

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tembok merupakan dinding padat yang berfungsi sebagai pembatas ruang, penyokong struktur bangunan, dan pelindung dari cuaca. Tembok dipasang vertikal untuk memisahkan bagian bangunan, memberikan keamanan, serta estetika[1]. Tembok juga kerap dijadikan pembatas jalan raya dengan tepi jalan. Saat datang musim penghujan, sering terjadi tembok pembatas ini ambruk sehingga aktivitas lalu lintas terhambat. Kejadian tembok ambruk ini tentu berdampak bagi masyarakat luas yang tentunya hal ini dapat menyebabkan banyak kerugian. Atas dasar hal-hal tersebut tembok harus dipastikan lurus tanpa adanya kemiringan.

Kebutuhan akan stabilitas struktur tembok bangunan didasari oleh fakta bahwa kegagalan fungsi atau keruntuhan struktural dapat menyebabkan kerugian material dan ekonomi. Kemiringan kerap teridentifikasi sebagai sinyal peringatan dini adanya ketidakseimbangan struktural[3]. Kemiringan ini bisa bersumber dari tekanan angin dan guncangan gempa, atau dipicu oleh masalah pada pondasi. Fenomena ini kerap terjadi di Indonesia, yang secara geografis berada pada zona aktif tektonik yang kerentanan tinggi terhadap aktivitas seismik. Perlu dipastikan bahwa setiap struktur memenuhi standar faktor keamanan[2]. Tuntutan ini mengandalkan sistem pemantauan digital untuk mendeteksi perubahan struktural yang sulit diamati secara manual untuk mencegah masalah yang tidak terantisipasi.

Kegagalan serius ini merupakan hasil dari akumulasi faktor kritis, seperti retakan mikro, penurunan pondasi yang perlahan, atau kerusakan material tersembunyi yang secara kolektif dapat mengancam keselamatan dan menimbulkan kerugian. Keterbatasan pemantauan secara manual menjadi kendala utama, sebab metode konvensional seperti inspeksi visual berkala memiliki kelemahan dalam hal kecepatan respons dan akurasi untuk anomali skala kecil[4]. Prosedur ini menyebabkan masalah struktural yang berkembang perlahan, hal seperti ini sering kali baru teridentifikasi setelah kerusakan mencapai ambang batas. Kegagalan dalam mendeteksi perubahan sekecil apa pun secara tepat waktu berpengaruh pada tertundanya metode pencegahan yang efektif.

Pemantauan kemiringan bangunan dapat dilakukan secara langsung untuk menjamin data akurat yang akurat. Proses krusial ini menjadi indikator utama untuk mengukur parameter struktural sekaligus mengevaluasi kondisi yang menyeluruh[5]. Berdasarkan berbagai studi berkaitan, sistem otomatis berbasis sensor memungkinkan deteksi dini potensi kerusakan yang dapat meningkatkan risiko bencana, sistem peringatan dini mampu mendeteksi kemiringan yang melebihi batas aman dan memberikan notifikasi secara instan. Penggunaan sensor, mikrokontroler, dan teknologi IoT dapat memantau secara efisien serta mempermudah pemeliharaan bangunan untuk menjaga kualitas struktur.

Teknologi sensor MPU-9250 merupakan sebuah modul pengukuran inersia yang mengintegrasikan akselerometer, giroskop, dan magnetometer untuk mendeteksi pergerakan dan vibrasi mikro[6]. Penggunaan sensor MPU-9250 memberikan data langsung dengan akurasi tinggi dalam mendeteksi perubahan orientasi serta kemudahan integrasi dengan sistem kontrol berbasis mikroprosesor. Mikroprosesor ideal yang digunakan untuk kebutuhan tersebut adalah ESP32 karena dapat terkoneksi dengan *Wi-Fi* dan *Bluetooth*, ESP32 berfungsi sebagai inti pemroses dan komunikasi data dalam *Internet of Things* (IoT). Sistem ini dirancang untuk mendeteksi perubahan kecil dan memungkinkan transmisi dan komunikasi data antar perangkat secara efisien. Perangkat lunak untuk pemrosesan data harus mampu menganalisis masukan masif dari sensor secara cepat dan akurat untuk mendukung proses analisis. Dengan adanya teknologi-teknologi tersebut, pemantauan kondisi bangunan menjadi lebih efektif karena tindakan dapat diambil secara cepat, yang pada akhirnya membantu mencegah dampak buruk yang lebih besar. Mengintegrasikan teknologi modern ini ke dalam sistem pemantauan struktural tidak hanya memberikan manfaat besar dalam hal peningkatan keselamatan, secara keseluruhan meningkatkan efisiensi operasional serta efektivitas dalam manajemen risiko, yang kemudian akan memperpanjang usia bangunan dan mengurangi biaya perawatan dalam jangka panjang.

Penelitian ini memandang perlu untuk mengembangkan prototipe sistem monitoring kemiringan tembok yang mengintegrasikan sensor MPU-9250 dengan metode *Fuzzy Logic*[7]. Penggunaan *Fuzzy Logic* menjadi krusial sebab metode ini

unggul dalam mengelola data sensor yang *uncertain* (tidak pasti), *vague* (buram), dan memiliki variabilitas tinggi, seperti data kemiringan yang terus berubah di lingkungan nyata. Kemampuannya untuk memodelkan penalaran manusia dan mengolah variabel, *Fuzzy Logic* memungkinkan sistem memberikan peringatan dini yang lebih adaptif dan akurat terhadap perubahan sudut kemiringan. Integrasi ini diharapkan menjadi solusi yang mampu mencegah kerusakan struktural serius dan memastikan keamanan serta keberlanjutan bangunan secara lebih efektif.

Integrasi metode *Fuzzy Logic* dengan optimasi dilakukan dalam pemantauan kesehatan struktural bangunan, terutama untuk meningkatkan kemampuan analisis pada struktur bangunan[8]. Hal ini efektif memitigasi ketidakpastian yang melekat pada data sensor dan model material, dan membuka jalan bagi sistem deteksi dini yang jauh lebih efisien dan andal dalam mengidentifikasi tingkat kemiringan.

Implementasi sistem pemantauan yang canggih melibatkan data sensor yang tidak pasti dapat memberikan kontribusi dalam pemeliharaan struktur bangunan yang prediktif. Kalman Filter menjadi metode yang diperlukan dalam sistem karena secara efektif dapat mengestimasi keadaan suatu sistem dengan mengurangi *noise* (gangguan) dan mengatasi ketidakpastian yang melekat pada pembacaan sensor[9]. Penggunaan Kalman Filter memperoleh estimasi yang optimal dari keadaan struktural yang sebenarnya.

Penelitian ini membawa kontribusi dalam aspek pemeliharaan bangunan dan inovasi dalam teknologi pemantauan struktural. Pengembangan prototipe sistem monitoring kemiringan tembok ini mengintegrasikan Sensor MPU-9250, Kalman Filter, *Fuzzy Logic*, dan IoT [8][9]. Kombinasi ini penting karena sensor MPU-9250 menyediakan data kemiringan yang rentan *noise*, kemudian Kalman Filter mengatasi *noise* tersebut, memberikan input keadaan struktural yang akurat, *Fuzzy Logic* mampu memproses input yang tidak pasti dengan penalaran menyerupai manusia untuk menentukan tingkat kemiringan, dan IoT menjamin data ini dapat diakses secara langsung oleh pengguna di mana pun, memastikan peringatan dini disampaikan seketika untuk mencegah ancaman bencana. Integrasi ini menciptakan sistem yang andal dan responsif.

1.2 Kajian Penelitian Terdahulu

Kajian riset terdahulu merupakan bagian penting dalam penelitian ini yang berfungsi untuk menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan dalam penyelesaian masalah memiliki perbedaan dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Dalam bagian diuraikan secara rinci dan sistematis beberapa penelitian terdahulu yang relevan, dengan tujuan memberikan landasan teoritis yang kuat sekaligus memperkuat alasan mengapa penelitian ini perlu dilakukan. Penjelasan mengenai penelitian sebelumnya juga akan mencakup metode, hasil, serta keterbatasan yang telah diidentifikasi, sehingga dapat dijadikan pijakan untuk kontribusi baru yang ditawarkan dalam penelitian ini. Kajian riset terdahulu yang terdapat pada Tabel 1.1 yang terdiri dari berbagai studi lain yang mendukung atau terkait dengan topik penelitian ini, kemudian akan dijabarkan secara mendalam untuk memberikan pemahaman menyeluruh mengenai konteks dari penelitian yang akan dilakukan.

Tabel 1.1 Penelitian terdahulu

No	Judul Penelitian	Nama Peneliti	Tahun
1	Implementasi Sensor Inertial Measurment Unit (IMU) Pada Sistem Monitoring Arah Antena [10].	Faiz Nizar Alpuhli, Shita Herfiah	2025
2	Fall Detector pada Lansia berbasis IoT Menggunakan Sensor MPU-6050 dan Sensor GPS Neo 6M [11].	Laila Fitriandini, Suhardi, Kartika Sari	2025
3	Performance of GPS and IMU sensor fusion using unscented Kalman filter for precise i-Boat navigation in infinite wide waters [12].	Mokhammad Nur Cahyadi, Tahiyatul Asfihani, Ronny Mardianto, Risa Erfianti	2022
4	Enhancing the Accuracy of Low-Cost Inclinometers with Artificial Intelligence [13].	Fidel Lozano, Seyyedbehrad Emadi, Seyedmilad Komarizadehasl, Jesús González Arteaga, and Ye Xia	2024
5	Inertial Methodology for the Monitoring of Structures in Motion Caused by Seismic Vibrations [14].	Julio C. Rodríguez-Quinonez, Jorge Alejandro Valdez-Rodríguez, Moises J. Castro-Toscano,	2024

No	Judul Penelitian	Nama Peneliti	Tahun
		Wendy Flores-Fuentes, and Oleg Sergiyenko	

Pengukuran kemiringan yang presisi merupakan inti dari sistem monitoring yang mengandalkan kapabilitas sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) tipe MPU-9250. Sensor ini menyediakan data *9-Degrees of Freedom* (9-DOF), yang meliputi data tri-aksial dari akselerometer, giroskop, dan magnetometer. Dalam konteks sistem berbasis IoT, MPU-9250 telah teruji fungsionalitasnya untuk penentuan orientasi absolut, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian mengenai monitoring arah antenna VSAT [10]. Data akselerometer digunakan untuk menghitung sudut kemiringan statis berdasarkan vektor gravitasi, sementara data giroskop memberikan informasi kecepatan sudut yang krusial untuk mendeteksi pergerakan dinamis. Meskipun sensor sejenis seperti MPU-6050 telah digunakan dalam aplikasi pendeteksi jatuh untuk mengukur perubahan orientasi [11], pemilihan MPU-9250 menjamin ketersediaan data inersia yang lebih lengkap yang menjadikannya fondasi untuk perhitungan sudut kemiringan tembok [13].

Penelitian [10] membahas modul ESP32 yang berfungsi sebagai unit mikrokontroler sekaligus gerbang komunikasi nirkabel, yang merupakan arsitektur fundamental dalam sistem *Internet of Things* (IoT). Keunggulan ESP32 terletak pada integrasi modul *Wi-Fi/Bluetooth*, memungkinkannya menangani pemrosesan data algoritma yang kompleks secara simultan dengan tugas transmisi data nirkabel. ESP32 telah dikonfirmasi dalam skema pengiriman data langsung ke *platform*, baik untuk monitoring arah antenna jarak jauh maupun untuk aplikasi kesehatan seperti pendeteksi jatuh [11]. Kemampuan mikrokontroler ini untuk memastikan bahwa data kemiringan yang telah diproses oleh Kalman Filter dan *Fuzzy Logic* dapat didistribusikan langsung kepada pengguna.

Data sudut kemiringan yang bersumber dari sensor IMU seringkali terdegradasi oleh *random noise* (gangguan acak) pada akselerometer dan *drift* jangka panjang pada giroskop. Algoritma Kalman Filter adalah solusi optimal untuk masalah sensor dan estimasi keadaan sistem. Prinsip dasar Kalman Filter memprediksi keadaan sistem dan mengoreksinya dengan pengukuran sensor,

kemudian menjadi landasan bagi pemfilteran data inersia. Dalam konteks monitoring kemiringan, penggunaan Kalman Filter dapat menghasilkan estimasi sudut kemiringan yang mulus dan mendekati nilai sebenarnya, mengurangi ketidakpastian yang timbul dari data sensor, dan memastikan bahwa sistem memiliki data input yang andal untuk penalaran lebih lanjut.

Fuzzy Logic digunakan untuk mengatasi ketidakakuratan yang bersifat non-linear atau untuk memberikan interpretasi cerdas terhadap hasil estimasi sudut. Meskipun beberapa kajian menggunakan jaringan saraf tiruan (*Multilayer Perceptron*). Koreksi akurasi sistem ini akan diusulkan sebagai mekanisme penalaran non-linear. *Fuzzy Logic* bekerja berdasarkan himpunan dan aturan linguistik (Jika-Maka), yang memungkinkannya menangani ketidakpastian dan ambang batas yang tidak tegas. Dalam konteks monitoring tembok, *Fuzzy Logic* dapat digunakan untuk mengoreksi bias yang dipengaruhi lingkungan atau untuk mengklasifikasikan tingkat risiko kemiringan secara adaptif.

Integrasi IMU, Kalman Filter, dan *Fuzzy Logic* ditempatkan dalam kerangka kerja yang lebih luas termasuk dalam mendeteksi deformasi dan pergerakan struktural. Penelitian mengenai metodologi inersia untuk monitoring struktur yang mengalami pergerakan akibat getaran seismik menunjukkan bahwa akurasi dalam mendeteksi perubahan posisi dan rotasi sangat tergantung pada pemrosesan sinyal yang canggih [14]. Dalam kasus tembok bangunan, deteksi kemiringan adalah bentuk deteksi deformasi. Penggunaan Kalman Filter memastikan bahwa data pergerakan diukur dengan akurasi tinggi meskipun terdapat *noise*. Hasil pemfilteran ini kemudian diproses oleh *Fuzzy Logic* untuk mengidentifikasi nilai kemiringan yang secara definitif mengindikasikan peringatan, menggeser fokus dari sekadar pembacaan data menjadi sistem deteksi dini kegagalan.

Keseluruhan sistem prototipe ini merupakan sinergi optimal dari perangkat keras sensor, pemrosesan algoritma, dan konektivitas nirkabel, yang berujung pada sistem yang mandiri. Penelitian terdahulu secara kolektif mendukung setiap komponen, MPU-9250 sebagai sensor data [10], ESP32 sebagai mikrokontroler berkapabilitas IoT [11], dan Kalman Filter sebagai algoritma estimasi yang teruji untuk data inersia, dilengkapi dengan teknik peningkatan akurasi dan penalaran

[12][13]. Sinergi ini memungkinkan data kemiringan yang telah difilter diunggah secara ke ponsel pengguna. Sistem yang diusulkan menciptakan alur kerja efektif, mulai dari akuisisi inersia yang terganggu *noise*, pemfilteran sinyal, hingga notifikasi peringatan.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dijadikan acuan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana rancang bangun prototipe sistem monitoring kemiringan tembok bangunan dengan memanfaatkan multisensor kemiringan menggunakan metode Kalman Filter dan *Fuzzy Logic* berbasis IoT?
2. Bagaimana kinerja prototipe sistem monitor kemiringan tembok bangunan dengan memanfaatkan multisensor kemiringan?

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam melakukan penelitian ini adalah:

1. Merancang dan membangun sistem monitoring kemiringan tembok yang memanfaatkan multisensor dengan metode Kalman Filter, *Fuzzy Logic*, berbasis IoT.
2. Menguji dan menganalisis kinerja prototipe sistem monitoring kemiringan tembok bangunan dalam hal akurasi pengukuran, kestabilan data hasil multisensor, serta kemampuan sistem dalam mendeteksi dan memonitor perubahan kemiringan secara langsung.

1.4.2 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memperoleh manfaat dari sisi teoritis dan sisi praktis.

1. Akademis

Penelitian ini memberikan manfaat akademis berupa kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem monitoring struktur bangunan, khususnya terkait dengan penerapan Kalman Filter dan *Fuzzy Logic* pada pengolahan data multisensor untuk pengukuran kemiringan tembok bangunan, serta menunjukkan bagaimana beberapa metode dapat diimplementasikan pada penelitian ini. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menambah referensi ilmiah

mengenai perancangan prototipe sistem monitoring kemiringan serta dapat dijadikan sebagai bahan acuan bagi penelitian selanjutnya yang membahas sistem monitoring kemiringan bangunan dengan pendekatan serupa.

2. Praktis

Penelitian ini secara praktis menghasilkan alat yang dapat mengukur kemiringan suatu bidang tembok yang mudah digunakan. Alat ini memiliki keunggulan yang dapat terhubung dengan pengguna tanpa harus berada di dekat alat ini, dengan kata lain pengguna alat ini dapat memantau kemiringan tembok kapanpun dan dimanapun.

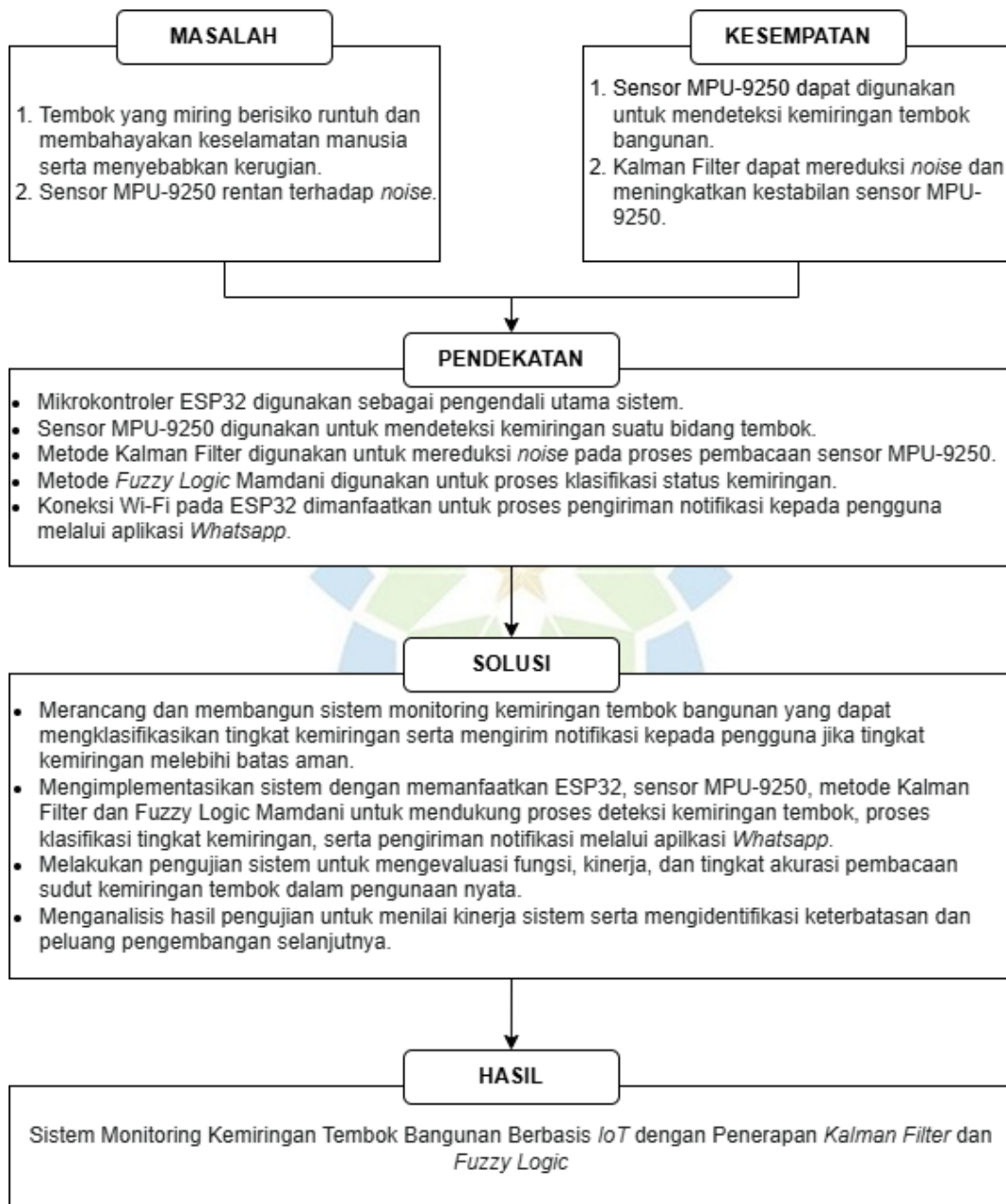
1.5 Batasan Masalah

1. Masukan sistem ini hanya menggunakan sensor MPU-9250 untuk mendeteksi sudut kemiringan tembok bangunan.
2. Data yang dihasilkan oleh sensor difilter menggunakan metode Kalman Filter.
3. Data yang telah melewati metode Kalman Filter kemudian diolah dengan metode *Fuzzy Logic* untuk memberikan hasil pengukuran yang adaptif.
4. Tahap akhir dari pengolahan kedua metode sebelumnya menghasilkan *output* yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT) dengan berupa notifikasi.
5. Parameter yang digunakan pada penelitian ini hanya terbatas pada derajat kemiringan tembok dan kecepatan sudut kemiringan.
6. Klasifikasi *output Fuzzy* pada penelitian ini ditentukan berdasarkan perancangan sistem dan hasil *trial and error* pada saat penelitian.
7. *Fuzzy Logic* yang digunakan pada penelitian ini hanya menggunakan satu metode *Fuzzy*, yaitu metode Mamdani.
8. Penelitian ini hanya prototipe dan difokuskan hanya pada tembok benteng dan/atau satu bidang tembok, sehingga implementasinya belum diuji pada skala yang lebih besar

1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir adalah penjelasan mengenai konsep-konsep yang digunakan untuk memecahkan masalah yang telah diidentifikasi. Kerangka ini berfungsi sebagai panduan dalam penelitian, menunjukkan alur logis dan sistematis

dalam merumuskan solusi yang diambil untuk menjawab permasalahan yang menjadi fokus penelitian. Gambar 1.1 menunjukkan kerangka berpikir.



Gambar 1.1 Kerangka berpikir penelitian.

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini memiliki sistematika penulisan dengan total enam bab dengan setiap bab mempunyai isi, penjabaran dari isi setiap bab Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab bab ini berisi hal yang melatarbelakangi dilakukannya penelitian, penelitian terkait, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, kerangka berpikir, dan sistematika penulisan.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini berisi teori dasar yang digunakan dalam penelitian serta memberikan gambaran peralatan yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode dan tahapan-tahapan yang dilakukan ketika melakukan penelitian "Prototipe Sistem Monitoring Kemiringan Tembok Berbasis Iot dengan Penerapan Kalman Filter dan *Fuzzy Logic*".

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Bab ini merupakan pembahasan mengenai perancangan dan implementasi sistem monitoring kemiringan tembok menggunakan sensor MPU-9250 dengan mikrokontroler ESP32 yang memproses metode Kalman Filter, *Fuzzy Logic*, dan IoT. Pembahasan bab ini meliputi perancangan dan implementasi *software*, *hardware*, dan sistem.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini membahas hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap sistem monitoring kemiringan tembok beserta analisis kinerjanya. Pembahasan meliputi hasil pembacaan yang diperoleh sistem, perbandingan dengan hasil pengukuran menggunakan alat ukur manual sebagai acuan, serta evaluasi tingkat akurasi berdasarkan hasil pengujian.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini membahas kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian kedepannya.