

# Sistem Proteksi Gangguan Thermal dan Arus Lebih Motor Induksi 3 Fasa pada Mesin Kompresor Menggunakan Metode Logika Fuzzy Dilengkapi Fitur *Mobile App*

Edo Andhika Praditya Jaya, Arif Musthofa, dan Ciptian Wieried Priananda  
Teknik Elektro Otomasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: arif@ee.its.ac.id

**Abstrak**—Kerusakan pada motor induksi 3 fasa pada mesin kompresor di PT X umumnya disebabkan oleh gangguan thermal dan arus lebih yang bermula dari masalah internal motor induksi. Seperti kumparan motor yang sudah mulai rusak, gearbox atau bearing yang sendat, dan kipas pendingin yang tidak berfungsi. Proyek Akhir ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan merancang Sistem Proteksi Gangguan Thermal dan Arus Lebih Motor Induksi 3 Fasa pada Mesin Kompresor Menggunakan Metode Logika Fuzzy. Proyek Akhir ini juga bertujuan untuk aplikasi fitur *mobile app* untuk monitoring nilai temperatur dan arus pada motor induksi serta dapat memutus daya motor induksi 3 fasa secara *online*. Prinsip kerja sistem proteksi ini yaitu ketika kendali logika fuzzy menetapkan motor induksi dalam kondisi peringatan maka sistem secara otomatis mengirimkan peringatan berupa notifikasi kepada pengguna. Begitu juga ketika temperatur dan arus terdeteksi melampaui nilai nominal maka motor trip. Dari hasil pembacaan temperatur oleh sensor DS18B20 dan termometer digital, terdapat rata-rata *error* sebesar 0,64%. Hasil pembacaan arus oleh sensor ACS712 dan amperemeter, terdapat rata-rata *error* sebesar < 1%. Pengujian dilakukan terhadap motor induksi 3 fasa berdaya 0,3 HP. Dengan hasil pengujian ketika didapatkan pembacaan arus motor sebesar 0,51; 0,53; dan 0,52 A kontrol logika fuzzy menentukan motor dalam kondisi peringatan. Sementara kontrol logika fuzzy menentukan motor dalam kondisi gangguan ketika didapatkan pembacaan arus motor sebesar 0,68; 0,69; dan 0,67 A.

**Kata Kunci**—Gangguan Thermal dan Arus Lebih, Fitur Mobile App, Metode Logika Fuzzy, Motor Induksi 3 Fasa, Sensor DS18B20, Sensor ACS712.

## I. PENDAHULUAN

MESIN kompresor dengan jenis *oil free screw compressor* di PT X menggunakan sebuah motor induksi 3 fasa yang berdaya besar. Motor induksi 3 fasa yang digunakan pada mesin kompresor ini adalah motor induksi rotor sangkar, di mana motor jenis ini sangat baik digunakan pada mesin-mesin berkapasitas besar dengan kecepatan konstan karena konstruksinya yang kuat. Salah satu permasalahan yang dihadapi oleh PT X adalah mesin kompresor ini beroperasi 24 jam nonstop selama proses produksi berjalan. Sementara setiap harinya teknisi hanya dapat memonitor mesin kompresor ini selama 1 *shift* atau 8 jam kerja. Sehingga di luar jam kerja tersebut teknisi tidak dapat memastikan motor induksi pada mesin kompresor beroperasi dalam kondisi normal. Apabila motor induksi terjadi gangguan dan berhenti beroperasi, kondisi motor induksi selama beroperasi tidak terekam secara otomatis

sehingga teknisi memerlukan waktu untuk menentukan indikasi gangguan motor induksi. Umumnya gangguan thermal dan arus lebih motor induksi yang terjadi di PT X disebabkan oleh kumparan motor yang sudah mulai rusak, gearbox atau bearing yang sendat, dan kipas pendingin yang tidak berfungsi.

Untuk menjamin kelangsungan operasional motor induksi, perlu diperhatikan keamanan motor tersebut baik terhadap gangguan internal atau gangguan dari motor induksi sendiri maupun gangguan eksternal. Maka dari itu, motor induksi pada mesin kompresor tersebut masih perlu dilengkapi dengan sistem proteksi dan sistem monitoring, karena pada operasinya motor induksi tidak terlepas dari gangguan yang dapat terjadi. Sehingga apabila motor induksi pada mesin kompresor ini mengalami gangguan, maka sistem proteksi yang dikendalikan oleh Arduino Mega 2560 memerintahkan pemutus daya untuk memutus rangkaian motor (*trip*). Hal ini bertujuan bahwa motor induksi dapat dimonitor selama beroperasi sehingga teknisi dapat memastikan bahwa motor induksi beroperasi dalam kondisi normal maupun gangguan. Selain itu juga kondisi motor induksi dapat terekam dalam bentuk grafik yang menjadi acuan teknisi dalam menentukan indikasi gangguan yang terjadi pada motor induksi.

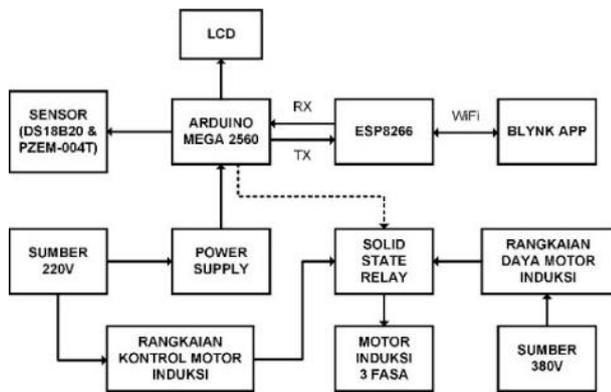
Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, penulis memiliki sebuah gagasan untuk merancang sebuah sistem proteksi dan monitoring motor induksi 3 fasa pada mesin kompresor di PT X menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 dan dilengkapi dengan fitur *mobile app*.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

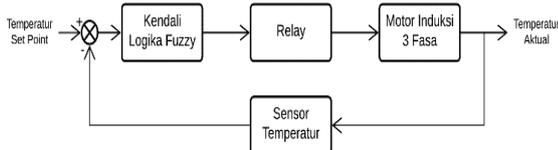
### A. Sistem Proteksi

Sistem proteksi diaplikasikan pada peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada suatu sistem tenaga, salah satunya adalah motor induksi. Sistem proteksi dibuat sebagai tindakan pengamanan terhadap kondisi operasi yang abnormal pada sistem itu sendiri. Kondisi abnormal tersebut dapat berupa antara lain hubung singkat, arus lebih, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah, dan lain sebagainya.

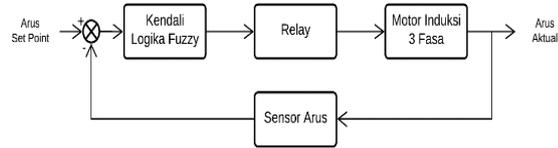
Tujuan aplikasi sistem proteksi pada peralatan listrik, yaitu menghindari ataupun mengurangi kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan atau kondisi abnormal operasi pada sistem. Semakin cepat respon perangkat proteksi yang digunakan maka akan semakin sedikit pengaruh gangguan yang menyebabkan kerusakan pada peralatan.



Gambar 1. Diagram blok sistem.



Gambar 2.II Diagram kontrol sistem proteksi gangguan thermal.



Gambar 3. Diagram kontrol sistem proteksi gangguan arus lebih.

Melakukan tindakan cepat dan tepat melokalisir unit-unit sistem yang terdampak oleh gangguan menjadi seminimal mungkin. Mengamankan manusia atau tenaga kerja terhadap bahaya yang ditimbulkan dari gangguan atau kondisi abnormal pada sistem [1].

**B. Motor Induksi**

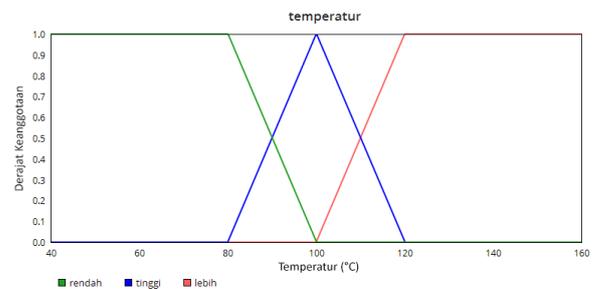
Motor listrik berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa tenaga putar. Motor listrik terdiri dari dua bagian utama yaitu stator atau bagian yang diam dan rotor atau bagian berputar. Pada motor AC, kumparan rotor tidak menerima energi listrik secara langsung, tetapi secara prinsip induksi elektromagnetik seperti yang terjadi pada kumparan transformator. Oleh karena itu motor AC dikenal dengan motor induksi. Dilihat dari kesederhanaannya, konstruksinya yang kuat, dan kokoh serta mempunyai karakteristik kerja yang baik, motor induksi 3 fasa yang tepat dan paling banyak digunakan dalam bidang industri [2].

Penggunaan motor induksi yang banyak digunakan dalam bidang industri mempunyai keunggulan sebagai berikut:

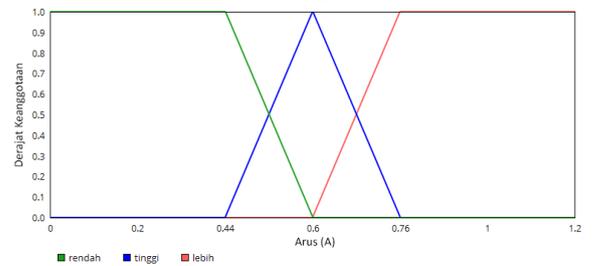
1. Memiliki bentuk yang sederhana dengan konstruksi yang kuat dan hampir tidak pernah mengalami kerusakan yang berarti.
2. Harga relatif murah namun dapat diandalkan.
3. Efisiensi tinggi pada keadaan operasi normal, tidak memerlukan sikat sehingga rugi-rugi daya yang diakibatkan dari gesekan dapat diminimalisir.
4. Untuk pengasutan tidak membutuhkan motor bantu sebagai starter.

Namun di samping hal tersebut, terdapat pula faktor-faktor kekurangan dari motor induksi yaitu sebagai berikut:

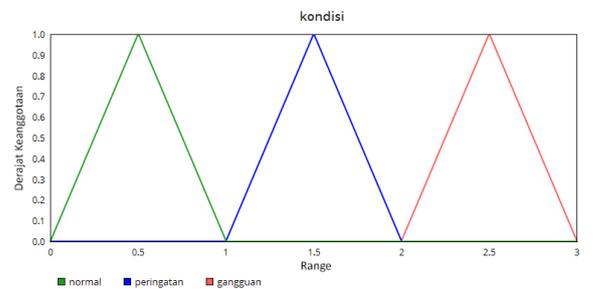
1. Pengaturan kecepatan motor induksi dapat mempengaruhi efisiensinya.
2. Tidak seperti motor DC atau motor *shunt*, kecepatan motor induksi akan menurun seiring dengan



Gambar I Fungsi keanggotaan input temperatur.



Gambar 5. Fungsi keanggotaan input arus.



Gambar 6. Fungsi keanggotaan output kondisi.

- bertambahnya beban.
3. Kopel awal mutunya rendah dibandingkan dengan motor DC *shunt*.

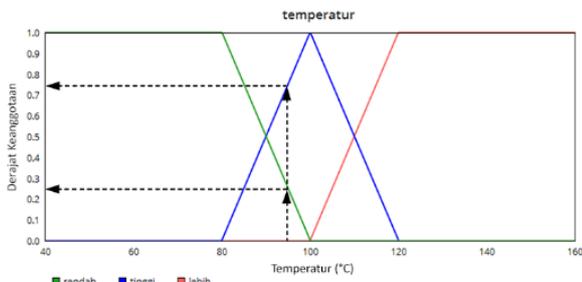
**C. Kendali Logika Fuzzy**

Logika fuzzy merupakan suatu metode yang tepat untuk memetakan ruang input ke dalam ruang output. Sehingga dengan menggunakan logika fuzzy ini, output yang diinginkan merupakan hasil pengejawantahan dari input yang ada dengan menggunakan aturan-aturan yang terkait. Di bawah ini dapat dilihat gambar hubungan antara ruang input dan ruang output dalam logika fuzzy [3].

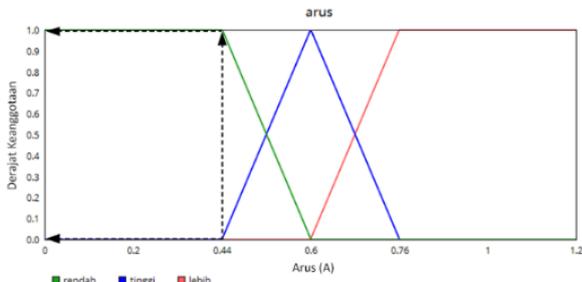
Sebagai suatu metode logika, logika fuzzy mempunyai beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan metoda logika lainnya, seperti berikut:

1. Sifatnya yang fleksible.
2. Memiliki toleransi cukup besar terhadap data yang tidak pasti.
3. Dapat digunakan untuk sistem yang non-linier dan kompleks, terutama untuk sistem yang tidak dapat dengan mudah dibuat persamaan model matematis antara masukan dan keluaran sistem.
4. Bahasa yang dipakai dalam logika fuzzy adalah bahasa yang digunakan oleh manusia pada umumnya (*variable linguistic*) sehingga akan lebih mudah untuk dipahami.

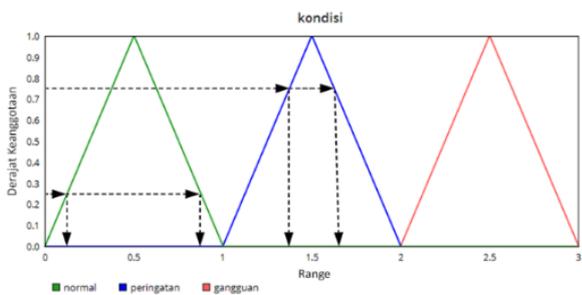
Sebagai suatu algoritma yang merepresentasikan keadaan yang tidak pasti, maka dalam logika fuzzy ini dikenal dengan apa yang disebut sebagai fungsi keanggotaan (*membership function*). Fungsi keanggotaan ini menyatakan suatu harga yang berfungsi untuk memetakan tiap elemen himpunan A kedalam suatu tingkat keanggotaan tertentu untuk suatu



Gambar III Nilai derajat keanggotaan input temperatur 95°C.



Gambar IV Nilai derajat keanggotaan input arus 0,44 A.



Gambar V Proses implikasi pada daerah output kondisi.

pernyataan *linguistic* yang mempunyai nilai antara 0 dan 1. Bila dinyatakan dalam bentuk matematis, maka himpunan fuzzy A dapat dinyatakan dalam persamaan (1) berikut [3].

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\} \tag{1}$$

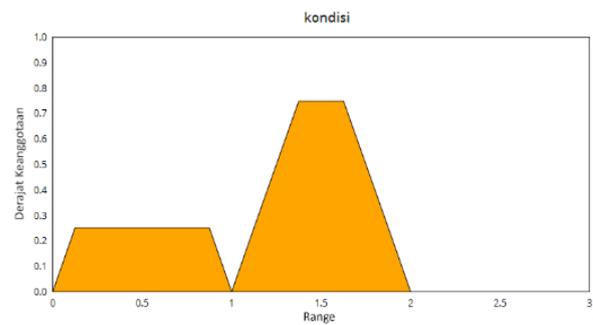
Dengan  $\mu_A(x)$  sama dengan fungsi keanggotaan x di dalam A, di mana nilai dari A tersebut berada diantara 0 dan 1.

Secara umum, penulisan himpunan fuzzy dapat diklasifikasikan kedalam 2 kelompok, yaitu untuk semesta yang diskrit dan untuk semesta yang kontinu.

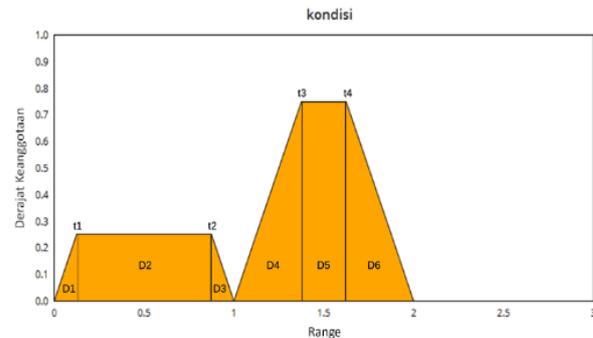
### III. PERANCANGAN SISTEM

#### A. Sistem Proteksi Gangguan Motor Induksi

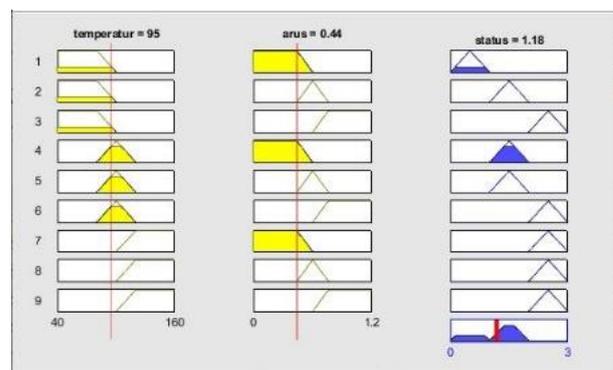
Secara garis besar, operasi sistem proteksi thermal dan arus lebih motor induksi 3 fasa ini dimulai ketika motor induksi yang terhubung dengan sistem dioperasikan. Dimana ketika temperatur motor induksi dideteksi oleh sensor DS18B20 dan nilai arus motor induksi juga dideteksi oleh sensor ACS712. Apabila salah satu dari nilai yang terdeteksi nyaris mencapai setting point yang ditentukan, Arduino Mega 2560 + Wi-Fi mengirimkan notifikasi via Blynk App kepada pengguna atau teknisi bahwa motor dalam kondisi mendekati abnormal atau gangguan. Di saat tersebut, pengguna atau teknisi dapat menghentikan operasi motor induksi dari jarak jauh secara online melalui Blynk App. Namun ketika salah satu dari nilai yang terdeteksi telah mencapai setting point yang ditentukan, Arduino Mega 2560 + Wi-Fi memberikan perintah relay untuk memutus rangkaian daya motor induksi. Sehingga motor induksi berhenti beroperasi dan tugas teknisi



Gambar 10. Hasil implikasi pada daerah output kondisi.



Gambar 11. Bagian-bagian implikasi pada daerah output kondisi.



Gambar 12. Hasil simulasi sistem pada MATLAB.

selanjutnya yaitu memeriksa kondisi motor induksi secara nyata. Untuk diagram perancangan sistem proteksi thermal dan arus lebih motor induksi 3 fasa pada mesin kompresor dapat dilihat pada Gambar 1.

Adapun desain sistem kontrol yang dibuat dalam sistem proteksi gangguan motor induksi ini meliputi sistem kontrol *closed loop* proteksi temperatur dan arus dengan kendali logika fuzzy. Diagram blok sistem kontrol proteksi gangguan thermal maupun arus lebih motor induksi 3 fasa dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.

#### B. Fuzzyfikasi

Untuk menentukan nilai setiap himpunan keanggotaan input temperatur seperti pada Gambar 4, berdasarkan tahap pengujian pada motor induksi 3 fasa dan standar NEMA untuk kelas isolasi F yang berbunyi bahwa temperatur referensi atau ambient motor induksi ditetapkan sesuai dengan suhu ruangan yaitu 40°C. Temperatur operasional maksimum yang diperbolehkan untuk kelas isolasi F sebesar 155°C. Peningkatan temperatur yang diperbolehkan ketika beban penuh adalah 105°C untuk service faktor 1.0. Peningkatan temperatur yang diperbolehkan ketika beban penuh adalah 115°C untuk service faktor 1.15. Dan hot spot atau titik suhu terpanas bertambah sebanyak 10°C. Di mana dalam fuzzy kemudian dapat dibagi menjadi 3 buah variabel

Tabel 1.

Hasil pengujian thermal motor induksi 3 fasa dengan logika fuzzy

Data No.	Temperatur DS18B20 (°C)	Kategori Temperatur	Tindakan Proteksi
1	40,0	Normal	Tidak Trip
2	52,0	Normal	Tidak Trip
3	60,5	Normal	Tidak Trip
4	65,5	Normal	Tidak Trip
5	71,5	Normal	Tidak Trip
6	76,5	Normal	Tidak Trip
7	83,0	Normal	Tidak Trip
8	95,0	Tinggi	Peringatan
9	97,5	Tinggi	Peringatan
10	105,0	Tinggi	Peringatan
11	108,5	Tinggi	Peringatan
12	111,5	Lebih	Trip

yang membentuk himpunan fuzzy yaitu rendah, tinggi, dan lebih. Dengan range himpunan keanggotaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{rendah}}(x) &= \text{trapmf}(x; 40, 40, 80, 100) \\ \mu_{\text{tinggi}}(x) &= \text{trimf}(x; 80, 100, 100, 120) \\ \mu_{\text{lebih}}(x) &= \text{trapmf}(x; 100, 120, 160, 160) \end{aligned}$$

Untuk menentukan nilai setiap himpunan keanggotaan input arus seperti pada Gambar 5, berdasarkan spesifikasi dan tahap pengujian pada motor induksi 3 fasa di mana dapat dibagi 3 buah variabel yang membentuk himpunan fuzzy yaitu rendah, tinggi, dan lebih. Dengan range himpunan keanggotaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{rendah}}(x) &= \text{trapmf}(x; 0, 0, 0.44, 0.6) \\ \mu_{\text{tinggi}}(x) &= \text{trimf}(x; 0.44, 0.6, 0.6, 0.76) \\ \mu_{\text{lebih}}(x) &= \text{trapmf}(x; 0.6, 0.76, 1.2, 1.2) \end{aligned}$$

Untuk menentukan nilai setiap himpunan keanggotaan output kondisi seperti pada Gambar 6, berdasarkan tindakan proteksi yang diinginkan terhadap nilai temperatur dan arus motor induksi 3 fasa di mana dapat dibagi menjadi 3 buah variabel yang membentuk himpunan fuzzy yaitu normal, peringatan, dan gangguan. Dengan range himpunan keanggotaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{normal}}(x) &= \text{trimf}(x; 0, 0.5, 0.5, 1) \\ \mu_{\text{peringatan}}(x) &= \text{trimf}(x; 1, 1.5, 1.5, 2) \\ \mu_{\text{gangguan}}(x) &= \text{trimf}(x; 2, 2.5, 2.5, 3) \end{aligned}$$

### C. Inferensi

Setelah menentukan masukan dan keluaran dari sistem proteksi, tahap selanjutnya adalah menentukan aturan fuzzy (fuzzy rules) yang merupakan logika dasar dari sistem proteksi untuk menentukan tindakan atas perubahan yang terjadi pada inputnya. Berikut merupakan 9 buah aturan fuzzy yang digunakan pada sistem proteksi motor induksi 3 fasa.

- [R1] Jika temperatur rendah dan arus rendah, maka kondisi normal
- [R2] Jika temperatur rendah dan arus tinggi, maka kondisi peringatan
- [R3] Jika temperatur rendah dan arus lebih, maka kondisi gangguan
- [R4] Jika temperatur tinggi dan arus rendah, maka kondisi peringatan
- [R5] Jika temperatur tinggi dan arus tinggi, maka kondisi peringatan
- [R6] Jika temperatur tinggi dan arus lebih, maka kondisi gangguan
- [R7] Jika temperatur lebih dan arus rendah, maka kondisi gangguan
- [R8] Jika temperatur lebih dan arus tinggi, maka kondisi gangguan

Tabel I Hasil pengujian arus lebih motor induksi 3 fasa dengan logika fuzzy

Data No.	Arus ACS712 (A)			Kategori Arus	Tindakan Proteksi
	I <sub>R</sub>	I <sub>S</sub>	I <sub>T</sub>		
1	0,14	0,16	0,17	Normal	Tidak Trip
2	0,23	0,24	0,21	Normal	Tidak Trip
3	0,28	0,29	0,28	Normal	Tidak Trip
4	0,30	0,31	0,30	Normal	Tidak Trip
5	0,34	0,34	0,34	Normal	Tidak Trip
6	0,37	0,37	0,36	Normal	Tidak Trip
7	0,41	0,39	0,40	Normal	Tidak Trip
8	0,43	0,44	0,43	Normal	Tidak Trip
9	0,51	0,53	0,52	Tinggi	Peringatan
10	0,61	0,63	0,63	Tinggi	Peringatan
11	0,65	0,67	0,65	Tinggi	Peringatan
12	0,68	0,69	0,67	Lebih	Trip

- [R9] Jika temperatur lebih dan arus lebih, maka kondisi gangguan

Aturan fuzzy tersebut berdasarkan bahwa ketika sistem mengalami gangguan, motor induksi 3 fasa mengalami pembebanan berlebih bahkan kerusakan mekanik sehingga kenaikan nilai arus dan temperatur menjadi tidak wajar sehingga motor induksi mengalami kondisi abnormal. Pada kondisi tersebut dilakukan tindakan proteksi dengan cara memutus daya motor induksi 3 fasa yang akan menghentikan operasi motor induksi untuk kemudian dilakukan pemeriksaan oleh teknisi.

### D. Defuzzyfikasi

Tahap defuzzyfikasi ini adalah tahap untuk mencari nilai akhir dari output fuzzy. Hasil akhirnya adalah berupa angka atau variabel numerik. Pada kasus ini, hasil akhirnya adalah berupa nilai kondisi motor induksi. Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan proses defuzzyfikasi. Pada kasus ini, akan digunakan metode yang cukup sederhana, yaitu mencari pusat atau centroid (*Center of Area*) dari hasil komposisi output yang diperoleh, di mana hasil dari defuzzyfikasinya adalah titik pusat area dari fungsi keanggotaan keluarannya. Berikut adalah rumus matematisnya.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem proteksi motor induksi 3 fasa dengan Logika Fuzzy ini dilakukan dengan menarik data beberapa kondisi yang terjadi pada motor induksi 3 fasa. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bahwa sistem proteksi dengan logika fuzzy mampu memberikan tindakan yang tepat terhadap gangguan yang terjadi pada motor induksi 3 fasa. Pengujian sistem proteksi dengan logika fuzzy, didapatkan hasil yang telah sesuai dengan rancangan sistem proteksi. Sementara pengujian dilakukan dengan menggunakan motor induksi 3 fasa dengan spesifikasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Daya} &= 0,3 \text{ HP} = 0,22 \text{ KW} \\ \text{Arus} &= 0,62 \text{ A} \\ \text{Tegangan} &= 460 \text{ V} \\ \text{Frekuensi} &= 50 \text{ Hz} \\ \text{RPM} &= 1572 \text{ r/min} \\ \text{Kelas isolasi} &= \text{F} \end{aligned}$$

### A. Pengujian Sistem Proteksi Gangguan Thermal

Pengujian prototipe untuk sistem proteksi gangguan thermal pada motor induksi 3 fasa dilakukan dengan cara mengoperasikan motor induksi 3 fasa yang terhubung dengan

prototipe sistem proteksi ini. Prototipe sistem diaplikasikan di antara inverter dan motor induksi 3 fasa. Pengujian dilakukan pada motor induksi yang dioperasikan dengan mengunci putarannya, sehingga motor sama halnya menerima beban melebihi batas spesifikasinya. Dalam kondisi tersebut arus motor induksi akan meningkat tinggi, dan apabila motor dioperasikan dalam durasi yang lama akan mengalami kenaikan temperatur. Ditentukan setting point untuk sistem mengirimkan peringatan atau notifikasi temperatur tinggi dan setting point maksimum untuk gangguan thermal berdasarkan program logika fuzzy yang telah dibuat seperti pada perancangan sistem.

Dari Tabel 1 dapat diuraikan bahwa terjadi kenaikan nilai temperatur motor induksi 3 fasa seiring dengan durasi motor induksi dioperasikan dengan beban. Selama durasi pengujian yang dilakukan, terjadi kenaikan temperatur motor induksi 3 fasa yang cukup tinggi. Besarnya perubahan kenaikan temperatur tersebut juga dipengaruhi oleh motor induksi 3 fasa yang beroperasi dalam kondisi dengan beban sehingga kinerja atau daya yang dilakukan oleh motor induksi 3 fasa tersebut cukup besar. Pada data no. 1 hingga 7 didapatkan nilai temperatur sebesar 40,0°C hingga 83,0°C. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan thermal menganggap bahwa motor induksi beroperasi dalam kondisi normal. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah tidak trip. Sementara pada data no. 8 hingga 11 didapatkan nilai temperatur sebesar 95,0°C hingga 108,5°C. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan thermal menganggap bahwa motor induksi beroperasi dalam kondisi temperatur tinggi. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah peringatan. Serta pada data no. 12 didapatkan nilai temperatur sebesar 111,5°C. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan thermal menganggap bahwa motor induksi beroperasi dalam kondisi gangguan. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah trip.

### B. Pengujian Sistem Proteksi Arus Lebih

Pengujian prototipe untuk sistem proteksi gangguan arus lebih pada motor induksi 3 fasa dilakukan dengan cara mengoperasikan motor induksi 3 fasa yang terhubung dengan prototipe sistem proteksi ini. Prototipe sistem diaplikasikan di antara inverter dan motor induksi 3 fasa. Pengujian dilakukan pada motor induksi yang dioperasikan dengan mengunci putarannya, sehingga motor sama halnya menerima beban melebihi batas spesifikasinya. Dalam kondisi tersebut motor induksi akan mengalami kenaikan arus. Ditentukan setting point untuk sistem mengirimkan peringatan atau notifikasi arus tinggi dan setting point maksimum untuk gangguan arus lebih berdasarkan program logika fuzzy yang telah dibuat seperti pada perancangan sistem.

Motor induksi 3 fasa yang digunakan mempunyai  $I_n$  sebesar 0,6 A pada *nameplate*-nya. Dengan nilai  $I_n$  sebesar itu maka dapat dicari untuk *setting point* pada gangguan arus lebih yaitu dengan persamaan berikut:

$$I_{set} = I_n \times 110\%$$

$$I_{set} = 0,62 \times 110\%$$

$$I_{set} \approx 0,68 \text{ Ampere}$$

Dari Tabel 2 dapat diuraikan bahwa terjadi kenaikan nilai arus motor induksi 3 fasa seiring dengan durasi motor induksi dioperasikan dengan beban. Selama durasi pengujian yang dilakukan, terjadi kenaikan arus motor induksi 3 fasa yang cukup tinggi. Besarnya perubahan kenaikan temperatur tersebut juga dipengaruhi oleh motor induksi 3 fasa yang beroperasi dalam kondisi dengan beban sehingga kinerja atau daya yang dilakukan oleh motor induksi 3 fasa tersebut cukup besar. Pada data no. 1 hingga 8 didapatkan nilai arus sebesar 0,23; 0,24; dan 0,21 A hingga 0,43; 0,44; dan 0,43 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap bahwa motor induksi beroperasi dalam kondisi normal. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah tidak trip. Sementara pada data no. 9 hingga 11 didapatkan nilai arus sebesar 0,51; 0,53; dan 0,52 A hingga 0,65; 0,67; dan 0,65 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap bahwa motor induksi beroperasi dalam kondisi arus tinggi. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah peringatan. Serta pada data no. 12 didapatkan nilai temperatur sebesar 0,68; 0,69; dan 0,67 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap bahwa motor induksi beroperasi dalam kondisi gangguan. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah trip.

### C. Perhitungan Logika Fuzzy Hasil Pengujian Sistem Proteksi Gangguan Thermal dan Arus Lebih

Dari hasil pengujian sistem proteksi gangguan thermal dan arus lebih motor induksi didapatkan untuk input temperatur, bahwa temperatur motor induksi yang terdeteksi sensor salah satunya bernilai 95,0°C. Nilai temperatur ini akan menjadi patokan awal untuk mencari masing-masing derajat keanggotaan dari input temperatur. Pada Gambar 7 nilai temperatur sebesar 95,0°C akan memotong fungsi keanggotaan rendah dan tinggi. Kemudian dari titik ini, dapat ditentukan masing-masing derajat keanggotaannya dengan cara menarik garis horizontal ke arah sumbu y.

Untuk mencari nilai derajat keanggotaan pada sumbu y, perlu diketahui persamaan garis yang melalui titik perpotongan himpunan rendah dan tinggi. Sebuah fungsi keanggotaan trapesium dan segitiga memiliki nilai fungsi yang berbeda. Untuk mencari nilai derajat keanggotaannya, dapat diselesaikan dengan persamaan berikut.

$$\mu_{rendah}(x) = \frac{100 - x}{100 - 80} = \frac{100 - 95}{100 - 80} = \frac{5}{20} = 0,25$$

$$\mu_{tinggi}(x) = \frac{x - 80}{100 - 80} = \frac{95 - 80}{100 - 80} = \frac{15}{20} = 0,75$$

$$\mu_{lebih}(x) = 0$$

Didapatkan bahwa himpunan fuzzy untuk input temperatur pada nilai 95°C adalah sebagai berikut.

$$\text{Himpunan fuzzy temperatur rendah} = \mu_{rendah}(95) = 0,25$$

$$\text{Himpunan fuzzy temperatur tinggi} = \mu_{tinggi}(95) = 0,75$$

$$\text{Himpunan fuzzy temperatur lebih} = \mu_{lebih}(95) = 0$$

Dari hasil pengujian sistem proteksi gangguan thermal dan arus lebih motor induksi didapatkan untuk input arus, bahwa arus motor induksi yang terdeteksi sensor bernilai 0,44 A. Nilai arus ini akan menjadi patokan awal untuk mencari masing-masing derajat keanggotaan dari input arus. Pada Gambar 8, nilai temperatur sebesar 0,44 A akan memotong fungsi keanggotaan rendah dan tinggi. Kemudian dari titik

ini, dapat ditentukan masing-masing derajat keanggotaannya dengan cara menarik garis horizontal ke arah sumbu y.

Untuk mencari nilai derajat keanggotaan pada sumbu y, perlu diketahui persamaan garis yang melalui titik perpotongan himpunan rendah dan tinggi. Sebuah fungsi keanggotaan trapesium dan segitiga memiliki nilai fungsi yang berbeda. Untuk mencari nilai derajat keanggotaannya, dapat diselesaikan dengan persamaan berikut.

$$\mu_{rendah}(x) = \frac{0,6 - x}{0,6 - 0,44} = \frac{0,6 - 0,44}{0,6 - 0,44} = \frac{0,16}{0,16} = 1$$

$$\mu_{tinggi}(x) = \frac{x - 0,44}{0,6 - 0,44} = \frac{0,44 - 0,44}{0,6 - 0,44} = \frac{0}{0,16} = 0$$

$$\mu_{lebih}(x) = 0$$

Didapatkan bahwa himpunan fuzzy untuk input arus pada nilai 0,44 A adalah sebagai berikut.

$$\text{Himpunan fuzzy arus rendah} = \mu_{rendah}(0,44) = 1$$

$$\text{Himpunan fuzzy arus tinggi} = \mu_{tinggi}(0,44) = 0$$

$$\text{Himpunan fuzzy arus lebih} = \mu_{lebih}(0,44) = 0$$

Penggunaan logika *and* atau *dan* dapat mengindikasikan penggunaan fungsi *min* dalam perhitungannya, yaitu mencari nilai yang paling kecil. Penyelesaian di bawah merupakan proses untuk memperoleh nilai *alpha*, yaitu nilai yang akan digunakan pada proses selanjutnya. Nilai yang dihasilkan pada tahap ini akan digunakan untuk mencari daerah implikasi pada output.

[R1] Jika temperatur **rendah** dan arus **rendah**, maka kondisi **normal**

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \min(\mu_{rendah}(95); \mu_{rendah}(0,44)) \\ &= \min(0,25; 1) \\ &= 0,25 \end{aligned}$$

[R2] Jika temperatur **rendah** dan arus **tinggi**, maka kondisi **peringatan**

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \min(\mu_{rendah}(95); \mu_{tinggi}(0,44)) \\ &= \min(0,25; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] Jika temperatur **tinggi** dan arus **rendah**, maka kondisi **peringatan**

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= \min(\mu_{tinggi}(95); \mu_{rendah}(0,44)) \\ &= \min(0,75; 1) \\ &= 0,75 \end{aligned}$$

[R4] Jika temperatur **tinggi** dan arus **tinggi**, maka kondisi **peringatan**

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= \min(\mu_{tinggi}(95); \mu_{tinggi}(0,44)) \\ &= \min(0,75; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan nilai *alpha* tersebut, diperoleh hasil untuk  $\alpha_1 = 0,25$ ;  $\alpha_2 = 0$ ;  $\alpha_3 = 0,75$ ; dan  $\alpha_4 = 0$ . Nilai-nilai ini adalah nilai derajat yang berada pada sumbu y. Tahap selanjutnya adalah menarik nilai-nilai ini ke fungsi keanggotaan output, sesuai dengan aturan *if-then* yang telah ditetapkan. Nilai  $\alpha_1$  akan digunakan untuk memotong fungsi keanggotaan kondisi normal, sebab hal ini memenuhi kriteria

pada aturan pertama. Nilai  $\alpha_2$  juga digunakan untuk memotong fungsi keanggotaan kondisi normal, sebab memenuhi kriteria pada aturan kedua. Sementara nilai  $\alpha_3$  akan digunakan untuk memotong fungsi keanggotaan kondisi peringatan, sebab hal ini memenuhi kriteria pada aturan ketiga. Serta nilai  $\alpha_4$  juga digunakan untuk memotong fungsi keanggotaan kondisi peringatan, sebab memenuhi kriteria pada aturan keempat. Titik-titik perpotongan ini selanjutnya ditarik ke bawah untuk dicari nilainya pada sumbu x, ini adalah kebalikan dari proses sebelumnya. Dengan mengetahui persamaan garis yang memotong fungsi normal dan peringatan, maka nilai sumbu x dengan sangat mudah dapat diketahui. Proses untuk mencarinya dapat digunakan penyelesaian-penyelesaian berikut dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 9.

$$t_1 = \frac{t_1 - 0}{0,5 - 0} = 0,25$$

$$t_1 = (0,25 \times 0,5) + 0 = 0,125$$

$$t_2 = \frac{1 - t_2}{1 - 0,5} = 0,25$$

$$t_2 = 1 - (0,25 \times 0,5) + 0 = 0,875$$

$$t_3 = \frac{t_3 - 1}{1,5 - 1} = 0,75$$

$$t_3 = (0,75 \times 0,5) + 1 = 1,375$$

$$t_4 = \frac{2 - t_4}{2 - 1,5} = 0,75$$

$$t_4 = 2 - (0,75 \times 0,5) = 1,625$$

Hasil akhir dari tahap ini adalah dapat diperoleh titik-titik implikasi. Setelah memperoleh titik-titik ini, pembahasan dapat kita lanjutkan ke tahap berikutnya, yaitu menggabungkan daerah-daerah implikasi yang telah diketahui.

Komposisi dari semua output dapat dilihat pada Gambar 10. Terlihat hasil dari daerah komposisi adalah dua buah trapesium dengan luasan yang berbeda. Setelah diperoleh daerah implikasi, maka tahap terakhir yang akan dilakukan yaitu defuzzyfikasi. Dari daerah implikasi tersebut dapat ditentukan persamaan (2) himpunan fuzzy yang baru sebagai berikut:

$$\mu(z) = \begin{cases} 0; z \leq 0 \\ \frac{z-0}{0,5-0}; 0 \leq z \leq 0,125 \\ 0,25; 0,125 \leq z \leq 0,875 \\ \frac{1-z}{1-0,5}; 0,875 \leq z \leq 1 \\ \frac{z-1}{1,5-1}; 1 \leq z \leq 1,375 \\ 0,75; 1,375 \leq z \leq 1,625 \\ \frac{2-z}{2-1,5}; 1,625 \leq z \leq 2 \\ 0; z \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

Dapat dibagi hasil daerah implikasi menjadi enam bagian, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Tampak bahwa trapesium akan dibagi menjadi beberapa bagian berbentuk segitiga dan persegi panjang. Rumus mencari luas segitiga sudah lazim, yaitu alas dikali tinggi dibagi dua, sedangkan rumus mencari luas persegi panjang adalah panjang dikalikan

dengan lebar. Proses untuk mencari luas daerah implikasi (A) dapat digunakan penyelesaian-penyelesaian berikut.

$$A_1 = \frac{(0,125 - 0) \times 0,25}{2} = 0,015625$$

$$A_2 = (0,875 - 0,125) \times 0,25 = 0,1875$$

$$A_3 = \frac{(1 - 0,875) \times 0,25}{2} = 0,015625$$

$$A_4 = \frac{(1,375 - 1) \times 0,75}{2} = 0,140625$$

$$A_5 = (1,625 - 1,375) \times 0,75 = 0,1875$$

$$A_6 = \frac{(2 - 1,625) \times 0,75}{2} = 0,140625$$

Berdasarkan persamaan (2), dinyatakan bahwa untuk mencari pusat daerah implikasi, momen dibagi dengan luas daerah. Luas daerah implikasi (A) sudah diperoleh, sementara momen (M) dapat diperoleh dengan memasukkan nilai z ke dalam persamaan (2), kemudian diintegrasikan dengan batas atas dan batas bawah tertentu. Untuk mencari momen (M), dapat disederhanakan persamaan (2) menjadi persamaan (3). Persamaan baru disederhanakan dengan membagi pembilang dengan penyebutnya, sehingga diperoleh bentuk yang lebih sederhana (tidak melibatkan bentuk pecahan). Persamaan baru yang disederhanakan akan menjadi seperti persamaan (3) berikut:

$$\mu(z) = \begin{cases} 0; z \leq 0 \\ 2z; 0 \leq z \leq 0,125 \\ 0,25; 0,125 \leq z \leq 0,875 \\ 2 - 2z; 0,875 \leq z \leq 1 \\ 2z - 2; 1 \leq z \leq 1,375 \\ 0,75; 1,375 \leq z \leq 1,625 \\ 4 - 2z; 1,625 \leq z \leq 2 \\ 0; z \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

Dari persamaan (3) dapat diketahui bahwa integral dilakukan terhadap variabel z. Dengan demikian, perlu dikalikan setiap persamaan dengan nilai z, kemudian dapat diintegrasikan. Karena terdapat batas atas dan batas bawah, maka persamaan dapat diselesaikan dengan memasukkan batas atas pada hasil integrasi, dikurangi dengan batas bawahnya. Proses untuk mencari momen daerah implikasi (M) dapat diselesaikan dengan cara sebagai berikut.

$$M1 = \int_0^{0,125} (2z)zdz = 0,0013$$

$$M2 = \int_{0,125}^{0,875} (0,25)zdz = 0,25 \int_{0,125}^{0,875} z dz = 0,25 \left[ \frac{z^{1+1}}{1+1} \right]_{0,125}^{0,875}$$

$$= 0,25 [0,5z^2]_{0,125}^{0,875} = 0,25 \times 0,375$$

$$= 0,09375$$

$$M3 = \int_{0,875}^1 (2 - 2z)zdz$$

$$= \int_{0,875}^1 2(1 - z)zdz$$

$$= 2 \int_{0,875}^1 (1 - z)zdz$$

$$= 2 \left( \int_{0,875}^1 z dz - \int_{0,875}^1 z^2 dz \right)$$

$$= 2 \times (0,1171875 - 0,011002) = 0,212375$$

$$M4 = \int_1^{1,375} (2z - 2)zdz$$

$$= \left[ z^2(z - 1) - \int (z^2 dz) \right]_1^{1,375}$$

$$= \left[ z^2(z - 1) - \frac{z^3}{3} \right]_1^{1,375}$$

$$= \left[ \frac{1}{3}(2z^3 - 3z^3) \right]_1^{1,375} = 0,17578125$$

$$M5 = \int_{1,375}^{1,625} (0,75)zdz$$

$$= 0,75 \int_{1,375}^{1,625} z dz$$

$$= 0,75 \left[ \frac{z^{1+1}}{1+1} \right]_{1,375}^{1,625}$$

$$= 0,75 [0,5z^2]_{1,375}^{1,625}$$

$$= 0,75 \times 0,375$$

$$M6 = \int_{1,625}^2 (4 - 2z)zdz$$

$$= \int_{1,625}^2 4 - 2z^2 dz$$

$$= \int_{1,625}^2 4z dz - \int_{1,625}^2 2z^2 dz$$

$$= 2,71875 - 2,47264$$

$$= 0,24610$$

Setelah luas (A) dan momen daerah implikasi (M) telah ditemukan, dengan menggunakan rumus centroid, yaitu jumlah momen (M) dibagi dengan total luas daerah implikasi (A), sehingga akan menjadi penyelesaian sebagai berikut.

$$z = \frac{\int \mu(z)zdz}{\int \mu(z)dz}$$

$$z = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6}$$

$$z = \frac{0,0013 + 0,09375 + 0,01432 + 0,17578125 + 0,28125 + 0,24610}{0,015625 + 0,1875 + 0,015625 + 0,140625 + 0,1875 + 0,140625}$$

$$z = \frac{0,81250125}{0,6875}$$

$$z = 1,18182$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh kondisi motor induksi dengan nilai temperatur = 95 dan arus = 0,44 adalah sebesar 1,18182. Dapat dibandingkan hasilnya dengan hasil pengujian sistem proteksi gangguan thermal dan arus lebih bahwa pada nilai temperatur dan arus yang sama maka sistem menetapkan kondisi peringatan dan mengirimkan notifikasi. Dapat dibandingkan juga hasilnya dengan simulasi pada MATLAB. Pada Gambar 12, terlihat bahwa hasil perhitungan manual tepat sama dengan hasil simulasi pada MATLAB.

## V. KESIMPULAN

Hasil dari pengujian serta analisis data “Sistem Proteksi Gangguan Thermal dan Arus Lebih Motor Induksi 3 Fasa pada Mesin Kompresor Menggunakan Metode Logika Fuzzy Dilengkapi Fitur *Mobile App*”, dapat disimpulkan bahwa:

Pada pengujian sistem proteksi gangguan thermal data no. 1 hingga 8 didapatkan nilai arus sebesar 0,23; 0,24; dan 0,21 A hingga 0,43; 0,44; dan 0,43 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap motor induksi beroperasi dalam kondisi normal. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah tidak trip.

Sementara pada data no. 9 hingga 11 didapatkan nilai arus sebesar 0,52; 0,53; dan 0,52 A hingga 0,65; 0,67; dan 0,65 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap motor induksi beroperasi dalam kondisi arus tinggi. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah peringatan. Serta pada data no. 12 didapatkan nilai temperatur sebesar 0,68; 0,69; dan 0,67 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap motor induksi beroperasi dalam kondisi gangguan. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah trip.

Pada pengujian sistem proteksi gangguan arus lebih data no. 1 hingga 8 didapatkan nilai arus sebesar 0,23; 0,24; dan 0,21 A hingga 0,43; 0,44; dan 0,43 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap motor induksi beroperasi dalam kondisi normal. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah tidak trip. Sementara pada data no. 9 hingga 11 didapatkan nilai arus sebesar 0,52; 0,53; dan 0,52 A hingga 0,65; 0,67; dan 0,65 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap motor induksi beroperasi dalam kondisi arus tinggi. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah peringatan. Serta pada data no. 12 didapatkan nilai temperatur sebesar 0,68; 0,69; dan 0,67 A. Pada kondisi tersebut sistem proteksi gangguan arus lebih menganggap motor induksi beroperasi dalam kondisi gangguan. Hal tersebut dibuktikan dengan tindakan proteksi yang terjadi adalah trip.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Tasiem, *Proteksi Sistem Tenaga Listrik 1*. Surabaya: Teknosains ITS, 2017.
- [2] T. Wijatmiko, “Rancang Bangun Alat Pengatur Kecepatan Motor Universal Pada Sewing Machine Motor,” Departemen Teknik Elektro: Universitas Negeri Semarang, 2007.
- [3] D. Firman, “Penggunaan Pengendali Logika Fuzzy untuk Koordinasi Pensaklaran Braking Resistor, Reaktor, dan Kapasitor pada Perbaikan Stabilitas Peralihan Sistem Tenaga Listrik,” Departemen Teknik Elektro: Universitas Indonesia, 2008.