

Modul Penyulutan Inverter Tiga Fasa Menggunakan Bipolar 60 Degrees Pulse Width Modulation

Three Phase Inverter Ignition Module Using Bipolar 60 Degrees Pulse Width Modulation

Muhammad Rizki Hidayah¹, Ignatius Riyadi Mardiyanto², Nanang Mulyono³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Bandung, Indonesia; email: muhammad.rizki.tlis21@polban.ac.id

[Dikirimkan: 30 Juli 2024, Direvisi: 5 November 2024, Diterima: 25 November 2024]

Corresponding Author: Muhammad Rizki Hidayah

INTISARI — Energi listrik yang diperoleh dari sumber daya terbarukan biasanya dalam bentuk tegangan searah (DC). Sebaliknya, sebagian besar peralatan rumah tangga dan industri beroperasi menggunakan tegangan bolak-balik (AC). Untuk menghubungkan sumber daya terbarukan dengan peralatan yang membutuhkan AC, diperlukan perangkat yang dapat mengonversi tegangan DC menjadi AC, yang dikenal sebagai inverter. Penelitian ini berfokus pada pengembangan modul penyulutan inverter tiga fasa dengan teknik switching 60 Degrees Pulse Width Modulation (PWM). Pengerjaan dimulai dari tahap perancangan hingga tahap pengambilan data output sinyal penyulutan. Modul yang dikembangkan menghasilkan enam sinyal PWM 60 derajat dengan frekuensi referensi 50 Hz dan frekuensi carrier 900 Hz, serta tegangan kerja sebesar 5 volt. Akurasi sistem dinilai dengan error frekuensi referensi sebesar 0,8% dan error frekuensi carrier sebesar 2,06%. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan teknik PWM 60 derajat dapat menghasilkan konversi yang efisien, menjadikannya solusi yang efektif untuk aplikasi inverter tiga fasa.

ABSTRACT — *Electrical energy obtained from renewable resources is usually in the form of direct voltage (DC). In comparison, most household and industrial appliances operate using alternating voltage (AC). To connect renewable resources with appliances that require AC, a device that can convert DC voltage to AC is required, known as an inverter. This research focuses on the development of a three phase inverter ignition module with 60 Degrees Pulse Width Modulation (PWM) switching technique. The module uses analog signal processing to adjust the signal and a microcontroller to regulate the voltage generation variables. The work starts from the design stage to the data collection stage of the ignition signal output. The developed module produces six 60-degree PWM signals with a reference frequency of 50 Hz and a carrier frequency of 900 Hz, and a working voltage of 5 volts. The system accuracy was assessed with a reference frequency error of 0.8% and a carrier frequency error of 2.06%. This research shows that the use of the 60-degree PWM technique can result in efficient conversion, making it an effective solution for three-phase inverter applications.*

KATA KUNCI — PWM, Inverter, Analog, Penyulutan

I. PENDAHULUAN

Energi listrik sangat penting untuk kegiatan sehari-hari, mulai dari rumah tangga hingga industri. Namun, dengan meningkatnya kebutuhan akan listrik, penting bagi kita untuk mencari solusi yang berkelanjutan dalam menyediakan pasokan energi. Pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi fokus utama dalam usaha menciptakan pasokan energi yang ramah lingkungan dan terus-menerus. Tantangannya adalah pada sumber energi terbarukan yang disimpan dalam bentuk listrik searah (DC), sedangkan peralatan 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 [1].

Salah satu masalah yang sering muncul dalam penggunaan inverter adalah distorsi harmonik tinggi pada keluaran listriknya, yang dapat memengaruhi kinerja dan keandalan sistem secara keseluruhan. Tingkat distorsi harmonik ini umumnya dipengaruhi oleh teknik switching yang digunakan dalam inverter. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang modul penyulutan inverter tiga fasa menggunakan teknik switching 60 Degrees Pulse Width Modulation (PWM). Harapannya, modul penyulutan yang dihasilkan mampu menghasilkan listrik dengan tegangan dan frekuensi yang sesuai [2].

Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan modul penyulutan inverter dengan nilai frekuensi penyulutan yang konstan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat. Dengan menggunakan teknik switching yang tepat seperti 60 Degrees PWM, diharapkan dapat meningkatkan kinerja inverter secara keseluruhan. Hal ini akan membantu mendukung pengembangan sistem energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, serta memberikan solusi yang lebih baik dalam memenuhi kebutuhan listrik yang semakin meningkat [3].

II. LANDASAN TEORI

A. INVERTER

Inverter tiga fasa membutuhkan enam sinyal PWM untuk mengendalikan enam komponen switching. Secara umum, inverter dibagi menjadi dua jenis diantaranya adalah VSI (Voltage Source Inverter) dan CSI (Current Source Inverter). Pada inverter VSI, sumber DC dihubungkan secara paralel dengan kapasitor besar untuk mempertahankan tegangan input, sedangkan bentuk gelombang arus beban dan besarnya bergantung pada sifat impedansi beban. Pada inverter CSI, sumber DC digunakan dengan arus input yang dijaga konstan, sedangkan besarnya tegangan output dan bentuk gelombangnya bergantung pada sifat impedansi beban [6],[8],[9].

B. PULSE WIDTH MODULATION

Pendekatan yang disebut modulasi lebar pulsa, atau PWM, digunakan untuk menghasilkan output AC yang sesuai dengan tuntutan sistem kelistrikan. Untuk mencapai tegangan rata-rata yang diperlukan dalam proses ini, PWM memodifikasi lebar sinyal, yang ditunjukkan sebagai jumlah pulsa dalam suatu periode. PWM digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pengontrolan kecerahan LED, kecepatan motor DC, atau motor servo. [10]

Teknik PWM dalam inverter 3 fasa melibatkan penggunaan saklar yang dapat berubah-ubah untuk menghasilkan output AC yang sesuai. Sinyal PWM kemudian disalurkan ke rangkaian inverter. Rangkaian ini terdiri dari Enam MOSFET digunakan dalam rangkaian untuk membuat desain H-bridge. Setiap MOSFET menerima input sinyal berbeda.[11]

Dalam penyulutan inverter, PWM sangat penting untuk menghasilkan output AC yang sesuai dengan kebutuhan sistem listrik. Dalam beberapa aplikasi, seperti sistem tenaga surya, sistem penggerak motor induksi, dan lain-lain, inverter DC- AC digunakan untuk mengkonversi sumber DC menjadi AC. Inverter DC-AC dapat dibuat menggunakan berbagai teknik switching. Teknik switching ini memungkinkan penggunaan saklar yang dapat berubah-ubah untuk menghasilkan output AC yang sesuai dengan kebutuhan sistem Listrik.[12]

C. MODULASI 60 DEGREES PULSE WIDTH MODULATION

60 Degrees Pulse Width Modulation berasal dari Sinusoidal PWM yang tersaturasi pada perioda 60-120 derajat, dengan tujuan untuk mereduksi harmonisa hasil dari proses switching.

Sinyal ini terbentuk dari kombinasi sinyal segitiga dan sinyal DC yang aktif pada sudut antara 60 hingga 120 derajat dalam setiap siklusnya, sehingga menghasilkan sinyal segitiga yang terputus di rentang sudut tersebut.

D. PENGUAT TEGANGAN DENGAN OP-AMP

Komponen listrik yang memperkuat sinyal arus bolak-balik (AC) dan arus searah (DC) dikenal sebagai penguat operasional, atau Op-Amp (Penguat Operasional). Transistor, resistor, dan kapasitor dirakit dan dikemas ke dalam sirkuit terpadu (IC) untuk membentuk penguat operasional.

Op-Amp adalah operator matematika yang dapat diterapkan pada tegangan listrik dan berfungsi sebagai penguat non-pembalikan dan pembalik. Resistor umpan balik eksternal yang terhubung antara terminal input dan output menjadi ciri amplifier Op-Amp.

Op-Amp digunakan dalam dua cara berbeda: sebagai amplifier linier dan sebagai amplifier non-linear. Semua jenis amplifier, termasuk amplifier non-pembalikan, pembalik, penjumlahan diferensial, dan instrumentasi, dianggap amplifier linier karena mempertahankan bentuk sinyal input. Di sisi lain, amplifier non-linear, yang meliputi komparator, integrator, pembeda, pengubah bentuk, dan generator gelombang, adalah amplifier yang bentuk signal outputnya berbeda dari bentuk signal input. [13]

Konfigurasi Penguat menggunakan Op-Amp

1) PENGUAT INVERTING

Penguat ini menggunakan input inverting dari op-amp dengan sinyal output beda fasa sebesar 180° .Penguatan yang terjadi merupakan perbandingan dari nilai output dan input.

2) PENGUAT NON-INVERTING

Pada dasarnya hal ini menggunakan konfigurasi input non-inverting dari op-amp, di mana sinyal outputnya berada dalam fase dengan sinyal inputnya.

E. PENGGESER FASA DENGAN OP-AMP

Rangkaian phase shifter berfungsi untuk mengubah sudut fasa tanpa mempengaruhi amplitudo sinyal. Rangkaian tersebut memakai sebuah op-amp sebagai penguat, serta tiga resistor dengan peran menjadi tahanan masukan, menjadi tahanan umpan balik dengan nilai yang sama, dan satu resistor variabel. Satu kapasitor digunakan untuk mengubah sudut fasa. Nilai pergeseran fasa dapat disesuaikan dengan mengatur nilai resistor R dan kapasitor C, yang juga dipengaruhi oleh frekuensi sinyal.

G. MODUL SINYAL GENERATOR AD9833

Modul AD9833 merupakan modul pembangkit sinyal yang menggunakan IC AD9833. IC AD9833 merupakan IC pembangkit sinyal yang dapat menghasilkan berbagai bentuk gelombang, termasuk sinusoidal, kotak, dan segitiga. Frekuensi sinyal dihasilkan oleh AD9833 dapat diubah hingga 12,5 Mhz. Untuk terhubung dengan perangkat mikrokontroler, modul ini menggunakan antarmuka SPI (Serial Peripheral Interface). [16]

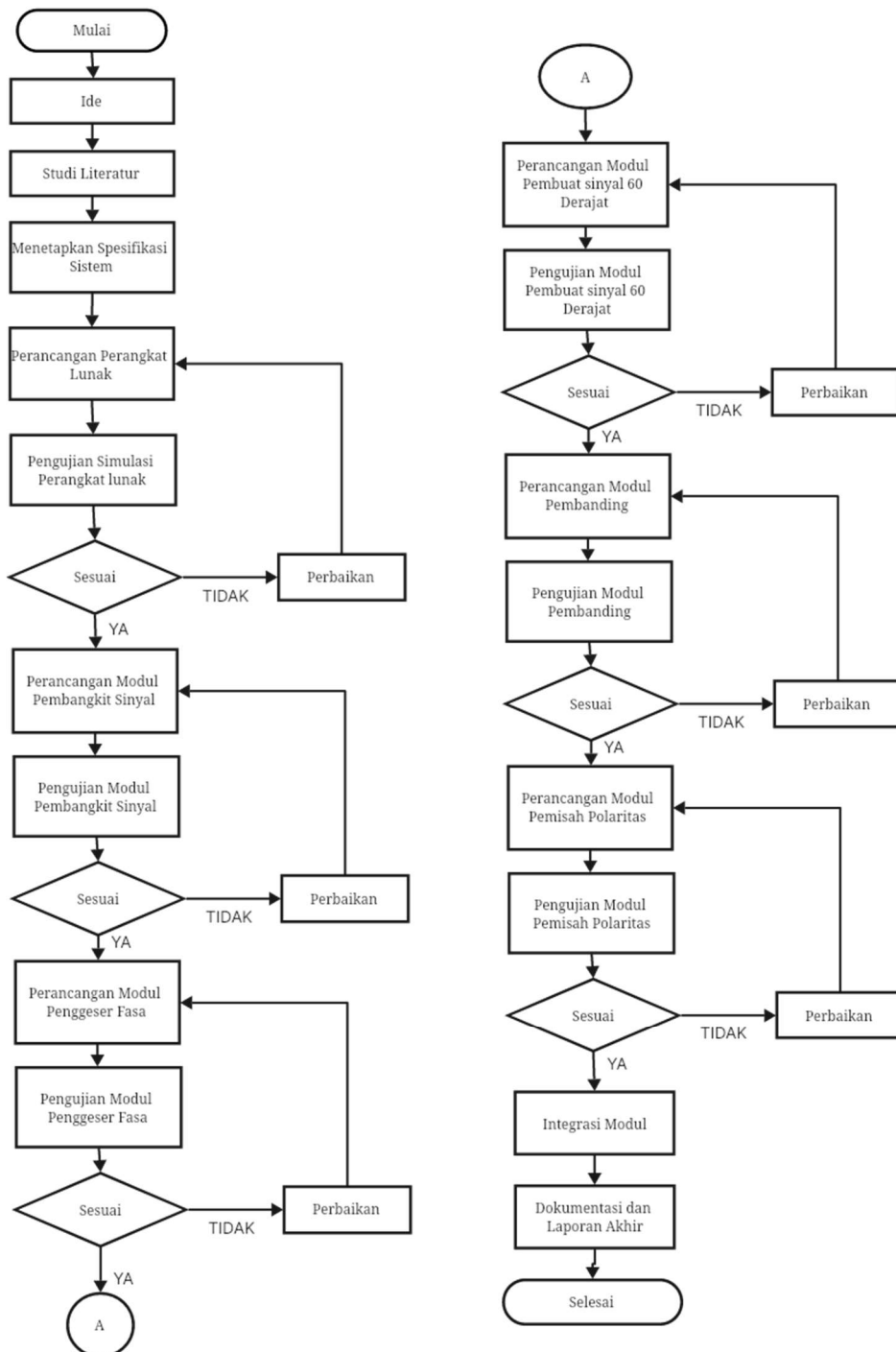
A. PERANCANGAN SISTEM

Perancangan sistem terbagi menjadi perancangan simulasi perangkat lunak dan perancangan perangkat keras. Perancangan sistem ini menggunakan software Proteus 8 Profesional versi 8.12 dan EAGLE versi 7.1.0. Sistem ini terbagi menjadi beberapa modul, antara lain:

1. Modul pembangkit sinyal
2. Modul penggeser Fasa
3. Modul pembuat gelombang 60 derajat PWM
4. Modul Pembanding
5. Modul pemisah polaritas

Dalam melakukan tahap perancangan, terdapat tahapan yang harus dilakukan secara sistematis dan real agar alat dapat terselesaikan sesuai dengan rencana, yaitu:

1. Membuat deskripsi kerja pada sistem beserta spesifikasinya.
2. Membuat diagram blok pada sistem.
3. Membuat perancangan perangkat.

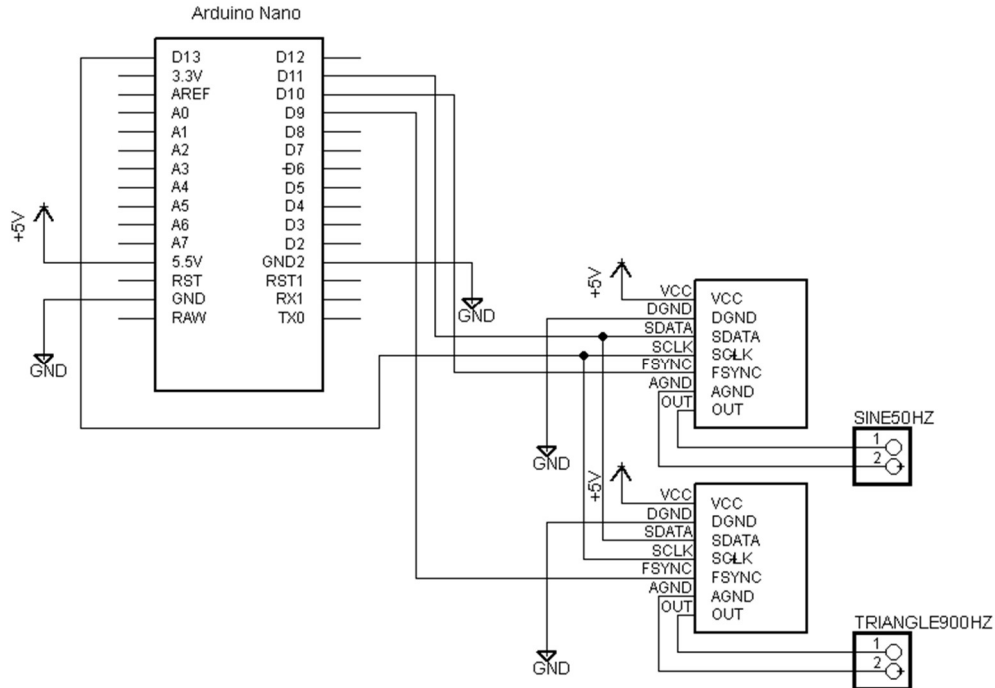


Gambar 1. Diagram alir penelitian

B. PERANCANGAN MODUL

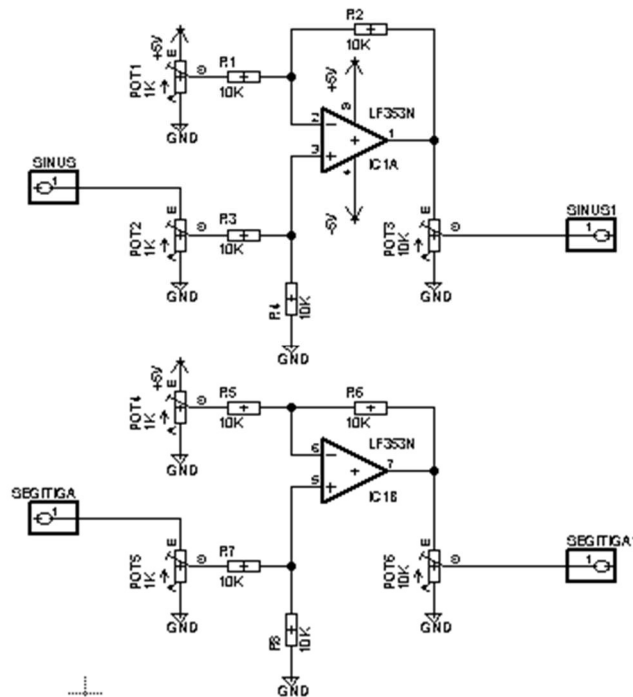
1) PERANCANGAN MODUL PEMBANGKIT SINYAL

Modul pembangkit sinyal menggunakan AD9833 yang dikontrol menggunakan perangkat mikrokontroler Arduino Nano dengan chip ATmega328P untuk pengaturan jenis gelombang dan frekuensinya. Kedua komponen tersebut terhubung melalui komunikasi serial. Tujuan Modul ini adalah untuk menghasilkan sinyal keluaran berupa gelombang sinusoidal 50 Hz dan gelombang segitiga 900 Hz.

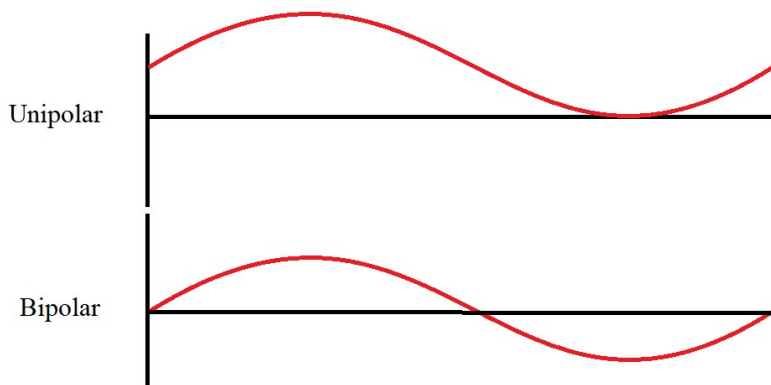


Gambar 2. Rangkaian skematik modul pembangkit sinyal

Gelombang output dari pembangkit sinyal kemudian diteruskan kepada rangkaian pengurang, fungsi dari rangkaian pengurang pada sistem ini adalah untuk mengubah gelombang hasil pembangkitan AD9833 yang semula unipolar menjadi bipolar. Cara kerja rangkaian ini adalah memasukan gelombang pada input *noninverting* yang kemudian dibandingkan dengan tegangan DC yang mempunyai nilai amplitudo setengah dari amplitudo input.

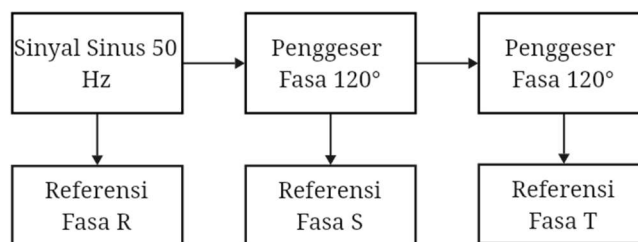


Gambar 3. Rangkaian Pengurang



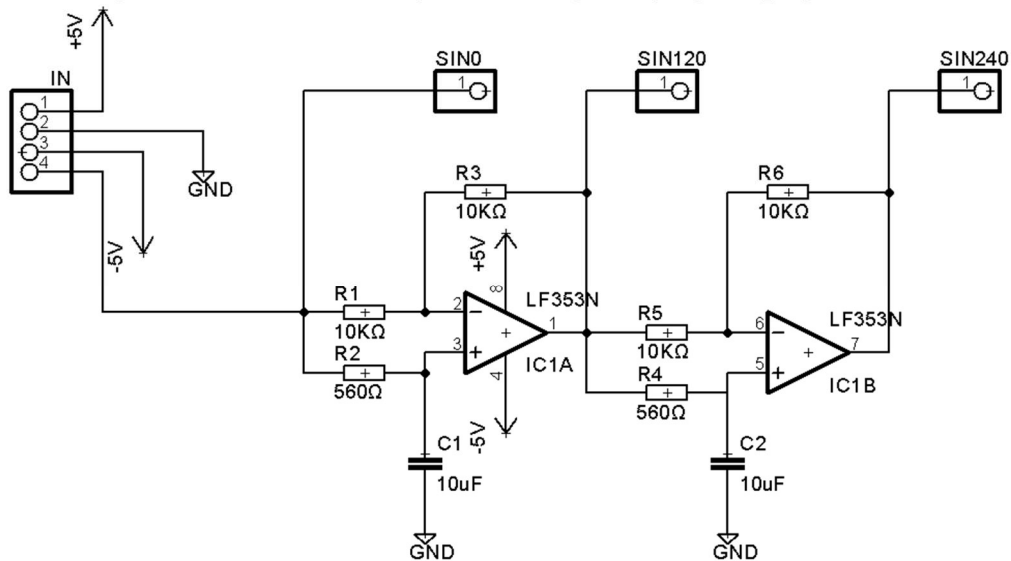
Gambar 4. Perbedaan sinyal sinusoidal unipolar dan bipolar

2) PERANCANGAN MODUL PENGGESER FASA



Gambar 5. Diagram blok modul penggeser fasa

Modul penggeser fasa digunakan untuk membuat sinyal referensi tiga fasa yang mempunyai beda fasa 120°.



Gambar 6. Rangkaian skematik modul penggeser fasa

Untuk mendapatkan pergeseran fasa yang diinginkan maka perlu memperhitungkan nilai R dan C pada rangkaian tersebut. Dengan menggunakan persamaan (1) diperoleh perhitungan sebagai berikut:

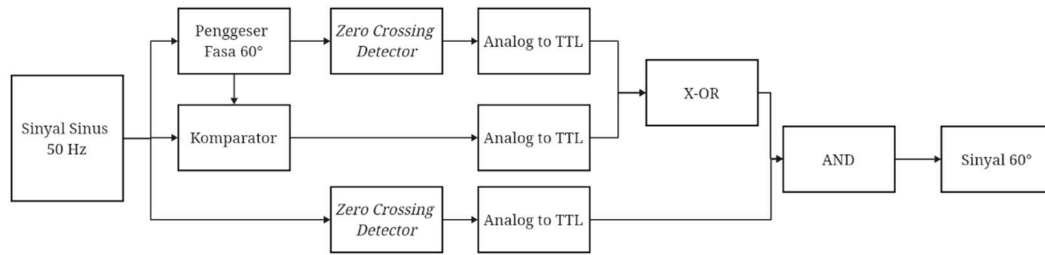
$$\theta = 2 \tan^{-1} 2\pi fRC \quad (1)$$

$$R = \frac{\tan(\frac{\theta}{2})}{2\pi fC}$$

$$R = \frac{\tan(\frac{120^\circ}{2})}{2\pi \times 50 \times 10^{-5}}$$

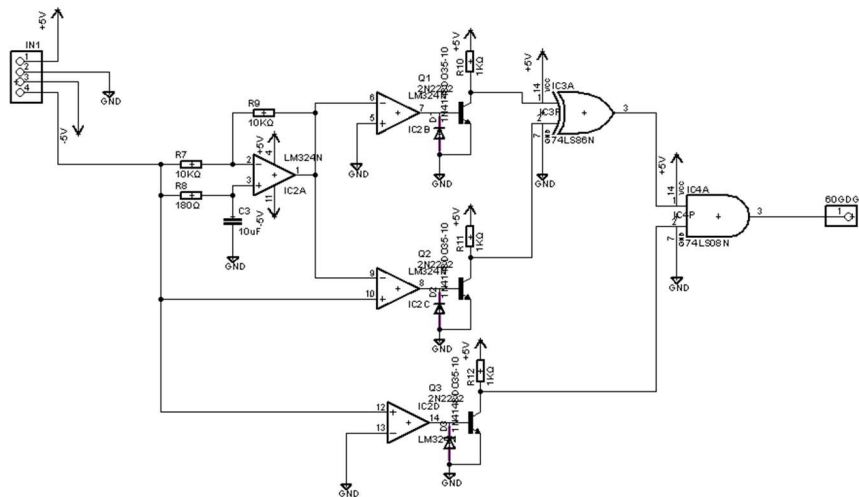
$$R = 551,32 \Omega$$

3) PERANCANGAN MODUL PEMBUAT SINYAL 60 DERAJAT



Gambar 7. Diagram blok modul pembuat sinyal 60 derajat

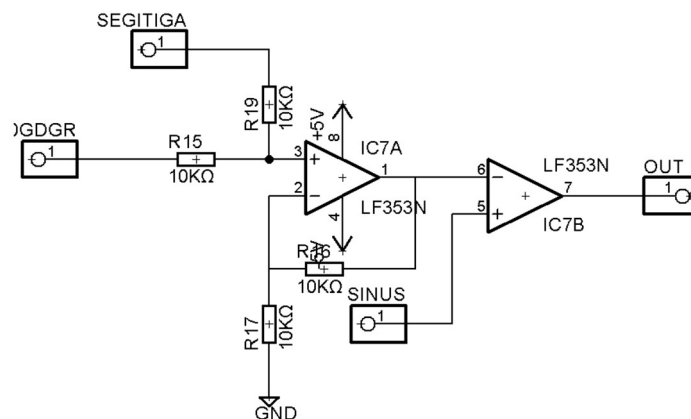
Urutan membuat modul ini antara lain sinyal sinusoidal dari modul penggeser fasa digeser 60 derajat, kemudian hasil tersebut dibandingkan dengan ground (*zero crossing detector*) sehingga menghasilkan sinyal kotak dengan duty cycle 50%. Output setelah digeser 60 derajat juga dibandingkan dengan sinyal sinusoidal dari modul penggeser fasa yang menghasilkan gelombang kotak yang *lagging* 60 derajat. Kemudian dua gelombang kotak tersebut dihubungkan ke sebuah rangkaian analog to TTL agar dapat dihubungkan dengan IC digital. Kedua gelombang kotak tersebut masuk ke IC gerbang logika XOR, *output* dari gerbang logika XOR berupa sinyal digital yang on pada sudut fasa 60°-120° dan 220°-280°. Kemudian gelombang tersebut di-AND-kan dengan hasil *zero crossing* dari sinusoidal *input* sehingga menyisakan sinyal digital yang ON pada 60°-120°.



Gambar 8. Rangkaian skematik 60 degrees pulse width modulation

Modul ini menggunakan IC LM324N, transistor NPN 2N2222, diode 1N148, IC 7408, IC 7486, resistor 10kΩ, resistor 180Ω, dan kapasitor 10μF.

4) PERANCANGAN MODUL PEMBANDING

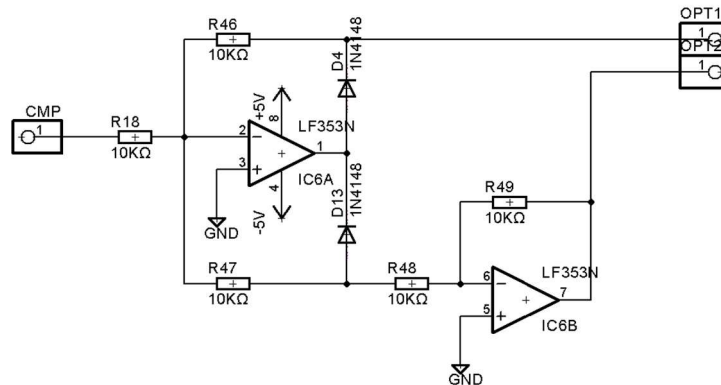


Gambar 2. Rangkaian skematik modul pembanding

Cara kerja dari modul ini yaitu membandingkan gelombang segitiga yang termodulasi oleh sinyal 60 derajat dengan gelombang sinusoidal, sehingga menghasilkan sinyal sinusoidal PWM yang tersaturasi pada sudut 60°-120°.

5) PERANCANGAN MODUL PEMISAH POLARITAS

Modul ini memisahkan siklus positif dan negatif gelombang hasil dari komparator sehingga menghasilkan 2 sinyal keluaran, kemudian sinyal keluaran dari siklus negative tersebut dimasukkan kedalam penguat inverting dengan perbandingan resistor 1:1, sehingga tidak terjadi penaikan amplitudo. Output dari modul ini berupa 2 sinyal PWM yang saling berkebalikan.



Gambar 3. Rangkaian skematik modul pemisah polaritas

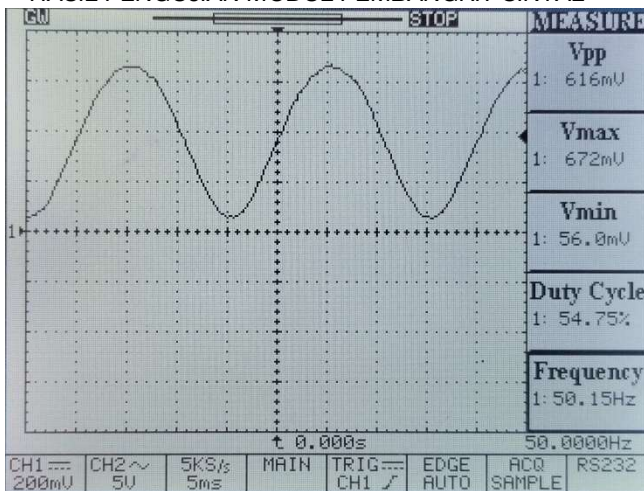
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. PENDAHULUAN

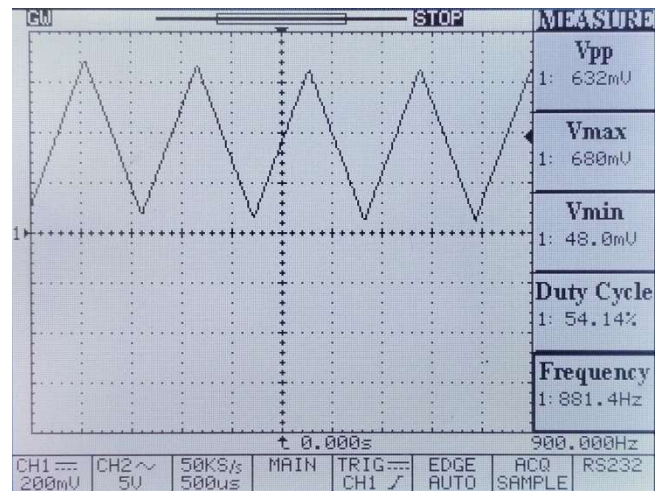
Pengujian sistem terbagi menjadi pengujian simulasi perangkat lunak dan perangkat keras. Perancangan sistem ini menggunakan software Proteus 8 Profesional versi 8.12 dan EAGLE versi 7.1.0. Sistem ini terbagi menjadi beberapa modul, antara lain:

1. Modul pembangkit sinyal
2. Modul penggeser Fasa
3. Modul pembuat gelombang 60 derajat PWM
4. Modul Pembanding
5. Modul pemisah polaritas

1) HASIL PENGUJIAN MODUL PEMBANGKIT SINYAL



Gambar 4. Gelombang sinusoidal keluaran dari modul AD9833



Gambar 5. Gelombang segitiga keluaran dari modul AD9833

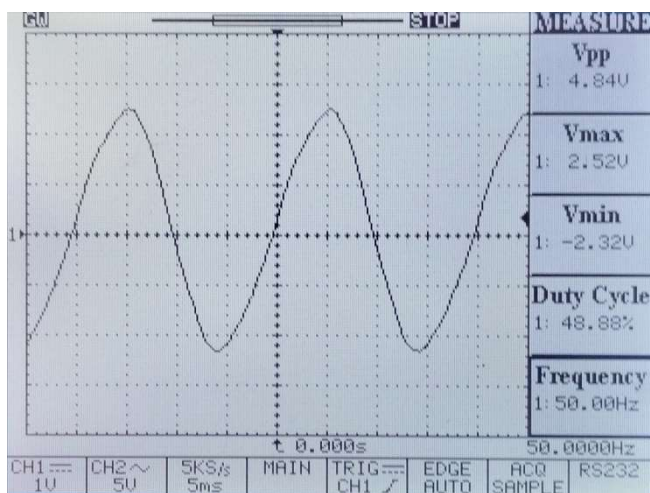
Gambar diatas merupakan gelombang dari keluaran sinyal generator AD9833, sinyal tersebut memiliki nilai besaran terukur sebagai berikut:

TABEL I

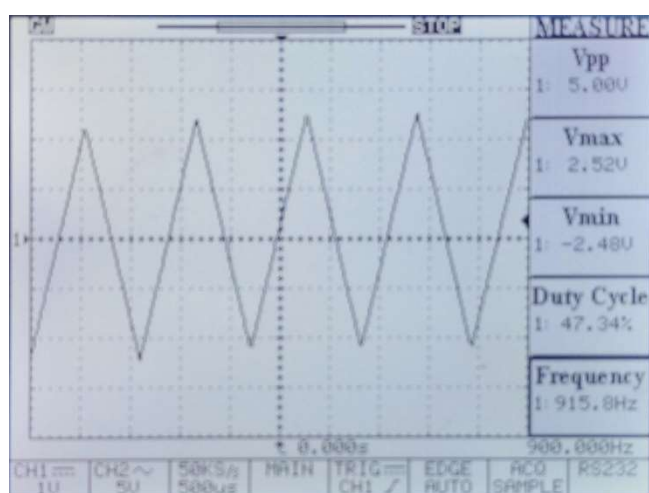
NILAI HASIL PENGUKURAN GELOMBANG KELUARAN DARI AD9833

Jenis Gelombang	Vpp (mV)	Vmax (mV)	Vmin (mV)	Duty Cycle (%)	Frequency (Hz)
Sinusoidal	616	672	56	54,75	50,15
Segitiga	632	680	48	54,14	881,4

Agar sinyal tersebut dapat digunakan untuk modul modul selanjutnya, maka ditambahkan rangkaian pengurang dan penguat seperti pada tahapan perencanaan. Hasil akhir dari modul pembangkit sinyal adalah sebagai berikut.



Gambar 6. Gelombang sinusoidal keluaran dari rangkaian pengurang



Gambar 7. Gelombang segitiga keluaran dari rangkaian pengurang

TABEL II

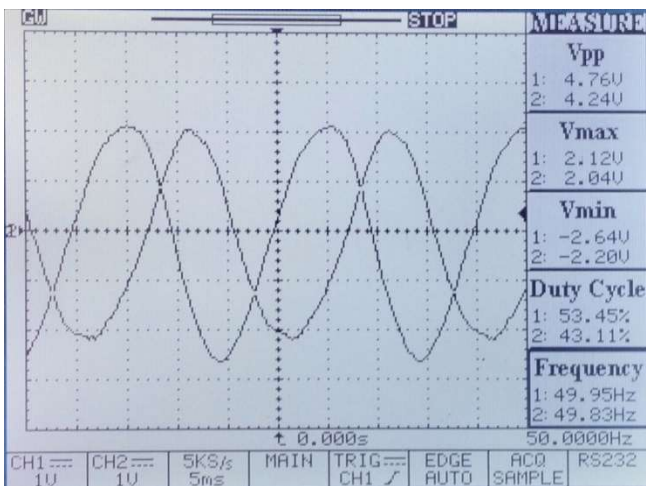
HASIL PENGUKURAN RANGKAIAN PENGUAT

Jenis Gelombang	Vpp (V)	Vmax (V)	Vmin (V)	Duty Cycle (%)	Frequency (Hz)
Sinusoidal	4,84 V	2,52 V	-2,32 V	48,88 %	50 Hz
Segitiga	5,00 V	2,52 V	-2,48 V	47,34 %	915,8 Hz

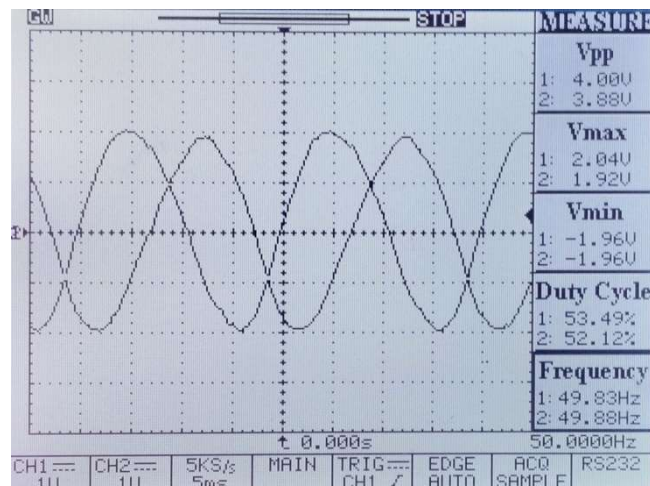
2) HASIL PENGUJIAN MODUL PENGGESER FASA

Tujuan dari pengujian modul penggeser fasa adalah untuk mengetahui bentuk sinyal keluaran beserta nilai besarnya. Diharapkan hasil pengujian ini dapat sesuai dengan rancangan awal.

1. PENGUJIAN PERANGKAT KERAS



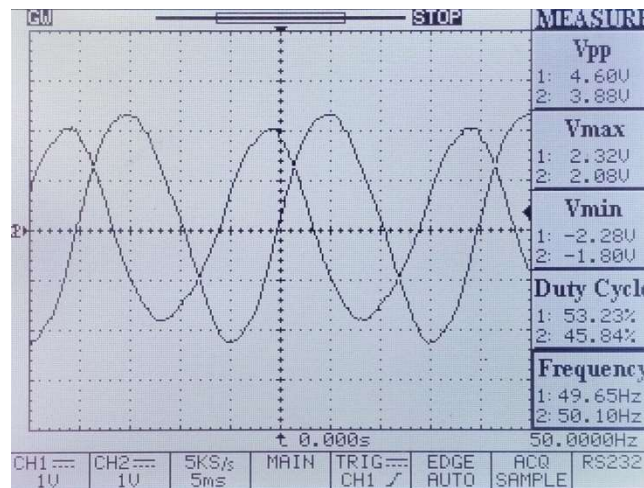
Gambar 8. Gelombang hasil penggeser fasa R-S



Gambar 9. Gelombang hasil penggeser fasa S-T

Channel 1 pada gambar 16 menunjukkan gelombang dari sinyal referensi fasa R, channel 2 menunjukkan gelombang dari sinyal referensi fasa S.

Channel 1 pada gambar 17 menunjukkan gelombang dari sinyal referensi fasa S, channel 2 menunjukkan gelombang dari sinyal referensi fasa T.



Gambar 10. Gelombang Hasil Penggeser Fasa R-T

Channel 1 menunjukkan gelombang dari sinyal referensi fasa R, channel 2 menunjukkan gelombang dari sinyal referensi fasa T.

TABEL III

TABEL HASIL PENGAMATAN MODUL PENGGESER FASA

Jenis Gelombang	Vpp (V)	Vmax (V)	Vmin (V)	Duty Cycle (%)	Frequency (Hz)
Fasa R (1)	4,76	2,12	-2,64	53,45	49,95
Fasa R (2)	4,60	2,32	-2,28	53,23	49,60
Fasa S (1)	4,24	2,04	-2,20	43,11	49,83
Fasa S (2)	4,00	2,04	-1,96	53,49	49,83
Fasa T (1)	3,88	1,92	-1,96	52,12	49,88
Fasa T (2)	3,88	2,08	-1,80	45,84	50,10

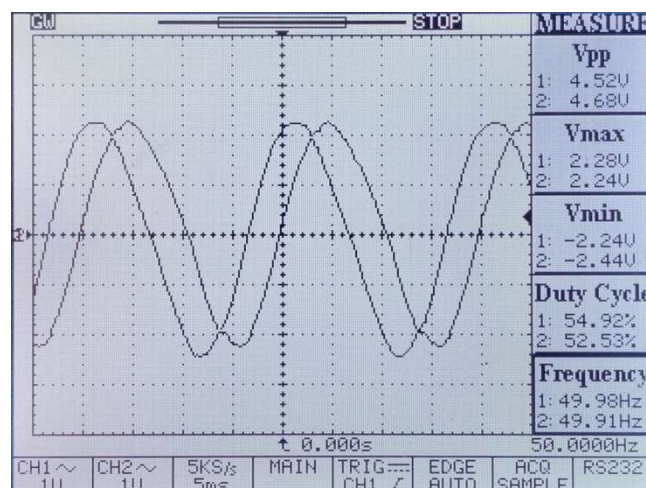
Dari hasil pengujian perangkat keras dapat dilihat bahwa terdapat sedikit perbedaan dari setiap fasanya, hal ini dapat disebabkan oleh nilai toleransi komponen dan stabilitas pembangkit sinyal.

$$Presentasi\ Error\ Maks = \frac{Nilai\ Acuan - Nilai\ penyimpangan\ terbesar}{Nilai\ Acuan} \quad (2)$$

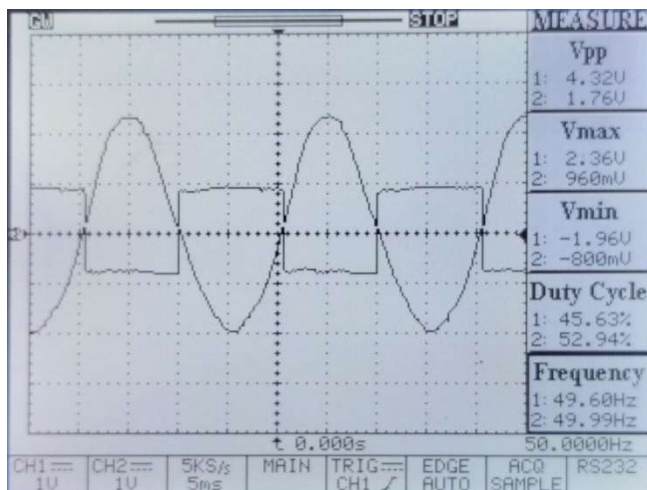
2. HASIL PENGUJIAN MODUL PEMBUAT 60 DERAJAT

Tujuan dari pengujian modul ini adalah untuk melihat sinyal gelombang keluaran dari modul pembuat 60 derajat ini, serta membandingkan bentuk gelombang antara simulasi dan rangkaian hasil implementasi.

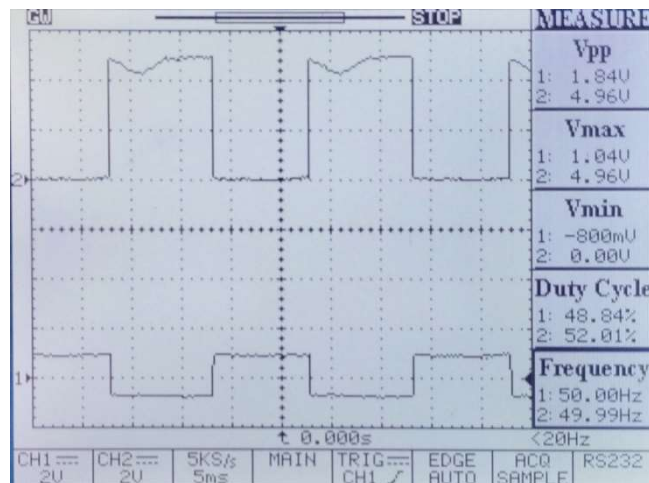
Sinyal sinusoidal digeser sebesar 60 derajat, kemudian kedua sinusoidal tersebut diubah dengan zero crossing detector menjadi gelombang kotak. Kemudian masuk ke rangkaian analog to TTL agar nilai tegangan dikonversi kedalam nilai digital 5 volt.



Gambar 11. Gelombang penggeser fasa 60 derajat

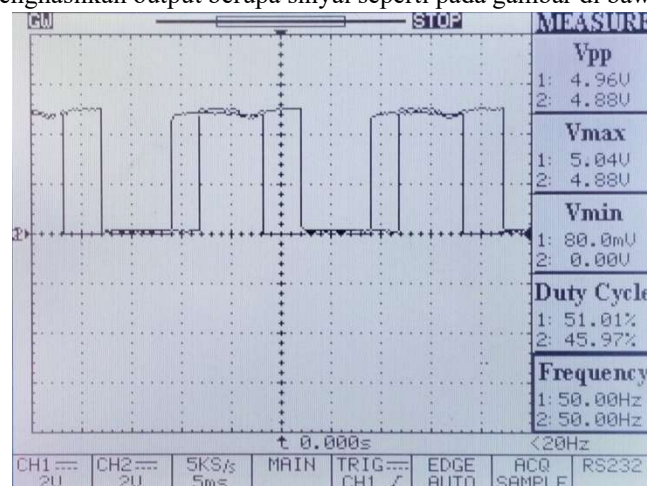


Gambar 12. Gelombang rangkaian zero crossing detector

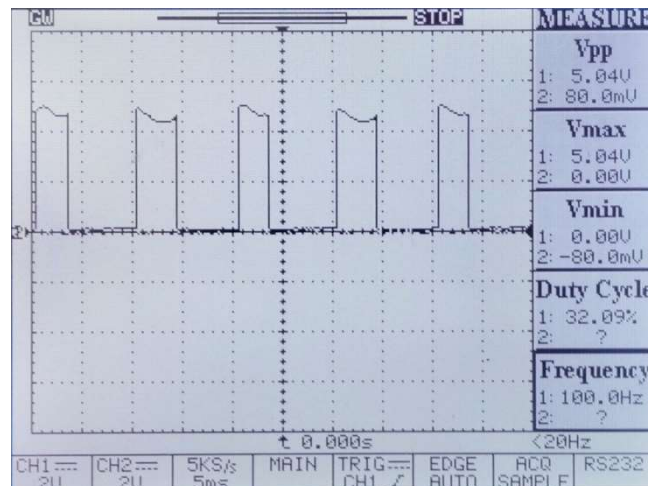


Gambar 13. Gelombang rangkaian analog to TTL

Hasil kedua gelombang kotak tersebut kemudian dimasukkan sebagai input kedalam IC gerbang logika XOR sehingga menghasilkan output berupa sinyal seperti pada gambar di bawah.

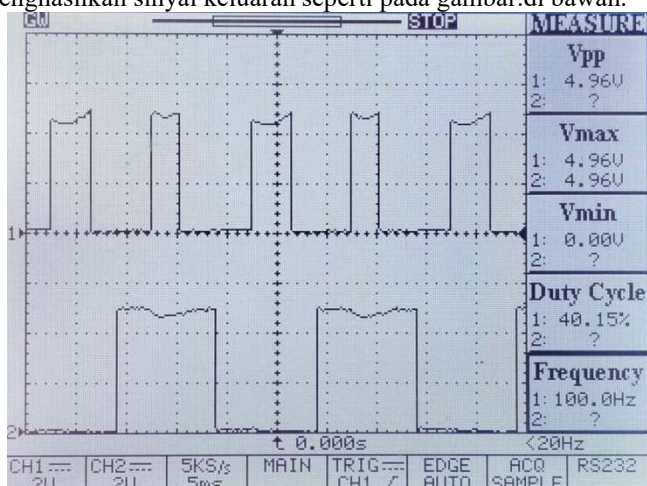


Gambar 14. Sinyal input gerbang logika XOR

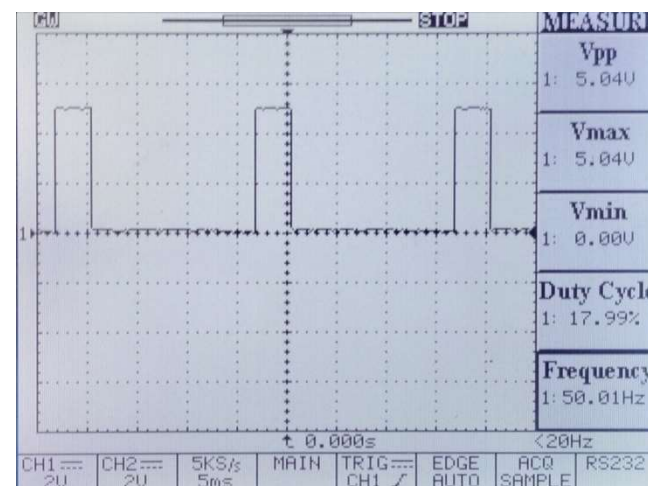


Gambar 15. Hasil keluaran gerbang logika XOR

Hasil yang didapat dari *output* gerbang logika XOR kemudian di-AND-kan dengan sinyal kotak dari *input*, sehingga menghasilkan sinyal keluaran seperti pada gambar di bawah.



Gambar 16. Sinyal input gerbang AND



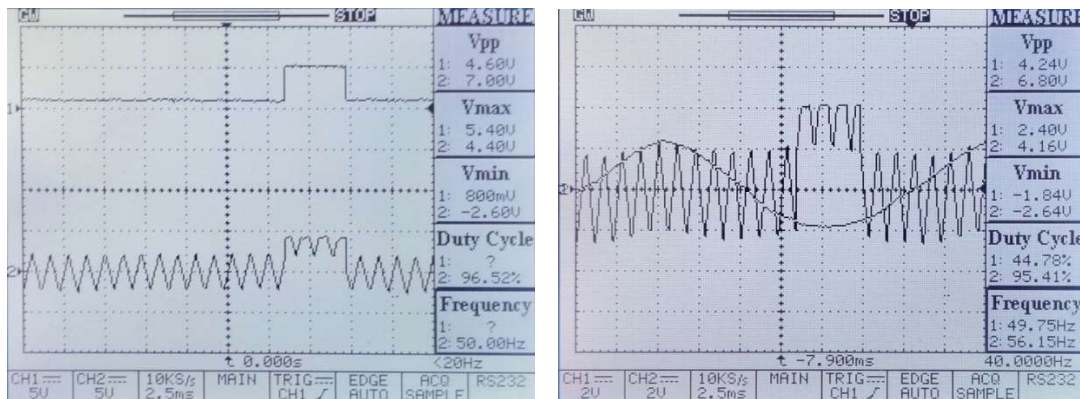
Gambar 17. Sinyal output gerbang AND

TABEL IV

HASIL PENGAMATAN MODUL PEMBUAT 60 DERAJAT

Jenis Gelombang	Vpp	Vmax	Vmin	Duty Cycle	Frequency
Kotak	5,04 V	5,04 V	0,00 V	17,99 %	50,01 Hz

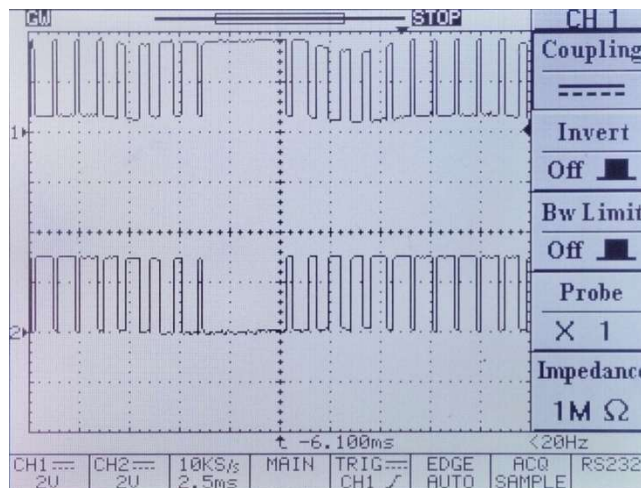
3. HASIL PENGUJIAN MODUL PEMBANDING



Gambar 26. Gelombang input modul pembanding

Sinyal segitiga yang sudah termodifikasi oleh sinyal 60 derajat dibandingkan dengan sinyal sinusoidal, menghasilkan output PWM dengan bentuk seperti pada gambar.

4. HASIL PENGUJIAN MODUL PEMISAH POLARITAS



Gambar 27. Output dari modul pemisah polaritas

Sinyal *output* dari modul pemisah polaritas merupakan 6 sinyal PWM yang setiap fasanya memiliki sepasang sinyal dengan nilai polaritas berkebalikan.

V. KESIMPULAN

1. Telah dihasilkan nilai frekuensi referensi sinyal sinusoidal 50 Hz dengan nilai *error* 0,8%, dengan nilai frekuensi terendah pada 49,60 Hz dan frekuensi tertinggi pada 49,98 Hz.
2. Telah dihasilkan nilai frekuensi *carrier* segitiga 900 Hz, dengan nilai *error* 2,06%, dengan nilai frekuensi terendah pada 881,4 Hz, dan frekuensi tertinggi pada 915,8 Hz.
3. Telah dihasilkan 6 jumlah *output* pemisah polaritas untuk 3 fasa dengan setiap fasanya memiliki sepasang pemisah polaritas
4. Telah diperoleh perbedaan sudut dari sinyal referensi antar fasanya yaitu sebesar 120,74° dari target awal yaitu 120°, hal tersebut terjadi dikarenakan ketersediaan nilai komponen resistor di pasaran yang tidak sesuai dengan perhitungan.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam hasil penelitian ini.

REFERENSI

- [1] N. Desiwantiyani, "Rancang Bangun Inverter SPWM," *Ranc. Bangun Invert. SPWM*, pp. 1-45, 2018.
- [2] Lalu Riza Aliyan, Rini Nur Hasanah, and M. Aziz Muslim, "Desain Inverter Tiga Fasa dengan Minimum," *J. EECCIS*, vol. Vol. 8, No. no. 1, pp. 79-84, 2014.
- [3] A. Cristyadi, D. Septiyanto, and N. Mulyono, "Rancang Bangun Modul Bipolar 60 Degrees-Pulse Width Modulation Fasa Tunggal," pp. 1-8, 2022.
- [4] R. M. Fahrizal, D. Septiyanto, and N. Mulyono, "Rancang Bangun Modul Unipolar 60 Degrees-Pulse Width Modulation Fasa Tunggal," pp. 1-8, 2022.
- [5] R. Muhammad, D. Septiyanto, and N. Mulyono, "Rancang Bangun Inverter 3 Fasa Berbasis Bipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 1 3, no. 01, pp. 13-14, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/4417>
- [6] M. Afandi, "ANALYSIS AND DESIGN OF 3 PHASE PWM ANALISA DAN RANCANG BANGUN PWM INVERTER 3 PHASA MENGGUNAKAN ARDUINO UNO," pp. 2-3.
- [7] Muhamad Rifa'i, Eka Mandayatma, and Fathoni, "Rancang Bangun Spwm Inverter 3 Fasa Daya Kecil Metode Skalar," *J. Tek. Ilmu Dan Apl.*, vol. 9, no. 1,

- pp. 50–55, 2021, doi: 10.33795/jtia.v9i1.11.
- [8] A. Efendi Setiawan, T. Odianto, S. Muharom, J. Teknik Elektro, and I. Teknologi Adhi Tama, “Rancang Bangun Inverter 3 Fasa Sebagai Pengendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa 1/2Hp 0.37Kw Menggunakan Metode Spwm Berbasis Arm Mikrokontroler (Stm32F4),” *Semin. Nas. Sains dan Teknol. Terap. IV*, pp. 17–24, 2016.
- [9] Dinda Triatno, “Pembuatan Dan Pengujian Power Inverter Push-Pull Satu Fasa Pure Shine Wave 15 Watt,” *Tek. Jur. Energi, Konversi Bandung, Politek. Negeri*, 2017.
- [10] Y. A. Sinaga, A. S. Samosir, and A. Haris, “Rancang Bangun Inverter 1 Phasa dengan Kontrol Pembangkit Pulse Width Modulation (PWM),” *Electr. - J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 81–91, 2017.
- [11] Ratmijai, I. N. S. Wahyu, and Supriono, “PERBANDINGAN TEKNIK MODULASI INVERTER 3-PHASA 2-TINGKAT UNTUK MENGHASILKAN TEGANGAN KELUARAN VARIABEL,” vol. 6, no. 1, pp. 67–74, 2019.
- [12] Moez Youssef, “Simulation and Design of A Single Phase Inverter with Digital PWM Issued by An Arduino Board,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. V9, no. 08, pp. 560–566, 2020, doi: 10.17577/ijertv9is080237.
- [13] Eko Nuryanto, “Penerapan Dari Op-Amp (Operational Amplifier),” *Orbith*, vol. 13, no. 1, pp. 43–50, 2017.
- [14] H. D. Surjono, “Elektronika Lanjut,” *Cerdas Ulet Kreat.*, pp. 53–61, 2009.
- [15] H. F. Siregar and I. Parinduri, “PROTOYPE GERBANG LOGIKA (AND , OR , NOT , NAND , NOR) PADA LABORATORIUM ELEKTRONIKA STMIK ROYAL KISARAN,” vol. 1, pp. 38–47, 2017.
- [16] S. Y. Panggabean, “Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Menggunakan Teknik High Voltage Pwm (Pulse Width Modulation),” *Ranc. Bangun Invert. Satu Fasa Menggunakan Tek. High Volt. PWM (Pulse Width Modul. Subas.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–9, 2017.
- [17] A. REHMAN and M. ASHRAF, "Design and Analysis of PWM Inverter for 100KVA Solid State Transformer in a Distribution System," IEE ACCES, 2019.
- [18] N. Farhana Abdul Hamid, M. Alleef Abd Jalil, and N. Syafiqah Syahirah Mohamed, “Design and simulation of single phase inverter using SPWM unipolar technique,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1432, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012021.
- [19] R. Mundus, K. H. Khwee, and A. Hiendro, “Rancang Bangun Inverter Dengan Menggunakan Sumber Baterai DC 12V,” *J. Tek. Elektro Univ. Tanjungpura*, vol. 2, no. 1, pp. 227–233, 2019.
- [20] 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.