

SISTEM PENGAMAN DAN MONITORING MOTOR INDUKSI SATU FASA SECARA ONLINE

Nanang Suyoko, 2120531049¹, M. Jasa Afroni², Bambang Minto B.³
Mahasiswa Teknik Elektro¹, Dosen Teknik Elektro^{2,3}, Universitas Islam Malang
okovys@gmail.com

ABSTRAK

Motor induksi satu fasa memiliki beberapa keunggulan, antara lain sederhana, efisien, kuat, dan mudah dalam perawatannya, sehingga menawarkan tingkat keandalan yang sangat tinggi. Seperti mesin lainnya, motor induksi satu fasa membutuhkan perlindungan terhadap kondisi yang berpotensi membuat terjadinya kerusakan ataupun kegagalan. Jika dalam prakteknya motor induksi digunakan untuk menunjang sistem otomatisasi, maka dibutuhkan pemantauan secara kontinu dan otomatis. Salah satu faktor yang berpotensi membuat terjadinya kerusakan atau kegagalan motor induksi satu fasa adalah kelebihan beban yang mengakibatkan arus listrik mengalir melampaui batas amannya. Selain itu terdapat kemungkinan terjadinya vibrasi yang berlebihan ketika motor beroperasi. Tindakan monitoring secara kontinu dan otomatis diperlukan untuk mencegah kedua hal tersebut terjadi, sehingga motor induksi terhindar dari kerusakan yang parah. Penelitian ini mencoba merancang sistem monitoring secara kontinu untuk menjaga besarnya arus listrik yang dipasok ke motor induksi satu fasa serta menjaga besarnya vibrasi yang terjadi. Sistem tersebut akan bereaksi memutus arus listrik yang dipasok ke motor induksi secara otomatis bila salah satu dari kedua kondisi tersebut terjadi, yaitu arus yang terlalu besar ataupun vibrasi yang terlalu besar. Jika sistem telah memutus arus listrik, sebuah pemulihan otomatis (*auto-recovery*) ditambahkan guna memastikan operasional tetap berjalan ketika kondisi tersebut merupakan kegagalan sementara. Selain sistem monitoring tersebut akan dapat beroperasi secara otomatis tanpa pengawasan operator, pengaturan bisa dilakukan dari jarak jauh menggunakan media IoT (*internet of things*).

Kata kunci: motor induksi, pengaman, monitoring, vibrasi, *internet of things*.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dewasa ini, perkembangan industri di Indonesia semakin meningkat. Dalam dunia industri, banyak ditemukan penggunaan motor listrik untuk berbagai macam keperluan. Pada perkembangannya, otomatisasi pada industri lebih banyak menggunakan motor induksi satu fasa dikarenakan murah dan mudah dalam perawatannya. Motor induksi satu fasa memiliki beberapa keunggulan, antara lain sederhana, efisien, kuat, dan mudah dalam perawatannya, sehingga menawarkan tingkat keandalan yang sangat tinggi. Seperti mesin lainnya, motor induksi satu fasa membutuhkan perlindungan terhadap kondisi yang berpotensi membuat terjadinya kerusakan ataupun kegagalan. Jika dalam prakteknya motor induksi digunakan untuk menunjang sistem otomatisasi, maka dibutuhkan pemantauan secara kontinu dan otomatis.

Salah satu faktor yang berpotensi membuat terjadinya kerusakan atau kegagalan motor induksi satu fasa adalah kelebihan beban yang mengakibatkan arus listrik mengalir melampaui batas amannya. Selain itu faktor lain yang berpotensi membuat terjadinya kerusakan atau kegagalan motor induksi satu fasa adalah putaran yang tidak seimbang sehingga mengakibatkan getaran atau vibrasi di luar batas amannya. Tindakan monitoring secara kontinu dan otomatis diperlukan untuk mencegah kedua hal tersebut terjadi, sehingga motor induksi terhindar dari kerusakan yang parah.

Pada penelitian ini akan dicoba untuk merancang sebuah sistem monitoring secara kontinu untuk menjaga besarnya arus listrik yang dipasok ke motor induksi satu fasa serta menjaga besarnya vibrasi yang terjadi. Sistem tersebut akan bereaksi memutus arus listrik yang dipasok ke motor induksi secara otomatis bila salah satu dari kedua kondisi tersebut terjadi, yaitu arus yang terlalu besar ataupun vibrasi yang terlalu besar. Jika sistem telah memutus arus listrik, sebuah pemulihan otomatis (*auto recovery*) ditambahkan guna memastikan operasional tetap berjalan ketika kondisi tersebut merupakan kegagalan sementara. Selain sistem monitoring tersebut akan dapat beroperasi secara otomatis tanpa pengawasan operator, pengaturan bisa dilakukan dari jarak jauh menggunakan media IoT (*internet of things*).

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas yang telah ditulis sebelumnya maka pada penelitian ini memiliki beberapa permasalahan yang akan diteliti:

1. Bagaimana metode untuk mendeteksi besarnya arus listrik pada motor induksi satu fasa.
2. Bagaimana metode untuk mendeteksi besarnya vibrasi pada motor industri satu fasa.
3. Bagaimana merancang sistem pengaman berdasarkan monitoring arus listrik dan vibrasi fisik pada motor induksi satu fasa.
4. Bagaimana hasil pengujian sistem pengaman motor induksi satu fasa yang telah dibangun.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Masukan yang digunakan adalah besaran arus listrik maksimal yang diperbolehkan dan besaran vibrasi maksimal yang diperbolehkan.
2. Perangkat pengaman menggunakan sensor arus listrik dan sensor *accelerometer* sebagai masukan, serta modul *relay* sebagai keluaran untuk menyambung dan memutus arus listrik menuju motor listrik.
3. Keluaran nilai kendali berupa nilai digital untuk menyambung atau memutus arus menuju ke motor listrik.
4. Perangkat mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Mega 2560.
5. Perangkat IoT yang digunakan adalah modul NodeMCU ESP-12E.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk merancang dan menerapkan algoritma pendeteksi besarnya arus listrik dan besarnya vibrasi pada motor industri satu fasa menggunakan sensor arus listrik dan sensor *accelerometer*.
2. Untuk merancang sistem pengaman otomatis berdasarkan monitoring arus listrik dan vibrasi fisik pada motor induksi satu fasa.
3. Untuk merancang monitoring dan pengaturan jarak jauh menggunakan IoT pada sistem pengaman motor induksi satu fasa.

II. METODE PENELITIAN

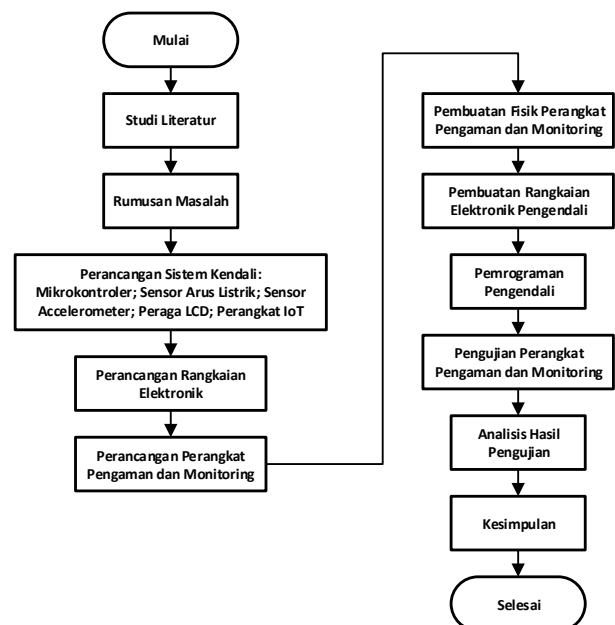
2.1. Langkah Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa langkah penelitian yang dilakukan, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Sesuai dengan diagram alir, langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur, yaitu mengumpulkan semua referensi tentang sistem kendali, motor induksi satu fasa, kelistrikan, vibrasi, dan IoT.
2. Perumusan masalah, yaitu dilakukannya perumusan masalah setelah mengumpulkan referensi yang bersangkutan dan menentukan tujuan dari penelitian.
3. Perancangan sistem kendali, yaitu melakukan perancangan logika sistem kendali yang dituangkan dalam kerangka rancangan penelitian. Perangkat sistem kendali yang akan dirakit antara lain mikrokontroler, sensor arus listrik, sensor *accelerometer*, peraga LCD, dan perangkat IoT. Logika sistem kendali antara lain pendeteksi arus, pendeteksi vibrasi, pemutusan rangkaian, dan pemulihan otomatis.
4. Perancangan rangkaian elektronik, yaitu dilakukannya perancangan rangkaian elektronik

sistem kendali lengkap dalam kerangka rancangan penelitian.

5. Perancangan perangkat pengaman dan monitoring, berupa perancangan fisik perangkat pengaman dan monitoring serta antarmuka dengan operator, yang dituangkan dalam kerangka rancangan penelitian.
6. Pembuatan fisik perangkat pengaman dan monitoring, yaitu mengimplementasikan pembuatan perangkat pengaman dan monitoring secara fisik.
7. Pembuatan rangkaian elektronik pengendali, yang berupa pembuatan rangkaian elektronik pengendali perangkat pengaman dan monitoring.
8. Pemrograman pengendali, berupa aktivitas pemrograman pada mikrokontroler perangkat pengaman dan monitoring.
9. Pengujian perangkat pengaman dan monitoring, yaitu melakukan pengujian perangkat pengaman dan monitoring berdasarkan langkah pengujian yang telah disusun sebelumnya.
10. Analisis hasil pengujian, yaitu dilakukannya analisis dari semua pengujian yang telah dilakukan sebelumnya.
11. Kesimpulan, adalah menarik kesimpulan tentang keberhasilan penelitian serta memberikan saran-saran pada bagian yang belum berhasil dilakukan.

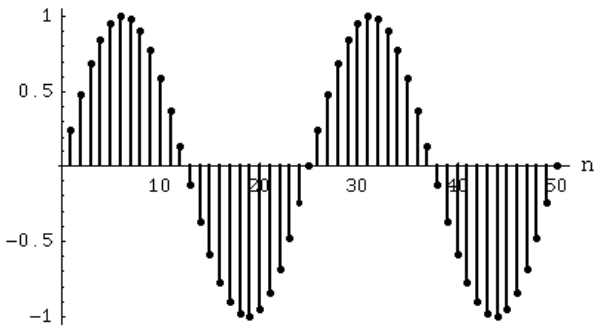


Gambar 1. Diagram alir langkah penelitian.

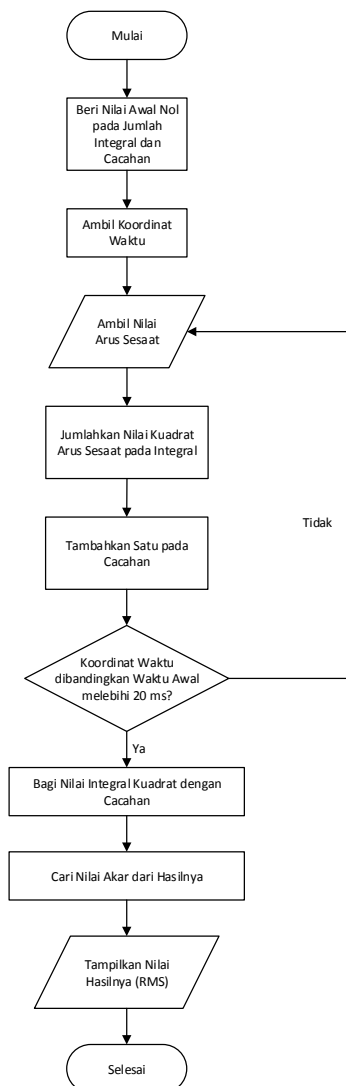
2.2. Metode Pendeteksi Arus Listrik

Karena listrik yang digunakan merupakan listrik AC, maka pendeteksian besaran arus listrik tidak bisa dilakukan dengan melakukan pengambilan data secara acak seperti pada listrik DC. Deteksi besaran arus listrik harus dilakukan menggunakan nilai RMS (*root means*

squared). Oleh karena itu diperlukan pengambilan data secara periodik.



Gambar 2. Pencacahan data arus listrik dalam dua panjang gelombang.



Gambar 3. Diagram alir algoritma penghitungan nilai RMS.

Data dari pembacaan arus listrik sesaat pada sensor arus listrik SCT-013 merupakan hasil pembacaan nilai arus listrik sesaat. Untuk mendapatkan nilai RMS diperlukan pengambilan data sebanyak mungkin dalam satu panjang gelombang arus listrik AC. Karena sistem

listrik di Indonesia menggunakan frekuensi 50 Hz, maka untuk satu periode panjang gelombang adalah 0,02 s atau 20 ms. Nilai RMS yang didapatkan akan memiliki aproksimasi yang cukup ketika terdapat minimal 20 cacahan (pengambilan data) pada setiap panjang gelombang, sehingga periode cacahan minimal adalah 1 ms.

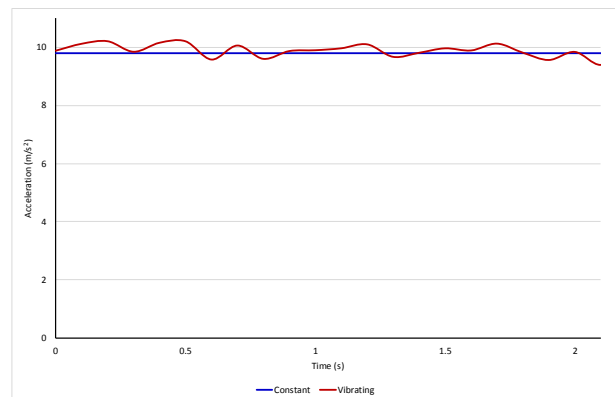
Pembacaan data harus dilakukan tepat selama 20 ms agar mendapatkan akurasi optimal. Selain itu, pembacaan setiap cacahan juga harus diusahakan sesingkat mungkin, dengan waktu maksimal 1 ms. Dengan demikian, akan didapatkan minimal 20 cacahan dalam satu panjang gelombang. Pada Gambar 3 ditunjukkan diagram alir algoritma penghitungan nilai RMS.

2.3. Metode Pendeteksi Vibrasi

Untuk melakukan deteksi vibrasi menggunakan sensor *accelerometer*, diperlukan pengambilan data percepatan pada waktu yang kontinu. Ini disebabkan bahwa sensor *accelerometer* tidak menyediakan pembacaan data vibrasi, namun yang disediakan adalah data percepatan.

Ada empat komponen yang menjadi parameter dalam melakukan pengukuran vibrasi, antara lain: (VIBES Corp., 2019)

1. *Frequency* (Frekuensi)
2. *Displacement* (Perpindahan)
3. *Velocity* (Kecepatan)
4. *Acceleration* atau Percepatan



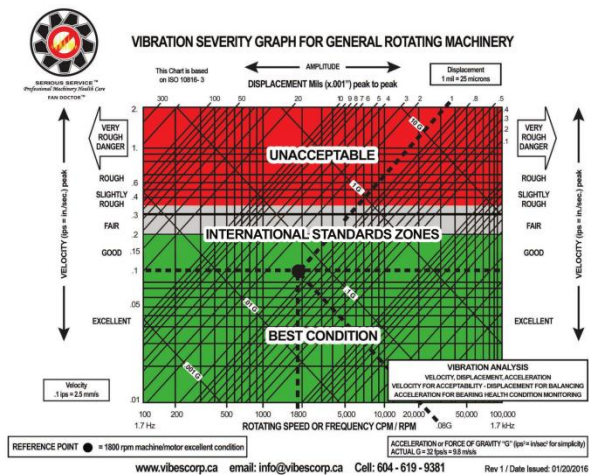
Gambar 4. Grafik percepatan vertikal di permukaan bumi ketika tidak terjadi vibrasi (biru) dan ketika terjadi vibrasi (merah).

Penggunaan sensor *accelerometer* akan menghasilkan nilai percepatan pada tiga sumbu, yaitu x, y, dan z. Arah horizontal dimiliki oleh sumbu x dan y, sementara arah vertikal dimiliki oleh sumbu z. Ketika dilakukan pengukuran secara kontinu, maka akan didapatkan nilai percepatan dan nilai perubahan percepatan pada masing-masing sumbu, sehingga parameter pengukuran yang didapatkan adalah percepatan dan frekuensi.

Berdasarkan sumber dari VIBES Corp., nilai percepatan yang terjadi pada vibrasi motor induksi memiliki tingkat keparahan sebagai berikut: (VIBES Corp., 2019)

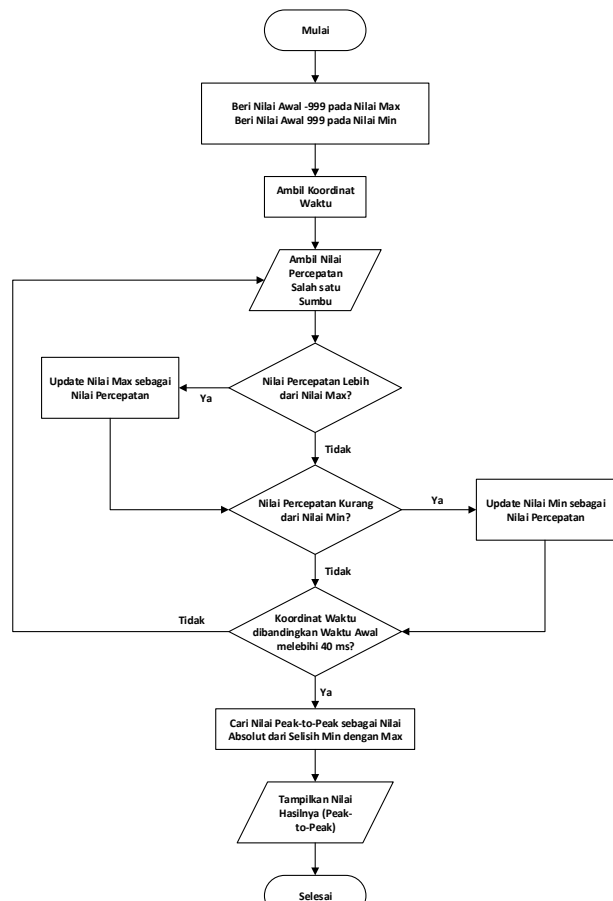
1. *Excellent levels*, memiliki percepatan hingga 0,1 g. Pada tingkat ini, tidak ada aksi yang diperlukan.
2. *Good levels*, memiliki percepatan hingga 0,35 g. Pada tingkat ini tidak diperlukan aksi kecuali jika terjadi kebisingan yang mengganggu.
3. *Fair levels*, memiliki percepatan hingga 0,5 g. Pada tingkat ini tidak diperlukan aksi kecuali jika terjadi kebisingan yang mengganggu.
4. *Rough levels*, memiliki percepatan hingga 0,75 g. Pada tingkat ini mulai diperlukan aksi, terutama melakukan pemeriksaan pada temperatur *bearing*.
5. *Very rough levels*, memiliki percepatan hingga 1 g. Pada tingkat ini diperlukan aksi, terutama melakukan pemeriksaan pada temperatur dan kebisingan *bearing*.
6. *Danger levels*, memiliki percepatan hingga 1,5 g. Pada tingkat ini dapat dipastikan telah terjadi kerusakan parah pada motor. Pemeriksaan pada temperatur dan kebisingan *bearing* harus segera dilakukan.
7. *Breakdown levels*, memiliki percepatan hingga 2,5 g. Pada tingkat ini motor harus dihentikan operasionalnya.

Sesuai dengan kategori tersebut di atas, maka *rough levels* yang berada pada percepatan 0,75 g menjadi batas aman yang dipakai untuk menentukan bahwa operasional motor harus dihentikan agar tidak terjadi kerusakan yang lebih parah. Tingkatan kategori tersebut didapatkan berdasarkan grafik tingkat keparahan vibrasi pada Gambar 5 sesuai dengan ISO 10816-3.



Gambar 5. Tingkat keparahan vibrasi pada perangkat berputar.

Gambar 6 menunjukkan diagram alir proses pengambilan nilai vibrasi, yang berdasarkan selisih nilai minimum dengan maksimum percepatan pada masing-masing sumbu. Hasilnya berupa nilai vibrasi yang terukur, dan bisa dicari nilai vibrasi resultan dari ketiga sumbu tersebut.



Gambar 6. Diagram alir penghitungan besaran vibrasi menggunakan sensor *accelerometer*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian Sensor Arus SCT-013

Sebelum perangkat pengaman dan monitoring motor induksi satu fasa dibangun dalam satu paket rangkaian, diperlukan pengujian pada sensor arus untuk mengetahui nilai arus yang terdeteksi terhadap arus yang sebenarnya. Pengujian ini dilakukan menggunakan sensor arus SCT-013 yang diverifikasi menggunakan multimeter CD800a.

Tabel I. Hasil Pengujian Sensor Arus SCT-013

No	Pengujian	Hasil Pengukuran (A)		Selisih (A)	Selisih (%)
		SCT-013	Multimeter CD800a		
1	Tanpa beban.	0.1	0.0	0.1	0.1%
2	Motor 1 fasa.	0.8	0.8	0.0	0.0%
3	Setrika dan lampu 25 watt.	1.0	1.0	0.0	0.0%
4	Setrika dan lampu 30 watt.	2.3	2.2	0.1	0.1%
5	Setrika dan lampu 50 watt.	3.1	3.1	0.0	0.0%
6	Motor 1 fasa, setrika, dan lampu 50 watt.	3.7	3.7	0.0	0.0%
Selisih Pengukuran Rata-rata (A)				0.03	0.03%

Seperti ditunjukkan oleh hasil pengujian pada Tabel I, ketika tidak terdapat beban sama sekali, SCT-013

menunjukkan pembacaan 0,1 A, sementara tidak ada pembacaan sama sekali dari multimeter CD800a. Untuk penambahan beban berikutnya didapatkan selisih yang bervariasi antara 0,0 A hingga 0,1 A. Pada serangkaian pengujian tersebut, didapatkan selisih rata-rata pengukuran antara SCT-013 dengan CD800a sebesar 0,03 A.

3.2. Pengujian Sensor Accelerometer

Sensor *accelerometer* juga diuji sebelum diintegrasikan dalam perangkat pengaman dan monitoring motor induksi satu fasa ini. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa nilai percepatan yang terdeteksi sesuai dengan kondisi sebenarnya. Verifikasi pada proses pengujian ini adalah dengan menggunakan percepatan gravitasi pada permukaan bumi yang memiliki nilai sebesar 1 g atau sebesar $9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Tabel II. Hasil Pengujian Sensor *Accelerometer* ADXL-345 pada Kemiringan Sumbu X

Kemiringan Sumbu X (°)	Kualitas	Hasil Pembacaan Sensor ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)		
		X	Y	Z
-90	Miring ke Depan	9.825	0.006	-0.008
-75	Miring ke Depan	9.490	-0.003	-2.538
-60	Miring ke Depan	8.508	-0.004	-4.918
-45	Miring ke Depan	6.938	-0.006	-6.942
-30	Miring ke Depan	4.914	0.007	-8.506
-15	Miring ke Depan	2.547	-0.009	-9.478
-10	Miring ke Depan	1.715	-0.005	-9.677
-5	Miring ke Depan	0.855	0.002	-9.776
0	Mendatar	0.007	0.006	-9.810
5	Miring ke Belakang	-0.857	-0.003	-9.786
10	Miring ke Belakang	-1.703	0.010	-9.664
15	Miring ke Belakang	-2.541	0.001	-9.479
30	Miring ke Belakang	-4.913	0.005	-8.501
45	Miring ke Belakang	-6.940	0.001	-6.947
60	Miring ke Belakang	-8.502	-0.002	-4.904
75	Miring ke Belakang	-9.482	-0.009	-2.541
90	Miring ke Belakang	-9.827	-0.004	0.009

Pengujian dilakukan dengan membaca percepatan yang terdeteksi oleh sensor *accelerometer* ADXL-345 pada sumbu x, y, dan z. Pengujian pertama dilakukan dengan cara mengambil bacaan pengukuran setiap sumbu sambil memposisikan pada kemiringan sumbu x, menghasilkan kualitas mendatar, miring depan, dan miring belakang.

Tabel II menunjukkan hasil pengujian sensor *accelerometer* ADXL-345 sewaktu tidak ada vibrasi dan posisinya dimiringkan pada sumbu x. Nilai resultan pengukuran menunjukkan simpangan baku sebesar $0,006 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, dengan rata-rata berada pada nilai $9,819 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Pengujian kedua dilakukan dengan cara mengambil bacaan pengukuran setiap sumbu sambil memposisikan kemiringan pada sumbu y. Kualitas mendatar adalah orientasi sensor sumbu y pada posisi 0° . Kualitas kemiringan ke arah kiri adalah orientasi sensor sumbu y pada posisi kurang dari 0° atau negatif. Kualitas kemiringan ke arah kanan adalah orientasi sensor sumbu y pada posisi lebih dari 0° atau positif.

Tabel III. Hasil Pengujian Sensor *Accelerometer* ADXL-345 pada Kemiringan Sumbu Y

Kemiringan Sumbu Y (°)	Kualitas	Hasil Pembacaan Sensor ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)		
		X	Y	Z
-90	Miring ke Kiri	-0.008	9.822	0.008
-75	Miring ke Kiri	0.003	9.481	-2.541
-60	Miring ke Kiri	-0.008	8.505	-4.906
-45	Miring ke Kiri	-0.009	6.943	-6.937
-30	Miring ke Kiri	0.002	4.916	-8.495
-15	Miring ke Kiri	-0.010	2.537	-9.486
-10	Miring ke Kiri	-0.005	1.704	-9.667
-5	Miring ke Kiri	0.003	0.863	-9.775
0	Mendatar	-0.008	-0.004	-9.823
5	Miring ke Kanan	0.010	-0.847	-9.777
10	Miring ke Kanan	0.009	-1.713	-9.673
15	Miring ke Kanan	0.003	-2.533	-9.479
30	Miring ke Kanan	0.005	-4.919	-8.494
45	Miring ke Kanan	-0.003	-6.940	-6.950
60	Miring ke Kanan	0.007	-8.502	-4.914
75	Miring ke Kanan	0.002	-9.480	-2.533
90	Miring ke Kanan	0.008	-9.821	-0.002

Tabel III menunjukkan hasil pengujian sensor *accelerometer* ADXL-345 sewaktu tidak ada vibrasi dan posisinya dimiringkan pada sumbu y. Nilai resultan pengukuran menunjukkan simpangan baku sebesar $0,006 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, dengan rata-rata berada pada nilai $9,819 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

3.3. Pengujian Pengamanan Vibrasi pada Motor Induksi

Pengujian pengamanan dari vibrasi dilakukan sewaktu perangkat pengaman dan monitoring motor induksi satu fasa sudah terbangun lengkap. Pada tahap ini, rangkaian arus ke motor induksi akan tetap tersambung sampai terjadi vibrasi hingga batas yang ditentukan. Ketika vibrasi mencapai batas tersebut, yaitu 0,75 g atau $7,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, maka arus listrik ke motor induksi akan diputuskan. Selama vibrasi yang terdeteksi kurang dari batas tersebut, maka arus listrik tetap akan tersambung.

Tabel IV. Hasil Pengujian Simulasi Vibrasi pada Motor Induksi

No.	Uraian	Nilai Vibrasi Tertinggi Terbaca		Kondisi Akhir Motor Induksi	Kesesuaian Perilaku
		($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	(g)		
1	Tanpa ada gangguan.	0.15	0.02	Tetap Berputar	Sesuai
2	Tanpa ada gangguan.	0.21	0.02	Tetap Berputar	Sesuai
3	Tanpa ada gangguan.	0.14	0.01	Tetap Berputar	Sesuai
4	Satu mur pada dudukan motor dilonggarkan.	0.57	0.06	Tetap Berputar	Sesuai
5	Dua mur pada dudukan motor dilonggarkan.	2.55	0.26	Tetap Berputar	Sesuai
6	Satu mur pada dudukan motor dilonggarkan, satu mur dilepas seluruhnya.	13.61	1.39	Berhenti	Sesuai

No.	Uraian	Nilai Vibrasi Tertinggi Terbaca		Kondisi Akhir Motor Induksi	Kesesuaian Perilaku
		($m \cdot s^{-2}$)	(g)		
7	Keseluruhan perangkat digoyang secara fisik perlahan.	4.93	0.50	Tetap Berputar	Sesuai
8	Keseluruhan perangkat digoyang secara fisik sedikit lebih kuat.	10.34	1.05	Berhenti	Sesuai
9	Keseluruhan perangkat digoyang secara fisik kuat.	19.35	1.97	Berhenti	Sesuai
10	Keseluruhan perangkat digoyang secara fisik sangat kuat.	24.89	2.53	Berhenti	Sesuai
11	Bagian luar piringan rem yang bergelombang ditahan dengan batang kayu sejajar sumbu putar.	6.32	0.64	Tetap Berputar	Sesuai
12	Bagian luar piringan rem yang bergelombang ditahan dengan ujung batang kayu mengarah ke pusat sumbu putar secara longitudinal.	32.55	3.32	Berhenti	Sesuai

Tabel IV menunjukkan hasil pengujian simulasi vibrasi yang dikenakan pada motor induksi. Simulasi vibrasi yang terjadi karena mur pada dudukan motor dilonggarkan menyebabkan vibrasi sebesar $2,55 m \cdot s^{-2}$ sewaktu kedua mur dilonggarkan. Ketika salah satu mur dilepas sementara satunya lagi dilonggarkan menyebabkan sistem pengaman bekerja, karena terjadi vibrasi kuat yang disebabkan oleh putaran piringan rem menyentuh sepatu rem secara tidak simetris. Tercatat vibrasi tertinggi adalah $13,61 m \cdot s^{-2}$ karena hal tersebut.

Perilaku pengaman sewaktu keseluruhan sistem digoyang secara fisik bervariasi. Ketika digoyang secara perlahan, tidak terjadi pemutusan arus karena vibrasi cukup rendah, yaitu $4,93 m \cdot s^{-2}$. Baru ketika sistem digoyang lebih kuat, terjadi pemutusan arus dengan nilai puncak vibrasi sebesar $10,34 m \cdot s^{-2}$.

Perlakuan berikutnya adalah menahan bagian luar piringan rem dengan batang kayu dengan orientasi sejajar sumbu putar. Karena bagian luar piringan rem bergelombang, maka terjadi vibrasi yang cukup tinggi, namun masih di bawah $0,75 g$, sehingga tidak terjadi pemutusan arus. Vibrasi yang tercatat adalah $6,32 m \cdot s^{-2}$ waktu itu. Ketika orientasi batang kayu diputar 90° sehingga mengarah ke pusat sumbu putar maka terjadi vibrasi yang cukup kuat, yaitu dengan nilai puncak sebesar $32,55 m \cdot s^{-2}$, sehingga sistem langsung memutuskan arus ke motor induksi.

Secara keseluruhan, hasil pengujian simulasi vibrasi pada sistem ini berhasil memicu pemutusan arus sesuai dengan spesifikasi yang ditunjukkan, yaitu memutuskan arus ketika mencapai $0,75 g$ atau $7,35 m \cdot s^{-2}$.

3.4. Pengujian Pengamanan Beban Berlebih pada Motor Induksi

Pengujian pengamanan dari beban berlebih dilakukan sewaktu perangkat pengaman dan monitoring motor induksi satu fasa sudah terbangun lengkap. Pada tahap ini, rangkaian arus ke motor induksi akan tetap tersambung sampai terjadi arus listrik melampaui batas yang ditentukan. Ketika arus mencapai batas aman tersebut, yaitu $0,9 A$, maka arus listrik ke motor induksi akan diputuskan.

Selama pengujian, kelebihan beban motor induksi akan disimulasikan dengan cara mengaktifkan perangkat rem yang telah tersedia pada sumbu penggerak motor induksi. Peraga LCD akan menampilkan nilai arus listrik RMS yang terbentuk secara *real-time*, sehingga arus yang mengalir pada motor induksi bisa diamati langsung.

Tabel V menunjukkan hasil pengujian simulasi kelebihan beban pada motor induksi. Dari data tersebut didapatkan kenyataan bahwa ketika tidak terdapat gangguan maka nilai arus listrik tertinggi yang terbaca adalah $0,8 A$. Kemudian ketika dilakukan pengereman pada perangkat rem yang ada, nilai arus meningkat sesuai dengan kekuatan pengereman. Nilai arus tertinggi yang tercatat ketika pengereman rem diperkeras adalah $1,0 A$, dan memicu sistem untuk memutuskan arus sehingga motor berhenti berputar. Hal ini sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu arus yang lebih dari $0,9 A$ akan memutuskan arus ke motor induksi.

Tabel V. Hasil Pengujian Simulasi Kelebihan Beban pada Motor Induksi

No.	Uraian	Nilai Arus Tertinggi Terbaca (A)	Kondisi Akhir Motor Induksi	Kesesuaian Perilaku
1	Tanpa ada gangguan.	0.8	Tetap Berputar	Sesuai
2	Tanpa ada gangguan.	0.8	Tetap Berputar	Sesuai
3	Tanpa ada gangguan.	0.8	Tetap Berputar	Sesuai
4	Menekan rem secara perlahan.	0.9	Tetap Berputar	Sesuai
5	Menekan rem lebih kuat #1.	0.9	Tetap Berputar	Sesuai
6	Menekan rem lebih kuat #2.	0.9	Tetap Berputar	Sesuai
7	Menekan rem lebih kuat #3.	1.0	Berhenti	Sesuai
8	Menekan rem lebih kuat #4.	1.1	Berhenti	Sesuai

3.5. Analisis Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian dapat dilakukan analisis bahwa:

1. Pengambilan data arus listrik bolak-balik dapat dilakukan dengan mendapatkan nilai RMS sesuai dengan karakteristik listrik AC. Pengambilan dengan cara acak tidak memungkinkan karena nilai arus yang bervariasi secara periodik pada

frekuensi 50 Hz sesuai dengan sistem yang berlaku di Indonesia.

2. Pengambilan data vibrasi dari sensor *accelerometer* hanya berhasil jika dilakukan dengan cara mendapatkan selisih percepatan puncak pada masing-masing sumbu x, y, dan z. Hal ini disebabkan ketika tidak terdapat vibrasi maka akan terbaca percepatan $9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ secara konstan.
3. Kesesuaian perilaku sistem pengaman dan monitoring motor induksi satu fasa menunjukkan hasil positif, seperti spesifikasi yang telah ditentukan.

IV. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis pada penelitian ini, maka dapat ditarik tiga kesimpulan, antara lain:

1. Metode untuk mendeteksi besarnya arus listrik pada motor induksi satu fasa adalah menggunakan nilai RMS yang merupakan nilai akar kuadrat dari rata-rata kuadrat pencacahan dalam satu periode.
2. Metode untuk mendeteksi besarnya vibrasi pada motor industri satu fasa menggunakan sensor *accelerometer* adalah dengan mendapatkan selisih nilai percepatan minimum dan maksimum setiap sumbu.
3. Rancangan sistem pengaman berdasarkan monitoring arus listrik dan vibrasi fisik pada motor induksi satu fasa telah berhasil dilakukan dan diuji sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan, di mana arus menuju motor berhasil terputus pada nilai arus 0,96 A atau pada nilai vibrasi $7,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.
4. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor arus telah berfungsi dengan baik, dengan *error* pada sensor arus sebesar 0,03%. Sistem pengamanan sudah bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

4.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian ini adalah:

1. Pada penelitian berikutnya diharapkan ada penyempurnaan pada cara kerja pengambilan data dari sensor *accelerometer*.
2. Pada penelitian berikutnya diharapkan bisa diterapkan pada lebih dari satu motor induksi menggunakan satu mikrokontroler.

V. DAFTAR PUSTAKA

Arduino - Introduction. (2018, 7 15). Retrieved from Arduino:
<https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>

Banzi, M. (2011). *Getting Started with Arduino*. Sebastopol: O'Reilly Media.

BM Electronic Embeded Solution. (2018, 11 15). *20x4 LCD Display | B.M. Embedded Solutions*. Retrieved from <http://bmselectronics.com/product/20x4-lcd-display/>

Dyer, S. (2004). *Wiley Survey of Instrumentation and Measurement*. John Wiley & Sons.

Handson Technology. (2015). *8 Channel 5V Optical Isolated Relay Module User Guide*. Masai: Handson Technology Enterprise.

Heath, S. (2003). *Embedded Systems Design*. Massachusetts: Newnes.

Herman, S. (2010). *Industrial Motor Control*. Delmar: Delmar Cengage Learning.

Ogata, K. (1987). *Discrete-Time Control Systems*. New York: Prentice-Hall.

Terrell, W. (1999). *Some Fundamental Control Theory I: Controllability, Observability, and Duality*. The American Mathematical Monthly.

Tutorials Point. (2018, 11 15). *Control Systems - Introduction*. Retrieved from Control Systems: https://www.tutorialspoint.com/control_systems/control_systems_introduction.htm

VIBES Corp. (2019, 4 9). *Learn About Vibration, Volume 1: Basic Understanding of Machinery Vibration*. Retrieved 5 16, 2019, from <https://www.vibescorp.ca/learn-about/basic-understanding-of-machinery-vibration/>

Vishay Intertechnology. (2012). *LCD-020N004L Datasheet*. Malvern: Vishay Intertechnology.

Vukić, Z., Kuljača, L., Đonlagić, D., & Tešnjak, S. (2003). *Nonlinear Control Systems*. New York: Marcel Dekker.