



Terbit *online* pada laman:

SEMINAR NASIONAL INOVASI, RISET, DAN TEKNOLOGI (SINERGI)



Original/Literature Review

STUDI FORENSIK DAN PENGUATAN STRUKTUR PADA BANGUNAN HUNIAN

*Arief Kurnia**, *Alex Kurniawand*

Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi : 18 September 2025

Revisi Akhir : 17 Oktober 2025

Diterbitkan *Online* : 4 Mei 2026

KATA KUNCI

Bangunan hunian, Forensik struktural,
Lendutan, Penguatan struktur, Profil baja

*KORESPONDENSI

E-mail: arief.kurnia6329@grad.unri.ac.id

A B S T R A K

Bangunan hunian memerlukan standar keamanan struktural tinggi untuk melindungi penghuni dari risiko kegagalan struktur yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor kompleks. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi kerusakan struktur menggunakan metodologi forensik engineering, mengidentifikasi faktor penyebab kegagalan, dan merumuskan strategi penguatan yang efektif. Metodologi investigasi forensik diterapkan pada bangunan rumah kost dua lantai di Tembilahan, Riau, melalui inspeksi visual komprehensif, pengujian hammer test, dan analisis struktural menggunakan ETABS. Hasil investigasi menunjukkan lendutan signifikan pada balok (25-30 mm) dan pelat lantai dua (20-25 mm) yang disebabkan oleh faktor desain struktural dan manajemen beban konstruksi, bukan degradasi material atau ketidakstabilan pondasi. Pengujian material memperlihatkan kuat tekan beton konsisten f_c 20 MPa sesuai spesifikasi K-250. Implementasi penguatan menggunakan profil baja WF 200×100×5,5×8 berhasil menciptakan sistem komposit beton-baja yang efektif mengurangi deformasi dan memulihkan serviceability struktur. Penelitian mengkonfirmasi efektivitas metodologi forensik engineering dalam menyelesaikan kegagalan struktur bangunan hunian dan merekomendasikan pengembangan protokol monitoring jangka panjang.

No ISSN 3124-7539 © 2026 The Authors. Dipublikasi

oleh Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Peer review under the responsibility of the scientific committee of the SINERGI

DOI: 10.21009/sinergi.v2i1.67651

1. PENDAHULUAN

Bangunan hunian merupakan infrastruktur vital yang memerlukan standar keamanan dan kinerja struktural yang tinggi untuk melindungi penghuni dari risiko kegagalan struktur. Rekayasa forensik dalam konteks bangunan hunian melibatkan penerapan prinsip-prinsip rekayasa untuk menyelidiki kerusakan atau kegagalan struktur yang terjadi selama masa konstruksi maupun operasional. Metodologi investigasi forensik telah berkembang pesat dengan mengintegrasikan teknologi canggih dan pendekatan analitis komprehensif untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan struktur [1]. Pendekatan ini menjadi sangat relevan mengingat kompleksitas struktur bangunan hunian modern dan berbagai tantangan teknis yang dihadapi dalam proses konstruksi. Investigasi forensik pada bangunan hunian bertujuan untuk menjawab pertanyaan fundamental mengenai karakteristik kerusakan, tingkat keparahan, waktu terjadinya, dan faktor penyebab kegagalan struktur. Metodologi analisis struktural yang sistematis memerlukan pendekatan multi-disiplin untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan secara komprehensif dan merumuskan strategi penguatan yang efektif [2]. Proses investigasi tidak hanya berfokus pada remediasi kerusakan yang telah terjadi, tetapi juga berperan dalam mencegah terjadinya kegagalan serupa pada bangunan hunian di masa mendatang.

Masa pakai struktur bangunan hunian menjadi pertimbangan krusial dalam desain dan pemeliharaan infrastruktur. Bangunan beton bertulang untuk fungsi hunian umumnya dirancang dengan umur layanan 60-80 tahun untuk bangunan komersial dan residensial. Namun, berbagai faktor dapat mempercepat degradasi dan mengurangi efektivitas masa pakai struktur bangunan hunian, sehingga memerlukan implementasi sistem monitoring dan pemeliharaan yang tepat. Kegagalan struktur pada bangunan hunian dapat disebabkan oleh berbagai faktor kompleks yang saling berinteraksi. Faktor umur bangunan merupakan proses degradasi alami yang bersifat *time dependent*, di mana terjadi penurunan kualitas material dan kemampuan struktur dalam menahan beban desain. Proses ini dapat dipercepat oleh fenomena *creep* pada material beton, *fatigue* akibat pembebanan siklik, dekarbonisasi akibat paparan lingkungan ekstrem, dan dampak gaya seismik yang dapat mengakibatkan kerusakan progresif pada komponen struktural.

Kondisi geoteknis lokasi memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja struktur bangunan hunian. Variabilitas karakteristik tanah di Indonesia mengharuskan dilakukannya investigasi geoteknis komprehensif untuk menentukan sistem pondasi yang optimal. Kondisi tanah yang tidak stabil dapat menyebabkan penurunan tidak seragam (*differential settlement*) yang menimbulkan tegangan tambahan pada struktur atas. Fluktuasi muka air tanah juga dapat mengakibatkan permasalahan seperti pengangkatan (*uplift*), rembesan, dan perubahan daya dukung tanah yang mempengaruhi stabilitas struktur bangunan hunian. Faktor lingkungan Indonesia yang beriklim tropis dengan intensitas curah hujan tinggi, variabilitas suhu harian yang signifikan, dan potensi gempa pada beberapa wilayah memerlukan pertimbangan khusus dalam desain struktur bangunan hunian. Beban angin yang tidak diperhitungkan dengan tepat dapat menyebabkan kegagalan struktur, terutama pada bangunan dengan geometri kompleks atau ketinggian tertentu. Risiko gempa bumi sebagai beban dinamis yang tidak dapat

diprediksi secara pasti memerlukan implementasi sistem struktur tahan gempa yang memadai.

Kualitas material konstruksi dan pelaksanaan pekerjaan menjadi faktor determinan dalam kinerja jangka panjang bangunan hunian. Pemilihan material yang tidak sesuai dengan kondisi lingkungan operasional atau spesifikasi desain dapat menyebabkan degradasi prematur struktur. Kesalahan dalam tahap perencanaan, seperti penggunaan asumsi beban yang tidak tepat, analisis struktur yang tidak akurat, atau pemilihan sistem struktur yang tidak optimal, dapat mengakibatkan kegagalan struktur dalam jangka pendek. Kesalahan pelaksanaan konstruksi merupakan faktor signifikan yang sering menyebabkan kegagalan struktur bangunan hunian. Ketidapatuhan terhadap spesifikasi teknis, penggunaan material di bawah standar, atau ketidakmampuan pelaksana dalam menerapkan teknologi konstruksi yang tepat dapat mengurangi kinerja dan durabilitas struktur. Pengawasan konstruksi yang tidak memadai juga berkontribusi terhadap terjadinya defek konstruksi yang dapat berujung pada kegagalan struktur.

Perubahan fungsi bangunan hunian dari rencana awal merupakan fenomena yang umum terjadi namun sering diabaikan dampaknya terhadap kinerja struktur. Konversi rumah tinggal menjadi bangunan komersial seperti rumah kost, penambahan tingkat bangunan, atau perubahan tata ruang dapat mengubah pola pembebanan dan distribusi gaya pada struktur eksisting. Hal ini memerlukan evaluasi struktural komprehensif dan implementasi sistem penguatan yang tepat. Perkembangan teknologi penguatan struktur memberikan solusi inovatif untuk meningkatkan kapasitas bangunan hunian yang mengalami kerusakan atau perubahan fungsi. Sistem penguatan menggunakan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) telah terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan lentur, geser, dan aksial elemen struktur beton bertulang dengan keunggulan dibandingkan metode konvensional. Aplikasi FRP dalam penguatan struktur menawarkan solusi yang berkelanjutan dengan rasio kekuatan-berat yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, dan kemudahan instalasi yang minimal mengganggu fungsi operasional bangunan.

Teknologi FRP untuk penguatan struktur beton telah mengalami perkembangan signifikan dalam aspek durabilitas dan kinerja mekanis pada kondisi lingkungan yang beragam. Metode penguatan lainnya meliputi *jacketing* beton bertulang, sistem dinding geser tambahan, dan aplikasi sistem bracing baja yang disesuaikan dengan karakteristik struktur bangunan hunian. Evaluasi kinerja terhadap kondisi ekstrem seperti kebakaran juga menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan sistem penguatan FRP [3]. Klasifikasi kerusakan struktur pada bangunan hunian dapat dikategorikan berdasarkan tingkat keparahan dan dampaknya terhadap fungsi bangunan. Kerusakan arsitektural umumnya berupa retak-retak superfisial pada elemen non-struktural dengan lebar maksimal 1 mm yang tidak mempengaruhi stabilitas struktur. Kerusakan fungsional mempengaruhi kenyamanan penghuni dan operasional bangunan namun tidak mengancam keselamatan struktural. Kerusakan struktural merupakan jenis kerusakan kritis yang berkaitan dengan stabilitas dan kemampuan struktur dalam mendukung beban, termasuk potensi keruntuhan parsial atau total.

Kerusakan tersembunyi (*latent damage*) pada bangunan hunian sering tidak dapat dideteksi melalui inspeksi visual rutin

dan memerlukan investigasi menggunakan teknologi pengujian non-destruktif. Jenis kerusakan ini dapat berkembang secara progresif dan berpotensi menyebabkan kegagalan struktur yang tidak terduga. Implementasi program inspeksi berkala dan pemantauan kondisi struktur menjadi penting untuk deteksi dini kerusakan tersembunyi. Proses investigasi forensik pada bangunan hunian memerlukan pendekatan sistematis yang mengintegrasikan pengamatan visual, pengujian material, analisis struktural, dan evaluasi kondisi lingkungan. Dokumentasi komprehensif menggunakan teknologi digital dan instrumen pengukuran presisi diperlukan untuk mengidentifikasi pola kerusakan dan menentukan mekanisme kegagalan. Implementasi metodologi investigasi yang terstandarisasi menjadi kunci keberhasilan dalam menentukan penyebab kegagalan struktur dengan akurasi tinggi [4].

Ahli forensik engineering (*forensic engineer*) berperan krusial dalam proses investigasi dan remediasi struktur bangunan hunian yang mengalami kerusakan. Kualifikasi seorang forensic engineer meliputi keahlian teknis spesifik, pengetahuan mendalam tentang perilaku struktur, dan pengalaman praktis dalam investigasi kegagalan struktur. Teknologi penguatan struktur menggunakan FRP telah menunjukkan efektivitas tinggi namun masih menghadapi tantangan dalam aplikasi praktis yang memerlukan penelitian lanjutan [5]. Penelitian ini difokuskan pada studi kasus investigasi forensik dan strategi penguatan struktur bangunan hunian berupa rumah kost dua lantai yang mengalami lendutan struktur selama tahap konstruksi. Investigasi forensik dilakukan untuk mengidentifikasi faktor penyebab lendutan, mengevaluasi tingkat kerusakan struktural, dan merumuskan strategi penguatan yang memungkinkan kelanjutan konstruksi dengan tetap mempertahankan standar keamanan struktural.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kondisi kerusakan struktur menggunakan metodologi forensik engineering, mengidentifikasi faktor-faktor penyebab kegagalan struktur, mengevaluasi dampak kerusakan terhadap integritas struktural keseluruhan, dan merumuskan strategi penguatan struktur yang efektif dan ekonomis. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metodologi investigasi forensik pada bangunan hunian dan formulasi panduan praktis penanganan kerusakan struktur serupa. Signifikansi penelitian terletak pada aplikasi praktis metodologi forensik engineering pada kasus nyata bangunan hunian di Indonesia, yang dapat memberikan pembelajaran berharga bagi praktisi konstruksi dalam menangani permasalahan serupa. Penelitian ini juga diharapkan dapat meningkatkan pemahaman tentang mekanisme kegagalan struktur bangunan hunian dan efektivitas berbagai teknik penguatan struktur dalam konteks kondisi lingkungan dan praktik konstruksi Indonesia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar Rekayasa Forensik Struktural

Rekayasa forensik struktural merupakan disiplin ilmu yang mengintegrasikan prinsip-prinsip teknik sipil, analisis material, dan metodologi investigasi untuk menyelidiki kegagalan struktur bangunan. Pendekatan ini berkembang sebagai respons terhadap meningkatnya kompleksitas struktur bangunan modern dan kebutuhan untuk memahami mekanisme kegagalan secara

komprehensif. Metodologi forensik struktural mencakup tahapan pengumpulan bukti fisik, analisis material, rekonstruksi kondisi pembebanan, dan evaluasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kegagalan struktur. Penerapan rekayasa forensik dalam konteks bangunan hunian memerlukan pendekatan multidisiplin yang mempertimbangkan aspek struktural, geoteknis, material, dan lingkungan. Proses investigasi dimulai dengan dokumentasi komprehensif kondisi kerusakan, diikuti analisis penyebab kegagalan melalui kombinasi pengamatan visual, pengujian tanpa merusak, dan pemodelan struktural. Karakteristik unik bangunan hunian, termasuk variabilitas beban operasional dan masa pakai yang panjang, menuntut metodologi investigasi yang disesuaikan dengan kondisi spesifik struktur residensial.

Perkembangan terkini dalam rekayasa forensik menekankan pentingnya integrasi teknologi digital dan instrumen pengukuran presisi untuk meningkatkan akurasi identifikasi penyebab kegagalan. Teknologi fotogrametri, pemindaian laser, dan radar penembus tanah telah menjadi alat standar dalam investigasi forensik untuk menghasilkan dokumentasi tiga dimensi yang akurat dari kondisi kerusakan struktur. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap pola kerusakan dan mekanisme kegagalan yang tidak dapat diidentifikasi melalui inspeksi visual konvensional. Standarisasi metodologi forensik struktural mengacu pada pedoman internasional seperti Perkumpulan Insinyur Sipil Amerika dan Lembaga Insinyur Struktur yang menetapkan protokol investigasi sistematis. Penerapan standar ini dalam konteks praktik konstruksi Indonesia memerlukan adaptasi terhadap kondisi iklim tropis, karakteristik material lokal, dan regulasi teknis yang berlaku. Aspek hukum dari rekayasa forensik juga menjadi pertimbangan penting, mengingat implikasi hukum dari temuan investigasi terhadap tanggung jawab profesional dan kompensasi kerusakan.

2.2 Karakteristik Kegagalan Struktur Bangunan Hunian

Kegagalan struktur bangunan hunian menunjukkan karakteristik yang berbeda dengan struktur komersial atau industri, terutama dalam hal pola pembebanan, kondisi lingkungan operasional, dan ekspektasi masa pakai. Analisis statistik kegagalan struktur menunjukkan bahwa sebagian besar kasus terjadi akibat kombinasi faktor desain yang tidak memadai, pelaksanaan konstruksi yang tidak sesuai spesifikasi, dan perubahan kondisi operasional selama masa pakai bangunan. Pemahaman karakteristik ini menjadi fundamental dalam pengembangan metodologi pencegahan dan mitigasi kegagalan struktur. Klasifikasi kegagalan struktur berdasarkan tingkat keparahan meliputi kegagalan kemampuan layanan, batas ultimit, dan keruntuhan progresif. Kegagalan kemampuan layanan umumnya berupa lendutan berlebihan, getaran, atau retak yang mempengaruhi fungsi dan kenyamanan penghuni tanpa mengancam keselamatan struktural. Batas ultimit menunjukkan kondisi di mana struktur mencapai kapasitas maksimum dan berpotensi mengalami keruntuhan parsial atau total. Keruntuhan progresif merepresentasikan skenario kegagalan berantai di mana kegagalan satu elemen memicu keruntuhan sistem struktur secara keseluruhan. Faktor temporal dalam kegagalan struktur menunjukkan variasi yang signifikan, dengan kegagalan dini umumnya berkaitan dengan cacat konstruksi atau kesalahan desain, sedangkan kegagalan jangka panjang lebih berkorelasi dengan degradasi material dan akumulasi kerusakan kelelahan.

Kondisi lingkungan Indonesia yang beriklim tropis dengan kelembaban tinggi, fluktuasi suhu, dan intensitas radiasi sinar ungu yang tinggi mempercepat proses degradasi material dan mengurangi masa pakai efektif struktur bangunan hunian. Interaksi antara faktor struktural dan non-struktural dalam kegagalan bangunan hunian menunjukkan kompleksitas yang memerlukan pendekatan holistik dalam analisis. Perubahan fungsi bangunan, modifikasi struktur tanpa evaluasi teknis, dan akumulasi beban mati tambahan merupakan faktor non-struktural yang sering diabaikan namun berkontribusi signifikan terhadap kegagalan struktur. Penerapan monitoring kondisi struktur secara berkala menjadi strategi preventif yang efektif dalam mendeteksi dini indikator kegagalan potensial. Dampak kegagalan struktur bangunan hunian tidak hanya terbatas pada aspek teknis, tetapi juga mencakup implikasi sosial, ekonomi, dan psikologis bagi penghuni. Biaya remediasi kegagalan struktur umumnya jauh lebih tinggi dibandingkan penerapan desain dan konstruksi yang memadai sejak awal. Aspek ini menegaskan pentingnya investasi dalam jaminan kualitas selama tahap desain dan konstruksi untuk meminimalkan risiko kegagalan struktur di masa depan [6].

2.3 Teknologi Penguatan Struktur Modern

Perkembangan teknologi penguatan struktur telah mengalami evolusi signifikan dengan pengenalan material komposit dan metodologi instalasi yang inovatif. Polimer Diperkuat Serat telah menjadi solusi dominan dalam penguatan struktur beton bertulang karena keunggulan rasio kekuatan-berat yang tinggi, ketahanan korosi, dan kemudahan aplikasi. Sistem polimer diperkuat serat tersedia dalam berbagai konfigurasi termasuk serat karbon, serat kaca, dan serat aramid dengan karakteristik mekanis yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik penguatan. Mekanisme transfer gaya dalam sistem penguatan polimer diperkuat serat bergantung pada kualitas ikatan antara material komposit dan substrat beton. Penelitian terkini menunjukkan bahwa efektivitas penguatan polimer diperkuat serat dipengaruhi oleh faktor persiapan permukaan, kondisi lingkungan selama instalasi, dan kompatibilitas termal antara komposit dan beton. Penerapan sistem monitoring sensor tertanam dalam penguatan memungkinkan evaluasi kinerja waktu nyata dan deteksi dini degradasi ikatan yang dapat mengakibatkan kegagalan sistem penguatan [7].

Alternatif teknologi penguatan meliputi sistem selubung beton bertulang, aplikasi profil baja struktural, dan penerapan sistem prategang eksternal. Setiap metodologi memiliki keunggulan dan keterbatasan spesifik yang harus dievaluasi berdasarkan kondisi struktur eksisting, kebutuhan peningkatan kapasitas, dan batasan ekonomis. Sistem selubung memberikan peningkatan kapasitas yang signifikan namun menambah beban mati struktur, sedangkan profil baja menawarkan fleksibilitas dalam instalasi dengan penambahan berat yang relatif minimal. Integrasi teknologi digital dalam desain penguatan struktur memungkinkan optimalisasi konfigurasi penguatan berdasarkan analisis elemen hingga dan algoritma optimasi struktural. Pemodelan Informasi Bangunan telah diimplementasikan untuk visualisasi tiga dimensi sistem penguatan dan koordinasi dengan elemen struktur eksisting. Pendekatan ini meningkatkan akurasi desain dan meminimalkan konflik instalasi yang dapat mempengaruhi efektivitas sistem penguatan [8].

2.4 Metodologi Analisis Struktural untuk Evaluasi Kerusakan

Metodologi analisis struktural untuk evaluasi kerusakan telah berkembang dari pendekatan konvensional berbasis perhitungan manual menuju sistem terintegrasi yang memanfaatkan analisis struktural komputasional dan kecerdasan buatan. Penerapan metode analisis elemen hingga memungkinkan pemodelan detail kondisi kerusakan dan prediksi perilaku struktur di bawah berbagai skenario pembebanan. Perangkat lunak analisis struktural telah menjadi alat standar dalam evaluasi kondisi struktur yang mengalami kerusakan. Karakterisasi material struktur eksisting merupakan tahapan kritis dalam analisis struktural yang memerlukan kombinasi pengujian merusak dan tidak merusak. Uji inti untuk menentukan kuat tekan beton, uji tarik untuk evaluasi kekuatan ikatan tulangan, dan pengujian ultrasonik untuk deteksi rongga internal merupakan metodologi standar yang diimplementasikan. Variabilitas kuat material dalam struktur eksisting memerlukan pendekatan statistik dalam analisis untuk mengakomodasi ketidakpastian dalam parameter material [9].

Pemodelan kondisi kerusakan dalam analisis struktural memerlukan idealisasi yang akurat dari kondisi struktur aktual untuk menghasilkan prediksi perilaku yang andal. Degradasi kekakuan elemen yang mengalami kerusakan, modifikasi kondisi batas akibat kerusakan sambungan, dan redistribusi gaya internal merupakan aspek yang harus dipertimbangkan dalam pemodelan. Validasi model analitis melalui perbandingan dengan hasil pengukuran uji lapangan menjadi esensial untuk memastikan akurasi prediksi. Analisis nonlinier menjadi prasyarat dalam evaluasi struktur yang mengalami kerusakan signifikan, mengingat perilaku material dan geometri yang telah melampaui rentang elastis linier. Penerapan nonlinieritas material, nonlinieritas geometri, dan nonlinieritas kontak dalam model analitis memerlukan keahlian tinggi dan sumber daya komputasi yang memadai. Interpretasi hasil analisis nonlinier juga memerlukan pemahaman mendalam tentang perilaku struktur untuk menghasilkan rekomendasi penguatan yang tepat.

2.5 Strategi Remediasi dan Rehabilitasi Struktur

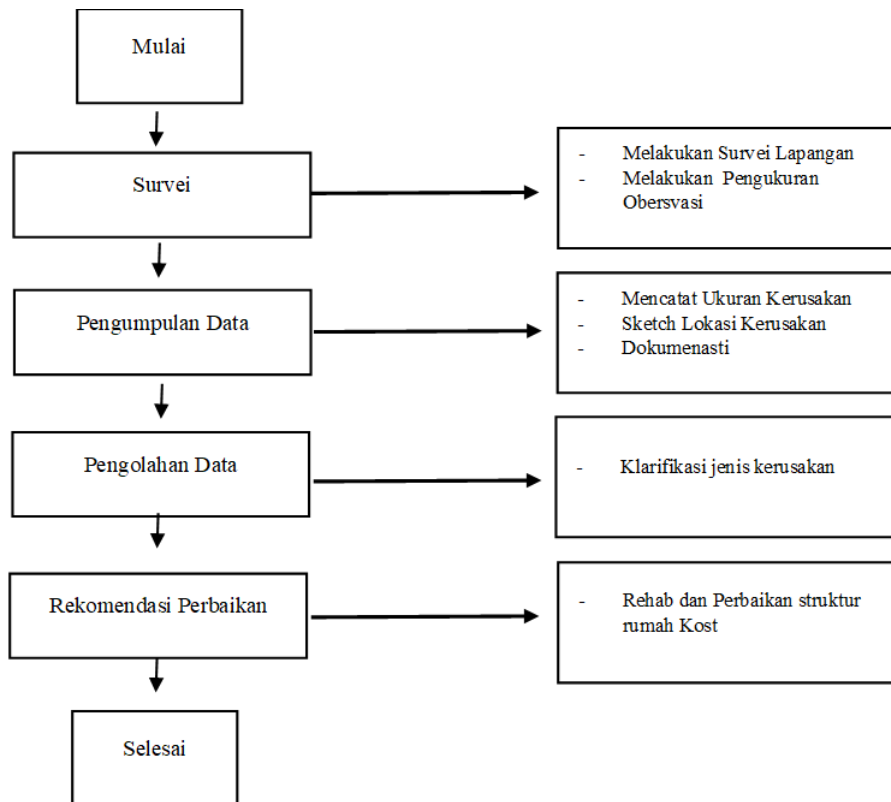
Strategi remediasi dan rehabilitasi struktur bangunan hunian memerlukan pendekatan sistematis yang mengintegrasikan aspek teknis, ekonomis, dan operasional untuk menghasilkan solusi optimal. Hierarki strategi remediasi dimulai dari perbaikan untuk kerusakan lokal, rehabilitasi untuk peningkatan kapasitas elemen spesifik, hingga retrofit untuk peningkatan sistem struktur secara komprehensif. Pemilihan strategi yang tepat berdasarkan tingkat kerusakan, batasan ekonomis, dan tujuan kinerja yang ingin dicapai. Teknologi material perbaikan telah mengalami kemajuan signifikan dengan pengembangan beton kinerja tinggi, sistem injeksi epoksi, dan mortar termodifikasi polimer. Material perbaikan modern menawarkan karakteristik yang superior dalam hal durabilitas, workabilitas, dan kompatibilitas dengan substrat eksisting. Kriteria seleksi untuk material perbaikan mencakup kekuatan mekanis, modulus elastisitas, koefisien ekspansi termal, dan permeabilitas yang sesuai dengan material struktur asli [10].

Penerapan sistem penyangga sementara selama proses remediasi merupakan aspek kritis yang memerlukan desain struktural yang memadai untuk mempertahankan stabilitas

struktur eksisting. Sistem perancah, sistem dongkrak, dan bracing sementara harus didimensi untuk menahan beban konstruksi ditambah beban operasional selama periode remediasi. Koordinasi antara kontraktor, insinyur struktur, dan penghuni bangunan penting untuk meminimalkan gangguan terhadap fungsi bangunan selama proses rehabilitasi. Kontrol kualitas dan jaminan kualitas dalam penerapan remediasi memerlukan protokol pengujian yang komprehensif untuk memastikan efektivitas sistem penguatan. Metode pengujian tanpa merusak seperti pengujian ultrasonik, palu pantulan, dan uji tarik lepas diimplementasikan untuk verifikasi kualitas pekerjaan perbaikan. Dokumentasi komprehensif dari proses remediasi dan hasil pengujian penting untuk perencanaan pemeliharaan masa depan dan tujuan garansi [5].

3. METODOLOGI

Pengamatan Forensik



Gambar 1. Bagan Alir Pengamatan

Sumber: Penyusun

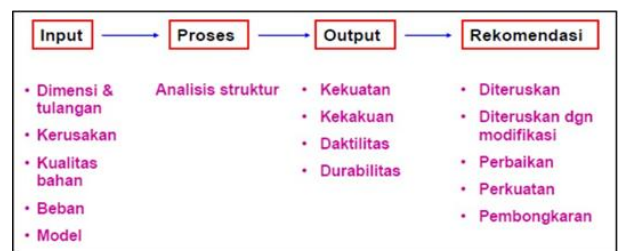
Tahapan awal meliputi inspeksi visual menyeluruh untuk mengklasifikasikan tingkat kerusakan berdasarkan kategori arsitektural, fungsional, dan struktural. Dokumentasi dilakukan menggunakan teknologi digital presisi untuk mengukur dimensi kerusakan dan mengidentifikasi pola distribusi damage [12]. Proses ini mengikuti protokol standar investigasi forensik yang mencakup pengamatan kondisi pondasi, struktur utama, dan elemen penunjang.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi kasus pada bangunan rumah kost yang mengalami lendutan struktur selama tahap konstruksi. Objek penelitian berlokasi di Tembilahan, Provinsi Riau dengan spesifikasi bangunan dua lantai milik Ibu Nisa. Metodologi investigasi forensik yang diterapkan mengacu pada standar rekayasa forensik struktural untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan dan merumuskan strategi penguatan yang optimal. Pengumpulan data primer dilakukan melalui *visual inspection* komprehensif dengan dokumentasi fotografis detail kondisi kerusakan struktur. Teknik ini melibatkan pengamatan sistematis terhadap elemen struktural, sambungan, dan komponen bangunan untuk mengidentifikasi pola kerusakan dan mekanisme kegagalan [11]. Data sekunder diperoleh melalui wawancara terstruktur dengan pemilik bangunan dan review dokumen konstruksi yang tersedia.

Tahapan Investigasi Forensik

1. Inspeksi Visual dan Dokumentasi

2. Analisis Struktural



Gambar 2. Bagan Alir Perbaikan

Sumber: Penyusun

Evaluasi kapasitas struktur dilakukan melalui analisis beban dan perhitungan kekuatan elemen struktural eksisting. Metodologi ini mengintegrasikan prinsip mekanika struktur untuk menentukan tingkat keamanan dan kebutuhan penguatan. Identifikasi faktor penyebab kegagalan dilakukan melalui analisis multi-parameter yang mempertimbangkan aspek material, pelaksanaan konstruksi, dan kondisi lingkungan operasional.

3. Formulasi Strategi Penguatan

Rekomendasi penguatan didasarkan pada hasil analisis forensik dengan mempertimbangkan efektivitas teknis dan ekonomis. Alternatif solusi meliputi aplikasi *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*, *jacketing* beton bertulang, dan sistem penguatan konvensional yang disesuaikan dengan karakteristik kerusakan [13]. Validitas hasil penelitian dipastikan melalui triangulasi data dari multiple sources dan cross-verification dengan standar teknis yang berlaku. Keterbatasan penelitian meliputi aksesibilitas lokasi pengamatan dan ketersediaan data historis konstruksi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Eksisting Struktur Bangunan

Investigasi forensik dilakukan pada bangunan rumah kost dua lantai yang berlokasi di Tembilahan, Provinsi Riau dengan tinggi per lantai ±4 meter. Karakteristik struktur terdiri dari sistem pondasi cerucuk diameter 10 cm dengan kedalaman 4-6 meter, struktur atas berupa rangka beton bertulang, dan komponen arsitektural berupa dinding bata dengan tingkat penyelesaian yang bervariasi antara lantai satu dan lantai dua. Evaluasi komprehensif menunjukkan bahwa bangunan mengalami distress struktural berupa lendutan pada elemen balok dan pelat lantai dua selama tahap konstruksi. Fenomena ini mengindikasikan adanya ketidaksesuaian antara kapasitas struktur dengan beban yang diterima, sehingga memerlukan investigasi mendalam untuk mengidentifikasi faktor penyebab dan merumuskan strategi penguatan yang efektif [14].

Analisis Forensik Komponen Struktur

1. Evaluasi Struktur Bawah (Pondasi)

Pemeriksaan kondisi pondasi dilakukan secara tidak langsung melalui observasi indikator kerusakan pada struktur atas. Hasil investigasi menunjukkan tidak adanya tanda-tanda *differential settlement* atau kegagalan sistem pondasi, yang ditandai dengan tidak ditemukannya retak pada dinding, deformasi lantai, atau ketidakrataan permukaan struktur.

Tabel 1. Hasil Survei Pelat Lantai

Pengamatan Visual terhadap Kerusakan	Keterangan
<input type="checkbox"/> Tidak Rusak	Kerusakan kondisi pelat lantai berdasarkan lokasi lantai.
<input type="checkbox"/> Rusak Ringan	
<input type="checkbox"/> Rusak Sedang	- Pelat Lantai lantai 1 kondisi malam keadaan baik.
<input type="checkbox"/> Rusak Berat	- Pelat Lantai lantai 2 mengalami lendutan lendutan berkisar 20-25 mm berdasarkan pengamatan visual

Sumber : diolah oleh penyusun Gambar: dokumentasi oleh Penyusun

Kondisi ini mengonfirmasi bahwa sistem pondasi cerucuk berfungsi optimal dalam mentransfer beban struktur ke lapisan tanah pendukung. Stabilitas pondasi yang baik mengindikasikan bahwa permasalahan struktural yang terjadi bukan disebabkan oleh kegagalan sistem fondasi, melainkan faktor lain yang berkaitan dengan struktur atas [14].

2. Pengamatan Visual Struktur Atas

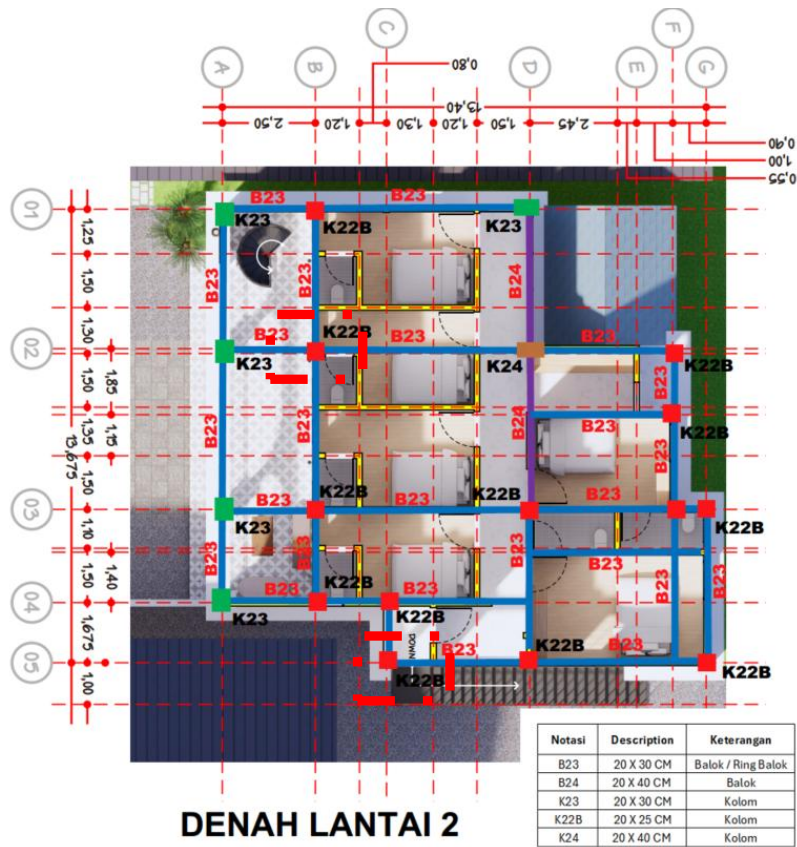
Tabel 2. Hasil Survei kolom

Pengamatan Visual terhadap Kerusakan	Keterangan
<input type="checkbox"/> Tidak Rusak	Keseluruhan kolom yang ada pada bangunan, kolom beton dalam gedung semua dalam keadaan baik. Pengecekan terhadap kolom dilakukan dengan uji hammer test, yang hasilnya baik dan disajikan dalam Tabel Pengujian.
<input type="checkbox"/> Rusak Ringan	
<input type="checkbox"/> Rusak Sedang	
<input type="checkbox"/> Rusak Berat	

Sumber : diolah oleh penyusun Gambar: dokumentasi oleh Penyusun

3. Evaluasi Struktur Atas

Inspeksi visual dan pengujian *hammer test* pada seluruh kolom beton menunjukkan kondisi yang memuaskan tanpa indikasi kerusakan struktural. Hasil evaluasi mengkonfirmasi bahwa elemen kolom memiliki integritas struktural yang baik dan mampu menjalankan fungsinya sebagai elemen penahan beban vertikal.



Gambar 3. Denah Lokasi Pengambilan Foto Kolom

Dokumentasi visual kolom lantai satu dan lantai dua menunjukkan kondisi permukaan beton yang homogen tanpa retak atau spalling yang signifikan. Hal ini mengindikasikan

bahwa proses konstruksi kolom telah dilaksanakan sesuai dengan standar teknis yang berlaku.



Gambar 4. Kolom Lantai 1



Gambar 5. Kolom Lantai 2

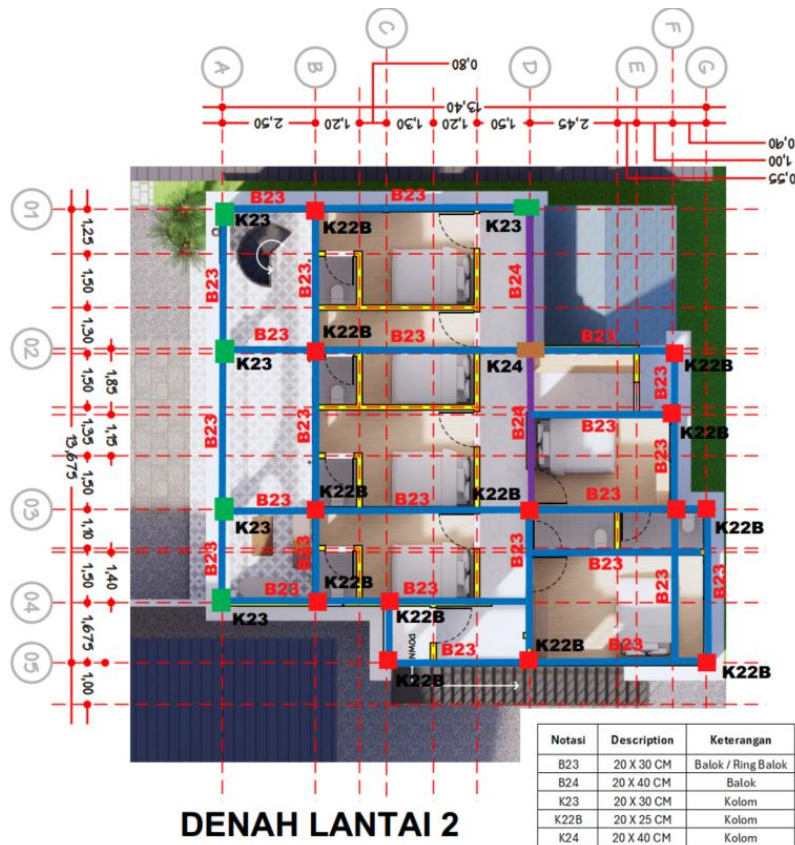
Kondisi kolom yang baik membuktikan bahwa sistem struktur vertikal tidak mengalami kegagalan dan mampu mendukung beban gravitasi dengan memadai. Evaluasi balok mengungkapkan adanya lendutan yang signifikan pada balok lantai dua dengan magnitudo 25-30 mm berdasarkan pengamatan visual. Lendutan ini melampaui batas serviceability yang diizinkan dalam standar perencanaan struktur beton bertulang, yang umumnya membatasi lendutan maksimum sebesar $L/250$ untuk kondisi beban kerja [15].

Tabel 3. Hasil Survei Balok

Pengamatan Visual terhadap Kerusakan	Keterangan
<input type="checkbox"/> Tidak Rusak	Kerusakan kondisi balok berdasarkan lokasi balok. - Balok lantai 1 mengalami lendutan lendutan berkisar 25-30 mm berdasarkan pengamatan visua - Ring Balok dalam kondisi Balok
<input type="checkbox"/> Rusak Ringan	
<input type="checkbox"/> Rusak Sedang	
<input type="checkbox"/> Rusak Berat	

Sumber : diolah oleh penyusun Gambar: dokumentasi oleh Penyusun

Fenomena lendutan berlebihan pada balok mengindikasikan ketidakcukupan momen inersia penampang atau kekuatan lentur elemen struktur dalam menahan beban yang bekerja. Ring balok menunjukkan kondisi yang baik, mengkonfirmasi bahwa permasalahan terlokalisasi pada balok bentang panjang.



Gambar 6. Denah Lokasi Pengambilan Foto Balok

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa lendutan balok berkorelasi dengan distribusi beban konstruksi dan kemungkinan adanya beban prematur selama tahap pelaksanaan yang melebihi kapasitas desain struktural. Pelat lantai dua mengalami lendutan 20-25 mm yang mengikuti pola deformasi balok penumpu. Kondisi ini mengkonfirmasi bahwa sistem pelat dan balok bekerja secara komposit, sehingga kegagalan pada satu elemen mempengaruhi kinerja elemen lainnya dalam sistem struktural.

Tabel 4. Hasil Survei Pelat Lantai

Pengamatan Visual terhadap Kerusakan	Keterangan
<input type="checkbox"/> Tidak Rusak	Kerusakan kondisi pelat lantai berdasarkan lokasi lantai.
<input type="checkbox"/> Rusak Ringan	
<input type="checkbox"/> Rusak Sedang	
<input type="checkbox"/> Rusak Berat	
	- Pelat Lantai lantai 1 kondisi malam keadaan baik.
	- Pelat Lantai lantai 2 mengalami lendutan lendutan berkisar 20-25 mm berdasarkan pengamatan visual

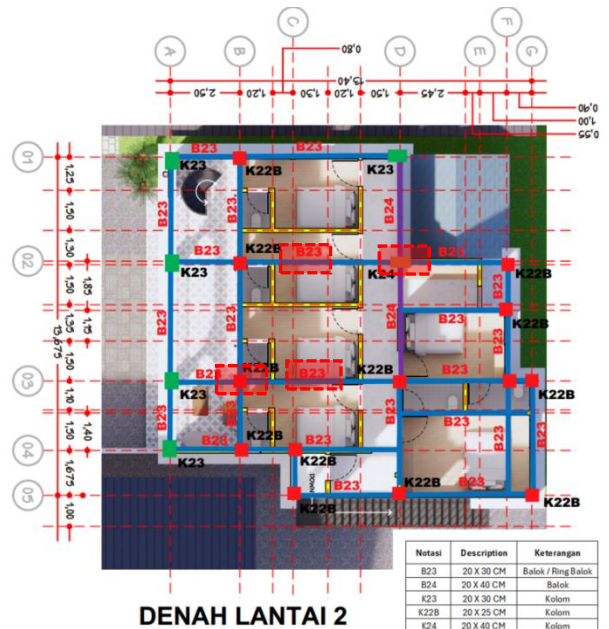
Sumber : diolah oleh penyusun Gambar: dokumentasi oleh Penyusun

Pelat lantai satu menunjukkan kondisi yang baik tanpa indikasi lendutan atau retak, mengkonfirmasi bahwa permasalahan struktural terpusat pada lantai dua. Perbedaan kondisi ini mengindikasikan adanya variasi beban atau kondisi konstruksi antara kedua lantai.

4. Karakteristik Material Struktural

Pengujian *hammer test* dilakukan pada multiple lokasi untuk mengevaluasi kekuatan tekan beton eksisting. Metodologi

pengujian mengacu pada SNI 6880-2016 tentang Spesifikasi Beton Struktural dengan pengambilan minimal tiga titik uji per area yang diidentifikasi berpotensi mengalami degradasi kekuatan.



Gambar 7. Denah Lokasi Pengambilan Foto Uji Hammer Test

Hasil pengujian menunjukkan kuat tekan beton karakteristik sebesar 250 kg/cm² (K-250) atau setara dengan f_c 20 MPa untuk seluruh elemen struktural. Konsistensi nilai kuat tekan ini mengkonfirmasi bahwa kualitas material beton

memenuhi spesifikasi desain dan bukan merupakan faktor penyebab kegagalan struktural [15].

Identifikasi Faktor Penyebab Kegagalan

Analisis forensik mengidentifikasi beberapa faktor potensial yang berkontribusi terhadap terjadinya lendutan struktural. Faktor primary meliputi kemungkinan underdesign pada elemen balok dan pelat lantai dua, beban konstruksi prematur yang melebihi kapasitas struktur selama tahap pelaksanaan, dan potensi ketidaksesuaian antara asumsi beban desain dengan kondisi aktual di lapangan. Investigasi menunjukkan bahwa kualitas material dan workmanship tidak menjadi faktor dominan dalam kegagalan struktur, mengingat hasil *hammer test* yang konsisten dan kondisi kolom yang baik. Hal ini mengalihkan fokus investigasi pada aspek desain struktural dan manajemen beban konstruksi. Kondisi geoteknis yang stabil, sebagaimana diindikasikan oleh kinerja pondasi yang baik, menegaskan bahwa faktor lingkungan eksternal bukan penyebab utama kegagalan. Analisis ini sejalan dengan karakteristik kegagalan yang terlokalisasi pada struktur atas tanpa melibatkan sistem pondasi [12].

Strategi Penguatan Struktur

1. Metodologi Penguatan

Berdasarkan hasil analisis forensik, strategi penguatan yang diterapkan berupa penambahan profil baja WF 200 × 100 × 5,5 × 8 sebagai elemen penunjang struktural. Metodologi ini dipilih karena kemudahan instalasi, minimal gangguan terhadap fungsi bangunan, dan efektivitas dalam meningkatkan kapasitas lentur struktur eksisting. Desain penguatan dilakukan menggunakan analisis struktural dengan program ETABS untuk memastikan kecukupan kapasitas sistem struktur gabungan beton-baja dalam menahan beban desain. Pendekatan ini mengintegrasikan prinsip kompatibilitas deformasi antara elemen beton eksisting dan elemen baja tambahan (Kumar & Singh, 2024).

2. Implementasi Penguatan

Implementasi penguatan dilakukan secara sistematis dengan pemasangan profil baja WF sebagai elemen penunjang di bawah balok eksisting. Konfigurasi ini menciptakan sistem struktur komposit yang mampu mendistribusikan beban secara efektif dan mengurangi lendutan pada elemen beton. Sistem koneksi antara elemen baja dan beton dirancang untuk memastikan transfer gaya yang efektif sambil mempertahankan integritas struktural keseluruhan sistem. Monitoring deformasi selama dan setelah instalasi mengkonfirmasi efektivitas sistem penguatan dalam mengurangi lendutan struktur [10].

Evaluasi Efektivitas Penguatan

Evaluasi pasca-penguatan menunjukkan pengurangan signifikan lendutan pada balok dan pelat lantai dua. Sistem struktur gabungan beton-baja berhasil meningkatkan kekakuan dan kapasitas lentur struktur, sehingga memungkinkan kelanjutan konstruksi dengan tingkat keamanan yang memadai. Kinerja sistem penguatan memvalidasi pendekatan forensik yang diterapkan dalam mengidentifikasi penyebab kegagalan dan merumuskan solusi teknis yang efektif. Implementasi ini juga memberikan pembelajaran berharga mengenai pentingnya evaluasi kapasitas struktur selama tahap konstruksi dan manajemen beban yang tepat. Keberhasilan strategi penguatan mengkonfirmasi bahwa metodologi forensik engineering dapat memberikan solusi praktis dan ekonomis untuk mengatasi

kegagalan struktur pada bangunan hunian, sekaligus mempertahankan standar keselamatan struktural yang dipersyaratkan [13].

5. KESIMPULAN

Investigasi forensik terhadap bangunan rumah kost dua lantai di Tembilahan mengungkapkan karakteristik kegagalan struktural yang spesifik pada elemen balok dan pelat lantai dua dengan magnitude lendutan mencapai 25-30 mm dan 20-25 mm secara berturut-turut. Metodologi analisis forensik yang mengintegrasikan inspeksi visual, pengujian hammer test, dan evaluasi struktural menunjukkan bahwa kegagalan bukan disebabkan oleh degradasi material atau ketidakstabilan pondasi, melainkan berkaitan dengan aspek desain struktural dan manajemen beban konstruksi. Hasil pengujian material memperlihatkan konsistensi kuat tekan beton f_c 20 MPa pada seluruh elemen struktur, mengkonfirmasi kualitas material yang memadai sesuai spesifikasi K-250. Kondisi kolom dan pondasi cerucuk yang optimal memvalidasi bahwa permasalahan terlokalisasi pada sistem balok-pelat lantai dua. Identifikasi faktor penyebab mengarah pada kemungkinan underdesign elemen struktur atau pembebanan prematur selama tahap konstruksi yang melampaui kapasitas desain awal. Distribusi kerusakan yang tidak uniform antara lantai satu dan lantai dua mengindikasikan adanya variasi kondisi operasional atau beban tambahan yang tidak diperhitungkan dalam analisis desain original. Evaluasi komprehensif membuktikan bahwa integritas struktural keseluruhan sistem masih dapat dipertahankan melalui implementasi strategi penguatan yang tepat.

Implementasi strategi penguatan menggunakan profil baja WF 200×100×5,5×8 sebagai elemen penunjang berhasil menciptakan sistem struktur komposit beton-baja yang efektif mengurangi lendutan eksisting. Metodologi penguatan yang diterapkan mempertimbangkan kemudahan instalasi, minimal disruption terhadap fungsi bangunan, dan optimalisasi rasio biaya-manfaat dalam peningkatan kapasitas struktural. Analisis struktural menggunakan program ETABS memvalidasi kecukupan kapasitas sistem gabungan dalam menahan beban desain dengan faktor keamanan yang memadai. Sistem koneksi yang dirancang memastikan kompatibilitas deformasi dan transfer gaya efektif antara elemen eksisting dan tambahan. Monitoring pasca-penguatan mengkonfirmasi pengurangan signifikan deformasi struktur dan pemulihan serviceability yang memungkinkan kelanjutan konstruksi dengan standar keselamatan terjamin. Keterbatasan penelitian meliputi aksesibilitas evaluasi detail elemen struktur internal dan keterbatasan data historis konstruksi yang komprehensif. Kontribusi penelitian terletak pada pengembangan metodologi forensik praktis untuk bangunan hunian Indonesia dan formulasi panduan aplikasi penguatan struktur komposit. Rekomendasi penelitian lanjutan mencakup pengembangan protokol monitoring jangka panjang dan investigasi efektivitas sistem penguatan pada berbagai konfigurasi struktur bangunan hunian.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Nisa selaku pemilik bangunan yang telah memberikan izin akses lokasi penelitian, tim konstruksi yang memfasilitasi proses investigasi

lapangan, serta rekan-rekan yang memberikan dukungan teknis dalam analisis struktural dan dokumentasi hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASCE, "Proceedings of the 10th Congress on Forensic Engineering," *Am. Soc. Civ. Eng. Seattle, Washingt.*, 2024, doi: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784485798>.
- [2] L. Rus Eng., C. Moreno Eng., S. Mohammad Eng., A. Shahid Eng., I. Ahmed Eng., and T. Chowdhury Eng., "Failure Analysis: Structural Investigation Methods and Example of Application," *Struct. Eng. Int.*, vol. 34, no. 3, pp. 461–468, Jul. 2024, doi: [10.1080/10168664.2024.2363437](https://doi.org/10.1080/10168664.2024.2363437).
- [3] A. Kashani, E. M. Golafshani, T. Kim, A. Behnood, and T. Ngo, "Sustainable mix design of recycled aggregate concrete using artificial intelligence," *J. Clean. Prod.*, vol. 442, no. February, p. 140994, 2024, doi: [10.1016/j.jclepro.2024.140994](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140994).
- [4] B. Guidio and C. Jeong, "On the feasibility of simultaneous identification of a material property of a Timoshenko beam and a moving vibration source," *Eng. Struct.*, vol. 227, p. 111346, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111346>.
- [5] A. Siddika, M. Mamun, W. Ferdous, and R. Alyousef, "Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs - A state-of-the-art review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 111, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.engfailanal.2020.104480](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480).
- [6] Kamaluddin, A. H. Wahyono, and T. Iskandar, "Forensic Engineering Analysis of Building Structures in Indonesia: a Case Study of the Collapse of the Mahakam Ii Kutai Kartanegara Bridge in East Borneo," *Russ. J. Agric. Socio-Economic Sci.*, vol. 85, no. 1, pp. 375–385, 2019, doi: [10.18551/rjoas.2019-01.46](https://doi.org/10.18551/rjoas.2019-01.46).
- [7] K. Ajtayné Károlyfi, D. Szalai, J. Szép, and T. Horváth, "Integration of BIM in architecture and structural engineering education through common projects," *Acta Tech. Jaurinensis*, vol. 14, no. 4, pp. 424–439, 2021, doi: [10.14513/actatechjaur.00641](https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00641).
- [8] J.-F. Chen, J.-H. Xie, Y. Tao, and X.-Q. Li, "A review of FRP strengthened concrete structures under extreme loading," no. January 2015, pp. 423–433, 2016, doi: [10.14264/uql.2016.1106](https://doi.org/10.14264/uql.2016.1106).
- [9] T. Ogunbode, O. Omotayo, J. Asifat, P. Ogunbile, I. Olatubi, and V. Oyebamiji, "Challenges of degradation in the Tropical Environment: Causes, Footprints and Remedies," *Aswan Univ. J. Environ. Stud.*, vol. 0, no. 0, pp. 0–0, 2021, doi: [10.21608/aujes.2021.89948.1035](https://doi.org/10.21608/aujes.2021.89948.1035).
- [10] H. Burton and L. Angeles, "Machine Learning Applications in Structural Engineering: Hope, Hype, or Hindrance," no. 1538866, pp. 16–20, 2021.
- [11] Pathan, S. W. Ali, M. Z. Shaikh, and N. Hasan, "A Forensic View to Structures' Failure Analysis," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 2, pp. 25–31, Jan. 2015, doi: [10.14445/23488352/IJCE-V2I1P104](https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V2I1P104).
- [12] S. Boluwatife, "Forensic Analysis of Construction Defects," no. June, 2025.
- [13] M. Hammad, A. Bahrami, S. A. Khokhar, and R. A. Khushnood, "A State-of-the-Art Review on Structural Strengthening Techniques with FRPs: Effectiveness, Shortcomings, and Future Research Directions," *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 6, 2024, doi: [10.3390/ma17061408](https://doi.org/10.3390/ma17061408).
- [14] M. Haris, E. Xiong, W. Gao, M. A. Samuel, N. U. Sahar, and A. Saleem, "Strengthening Reinforced Concrete Members Using FRP—Evaluating Fire Performance, Challenges, and Future Research Directions: A State-of-the-Art Review," *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 1, 2025, doi: [10.3390/polym17010013](https://doi.org/10.3390/polym17010013).
- [15] J. D. Ortiz, S. S. Khedmatgozar Dolati, P. Malla, A. Nanni, and A. Mehrabi, "FRP-Reinforced/Strengthened Concrete: State-of-the-Art Review on Durability and Mechanical Effects," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 5, pp. 1–30, 2023, doi: [10.3390/ma16051990](https://doi.org/10.3390/ma16051990).