

Desain Peralatan Pendeteksi Gangguan Hubung Singkat Belitan Stator Motor Induksi Menggunakan Arus *Online* Berbasis Mikrokontroler

Ade Kurniawan Putra, Dimas Anton Asfani, Dedet Candra Riawan
 Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: anton@ee.its.ac.id, dedet@ee.its.ac.id

Abstrak— Motor induksi adalah salah satu peralatan utama dalam industri. Kerusakan pada bagian motor akan mempengaruhi proses dan hasil produksi. Oleh karena itu, deteksi dini kerusakan motor induksi sangat dibutuhkan untuk menghindari kerusakan yang lebih parah. Pada tugas akhir ini akan didesain sistem *monitoring* untuk menganalisa dan mendeteksi kerusakan pada motor berdasarkan pembacaan arus fasa dan tegangan fasa belitan motor induksi pada saat keadaan normal maupun gangguan melalui komputer. Pada layar komputer akan ditampilkan hasil pembacaan tegangan dan arus. Dari parameter tersebut dapat dilakukan diagnosa keadaan dari motor induksi apakah dalam keadaan normal atau tidak. Bila terjadi gangguan pada motor induksi, sistem ini dapat mendeteksi jenis gangguan yang terjadi pada motor induksi tersebut.

Kata Kunci— belitan stator, hubung singkat, motor induksi.

I. PENDAHULUAN

MOTOR induksi adalah salah satu bagian yang paling penting untuk berbagai proses industri, yang banyak digunakan adalah sebagai elektromekanis perangkat konversi energi. Namun, ada beberapa masalah yang biasanya terdapat pada motor induksi yang mengakibatkan kerusakan pada bagian-bagian motor. Kerusakan isolasi belitan dan bearing adalah Jenis kerusakan yang paling umum[1]. Penelitian tentang gangguan pada motor induksi yang telah dilakukan menunjukkan mekanisme kegagalan pada mesin induksi yang paling umum dikategorikan berdasarkan komponen utama mesin sepertigangguan pada stator (38%), gangguan pada rotor(10%), gangguan pada *bearing*(40%) dan gangguan lain (12%) [2,3].

Deteksi dini hubung singkat pada belitan saat motor beroperasi akan mencegah kerusakan berikutnya pada belitan yang saling berdekatan, inti stator, mengurangi biaya reparasi dan memperpanjang usia motor. Oleh karena itu deteksi kerusakan motor induksi mendapat perhatian lebih beberapa tahun belakangan[4]. Hubung singkat pada belitan menyebabkan penurunan jumlah belitan ekuivalen pada motor. Hal ini menyebabkan penurunan kecepatan dan peningkatan panas pada inti karena penambahan rugi-rugi. Peningkatan

panas membuat suhu belitan stator meningkat sehingga berakibat pada penurunan perkiraan umur isolasi belitan. Kegagalan isolasi pada belitan stator akan mengakibatkan tambahan hubung singkat pada belitan, tambahan kenaikan temperature , dan dan semakin memperpendek umur isolasi belitan. Selanjutnya, akan menyebabkan kerusakan pada belitan yang berdekatan bahkan menyebabkan motor gagal beroperasi[5].

Salah satu cara mengurangi resiko gangguan pada motor induksi adalah mendeteksi awal gangguan yang muncul dengan cara *me-monitoring* dan mendiagnosa motor induksi tersebut [6]. Sistem *monitoring* motor induksi telah banyak dilakukan dalam berbagai kajian dan penelitian [7]. Namun *monitoring* yang sering digunakan adalah *monitoring* konvensional dengan teknik mekanik yang akan menyebabkan masalah selama operasi, mengurangi umur, dan efisiensi motor induksi [6]. Sedangkan untuk sistem *monitoring* digital menggunakan *microcontroller* hanya menggunakan LCD sebagai tampilan keluaran sehingga kurang efektif [8]. Apabila menggunakan komputer akan dapat menampilkan hasil yang lebih baik. Oleh karena itu sistem *monitoring* yang didukung oleh *mikrokontroler*, dan komputer lebih baik digunakan.

Pada tugas akhir ini akan desain sistem *monitoring* untuk menganalisa dan menampilkan hasil dari pembacaan arus fasa, tegangan fasa dan suhu melalui komputer. Pada layar computer akan ditampilkan hasil pembacaan tegangan, arus serta mendiagnosis gangguan yang terjadi berupa gangguan *inter turn short circuit* pada salah satu kumparan stator motor induksi.

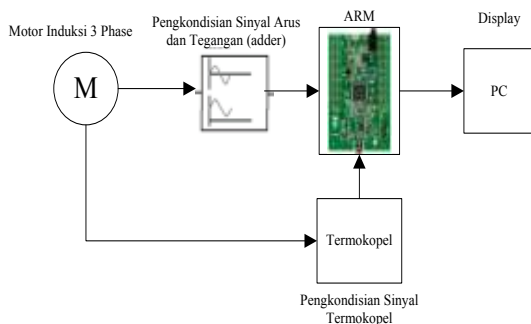
II. HUBUNG SINGKAT TEMPORER

Peristiwa hubung singkat ini dimulai secara bertahap dan berkelanjutan. Kegagalan pada motor dimulai dengan penurunan kekuatan isolasi dari belitan stator motor. Penurunan kekuatan isolasi dari belitan stator motor tersebut mengakibatkan terjadi hubung singkat temporer dengan durasi yang sangat pendek dan arus hubung singkat yang kecil karena impedansi isolasi masih tinggi. Hubung singkat temporer tersebut mempunyai pola yang tidak teratur atau non-periodik.

Hal itu dikarenakan kekuatan isolasi dari laminasi belitan motor masih cukup kuat, namun sedang mengalami deterosiasi. Sehingga terkadang terjadi hubung singkat, namun hanya sementara setelah itu motor kembali beroperasi normal. Kejadian tersebut berlangsung dengan frekuensi yang tidak teratur. Dan kemudian, pada kejadian selanjutnya, peristiwa hubung singkat menjadi semakin periodik dengan durasi yang juga sangat pendek dan arus hubung singkat yang kecil. Hubung singkat temporer dalam kasus ini terjadi semakin periodik dengan intensitas kejadian yang semakin sering. Hal ini terjadi beberapa waktunon-periodik. Pemanasan, operasi terus menerus, dan lingkungan yang lembab menyebabkan deterosiasi pada isolasi motor semakin tinggi. Sehingga menyebabkan hubung singkat temporer yang semakin periodik dengan intensitas yang tinggi. Setelah itu, deterosiasi pada belitan motor yang semakin parah, menyebabkan hubung singkat menjadi bersifat permanen. Hal ini berarti, peristiwa hubung singkat tidak akan hilang dengan sendirinya. Bila tidak diperbaiki, motor akan mengalami hubung singkat secara berkelanjutan.[9]

III. SISTEM MONITORING MOTOR INDUKSI

Pada bab ini akan dibahas mengenai perancangan *monitoring* motor induksi tiga fasa dalam meliputi beberapa hal yaitu perencanaan perangkat keras, perencanaan akuisisi data, dan perencanaan antarmuka. Pada Gambar 1 dapat dilihat diagram blok dari sistem *monitoring* motor induksi.



Gambar.1. Diagram Blok Sistem *Monitoring*

A. Perangkat Keras

Tegangan atau arus yang dihasilkan oleh sensor biasanya kecil, sedangkan komponen ADC yang digunakan dalam praktik bekerja pada skala penuh 0-5 volt, -5 - +5 volt, 0-10 volt dan sebagainya tergantung mode input dan spesifikasi komponen yang dipakai, oleh karena itu diperlukan signal conditioner, yang memperlakukan sinyal keluaran dari sensor cukup besar untuk diinputkan pada ADC. Rangkaian-rangkaian dengan menggunakan operasional amplifier merupakan bagian utama dari signal conditioner.

B. Instrumentasi

Untuk mendeteksi tegangan pada masing – masing fasa motor induksi tiga fasa maka digunakan transformator tegangan *step down*. Transformator yang digunakan dengan

tegangan input 220V dan tegangan keluaran 3V. Tegangan keluaran dari transformator ini adalah tegangan AC yang berupa gelombang sinusoidal. Range dari ADC internal ARM hanya dapat membaca inputan 0 -3V, sedangkan tegangan dibawah 0V atau berharga negatif tidak akan terbaca. Oleh karena itu dibutuhkan rangkaian *non inverting adder* agar tegangan bernilai negatif dapat terbaca oleh mikrokontroller.

Pada perancangan pengkondisi sinyal termokopel dilakukan dengan menambahkan sebuah penguat yang inputnya berasal dari thermocouple. Output dari thermocouple mempunyai range nol sampai 1 V, maka penguat digunakan agar pembacaan tegangan terbangkit di thermocouple dapat dibaca berdasarkan range multimeter.

Catu daya di sini berfungsi sebagai pemberi daya pada rangkaian elektronis , seperti : rangkaian non inverting arus, non inverting tegangan dan pengkondisian sinyal termokopel. Pada rangkaian ini menggunakan transformator step down 2A yang menurunkan tegangan 220V AC menjadi 9 Vac. Tegangan yang dibutuhkan untuk mensuplai rangkaian-rangkaian monitoring motor induksi yaitu 5 Vdc, -12 Vdc, +12Vdc dan 0 V. Sementara rangkaian Clipper yang berfungsi membatasi tegangan output agar mempunyai jangkauan dari -3V sampai 3V. Gambar rangkaianannya dapat dilihat pada gambar 3.10

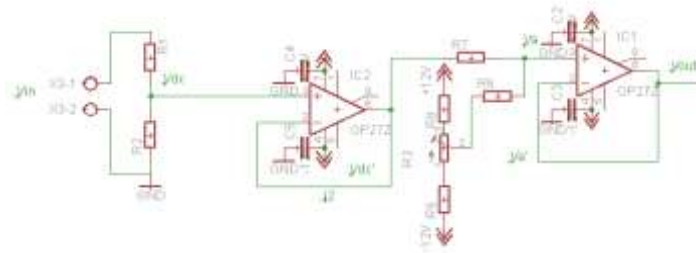
Algoritma pada mikrokontroler ARM dibuat dengan menggunakan bahasa C dengan *compiler* Coocox. Algoritma mikrokontroler ARM dapat dilihat pada gambar 3.13. Beberapa fitur ARM yang digunakan yaitu *Analog Digital Converter* dan *Timer*. ADC yang digunakan 8 bit sehingga resolusinya :

$$resolusi = \frac{V_{ref}}{2^8 - 1} = \frac{3000mV}{255} = 11.764 mV/bit$$

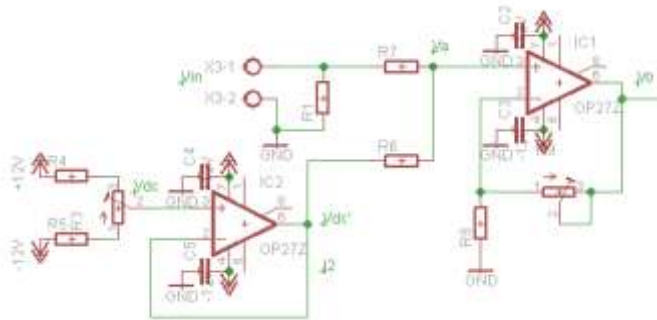
Mikrokontroler mengambil data ADC, kemudian mengaktifkan *timer interrupt* setiap 100 us, jika sudah lanjut ke proses selanjutnya yaitu sampling ADC VR, VS, VT, IR, IIS, IT dan kemudian mengirim data serial USART



Gambar .2. Pengujian Sistem di Laboratorium.



Gambar 3. Non Inverting Adder Tegangan



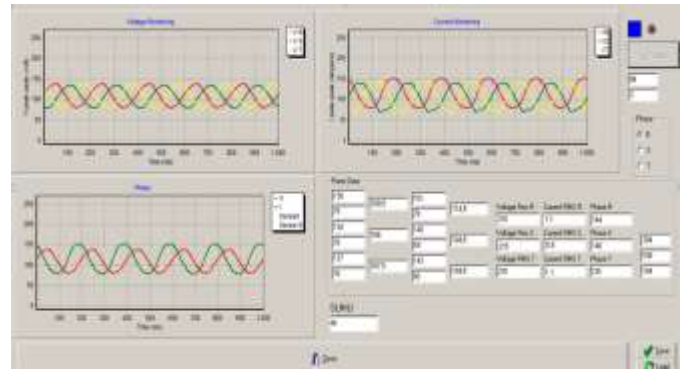
Gambar 4. Non Inverting Adder Arus

C. Software

Sebuah Sistem akuisisi data, secara actual berupa *Interface* antara lingkungan analog dengan lingkungan digital. Lingkungan analog berupa sensor dan pengkondisian siny baik itu dari sensor tegangan, sensor arus atau sensor suhu sementara untuk lingkungan digitalnya merupakan ADC yang dilakukan mikrokontroler itu sendiri. Akuisisi data akan mengkonversi data analog dari sensor ke bentuk digital dan diproses di komputer. Untuk memudahkan proses *monitoring* maka dibutuhkan *software* pada komputer untuk mengelola data yang diperoleh. Dalam Tugas Akhir ini *software* yang digunakan untuk *monitoring* kerusakan motor induksi sekaligus melakukan pengolahan data menggunakan *Borland Delphi 7*

IV. PENGUJIAN DAN HASIL

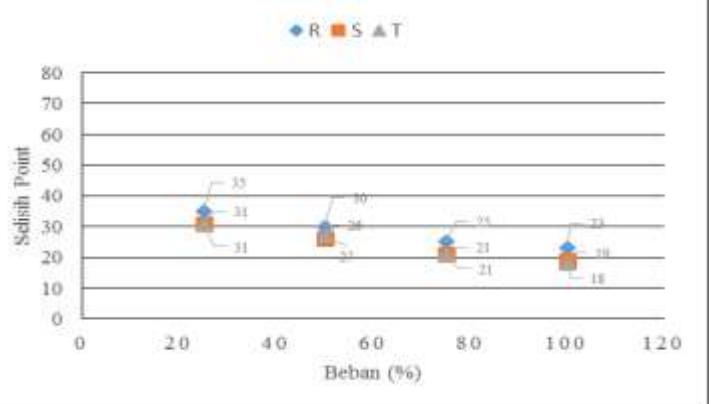
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja keseluruhan sistem yang dirancang. Pengujian ini juga digunakan untuk menentukan sudut fasa antara gelombang tegangan dan gelombang arus motor induksi tiga fasa pada saat normal maupun saat gangguan dengan variasi pembebanan 25% dan 100%, untuk gangguan *inter-turn short circuit*. Untuk pengujian dilakukan pada laboratorium konversi energi. Pengujian dilakukan saat motor induksi dalam kondisi normal maupun diberikan gangguan *inter-turn short circuit* dengan variasi pembebanan. Pengujian ini dilakukan dengan mode pada kondisi hidup (*online*), input sensor tegangan berasal dari tegangan sumber atau terminal motor, untuk sensor arus juga merupakan arus pada sumber 3 fasa, pengujian yang dilakukan yaitu kondisi motor saat normal dan kondisi motor jika terjadi gangguan antar fasa. Yang digunakan sebagai pembanding sinyal adalah sinyal osiloskop



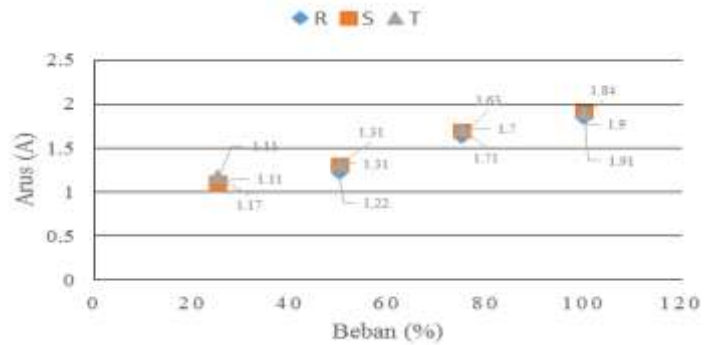
Gambar 5. Tampilan Pembacaan software monitoring

A. Pengujian Motor Saat Keadaan Normal

Pengujian pertama kali dilakukan yaitu pengujian pada saat motor dalam keadaan normal, setelah itu dilakukan pengujian terhadap variasi gangguan yaitu short circuit fasa R ke T, short circuit fasa R ke Netral dan yang terakhir yaitu inter turn short circuit pada fasa R. Pada pengujian ini, motor dijalankan secara normal tanpa terjadi gangguan dengan variasi pembebanan antara 25%, beban 50%, beban 75%, dan beban 100%. Pada Gambar 6 dapat dilihat spesifikasi motor induksi dan selisih data yang diperoleh pada saat keadaan normal pada fasa R. Turn yang digunakan dalam pengujian ini yaitu turn 1 untuk gangguan ringan dan turn 24 untuk gangguan berat.



Gambar 6. Sudut Fasa Pada Kondisi Normal



Gambar 7. Arus Pada Kondisi Normal

Dapat dilihat dari gambar 6, karakteristik motor dalam keadaan normal adalah beda selisih data dari masing-masing fasa tidak terlalu besar, beda selisih data dari masing-masing

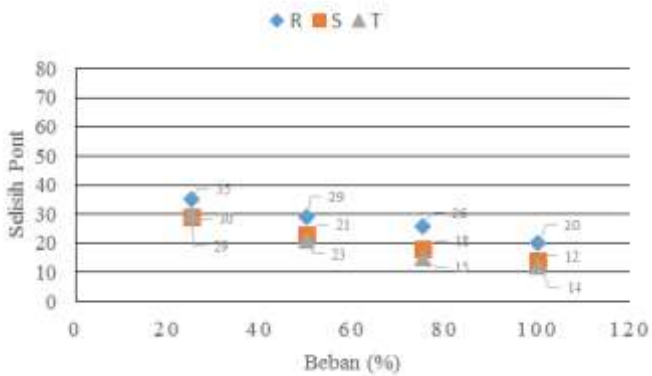
fasa R, S dan T tidak lebih dari 14 point. Dengan ada variasi pembebanan, jika beban bertambah maka selisih p tegangan dan arus akan menurun. Untuk karakteristik ϵ dapat dilihat pada Gambar 7 Arus pada fasa R, S dan T han sama. Perbedaan tidak lebih dari 0,1 ampere. Den demikian dapat dikatakan bahwa motor dalam keadaan nor apabila beda selisih data dari fasa R, S dan T tidak lebih da point. Sedangkan untuk arus tidak melebihi 0,1 Ampere.

B. Pengujian Gangguan Short Circuit Fasa R dengan Fasa

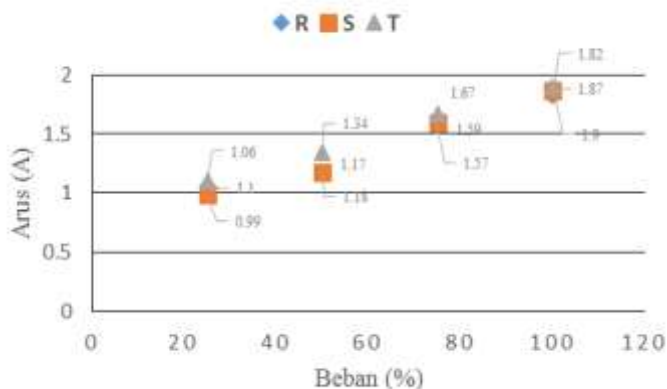
Pada pengujian untuk gangguan *Short Circuit* Fas dengan Fasa T ini dilakukan untuk mengetahui kinerja motor induksi tiga fasa saat kondisi tanpa beban maupun kondisi berbebandengan menggunakan variasi pembebanan. Untuk gangguan yang diberikan yaitu *short circuit* antara fasa R dengan fasa T pada *turn* 1 dan 24 dengan variasi pembebanan dari 25%, beban 50%, beban 75%, dan beban 100%.

Pada gambar 8 beda selisih point dari masing-masing fasa mulai naik namun tidak terlalu besar, hal ini dikarenakan turn yang digunakan masih kecil yaitu *turn* 1. Namun besarnya selisih point yaitu 18 poin. Selisih poin yang didapatkan sudah melebihi dari 8 poin sehingga dapat dikatakan tidak normal atau terjadi gangguan dengan adanya penambahan akan menurunkan selisih poin antara tegangan dan arus. Sementara untuk arusnya kenaikan belum terlalu signifikan.

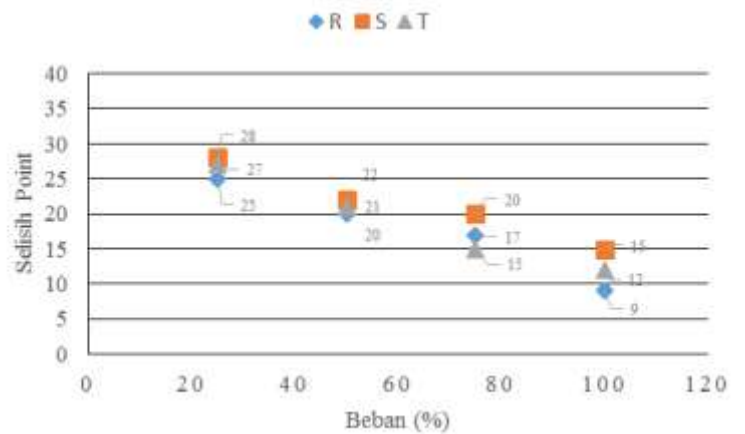
Pada gambar 10 menunjukkan selisih poin yang terbesar antara fasa R, fasa S dan fasa T yaitu 6 poin. Sedangkan besarnya selisih poin dari fasa R dan S juga cukup besar.



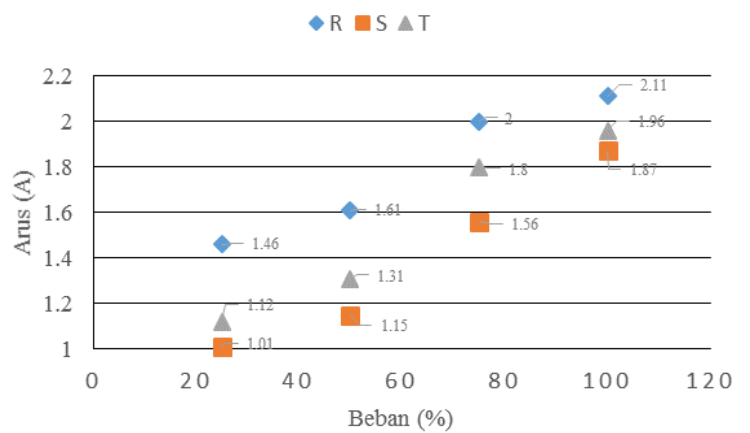
Gambar 8. Sudut Fasa Pada Kondisi Short R-T Turn 1



Gambar 9. Arus Pada Kondisi Short R-T Turn 1



Gambar 10. Sudut Fasa Pada Kondisi Short R-T Turn 24



Gambar 11. Arus Pada Kondisi Short R-T Turn 24

C. Pengujian Gangguan Short Circuit Fasa R dengan Ground

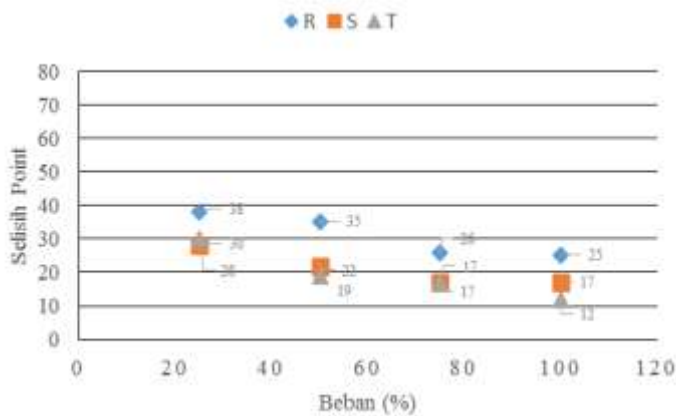
Pengujian ini dilakukan pada kondisi tanpa beban maupun kondisi berbeban dengan variasi gangguan. Adapun gangguan yang diberikan yaitu *short circuit* antara fasa R pada *turn* 1 dengan ground, *short circuit* antara fasa R pada *turn* 15 dengan ground dan *short circuit* antara fasa R pada *turn* 24 dengan ground. Pada pengujian ini didapatkan data arus dan sudut fasa yang akan dijadikan referensi dalam mendiagnosis gangguan.

Dari pengujian yang telah dilakukan maka selisih point dari kondisi normal, *short circuit turn* 1, *short circuit turn* 24 pada fasa R. Dari selisih data (point) yang telah didapat maka dapat diambil kesimpulan untuk *short circuit* *turn* 1 pada fasa R-Ground pada gambar 12 perubahan selisih beda fasa belum terlihat secara signifikan dari keadaan normalnya yaitu sekitar 16 poin selisih yang terbesar, sementara untuk *short circuit* *turn* 24 pada fasa R-ground perubahan selisih beda fasa terbesar yaitu sekitar 21 point yaitu pada gambar 13 bisa dikatakan pada saat terjadi hubung singkat pada fasa R – Ground selisih poin dari fasa R memiliki selisih yang besar dengan fasa yang lainnya

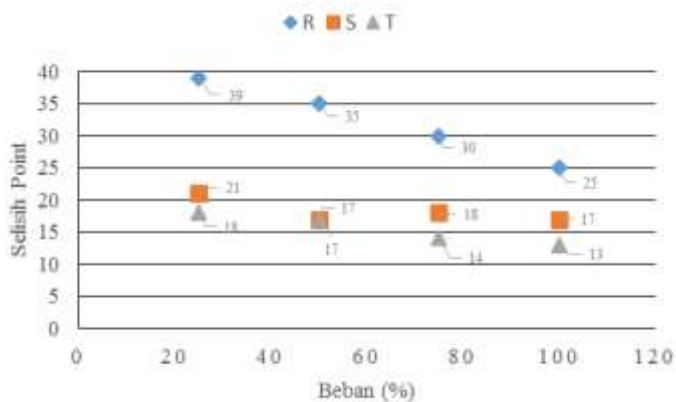
Dari gambar merupakan jumlah *turn* pada *short circuit* dilihat dari selisih pointnya, pengujian yang dilakukan yaitu *short circuit* *turn* 1, *short circuit* *turn* 2, *short circuit* *turn* 3,

short circuit turn 5, short circuit turn 15 dan short circuit turn 24. Dari data yang didapat semakin besar turn yang dihubungkan singkat pada fasa R misalnya maka selisih poinnya akan semakin besar pula.

yang besar antara fasa R dengan fasa S dan T, sedangkan fasa S dan T memiliki beda selisih yang kecil.



Gambar 12. Sudut Fasa Pada Kondisi Short R-Ground Turn 1

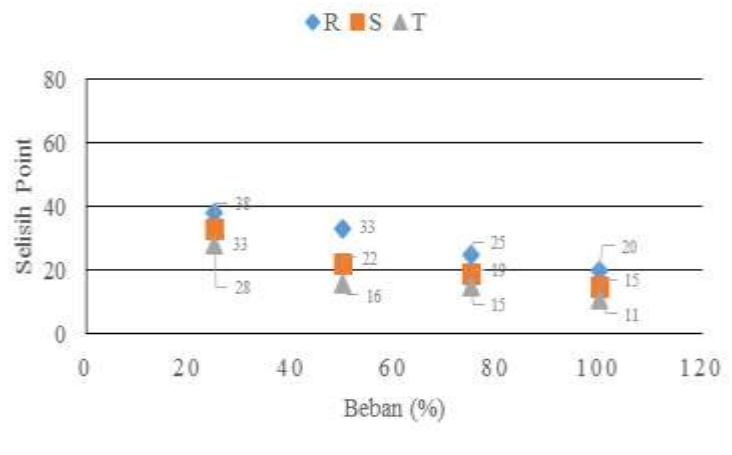


Gambar 13. Sudut Fasa Pada Kondisi Short R-Ground Turn 24

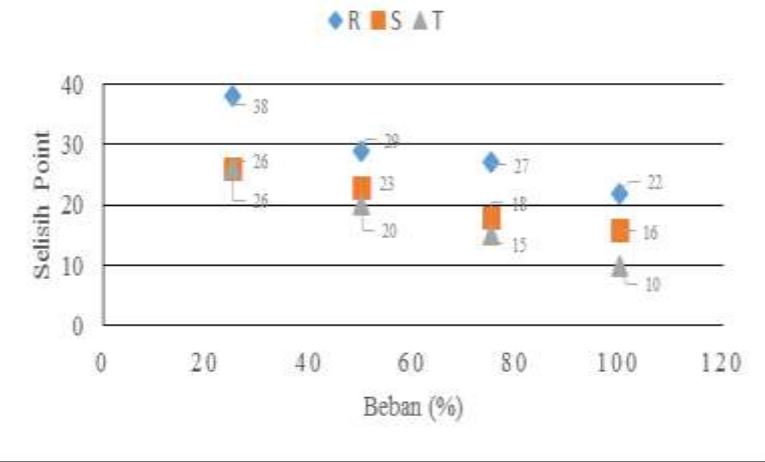
D. Pengujian Gangguan Short Circuit Fasa R

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari motor induksi tiga fasa saat kondisi tanpa beban maupun saat kondisi berbeban dengan variasi gangguan. Gangguan yang diberikan yaitu short circuit fasa R pada turn 1 dengan turn 5, turn 1 dengan turn 15, dan turn 1 dengan turn 24. Motor induksi yang di uji diberikan variasi pembebanan dari 25%, beban 50%, beban 75%, dan beban 100%. Pada pengujian ini didapatkan data berupa arus dan sudut fasa yang akan dijadikan acuan dalam mendiagnosis gangguan.

Pada Gambar 14 dan gambar 15 dapat dilihat beda selisih point antara fasa R dengan fasa S dan T besar sedangkan beda selisih point antara fasa S dengan T kecil. Hal ini terjadi karena fasa R yang mengalami gangguan sehingga hanya fasa R yang memiliki selisih point yang besar. Selain itu arus fasa R dan T lebih tinggi dibanding dengan fasa S. Hal ini terjadi karena hanya fasa R yang mengalami short sehingga fasa R memiliki arus yang besar dibandingkan fasa S. Short circuit ini hampir sama karakteristiknya dengan short circuit fasa R ke ground. Namun pada short circuit fasa ke ground. Selain itu pada short circuit fasa R memiliki beda selisih poin



Gambar 14. Sudut Fasa Pada Kondisi Short R Turn 1- R turn 5



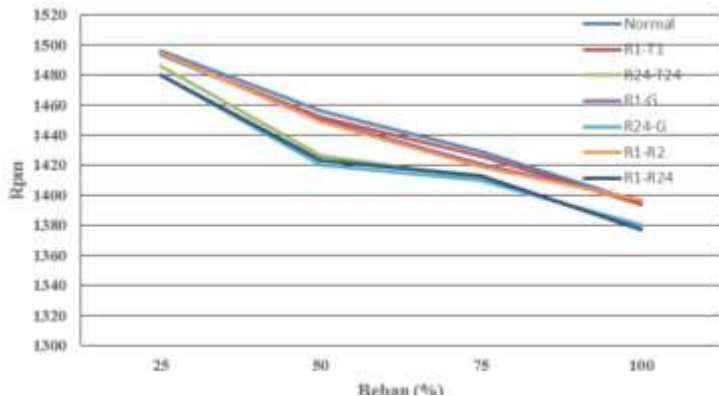
Gambar 15. Sudut Fasa Pada Kondisi Short R Turn 1- R turn 24

E. Pengukuran Kecepatan dan Suhu Motor Induksi

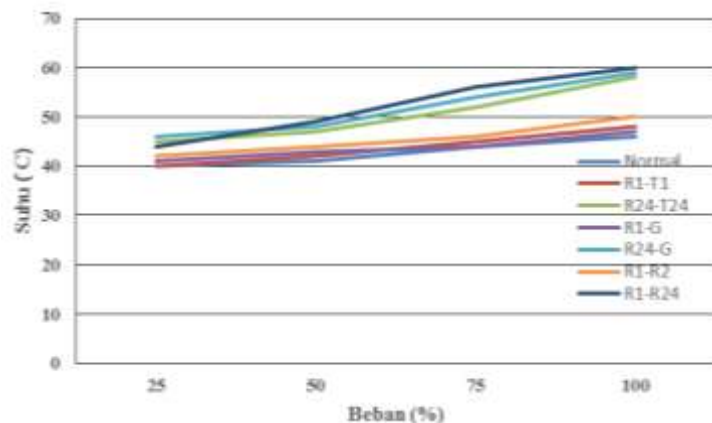
Untuk pengukuran kecepatan motor induksi dilakukan dengan menggunakan tachogenerator pada lab konversi energi, sementara untuk pengukuran suhu menggunakan adalah Fluke IR Thermometer Adapun data kecepatan dan suhu yang didapat berdasarkan kondisi motor ketika normal dan hubung singkat fasa R dengan ground untuk kondisi beban yang berbeda beda dapat dilihat pada gambar untuk grafik kecepatan dan gambar untuk suhu.

Pada saat motor induksi terjadi gangguan, kecepatan putar rotor berkurang. Hal ini disebabkan karena adanya penurunan jumlah belitan dari kumparan fasa yang terkena gangguan. Kumparan fasa yang tidak seimbang mengakibatkan arus yang mengalir pada tiap kumparan berbeda dibandingkan pada saat kondisi motor normal. Sehingga distribusi medan magnet menjadi berkurang dan melemah sehingga putaran rotor menjadi berkurang atau menurun dari kondisi normalnya. Pada gambar 4.21 menunjukkan perubahan kecepatan putaran motor saat kondisi normal maupun gangguan dengan variasi

pembebanan. Sementara pada gambar 4.22 untuk suhu pada motor mengalami peningkatan baik itu ketika motor dalam keadaan normal, akan tetapi ketika motor dalam keadaan normal dengan variasi pembebanan suhu pada motor tidak naik secara signifikan. sementara untuk hubung singkat suhu motor cepat naik, dapat diartikan semakin besar *hubung singkat* maka suhu pada motor akan semakin meningkat dari keadaan normalnya, ini dikarenakan hubung singkat yang dilakukan akan menyebabkan isolasi pada belitan akan menurun sehingga arus pada fasa yang dihubung singkat akan semakin besar membuat arus pada motor tidak seimbang.



Gambar 16. Perubahan Kecepatan pada motor



Gambar 17. Perubahan Suhu pada Motor

V. KESIMPULAN

Sebagai penutup, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan dari tugas akhir ini. Kecepatan ARM membuktikan bahwa proses sampling dan mengirim data ke PC melalui port serial bisa di eksekusi didalam 1 chip dengan durasi 100us untuk setiap sampling 100 ms. Setelah melakukan pengujian dari keseluruhan sistem dan berdasarkan dari data yang didapat, pada kondisi normal, Diagnosa *online* terhadap motor induksi dengan macam-macam gangguan dan pembebanan merupakan pemeriksaan terhadap kondisi motor induksi tiga

fasa yaitu dengan cara mengukur dan menganalisa tegangan, arus, beda fasa, suhu, dan kecepatan.

Karakteristik motor dalam keadaan normal adalah beda selisih data dari masing-masing fasa tidak terlalu besar, beda selisih data dari masing-masing fasa R, S dan T tidak lebih dari 4 point. Dengan adanya variasi pembebanan, jika beban bertambah maka selisih poin tegangan akan menurun, dengan adanya hubung singkat pada belitan stator motor induksi akan menyebabkan suhu pada motor akan naik dan untuk kecepatan pada motor sendiri akan menurun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa syukur kepada Allah SWT. Atas berkah dan rahmatnya kepada penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. terima kasih kepada kedua orang tua penulis atas bantuan moril dan materil. Ucapan terima kasih kepada Jurusan Teknik Elektro, kepada Laboratorium Biocybernetic yang memberikan fasilitas kepada penulis dan mendukung dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Y. Chow, "Methodologies of using neural network and fuzzy logic technologies for motor incipient fault detection", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 1997.
- [2] O.V. Thorsen and M. dalva, "failure identification and analysis for HV induction motors in the petrochemical industry", *IEEE trans. On Ind. Appl.*, vol. 35, no. 4, jul/aug.1999, pp. 810-818.
- [3] IAS motor reliability working group, "report of large motor reliability survey of industrial and commercial installation part1", *IEEE trans. On Ind. Appl.*, vol. 21 jul/aug. 1985, pp. 853-864. M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [4] K. Kim and A. G. Parlos, "Induction Motor ault Diagnosis Based on Neuropredictors and Wavelet signal processing", *IEEE/ASME Trans. On Mechatronics*, vol. 7, no. 2, June 2002.
- [5] S.A. Nasar, "Hanbook of electric Machines", New York: Mc Graw Hill, Chapter 3 dan 4, 1987
- [6] I. Colak, H. Celik, I. Sefa, and S. Demirbas, "Online Protection System for Induction Motors," *Energy Convers. Manage.*, vol. 46, no. 17, pp. 2773–2786, 2005.
- [7] M. E. H. Benbouzid, "Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 4, pp. 1065–1074, Dec. 1999.
- [8] R. Bayindir and I. Sefa, "Novel Approach Based on Microcontroller to Online Protection of Induction Motors," *Energy Convers. Manage.*, vol. 48, no. 3, pp. 850–856, 2007.
- [9] Panda S, K. Power Electronics and System Application- *Variable Speed Electric Drive, Short Course – Faculty Club*, National University of Singapore, 1993.
- [10] J. Yun, K. Lee, K.W. Lee, S. B. Lee, J.Y. Yoo, "Detection and classification of stator turn faults and high-resistance electrical connections for induction machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 2, pp. 666-675, Mar./Apr. 2009.
- [11] M. Muslimin, "Teknik Tenaga Listrik," Armico, Bandung, Bab.3, 1988.
- [12] Tobing, L. Bonggas, "Peralatan Tegangan Tinggi," Gramedia, Jakarta, Bab. 7, 2003.