

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka memuat uraian yang sistematis tentang teori dasar yang relevan, hasil penelitian sebelumnya, kerangka konseptual dan hipotesis penelitian. Tata cara penulisan kepustakaan harus sesuai dengan ketentuan yang ada pada buku panduan ini. Secara berurutan tinjauan pustaka memuat.

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Konsep Forensic Engineering

2.1.1.1 Pengertian Forensic Engineering

Teknik Forensik adalah bidang khusus dalam bidang teknik yang berfokus pada investigasi dan analisis penyebab kegagalan atau kerusakan pada struktur, komponen, atau sistem. Kegagalan ini dapat terjadi pada berbagai jenis infrastruktur, seperti bangunan, jembatan, kendaraan, atau peralatan industri, dan dapat mengakibatkan kerugian material, cedera, atau bahkan kematian. Tujuan utama dari Teknik Forensik adalah untuk menentukan penyebab teknis dan faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kegagalan, seperti kesalahan desain, cacat material, atau kurangnya pemeliharaan, dalam rangka memberikan wawasan untuk mencegah insiden serupa di masa depan. Disiplin ilmu ini memainkan peran penting dalam meningkatkan keamanan dan keandalan sistem rekayasa di berbagai sektor industri (Xu, 2024).

Di bidang konstruksi, Insinyur Forensik dapat menyelidiki investigasi seputar keruntuhan bangunan atau kegagalan jembatan untuk menunjukkan

kesalahan desain atau konstruksi yang menyebabkan insiden tersebut (Kabando, 2019). Demikian pula, dalam industri transportasi, para profesional ini dapat memeriksa kecelakaan kendaraan atau insiden pesawat terbang untuk mengungkap penyebab mekanis atau struktural yang mungkin bertanggung jawab atas kecelakaan tersebut (Yan, 2021). Dengan menggabungkan prinsip-prinsip teknik dengan investigasi di tempat, Teknik Forensik menawarkan pendekatan komprehensif untuk memahami akar penyebab kegagalan, sehingga berkontribusi pada peningkatan standar keselamatan dan pencegahan kecelakaan di masa depan (Booker, 2020).

Rekayasa Forensik mencakup berbagai aplikasi di berbagai industri, termasuk konstruksi, transportasi, energi, dan manufaktur (Sawhney, 2020). Misalnya, dalam konservasi bangunan bersejarah seperti Kubah Chiesa di Santa Maria del Fiore di Florence, Italia, kombinasi antara teknik material forensik dan investigasi struktural sangat penting untuk mengidentifikasi jenis struktur dan bahan yang digunakan berdasarkan periode konstruksi (Vitorino, 2024). Hal ini menyoroti sifat interdisipliner dari Rekayasa Forensik, di mana keahlian dari berbagai bidang diintegrasikan untuk mengungkap kompleksitas kegagalan dan kerusakan struktur.

Selain itu, pemanfaatan data Building Information Modeling (BIM) dalam analisis forensik, seperti yang ditunjukkan dalam studi tentang kerusakan jembatan cable-stayed tanpa backstay, menunjukkan bagaimana teknologi canggih dimanfaatkan untuk meningkatkan proses investigasi (Al-Fatla, 2023). Dengan menggabungkan teknologi informasi modern ke dalam sistem organisasi ahli konstruksi, Rekayasa Forensik berkembang seiring dengan kemajuan teknologi

untuk merampingkan analisis data dan meningkatkan efisiensi investigasi (Mishra, 2024).

Dalam konteks rekayasa struktur forensik, pemeriksaan bangunan beton bertulang yang runtuh dengan pendekatan forensik dapat menjelaskan mekanisme kegagalan yang terkait dengan keruntuhan progresif (Etemadi & Balkaya, 2020). Memahami seluk-beluk kegagalan struktural melalui investigasi forensik sangat penting untuk mengembangkan praktik desain yang kuat yang dapat bertahan menghadapi tantangan tak terduga dan mencegah terjadinya bencana (De Boer, 2020). Dengan mengidentifikasi wilayah kritis dalam infrastruktur industri, seperti jaringan pipa, melalui analisis geospasial, Rekayasa Forensik membantu dalam menilai kerentanan dan meningkatkan ketahanan sistem kritis (Hou et al., 2020).

Selain itu, integrasi metode pengujian destruktif dan non-destruktif dalam konstruksi forensik dan keahlian teknis menggarisbawahi pentingnya teknik evaluasi yang komprehensif dalam mengungkap cacat dan deformasi yang tersembunyi di dalam struktur (Zilberova et al., 2021). Dengan menggabungkan pendekatan pengujian ini, Insinyur Forensik dapat memberikan penilaian menyeluruh terhadap peristiwa yang menyebabkan kecelakaan atau anomali struktural, yang berkontribusi pada pengambilan keputusan yang tepat dalam upaya perbaikan.

Peran Rekayasa Forensik meluas melampaui struktur fisik hingga mencakup forensik digital, sebagaimana dibuktikan oleh penelitian tentang layanan pesan instan dan analisis paket data jaringan (Li & Mogos, 2022). Dengan menerapkan teknik forensik digital, para insinyur dapat menyelidiki insiden siber dan menganalisis bukti digital untuk merekonstruksi peristiwa dan mengidentifikasi

potensi kerentanan dalam sistem komunikasi. Pendekatan interdisipliner ini menggarisbawahi beragam aplikasi Teknik Forensik dalam mengatasi tantangan modern di seluruh domain fisik dan digital.

Kesimpulannya, Teknik Forensik memainkan peran penting dalam menyelidiki kegagalan, menganalisis kerusakan, dan meningkatkan keamanan dan keandalan sistem teknik di berbagai industri. Dengan mengintegrasikan teknologi canggih, keahlian interdisipliner, dan metode pengujian yang komprehensif, Insinyur Forensik dapat mengungkap kompleksitas kegagalan struktural, mencegah insiden di masa depan, dan berkontribusi pada kemajuan praktik teknik.

2.1.1.2 Aplikasi Forensic Engineering pada Investigasi Struktural

Rekayasa Forensik, khususnya di bidang investigasi struktural, melibatkan penerapan prinsip-prinsip forensik untuk menganalisis dan menentukan penyebab kegagalan atau kerusakan pada struktur bangunan atau infrastruktur lainnya. Proses ini memerlukan evaluasi menyeluruh terhadap komponen struktur yang mengalami kegagalan, baik karena alasan alam seperti gempa bumi atau kesalahan manusia seperti desain yang cacat atau praktik konstruksi yang tidak memadai (Filipov, 2022).

Tujuan utama dari aplikasi ini adalah untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan, mengumpulkan bukti teknis, dan menyusun laporan yang dapat digunakan dalam proses hukum atau untuk tujuan asuransi (De Boer, 2020). Dalam investigasi struktural, insinyur forensik menggunakan berbagai teknik dan metodologi untuk mengumpulkan dan menganalisis data. Metode-metode ini termasuk inspeksi visual, pengujian material, analisis rekayasa balik, dan simulasi

komputer. Dengan mempelajari dokumen terkait seperti gambar desain, spesifikasi material, dan catatan konstruksi, insinyur forensik dapat mengidentifikasi potensi kesalahan atau penyimpangan dari standar yang telah ditetapkan, sehingga memungkinkan mereka untuk membentuk hipotesis yang dapat diuji lebih lanjut untuk menentukan penyebab kegagalan (Claveau, 2019).

Temuan dari investigasi struktural melalui Rekayasa Forensik tidak hanya membantu dalam menentukan tanggung jawab hukum, tetapi juga menyediakan data penting untuk meningkatkan praktik desain, pemeliharaan, dan konstruksi (Valenzuela, 2024). Dengan mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang penyebab kegagalan struktural, industri konstruksi dapat mengembangkan solusi yang lebih aman dan lebih dapat diandalkan, memastikan kepatuhan yang ketat terhadap standar keselamatan (Loosemore, 2019). Investigasi ini juga membantu dalam memberikan rekomendasi remediasi yang tepat dan memastikan keselamatan publik dalam penggunaan struktur yang ada.

Rekayasa Forensik dalam investigasi struktur sangat penting untuk mencegah terulangnya kegagalan serupa di masa depan. Wawasan yang diperoleh dari investigasi ini tidak hanya berkontribusi pada akuntabilitas hukum tetapi juga menawarkan data yang berharga untuk meningkatkan praktik desain, pemeliharaan, dan konstruksi (Zhang, 2019). Dengan memahami secara komprehensif akar penyebab kegagalan struktural, industri konstruksi dapat mengembangkan solusi yang lebih kuat, mematuhi standar keselamatan yang ketat, dan mencegah insiden serupa terjadi lagi.

Selain itu, integrasi metode pengujian destruktif dan non-destruktif dalam konstruksi forensik dan keahlian teknis menggarisbawahi pentingnya teknik

evaluasi yang komprehensif dalam mengungkap cacat dan deformasi yang tersembunyi di dalam struktur (Zilberova et al., 2021). Dengan menggabungkan pendekatan pengujian ini, Insinyur Forensik dapat memberikan penilaian menyeluruh terhadap peristiwa yang menyebabkan kecelakaan atau anomali struktural, yang berkontribusi pada pengambilan keputusan yang tepat dalam upaya remediasi (Parrott., 2021).

2.1.2 Konsep Investigasi Forensik Engineering

Investigasi forensik engineering merupakan disiplin yang penting dalam memahami dan menganalisis kegagalan struktur dan sistem. Dalam konteks ini, enam dimensi yang diusulkan—struktural, getaran, material, lingkungan, pemeliharaan, dan regulasi—merupakan kerangka kerja yang komprehensif untuk melakukan investigasi yang mendalam. Setiap dimensi ini berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik mengenai penyebab kegagalan dan bagaimana mencegahnya di masa depan.

2.1.2.1 Struktural

Dimensi struktural berfokus pada desain dan integritas struktur. Kegagalan struktur sering kali disebabkan oleh kesalahan desain, cacat konstruksi, atau keausan seiring waktu. Penelitian menunjukkan bahwa kesalahan dalam perencanaan dan pelaksanaan dapat menyebabkan keruntuhan yang signifikan, yang tidak hanya mengakibatkan kerugian finansial tetapi juga dapat mengancam keselamatan manusia ("Case Studies on Failure Investigations in Structural and Geotechnical Engineering", 2023). Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis menyeluruh terhadap desain struktural dan mengidentifikasi potensi

kelemahan yang dapat dieksploitasi oleh kondisi lingkungan atau penggunaan yang tidak tepat.

2.1.2.2 Getaran

Dimensi getaran juga memainkan peran penting dalam investigasi forensik engineering. Getaran yang berlebihan dapat menyebabkan kelelahan material dan kerusakan struktural. Penelitian menunjukkan bahwa pemantauan getaran dapat membantu dalam mendeteksi masalah sebelum menjadi kritis, seperti yang terlihat dalam analisis kegagalan jembatan yang menunjukkan bahwa getaran berlebih dapat berkontribusi pada keruntuhan ("Bridge failures, forensic structural engineering and recommendations for design of robust structures", 2021). Dengan menggunakan teknologi modern, seperti sensor dan sistem pemantauan, insinyur dapat mengumpulkan data yang diperlukan untuk menganalisis pola getaran dan mengidentifikasi potensi masalah.

2.1.2.3 Material

Dimensi material mencakup analisis sifat dan perilaku material yang digunakan dalam konstruksi. Kegagalan material sering kali disebabkan oleh korosi, keausan, atau cacat produksi. Sebuah studi menyatakan bahwa pemahaman yang mendalam tentang sifat material dan bagaimana mereka bereaksi terhadap kondisi lingkungan sangat penting untuk mencegah kegagalan (Melanitis et al., 2021). Misalnya, dalam kasus pipa gas yang meledak, analisis menunjukkan bahwa embrittlement hidrogen akibat prosedur operasi dan pemeliharaan yang tidak tepat berkontribusi pada kegagalan tersebut (Rasty et al., 2023). Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat dan pemahaman tentang interaksinya dengan lingkungan sangat penting dalam desain dan pemeliharaan struktur.

2.1.2.4 Lingkungan

Lingkungan merupakan dimensi yang tidak kalah penting dalam investigasi forensik engineering. Faktor-faktor lingkungan seperti cuaca ekstrem, gempa bumi, dan banjir dapat mempengaruhi integritas struktur. Penelitian menunjukkan bahwa banyak kegagalan struktural terjadi akibat pengabaian terhadap kondisi lingkungan yang dapat mempengaruhi performa struktur ("Case Studies on Failure Investigations in Structural and Geotechnical Engineering", 2023). Oleh karena itu, analisis risiko lingkungan harus menjadi bagian integral dari setiap proyek konstruksi, dengan mempertimbangkan potensi dampak dari bencana alam dan perubahan iklim.

2.1.2.5 Maintenance/Operasional

Dimensi pemeliharaan berfokus pada pentingnya pemeliharaan yang tepat untuk memastikan keberlanjutan dan keamanan struktur. Kegagalan dalam pemeliharaan dapat mengakibatkan kerusakan yang signifikan dan meningkatkan risiko kegagalan. Penelitian menunjukkan bahwa program pemeliharaan yang sistematis dan terencana dapat mengurangi risiko kegagalan (Williams, 2024). Misalnya, dalam analisis sistem atap komersial, penting untuk mengembangkan metodologi penilaian yang dapat membantu memahami kondisi permukaan atap dan menentukan tindakan pemeliharaan yang diperlukan (Williams, 2024). Dengan demikian, pemeliharaan yang tepat tidak hanya memperpanjang umur struktur tetapi juga melindungi keselamatan publik.

2.1.2.6 Regulasi

Regulasi merupakan dimensi terakhir yang harus dipertimbangkan dalam investigasi forensik engineering. Kepatuhan terhadap standar dan regulasi yang

berlaku sangat penting untuk memastikan bahwa struktur dibangun dan dipelihara sesuai dengan praktik terbaik. Penelitian menunjukkan bahwa kegagalan untuk mematuhi regulasi dapat berkontribusi pada kegagalan struktural yang signifikan (Ala et al., 2020). Oleh karena itu, penting bagi insinyur untuk memahami dan menerapkan regulasi yang relevan dalam setiap tahap proyek, mulai dari desain hingga pemeliharaan.

Secara keseluruhan, investigasi forensik engineering yang komprehensif harus mempertimbangkan semua enam dimensi ini. Dengan mengintegrasikan analisis struktural, getaran, material, lingkungan, pemeliharaan, dan regulasi, insinyur dapat mengidentifikasi penyebab kegagalan dengan lebih akurat dan mengembangkan strategi untuk mencegahnya di masa depan. Pendekatan multidimensional ini tidak hanya meningkatkan pemahaman kita tentang kegagalan tetapi juga berkontribusi pada pengembangan praktik rekayasa yang lebih aman dan efektif.

2.1.3 Struktur Bangunan dan Getaran

2.1.2.1 Pengertian Struktur Bangunan

Desain dan konstruksi struktur bangunan merupakan aspek penting yang direncanakan dengan cermat untuk menahan beban, memastikan stabilitas, dan menahan gaya eksternal seperti gravitasi, angin, dan aktivitas seismik (Okeke, 2023). Berbagai elemen struktur, termasuk balok, kolom, dinding, lantai, dan atap, dirancang secara strategis untuk mendistribusikan beban secara merata ke fondasi, sehingga dapat menopang kekuatan dan fungsionalitas bangunan (Verstichele, 2020).

Selain memberikan kekuatan dan stabilitas, desain struktur bangunan secara signifikan mempengaruhi estetika, bentuk, dan keberlanjutan bangunan secara keseluruhan. Pemilihan material, efisiensi energi, kebutuhan ruang, dan dampak lingkungan semuanya dipertimbangkan dengan cermat selama tahap desain struktural (Hertwich, 2019). Selain itu, proses konstruksi menekankan penggunaan bahan dan teknik berkualitas tinggi untuk memastikan umur bangunan yang panjang dan kepatuhan terhadap standar keselamatan (Zhang, 2020).

Peran struktur bangunan lebih dari sekadar pertimbangan teknis, tetapi juga mencakup faktor ekonomi, lingkungan, dan sosial yang berkontribusi terhadap keberlanjutan dan fungsionalitas bangunan (Martek, 2019). Sangat penting bagi struktur untuk mendukung bangunan dalam kondisi normal dan ekstrem, menyoroti pentingnya mempertimbangkan berbagai aspek di luar persyaratan teknis.

Rekayasa Forensik, khususnya dalam investigasi struktur, melibatkan penerapan prinsip-prinsip forensik untuk menganalisis dan menentukan penyebab kegagalan atau kerusakan pada struktur bangunan (Etemadi, 2020). Proses ini mencakup evaluasi komprehensif terhadap komponen struktur yang mengalami kegagalan, baik karena kejadian alam maupun kesalahan manusia, dengan tujuan untuk mengidentifikasi akar permasalahan dan memberikan bukti teknis untuk tujuan hukum atau asuransi.

Industri konstruksi telah melihat tren penting untuk menggunakan struktur baja pada bangunan publik besar, yang didorong oleh kebijakan nasional dan kemajuan teknologi (Duan, 2024). Metode konstruksi pracetak, khususnya, telah mendapatkan popularitas karena efisiensi energi, efisiensi manajemen, dan

keramahan lingkungannya, selaras dengan langkah industri menuju praktik berkelanjutan (Gao, 2023).

Selain itu, kemajuan dalam sistem fasad untuk bangunan di daerah beriklim panas menunjukkan upaya berkelanjutan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mematuhi peraturan lingkungan (Giyasov & Mirzoev, 2021). Dengan berfokus pada peningkatan sistem fasad untuk mengoptimalkan kinerja energi, proyek konstruksi dapat memenuhi persyaratan efisiensi energi yang ketat dan berkontribusi pada praktik bangunan berkelanjutan (Giyasov & Mirzoev, 2021).

2.1.2.2 Pengaruh Getaran pada Struktur Bangunan

Getaran memiliki dampak yang signifikan terhadap integritas dan stabilitas struktur bangunan, yang berasal dari berbagai sumber seperti aktivitas seismik (gempa bumi), lalu lintas kendaraan berat, mesin industri, atau pekerjaan konstruksi di dekat bangunan (Filipov, 2022). Ketika bangunan terpapar getaran, struktur internalnya mengalami perubahan berupa deformasi dan tekanan yang dapat mengakibatkan kerusakan material, keretakan, atau bahkan kegagalan struktur jika getaran terus berlangsung atau melebihi batas toleransi yang telah ditentukan oleh desain bangunan (Longinow, 2022). Dampak getaran pada struktur bangunan dapat terjadi secara langsung maupun jangka panjang, dengan getaran yang kuat menyebabkan kerusakan fisik yang terlihat seperti retakan pada dinding, keruntuhan parsial, atau pergeseran elemen struktur dalam jangka pendek (Gocer, 2020). Dalam jangka panjang, getaran yang berulang dan berkepanjangan dapat mempercepat proses kelelahan material, yang pada akhirnya mengurangi umur bangunan dan meningkatkan risiko kegagalan struktur (Hao, 2023).

Upaya mitigasi sangat penting dalam mengatasi efek negatif getaran pada struktur bangunan, yang meliputi perencanaan desain, pemilihan material yang tepat, dan penerapan teknologi yang dapat mengurangi atau mengendalikan dampak getaran (Filipov, 2022). Hal ini mencakup penggunaan isolator seismik, peredam getaran, dan fondasi yang dirancang khusus untuk meredam getaran. Selain itu, pemantauan getaran dan inspeksi struktural secara teratur dapat membantu mendeteksi potensi masalah sebelum meningkat menjadi masalah yang lebih serius (Filipov, 2022). Oleh karena itu, manajemen getaran yang efektif sangat penting untuk menjaga keamanan, keandalan, dan umur panjang struktur bangunan.

Penerapan sistem isolasi dasar sebagai sistem struktur alternatif pada bangunan rumah sakit delapan lantai di Manado menunjukkan solusi inovatif untuk memitigasi efek getaran dan meningkatkan ketahanan struktur (Tio et al., 2022). Dengan menerapkan sistem isolasi dasar, respon struktur bangunan terhadap getaran dapat dikelola secara efektif, sehingga menjamin keamanan dan stabilitas struktur di bawah beban dinamis (Tio et al., 2022). Selain itu, analisis jarak dilatasi pada struktur bangunan dengan menggunakan sistem dilatasi dua kolom menyoroti pentingnya sambungan struktur dalam mengakomodasi tata letak bangunan yang kompleks dan memitigasi dampak pergerakan struktur (Durachman et al., 2022).

2.1.4 Balok Gantung dalam Arsitektur Bangunan

2.1.3.1 Pengertian Balok Gantung

Balok adalah elemen struktur yang berfungsi menyalurkan beban ke kolom. Balok merupakan bagian dari struktur inti bangunan selain kolom dan pondasi. Sehingga pengecorannya harus dilakukan dengan baik (Soumokil, 2022). Tahap

pengecoran dimulai sejak tahap persiapan pengerjaan tulangan sampai pada saat perawatan (curing). Pelaksanaan pengecoran yang kurang baik dapat menimbulkan pengeroposan pada balok, dan hasil dari survey yang tidak sesuai dengan yang sudah direncanakan. agar mencegah terjadinya pengeroposan tersebut, perlu dilakukan proses- proses pengujian kualitas beton seperti slump test dan test kuat beton yang dilakukan oleh bagian pengendalian mutu (Quality Control) (Restiwi, 2022).

Bicara tentang gedung bertingkat maka diperlukan metode pemasangan bekisting dan pengecoran di ketinggian. Hal tersebut juga berhubungan dengan jenis perancah yang digunakan (Soumokil, 2022). Perancah adalah salah satu struktur yang berfungsi untuk menahan dan menyangga material secara sementara pada bangunan gedung dan bangunan besar lainnya, konstruksi sementara yang memungkinkan pelaksanaan konstruksi permanen setelahnya (Restiwi, 2022).

Balok gantung adalah elemen struktural yang digunakan untuk mendukung beban dari struktur di atasnya dan menyalurkannya ke elemen pendukung melalui gaya tarik, biasanya menggunakan kabel atau tali gantung (Ding, 2021). Konsep ini memungkinkan terciptanya ruang yang luas tanpa kolom penopang di tengah, memberikan fleksibilitas desain dan kelegaan ruang di bawahnya. Fungsi balok gantung adalah untuk mendistribusikan beban secara efisien ke elemen-elemen pendukung, memungkinkan konstruksi bentang panjang seperti jembatan gantung atau atap besar, dan memberikan solusi arsitektural yang mengutamakan ruang terbuka dan fungsionalitas yang optimal (Spaquuolo, 2019).

Balok gantung merupakan elemen struktural yang memegang peranan penting dalam mendukung beban dari struktur di atasnya dan mengalirkan beban

tersebut ke elemen pendukung melalui gaya tarik, seringkali menggunakan kabel atau tali gantung (Zhang, 2023). Konsep ini memungkinkan penciptaan ruang yang luas tanpa adanya kolom penopang di tengah, memberikan fleksibilitas desain, serta menciptakan ruang di bawahnya yang terasa lebih lega. Fungsi utama dari balok gantung adalah untuk mendistribusikan beban secara efisien ke elemen-elemen pendukung, memungkinkan konstruksi bentang panjang seperti jembatan gantung atau atap besar, dan memberikan solusi arsitektural yang menekankan ruang terbuka dan fungsionalitas yang optimal.

2.1.3.2 Potensi Masalah Struktural pada Balok Gantung

Balok yang digantung rentan terhadap berbagai masalah struktural yang dapat membahayakan integritas dan keamanannya. Masalah-masalah ini termasuk risiko kegagalan akibat gaya tarik yang berlebihan, kelelahan material, atau korosi pada kabel atau elemen penggantung yang menopang balok (Hall et al., 2021). Ketika beban pada balok melebihi kapasitas desainnya atau jika ada distribusi beban yang tidak merata, struktur dapat berubah bentuk atau gagal total. Faktor-faktor seperti getaran, perubahan suhu yang ekstrem, dan cuaca buruk dapat mempercepat kerusakan elemen penyangga, yang selanjutnya membahayakan stabilitas balok (Hall et al., 2021). Mengabaikan inspeksi dan pemeliharaan berkala memperburuk kondisi ini, sehingga meningkatkan risiko keruntuhan struktur secara tiba-tiba yang dapat membahayakan keselamatan penghuni dan stabilitas bangunan secara keseluruhan.

Pada jembatan suspensi bentang panjang, suspender, yang merupakan komponen penting yang menghubungkan balok utama dan kabel, sangat rentan

terhadap korosi lingkungan (Yuan, 2023). Kabel baja, bahan utama pada suspender, sangat rentan terhadap degradasi jenis ini, sehingga menyoroti pentingnya pemantauan dan penanganan masalah korosi pada elemen-elemen penting ini (Yuan, 2023). Metode untuk mengidentifikasi kerusakan pada suspender jembatan lengkung terikat telah dikembangkan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan, yang menunjukkan ketahanan dalam berbagai lingkungan kebisingan (Zhou, 2024). Metode ini memberikan pendekatan proaktif untuk mendeteksi dan mengatasi kerusakan pada suspender, sehingga meningkatkan keselamatan dan integritas struktural jembatan secara keseluruhan (Zhou, 2024).

Dalam bidang pemanenan energi getaran, desain balok fleksibel secara signifikan mempengaruhi pencapaian respons frekuensi sangat rendah (Feng et al., 2023). Para peneliti telah mengusulkan solusi inovatif dengan memanfaatkan pemanen energi getaran sistem mikroelektromekanis multimodal (MEMS) dengan balok fleksibel dan silikon bertingkat untuk meningkatkan kemampuan pemanenan energi (Feng et al., 2023). Penyesuaian optimal gaya kabel pada jembatan pelengkung tabung baja berisi beton bentang panjang sangat penting untuk memastikan stabilitas dan keamanan struktural (Yu, 2023). Namun, metode optimasi yang ada untuk gaya kabel pada struktur yang kompleks sering kali membutuhkan daya dan waktu komputasi yang besar karena sifat dari proses solusinya (Yu, 2023).

Desain dan analisis statis jembatan suspensi rangka baja bentang panjang sangat penting untuk meningkatkan keamanan struktur (Geng et al., 2023). Insinyur dapat secara efektif meningkatkan status keselamatan jembatan suspensi dengan menggunakan perangkat lunak penghitungan elemen hingga yang canggih, seperti

Midas Civil, dalam proses desain dan analisis yang cermat (Geng et al., 2023). Memastikan keselamatan selama tanggap darurat dan pekerjaan restorasi untuk struktur seperti menara radio V.G. Shukhov melibatkan pembongkaran elemen dengan menggantungkannya pada struktur pendukung tambahan (Mamin, 2024). Metode ini memungkinkan pekerjaan restorasi yang aman pada struktur dengan fitur struktural tertentu, meminimalkan risiko selama kegiatan pemeliharaan dan perbaikan (Mamin, 2024).

Dalam konteks operasi pengangkatan struktur, mengoptimalkan sikap pengangkatan pada struktur baja non-standar melalui teknologi balok penyeimbang yang dapat disesuaikan sangatlah penting (Li, 2023). Balok penyeimbang sangat penting untuk menjaga keseimbangan, mencegah kerusakan akibat sling, dan memastikan distribusi beban yang efektif selama operasi pengangkatan (Li, 2023). Dinamika dan kontrol quadrotor ganda yang digantungkan pada balok ramping dengan efek kopling sikap-pendulum menghadirkan tantangan unik yang perlu diatasi untuk operasi yang aman dan efisien (Li et al., 2023). Memahami efek kopling antara sikap quadrotor dan pendulum kabel sangat penting untuk meningkatkan kontrol dan stabilitas pada sistem tersebut (Li et al., 2023).

2.1.5 Analisis Getaran pada Struktur Bangunan

2.1.4.1 Metode Pengukuran dan Analisis Getaran

Pengukuran dan analisis getaran sangat penting untuk memantau kesehatan struktur dan mendiagnosis potensi masalah pada bangunan atau mesin. Metode pengukuran getaran biasanya melibatkan penggunaan alat seperti akselerometer, seismometer, atau sensor getaran yang dipasang di titik-titik kritis struktur atau

mesin (Rahayu, 2024). Akselerometer mengukur percepatan getaran dalam satuan gravitasi (g), sedangkan seismometer digunakan untuk mendeteksi gerakan yang sangat halus seperti yang dihasilkan oleh aktivitas seismik (Rahayu, 2024). Data yang dikumpulkan dari sensor-sensor ini kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik untuk analisis lebih lanjut.

Analisis getaran mencakup beberapa teknik, termasuk analisis spektrum frekuensi, analisis bentuk gelombang waktu, dan analisis modal (Rahayu, 2024). Analisis spektrum frekuensi digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi getaran yang dominan dan menentukan apakah frekuensi tersebut menimbulkan risiko pada struktur atau mesin (Rahayu, 2024). Analisis bentuk gelombang waktu melibatkan pemeriksaan langsung sinyal getaran dari waktu ke waktu untuk mengidentifikasi pola atau anomali yang dapat mengindikasikan potensi masalah (Rahayu, 2024). Analisis modal digunakan untuk memahami mode getaran alami dari sebuah struktur atau mesin dan menentukan bagaimana getaran akan merambat melalui sistem (Rahayu, 2024). Melalui metode ini, para insinyur dapat mendiagnosis masalah awal, mengidentifikasi akar penyebab getaran abnormal, dan mengambil tindakan korektif sebelum terjadi kerusakan serius.

Dalam bidang analisis getaran, teknik Fast Fourier Transform (FFT) digunakan dalam mentransformasikan sinyal frekuensi suara untuk memperoleh Average Energy (AE) dalam musik (Kusuma, 2020). Frekuensi suara mengacu pada sinyal getaran yang dapat didengar oleh manusia yang dihasilkan oleh gelombang suara dengan frekuensi mulai dari 20 Hz hingga 20.000 Hz (Kusuma, 2020). Metode ini membantu dalam memahami distribusi energi di berbagai komponen

frekuensi yang berbeda dalam sinyal suara, memberikan wawasan yang berharga tentang karakteristik musik dan produksi suara (Kusuma, 2020).

Lebih lanjut, penerapan akselerometer Micro Electro Mechanical System (MEMS) berbasis Internet of Things (IoT) dalam mengukur akselerasi maksimum getaran struktural pada jembatan menunjukkan kemajuan teknologi sensor untuk pemantauan kesehatan struktural (Rahayu, 2024). Dengan menganalisis nilai deviasi standar di berbagai titik pengukuran pada jembatan, para insinyur dapat memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik getaran dan titik-titik tegangan potensial di dalam struktur (Rahayu, 2024).

Selain itu, analisis respon getaran pada peredam Stockbridge sebagai Dynamic Vibration Absorbers pada kabel menunjukkan pentingnya mengoptimalkan massa dan bentuk penyeimbang untuk meredam getaran kabel dalam rentang frekuensi tertentu (Habibah, 2024). Penelitian ini tidak hanya menyoroti pentingnya mekanisme kontrol getaran tetapi juga menekankan perlunya solusi desain yang disesuaikan untuk memitigasi getaran struktural secara efektif (Habibah, 2024).

2.1.6 Penanganan Masalah Getaran pada Bangunan

2.1.5.1 Strategi Perbaikan Struktural

Perbaikan struktural getaran pada bangunan melibatkan berbagai strategi untuk mengurangi dampak negatif getaran dan meningkatkan stabilitas serta kenyamanan (Rihimi, 2020). Salah satu strategi utama adalah pemasangan damper seismik atau peredam getaran, yang berfungsi untuk menyerap energi getaran dan mengurangi amplitudo getaran yang dirasakan oleh struktur. Damper ini dapat

berupa viscous damper, tuned mass damper (TMD), atau perangkat lainnya yang dirancang khusus untuk meredam getaran dalam frekuensi tertentu (Gao, 2020).

Penguatan struktur adalah strategi lain yang melibatkan penambahan elemen struktural tambahan seperti penyangga diagonal, pengencangan sambungan, atau penggunaan material yang lebih tahan getaran. Langkah ini bertujuan untuk meningkatkan kekakuan dan kekuatan bangunan, sehingga lebih mampu menahan getaran tanpa mengalami kerusakan. Selain itu, isolasi getaran merupakan teknik penting yang melibatkan pemisahan struktur bangunan dari sumber getaran melalui penggunaan bantalan isolasi atau fondasi khusus. Teknik ini efektif dalam mengurangi transfer getaran dari lingkungan luar, seperti lalu lintas atau aktivitas industri, ke dalam bangunan.

Monitoring dan pemeliharaan berkala juga menjadi bagian penting dari strategi perbaikan. Dengan pemantauan terus-menerus menggunakan sensor getaran, potensi masalah dapat dideteksi lebih awal, dan perbaikan dapat dilakukan sebelum kerusakan signifikan terjadi (Loper, 2020). Pemeliharaan yang teratur memastikan bahwa semua perangkat peredam dan penguatan tetap berfungsi dengan baik, sehingga risiko kerusakan akibat getaran diminimalkan.

Secara keseluruhan, kombinasi dari pemasangan perangkat peredam, penguatan struktural, isolasi getaran, serta pemantauan dan pemeliharaan berkala akan memastikan bangunan tetap stabil, aman, dan nyaman meskipun terpapar getaran yang berkelanjutan.

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu memuat temuan tesis-tesis hasil kajian ilmiah yang relevan dengan tujuan penelitian, baik yang mendukung maupun yang menolak teori, proposisi atau konsep, sebagai pendekatan terbaru guna mendukung penyusunan kerangka konseptual sebagai dasar merumuskan hipotesis. Tesis yang digunakan lebih diutamakan berasal dari sumber primer dan dicantumkan nama sumbernya.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Penelitian yang disarankan
1	Tiwa, (2020).	Forensic engineering in reinforced concrete structures and analysis of crack propagation: Case study of the new administrative building of the National Advanced School of Public Works Yaoundé.	Hasil yang diperoleh dapat memberikan petunjuk informasi yang diperlukan bagi insinyur forensik struktural untuk menemukan sumber sebenarnya dari cacat tersebut (dalam hal ini defleksi balok) selama penyelidikan. Lendutan pada balok menyebabkan terjadinya partisi pelapis dinding dan lantai retak, jadi jika ditemukan retakan pada pelapis tersebut, hal tersebut dapat berfungsi sebagai peringatan bahwa hal ini dapat disebabkan oleh defleksi balok, menghindari solusi perbaikan apa pun yang mungkin tidak terjadi efektif.	Penelitian lanjutan disarankan untuk mencakup pengujian eksperimental langsung pada prototipe balok untuk memvalidasi lebih lanjut model numerik yang dikembangkan. Hal ini akan memberikan hasil yang lebih komprehensif dan memungkinkan perbandingan langsung antara simulasi dan kondisi nyata
2	Widyatmoko, (2021)	Damages of Orthotropic Bridge Deck Surfacing: Forensic Investigation,	hasil penelitian menunjukkan bahwa tinjauan literatur dan studi kasus di seluruh dunia, tiga opsi sistem permukaan alternatif	Berdasarkan hasil analisis, rekomendasi diberikan untuk memperbaiki desain permukaan

No	Nama dan Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Penelitian yang disarankan
		Remedial Work and Performance Monitoring	<p>diidentifikasi. Prediksi sisa umur permukaan yang ada dan Proyeksi umur sistem penggantian yang direkomendasikan dianalisis. Pengaruh pembebanan roda super tunggal Sistem yang diusulkan juga dinilai. Berdasarkan kinerja relatif dari opsi-opsi ini, rekomendasi diberikan kepada memperbaiki desain permukaan untuk digunakan dalam pekerjaan pemeliharaan dan perbaikan sementara. Pekerjaan tindak lanjut mencakup pemantauan kinerja layanan solusi sementara sejak dibuka untuk lalu lintas. Untuk pekerjaan rehabilitasi besar di masa depan, tiga Pilihan alternatif telah disarankan untuk menggantikan sistem permukaan saat ini. Masing-masing pilihan ini memiliki manfaat juga telah disajikan untuk membantu pengambilan keputusan, dengan mempertimbangkan biaya dan aspek teknis</p>	<p>jalan yang digunakan dalam pemeliharaan sementara dan perbaikan. Selanjutnya, kinerja solusi sementara ini dipantau sejak mulai digunakan oleh lalu lintas. Untuk rehabilitasi besar di masa depan, tiga alternatif pengganti sistem permukaan saat ini telah diusulkan. Setiap alternatif dijelaskan kelebihanannya untuk membantu pengambilan keputusan, dengan mempertimbangan biaya dan aspek teknis.</p>
3	Fehim (2024)	Forensic materials and test methods	<p>Insinyur forensik mengevaluasi bukti dokumenter sehingga pengadilan dapat membuat keputusan yang benar. Dalam penelitian ini, bahan forensik dan metode pengujian dibahas. Untuk tujuan ini, pertama-tama, konsep Teknik Forensik diperkenalkan</p>	<p>Penelitian lanjutan dapat fokus pada identifikasi dan analisis lebih mendalam terhadap pola kerusakan produk spesifik dalam berbagai kondisi lingkungan,</p>

No	Nama dan Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Penelitian yang disarankan
			dan cacat yang terjadi dalam produk diperiksa. Kemudian, dalam kasus perselisihan antara pihak-pihak, dijelaskan bagaimana insinyur forensik memeriksa produk dan menyiapkan laporan ahli untuk menyelesaikan sengketa. Akhirnya, bagaimana dan dengan perangkat apa tes makroskopik dan mikroskopis, tes mekanis dan termal dilakukan diperiksa.	seperti suhu ekstrem, tekanan tinggi, atau paparan zat kimia tertentu.
4	Cowley (2020)	Forensic Engineering Analysis of a Failed ROPS	Penelitian ini menyelidiki kecelakaan di sebuah pabrik manufaktur dengan menggunakan teknologi 3D dan analisis keselamatan. Hasilnya menunjukkan bahwa beberapa pihak bertanggung jawab atas kecelakaan tersebut, sementara korban tidak berkontribusi. Kasus ini diselesaikan dengan pembayaran sebesar \$4,7 juta di luar pengadilan dan dipublikasikan dalam Virginia Lawyer Weekly.	Penelitian selanjutnya dapat dilakukan pada kondisi medan yang lebih bervariasi, seperti tanah berbatu, kemiringan curam, dan permukaan tidak rata, untuk memahami lebih baik faktor-faktor yang memengaruhi kegagalan ROPS.
5	Barakat (2020)	Analysis of Methods used to Investigate Engineering Measured Experimental Data	Hasil dari banyak eksperimen teknik yang terukur memerlukan proses analisis dan studi untuk menentukannya hubungan antara variabel independen dan variabel dependen, dan akibatnya, keakuratan nilai-nilai tersebut variabel yang diadopsi menjadi kebutuhan mendesak.	Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan pendekatan yang dikembangkan untuk aplikasi spesifik, seperti prediksi kerusakan material, analisis energi terbarukan, atau optimasi

No	Nama dan Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Penelitian yang disarankan
				proses manufaktur.
6	Платонова et al (2021)	Forensic Construction Investigation of Reconstructed Premises	Hasil Penelitian: Penelitian ini membahas kemungkinan pelaksanaan atau pelestarian rekonstruksi ruang dengan menilai kondisi saat ini secara objektif dan independen, serta memeriksa dokumentasi dan kesesuaian struktur dengan norma dan peraturan. Ditemukan bahwa keinginan untuk meningkatkan kondisi tempat tinggal adalah hal yang wajar. Namun, pelaksanaan rekonstruksi harus memperhatikan kepatuhan terhadap persyaratan keselamatan bangunan, keselamatan hidup, dan kebakaran.	Penelitian lebih lanjut dapat mengevaluasi risiko teknis dan struktural yang spesifik pada bangunan lama saat dilakukan rekonstruksi, termasuk analisis dampaknya terhadap keselamatan dan ketahanan bangunan.
7	Al-Sanjery et al (2020)	Education in the Field of Forensic Engineering	Hasil penelitian menunjukkan bahwa makalah ini mengusulkan kurikulum untuk membekali insinyur lulusan dengan keterampilan dalam menyelidiki kegagalan proyek teknik, dengan tujuan meningkatkan wawasan teknis dan manajemen krisis. Kesuksesan kursus ini bergantung pada kontribusi berkelanjutan dari Insinyur Profesional di industri dan dukungan dari Dewan Insinyur, yang dapat menyediakan contoh nyata kegagalan proyek untuk dianalisis oleh mahasiswa.	Melakukan investigasi pada kasus-kasus nyata lain yang melibatkan getaran balok gantung pada gedung konser atau bangunan serupa untuk memperluas wawasan dan menciptakan basis data referensi yang lebih komprehensif.

No	Nama dan Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Penelitian yang disarankan
8	Shaikh et al (2019)	Forensic Structural Engineering an Overview	<p>Hasil penelitian menunjukkan bahwa rekayasa struktural forensik mendapatkan pengakuan sebagai bidang praktik teknik profesional di banyak bidang bagian dunia. Pada suatu saat, hampir semua perusahaan teknik melakukan pekerjaan teknik forensik sebagai bagian dari pekerjaan mereka berlatih atau sebagai layanan sesekali kepada klien favorit mereka. Kualitas bahan konstruksi yang rendah merupakan faktor paling umum yang menyebabkan cacat dan kegagalan bangunan. Miskin pengerjaan oleh kontraktor, kontraktor tidak kompeten, konstruksi salah, ketidakpatuhan spesifikasi/standar oleh pengembang/kontraktor, cacat struktur, cacat desain/struktur adalah hal yang biasa permasalahan di bidang konstruksi. Manajemen risiko yang buruk, pembengkakan anggaran, manajemen komunikasi yang buruk, penundaan jadwal, estimasi yang buruk praktik, kesulitan arus biaya, perbedaan desain, struktur proyek yang tidak memadai, kurangnya kerja tim juga merupakan ancaman kepada industri konstruksi</p>	<p>Penelitian dapat dilakukan dengan menggunakan simulasi dinamis untuk memodelkan perilaku getaran balok gantung di gedung konser. Hal ini dapat mencakup penggunaan perangkat lunak rekayasa struktural untuk memodelkan dan menganalisis respons struktural terhadap getaran yang ditimbulkan oleh aktivitas konser atau faktor eksternal seperti gempa bumi atau angin.</p>

No	Nama dan Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Penelitian yang disarankan
9	Ziernicki & Nguyen, (2020)	Forensic Engineering Analysis of Fatal Overhead Crane Accident	<p>Hasil Penelitian: Penelitian ini mengevaluasi praktik forensik dalam analisis ledakan dengan studi kasus ledakan di kuil Erawan, Bangkok. Dari perbandingan kerusakan struktural dan analisis FE, ditemukan bahwa berat TNT setara sekitar 3 kg mungkin digunakan. Analisis zona lethality berdasarkan tekanan ledakan dan serpihan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan kerusakan yang diamati. Teknik ini dapat meningkatkan manajemen keamanan dalam negeri.</p>	<p>Untuk memperluas aplikasinya, penelitian dapat dilakukan pada ledakan yang terjadi di area yang lebih kompleks, seperti gedung bertingkat tinggi atau infrastruktur kritis lainnya, guna menilai keefektifan metode analisis dan rekomendasi keselamatan yang lebih sesuai untuk lingkungan yang lebih besar dan lebih padat.</p>
10	Tanapornrawee et al (2023)	Forensic Engineering Technique for Analysis of an Explosion Incident	<p>Hasil penelitian menemukan bahwa muatan kosong TNT yang setara dengan berat 3 kg mungkin dapat digunakan untuk bom tersebut. Selain itu, berat muatan yang diselubungi dapat dihitung berdasarkan berat setara telanjang biaya TNT. Untuk mengkonfirmasi validitas bobot ledakan yang dihitung, gabungan zona mematikan dari tekanan ledakan dan fragmen yang tersebar dianalisis. Kerusakan manusia akibat tekanan ledakan adalah dianalisis berdasarkan kurva kematian Bowen. Zona mematikan dari pecahan yang meledak digambar berdasarkan pada</p>	<p>Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model simulasi dinamis yang lebih canggih untuk memprediksi dampak ledakan, termasuk interaksi antara tekanan ledakan dan fragmen yang tersebar, serta dampaknya terhadap berbagai jenis struktur bangunan. Simulasi ini bisa mencakup lebih banyak faktor seperti variasi dalam kepadatan material</p>

No	Nama dan Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Penelitian yang disarankan
			kemungkinan mematikan 50% yang mempertimbangkan kepadatan serangan dan energi kinetik fragmen. Zona mematikan yang dianalisis cukup sesuai dengan tingkat kerusakan aktual yang diamati. Dengan teknik rekayasa forensik yang diusulkan, manajemen dan kebijakan keamanan dalam negeri bisa ditingkatkan demi komunitas yang lebih aman.	bangunan dan keberadaan elemen struktural pelindung.

