

SISTEM KENDALI SOFT-STOPPING PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASE BERBASIS MIKROKONTROLER

*Soft-Stopping Control System in Three Phases Induction Motor
Based on Microcontroller*

Suryono¹, Bambang Sutopo², dan Adhi Susanto²

Program Studi Teknik Elektro
Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

ABSTRACT

Accurate timing is strongly needed in a moving control system in modern industries, especially in industries using three phases induction motor as a part of their production equipment. This study was intended to evaluate the performance of soft-stopping control system of three phases induction motor based on microcontroller by adding thyristor hold off angle for the purpose of timing.

This control system detects time of null intersection of source tension and detect losing of current from ggl versus motor when the control do soft opening activity. Soft stopping process of the control begins from soft start to steady state condition and to soft stopping when loaded current reach minimum value. Within the process of soft-stopping, the addition of thyristor hold off angle gradually, waiting for the calculation of the working circle from its microcontroller, for the purpose of programmed timing. This study was carried out in three-phase induction motor of 220/380 Volt, power of 0.5 Hp, and load of 72.4 Watt.

Result of this study indicated that minimum current when stopping was on thyristor hold off angle wide position (γ) of 44.9° , mistake of timing during an hour was 0.34% (12.2 seconds late) in condition of unloaded motor and 0.35% (12.5 seconds late) in loaded motor condition.

Keywords : *Soft-stopping, Induction Motor, Timing, Mikrokontroler*

¹ Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang

² Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

PENGANTAR

Motor induksi merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan dalam industri dibandingkan dengan jenis motor yang lain, karena jenis motor ini mempunyai beberapa keuntungan, antara lain konstruksinya yang sederhana dan kokoh, harga relatif murah dan tidak memerlukan pemeliharaan yang rumit. Karena banyaknya pemakaian motor induksi, perlu dilakukan pemahaman unjuk kerja suatu motor induksi, sehingga setiap pemakaian motor induksi menjadi lebih berdaya guna yang sangat besar.

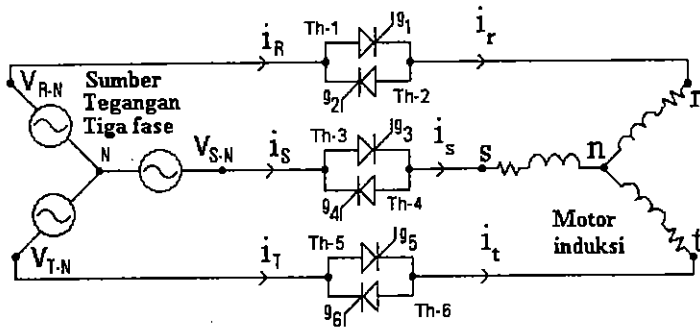
Suatu proses penghentian (*stopping*), dewasa ini masih jarang dilakukan pemahaman. Sangat dimungkinkan bahwa suatu proses *stopping* (penghentian) dengan mengatur waktu yang tepat dapat dimanfaatkan sebagai kendali otomatis dalam suatu kegiatan produksi pada suatu industri. Penghentian yang baik adalah tidak menimbulkan guncangan tegangan jaringan dikarenakan lepasnya beban, untuk itu perlu dilakukan suatu langkah *soft-stopping* dengan pelepasan jaringan dilakukan saat arus beban pada kondisi paling rendah. Untuk keperluan *soft-stopping* dengan sistem ini diperlukan suatu sistem kendali motor induksi tiga fase yang berbasis mikrokontroler.

Pengendalian motor induksi tiga fase dengan *thyristor* yang berbasis mikrokontroler banyak digunakan pada industri, hal ini mengakibatkan banyak perhatian karena dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil produksi. Agar tidak terjadi guncangan tegangan pada saat motor dimatikan, perlu diupayakan arus beban diturunkan pada saat motor dimatikan. Pengurangan arus beban, dilakukan dengan menurunkan tegangan terminal dengan penambahan sudut takhantar *thyristornya*. Pengaturan sudut tak hantar *thyristor* dalam sistem pengendalian akan menjadikan suatu hal yang sangat penting bagi industri-industri yang sistem pengendalian motor penggeraknya menggunakan *thyristor* terkendali mikrokontroler. Model ini pada dasarnya merupakan pengendalian tegangan dengan *thyristor* terpicu atau disebut juga pengendali fase (*phase kontroler*). Mikrokontroler di samping sebagai pembangkit pulsa pemicu, juga berfungsi sebagai pengendali besarnya sudut takhantar *thyristor*.

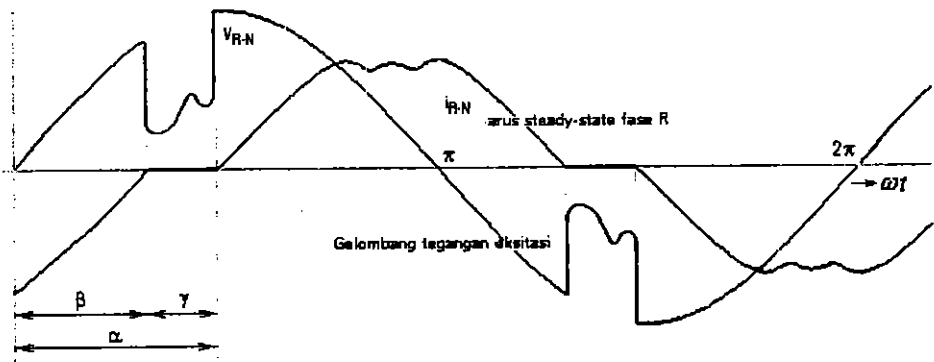
Lipo (1971) dalam penelitiannya telah melakukan analisis motor induksi tiga fase yang dikendalikan oleh *thyristor* terpicu. Penelitian itu membandingkan hasil analisis teoritik dengan eksperimen. Dari penelitian itu disimpulkan bahwa bentuk

gelombang hasil eksperimen sama dengan bentuk gelombang hasil analisis. Sistem konfigurasi motor induksi tiga fase yang dianalisis oleh Lipo ditunjukkan pada gambar 1a, sedangkan bentuk gelombang arus dan tegangan diperlihatkan pada gambar 1b. Penelitian itu memberi gambaran bahwa bentuk tegangan dan arus motor yang dikendalikan dengan *thyristor* memiliki bentuk-bentuk yang spesifik. Suatu langkah menurunkan tegangan dengan menggunakan *autotransformer* pernah dilakukan oleh Palit (1989). Penurunan tegangan ini oleh Palit dimanfaatkan untuk keperluan hemat energi. Analisis *transien* terhadap motor induksi tiga fase terkendali oleh *thyristor* pernah dilakukan oleh Chaatopadhyay dan Rao. Pada penelitian itu Chaatopadhyay dan Rao mencoba mengadopsi model sumbu d-q untuk mengembangkan persamaan umum unjuk kerja motor induksi tiga fase yang terkendali oleh *thyristor*. Dari penelitian itu diperoleh persamaan umum model motor induksi dengan menggunakan variabel logika yang mempresentasikan kerja *thyristor*. Walaupun telah tersedia model untuk keperluan analisis *transien*, peneliti itu hanya memberikan penyelesaian keadaan *steady state* saja, sehingga tidak bisa memberikan gambaran unjuk kerja motor pada saat *soft-stopping*.

Beberapa uraian hasil penelitian di atas memberi gambaran kepada penelitian ini bahwa penurunan tegangan pada masukan motor sama halnya dengan penurunan arus masukan motor. Proses penurunan arus masukan motor ini dapat dimanfaatkan dalam sistem penghentian (*soft-stopping*) motor yang sedang berjalan. Penelitian ini akan mendeskripsikan struktur perangkat keras dan struktur perangkat lunak sistem kendali motor induksi tiga fase untuk keperluan *soft-stopping* dengan menggunakan mikrokontroler 68HC11, sebagai realisasi untuk pengaturan sudut tak hantar *thyristor* (γ) dan waktu yang direncanakan. Perangkat keras yang digunakan mencakup rangkaian mikrokontroler 68HC11 dalam mode *expanded*, rangkaian detektor persilangan nol, rangkaian pembangkit pulsa pemicu *thyristor*, rangkaian detektor persilangan nol untuk fase R, S, dan T, rangkaian tombol pengatur, rangkaian *power supply*, dan rangkaian pengaman. Struktur perangkat lunak yang dideskripsikan meliputi teknik urutan pulsa pemicuan, dan teknik pengaturan lebar sudut tak hantar *thyristor* (γ).



(a)

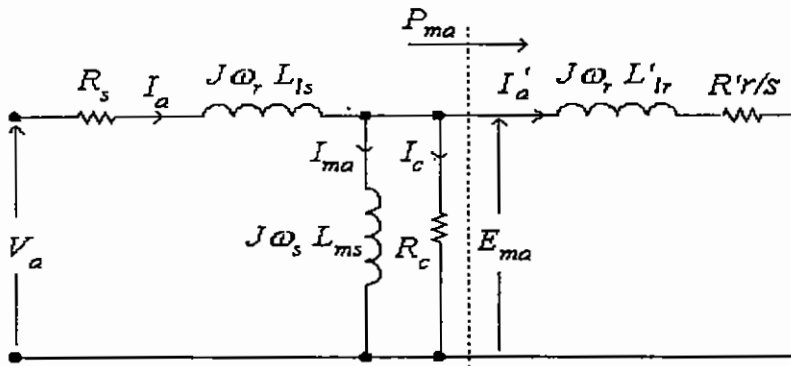


(b)

Gambar 1. Pengendalian motor induksi dengan *thyristor*

- (a) Konfigurasi pengendalian motor induksi dengan *thyristor*
- (b) Bentuk gelombang eksitasi fase-R terhadap nol

Rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa jenis rotor sangkar tupai (*squirrel-cage*), menurut Dewan dkk., (1984), terlukis pada gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekivalen motor induksi rotor sangkar tupai satu fase

Apabila frekuensi sudut listrik rotor adalah ω_r , frekuensi sudut listrik stator ω_s , kecepatan sudut mekanis rotor ω_m dan jumlah kutub adalah p , maka hubungan besaran-besaran frekuensi atau kecepatan yang terdapat pada model itu dinyatakan sebagai berikut:

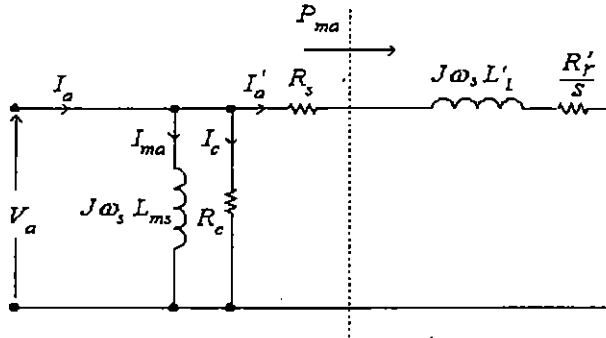
$$\omega_s = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

$$\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2)$$

Besarnya slip adalah

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad \text{atau} \quad s = \frac{\omega_s - (p/2)\omega_m}{\omega_s} \quad (3)$$

Rangkaian ekivalen motor induksi sangkar tupai untuk satu fase seperti terlihat pada gambar 2 dapat disederhanakan dengan pendekatan rangkaian ekivalen aproksimasi seperti terlukis pada gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian ekivalen aproksimasi motor induksi

Rangkaian ekivalen aproksimasi motor induksi rotor sangkar tupai, dari gambar itu dapat diperhitungkan besarnya daya setiap fase yang dibangkitkan oleh rotor motor adalah

$$P_{ma} = \frac{R'_r}{s} (I'_a)^2 \quad \text{Watt} \quad (4)$$

dengan

$$I'_a = \frac{V_a}{R_s + R'_r/s + j\omega_s L_s} \quad \text{Ampere} \quad (5)$$

Besarnya torsi motor adalah

$$T = 3 \left(\frac{p}{2} \right) \left(\frac{P_{ma}}{\omega_s} \right) \quad \text{Nm} \quad (6)$$

Dengan memasukkan persamaan (4) ke dalam persamaan (6) diperoleh

$$T = \frac{3}{\omega_s} \frac{p}{2} \frac{R'_r}{s} (I'_a)^2 \quad \text{Nm} \quad (7)$$

Dengan memasukkan persamaan (5) kedalam persamaan (7) diperoleh

$$T = \frac{3}{\omega_s} \frac{p}{2} \frac{R'_r}{s} \frac{V_a^2}{(R_s + R'_r/s)^2 + (\omega_s L_s)^2} \quad \text{Nm} \quad (8)$$

Dari persamaan (5) dapat diketahui bahwa untuk kecepatan motor yang tetap, besarnya arus rotor motor dipengaruhi oleh besarnya tegangan terminal motor. Penurunan tegangan motor akan membuat arus rotor motor turun. Jika besarnya rugi-rugi inti besi dan rugi-rugi fluk tetap, penurunan tegangan akan mengakibatkan turunnya arus masukan motor.

Dari persamaan (8) dapat dilihat bahwa penurunan tegangan motor juga akan mengakibatkan penurunan torsi maksimum motor. Apabila torsi maksimum motor sudah mencapai sama dengan torsi beban, atau torsi maksimum lebih kecil dari torsi beban ($T_{\text{mak}} < T_{\text{beban}}$), penurunan tegangan masukan akan mengakibatkan naiknya slip motor secara drastis dan dapat mengakibatkan motor gagal berputar.

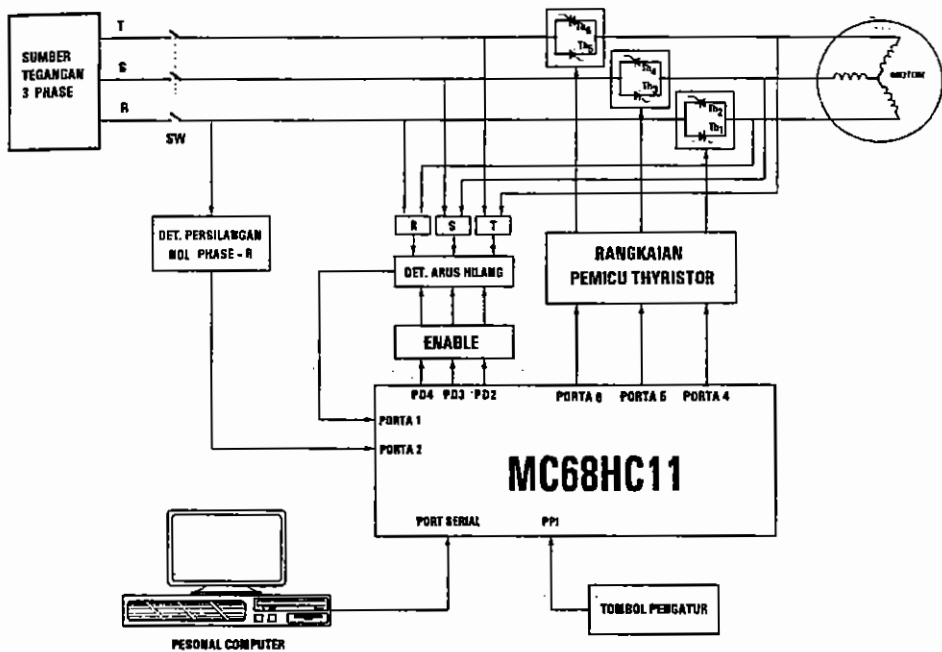
Dari persamaan (5), penurunan tegangan motor yang diikuti oleh naiknya slip, tidak membuat arus motor turun, melainkan sebaliknya akan membuat arus menjadi naik. Dengan demikian, untuk beban motor yang ringan upaya penurunan arus motor dapat ditempuh dengan cara menurunkan tegangannya.

Pencatuan tegangan pada motor induksi tiga fase yang terkendali *thyristor* dapat dilakukan dengan berbagai macam konfigurasi. Mc Murray (1974), memberikan tiga macam konfigurasi untuk motor yang terkendali *thyristor*. Konfigurasi itu adalah motor dan *thyristor* keduanya dihubungkan bintang (*star*), motor dan *thyristor* keduanya dalam konfigurasi segitiga (*delta*), dan motor dalam konfigurasi bintang (*star*) dan *thyristor* dalam konfigurasi segitiga (*delta*). Penelitian ini akan dilakukan dengan konfigurasi yang pertama, yaitu motor dan *thyristor* keduanya disambung bintang. Seperti terlihat pada gambar 1 pengendalian motor induksi dengan *thyristor* terpicu, *thyristor* dipasang secara seri dengan belitan stator. Karena sumber tegangan berasal dari tegangan bolak-balik tiga fasa, maka untuk dapat dilakukan pengendalian diperlukan tiga pasang *thyristor* anti-paralel (6 buah *thyristor*) sebagai piranti pengendalinya. Dengan mengatur sudut pemucuan (*firing angle*) *thyristor*, dapat diperoleh tegangan catu motor listrik yang berubah-ubah. Sistem pengendalian motor itu dapat dilaksanakan dalam untai elektronis, namun demikian semakin rumit algoritma pengendalian, realisasi untai elektronisnya menjadi sangat susah. Untuk menghindari kerumitan untai elektronis, diperlukan piranti mikrokontroler jenis *on-chip peripherals* yang dapat diperoleh dengan cara mudah. Mikrokontroler seperti ini memiliki Prosesor, RAM, ROM, Input Capture, Output Capture, pengubah analog ke digital dan waktu yang dikemas dalam satu chip, sehingga dapat digunakan dalam

pengendalian motor listrik. Kelebihan pengendali sistem mikrokontroler ini, antara lain pengubahan interuksi pengaturan (algoritma pengendalian) tanpa mengubah perangkat kerasnya.

Untuk merealisasikan *soft-stopping* pada motor induksi tiga fase ini, langkah yang perlu diambil adalah mengkondisikan motor dalam keadaan *steady state* dan seterusnya melakukan penambahan sudut tak hantar *thyristor* (γ) dengan waktu tertentu, setelah tercapai arus minimum motor dihentikan. Agar motor dalam kondisi *steady state* diperlukan suatu sistem kendali *soft-start* dengan pemberian sudut pemicuan *thyristor* yang semakin besar akan berakibat semakin menurunnya tegangan terminal motor. Sebaliknya, dengan memberikan sudut pemicuan yang semakin kecil pada *thyristor* akan semakin besar tegangan terminal motor. Dalam langkah *soft-start* agar didapat arus pengasutan yang kecil harus dikondisikan tegangan terminal motor yang diawali dari tegangan yang rendah menuju tegangan yang besar, yaitu dengan memberikan sudut pemicuan *thyristor* dari yang besar kearah sudut pemicuan yang kecil. Oleh karena mekanisme pengendaliannya cukup rumit, maka diperlukan dukungan mikrokontroler agar langkah pengendaliannya menjadi mudah. Keterlibatan mikrokontroler dalam *soft-stopping*, disamping untuk membangkitkan pulsa pemicuan juga untuk menggerser pulsa pemicuan baik pada saat *soft-start* maupun *soft-stopping*. Blok diagram untuk keperluan *soft-stopping* ini, diperlihatkan pada gambar 4. Detektor persilangan nol diambil dari fase R sebagai masukan *input capture* satu (IC₁) melalui PORTA2. Detektor arus menghilang untuk fase R, S, dan T sebelum masuk *input capture* dua (IC₂) terlebih dahulu masing-masing *dienable* untuk memudahkan dalam pendeteksian urutan fase tegangan input. Urutan fase ini sangat perlu diketahui agar penyusunan urutan-urutan pulsa pemicuan pada masing-masing *thyristor* menjadi benar.

Pulsa pemicuan diambil dari PA4, PA5 dan PA6, Melalui PPI (*Programmable Peripheral Interface*) yang dihubungkan dengan mikrokontroler dilakukan pengaturan lewat tombol pengatur. Pengaturan ini meliputi tombol start/mulai bekerja, tombol *stopping* (berhenti) dan tombol OFF yaitu tombol yang digunakan untuk mematikan motor setelah kondisi *steady state*



Gambar 4. Blok diagram motor induksi tiga fase terkendali mikrokontroler, untuk keperluan *soft-stopping*

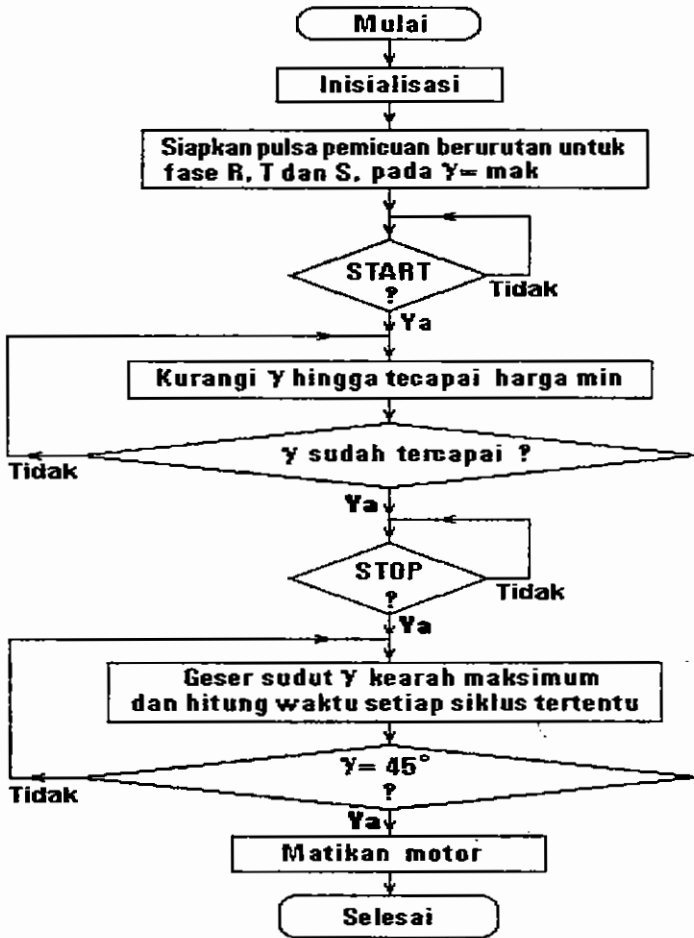
CARA PENELITIAN

Materi penulisan ini dikhususkan pada teknik *soft-stopping*, pengaturan waktu selama *stopping* dan pengamatan bentuk gelombang jaringan selama proses *soft-stopping* pada saat berbeban tanpa kendali mikrokontroler dan saat berbeban dengan kendali mikrokontroler.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini dimulai dengan perencanaan rangkaian, pembuatan PCB, dan layout tiap-tiap bagian peralatan perangkat keras.

Langkah berikutnya adalah menyusun perangkat lunak (*software*) dari sistem kendali yang terintegrasi berdasar pada diagram alir yang ditunjukkan pada gambar 5. Perangkat lunak ini dibuat dengan editor teks dalam format assembly 68HC11 pada berkas dengan ekstensi .ASM. Selanjutnya, listing program .ASM itu diubah menjadi kode-kode program dalam format *S-record* dengan ekstensi .S19, berkas dalam format *S-record* itu di *uploading* ke dalam

RAM mikrokontroler yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai pengendalian sistem pengendali tegangan pada motor induksi tiga fase, khususnya untuk pengendali *soft-stopping* dengan waktu selama penambahan sudut takhantar *thyristor*.

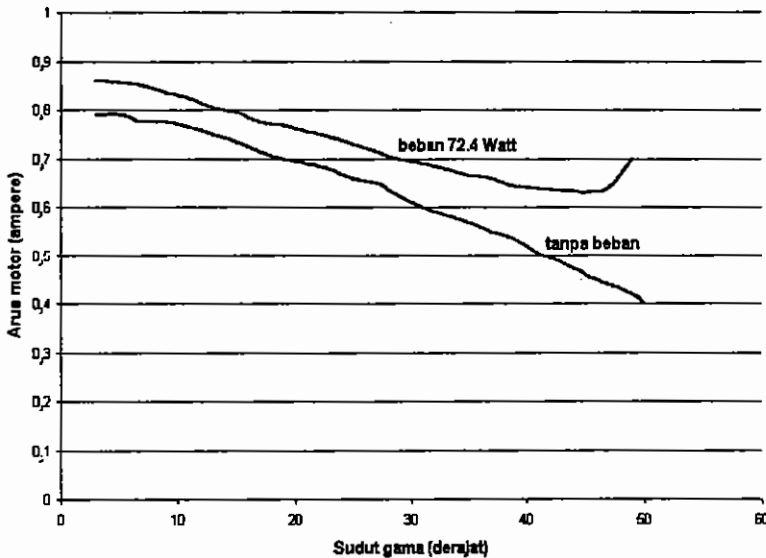


Gambar 5. Diagram alir perangkat lunak sistem kendali motor tiga fase untuk keperluan *soft-stopping*

Uji coba pada penelitian ini meliputi beberapa tahap uji coba, diantaranya uji coba yang pertama adalah mencari sudut takhantar thyristor minimum (γ_{min}), dan penetapan sudut gama minimum ini perlu dilakukan agar dapat dipastikan bahwa pada saat *thyristor* dipicu pada sudut tak hantar minimum kondisinya sama terhadap suatu motor yang dicatu secara langsung (*direct on line*). Pada penelitian ini ditunjukkan pengujian yang dilakukan antara *direct on line* (DOL) adalah sama terhadap hasil yang diperoleh dari pengendalian dengan mikrokontroler sehingga dianggap bahwa sitem pengendali motor dengan *direct on line* dapat diwakili oleh sistem kendali motor dengan thyristor terpicu mikro-kontroler.

HASIL DAN PEMBAHASAN

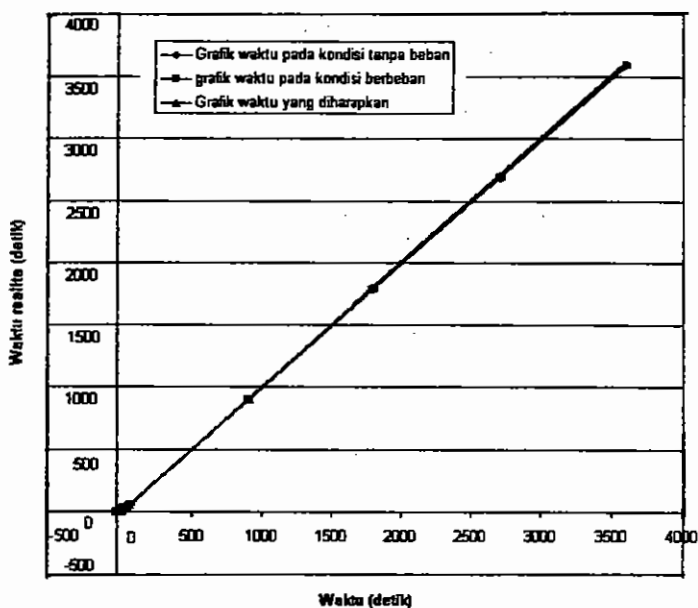
Setelah dilakukan uji coba, uji pengaturan sudut dimulai dari sudut takhantar minimum (3°) sampai dengan sudut takhantar maksimum (50°). Hal ini perlu dilakukan karena untuk mengetahui pada daerah sudut takhantar berapa, arus motor mencapai nilai minimum dan seterusnya motor dimatikan. Hasil pengujian yang dilakukan dan seterusnya digrafikkan (lihat gambar 6), memberi gambaran bahwa pada daerah sudut gama sebesar kurang lebih $44,9^\circ$, arus motor telah mencapai nilai minimum. Dengan demikian, daerah sudut ini akan dipakai acuan untuk mematikan motor setelah melakukan kerja dalam waktu yang dikehendaki. Perlu diketahui dan diberi catatan bahwa dalam pengujian ini motor mulai tidak mampu mengangkat beban (tidak mau berputar) pada pemicuan sudut takhantar *thyristor* mencapai 50° , yang berarti bahwa arus motor dalam kondisi berbeban mencapai nilai maksimum pada pengaturan sudut takhantar sebesar 50° atau lebih. Pada arus beban mencapai nilai yang sangat besar ini, motor harus sudah dalam posisi mati (OFF). Besar sudut tak hantar minimum diambil pada nilai 5° , karena pada nilai ini sistem kendali dianggap dapat mewakili sistem *direct on line*. Setelah diketahui lebar pengaturan sudut tak hantar *thyristor*, yaitu mulai dari 5° sampai $44,9^\circ$ atau sampai 45° , maka pengambilan data seterusnya adalah membuktikan ketepatan waktu selama penambahan sudut takhantar sampai motor dimatikan.



Gambar 6. Grafik pengaruh penambahan sudut gama terhadap perubahan arus motor pada kondisi tanpa beban dan pada kondisi berbeban.

Karena keterbatasan waktu dan alat ukur yang dipakai, nilai waktu terendah yang akan di uji pada penelitian ini adalah 1 detik, dan nilai terbesarnya adalah 1 jam. Secara teoritis (pada penambahan sudut tak hantar thyristor mulai 5° sampai $44,9^\circ$) nilai waktu terendah yang dapat dilakukan adalah sebesar satu siklus mesin dalam melakukan kegiatan operasinya, yaitu $1/8,96 \times 1 \text{ detik} = 0,112 \text{ detik}$. Pada pengujian ketepatan waktu itu motor dikondisikan pada keadaan tanpa beban dan motor dikondisikan pada keadaan berbeban dengan menggunakan sitem kendali pada posisi sudut takhantar awal (gama minimum) adalah 5° , dan posisi sudut takhantar maksimum adalah sebesar $44,9^\circ$.

Data hasil pengamatan pada penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan waktu terhadap perubahan kenaikan sudut takhantar thyristor mulai dari 5° sampai $44,9^\circ$. Waktu diamati dari 1 detik hingga 1 jam, dengan masukan siklus tiap-tiap detik = #9 (secara teoritis = #8,96).



Gambar 7. Perbandingan waktu realita selama *soft-stopping* dengan 1 tingkat loop pada motor tanpa beban dan berbeban terhadap waktu yang diharapkan. (γ dinaikkan dari 5° sampai $44,9^\circ$, $t = 1$ detik sampai 1jam)

Gambar 7 menunjukkan bahwa waktu yang didapat dengan sistem 1 tingkat loop (loop 1 diisi nilai waktu dan loop 2 diisi nilai #1) yang dimulai dari 1 detik hingga 1 jam, baik motor dalam kondisi tanpa beban maupun pada kondisi berbeban, ketepatan waktu terhadap waktu yang diharapkan adalah sama, yang ditunjukkan pada grafik antara waktu yang diinginkan dengan waktu pada kondisi motor tanpa beban dan berbeban adalah berhimpit, walaupun ada indikasi bahwa garis itu semakin menuju kearah waktu 1 jam (3600 detik) mulai menunjukkan semakin menebal (memisahkan diri satu terhadap yang lain). besar, yaitu 0% pada posisi 60 detik hingga mencapai 0,35% pada posisi 3600 detik (1 jam), atau beselisih 12,5 detik selama waktu tempuh 3600 detik atau selama 1 jam.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali *soft-stopping* pada motor induksi 3 fase yang berbasis mikrokontroler pada penelitian ini secara spesifik, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Dalam sistem *soft-stopping* motor induksi 3 fase dengan beban 72,4 Watt harus dimatikan pada sudut pemadaman sebesar $44,9^\circ$, karena pada daerah sudut takhantar itu arus motor mencapai nilai paling rendah (minimum).
2. Semakin besar waktu yang dipakai untuk langkah *soft-stopping*, semakin besar pula nilai kesalahan waktu.
3. Kerugian waktu proses *soft-stopping* selama 1 jam pada motor tanpa beban sebesar 12,2 detik (atau % kesalahan = 0,34%), untuk kondisi berbeban adalah sebesar 12,5 detik (atau % kesalahan = 0,35%).
4. Ketepatan waktu yang diharapkan relatif sangat baik, karena untuk waktu selama 1 jam persentase kesalahan kurang dari 1%.

DAFTAR PUSTAKA

- Dewan, S.B., Slemon, G.R., dan Straugen, A., 1984, "*Power Semiconductor Drives*", John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Lipo T.A., 1971, "*The Analysis of Induction Motors with Voltage Control by Symmetrically Triggered Thyristors*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, 515-525.
- McMurray, W.M., 1974, "*A Comparative Study of Symmetrical Three Phase Circuits for Phase-Controlled AC Motor Drives*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-10, No. 3, 403-411.
- Palit, B.B., 1989, "*Energy Saving Operation of Induction Motor by Voltage Reduction at No- and Low Partial-load*", IEEE Electronic Library, 147-151.