

Implementasi *Wireless Sensor Network* pada Sistem Manajemen Kesehatan Struktur Jembatan

Aris Budiarto^{#1}, Abyanuddin Salam^{#2}, Hafyyan Tashbir^{#3}

[#]Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Politeknik Manufaktur Bandung
Jl. Kanayakan no. 21, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

¹aris@ae.polman-bandung.ac.id

²aby@ae.polman-bandung.ac.id

³hafyyantashbir@gmail.com

Abstract— *The bridge is a building construction that functions as a means of transport. Therefore, mobility will be disrupted when the bridge is damaged due to natural disasters or aging. The problem can be solved by creating a health management system of the bridge structure consisting of DHT11 sensors for temperature and humidity monitoring, load cell sensors for weight monitoring, GY-521 sensors for vibration and tilt monitoring, time of flight sensors, and ultrasonic for shift monitoring. This system implements a wireless sensor network and uses a star topology in data capture and transmission. Sensor data from the nodes will be sent wirelessly to the base station and then displayed on the Node-Red dashboard. The test results show that all sensor nodes can take readings of bridge conditions and send them to the base station with an average data transmission delay of 525ms, an average packet loss value of 0%, an average throughput value of 2180.74 bps, and an average jitter value of 16.82 ms. The system built managed to get a score of 3 from the Quality of Service test with the ‘Satisfactory’ category.*

Keywords— *Node-Red, QoS, star topologi, WSN, bridge health*

Abstrak— *Jembatan merupakan sebuah konstruksi bangunan yang berfungsi sebagai sarana transportasi. Oleh sebab itu, ketika jembatan mengalami kerusakan akibat dari bencana alam atau penuaan umur jembatan, maka mobilitas akan menjadi terganggu. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan cara membuat suatu sistem manajemen kesehatan struktur jembatan yang terdiri dari sensor DHT11 untuk pemantauan suhu dan kelembapan, sensor loadcell untuk pemantauan berat, sensor GY-521 untuk pemantauan getaran dan kemiringan, sensor time of flight, dan ultrasonik untuk pemantauan pergeseran. Sistem ini menerapkan wireless sensor network dan menggunakan topologi star dalam pengambilan dan pengiriman data. Data sensor dari node akan dikirimkan secara nirkabel menuju base station lalu ditampilkan pada dashboard Node-Red. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua node sensor dapat melakukan pembacaan kondisi jembatan dan mengirimkannya kepada base station dengan rata-rata delay pengiriman data sebesar 525ms, nilai rata-rata packet loss sebesar 0 %, nilai rata-rata throughput sebesar 2180,74 bps, dan nilai rata-rata jitter sebesar 16,82 ms. Sistem yang dibangun berhasil mendapatkan nilai 3 dari pengujian Quality of Service dengan kategori “Memuaskan”.*

Kata Kunci— *Node-Red, QoS, topologi star, WSN, kesehatan jembatan*

I. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki keadaan geografis yang terdapat banyak pegunungan, lembah, dan aliran air [1]. Penghubung, seperti konstruksi jembatan, dibutuhkan sebagai upaya memaksimalkan hubungan dua tempat yang dipisahkan oleh kondisi alam [2]. Jembatan memiliki peran penting bagi masyarakat sebagai sarana transportasi untuk melakukan kegiatan ekonomi dari satu tempat ke tempat lain [3]. Meningkatnya kegiatan ekonomi akan menyebabkan beban lalu lintas yang diterima oleh jembatan juga akan meningkat. Akibatnya, jembatan lebih cepat mengalami kerusakan dan berkurangnya usia layan [4]. Faktor lain, seperti penuaan, pengoperasian yang kurang memadai, dan gempa juga dapat menyebabkan kesehatan dari suatu jembatan menjadi menurun sehingga mengancam keamanan dari fungsi jembatan. Sistem pengawasan kondisi jembatan menjadi diperlukan agar dapat digunakan sebagai bahan analisis [5].

Sistem Manajemen Kesehatan Struktur (SMKS) merupakan sistem yang dapat mengumpulkan data secara *real-time* dalam sebuah interval waktu. Data yang dikumpulkan adalah data respons struktur dan perubahan struktur. Sistem ini dapat digunakan untuk mendeteksi adanya deformasi atau kerusakan pada struktur [2]. Deformasi atau kerusakan tersebut diartikan sebagai perubahan bentuk dari sifat material. Deteksi kerusakan, lokasi, jenis, dan taraf adalah empat tingkat deteksi yang umum digunakan. Tujuan SMKs ini adalah untuk memberikan informasi tentang pemantauan kondisi kesehatan struktur, terutama jembatan yang mengalami beban hidup yang tinggi sehingga dapat membuat perencanaan pemeliharaan yang ekonomis dan mengetahui penyebab kerusakan pada struktur [6]. Sistem pemantauan ini mampu mengetahui kerusakan atau penurunan kemampuan lebih awal. Getaran, frekuensi alami, faktor pembesaran dinamis, pergeseran elemen jembatan, tegangan dan regangan struktur, perubahan suhu lingkungan, dan perubahan kemiringan struktur adalah beberapa parameter yang termasuk dalam SMKs ini [7].

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan jaringan terdesentralisasi yang terdiri dari *node* sensor yang dapat memantau, menghitung, dan berkomunikasi satu sama lain. *Node* tersebut bekerja untuk melakukan pengumpulan informasi dari lingkungan sekitarnya. WSN telah digunakan pada berbagai bidang, seperti kesehatan, infrastruktur perkotaan cerdas, dan kontrol industri. *Node* sensor ditempatkan pada wilayah yang ditentukan untuk melakukan

pemantauan lalu meneruskannya ke *base station* atau *node* lain yang ada pada jaringannya. Data yang telah diterima oleh *base station* dapat digunakan untuk analisis untuk keperluan pengambilan keputusan [8].

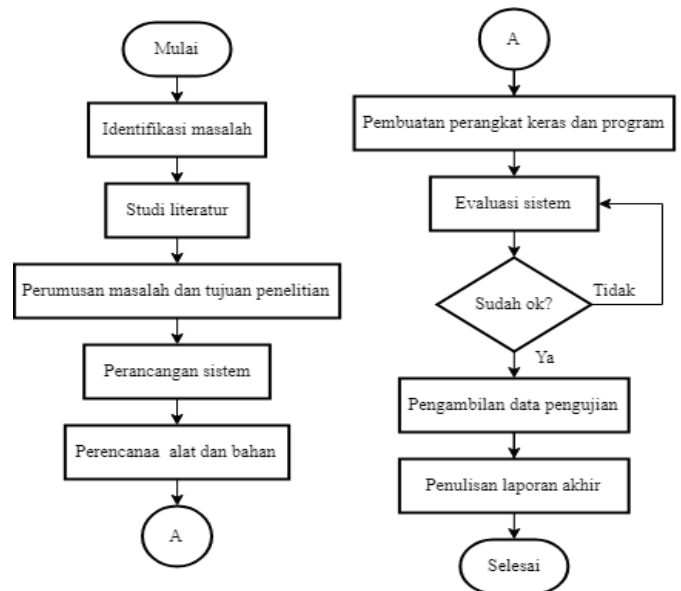
Budiyarto A, dkk. melakukan penelitian dengan judul “*Design System of Structural Health Monitoring System Using Wireless Sensor Network*”. Penelitian ini menggunakan sistem WSN pada aplikasi pemantauan jembatan dan menggunakan topologi *linear* dengan *routing protocol static* [9]. Wibawa, dkk. melakukan integrasi sensor *loadcell* dan sensor *SunSpot* untuk melakukan pengawasan kesehatan pada beban dan frekuensi getaran jembatan [2]. Panuntun, dkk. melakukan penelitian pemantauan estimasi pergeseran jembatan menggunakan sensor *tiltmeter* [10]. Pramudya, dkk. mengemukakan pada penelitiannya tentang tren, biaya, dan tantangan *structural health monitoring system* bahwa terdapat parameter pemantauan jembatan yang sering digunakan, yaitu suhu, beban, getaran, dan pergeseran. Sistem pemantauan dengan menggunakan *wireless sensor* menjadi peringkat kedua yang paling banyak digunakan. Sistem *wireless sensor* yang dihubungkan dengan internet memungkinkan untuk melakukan pemantauan kondisi jembatan tanpa harus melakukan inspeksi manual ke lapangan [11].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menerapkan teknologi WSN pada sistem pemantauan kondisi kesehatan dari sebuah struktur jembatan yang dipasang pada purwarupa jembatan. Kemampuan sensor yang dapat melakukan pemantauan kondisi jembatan ditempatkan pada titik yang dianggap rawan terjadinya kerusakan. Data pembacaan sensor kemudian dikirimkan ke *base station* secara nirkabel. *Node* sensor terdiri dari *microcontroller* ESP32, modul NRF24I01+, dan *battery shield* sebagai modul yang menyuplai sumber daya. Data sensor yang dikirim oleh *base station* diproses dan ditampilkan pada *dashboard* Node-Red. Dengan demikian, pihak yang terlibat dapat mempertimbangkan dan menganalisis data ini untuk membantu mereka membuat keputusan. Diharapkan penelitian ini akan memberikan kontribusi ilmu pengetahuan tentang pemilihan topologi jaringan yang digunakan pada sistem WSN dan sistem pemantauan jembatan.

II. METODOLOGI

Alur penelitian ini meliputi identifikasi masalah kemudian dilanjutkan dengan studi literatur untuk mencari informasi yang berkaitan dengan penelitian sebagai landasan yang menunjang perumusan dan penyelesaian masalah. Tahapan selanjutnya, yaitu perumusan masalah dan tujuan penelitian, kemudian melakukan perancangan sistem yang dibangun, serta merencanakan alat dan bahan yang digunakan. Pembuatan perangkat keras dan program menjadi tahapan selanjutnya pada penelitian ini. Setelah sistem dapat berjalan, dilakukan evaluasi sistem. Jika sistem belum sesuai dengan yang diharapkan kemudian dilanjutkan ke tahap selanjutnya, yaitu pengambilan data pengujian. Tahapan terakhir ditutup dengan penulisan laporan akhir penelitian. Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Penelitian ini berfokus pada penerapan teknologi *wireless*



Gambar 1 Alur penelitian

sensor network pada sistem manajemen kesehatan struktur jembatan menggunakan topologi jaringan *star*. Pengujian pada penelitian ini meliputi pengujian fungsi sistem secara menyeluruh, serta pengujian sistem WSN yang dibangun dengan parameter *delay* pengiriman data, parameter *packet loss*, *throughput*, dan *jitter*.

A. Sistem Manajemen Kesehatan Struktur (SMKS)

SMKS adalah penerapan sistem deteksi kerusakan serta karakteristik strategi untuk *engineering structures*. Tujuan penggunaan SMKS pada struktur adalah untuk mengumpulkan data yang digunakan sebagai penentuan risiko keamanan struktur berdasarkan komponen struktural yang terlibat dalam proses fabrikasi, manufaktur, dan konstruksi. Pengumpulan data dilakukan, baik secara *real-time* maupun dalam interval waktu yang teratur. Sekitar 40 jembatan bentang panjang (100 m atau lebih) di seluruh dunia telah diintegrasikan dengan sistem pemantauan kesehatan struktural untuk menerapkan dan mengoperasikan sistem SMKS pada skala besar. SMKS memiliki kemampuan untuk bertindak sebagai sistem peringatan darurat dan melakukan penilaian keamanan untuk membantu menemukan kerusakan struktural. [3].

B. Wireless Sensor Network (WSN)

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk pengolahan data pada SMKS dan diterapkan untuk menggantikan sistem kabel tradisional. *Node* sensor pada WSN tersebar pada struktur. Setiap *node* memiliki kemampuan untuk komunikasi dengan *base station* secara nirkabel untuk mengirim data. WSN memiliki *node* sensor yang tidak membutuhkan kabel sehingga cocok dipasang di lokasi terpencil yang sulit jika menggunakan sistem kabel tradisional. Hal ini yang membedakan sistem WSN dengan sistem kabel tradisional. Penerapan WSN untuk SMKS, akuisisi data dilakukan oleh *node* sensor yang mengumpulkan

data dari sensor SMKS. Terdapat dua jenis jaringan komunikasi pada WSN, yaitu *node sensor* yang dapat mengirimkan data langsung kepada *base station* yang disebut *single-hop* atau dengan cara mengirimkan dahulu kepada *node sensor* lain hingga data dapat diterima oleh *base station* yang disebut *multi-hop* [12]. Ilustrasi arsitektur WSN secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.

C. Arsitektur Sistem

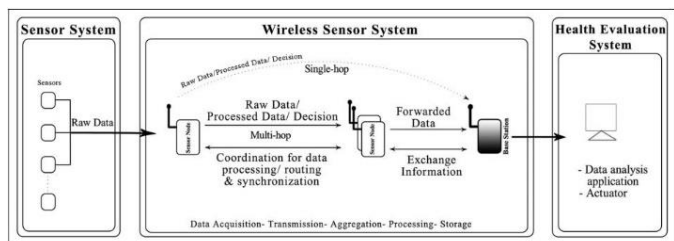
Sistem pemantauan kesehatan struktur jembatan yang dibangun pada penelitian ini terdiri atas 5 *node sensor* dan 1 *base station*. Sensor yang digunakan untuk melakukan pemantauan kesehatan jembatan, yaitu sensor DHT11 yang berfungsi untuk melakukan pemantauan suhu dan kelembapan, sensor GY-521 untuk mendeteksi kemiringan dan getaran, sensor *loadcell* untuk pembacaan berat, serta sensor *time of flight* dan ultrasonik yang berfungsi untuk mendeteksi pergeseran pada sumbu X, Y, dan Z. Pemilihan sensor didasarkan terhadap spesifikasi sensor. Sensor DHT11 mampu membaca suhu dari 0°C-50°C, sedangkan untuk kelembapan dari 20%-90%. Sensor GY-521 dipilih karena sensor ini memiliki kemampuan untuk membaca 3 *axis accelerometer* dan 3 *axis gyro* sehingga kedua pembacaan tersebut dapat dikombinasikan untuk pembacaan kemiringan dan getaran. Sensor *loadcell* digunakan karena sensor ini mampu mendeteksi berat dengan akurasi yang tinggi. Sensor ultrasonik dan *time of flight* dipilih karena kedua sensor tersebut mampu membaca jarak dengan resolusi 1 mm. Semua sensor yang dipilih sudah cukup mampu membaca perubahan yang terjadi pada jembatan dalam skala purwarupa.

Sensor yang digunakan dihubungkan dengan *microcontroller* ESP32 dan modul *battery shield* 18650 sebagai suplai daya pada *node sensor*, serta modul komunikasi nirkabel NRF24101. *Base station* terdiri dari Raspberry Pi dan modul NRF24101 sebagai perangkat yang digunakan untuk komunikasi dengan *node sensor*.

WSN yang menggunakan topologi *star* dalam aplikasi sistem manajemen kesehatan struktur jembatan ini memungkinkan setiap *node sensor* terhubung secara langsung ke *base station* dan mengirimkan data pembacaan sensor ke *base station*. Data yang diterima *base station* kemudian disimpan pada *database* MySQL dan ditampilkan pada *dashboard* Node-Red. Arsitektur sistem yang dibangun dapat dilihat pada Gambar 3.

D. Parameter Pengujian Sistem

Pengujian WSN pada sistem manajemen kesehatan struktur



Gambar 2 Arsitektur WSN [12]

jembatan mencakup pengujian berdasarkan keandalan sistem dan pengukuran kualitas jaringan menggunakan metode *Quality of Service (QoS)*. Karakteristik dan model layanan juga dapat digambarkan oleh metode QoS. Pengukuran kualitas jaringan mengacu pada seberapa baik sebuah jaringan dapat menangani lalu lintas data tertentu. *Delay*, *packet loss*, *throughput*, dan *jitter* adalah parameter pengujian QoS jaringan. Tabel I menunjukkan nilai dan indeks dari QoS.

1) Parameter keakuratan Sensor

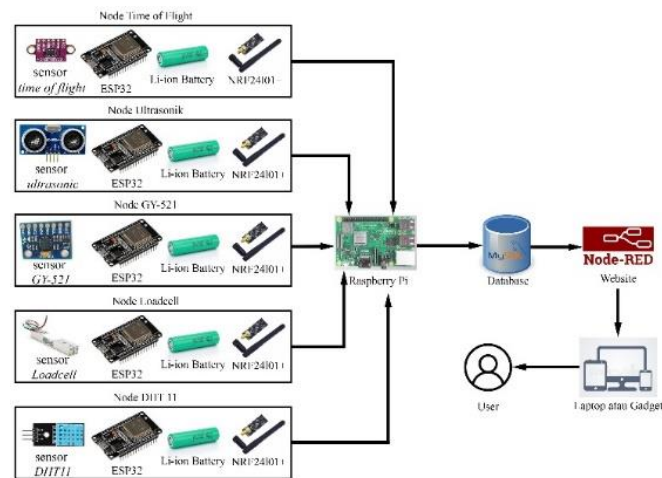
Parameter ini akan menilai keakuratan sensor dalam melakukan pembacaan. Pengujian dilakukan dengan pengambilan data sebanyak 10 kali yang dibandingkan dengan pembacaan alat ukur.

2) Parameter Keandalan Sistem

Parameter ini akan menilai kemampuan sistem untuk berfungsi dengan baik. Pengujian dilakukan dengan cara membuat kondisi parameter pemantauan melebihi dari batas atas atau bawah yang sudah ditentukan. Sistem akan menampilkan alarm berupa teks pada *dashboard* Node-Red jika kondisi sudah tercapai.

3) Parameter Penilaian Kesehatan Jembatan

Parameter ini akan menilai kemampuan sistem dalam menilai kondisi kesehatan dari sebuah jembatan. Penilaian kondisi jembatan dilakukan dengan melihat seberapa banyak parameter ambang batas yang tercapai. Pada sistem ini, kesehatan jembatan akan berkurang sebesar 5% untuk setiap parameter yang melebihi ambang batas yang sudah ditentukan.



Gambar 3 Arsitektur Sistem

TABEL I
NILAI QUALITY OF SERVICE

Nilai	Persentase	Indeks
3,8 – 4	95 – 100	Sangat Memuaskan
3 – 3,79	75 – 94,75	Memuaskan
2 – 2,99	50 – 74,75	Kurang Memuaskan
1 – 1,99	25 – 49,75	Tidak Memuaskan

4) *Parameter Delay Pengiriman Data*

Delay merupakan berapa lama waktu perjalanan data dari pengirim ke penerima. Kondisi jarak antara pengirim dan penerima, kondisi media fisik, dan pemrosesan data yang lama dapat mempengaruhi *delay*. Perhitungan *delay* dapat dilakukan dengan cara melihat selisih waktu data dikirim dan waktu data diterima kemudian dirataratakan. Satuan *delay* adalah ms.

$$Delay = waktu\ terima - waktu\ kirim \quad (1)$$

Persamaan (1) merupakan rumus untuk menghitung *delay* pengiriman data dengan cara mengurangi waktu pada saat data diterima dengan waktu pada saat data dikirimkan [13]. Tabel II menunjukkan parameter *delay* menurut standar TIPHON (Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Network).

5) *Parameter Packet Loss*

Kondisi paket data yang dikirim tidak sampai ke penerima karena alasan tertentu disebut *packet loss*. Kondisi ini dapat berupa tabrakan dan penuhnya jaringan.

$$Packet\ loss = \frac{(Data\ dikirim - data\ diterima)}{Data\ diterima} \times 100\% \quad (2)$$

Persamaan (2) merupakan metode untuk menghitung *packet loss*, yaitu dengan cara jumlah data yang dikirim dikurangi dengan jumlah data yang diterima, dibagi dengan jumlah data yang diterima, dan kemudian dikalikan dengan 100%. Hasilnya berupa persentase [13]. Tabel III merupakan parameter *packet loss* menurut standar TIPHON.

6) *Parameter Throughput*

Throughput merupakan kecepatan transfer data. Perhitungan *throughput* membutuhkan data paket yang diterima dan interval waktu selama pengamatan. *Throughput* diukur dalam satuan bps, atau *bit per second*.

$$Throughput = \frac{Paket\ data\ diterima}{Lama\ pengamatan} \quad (3)$$

Persamaan (3) merupakan rumus untuk menghitung nilai *throughput* dengan cara membagi jumlah paket data yang diterima selama periode waktu tertentu dengan lama periode waktu tersebut [13]. Tabel IV menunjukkan parameter *throughput* berdasarkan standar TIPHON.

7) *Parameter Jitter*

Jitter merupakan nilai variasi dari *delay* antar paket. Adanya *jitter* disebabkan oleh antrean pemrosesan data dan penyusunan kembali paket data pada akhir pengiriman akibat kesalahan yang terjadi sebelumnya [13]. Untuk menghitung nilai *jitter*, langkah pertamanya harus mengetahui nilai total variasi *delay*.

TABEL II
KATEGORI DELAY

Kategori	Besar Delay (ms)	Indeks
Sangat Baik	< 150	4
Baik	150 s.d. 300	3
Sedang	300 s.d. 450	2
Buruk	> 450	1

TABEL III
KATEGORI PACKET LOSS

Kategori	Packet Loss (%)	Indeks
Sangat Baik	0	4
Baik	3	3
Sedang	15	2
Buruk	25	1

TABEL IV
KATEGORI THROUGHPUT

Kategori	Throughput (bps)	Indeks
Sangat Baik	100	4
Baik	75	3
Sedang	50	2
Buruk	< 25	1

$$Total\ variasi\ delay = |(delay\ 2 - delay\ 1)| + |(delay\ 3 - delay\ 2)| + \dots + |(delay\ n - delay\ (n-1))| \quad (4)$$

Persamaan (4) adalah untuk mencari nilai total variasi *delay* dengan menjumlahkan selisih dari nilai *delay* data ke-2 yang dikurangi dengan nilai *delay* data ke-1 sampai dengan nilai *delay* data ke-*n* dikurangi dengan nilai *delay* data ke-*n-1*.

$$Jitter = \frac{Total\ variasi\ delay}{Total\ paket\ diterima} \quad (5)$$

Persamaan (5) membagi nilai total variasi *delay* yang didapatkan dengan persamaan (4) dengan nilai total paket yang diterima untuk menghitung nilai *jitter*. Tabel V menunjukkan parameter *jitter* berdasarkan standar TIPHON.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil dari implementasi dan pengujian sistem yang telah dibangun. Tujuan pengujian adalah untuk memastikan bahwa sistem berfungsi dengan baik dan sesuai dengan rancangan. Pengujian dilakukan pada semua *node* sensor yang ada dengan jumlah 5 *node* sensor.

A. *Pengujian Pembacaan Sensor*

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui kesalahan atau *error* pembacaan sensor. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pembacaan data pada sensor lalu dibandingkan dengan pembacaan alat ukur, sebagai pembanding. Pada Tabel VI dapat dilihat bahwa pengujian sensor DHT11 mendapatkan nilai *error* sebesar 4%; pada Tabel VII dapat dilihat pengujian sensor *loadcell* mendapatkan nilai *error* sebesar 0,52%; pada

TABEL V
KATEGORI *JITTER*

Kategori	<i>Jitter</i> (ms)	Indeks
Sangat Baik	0	4
Baik	0 s.d. 75	3
Sedang	75 s.d. 125	2
Buruk	125 s.d. 225	1

TABEL VI
PENGUJIAN SENSOR DHT11

Uji ke-	HTC-01		DHT11	
	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)
1	25,2	72	24,7	74
2	26,4	68	26,5	70
3	27,5	64	27,4	66
4	27,7	63	27,8	68
5	28	61	29,3	63
6	29,1	57	29,3	62
7	29,8	56	30,8	59
8	30,4	55	31,3	58
9	28,7	58	27,8	62
10	28	60	27,4	68
	Error		4%	

TABEL VII
PENGUJIAN SENSOR *LOADCELL*

Uji ke-	Timbangan Digital (Gram)	<i>Loadcell</i> (Gram)	
1	31	30	
2	69	68	
3	65	65	
4	86	86	
5	92	92	
6	220	220	
7	268	267	
8	436	436	
9	553	553	
10	579	578	
	Error		0,52%

Tabel VIII dapat dilihat pengujian sensor GY-521 mendapatkan nilai *error* sebesar 1,17%; pada Tabel IX dapat dilihat pengujian sensor *time of flight* mendapatkan nilai *error* sebesar 3%; dan pada Tabel X dapat dilihat pengujian sensor ultrasonik mendapatkan nilai *error* sebesar 4,13%.

B. Pengujian Keandalan Sistem

Sistem harus diuji untuk mengetahui seberapa baik sistem berfungsi. Pengujian ini dilakukan sepuluh kali. Tabel XI menampilkan hasil pengujian keandalan sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat diandalkan karena semua alarm bekerja dengan baik pada semua parameter pemantauan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang dibangun sepenuhnya dapat berfungsi dengan baik.

Gambar 4 menunjukkan tampilan *dashboard node* DHT11; Gambar 5 menunjukkan tampilan *dashboard node loadcell*; Gambar 6 menunjukkan tampilan *dashboard node* GY-521; Gambar 7 menunjukkan tampilan *dashboard node time of flight*; dan Gambar 8 menunjukkan tampilan *dashboard node* ultrasonik.

TABEL VIII
PENGUJIAN SENSOR GY-521

Uji ke-	Busur Derajat (°)	GY-521	
		<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)
1	0	0	0
2	10	9,6	9,8
3	30	29,6	30,4
4	50	49,7	50,3
5	70	70,5	69,6
6	80	80,2	79,6
7	-10	-9,5	-9,8
8	-30	-30,2	-30,5
9	-50	-50,2	-50,6
10	-70	-70,3	-70,1
	Error		1,17%

TABEL IX
PENGUJIAN SENSOR *TIME OF FLIGHT*

Uji ke-	Penggaris (mm)	<i>Time of Flight</i>		
		Sumbu X	Sumbu Y	Sumbu Z
1	50	47	52	52
2	70	68	72	74
3	90	88	93	95
4	110	112	114	115
5	130	132	135	136
6	150	153	155	154
7	170	167	172	174
8	190	187	191	196
9	210	213	212	217
10	230	223	223	236
	Error		3%	

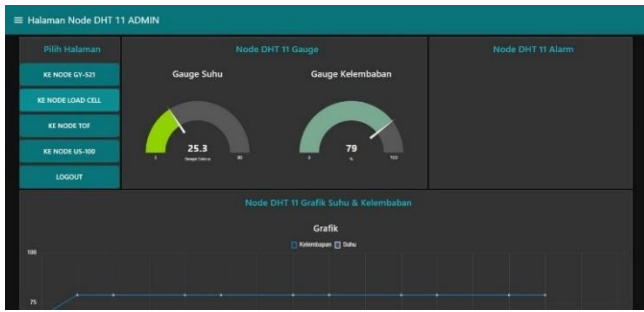
TABEL X
PENGUJIAN SENSOR ULTRASONIK

Uji ke-	Penggaris (mm)	<i>Time of Flight</i>		
		Sumbu X	Sumbu Y	Sumbu Z
1	50	52	56	55
2	70	76	76	73
3	90	91	93	93
4	110	113	113	112
5	130	132	136	130
6	150	159	158	157
7	170	176	179	177
8	190	196	199	196
9	210	215	215	213
10	230	237	237	237
	Error		4,13%	

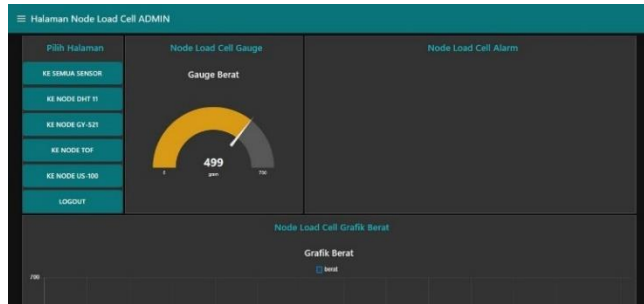
C. Pengujian Kesehatan Jembatan

Pengujian penilaian kesehatan perlu dilakukan agar dapat mengetahui sistem dapat melakukan penilaian kesehatan dengan baik. Pada sistem ini, kondisi kesehatan jembatan bernilai 100% jika tidak ada ambang batas yang terlampaui. Nilai kesehatan jembatan akan berkurang sebesar 5% untuk setiap parameter yang melebihi ambang batas yang sudah ditentukan.

Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pengambilan data dengan kombinasi parameter yang berbeda. Purwarupa jembatan dikondisikan dalam keadaan tidak aman atau melebihi ambang batas. Ambang batas untuk parameter beban



Gambar 4 Tampilan dashboard node DHT11



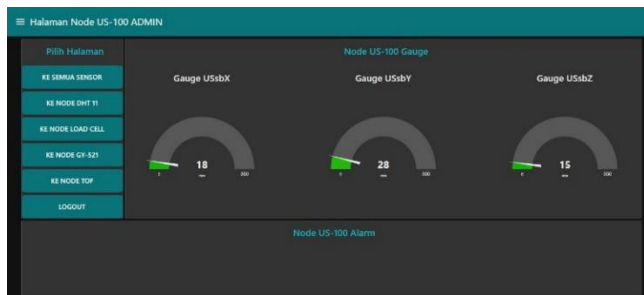
Gambar 5 Tampilan dashboard node loadcell



Gambar 6 Tampilan dashboard node GY-521



Gambar 7 Tampilan dashboard time of flight



Gambar 8 Tampilan dashboard ultrasonik

TABEL XI
HASIL PENGUJIAN KEANDALAN SISTEM

No.	Parameter	Percobaan									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Suhu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2.	Kelembapan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3.	Berat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4.	Pitch	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5.	Roll	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6.	Frekuensi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7.	Time of Flight Sumbu X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8.	Time of Flight Sumbu Y	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9.	Time of Flight Sumbu Z	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10.	Ultrasonik sumbu X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11.	Ultrasonik Sumbu Y	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12.	Ultrasonik Sumbu Z	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

adalah 821 gram. Parameter kemiringan sebesar $1,14^\circ$ untuk *pitch* dan $2,86^\circ$ untuk *roll*. Parameter getaran atau frekuensi sebesar 0,93Hz. Ambang batas untuk pergeseran sebesar 6,35mm. Tabel XII menunjukkan pengujian penilaian kesehatan jembatan dapat menilai kesehatan purwarupa jembatan pada semua percobaan yang dilakukan.

D. Pengujian Delay Pengiriman Data

Untuk mengetahui berapa lama sistem membutuhkan waktu untuk mengirim data dari *node* sensor ke *base station*, dilakukan pengujian *delay* pengiriman data. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali, *node* sensor mengirim data menuju *base station* kemudian dihitung rata-ratanya. Waktu data terkirim dan data diterima dicatat kemudian dilakukan perhitungan dengan cara waktu terima dikurangi dengan waktu kirim sehingga didapatkan *delay* pengiriman data.

Tabel XIII menunjukkan data pengujian *delay* yang memperlihatkan bahwa *delay* pada setiap *node* tidak jauh berbeda. Nilai *delay* terbesar terdapat pada *node* DHT11, yaitu 528 ms, sedangkan nilai *delay* terkecil terdapat pada *node* ultrasonik, yaitu 519 ms.

E. Pengujian Packet Loss

Untuk mengetahui berapa banyak data yang hilang atau yang tidak diterima oleh *base station*, maka dilakukan pengujian *packet loss*. Pengujian ini dilakukan dengan cara data pembacaan sensor dari *node* sensor dikirimkan ke *base station* sebanyak 500 kali kemudian dicatat jumlah data yang diterima oleh *base station*.

Tabel XIV menunjukkan data pengujian *packet loss* pada setiap *node* sensor yang menghasilkan bahwa nilai *packet loss* pada setiap *node* bernilai 0%. Hal ini menunjukkan bahwa semua data yang dikirim oleh *node* sensor dapat diterima oleh *base station* dengan baik tanpa adanya kehilangan data.

F. Pengujian Throughput

Tujuan dilakukannya pengujian *throughput* untuk mengetahui kecepatan transfer data dalam satuan bps (*bit per second*). Pengujian dilakukan selama satu menit dengan cara *node* sensor mengirimkan data pembacaan sensor menuju *base station*.

Tabel XV menunjukkan hasil pengujian pada parameter *throughput*. Nilai *throughput* terbesar terdapat pada *node* DHT11, yaitu 2389,73 bps, sedangkan nilai *throughput* terkecil terdapat pada *node loadcell*, yaitu 1586,66 bps.

G. Pengujian Jitter

Pengujian *jitter* dilakukan untuk mengetahui nilai variasi *delay* antar paket data yang diterima oleh *base station*. Pengujian dilakukan dengan cara data pembacaan sensor dari *node* sensor dikirimkan ke *base station* sebanyak 10 kali pengiriman data kemudian dicatat *delay* pengiriman data dan dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (4) dan (5).

Tabel XVI menunjukkan hasil pengujian *jitter* untuk setiap *node* sensor. Pengujian menghasilkan bahwa nilai *jitter* terbesar terdapat pada *node loadcell* dengan nilai 19,22 ms, sedangkan nilai *jitter* terkecil terdapat pada *node* ultrasonik dengan nilai 13,33 ms.

TABEL XII
PENGUJIAN KESEHATAN JEMBATAN

Uji ke-	Parameter	Pembacaan Sensor	Nilai Kesehatan Jembatan
1	Beban, <i>pitch</i> , <i>roll</i> , frekuensi	967, 1.53°, 3.27°, 4.1Hz	80%
2	Beban, <i>pitch</i> , <i>roll</i> , frekuensi, ToF X, US X	861, 1.79°, 2.96°, 3.71Hz, 8, 8	70%
3	Beban, <i>pitch</i> , frekuensi, ToF X, ToF Z, US X, US Z	850, 2.48°, 3.41Hz, -7, -8, -7, -8	65%
4	<i>pitch</i> , frekuensi, ToF X, ToF Y, ToF Z, US X, US Y, US Z	1.78°, 2.39Hz, -9, -8, 7, -9, 8, 7	60%
5	<i>roll</i> , frekuensi, ToF X, ToF Y, ToF Z, US X, US Y, US Z	2.78°, 3.48Hz, -7, 9, 7, -7, -9, 7	60%
6	Beban, <i>pitch</i> , <i>roll</i> , frekuensi, ToF X, ToF Y, US X, US Y	925 gram, 1.28°, 3.16°, 3.94Hz, 8, -7, 8, 7	60%
7	Beban, frekuensi, ToF X, ToF Y, US X, US Y	893 gram, 3.69Hz, -9, 8, -9, -8	70%
8	Beban, frekuensi, ToF X, ToF Y, ToF Z, US X, US Y, US Z	859 gram, 3.28Hz, -7, -8, 8, -7, 8, 7	60%
9	Beban, <i>pitch</i> , frekuensi, ToF X, ToF Y, ToF Z, US X, US Y, US Z	923 gram, 1.48°, 3.48Hz, 8, 7, 9, 8, -7, 7	55%
10	Beban, <i>pitch</i> , <i>roll</i> , frekuensi, ToF X, ToF Y, ToF Z, US X, US Y, US Z	872 gram, 1.21°, 3.72°, 2.69Hz, 7, 9, 9, 7, -9, 9	50%

H. Hasil Pengujian QoS Keseluruhan

Hasil pengujian parameter QoS yang telah dilakukan kemudian dibandingkan dengan standar TIPHON untuk dapat menilai kualitas jaringan secara keseluruhan. Nilai QoS pada semua *node* mendapatkan nilai 3 dengan kategori "Memuaskan". Tabel XVII menunjukkan nilai QoS untuk *node* DHT11; Tabel XVIII menunjukkan nilai QoS pada *node loadcell*; Tabel XIX menunjukkan nilai QoS pada *node* GY-521; Tabel XX menunjukkan nilai QoS pada *node time of flight*; dan Tabel XXI menunjukkan nilai QoS pada *node* ultrasonik.

TABEL XIII
HASIL PENGUJIAN DELAY PENGIRIMAN DATA

No.	Node Sensor	Rata-rata Delay (ms)
1	Node DHT11	528
2	Node Loadcell	527
3	Node GY-521	525
4	Node Time of Flight	526
5	Node Ultrasonik	519
Rata-rata		525

TABEL XIV
HASIL PENGUJIAN PACKET LOSS

No.	Node Sensor	Jumlah Pengiriman Data (kali)	Jumlah Data Diterima	Packet Loss (%)
1	Node DHT11	500	500	0
2	Node Loadcell	500	500	0
3	Node GY-521	500	500	0
4	Node Time of Flight	500	500	0
5	Node Ultrasonik	500	500	0
Rata-rata				0

TABEL XV
HASIL PENGUJIAN THROUGHPUT

No.	Node Sensor	Hasil Pengukuran Throughput (bps)
1	Node DHT11	2389,73
2	Node Loadcell	1586,66
3	Node GY-521	2169,46
4	Node Time of Flight	2464
5	Node Ultrasonik	2293,86
Rata-rata		2180,74

TABEL XVI
HASIL PENGUJIAN JITTER

No.	Node Sensor	Hasil Pengukuran Jitter (ms)
1	Node DHT11	18,56
2	Node Loadcell	19,22
3	Node GY-521	15,67
4	Node Time of Flight	17,33
5	Node Ultrasonik	13,33
Rata-rata		16,82

TABEL XVII
NILAI QoS NODE DHT11

Parameter	Hasil Pengujian	Indeks
Delay	528 ms	1
Packet loss	0%	4
Throughput	2389,73 bps	4
Jitter	18,56 ms	3
Rata - rata		3

TABEL XVIII
NILAI QoS NODE LOADCELL

Parameter	Hasil Pengujian	Indeks
Delay	527 ms	1
Packet loss	0%	4
Throughput	1586,66 bps	4
Jitter	19,22 ms	3
Rata - rata		3

TABEL XIX
NILAI QoS NODE GY-521

Parameter	Hasil Pengujian	Indeks
Delay	525 ms	1
Packet loss	0%	4
Throughput	2169,46 bps	4
Jitter	15,67 ms	3
Rata - rata		3

TABEL XX
NILAI QoS NODE TIME OF FLIGHT

Parameter	Hasil Pengujian	Indeks
Delay	526ms	1
Packet loss	0%	4
Throughput	2464 bps	4
Jitter	17,33 ms	3
Rata - rata		3

TABEL XXI
NILAI QoS NODE ULTRASONIK

Parameter	Hasil Pengujian	Indeks
Delay	519ms	1
Packet loss	0%	4
Throughput	2293,86 bps	4
Jitter	13,33 ms	3
Rata - rata		3

IV. SIMPULAN

Berdasarkan implementasi dan pengujian yang dilakukan pada kegiatan penelitian ini, maka dapat disimpulkan realisasi WSN pada aplikasi sistem manajemen kesehatan struktur jembatan yang dibangun dapat berjalan dengan baik.

Hasil pengujian *error* atau kesalahan pembacaan sensor DHT11 sebesar 4%; sensor *loadcell* sebesar 0,52%; sensor GY-521 sebesar 1,17%; sensor *time of flight* 3%, dan sensor ultrasonik sebesar 4,13%. Sistem mampu melakukan pembacaan sensor dan mengirimkannya ke *base station* secara nirkabel kemudian ditampilkan pada *dashboard* Node-Red. Fungsi alarm pada sistem dapat bekerja dengan baik dengan menampilkan teks pada *dashboard* ketika suatu kondisi tercapai. Sistem juga dapat melakukan penilaian kesehatan jembatan dengan baik, yaitu kesehatan jembatan akan berkurang sebesar 5% setiap parameter yang melebihi ambang batas yang ditentukan

Berdasarkan hasil pengujian sistem, nilai rata-rata *delay* pengiriman data sebesar 525 ms dengan *delay* terkecil terdapat pada *node* ultrasonik, yaitu sebesar 519 ms; nilai rata-rata persentase *packet loss* sebesar 0%; nilai rata-rata *throughput* sebesar 2180,74 bps dengan nilai *throughput* terbesar terdapat

pada *node* DHT11, yaitu sebesar 2389,73 bps; dan nilai rata-rata *jitter* sebesar 16,82 ms dengan nilai *jitter* terkecil terdapat pada *node* ultrasonik, yaitu 13,33 ms. Nilai QoS pada keseluruhan sistem yang dibangun mendapatkan nilai 3 dengan kategori “Memuaskan”.

DAFTAR REFERENSI

- [1] B. A. Billahi dan K. W. Widiatmoko, “Desain rencana pemasangan structural health monitoring system jembatan rangka baja (studi kasus: Jembatan Sendangmulyo),” *Briliant: Jurnal Riset dan Konseptual*, vol. 7, no. 2, hlm. 537–545, 2022, DOI: <https://doi.org/10.28926/briliant.v7i2.974>
- [2] M. S. Wibawa, Achmad Irjick Ubay, Seno Adi Putra, dan Alvi Syahrina, “Integrasi sistem pengawasan kesehatan jembatan dengan sistem pengawasan lalu lintas,” *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 9, no. 2, hlm. 138–147, Mei 2020, DOI: <https://doi.org/10.22146/jnteti.v9i2.197>
- [3] M. S. Wibawa, S. A. Putra, dan A. Syahrina “Pengembangan purwarupa sistem pengawasan kondisi kesehatan jembatan *single degree of freedom* menggunakan respon dinamik,” dalam *eProceeding of Engineering*, vol. 7, no. 1, April 2020, hlm. 2155-2169.
- [4] M. Maizuar, “Studi eksperimen perilaku dinamik jembatan PCI Girder dengan menggunakan akselerometer,” *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, vol. 10, no. 2, hlm. 297, 2020, DOI: <https://doi.org/10.29103/tj.v10i2.353>
- [5] A. Fatah, U. Ungkawa, dan M. M. Barmawi, “Implementasi algoritma *fast fourier transform* pada monitor getaran untuk analisis kesehatan jembatan,” *Infotronik : Jurnal Teknologi Informasi dan Elektronika*, vol. 5, no. 2, hlm. 48, Des. 2020, DOI: <https://doi.org/10.32897/infotronik.2020.5.2.414>
- [6] A. S. Anam, S. Setyorini, dan S. A. Putra, “Pemanfaatan WSN (*wireless sensor network*) untuk menganalisis perilaku jembatan menggunakan metode Arima,” dalam *eProceeding of Engineering*, vol. 8, no. 2, p. 3314, 2021, [Daring]. Tersedia: <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/viewFile/14721/14498>
- [7] N. Retno Setiati dan M. Saverio Ghafiruzzambi, “SHMS sebagai solusi teknologi monitoring online untuk mengevaluasi kondisi jembatan,” dalam *Konverensi Regional Teknik Jalan*, Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia, 2022, hlm. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.58674/phppi.v15i1.244>
- [8] I. Surenter, K. P. Sridhar, dan M. Kingston Roberts, “Maximizing energy efficiency in wireless sensor networks for data transmission: a deep learning-based grouping model approach,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 83, Juli, hlm. 53–65, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.016>
- [9] A. Budiyarto, A. Salam, dan B. Naufal, “Design system of structural health monitoring system using wireless sensor network,” dalam *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science*, Scitepress - Science and Technology Publications, 2022, hlm. 561–566. DOI: <https://doi.org/10.5220/0011821400003575>.
- [10] R. B. Panuntun, A. Aminullah, B. Suhendro, dan P. K. Wardana, “Bridge displacement estimation using tiltmeter data,” *Journal of the Civil Engineering Forum*, vol. 5, no. 2, hlm. 105, Mei 2019, DOI: <https://doi.org/10.22146/jcef.43670>
- [11] A. A. Pramudya, A. Wibowo, dan A. Soekiman, “Tren, biaya, dan tantangan *structural health monitoring* jembatan,” *Jurnal Transportasi*, vol. 22, no. 2, hlm. 117–130, 2022, DOI: <https://doi.org/10.26593/jtrans.v22i2.6062.117-130>
- [12] M. Abdulkarem, K. Samsudin, F. Z. Rokhani, dan M. F. A. Rasid, “Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction,” *Struct Health Monit*, vol. 19, no. 3, hlm. 693–735, Mei 2020, DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921719854528>
- [13] A. D. Fakhruddin, N. F. A. Hakim, dan A. H. S. Budi, “Implementasi protokol TCP dan UDP pada sistem monitoring dan otomasi rumah jamur berorientasi WSN,” *Telka*, vol. 9, no. 2, hlm. 130–144, 2023, DOI: <https://doi.org/10.15575/telka.v9n2.130-144>

Aris Budiarto, dosen jurusan *Automation Engineering*, Politeknik Manufaktur Bandung. Ketua Program Studi Sistem Siber-Fisik. Menyelesaikan gelar sarjana di Institut Teknologi Bandung pada Program Studi Teknik Elektro, melanjutkan program magister pada program studi yang sama, dan mendapatkan gelar doktor di Universitas Pendidikan Indonesia pada Program Studi Manajemen.

Abyanuddin Salam, kelahiran Bandung tahun 1989 dan memperoleh gelar sarjana terapan pada Jurusan *Automation Engineering* di

Politeknik Manufaktur Bandung lalu melanjutkan program magister di Hochschule Coburg Jerman pada Program Studi *Analytical Instruments, Measurement and Sensor Technology*. Saat ini sedang melanjutkan pendidikan doctoral di Swinburne University of Technology.

Hafyyan Tashbir, kelahiran kota Bandung. Saat ini sedang menyelesaikan program D4 Program Studi Rekayasa Otomasi di Politeknik Manufaktur Bandung.