

KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI SATU FASA DENGAN INVERTER PWM PULSA TUNGGAL BERBASIS MIKROKONTROLER AT89S51

Muchlas, Tole Sutikno, Muhammad Noorudin

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan
Kampus III UAD Jl. Prof. Dr. Soepomo, Janturan, Umbulharjo, Yogyakarta
Telp. (0274) 379418-381523 psw 101/220, Fax 0274-381523
e-mail: muchlas@lycos.com, tole@uad.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan dan menguji kinerja pengendalian motor induksi satu fasa menggunakan inverter PWM pulsa tunggal berbasis mikrokontroler AT89S51. Penelitian dilakukan dengan terlebih dahulu merancang inverter menggunakan Mosfet IRF 830, rangkaian penggerak mosfet dan pembangkit pulsa PWM dengan mikrokontroler AT89S51. Keluaran pulsa dari mikrokontroler AT89S51 kemudian diumpankan ke rangkaian penggerak untuk mengemudikan inverter. Selanjutnya dilakukan pengujian kinerja sistem kendali dengan memasang beban motor induksi satu fasa pada keluaran inverter. Pada penelitian ini, inverter dicatu dengan tegangan DC 50 Volt. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kendali dengan inverter PWM pulsa tunggal yang diimplementasikan berbasis mikrokontroler AT89S51 dapat mengatur kecepatan putar motor induksi satu fasa.

Kata kunci : PWM pulsa tunggal, AT89S51, Inverter, Kecepatan Motor Induksi.

1. PENDAHULUAN

Dalam dunia industri, pengendalian motor sangat diperlukan sebagai tenaga penggerak mekanik. Penggunaannya sebagai penggerak diantaranya untuk pengaturan posisi pada robot, sebagai pengatur aliran dalam pompa, kompresor dan blower memerlukan elektronika daya sebagai perantara sumber daya motor.

Salah satu cara pengendalian kecepatan motor induksi adalah dengan inverter PWM pulsa tunggal. Proses pembangkitan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) menjadi salah satu faktor penentu unjuk kerja sistem secara keseluruhan. Sinyal PWM dapat dibangkitkan secara analog atau digital. Pembangkitan secara analog lebih sederhana tetapi sangat rentan terhadap derau. Pembangkitan secara digital dapat menghasilkan sinyal PWM lebih baik karena tidak terpengaruh oleh derau tetapi mempunyai tingkat kerumitan lebih tinggi dibanding cara analog.

Mikrokontroler adalah sistem mikroprosesor dengan jumlah pengingat yang terbatas dan jumlah piranti penunjang (peripheral) tergabung dengan CPU (Central Processing Unit) dalam sebuah rangkaian terintegral. Mikrokontroler AT89S51 dirancang khusus untuk sistem pengaturan dan mempunyai banyak cara untuk kendali inverter elektronika daya. Pemakaian mikrokontroler dalam sistem memberikan keuntungan pada ketelitian sistem dan memungkinkan melakukan modifikasi atas sistem yang sudah ada hanya dengan mengganti atau mengubah perangkat lunaknya.

2. METODE PENELITIAN

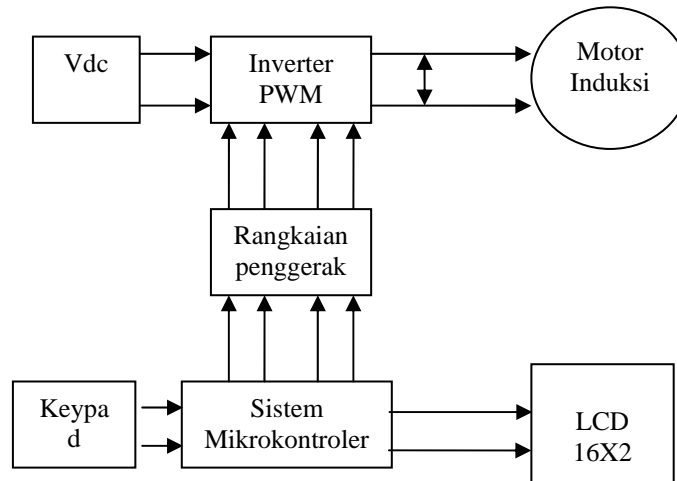
Pada bagian ini akan dijelaskan tentang perancangan sistem yang meliputi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak.

2.1. Perancangan Perangkat Keras

Susunan perangkat keras sistem kendali kecepatan motor induksi pada penelitian ini terdiri atas 7 bagian utama rangkaian, yaitu (*Rangkaian sistem minimum Mikrokontroler AT89S51*), (*Power supply*), (*Keypad 3x4*), (*LCD 16x2 karakter*), (*Driver motor/rangkaian penggerak inverter*), (*Inverter*), (*Motor induksi satu fasa*).

Secara umum blok diagram perangkat keras dari sistem kendali kecepatan motor induksi satu fasa dengan inverter PWM pulsa tunggal berbasis mikrokontroler AT89S51 yang telah didesain dapat dilihat pada gambar 1.

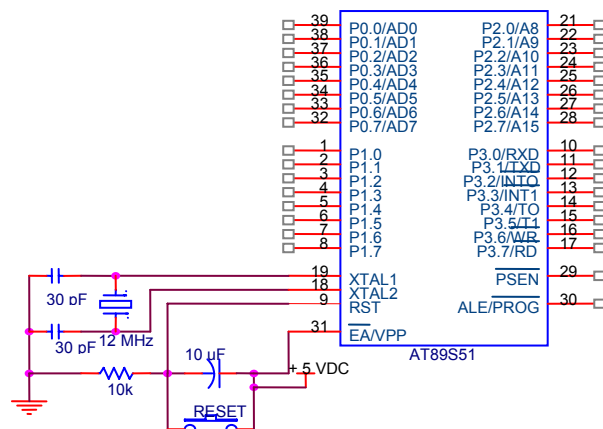
Alat ini dirancang dengan menggunakan mikrokontroler AT89S51. Secara umum, sistem secara keseluruhan diatur oleh mikrokontroler AT89S51 sebagai kontroler utama. Mikrokontroler ini berfungsi sebagai pembangkit sinyal PWM pulsa tunggal dengan indeks modulasi bervariasi yang disetting menggunakan keypad dan sebagai tampilan adalah LCD. Sebagai subjek adalah motor induksi satu fasa.



Gambar 1. Blok Diagram Perangkat Keras Sistem Kendali Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa Dengan Inverter PWM Pulsa Tunggal Berbasis Mikrokontroler AT89S51

Rangkaian Mikrokontroler AT89S51

Pada perancangan mikrokontroler ini menggunakan mikrokontroler dari keluarga ATMEL. Mikrokontroler ini memiliki memori sebesar 8 Kbyte dan 4 port kontrol utama. Berikut gambar 2 menunjukkan gambar rangkaian mikrokontroler AT89S51 yang telah dirancang sesuai dengan kebutuhan.



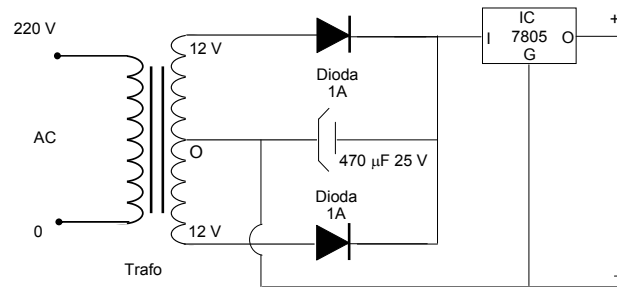
Gambar 2. Rangkaian Mikrokontroler AT89S51

Sistem minimum mikrokontroler yang digunakan berjenis AT89S51 menggunakan mode *single chip* sehingga rangkaian mikrokontroler hanya terdiri dari *chip* mikrokontroler AT89S51, rangkaian osilator dan rangkaian *Reset*. Komponen kristal yang digunakan pada osilator bernilai 12 MHz. Blok rangkaian mikrokontroler AT89S51 dapat dilihat pada gambar 2.

Perancangan Catu Daya (Power Supply)

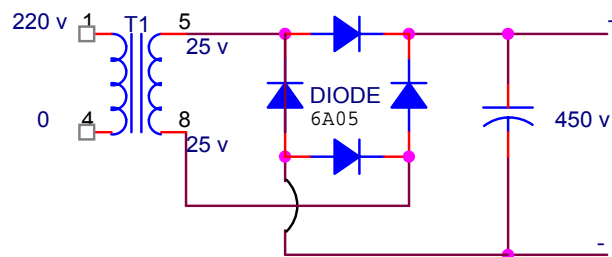
Pada perancangan sistem ini dibutuhkan 5 buah catu daya. Catu daya tersebut digunakan untuk sistem mikrokontroler, pembangkit sinyal inverter dan tiga buah catu daya untuk rangkaian penggerak.

- Satu buah catu daya dengan tegangan 5 volt/2 ampere sebagai tegangan sistem minimum mikrokontroler dan sebagai tegangan pencatu rangkaian gerbang *NOT Schmitt Trigger* dan *Optocoupler*.



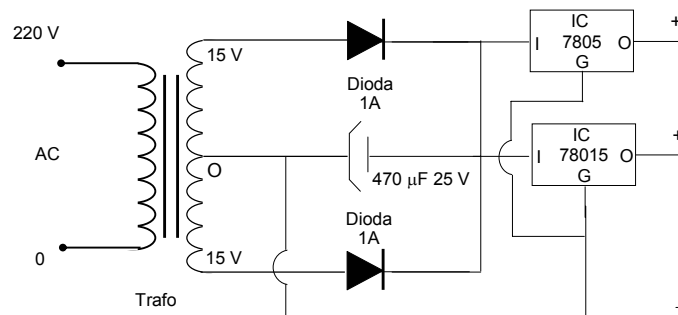
Gambar 3. Catu daya untuk mikrokontroler dan rangkaian gerbang NOT Schmitt Trigger dan Optocoupler.

- Satu buah catu daya untuk pembangkit sinyal inverter



Gambar 4. Catu daya untuk rangkaian inverter

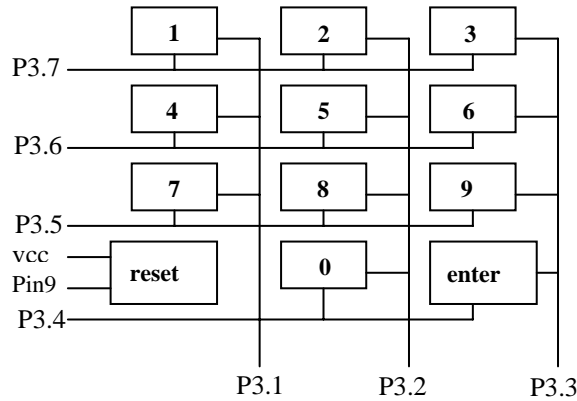
- Catu daya yang digunakan untuk rangkaian driver sebesar 5 Volt menggunakan IC 7805 dan 15 Volt menggunakan IC 7815. Catu daya untuk driver ini tidak perlu stabil dan harus terisolasi dari rangkain mikrokontroler dan pembangkit sinyal PWM. Masing-masing driver/rangkaian penggerak lengan atas inverter membutuhkan catu daya tersendiri sehingga membutuhkan dua buah catu daya. Sedangkan driver lengan bawah inverter cukup membutuhkan sebuah catu daya bersama untuk dua buah driver bagian bawah.



Gambar 5. Catu daya untuk rangkaian penggerak

Konfigurasi Tombol Pada Keypad 4 x 3

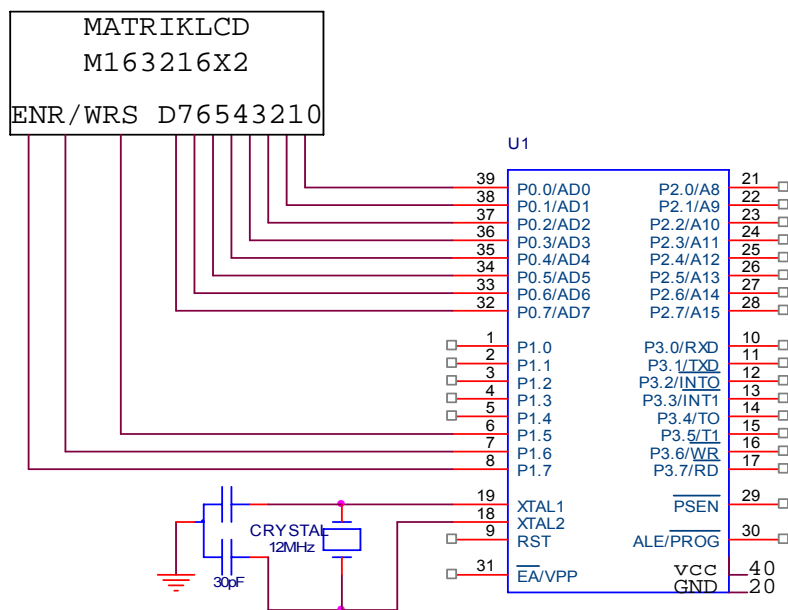
Keypad yang digunakan terdiri dari 4 baris dan 3 kolom. 7 buah kaki Keypad terhubung dengan port3 mikrokontroler AT89S51. Ketika sebuah tombol ditekan maka sebuah baris akan terhubung dengan sebuah kolom, menyebabkan baris dan kolom tersebut akan berlogika 0/low. Lebih jelasnya dapat dilihat pada rangkaian Keypad Gambar 6.



Gambar 6. Konfigurasi Keypad 4x3

Setiap tombol pada Keypad dari 0-9 sudah diberikan setting kecepatan sesuai indeks modulasi (PWM) pulsa tunggal dengan kombinasi mikrokontroler tertentu. Data *set point* dilihat pada tabel 8. Tombol *Reset* berfungsi sebagai tombol *reset/stop* konfigurasi mikrokontroler pin 9 yang akan berlogika 0/ Low apabila terhubung Vcc 5 volt dengan hambatan 10 KΩ. Tombol *Enter* sebagai perintah pada setiap penekanan tombol 0-9 akan dilanjutkan dengan menekan tombol *Enter* sebelum dilakukan pensaklaran pada tegangan inverter (Vdc) pada tegangan 50 Volt.

Perancangan LCD 16x2 Karakter



Gambar 7. Pemasangan Matriks LCD pada Mikrokontroler AT89S51

LCD yang digunakan adalah LCD 16 karakter x 2 baris berjenis M1632 buatan SEIKO, dihubungkan dengan mikrokontroler pada port 0 sebagai jalur Data Bus dan P1.5, P1.6 dan P1.7 sebagai jalur kendalinya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 7. Karakter baris pertama digunakan sebagai tampilan "M NOORUDIN" dan untuk karakter baris kedua sebagai tampilan tombol keypad sesuai dengan penekanan tombol keypad yang mempunyai indeks modulasi PWM pulsa tunggal yang berbeda serta tampilan kecepatan dalam Rps. Contoh tampilan pada LCD untuk indeks modulasi 0,4 pada tombol 3:

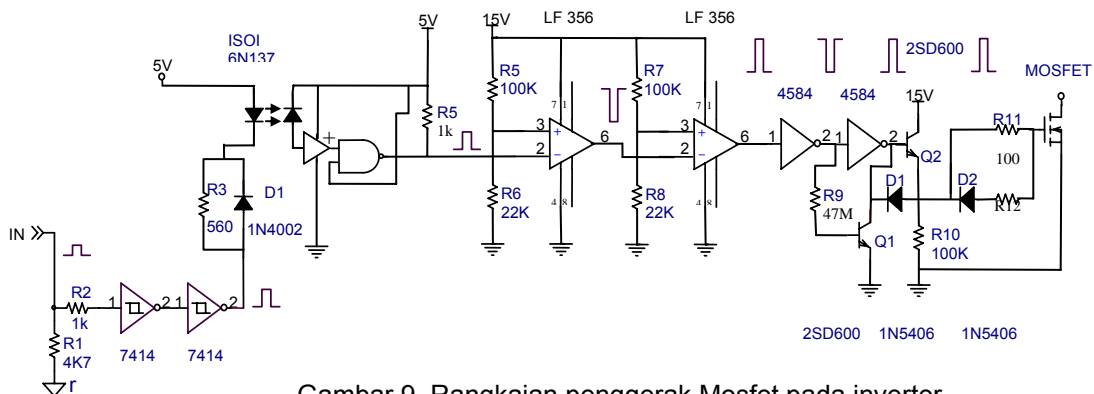
KENDALI PWM:
3: KEC = 2 Rps

Gambar 8. Tampilan LCD 16x2 karakter

Perancangan Penggerak Mosfet Pada Inverter

Penelitian ini menggunakan rangkaian penggerak mosfet yang diperlihatkan pada gambar 9. Rangkaian driver digunakan untuk menguatkan sinyal tegangan dari pembangkit sinyal PWM agar mampu menggerakkan mosfet pada jembatan inverter sekaligus mengisolasi rangkaian pembangkit PWM yang berdaya rendah.

Mosfet sebagai komponen utama pada inverter memerlukan tegangan Gate berkisar 7,5 Volt. Dengan sinyal PWM keluaran mikrokontroler yang hanya mempunyai tegangan 2,5 Volt pada level tinggi sehingga tidak dapat digunakan untuk mengoperasikan mosfet secara langsung. Sinyal tersebut dapat digunakan untuk menggerakkan mosfet dengan bantuan suatu rangkaian penggerak (*driver*). Rangkaian penggerak akan menaikkan sinyal keluaran mikrokontroler pada level tegangan *Gate* batas (V_G) mosfet. Rangkaian ini juga dilengkapi dengan isolator dengan memisahkan rangkaian logika sebagai bagian tegangan rendah dan inverter sebagai bagian tegangan tinggi.



Gambar 9. Rangkaian penggerak Mosfet pada inverter

Sisi masukan pada rangkaian penggerak dirancang dengan dua gerbang NOT *Schmitt Trigger* dan dua buah resistor yang membentuk konfigurasi *pull down*. Register *pull down* berfungsi untuk menghindari kondisi mengambang pada rangkaian penggerak. Dua gerbang NOT *Schmitt Trigger* (74LS14) digunakan untuk membalik sinyal masuk dua kali sehingga sinyal yang ke *optocoupler* sama dengan sinyal masukan. Gerbang NOT kedua dihubungkan dengan *optocoupler* melalui melalui R3 membentuk konfigurasi *sink*. Mikrokontroler tidak langsung dihubungkan ke *optocoupler* agar tidak menanggung beban arus *sink*, sehingga dapat meminimalkan kemungkinan kerusakan pada mikrokontroler jika sewaktu-waktu terjadi kerusakan pada rangkaian *optocoupler*. *Optocoupler* berfungsi sebagai isolator. Tipe yang digunakan adalah 6N137. Tipe ini mempunyai waktu bangkit/rise time 45 ns dan dilengkapi

dengan fasilitas *Disable/Enable*. Keluaran *optocoupler* dihubungkan dengan resistor *pull up* untuk diumpangkan ke rangkaian komputer.

Dua buah rangkaian komparator dan gerbang NOT CMOS Schmitt Trigger (MC14584) digunakan untuk mengurangi lebar (memotong) pulsa penggerak dengan tujuan untuk menghindari terjadinya kondisi pada pasangan mosfet dalam keadaan on secara bersamaan. Sinyal penggerak pasangan mosfet sering sekali berkebalikan pada saat pulsa penggerak mosfet pada kondisi turun, mosfet tersebut membutuhkan waktu selama (fall time) untuk mencapai kondisi off. Pada saat yang sama pula penggerak mosfet bawah pasangan akan berada pada kondisi transisi naik yang akan meng-ON-kan mosfet bawah. Karena (rise time) mosfet lebih cepat, ada kemungkinan saat mosfet atas sedang transisi ke kondisi off mosfet bawah pasangannya sudah dalam kondisi on sehingga terjadi hubungan singkat. Agar inverter dapat beroperasi dengan aman, maka lebar pulsa keempat sinyal penggerak tidak terhubung singkat dengan pasangannya.

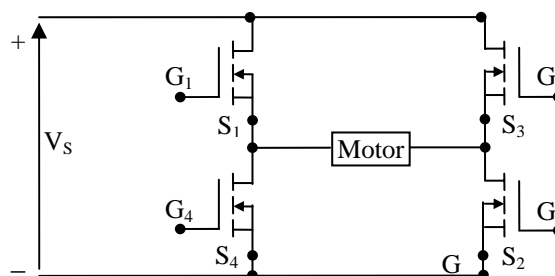
Rangkaian OpAmp digunakan untuk mengubah keluaran dari kondisi $-V_{sat}$ ke $+V_{sat}$ pada catu daya 15 Volt, gerbang NOT CMOS membutuhkan masukan dengan level tegangan maksimal 7,5 Volt untuk logika '1' dan maksimal 2,5 Volt untuk logika '0'. Komponen yang digunakan sebagai komparator adalah OpAmp tipe LF356. OpAmp merupakan beda tegangan antara masukan positif dan negatif minimal yang dapat menyebabkan perubahan keluaran OpAmp. Komparator dirancang sebagai komparator pembalik tegangan (dc).

Komparator pertama digunakan untuk sinyal keluaran *optocoupler* sebagai rangkaian pembagi tegangan R5 dan R6 akan menghasilkan tegangan sebesar 2,7 Volt sebagai referensi sehingga akan memotong sinyal keluaran *optocoupler* ± 20 ns. Komparator kedua digunakan untuk sinyal keluaran komparator pertama dengan tegangan referensi sebesar 2,5 Volt yang berasal dari rangkaian pembagi tegangan R7 dan R8. Komparator pertama sehingga sama dengan polaritas sinyal masukan rangkaian penggerak. Sinyal keluaran sinyal komparator kedua diumpangkan ke gerbang NOT CMOS Schmitt Trigger (MC14585). untuk memperjelas bentuk pulsa. Pulsa keluaran gerbang NOT CMOS mempunyai lebar sama dengan lebar efektif pulsa keluaran komparator karena gerbang CMOS memerlukan tegangan maksimal sebesar 7,5 Volt untuk mencapai logika masukan '1' dan maksimal 2,5 Volt untuk logika masukan '0'.

Komponen rangkaian penggerak terakhir adalah dua buah transistor yang bekerja saling berlawanan. Q2 mendapat masukan dari NOT CMOS 2 yang mempunyai polaritas sama dengan sinyal masukan rangkaian penggerak. Q1 mendapat masukan dari NOT CMOS 1 yang berkebalikan dengan sinyal masukan Q2. Emitor Q2 dihubungkan dengan kolektor Q1 melalui D1 untuk mempercepat transisi sinyal turun. Sinyal keluaran Emitor Q2 digunakan untuk menggerakkan mosfet melalui R11. Dioda 2 dan R12 berfungsi untuk mencegah terjadinya arus balik dan mengurangi derau.

Inverter

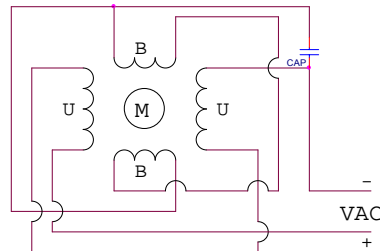
Rangkaian jembatan inverter satu fasa menggunakan mosfet dengan tipe IRF 830 dengan V_{DS} maksimum 500 V dan I_D kontinu maksimum 4,5 Ampere. Untuk dapat mengoperasikan Mosfet Daya, digunakan metode pensaklaran, dimana tegangan gerbang pada *Gate* harus diberikan untuk membawa mosfet dari *mode saturasi* untuk tegangan keadaan hidup yang rendah. Tegangan kontrol harus diberikan antara terminal gerbang dan sumber atau antara *Gate* dan *Source*. Secara lengkap rangkaian inverter jembatan penuh ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Rangkaian inverter jembatan penuh

Motor Induksi Satu Fasa

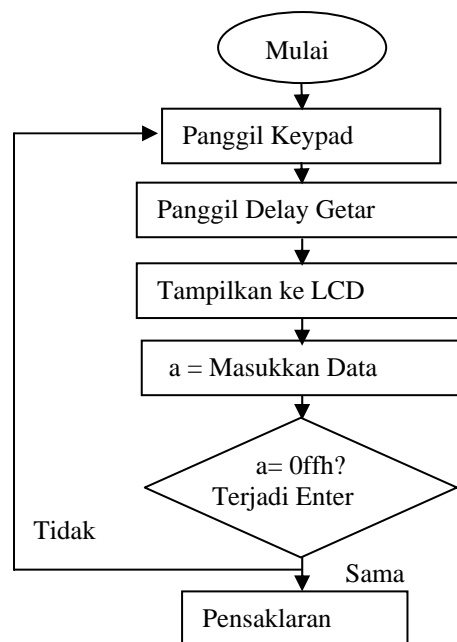
Dalam penelitian ini digunakan motor induksi satu fasa jenis motor kapasitor yang hanya memiliki satu lilitan pada stator yang memiliki dua macam kumparan Bantu (B) dan kumparan Utama (U), dimana rotor berupa logam tidak lilitan. Cara penyambungan motor induksi satu fasa dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Motor induksi satu fasa jenis motor kapasitor

2.2. Perancangan Perangkat Lunak

Sinyal PWM tunggal dibuat dalam pola indeks modulasi yang bervariasi. Pada penelitian ini dibuat 10 macam tabel sinyal PWM dengan indeks modulasi (0), (0.2), (0.3), (0.4), (0.5), (0.7), (0.8), 0.9 dan (1). Sistem kendali indeks modulasi akan di-setting menggunakan keypad, yang akan dikontrol dengan tampilan LCD (*Liquid Crystal Display*). Flowchart program utama dari sistem yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Flowchart program utama

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini langkah berikutnya dilakukan pengujian sistem kendali kecepatan sebagai objek motor induksi satu fasa jenis sangkar burung. Sinyal pembangkit PWM pulsa tunggal diimplementasikan ke dalam mikrokontroler AT89S51 sebagai kontrol nilai indeks modulasi yang bervariasi menggunakan Keypad.

3.1. Sinyal PWM Keluaran Mikrokontroler AT89S51

Uji coba tahap pertama adalah mengamati bentuk sinyal PWM pulsa tunggal yang diimplementasikan ke dalam mikrokontroler AT89S51 yang diumpangkan pada rangkaian penggerak inverter. Pengambilan gambar gelombang sinyal keluaran pada rangkaian penggerak inverter menggunakan CH1 dan CH2 secara bersamaan. Dalam hal ini untuk mengetahui selang waktu tunda penggerak mosfet. *Duty Cycle* untuk indeks modulasi 0-9 dinyatakan dalam persen (%) ditunjukkan pada Tabel 1. Dari Tabel 1 tersebut dapat dilihat bahwa lebar pulsa dalam satu periode untuk setiap indeks modulasi mempunyai lebar pulsa yang berbeda, semakin besar indeks modulasi maka semakin lebar pulsanya.

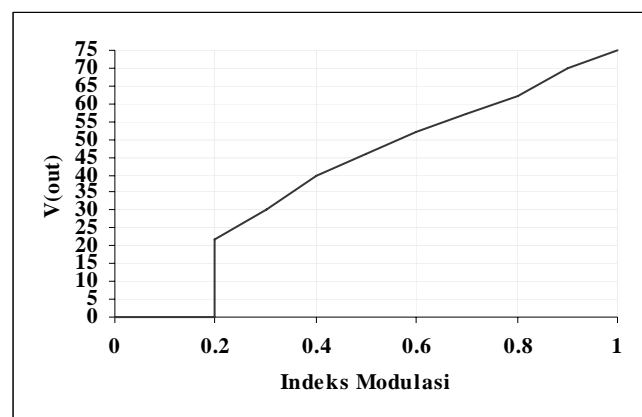
Tabel 1. *Duty Cycle* Pulsa PWM

Keypad	Indeks Modulasi	Lebar Pulsa "ON"	Duty Cycle (%)
0	0	0	0
1	0,2	19	10,545
2	0,3	27	14,985
3	0,4	37	20,535
4	0,5	45	24,975
5	0,6	55	30,525
6	0,7	63	34,965
7	0,8	73	40,515
8	0,9	81	44,955
9	0,10	91	50,505

3.2. Tegangan Keluaran Inverter

Uji coba tahap kedua adalah mengamati bentuk tegangan keluaran yang dilakukan dengan cara memberikan hambatan berupa *transformator step down* untuk dapat ditangkap oleh DSO. Pengamatan ini dilakukan dengan cara memasang CH1 pada output inverter. Tingkat pengaturannya dipilih melalui *Keypad*, yaitu saklar yang difungsikan sebagai pemilih program/*data set point* dengan 10 indeks modulasi yang bervariasi dengan step 0,1. Setting dari pensaklarannya dengan indeks modulasi sebagai berikut ; indeks modulasi 0 (pada keypad 0), indeks modulasi 0,2 (pada keypad 1), indeks modulasi 0,3 (pada keypad 2), indeks modulasi 0,4 (pada keypad 3), indeks modulasi 0,5 (pada keypad 4), indeks modulasi 0,6 (pada keypad 5), indeks modulasi 0,7 (pada keypad 6), indeks modulasi 0,8 (pada keypad 7), indeks modulasi 0,9 (pada keypad 8) dan indeks modulasi 1 (pada keypad 9). Hasil pengujian dengan DSO menunjukkan bahwa lebar pulsa ON, sama seperti ditunjukkan pada Tabel 1 (lebar pulsa pada output inverter dengan masukan indeks modulasi yang bervariasi menghasilkan tegangan output inverter yang bervariasi, yaitu semakin lama clock (ON) pulsa semakin lebar dan tegangan semakin tinggi).

Pada penelitian ini karakteristik tegangan output inverter menggunakan sistem kendali PWM pulsa tunggal sesuai dengan teori, semakin besar indeks modulasi semakin besar tegangan output pada inverter, seperti ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Karakteristik tegangan output inverter

3.3. Arus Keluaran Inverter Melalui Beban Motor Satu Fasa

Uji coba tahap ketiga adalah mengamati bentuk arus melalui beban motor satu fasa. Pengamatan dilakukan dengan cara memasang salah satu terminal V_{AN} dan V_{BN} secara seri terhadap motor induksi satu fasa dari ujung-ujung kaki dihubungkan secara paralel ke *transformator step down* untuk dapat ditangkap oleh DSO. Pada pengujian ini digunakan *transformator step down* sebagai beban agar tegangan output inverter dapat di tangkap oleh DSO. Pengamatan tahap ini menunjukkan bahwa rangkaian logika PWM pulsa tunggal yang diimplementasikan dengan inveter PWM pulsa tunggal berbasis mikrokontroler AT89S51 dapat dijadikan sebagai sistem kendali kecepatan motor induksi satu fasa.

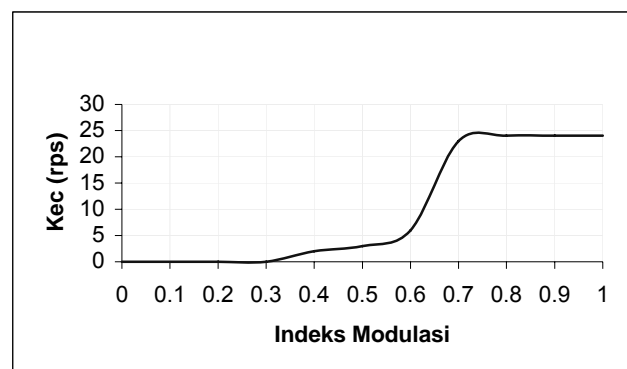
3.4. Kecepatan Putar Motor Induksi

Pada uji coba keempat dilakukan pengukuran kecepatan motor induksi satu fasa, dengan 10 kecepatan menggunakan alat *Tachometer*, pengukuran arus output inverter menggunakan *Ampermeter* dan pengukuran tegangan menggunakan *Voltmeter*. Kecepatan putar motor dipilih menggunakan keypad yang masing-masing tombol memiliki indeks modulasi yang berbeda, yaitu saklar yang difungsikan sebagai pemilih program dengan 10 indeks modulasi yang bervariasi. Hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran inverter serta kecepatan motor ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel kecepatan putar motor dengan indeks modulasi yang bervariasi.

Keypad No	Indeks Modulasi	Tegangan output beban motor	Arus output beban motor	Kecepatan dalam RPS	Keterangan Kecepatan
0	0	0	0	0	Berhenti
1	0,2	22 Volt	0,19 A	0	Set kecepatan 1
2	0,3	30 Volt	0,30 A	1	Set kecepatan 2
3	0,4	40 Volt	0,42 A	2	Set kecepatan 3
4	0,5	46 Volt	0,53 A	3	Set kecepatan 4
5	0,6	52 Volt	0,62 A	6	Set kecepatan 5
6	0,7	57 Volt	0,23 A	23	Set kecepatan 6
7	0,8	62 Volt	0,25 A	24	Set kecepatan 7
8	0,9	70 Volt	0,30 A	24	Set kecepatan 8
9	1	75 Volt	0,33 A	24	Set kecepatan 9
Reset	-	-	-	-	Stop
Enter	-	-	-	-	Jalankan/Mulai

Kecepatan putar motor induksi satu fasa terhadap indeks modulasi yang bervariasi diperoleh karakteristik, yaitu: untuk indeks modulasi 0,2 motor berputar pelan maka untuk indeks modulasi selanjutnya yaitu pada indeks modulasi (0,3) motor berputar mendekati kencang, dan pada indeks modulasi (0,4), (0,5), (0,6), (0,7) motor mulai berputar kencang. Akibat tegangan terkecil pada motor kapasitor terpenuhi maka untuk indeks modulasi (0,8), (0,9) dan (1) motor berputar mendekati kecepatan putar yang sama, seperti ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Karakteristik kecepatan putar motor induksi satu fasa

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat diambil kesimpulan bahwa rancangan pembangkit PWM pulsa tunggal melalui teknik perhitungan yang diimplementasikan dengan mikrokontroler AT89S51, mampu menghasilkan variasi kecepatan putar motor induksi satu fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Putro Eko Agvianto, "**Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55 (Teori dan Aplikasi)**", Gava Media, Yogyakarta, 2002.
- [2] Muh.Ibnu Malik, "**Belajar Mikrokontroler AT89S51/52**", Gava Media Yogyakarta, 2003.
- [3] Rashid, M.H., "**Power Electronic Circuit Devices and Applications**", Second Edition, Prentice- Holl International, Inc, London, 1995.
- [4] Gendroyono, P., "**Sistem Penggerak Motor Induksi dengan Berubah Menggunakan Inverter PWM Berbasis Mikrokontroler**", Tesis S2, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 1999.
- [5] Cathey, J..J., "**Electric Machines Analysis and Design Applying MATLAB**", Mc Graw-Hill Companies, Inc., Singapore, 2001.
- [6] Sutikno. T., "**Pembangkit Sinyal PWM Sinusoidal Dua Fasa Berbasis FPGA**", Tesis S2, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 2004.
- [7] Dewan, S. B., Slemon, G. R. and Straughen, A., "**Power Semiconductor Circuits**", John Wiley and Sonss, Inc., Taronto, 1994.
- [8] Silvi, B.E.F., Soebijantoro dan Surawan, Tri, "**Sistem Kontrol Digital PID Untuk Kecepatan Motor DC dengan Micro 8032**", Elektro Indonesia, Edisi 6, 1997.
- [9], "**Liquid Crystal Display Module M1632**", Seiko Instruments Inc, 1987.