

EFISIENSI METODE *MONITORING* KESEHATAN STRUKTUR JEMBATAN BERBASIS IOT DI INDONESIA

Darryl Sebastian^{1*}, Oei Fuk Jin¹

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara
Jalan Letjen S.Parman, Jakarta Barat

*Corresponding authors: darryl.327241001@stu.untar.ac.id

Abstract: Bridges are vital infrastructure that connect communities and drive economic growth, but their maintenance poses significant challenges, particularly in disaster-prone countries like Indonesia. Structural Health Monitoring (SHM) combined with Internet of Things (IoT) technology, offers a breakthrough solution for real-time damage detection, preventing structural failures, and minimizing costly reconstructions. This study adopts a Systematic Literature Review (SLR) method, analyzing 17 selected references using Vosviewer to uncover research gaps and formulate optimal strategies for IoT-based SHM implementation in Indonesia. The findings reveal the critical need for systematic and efficient SHM adoption to reduce energy consumption, streamline maintenance costs, and extend the lifespan of bridges. Furthermore, SHM is positioned as a cornerstone of sustainable infrastructure development, directly contributing to the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs). By ensuring the safety and resilience of critical infrastructure, this research offers a compelling roadmap for modernizing Indonesia's bridge maintenance strategies, making it an essential read for policymakers, engineers, and researchers focused on building a sustainable future.

Keywords: Structural Health Monitoring (SHM), Bridge, Internet of Things (IoT), *Sustainable Development Goals* (SDGs), Bridge Maintenance

Abstrak: Jembatan merupakan infrastruktur vital yang mendukung aktivitas manusia dan perekonomian, namun pemeliharaannya menjadi sebuah tantangan yang besar, khususnya di negara rawan bencana seperti Indonesia. *Structural Health Monitoring* (SHM) berbasis *Internet of Things* (IoT) menawarkan solusi pemantauan *real-time* yang akurat untuk mendeteksi dini kerusakan, mencegah kegagalan struktur, dan mengurangi biaya rekonstruksi. Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengumpulkan dan menganalisis 17 referensi relevan yang diseleksi dengan menggunakan bantuan aplikasi Vosviewer, dalam mengidentifikasi kesenjangan penelitian dan strategi optimal dalam implementasi SHM berbasis IoT di Indonesia. Hasilnya menunjukkan pentingnya langkah-langkah sistematis dalam penerapan SHM untuk meningkatkan efisiensi energi dan menekan biaya pemeliharaan yang tidak diperlukan. Selain itu, SHM diharapkan mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan sesuai target *Sustainable Development Goals* (SDGs), dengan memastikan keamanan jembatan sekaligus memperpanjang masa layanannya. Penelitian ini memberikan kontribusi strategis dalam meningkatkan ketangguhan dan keberlanjutan infrastruktur kritis di Indonesia, menjadikan SHM sebagai elemen utama dalam menjawab kebutuhan pembangunan modern.

Kata kunci: : *Structural Health Monitoring* (SHM), *Internet of Things* (IoT), *Sustainable Development Goals* (SDGs), Pemeliharaan Jembatan

1. PENDAHULUAN

Pada masa modern ini sebuah kota yang baik akan terus mengalami peningkatan populasi yang cepat karena tingginya angka urbanisasi dan juga pertumbuhan masyarakat. Terjadinya kesenjangan antara satu kota dengan yang lainnya membuat para masyarakat berbondong-bondong bermigrasi untuk mencari kehidupan

yang lebih baik. Sehingga untuk menunjang hal tersebut, maka diperlukan infrastruktur yang memadai untuk menunjang kehidupan masyarakat didalamnya. Selain itu sebuah kota perlu meningkatkan ketangguhan terhadap perubahan keadaan lingkungan yang terjadi agar masyarakat yang tinggal pada kota tersebut merasa aman dan nyaman (Sachs et al., 2019).

Infrastruktur secara langsung dan tidak langsung mempengaruhi hampir 121 dari 169 target dan 5 dari 17 tujuan *Sustainable Development Goals* (SDGs) yaitu 3,6,7,9 dan 11. Investasi pada bidang infrastruktur merupakan investasi termahal bagi negara-negara di dunia ini, sedangkan infrastruktur sangat dibutuhkan untuk mengikuti perkembangan populasi dan penduduk yang sangat cepat (Thacker et al., 2019). Oleh karena itu, semua infrastruktur yang dibangun perlu dirawat dan dilakukan pengecekan dengan pemantauan kesehatan struktur (*Structural Health Monitoring*), karena jika membiarkan sebuah infrastruktur seperti jembatan sampai rusak atau roboh akan membahayakan keselamatan masyarakat baik pengguna maupun yang tinggal disekitar jembatan tersebut dan juga memerlukan biaya yang sangat besar untuk membuat ulang jembatan tersebut (Berrocal et al., 2021).

Indonesia merupakan sebuah negara yang sangat rawan terhadap berbagai bencana alam karena letaknya yang terdapat pada 3 lempeng yaitu lempeng pasifik, Indo-Australia, dan Eurasian. Sehingga di Indonesia sangat rawan untuk terjadi gempa kuat, gunung meletus, tsunami, dan badai topan. Kerentanan ini yang membuat Indonesia harus menjadi negara yang lebih siap dalam menghadapi kemungkinan bencana yang dapat terjadi sewaktu waktu (Kusumastuti et al., 2014).

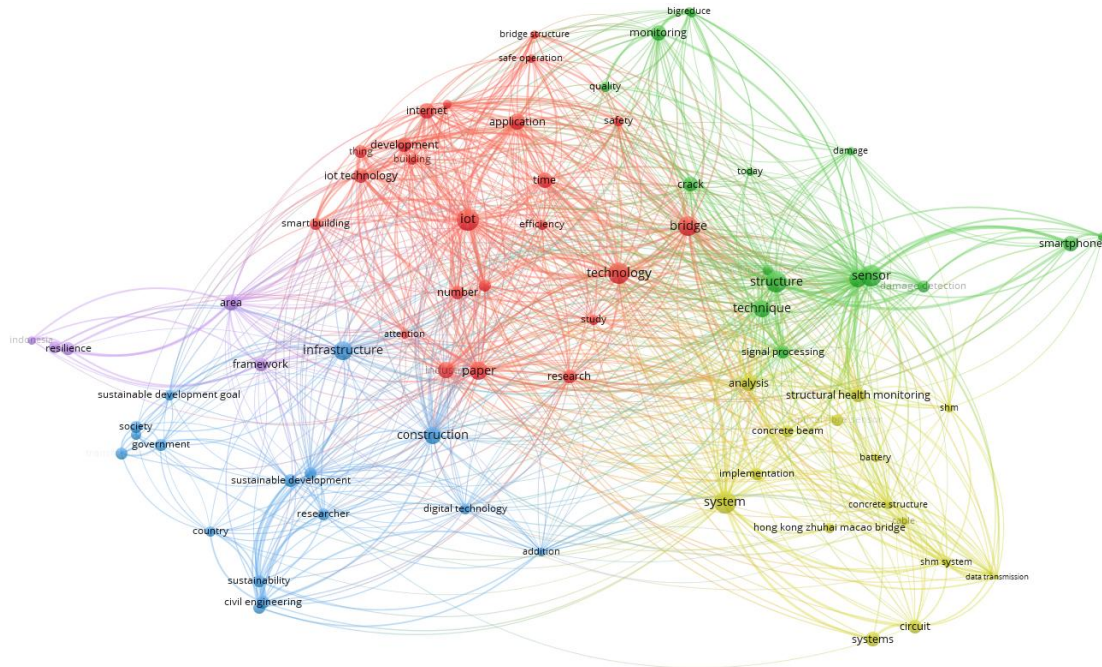
Pengecekan kesehatan struktur secara konvensional biasanya hanya didasari pada visual dengan bantuan alat sederhana, akan tetapi hal tersebut tidak dapat menggambarkan kondisi struktur yang sesungguhnya. Dengan adanya perkembangan teknologi maka sangat memungkinkan untuk dilakukan pemantauan kekuatan struktur secara detail, akurat, lebih efisien, dan langsung dalam menggambarkan kondisi terkini dari kesehatan struktur sebuah jembatan. Sehingga paradigma dari pengecekan struktur yang awalnya sebagai upaya perbaikan harus menjadi upaya pencegahan (Berrocal et al., 2021). Oleh karena itu dalam penelitian ini bertujuan untuk membahas teknologi pemantauan kesehatan struktur (*Structural Health Monitoring*) secara mendalam, yang bermanfaat dalam meningkatkan ketangguhan infrastruktur di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Tata cara penelitian dalam jurnal ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR). Dimana *Systematic Literature Review* merupakan sebuah pendekatan terstruktur dan sistematis untuk mengumpulkan dan menyusun literatur yang relevan dengan topik yang diteliti dengan mencari beberapa referensi lain sebagai dasar penelitian. Setiap referensi yang didapatkan akan diseleksi dan dinilai seberapa terpercaya dan relevan isi dari sumber tersebut terhadap penelitian yang dilakukan.

Pengumpulan beragam jurnal menggunakan bantuan dari aplikasi *Publish or Perish* untuk mencari jurnal-jurnal yang terakreditasi oleh Scopus dalam kurun waktu 10 tahun terakhir. Dilakukan beberapa kali pencarian kata kunci seperti “*Digital Construction, Structural Health Monitoring, Bridge, IoT, Sustainable Development Goals, Indonesia*” yang menghasilkan 509 referensi. Kemudian dilakukan seleksi atau filter bagi setiap referensi yang diperoleh berdasarkan judul, abstrak, dan isi dari referensi, apakah sumber referensi tersebut sesuai dengan tema yang ingin diteliti atau tidak. Hingga pada akhirnya terdapat total 17 jurnal artikel dan *conference paper* yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini.

Selanjutnya 17 artikel dan *conference paper* tersebut disintesis dengan bantuan aplikasi Vosviewer seperti pada **Gambar 1**. Berdasarkan gambar tersebut dapat diperoleh hubungan antara kata kunci yang berkaitan dengan teknologi pemantauan kesehatan struktur yang dibagi menjadi 5 klaster. Klaster merah berfokus pada teknologi *Internet of Things*, efisiensi, dan penerapan teknologi dalam pembangunan dan monitoring. Klaster hijau mencakup aspek teknis seperti sensor, teknik monitoring. Klaster kuning berisikan studi kasus implementasi *Structural Health Monitoring* (SHM), dan proses analisis. Klaster biru menyoroti keterkaitan antara infrastruktur, tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), dan peran pemerintah. Klaster ungu, terkait dengan konsep ketahanan dan area Indonesia. Sehingga dari hasil ini ditentukan judul penelitian yaitu “Efisiensi Metode Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan Berbasis IoT di Indonesia”.



Gambar 1. Peta analisis ilmiah dari aplikasi vosviewer

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada zaman modern ini, standar kota yang dapat dikatakan maju adalah sebuah kota yang melibatkan “kepintaran” atau kemajuan teknologi untuk menyelesaikan masalah yang terjadi di tengah masyarakatnya. Salah satu masalah yang seringkali terjadi dalam kota yang berkembang adalah kepadatan atau kemacetan dalam lalu lintas, sehingga diperlukan jalan-jalan yang lebih efisien untuk mengurangi waktu tempuh perjalanan. Bagi wilayah dengan topografi yang berbukit, memiliki banyak sungai, serta lembah maka terkadang diperlukan jembatan-jembatan dengan skala dan bentang yang panjang (Zhang et al., 2018). Infrastruktur-infrastruktur kritis tersebut tentunya perlu diawasi dan diperhatikan atau seringkali dikenal dengan *Structural Health Monitoring* (SHM). Pengawasan terhadap kesehatan struktur bertujuan untuk mendeteksi secepat mungkin kerusakan pada sebuah jembatan yang dapat menyebabkan potensi kegagalan struktur (Wang et al., 2018).

Internet Of Things (IoT)

Salah satu pemanfaatan teknologi yang sedang marak digunakan adalah dengan memanfaatkan *Internet of Things* (IoT). *Internet of Things* sendiri sudah menjadi strategi dalam pengembangan nasional bagi sebuah negara, karena dampaknya yang sangat besar. *Internet of*

Things (IoT) merupakan sebuah teknologi yang menjadikan internet sebagai penghubung antara satu hal dengan hal lainnya, serta dapat saling bertukar ataupun mengirim sebuah informasi melalui jaringan internet. Riset mengenai IoT banyak mulai dikembangkan dalam bidang-bidang yang khusus untuk mencapai tujuan tertentu seperti keamanan, pengawasan lingkungan, dan bahkan pemantauan kesehatan struktur seperti pada **Gambar 2** (Sui et al., 2014).



Gambar 2. Ilustrasi penggunaan IoT dalam SHM (Lamonaca, 2018)

Faktor penyebab kegagalan jembatan

Semua struktur termasuk juga jembatan tidak terpungkiri dapat mengalami penurunan

kekuatan/integritas struktur. Penurunan kekuatan struktur jembatan dapat disebabkan oleh beberapa faktor yang dapat dijabarkan sebagai berikut:

A. Masa layan/service

Masa layan adalah masa saat sebuah jembatan sudah mulai beroperasi. Dalam masa ini penurunan kualitas jembatan dapat disebabkan oleh penambahan umur jembatan sehingga mutu dari material pun juga akan menurun. Selain itu dengan adanya beban berlebih secara terus menerus akan semakin memperburuk kondisi kesehatan struktur. Pengaruh dari kondisi bencana alam seperti gempa ataupun cuaca buruk juga menjadi salah satu faktor yang menyebabkan kerusakan pada struktur jembatan (Yan et al., 2019).

B. Masa desain

Dalam proses mendesain sebuah struktur jembatan, seringkali ditemukan banyak sekali penyimpangan dan ketidaktepatan karena tidak mengikuti aturan-aturan yang berlaku. Aturan-aturan internasional seringkali dilengkapi dengan faktor keamanan yang besar, dengan tujuan apabila terjadi bencana alam seperti gempa ataupun mengalami beban berlebih dapat tetap kokoh dan kuat agar tidak membahayakan pengguna jembatan tersebut (Paul et al., 2018).

C. Masa Konstruksi

Dalam masa konstruksi seringkali ditemukan penyelewengan seperti penggunaan mutu material yang tidak sesuai dengan mutu yang direncanakan, kualitas material yang jelek, dan juga metode pengerjaan yang tidak sesuai dengan peraturan dan syarat-syarat yang berlaku (Paul et al., 2018).

D. Masa Pengawasan

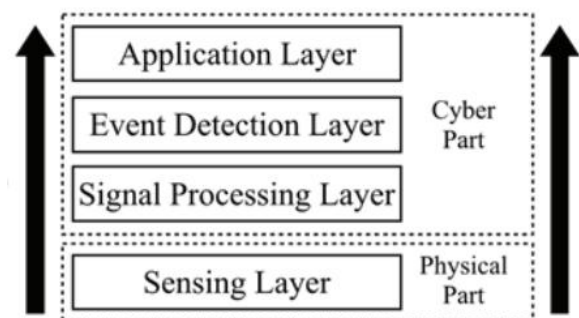
Jembatan-jembatan yang sudah dibangun harus tetap dilakukan pengawasan secara teratur dan detail, karena retakan atau kerusakan yang awalnya kecil dapat menyebabkan sebuah jembatan menjadi gagal dan dapat menimbulkan banyak sekali kerugian mulai dari korban jiwa dan juga kerusakan properti yang bernilai fantastis (Paul et al., 2018).

Structural health monitoring

Sebuah bangunan pada dasarnya memerlukan inspeksi, pengawasan, dan juga perawatan. *Structural Health Monitoring* (SHM)

merupakan sebuah metode untuk meningkatkan keamanan dan juga proses perawatan struktur krusial. Walaupun dengan adanya SHM dapat menyediakan informasi yang terkini dan juga akurat mengenai kondisi struktur, SHM tidak boleh menggantikan inspeksi manual yang dilakukan dengan mata manusia (Jang et al., 2018). Metode SHM adalah upaya dalam mengevaluasi titik kerusakan dan usaha perbaikan yang dapat dilakukan, tanpa adanya penghancuran struktur yang bertujuan untuk mengidentifikasi lokasi yang mengalami kerusakan, memperpanjang usia struktur, dan memperhitungkan sisa umur bangunan sebelum berpotensi mengalami kegagalan yang dapat menimbulkan korban jiwa dan kerugian finansial (Abdelgawad & Yelamarthi, 2016).

Secara sederhana, proses SHM dapat dibagi menjadi 2 komponen utama yaitu komponen fisik dan komponen *cyber*. Komponen fisik adalah komponen yang bersifat mekanis seperti sensor, alarm, dan alat alat untuk memproses data untuk dikirim melalui internet. Sedangkan, komponen *cyber* merupakan komponen untuk memproses data, menerapkan logika, menyajikan data, dan mendeteksi titik kerusakan pada struktur seperti pada **Error! Reference source not found.** (Lamonaca, 2018).



Gambar 3. Komponen dari Sistem SHM (Lamonaca, 2018)

A. Klasifikasi Parameter Pengukuran

Structural Health Monitoring (SHM) dilakukan dengan menganalisis data yang diperoleh dari sensor akibat adanya beban yang bekerja pada struktur jembatan, data yang diperoleh dapat berupa getaran, tegangan, regangan, lendutan, reaksi perletakan, dan lain-lain. Secara garis besar, terdapat 4 jenis kategori parameter yang digunakan dalam pengukuran yaitu (Malik et al., 2019):

1. Beban

Dalam sebuah struktur pasti terdapat gaya-gaya luar yang bekerja dan membebani sebuah struktur. Beban dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu beban statik dan beban dinamik. Beban statik merupakan beban yang bekerja secara stabil dan perlahan seperti berat sendiri. Sedangkan beban dinamik merupakan beban yang besaran dan arah bekerjanya selalu berubah-ubah secara cepat dan tidak pasti seperti kendaraan yang bergerak dan beban angin.

2. Respon struktur setempat

Saat sebuah struktur dibebani maka akan mempengaruhi sebuah struktur yang menopangnya. Pada respon struktur setempat ini hanya meninjau reaksi/respon dari titik tertentu dari sebuah struktur, dalam penerapannya seperti pada sambungan antara balok dan kolom struktur.

3. Respon struktur keseluruhan

Ketika sebuah beban bekerja pada suatu titik tertentu dalam struktur, maka pada kenyataannya beban tersebut juga dapat memberi dampak bagi struktur secara menyeluruh, karena sifatnya sebuah struktur yang dibuat secara monolit atau satu kesatuan. Sehingga perlu juga untuk memperhatikan respon struktur secara menyeluruh saat terdapat beban yang bekerja.

4. Efek Lingkungan

Lingkungan dimana sebuah jembatan dibangun menjadi pengaruh yang cukup besar bagi kesehatan struktur, mengingat setiap material yang ada di bumi ini memiliki karakter kimiawi yang berbeda-beda. Seperti baja yang mudah korosi akibat kelembapan, kadar garam, tingkat asam yang dapat mempengaruhi kekuatan struktur jembatan (Ahmed et al., 2019).

B. Berbagai Jenis Sensor








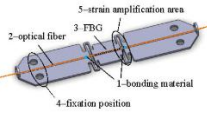
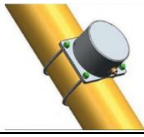


Penggabungan antara pemantauan kesehatan struktur secara otomatis dan juga disertai dengan inspeksi manual merupakan kemajuan teknologi, ekonomis, dan efisien. Dalam mendeteksi adanya perubahan-perubahan baik pada struktur jembatan maupun pengaruh

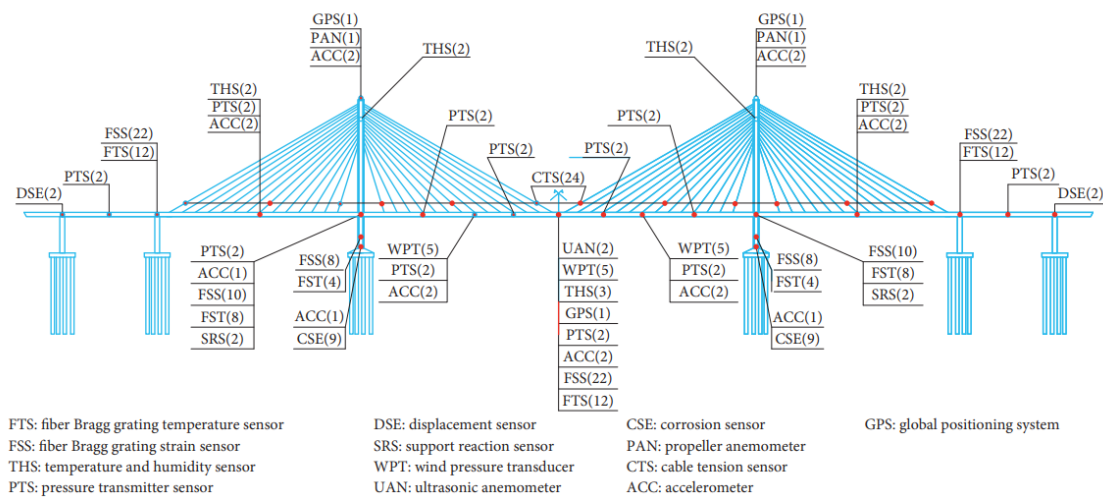
dari lingkungan, dibutuhkan beberapa sensor untuk menangkap respon tersebut sehingga dapat diperoleh data mengenai kondisi struktur. Terdapat banyak sekali jenis sensor dengan fungsi yang berbeda-beda untuk mengetahui kondisi struktur jembatan seperti pada **Tabel 1** (Yan et al., 2019).

Dengan semakin berkembangnya zaman juga mulai banyak sensor-sensor dengan teknologi *wireless*. Sensor ini memiliki keuntungan dimana sensor tetap dapat diintegrasikan dalam sebuah struktur tanpa adanya benda-benda lain yang dapat mempengaruhi kekuatan struktur. *Sensor wireless* juga sangat mudah dalam proses instalasinya yang dapat mempermudah pekerjaan di lapangan. (Angrisani et al., 2017). Sensor *wireless* juga dapat didukung dengan fitur *wireless charging* yang memanfaatkan induksi magnetik sebagai sumber daya bagi sensor tersebut. Kelemahan dari sensor yang menggunakan baterai sebagai sumber energinya adalah proses pergantian baterai secara berkala dan lokasi nya yang harus berada pada sisi luar struktur agar mudah diakses. Hal ini yang menyebabkan sensor tidak dapat mendeteksi hal-hal yang terjadi di dalam struktur dan juga terkait keberadaan baterai didalam struktur yang masih belum diterima dengan baik dalam metode SHM (Angrisani et al., 2014).

Lokasi pemasangan sensor pun tidak bisa sembarangan, karena akan mempengaruhi hasil bacaan dari sensor-sensor tersebut. Sehingga perlu ditentukan titik-titik kritis dan krusial pada sebuah struktur yang memiliki potensi terjadinya kerusakan saat mengalami kondisi bencana alam ataupun beban berlebih. Berikut merupakan contoh dari lokasi pemasangan sensor pada Jembatan Qingzhou, Hongkong seperti pada **Gambar 4** (Yan et al., 2019).

Tabel 1. Jenis-jenis sensor dalam SHM (Yan et al., 2019)

Parameter	Variabel	Sensor	Gambar
Pengaruh Lingkungan	Kecepatan angin	<i>Anemometer</i> baling-baling	
	Arah angin	<i>Anemometer</i> Ultrasonik	
	Temperatur	Termometer	
	Kelembapan	<i>Hygrometer</i>	
	Gempa bumi Tabrakan kapal	3D <i>Accelerometer</i>	
Structural Response	Perpindahan spasial	GPS	
	Lendutan pada balok	Sensor lendutan	
	Regangan	<i>FBG Strain Sensor</i>	
	Tegangan kabel baja	<i>Cable Tension Sensor</i>	
Korosi	Getaran	2D <i>accelerometer</i>	
	Proses korosi	<i>Corosion sensor</i>	



Gambar 4. Lokasi pemasangan sensor pada Jembatan Qingzhou, Hongkong (Yan et al., 2019)

C. Proses Analisis dan Penyajian Data

Proses ini merupakan bagian tersulit dalam SHM, dimana semua data yang diperoleh dari sensor-sensor pada jembatan harus dirangkum menjadi suatu hasil yang menggambarkan kondisi jembatan secara akurat. Sesuai tujuan dari SHM, maka diharapkan dengan metode ini dapat mengetahui secara akurat lokasi dan juga kerusakan yang terjadi pada struktur, agar dapat mempermudah pemilik struktur untuk menyusun rencana strategis dalam menangani masalah yang terjadi. Beberapa masalah yang sering muncul dalam proses analisis adalah sebagai berikut (Lamonaca, 2018):

1. Mengidentifikasi sinyal yang diberikan oleh sensor, oleh karena sensor akan menerima semua respon yang diterimanya. Tentu hal ini dapat mengganggu keakuratan dari hasil sensor yang dipasang, seperti contoh ketika ingin mendeteksi keretakan pada beton akan tetapi sinyal yang didapat disebabkan oleh suara yang berasal di lingkungan sekitar (Mahmud et al., 2018).
2. Borosnya memori dan energi yang diperlukan apabila semua reaksi/respon yang diterima oleh sensor perlu dicatat dan dikirimkan ke *database*.
3. Sinkronisasi hasil pengukuran yang diperoleh oleh beberapa sensor yang berbeda. Setiap sensor pasti akan memiliki hasil dan penyajian data yang berbeda-beda. Oleh karena itu dalam mengetahui

respon dari sebuah struktur akibat kejadian khusus, maka perlu dilakukan sinkronisasi data agar respon yang diperoleh benar-benar diakibatkan oleh fenomena yang sama. Selain itu, dengan adanya proses sinkronisasi ini akan mempermudah dalam pengidentifikasian respon struktur secara menyeluruh.

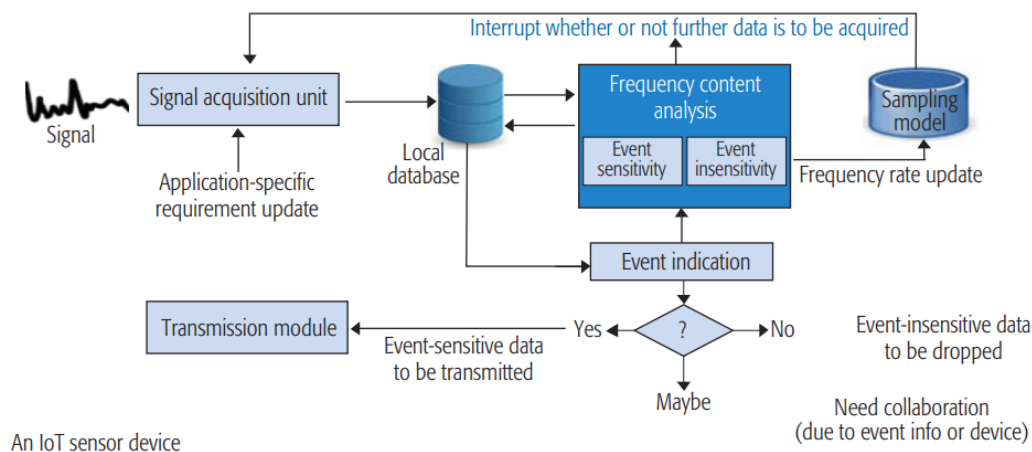
Terdapat 2 tahapan proses analisis dalam metode SHM, yang pertama adalah analisis yang terjadi pada stasiun pemantauan kesehatan struktur yang bertempat pada lokasi jembatan dan yang kedua merupakan analisis pada stasiun pusat pemantauan struktur. Kedua stasiun ini memiliki fungsi dan tanggung jawab yang berbeda demi tercapainya penerapan SHM yang baik. Antara kedua stasiun tersebut dihubungkan melalui jaringan internet, sehingga dapat menggambarkan keadaan dan kondisi secara langsung (*real time*). Hal inilah yang mendasari salah satu alasan dari pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) dalam pemantauan kesehatan struktur (Yan et al., 2019).

Stasiun SHM yang berada pada lokasi infrastruktur memiliki tanggung jawab untuk mengumpulkan data baik yang diterima dari sensor-sensor pada struktur maupun melakukan inspeksi secara manual dengan peralatan-peralatan yang tersedia pada stasiun tersebut serta memastikan bahwa data yang diperoleh merupakan hasil yang akurat dan sesuai dengan yang terjadi pada struktur. Setelah diperoleh data yang dibutuhkan, maka data-data tersebut

akan dikirimkan menuju stasiun pusat pemantauan struktur (Yan et al., 2019).

Dalam usaha untuk mengurangi beban dan meningkatkan efisiensi dari *Structural Health Monitoring*, maka diperlukan 2 skema yaitu kemampuan memproses data secara langsung dan mengintegrasikan kecerdasan buatan dalam menentukan keputusan. Dengan adanya 2 skema tersebut maka dapat dapat mengurangi beban kerja dari SHM berbasis IoT ini. Dengan adanya pengumpulan data, maka sistem diharapkan dapat beradaptasi dalam mengatur tingkat sensitivitas dari sensor yang digunakan berdasarkan data yang terus menerus direkam oleh sensor, sehingga sensor hanya memproses data atau hasil yang abnormal dan berpotensi mempengaruhi struktur (Wang et al., 2018).

Skema kerja yang terjadi pada stasiun pemantauan pada lokasi jembatan dapat dilihat seperti pada **Gambar 5**. Dengan adanya skema ini dapat mengurangi data *offline* yang disimpan dari sensor dan dapat menghemat banyak sekali energi yang terbuang secara sia-sia akibat pengiriman data yang kurang bermanfaat melalui internet. Sejak awalnya yang mungkin memerlukan ratusan *megabyte* dan biaya energi yang besar, dapat dibuat menjadi lebih hemat dan efisien dalam melaksanakan sistem berbasis IoT (Wang et al., 2018). Dimana hal ini juga merupakan salah satu target yang ingin dicapai dalam SDGs yaitu untuk meningkatkan efisiensi dari penggunaan energi (Sachs et al., 2019).



Gambar 5. Skema penerapan SHM berbasis IOT (Wang et al., 2018)

Data-data yang diterima oleh stasiun pusat, selanjutnya akan dievaluasi dan dianalisis untuk mengetahui kondisi pada struktur jembatan tersebut. Evaluasi yang dilakukan dengan perhitungan matematis dan dipadukan dengan teori-teori dasar, dari yang tujuan awalnya hanya beberapa balok atau bagian struktur tertentu menjadi keseluruhan struktur jembatan. Setelah memperoleh beberapa variabel seperti kecepatan angin, perpindahan struktur, dan beberapa hasil akibat beban statik. Selanjutnya struktur jembatan akan dianalisis secara dinamik, untuk mengetahui karakteristik dinamik dari sebuah jembatan dan memprediksi sisa umur ataupun upaya-upaya perbaikan yang dapat dilakukan pada struktur (Yan et al., 2019).

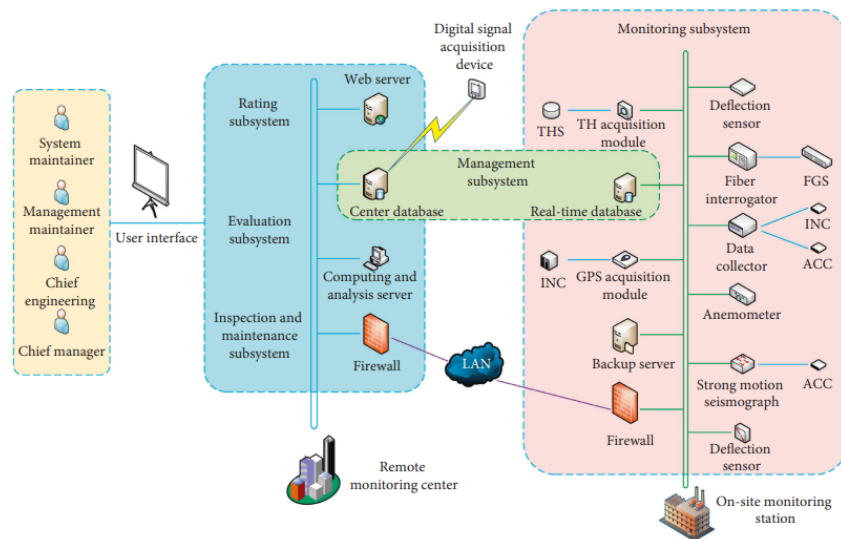
Dalam skema yang tertera pada

Gambar 6 juga memungkinkan untuk para pengguna data di stasiun pusat untuk langsung terhubung dengan stasiun pada lokasi infrastruktur melalui internet untuk mengakses informasi-informasi yang dimiliki pada stasiun lokal (Yan et al., 2019).

D. Alarm Peringatan (*Early Warning*)





Walaupun dengan menerapkan *Structural Health Monitoring* (SHM) pada jembatan telah menyediakan kemampuan untuk mengetahui kondisi jembatan secara *real time*, penerapan sistem *early warning* tetap menjadi sebuah aspek yang penting. SHM dapat memberikan hasil berupa perubahan karakteristik ataupun kerusakan yang terjadi pada struktur secara mendalam dan detail, akan tetapi SHM memerlukan proses analisis yang panjang sehingga pada kondisi mendesak atau saat terjadi bencana alam diperlukan adanya peringatan mengenai potensi kegagalan struktur untuk mengambil tindakan pengamanan secepat mungkin sebelum terjadi kegagalan struktur. Sistem *early warning* ini berfungsi sebagai pelindung tambahan yang memberikan peringatan berupa notifikasi kepada pihak stasiun lokal maupun stasiun pusat dalam kondisi kritis. Notifikasi dapat dibagi menjadi 4 level yaitu hijau, kuning, jingga, dan merah yang secara berurutan menggambarkan status bahaya sebuah jembatan. Penilaian dilakukan untuk semua titik jembatan dengan faktor keamanan dan bobot yang berbeda-beda tergantung dengan seberapa krusial titik tersebut. Lalu hasil perhitungan dari setiap titik akan diubah menjadi sebuah satu nilai akhir yang menggambarkan nilai dari sebuah struktur jembatan. Klasifikasi dari level kritis dari sebuah struktur berdasarkan nilai yang dihitung dapat dilihat pada

Tabel 2 (Sui et al., 2014)



Gambar 6. Skema hubungan antara stasiun pusat dan stasiun pada lokasi jembatan (Yan et al., 2019)

Tabel 2. Klasifikasi level bahaya struktur jembatan (Sui et al., 2014)

Level	Kategori	Status	Deskripsi
Merah		Berbahaya	Jembatan mengalami masalah serius yang membahayakan struktur dan dapat menyebabkan insiden bila terus berlangsung berdasarkan kondisi desain.
Oren		Waspada	Sebagian struktur jembatan tidak dapat memenuhi kebutuhan desain dan dapat menyebabkan kegagalan diabaikan.
Kuning		Abnormal	Mulai terjadi peningkatan aktivitas pada struktur mendekati rencana desain.
Hijau		Normal	Kondisi normal struktur saat tidak ada kerusakan

4. KESIMPULAN

Dalam mewujudkan *Sustainable Development Goals* (SDGs), maka diperlukan beberapa usaha ekstra yang perlu dilakukan untuk mencapai tujuan tersebut. Salah satunya adalah dengan menjaga kondisi kesehatan jembatan dengan metode *Structural Health Monitoring* (SHM) berbasis IoT, sehingga dapat menjamin bahwa jembatan yang digunakan oleh masyarakat tetap aman dan dapat memperpanjang usia jembatan tersebut. SHM yang berbasis IoT ini memungkinkan untuk dilakukan pengawasan struktur secara langsung (*real time*) yang dapat menggambarkan kondisi dari sebuah jembatan secara detail dan akurat bahkan yang tidak dapat dilihat dengan mata. Terutama di Indonesia yang rawan sekali mengalami gempa bumi, sehingga semua infrastruktur yang krusial perlu dilakukan pengawasan dan pemantauan secara berkala untuk memastikan keamanannya.

SHM melewati proses yang cukup panjang mulai dari pengumpulan data melalui sensor-sensor yang dipasang pada struktur, proses analisis, proses evaluasi, sampai pada akhirnya dapat mengidentifikasi titik kerusakan pada struktur dan kondisi terkini dari jembatan. Walaupun dengan adanya bantuan pemantauan kesehatan struktur dengan teknologi yang canggih, sebuah struktur tetap memerlukan inspeksi manual yang dilakukan secara rutin, karena sebuah sensor bisa saja mengalami kerusakan dan memberikan hasil yang tidak akurat. Hal ini diperlukan karena jembatan merupakan infrastruktur krusial bagi kehidupan masyarakat yang menghubungkan satu daerah dengan daerah lainnya dan juga dapat menyebabkan korban jiwa serta kerugian material yang besar apabila terjadi kegagalan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdelgawad, A., & Yelamarthi, K. (2016). *Structural Health Monitoring: Internet of Things Application*. [Conference Paper]. 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS).
- Ahmed, Z., Ali, J. S. M., Rafieq, M., & Hrairi, M. (2019). Application of machine learning with impedance based techniques for structural health monitoring of civil infrastructure. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(6 Special Issue 4), 1139–1148. <https://doi.org/10.35940/ijitee.F1237.0486S419>
- Angrisani, L., Bonavolontà, F., D'Alessandro, G., & D'Arco, M. (2014). Inductive power transmission for wireless sensor networks supply. *EESMS 2014 - 2014 IEEE Workshop on Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems, Proceedings*, 187–191. <https://doi.org/10.1109/EESMS.2014.6923289>
- Angrisani, L., Moriello, R. S. Lo, Bonavolontà, F., & Gallucci, L. (2017). *An innovative embedded wireless sensor network system for the structural health monitoring of RC structures*. [Conference Paper]. *IEEE RTSI 2017: Research and Technologies for Society and Industry, 3rd International Forum: 2017 conference proceedings: September 11-13 2017 - Modena, Italy*.
- Berrocal, C. G., Fernandez, I., Bado, M. F., Casas, J. R., & Rempling, R. (2021). Assessment and visualization of performance indicators of reinforced concrete beams by distributed optical fibre sensing. *Structural Health Monitoring*, 20(6), 3309–3326. <https://doi.org/10.1177/1475921720984431>
- Jang, Y., Kim, K.-W., Park, M.-H., Lee, N., & Moon, G.-W. (2018). *A Novel Structural Health Monitoring System with Wireless Power and Bi-directional Data Transfer*. 1562–1566.
- Kusumastuti, R. D., Viverita, Husodo, Z. A., Suardi, L., & Danarsari, D. N. (2014). Developing a resilience index towards natural disasters in Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10(PA), 327–340. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.10.007>
- Lamonaca, F. (2018). *Synchronization of IOT layers for Structural Health Monitoring*. [Conference Paper]. 2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT.
- Mahmud, M. A., Bates, K., Wood, T., Abdelgawad, A., & Yelamarthi, K. (2018). *A Complete Internet of Things (IoT) Platform for Structural Health Monitoring (SHM)*. [Conference Paper]. 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF IoT).
- Malik, H., Khattak, K. S., Wiqar, T., Khan, Z. H., & Altamimi, A. B. (2019). *Low Cost Internet of Things Platform for Structural Health Monitoring*. [Conference Paper]. 2019 22nd International Multitopic Conference (INMIC).
- Paul, P., Dutta, N., Biswas, B. A., Das, M., Biswas, S., Khalid, Z., & Saha, H. N. (2018). *An Internet of Things (IoT) Based System to Analyze Real-time Collapsing Probability of Structures*

- [Conference Paper]. 2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON) : 1st-3rd November, 2018, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M., Messner, D., Nakicenovic, N., & Rockström, J. (2019). Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 2(9), 805–814. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0352-9>
- Sui, L. Y., Chen, Z. H., Li, W., & Wang, L. X. (2014). Study on monitoring and safety early warning technology of bridge health based on internet of things technology. *Applied Mechanics and Materials*, 556–562, 5994–5998. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.556-562.5994>
- Thacker, S., Adshead, D., Fay, M., Hallegatte, S., Harvey, M., Meller, H., O'Regan, N., Rozenberg, J., Watkins, G., & Hall, J. W. (2019). Infrastructure for sustainable development. *Nature Sustainability*, 2(4), 324–331. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0256-8>
- Wang, T., Bhuiyan, M. Z. A., Wang, G., Rahman, M. A., Wu, J., & Cao, J. (2018). Big Data Reduction for a Smart City's Critical Infrastructural Health Monitoring. *IEEE Communications Magazine*, 56(3), 128–133. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700303>
- Yan, Y., Mao, X., Wang, X., Yu, X., & Fang, L. (2019). Design and Implementation of a Structural Health Monitoring System for a Large Sea-Crossing Project with Bridges and Tunnel. *Shock and Vibration*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2832089>
- Zhang, L., Zhou, G., Han, Y., Lin, H., & Wu, Y. (2018). Application of Internet of Things Technology and Convolutional Neural Network Model in Bridge Crack Detection. *IEEE Access*, 6, 39442–39451. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2855144>