



## Pemanfaatan Gelombang Akustik untuk Deteksi Dini Retakan Struktur Jembatan

Lismin Dirwanto<sup>1\*</sup>, Shally Joncicilia<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> Institut Nalanda, Indonesia

\*Penulis korespondensi [lismin@nalanda.ac.id](mailto:lismin@nalanda.ac.id)

**Abstract.** Bridge infrastructure is a vital component of transportation systems that is vulnerable to structural damage caused by dynamic loads, environmental factors, and aging. Early crack detection is crucial to prevent structural failures that may lead to catastrophic consequences. This study aims to develop a non-destructive detection method based on acoustic sensors to identify cracks in bridge structures with higher sensitivity and accuracy compared to conventional visual inspections. The research was conducted through laboratory experiments and field tests using acoustic sensors, data acquisition devices, and signal analysis software. The procedure included sensor installation on a bridge model, simulation of artificial cracks with varying sizes and positions, recording of acoustic wave signals, and data analysis using frequency spectrum, amplitude, and waveform pattern approaches. The results show significant differences between normal and cracked conditions in the frequency spectrum, where cracks produced amplitude anomalies at specific frequencies. Amplitude analysis revealed a positive correlation between crack size and acoustic signal intensity, while waveform pattern analysis demonstrated the influence of crack position on distortion levels. Cracks located at the center generated the highest distortion, followed by joints and edges. These findings confirm that acoustic sensors, particularly fiber-optic-based ones, offer advantages such as high sensitivity, reliability under complex environmental conditions, and the ability to detect subsurface cracks. The implications of this research highlight the potential development of an acoustic sensor-based structural health monitoring system integrated with real-time analysis software, thereby supporting preventive maintenance, extending infrastructure lifespan, and enhancing transportation safety.

**Keywords:** Acoustic; Bridge; Crack; Non-Destructive Detection; Sensor.

**Abstrak.** Infrastruktur jembatan merupakan salah satu komponen vital dalam sistem transportasi yang rentan mengalami kerusakan struktural akibat beban dinamis, faktor lingkungan, maupun usia pemakaian. Deteksi dini retakan menjadi penting untuk mencegah kegagalan struktur yang dapat berakibat fatal. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode deteksi non-destruktif berbasis sensor akustik untuk mendeteksi retakan pada struktur jembatan secara lebih sensitif dan akurat dibandingkan inspeksi visual konvensional. Metode penelitian dilakukan melalui eksperimen laboratorium dan uji lapangan menggunakan sensor akustik, perangkat akuisisi data, dan perangkat lunak analisis sinyal. Tahapan penelitian meliputi pemasangan sensor pada model struktur jembatan, simulasi retakan buatan dengan variasi ukuran dan posisi, perekaman gelombang akustik, serta analisis data menggunakan pendekatan spektrum frekuensi, amplitudo, dan pola gelombang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan antara kondisi normal dan retak pada spektrum frekuensi, di mana retakan menghasilkan anomali amplitudo pada frekuensi tertentu. Analisis amplitudo membuktikan adanya hubungan positif antara ukuran retakan dan intensitas sinyal akustik, sedangkan pola gelombang menunjukkan pengaruh posisi retakan terhadap tingkat distorsi. Retakan di bagian tengah menghasilkan distorsi tertinggi, diikuti sambungan, dan tepi. Temuan ini menegaskan bahwa sensor akustik, khususnya berbasis serat optik, memiliki keunggulan berupa sensitivitas tinggi, keandalan dalam kondisi lingkungan kompleks, serta kemampuan mendeteksi retakan *subsurface*. Implikasi penelitian ini adalah potensi pengembangan sistem monitoring kesehatan struktur jembatan berbasis sensor akustik yang terintegrasi dengan perangkat lunak analisis real-time, sehingga dapat mendukung pemeliharaan preventif, memperpanjang umur pakai infrastruktur, dan meningkatkan keselamatan transportasi.

**Kata kunci:** Akustik; Deteksi Non-Destruktif; Jembatan; Retakan; Sensor.

### 1. LATAR BELAKANG

Infrastruktur jembatan merupakan komponen vital dalam sistem transportasi modern yang berfungsi sebagai penghubung antarwilayah, memfasilitasi pergerakan manusia, barang, dan jasa. Keberadaan jembatan tidak hanya penting bagi mobilitas sehari-hari, tetapi juga

memiliki nilai strategis, terutama dalam menjamin akses ke layanan darurat, distribusi logistik, dan utilitas publik (Kour et al., 2023). Oleh karena itu, menjaga keberlanjutan dan keamanan infrastruktur jembatan menjadi prioritas utama dalam pengelolaan transportasi.

Namun, jembatan sangat rentan terhadap berbagai bentuk kerusakan struktural yang dipengaruhi oleh usia pemakaian, beban berlebih, serta kondisi lingkungan yang agresif. Faktor-faktor seperti korosi, siklus pembebanan, dan pengaruh iklim dapat mempercepat degradasi material, sehingga menurunkan daya tahan struktur (Jancula et al., 2021). Seiring bertambahnya usia jembatan, risiko kegagalan struktural juga semakin meningkat jika tidak dilakukan pemantauan dan pemeliharaan secara sistematis.

Salah satu bentuk kerusakan yang paling krusial adalah retakan pada struktur jembatan. Retakan kecil yang awalnya tidak terdeteksi dapat berkembang menjadi kerusakan serius yang berpotensi membahayakan keselamatan publik (Zoubir et al., 2024). Retakan ini biasanya dimulai dari tingkat mikroskopis pada material, kemudian berkembang menjadi deformasi atau tegangan berlebih yang dapat berujung pada kegagalan struktural. Oleh karena itu, deteksi dini retakan sangat penting untuk mencegah kerugian besar maupun kecelakaan fatal.

Metode inspeksi konvensional, seperti inspeksi visual, selama ini menjadi cara utama dalam memantau kondisi jembatan. Namun, metode ini memiliki keterbatasan signifikan, seperti hanya dapat menjangkau area yang terlihat, membutuhkan biaya dan waktu yang tinggi, serta bersifat subjektif tergantung pada pengalaman inspektur (Zhou & Song, 2020). Hal ini dapat mengakibatkan keterlambatan dalam deteksi retakan awal, sehingga risiko kerusakan besar semakin meningkat.

Kemajuan teknologi telah mendorong pengembangan berbagai pendekatan baru dalam mendeteksi kerusakan jembatan. Metode berbasis visi komputer, pembelajaran mesin, maupun augmented reality mulai diterapkan untuk meningkatkan akurasi deteksi (Malek et al., 2023; Qi et al., 2024). Meski demikian, sebagian besar teknologi tersebut masih membutuhkan integrasi dengan sistem monitoring yang mampu memberikan hasil real-time dan non-destruktif.

Salah satu pendekatan yang semakin mendapat perhatian adalah pemanfaatan gelombang akustik. Teknologi ini terbukti efektif dalam deteksi dini retakan karena mampu mendeteksi sinyal akustik yang muncul akibat propagasi kerusakan material (Tai et al., 2025). Selain itu, metode akustik memungkinkan pemantauan secara real-time tanpa merusak struktur, sehingga sangat cocok diterapkan pada infrastruktur vital seperti jembatan.

Pemanfaatan teknologi akustik juga memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas dan efisiensi. Gelombang akustik dapat diaplikasikan pada berbagai jenis material, termasuk baja,

beton, maupun komposit, serta mengurangi ketergantungan pada inspeksi manual yang rawan kesalahan manusia (Ha et al., 2023). Hal ini menunjukkan potensi besar penggunaan metode akustik sebagai solusi komplementer maupun alternatif dari metode inspeksi visual konvensional.

Dengan mempertimbangkan tingginya risiko kegagalan struktural akibat retakan yang tidak terdeteksi, serta keterbatasan metode inspeksi tradisional, maka penerapan teknologi gelombang akustik menjadi relevan untuk penelitian lebih lanjut. Integrasi teknologi ini dengan sistem pemantauan kesehatan struktural dapat meningkatkan keamanan, memperpanjang umur layanan jembatan, serta mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang (Rotaru, 2023; Pregolato et al., 2021). Dengan demikian, penelitian mengenai pemanfaatan gelombang akustik untuk deteksi dini retakan pada jembatan diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengelolaan infrastruktur transportasi yang lebih berkelanjutan dan aman.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

### **Infrastruktur Jembatan**

Jembatan memiliki fungsi vital dalam sistem transportasi karena berperan sebagai penghubung wilayah yang terpisah oleh penghalang alami seperti sungai, lembah, maupun jalan raya lainnya. Keberadaan jembatan memastikan kelancaran mobilitas masyarakat serta distribusi barang dan jasa, sehingga menjadi bagian penting dari jaringan transportasi nasional dan regional (Rathore & Garg, 2022). Lebih jauh, kerusakan pada jembatan tidak hanya menimbulkan kerugian langsung berupa kerusakan fisik, tetapi juga kerugian tidak langsung yang berimplikasi pada terganggunya aktivitas sosial dan ekonomi (Bas & Catbas, 2021).

Penelitian sebelumnya menekankan bahwa keruntuhan jembatan kerap disebabkan oleh kombinasi faktor usia, beban berlebih, dan kondisi lingkungan ekstrem. Misalnya, banjir besar dan bencana alam lain terbukti menjadi salah satu penyebab utama kegagalan struktur jembatan (Hussain & Jan, 2016). Selain itu, penelitian oleh Jancula et al. (2019) menunjukkan bahwa korosi pada baja secara signifikan mengurangi kekuatan struktur, sehingga menurunkan umur layan jembatan. Hal ini menggarisbawahi pentingnya pemeliharaan rutin dan monitoring untuk mencegah keruntuhan dini.

Faktor lingkungan, termasuk gempa bumi dan perubahan iklim, juga memainkan peran besar dalam kerusakan jembatan. Studi mengenai jembatan lengkung horizontal akibat gempa menunjukkan bahwa desain yang tidak tahan terhadap gaya lateral dapat meningkatkan risiko keruntuhan (Namlı & Öztürk, 2023). Dengan demikian, ketahanan terhadap multi-bencana menjadi salah satu aspek krusial dalam desain dan pemeliharaan jembatan modern.

Upaya monitoring dan benchmarking kesehatan struktur jembatan telah banyak dikembangkan. Misalnya, Pramod Kumar Reddy dan Sen (2023) mengusulkan metode monitoring berbasis *Integrated Wavelet Coupled Method* (IWCM) dan *Temperature-Based Structural Index* (TBSI) untuk jembatan gantung warisan budaya. Teknologi ini memungkinkan deteksi dini kerusakan meskipun dalam kondisi suhu lingkungan yang bervariasi. Pendekatan semacam ini memperlihatkan arah perkembangan riset menuju sistem pemantauan cerdas berbasis data.

### **Konsep Gelombang Akustik**

Dalam konteks deteksi kerusakan material, konsep gelombang akustik menawarkan potensi besar sebagai teknologi non-destruktif. Gelombang akustik merambat melalui medium padat dengan sifat propagasi yang dipengaruhi oleh densitas dan modulus elastisitas material. Pada batas antar medium, gelombang ini dapat mengalami refleksi, transmisi, maupun absorpsi (Singh & Thakur, 2024). Karakteristik propagasi inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk mengidentifikasi anomali dalam material.

Kerusakan material, seperti retakan atau cacat internal, dapat memengaruhi propagasi gelombang akustik melalui fenomena atenuasi frekuensi dan dispersi kecepatan fase. Penelitian menunjukkan bahwa media dengan kerusakan cenderung menimbulkan atenuasi lebih besar dan perubahan kecepatan gelombang, sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan (Stulov & Erofeev, 2016). Selain itu, simulasi numerik juga telah membuktikan bahwa adanya retakan pada struktur padat dapat menimbulkan efek resonansi dan lokalitas gelombang (Golub & Zhang, 2016).

Teknik berbasis gelombang akustik, seperti emisi akustik dan tomografi akustik, semakin banyak diterapkan dalam rekayasa sipil. Misalnya, penelitian Zhong dan Zhang (2018) menunjukkan efektivitas metode transmisi gelombang dan tomografi akustik dalam mendeteksi kerusakan pondasi tiang pancang. Teknik ini dapat memberikan gambaran tiga dimensi mengenai kondisi internal struktur tanpa perlu melakukan pembongkaran fisik.

### **Sensor Akustik**

Sensor akustik memiliki peran penting dalam pemantauan kondisi struktural karena kemampuannya mendeteksi getaran, retakan, dan perubahan material secara sensitif. Salah satu teknologi yang berkembang adalah *Fiber-Optic Acoustic Sensors* (FOASs), yang terbagi ke dalam beberapa tipe, seperti *Acoustic Structure Optic Coupling* (ASOC) dan *Acoustic Optic Coupling* (AOC). FOASs memiliki keunggulan berupa kekebalan terhadap gangguan elektromagnetik, sensitivitas tinggi, dan bandwidth yang lebih luas dibandingkan sensor konvensional (Li et al., 2024). Selain itu, *Acoustic Emission* (AE) Sensors menggunakan

elemen piezoelektrik untuk mendeteksi gelombang stres elastis yang merambat dalam material struktural. Teknologi ini efektif dalam mengidentifikasi pelepasan energi akibat retakan mikro atau kerusakan awal (Hamdan et al., 2024).

Jenis sensor lain yang digunakan adalah *Micro Opto Electro Mechanical Systems* (MOEMS) dan *Surface Acoustic Wave* (SAW) Sensors. MOEMS memungkinkan miniaturisasi perangkat dengan sensitivitas tinggi, sedangkan SAW sensors memanfaatkan propagasi gelombang akustik di permukaan material sehingga dapat digunakan dalam pengukuran getaran dan deformasi struktural (Willberry & Papaalias, 2020). Selain itu, perkembangan terbaru juga mencakup *Distributed Acoustic Sensing* (DAS) yang memanfaatkan kabel serat optik sebagai jaringan sensor akustik kontinu dengan cakupan yang luas (Li et al., 2024).

### **Prinsip Kerja Sensor Akustik**

Prinsip kerja sensor akustik bervariasi tergantung teknologinya. FOASs bekerja berdasarkan perubahan intensitas cahaya, *grating Bragg serat*, atau *interferometer Fabry-Pérot*, yang dipengaruhi oleh getaran mekanis di sekitar serat optik (Li et al., 2024). Sementara itu, AE sensors mendeteksi gelombang elastis yang dihasilkan oleh pelepasan energi lokal dari material yang mengalami kerusakan mikro (Hamdan et al., 2024). SAW sensors memanfaatkan perubahan properti gelombang akustik di permukaan material yang berkaitan dengan adanya retakan atau tekanan (Willberry & Papaalias, 2020).

### **Metode Deteksi Non-Destruktif (NDT)**

Metode Non-Destructive Testing (NDT) merupakan pendekatan yang memungkinkan evaluasi kondisi material, komponen, atau sistem tanpa menyebabkan kerusakan pada objek yang diuji. Teknik NDT meliputi ultrasonik, radiografi, partikel magnetik, penetran cair, inspeksi visual jarak jauh, hingga pengujian arus eddy (Khalid et al., 2023).

Metode akustik memiliki keunggulan dibandingkan inspeksi visual karena mampu mendeteksi kerusakan *subsurface*, yaitu retakan atau cacat yang tidak terlihat di permukaan material. Misalnya, emisi akustik dan sensor ultrasonik dapat mengidentifikasi anomali di bawah permukaan struktur (Vesala et al., 2022). Selain itu, sensor akustik berbasis serat optik menawarkan keandalan dan sensitivitas tinggi, serta tahan terhadap interferensi elektromagnetik, sehingga lebih efektif dalam pemantauan struktural jangka panjang (Li et al., 2024).

### 3. METODE PENELITIAN

#### Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium dan uji lapangan. Eksperimen laboratorium dilakukan untuk memperoleh pemahaman awal mengenai karakteristik propagasi gelombang akustik pada material struktur jembatan dengan kondisi retakan buatan. Uji lapangan selanjutnya dilakukan pada model jembatan berskala kecil untuk menguji validitas hasil laboratorium dalam kondisi yang lebih mendekati situasi nyata.

#### Instrumen penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sensor akustik yang dipasang pada permukaan struktur untuk menangkap gelombang elastis yang dihasilkan dari adanya retakan, perangkat akuisisi data yang berfungsi merekam sinyal akustik dari sensor secara *real-time*, serta perangkat lunak analisis sinyal yang digunakan untuk melakukan pengolahan data, termasuk analisis frekuensi, amplitudo, dan pola gelombang.

#### Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan melalui beberapa langkah yang sistematis. Pertama, dilakukan pemasangan sensor akustik pada model struktur jembatan, di mana sensor ditempatkan pada beberapa titik strategis untuk memastikan cakupan area deteksi yang memadai. Selanjutnya, dilakukan simulasi retakan dengan membuat retakan buatan pada model yang divariasikan berdasarkan ukuran, mulai dari mikro hingga makro, serta posisi retakan pada bagian tengah, tepi, maupun sambungan material. Setelah itu, dilakukan perekaman gelombang akustik, di mana sinyal yang dipancarkan akibat adanya retakan direkam menggunakan perangkat akuisisi data. Tahap terakhir adalah analisis sinyal akustik melalui perangkat lunak, yang mencakup identifikasi pola, perbandingan kondisi normal dan retak, serta pengelompokan sinyal berdasarkan ukuran dan posisi retakan.

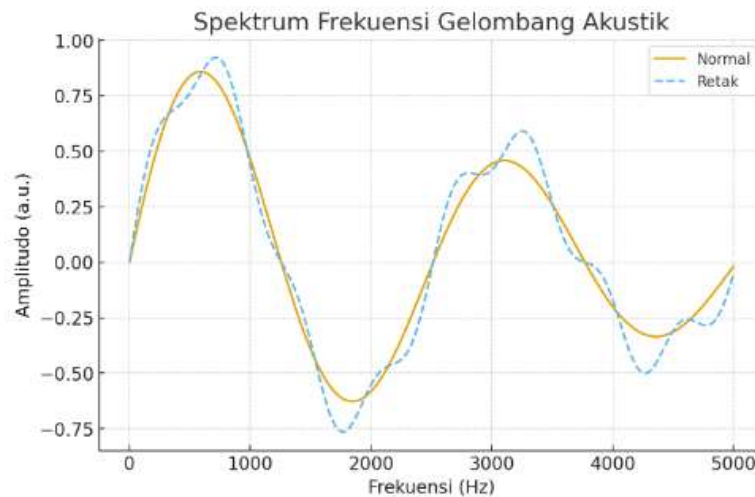
#### Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan pendekatan analisis spektrum frekuensi, amplitudo, dan pola gelombang. Analisis frekuensi digunakan untuk mengidentifikasi pergeseran spektrum akibat adanya retakan. Analisis amplitudo bertujuan menilai perbedaan intensitas sinyal yang ditimbulkan, sedangkan pola gelombang diamati untuk mendeteksi anomali yang dapat menunjukkan karakteristik retakan. Hasil analisis ini kemudian diinterpretasikan untuk menentukan kemampuan sensor akustik dalam mendeteksi retakan pada struktur jembatan secara dini.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

Berdasarkan hasil eksperimen laboratorium, diperoleh data frekuensi sinyal akustik dari model jembatan dalam kondisi normal dan kondisi dengan variasi retakan. Data ini kemudian diolah untuk mengidentifikasi adanya pergeseran spektrum akibat retakan.



**Gambar 1.** Grafik spektrum frekuensi gelombang akustik pada kondisi normal dan retak.

Grafik di atas menunjukkan adanya pergeseran spektrum antara kondisi normal dan kondisi retak. Pada kondisi normal, spektrum frekuensi cenderung stabil dengan amplitudo yang menurun seiring bertambahnya frekuensi. Sebaliknya, pada kondisi retak terlihat adanya anomali berupa peningkatan amplitudo pada frekuensi tertentu yang menunjukkan adanya pelepasan energi akibat retakan. Temuan ini mengindikasikan bahwa analisis spektrum frekuensi dapat digunakan sebagai indikator awal untuk mendeteksi retakan pada struktur jembatan.

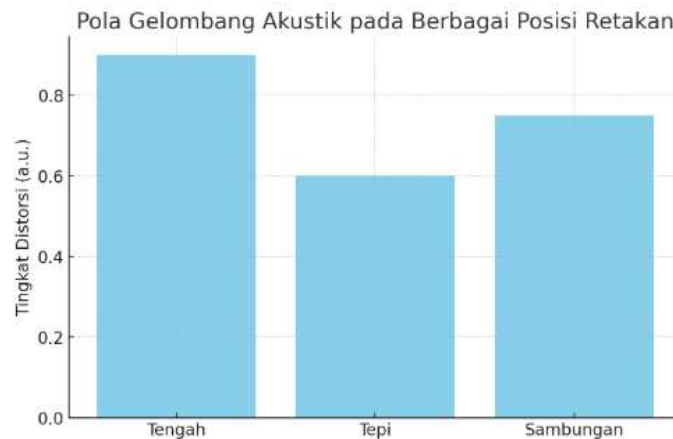
Selain itu, penelitian ini juga menganalisis hubungan antara ukuran retakan dengan amplitudo sinyal akustik yang ditangkap sensor.



**Gambar 2.** Grafik hubungan amplitudo sinyal dengan ukuran retakan.

Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin besar ukuran retakan, amplitudo sinyal yang terdeteksi meningkat secara signifikan. Retakan berukuran kecil (1–2 mm) menghasilkan sinyal dengan amplitudo relatif rendah, sedangkan retakan yang lebih besar (4–5 mm) menghasilkan lonjakan amplitudo yang jelas. Hal ini memperkuat hipotesis bahwa amplitudo sinyal akustik berbanding lurus dengan tingkat kerusakan struktural.

Untuk melihat pola propagasi gelombang secara menyeluruh, dilakukan analisis pola sinyal dari berbagai posisi retakan yaitu pada bagian tengah, tepi, dan sambungan material.



**Gambar 3.** Diagram pola gelombang akustik pada berbagai posisi retakan.

Gambar 3 menunjukkan bahwa retakan di bagian tengah struktur menghasilkan tingkat distorsi gelombang tertinggi, diikuti oleh retakan pada sambungan, dan yang terendah pada bagian tepi. Hal ini mengindikasikan bahwa posisi retakan berpengaruh signifikan terhadap pola propagasi gelombang akustik. Dengan demikian, pola gelombang dapat dijadikan parameter tambahan dalam mengidentifikasi lokasi retakan secara lebih spesifik.

### Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode berbasis sensor akustik efektif dalam mendeteksi retakan pada struktur jembatan. Analisis spektrum frekuensi memperlihatkan adanya pergeseran dan anomali amplitudo pada kondisi retak dibandingkan dengan kondisi normal. Hal ini sejalan dengan prinsip kerja *Acoustic Emission* (AE), di mana energi elastis yang dilepaskan dari sumber lokal dalam material akan menghasilkan gelombang akustik yang dapat ditangkap sensor (Hamdan et al., 2024). Dengan demikian, pola perubahan frekuensi dapat dijadikan indikator awal dalam sistem deteksi dini kerusakan.

Lebih lanjut, hubungan amplitudo dengan ukuran retakan menunjukkan adanya korelasi positif yang konsisten. Retakan kecil hanya menghasilkan sinyal dengan amplitudo rendah, sementara retakan yang lebih besar memicu lonjakan amplitudo signifikan. Temuan ini mendukung hasil penelitian Willberry dan Papaalias (2020) yang menyatakan bahwa sensor

akustik berbasis serat optik mampu merekam variasi amplitudo yang berkaitan dengan tingkat kerusakan struktural. Dengan sensitivitas tinggi dan kekebalan terhadap gangguan elektromagnetik, sensor serat optik menjadi salah satu instrumen yang paling andal untuk monitoring jembatan.

Analisis pola gelombang berdasarkan posisi retakan juga memberikan kontribusi penting dalam pemetaan kerusakan. Distorsi tertinggi pada retakan di bagian tengah struktur menunjukkan bahwa lokasi retakan memengaruhi propagasi gelombang akustik. Temuan ini sejalan dengan Li et al. (2024) yang menekankan pentingnya pemetaan pola gelombang untuk meningkatkan akurasi deteksi lokasi kerusakan pada aplikasi sensor akustik berbasis serat optik. Retakan pada sambungan juga menghasilkan distorsi cukup tinggi, yang dapat diinterpretasikan sebagai indikasi area kritis pada sambungan material jembatan.

Secara keseluruhan, hasil eksperimen laboratorium yang diperkuat dengan uji lapangan ini membuktikan bahwa penggunaan sensor akustik tidak hanya mampu mendeteksi keberadaan retakan, tetapi juga dapat memberikan informasi terkait ukuran dan posisi retakan. Hal ini memberikan keunggulan dibandingkan inspeksi visual konvensional yang hanya mampu mendeteksi kerusakan permukaan (Khalid et al., 2023). Dengan demikian, penerapan metode deteksi non-destruktif berbasis sensor akustik sangat relevan untuk mendukung *Structural Health Monitoring* (SHM) jembatan secara berkelanjutan.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa sensor akustik efektif digunakan untuk mendeteksi retakan pada struktur jembatan secara dini. Analisis spektrum frekuensi berhasil menunjukkan adanya pergeseran sinyal antara kondisi normal dan kondisi retak, sedangkan analisis amplitudo memperlihatkan hubungan positif antara ukuran retakan dengan intensitas sinyal yang ditangkap. Selain itu, variasi pola gelombang berdasarkan posisi retakan memberikan informasi tambahan mengenai lokasi kerusakan, yang tidak dapat diperoleh melalui metode inspeksi visual konvensional.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa metode deteksi non-destruktif berbasis sensor akustik, terutama sensor serat optik, memiliki sensitivitas tinggi, keandalan dalam berbagai kondisi lingkungan, serta kemampuan mendeteksi retakan *subsurface*. Temuan ini mendukung pengembangan sistem *Structural Health Monitoring* (SHM) jembatan yang lebih efektif, dengan potensi untuk mengurangi risiko kegagalan struktur melalui deteksi kerusakan sebelum mencapai tahap kritis.

## Saran

Untuk meningkatkan efektivitas deteksi retakan pada struktur jembatan, disarankan agar sistem monitoring berbasis sensor akustik diintegrasikan dengan algoritma analisis real-time. Integrasi ini memungkinkan deteksi anomali dilakukan secara otomatis sehingga hasil pemantauan dapat langsung digunakan oleh pihak pengelola infrastruktur untuk mengambil keputusan cepat. Selain itu, implementasi sensor sebaiknya diperluas pada berbagai titik kritis jembatan, termasuk sambungan dan area dengan beban dinamis tinggi, guna memaksimalkan cakupan deteksi.

Penelitian lanjutan juga perlu difokuskan pada pengujian sistem dalam kondisi lingkungan yang lebih kompleks, seperti getaran lalu lintas padat, perubahan suhu ekstrem, maupun paparan kelembaban tinggi. Hal ini penting untuk memastikan keandalan sensor akustik dalam aplikasi nyata yang bervariasi. Selain itu, pengembangan metode hibrida yang menggabungkan sensor akustik dengan teknologi non-destruktif lainnya, seperti citra inframerah atau pemodelan numerik, berpotensi meningkatkan akurasi identifikasi retakan sekaligus memberikan gambaran lebih komprehensif mengenai kondisi kesehatan struktur jembatan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bas, S., & Catbas, N. (2021). Bridge failures and mitigation using monitoring technologies. In *Springer tracts on transportation and traffic* (Vol. 17, pp. 43–52). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59169-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59169-4_3)
- Golub, M. V., & Zhang, C. (2016). Numerical simulation of elastic wave propagation in layered phononic crystals with strip-like cracks: Resonance scattering and wave localization. In *Springer proceedings in physics* (Vol. 175, pp. 431–447). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26324-3\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26324-3_30)
- Ha, M., Kim, J. H., & Kim, S. (2023). Crack detection in upsetting of aluminum alloy using acoustic emission monitoring technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(7–8), 2823–2834. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10628-y>
- Hamdan, E., Zhu, X., Ozevin, D., Chen, P.-Y., & Cetin, A. E. (2024). Effect of data compression on crack location prediction using acoustic emission sensor arrays. *Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 2024)*, 807. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEAA61917.2024.10701877>
- Hussain, A., & Jan, S. (2016). Bridges failures in extreme flood events by taking a case study. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(5), 222–231.

- Jancula, M., Jošt, J., & Gocál, J. (2021). Influence of aggressive environmental actions on bridge structures. *Transportation Research Procedia*, 55, 1229–1235. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.104>
- Jancula, M., Vican, J., & Spiewak, A. (2019). Experimental research of corrosion effects on steel bridges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 661(1), 012138. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/661/1/012138>
- Khalid, K., Ishak, R., & Chowdhury, Z. Z. (2023). UV-Vis spectroscopy in non-destructive testing. In *Non-destructive material characterization methods* (pp. 391–416). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91150-4.00021-5>
- Kour, P., Tangri, A., & Tiwary, A. K. (2023). A review on analysis of damage diagnosis and the vibration characteristics of steel bridge structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012011>
- Li, T., Zhang, J., Al-Hadad, M., Han, X., Xu, D., Tan, Y., & Zhou, Z. (2024). Recent progress in fiber-optic acoustic sensor and its applications: A review. *IEEE Sensors Journal*, 24(16), 25249–25260. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3422186>
- Malek, K., Mohammadkhorasani, A., & Moreu, F. (2023). Methodology to integrate augmented reality and pattern recognition for crack detection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 38(8), 1000–1019. <https://doi.org/10.1111/mice.12932>
- Namlı, E., & Öztürk, T. (2023). Lessons learned from past earthquakes for horizontally curved bridges. In *Lecture notes in civil engineering* (Vol. 350, pp. 1714–1723). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3\\_176](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_176)
- Pramod Kumar Reddy, Y., & Sen, S. (2023). Temperature robust health bench-marking and monitoring of an heritage suspension bridge using coupled IWCM and TBSI method. In *Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 363–370). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5347-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5347-7_30)
- Pregolato, M., Gavriel, G., & Lopane, F. D. (2021). A risk-based taxonomy for bridges at risk of flooding. In *Bridge maintenance, safety, management, life-cycle sustainability and innovations—Proceedings of the 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2020* (pp. 3282–3285). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429279119-445>
- Qi, Y., Ding, Z., Luo, Y., & Ma, Z. (2024). A three-step computer vision-based framework for concrete crack detection and dimensions identification. *Buildings*, 14(8), 2360. <https://doi.org/10.3390/buildings14082360>
- Rathore, A., & Garg, R. K. (2022). Assessing resilience of transportation networks under multi-hazards: A review. In *Lecture notes in civil engineering* (Vol. 183, pp. 29–43). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5543-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5543-2_3)
- Rotaru, A. (2023). Measurements of bridge structures using non-destructive testing methods and their stability in wind gusts. *Reliability: Theory and Applications*, 18(4), 1056–1066. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-476-1056-1066>

- Singh, S., & Thakur, S. (2024). Acoustic wave propagation at boundaries: Reflection, absorption, and transmission. In *Handbook of vibroacoustics, noise and harshness* (pp. 61–78). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-8100-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-97-8100-3_6)
- Stulov, A., & Erofeev, V. I. (2016). Frequency-dependent attenuation and phase velocity dispersion of an acoustic wave propagating in the media with damages. In *Advanced structured materials* (Vol. 42, pp. 413–423). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-31721-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31721-2_19)
- Tai, J. L., Sultan, M. T. H., Łukaszewicz, A., Siemiątkowski, Z., Skorulski, G., & Shahar, F. S. (2025). Preventing catastrophic failures: A review of applying acoustic emission testing in multi-bolted flanges. *Metals*, 15(4), 438. <https://doi.org/10.3390/met15040438>
- Vesala, G. T., Ghali, V. S., Lakshmi, A. V., Suresh, B., & Naik, R. B. (2022). Proximity: An automatic approach for defect detection and depth estimation in infrared non-destructive testing. In *Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 83–94). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-9093-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-16-9093-8_8)
- Willberry, J. O., & Papaalias, M. (2020). Structural health monitoring using fibre optic acoustic emission sensors. *Sensors*, 20(21), 6369. <https://doi.org/10.3390/s20216369>
- Zhong, J., & Zhang, W. (2018). Application of transmission wave method and acoustic wave CT in pile foundation detection. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 34(2), 310–322. <https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2018.02.14>
- Zhou, S., & Song, W. (2020). Robust image-based surface crack detection using range data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34(2), 04019054. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000873](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000873)
- Zoubir, H., Rguig, M., Chehri, A., El Aroussi, M., & Saadane, R. (2024). Leveraging public safety and enhancing crack detection in concrete bridges using deep convolutional neural networks. In *Proceedings – 2024 IEEE World Forum on Public Safety Technology (WFPST 2024)* (pp. 37–41). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WFPST58552.2024.00029>