



Analisis Kinerja Penyearah Terkontrol Gelombang Penuh Tiga Fasa Menggunakan Thyristor Berbasis Simulasi MATLAB/Simulink

Tika Juni Lestari¹

Universitas Negeri Medan

Ridho Syahban²

Universitas Negeri Medan

Aditya Utama³

Universitas Negeri Medan

Alamat: Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20221

Korespondensi penulis: tikajunilestari@gmail.com¹, ridhosyahban9@gmail.com², adityautama890@gmail.com³

Abstract. *This study investigates the performance of a three-phase full-wave controlled rectifier using thyristors, focusing on the influence of firing angle on output voltage and current stability. The simulation was conducted using MATLAB/Simulink, with measurement blocks to observe three-phase input and output waveforms. The results show that the rectifier provides a stable DC output with minimal ripple, and the firing angle effectively controls the average output voltage. Input voltage and current remain balanced, with RMS and standard deviation values indicating consistent system behavior. These findings demonstrate the suitability of controlled three-phase rectifiers for industrial applications requiring reliable DC power conversion, and provide insight for optimizing thyristor triggering in practical systems.*

Keywords: *Controlled rectifier, MATLAB/Simulink, Three-phase system, Thyristor, Waveform analysis*

Abstrak. Penelitian ini menganalisis kinerja penyearah gelombang penuh tiga fasa yang dikendalikan menggunakan thyristor, dengan fokus pada pengaruh sudut pemacu terhadap kestabilan tegangan dan arus keluaran. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink, dengan blok pengukur untuk memantau bentuk gelombang input dan output tiga fasa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyearah menghasilkan tegangan DC yang stabil dengan riak minimal, dan sudut pemacu mampu mengatur tegangan rata-rata keluaran secara efektif. Tegangan dan arus input relatif seimbang, dengan nilai RMS dan Standard Deviation menunjukkan sistem bekerja konsisten. Temuan ini menegaskan bahwa penyearah tiga fasa terkontrol sesuai untuk aplikasi industri yang memerlukan konversi daya DC andal, sekaligus memberikan panduan optimasi pemacu thyristor pada sistem praktis.

Kata kunci: Analisis gelombang, MATLAB/Simulink, Penyearah terkendali, Sistem tiga fasa, Thyristor

LATAR BELAKANG

Sistem tenaga listrik tiga fasa menjadi standar dalam distribusi energi modern, terutama untuk aplikasi industri dan peralatan daya tinggi, karena mampu menyediakan daya yang stabil dan efisien dibandingkan sistem satu fasa. Dalam praktiknya, konversi tegangan AC menjadi DC sering dibutuhkan agar peralatan seperti motor listrik, pengisian baterai, dan peralatan elektronika daya dapat bekerja optimal. Penyearah tiga fasa yang dikendalikan menggunakan thyristor menawarkan keunggulan berupa tegangan DC yang lebih stabil dengan riak tegangan yang rendah. Namun, performa rangkaian sangat dipengaruhi oleh pengaturan sudut pemacu thyristor dan karakteristik tegangan serta arus input.

Penelitian sebelumnya banyak menekankan analisis teoritis atau simulasi sederhana, sehingga diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif untuk menilai kinerja penyearah tiga fasa secara nyata. Penelitian ini menggunakan MATLAB/Simulink untuk memodelkan penyearah terkontrol gelombang penuh tiga fasa, melakukan pengukuran tegangan dan arus pada sisi input

dan output, serta mengevaluasi pengaruh sudut pemacu thyristor terhadap kualitas tegangan DC yang dihasilkan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih akurat dan relevan untuk penerapan sistem penyearah tiga fasa di lapangan.

KAJIAN TEORITIS

Sistem Tegangan Tiga Fasa

Sistem tenaga listrik tiga fasa adalah sistem penyedia energi listrik yang paling umum digunakan dalam tenaga modern terutama di sektor industri dan distribusi energi listrik besar. Sistem ini terdiri dari tiga tegangan bolak-balik yang memiliki nilai amplitudo yang sama tetapi berbeda sudut fasa sebesar 120° satu sama lain. Perbedaan sudut fasa ini memungkinkan sistem tiga fasa menghasilkan daya yang lebih stabil dan terus menerus dibandingkan dengan sistem satu fasa. Penggunaan sistem tiga fasa juga dapat meningkatkan efisiensi penyaluran daya listrik karena distribusi arus pada penghantar menjadi lebih seimbang (Mohan, Undeland, & Robbins, 2003).

Keunggulan lain dari sistem tiga fasa adalah kemampuannya dalam menciptakan medan magnet berputar yang stabil sehingga sangat cocok digunakan pada berbagai alat listrik seperti motor induksi tiga fasa sistem penggerak industri serta berbagai alat elektronika daya yang memerlukan daya tinggi. Dalam sistem distribusi tenaga listrik sistem tiga fasa juga memungkinkan penggunaan konduktor yang lebih sedikit dibandingkan sistem satu fasa dengan kapasitas daya yang sama. Sistem tiga fasa menjadi standar utama dalam sistem tenaga listrik modern dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri maupun komersial.

Rumus:

$$\begin{aligned}V_a(t) &= V_m \sin(\omega t) \\V_b(t) &= V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\V_c(t) &= V_m \sin(\omega t + 120^\circ)\end{aligned}$$

Keterangan:

$V_b(t), V_c(t)$: Tegangan pada masing-masing fasa A, B, dan C terhadap waktu

V_m : Nilai tegangan maksimum atau tegangan puncak

ω : Frekuensi sudut dari sumber tegangan AC

t : Waktu

120° : Perbedaan sudut antar fasa pada sistem tiga fasa

Persamaan diatas menjelaskan bahwa dalam sistem tiga fasa terdapat tiga tegangan yang berbentuk gelombang sinus. Ketiga tegangan ini memiliki nilai yang sama tetapi setiap fasa memiliki perbedaan sudut sebesar 120° . Perbedaan sudut ini memungkinkan setiap fasa beroperasi secara bergantian yang membuat aliran daya lebih stabil. Jadinya sistem tiga fasa banyak dipakai dalam berbagai perangkat listrik yang memerlukan daya tinggi, seperti motor listrik dan alat-alat di industri.

Penyearah Tiga Fasa

Penyearah merupakan rangkaian elektronik yang berfungsi untuk mengubah arus listrik dari AC menjadi DC. Proses ini dilakukan dengan komponen semikonduktor seperti dioda atau thyristor, yang hanya memberikan izin arus mengalir ke satu arah saja. Dalam dunia tenaga listrik penyearah diterapkan dalam berbagai situasi yang memerlukan pasokan tegangan DC seperti dalam motor listrik, pengisian baterai, serta alat-alat elektronik di sektor industri (Rashid, 2014). Keunggulan penyearah tiga fasa dibandingkan penyearah satu fasa adalah kemampuannya

menghasilkan tegangan yang lebih stabil dan riak tegangan yang lebih rendah. Ini karena proses konduksi yang berlangsung secara bergantian di setiap fasa sehingga menghasilkan keluaran tegangan yang lebih konstan. Dengan fitur-fitur ini penyearah tiga fasa sangat umum digunakan dalam sistem konversi energi listrik yang memerlukan kualitas tegangan DC yang lebih optimal.

Rumus tegangan rata-rata dan RMS keluaran penyearah:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$
$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$

Keterangan:

V_{DC} : Nilai tegangan rata-rata yang dihasilkan oleh penyearah (tegangan DC)

V_{RMS} : Nilai tegangan efektif yang bekerja pada beban

$v(t)$: Tegangan keluaran yang berubah terhadap waktu

T : Waktu satu siklus gelombang

dt : Perubahan waktu yang sangat kecil saat perhitungan

Persamaan ini berfungsi untuk mengidentifikasi sifat tegangan keluaran dari sistem penyearah. Nilai tegangan rata-rata (V_{DC}) mencerminkan ukuran tegangan searah yang diperoleh setelah proses konversi dari AC menjadi DC. Tegangan RMS (V_{RMS}) menunjukkan nilai tegangan yang efektif yang bekerja pada beban listrik. Pada penyearah tiga fasa tegangan yang dihasilkan biasanya lebih stabil dibandingkan dengan penyearah satu fasa karena aliran arus berlangsung secara bergantian pada setiap fasa mengakibatkan fluktuasi tegangan yang muncul menjadi lebih kecil sehingga kualitas tegangan DC yang dihasilkan menjadi lebih baik.

Thyristor (SCR)

Thyristor yang biasanya dikenal dengan istilah Silicon Controlled Rectifier (SCR) adalah perangkat semikonduktor yang berfungsi sebagai saklar elektronik yang dapat dikendalikan. Komponen ini terdiri dari tiga terminal utama yang meliputi anoda, katoda, dan gate. Cara kerja thyristor didasarkan pada penerimaan sinyal pengaktif pada terminal gate yang memungkinkan perangkat ini untuk mulai menghantarkan arus dari anoda ke katoda. Setelah berada dalam keadaan konduksi thyristor akan terus menghantarkan arus sampai besaran arus yang mengalir turun di bawah nilai tertentu (Hart, 2011). Karakteristik tersebut membuat thyristor sangat ideal untuk digunakan dalam berbagai aplikasi kontrol daya listrik. Dalam rangkaian elektronika daya, thyristor biasanya ditemukan dalam sistem penyearah yang dikendalikan pengatur tegangan AC serta berbagai sistem konversi energi listrik lainnya. Dengan memanfaatkan pengaturan waktu aktif dari thyristor tegangan keluaran dalam suatu rangkaian dapat diatur sesuai dengan kebutuhan sistem. Dengan mengatur sudut pemacu (firing angle) α , tegangan keluaran penyearah dapat dikontrol.

Rumus:

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}V_L}{\pi} \cos \alpha$$

Keterangan:

V_{DC} : Tegangan DC rata-rata pada keluaran penyearah

V_L : Tegangan antar fasa (line to line) dari sumber tiga fasa

α : Sudut pemacu thyristor

π : Konstanta matematika ($\approx 3,14$)

Rumus menunjukkan bahwa nilai tegangan DC keluaran dapat diatur dengan mengubah sudut pemacu (α) pada thyristor. Semakin besar nilai sudut pemacu maka tegangan keluaran yang dihasilkan akan semakin kecil.

Generator Impuls dan Sudut Pemacu

Dalam rangkaian penyearah yang terkontrol menggunakan thyristor, proses di mana komponen ini mulai konduksi tidak terjadi secara otomatis seperti pada dioda. Maka dari itu diperlukan sinyal pemacu yang harus diterapkan pada terminal gate agar thyristor dapat mulai menghantarkan arus. Salah satu alat yang digunakan untuk menciptakan sinyal pemacu ini adalah generator impuls. Generator impuls berfungsi untuk menciptakan sinyal pulsa dengan karakteristik tertentu yang digunakan untuk memacu penyalan thyristor.

Dalam sistem penyearah yang terkontrol waktu penyalan thyristor biasanya dinyatakan dalam sudut pemacu atau firing angle. Sudut pemacu tersebut menunjukkan waktu dalam gelombang tegangan AC saat thyristor mulai menghantarkan arus. Perubahan pada nilai sudut pemacu akan memengaruhi lama waktu konduksi komponen ini sehingga berdampak pada nilai tegangan rata-rata yang dihasilkan di sisi keluaran rangkaian penyearah (Singh & Khanchandani, 2012). Generator impuls menghasilkan pulsa untuk memacu thyristor pada sudut tertentu. Perubahan sudut pemacu (α) memengaruhi waktu konduksi thyristor dan tegangan rata-rata output. Untuk menganalisis hasil simulasi yang diperoleh beberapa nilai penting digunakan sebagai acuan dalam pengamatan gelombang tegangan dan arus sebagai berikut:

1. Tegangan / Arus Maksimum dan Minimum

$$V_{max}, V_{min}, I_{max}, I_{min}$$

2. Peak-to-Peak (Puncak-ke-Puncak)

$$V_{p-p} = V_{max} - V_{min}, I_{p-p} = I_{max} - I_{min}$$

3. Rata-rata (Mean)

$$\text{Mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

4. Median

Nilai tengah dari data setelah diurutkan.

5. Nilai Efektif (RMS)

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2}, I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i^2}$$

6. Standard Deviation

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \text{Mean})^2}$$

Menunjukkan variasi tegangan atau arus terhadap nilai rata-rata; semakin kecil, gelombang semakin stabil.

Ripple Tegangan pada Penyearah

Dalam rangkaian penyearah tegangan DC yang dihasilkan seringkali tidak sepenuhnya halus karena masih terdapat sedikit gelombang yang dikenal sebagai ripple atau riak tegangan. Riak terjadi akibat proses mengubah tegangan AC menjadi DC yang masih menyisakan elemen dari gelombang bolak-balik. Besar kecilnya riak dipengaruhi oleh jenis rangkaian penyearah serta kondisi beban yang digunakan. Pada penyearah tiga fasa nilai riak umumnya lebih kecil dibandingkan dengan penyearah satu fasa karena proses konduksi berlangsung secara bergantian pada setiap fasa sehingga tegangan keluarannya menjadi lebih stabil. Dengan riak yang lebih minim kualitas tegangan DC yang dihasilkan menjadi lebih baik dan lebih stabil untuk berbagai aplikasi dalam elektronik daya seperti sistem penggerak motor listrik dan pengisian baterai (Atmam, 2017).

Rumus:

$$r = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{DC}}\right)^2 - 1}$$

Keterangan:

r : Ripple factor atau faktor riak pada tegangan keluaran

V_{rms} : Nilai RMS (Root Mean Square) dari tegangan keluaran

V_{DC} : Nilai tegangan DC rata-rata pada keluaran penyearah

Rumus faktor riak atau ripple ini kita bisa menganalisis tingkat riak pada tegangan keluaran dari penyearah untuk menilai seberapa baik kualitas tegangan DC yang dihasilkan. Semakin rendah nilai faktor riak maka tegangan DC yang didapatkan akan semakin stabil sehingga lebih cocok untuk dipakai dalam berbagai aplikasi sistem elektronik daya.

MATLAB/Simulink dalam Simulasi Sistem Energi

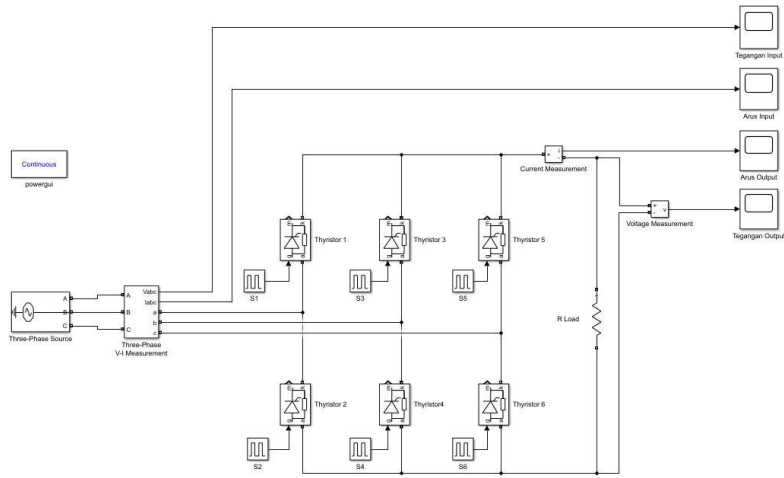
MATLAB/Simulink adalah software komputer yang sering dipakai untuk analisis angka, pemodelan sistem, serta mensimulasikan banyak masalah teknik. Salah satu alat yang banyak dipakai di bidang teknik elektro adalah Simulink yaitu lingkungan pemodelan berbasis diagram blok yang memudahkan pengguna dalam merancang dan mensimulasikan berbagai sistem dinamis dengan cara yang visual. Dengan Simulink komponen rangkaian listrik seperti sumber tegangan, semikonduktor, dan alat pengukur tegangan serta arus dapat dimodelkan dengan gampang (MathWorks, 2020).

Menggunakan MATLAB/Simulink dalam penelitian sistem tenaga listrik menawarkan kemudahan terutama dalam menganalisis karakteristik rangkaian tanpa perlu membuat rangkaian fisik langsung. Software ini juga memungkinkan peneliti untuk melihat bentuk gelombang tegangan dan arus sehingga analisis sistem menjadi lebih praktis. MATLAB/Simulink banyak dipakai dalam penelitian dan pendidikan yang berkaitan dengan sistem tenaga listrik dan elektronika daya. MATLAB/Simulink juga banyak digunakan dalam penelitian sistem elektronika daya untuk memodelkan rangkaian penyearah serta menganalisis karakteristik tegangan dan arus pada berbagai kondisi operasi sehingga membantu peneliti memahami performa sistem secara lebih mendalam (Indrianto & Hariyadi, 2020).

METODE PENELITIAN

Diagram Blok Simulasi

Penelitian ini menggunakan metode simulasi untuk mempelajari performa dari penyearah terkontrol gelombang penuh tiga fasa yang menggunakan thyristor dengan bantuan MATLAB Simulink. Model simulasi ini ada beberapa elemen utama, yaitu sumber tiga fasa sebagai sumber tegangan AC tiga fasa, pengukuran V-I tiga fasa untuk mengukur tegangan dan arus di sisi input, rangkaian penyearah yang terdiri dari enam thyristor, serta beban di sisi keluaran. Setiap thyristor diatur oleh sinyal pemicu dari generator pulse yang bertugas mengatur sudut penyalan (firing angle). Tegangan dan arus dalam sistem kemudian dipantau menggunakan Scope untuk menganalisis kinerja penyearah dalam mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC.



Gambar 1. Rangkaian simulasi penyearah terkontrol gelombang penuh tiga fasa menggunakan thyristor pada MATLAB Simulink.

Spesifikasi Komponen

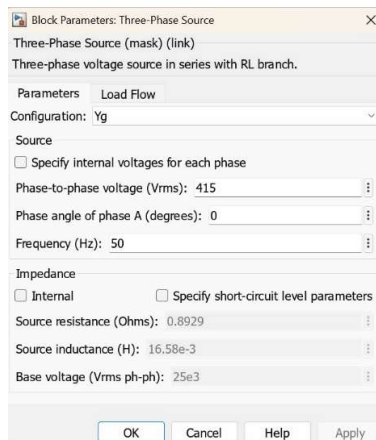
Dalam penelitian ini sejumlah komponen penting dimodelkan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB di dalam lingkungan pemodelan simulink. Komponen kompone ini dipakai untuk menciptakan rangkaian penyearah tiga fasa yang berbasis thyristor dan untuk melakukan pengukuran arus serta tegangan dalam sistem. Rincian spesifikasi komponen yang terpakai dalam simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen pada Rangkaian Simulasi

Komponen	Spesifikasi Simulasi	Nilai
Three-Phase Source	Tegangan antar fasa	415 V
	Frekuensi sumber AC	50 Hz
	Konfigurasi	Y-Grounded (Yg)
	Resistansi sumber	0,8929 Ω
	Induktansi sumber	16,58 mH
Thyristor (SCR)	Jumlah Komponen	6 buah
Pulse Generator	Amplitudo pulsa	1
	Periode pulsa	0,02 s
	Pulsd width	10%
Three Phase V I Measurement	Fungsi	Mengukur tegangan dan arus tiga fasa

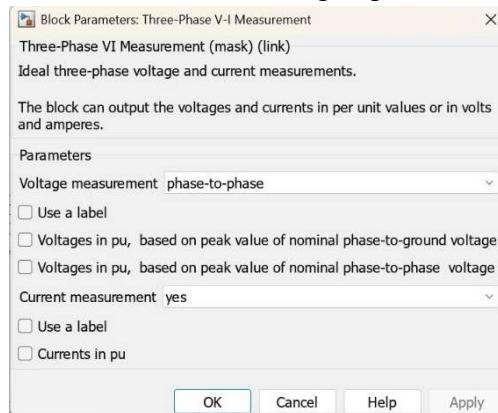
Beban (Load)	Jenis	Beban resistif
Scope	Fungsi	Menampilkan bentuk gelombang tegangan dan arus

Sistem simulasi terdiri dari beberapa komponen utama yaitu sumber tegangan tiga fasa, alat ukur tegangan dan arus, rangkaian penyearah menggunakan enam thyristor, dan beban di sisi keluaran. Setiap thyristor diatur oleh sinyal dari pulse generator untuk mengontrol sudut penyalan. Hasil tegangan dan arus dari sistem kemudian diperlihatkan di scope untuk meninjau kinerja penyearah dalam mengubah tegangan AC menjadi DC. Nilai sumber tegangan dalam simulasi harus ditentukan dengan tepat agar sistem bisa menggambarkan kondisi jaringan listrik tiga fasa dengan akurat.



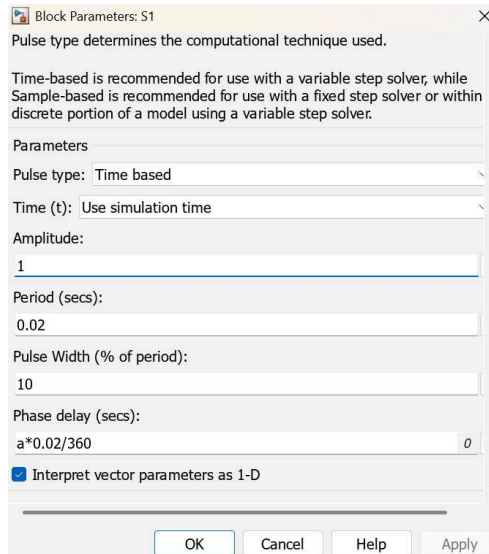
Gambar 2. Spesifikasi komponen Three-Phase Source pada simulasi MATLAB Simulink.

Nilai yang digunakan di blok sumber tiga fasa berfungsi sebagai penyedia tegangan AC dalam sistem simulasi. Sumber tegangan ini memiliki nilai 415 Vrms dengan frekuensi 50 Hz dan menggunakan konfigurasi grounded wye (Yg). Sumber ini juga memiliki resistansi sebesar 0,8929 Ω dan induktansi 16,58 mH yang menggambarkan impedansi sumber dalam sistem kelistrikan. Nilai ini digunakan untuk mensimulasikan kondisi sumber tegangan tiga fasa sebelum melalui rangkaian penyearah yang menggunakan thyristor. Untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan dalam sistem tiga fasa digunakan blok pengukuran di MATLAB Simulink yang bertugas buat memantau besaran listrik selama simulasi berlangsung.



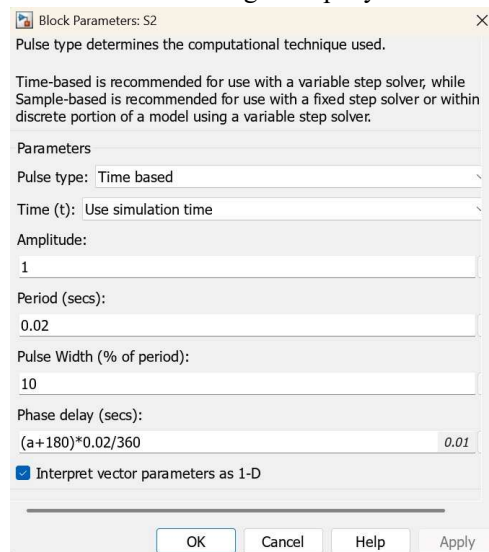
Gambar 3. Spesifikasi komponen Three-Phase V-I Measurement pada simulasi MATLAB Simulink.

Pengaturan pada blok pengukuran V-I tiga fasa digunakan untuk menilai tegangan dan arus dalam rangkaian tiga fasa. Komponen ini berguna untuk mengawasi nilai tegangan dan arus di sisi input rangkaian penyearah sebelum diproses oleh thyristor. Hasil dari pengukuran tersebut kemudian ditampilkan pada scope sehingga bentuk gelombang tegangan dan arus dapat terlihat dan dianalisis selama simulasi berlangsung. Untuk mengatur penyalaan pada setiap thyristor digunakan blok generator pulsa yang berfungsi sebagai sinyal pemicu dalam sistem simulasi.



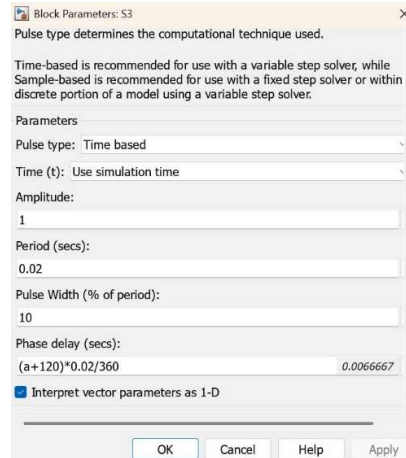
Gambar 4. Pulse Generator 1 untuk Thyristor 1 pada simulasi MATLAB Simulink.

Pengaturan nilai di pulse generator 1 digunakan untuk menghasilkan sinyal pemicu bagi thyristor 1. sinyal pulsa ini penting untuk mengatur waktu aktifnya thyristor, agar proses konduksi berlangsung sesuai dengan sudut penyalaan yang diinginkan. Dengan mengatur parameter pada pulse generator, kita dapat mengendalikan proses penyearahan tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC di sisi keluaran sistem simulasi. Blok pulse generator digunakan untuk mengatur penyalaan komponen semikonduktor dalam rangkaian penyearah.



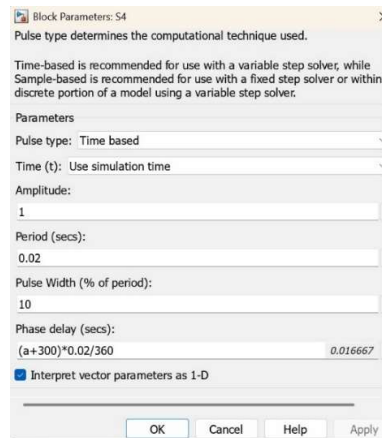
Gambar 5. Pulse Generator 2 untuk Thyristor 2 pada simulasi MATLAB Simulink.

Pengaturan di pulse generator 2 yang digunakan sebagai sinyal pemicu untuk thyristor 2. Sinyal pulsa yang dihasilkan berperan dalam mengaktifkan thyristor pada waktu yang tepat agar proses konduksi dapat terjadi sesuai dengan urutan kerja dalam sistem penyearah tiga fasa. Pengaturan ini memungkinkan konversi tegangan AC menjadi tegangan DC berlangsung dengan terkendali. Untuk memastikan setiap thyristor bekerja sesuai dengan urutan di rangkaian penyearah tiga fasa, diperlukan sinyal pemicu dari blok pulse generator.



Gambar 6. Pulse Generator 3 untuk Thyristor 3 pada simulasi MATLAB Simulink.

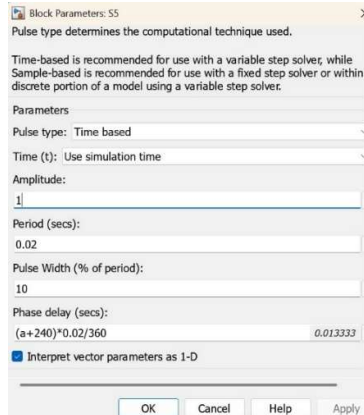
Pengaturan di pulse generator 3 yang digunakan untuk mengirimkan sinyal pemicu pada thyristor 3. Sinyal pulsa ini bertujuan untuk mengatur waktu pengaktifan thyristor agar proses konduksi dapat terjadi secara bergantian berdasarkan urutan kerja dari rangkaian penyearah tiga fasa. Dengan pengaturan ini, proses mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC dapat berjalan dengan baik di dalam sistem simulasi. Untuk melanjutkan proses pengaturan pengaktifan pada rangkaian penyearah tiga fasa digunakan generator pulsa berikutnya yang berperan sebagai sinyal pemicu untuk thyristor.



Gambar 7. Pulse Generator 4 untuk Thyristor 4 pada simulasi MATLAB Simulink.

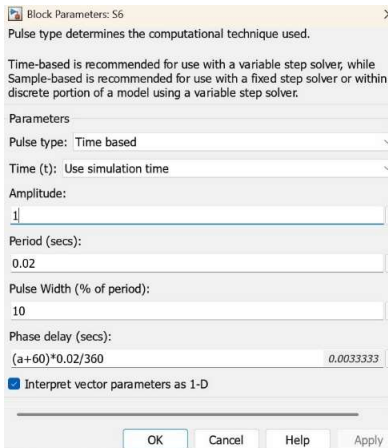
Pengaturan pada pulse generator 4 yang digunakan untuk mengeluarkan sinyal pendorong bagi thyristor 4. Sinyal pulsa yang dihasilkan berfungsi untuk mengaktifkan thyristor pada waktu yang telah ditentukan sehingga proses konduksi dapat berjalan sesuai dengan urutan kerja dari rangkaian penyearah tiga fasa. Dengan pengaturan ini setiap thyristor dapat beroperasi secara bergantian dalam proses mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC pada sistem simulasi.

Untuk memastikan urutan kerja di rangkaian penyearah tiga fasa, setiap thyristor dikendalikan oleh sinyal pendorong yang dihasilkan dari blok Pulse Generator.



Gambar 8. Pulse Generator 5 untuk Thyristor 5 pada simulasi MATLAB Simulink.

Pengaturan pada pulse generator 5 digunakan untuk mengirim sinyal pemicu ke thyristor 5. Sinyal pulsa ini penting untuk mengatur kapan thyristor menyala sehingga proses konduksi dapat terjadi tepat sesuai urutan kerja rangkaian penyearah tiga fasa. Dengan begitu penyearahan dari tegangan AC menjadi tegangan DC dapat berlangsung dengan baik dalam sistem simulasi. Untuk melengkapi kontrol rangkaian penyearah tiga fasa, digunakan pulse generator terakhir yang memberikan sinyal pemicu ke thyristor.

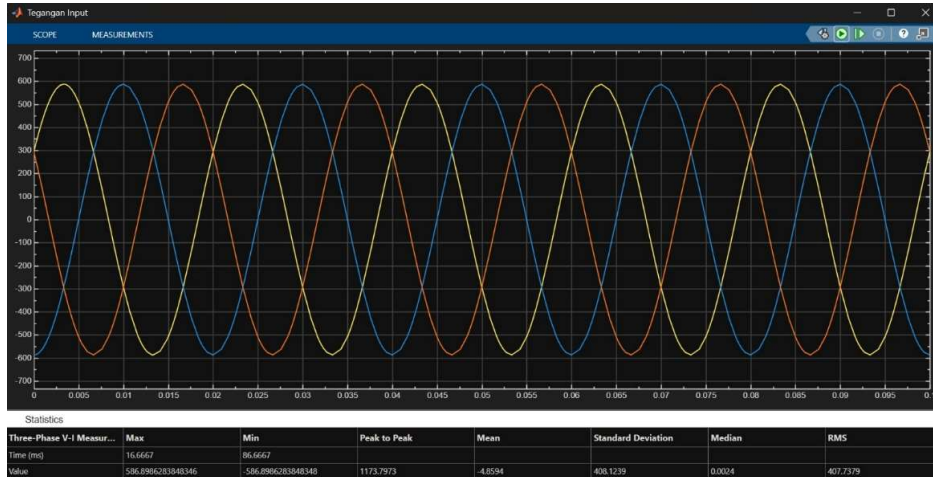


Gambar 9. Pulse Generator 6 untuk Thyristor 6 pada simulasi MATLAB Simulink.

Pengaturan pada pulse generator 6 yang digunakan sebagai sinyal pemicu untuk thyristor 6. Sinyal pulsa yang dihasilkan berfungsi untuk mengatur waktu penyalan thyristor sehingga proses konduksi dapat terjadi sesuai dengan urutan kerja pada rangkaian penyearah tiga fasa. Dengan pengaturan ini seluruh thyristor dapat bekerja secara bergantian dalam proses konversi tegangan AC menjadi tegangan DC pada sistem simulasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil simulasi pada rangkaian penyearah terkontrol gelombang penuh tiga fasa menggunakan thyristor di MATLAB Simulink, diperoleh tegangan input tiga fasa yang diukur menggunakan blok Three-Phase V-I Measurement.



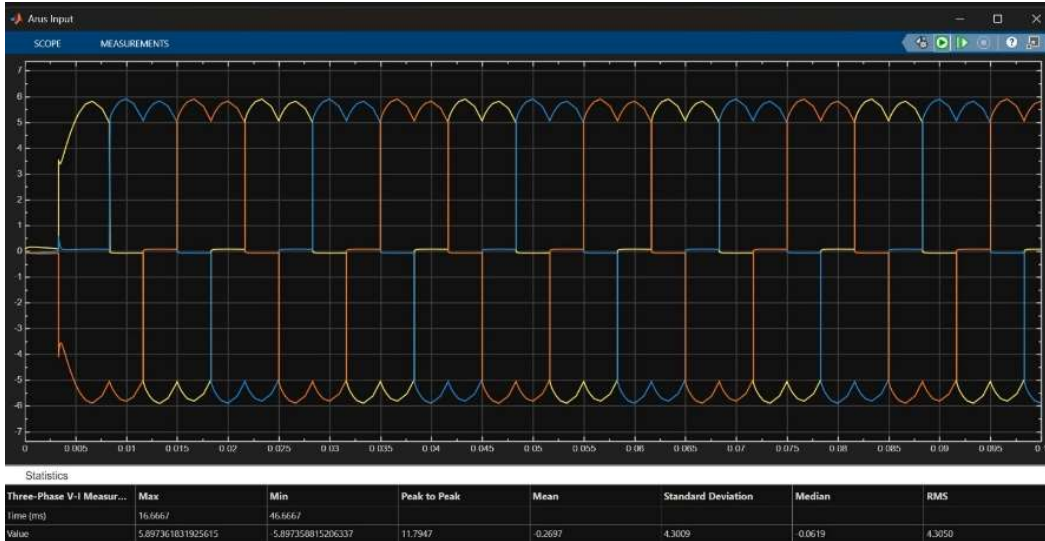
Gambar 10. Bentuk Gelombang Tegangan Input dan Statistik

Gambar 10 menunjukkan gelombang tegangan untuk input tiga fasa. Dari gambar ini kita bisa melihat perbedaan antara nilai tertinggi dan terendah yang menunjukkan variasi tegangan selama simulasi. Dari hasil gelombang yang digambar dapat dilihat kondisi tegangan input dapat memengaruhi cara kerja rangkaian penyearah dan pengaturan thyristor. Tabel 2 dibawah memberikan gambaran nilai dari gelombang yang ada di gambar 1 menampilkan nilai tertinggi, terendah, peak to peak, mean, median, rms, dan standard deviation.

Tabel 2. Data Tegangan Input Tiga Fasa

Voltage Measurement	Value	Time
Min	-589,8986 V	Waktu: 16,6667 ms
Max	586,8986 V	Waktu: 86,6667 ms
Peak to Peak	1173,7973 V	
Mean	-4,8594 V	
Standard Deviation	0,0024 V	
Median	407,7379 V	
RMS	408,1239 V	

Nilai mean (rata-rata) yang hampir nol menunjukkan bahwa tegangan tiga fasa cukup seimbang terhadap titik nol selama simulasi berjalan. Median sebesar 407,7379 V menunjukkan nilai tengah dari distribusi tegangan yang terukur. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar tegangan terdistribusi di sekitar nilai efektif dari sistem tiga fasa. Nilai rms sebesar 408,1239 V menunjukkan besaran tegangan efektif yang berfungsi dalam sistem sementara deviasi standar yang rendah menunjukkan bahwa variasi tegangan terhadap rata-rata tetap stabil sepanjang simulasi.



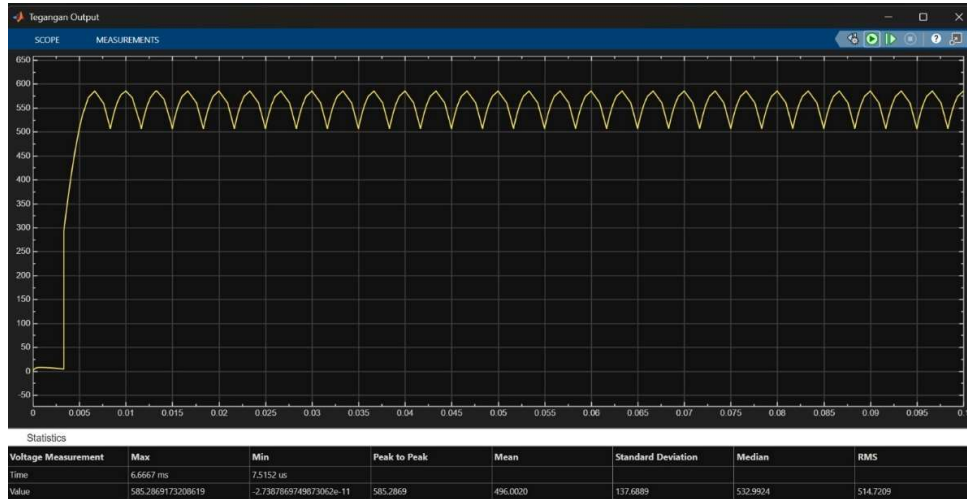
Gambar 11. Bentuk Gelombang Arus Input dan Statistik

Gambar 11 menampilkan gelombang arus input tiga fasa. Dari gambar terlihat perbedaan antara nilai maksimum dan minimum, yang menunjukkan rentang arus selama simulasi. Informasi ini penting karena kondisi arus input memengaruhi kinerja rangkaian penyearah dan pengaturan thyristor. Tabel 3 menunjukkan ringkasan nilai hasil perhitungan dari gelombang pada Gambar 11, termasuk nilai maksimum, minimum, peak to peak, mean, median, rms, dan standard deviation.

Tabel 3. Data Arus Input Tiga Fasa

Current Measurement	Value	Time
Min	-5.897358815206337 A	Waktu: 46,6667 ms
Max	5,897361831925615 A	Waktu: 16,6667 ms
Peak to Peak	11,7947 A	
Mean	-0,2697 A	
Standard Deviation	4,3009 A	
Median	-0,0619 A	
RMS	4,3050 A	

Dari Tabel 3 terlihat bahwa arus input tiga fasa stabil. Nilai rms sebesar 4,3050 A menunjukkan arus efektif yang bekerja selama simulasi. Mean dan median yang mendekati nol menunjukkan arus relatif seimbang terhadap titik nol sementara standard deviation sebesar 4,3009 A menunjukkan variasi arus terhadap rata-rata.



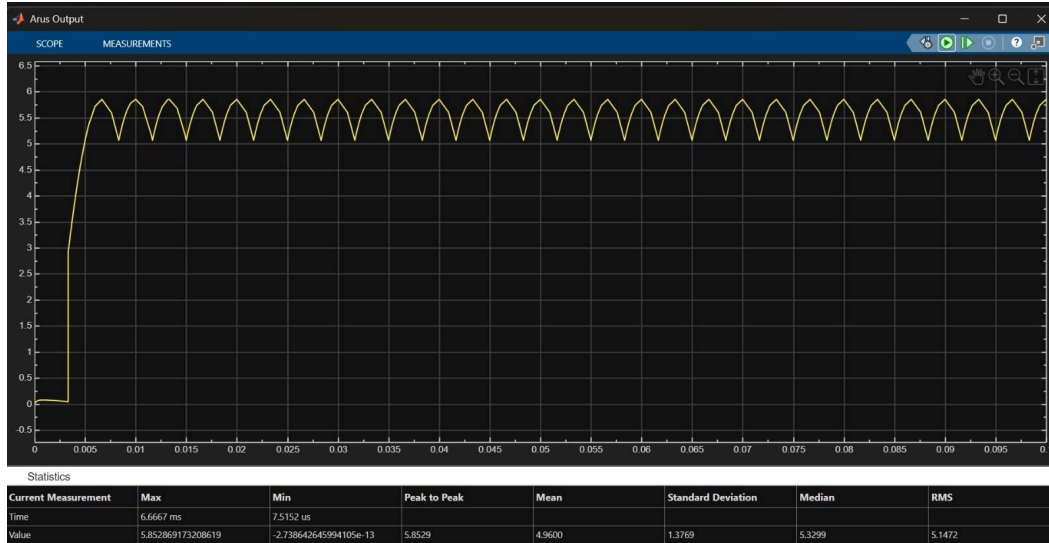
Gambar 12. Bentuk Gelombang Tegangan Output dan Statistik

Gambar 12 menunjukkan gelombang tegangan keluaran dari rangkaian penyearah tiga fase. Dari tampilan gambar tampak adanya perbedaan antara nilai tertinggi dan terendah yang menunjukkan kisaran tegangan keluaran selama proses simulasi. Informasi ini sangat penting karena tegangan keluaran menunjukkan seberapa baik rangkaian penyearah dan pengaturan thyristor berfungsi. Tabel 4 memberikan ringkasan angka dari gelombang tegangan keluaran yang ada pada gambar 12 termasuk nilai maksimum, minimum, peak to peak, mean, median, rms, dan standard deviation.

Tabel 4. Data Tegangan Output Tiga Fasa

Voltage Measurement	Value	Time
Min	-2,7387869749873062 V	Waktu: 7,5152 us
Max	585,2869173208619 V	Waktu: 6,6667 ms
Peak to Peak	585,2869 V	
Mean	496,0020 V	
Standard Deviation	137,6889 V	
Median	532,9924 V	
RMS	514,7209 V	

Dari Tabel 4 terlihat bahwa tegangan output memiliki nilai mean dan median yang tinggi menunjukkan tegangan DC yang dihasilkan cukup stabil. Nilai rms sebesar 514,7209 V menunjukkan besarnya tegangan efektif dan standard deviation 137,6889 V menunjukkan adanya variasi tegangan terhadap rata-rata.



Gambar 13. Bentuk Gelombang Arus Output dan Statistik

Gambar 13 menampilkan gelombang arus output tiga fasa dari rangkaian penyearah. Dari gambar terlihat perbedaan antara nilai maksimum dan minimum yang menunjukkan rentang arus output selama simulasi. Data ini penting karena arus output menunjukkan performa rangkaian penyearah dan pengaturan thyristor. Tabel 5 menunjukkan ringkasan nilai hasil perhitungan dari gelombang arus output pada Gambar 13 termasuk nilai maksimum, minimum, peak to peak, mean, median, rms, dan standard deviation.

Tabel 5. Data Arus Output Tiga Fasa

Current Measurement	Value	Time
Min	-2,738642645994105 A	Waktu: 7,5152 us
Max	5.852869173208619 A	Waktu: 6,6667 ms
Peak to Peak	5.8529 A	
Mean	4.600 A	
Standard Deviation	1,3769 A	
Median	5,3299 A	
RMS	5,1472 A	

Dari Tabel 5 terlihat bahwa arus output tiga fasa cukup stabil. Arus maksimum dan minimum menunjukkan rentang arus sebesar 5,8529 A. Nilai mean dan median mendekati angka tengah menandakan arus relatif seimbang. Rms 5,1472 A menunjukkan arus efektif dan standard deviation 1,3769 A menunjukkan variasi arus terhadap rata-rata tidak besar. Bentuk gelombang pada Gambar 13 memperlihatkan arus simetris dan stabil sehingga rangkaian penyearah dan thyristor bekerja dengan baik.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil simulasi dan analisis mengenai rangkaian penyearah terkontrol gelombang penuh tiga fasa menggunakan thyristor pada MATLAB/Simulink dapat disimpulkan beberapa poin berikut:

1. Sumber tegangan tiga fasa dalam simulasi menunjukkan kestabilan yang cukup baik. Ini terlihat dari nilai rata-rata yang hampir nol dan nilai rms yang stabil selama pengamatan.

2. Rangkaian penyearah gelombang penuh tiga fasa dengan enam thyristor mampu mengonversi tegangan AC menjadi tegangan DC dengan efektif. Penyearahan dilakukan secara bergantian di setiap fase sehingga tegangan keluaran menjadi lebih stabil.
3. Simulasi memperlihatkan bahwa tegangan keluaran memiliki rata-rata sekitar 496 V dengan nilai rms sekitar 514,72 V. Angka ini menunjukkan bahwa rangkaian dapat menghasilkan tegangan DC yang cukup stabil.
4. Arus di sisi keluaran mencapai nilai rms kurang lebih 5,1472 A yang menunjukkan bahwa arus pada beban tetap dalam kondisi stabil selama simulasi.
5. Penggunaan thyristor dalam rangkaian penyearah memungkinkan penyesuaian besar tegangan keluaran dengan mengubah sudut pemacu (firing angle). Dengan mengatur sudut tersebut nilai tegangan DC yang dihasilkan dapat diubah sesuai kebutuhan.

Secara keseluruhan hasil simulasi menunjukkan bahwa rangkaian penyearah terkontrol gelombang penuh tiga fasa bekerja dengan baik dalam mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC. Penggunaan MATLAB/Simulink sebagai alat simulasi mempermudah pemahaman tentang karakteristik tegangan dan arus dalam rangkaian elektronika daya.

DAFTAR REFERENSI

- Hart, D. W., & Hart, D. W. (2011). *Power electronics* (Vol. 166). New York: McGraw-Hill.
https://www.ece.ufl.edu/wp-content/uploads/syllabi/Fall2018/EEE5317C_F_2018.pdf
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons.
<https://www.academia.edu/download/56783670/s-power-electronics.pdf>
- Singh, M. D., & Khanchandani, K. B. (2007). *Power electronics*. Tata Mcgraw-Hill publishing company limited. <https://repositori.mypolycc.edu.my/handle/123456789/5103>
- Rashid, M. H. (2014). *Power electronics: circuits, devices, and applications* (4th ed.). Pearson Education.
<https://books.google.com/books?hl=id&lr=&id=yrOnEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Power+electronics+circuits+devices+and+applications+rashid&ots=HSEBCtQP1&sig=WniWzsvacu3MItFihJ6n3HE7ZsE>
- MathWorks. (2020). *MATLAB and Simulink for engineering applications*.
<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- Atmam, A. (2017). Penggunaan Filter Kapasitif Pada Rectifier Satu Fasa Dan Tiga Fasa Menggunakan Power Simulator (PSIM). *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, 2(1), 18-26. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v2i1.1667>
- Indrianto, R., & Hariyadi, S. (2020). PENGUKURAN HARMONIK PADA PENYEARAH TIGA FASA DENGAN MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK. *Jurnal Penelitian*, 5(4), 316-323.
<https://ejournal.poltekbangsby.ac.id/index.php/jurnalpenelitian/article/download/547/478>