

Desain Sistem Kontrol Sudut Penyalan *Thyristor* Komutasi Jaringan Berbasis Mikrokontroler PIC 16F877

Tarmizi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. T. Syech Abdurrauf No. 7 Darussalam, Banda Aceh, NAD, Indonesia

Abstrak— *Thyristor* digunakan untuk pengontrolan tegangan ac pada rangkaian penyearah terkendali dan rangkaian pengontrol tegangan ac karena dapat diatur tegangan keluaran dengan pengaturan sudut penyalan dari sinyal *trigger*. Pada penelitian dihasilkan sebuah prototipe rangkaian kontrol sudut penyalan *Thyristor* untuk aplikasi penyearah gelombang penuh satu fasa, tiga fasa dan rangkaian pengontrol tegangan ac satu. Rangkaian kontrol ini terdiri dari mikrokontroler PIC 16F877 dan rangkaian *zero crossing detector* yang menggunakan gerbang *inverting*. Desain diawali dengan simulasi menggunakan PSIM 6.0. sebagai referensi untuk rangkaian eksperimen. Sinyal *trigger* pada rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh, dan rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa sudut penyalannya dapat diatur dari $0^\circ - 180^\circ$. Sinyal *trigger* rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh sudut penyalannya dapat diatur dari $0^\circ - 60^\circ$. Hasil yang diperoleh melalui eksperimen ini sama dengan hasil simulasi.

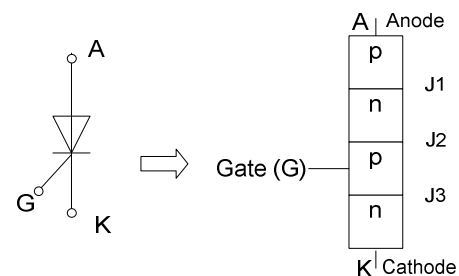
Kata Kunci. *thyristor*, sudut penyalan, *zero crossing detector*, sinyal *trigger*, mikrokontroler PIC 16F877, PIC Basic Pro.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan industri semakin pesat seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi seperti peralatan daya. Kebanyakan peralatan daya yang dipakai di industri sekarang ini tegangannya harus dikontrol setiap saat untuk memperoleh kinerja peralatan listrik sesuai dengan yang diinginkan. *Thyristor* merupakan peralatan daya semikonduktor yang digunakan pada rangkaian konverter, penyearah terkendali, dan pengontrol tegangan ac yang dapat diaplikasikan di industri, seperti untuk mengontrol *motor ac drive*, *motor dc drive*, pemanas, dll.

Thyristor bekerja dengan mengatur sudut penyalannya sesuai dengan yang dibutuhkan, sehingga tegangan keluaran dapat bervariasi. Sudut penyalan (*firing angle*) adalah waktu setelah tegangan masuk mulai menjadi positif sampai *thyristor* dipicu.

Pengaturan sudut penyalan *thyristor* untuk sumber ac menggunakan tegangan jaringan sebagai referensi, yang dideteksi oleh *zero crossing detector*, karena teknik pemadaman *thyristor* untuk sumber ac adalah komutasi jaringan (*line-commutation*) atau dikenal juga dengan teknik pemadaman secara alami, yaitu *thyristor* akan padam ketika berada dalam keadaan bias mundur, dimana kinerjanya tergantung pada operasi *zero crossing* dari tegangan sumber. Dengan adanya operasi *zero crossing* maka dapat diatur waktu dari penyalan *thyristor*[3].



Gambar 1. Simbol *thyristor*

Metode pengaturan sudut penyalan *thyristor* yang telah ada yaitu dengan menggunakan rangkaian analog. Besar tegangan yang dihasilkan merupakan fungsi dari nilai tahanan dan kapasitor. Untuk setiap rangkaian penyearah terkendali dan rangkaian pengontrol tegangan ac yang berbeda, maka rangkaian analog yang digunakan juga berbeda [5],[6].

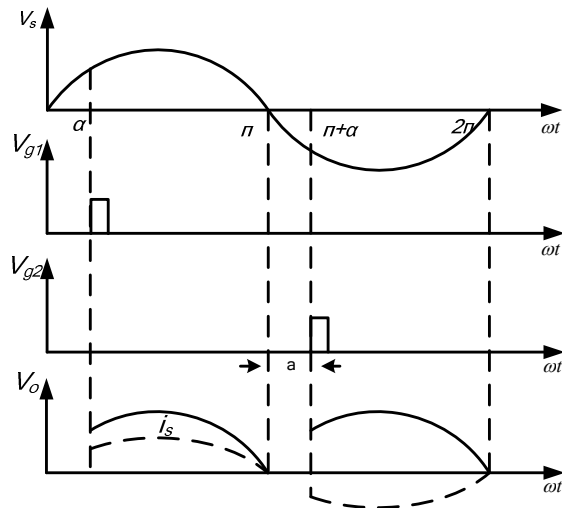
Upaya yang dilakukan untuk mempermudah pengaturan sudut penyalan yang dapat digunakan untuk berbagai rangkaian penyearah terkendali yaitu mendesain suatu sistem pengontrolan sudut penyalan *thyristor* menggunakan mikrokontroler PIC 16F877.

II. DASAR TEORI

A. *Thyristor*

Thyristor merupakan peralatan elektronik yang terdiri dari empat lapisan semikonduktor *pnpn* dan memiliki tiga sambungan-pn. *Thyristor* memiliki 3 terminal, yaitu anoda, katoda, dan *gate* (gerbang). *Thyristor* disebut juga dengan penyearah terkendali, karena memiliki *gate* yang berfungsi untuk mengendalikan arus. Teknik penyalan *thyristor* yang sering digunakan yaitu menggunakan arus gerbang. Jika *thyristor* dibias maju, pemberian arus pada gerbang dengan memakai tegangan positif antara gerbang dan terminal katoda akan menyalakan *thyristor*. Penundaan pemberian arus pada gerbang *thyristor* tergantung pada operasi *zero crossing* [1].

Thyristor dalam keadaan menyala dapat dipadamkan dengan mengurangi arus maju sampai di bawah arus *holding* (I_H). Teknik komutasi adalah salah satu teknik pemadaman *thyristor*. Dalam teknik komutasi, arus anoda dijaga agar berada dibawah arus *holding* dalam waktu yang cukup lama, jadi semua pembawa muatan lebih pada 4 lapisan *pnpn* dapat dihapuskan [1].



Gambar 2. Bentuk gelombang penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh

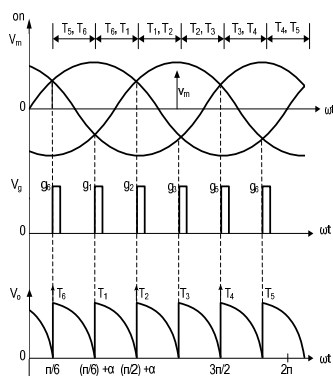
B. Penyearah Terkendali dan Pengontrol Tegangan Ac

Rangkaian penyearah terbagi atas beberapa macam. Menurut fasanya, rangkaian penyearah dibagi menjadi dua yaitu rangkaian penyearah terkendali satu fasa dan rangkaian penyearah terkendali tiga fasa.

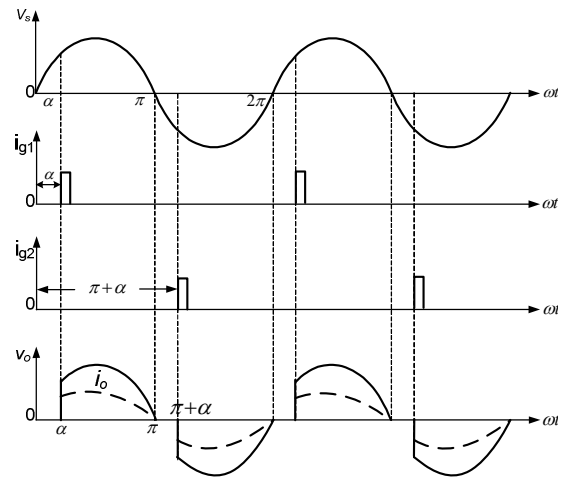
Gambar 2 adalah bentuk gelombang tegangan dan sinyal *trigger* untuk rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh. Selama setengah siklus positif *thyristor* T_1 dan T_2 dalam keadaan bias maju, dan diberi sudut penyalan sebesar $\omega t = \alpha$. Selama setengah siklus negatif *thyristor* T_3 dan T_4 akan dibias maju, dan penyalan dari *thyristor* T_3 dan T_4 menggunakan tegangan yang mengalir melalui *thyristor* T_1 dan T_2 sebagai tegangan *reverse blocking*. Tegangan V_{dc} yang dihasilkan adalah [1] :

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (1)$$

Sinyal *trigger* dan gelombang tegangan untuk rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh diperlihatkan pada Gambar 3. *Thyristor* untuk rangkaian ini terdiri dari 6 buah, sehingga jumlah sinyal *trigger* juga ada 6 dengan interval sudut penyalannya adalah $\pi/3$. Tegangan



Gambar 3. Gelombang tegangan dan sinyal trigger penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh

Gambar 4. Gelombang tegangan dan sinyal *trigger* rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa.

V_{dc} dihitung dengan menggunakan rumus (2).

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (2)$$

Bentuk gelombang tegangan dan sinyal *trigger* untuk rangkaian pengontrol tegangan ac 1 fasa ditunjukkan pada Gambar 4. Selama setengah siklus positif dari tegangan masuk, T_1 dalam kondisi bias maju. Ketika T_1 dipicu pada $\omega t = \alpha$, T_1 akan tersambung dan tegangan masuk akan muncul ke beban. Ketika tegangan masuk mulai negatif pada $\omega t = \pi$, T_1 akan padam. Saat tegangan masuk mulai negatif pada $\omega t = \pi$, maka T_2 berada dalam kondisi bias maju. Sehingga ketika T_2 dipicu pada $\omega t = \pi + \alpha$, T_2 akan tersambung dan tegangan masuk juga akan muncul ke beban [3]. Tegangan keluar rms dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3),

$$V_{o(rms)} = \left(\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right)^{1/2} = V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

C. PIC Mikrokontroler

Mikrokontroler banyak digunakan sebagai sistem kontrol dalam berbagai aplikasi pengontrolan perangkat. Mikrokontroler adalah komputer kecil *single chips*, yang digunakan untuk sistem kontrol. Mikrokontroler terdiri dari prosesor, memori dan *interfece* I/O pada sebuah potongan silikon (*single chips*). Banyak kelebihan yang didapat diantaranya murah, ukuran kecil, mudah dalam aplikasi dan cepat [4].

III. METODELOGI PENELITIAN

A. Tahapan Perancangan

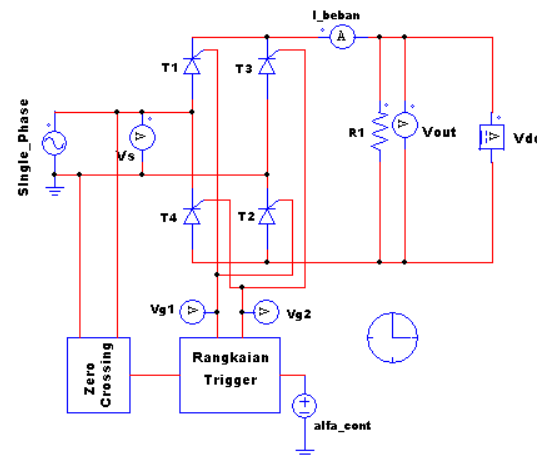
Tahapan dalam menyelesaikan tugas akhir ini dimulai dengan membangun ide awal dilanjutkan dengan studi literatur untuk mencari informasi dan mengenai dasar teori *thyristor*, *zero crossing detector*, PIC mikrokontroler, dan bahasa pemrograman basic pro compiler, serta pencarian data-data perangkat keras yang diperlukan.

Selanjutnya dilakukan perancangan perangkat lunak yaitu melakukan simulasi dengan menggunakan PSIM 6.0 yang terdiri dari 8 rangkaian, yaitu 6 rangkaian penyearah terkendali dan 2 rangkaian pengontrol tegangan ac. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk melihat gelombang tegangan masuk, sinyal *trigger*, dan gelombang tegangan keluar dari masing-masing rangkaian, dimana tegangan keluar yang dihasilkan dapat diatur dengan mengatur sudut penyalan sinyal *trigger*. Selanjutnya dilakukan perakitan rangkaian *zero crossing detector* dan rangkaian PIC mikrokontroler penghasil sinyal *trigger* pada *project board*. Pengujian pada PIC mikrokontroler untuk menghasilkan sinyal *trigger* sesuai dengan operasi *zero crossing detector* dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman *basic pro compiler*. Hasil yang diinginkan adalah agar rangkaian dapat menghasilkan gelombang tegangan masuk dan sinyal *trigger* yang dapat diatur waktu penyalannya sesuai dengan yang diinginkan. Selanjutnya dilakukan pengujian dan pengukuran, yaitu membandingkan hasil dari rangkaian simulasi dengan hasil eksperimen. Jika hasil simulasi dan hasil eksperimen telah sama maka perancangan telah berhasil.

B. Rangkaian Simulasi

Rangkaian simulasi penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh terdiri dari 4 buah *thyristor* seperti pada Gambar 5. Urutan kerja dari *thyristor* adalah T_1T_2 dan T_3T_4 . Sumber 1 fasa diatur dengan amplitudo maksimum sebesar 310 volt dan frekuensi 50 Hz. Besar sudut alfa yang dapat diatur pada rangkaian ini adalah 0° sampai 180° .

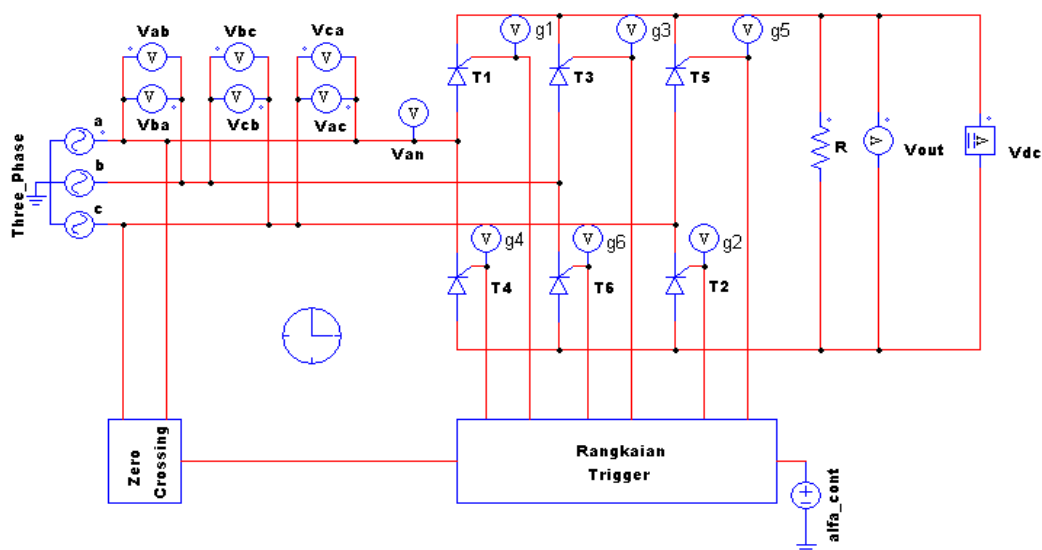
Gambar 6 adalah rangkaian simulasi untuk penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh. Sumber 3 fasa (a,b,c) diatur dengan tegangan *line to line rms* 380 volt dan frekuensi 50 Hz. Pada keluaran sumber 3 fasa dipasang alat ukur tegangan *line to line* yaitu V_{ab} , V_{bc} , dan V_{ca} . Rangkaian *zero crossing* dihubungkan antara fasa a dan



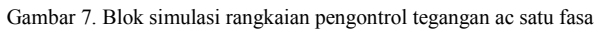
Gambar 5. Blok simulasi rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh

fasa c. Rangkaian *trigger* untuk penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh menghasilkan enam buah sinyal *trigger* yang masing-masing terhubung dengan *thyristor* sesuai dengan urutannya. Urutan kerja *thyristor* yaitu T_1T_2 , T_2T_3 , T_3T_4 , T_4T_5 , T_5T_6 , dan T_6T_1 . Sudut alfa pada rangkaian ini dapat diatur dari 0° sampai 60° atau $\pi/3$.

Rangkaian simulasi pada Gambar 7 merupakan rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa yang terdiri dari 2 buah *thyristor* T_1 dan T_2 . *Thyristor* T_1 bekerja ketika sumber tegangan positif, sedangkan T_2 bekerja ketika sumber tegangan negatif. Sumber 1 fasa diatur dengan amplitudo maksimum sebesar 310 volt dan frekuensi 50 Hz. Besar sudut alfa dapat diatur dari 0° sampai 180° .



Gambar 6. Blok simulasi rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh



A. Perancangan Rangkaian Pembangkit Sinyal Trigger

Untuk aplikasi pembangkitan sinyal *trigger* ini 6 buah PORTB digunakan sebagai penghasil sinyal *square*, yaitu PORTB.1, PORTB.2, PORTB.3, PORTB.4, PORTB.5, dan PORTB.6, yang mana keluaran sinyal pada *port-port* tersebut dihubungkan pada osiloskop. PORTB.0 digunakan sebagai masukan dari rangkaian *zero crossing detector*.

B. Flowchart Program Pembangkit Sinyal Trigger

1) *Flowchart Program Pembangkit Sinyal Trigger Pada Rangkaian Penyearah Terkendali Satu Fasa Gelombang Penuh*

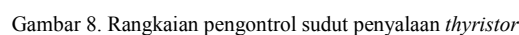
Program untuk rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh menghasilkan 6 sinyal *trigger* pada PORTB.1 sampai PORTB.6. sudut penyalanya dapat diatur dari 0° sampai 60°.

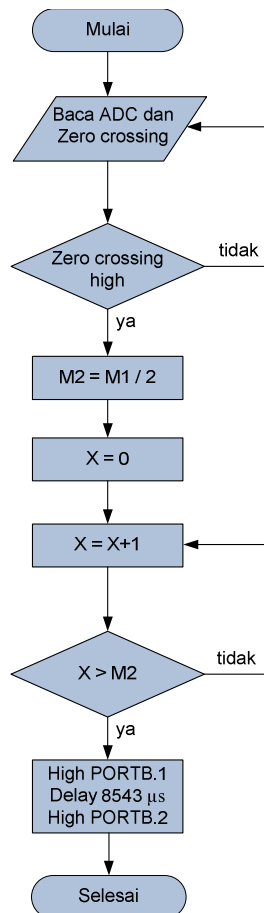
2) Program Pembangkit Sinyal Trigger Pada Rangkaian Pengontrol Tegangan Ac Satu Fasa

Sinyal *trigger* pada program untuk rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa yang dihasilkan adalah 2 sinyal masing-masing pada PORTB.1 dan PORTB.2 dengan jarak antara sinyal adalah 8543 mikrodetik atau sama dengan setengah perioda.

Hasil simulasi rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh ditunjukkan pada Gambar 12, dan hasil eksperimen seperti pada Gambar 13.

Hasil simulasi untuk rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh dengan sudut alfa $\alpha = 30^\circ$ adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12. Gambar 12(a)





Gambar 9. Flowchart program untuk rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh

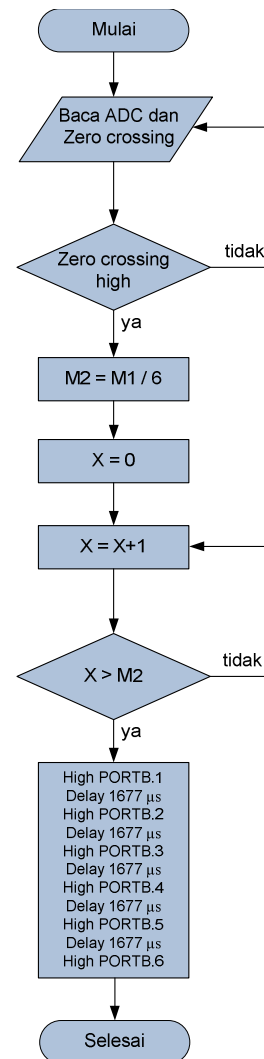
adalah bentuk gelombang tegangan masuk sumber satu fasa sebanyak dua periode. Gambar 12(b) adalah sinyal *trigger* pada T_1 untuk setengah siklus positif, sedangkan Gambar 12(c) adalah sinyal *trigger* pada T_2 untuk setengah siklus negatif. Gambar 12(d) merupakan gelombang tegangan keluar yang dihasilkan dari simulasi yang terpotong sejauh alfa $\alpha = 30^\circ$. Besar tegangan V_{dc} untuk $\alpha = 30^\circ$ adalah 183,99 volt seperti pada Gambar 12(e). Dimana hasil perhitungan dan simulasi adalah sama, yaitu :

$$V_{dc} = \frac{220\sqrt{2}}{3,14} (1 + \cos 30) = 184,88 \text{ volt}$$

Nilai V_{dc} untuk sudut penyalan yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 14.

Gambar 13(a) adalah gelombang tegangan sumber satu fasa yang diperlihatkan untuk beberapa periode. Gambar 13(b) dan Gambar 13(c) adalah sinyal *trigger* dengan sudut penyalan 30° untuk T_1 dan T_2 pada siklus positif serta T_3 dan T_4 pada siklus negatif untuk beberapa periode, sedangkan Gambar 13(d), 13(e), dan 13(f) adalah pembesaran dari Gambar 13(a), 13(b), dan 13(c). Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen, dapat dilihat bahwa sinyal *trigger* yang dihasilkan adalah sama.

Hasil simulasi rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh ditunjukkan pada Gambar 15 dan 16 dengan sudut penyalan sebesar 30° . Hasil eksperimen untuk rangkaian ini diperlihatkan pada Gambar 18 dan 19. Sinyal *trigger* yang dihasilkan sama seperti simulasi.



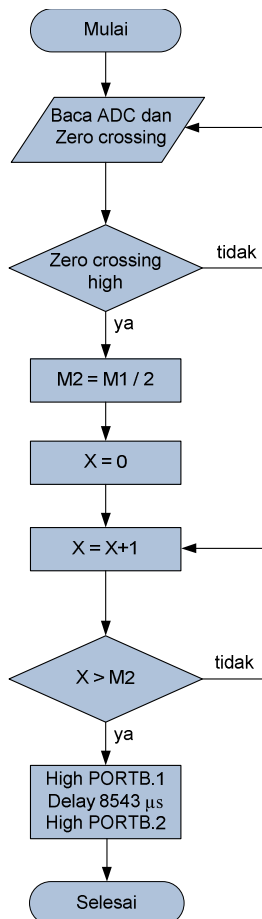
Gambar 10. Flowchart program untuk rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh

Gambar 15(a) dan 16(a) adalah gelombang tegangan masuk sumber tiga fasa 6 pulsa, sedangkan Gambar 15(b) dan 16(b) adalah gelombang tegangan fasa ke netral. Gambar 15(c), (d), dan (e) adalah sinyal *trigger* masing-masing untuk T_1 , T_2 , dan T_3 dengan sudut penyalan 30° . Gambar 16(c), (d), dan (e) adalah sinyal *trigger* untuk T_4 , T_5 , dan T_6 dengan sudut penyalan 30° . Gelombang tegangan keluar yang dihasilkan terpotong sebesar $\alpha = 30^\circ$, diperlihatkan pada Gambar 15(f) dan 16(f). Tegangan rata-rata V_{dc} dengan sudut $\alpha = 30^\circ$ adalah 445,55 volt seperti pada Gambar 17. Dimana tegangan V_{dc} hasil perhitungan juga sama yaitu:

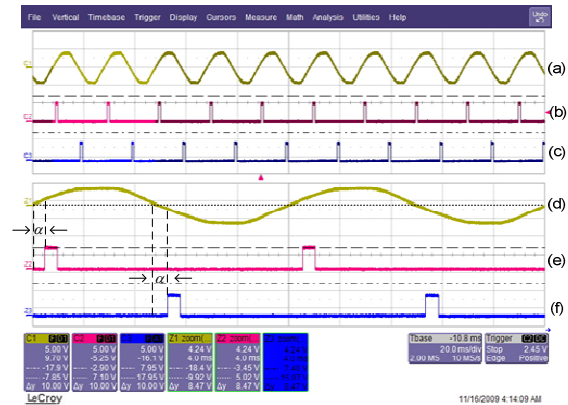
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3} \times 220\sqrt{2}}{3,14} \cos 30 = 445,88 \text{ volt}$$

Nilai V_{dc} untuk sudut penyalan yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 20.

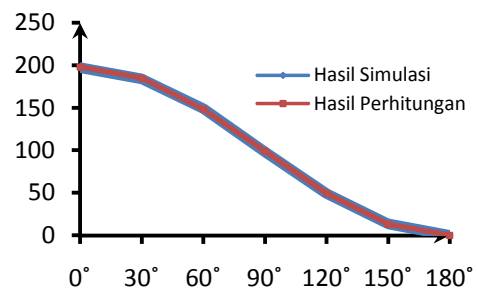
Pada eksperimen sumber tegangan fasa ke netral digunakan sebagai referensi pergeseran sudut fasa. Gambar 18(a) dan 19(a) adalah sumber tegangan fasa ke netral. Gambar 18(b), (c), dan (d) adalah sinyal *trigger* untuk T_1 , T_2 , dan T_3 pada sudut penyalan 30° . Gambar 18(e), (f), (g), dan (h) adalah pembesaran dari Gambar 18(a), (b), (c),



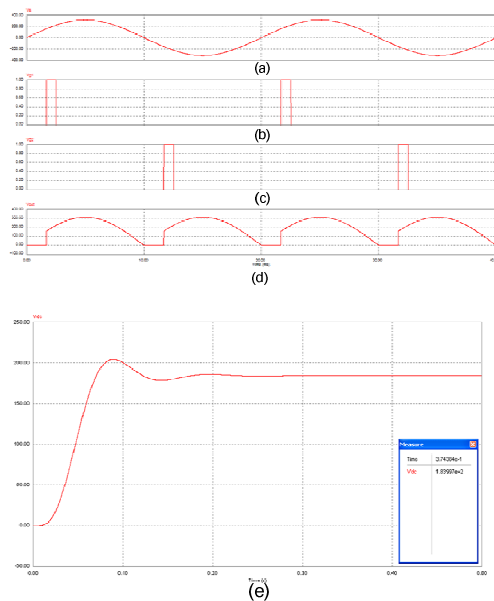
Gambar 11. *Flowchart* program untuk rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa



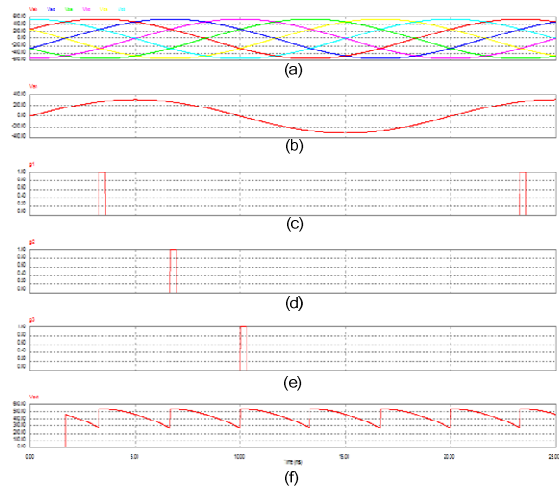
Gambar 13. Hasil eksperimen rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh untuk $\alpha = 30^\circ$



Gambar 14. Grafik perbandingan nilai V_{dc} simulasi dan perhitungan untuk rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh

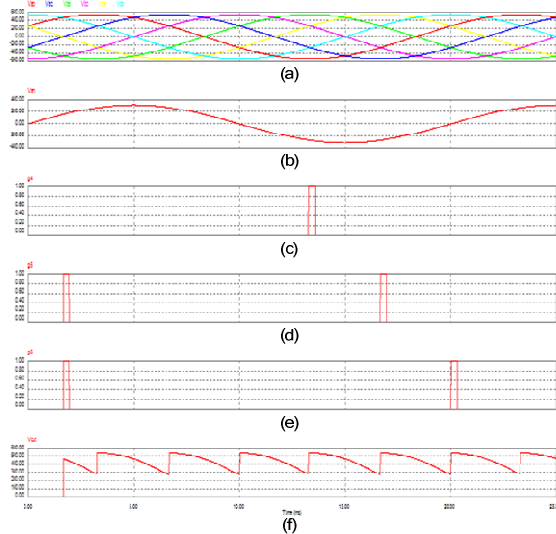


Gambar 12. Hasil simulasi rangkaian penyearah terkendali satu fasa gelombang penuh untuk $\alpha = 30^\circ$

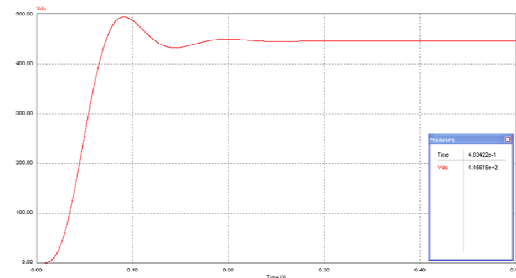


Gambar 15. Hasil simulasi rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh untuk T_1, T_2 , dan T_3 dengan $\alpha = 30^\circ$

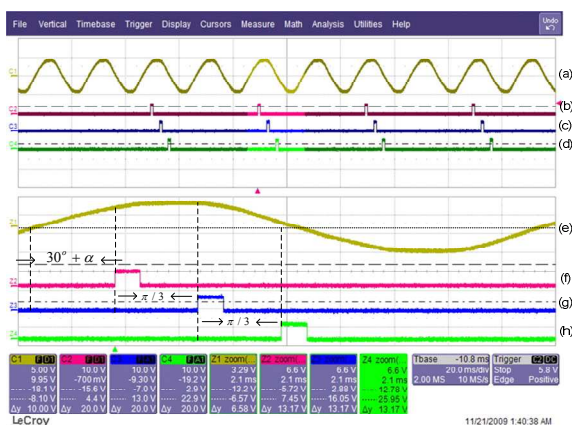
dan (d). Gambar 19(b), (c), dan (d) adalah sinyal *trigger* untuk T_4 , T_5 , dan T_6 pada sudut penyalan 30° . Gambar 19(e), (f), (g), dan (h) adalah pembesaran dari Gambar 19(a), (b), (c), dan (d). Simulasi dan eksperimen menghasilkan sinyal *trigger* yang sama.



Gambar 16. Hasil simulasi rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh untuk T_4, T_5 , dan T_6 dengan $\alpha = 30^\circ$

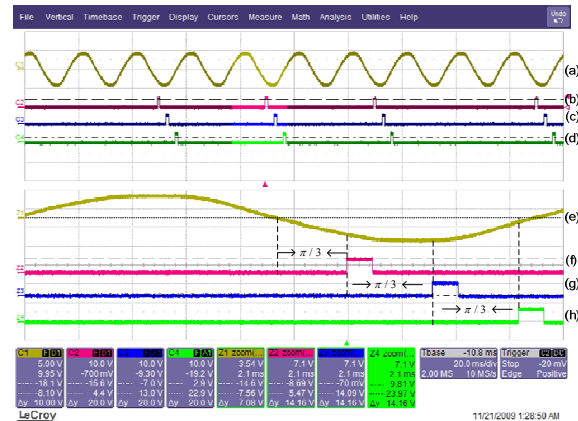


Gambar 17. Tegangan rata-rata (V_{dc}) hasil simulasi rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh untuk $\alpha = 30^\circ$

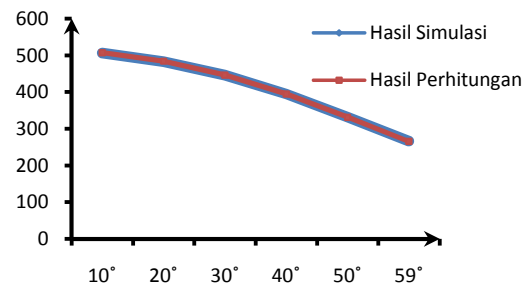


Gambar 18. Hasil eksperimen rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh untuk T_1, T_2 , dan T_3 dengan $\alpha = 30^\circ$

Hasil simulasi rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa untuk sudut alfa $\alpha = 30^\circ$ dapat dilihat pada Gambar 21. Gambar 21(a) menunjukkan bentuk gelombang tegangan keluaran dengan sudut $\alpha = 30^\circ$, dan sinyal *trigger* untuk T_1



Gambar 19. Hasil eksperimen rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh untuk T_4, T_5 , dan T_6 dengan $\alpha = 30^\circ$



Gambar 20. Grafik perbandingan nilai V_{dc} simulasi dan perhitungan untuk rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh

dan T_2 dimana tegangan $V_{out(rms)}$ yang dihasilkan adalah 215,77 volt. Bentuk tegangan masukan dan sinyal *trigger* pada rangkaian PIC 16F877 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 22. Sinyal *trigger* yang dihasilkan pada simulasi dan eksperimen adalah sama. Nilai tegangan keluar $V_{o(rms)}$ dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut

$$V_{o(rms)} = 220 \left[\frac{1}{3,14} (3,14 - 0,52 + 0,433) \right]^{1/2} = 216,9 \text{ volt}$$

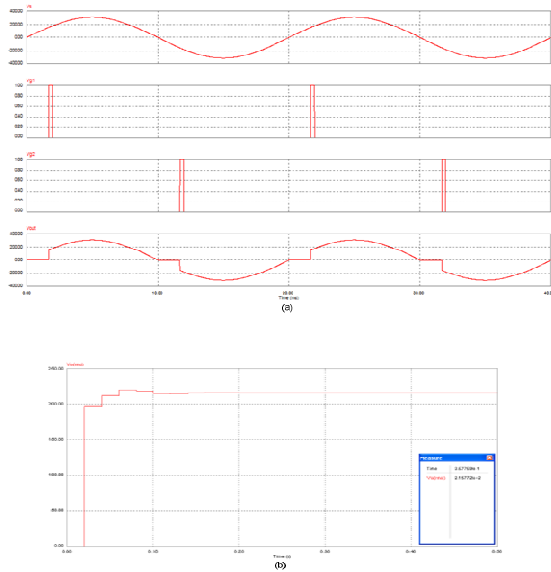
Nilai V_{dc} untuk sudut penyalan yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 23.

Dari hasil simulasi dan eksperimen untuk ketiga rangkaian, dapat dilihat bahwa rangkaian pembangkit sinyal *trigger* dapat digunakan untuk berbagai macam rangkaian penyearah dan rangkaian ac, dimana rangkaian analognya tidak perlu diubah tetapi hanya mengubah sedikit programnya sesuai dengan rangkaian penyearah atau rangkaian ac yang diperlukan.

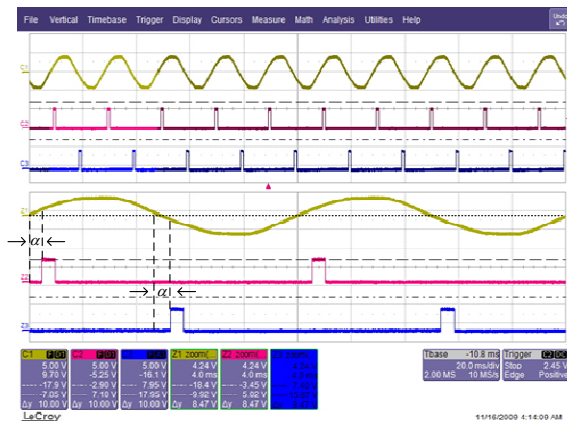
V. KESIMPULAN

Dari pembahasan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

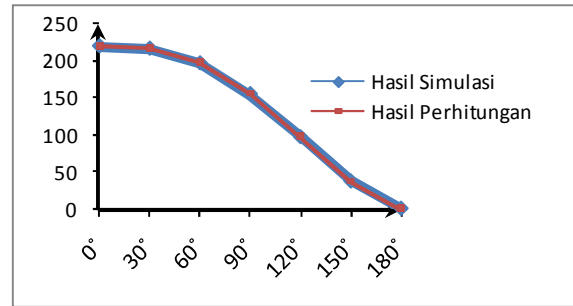
1. Sinyal *trigger* pada rangkaian penyearah terkendali gelombang penuh satu fasa sudut penyalan dapat diatur dari 0° sampai 180° , sehingga tegangan dapat diatur dari 198,16 volt sampai 0 volt.



Gambar 21. Hasil simulasi rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa untuk $\alpha=30^\circ$



Gambar 22. Hasil eksperimen pada rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa untuk $\alpha=30^\circ$



Gambar 23. Grafik perbandingan nilai V_{dc} simulasi dan perhitungan untuk rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa.

2. Sinyal *trigger* pada rangkaian penyearah terkendali tiga fasa gelombang penuh sudut penyalan dapat diatur dari 0° sampai 60° , sehingga tegangan dapat diatur dari 507,04 volt sampai 265,17 volt.
3. Sinyal *trigger* pada rangkaian pengontrol tegangan ac satu fasa sudut penyalan dapat diatur dari $0^\circ - 180^\circ$, sehingga tegangan dapat diatur dari 220 volt sampai 0 volt.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rashid, Muhammad H, *Power Electronics Circuits, Devices, And Applications*, Third Edition, Pearson Education International, 2004.
- [2] Batarseh, Issa, *Power Electronic Circuits*, Wiley International Edition University of Central Florida, 2004.
- [3] http://www.electroniclab.com/index.php?option=com_content&view=article&id=31:pengontrolan-temperatur-menggunakan-metode-kontrol-pid&catid=9:labmikro&Itemid=11
- [4] PIC16F87X Data Sheet 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers, Microchip Technology Inc., 2001.
- [5] Clements, "Capacitor fired thyristor", United States Patent, appl. no : 3.739.198, 1973.
- [6] Johnson, "Method and apparatus for firing angle control of series connected thyristor switches", United State Patent, appl. no : 4.639.851, 1987.