dan pemilihan komponen. Untuk meminimalisir kesalahan pada saat perancangan maka dilakukan simulasi menggunakan *software* Proteus sehingga dapat dilakukannya integrasi perangkat keras. Pengujian dari perangkat keras dilakukan untuk dapat menyimpulkan bahwa alar yang dikerjakan berhasil atau tidak. Apabila hasil tidak sesuai dengan harapan, maka proses akan kembali pada pemilihan komponen dan berikutnya.



Gambar 5 Diagram Blok Rangkaian Kontrol

Diagram blok rangkaian kontrol menjelaskan proses pengolahan sinyal SPWM 3 fasa. *Power supply* memberikan sumber DC 12 V untuk setiap modul. Sinyal *reference* sinusoidal dan *carrier* segitiga dibangkitkan melalui modul osilator. Impedansi setiap modul berbeda-beda sehingga digunakan modul *buffer* sebagai penyangga impedansi antar modul. Sinyal 3 fasa diperoleh dari sinyal sinusoidal digeserkan sebesar 120° antar fasanya. Sinyal sinusoidal 3 fasa dibandingkan dengan sinyal segitiga menggunakan modul komparator sehingga menghasilkan sinyal SPWM dengan bentuk sinyal kotak. Sinyal SPWM tersebut adalah bipolar yang terdapat gelombang positif dan negatif, agar dapat bekerja pada siklus positif dan siklus negatif *switching* maka sinyal SPWM tersebut dibedapolaritaskan.



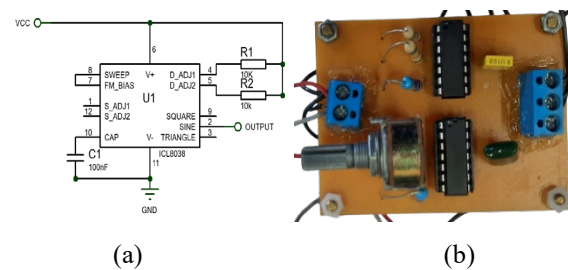
Gambar 6 Diagram Blok Rangkaian Daya

Diagram blok rangkaian daya menjelaskan proses pengubahan tegangan DC menjadi AC melalui sistem *switching*. *Power supply* memberikan sumber DC 12 V untuk setiap modul. Modul *isolated power supply* dan modul *driver inverter* berfungsi sebagai isolator untuk memproteksi rangkaian kontrol dari kerusakan akibat proses *switching*. Untuk menaikkan tegangan DC digunakan modul DC Chopper. Pada modul *switching inverter* terdapat MOSFET untuk mengubah tegangan DC menjadi AC. *Input* DC 12 V digunakan untuk menyulut kerja MOSFET pada kaki *gain* dan *source*, sedangkan untuk menaikkan tegangan didapatkan pada kaki *drain* dan *source*.

Modul osilator menggunakan IC L8038 untuk membangkitkan sinyal *reference* dan *carrier*. Besarnya frekuensi keluaran ditentukan menggunakan persamaan (1).

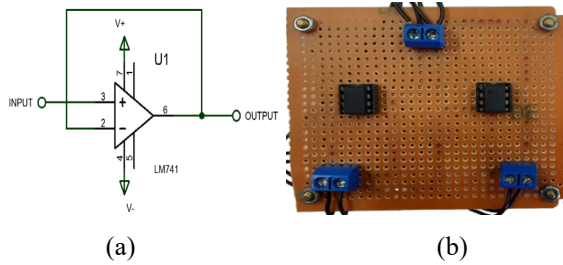
$$f = \frac{0,33}{R \times C} \quad (1)$$

Nilai frekuensi sinyal keluaran pada gambar 7(a) ditentukan oleh nilai R1, R2, dan C, dengan nilai resistansi R1 besarnya sama dengan R2. Nilai R1 dihitung dengan persamaan (1) sehingga diperoleh 68 KΩ. Sedangkan R2 dipilih nilainya sama dengan R1. Nilai C yang ditentukan sebesar 100 uF. Modul ini menghasilkan 2 gelombang dengan rangkaian yang sama pada gambar 7(b).



Gambar 7 a) Rangkaian Osilator, b) Realisasi Modul

Modul *buffer* digunakan sebagai penyangga karena setiap modul memiliki impedansi yang berbeda sehingga mendapatkan sinyal yang diinginkan. Modul ini menghasilkan 2 gelombang dengan rangkaian yang sama pada gambar 8(b).

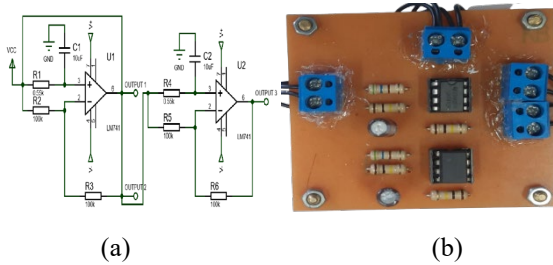


Gambar 8 a) Rangkaian *Buffer*, b) Realisasi Modul

Modul penggeser fasa digunakan untuk menggeserkan sinyal sinusoidal sehingga berbeda fasa 120° antar fasa menggunakan persamaan (2).

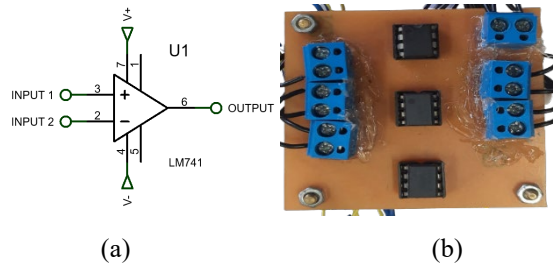
$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \times 2 \times \pi \times R \times C \quad (2)$$

Sinyal keluaran pada gambar 9(a) ditentukan oleh nilai R dengan nilai resistansi R dihitung dengan persamaan (2) sehingga diperoleh 550Ω . Nilai C yang ditentukan sebesar $50 \mu\text{F}$.



Gambar 9 a) Rangkaian Penggeser Fasa, b) Realisasi Modul

Modul komparator digunakan untuk membandingkan sinyal *reference* dan sinyal *carrier* sehingga menghasilkan PWM dengan bentuk gelombang kotak. Modul ini menghasilkan 3 gelombang dengan rangkaian yang sama pada gambar 10(b).

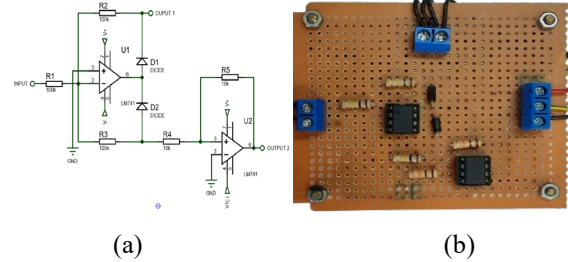


Gambar 10 a) Rangkaian Komparator, b) Realisasi Modul

Sinyal PWM tersebut merupakan bipolar yang memiliki gelombang positif dan negatif. Agar PWM dapat bekerja dengan sistem *switching* MOSFET maka sinyal tersebut dibedapolaritaskan menggunakan persamaan (3).

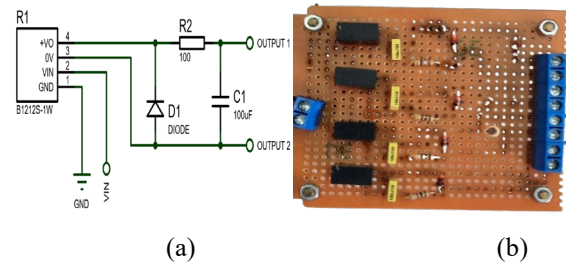
$$G = \frac{R_f}{R_i} \quad (3)$$

Sinyal keluaran pada gambar 11(a) ditentukan oleh nilai R_f dan R_i dengan nilai resistansi R dihitung dengan persamaan (3) sehingga diperoleh $100 \text{ K}\Omega$. Nilai *gain* atau G diperoleh adalah 1 yang artinya nilai V_{in} sama dengan nilai V_{out} . Sinyal 3 fasa menggunakan 3 modul yang sama pada gambar 11(b).



Gambar 11 a) Rangkaian Beda Polaritas, b) Realisasi Modul

Modul *isolated power supply* menggunakan B1212S-1W sebagai *power supply* terisolasi yang terkoneksi secara *wireless*. Modul ini menghasilkan 4 sumber tegangan yang sama pada gambar 12(b).

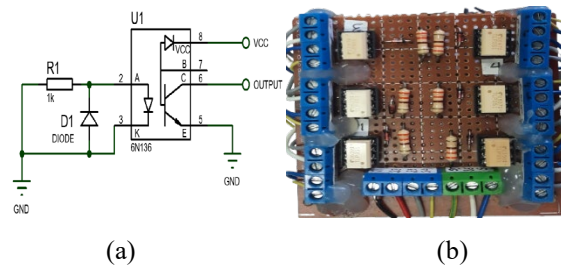


Gambar 12 a) Rangkaian *Isolated Supply*, b) Realisasi Modul

Modul *driver inverter* digunakan sebagai isolator untuk memisahkan rangkaian daya dan rangkaian kontrol. Untuk menyulut kerja optocoupler TLP351 diperlukan V_f dengan mencari nilai R menggunakan persamaan (4).

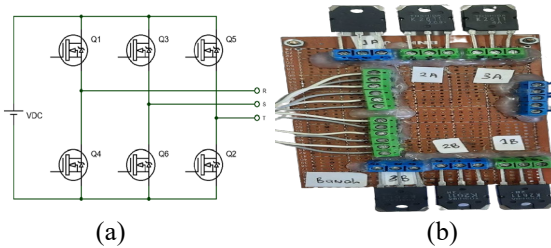
$$R = \frac{V_s - V_f}{I_f} \quad (4)$$

Sinyal keluaran pada gambar 13(a) ditentukan oleh nilai R dengan nilai resistansi R dihitung dengan persamaan (4) sehingga diperoleh 230Ω . MOSFET akan bekerja bila diberi tegangan sebesar 12 V , tegangan tersebut diperoleh dari sumber tegangan DC 12 V .



Gambar 13 a) Rangkaian *Driver Inverter*, b) Realisasi Modul

Modul *switching* inverter digunakan untuk mengubah tegangan DC menjadi AC menggunakan MOSFET K2611.



Gambar 14 a) Rangkaian Switching, b) Realisasi Modul

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian yang dilakukan menggunakan sumber DC 12 V. Pengujian terdiri dari pengujian rangkaian kontrol sebagai pembangkit sinyal SPWM 3 fasa dan pengujian rangkaian daya sebagai pengubah tegangan DC menjadi AC. Tegangan DC dinaikkan menjadi 260 V pada pengujian rangkaian daya.



Gambar 15 Setup Pengujian

Tabel 2 Pengujian Pembangkit Sinyal SPWM

No.	Variabel	Nilai
1.	Tegangan <i>input</i> SPWM 3 fasa	12 V
2.	Tegangan <i>output</i> SPWM 3 fasa	5.6 Vpp
3.	Frekuensi gelombang <i>output</i> segitiga	246.7 Hz
4.	Frekuensi gelombang <i>output</i> sinusoidal	50 Hz
5.	Frekuensi SPWM 3 fasa	49.76 Hz

Sinyal SPWM 3 fasa dibangkitkan dengan tegangan *input* DC 12 V dan menghasilkan tegangan *output* 5.6 Vpp. Sinyal SPWM 3 fasa dibangkitkan dari sinyal *reference* 50 Hz dan sinyal *carrier* 246.7 Hz yang menghasilkan frekuensi *output* 49.76 Hz. Nilai frekuensi *carrier* tersebut untuk menghasilkan tegangan dan bentuk gelombang yang stabil.

Tabel 3 Pengujian Tegangan Tanpa Beban dan Dengan Beban

	Tegangan Tanpa Beban (V)	Tegangan Dengan Beban (V)	Drop Tegangan (%)
R-S	241,6	230,9	5
S-T	252,8	251,1	1
T-R	306,6	305	1

Pengujian dilakukan dengan menguji tegangan *output* tanpa beban dan tegangan *output* dengan beban resistif. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *drop* tegangan antar fasa bila dibebani beban resistif.

Tabel 4 Pengujian Menggunakan Beban Resistif 22K Ω

	Tegangan (V)	Resistansi (K Ω)	Arus (A)	Daya (Watt)
R-S	230.9	22	0.10	24.23
S-T	251.1	22	0.11	28.66
T-R	305	22	0.14	42.28
Total				95.18

Tabel 5 Pengujian Menggunakan Beban Resistif 27K Ω

	Tegangan (V)	Resistansi (K Ω)	Arus (A)	Daya (Watt)
R-S	230.9	27	0.09	19.75
S-T	251.1	27	0.09	23.35
T-R	305	27	0.11	34.45
Total				77.55

Tabel 6 Pengujian Menggunakan Beban Resistif 32K Ω

	Tegangan (V)	Resistansi (K Ω)	Arus (A)	Daya (Watt)
R-S	230.9	32	0.07	16.66
S-T	251.1	32	0.08	19.70
T-R	305	32	0.10	29.07
Total				65.43

Tabel 7 Pengujian Menggunakan Beban Resistif 37K Ω

	Tegangan (V)	Resistansi (K Ω)	Arus (A)	Daya (Watt)
R-S	230.9	37	0.06	14.41
S-T	251.1	37	0.07	17.04
T-R	305	37	0.08	25.14
Total				56.59

Tabel 8 Pengujian Menggunakan Beban Resistif 42K Ω

	Tegangan (V)	Resistansi (K Ω)	Arus (A)	Daya (Watt)
R-S	230.9	42	0.05	12.69
S-T	251.1	42	0.06	15.01
T-R	305	42	0.07	22.15
Total				49.86

Pengujian inverter 3 fasa menggunakan *input* DC 12 V kemudian dinaikkan menjadi 260 V sehingga diperoleh tegangan *output* antar fasa sebesar 230.9, 251.1, dan 305 V. Masih terdapat selisih antara tegangan *output* antar fasa tersebut karena frekuensi dan bentuk gelombang sinyal *reference* kurang stabil. Pengujian beban bertahap ini dilakukan untuk mengetahui daya optimum dari inverter 3 fasa.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perakitan dan pengujian dapat ditarik kesimpulan telah dihasilkannya inverter metode bipolar SPWM tiga fasa frekuensi 49.76 Hz dengan *input* tegangan DC 12 V dan menghasilkan tegangan AC antar fasa sebesar 230.9, 251.1, dan 305 V. Terdapat selisih antara tegangan *output* karena frekuensi dan bentuk sinyal *reference* tidak stabil sehingga diperukan komponen dan IC yang tepat pada pembangkit sinyal. Pengujian dilakukan tanpa beban dan dengan beban, terjadi drop tegangan sebesar 1% dan 5%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung, melalui wakil Direktur Akademik atas bantuan pendanaan penyusunan tugas akhir No.B/74.8/PL1.R7/PG.00.03/2021.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Moez Youssef, "Simulation and Design of A Single Phase Inverter with Digital PWM Issued by An Arduino Board," *International Journal of Engineering Research and*, vol. V9, no. 08, Aug. 2020, doi: 10.17577/IJERTV9IS080237.
- [2] K. V. Kumar, A. Michael, J. P. John, and S. Suresh Kumar, "Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter Spectrum Analysis of Sidebands in Industrial Drives View project SIMULATION AND COMPARISON OF SPWM AND SVPWM CONTROL FOR THREE PHASE INVERTER," vol. 5, no. 7, 2010, [Online]. Available: www.arpnjournals.com
- [3] "Review of Different PWM Techniques," 2018.
- [4] L. Chaturvedi, D. K. Yadav, and G. Pancholi, "Comparison of SPWM, THIPWM and PDPWM technique based voltage source inverters for application in renewable energy," *Journal of Green Engineering*, vol. 7, no. 1–2, pp. 83–98, Jan. 2017, doi: 10.13052/jge1904-4720.7125.
- [5] N. Sihombing, N. Mulyono, and D. Septiyanto, "Seminar Nasional Teknologi dan Riset Terapan) Politeknik Sukabumi," 2021.
- [6] N. Desiwantiyani and F. N. Budiman, "Rancang Bangun Inverter SPWM."