

***Trainer-kit* Sistem Penyearah Terkendali 3 Fasa Berbasis SCR dan Mikrokontroler**

Satriyo Wibowo¹, Septian Jodie Patriatama², Muhammad Bagas Saputra³, Syaifullah Filard Latifan⁴, Dezetty Monika⁵ dan Hatib Setiana⁶

Program Studi Teknik Otamasi Listrik Industri, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta Jl. Prof. DR. Ir. G. A. Siwabessy Kampus Baru Universitas Indonesia, Depok, 16425, Indonesia.

^{1,2,3,5,6}Politeknik Negeri Jakarta
⁴Universitas Indonesia

E-mail: ¹satriyo.wbw23@gmail.com.

Abstrak

Keterbatasan perangkat praktikum elektronika daya di laboratorium menjadi hambatan nyata dalam pembentukan kompetensi teknis mahasiswa. Penelitian ini bertujuan merancang dan merealisasikan sebuah *trainer-kit* sistem penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh berbasis *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) dengan kendali digital menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3 ATmega328P. Sistem dirancang dengan pendekatan eksperimen yang mencakup perancangan rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD) berbasis Op-Amp, modul penguat pulsa FET driver TC4427, transformator pulsa sebagai isolasi galvanik, serta enam SCR TYN1225 dalam konfigurasi jembatan penuh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ZCD mampu menghasilkan sinyal logika yang stabil dengan tegangan keluaran 4,52–4,58V, modul penguat pulsa secara konsisten menghasilkan tegangan drain 48,3V dan pengendalian sudut penyalan melalui *delay firing* berhasil menurunkan tegangan keluaran DC secara monoton dari 456V hingga 150V. *Trainer-kit* ini berpotensi digunakan sebagai media praktikum elektronika daya.

Keywords: penyearah terkendali, sudut penyalan, mikrokontroler, SCR, zero crossing detector

ABSTRACT

The limited availability of power electronics laboratory equipment poses a significant obstacle to the development of students' technical competencies. This study aims to design and implement a three-phase full-wave controlled rectifier trainer-kit based on Silicon Controlled Rectifier (SCR) with digital control using an Arduino Uno R3 ATmega328P microcontroller. The system was developed using an experimental approach encompassing the design of an Op-Amp-based Zero Crossing Detector (ZCD) circuit, a TC4427 FET driver pulse amplifier module, a pulse transformer for galvanic isolation, and six TYN1225 SCRs in a full-bridge configuration. Test results indicate that the ZCD successfully produced stable logic signals with an output voltage of 4.52–4.58V, the pulse amplifier module consistently delivered a drain voltage of 48.3V, and firing angle control via firing delay effectively reduced the DC output voltage monotonically from 456V to 150V. This trainer-kit has strong potential as a practical learning medium for power electronics laboratory courses.

Keywords: controlled rectifier, firing angle, microcontroller, SCR, zero crossing detector

1. Pendahuluan

Elektronika daya merupakan cabang ilmu Teknik elektro yang memiliki peran strategis dalam berbagai sistem konversi energi modern, mulai dari skala rumah tangga hingga industri besar [1]. Di antara berbagai topologi konverter yang ada, sistem penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh berbasis *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) menempati posisi yang sangat penting, karena kemampuannya dalam mengonversi tegangan masukan AC tiga fasa menjadi tegangan keluaran DC yang nilainya dapat diatur secara presisi melalui mekanisme sudut penyalan atau *firing angle* [2], [3], [4]. Prinsip kerja sistem ini bergantung pada karakteristik SCR sebagai komponen semikonduktor berstruktur empat lapis (PNPN) yang dapat dikendalikan konduksinya melalui elektroda gate-nya, sehingga memungkinkan pengaturan daya secara bertahap [5]. Di dunia industri, teknologi ini diaplikasikan secara luas pada sistem penggerak motor DC berdaya tinggi [6].

Di sisi pendidikan vokasi, penguasaan konsep elektronika daya tidak cukup hanya melalui pendekatan teoritis. Mahasiswa memerlukan media pembelajaran berbasis pengalaman langsung agar dapat membangun pemahaman yang utuh tentang karakteristik sistem. Namun, keterbatasan perangkat praktikum yang memadai di laboratorium perguruan tinggi menjadi hambatan yang kerap dijumpai. Kondisi ini berdampak langsung pada kurang optimalnya kemampuan mahasiswa dalam memahami mekanisme pengaturan sudut penyalan, membaca karakteristik gelombang keluaran, serta mengamati hubungan antara sudut picu dan tegangan DC yang dihasilkan. Trainer praktikum yang dirancang khusus menjadi salah satu solusi yang telah terbukti efektif dalam mendukung proses pembelajaran praktis di pendidikan Teknik [7], [8], [9].

Berbagai penelitian dan Implementasi telah dilakukan mengenai sistem penyearah penyearah tiga fasa. Literatur terdahulu mayoritas menggunakan pendekatan teori dasar penyearah jembatan dioda (tak terkendali) sehingga tegangan DC yang dihasilkan nilainya tetap dan tidak dapat diubah-ubah [2], [9]. Pengembangan ke arah penyearah terkendali memang telah dilakukan, namun masih terbatas pada model semi-terkendali yaitu dengan pengaturan sudut penyalan manual yang rentan terhadap *noise* dan kurang presisi [10]. Di sisi lain, upaya untuk beralih ke kontrol digital telah dilakukan dengan menggunakan mikrokontroler Arduino, tetapi implementasinya masih sebatas simulasi perangkat lunak tanpa wujud perangkat keras fisik [11]. Dengan demikian, untuk pengaturan waktu penyalan SCR secara digital memerlukan rangkaian pengendali yang dilengkapi dengan sinyal referensi dari rangkaian *zero crossing detector* [12].

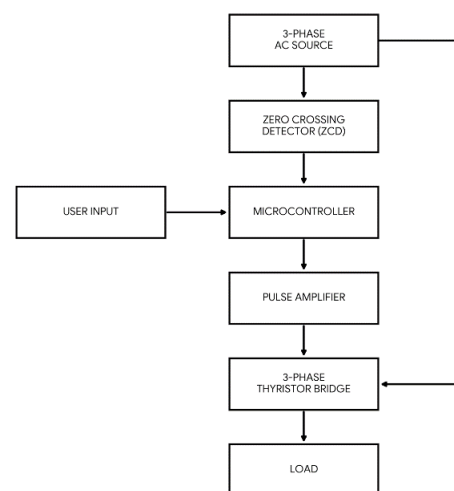
Berangkat dari keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan perangkat keras penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh berbasis mikrokontroler [12], [13]. Dalam penelitian ini, menggunakan perangkat keras yang digunakan sebagai sistem kontrol adalah ARDUINO Uno R3 ATmega328P dipilih karena spesifikasinya yang sesuai keperluan seperti jumlah pin I/O yang mendukung dan memiliki kecepatan clock yang tinggi untuk sistem penyearah yaitu 16mhz cukup untuk mengatur trigger gate SCR. Dalam sistem ini, mikrokontroler berperan vital sebagai unit pemroses untuk mendeteksi titik nol *zero-crossing* (ZCD) secara *real-time* dan mengeksekusi algoritma perhitungan penundaan sudut pemucuan (*delay angle*).

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah merancang, membangun, dan menguji sebuah *trainer-kit* sistem penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh berbasis SCR dengan sistem kendali digital mikrokontroler, sehingga dapat difungsikan sebagai media praktikum elektronika daya. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi kinerja sistem terhadap karakteristik tegangan keluaran DC pada berbagai sudut penyalan, serta mengevaluasi akurasi dan kestabilan tegangan yang dihasilkan sebagai dasar pengembangan perangkat pembelajaran yang lebih lanjut.

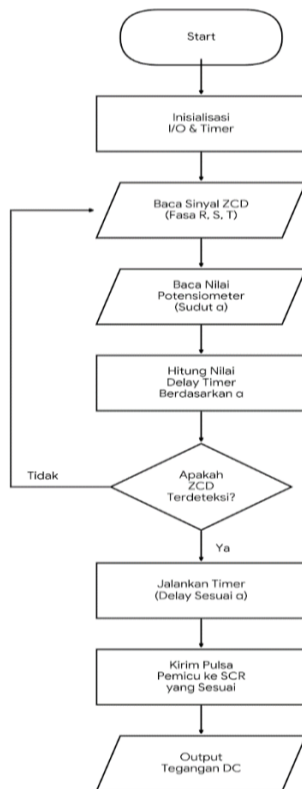
2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rancang bangun modul *trainer-kit* sistem penyearah tiga fasa berbasis SCR TYN1225 dengan metode eksperimen. Metode eksperimen dilakukan dengan cara merancang, membuat dan menguji alat yang dilakukan di Laboratorium Elektronika.

A. Deskripsi Sistem



Gambar 1. Topologi Sistem

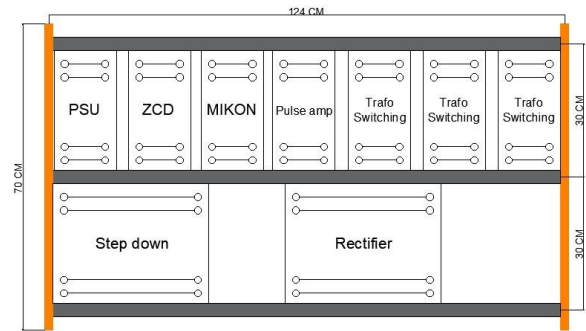


Gambar 2. Flowchart Sistem

Cara kerja sistem ini dimulai dari sumber tegangan AC tiga fasa dan frekuensi 50Hz disalurkan secara bersamaan menuju rangkaian penyearah *thyristor* dan rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD). Rangkaian ZCD berfungsi untuk mendeteksi titik di mana gelombang tegangan pada setiap fasa R, S dan T melewati nilai nol, lalu mengirimkan sinyal interupsi ke mikrokontroler sebagai titik referensi waktu (sinkronisasi). Berdasarkan sinyal sinkronisasi tersebut dan besaran sudut penyalan (α) yang telah diatur, mikrokontroler akan menghitung waktu tunda (*delay*) secara presisi sebelum membangkitkan pulsa pemicu (*trigger pulse*). Pulsa pemicu ini kemudian disalurkan melalui rangkaian *pulse amplifier* untuk menyalakan gerbang (*gate*) pada masing-masing *thyristor* secara bergantian sesuai urutan fasanya, sehingga komponen *thyristor* tersebut aktif dan mulai menyearahkan tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan keluaran arus searah (DC) yang nilai rata-ratanya dapat diatur melalui variasi sudut penyalan pada program mikrokontroler.

B. Tampilan Trainer-kit

Secara struktural, sistem ini dibagi menjadi dua bagian utama: 1. Sebagai sistem kontrol dan pemicu. 2. Sebagai sistem daya. Tampilan desain modul dapat dilihat pada Gambar 3.



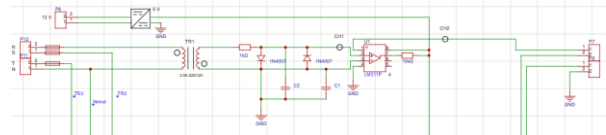
Gambar 3. Papan modul trainer-kit

C. Desain Skematik Rangkaian

Perancangan sistem penyearah terkendali tiga fasa pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *EasyEDA* sebagai media desain skematik dan simulasi awal rangkaian. Desain skematik terdiri atas beberapa blok utama, yaitu:

1) Desain Skematik Rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD)

Rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD), berfungsi mendeteksi saat gelombang sinusoidal tegangan AC melewati titik nol volt. Sinyal sinkronisasi ini digunakan sebagai referensi waktu utama bagi mikrokontroler dalam menentukan sudut penyalan (*firing*) pada komponen daya.



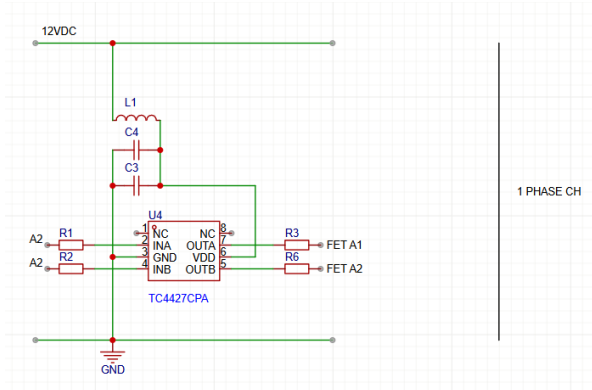
Gambar 4. Rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD)

Pada skematik Gambar 4, setiap fasa R, S dan T dihubungkan ke trafo step-down 220V/12V, dengan rating 0,5A/220V. penurunan tegangan ini diperlukan karena sinyal tegangan jala-jala 220V tidak dapat langsung diumpankan ke komparator berbasis tegangan rendah. Keluaran skunder trafo disearahkan menggunakan Dioda 1N4007 dan difilter dengan kapasitor untuk menghasilkan sinyal DC yang rendah riak. Sinyal ini kemudia diumpankan ke pin inverting dan non-inverting komparator LM311P berbasis Op-Amp untuk menghasilkan sinyal logika bersih setiap kali tegangan melewati titik nol.

Keluaran dari ketiga komparator dihubungkan ke pin interupsi Arduino, sehingga tiga sinyal ZCD yang bergeser fasa 120° satu sama lain dapat diproses secara independen oleh firmware. Titik uji (test point) CH2 pada jalur keluaran komparator pertama untuk mengukur sinyal yang dihasilkan saat pengukuran.

2) Desain Skematik Pulse Amplifier

Rangkaian *pulse amplifier* dirancang untuk memperkuat sinyal trigger dari mikrokontroler sebelum diteruskan ke gate SCR melalui pulse transformator. Penguatan sinyal diperlukan karena arus keluaran mikrokontroler relatif kecil dan belum mampu memicu SCR secara langsung.

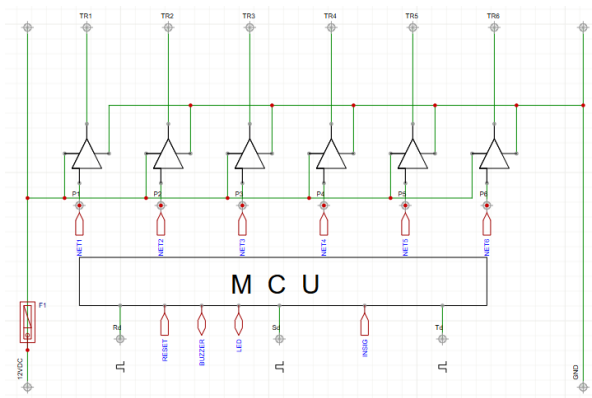


Gambar 5. Rangkaian Penguat Pulsa

Rangkaian penguatan pulsa dengan fet driver TC4427, INA terhubung ke keluaran sinyal Arduino, dan OUTA menghasilkan sinyal yang diperkuat untuk menggerakkan gate FET eksternal.

3) Desain Antarmuka mikrokontroler dan Penguat Pulsa

Desain ini menggambarkan hubungan antara mikrokontroler sebagai pusat kendali dengan ke-6 penguat pulsa yang masing-masing menggerakkan satu SCR. Dari skematik rangkaian mikrokontroler terhubung ke-6 keluaran NET1-NET6 yang masing-masing diteruskan ke gate driver melalui konektor P1 hingga P6.



Gambar 6. Desain MCU dan Pulse Amplifier

Rangkaian MCU berfungsi sebagai pusat pengendali sistem firing SCR. Pada penelitian ini digunakan Arduino Uno untuk mengolah sinyal sinkronisasi dari rangkaian ZCD dan menghasilkan sinyal trigger sesuai sudut firing. Mikrokontroler menerima sinyal interrupt dari ZCD

sebagai referensi awal gelombang AC. Setelah itu sistem menghitung waktu delay berdasarkan besar sudut firing (α). Delay pemecuan dihitung berdasarkan hubungan antara sudut firing dan periode gelombang AC sebagai berikut:

$$t_{delay} = \frac{\alpha}{T} \times 360^\circ \quad (1)$$

Keterangan:

t_{delay} = waktu delay pemecuan

α = sudut firing

T = periode gelombang AC

4) Rangkaian SCR Rectifier dengan Transformator Pulsa

Subsistem ini merupakan rangkaian daya inti dari sistem, yaitu jembatan SCR tiga fasa yang dilengkapi transformator pulsa sebagai media transfer energi berkecepatan tinggi. Prinsip kerja sistem dimulai ketika sumber AC tiga fasa diberikan pada input penyearah. Selanjutnya mikrokontroler mengirimkan pulsa trigger menuju gate SCR melalui pulse transformer berdasarkan urutan firing yang telah ditentukan. Nilai tegangan keluaran DC dipengaruhi oleh besar sudut firing SCR.

Hubungan tegangan keluaran rata-rata penyearah SCR tiga fasa terhadap sudut firing dapat dinyatakan dengan Pers. (2):

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos(\alpha) \quad (2)$$

Keterangan:

V_{DC} = Teg.DC rata-rata

V_m = Teg. Maksimum sumber AC

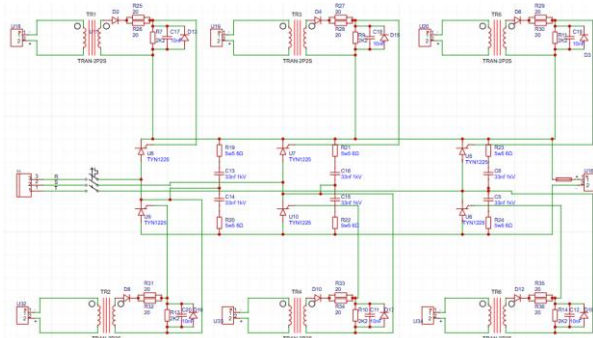
α = Sudut firing SCR

Urutan penyalan keenam SCR mengikuti sekuens listrik tiga fasa dengan interval 60° per langkah sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Urutan SCR pada Satu Siklus Gelombang

Uru tan	sudut	SCR yang aktif	Fasa konduksi	Transisi (komutasi)
1	0° - 60°	1 & 4	L1 → L2 (R ke S)	SCR 1 Menyala (Sisi Atas beralih dari L3 ke L1). SCR 4 tetap aktif.
2	60° - 120°	1 & 6	L1 → L2 (R ke T)	SCR 6 Menyala (Sisi Bawah beralih dari L2 ke L3). SCR 1 tetap aktif.

3	120°-180°	3 & 6	L1 → L2 (S ke T)	SCR 3 Menyala (Sisi Atas beralih dari L1 ke L2). SCR 6 tetap aktif.
4	180°-240°	3 & 2	L1 → L2 (S ke R)	SCR 2 Menyala (Sisi Bawah beralih dari L3 ke L1). SCR 3 tetap aktif.
5	240°-300°	5 & 2	L1 → L2 (T ke R)	SCR 5 Menyala (Sisi Atas beralih dari L2 ke L3). SCR 2 tetap aktif.
6	300°-360°	5 & 4	L1 → L2 (T ke S)	SCR 4 Menyala (Sisi Bawah beralih dari L1 ke L2). SCR 5 tetap aktif.



Gambar 7. Desain SCR Rectifier dengan Transformer Pulse

Pada skematik, enam buah SCR berjenis TYN1225 tersusun dalam konfigurasi jembatan penuh tiga fasa (*three-phase full-wave bridge*). Tiga SCR kelompok anoda (1, 3, 5) dan tiga SCR kelompok katoda (2, 4, 6). Setiap SCR dilindungi oleh jaringan *snubber* terdiri dari kapasitor 33nF/1kV yang dirangkai seri dengan resistor 5W 6Ω, berfungsi meredam lonjakan tegangan akibat pergantian konduksi antar SCR.

Setiap transformator pulsa menghubungkan keluaran FET driver ke gate-katoda masing-masing SCR. Di sisi sekunder trafo pulsa, rangkaian penyearah dioda dengan resistor seri 10 Ω dan resistor *pull-down* 2k2 Ω paralel sebagai pembatas arus. kapasitor filter 10nF membentuk pulsa DC unipolar yang diperlukan oleh gate SCR.

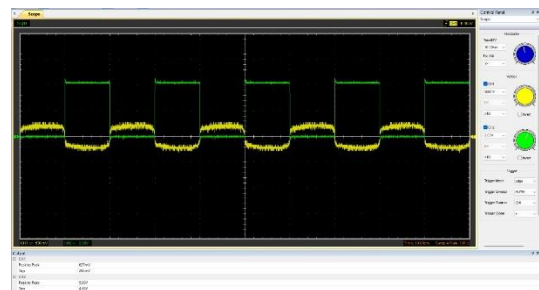
3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi hasil rangkaian penyearah tiga fasa berbasis *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) yang telah dirancang. Seluruh data pemantauan gelombang diambil secara *real-time*

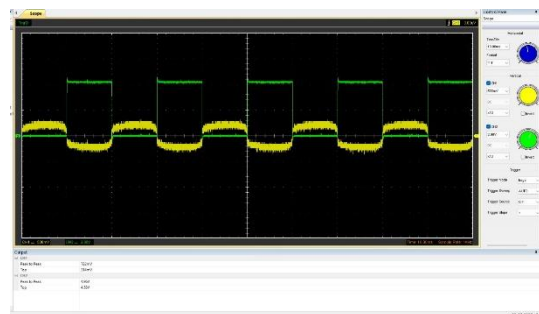
menggunakan osiloskop berbasis PC tipe Hantek 6022BE. Fokus pengujian meliputi sinkronisasi sinyal *zero crossing detector* (ZCD), performa rangkaian penguat gate, respons firing SCR terhadap sinyal pemicu, serta pengaruh *delay firing* terhadap nilai tegangan DC yang dihasilkan.

A. Deteksi Titik Nol Zero Crossing Detector Berbasis Komparator Op-Amp.

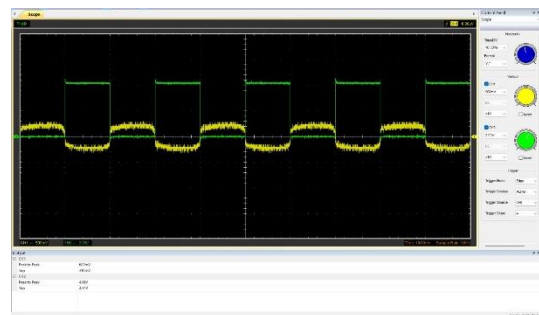
Tahap awal pengujian dilakukan pada rangkaian *Zero Crossing* (Hijau) terhadap sinyal dioda anti parallel (Kuning) pada masing-masing fasa R, S, dan T sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8 sampai Gambar 10.



Gambar 8. Rangkaian ZCD Fasa R Terhadap Dioda Anti Paralel R



Gambar 9. Rangkaian ZCD Fasa S Terhadap Dioda Anti Paralel S



Gambar 10. Rangkaian ZCD Fasa T Terhadap Dioda Anti Paralel T

Tabel 2 Karakteristik Tegangan Output Dioda Anti-Paralel dan Komparator

Parameter Pengukuran	Fasa R	Fasa S	Fasa T
CH1: Dioda Anti-Paralel V_{pp}	627 mV	722 mV	627 mV
CH1: Dioda Anti-Paralel V_{top}	282 mV	314 mV	314 mV
CH2: Output ZCD (Op-Amp) V_{pp}	5,08 V	4,96 V	4,96 V
CH2: Output ZCD (Op-Amp) V_{top}	4,58 V	4,58 V	4,52 V

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** pembatasan tegangan oleh rangkaian dioda anti-paralel pada CH1 menghasilkan nilai tegangan *Peak to Peak* (V_{pp}) sebesar 627 mV hingga 722 mV. Op-Amp yang dikonfigurasi sebagai komparator mendeteksi setiap transisi tegangan saat melewati titik nol volt. Perubahan polaritas input yang sangat kecil pada CH1 langsung memaksa output Op-Amp CH2 berpindah saturasi secara instan, menghasilkan sinyal kotak digital murni dengan V_{top} berkisar 4,52V-4,58V dan V_{pp} mendekati 5V. Nilai tersebut sangat ideal dan aman untuk dibaca oleh pin external interrupt mikrokontroler. Penggunaan Op-Amp terbukti menghasilkan deteksi waktu *zero-crossing* yang konsisten di ketiga fasa.

B. Analisis Penguatan Sinyal Gerbang Driver

Sinyal pemicuan (*firing pulse*) yang dihasilkan *mikrokontroler* tidak memiliki kapasitas daya yang cukup besar untuk mentrigger gerbang SCR. Oleh karena itu, diperlukan modul penguat pulsa dengan memanfaatkan *Field Effect Transistor* (FET) sebelum sinyal dikirimkan ke *gate* SCR. Analisis pengujian dilakukan dengan membandingkan sinyal keluaran penguatan gate (kuning) terhadap sinyal pada sisi drain FET (hijau). Hasil pengukuran penguatan gate FET ditunjukkan pada **Error! Reference source not found.**



Gambar 11. Hasil Pengujian Penguat Gate FET 4 Terhadap Drain FET 4

Berdasarkan hasil pengukuran, sinyal keluaran dari mikrokontroler mengalami peningkatan amplitude setelah melewati rangkaian penguatan. Pulsa gate menunjukkan hasil yang cukup untuk memicu SCR secara optimal. Hasil pengukuran dari penguatan FET disajikan pada Tabel 3.

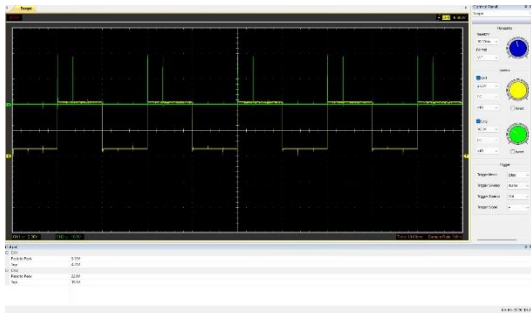
Tabel 3 Tegangan Peak-to-Peak dan Top pada Rangkaian Penguat FET

Pengujian Modul	CH1: Gate V_{pp}	CH1: Gate V_{top}	CH2: Drain V_{pp}	CH2: Drain V_{top}
FET 4	47,7 V	1,88 V	72,2 V	48,3 V

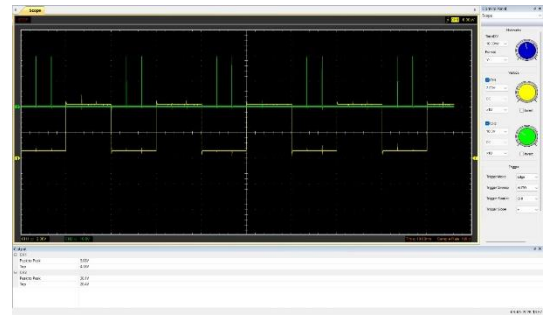
Tegangan statis pada terminal Drain (V_{top}) berada pada nilai 48,3V diseluruh modul penguatan, menandakan level tegangan suplai DC yang mencatu rangkaian *pulse transformer*. Ketika terminal gate menerima sinyal logika tinggi dari MCU, resistansi internal FET jatuh mencapai nilai minimum, sehingga menarik tegangan drain ke titik referensi terendah (*switching*) sehingga mampu mengalirkan arus *Impuls* menuju kumparan primer trafo pulsa.

C. Pengujian Sinkronisasi Antara Sinyal ZCD dengan Sinyal Gate SCR

Pengujian sinkronisasi dilakukan dengan memetakan keluaran sinyal ZCD fasa R sebagai referensi (kuning) dibandingkan terhadap sinyal gate masing-masing SCR (hijau). Hasil dari pengukuran sinkronisasi antara sinyal zero crossing dengan sinyal gate SCR sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12 - Gambar 17.



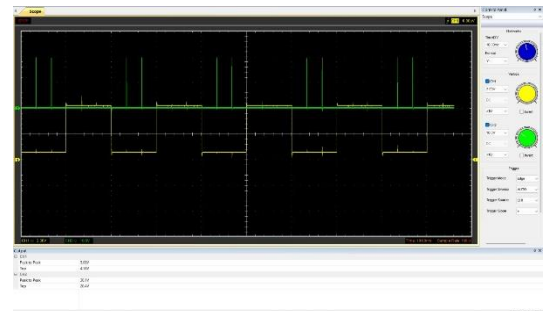
Gambar 12. Pengukuran Rangkaian ZCD Terhadap Gate SCR1



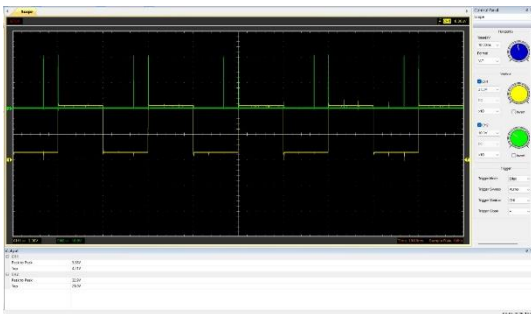
Gambar 16. Pengukuran Rangkaian ZCD Terhadap Gate SCR5



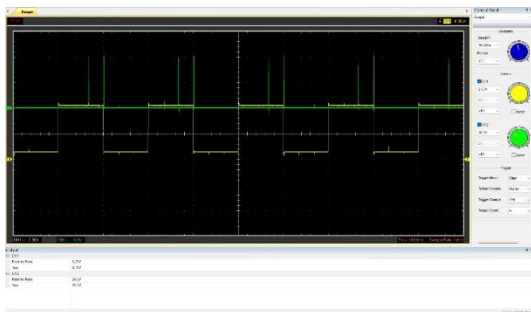
Gambar 13. Pengukuran Rangkaian ZCD Terhadap Gate SCR2



Gambar 17. Pengukuran Rangkaian ZCD Terhadap Gate SCR6



Gambar 14. Pengukuran Rangkaian ZCD Terhadap Gate SCR3

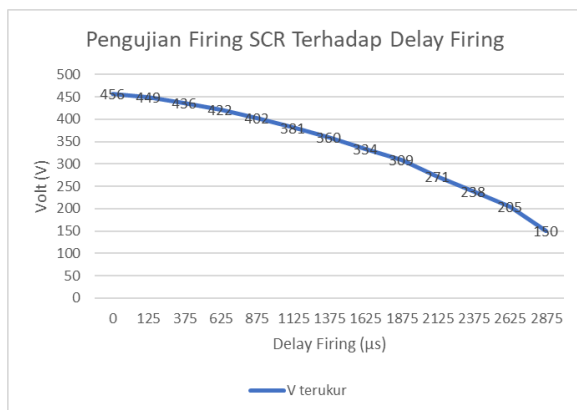


Gambar 15. Pengukuran Rangkaian ZCD Terhadap Gate SCR4

Berdasarkan hasil pengukuran, sinyal gate SCR muncul setelah sinyal *zero crossing* dengan selisih waktu tertentu sesuai sudut tunda penyalan (α) yang telah diprogram pada mikrokontroler. Pada kondisi delay kecil, SCR menyala lebih awal sehingga sebagian besar gelombang AC diteruskan menuju beban dan menghasilkan tegangan DC rata-rata yang lebih tinggi. Sebaliknya, ketika *delay firing* diperbesar, SCR menyala lebih lambat sehingga hanya sebagian kecil gelombang yang dikonversi menjadi tegangan keluaran. Akibatnya, nilai tegangan rata-rata keluaran mengalami penurunan.

D. Pengaruh *Delay Firing* terhadap Tegangan Keluaran DC

Dengan memvariasikan nilai delay firing dari 0 hingga 2,875 μs pada beban resistif lampu pijar 15W. Hubungan antara *delay firing* terhadap tegangan keluaran ditunjukkan pada Gambar 18 berdasarkan data pengujian.



Gambar 18. Grafik Hubungan Antara Delay Firing dengan V_{Out}

Data dari Gambar 18 menunjukkan adanya tren penurunan tegangan output yang monoton seiring bertambahnya nilai delay firing, dari 456V pada delay 0 μs hingga 150V pada delay 2.875 μs . Secara keseluruhan, hasil-hasil pengujian yang diperoleh berhasil menjawab hipotesis penelitian bahwa: (1) ZCD berbasis OpAmp dapat menghasilkan sinyal referensi zero-crossing yang akurat untuk sistem tiga fasa, (2) modul driver FET mampu memperkuat sinyal firing dari MCU ke level yang memadai untuk mengaktifkan SCR, dan (3) delay firing yang diprogram pada MCU dapat digunakan sebagai mekanisme pengendalian tegangan output secara efektif dalam rentang operasi tertentu.

4. Kesimpulan

Rangkaian Zero Crossing Detektor (ZCD) berbasis Op-Amp komparator LM311P terbukti mampu menghasilkan sinyal referensi *zero-crossing* yang stabil dan akurat pada ketiga fasa, dengan tegangan keluaran logika digital mendekati 5V (V_{top} 4,52–4,58V). Modul penguat pulsa berbasis FET driver TC4427 berhasil mengangkat sinyal pemicuan dari level logika mikrokontroler menjadi tegangan sisi drain sebesar 48,3V secara konsisten di seluruh enam modul, sehingga mampu menyediakan energi impuls yang memadai untuk mengaktifkan gate SCR TYN1225 melalui transformator pulsa. Keterbatasan penelitian pada studi lanjut meliputi pada pengujian beban induktif dan beban motor DC.

Daftar Acuan

- [1] F. Achmad, N. Nurhayati, M. Iyo, A. Setyono, I. Basuki, and N. Kholis, "Pengembangan Trainer Elektronika Daya untuk Meningkatkan Kompetensi Praktik Siswa pada Bidang Konversi Energi dan Pengendalian Motor di smk ummatan wasathan kabupaten kediri," *J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 7, no. 1, pp. 341–351, 2026.
- [2] A. Manap, "Assessment and Performance

Analysis of a Full-Wave Three-Phase Uncontrolled Rectifier in Powering a Single-Phase DC Motor," *J. Mar. Electr. Electron. Technol.*, vol. 1, no. 1, 2024.

[3] Effendi and Fitriady, "Design and Application SCR Trigger Circuit for Three-phase Half-wave Controlled Rectifier with Resistive Load," *J. Inov. Teknol. dan Rekayasa*, vol. 8, no. 2, pp. 246–256, 2023, doi: 10.31572/inotera.Vol8.Iss2.2023.ID249.

[4] S. Islam, R. Shovon, M. Abdul, and G. Khan, "Comparative Study of Thyristor vs IGBT Based AC-DC Power Converter," *AIUB J. Sci. Eng.*, no. 3, pp. 89–102, 2018.

[5] A. T. Nugraha and R. P. Eviningsing, *Konsep Dasar Elektronika*. 2022. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=O7NN EQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=elektronika+daya&ots=Pl-UbODJEh&sig=fPtx3IAiaSnfbAJ8XIP9HNCEH7s>

[6] K. E. Sinuraya, D. J. Sinaga, and J. P. Simarmata, "Analisis Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Penyearah Terkendali Berbasis Simulasi MATLAB/Simulink," *J. Sains Student Res.*, vol. 3, no. 6, pp. 857–863, 2025.

[7] Usman, F. Azis, A. Wirana, and R. Habibuddin, "Perancangan dan Pembuatan Trainer Penyearah Terkendali 3 Fasa," *J. Teknol. Terpadu*, vol. 5, no. 1, pp. 26–35, 2017.

[8] R. Pramudita and A. Suryana, "RANCANG BANGUN TRAINER TERINTEGRASI RANGKAIAN PENYEARAH GELOMBANG DAN PENGUAT OP-AMP BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA 32," *J. Ilm. Teknol. Inf. Terap.*, vol. 6, no. 1, pp. 36–41, 2019.

[9] P. D. T. Yanto, E. Astrid, R. Hidayat, and S. Islami, "Analisis Uji Kelayakan Trainer Kit Elektronika Daya : 3 Phase Half-Wave and Full-Wave Uncontrolled Rectifier," pp. 121–125, 2019.

[10] F. D. Ikram, "Controlled Circuit for Three-Phase Characteristics Control of Shunt Direct Current Motor," *J. Mar. Electr. Electron. Technol.*, vol. 1, no. 1, 2024.

[11] A. Yusuf, T. Tohir, and Y. Santoso, "Simulasi Pengendali Sudut Fasa Pada Rangkaian Penyearah Terkendali Dengan Arduino Berbasis Proteus," pp. 13–14, 2020, [Online]. Available: <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/4336%0Ahttps://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/download/4336/2900>

[12] D. N. Wulandari, A. Pracoyo, and Sungkono, "Rancang Bangun Rangkaian Pengatur Kecepatan Motor DC dengan Penyearah Terkendali 3 Fasa," *J. Elkolind*, vol. 10, no. 9, pp. 60–67, 2023.

[13] Y. Kurnia and J. L. Sie, "Prototype of Warehouse Automation System Using Arduino Mega 2560 Microcontroller Based on Internet of Things," *bit-Tech*, vol. 1, no. 3, pp. 122–128, 2019, doi: 10.32877/bt.v1i3.78.