

Sistem Peringatan Tingkat Kerentanan Bangunan Berbasis Sensor IMU dengan Metode Fuzzy

Muhammad Fikri Ahsanandi*¹, Lukman Awaludin²

¹Program Studi Elektronika dan Instrumentasi, FMIPA UGM, Yogyakarta, Indonesia

²Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta, Indonesia

e-mail: *¹fikriahsanandi@mail.ugm.ac.id, ²lukman.awaludin@ugm.ac.id

Abstrak

Negara Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi besar terhadap terjadinya gempa bumi. Bangunan yang merupakan salah satu infrastruktur yang sangat penting bagi kehidupan manusia, merupakan sasaran utama bagi bencana alam gempa bumi yang sering terjadi dan dapat menimbulkan kerusakan yang tidak terduga. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem peringatan yang dapat mengukur dan mengamati getaran yang terjadi dengan besar tertentu untuk mengetahui tingkat kerentanan bangunan tersebut.

Sistem ini menggunakan metode logika fuzzy Mamdani dengan proses defuzzifikasi centroid. Logika fuzzy tersebut digunakan pada sistem peringatan untuk menentukan tingkat bahayanya. Masukan dari sistem terdiri dari nilai resonansi bangunan dan nilai simpangan bangunan. Masukan tersebut diperoleh dari pembacaan sensor IMU MPU6050. Proses defuzzifikasi menghasilkan nilai keluaran crisp berupa rentang keputusan alarm. Data yang diolah dari pembacaan sensor ditampilkan dalam web server sebagai antarmuka.

Berdasarkan hasil pengujian sistem peringatan tingkat kerentanan pada purwarupa bangunan yang telah dilakukan, akurasi logika fuzzy mencapai 95% dari 20 kali pengambilan data. Sistem peringatan yang dirancang dapat berjalan secara real time. Secara keseluruhan proses mulai dari pembacaan sensor hingga akuisisi data dapat berjalan dengan baik.

Kata kunci—Logika fuzzy, Sensor IMU, Sistem peringatan, Kerentanan bangunan

Abstract

Indonesia is a country that has great potential for earthquakes. Buildings, which are one of the most important infrastructures for human life, are the main targets for earthquakes that often occur and can cause unexpected damage. Therefore, we need a warning system that can measure and observe vibrations that occur with a certain magnitude to determine the level of vulnerability of the building.

This system uses Mamdani fuzzy logic method with centroid defuzzification process. The fuzzy logic is used in the warning system to determine the level of danger. The input from the system consists of building resonance value and building drift value. The input is obtained from the reading of the IMU MPU6050 sensor. The defuzzification process produces a crisp output value in the form of an alarm decision range. The processed data from sensor readings is displayed in the web server as an interface.

Based on the results of testing the vulnerability level warning system on the building prototype that has been done, the accuracy of fuzzy logic reaches 95% from 20 times of data collection. The warning system designed can run in real time. Overall the process from sensor reading to data acquisition can run well.

Keywords—Fuzzy logic, IMU sensor, Warning system, Building vulnerability

1. PENDAHULUAN

Negara Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi besar terhadap terjadinya gempa bumi. Maka dari itu kebutuhan informasi peringatan gempa bumi dengan cepat dan tepat sangat dibutuhkan agar dapat meminimalisir dampak yang terjadi, namun saat ini informasi tersebut dianggap masih kurang [1]. Bangunan yang merupakan salah satu infrastruktur yang sangat penting bagi kehidupan manusia, merupakan sasaran utama bagi bencana alam gempa bumi yang sering terjadi dan dapat menimbulkan kerusakan yang tidak terduga. Kondisi tersebut perlu diperhatikan sehingga ketahanan infrastruktur terpantau dengan baik dan tetap terjaga. Setiap bangunan memiliki kerentanan tertentu dan harus selalu diwaspadai.

Seiring perkembangan teknologi, getaran pada suatu bangunan dapat dipantau untuk memberikan kemudahan dalam pengukuran data. Proses ini digunakan sebagai penunjuk parameter-parameter yang ada pada struktur bangunan untuk menilai kondisinya secara berkelanjutan. Dalam pemantauan kondisi bangunan perlu diperhatikan kualitas sebuah bangunan, salah satunya dari faktor nilai frekuensi natural yang dimilikinya. Salah satunya dengan melakukan pengukuran frekuensi natural bangunan tersebut melalui pengukuran mikrotremor. Akan tetapi masih sedikit penelitian mengenai kerentanan bangunan terhadap getaran [2].

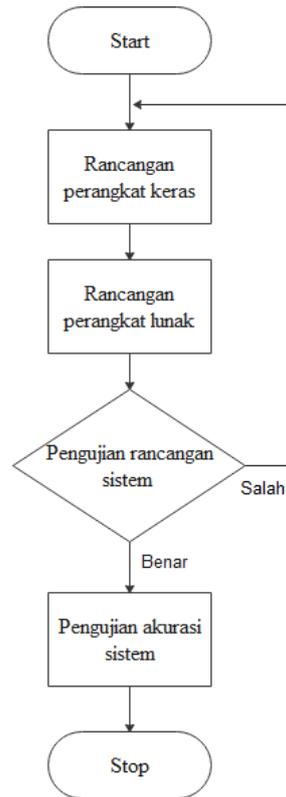
Oleh karena itu, penulis bertujuan melakukan penelitian terhadap sebuah bangunan yang dapat diukur dan diamati getaran yang terjadi dengan besar tertentu untuk mengetahui tingkat kerentanan bangunan tersebut. Pengukuran tersebut dilakukan secara otomatis dengan tujuan agar informasi peringatan dini terhadap terjadinya bahaya pada bangunan tersebut dapat diperoleh dengan cepat dan tepat, serta agar dapat meminimalisir dampak yang terjadi. Objek yang penulis gunakan dalam penelitian ini adalah purwarupa bangunan dengan dasar lantai dan dinding pada purwarupa bangunan yang masing-masing telah dipasang sebuah sensor.

Sistem ini menggunakan sensor IMU MPU6050 untuk mendeteksi data sinyal yang dihasilkan oleh getaran [3]. Hasil dari data tersebut diolah dengan menggunakan analisis metode FSR (*Floor Spectral Ratio*) untuk digunakan sebagai perhitungan besar resonansi terjadinya getaran pada bangunan [4]. Dengan tujuan dapat mengetahui dan memantau tingkat kerentanan bangunan tersebut apakah akan aman jika menerima getaran tertentu berdasarkan pengukuran resonansi dan simpangan bangunan. Pada sistem peringatan untuk menentukan tingkat bahayanya menggunakan algoritma logika fuzzy yang memiliki karakteristik kompleksitas rendah dan pengolahan informasi secara cepat [5]. Sehingga sistem dapat memberikan peringatan secepat mungkin secara otomatis pada kondisi yang tepat sesuai parameter dan aturan yang telah ditetapkan. Selain itu juga karena masukan data berupa non-linear, logika fuzzy mampu memodelkan fungsi-fungsi non-linear yang sangat kompleks.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan Sistem

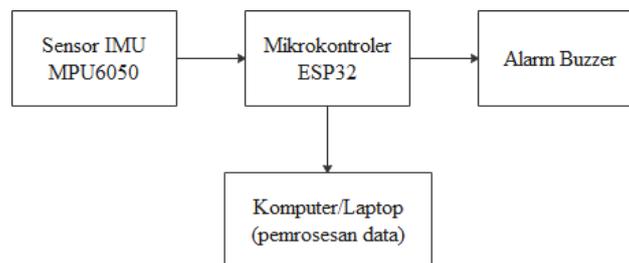
Dalam melakukan perancangan sistem, terdapat sistematika atau tahapan-tahapan yang harus dikerjakan untuk mendapatkan sebuah sistem yang langkah-langkahnya tepat dan sesuai dengan prosedur. Dalam tahapannya terdapat perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, pengujian rancangan sistem dan pengujian akurasi keberhasilan sistem. Tahapan penelitian ditunjukkan pada gambar 1 diagram alir berikut.



Gambar 1 Diagram alir tahapan penelitian

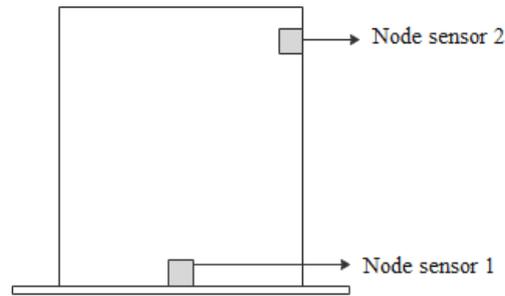
2.2 Rancangan Perangkat Keras

Sistem ini dirancang dengan beberapa perangkat keras seperti sensor IMU MPU6050, mikrokontroler ESP32, *buzzer* dan Laptop. Laptop difungsikan sebagai sumber tegangan untuk menyalakan mikrokontroler dan pemroses data. Yang mana mikrokontroler tersebut menggunakan ESP32 guna memprogram sensor dan memprosesnya menjadi data luaran. Pembacaan data didapatkan dari sensor IMU MPU6050. Keluaran berupa *alarm* yang dihasilkan oleh *buzzer* jika dalam kondisi yang mengakibatkan terjadinya bahaya kerusakan pada bangunan. Rancangan perangkat keras digambarkan dalam diagram berikut.



Gambar 2 Rancangan perangkat keras

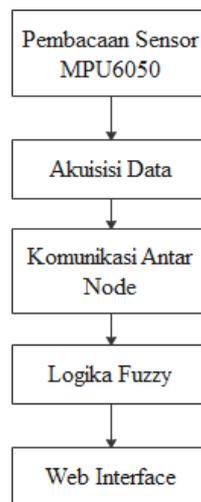
Perangkat keras tersebut akan dipasang pada sebuah purwarupa bangunan yang menjadi alat uji. Purwarupa bangunan tersebut rencana akan dibuat dengan ukuran tinggi 60 cm. Dalam penempatan *node* sensor juga perlu diperhatikan tata letaknya [6]. Peletakan *node* sensor di purwarupa bangunan dilakukan dengan menempatkan *node* sensor 1 di titik tengah bangunan atau di posisi *center of building* lantai [7]. Sedangkan *node* 2 pada sisi samping purwarupa ditunjukkan oleh Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Rancangan purwarupa bangunan

2.3 Rancangan Perangkat Lunak dan Program

Sistem ini selain dirancang menggunakan perangkat keras, juga dirancang menggunakan perangkat lunak. Perangkat lunak yang digunakan yaitu Arduino IDE dan MATLAB. Arduino IDE digunakan untuk memprogram mikrokontroler ESP32, sedangkan MATLAB digunakan untuk membandingkan *rule* dan *output* fuzzy dari sistem. Di dalam perangkat lunak tersebut dibuat beberapa program untuk menjalankan sistem yang dirancang. Program yang dirancang akan menjalankan beberapa perintah diantaranya yaitu pembacaan sensor MPU6050, akuisisi data, logika fuzzy, komunikasi sistem dan *web interface*. Rancangan program tersebut disajikan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Diagram blok rancangan program

2.4 Rancangan Akuisisi Data

Dalam mengolah data masukan menjadi data luaran, diperlukan sebuah tahapan berupa akuisisi data. Akuisisi data dapat didefinisikan sebagai suatu sistem yang berfungsi untuk mengambil, mengumpulkan dan menyiapkan data, hingga memprosesnya untuk menghasilkan data yang dikehendaki. Data tersebut didapatkan dari pembacaan sensor MPU6050 kemudian diolah lebih lanjut. Sebelum diperoleh data luaran, didapatkan beberapa data diantaranya yaitu kalibrasi sensor, percepatan getaran tanah, frekuensi tanah, percepatan getaran bangunan, frekuensi bangunan, resonansi bangunan, sudut kemiringan, dan simpangan bangunan.

2.4.1 Kalibrasi sensor

Sebelum digunakan untuk pengukuran, sensor perlu dikalibrasi terlebih dahulu dengan tujuan untuk mendapatkan data pengukuran yang akurat. Pada sistem ini kalibrasi dilakukan dengan menggunakan program *auto calibration* (kalibrasi otomatis) pada nilai *accelerometer* dan *gyroscope* sensor dengan *library* yang sudah tersedia.

2.4.2 Percepatan getaran tanah

Nilai percepatan getaran tanah diperoleh dari pembacaan sensor MPU6050 yang diletakkan pada lantai purwarupa bangunan (*node 1*). Percepatan getaran tanah yang diambil dalam 3 sumbu yaitu x, y dan z [8].

2.4.3 Frekuensi tanah

Setelah memperoleh nilai percepatan getaran tanah, kemudian dilakukan proses FFT untuk memperoleh data berupa frekuensi. Frekuensi diproses dari beberapa jumlah sampel percepatan getaran tanah. Data frekuensi tanah juga diambil dalam 3 sumbu yaitu x, y dan z.

2.4.4 Percepatan getaran bangunan

Nilai percepatan getaran bangunan diperoleh dari pembacaan sensor MPU6050 yang diletakkan pada dinding purwarupa bangunan (*node 2*). Percepatan getaran tanah yang diambil hanya dalam satu sumbu x saja.

2.4.5 Frekuensi bangunan

Setelah memperoleh nilai percepatan getaran bangunan, kemudian dilakukan proses FFT untuk memperoleh data berupa frekuensi. Frekuensi diproses dari beberapa jumlah sampel percepatan getaran tanah. Data frekuensi bangunan juga diambil dalam satu sumbu x saja.

2.4.6 Resonansi bangunan

Resonansi bangunan merupakan parameter penting untuk memperoleh tingkat kerentanan bangunan. Data ini diperoleh dari perhitungan melalui analisis FSR. Resonansi bangunan merupakan perbandingan dari rasio resonansi getaran bangunan terhadap rasio resonansi getaran tanah. Nilai tersebut dihitung menggunakan rumus pada persamaan 3.4. Nilai ini nantinya digunakan untuk input pada logika fuzzy.

2.4.7 Sudut kemiringan

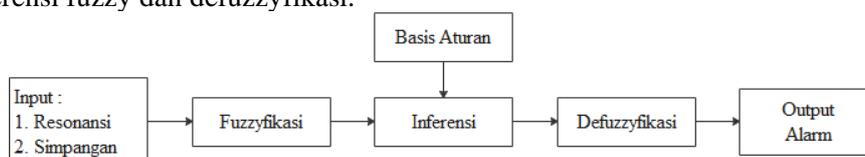
Sudut kemiringan merupakan sudut yang terbaca dari dari pembacaan sensor MPU6050 yang diletakkan pada dinding purwarupa bangunan (*node 2*). Sudut ini digunakan untuk menghitung besar dari simpangan yang terjadi pada bangunan.

2.4.8 Simpangan bangunan

Simpangan bangunan juga merupakan parameter penting untuk memperoleh tingkat kerentanan bangunan. Nilai simpangan bangunan diperoleh dari perhitungan menggunakan rumus pada persamaan 3.7. Nilai ini nantinya juga digunakan untuk input pada logika fuzzy.

2.5 Rancangan Logika Fuzzy

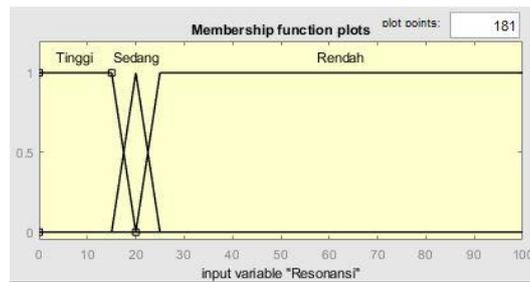
Pemodelan ini dibuat untuk menentukan logika pada sistem peringatan, dengan sistem inferensi fuzzy atau *Fuzzy Inference System* (FIS) mamdani [9]. Penggunaan FIS Mamdani karena output sistem yang dibutuhkan berupa himpunan fuzzy. FIS Mamdani dianggap yang paling mudah dimengerti karena dapat bekerja berdasarkan kaidah-kaidah linguistik dan memiliki algoritma fuzzy yang menyediakan sebuah aproksimasi untuk dimasuki analisa matematik. Sistem ini akan mengklasifikasikan tingkat bahaya dari getaran yang terdeteksi oleh pembacaan data sensor. Tahapan dalam proses sistem logika fuzzy terdiri dari fuzzyfikasi, sistem inferensi fuzzy dan defuzzyfikasi.



Gambar 5 Diagram logika fuzzy sistem

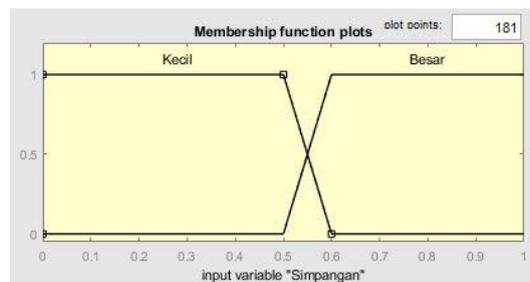
2.5.1 Fuzzyfikasi

Fuzzyfikasi merupakan proses definisi dari himpunan fuzzy dan penentuan derajat keanggotaan dari *crisp input* pada sebuah himpunan fuzzy, dengan membuat fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan digunakan untuk menentukan parameter apa yang berpengaruh terhadap keluaran. Fungsi keanggotaan terdiri dari fungsi keanggotaan *input* dan *output*. Untuk fungsi keanggotaan input sistem ini terdapat 2 parameter yaitu resonansi dan simpangan bangunan. Sementara untuk fungsi keanggotaan output berupa *alarm*. Fungsi keanggotaan *input* himpunan fuzzy tersebut dapat digambarkan sebagai berikut. Berikut gambar fungsi keanggotaan *input* resonansi.



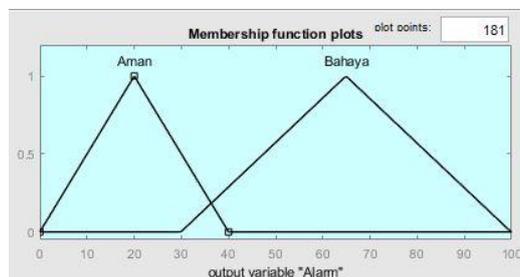
Gambar 6 Fungsi keanggotaan *input* resonansi

Dengan himpunan keanggotaan tinggi (0-15 %), sedang (15-25 %) dan rendah (20-100 %). Sementara untuk fungsi keanggotaan *input* simpangan digambarkan sebagai berikut.



Gambar 7 Fungsi keanggotaan *input* simpangan

Dengan himpunan keanggotaan kecil (0-0,6 cm) dan besar (0,5-1 cm). Nilai tersebut didasarkan pada batas rasio simpangan maksimum yang diperbolehkan yaitu sebesar 0,01 [10]. Karena purwarupa bangunan yang akan dibuat setinggi 60 cm maka simpangan bernilai besar jika melebihi nilai 0,6 cm.



Gambar 8 Fungsi keanggotaan *output* alarm

Pada gambar 8 di atas merupakan fungsi keanggotaan *output alarm*. Dengan himpunan keanggotaan aman (0-40) dan bahaya (30-100). *Output* ini akan menyalakan *alarm* bergantung dari nilai *crisp output* yang dihasilkan.

2.5.2 Sistem Inferensi Fuzzy

Tahapan selanjutnya berupa sistem inferensi fuzzy, yaitu evaluasi kaidah/aturan/*rule* fuzzy untuk menghasilkan *output* dari tiap *rule*. Pada tahapan ini sistem terdiri dari beberapa aturan, maka inferensi diperoleh dari kumpulan atau korelasi antar aturan. Pada FIS Mamdani implikasi yang digunakan adalah *Min*. Implikasi berupa nilai *crisp* yang telah diubah ke nilai derajat keanggotaan. Sedangkan komposisi aturan dilakukan secara agregasi atau kombinasi dari keluaran semua *rule* (*Max*). Komposisi aturan yang digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat kerentanan pada bangunan yang digunakan seperti pada tabel 1 berikut.

Tabel 1 Komposisi aturan

Resonansi Simpangan	Tinggi	Sedang	Rendah
	Kecil	Bahaya	Aman
Besar	Bahaya	Bahaya	Bahaya

2.5.3 Defuzzyfikasi

Pada tahap akhir dari logika fuzzy yaitu proses defuzzyfikasi, berupa konversi himpunan fuzzy yang dihasilkan dari komposisi ke *output* dalam nilai *crisp*. *Input* dari proses defuzzyfikasi adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy, sedangkan *output* yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut. Defuzzyfikasi pada fuzzy mamdani menggunakan metode centroid atau *centre of gravity* (COG) yaitu mengambil titik pusat fuzzy yang membagi area solusi menjadi 2 bagian yang sama, dengan persamaan (1) berikut.

$$\text{COG} = \frac{\sum \mu(y)y}{\sum \mu(y)} \quad (1)$$

Dimana y merupakan nilai *crisp* dan $\mu(y)$ merupakan derajat keanggotaan dari nilai *crisp* y . Nilai *crisp* hasil defuzzyfikasi tersebut merupakan data luaran akhir dari sistem. Kemudian dilakukan keputusan akhir jika nilai *output* defuzzyfikasi dalam rentang aman maka *alarm* tidak menyala. Sedangkan jika nilai *output* defuzzyfikasi dalam rentang bahaya maka sistem akan menyalakan *alarm* sebagai tanda bahaya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai hasil pengujian pada penelitian purwarupa sistem peringatan tingkat kerentanan bangunan berbasis sensor IMU dengan metode fuzzy. Terdapat beberapa pengujian dalam penelitian ini, yaitu pengujian sistem meliputi kalibrasi sensor MPU6050 untuk pembacaan percepatan getaran, simpangan, dan frekuensi getaran. Selain itu terdapat juga pengujian logika fuzzy dan pengujian akurasi keberhasilan dari sistem.

3.1 Pengujian Logika Fuzzy

Pengujian logika fuzzy dilakukan dengan cara mengambil sejumlah data dari beberapa kali percobaan. Data yang diambil yaitu data resonansi dan simpangan bangunan sebagai *input* logika fuzzy. Pada pengujian logika fuzzy dari sistem dilakukan dengan cara membandingkan nilai *crisp output* fuzzy dari sistem pada program Arduino dengan nilai *crisp output* fuzzy dari MATLAB untuk memperoleh besar *error* dari sistem. Tabel 2 berikut merupakan hasil pengujian logika fuzzy yang telah diperoleh.

Tabel 2 Pengujian logika fuzzy

NO	Input		Output		Error (%)
	Resonansi (%)	Simpangan (cm)	Arduino	MATLAB	
1	5,00	0,10	65,00	64,90	0,15
2	17,00	0,15	52,59	51,60	1,92
3	20,00	0,26	20,00	20,00	0,00
4	24,70	0,41	20,00	20,00	0,00
5	18,80	0,50	36,02	39,90	9,72
6	20,00	0,55	48,64	48,90	0,53
7	23,00	0,55	48,64	48,90	0,53
8	50,00	0,61	65,00	64,90	0,15
9	83,00	0,56	52,59	51,60	1,92
10	15,70	0,59	62,78	60,90	3,08
11	24,30	0,57	54,63	54,40	0,42
12	63,80	0,54	44,23	45,90	3,64
13	95,80	0,58	59,37	57,50	3,25
14	19,70	0,54	47,12	45,90	2,66
15	19,70	0,51	33,48	31,20	7,31
Rata-rata error					2,35

Hasil rata-rata pengujian logika fuzzy pada program Arduino dan MATLAB mempunyai nilai yang kurang lebih sama. Berdasarkan hasil pengujian logika fuzzy pada Tabel 2 sesuai dengan sistem yang telah dibuat, terdapat rata-rata *error* sebesar $\pm 2,35\%$.

3.2 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan dengan menjatuhkan beban di samping purwarupa bangunan dengan ketinggian yang berbeda-beda untuk mendapatkan hasil data yang bervariasi. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, sistem peringatan dikatakan berhasil jika *alarm* tidak aktif pada status aman dan alarm aktif pada status bahaya. Uji validitas dihitung berdasarkan hasil analisis pada data sampel pengujian. Dimana setiap data sampel pada *rule* algoritma fuzzy divalidasi kebenarannya. Hasil pengujian sistem ditunjukkan pada tabel 3 berikut.

Tabel 3 Pengujian sistem

Pengujian	Variabel		Status	Alarm
	Resonansi (%)	Simpangan (cm)		
1	90,78	0,03	Aman	Tidak aktif
2	21,49	0,04	Aman	Tidak aktif
3	100,00	0,16	Aman	Tidak aktif
4	31,51	0,02	Aman	Tidak aktif
5	30,90	0,12	Aman	Tidak aktif
6	88,93	0,09	Aman	Tidak aktif
7	45,73	0,03	Aman	Tidak aktif
8	47,22	0,00	Aman	Tidak aktif
9	100,00	0,07	Aman	Tidak aktif
10	47,06	0,00	Aman	Tidak aktif
11	56,95	0,13	Aman	Tidak aktif
12	19,38	0,36	Aman	Tidak aktif
13	71,83	0,44	Aman	Tidak aktif
14	37,14	0,29	Aman	Tidak aktif
15	37,33	0,33	Aman	Tidak aktif
16	18,10	0,05	Aman	Aktif
17	10,75	0,04	Bahaya	Aktif
18	4,67	0,26	Bahaya	Aktif
19	0,38	0,05	Bahaya	Aktif
20	3,78	0,04	Bahaya	Aktif

Dari tabel di atas diperoleh sejumlah 20 sampel data uji dari pengujian sistem secara keseluruhan dengan jumlah data valid sebanyak 19 data dan data tidak valid sejumlah 1 data. Data tidak valid terdapat pada nomor 16 pada tabel di atas. Dimana dengan nilai variabel yang terukur dengan status aman. Pada status tersebut alarm seharusnya dalam kondisi tidak aktif, akan tetapi yang terjadi ialah alarm aktif. Hal tersebut terjadi karena nilai *crisp output* pada kondisi tersebut masuk ke dalam rentang bahaya. Dari hasil tersebut dapat dihitung akurasi untuk sistem peringatan dengan menggunakan perhitungan *confusion matrix* sesuai persamaan berikut.

$$\text{Akurasi} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Akurasi} = \frac{15 + 4}{15 + 4 + 1 + 0} \times 100\% = 95\%$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan 2 di atas, diperoleh nilai akurasi dari sistem peringatan sebesar 95%. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem peringatan yang telah dirancang memiliki akurasi yang baik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut kesimpulan yang diperoleh. Sistem peringatan dengan logika fuzzy pada purwarupa bangunan yang menggunakan dua parameter telah berhasil dibuat dan secara umum dapat berjalan dengan lancar. Penggunaan logika fuzzy pada sistem peringatan menghasilkan akurasi sebesar 95%, hal tersebut menunjukkan bahwa sistem peringatan yang telah dirancang memiliki akurasi yang baik. Pada sistem peringatan yang dirancang dapat berjalan secara *real time*.

5. SARAN

Saran lebih lanjut kedepan pada saat pengujian dilakukan menggunakan *shake table* dengan tujuan agar besar getaran yang diberikan dapat terukur secara pasti. Frekuensi getaran yang diukur belum divalidasi apakah hasilnya sudah akurat, kedepannya perlu dilakukan validasi. Dan melakukan konsultasi dengan ahli terkait purwarupa bangunan yang digunakan agar memperkuat penelitian yang dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tisnadinata, M. A., Suwastika, N. A., & Yasirandi, R. (2019). Sistem Peringatan Dini Gempa Bumi Multi *Node* Sensor Berbasis Fuzzy Dan Komunikasi IOT. 4(August), 67–80. <https://doi.org/10.21108/indojc.2019.4.2.311>
- [2] Wahyuni, A. (2014). Pengukuran Frekuensi Natural Pada Gedung Bertingkat Menggunakan Accelerometer GPL-6A3P. *Jurnal Fisika Dan Terapannya*, 1(1), 12–17.
- [3] A. Alphonsa and G. Ravi, "Earthquake Early Warning System by IOT using Wireless Sensor Networks", *IEEE*, 2016.
- [4] Prastowo, R., & Prabowo, U. N. (2017). Evaluasi Kerentanan Gedung Rektorat Sttnas Terhadap Gempa Bumi Berdasarkan Analisis Mikrotremor. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 9(1), 83. <https://doi.org/10.28989/angkasa.v9i1.113>

-
- [5] Liu, C.-L., & Uang, S.-T. (2017). An Efficient Fuzzy Alarm System for Improving Human Performance in Supervisory Task. *2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, 66–70. <https://doi.org/10.1109/CRC.2017.21>
- [6] Imanningtyas, E., Akbar, S. R., & Syauqy, D. (2017). Implementasi Wireless Sensor Network pada Pemantauan Kondisi Struktur Bangunan Menggunakan Sensor *Accelerometer* MMA7361. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer (J-PTI IK) Universitas Brawijaya*, 1(7), 545–554.
- [7] Riantana, R., Darsono, D., & Triyono, A. (2017). Penentuan Nilai Frekuensi *Natural* Bangunan UPT Perpustakaan UNS dengan Sensor *Accelerometer* pada Handphone Android. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 13(3), 97. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v13i3.2838>
- [8] Sharma, V. G. A. (2017). Prediction of Earthquake Using 3 Axis *Accelerometer* Sensor (ADXL335) and ARDUINO UNO. *International Journal of Science and Research(IJSR)*,6(9),1044–1047. <https://www.ijsr.net/archive/v6i9/ART20176803.pdf>
- [9] Fatimah, P., Irawan, B., Setianingsih, C., Elektro, F. T., Telkom, U., Elektro, F. T., Telkom, U., Elektro, F. T., & Telkom, U. (2020). PERANCANGAN SISTEM PERINGATAN DINI TANAH LONGSOR MENGGUNAKAN METODE FUZZY BERBASIS ANDROID. 7(1), 1658–1667.
- [10] Standar Nasional Indonesia. (2012). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. SNI 03-1726-2012. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional Indonesia