

Monitoring Kemiringan Dan Penurunan Pada Purwarupa Jembatan Berbasis IoT

Maripah Nurhayati^{1*}, Satriyo², Yohannes C. H Yuwono³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Politeknik Negeri Pontianak

²Program Studi Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Politeknik Negeri Pontianak

³Program Studi Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Politeknik Negeri Pontianak

*Penulis Korespondensi: maripahnurhayati.22@gmail.com

Abstract. Bridges are vital infrastructure that connect two separate areas and play a crucial role in supporting the smooth flow of economic and social activities. However, bridge structures often experience damage such as cracks, tilting, and subsidence due to natural influences, aging materials, excessive loads, and a lack of routine maintenance. Manual monitoring systems are ineffective in detecting early signs of damage in real time, necessitating a more modern technological approach. This research aims to create a system that can automatically monitor the slope and subsidence of a bridge using Internet of Things (IoT) technology. This system uses an MPU6050 gyro sensor to detect the slope, and an ESP8266 WIFI module for data processing and wireless transmission. Data from the sensor will be displayed directly in graphical form in web software, and is also equipped with a green indicator light for safe conditions, and red for damage. The test results show that the designed monitoring system is capable of detecting changes in slope and settlement on the bridge prototype in real-time. The MPU6050 sensor can read the slope angle well, where a safe condition is indicated by an angle value close to 0°, while an unsafe condition is detected when the slope angle exceeds $\pm 5^\circ$ or a settlement of ≥ 5 mm. The measurement data was successfully sent and displayed on the Adafruit IO platform, and the LED indicator system functions according to the bridge condition. This proves that the created system can be used as an effective initial monitoring tool for bridge structure conditions.

Keywords: Bridge; Monitoring; Internet of Things; Gyroscope Sensor; Tilt and Slope.

Abstrak. Jembatan merupakan salah satu infrastruktur penting yang berfungsi menghubungkan 2 area terpisah dan memiliki peran krusial dalam mendukung kelancaran aktifitas ekonomi serta sosial masyarakat. Namun, struktur jembatan sering mengalami kerusakan seperti retak, kemiringan, dan penurunan akibat pengaruh alam, usia material yang menua, beban berlebihan, serta minimnya perawatan secara rutin. Sistem pemantauan yang masih bersifat manual kurang efektif untuk mendeteksi gejala kerusakan secara dini real-time, sehingga dibutuhkan pendekatan teknologi yang lebih modern. Penelitian ini bertujuan untuk membuat sistem yang bisa memantau kemiringan dan penurunan jembatan secara otomatis dengan bantuan teknologi *internet of things* (IoT). Sistem ini menggunakan sensor gyro MPU6050 untuk mendeteksi kemiringan, dan modul WIFI ESP8266 untuk pengolahan data dan untuk mengirimkan data secara nirkabel. Data dari sensor akan ditampilkan secara langsung dalam bentuk grafik di *software web*, dan juga dilengkapi lampu indikator hijau untuk kondisi aman, merah jika ada kerusakan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring yang dirancang mampu mendeteksi perubahan kemiringan dan penurunan pada purwarupa jembatan secara *real-time*. Sensor MPU6050 dapat membaca sudut kemiringan dengan baik, di mana kondisi aman ditunjukkan oleh nilai sudut mendekati 0°, sedangkan kondisi tidak aman terdeteksi saat sudut kemiringan melebihi $\pm 5^\circ$ atau terjadi penurunan ≥ 5 mm. Data hasil pengukuran berhasil dikirim dan ditampilkan pada *platform Adafruit IO*, serta sistem indikator LED berfungsi sesuai dengan kondisi jembatan. Hal ini membuktikan bahwa sistem yang dibuat dapat digunakan sebagai alat monitoring awal kondisi struktur jembatan secara efektif.

Kata kunci: Monitoring; Jembatan; Internet of Things; Sensor Gyroscope; Kemiringan; Penurunan.

1. LATAR BELAKANG

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur yang berfungsi sebagai penghubung antara dua wilayah yang terpisah karena adanya sungai atau jurang. Jembatan sangat

penting dalam menunjang kelancaran aktifitas ekonomi dan sosial. Oleh karena itu, keberlanjutan fungsi jembatan yang aman dan dapat diandalkan sangatlah krusial.

Seiring berjalannya waktu, intensitas penggunaan jembatan yang tinggi seringkali menyebabkan penurunan kualitas strukturnya. Beberapa kerusakan biasa terjadi seperti retak, miring bahkan runtuh. Faktor-faktor yang memicu kerusakan ini adalah ketidakteraturan dalam proses perawatan, pengaruh cuaca ekstrim atau bencana alam seperti gempa bumi, Beban muatan yang melampaui batas, serta usia material konstruksi yang sudah tua. Menurut laporan dari kementerian pekerja umum dan perumahan rakyat (PUPR), sepanjang tahun 2023 tercatat lebih dari 130 insiden kerusakan jembatan dan setidaknya 14 jembatan mengalami keruntuhan di berbagai wilayah Indonesia. Beberapa kejadian signifikan terjadi di antaranya pada Kabupaten Lumajang (Gladak Perak), Kabupaten Tanah Datar di Provinsi Sumatera Barat, dan Kabupaten Pulang Pisau di Kalimantan Tengah. Disamping itu, data dari Badan Pusat Statistik (2023) mengungkapkan bahwa lebih dari 30 persen jembatan di Indonesia saat ini berada dalam kondisi yang tidak layak hingga tergolong rusak parah. Fakta ini memperkuat urgensi penerapan sistem monitoring struktur jembatan yang dapat bekerja secara otomatis dan *real-time* guna mendeteksi gejala kerusakan sejak dini.

Sistem pemantauan jembatan yang digunakan saat ini masih bersifat konvensional, dimana pemeriksaan masih dilakukan secara manual oleh petugas lapangan dalam periode tertentu. Sayangnya, metode ini memiliki banyak kekurangan, seperti kurang efisien, tidak mampu memberi deteksi dini, dan rawan terhadap *human error*. Akibatnya, indikasi awal dari kerusakan struktur sering terabaikan hingga akhirnya mencapai kondisi darurat. Oleh karena itu, dibutuhkan pemantauan berbasis teknologi yang mampu bekerja secara otomatis, *real-time*, dan dapat memberikan peringatan dini jika terdeteksi gejala kerusakan atau gangguan kestabilan struktur jembatan.

Seiring kemajuan teknologi, sistem monitoring ini dapat memanfaatkan teknologi berbasis *Internet Of Things (IoT)* yang akan menjadi alternatif yang sangat relevan untuk diterapkan dalam konteks ini. *IoT* memungkinkan integrasi antara sensor, mikrokontroler, perangkat lunak, dan jaringan komunikasi, sehingga membentuk sistem yang mampu bekerja secara mandiri dan terus menerus dan diintegrasikan dengan *platform adafruit io* yaitu *platform web* untuk pemrograman grafis yang memungkinkan visualisasi data kemiringan secara *real-time* melalui jaringan internet.

Penerapan teknologi ini akan mempermudah pemeliharaan jembatan, karena kondisi jembatan dapat dipantau tanpa harus datang langsung ke lokasi jembatan, dan pada akhirnya dapat meningkatkan keselamatan pengendara/ pengguna jembatan. Oleh karena itu, penelitian mengenai pengembangan sistem ini menjadi sangat penting untuk mendukung transformasi digital dalam pengelolaan infrastruktur transportasi.

2. KAJIAN TEORITIS

A. Standar Kemiringan Dan Penurunan Struktur Jembatan

Menurut Umar (2024), dalam penelitiannya mengenai deteksi dini untuk kemiringan dan getaran jembatan berbasis IoT, suatu struktur jembatan dikategorikan dalam kondisi berbahaya apabila mengalami kemiringan melebihi 5° atau terjadi penurunan lebih dari 5 mm pada area yang seharusnya stabil. Nilai ambang batas ini dijadikan sebagai parameter penting dalam sistem monitoring otomatis, khususnya pada jembatan jenis *girder* dan lengkung yang sensitif terhadap perubahan beban dan kelebihan material

Sementara itu, Hartono dan Khoiroh (2021) menyatakan bahwa berdasarkan pengalaman dalam pemeliharaan jembatan di Indonesia, toleransi kemiringan yang masih dianggap aman berkisar antara 2° hingga 5° , tergantung pada jenis dan panjang struktur. Untuk penurunan vertikal, batas yang diperbolehkan pada bagian tengah jembatan biasanya berada di antara 5 hingga 10 mm per 10 meter panjang jembatan, yang berfungsi sebagai indikator awal deformasi struktural.

B. Internet of Things (IoT) dalam Infrastruktur

Internet of Things (IoT) merupakan konsep penghubung perangkat fisik melalui jaringan internet untuk saling bertukar data secara otomatis dan *real-time*. Dalam konteks infrastruktur, *IoT* digunakan untuk mengintegrasikan sensor dan sistem monitoring agar mampu mendeteksi kondisi struktural secara jarak jauh (Gubbi et al., 2013). *IoT* juga memungkinkan interaksi antara mikrokontroler (ESP8266) dan perangkat lunak seperti *platform web*, sehingga data dari sensor kemiringan dapat dipantau langsung tanpa kehadiran fisik di lokasi (Laksono & Latief, 2024).

C. Konsep Sensor Dan Akuisisi Data

Sensor merupakan komponen utama dalam sistem monitoring, berfungsi mengubah besaran fisik menjadi sinyal listrik yang dapat diolah. Dalam penelitian ini, digunakan sensor MPU6050 yang menggabungkan *gyroscope* dan *accelerometer* dalam satu chip. Sensor ini mampu mengukur percepatan serta orientasi dalam bentuk *roll*, *pitch*, dan *yaw*

(Suprayogi, Fitriyah, & Tibyani, 2019). Data dari MPU6050 diambil oleh ESP8266 lalu dikirim ke antarmuka pengguna. Proses ini disebut akuisisi data dan merupakan fondasi dari sistem pemantauan berbasis *IoT* (Purnomo, 2023).

D. Komunikasi Data Secara Nirkabel

ESP8266 merupakan modul mikrokontroler yang mendukung komunikasi data serial dan nirkabel. Modul ini berperan penting dalam sistem *IoT* karena memungkinkan pengiriman data sensor ke perangkat lunak melalui jaringan *WiFi* menggunakan protokol *UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)*. Komunikasi berbasis *WiFi* ini memungkinkan data ditransmisikan secara cepat dan efisien, bahkan hingga ke sistem *cloud* atau aplikasi *desktop*. Dalam penelitian ini, ESP8266 menghubungkan data dari sensor ke *LabVIEW* secara *real-time* untuk proses monitoring jarak jauh (Dewi, Rohmah, & Zahara, n.d.).

E. Proses Pengujian Kemiringan Dan Penurunan Pada Jembatan

Pengujian dilakukan secara bertahap dan sistematis, dimulai dari proses kalibrasi hingga evaluasi kinerja sistem. Pada tahap kalibrasi, jembatan diletakkan pada permukaan yang rata agar sistem dapat mengenali posisi nol derajat sebagai kondisi standar. Setelah itu, dilakukan pengujian dengan memiringkan jembatan ke arah kiri, kanan, serta memberikan tekanan di bagian tengah untuk mensimulasikan terjadinya penurunan struktur.

Pengujian ini juga bertujuan untuk menilai seberapa cepat sistem merespons perubahan, yakni waktu yang dibutuhkan sensor untuk mengirimkan data dan ditampilkan di *platform web* setelah perubahan terjadi. Waktu respon yang diharapkan idealnya kurang dari 1 detik. Sistem dinyatakan memiliki performa baik apabila masih mampu mengirimkan data secara stabil dalam jangkauan 10 hingga 20 meter.

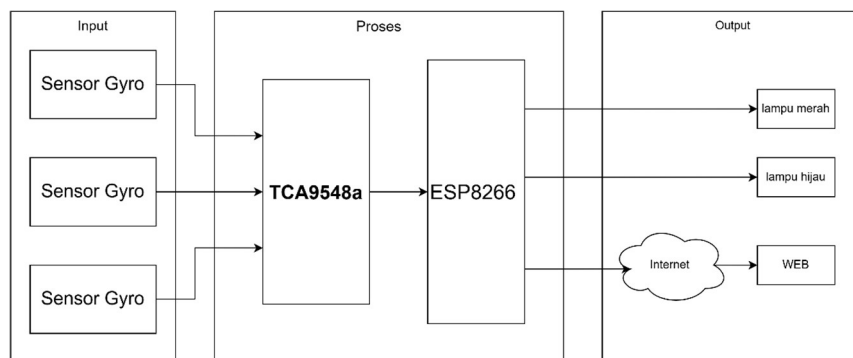
Melalui proses pengujian ini, diperoleh informasi terkait akurasi sensor, efektivitas tampilan visual, serta kinerja keseluruhan sistem. Jika ditemukan selisih antara data sensor dan kondisi sebenarnya, maka akan dihitung persentase kesalahannya (*error*). Evaluasi ini sangat penting untuk memastikan apakah sistem yang dirancang sudah layak digunakan dalam pemantauan infrastruktur berskala kecil.

3. METODE PENELITIAN

Sistem monitoring kemiringan dan penurunan pada purwarupa jembatan berbasis *Internet of Things (IoT)* dirancang untuk melakukan pemantauan kondisi struktur

jembatan secara otomatis dan berkelanjutan. Sistem ini tersusun atas sensor MPU6050 yang dipasang pada beberapa titik jembatan, NodeMCU ESP8266 sebagai unit pengolah data sekaligus penghubung ke jaringan internet, *multiplexer I2C* TCA9548A untuk mengatur komunikasi antar sensor, serta LED indikator sebagai penanda kondisi jembatan. Data hasil pengukuran sensor diolah oleh ESP8266 dan selanjutnya dikirimkan ke *platform Adafruit IO* untuk ditampilkan dalam bentuk grafik secara *real-time*.

Diagram Blok Sistem



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Berikut adalah penjelasan dari diagram blok tersebut :

1) Input

Terdiri dari 3 sensor *gyro* yang berfungsi sebagai pendeteksi kemiringan atau perubahan sudut dari struktur jembatan, dan pendeteksi penurunan atau pergeseran posisi struktur secara vertikal. Setiap sensor *gyro* terpasang di titik-titik strategis pada jembatan untuk mendapat data gerakan yang akurat dan *real-time*, 2 sensor akan terpasang di ujung-ujung jembatan untuk mendeteksi kemiringan dan 1 sensor akan terpasang di tengah jembatan untuk mendeteksi penurunan.

2) Proses

Pada tahap proses ini data yang diterima oleh sensor *gyro* terlebih dahulu masuk ke modul TCA9548A, yaitu sebuah *I2C* multiplexer yang berfungsi mengatur komunikasi antara beberapa sensor yang memiliki alamat *I2C* yang sama. Dengan menggunakan TCA9548A sistem dapat membaca setiap sensor melalui channel yang berbeda tanpa terjadi konflik alamat. Setelah dipilih melalui data kemudian diteruskan ke mikrokontroler ESP8266. ESP8266 yang berfungsi untuk mengolah data tersebut dengan membandingkannya terhadap batas aman kemiringan dan penurunan yang telah ditentukan. Selain pemrosesan lokal, ESP8266 juga menyiapkan data agar dapat dikirim

ke platform IoT melalui koneksi internet untuk keperluan monitoring jarak jauh.

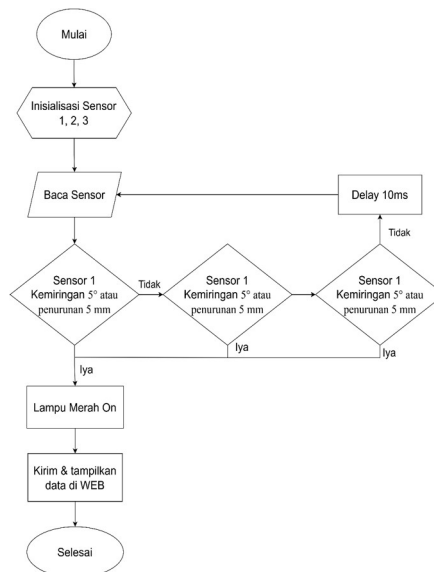
3) Output

Apabila terdeteksi kemiringan atau penurunan pada jembatan lampu merah akan menyala, dan jika jembatan dalam keadaan normal (tidak terdeteksi kemiringan dan penurunan) lampu hijau akan tetap menyala. *Platform web* akan menerima data dari ESP8266 melalui internet dan akan ditampilkan secara *real-time* untuk dilakukan pemantauan secara visual terhadap kemiringan dan penurunannya.

Flowchart Sistem

Penjelasan dari flowchart tersebut adalah seperti berikut :

- 1) Inisiasi Input/Output: Sistem akan menginisialisasi port input dan output yang terhubung dengan sensor
- 2) Baca sensor: Sistem akan membaca data dari sensor kemiringan dan sensor penurunan yang terpasang pada jembatan
- 3) Kemiringan melebihi 5°?: Sistem akan memeriksa apakah nilai sudut kemiringan melebihi 5°, jika iya maka lampu merah akan menyala sebagai peringatan bahwa kemiringan jembatan tidak normal
- 4) Penurunan melebihi 5mm: Sistem akan memeriksa apakah terjadi penurunan pada permukaan jembatan lebih dari 5mm, jika iya, maka lampu merah akan menyala sebagai tanda bahaya terhadap pengguna jalan
- 5) Kirim & tampilkan data di WEB: Setelah pemeriksaan kondisi selesai, sistem akan mengirimkan data hasil pembacaan sensor melalui komunikasi ESP8266 ke sistem monitoring berbasis web. Data ini akan ditampilkan secara *real-time* untuk keperluan dokumentasi dan pengawasan.

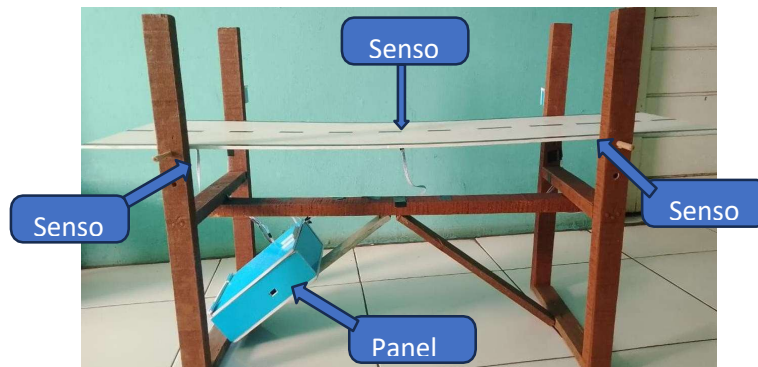


Gambar 2. Flowchart sistem

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengerjaan Alat

Gambar berikut menampilkan hasil pengerjaan alat berupa purwarupa jembatan sistem monitoring kemiringan dan penurunan berbasis *IoT*. Dokumentasi ditampilkan untuk memperlihatkan bentuk keseluruhan alat, panel box, pemasangan sensor dan indikator LED.



Gambar 3. bentuk nyata prototipe jembatan tampak samping



Gambar 4. Bentuk nyata prototipe jembatan tampak depan

Gambar di atas menunjukkan tampilan depan purwarupa jembatan, pada gambar tersebut menampilkan letak indikator LED untuk peringatan pengguna jalan.

B. Pengujian Sistem

Pengujian perancangan sistem bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem monitoring dalam mendeteksi perubahan kemiringan jembatan. Pengujian dilakukan dengan memberikan beberapa variasi kemiringan pada prototype jembatan, meliputi kondisi normal, kondisi bahaya dengan kemiringan ke sisi kiri, serta kondisi bahaya dengan kemiringan ke sisi kanan. Data hasil pengujian diperoleh dari pembacaan nilai sensor yang ditampilkan melalui Serial Monitor pada Arduino IDE.

Pengujian kondisi aman

Pengujian kondisi aman dilakukan dengan meletakkan purwarupa jembatan pada posisi datar tanpa kemiringan.

Tabel 1. Pengujian kondisi aman

Sensor	Roll(°)	Pitch(°)	Status
Sensor 1	0,19°	-0,01°	Aman
Sensor 2	0,08°	0,03°	Aman
Sensor 3	0,02°	0,09°	Aman

Berdasarkan hasil pengujian kondisi aman yang ditunjukkan dalam Tabel di atas, seluruh sensor MPU6050 menunjukkan nilai sudut *roll* dan *pitch* yang berada di sekitar nol derajat. Nilai kemiringan tersebut masih berada di bawah batas ambang $\pm 5^\circ$ yang telah ditentukan sebagai batas kondisi aman pada struktur jembatan.

Hal ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi sensor telah dilakukan dengan baik, sehingga sensor mampu mendeteksi posisi jembatan secara stabil ketika berada pada kondisi datar. Pada kondisi ini, LED hijau aktif sebagai indikator keadaan aman, sedangkan LED merah dalam kondisi mati, yang menandakan sistem berhasil mengklasifikasikan kondisi jembatan sebagai aman.



Gambar 5. Dasboard Adafruit IO kondisi aman

Berdasarkan Gambar 5 hasil pembacaan data pada serial monitor menunjukkan nilai sudut kemiringan (*pitch* dan *roll*) yang berada di sekitar 0° hingga $\pm 1^\circ$. Nilai tersebut masih berada di bawah batas ambang yang telah ditentukan, yaitu $\pm 5^\circ$, sehingga sistem mengklasifikasikan kondisi jembatan dalam keadaan aman. Data yang ditampilkan juga terlihat stabil tanpa fluktuasi yang signifikan, menandakan bahwa sensor MPU6050 telah bekerja dengan baik setelah proses kalibrasi. Kondisi ini membuktikan bahwa sistem mampu membaca dan memproses data kemiringan secara akurat pada keadaan normal.

Pengujian kondisi bahaya (kemiringan kanan)

Pengujian kondisi bahaya dilakukan dengan simulasi memiringkan purwarupa jembatan ke arah kanan. Pada pengujian ini, kemiringan kanan dibagi menjadi dua kondisi, yaitu kemiringan sedang dan kemiringan ekstrim, untuk melihat respons sistem terhadap tingkat kemiringan yang berbeda.

Tabel 2. Kondisi kemiringan kanan (sedang)

Sensor	Roll($^\circ$)	Pitch($^\circ$)	Status
Sensor 1	-3,86 $^\circ$	-0,4 $^\circ$	Aman
Sensor 2	-3,82 $^\circ$	-0,32 $^\circ$	Aman
Sensor 3	-3,5 $^\circ$	-0,31 $^\circ$	Aman

Pada pengujian kemiringan kanan sedang, nilai sudut *roll* yang terukur pada ketiga sensor menunjukkan kecenderungan negatif dengan rentang $-3,86^\circ$ hingga $-3,5^\circ$, yang menandakan arah kemiringan ke sisi kanan. Sementara itu, nilai *pitch* relatif kecil dan stabil pada seluruh sensor, sehingga perubahan posisi jembatan masih bersifat ringan dan terkendali.

Kestabilan nilai *pitch* menunjukkan bahwa kemiringan yang terjadi belum memengaruhi keseimbangan vertikal prototipe jembatan. Oleh karena itu, sistem mengklasifikasikan kondisi ini sebagai Aman, yang menandakan bahwa struktur jembatan masih berada dalam batas operasional normal pada kemiringan kanan sedang.



Gambar 6. Dashboard Adafruit IO kemiringan kanan (sedang)

Tabel 3. Kondisi kemiringan kanan (ekstrim)

Sensor	Roll(°)	Pitch(°)	Status
Sensor 1	-7,73°	-0,49°	Bahaya
Sensor 2	-7,99°	-0,67°	Bahaya
Sensor 3	-8,25°	-0,63°	Bahaya

Pada pengujian dengan kondisi kemiringan kanan ekstrem, nilai sudut *roll* mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan kondisi kemiringan sedang, dengan kisaran nilai antara $-7,73^{\circ}$ hingga $-8,25^{\circ}$. Hal ini menunjukkan bahwa sudut kemiringan ke arah kanan telah mendekati ambang batas maksimum yang ditetapkan oleh sistem.

Selain itu, perubahan nilai sudut *pitch* juga terlihat lebih besar dibandingkan kondisi sedang, yang menandakan bahwa kemiringan mulai berdampak pada keseimbangan struktur secara menyeluruh. Berdasarkan hasil tersebut, sistem menetapkan status *Bahaya* pada seluruh sensor, yang mengindikasikan bahwa prototipe jembatan berada dalam kondisi tidak stabil dan berisiko terhadap keselamatan.



Gambar 7. Dashboard Adafruit IO kemiringan kanan (ekstrim)



Gambar 8. Indikator lampu menyala saat kemiringan kanan

Pengujian kondisi bahaya (kemiringan kiri)

Pengujian kondisi bahaya selanjutnya dilakukan dengan simulasi memiringkan purwarupa jembatan ke arah kiri. Pada pengujian ini, kemiringan kiri juga akan dibagi menjadi dua kondisi, yaitu kemiringan sedang dan kemiringan *ekstrem*, untuk mengetahui respons sistem terhadap perubahan sudut kemiringan pada tingkat kondisi yang berbeda.

Tabel 4. kondisi kemiringan kiri (sedang)

Sensor	Roll(°)	Pitch(°)	Status
Sensor 1	3.58°	0,06°	Aman
Sensor 2	3.81°	0,14°	Aman
Sensor 3	4.08°	0,74°	Aman

Berdasarkan Tabel di atas hasil pengujian memperlihatkan adanya kecenderungan peningkatan nilai sudut roll pada setiap sensor seiring dengan perbedaan posisi pemasangan sensor pada prototipe jembatan. Nilai sudut roll tercatat berada pada kisaran 3,58° sampai dengan 4,08°, sementara nilai sudut pitch relatif kecil dan tidak mengalami perubahan yang berarti. Hal tersebut menunjukkan bahwa kemiringan yang terjadi lebih dominan mengarah ke sisi kiri.



Gambar 9. dashboard adafruit IO kemiringan kiri (sedang)

Walaupun terdapat perbedaan nilai sudut antar sensor, seluruh hasil pengukuran masih termasuk dalam kategori kemiringan sedang, sehingga sistem menetapkan status Aman. Kondisi ini menandakan bahwa pada tingkat kemiringan kiri sedang, struktur prototipe jembatan masih berada dalam kondisi stabil dan mampu mempertahankan keseimbangannya.

Tabel 5. kondisi kemiringan kiri (ekstrem)

Sensor	Roll(°)	Pitch(°)	Status
Sensor 1	7.33°	0,12°	Bahaya
Sensor 2	7.7°	0.54°	Bahaya
Sensor 3	7.49°	1.28°	Bahaya

Berdasarkan hasil pengujian pada kondisi kemiringan kiri ekstrem, nilai sudut *roll* yang terukur pada ketiga sensor mengalami peningkatan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan kondisi kemiringan sedang, dengan nilai berada pada kisaran 7,33° hingga 7,7°. Selain itu, sudut *pitch* juga menunjukkan kenaikan, khususnya pada Sensor 3 yang mencapai nilai 1,28°, yang mengindikasikan terjadinya perubahan posisi vertikal akibat tingkat kemiringan yang semakin besar.



Gambar 10. Dashboard Adafruit IO kemiringan kiri (ekstrim)

Kenaikan nilai sudut roll dan pitch tersebut menunjukkan bahwa kemiringan yang terjadi tidak hanya bersifat lateral ke arah kiri, tetapi juga mulai berdampak pada kestabilan permukaan prototipe jembatan. Atas dasar kondisi tersebut, sistem menetapkan status Bahaya pada seluruh sensor, seperti ditunjukkan pada gambar berikut, sehingga indikator lampu bahaya menyala.



Gambar 11. Indikator lampu menyala saat kemiringan kiri

Pengujian kondisi bahaya (penurunan)

Pengujian kondisi bahaya ketiga yaitu pengujian kondisi penurunan pada purwarupa jembatan. Pengujian kondisi penurunan dilakukan dengan memberikan tekanan pada bagian tengah purwarupa jembatan sehingga terjadi penurunan permukaan jembatan secara vertikal. Tekanan diberikan secara bertahap dengan variasi jarak penurunan sebesar 3 cm, 6 cm, dan 8 cm untuk mensimulasikan beban yang bekerja pada struktur jembatan.

Tabel 6. kondisi bahaya penurunan

No	Jarak penurunan	Kondisi bahaya
1	3 cm	8,53 mm
2	6 cm	11,72 mm
3	8 cm	14.06 mm

Berdasarkan Tabel di atas, hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar tekanan yang diberikan, semakin besar nilai penurunan yang terdeteksi oleh sistem. Pada

penurunan 3 cm, sensor mendeteksi perubahan sebesar 8,53 mm, kemudian meningkat menjadi 11,72 mm pada penurunan 6 cm dan 14,06 mm pada penurunan 8 cm. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan penurunan secara bertahap akibat adanya tekanan pada prototipe jembatan.

Perbedaan nilai penurunan yang terukur pada setiap variasi tekanan menunjukkan bahwa sensor merespons secara proporsional terhadap perubahan kondisi struktural. Dengan demikian, sistem monitoring penurunan dapat digunakan untuk mengamati perubahan tinggi permukaan jembatan akibat beban atau tekanan yang diberikan.



Gambar 12. Dashboard Adafruit IO penurunan 3cm



Gambar 13. Dashboard Adafruit IO penurunan 6 cm



Gambar 14. Dashboard Adafruit IO penurunan 8 cm

Perbandingan hasil pengukuran kemiringan jembatan sisi kiri

Tabel 7. Perbandingan hasil ukur jembatan sisi kiri

No	Hasil Pengujian		Hasil Acuan waterpass	
	X	Y	X	Y

1	7.33°	0.12°	8.2°	0.0°
2	7.7°	0.54°	8.4°	-0,4°
3	7.49°	1.28°	8.0°	-0,6°

Berdasarkan Tabel di atas terdapat perbedaan nilai sudut kemiringan antara hasil pengukuran yang diperoleh dari sistem sensor dan hasil pengukuran menggunakan *waterpass* sebagai alat pembanding. Perbedaan tersebut disebabkan oleh perbedaan prinsip kerja serta tingkat resolusi dari masing-masing alat ukur. Sistem sensor menentukan sudut kemiringan secara digital berdasarkan data dari *accelerometer* dan *gyroscope*, sedangkan *waterpass* mengukur kemiringan secara manual melalui posisi gelembung udara.

Selain itu, perbedaan hasil pengukuran juga dapat dipengaruhi oleh posisi dan metode pemasangan alat ukur pada permukaan jembatan. Sensor dipasang secara tetap pada titik tertentu, sementara *waterpass* digunakan secara manual sehingga sangat bergantung pada ketepatan penempatan dan pembacaan oleh pengguna. Faktor tambahan seperti adanya getaran ringan pada prototipe serta toleransi alat ukur turut berkontribusi terhadap selisih nilai sudut yang diperoleh.

Perbandingan hasil pengukuran kemiringan jembatan sisi kanan

Tabel 8. perbandingan hasil ukur jembatan sisi kanan

No	Hasil Pengujian		Hasil Acuan	
	X	Y	X	Y
1	-7.73°	-0.49°	-7.8°	-0.6°
2	7.99°	-0.67°	-8.2°	-0,4°
3	8.25°	-0.63°	-8.4°	0,0°

Berdasarkan Tabel di atas hasil pengukuran sudut *roll* (X) menggunakan sensor berada pada rentang $-7,73^{\circ}$ sampai $-8,25^{\circ}$, sedangkan pengukuran dengan *waterpass* sebagai alat acuan menunjukkan nilai antara $-7,8^{\circ}$ hingga $-8,4^{\circ}$. Selisih nilai yang diperoleh tergolong kecil dan menunjukkan arah kemiringan yang sama, yaitu mengarah ke sisi kanan. Sementara itu, nilai sudut *pitch* (Y) yang terukur pada kedua metode relatif kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa kemiringan yang terjadi lebih dominan disebabkan oleh pergerakan lateral. Perbedaan nilai yang tidak signifikan antara hasil pengukuran sensor dan *waterpass* dipengaruhi oleh perbedaan prinsip kerja serta metode penempatan alat ukur. Secara keseluruhan, sistem sensor yang dirancang mampu menggambarkan kondisi kemiringan jembatan dengan cukup akurat jika dibandingkan dengan alat ukur acuan.

C. Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem monitoring mampu mendeteksi perubahan kemiringan dan penurunan pada prototipe jembatan sesuai dengan skenario pengujian yang diberikan. Pengujian dilakukan pada kondisi kemiringan sisi kanan dan kiri dengan tingkat kemiringan sedang dan ekstrem, serta pengujian penurunan akibat tekanan pada permukaan jembatan.

Pada pengujian kemiringan kanan sedang, nilai sudut roll (X) yang terukur berada pada rentang $-3,50^{\circ}$ hingga $-3,86^{\circ}$, sedangkan nilai pitch (Y) berada pada rentang $-0,31^{\circ}$ hingga $-0,40^{\circ}$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan sudut kemiringan masih relatif kecil. Pada kondisi kemiringan kanan ekstrem, nilai roll meningkat secara signifikan menjadi $-7,73^{\circ}$ hingga $-8,25^{\circ}$, dengan nilai pitch $-0,49^{\circ}$ hingga $-0,67^{\circ}$, yang menandakan adanya peningkatan kemiringan dibandingkan kondisi sedang.

Untuk pengujian kemiringan kiri sedang, nilai roll berada pada rentang $3,58^{\circ}$ hingga $4,08^{\circ}$ dan nilai pitch berada pada rentang $0,06^{\circ}$ hingga $0,74^{\circ}$. Sedangkan pada kondisi kemiringan kiri ekstrem, nilai roll meningkat menjadi $7,33^{\circ}$ hingga $7,70^{\circ}$ dan nilai pitch mencapai $1,28^{\circ}$. Peningkatan nilai roll dan pitch pada kondisi ekstrem menunjukkan bahwa kemiringan yang terjadi semakin besar dan mulai memengaruhi kestabilan struktur jembatan.

Pengujian penurunan dilakukan dengan memberikan tekanan secara bertahap pada bagian tengah prototipe jembatan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada penurunan 3 cm terdeteksi perubahan sebesar 8,56 mm, pada penurunan 6 cm meningkat menjadi 12,05 mm, dan pada penurunan 8 cm mencapai 15,35 mm. Peningkatan nilai penurunan ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan kondisi struktural akibat tekanan yang diberikan.

Hasil perbandingan antara pengukuran sistem sensor dan alat acuan waterpass menunjukkan bahwa nilai sudut kemiringan yang terukur berada pada rentang yang relatif berdekatan. Pada pengujian kemiringan kiri ekstrem, selisih nilai roll berada di bawah 1° , sedangkan pada pengujian kemiringan kanan ekstrem selisih nilai roll berada di bawah $0,5^{\circ}$. Meskipun terdapat selisih nilai, kedua metode pengukuran menunjukkan kecenderungan arah kemiringan yang searah. Berdasarkan hasil tersebut, sistem monitoring yang dirancang mampu mendeteksi perubahan kemiringan dan penurunan jembatan secara konsisten sesuai dengan kondisi pengujian yang diberikan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa Sistem monitoring kemiringan dan penurunan pada prototipe jembatan mampu mendeteksi perubahan kondisi struktur jembatan secara bertahap sesuai dengan skenario pengujian yang diberikan, baik pada kemiringan sisi kiri maupun sisi kanan. Hasil pengujian kemiringan menunjukkan bahwa nilai sudut *roll* mengalami peningkatan yang signifikan dari kondisi kemiringan sedang ke kondisi kemiringan ekstrem. Pada kondisi ekstrem, nilai *roll* mencapai kisaran $\pm 7^\circ$ hingga $\pm 8^\circ$, yang menunjukkan perubahan kemiringan yang lebih besar dibandingkan kondisi sedang. Nilai sudut *pitch* yang terukur relatif lebih kecil dibandingkan nilai *roll*, namun mengalami peningkatan pada kondisi kemiringan ekstrem. Hal ini menunjukkan bahwa kemiringan yang terjadi tidak hanya bersifat lateral, tetapi juga mulai memengaruhi keseimbangan struktur jembatan. Pengujian penurunan menunjukkan bahwa semakin besar tekanan yang diberikan pada prototipe jembatan, semakin besar nilai penurunan yang terdeteksi oleh sistem. Nilai penurunan meningkat secara bertahap dari sekitar 8 mm hingga lebih dari 15 mm seiring dengan peningkatan jarak penurunan. Hasil perbandingan antara pengukuran sistem sensor dan alat acuan waterpass menunjukkan adanya selisih nilai sudut yang relatif kecil. Meskipun demikian, kedua metode pengukuran menunjukkan kecenderungan arah dan besaran kemiringan yang searah, sehingga sistem monitoring mampu merepresentasikan kondisi kemiringan jembatan dengan cukup baik. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, sistem monitoring yang dirancang mampu mengklasifikasikan kondisi jembatan ke dalam kategori aman dan bahaya sesuai dengan perubahan kemiringan dan penurunan yang terdeteksi.

DAFTAR REFERENSI

- Badan Pusat Statistik. (2023). Statistik Transportasi Darat 2023. Retrieved from <https://www.bps.go.id>
- Dewi, N. H. L., Rohmah, M. F., & Zahara, S. (n.d.). *Prototype smart home dengan modul NodeMCU ESP8266 berbasis Internet of Things (IoT)*. Universitas Islam Majapahit.
- Hartono, J., & Khoiroh, U. (2021). Evaluasi rencana pemasangan sensor Structure Health Monitoring System jembatan Pulau Balang II. *Teras Jurnal*, 11(2), 423–425.
- Laksono, N. B., & Latief, Y. (2024). Optimasi pengelolaan pemeliharaan jembatan di era digital melalui Internet of Things (IoT): Tinjauan pustaka berbasis PRISMA. *Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur, Yogyakarta, Indonesia*.
- Purnomo, A. (2023). *Rancang bangun sistem akuisisi data monitoring kualitas udara*

berbasis multisensor secara nirkabel menggunakan LabVIEW. Universitas Lampung.

- Suprayogi, A., Fitriyah, H., & Tibyani. (2019). Sistem pendeteksi kecelakaan pada sepeda motor berdasarkan kemiringan menggunakan sensor gyroscope berbasis Arduino. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 3(3), 3079–3085.
- Umar, N. (2024). *Sistem deteksi dini kemiringan dan vibrasi jembatan berbasis IoT*. Universitas Hasanuddin.