

# TREN, BIAYA, DAN TANTANGAN *STRUCTURAL HEALTH MONITORING* JEMBATAN

**Andreas A. Pramudya**  
Universitas Katolik Parahyangan  
Jln. Ciumbuleuit No. 94,  
Bandung 40141  
aapramudya@gmail.com

**Andreas Wibowo**  
Universitas Katolik Parahyangan  
Jln. Ciumbuleuit No. 94,  
Bandung 40141  
andreas\_wibowo@unpar.ac.id

**Anton Soekiman**  
Universitas Katolik Parahyangan  
Jln. Ciumbuleuit No. 94,  
Bandung 40141  
soekiman@unpar.ac.id

## Abstract

Information technology and the Internet of Things are developing rapidly, resulting in changes in all fields, including monitoring and testing bridges. Structural Health Monitoring (SHM) is currently an alternative to replace conventional visual inspections. This study aims to determine trends in the use of Structural Health Monitoring on bridges, including cost factors and challenges faced, so that they can be considered and referenced in the installation of Structural Health Monitoring on bridges in the future. This study uses bibliometric analysis methods and literature review. Bibliometric analysis was carried out to determine the type of bridge, the method of Structural Health Monitoring, the type of sensor, and the part that the sensor was installed on, so that the trend of Structural Health Monitoring installation could be observed. A literature review was carried out on the challenges that occurred and the cost factors that were considered and their potential in the future. This research shows that the method of Structural Health Monitoring is still evolving and that new technologies have been used to overcome various challenges, including the cost factor. If Structural Health Monitoring can be mass produced, the cost of producing Structural Health Monitoring is expected to decrease.

**Keywords:** bridge; structural health monitoring; visual inspection; bibliometrics

## Abstrak

Teknologi informasi dan *Internet of Things* berkembang dengan pesat, yang mengakibatkan terjadinya perubahan di segala bidang, termasuk pada pemantauan dan pengujian jembatan. *Structural Health Monitoring* (SHM) saat ini menjadi alternatif untuk menggantikan inspeksi visual yang bersifat konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tren penggunaan *Structural Health Monitoring* pada jembatan, termasuk faktor biaya dan tantangan yang dihadapi, sehingga dapat menjadi pertimbangan dan acuan dalam pemasangan *Structural Health Monitoring* pada jembatan di masa mendatang. Studi ini menggunakan metode analisis bibliometrik dan tinjauan literatur. Analisis bibliometrik dilakukan untuk mengetahui jenis jembatan, metode *Structural Health Monitoring*, jenis sensor, dan bagian yang dipasang sensor, sehingga tren pemasangan *Structural Health Monitoring* dapat diamati. Tinjauan literatur dilakukan pada tantangan yang terjadi dan faktor biaya yang menjadi pertimbangan serta potensinya di masa mendatang. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Structural Health Monitoring* masih terus berkembang dan berbagai teknologi baru telah digunakan untuk mengatasi berbagai tantangan, termasuk faktor biaya. Jika *Structural Health Monitoring* dapat diproduksi secara massal, biaya produksi *Structural Health Monitoring* diharapkan menurun.

**Kata-kata kunci:** jembatan; *structural health monitoring*; inspeksi visual; bibliometrik

## PENDAHULUAN

Sekitar 70% jembatan di Jepang telah berusia 50 tahun hingga 60 tahun, sementara itu lebih dari sepertiga jembatan di Amerika Serikat telah habis usia desainnya; bahkan 1 dari 10 jembatan mengalami kerusakan struktural (Miyamoto dan Yabe, 2012; Bell et al., 2013). Di Indonesia banyak jembatan yang berusia lebih dari 100 tahun dan tetap berfungsi,

yang di antaranya adalah Jembatan Rel Cikubang dan Jembatan Rel Cikolawing, yang dibangun pada pemerintahan Hindia Belanda. Runtuhnya jembatan di Minneapolis tahun 2007 dan Jembatan Kutai Kartanegara tahun 2011, telah membuat masyarakat lebih peka terhadap pemantauan bangunan infrastruktur. Penuaan dan kerusakan pada jembatan telah menjadi masalah yang besar. Untuk itu, diperlukan peralatan yang mampu mendeteksi jembatan dengan memanfaatkan perkembangan teknologi informasi dan *Internet of Things* (IoT), yaitu *Structural Health Monitoring* (SHM).

Alasan penelitian ini adalah bahwa SHM merupakan suatu bidang baru dan masih berkembang, serta memiliki kemampuan untuk melakukan deteksi dini terhadap kerusakan sistem struktur. Sementara itu, jembatan merupakan suatu bangunan infrastruktur yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi serta memiliki dampak sosial dan ekonomi.

### **Structural Health Monitoring System**

Sebelum adanya SHM, jembatan dipantau dengan inspeksi visual konvensional, yang mana masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasannya. Inspeksi visual efektif untuk hal-hal yang umum, berskala kecil, belum diketahui adanya masalah, dan untuk identifikasi awal masalah yang timbul. Pemeriksaan visual merupakan metode standar pemeriksaan, namun terdapat keterbatasan, seperti waktu, interpretasi, dan aksesibilitas (Agdas et al., 2016).

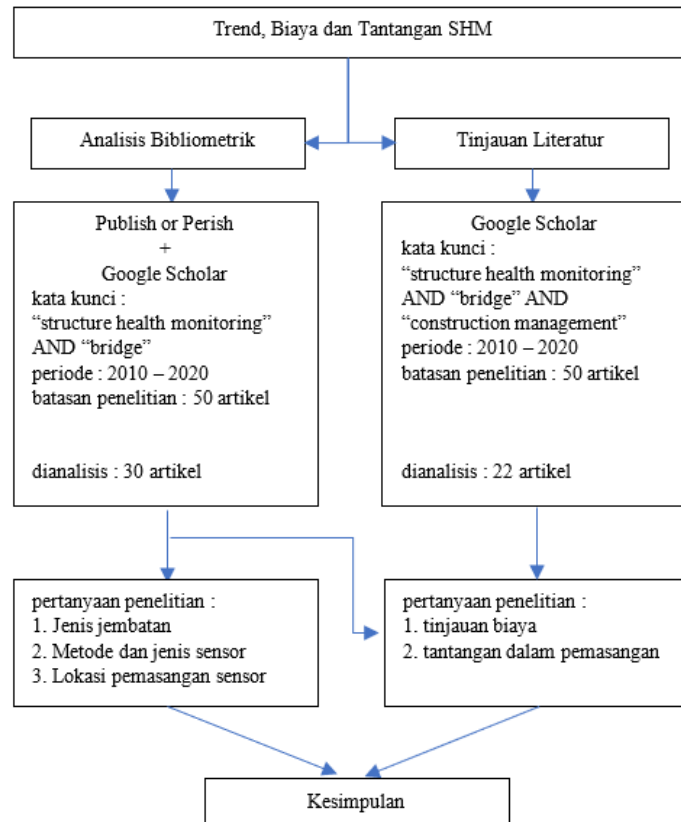
Struktur dengan skala besar membutuhkan pemantauan detail dan menerus terhadap sifat karakteristik struktural. Hal-hal yang menjadi keterbatasan pemeriksaan visual dapat diselesaikan oleh SHM melalui pemantauan yang lebih detail (Agdas et al., 2016). Sistem SHM dapat diaplikasikan dalam berbagai tahap siklus layanan (Treacy et al., 2019), seperti (1) tahap konstruksi; (2) inspeksi umum dan pemeliharaan selama masa layanan; (3) penyelidikan terhadap hal khusus; dan (4) perbaikan saat penggantian bagian atau keseluruhan struktur.

## **METODOLOGI PENELITIAN**

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis bibliometrik dan tinjauan literatur terhadap penelitian terdahulu. Alur metodologi ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Analisis bibliometrik dilakukan dengan Publish or Perish (PoP) dan Google Scholar (GS). Tiga kata kunci yang digunakan adalah “*structure health monitoring system*”, “*bridge*”, dan “*journal*”; diharapkan dapat memberikan informasi perkembangan terkini dan tren penggunaan SHM dalam struktur jembatan. Durasi publikasi yang ditinjau antara tahun 2010 dan tahun 2020. Dari hasil yang diperoleh, dilakukan evaluasi dan penyaringan dengan kriteria penelitian terkait SHM pada jembatan dan dipublikasikan dalam jurnal. Tiga pertanyaan penelitian digunakan untuk identifikasi tren tersebut, yaitu: (1) jenis jembatan yang paling sering ditinjau; (2) metode dan jenis sensor yang paling sering digunakan serta

keunggulan dan kelemahan pada metode sensor tersebut; dan (3) bagian yang paling banyak dipasang sensor SHM dan untuk mendeteksi kerusakan apa saja.



**Gambar 1** Diagram Alur Metodologi

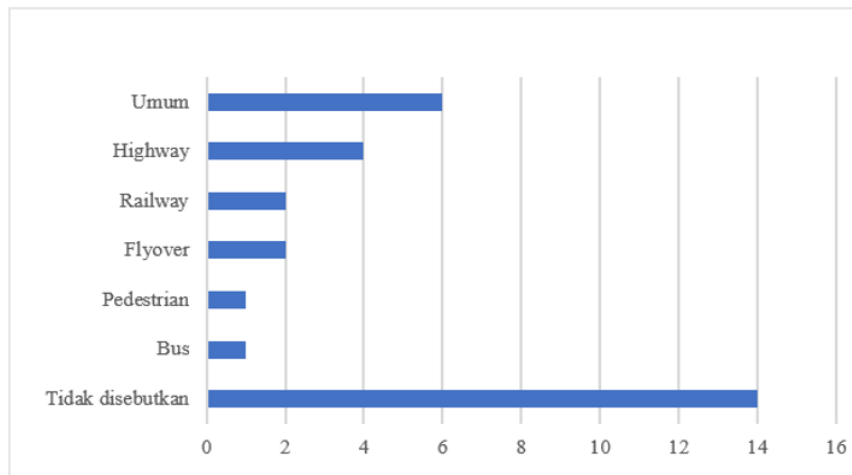
Tahap kedua adalah tinjauan literatur menggunakan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan adalah “*structure health monitoring system*” dan “*bridge*” dan “*construction management*”. Penambahan kata kunci “*construction management*” ditempuh, karena banyak artikel yang tidak terkait dengan manajemen konstruksi. Pencarian tahap pertama diperlukan untuk mengetahui tren secara umum dan tidak terbatas pada bidang manajemen konstruksi. Terdapat 403 artikel untuk periode 2010-2020, namun hanya 50 artikel yang sesuai dengan kata kunci yang ditetapkan dan hanya 22 artikel yang dievaluasi. Tahap kedua dilakukan untuk menjawab 2 pertanyaan penelitian, yaitu (i) bagaimana pertimbangan biaya dalam pemasangan SHM; dan (2) tantangan yang dihadapi dalam pemasangan SHM. Jawaban atas 5 pertanyaan penelitian tersebut diharapkan mampu menjawab tujuan penelitian ini.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis bibliometrik dan tinjauan literatur yang dikelompokkan menjadi beberapa bagian. Bagian-bagian tersebut diuraikan berikut.

## Jenis Jembatan Berdasarkan Fungsi

Berdasarkan fungsinya, jenis jembatan secara umum merupakan jenis jembatan yang paling banyak ditinjau, diikuti jembatan bebas hambatan (*highway bridge*), jembatan kereta api, dan jembatan layang. Terdapat 14 penelitian yang tidak menyebutkan secara spesifik fungsi jembatan yang diteliti, karena merupakan studi literatur atau percobaan laboratorium. Distribusi jenis jembatan berdasarkan fungsinya dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2** Jembatan Berdasarkan Fungsi

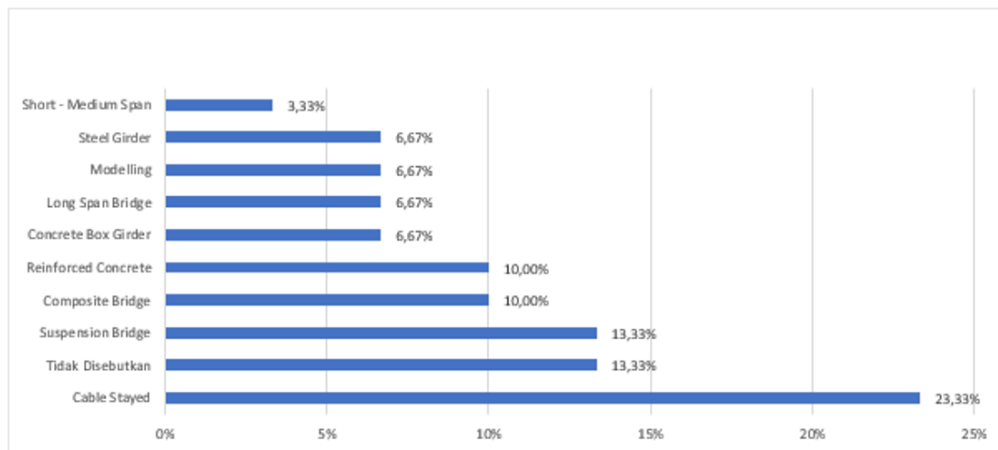
Jumlah penelitian pada jembatan rel masih terbatas. Dua jembatan rel yang dipantau menggunakan SHM memiliki usia hampir seratus tahun, yaitu Jembatan Go'taa'lv, yang dibangun pada tahun 1939 di Swedia (Elhattab et al., 2016), dan Jembatan Georgopotamos, yang dibangun pada tahun 1905 di Yunani dan masih digunakan hingga saat ini (Psimoulis dan Stiros, 2013). Karena kegagalan jembatan mengakibatkan kerugian ekonomi yang sangat besar, usia layanan jembatan perlu dipastikan agar aman untuk digunakan. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi struktur jembatan yang terintegrasi, setiap 2 tahun sekali, sesuai standar AASHTO untuk Evaluasi Jembatan (Seo et al., 2016).

## Jenis Jembatan yang Ditinjau

Jembatan *cable-stayed* berada pada urutan pertama (lebih dari 23%), seperti terlihat pada Gambar 3. Jembatan *cable-stayed* modern dibangun pertama kali di Swedia pada tahun 1956. Jembatan jenis ini memiliki kekakuan, aerodinamis, ketahanan gempa, dan bentuk estetis yang indah. Dalam 10 tahun terakhir banyak dibangun jembatan *cable-stayed* dengan bentang lebih dari 1000 meter (Li dan Ou, 2016) sehingga memiliki risiko yang lebih besar.

Jembatan gantung (*suspension bridge*) berada pada peringkat kedua dengan 4 penelitian (13%). Jembatan ini memiliki bentuk dan karakteristik mirip *cable-stayed*, dan perbedaan kedua jembatan ini terletak pada hubungan kabel dengan menara. Kabel jembatan *cable-stayed* dihubungkan ke menara, sehingga beban diterima menara. Sedangkan pada jembatan gantung, kabel berdiri bebas terhadap menara dan beban ditransfer ke angkur di kedua ujung.

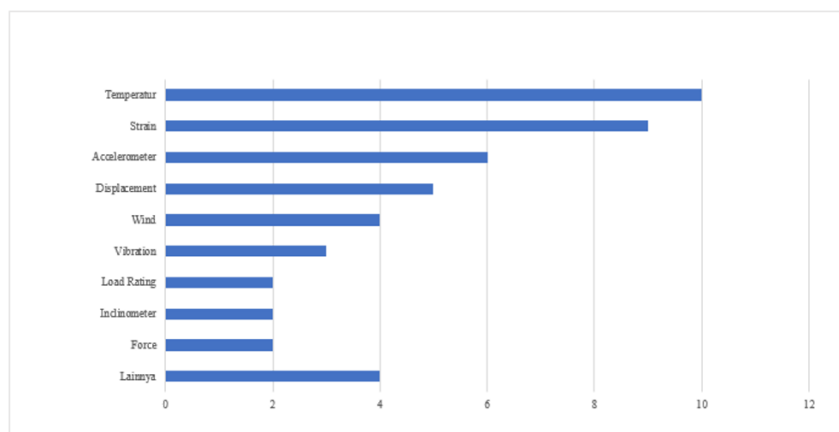
Kedua jembatan ini menerima berbagai macam beban dalam jangka waktu panjang, gangguan lingkungan, dan bencana alam. Kerusakan seringkali terjadi pada kabel dan angkur, cat yang mengelupas, bearings yang tidak berfungsi akibat kelelahan (*fatigue*) material, korosi, dan dampak lainnya (Hui dan Ou, 2016). Dengan kondisi seperti ini, kedua jenis jembatan tersebut sangat rentan dan memerlukan pengamatan elemen struktural secara menerus. Beberapa jembatan lain, seperti jembatan komposit, jembatan beton bertulang, jembatan beton dengan *box girder*, jembatan dengan *girder* baja, juga mendapat perhatian pada studi ini.



**Gambar 3** Jenis Jembatan yang Ditinjau

### Jenis Sensor SHM

Jenis sensor untuk pemantauan yang dipasang pada jembatan sangat beragam; bahkan, pada satu objek jembatan dapat dipasang lebih dari 1 macam sensor. Sensor untuk temperatur dan regangan merupakan 2 jenis sensor yang paling sering dipasang. Kedua sensor tersebut berfungsi untuk melakukan deteksi terhadap pemantauan retakan, yang dapat mengakibatkan kerusakan serius pada bangunan struktur, dan dapat mengurangi kinerja dan keselamatan (Enckell et al., 2011). Jenis sensor yang sering dipasang pada jembatan dapat dilihat pada Gambar 4.



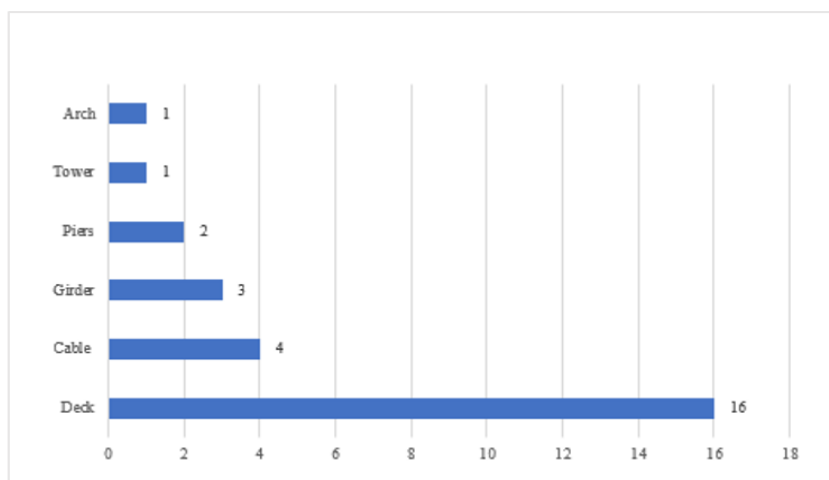
**Gambar 4** Jenis Sensor yang Sering Dipasang

Parameter struktur dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional dan lingkungan, termasuk temperatur, beban lalu lintas, dan kecepatan angin. Faktor temperatur merupakan faktor yang sangat dominan pada jembatan di negara 4 musim, sehingga pemantauan terhadap temperatur dilakukan secara menerus (Jin et al., 2016). Sementara itu, faktor regangan berperan dalam evaluasi keamanan dan kelelahan material. Regangan diukur menggunakan *strain gauge* tradisional, *vibrating-wire strain gauge*, dan *sensor fibre optic*. Perubahan fisik struktur mengakibatkan perubahan amplitudo regangan, sehingga kerusakan dapat dideteksi dan dilokalisasi dengan menganalisis waktu dan regangan yang terjadi (Li dan Ou, 2016). Penggunaan sensor regangan bersamaan dengan sensor getaran dalam SHM meningkat secara cepat dalam mendeteksi kerusakan pada jembatan (Seo et al., 2016). Sensor temperatur dan sensor regangan dapat dikombinasikan untuk mendeteksi retakan pada material komposit (Enckell et al., 2011; Xia et al., 2012).

Angin dan hujan merupakan faktor beban yang sangat penting pada jembatan *cable-stayed* dengan bentang panjang, karena memengaruhi vibrasi pada jembatan (Li dan Ou, 2016). Karena itu, diperlukan pemasangan sensor angin. Sensor lainnya adalah *accelerometer*, *displacement*, *vibration*, *load rating*, *inclinometer*, dan sensor gaya. Sementara itu, sensor seismik, *stress*, *swing*, dan *tension* masing-masing hanya terdapat pada 1 penelitian saja.

### Penempatan Sensor

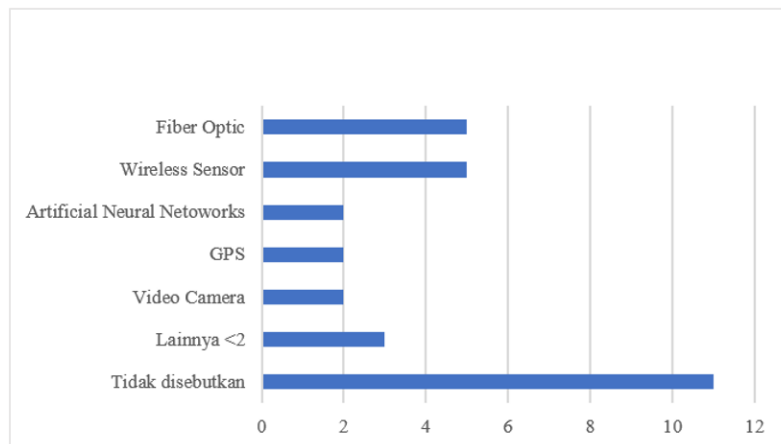
Penempatan sensor pada badan jembatan merupakan hal penting untuk mengetahui kinerja elemen jembatan. Pada umumnya, sensor diletakkan di tempat tertentu yang ingin ditinjau lebih dalam, selain untuk melakukan efisiensi biaya dan data. Pada Gambar 5 terlihat sebagian besar sensor ditempatkan pada dek jembatan, untuk memantau deformasi dan lendutan yang terjadi. Pada jembatan *cable-stayed*, pemasangan pada kabel juga banyak dilakukan, karena kabel memiliki peran penting dalam menopang beban jembatan tetapi rentan terhadap gangguan, seperti beban angin dan beban dinamis lainnya.



**Gambar 5** Lokasi Pemasangan Sensor pada Elemen Jembatan

## Metode Pengambilan Data SHM

Metode untuk pengambilan data SHM sangat beragam, dan sebarannya dapat dilihat pada Gambar 6. Serat optik dan sensor nirkabel merupakan metode yang paling banyak digunakan. Terdapat 11 penelitian yang tidak menyebutkan secara spesifik jenis sensor yang digunakan. Serat optis digunakan terutama pada sensor regangan dan sensor temperatur, karena memiliki ketahanan, kestabilan, dan keandalan dibandingkan dengan kabel biasa walaupun investasi awal relatif mahal (Sigurdardottir dan Glisic, 2015; Yu dan Ou, 2017).



**Gambar 6** Metode Pengambilan Data SHM

Jaringan sensor nirkabel (*wireless sensor network*, WSN) serupa dengan sistem konvensional, yang mana serangkaian sensor dihubungkan dengan *data logger* dan diakses langsung di lapangan atau dari jarak jauh melalui koneksi internet dan tidak memerlukan kabel untuk transmisi daya dan data. Server dipasang pada struktur untuk menyimpan data sementara dan mengirimkannya ke *cloud*. Hal ini mengurangi biaya instalasi kabel, mempercepat waktu pemasangan sensor, dan penambahan sensor dapat dilakukan dengan cepat sesuai dengan kebutuhan. Namun, terdapat 4 kelemahan WSN (Hoult et al., 2010; Kurata et al., 2013), yaitu: (1) daya listrik, (2) keterbatasan *bandwidth*, (3) keandalan koneksi, dan (4) waktu untuk sinkronisasi.

Teknologi *Global Positioning System* (GPS), sebagai alat navigasi, juga dapat digunakan untuk memantau perubahan posisi bangunan sipil secara *real-time*. Penggunaan GPS dalam SHM terbatas pada struktur yang fleksibel dan berisiko terjadinya kesalahan pengukuran, namun dapat diatasi dengan integrasi sensor lainnya untuk meningkatkan akurasi (Im et al., 2013).

Kamera video dapat digunakan untuk pemantauan SHM (Catbas et al., 2012; Fraser et al., 2010). Gambar yang diperoleh melalui *video imaging* dianalisis menggunakan teknologi penglihatan untuk mendeteksi dan melacak kendaraan yang melintasi jembatan (Catbas et al., 2012). Data yang diperoleh dari penggunaan kamera video sangat akurat jika dilakukan sinkronisasi dengan data dari *accelerometer* (Fraser et al., 2010).

Tiga metode lainnya hanya ditemukan 1 kali, yaitu *Robotic Total Station* (RTS), *smartphone*, dan *Micro Electro-Mechanical System* (MEMS). RTS merupakan cara yang

akurat untuk mengukur *displacement* pada jembatan bentang pendek yang kaku, seperti Jembatan Rel Gorgopotamos di Yunani (Psimoulis dan Stiros, 2013). Namun, diperlukan kondisi atmosfer yang baik dan tidak terganggu oleh pantulan sinar matahari. *Smartphone* dapat berfungsi sebagai sensor SHM, dengan memanfaatkan sensor yang ada, seperti temperatur, kelembapan, akselerasi, dan kemiringan (*inclination*). Penggunaan *smartphone* efektif untuk struktur kecil, piranti lunak yang mudah dioperasikan, dan tidak memerlukan interpretasi profesional. Metode MEMS mudah dipindahkan, awet, biaya rendah, dan digunakan untuk pemantauan pada struktur yang kaku (Yu et al., 2015). Fitur dinamis jembatan dapat diperkirakan dengan menggunakan MEMS dan luaran yang dihasilkan dapat dianalisis (Bedon et al., 2018).

Berdasarkan analisis bibliometrik, dapat disimpulkan bahwa banyak parameter yang ditinjau dalam pemasangan sensor SHM. Selain itu, belum ada sensor yang sesuai untuk semua jenis jembatan, sehingga perlu disesuaikan terhadap elemen yang ditinjau, kondisi, lokasi, dan usia layanan jembatan.

### **Pertimbangan dan Tahapan Pemasangan SHM**

Menurut López-Higuera et al. (2011), terdapat 5 pertimbangan pada pengembangan SHM, yaitu: (1) perilaku struktur; (2) beban yang direncanakan; (3) prinsip desain; (4) persyaratan dalam desain; dan (5) keberadaan sistem dan kesesuaian teknologi. Miyamoto dan Yabe (2012) melengkapi pertimbangan tersebut, yaitu: (1) identifikasi bagian yang perlu dideteksi; (2) pemilihan sensor yang sesuai untuk mekanisme kerusakan yang berbeda; (3) akurasi sensor; (4) usia pakai sensor; (5) biaya perawatan sistem; (6) metode pengisian daya dan metode telekomunikasi yang digunakan; dan (7) biaya pemasangan sensor. Berdasarkan kriteria tersebut, terdapat 3 tahapan utama dalam merancang dan melaksanakan SHM (Su et al., 2013), yaitu: (1) tahap perancangan jumlah elemen struktural yang diukur, pemilihan jenis sensor yang sesuai, dan penempatan sensor yang optimal; (2) tahap pemasangan dan kalibrasi: serangkaian percobaan statis dan dinamis untuk memeriksa sistem pemantauan pada jembatan setelah selesai pelaksanaan pemasangan; (3) tahapan operasional untuk pengujian sistem, pelatihan staf untuk pemeliharaan, dan penggantian jika terjadi malfungsi sensor yang ada.

### **Tantangan dalam Pelaksanaan SHM**

SHM berperan penting dalam teknologi pengujian di lapangan, untuk mengetahui siklus beban hidup, perubahan lingkungan, sifat, dan kinerja bangunan infrastruktur selama periode layanannya. Delapan tantangan dalam penggunaan SHM (Ou dan Li, 2010) adalah: (1) deteksi kerusakan lokal; (2) daya tahan sensor; (3) usia layanan sensor dan penggantianannya; (4) sensor nano teknologi; (5) teknologi nirkabel; (6) topologi jaringan sensor; (7) sensor dengan biaya rendah; dan (8) teknologi kompresif data. Dalam kurun waktu 10 tahun telah terjadi pergeseran, dan saat ini terdapat 3 tantangan utama yang ditemukan dalam penerapan SHM, yaitu:



- 1) Penentuan lokasi sensor yang tepat untuk memantau kerusakan struktur dan kapasitas beban. Gangguan lingkungan merupakan hal krusial dalam evaluasi keselamatan dan prediksi usia layanan (Li dan Ou, 2016). Penentuan lokasi tersebut dipengaruhi kompleksitas, ukuran, dan kerumitan struktur yang diamati (Agdas et al., 2016).
- 2) Isu baterai dan hemat energi menjadi fokus penelitian untuk mempercepat penggunaan SHM di masa depan. Pengelolaan daya yang baik menjadi penting dalam memaksimalkan daya tahan sensor (Annamdas et al., 2017; Galchev et al., 2011; Vagnoli et al., 2018). Tantangan yang dihadapi terjadi dalam penggantian dan pengisian daya. Pengisian daya sensor nirkabel pada lokasi yang sulit dijangkau menyebabkan biaya pemeliharaan menjadi mahal. Pengisian daya dan transfer data dapat dilakukan dengan *unmanned aerial vehicle* (Moud dan Gheisari, 2016).
- 3) Metode SHM menghasilkan data yang sangat besar (*big data*). Diperlukan pemantauan informasi namun, tetapi belum tersedia metode yang efisien untuk menginterpretasikan data tersebut, sehingga diperlukan personel khusus untuk memantau setiap data dan informasi yang dihasilkan (Agdas et al., 2016; Malekzadeh et al., 2015; Yu dan Ou, 2017). Mengolah dan menginterpretasikan informasi secara tepat berguna untuk pengambilan keputusan dalam pemeliharaan, sehingga SHM bukan hanya sebagai suatu jaringan sensor penghasil data saja (Agdas et al., 2016; Webb et al., 2014).

### **Biaya Penerapan SHM**

Tidak banyak penelitian yang membahas biaya pemasangan SHM pada jembatan dan hanya dilakukan perbandingan kualitatif. Beberapa faktor yang menjadi pertimbangan biaya dalam penerapan SHM dapat dibagi menjadi 4 hal, yaitu:

- 1) Perkiraan biaya awal pemasangan SHM bergantung pada jumlah sensor, komposisi sistem, dan frekuensi pemantauan (Agdas et al., 2016). Pemasangan SHM memiliki biaya awal yang tinggi, tetapi jika dibandingkan dengan biaya konstruksi, biaya SHM relatif kecil, yaitu kurang dari 10% biaya konstruksi. Biaya tersebut dapat berkurang jika dilakukan perancangan detail (Bell et al., 2013; Hoult et al., 2010; Vujović, 2018). Biaya investasi harus dipertimbangkan sebagai penghematan jangka panjang dan biaya perawatan. Seiring dengan kemajuan teknologi dan kemudahan penerapannya, biaya pemasangan SHM akan berkurang.
- 2) Biaya SHM lebih rendah untuk penggunaan jangka panjang dibandingkan dengan biaya SHM tahunan pada pengamatan konvensional (Treacy et al., 2019). Perbandingan biaya harus diperhitungkan terhadap usia layanan sensor, piranti keras, dan piranti lunak yang digunakan SHM. Inspeksi visual membutuhkan biaya USD 8.806 per inspeksi, sedangkan untuk SHM diperlukan biaya awal USD 63.810 dan biaya operasional sebesar USD 12.000 per tahun (Agdas et al., 2016). Dengan asumsi SHM memiliki usia layanan selama 10 tahun, biaya untuk SHM adalah sebesar USD 18.381 per tahun atau setara dengan biaya inspeksi konvensional setahun bila inspeksi visual dilakukan setiap enam bulan sekali. Perhitungan berbeda yang dikerjakan oleh Dalia et al. (2018) menunjukkan

bahwa penggunaan SHM menghasilkan keuntungan sebesar 17,5% dibandingkan tanpa SHM.

- 3) Perkembangan teknologi SHM memengaruhi efisiensi biaya. Berbagai teknologi dikembangkan untuk mendapatkan biaya sensor yang lebih murah, yang di antaranya adalah penggunaan WSN dan serat fiber. Penggunaan WSN dapat menghemat 40% dibandingkan dengan penggunaan sistem kabel, serta meningkat seiring dengan penambahan panjang jembatan (Neves et al., 2017) dan sangat mudah dan murah jika diperlukan penambahan sensor (Hoult et al., 2010). Penggunaan *smartphone* termasuk teknologi WSN dengan biaya yang murah (Yu et al., 2015; Pandey et al., 2016). Tren efisiensi biaya juga terjadi pada sistem sensor lainnya. Serat optik memiliki biaya awal tinggi, tetapi efisien untuk jangka panjang, stabil, dan dapat diandalkan (Sigurdottir dan Glisic, 2015). Sensor regangan dengan sensitivitas tinggi dan biaya yang sangat rendah dapat menggunakan *electroluminescent* (Xu dan Jo, 2016). Penggunaan *Global Navigation Satellite System* (GNSS) dengan biaya rendah menghasilkan kinerja yang baik untuk mengukur penurunan struktur (Manzini et al., 2020).
- 4) Biaya perawatan dan pengelolaan dapat disesuaikan dengan kebutuhan, seiring dengan pemahaman yang diperoleh terhadap kondisi aktual jembatan (Adibfar dan Costin, 2019). Biaya ini diperlukan untuk menghindari kerusakan dan menghemat biaya pembongkaran dan pembangunan kembali (Alokita et al., 2018) dan meningkatkan usia layanan dan keamanan jembatan (Koh et al., 2009). Akurasi yang lebih tinggi akan memperluas efektivitas SHM termasuk biaya perbaikan (Cheng et al., 2020).

### **Penerapan SHM di Indonesia**

Penelitian SHM di Indonesia masih sangat sedikit. Hasil penelusuran Google Search dengan kata kunci “structure health monitoring system” dan “Indonesia”, tanpa melakukan penyaringan, hanya ditemukan 59 artikel, yang berasal dari bidang keilmuan teknik mesin, teknik elektro, dan teknik industri. Hal ini menunjukkan bahwa keterlibatan akademisi teknik sipil, khususnya bidang manajemen rekayasa dan konstruksi, dalam penelitian SHM masih sangat sedikit.

Dari sisi regulator, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat melalui Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (sekarang menjadi Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan), memiliki perhatian yang sangat serius, dengan diterbitkannya buku yang mengatur penilaian kondisi dan kriteria peralatan SHM (Septinurriandiani, 2011). Secara khusus, dilakukan pembahasan mengenai Jembatan Suramadu, yang telah menggunakan SHM.

Jembatan Suramadu merupakan jembatan *cable-stayed* dengan bentang utama 1018 m, yang menghubungkan Pulau Jawa dan Pulau Madura. Jembatan ini dibangun pada tahun 2004 dan pemasangan SHM dilakukan pada tahun 2009. Sejumlah 452 sensor dipasang pada struktur jembatan untuk melakukan verifikasi desain, pemeliharaan struktur, dan pengelolaan lalu lintas.

## KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode analisis bibliometrik dan tinjauan literatur, yang bertujuan untuk mengetahui tren yang terjadi pada pemasangan SHM di jembatan serta untuk mengetahui tantangan dan pertimbangan biaya. Pada periode tahun 2010-2020, fungsi jembatan yang terbanyak ditinjau adalah jembatan umum dan jembatan bebas hambatan, dengan jenis jembatan *cable-stayed* dan jembatan gantung. Penggunaan sensor terbanyak adalah sensor temperatur dan sensor regangan, yang ditempatkan pada dek jembatan serta kabel penggantung. Pemasangan sensor yang terbanyak adalah dengan menggunakan metode nirkabel dan serat optik.

Terdapat 3 tantangan dalam pelaksanaan SHM, yaitu: (1) penentuan lokasi pemasangan; (2) efisiensi daya; dan (3) pengelolaan *big data*. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan dengan penelitian yang telah dilakukan 10 tahun yang lalu. Dari tinjauan terhadap penerapan biaya SHM, dapat dikategorikan 4 hal yang menjadi perhatian dalam penelitian terdahulu, yaitu: (1) biaya awal pemasangan; (2) perbandingan biaya SHM dengan metode konvensional; (3) efisiensi biaya sensor SHM; dan (4) biaya perawatan dan pengelolaan.

Penelitian dengan topik SHM pada jembatan masih terus berkembang, terutama dalam ranah perhitungan komputasi, teknologi informasi, serta rekayasa struktur. Dalam bidang ilmu manajemen dan rekayasa konstruksi, penelitian dengan topik SHM pada jembatan masih sangat sedikit dan masih berpeluang untuk dilakukan penelitian lebih mendalam.

Kerja sama antara Pemerintah, akademisi, dan praktisi diperlukan dalam sosialisasi penerapan SHM di Indonesia. Apabila dapat digunakan secara luas, SHM akan dapat diproduksi secara masal, biaya produksi SHM diharapkan akan menurun, dan manfaat penggunaan SHM dapat dirasakan oleh seluruh pemangku kepentingan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adibfar, A. dan Costin, A. 2019. *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*. Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering. New York, NY: Springer Nature.
- Agdas, D., Rice, J. A., Martinez, J.R, dan Lasa, I.R. 2016. *Comparison of Visual Inspection and Structural-Health Monitoring as Bridge Condition Assessment Methods*. Journal of Performance of Constructed Facilities, 30 (3): 1–10.
- Alokita, S, Rahul, V, Jayakrishna, K, Kar, V.R, Rajesh, M, Thirumalini, S, dan Manikandan, M. 2018. *Recent Advances and Trends in Structural Health Monitoring*. Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites, and Hybrid Composites. Amsterdam: Elsevier Ltd.
- Annamdas, V.G.M., Bhalla, S., dan Soh, C.K. 2017. *Applications of Structural Health Monitoring Technology in Asia*. Structural Health Monitoring, 16 (3): 324–346.

- Bedon, C., Bergamo, E., Izzi, M., dan Noè, S. 2018. *Prototyping and Validation of MEMS Accelerometers for Structural Health Monitoring: The Case Study of the Pietra-tagliata Cable-Stayed Bridge*. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 7 (3): 1–18.
- Bell, E.S., Lefebvre, P.J., Sanayei, M., Brenner, B., Sipple, J.D., dan Peddle, J. 2013. *Objective Load Rating of A Steel-Girder Bridge Using Structural Modeling and Health Monitoring*. *Journal of Structural Engineering*, 139 (10): 1771–1779.
- Catbas, F. N., Zaurin, R., Gul, M., dan Gokce, H. B. 2012. *Sensor Networks, Computer Imaging, and Unit Influence Lines for Structural Health Monitoring: Case Study for Bridge Load Rating*. *Journal of Bridge Engineering*, 17 (4): 662–670.
- Cheng, B., Wang, L., Huang, J., Shi, X., Hu, X., dan Chen, H. 2020. *A Computing Model for Quantifying the Value of Structural Health Monitoring Information in Bridge Engineering*. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020: 1–7.
- Dalia, Z. M., Bagchi, S., Sabamehr, A., Bagchi, A., dan Bhowmick, A. 2018. *Life Cycle Cost-Benefit Analysis of Shm of I-35 W St. Anthony Falls Bridge*. *International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing 2018 (SHM-NDT 2018)*. Saarbruecken
- Elhattab, A., Uddin, N., dan OBrien, E. 2016. *Drive-by Bridge Damage Monitoring Using Bridge Displacement Profile Difference*. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6 (5): 839–850.
- Enckell, M., Glisic, B., Myrvoll, F., dan Bergstrand, B. 2011. *Evaluation of A Large-Scale Bridge Strain, Temperature and Crack Monitoring with Distributed Fibre Optic Sensors*. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 1 (1–2): 37–46.
- Fraser, M., Elgamal, A., He, X., dan Conte, J. P. 2010. *Sensor Network for Structural Health Monitoring of A Highway Bridge*. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24 (1): 11–24.
- Galchev, T. V., McCullagh, J., Peterson, R. L., dan Najafi, K. 2011. *Harvesting Traffic-Induced Vibrations for Structural Health Monitoring of Bridges*. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 21 (10): 1–13.
- Hoult, N. A., Fidler, P. R. A., Hill, P. G., dan Middleton, C. R. 2010. *Long-Term Wireless Structural Health Monitoring of the Ferriby Road Bridge*. *Journal of Bridge Engineering*, 15 (2): 153–159.
- Im, S. B., Hurlebaus, S., dan Kang, Y. J. 2013. *Summary Review of GPS Technology for Structural Health Monitoring*. *Journal of Structural Engineering*, 139 (10): 1653–1664.
- Jin, C., Jang, S., Sun, X., Li, J., dan Christenson, R. 2016. *Damage Detection of A Highway Bridge Under Severe Temperature Changes Using Extended Kalman Filter Trained Neural Network*. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6 (3): 545–560.
- Koh, H. M., Park, W., dan Choo, J. F. 2009. *Achievements and Challenges in Bridge Health Monitoring Systems and Intelligent Infrastructures in Korea*. *Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure-Proceedings of the 4th International Confe-*

- rence on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII-4 2009. Zurich.
- Kurata, M., Kim, J., Lynch, J. P., van der Linden, G. W., Sedarat, H., Thometz, E., Hipley, P., dan Sheng, L.H. 2013. *Internet-Enabled Wireless Structural Monitoring Systems: Development and Permanent Deployment at the New Carquinez Suspension Bridge*. Journal of Structural Engineering, 139 (10): 1688–1702.
- Li, H. dan Ou, J. 2016. *The State of the Art in Structural Health Monitoring of Cable-Stayed Bridges*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6 (1): 43–67.
- López-Higuera, J. M., Cobo, L. R., Incera, A. Q., dan Cobo, A. 2011. *Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring*. Journal of Lightwave Technology, 29 (4): 587–608.
- Malekzadeh, M., Atia, G., dan Catbas, F. N. 2015. *Performance-Based Structural Health Monitoring Through an Innovative Hybrid Data Interpretation Framework*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 5 (3): 287–305.
- Manzini, N., Orcesi, A., Thom, C., Brossault, M. A., Botton, S., Ortiz, M., dan Dumoulin, J. 2020. *Performance Analysis of Low-Cost GNSS Stations for Structural Health Monitoring of Civil Engineering Structures*. Structure and Infrastructure Engineering, 16 (12): 595–611.
- Miyamoto, A. dan Yabe, A. 2012. *Development of Practical Health Monitoring System for Short- and Medium-Span Bridges Based on Vibration Responses of City Bus*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2 (1): 7–63.
- Moud, H. I. dan Gheisari, M. 2016. *Coupling Wireless Sensor Networks and Unmanned Aerial Vehicles in Bridge Health Monitoring Systems*. ISARC 2016-33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Isarc, 267–273.
- Neves, A. C., González, I., Leander, J., dan Karoumi, R. 2017. *Structural Health Monitoring of Bridges: A Model-Free ANN-Based Approach to Damage Detection*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 7 (5): 689–702.
- Ou, J. dan Li, H. 2010. *Structural Health Monitoring in Mainland China: Review and Future Trends*. Structural Health Monitoring, 9 (3): 219–231.
- Pandey, S., Haider, M., dan Uddin, N. 2016. *Design and Implementation of A Low-Cost Wireless Platform for Remote Bridge Health Monitoring*. Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng., 6 (6): 57–62.
- Psimoulis, P. A., dan Stiros, S. C. 2013. *Measuring Deflections of a Short-Span Railway Bridge Using a Robotic Total Station*. Journal of Bridge Engineering, 18 (2): 182–185.
- Seo, J., Hu, J. W., dan Lee, J. 2016. *Summary Review of Structural Health Monitoring Applications for Highway Bridges*. Journal of Performance of Constructed Facilities, 30 (4): 2016-08.
- Septinurriandiani. 2011. *Sistem Monitoring Kesehatan Struktur-Penilaian Kondisi dan Kriteria Peralatan Monitoring*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan

- Jembatan. Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum. Bandung.
- Sigurdardottir, D. H., dan Glisic, B. 2015. *On-Site Validation of Fiber-Optic Methods for Structural Health Monitoring: Streicker Bridge*. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5 (4): 529–549.
- Su, J. Z., Xia, Y., Chen, L., Zhao, X., Zhang, Q. L., Xu, Y. L., Ding, J. M., Xiong, H. B., Ma, R. J., Lv, X. L., dan Chen, A. R. 2013. *Long-Term Structural Performance Monitoring System for the Shanghai Tower*. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 3 (1): 49–61.
- Treacy, M., Meng, N., dan Paciacconi, A. 2019. *What Added Value Can SHM Bring to My Construction Project or Structure Maintenance Programme?* SMAR2019-Fifth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 1–8.
- Vagnoli, M., Remenyte-Prescott, R., dan Andrews, J. 2018. *Railway Bridge Structural Health Monitoring and Fault Detection: State-of-the-Art Methods and Future Challenges*. *Structural Health Monitoring*, 17 (4): 971–1007.
- Vujović, V. 2018. *The Mala Rijeka Bridge-Specificity of Maintenance*. *Procedia Structural Integrity*, 13: 1901–1907.
- Webb, G. T., Vardanega, P. J., Fidler, P. R. A., dan Middleton, C. R. 2014. *Analysis of Structural Health Monitoring Data from Hammersmith Flyover*. *Journal of Bridge Engineering*, 19 (6): 1–11.
- Xia, Y., Chen, B., Weng, S., Ni, Y. Q., dan Xu, Y. L. 2012. *Temperature Effect on Vibration Properties of Civil Structures: A Literature Review and Case Studies*. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2 (1): 29–46.
- Xu, J. dan Jo, H. 2016. *Development of High-Sensitivity and Low-Cost Electroluminescent Strain Sensor for Structural Health Monitoring*. *IEEE Sensors Journal*, 16 (7): 1962–1968.
- Yu, S., dan Ou, J. 2017. *Structural Health Monitoring and Model Updating of Aizhai Suspension Bridge*. *Journal of Aerospace Engineering*, 30 (2): 1–15.
- Yu, Y., Han, R., Zhao, X., Mao, X., Hu, W., Jiao, D., Li, M., dan Ou, J. 2015. *Initial Validation of Mobile-Structural Health Monitoring Method Using Smartphones*. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015 (2): 1–14.