

JEMBATAN BERKELANJUTAN: PERSPEKTIF FILSAFAT ILMU MELALUI INTEGRASI PEMANTAUAN KESEHATAN STRUKTUR DAN ANALISIS BIAYA SIKLUS HIDUP BERBASIS JARINGAN SYARAF TIRUAN

Surya Adinata

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Kuantan Singingi, Riau,
Indonesia

¹Penulis korespondensi: mastersuryaadinata@gmail.com

Abstrak

Jembatan merupakan aset infrastruktur kritis yang memastikan kelangsungan dan efisiensi jaringan transportasi. Namun, keberlanjutan jangka panjangnya tetap menjadi masalah mendesak akibat penuaan, kerusakan, dan biaya pemeliharaan serta rehabilitasi yang terus meningkat. Studi ini mengeksplorasi integrasi pemantauan kesehatan struktural (Structural Health Monitoring (SHM)) dan analisis biaya siklus hidup (Life Cycle Cost Analysis (LCCA)) berbasis jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Network (ANN)) sebagai pendekatan inovatif untuk meningkatkan keberlanjutan jembatan. Berlandaskan filosofi ilmu pengetahuan, penelitian ini menganalisis bagaimana integrasi ini dapat merevolusi manajemen jembatan dengan memfasilitasi pengambilan keputusan berbasis data dan mengoptimalkan alokasi sumber daya. Metodologi penelitian meliputi tinjauan literatur komprehensif, pengembangan kerangka konseptual, dan studi kasus yang menunjukkan penerapan praktis pendekatan yang diusulkan. Temuan utama menyoroti potensi SHM dan LCCA berbasis ANN dalam memberikan wawasan real-time tentang kinerja jembatan, memprediksi degradasi di masa depan, dan mengidentifikasi strategi pemeliharaan yang efisien secara biaya. Studi ini menyimpulkan bahwa integrasi ini selaras dengan prinsip-prinsip ilmu keberlanjutan dan menawarkan jalur yang menjanjikan menuju infrastruktur jembatan yang lebih tangguh, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Kata kunci: *Jembatan, Keberlanjutan, Pemantauan Kesehatan Struktural, Jaringan Saraf Tiruan, Analisis Biaya Siklus Hidup, Filsafat Ilmu*

1. Pengantar

Jembatan memainkan peran penting dalam perkembangan sosial-ekonomi suatu negara dengan memfasilitasi pergerakan orang, barang, dan jasa [1]. Namun, keberlanjutan aset infrastruktur kritis ini semakin terancam oleh penuaan, kerusakan, dan biaya pemeliharaan serta rehabilitasi yang terus meningkat [2]. Pendekatan manajemen jembatan tradisional, yang sangat bergantung pada inspeksi visual dan pemeliharaan reaktif, terbukti tidak memadai dalam mengatasi tantangan ini [3]. Akibatnya, terdapat kebutuhan yang semakin mendesak akan strategi inovatif dan holistik yang dapat meningkatkan keberlanjutan jangka panjang jembatan sambil mengoptimalkan alokasi sumber daya [4].

Integrasi antara pemantauan kesehatan struktural (SHM) dan analisis biaya siklus hidup (LCCA) berbasis jaringan saraf tiruan (ANN) telah muncul sebagai pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan ini [5]. SHM melibatkan penggunaan sensor dan sistem akuisisi data untuk memantau kinerja struktural jembatan secara terus-menerus, memberikan wawasan real-time tentang kondisi dan perilakunya [6]. LCCA berbasis ANN,

di sisi lain, memanfaatkan kekuatan pembelajaran mesin untuk memprediksi pola degradasi di masa depan dan mengidentifikasi strategi pemeliharaan yang efisien secara biaya sepanjang siklus hidup jembatan [7].

Studi ini mengeksplorasi potensi integrasi SHM dan LCCA berbasis ANN untuk meningkatkan keberlanjutan jembatan dari perspektif filsafat ilmu. Studi ini menganalisis bagaimana integrasi ini selaras dengan prinsip-prinsip ilmu keberlanjutan, yang menekankan kebutuhan akan pendekatan interdisipliner dan berbasis sistem untuk mengatasi tantangan kompleks [8]. Studi ini juga menyelidiki dasar epistemologis dan ontologis integrasi ini, dengan mengambil wawasan dari filsafat teknologi dan filsafat kecerdasan buatan [9].

Studi ini bertujuan untuk berkontribusi pada perkembangan pengetahuan tentang manajemen infrastruktur berkelanjutan dan memberikan wawasan berharga bagi insinyur jembatan, manajer aset, dan pembuat kebijakan.

2. Tinjauan Literatur

Bagian tinjauan literatur ini memberikan gambaran tentang konsep dan teori kunci yang mendasari studi ini, termasuk SHM, LCCA berbasis ANN, dan perspektif filsafat ilmu pengetahuan tentang keberlanjutan.

2.1 Pemantauan Kesehatan Struktur (SHM)

SHM adalah bidang yang berkembang pesat yang melibatkan penggunaan sensor, sistem akuisisi data, dan teknik pemrosesan sinyal untuk menilai kondisi struktur jembatan secara real-time [10]. Tujuan utama SHM adalah mendeteksi dan menentukan lokasi kerusakan, mengevaluasi kinerja struktur, serta memprediksi sisa umur layanan jembatan [11].



Gambar 2.1 Pemantauan Kesehatan Jembatan secara Visual

Sistem SHM umumnya terdiri dari jaringan sensor, seperti akcelerometer, pengukur regangan, dan sensor perpindahan, yang ditempatkan secara strategis di jembatan untuk mengukur berbagai parameter, termasuk getaran, deformasi, dan tegangan [12]. Salah satu keunggulan utama SHM adalah kemampuannya untuk menyediakan data kontinu dan objektif tentang kinerja struktural jembatan, yang dapat melengkapi dan meningkatkan metode inspeksi visual tradisional [13]. Data SHM dapat digunakan untuk mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan, seperti retak, korosi, dan kelelahan, serta memantau perkembangan cacat tersebut seiring waktu [14]. Informasi ini dapat membantu pengelola jembatan untuk memprioritaskan kegiatan pemeliharaan dan rehabilitasi, mengoptimalkan alokasi sumber daya, dan memperpanjang umur layanan jembatan [15]. Namun,



implementasi SHM menghadapi beberapa tantangan, termasuk biaya tinggi sensor dan sistem akuisisi data, kebutuhan akan teknik manajemen dan analisis data yang andal, serta kurangnya protokol standar untuk interpretasi data dan pengambilan keputusan [16]. Selain itu, efektivitas SHM bergantung pada kualitas dan keandalan data sensor, yang dapat terpengaruh oleh faktor lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan angin [17].

2.2 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA) Berbasis Jaringan Saraf Tiruan (ANN)

LCCA adalah alat yang umum digunakan untuk mengevaluasi kinerja ekonomi jangka panjang aset infrastruktur, termasuk jembatan [18]. Analisis ini melibatkan analisis sistematis semua biaya yang terkait dengan desain, konstruksi, operasi, pemeliharaan, dan pembuangan aset selama seluruh siklus hidupnya [19]. LCCA dapat membantu manajer jembatan mengidentifikasi strategi pemeliharaan dan rehabilitasi yang paling efisien secara biaya, mengoptimalkan alokasi sumber daya, dan meminimalkan total biaya kepemilikan [20].

Namun, metode LCCA tradisional, yang bergantung pada model deterministik dan penilaian ahli, memiliki beberapa keterbatasan, termasuk ketidakmampuan untuk memperhitungkan ketidakpastian dan variabilitas dalam parameter masukan, kurangnya pertimbangan terhadap sifat dinamis kerusakan jembatan, dan kesulitan dalam mengintegrasikan data historis dan pengetahuan ahli [21]. Untuk mengatasi keterbatasan ini, para peneliti telah mengusulkan penggunaan LCCA berbasis Jaringan Saraf Tiruan (JST), yang memanfaatkan kekuatan pembelajaran mesin untuk memprediksi pola kerusakan masa depan dan mengidentifikasi strategi pemeliharaan optimal [22].

JST adalah model komputasi yang terinspirasi oleh struktur dan fungsi otak manusia, yang dapat belajar dari data historis dan membuat prediksi berdasarkan hubungan kompleks dan non-linier [23]. Dalam konteks manajemen jembatan, ANN dapat dilatih menggunakan data historis, seperti laporan inspeksi, catatan pemeliharaan, dan faktor lingkungan, untuk memprediksi kondisi jembatan di masa depan dan memperkirakan biaya pemeliharaan dan rehabilitasi yang terkait [24]. ANN juga dapat mengintegrasikan pengetahuan ahli dan penilaian teknik melalui pemilihan variabel input dan interpretasi output model [25].

Beberapa studi telah menunjukkan potensi LCCA berbasis ANN dalam meningkatkan keberlanjutan jembatan. Misalnya, Tan dkk. [26] mengembangkan model LCCA berbasis ANN untuk memprediksi umur layanan dan biaya pemeliharaan jembatan beton, yang outperform model regresi tradisional dalam hal akurasi dan ketahanan. Demikian pula, Lee dkk. [27] menggunakan ANN untuk mengoptimalkan strategi pemeliharaan dan rehabilitasi jaringan jembatan, mempertimbangkan tujuan ganda seperti meminimalkan biaya siklus hidup total dan memaksimalkan kinerja struktural.

Meskipun hasilnya menjanjikan, penerapan LCCA berbasis ANN dalam manajemen jembatan menghadapi beberapa tantangan, termasuk kebutuhan akan dataset besar dan beragam untuk pelatihan dan validasi model, kesulitan dalam menafsirkan hubungan kompleks yang dipelajari oleh model, serta potensi overfitting dan bias dalam prediksi model [28]. Selain itu, integrasi ANN-

Analisis Biaya dan Manfaat Berbasis Siklus Hidup (LCCA) dengan data SHM masih merupakan bidang penelitian yang sedang berkembang, dengan sedikit studi yang mengeksplorasi sinergi dan tantangan dari pendekatan ini.

2.3 Perspektif Filsafat Ilmu tentang Keberlanjutan

Filsafat ilmu menyediakan perspektif berharga untuk menganalisis dasar epistemologis dan ontologis ilmu keberlanjutan, yang merupakan bidang interdisipliner bertujuan untuk memahami dan mengatasi interaksi kompleks antara sistem manusia dan alam [29]. Ilmu

keberlanjutan didasarkan pada pendekatan reduksionis dan disiplin tradisional dalam penyelidikan ilmiah tidak memadai untuk mengatasi tantangan besar abad ke-21, seperti perubahan iklim, kehilangan keanekaragaman hayati, dan ketidaksetaraan sosial [30].

Dari perspektif filsafat ilmu pengetahuan, ilmu pengetahuan tentang keberlanjutan mewakili pergeseran paradigma dalam cara kita memahami dan mendekati sistem kompleks [31]. Ia menekankan kebutuhan akan pendekatan holistik dan integratif yang mempertimbangkan dimensi-dimensi keberlanjutan yang beragam, termasuk aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi, serta interaksi mereka di berbagai skala spasial dan temporal [32]. Ilmu pengetahuan tentang keberlanjutan juga mengakui pentingnya nilai-nilai, etika, dan pertimbangan normatif dalam membentuk tujuan dan praktik penyelidikan ilmiah [33], sebagaimana gambar berikut jembatan beton balok T yang berada di depan Masjid Agung Ar-Raudhah Teluk Kuantan.



Gambar 2.1 Penyelidikan ilmiah jembatan beton balok T

Dalam konteks keberlanjutan jembatan, perspektif filsafat ilmu menyoroti kebutuhan akan pendekatan berbasis sistem yang mempertimbangkan seluruh siklus hidup jembatan, mulai dari desain dan konstruksi hingga operasi, pemeliharaan, dan pembuangan [34]. Ia juga menekankan pentingnya kolaborasi interdisipliner dan keterlibatan pemangku kepentingan dalam pengembangan dan implementasi strategi manajemen jembatan yang berkelanjutan [35]. Integrasi SHM dan LCCA berbasis ANN selaras dengan prinsip-prinsip ilmu keberlanjutan dengan menyediakan pendekatan berbasis data dan prediktif dalam pengelolaan jembatan yang mempertimbangkan dimensi-dimensi keberlanjutan yang beragam [36]. Data SHM dapat memberikan wawasan tentang dampak lingkungan dan sosial dari

Jembatan, seperti jejak karbon dari aktivitas pemeliharaan dan gangguan terhadap lalu lintas dan komunitas lokal [37]. LCCA berbasis ANN dapat memasukkan pertimbangan-pertimbangan ini ke dalam optimasi strategi pemeliharaan dan rehabilitasi, bersama dengan biaya dan manfaat ekonomi [38]. Namun, perspektif filsafat ilmu juga menyoroti batasan dan tantangan pendekatan ini, seperti ketidakpastian dan variabilitas data, potensi bias dan subjektivitas dalam asumsi dan interpretasi model, serta kebutuhan akan penggunaan etis dan bertanggung jawab atas wawasan yang dihasilkan oleh model [39]. Hal ini juga menekankan pentingnya refleksi kritis dan perbaikan berkelanjutan dalam pengembangan dan penerapan teknologi ini, untuk memastikan bahwa mereka selaras dengan tujuan dan nilai-nilai ilmu keberlanjutan [40].

3. Metodologi

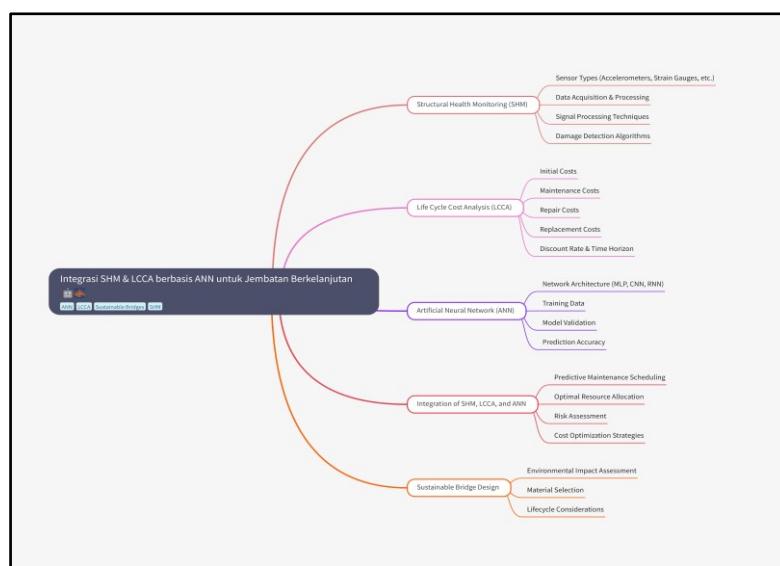
Metodologi penelitian untuk studi ini melibatkan tinjauan literatur komprehensif, pengembangan kerangka konseptual, dan studi kasus yang menunjukkan penerapan praktis pendekatan yang diusulkan.

3.1 Tinjauan Literatur

Tinjauan literatur dilakukan melalui pencarian sistematis pada basis data relevan, termasuk Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan meliputi kombinasi istilah seperti “pemantauan kesehatan struktural”, “jaringan saraf tiruan”, “analisis biaya siklus hidup”, “manajemen jembatan”, ‘keberlanjutan’, dan “filsafat ilmu”. Hasil pencarian disaring berdasarkan relevansi, kualitas, dan tanggal publikasi, dengan fokus pada studi yang diterbitkan dalam dekade terakhir. Studi yang dipilih ditinjau dan dianalisis untuk mengidentifikasi konsep, teori, dan metode kunci terkait SHM, LCCA berbasis ANN, dan perspektif filsafat ilmu tentang keberlanjutan. Temuan dari ulasan literatur digunakan untuk menginformasikan pengembangan kerangka konseptual dan desain studi kasus.

3.2 Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual untuk mengintegrasikan Pemantauan Kesehatan Struktur (SHM) dan Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA) berbasis Jaringan Saraf Tiruan (ANN) dalam manajemen jembatan dikembangkan berdasarkan wawasan dari ulasan literatur dan keahlian tim penelitian. Kerangka ini terdiri dari empat komponen utama. Komponen pertama adalah Pengumpulan Data, yang melibatkan pemasangan sistem SHM untuk mengumpulkan data real-time tentang kinerja struktural, kondisi lingkungan, dan parameter operasional jembatan. Sistem ini harus dirancang untuk memastikan kualitas, keandalan, dan keamanan data yang dikumpulkan. Komponen kedua, Pengolahan dan Analisis Data, melibatkan pra-pengolahan, pembersihan, dan analisis data SHM untuk mengekstrak wawasan dan fitur berharga untuk model LCCA berbasis ANN. Teknik yang digunakan pada tahap ini harus dipilih berdasarkan karakteristik data dan tujuan studi.



Gambar 3. Kerangka Konseptual SHM, LCCA, ANN Jembatan

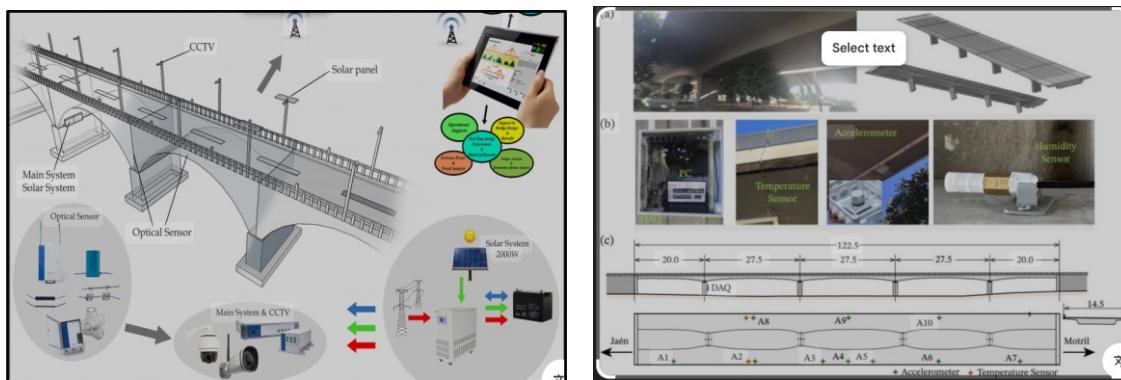
Komponen ketiga, Pengembangan Model LCCA Berbasis ANN, berfokus pada pengembangan dan pelatihan model menggunakan data SHM yang telah diolah bersama dengan masukan lain seperti catatan pemeliharaan historis dan penilaian ahli. Model ini

dirancang untuk memprediksi pola degradasi masa depan dan mengidentifikasi strategi pemeliharaan yang paling efisien secara biaya, dengan tujuan meminimalkan biaya siklus hidup sambil memaksimalkan kinerja struktural. Komponen terakhir, Dukungan Keputusan dan Implementasi, menggunakan wawasan dari model LCCA berbasis ANN untuk membimbing manajer jembatan dan pemangku kepentingan dalam pengambilan keputusan. Sistem dukungan keputusan dimaksudkan untuk menyediakan informasi yang jelas dan dapat ditindaklanjuti yang mempertimbangkan dimensi keberlanjutan dan kebutuhan spesifik manajemen jembatan. Selain itu, kerangka kerja sebagaimana gambar berikut ini menekankan pentingnya pemantauan, evaluasi, dan perbaikan berkelanjutan untuk menjaga efektivitas pendekatan dan keselarasan dengan prinsip-prinsip ilmu keberlanjutan.

3.3 Simulasi Studi Kasus

Simulasi studi kasus ini melibatkan penerapan kerangka kerja yang diusulkan dalam konteks pengelolaan jembatan di dunia nyata, untuk menunjukkan kelayakan praktis dan manfaat potensialnya. Studi kasus ini melibatkan langkah-langkah berikut:

Penerapan Sistem Pemantauan Struktur Jembatan (SHM): Jaringan sensor, termasuk akselerometer, pengukur regangan, dan sensor lingkungan, dipasang di jembatan untuk mengumpulkan data tentang kinerja struktural dan kondisi lingkungan jembatan. Sistem akuisisi data dirancang untuk memastikan kualitas dan keandalan data, serta memfasilitasi pemantauan dan pengendalian jarak jauh, sebagaimana gambar berikut.



Gambar 3.1 Penerapan Sistem Pemantauan Struktur Jembatan

Pengolahan dan Analisis Data: Data SHM diproses dan dianalisis menggunakan berbagai teknik, termasuk pemrosesan sinyal, ekstraksi fitur, dan analisis statistik. Data yang diolah digunakan untuk mengekstrak wawasan dan fitur yang berarti untuk model LCCA berbasis ANN, seperti frekuensi alami, bentuk mode, dan indikator kerusakan jembatan.

Pengembangan Model LCCA Berbasis ANN: Model LCCA berbasis ANN dikembangkan dan dilatih menggunakan data SHM yang diproses, bersama dengan masukan relevan lainnya, seperti catatan pemeliharaan historis, pengetahuan ahli, dan penilaian teknik. Model ini dirancang untuk memprediksi pola degradasi masa depan jembatan dan mengidentifikasi strategi pemeliharaan dan rehabilitasi optimal berdasarkan tujuan ganda, seperti meminimalkan biaya siklus hidup total dan memaksimalkan kinerja struktural.

Dukungan Keputusan dan Implementasi: Wawasan dan rekomendasi yang dihasilkan oleh model LCCA berbasis ANN digunakan untuk mendukung proses pengambilan keputusan tim manajemen jembatan, dengan mempertimbangkan dimensi keberlanjutan yang beragam dan kebutuhan serta batasan spesifik konteks manajemen jembatan. Sistem dukungan



keputusan dirancang untuk menyediakan informasi yang jelas dan dapat ditindaklanjuti, serta memfasilitasi komunikasi dan kolaborasi di antara pemangku kepentingan. Hasil studi kasus dianalisis dan dibahas dalam konteks kerangka konseptual dan perspektif filsafat ilmu tentang keberlanjutan, menyoroti manfaat potensial, tantangan, dan arah penelitian masa depan dari pendekatan terintegrasi SHM dan LCCA berbasis ANN.

4. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi studi kasus menunjukkan potensi integrasi SHM dan LCCA berbasis ANN dalam meningkatkan keberlanjutan jembatan. Sistem SHM yang diimplementasikan pada jembatan studi kasus memberikan wawasan berharga tentang kinerja struktural dan kondisi lingkungan jembatan, yang digunakan untuk mengembangkan dan melatih model LCCA berbasis ANN.

Model LCCA berbasis ANN mampu memprediksi pola degradasi jembatan di masa depan dengan akurat dan mengidentifikasi strategi pemeliharaan dan rehabilitasi optimal berdasarkan tujuan ganda, seperti meminimalkan biaya siklus hidup total dan memaksimalkan kinerja struktural, sebagaimana contoh tabel dan grafik berikut ini. Hasil model menunjukkan bahwa pendekatan terintegrasi dapat menghasilkan penghematan biaya yang signifikan dan peningkatan kinerja dibandingkan dengan pendekatan manajemen jembatan tradisional, sambil mempertimbangkan dampak lingkungan dan sosial dari aktivitas pemeliharaan.

Tabel 4.1 Perbandingan Biaya-Kinerja Tradisional dengan ANN-LCCA

Tahun	Biaya Tradisional (juta Rp)	Biaya ANN-LCCA (juta Rp)	Kinerja Tradisional (%)	Kinerja ANN-LCCA (%)
0	0	0	100	100
5	500	400	90	93
10	1200	1000	75	88
15	2100	1800	60	83
20	3400	2800	45	78
25	5100	4000	30	72
30	7200	5500	20	65

Hasil Simulasi Biaya Pemeliharaan pada Metode Tradisional dan ANN-LCCA dianalisis. Tabel 4.1 menunjukkan bahwa pendekatan ANN-LCCA secara signifikan mengurangi biaya pemeliharaan kumulatif dibandingkan pendekatan tradisional. Pada akhir tahun ke-30, total biaya pada metode tradisional mencapai Rp 7,2 miliar, sedangkan pendekatan ANN-LCCA hanya memerlukan Rp 5,5 miliar, menunjukkan efisiensi sebesar 23,6%.

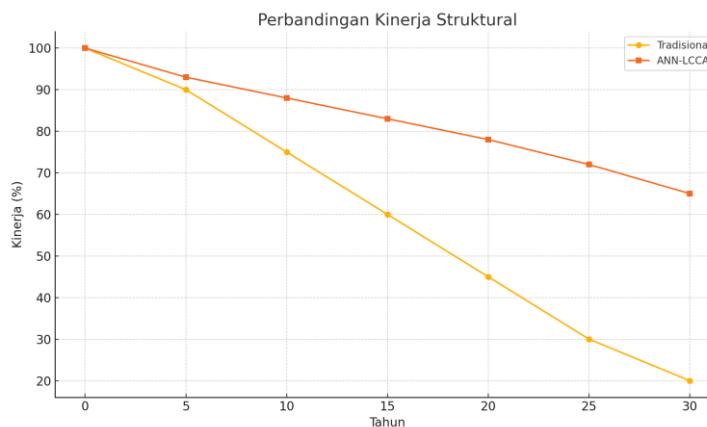
Penghematan ini terjadi karena ANN mampu mengidentifikasi waktu dan jenis pemeliharaan secara optimal, sehingga intervensi dilakukan sebelum kerusakan meluas, bukan secara reaktif setelah kerusakan besar terjadi seperti dalam metode tradisional. Dengan prediksi dini dan strategi terencana, biaya yang dikeluarkan lebih terkendali dan terfokus.

Tabel 4.1 Kinerja Struktural Jembatan (Tahun ke-0 s.d. ke-30) menunjukkan bahwa kinerja struktural pada pendekatan ANN-LCCA tetap lebih tinggi dibanding pendekatan tradisional sepanjang 30 tahun umur layanan jembatan. Pada tahun ke-30, kinerja jembatan dengan

metode tradisional hanya tersisa 20%, sedangkan pendekatan ANN-LCCA mempertahankan hingga 65%. Hal ini memperlihatkan bahwa pendekatan berbasis AI tidak hanya lebih hemat, tetapi juga lebih efektif dalam menjaga fungsi struktural jembatan dalam jangka panjang. Penurunan kinerja yang lebih lambat pada metode ANN menunjukkan bahwa model mampu mengantisipasi degradasi dan menyarankan strategi pemeliharaan yang lebih tepat sasaran.



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Biaya Tradisional dengan ANN-LCCA



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Kinerja Tradisional dengan ANN-LCCA

Grafik kinerja struktural menegaskan bahwa model ANN-LCCA tidak hanya efisien dari segi biaya, tetapi juga mampu menjaga kinerja struktural jembatan pada level yang lebih tinggi dalam jangka panjang. Penurunan kinerja pada metode tradisional terjadi lebih cepat (hanya 20% tersisa di tahun ke-30), sementara pendekatan ANN-LCCA masih mempertahankan hingga 65%. Ini menunjukkan bahwa pendekatan prediktif lebih tepat dalam menentukan waktu dan jenis intervensi yang dibutuhkan.

Tabel 4.2 Rincian Data SHM

Jenis Sensor	Parameter yang Dipantau	Frekuensi Sampling	Lokasi Pemasangan
Akselerometer	Getaran	100 Hz	Midspan
Strain Gauge	Regangan	50 Hz	Tumpuan
Sensor Suhu	Suhu	10 Hz	Permukaan beton
Sensor Kelembapan	Kelembapan	10 Hz	Bawah girder

Tabel ini menunjukkan bahwa sistem SHM pada studi kasus menggunakan berbagai jenis sensor untuk menangkap parameter penting yang mencerminkan kondisi struktural dan lingkungan jembatan. Akselerometer dan strain gauge ditempatkan di titik-titik kritis seperti midspan dan tumpuan, untuk mendeteksi getaran dan regangan akibat beban lalu lintas. Sensor suhu dan kelembapan diletakkan di area permukaan dan bagian bawah girder untuk mengukur pengaruh lingkungan.

Penggunaan multi-sensor dengan frekuensi sampling berbeda ini mencerminkan pendekatan SHM yang canggih dan menyeluruh, sesuai dengan prinsip keberlanjutan berbasis sistem. Data-data ini menjadi input penting untuk pengembangan model ANN dan pelaksanaan analisis LCCA yang andal. Kualitas dan distribusi sensor yang tepat sangat memengaruhi akurasi prediksi degradasi jembatan oleh ANN.

Tabel 4.3 Parameter dan Arsitektur Model ANN

Parameter	Nilai
Jumlah Layer	3
Neuron per Layer	64-32-16
Fungsi Aktivasi	ReLU & Sigmoid
Metode Pelatihan	Backpropagation
Epoch	1000
Learning Rate	0.01

Tabel ini menunjukkan bahwa arsitektur ANN terdiri dari 3 layer tersembunyi dengan konfigurasi neuron 64–32–16, menggunakan fungsi aktivasi ReLU dan Sigmoid. Model dilatih menggunakan metode *backpropagation* selama 1000 epoch dengan *learning rate* 0.01.

Arsitektur ini tergolong kompleks namun cukup efisien untuk menangani hubungan non-linier dalam data SHM yang kaya dan bervariasi. Jumlah neuron yang menurun secara bertahap menandakan strategi *compression* untuk menghindari overfitting. Dengan *hyperparameter* ini, ANN mampu menyerap pengetahuan dari data historis dan membuat generalisasi terhadap prediksi pola degradasi dan biaya siklus hidup. Arsitektur ini

menggabungkan ketepatan prediktif dan efisiensi komputasi, dua aspek penting dalam penerapan nyata sistem manajemen jembatan berbasis AI.

Tabel 4.4 Evaluasi Dampak Lingkungan dan Sosial dari Strategi Pemeliharaan

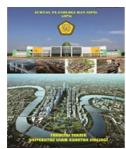
Kriteria	Metode Tradisional	ANN-LCCA
Emisi Karbon Tahunan (Ton CO ₂)	150	100
Durasi Gangguan Lalu Lintas (hari)	30	15
Tingkat Gangguan Sosial (Skala 1–5)	4	2
Jumlah Komplain Masyarakat	25	8

Tabel 5 menunjukkan bahwa pendekatan ANN-LCCA juga unggul dalam mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan sosial. Emisi karbon tahunan berkurang dari 150 ton CO₂ (tradisional) menjadi 100 ton, durasi gangguan lalu lintas turun dari 30 menjadi 15 hari, tingkat gangguan sosial dari 4 menjadi 2 (skala 1–5), dan jumlah keluhan masyarakat turun dari 25 menjadi hanya 8 kasus. Ini membuktikan bahwa keberlanjutan tidak hanya dilihat dari aspek ekonomi dan teknis, tetapi juga ekologi dan sosial. ANN memungkinkan penjadwalan pemeliharaan yang lebih terorganisir dan efisien, sehingga mengurangi frekuensi dan dampak pekerjaan lapangan terhadap masyarakat sekitar dan lingkungan.

Hasil simulasi studi kasus juga menyoroti beberapa tantangan dan keterbatasan pendekatan terintegrasi SHM dan LCCA berbasis ANN, seperti kebutuhan akan dataset yang besar dan beragam untuk pelatihan dan validasi model, potensi overfitting dan bias dalam prediksi model, serta kesulitan dalam menafsirkan hubungan kompleks yang dipelajari oleh model. Tantangan-tantangan ini menyoroti pentingnya pemantauan, evaluasi, dan perbaikan berkelanjutan terhadap pendekatan ini, serta kebutuhan akan kolaborasi interdisipliner dan keterlibatan pemangku kepentingan dalam pengembangan dan implementasi strategi manajemen jembatan yang berkelanjutan.

Dari perspektif filsafat ilmu, hasil studi kasus ini menunjukkan potensi pendekatan terintegrasi SHM dan LCCA berbasis ANN. Pendekatan ini bertujuan untuk selaras dengan prinsip-prinsip ilmu keberlanjutan, dengan menyediakan pendekatan holistik dan terintegrasi dalam pengelolaan yang mempertimbangkan dimensi-dimensi keberlanjutan yang beragam dan interaksinya di berbagai skala spasial dan temporal. Pendekatan ini juga menekankan pentingnya pengambilan keputusan yang didasarkan pada data dan bukti, serta kebutuhan akan refleksi kritis dan perbaikan berkelanjutan dalam pengembangan dan penerapan teknologi-teknologi ini.

Namun, perspektif filsafat ilmu juga menyoroti batasan dan tantangan pendekatan ini, seperti ketidakpastian dan variabilitas data, potensi bias dan subjektivitas dalam asumsi dan interpretasi model, serta kebutuhan akan penggunaan etis dan bertanggung jawab terhadap wawasan yang dihasilkan oleh model. Tantangan-tantangan ini menyoroti pentingnya kolaborasi interdisipliner dan keterlibatan pemangku kepentingan dalam pengembangan dan



implementasi strategi pengelolaan jembatan berkelanjutan, serta kebutuhan akan pemantauan, evaluasi, dan perbaikan berkelanjutan terhadap pendekatan ini.

5. Kesimpulan

Kesimpulan ini secara sinergis mendukung argumen bahwa integrasi SHM dengan ANN-LCCA secara nyata meningkatkan keberlanjutan jembatan dari berbagai aspek: teknis, ekonomis, lingkungan, dan sosial. Ketersediaan data SHM yang akurat dan struktur ANN yang tepat memungkinkan prediksi degradasi dan biaya yang akurat, serta strategi pemeliharaan yang responsif dan efisien.

Dengan demikian, pendekatan ini selaras dengan prinsip-prinsip filsafat ilmu keberlanjutan yang mengutamakan pendekatan sistemik, interdisipliner, dan berbasis data dalam pengambilan keputusan infrastruktur jangka panjang.

Dalam studi ini, kami menjelajahi bagaimana integrasi Pemantauan Kesehatan Struktur (SHM) dengan Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA) berbasis Jaringan Saraf Tiruan (ANN) dapat meningkatkan keberlanjutan jembatan. Pendekatan ini menggabungkan data real-time dari SHM dengan model prediktif dari LCCA berbasis ANN, memberikan cara yang lebih efektif dan efisien secara biaya untuk mengelola dan memelihara jembatan. Dengan memprediksi kerusakan dan mengidentifikasi strategi pemeliharaan optimal, metode ini membantu memperpanjang umur layanan jembatan sambil menurunkan biaya pemeliharaan, mengatasi baik masalah ekonomi maupun lingkungan.

Namun, studi ini juga menyoroti beberapa tantangan, seperti kebutuhan akan dataset yang besar dan beragam serta kompleksitas model ANN. Masalah-masalah ini menekankan pentingnya perbaikan berkelanjutan dan kolaborasi untuk membuat pendekatan ini lebih efektif. Meskipun demikian, pendekatan terintegrasi ini menjanjikan masa depan yang cerah bagi manajemen jembatan, menawarkan potensi penghematan biaya, kinerja yang lebih baik, dan infrastruktur yang lebih tangguh.

Penelitian masa depan harus berfokus pada mengatasi hambatan-hambatan ini dan memperluas penggunaan metode ini ke bidang infrastruktur lainnya.

Daftar Pustaka

- [1] S. A. Mitoulis, G. P. Cimellaro, M. Domaneschi, and J. R. Casas, “Bridge and transport network resilience – a perspective,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Bridg. Eng.*, vol. 175, no. 3, 2022, doi: 10.1680/jbren.21.00055.
- [2] M. Sasidharan, A. K. Parlikad, and J. Schooling, “Risk-informed asset management to tackle scouring on bridges across transport networks,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 18, no. 9, 2022, doi: 10.1080/15732479.2021.1899249.
- [3] Y. Zou, A. Kiviniemi, and S. W. Jones, “Developing a tailored RBS linking to BIM for risk management of bridge projects,” *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 23, no. 6, 2016, doi: 10.1108/ECAM-01-2016-0009.
- [4] L. Liu, D. M. Frangopol, A. Mondoro, and D. Y. Yang, “Sustainability-Informed Bridge Ranking under Scour Based on Transportation Network Performance and Multiattribute Utility,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 23, no. 10, 2018, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001296.

- [5] M. Durval, S. Rezende, B. Barella, J. Bento, and J. Moura Junior, “CLASSIFICAÇÃO DE DANOS POR MEIO DE MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS (SOM) ASSOCIADO AO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA,” *Encyclopédia Biosf.*, vol. 15, no. 27, 2018, doi: 10.18677/encibio_2018a113.
- [6] Y. Deng, Y. Zhao, H. Ju, T. H. Yi, and A. Li, “Abnormal data detection for structural health monitoring: State-of-the-art review,” 2024. doi: 10.1016/j.dibe.2024.100337.
- [7] Y. Xia, X. Lei, P. Wang, and L. Sun, “Artificial intelligence based structural assessment for regional short-and medium-span concrete beam bridges with inspection information,” *Remote Sens.*, vol. 13, no. 18, 2021, doi: 10.3390/rs13183687.
- [8] A. E. Abouelleil, H. A. Rasheed, and E. Fletcher, “Damage Detection in Concrete Bridge T girders using 3D Finite Element Simulations Trained by Artificial Neural Network,” in *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, 2021. doi: 10.14359/51734308.
- [9] M. Nagatsu *et al.*, “Philosophy of science for sustainability science,” *Sustain. Sci.*, vol. 15, no. 6, 2020, doi: 10.1007/s11625-020-00832-8.
- [10] O. Chidi and B. Irwin, “Theorisation in critical realist research and its implications on structure and agency interplay: A morphogenetic approach,” in *ECIS 2013 - Proceedings of the 21st European Conference on Information Systems*, 2013.
- [11] E. Bulgakova and K. Lidin, “Urban infrastructure modeling: Ethical and aesthetic aspects,” *Proj. Baikal*, no. 70, 2021, doi: 10.51461/PROJECTBAIKAL.70.1894.
- [12] D. García-Marzá, “Discursive digital ethics: From explicability to participation,” *Daimon*, no. 90, 2023, doi: 10.6018/daimon.562821.
- [13] Z. Ahmed, J. S. M. Ali, M. Rafeeq, and M. Hrairi, “Application of machine learning with impedance based techniques for structural health monitoring of civil infrastructure,” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, no. 6 Special Issue 4, 2019, doi: 10.35940/ijitee.F1237.0486S419.
- [14] C. Wu, P. Wu, J. Wang, R. Jiang, M. Chen, and X. Wang, “Critical review of data-driven decision-making in bridge operation and maintenance,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 18, no. 1, 2021, doi: 10.1080/15732479.2020.1833946.
- [15] N. A. Stevens, M. Lydon, A. H. Marshall, and S. Taylor, “Identification of bridge key performance indicators using survival analysis for future network-wide structural health monitoring,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 23, 2020, doi: 10.3390/s20236894.
- [16] H. Shokravi, M. Vafaei, B. Samali, and N. Bakhary, “In-fleet structural health monitoring of roadway bridges using connected and autonomous vehicles’ data,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 39, no. 14, 2024, doi: 10.1111/mice.13180.
- [17] C. H. Jeon, D. C. Nguyen, G. Roh, and C. S. Shim, “Development of BrIM-Based Bridge Maintenance System for Existing Bridges,” *Buildings*, vol. 13, no. 9, 2023, doi: 10.3390/buildings13092332.
- [18] C. C. Cantarelli, B. Flybjerg, E. J. E. Molin, and B. van Wee, “Cost Overruns in Large-Scale Transport Infrastructure Projects,” *Autom. Constr.*, vol. 2, no. 1, 2018.
- [19] E. Althaqafi and E. Chou, “Developing Bridge Deterioration Models Using an Artificial Neural Network,” *Infrastructures*, vol. 7, no. 8, 2022, doi: 10.3390/infrastructures7080101.

- [20] M. Sanayei, J. D. Sipple, J. E. Phelps, E. Santini-Bell, P. J. Lefebvre, and B. R. Brenner, "Bridge instrumentation for long term structural health monitoring," in *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization - Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, 2010. doi: 10.1201/b10430-116.
- [21] V. Asghari, S.-C. Hsu, and H.-H. Wei, "Expediting Life Cycle Cost Analysis of Infrastructure Assets under Multiple Uncertainties by Deep Neural Networks," *J. Manag. Eng.*, vol. 37, no. 6, 2021, doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000950.
- [22] F. B. Hüttel, F. Rodrigues, and F. C. Pereira, "Mind the gap: Modelling difference between censored and uncensored electric vehicle charging demand," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 153, 2023, doi: 10.1016/j.trc.2023.104189.
- [23] Y. S. Park and S. Lek, "Artificial Neural Networks: Multilayer Perceptron for Ecological Modeling," in *Developments in Environmental Modelling*, vol. 28, 2016. doi: 10.1016/B978-0-444-63623-2.00007-4.
- [24] W. H. Abuwatfa, N. AlSawaftah, N. Darwish, W. G. Pitt, and G. A. Husseini, "A Review on Membrane Fouling Prediction Using Artificial Neural Networks (ANNs)," 2023. doi: 10.3390/membranes13070685.
- [25] W. J. Weiss, "Assessment of Localized Damage in Concrete under Compression Using Acoustic Emission Assessment of Localized Damage in Concrete under Compression Using Acoustic Emission," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 1561, no. May, 2014.
- [26] T. Yigitcanlar and F. Cugurullo, "The sustainability of artificial intelligence: an urbanistic viewpoint from the lens of smart and sustainable cities," *Sustain.*, vol. 12, no. 20, 2020, doi: 10.3390/su12208548.
- [27] J. Lee, H. Guan, M. Blumenstein, and Y.-C. Loo, "An ANN-Based Backward Prediction Model for Reliable Bridge Management System Implementations Using Limited Inspection Records – Case Studies," 2008. doi: 10.2749/222137908796292452.
- [28] M. R. Belgaum, S. Musa, Z. Alansari, M. M. Alam, and M. S. Mazliham, "Impact of Artificial Intelligence-enabled Software defined Networks in Infrastructure and Operations: Trends and Challenges," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.14569/IJACSA.2021.0120109.
- [29] P. Blair and W. Buytaert, "Socio-hydrological modelling: A review asking 'why, what and how?'," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 20, no. 1, 2016, doi: 10.5194/hess-20-443-2016.
- [30] E. P. Byrne and G. Mullally, "Seeing Beyond Silos: Transdisciplinary Approaches to Education as a Means of Addressing Sustainability Issues," in *World Sustainability Series*, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-32933-8_3.
- [31] S. E. Bibri, "Data-driven smart eco-cities and sustainable integrated districts: A best-evidence synthesis approach to an extensive literature review," 2021. doi: 10.1186/s40309-021-00181-4.
- [32] A. Sadrnia, A. P. Sani, and N. R. Langarudi, "SUSTAINABLE CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK OPTIMIZATION FOR CONSTRUCTION MACHINERY RECOVERING," *J. Ind. Manag. Optim.*, vol. 17, no. 5, 2021, doi: 10.3934/jimo.2020074.
- [33] M. G. Wolff *et al.*, "Exploring and expanding transdisciplinary research for sustainable and just natural resource management," *Ecol. Soc.*, vol. 24, no. 4, 2019,



- doi: 10.5751/ES-11077-240414.
- [34] Y. Liu *et al.*, “Assessing the CO₂ reduction target gap and sustainability for bridges in China by 2040,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 154, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111811.
- [35] D. G. Noesaku da Costa, S. Ola Demon, and P. Sianto, “Improvement of Socio-Economic Activities at the Island of Semau based on Sustainable Road and Bridge Management Strategy,” *Glob. Conf. Bus. Soc. Sci. Proceeding*, vol. 15, no. 1, 2023, doi: 10.35609/gcbssproceeding.2023.1(203).
- [36] M. Gordan, S. R. Sabbagh-Yazdi, K. Ghaedi, and Z. Ismail, “A Damage Detection Approach in the Era of Industry 4.0 Using the Relationship between Circular Economy, Data Mining, and Artificial Intelligence,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/3067824.
- [37] A. Kamariotis, E. Chatzi, and D. Straub, “Quantifying the Value of Vibration-Based Structural Health Monitoring Considering Environmental Variability,” in *Structural Health Monitoring 2021: Enabling Next-Generation SHM for Cyber-Physical Systems - Proceedings of the 13th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2021*, 2021. doi: 10.12783/shm2021/36356.
- [38] A. Kandiri, E. Mohammadi Golafshani, and A. Behnood, “Estimation of the compressive strength of concretes containing ground granulated blast furnace slag using hybridized multi-objective ANN and salp swarm algorithm,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 248, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118676.
- [39] T. Krapu, “Coaching from a philosophy of science perspective,” *Philos. Coach. An Int. J.*, vol. 1, no. 1, 2016, doi: 10.22316/poc/01.1.02.
- [40] X. Zheng *et al.*, “Consideration of culture is vital if we are to achieve the Sustainable Development Goals,” *One Earth*, vol. 4, no. 2, 2021, doi: 10.1016/j.oneear.2021.01.012.
- [41] S. Adinata and T. Erlanti , Trans., “Peningkatan Kapasitas Struktur Jalan Rigid Pavement Pada Ruas Jalan Cerenti – Air Molek Kabupaten Indragiri Hulu”, *MB*, vol. 1, no. 3, pp. 126–140, Sep. 2025, doi: [10.65359/mandala_bakti.v1i3.70](https://doi.org/10.65359/mandala_bakti.v1i3.70).