

Rancang Bangun Modul Penyulutan Inverter Satu Fasa Berbasis Unipolar MPWM (*MULTIPLE PULSE WIDTH MODULATION*)

Maulidan Usyani¹, Nanang Mulyono², Dwi Septiyanto³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559

E-mail : ¹maulidan.usyani.tlis21@polban.ac.id

E-mail : nanang.mulyono@polban.ac.id

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

ABSTRAK

Energi listrik merupakan salah satu bagian kebutuhan pokok bagi kehidupan manusia sehari-hari. Pemanfaatan sumber energi terbarukan merupakan upaya untuk dapat menciptakan pasokan listrik yang terus menerus. Namun energi listrik dari sumber terbaharukan biasanya berupa tegangan searah (DC), Sedangkan sebagian besar peralatan rumah tangga dan industri menggunakan tegangan bolak balik (AC). Oleh karena itu diperlukan suatu alat inverter yang dapat mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Salah satu permasalahan yang dihadapi dengan inverter adalah ketersediaan dari daya DC dan level THD. Tingkat THD dapat dipengaruhi oleh teknologi switching yang digunakan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dirancang modul penyulutan inverter satu fasa berbasis Unipolar Multiple Pulse Width Modulation. Modul penyulutan yang dibuat terdiri dari beberapa modul yang dijadikan menjadi satu. Sinyal Kotak yang dibangkitkan oleh modul osilator lalu dibandingkan dengan sinyal carrier segitiga dan segitiga pembalik sehingga menghasilkan sinyal kotak yang terbentuk berdasarkan perpotongan amplitudo antara sinyal referensi dan sinyal carrier. Sinyal kotak 1 fasa yang dihasilkan oleh modul komparator lalu dipisahkan polaritas nya menjadi siklus positif dan negative, keluaran dari pemisah polaritas ini akan digunakan untuk penyulutan inverter satu fasa. Hasil yang didapat yaitu sinyal MPWM satu fasa dengan amplitudo pada saat ON atau pada polaritas positif sebesar 10.6V dan frekuensinya sebesar 500Hz, dan pada saat OFF atau polaritas negative dengan amplitudo sebesar 11V dan frekuensinya 500.4Hz.

Kata Kunci

Multiple Pulse Width Modulation, Unipolar, Inverter Satu Fasa

ABSTRACT

Electrical energy is one of the basic needs for daily human life. Utilization of renewable energy sources is an effort to be able to create a continuous supply of electricity. However, electrical energy from renewable sources is usually in the form of direct voltage (DC), while most household and industrial equipment uses alternating voltage (AC). Therefore, an inverter device is needed that can convert DC voltage into AC voltage. One of the problems faced with inverters is the availability of DC power and THD levels. The THD level can be affected by the switching technology used. Therefore, in this study, a single-phase inverter ignition module based on Unipolar Multiple Pulse Width Modulation was designed. The ignition module made consists of several modules that are made into one. The box signal generated by the oscillator module is then compared with the triangular carrier signal and the inverting triangle to produce a box signal that is formed based on the intersection of the amplitude between the reference signal and the carrier signal. The 1-phase box signal generated by the comparator module is then separated by polarity into positive and negative cycles, the output of this polarity separator will be used to ignite a single-phase inverter. The results obtained are a single-phase MPWM signal with an

amplitude at ON or positive polarity of 10.6V and a frequency of 500Hz, and at OFF or negative polarity with an amplitude of 11V and a frequency of 500.4Hz.

Keywords

Multiple Pulse Width Modulation, Unipolar, Single Phase Inverter

1. PENDAHULUAN

Tenaga listrik merupakan kebutuhan yang sangat vital dalam kehidupan manusia sehari-hari, selain itu tenaga listrik juga sangat dibutuhkan untuk peralatan rumah tangga dan industri. Energi alternatif yang berkembang pada saat ini salah satunya memiliki sumber tegangan DC (Direct Current). Sedangkan peralatan industri yang banyak digunakan membutuhkan listrik bolak-balik (AC). Oleh karena itu, dibutuhkan perangkat inverter yang dapat mengubah listrik dari DC menjadi AC agar bisa digunakan oleh peralatan yang ada.

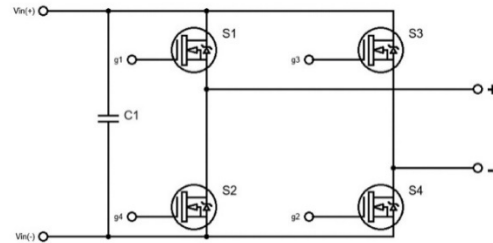
Untuk memenuhi kebutuhan tersebut dapat menggunakan inverter. Inverter merupakan alat elektronika yang secara umum berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Untuk mengendalikan inverter digunakan teknik PWM. Teknik PWM dapat menghasilkan THD yang lebih rendah.

Untuk meningkatkan kualitas keluaran inverter, teknik Multiple Pulse Width Modulation (MPWM) dapat diterapkan. MPWM memungkinkan pengaturan lebih presisi terhadap bentuk gelombang keluaran, sehingga menghasilkan sinyal AC yang lebih mendekati bentuk gelombang sinusoidal ideal. Kombinasi antara Unipolar PWM dan MPWM diharapkan dapat meningkatkan performa inverter fasa tunggal, baik dari segi efisiensi maupun kualitas tegangan keluaran.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Inverter 1 Fasa

Inverter satu fasa adalah perangkat elektronik yang dapat mengubah tegangan arus searah (DC) menjadi tegangan arus bolak-balik (AC) satu fasa. Tegangan AC satu fasa ini kemudian dapat digunakan untuk mengoperasikan berbagai peralatan elektronik dan motor listrik yang dirancang untuk beroperasi pada daya AC. Rangkaian inverter satu fasa dapat dihasilkan dengan menggunakan konfigurasi full-bridge[1]. Prinsip kerja dari inverter full-bridge satu fasa dapat ditemukan pada gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian inverter full-bridge satu fasa

Prinsip kerja dari inverter satu fasa jembatan penuh adalah sebagai berikut: ketika saklar S1 dan S3 dalam keadaan ON, arus akan mengalir dari kiri ke kanan, menghasilkan setengah gelombang periode pertama (positif). Selanjutnya, ketika saklar S2 dan S4 dalam keadaan ON, arus akan mengalir dari kanan ke kiri, menghasilkan setengah gelombang periode kedua (negatif)[2]-[3]-[4]-[5].

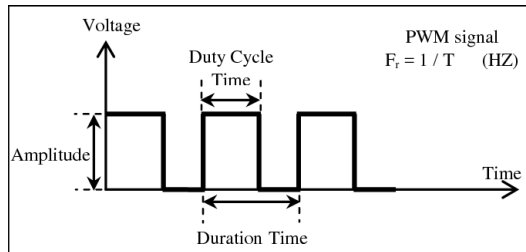
Tabel 1 Cara Kerja Inverter Fase Tunggal dengan Konfigurasi Jembatan Penuh

Saklar ON	Saklar OFF	Tegangan Keluaran (VO)
S1 dan S3	S2 dan S4	+VO
S2 dan S4	S1 dan S3	-VO
S1 dan S2	S3 dan S4	OFF
S2 dan S3	S1 dan S4	OFF

2.2 Modulasi Lebar Pulsa

Modulasi lebar pulsa (PWM) adalah teknik modulasi yang bekerja dengan mengubah lebar pulsa sambil mempertahankan amplitudo dan frekuensi tetap konstan. Satu siklus pulsa dimulai dari kondisi tinggi (high) kemudian bertransisi ke kondisi rendah (low)[6]. Lebar pulsa pada PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum dimodulasi. Lebar pulsa menunjukkan durasi kondisi logika tinggi dalam satu periode sinyal dan dinyatakan sebagai persentase antara 0% hingga 100%. Sebagai contoh, jika sinyal tetap dalam kondisi high secara terus menerus, maka lebar pulsa akan menjadi 100%. Sebaliknya, jika durasi sinyal dalam kondisi high sama dengan durasi dalam kondisi low, maka sinyal tersebut

akan memiliki lebar pulsa yang setara, yaitu 50%[7]-[8].

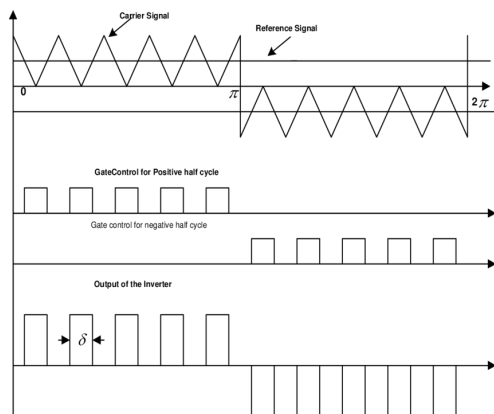


Gambar 2. Modulasi Lebar Pulsa

$$Duty\ Cycle\ (D) = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \quad (1)$$

2.3 Modulasi Lebar Pulsa Ganda

Dengan modulasi lebar pulsa ganda, terdapat sekitar pulsa per setengah siklus tegangan keluaran. Lebar masing-masing pulsa serupa dengan dan dapat diubah dengan mengubah sinyal pembawa. Frekuensi pembawa segitiga lebih besar dari yang digunakan dalam modulasi lebar pulsa tunggal. Frekuensi pembawa menentukan jumlah sinyal gerbang per setengah siklus. Dengan menggunakan beberapa pulsa pada selama setiap setengah siklus tegangan keluaran, kandungan harmonik dapat dikurangi[9]. Dengan membandingkan sinyal referensi dengan gelombang pembawa berbentuk segitiga, kita membentuk sinyal gerbang yang menghidupkan dan mematikan transistor. Frekuensi menentukan jumlah pulsa per setengah siklus. Dengan mengontrol indeks modulasi, tegangan keluaran dapat dikontrol. Jenis modulasi ini juga disebut modulasi lebar pulsa seragam [7]-[10].

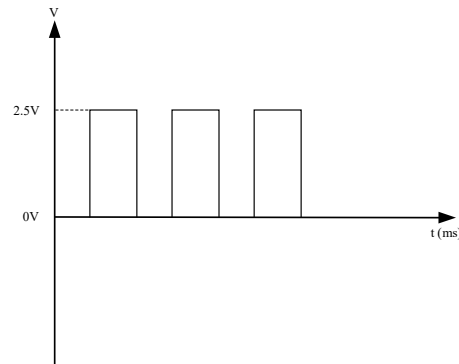


Gambar 3. Modulasi Lebar Pulsa Ganda

2.4 Unipolar

Teknik ini melibatkan modulasi lebar pulsa dalam sinyal untuk menandakan informasi atau mengontrol pengiriman daya. Pada unipolar,

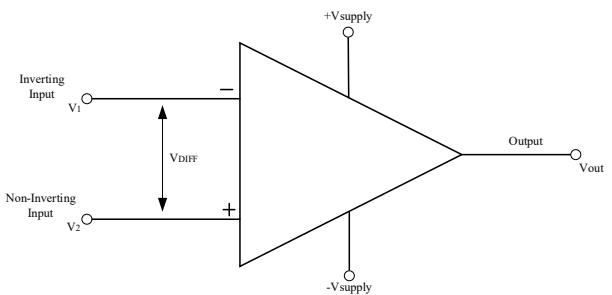
sinyal bervariasi antara nilai nol dan nilai positif (unipolar), tidak seperti bipolar yang sinyalnya bergantian antara nilai positif dan negatif [1]-[11].



Gambar 4. Gelombang Unipolar

2.5 OPAMP (Operational Amplifier)

Penguat operasional, sering dikenal sebagai Op-Amp (Operational Amplifier), adalah sebuah komponen listrik yang digunakan untuk memperkuat sinyal arus searah (DC) dan arus bolak-balik (AC). Op-Amp berfungsi sebagai operator matematis untuk tegangan listrik, dengan dua fungsi utama yaitu sebagai amplifikasi pembalik dan sebagai amplifikasi tak membalik[12]. Op-Amp sebagai penguat memiliki ciri yaitu adanya tahanan umpan balik eksternal yang terhubung antara terminal input dan terminal output[13]-[14].



Gambar 5. Operational Amplifier

Dalam pengaplikasiannya, Op-Amp diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu penguat linier dan penguat non-linier. Penguat linier adalah penguat yang menjaga bentuk sinyal masukan tetap sama. Jenis penguat ini mencakup antara lain penguat pembalik, penguat tak pembalik, penambah diferensial dan penguat instrumentasi. Sedangkan penguat non-linier menghasilkan bentuk sinyal keluaran yang berbeda dari bentuk sinyal masukan, Contohnya meliputi integrator, komparator, diferensiator, pembangkit gelombang dan pengubah bentuk gelombang[13]-[15].

Inverting amplifier atau penguatan pembalik adalah penggunaan penguat operasional untuk menguatkan sinyal, di mana sinyal outputnya memiliki fase yang berlawanan 180° dari sinyal inputnya[13]-[15].

$$A_v = \left(-\frac{R_f}{R_{in}} \right) \quad (2)$$

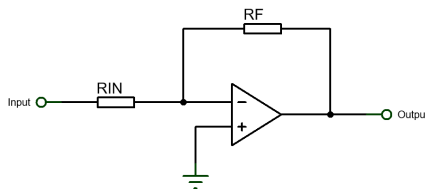
A_v : Gain (penguatan)

R_f : Resistor feedback

R_{in} : Resistor input

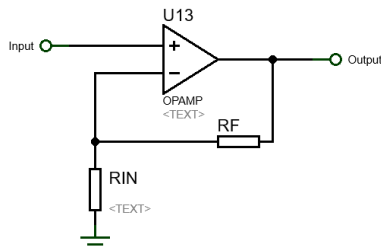
$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_{in}} \right) V_{in} \quad (3)$$

Tanda minus (-) pada persamaan diatas menandakan bahwa keluaran V_{out} berbeda dengan V_{in} .



Gambar 6. Rangkaian Penguat Pembalik

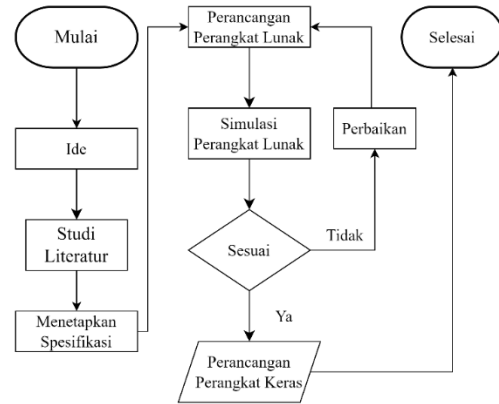
Sedangkan penguat tak pembalik akan menguatkan sinyal dan menghasilkan tegangan keluaran yang proporsional dengan tegangan masukan, tetapi memiliki polaritas yang sama[13].



Gambar 7. Rangkaian Penguat Tak Pembalik

3. METODE PENELITIAN

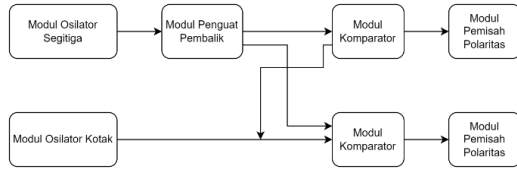
3.1 Tahapan Perancangan Alat



Gambar 8. Diagram Alir

Gambar diagram alir berikut merupakan Langkah penelitian yang dimulai dari:

1. Studi literatur dilakukan dengan mencari jurnal-jurnal yang relevan sebagai acuan, yang memiliki hubungan dengan alat yang akan dirancang dan dibuat.
2. Perancangan perangkat keras dilakukan melalui beberapa langkah, yaitu menentukan perhitungan rangkaian, memilih komponen, dan membuat PCB.
3. Simulasi rangkaian menggunakan perangkat lunak dilakukan untuk meminimalkan kesalahan yang mungkin terjadi. Simulasi perangkat lunak ini dilakukan menggunakan aplikasi Proteus.
4. Pembuatan perangkat keras dilakukan setelah simulasi perangkat lunak berjalan dengan lancar dan pemilihan komponen sudah sesuai. Setelah itu, integrasi perangkat keras dapat dilakukan.
5. Pengujian perangkat keras dilakukan dengan menggunakan osiloskop untuk memastikan apakah alat berfungsi sesuai harapan atau tidak. Jika alat tidak berfungsi sebagaimana mestinya, maka proses perancangan akan diulang mulai dari tahap perancangan perangkat keras hingga tahap-tahap berikutnya.
6. Dokumentasi hasil penelitian dilakukan setelah pengujian berhasil dan semua data telah terkumpul.

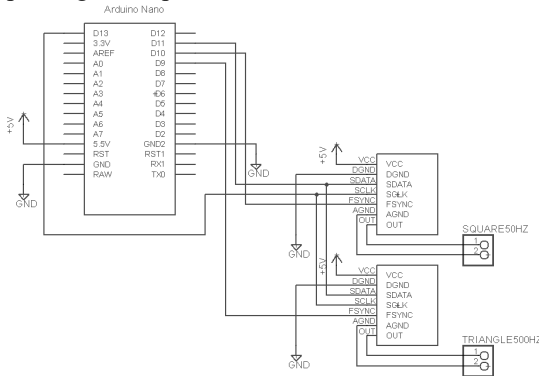


Gambar 9. Diagram Blok Rangkaian Kontrol

Diagram blok rangkaian kontrol menjelaskan proses pengolahan sinyal MPWM satu fasa. Sinyal carrier berbentuk segitiga dan sinyal referensi berbentuk kotak dibangkitkan melalui modul osilator. Setelah sinyal segitiga dibangkitkan, dilakukan penguatan pembalik. Setelah mendapatkan sinyal segitiga yang telah dibalik, sinyal tersebut diteruskan ke modul komparator sehingga sinyal keluarannya menjadi berbentuk kotak. Selanjutnya, sinyal kotak tersebut dimasukkan ke modul pemisah polaritas untuk memisahkan polaritasnya agar dapat beroperasi pada siklus positif dan negatif.

3.2 Modul Osilator

Modul osilator menggunakan Arduino Nano sebagai control dan AD9833 sebagai pembangkit sinyal segitiga dan sinyal kotak. Besarnya frekuensi dan keluaran ditentukan menggunakan pemrograman pada Arduino nano.



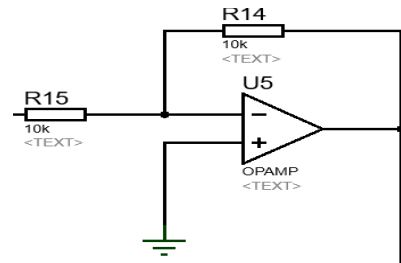
Gambar 10. Rangkaian Osilator

Modul ini diharapkan dapat menghasilkan suatu gelombang kotak dengan frekuensi 50Hz yang berfungsi sebagai sinyal *reference* dan sinyal segitiga dengan frekuensi 500Hz sebagai sinyal carrier dan kedua sinyal tersebut masuk ke rangkaian pengurang agar menjadi sinyal bipolar.

3.3 Modul Penguat Pembalik

Pada modul penguat pembalik input modul ini berupa segitiga yang akan dikuatkan sinyalnya dan outputnya akan berupa fase yang berlawanan 180° dari sinyal inputnya. Jika sinyal input berada dalam fase positif, maka sinyal

output yang dihasilkan akan berada dalam fase negative dan diperkuat, begitu juga sebaliknya.

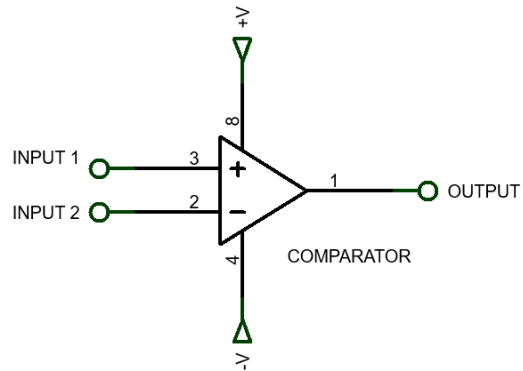


Gambar 11. Rangkaian Penguat Pembalik

Modul ini dapat menghasilkan segitiga yang berbalik 180° dari inputan segitiga osilator dengan amplitude 5Vpp

3.3 Modul Komparator

Komparator digunakan sebagai pembanding dua buah tegangan. Pada perancangan ini, tegangan yang dibandingkan adalah tegangan dari sensor dengan tegangan referensi. Tegangan dari sensor dengan tegangan referensi merupakan tegangan yang dibandingkan.

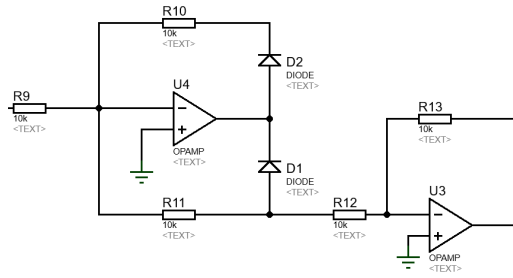


Gambar 12. Rangkaian Komparator

Output modul komparator ini juga digunakan untuk input rangkaian pemisah polaritas.

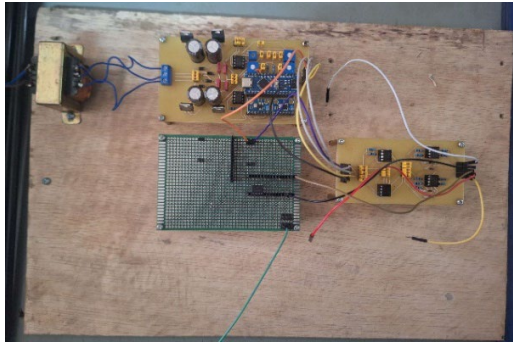
3.4 Modul Pemisah Polaritas

Pemisah Polaritas adalah rangkaian yang memisahkan sinyal menjadi komponen positif dan negatifnya. Ini sering digunakan dalam aplikasi di mana hanya diperlukan satu polaritas sinyal, atau di mana kedua polaritas perlu diperlakukan secara terpisah



Gambar 13. Rangkaian Pemisah Polaritas

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

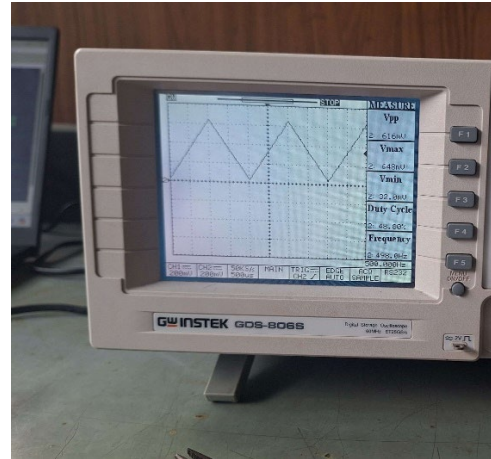


Gambar 14. Realisasi Keseluruhan Modul Penyalutan Inverter MPWM Unipolar

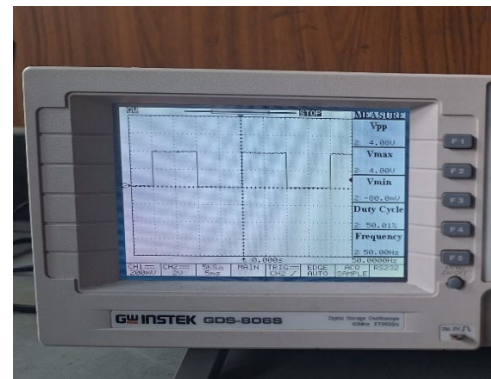
Bagian ini akan memaparkan secara keseluruhan tentang hasil pengujian yang dilakukan pada setiap modul penyulut inverter.

4.1 Hasil Pengujian Modul Osilator

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan power supply 12V DC, mengatur tegangan keluaran sinyal diatur melalui arduino nano. Bentuk sinyal ini berbentuk segitiga dan kotak. Diperoleh sinyal segitiga dengan frekuensi sebesar 500Hz dengan nilai V_{pp} 616mV sedangkan pada gambar 15 diperoleh sinyal kotak dengan frekuensi sebesar 50 Hz dan dengan nilai 4.08 Vpp



Gambar 15. Bentuk Gelombang Osilator Segitiga

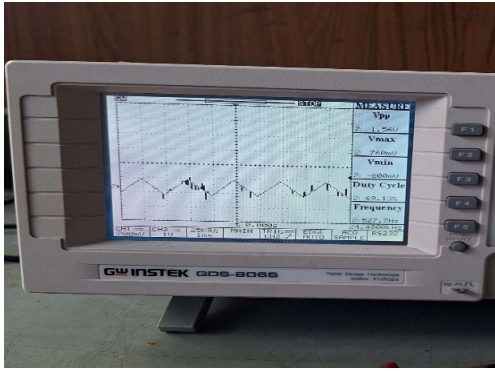


Gambar 16. Bentuk Gelombang Osilator Kotak

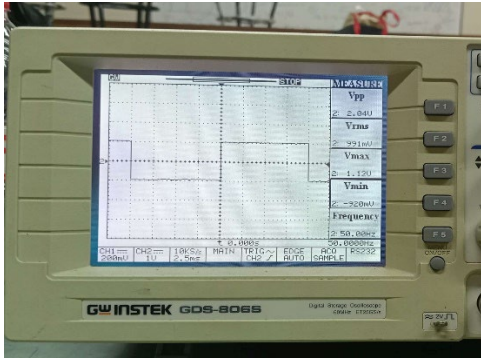
Tabel 2. Hasil Pengujian Modul Osilator

Keterangan	Sinyal Segitiga	Sinyal Kotak
Vpp	616mV	4.08v
Frekuensi	498Hz	50Hz
Vmax	648mV	4.00V
Vmin	32mV	-80mV
Duty Cycle	48.80%	50.01%

4.2 Hasil Pengujian Modul Pengurang



Gambar 17. Modul Pengurang Segitiga



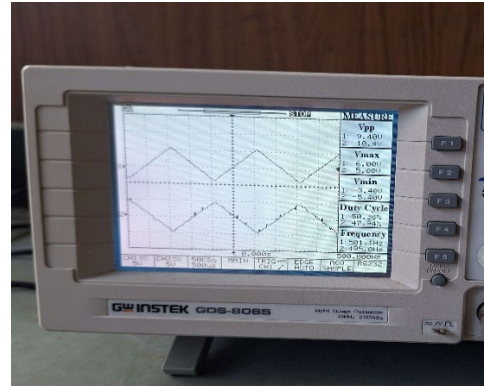
Gambar 18. Modul Pengurang Kotak

Hasil pengujian modul ini dapat dilihat pada gambar 16. Dan 17. Berdasarkan hasil pengujian, terbukti bahwa sinyal yang dibangkitkan dari unipolar menjadi bipolar dikarenakan pada tegangan V_{max} dan V_{min} berlawanan polaritasnya positif dan negatif. Diperoleh sinyal segitiga dengan tegangan puncak ke puncak 1,56v dan frekuensi 527.7Hz lalu sinyal kotak dengan tegangan puncak ke puncak 2.05v dan frekuensi 50Hz.

Tabel 3. Hasil Pengujian Modul Pengurang

KETERANGAN	SEGITIGA	KOTAK
V_{pp}	1.56V	2.04V
Frekuensi	527.7Hz	50Hz
V_{max}	760mV	1.12V
V_{min}	-800mV	-920mV
Duty Cycle	69.13%	52.1%

4.3 Hasil Pengujian Modul Penguat Pembalik Segitiga



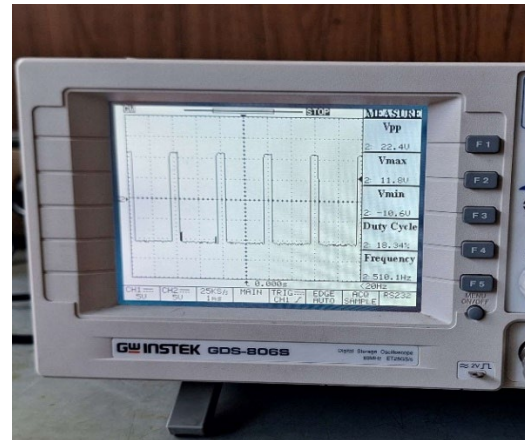
Gambar 19. Modul Penguat Pembalik Segitiga

Hasil Pengujian modul ini dapat dilihat pada gambar 18. Pengujian modul penguat pembalik dilakukan untuk memastikan bahwa modul ini mampu membalikkan sinyal input sebesar 180°. Segitiga pembalik memiliki tegangan puncak ke puncak sebesar 10.4V dengan frekuensi 495Hz

Tabel 4 Hasil Pengujian Modul Penguat Pembalik

Keterangan	Segitiga	Segitiga Pembalik
V_{pp}	9.40V	10.4V
V_{max}	6V	5V
V_{min}	-3.40V	-5.40V
Frekuensi	501.1Hz	495Hz
Duty Cycle	50.36%	47.94%

4.4 Hasil Pengujian Modul Komparator



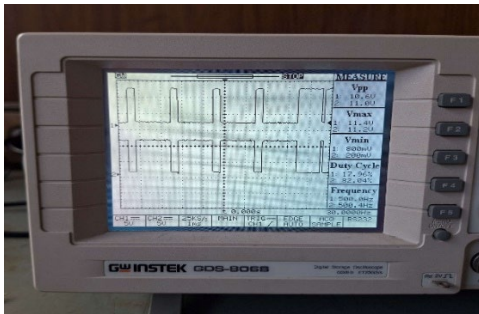
Gambar 20. Modul Komparator

Hasil pengujian modul ini dapat dilihat pada gambar 19. Pengujian modul komparator ini dilakukan untuk membandingkan dua sinyal input agar menjadi sinyal kotak, sinyal yang dibandingkan yaitu sinyal segitiga pembalik dan kotak.

Tabel 5 Hasil Pengujian Modul Komparator

Keterangan	Pulsa Komparator 1
Vpp	22.4V
Vmax	11.8V
Vmin	-10.6V
Frekuensi	510Hz
Duty Cycle	18.34%

4.5 Hasil Pengujian Pemisah Polaritas



Gambar 21. Modul Pemisah Polaritas

Hasil Pengujian modul ini dapat dilihat pada gambar 20. Pengujian dari modul pemisah polaritas adalah untuk mendapatkan sinyal kotak yang dipisah polaritaskan dan berasal dari modul komparator. Sehingga sinyal dapat bekerja pada siklus positif dan juga siklus negative, dan akan terjadi kondisi dimana pada saat siklus positif maka siklus negative tidak akan bertegangan begitu juga sebaliknya.

Tabel 6 Hasil Pengujian Modul Pemisah Polaritas

Keterangan	SIKLUS ON	SIKLUS OFF
Vpp	10.6V	11V
Vmax	11.4V	11.2V
Vmin	800mV	200mV
Frekuensi	500Hz	500.4Hz
Duty Cycle	17.96%	82.04%

5. KESIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa frekuensi sinyal reference kotak yang dibangkitkan sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan sebesar 50Hz. Selain itu sinyal carrier segitiga berhasil dibangkitkan tetapi frekuensinya memiliki perbedaan sebesar 0.4% dari frekuensi yang

diharapkan. Modul ini memiliki 4 output channel untuk penyulutan inverter dengan Teknik switching MPWM, Menghasilkan sinyal MPWM satu fasa dengan amplitudo pada saat ON atau pada polaritas positif sebesar 10.6V dan frekuensinya sebesar 500Hz, dan pada saat OFF atau polaritas negative dengan amplitudo sebesar 11V dan frekuensinya 500.4Hz.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim peneliti mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung, melalui Wakil Direktur Bidang Akademik atas bantuan pendanaan penyusunan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Islam and S. Mekhilef, "H6-type transformerless single-phase inverter for grid-tied photovoltaic system," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 4, pp. 636–644, 2015, doi: 10.1049/iet-pel.2014.0251.
- [2] A. T. David, T. T. James, and P. A. Akor, "Simulation of a Single Phase Inverter with Unipolar Voltage Switching Using Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Technique," *Int. J. Adv. Sci. Res. Eng.*, vol. 08, no. 01, pp. 01–10, 2022, doi: 10.31695/ijasre.2022.8.1.1.
- [3] Fathoni, Agus Pracoyo, Totok Winarno, and Rizal Sabillah, "Rancang bangun Rangkaian Inverter Spwm Unipolar 1 Fasa Dengan Pengaturan Frekuensi Output," *J. Tek. Ilmu Dan Apl.*, vol. 9, no. 1, pp. 46–49, 2021, doi: 10.33795/jtia.v9i1.10.
- [4] L. Fadihilah, D. Septiyanto, and N. Mulyono, "Rancang Bangun Inverter Fasa Tunggal Frekuensi Berbasis Bipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 13, no. 01, pp. 13–14, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/4417>
- [5] B. S. Aprillia, R. A. Umar, and K. B. Adam, "Single Phase on Grid Solar Power Inverter Design," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Nov. 2022. doi: 10.1063/5.0107797.
- [6] F. P. Wahyudin, N. Mulyono, D. Septiyanto, J. Teknik, E. Politeknik, and N. Bandung, "Desain dan Implementasi Modul Bipolar Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation (THPWM) untuk Inverter Tiga Fasa," 2023, doi: 10.26760/jrh.V7i3.263-276.

- [7] H. Shahane, S. Onkarkar, P. Khandekar, Z. Bhagat, and R. Tondare, "Review of Different PWM Techniques," *Int. J. Eng. Res. Electr. Electron.*, vol. 4, no. 3, pp. 206–208, 2018, [Online]. Available: https://www.technoarete.org/common_abstract/pdf/IJEREEE/v5/i3/Ext_45138.pdf
- [8] J. Zala, M. Desai, K. Bhayani, and A. Budhvani, "Journal of Power Electronics & Power Systems Sinusoidal Pulse Width Modulation Switching Technique based Single Phase Inverter," pp. 1–7, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.27114.75207.
- [9] M. Masri, M. Irwanto, H. Alam, and Y. M. Mashor, "Simulation of multiple pulse width modulation (MPWM) transformerless photovoltaic inverter (TPVI) system," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1432, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012017.
- [10] M. Masri, M. Irwanto, H. Alam, and Y. M. Mashor, "Simulation of multiple pulse width modulation (MPWM) transformerless photovoltaic inverter (TPVI) system," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Jan. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012017.
- [11] S. Baburajan, S. Peyghami, D. Kumar, F. Blaabjerg, and P. Davari, "Effect of Unipolar and Bipolar SPWM on the Lifetime of DC-link Capacitors in Single-Phase Voltage Source Inverters," *2020 22nd Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2020 ECCE Eur.*, pp. 1–10, 2020, doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215656.
- [12] B. U. Ambarsani, N. Mulyono, and D. Septiyanto, "Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Berbasis Bipolar Trapezium Pulse Widht Modulation (TPWM)," *Politek. Negeri Bandung*, pp. 16–22, 2022.
- [13] L. E. Nuryanto, "Penerapan Dari Op-Amp (Operational Amplifier)," *Orbith*, vol. 13, no. 1, pp. 43–50, 2017.
- [14] B. Carter and L. P. Huelsman, "Handbook Of Operational Amplifier Active RC Networks," *Networks*, no. October, pp. 1–85, 2001.
- [15] P. E. Allen, *Operational amplifiers and linear integrated circuits*, vol. 71, no. 9. 2008. doi: 10.1109/proc.1983.12732.