

Perancangan Condition Based Monitoring Pada Transformator Traksi Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani

Fegi Arga Reimondika ^{*1}, Freddy Artadima Silaban²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana

e-mail: ^{*1}41422110110@student.mercubuana.ac.id, ²freddy.artadima@mercubuana.ac.id,

Abstrak

Condition Based Monitoring Real-Time, pengawasan langsung terhadap parameter kondisi mesin untuk mendeteksi perubahan potensial, berfokus pada tekanan gas nitrogen dan suhu minyak transformator traksi di Stasiun ASEAN, dengan menggunakan metode *Fuzzy Mamdani*. Metode ini memberi notifikasi mengenai kondisi *transformator* traksi dan aktivasi kipas, memberikan informasi kepada operator. Arduino Uno R3 berfungsi sebagai penerima dan pengolah nilai sensor. Nilai-nilai tersebut diproses menggunakan *Fuzzy Mamdani*, dikirimkan ke ESP8266, dan ditampilkan pada localhost. Persentase *error* untuk tekanan gas nitrogen (3,7%) dan suhu (1,55%) menghasilkan total persentase 5,25%. Keluaran *Fuzzy Mamdani* adalah 771,53 dengan persentase *error* 0,0019%, dibandingkan dengan hasil uji MATLAB 2023b sebesar 773. Pemantauan *real-time* menunjukkan *transformator* traksi dalam kondisi baik, dengan kontrol tambahan untuk menjaga kondisinya dan meningkatkan keandalan.

Kata kunci—*Condition Based Monitoring, Transformator Traksi, Suhu Minyak, Tekanan Gas N₂, Metode Fuzzy Mamdani.*

Abstract

Condition Based Monitoring Real-Time, direct supervision of machine condition parameters to detect potential changes, focuses on nitrogen gas pressure and oil temperature of the traction transformer at ASEAN Station, using the *Fuzzy Mamdani* method. This method notifies the traction transformer's condition and activates fans, providing information to operators. Arduino Uno R3 functions as a receiver and processor of sensor values. These values are processed using *Fuzzy Mamdani*, sent to ESP8266, and displayed on localhost. Percentage errors for nitrogen gas pressure (3.7%) and temperature (1.55%) result in a total percentage of 5.25%. The *Fuzzy Mamdani* output is 771.53 with a percentage error of 0.0019%, compared to MATLAB 2023b testing results of 773. Real-time monitoring shows the traction transformer is in good condition, with additional control to maintain its condition and improve reliability.

Keywords—*Condition Based Monitoring, Traction Transformer, Oil Temperature, N2 Gas Pressure, Fuzzy Mamdani Method.*

1. PENDAHULUAN

Transformator traksi memegang peran sentral dalam operasional kereta listrik, menyediakan daya vital untuk mobilitas efisien. Kinerja optimal pada transformator traksi ini sangat tergantung pada suhu isolasi dan kondisi tekanan gas N2 yang harus dijaga secara optimal. Kondisi yang terganggu dapat membawa risiko serius terhadap kegagalan sistem. Oleh karena itu, kebutuhan mendesak akan pengembangan strategi pemantauan yang efektif dan proaktif muncul sebagai solusi krusial. {1}

Dalam upaya meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional transformator traksi, pendekatan *Condition Based Monitoring* (CBM) menjadi solusi menarik. CBM menitik beratkan pada pemantauan kondisi transformator secara *real-time*, [2] dan penerapan metode *Fuzzy Mamdani* di dalam kerangka CBM muncul sebagai pilihan cerdas. *Fuzzy Mamdani* memungkinkan pengambilan keputusan yang adaptif, terutama dalam menghadapi kompleksitas kondisi suhu dan tekanan gas N2. Keunggulan metode ini dalam menangani ketidakpastian menjadikannya relevan untuk meningkatkan ketepatan dalam meminimalkan risiko kegagalan dan mengoptimalkan kegiatan pemeliharaan [3].

Selain itu, pentingnya integrasi jaringan LAN dan localhost dalam sistem pemantauan semakin terasa. Jaringan *wireless* memfasilitasi pengelolaan data secara terpusat, sementara localhost memungkinkan pemantauan yang lebih dekat pada tingkat sumber data. [4] Kombinasi keduanya memberikan manfaat signifikan dalam pengelolaan informasi secara holistik, mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik, dan menjawab tuntutan akan efisiensi dan ketepatan dalam operasional transformator traksi. [5]

Maka, pada penelitian ini akan melakukan perancangan yang berguna untuk melakukan pemantauan secara *real-time* untuk mengetahui nilai tekanan gas N2 dan suhu minyak transformator traksi yang diolah menggunakan metode *fuzzy mamdani*. serta penggunaan jaringan LAN yang terhubung dengan localhost, agar data dapat ditampilkan menjadi sebuah grafik, penyimpanan data dan pemberitahuan pengaktifan kipas kepada operator.

Literature Review

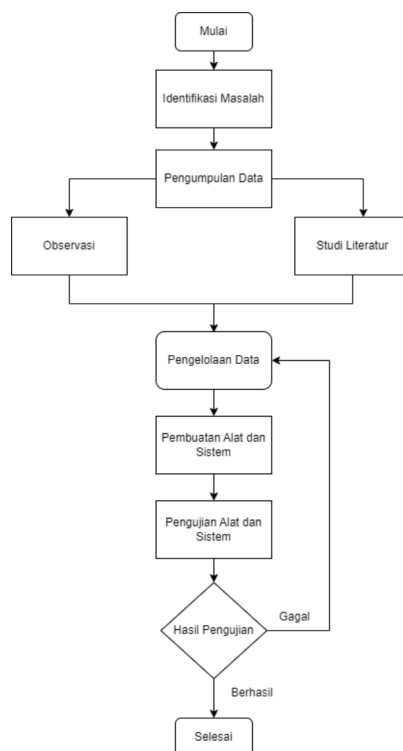
1. Riset oleh [1] L. Jin, Z. Zhou, R. Zhan, G. Yang and Y. Zhang, "Optimal Layout and Overheat Monitoring for Components of Highly Reliable Relay Protection Equipment," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 85615-85625, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3304276. Tata letak yang dioptimalkan guna mengurangi suhu komponen. Tujuannya untuk mengurangi risiko overheating, meningkatkan efisiensi dan memastikan kinerja sistem yang handal
2. Riset oleh [2] C. Chuang, L. Ningyun, J. Bin and X. Yin, "Condition-based maintenance optimization for continuously monitored degrading systems under imperfect maintenance actions," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 31, no. 4, pp. 841-851, Aug. 2020, doi: 10.23919/JSEE.2020.000057. Pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) dalam konteks sistem yang mengalami degradasi terus-menerus yang dipantau.
3. Riset Oleh [3] Ardania, Lutfi (2020), "Perancangan Sistem Kontrol Suhu Pada Ruang Pengujian Ban menggunakan Logika Fuzzy Berbasis Arduino Uno". Membuat sistem kontrol suhu pada ruang pengujian ban menggunakan Logika Fuzzy berbasis Arduino Uno

- Riset oleh [4] Febriyanti, Nurliana (2023) “Prototipe jaringan Ethernet Pada Data Logger suhu dan Kelembapan Menggunakan Protokol ModBus TCP/IP di PT. GMF AEROASIA”. Membuat Prototipe Data logger suhu dan kelembapan menggunakan protokol ModBus TCP/IP.
- Riset oleh [5] Afriansyah, Nurizal (2022) “Rancang Bangun Monitoring Suhu Minyak Transformator IBT (Inter-Bus Trafo) Dengan Wireless Sensor Network”. Merancang Sistem Monitoring suhu Transformator dengan Wireless Sensor Network (WSN)

Berdasarkan peninjauan literatur yang telah dilakukan, tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mengimplementasikan sebuah *Condition Based Monitoring Real-time System* pada tekanan gas nitrogen (N₂) dan suhu pada minyak transformator traksi, yang dilanjutkan pada penggunaan metode *Fuzzy Mamdani* untuk aktivasi kipas pendingin transformator traksi serta menampilkan grafik tren dan penyimpanan data ke *localhost*.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk membuat sebuah model dan prototipe sistem untuk menguji konsep *condition based monitoring system* dan metode *fuzzy mamdani* dengan pendekatan *Design Research Method* (DRM), sehingga didapatkan pemenuhan kebutuhan yang tepat pada implementasi. Berikut Gambar 1. Flowchart Penelitian.



Gambar 1 Flowchart Penelitian

Prototipe terintegrasi dengan objek penelitian yaitu *transformator* traksi guna mengetahui nilai tekanan gas N₂ dan suhu minyak transformator traksi secara *real-time*. Nilai

tersebut di proses menggunakan logika *fuzzy mamdani* sehingga mendapatkan nilai keluaran logika *fuzzy mamdani*, maka, akan terdapat 3 nilai yaitu tekanan gas N₂, suhu minyak dan keluaran fuzzy. 3 nilai tersebut dibentuk menjadi sebuah data pada arduino uno R3 dan ditransmisikan ke ESP 8266 melalui serial TX-RX. Data akan dipecah untuk dikirimkan ke database *localhost* dan ditampilkan pada laman *localhost* melalui jaringan WiFi. Nilai keluaran *Fuzzy* yang tersimpan diubah menjadi bahasa *deactive fan*, *Normal fan* dan *Fast Fan*. Pada ESP 8266 juga ditambahkan fitur kontrol guna penyalan kipas pendingin *transformator* traksi, sehingga diharapkan *operator* dapat melakukan penyalan kipas pendingin *transformator* secara *remote*. Berikut Gambar 2. Cara Kerja Rancangan.



Gambar 2. Cara Kerja Rancangan

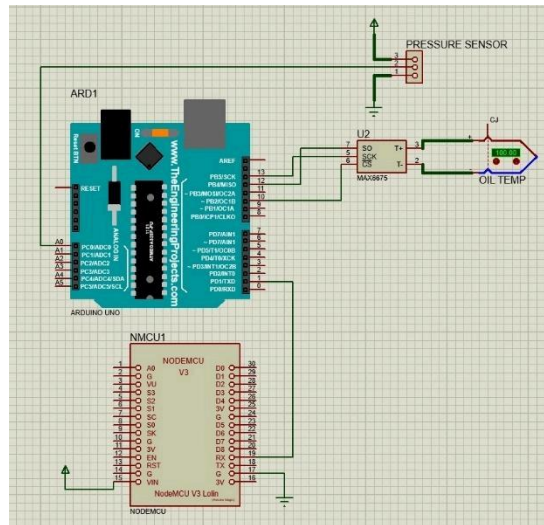
Pada gambar diatas menjelaskan bagaimana rancangan bekerja pada penelitian guna terpenuhinya tujuan penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perancangan Elektrik (Electrical)

Perancangan Elektrik ini menjelaskan tentang *wiring* pada perancangan, yang pertama terdapat dua sensor yaitu tekanan gas N₂ dan suhu minyak *transformator* traksi, dimana sensor tekanan suhu mempunyai tiga pin, yang pertama pin 1 terhubung pada ground, kedua pembacaan nilai analog yang terhubung pada *Arduino Uno R3*, pin 3 terhubung pada Pin power DC 5V. pada sensor suhu MAX6675 pin SO terhubung pada pin 12, SCK terhubung pada pin 13, CS terhubung pada pin 10 di *Arduino Uno R3*.

NodeMCU ESP8266 digunakan sebagai mikrokontroler yang menghubungkan pembacaan dan hasil pengolahan data dari *arduino uno R3*, diteruskan ke *localhost*. Maka, dengan hubung serial pin RX terhubung dengan pin TX *arduino uno R3*, pin ground terhubung pada ground *Arduino Uno R3* dan pin Vin terhubung dengan Vin *Arduino Uno R3*. Berikut ini Gambar 4 Rancangan Elektrikal.



Gambar 4 Rancangan Elektrikal

Dari gambar 4 Rancangan Elektrikal, maka rancangan elektrikal terbagi dari empat bagian, pertama sensor tekanan gas N2 dan suhu minyak, bagian pengolah data masukan, keluaran, desain *fuzzy mamdani* terdapat pada arduino uno R3, NodeMCU ESP8266 penghubung rancangan pada jaringan.

2. Perancangan Perangkat Lunak (*Software*)

Pada perancangan ini *sublime text* digunakan sebagai pembuatan dan *editor* dalam pembuatan sintaks dan penggunaan plugin, dalam penggunaannya *sublime text* mendukung dengan fitur *code snippets*.

```

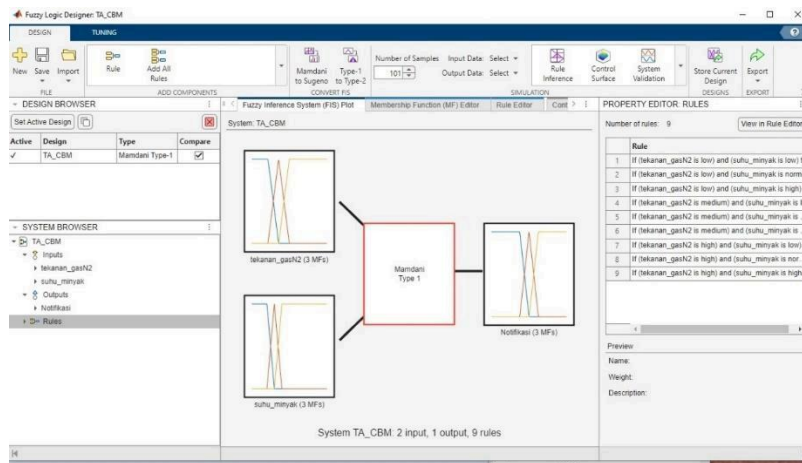
21 <!-- tempat untuk tampilan grafik -->
22 <div class="container" style="text-align: center;">
23 <h3>Realtime Monitoring Traction Transformer 1</h3>
24 <p>(Data yang ditampilkan adalah 5 data terakhir)</p>
25 </div>
26
27 <!-- div untuk grafik -->
28 <div class="container">
29 <div class="container" id="responsecontainer" style="
30 width: 100%; text-align: center;"></div>
31 </div>
32 <!-- Pemanis untuk menampilkan gambar -->
33 <div class="container" style="text-align: center;">
34 
36 </div>
37 <script type="text/javascript" src="assets/js/
38 jquery.min.js"></script>
39 <script type="text/javascript" src="bootstrap.min.js"></
40 script>
41 </body>
42 </html>
    
```

Gambar 6 Pembuatan kode *localhost PHP* di *sublime text*

Terdapat 3 kode skrip, yang pertama adalah *index.php* untuk membuat tampilan antar muka dengan operator. Kedua, *Data.php* untuk fitur informasi berupa angka, teks dan tombol

kontrol pada laman web *localhost*. Ketiga, TerimaData.php untuk menghubungkan nilai yang dikirimkan ESP8266 ke *localhost database*.

Pada perancangan ini suhu minyak dan tekanan gas N2 sebagai 2 variabel sensor yang terbaca serta satu variabel keluaran notifikasi, dan diberikan sebuah fungsi keanggotaan dalam setiap variabel tersebut dan diberikan aturan *FIS* mamdani. Berikut ini adalah gambar dari MATLAB 2023b pada gambar 7.

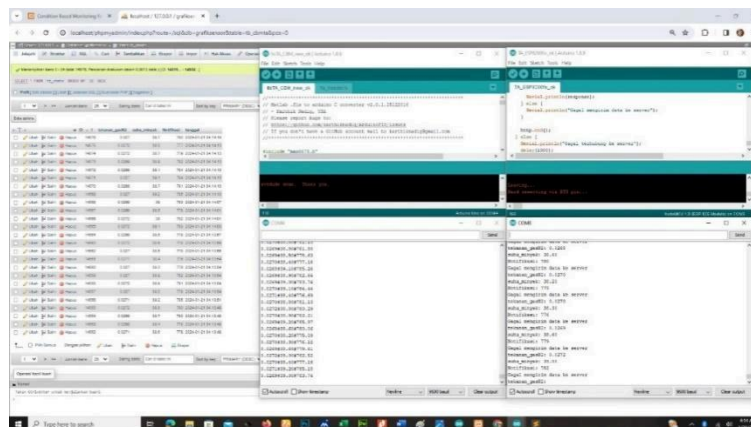


Gambar 7 MATLAB Fuzzy Logic Designer

Terdapat dua bagian proses FIS Mamdani yaitu fuzzifikasi dan defuzzifikasi. Pada proses fuzzifikasi yaitu himpunan suhu dan tekanan gas N2 dan pada proses himpunan defuzzifikasi yaitu notifikasi.

3. Pengujian web localhost dan penyimpanan database

Pada perancangan ini dibuat database penyimpanan basis data di PHPMyAdmin *localhost*. Berikut untuk penyimpanan basis data atau database pada gambar 8 Penyimpanan basis data di PHPMyadmin *localhost*.



Gambar 8 Penyimpanan Nilai pada Tekanan gas N2 dan Suhu minyak pada *Transformator*

Data yang sudah dipisah pada ESP8266 dikirimkan ke penyimpanan database. Nilai tekanan gas N₂, suhu minyak dan nilai keluaran *fuzzy mamdani* berhasil ditampilkan. Berikut pada Gambar 9 Tampilan dari web localhost.



Gambar 9 Tampilan dari web localhost

4. Pengujian *Fuzzy Mamdani*

Pada pengujian metode *Fuzzy Mamdani* membahas bagaimana proses perhitungan dari tahapan pembentukan awal fuzzifikasi hingga defuzzifikasi. Penghitungan berdasarkan hasil pengujian langsung pada objek pada nilai tekanan gas N₂ 0,027 Mpa dan suhu minyak 38°C. Berikut pada tabel 1 Himpunan Fuzzy

Tabel 1 Himpunan Fuzzy

No	Fungsi	Variabel	Himpunan Fuzzy	Range
1	Input 1	Tekanan Gas N ₂	<i>Low</i>	0 – 0.025
			<i>Medium</i>	0.015 – 0.035
			<i>High</i>	0.025 – 0.035
2	Input 2	Suhu Minyak	<i>Low</i>	0 – 20
			<i>Normal</i>	20 – 40
			<i>High</i>	30 – 40
3	Output	Notifikasi	<i>Deactive Fan</i>	0 – 500
			<i>Normal Fan</i>	385 – 640
			<i>Fast Fan</i>	500 – 1024

Adapun parameter Fuzzy Mamdani yang digunakan pada program arduino dan php, pada tabel berikut.

Tabel 2 Parameter Fuzzy Mamdani

Variabel	Himpunan Fuzzy	Range Input	Notifikasi
Tekanan Gas N ₂	Low	tekanan gas N ₂ < 0.015	<i>Deactive Fan</i>
	Medium	$0.015 \leq \text{tekanan gas N}_2 \leq 0.035$	<i>Deactive Fan</i>
	High	$0.035 < \text{tekanan gas N}_2 \leq$	<i>Deactive Fan</i>
Suhu Minyak	Low	$20 < \text{suhu minyak} < 30$	<i>Deactive Fan</i>

	Normal	$30 \leq \text{suhu minyak} \leq 40$	Normal Fan
	High	Suhu minyak > 40	Fast Fan
Notifikasi	Deactive Fan	Notifikasi < 384	Deactive Fan
	Normal Fan	$384 \leq \text{Notifikasi} \leq 640$	Normal fan
	Fast Fan	Notifikasi > 640	Fast Fan

Dari tabel 2 nilai keluar *fuzzy* akan diproses untuk menjadi linguistik keluaran *Fuzzy Mamdani* yang ditampilkan pada web.

5. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi pada metode *Fuzzy Mamdani* adalah pembentukan himpunan *Fuzzy*. Prosesnya dengan cara mentransformasikan masukan himpunan tegas ke dalam himpunan *Fuzzy*. Pada perancangan ini sudah dibuat berdasarkan nilai suhu minyak transformator terbawah yang pernah terjadi dan suhu tertinggi yang di rekomendasikan pada buku manual.

Variabel *Fuzzy* input tekanan gas N2 sebesar 0,027 Mpa, nilai keanggotaannya sebagai Berikut ini adalah tabel hasil dari keluaran *fuzzy mamdani* pada MATLAB.

Tabel 3 Keluaran Fuzzy di Matlab 2023b

Aturan	Nilai tekanan gas N2	Nilai suhu minyak	Keluaran (MIN)
1	0	0	0
2	0	0,2	0
3	0	0,8	0
4	0,8	0	0
5	0,8	0,2	0,2
6	0,8	0,8	0,8
7	0,2	0	0
8	0,2	0,2	0,2
9	0,2	0,8	0,2

Pada tabel 3 diatas menjelaskan derajat keanggotaan dalam pada *fuzzy mamdani* adalah nilai terkecil dari tekanan gas N2 dan Nilai suhu minyak, menunjukan 0,2 dan 0,8 sebagai komposisi aturan yang dilanjutkan pada implikasi menggunakan aturan nilai terendah dan agregasi nilai tertinggi.

6. Komposisi Aturan

Fungsi implikasi pada metode *fuzzy mamdani* yaitu komposisi aturan yang bertujuan untuk menentukan inferensi dari kumpulan dan korelasi antar aturan dengan menggunakan metode MAX. Komposisi aturan pada perancangan ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Notifikasi normal_fan} &= \text{MAX (R5; R8;R9)} \\ &= \text{MAX (0,2; 0,2; 0,2)} \\ &= 0,2 \end{aligned}$$

Pada gambar 10 Derajat keanggotaan notifikasi normal fan memiliki derajat keanggotaan 0,2. Dan untuk notifikasi fast fan memiliki derajat keanggotaan 0,8, terlihat pada Gambar 11. Derajat keanggotaan notifikasi fast fan.

$$\begin{aligned} \text{Notifikasi fast fan} &= \text{MAX (R6)} \\ &= \text{MAX (0,8)} \end{aligned}$$

$$= 0,8$$

Pada gambar 11 derajat keanggotaan notifikasi normal fan memiliki derajat keanggotaan sebesar 0,8. Hal ini menunjukkan bahwa notifikasi fast fan yang sebagai keluaran fuzzy mamdani.

Berikut ini merupakan Agregasi

$$\begin{aligned} \text{Nilai } t1 &= \\ 0,2 &= \frac{(x-200)}{(1023-200)} \\ t1 &= 364,6 \end{aligned}$$

1) Nilai t2

$$\begin{aligned} 0,8 &= \frac{(t2-200)}{(1023-200)} \\ t2 &= 858,4 \end{aligned}$$

Maka, komposisi aturan pada fungsi keanggotaan Notifikasi yaitu

$$\mu(z) = \{ 0,2; z \leq 364,6 \frac{(z-200)}{(1023-200)}; 364,6 \leq z \leq 858,4 \ 0,8; z \geq 858,4$$

7. Defuzzifikasi

Dalam defuzzifikasi dilakukan konversi nilai *Fuzzy* dari hasil komposisi aturan ke dalam sebuah bilangan tegas. Metode yang digunakan dalam pengujian ini adalah defuzzifikasi metode *centroid*, rumusnya sebagai berikut:

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

Menghitung momen Notifikasi, sebagai berikut;

Perhitungan untuk momen 1 (M1);

$$\begin{aligned} M1 &= \int_{364,6}^{858,4} 0,2zdz \\ &= 60391 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk momen 2 (M2);

$$\begin{aligned} M2 &= \int_{364,4}^{858,4} \frac{z-200}{1023-200}zdz \\ &= 184961 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk momen 3 (M3);

$$\begin{aligned} M3 &= \int_{858,4}^{1023} 0,8zdz \\ &= 123871 \end{aligned}$$

Luas setiap daerah pada Nofikasi, yaitu;

Perhitungan luas daerah 1 (A1)

$$A1 = \int_{364,6}^{858,4} 0,2 dz$$

$$= 98,76$$

Perhitungan luas daerah 2 (A2)

$$A2 = \int_{364,6}^{858,4} \frac{z-200}{1023-200} dz$$

$$= 246,9$$

Perhitungan luas daerah 3 (A3)

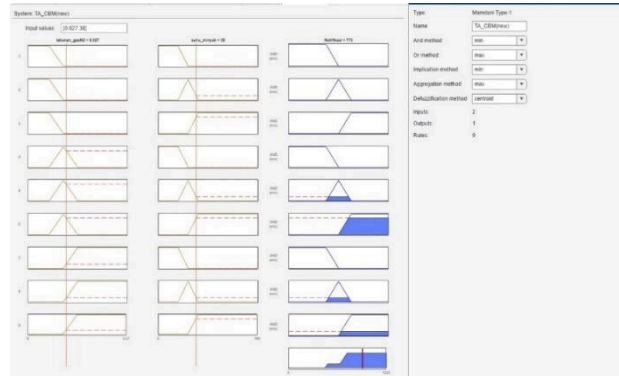
$$A3 = \int_{858,4}^{1023} 0,8 dz$$

$$= 132$$

Dari perhitungan diatas, maka dapat diketahui hasil titik pusat dari daerah *Fuzzy* pada Notifikasi, yaitu

$$z_{Notifikasi} = \frac{M1+M2+M3}{A1+A2+A3} = \frac{60391 + 184959 + 123871}{98,76+246,9+132} = 771,53$$

Berdasarkan proses perhitungan aturan Fuzzy Inference System Mamdani. Nilai dari keluaran pada perancangan ini adalah 771,53 dengan rentang normal dan cepat. Berikut Gambar 15 merupakan pengujian perhitungan dari Fuzzy Mamdani di MATLAB.



Gambar 15 Pengujian Perhitungan Dari Fuzzy Mamdani di MATLAB

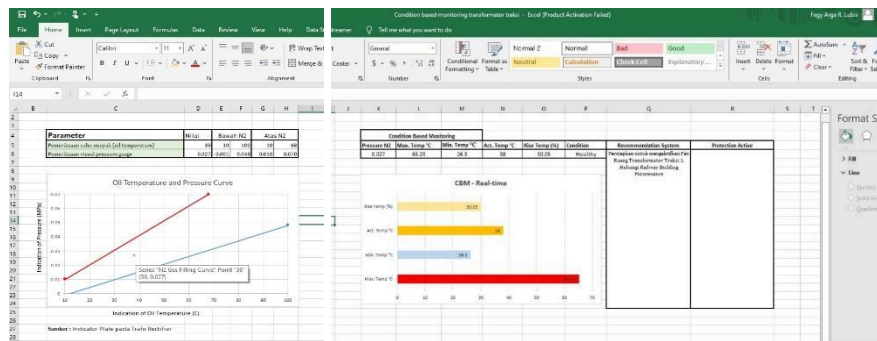
$$\% \text{ error} = \left| \frac{\text{Nilai perhitungan MATLAB} - \text{Nilai perhitungan}}{\text{Nilai perhitungan MATLAB}} \right| \times 100\%$$

$$\% \text{ error} = \left| \frac{773 - 771,53}{773} \right| \times 100\%$$

$$= 0,0019 \%$$

8. Hasil dari Pemeriksaan Kondisi *Transformator* Traksi

Setelah mendapatkan nilai tekanan gas N2 dan suhu minyak *transformator* traksi berdasarkan *Condition Based Monitoring*. Dilakukan untuk pengujian untuk mengetahui kondisi dari operasi transformator traksi berdasarkan kurva *Oil Temperature and Pressure Curve*. Berikut ini Gambar 16 Nilai tekanan gas N2 dan suhu minyak.



Gambar 16 Nilai tekanan gas N2 dan suhu minyak

4. KESIMPULAN

1. Perancangan *Condition Based Monitoring* Pada *Transformator* Traksi menggunakan Metode *Fuzzy Mamdani* Pada Gardu Traksi Stasiun ASEAN PT. MRT Jakarta telah berhasil.
2. Nilai dari Suhu minyak, tekanan gas N2 dan *fuzzy transformator* traksi satu sudah ditampilkan pada web, dalam bentuk nilai dan grafik.
3. Pengujian terhadap logika *Fuzzy Mamdani* dilakukan perbandingan antara perhitungan manual dengan perhitungan dari sistem pada Matlab. Hasil persentase error pada kipas sebesar 0.0019%.
4. Kondisi *Transformator* Traksi dalam keadaan *Healthy*. Tekanan gas N2 dan Suhu minyak masuk kedalam kurva suhu minyak dan tekanan gas N2.

5. SARAN

1. Pengembangan perancangan pada sistem ini dapat dilakukan penambahan dari perancangan sistem kendali kipas guna mendapatkan kecepatan kipas pendingin *transformator* traksi yang tepat.
2. Penambahan untuk fitur dalam pengukuran tegangan dan arus yang dapat digabungkan pada database *localhost*.
3. Penggunaan perangkat keras yang lebih baik sehingga waktu pembacaan, penyimpanan, penampilan dan grafik lebih baik dari perancangan ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Freddy Artadima Silaban, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan dukungan yang tak ternilai selama penyelesaian penelitian ini. Terima kasih kepada rekan-rekan Mahasiswa Universitas Mercu Buana atas dukungan dan kerjasama yang diberikan. Terima kasih kepada keluarga yang

memberikan doa dan semangat dalam setiap langkah penulis dalam menyelesaikan penelitian ini, Dan terima kasih kepada pihak-pihak yang senantiasa membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Jin, Z. Zhou, R. Zhan, G. Yang and Y. Zhang, "Optimal Layout and Overheat Monitoring for Components of Highly Reliable Relay Protection Equipment," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 85615-85625, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3304276..
- [2] C. Chuang, L. Ningyun, J. Bin and X. Yin, "Condition-based maintenance optimization for continuously monitored degrading systems under imperfect maintenance actions," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 31, no. 4, pp. 841-851, Aug. 2020, doi: 10.23919/JSEE.2020.000057.
- [3] Ardania, Lutfi (2020), "Perancangan Sistem Kontrol Suhu Pada Ruang Pengujian Ban menggunakan Logika Fuzzy Berbasis Arduino Uno". S1 thesis, Universitas Mercu Buana.
- [4] Febriyanti, Nurliana (2023) "Prototipe jaringan Ethernet Pada Data Logger suhu dan Kelembapan Menggunakan Protokol ModBus TCP/IP di PT. GMF AEROASIA". S1 thesis, Universitas Mercu Buana
- [5] Afriansyah, Nurizal (2022) "Rancang Bangun Monitoring Suhu Minyak Transformator IBT (Inter-Bus Trafo) Dengan Wireless Sensor Network". S1 thesis, Universitas Mercu Buana.
- [6] V. J. Hodge, S. O'Keefe, M. Weeks and A. Moulds, "Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 1088-1106, June 2015, doi: 10.1109/TITS.2014.2366512.
- [7] Sunardi, A. Yudhana and Furizal, "Tsukamoto Fuzzy Inference System on Internet of Things-Based for Room Temperature and Humidity Control," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 6209-6227, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3236183.
- [8] Altay, Ramazan & Santisteban, Agustín & Olmo, Cristian & Renedo, Carlos & Ortiz, Alfredo & Ortiz, Félix & Delgado, F.. (2020). Use of Alternative Fluids in Very High-Power Transformers: Experimental and Numerical Thermal Studies. *IEEE Access*. 8. 207054-207062. 10.1109/ACCESS.2020.3037672.
- [9] K. Wei, W. Wang, Z. Hu and M. Du, "Condition Monitoring of IGBT Modules Based on Changes of Thermal Characteristics," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 47525-47534, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909928.
- [10] Gil, E.S., Sivilla, J.E.M., González, A.S. et al. Fuzzy logic applied to the diagnosis of technical conditions of distribution transformers. *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 129 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00301-w>
- [11] Jiménez-Navarro, M.J., Martínez-Ballesteros, M., Martínez-Álvarez, F. et al. A new deep learning architecture with inductive bias balance for transformer oil temperature forecasting. *J Big Data* 10, 80 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00745-0>
- [12] Peter Brncal, Miroslav Gutten, Diagnostics of Insulating Condition of Traction Transformer by Frequency Method, *Transportation Research Procedia*, Volume 55, 2021, Pages 977-982, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.067>.
- [13] Ivan Ukhov, Andrey Sotskov, Viktor Anisimov, Fyodor Ryabtsev, Aleksandr Marusin, Alexey Marusin, Influence of performance criteria on the selection of electric traction equipment and a temperature control system for a battery-powered vehicle with an electric traction drive, *Transportation Research Procedia*, Volume 57, 2021, Pages 711-720, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.104>.
- [14] A. Medina-Santiago et al., "Adaptive Model IoT for Monitoring in Data Centers," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 5622-5634, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963061.
- [15] Zhao, Z., Wu, J., Li, T. et al. Challenges and Opportunities of AI-Enabled Monitoring, Diagnosis & Prognosis: A Review. *Chin. J. Mech. Eng.* 34, 56 (2021). <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00570-7>

- [16] Durgesh, Beri & Reddy, Gurusundar & Reddy, M & Manoz, K & Reddy, Kumar & Ijmtst, Editor. (2022). Design and Implementation of Transformer Health Monitoring using IOT. International Journal for Modern Trends in Science and Technology. 8. 99-104. 10.46501/IJMTST0812016.
- [17] Ukiwe, E.K., Adeshina, S.A. & Tsado, J. Techniques of infrared thermography for condition monitoring of electrical power equipment. Journal of Electrical Systems and Inf Technol 10, 49 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00115-z>
- [18] Aprililia Ningrum, Dewi (2020) Perancangan Sistem Exhasut Fan Otomatis Berbasis Sensor Suhu DHT22 Pada Panel Listrik Standing. S1 thesis, Universitas Mercu Buana.