

Structural Performance Analysis of Post-Fire Reinforced Concrete Buildings Using Hammer Test Method and ETABS Modeling

*Willy Susanto¹, Tegar Abdillah Ramadhan¹, Raudah Ahmad¹, Insan Kamil¹, Gusti Ahmad Firdaus²

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda, Samarinda, ²Inspektorat Daerah, Kutai Kertanegara

*willysusanto@polnes.ac.id

Abstract

Reassessing the structural integrity of reinforced concrete buildings after a fire is crucial to ensure the continued operation of healthcare facilities. This study evaluates the structural performance of a multi-story hospital building that sustained significant fire damage by integrating non-destructive testing using a rebound hammer and finite element modeling in ETABS. The test results indicated substantial variations in residual concrete strength across structural elements: the average strengths of columns and beams were 25.95 MPa and 22.51 MPa, respectively, while floor slabs showed drastic reductions on fire-affected levels, ranging from 11.82 MPa to 51.42 MPa on unaffected floors. Structural modeling with these degraded material properties demonstrated that column stresses remained within acceptable limits, whereas 69% of the second-floor slabs and several beams on upper floors exceeded permissible stress thresholds. Consequently, the rehabilitation strategy prioritizes strengthening the floor slabs and enhancing beam capacity, while column replacement is not required. This approach enables cost- and time-efficient recovery without compromising structural safety.

Keywords: ETABS modeling; fire damage assessment; hospital buildings; non-destructive testing; structural rehabilitation

Abstrak

Penilaian ulang integritas struktural bangunan beton bertulang pasca-kebakaran merupakan langkah krusial untuk menjamin keberlanjutan fungsi pelayanan kesehatan. Penelitian ini mengevaluasi kinerja struktural sebuah bangunan rumah sakit bertingkat yang mengalami kerusakan signifikan akibat kebakaran, dengan mengintegrasikan pengujian tak merusak menggunakan *rebound hammer* dan pemodelan numerik berbasis elemen hingga pada ETABS. Hasil pengujian menunjukkan adanya variasi kekuatan beton yang mencolok antar elemen struktur: kolom memiliki kekuatan rata-rata 25.95 MPa, balok 22.51 MPa, sedangkan pelat lantai menurun drastis pada lantai yang terpapar api, dengan nilai terendah 11.82 MPa hingga tertinggi 51.42 MPa pada lantai yang tidak terdampak. Pemodelan struktur dengan parameter degradasi tersebut memperlihatkan bahwa tegangan kolom masih berada dalam batas aman, namun 69% pelat lantai pada lantai dua dan sebagian balok lantai atas melampaui batas tegangan izin. Oleh karena itu, strategi rehabilitasi diprioritaskan pada penguatan pelat lantai dan peningkatan kapasitas balok, sementara kolom tidak memerlukan penggantian menyeluruh. Pendekatan ini memungkinkan optimasi biaya dan waktu pemulihan tanpa mengurangi keselamatan struktural.

Kata Kunci: Pemodelan ETABS; evaluasi kerusakan pasca-kebakaran; bangunan fasilitas kesehatan; pengujian nondestruktif (NDT); strategi rehabilitasi struktur

PENDAHULUAN

Mempertahankan integritas struktural bangunan setelah mengalami paparan kebakaran merupakan tantangan signifikan dalam bidang teknik sipil, khususnya pada fasilitas layanan kesehatan di mana keberlanjutan fungsi tanpa gangguan sangat penting untuk menjamin keselamatan publik. Meskipun beton bertulang memiliki ketahanan intrinsik terhadap api, paparan berkepanjangan terhadap temperatur tinggi menyebabkan degradasi yang substansial pada sifat mekanis dan materialnya. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi pasca-kebakaran yang komprehensif untuk menilai kapasitas struktural sisa serta mengidentifikasi langkah rehabilitasi yang sesuai (Annerel et al., 2011; Kodur & Agrawal, 2016). Efek termal akibat kebakaran memicu proses fisikokimia yang kompleks pada beton maupun tulangan baja, seperti penguapan kelembapan, dekomposisi hidrat semen, ekspansi agregat, dan penurunan kekuatan baja, yang secara kolektif mengurangi kinerja struktural secara keseluruhan (Bisby et al., 2013; Choe et al., 2019).

STUDI LITERATUR

Penilaian Kerusakan Akibat Kebakaran pada Bangunan Beton Bertulang

Deteriorasi akibat kebakaran pada struktur beton bertulang merupakan permasalahan rekayasa yang bersifat multifaset, ditandai oleh distribusi kerusakan yang heterogen pada berbagai komponen struktural dan elevasi bangunan. Studi empiris menunjukkan bahwa beton yang terpapar suhu melebihi 300°C mengalami degradasi kekuatan secara progresif, dengan penurunan kuat tekan berkisar antara 25% hingga 75%, bergantung pada faktor-faktor seperti suhu maksimum yang dicapai, durasi paparan, jenis agregat, dan kondisi pendinginan (Felicetti & Gambarova, 1998; Hager, 2013).

Kompleksitas penilaian pasca-kebakaran semakin meningkat akibat adanya gradien termal yang tidak seragam pada penampang elemen struktur, di mana lapisan permukaan yang terpapar langsung dengan api mengalami kerusakan berat, sementara bagian inti dalam masih dapat mempertahankan kekuatan sisa yang signifikan (Gales et al., 2011; Phan & Carino, 2002). Degradasi yang bervariasi secara spasial ini menuntut penggunaan teknik diagnostik lanjutan yang mampu menangkap profil kerusakan berdasarkan kedalaman,

melampaui keterbatasan inspeksi visual permukaan konvensional (Colombo & Felicetti, 2007).

Dalam konteks infrastruktur layanan kesehatan, evaluasi struktural pasca-kebakaran yang komprehensif menjadi sangat krusial, karena keandalan operasional fasilitas tersebut secara langsung memengaruhi efektivitas respons darurat dan keberlanjutan pelayanan kepada pasien. Bangunan rumah sakit, khususnya, memerlukan inspeksi segera setelah kejadian untuk menentukan batas aman hunian kembali, mengidentifikasi komponen struktural yang membutuhkan penyanggaan sementara atau pembongkaran, serta merumuskan ruang lingkup intervensi rehabilitasi (Foster & Bisby, 2008; Wald et al., 2016). Berbeda dengan bangunan komersial atau hunian pada umumnya, di mana penutupan terutama menimbulkan konsekuensi finansial dimana gangguan pada fungsi rumah sakit dapat memicu dampak berantai yang serius terhadap sistem kesehatan publik, berpotensi membebani kapasitas medis regional selama situasi darurat kritis. Oleh karena itu, pengembangan metodologi penilaian yang cepat namun komprehensif untuk struktur rumah sakit yang terdampak kebakaran merupakan kebutuhan riset yang esensial dalam meningkatkan ketahanan bencana dan pemulihan infrastruktur (Gernay & Franssen, 2015).

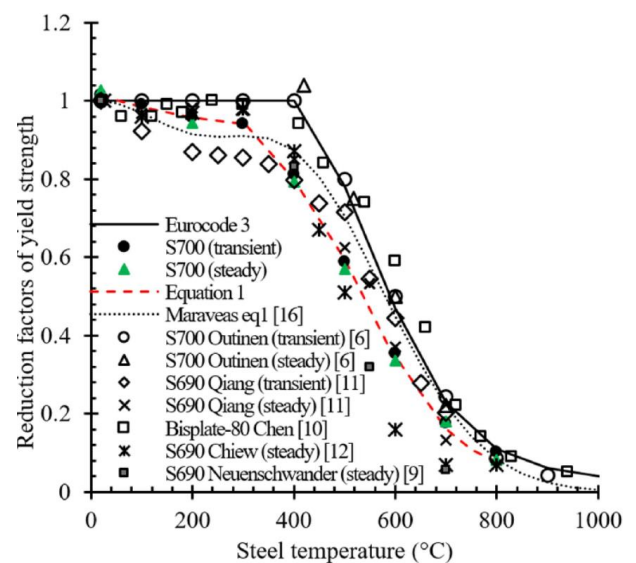
Mekanisme Degradasi Termal pada Beton dan Baja

Mekanisme degradasi termal dalam sistem beton bertulang mencakup proses termomekanik dan termokimia yang kompleks serta saling terkait, yang terjadi pada berbagai skala material. Dalam rentang suhu 100°C hingga 400°C, beton mengalami dehidrasi bertahap pada fase-fase semen, termasuk dekomposisi *gel calcium silicate hydrate* (C-S-H) dan hilangnya *portlandit*, yang secara kolektif meningkatkan porositas material serta mengurangi kohesi internal (Dwaikat & Kodur, 2010; Kodur & Dwaikat, 2008). Pada suhu di atas 450°C, dekomposisi kalsium karbonat menghasilkan tekanan uap internal yang memicu pembentukan retak mikro dan *spalling*, dengan efek yang lebih signifikan pada spesimen dengan kadar kelembapan tinggi (Ervine et al., 2012). Ketika terpapar suhu di atas 600°C, beton umumnya hanya mempertahankan 30–40% dari kuat tekan awalnya, dengan agregat silika menunjukkan kerentanan termal yang lebih besar dibandingkan agregat kalsium (Bastami & Baghbadrani, 2012; Khalaf & Huang, 2019).

Tulangan baja juga mengalami penurunan kekuatan yang signifikan akibat peningkatan suhu, mempertahankan sekitar 50% dari kuat lelehnya pada suhu 550°C dan hampir kehilangan seluruh kapasitasnya ketika suhu mendekati 1200°C (Della Corte dkk., 2003). Temuan ini sejalan dengan hasil eksperimen yang dilaporkan oleh Shakil dkk. (2020), yang menunjukkan bahwa baja S700 MC mengalami penurunan kuat leleh yang konsisten dengan kurva Eurocode 3, di mana kapasitas leleh mulai menurun tajam setelah 400°C dan hanya mempertahankan sekitar 45–55% dari kapasitas awal pada 600°C. Grafik reduksi kuat leleh pada

penelitian tersebut memperlihatkan pola degradasi yang hampir identik dengan *strength reduction curve* Eurocode, sekaligus memvalidasi pendekatan reduksi konservatif yang digunakan dalam studi ini.

Perbedaan koefisien muai termal antara matriks beton dan tulangan yang tertanam di dalamnya menyebabkan pelemahan ikatan, terutama pada kondisi pemanasan dan pendinginan cepat, sehingga mengurangi kapasitas lentur elemen struktural (Gernay dkk., 2016; Jeffers dkk., 2013). Pada fase pasca-kebakaran, korosi akseleratif menjadi mekanisme degradasi jangka panjang yang krusial, karena retak akibat kebakaran meningkatkan masuknya kelembapan dan klorida, sehingga mempercepat oksidasi tulangan dan menyebabkan penurunan integritas struktural secara progresif (Mostafaei & Kabeyasawa, 2007; Purkiss & Li, 2013).



Gambar 1. Grafik Reduksi Kekuatan Leleh Terhadap Suhu
Sumber : Shakil dkk, 2020

Pengujian Non-Destruktif untuk Penilaian Pasca-kebakaran

Kuantifikasi kapasitas struktural sisa pada beton bertulang yang terdampak kebakaran memerlukan penerapan protokol pengujian komprehensif yang mampu menyeimbangkan akurasi, efisiensi operasional, dan tingkat invasi yang minimal. Metode pengujian non-destruktif (NDT) menyediakan pendekatan efektif untuk evaluasi skala besar tanpa mengurangi integritas struktur, sekaligus memungkinkan pengukuran berulang guna memantau degradasi progresif dari waktu ke waktu (Quiel & Garlock, 2010; Raut & Kodur, 2011). Di antara metode tersebut, uji *rebound hammer* menawarkan pendekatan praktis dan ekonomis untuk memperkirakan kekerasan permukaan beton, yang secara empiris dapat dikorelasikan dengan kuat tekan melalui prosedur kalibrasi spesifik material (Serega, 2021; Tashan & Al-Mahaidi, 2014). *Rebound hammer* beroperasi berdasarkan prinsip bahwa jarak pantulan massa pegas mencerminkan kekakuan dan densitas material yang diuji

atau parameter yang secara langsung terpengaruh oleh degradasi termal (Behnam & Ronagh, 2015).

Meskipun terbatas pada data permukaan, penerapan sistematis pada banyak titik memungkinkan karakterisasi statistik pola kerusakan spasial dan memfasilitasi identifikasi area yang memerlukan investigasi lebih lanjut melalui pengambilan inti beton atau pengujian gelombang ultrasonik (Pournamazian et al., 2023). Koefisien korelasi yang dilaporkan antara indeks pantul dan kuat tekan sisa umumnya berkisar antara 0.70 hingga 0.85, menunjukkan reliabilitas prediktif yang memadai ketika koreksi terhadap kondisi permukaan diterapkan secara tepat (Zaharia & Dubina, 2006; Zaharia & Pintea, 2009).

Metode NDT tambahan, seperti pengujian kecepatan gelombang ultrasonik (UPV), mengukur kecepatan propagasi gelombang elastis untuk menginferensikan modulus elastisitas material dan kondisi retak internal. Integrasi berbagai metode NDT melalui kerangka analisis multivariat secara signifikan meningkatkan akurasi dan tingkat kepercayaan dalam penilaian kondisi struktural dibandingkan evaluasi metode tunggal, sehingga mendukung estimasi kapasitas yang lebih presisi serta perencanaan rehabilitasi yang lebih optimal (Colombo & Felicetti, 2007; Felicetti, 2014).

Pemodelan Komputasional pada Struktur yang Terkena Kebakaran

Pemodelan komputasional tingkat lanjut telah merevolusi proses penilaian struktural pasca-kebakaran dengan memungkinkan simulasi perilaku bangunan dalam kondisi material yang terdegradasi, sekaligus menangkap redistribusi beban dan kinerja sistem secara keseluruhan. Platform analisis elemen hingga (FEA) seperti ETABS menyediakan kapabilitas yang kuat untuk mengevaluasi struktur yang terdampak kebakaran melalui representasi detail mengenai retak beton, luluhnya tulangan, dan respons struktural nonlinier (Gernay et al., 2016; Kodur & Agrawal, 2016). Integrasi data hasil pengujian non-destruktif (NDT) dengan pemodelan komputasional membentuk kerangka penilaian yang sinergis, di mana pengukuran lapangan menginformasikan parameter material masukan, dan simulasi analitis memprediksi respons struktural global serta mengidentifikasi kerentanan kritis (Bisby et al., 2013).

ETABS secara khusus mendukung penerapan properti material yang bervariasi secara spasial untuk mencerminkan sifat heterogen dari kerusakan akibat kebakaran, sehingga memungkinkan pemodelan realistis pada sistem yang sebagian terdegradasi, di mana elemen-elemen struktural memiliki kapasitas sisa yang berbeda-beda. Output komputasional yang dihasilkan, termasuk peta distribusi tegangan, profil perpindahan, dan mekanisme transfer beban dimana memberikan wawasan penting dalam menentukan tingkat keamanan hunian pasca-kebakaran serta merumuskan strategi rehabilitasi yang terarah (Dwaikat & Kodur, 2010; Gernay & Franssen, 2015). Menjamin reliabilitas model melalui

validasi terhadap data eksperimental tetap menjadi langkah esensial untuk meningkatkan akurasi prediktif dan menetapkan margin keselamatan yang tepat dalam evaluasi kinerja pasca-kebakaran (Choe et al., 2019; Phan & Carino, 2002).

METODOLOGI PENELITIAN

Meskipun terdapat kemajuan dalam penilaian pasca-kebakaran, masih terdapat kesenjangan dalam integrasi pengujian non-destruktif (NDT) berbasis lapangan dengan pemodelan komputasional untuk evaluasi skala bangunan. Sebagian besar studi berfokus pada komponen individual, sehingga memberikan wawasan yang terbatas mengenai kinerja sistem secara keseluruhan dan variabilitas spasial kerusakan akibat kebakaran (Ervine et al., 2012; Foster & Bisby, 2008). Penilaian terintegrasi pada bangunan rumah sakit juga masih jarang dilakukan, meskipun fasilitas tersebut memiliki peran penting dalam ketahanan infrastruktur (Gales et al., 2011). Penelitian ini mengevaluasi sebuah rumah sakit beton bertulang yang terdampak kebakaran melalui kombinasi pengujian *rebound hammer* dan pemodelan berbasis ETABS. Pendekatan ini mengkuantifikasi kekuatan sisa beton, mengintegrasikan degradasi spasial ke dalam model yang terkalibrasi, serta mengevaluasi kinerja struktur melalui analisis rasio tegangan terhadap kapasitas untuk mengidentifikasi elemen-elemen kritis yang membutuhkan rehabilitasi dan kelayakan huni kembali. Dengan berfokus pada perilaku statik di bawah beban gravitasi, penelitian ini menetapkan suatu kerangka praktis untuk penilaian struktural pasca-kebakaran, yang dapat meningkatkan keselamatan serta efisiensi pemulihan (Hager, 2013; Kodur & Dwaikat, 2008).

Penelitian ini menerapkan metodologi terintegrasi yang menggabungkan NDT dan pemodelan struktural untuk menentukan kapasitas beban sisa pada bangunan rumah sakit yang terdampak kebakaran. Kerangka penilaian terdiri atas empat fase: (1) pendokumentasian kerusakan, (2) penilaian kekuatan beton melalui uji *rebound hammer*, (3) pemodelan elemen hingga dengan mempertimbangkan degradasi spasial, dan (4) evaluasi kinerja melalui rasio tegangan terhadap kapasitas. Pendekatan ini memastikan evaluasi keselamatan yang andal dengan tingkat intrusi minimal, sekaligus menekankan batas layanan (*serviceability limit states*) untuk memverifikasi keamanan hunian pasca-kebakaran di bawah beban normal, hal yang sangat penting bagi fasilitas kesehatan yang memerlukan pemulihan cepat. Metode ini juga mendukung strategi rehabilitasi yang terarah berdasarkan kinerja struktural aktual.

Inspeksi lapangan di RSUD AWS menunjukkan kerusakan kebakaran yang tidak seragam, dengan tingkat kerusakan paling parah pada lantai dua. Rangka beton bertulang bangunan tetap stabil secara geometris tanpa mengalami deformasi global. Kolom menunjukkan *spalling* tingkat sedang hingga berat serta tulangan yang terekspos, sementara balok dan pelat, terutama pada lantai dua, mengalami penurunan kekuatan yang signifikan, dengan rata-rata kuat tekan beton turun

menjadi 11.82 MPa. Lantai atas dan bawah mempertahankan kekuatan yang lebih tinggi (>50 MPa), mengindikasikan adanya gradien vertikal yang kuat terhadap intensitas paparan kebakaran.

Protokol Pengujian Non-Destruktif

Kuat tekan sisa beton dievaluasi menggunakan pengujian *rebound hammer* yang dilakukan sesuai dengan standar ASTM C805 dan SNI 03-4430-1997. *Rebound hammer* bekerja berdasarkan prinsip bahwa jarak pantulan massa pegas berbanding lurus dengan kekerasan permukaan beton, yang secara empiris dapat dikorelasikan dengan kuat tekan melalui hubungan kalibrasi. Metode non-destruktif ini memungkinkan estimasi cepat dan in-situ terhadap kekuatan sisa tanpa memerlukan pengambilan inti beton yang bersifat invasif.

Tabel 1. Ringkasan Kondisi Struktur Eksisting Pasca Paparan Kebakaran

Dimensi (cm)	Elemen Struktur	Observasi Lapangan	Evaluasi Kondisi Eksisting
50 × 50	Kolom Utama	Beberapa kolom menunjukkan retak termal dan terkelupasnya selimut beton (<i>spalling</i>).	Kerusakan tingkat sedang hingga berat teramati pada area-area tertentu, termasuk hilangnya sebagian selimut beton yang menyebabkan tulangan terekspos, serta penurunan kuat tekan beton yang signifikan.
25 × 25	Kolom Pendukung	Terdampak ringan, dengan penurunan kualitas beton yang bersifat minor.	Retak permukaan minor dan perubahan warna akibat paparan panas tidak langsung serta integritas keseluruhan tetap terjaga.
40 × 60	Balok Utama	Beberapa balok menunjukkan retak termal dan terkelupasnya selimut beton (<i>spalling</i>).	Terdapat bukti degradasi termal tingkat sedang, ditunjukkan oleh perubahan warna menjadi abu-abu terang serta retak memanjang pada zona tarik. Fungsi struktural secara umum tetap terjaga, namun kinerja lentur dan area sambungan memerlukan evaluasi ulang yang lebih mendetail serta kemungkinan pelaksanaan perkuatan.
25 × 50	Balok Pendukung	Terpapar panas, retak-retak halus (<i>hairline cracks</i>) teramati dalam jumlah kecil.	Retak ringan non-struktural akibat perbedaan pemuaian antara baja dan beton
12 (tebal)	Plat Lantai	Diindikasikan terjadi penurunan kuat tekan beton secara drastis pada lantai dua. Beberapa pelat menunjukkan retak termal serta terkelupasnya selimut beton (<i>spalling</i>).	Terjadi degradasi termal yang parah pada lantai dua yang mengindikasikan sebagian hilangnya kapasitas menahan beban, sementara lantai lainnya tetap dalam kondisi baik. Penguatan atau penggantian parsial direkomendasikan untuk zona yang mengalami kerusakan kritis.

Sumber: Hasil pengujian dan observasi lapangan (2025)

Pengujian dilakukan secara sistematis pada sampel representatif berupa kolom, balok, dan pelat lantai pada setiap tingkat bangunan. Sebelum pengujian, dilakukan persiapan permukaan dengan membersihkan material lepas serta lapisan terkarbonasi yang dapat mengganggu akurasi pengukuran. *Rebound hammer* diposisikan tegak lurus terhadap permukaan uji, dan faktor koreksi orientasi yang relevan diterapkan pada saat interpretasi data. Untuk setiap titik pengujian, diambil sedikitnya sepuluh bacaan tumbukan, dengan nilai pencilaan dieliminasi sebelum menghitung nilai pantulan rata-rata. Titik pengukuran diberi jarak minimal 25–30 mm satu sama lain serta dihindarkan dari area dalam radius 50 mm dari tepi atau retak yang terlihat guna mengurangi efek batas.

Nilai pantulan selanjutnya dikonversi menjadi estimasi kuat tekan menggunakan kurva kalibrasi yang disediakan oleh pabrikan, yang kemudian disesuaikan dengan faktor umur beton, karakteristik agregat, dan degradasi akibat kebakaran. Faktor koreksi tambahan yang mempertimbangkan karbonasi permukaan, variasi kelembapan, dan retak mikro termal turut diterapkan untuk meningkatkan reliabilitas estimasi dan memastikan bahwa nilai yang diperoleh secara akurat merepresentasikan kinerja material sisa pasca-kebakaran.

Penentuan Parameter Material

Program pengujian yang komprehensif menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata yang terklasifikasi secara jelas pada berbagai kategori elemen struktural. Elemen kolom menunjukkan kuat tekan sisa rata-rata sebesar 25.95 MPa, sedangkan elemen balok memiliki nilai rata-rata 22.51 MPa. Sebaliknya, pelat lantai memperlihatkan variabilitas spasial yang signifikan, dengan penurunan kekuatan yang sangat besar pada lantai dua yang terdampak kebakaran sebesar 11,82 MPa dibandingkan dengan 51,42 MPa pada lantai-lantai atas yang relatif tidak mengalami kerusakan. Pola variasi kekuatan yang jelas ini selaras dengan catatan kejadian kebakaran, yang mengidentifikasi lantai dua sebagai zona dengan intensitas kebakaran maksimum. Penyebaran api ke tingkat yang lebih tinggi berhasil dibatasi oleh fitur kompartementalisasi bangunan serta sistem pemadaman aktif, sehingga degradasi termal terutama terfokus pada lantai yang paling terdampak tersebut.

Prosedur penilaian dan pemodelan struktural dilakukan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang relevan serta kode teknik internasional yang diakui secara luas. Acuan utama meliputi SNI 2847:2019 untuk perencanaan struktur beton bertulang, SNI 1726:2019 untuk ketentuan ketahanan gempa (dengan penegasan bahwa studi ini hanya berfokus pada efek beban gravitasi), dan SNI 1727:2020 untuk ketentuan pembebanan dan kombinasi beban. Panduan pelengkap juga merujuk pada ASCE/SEI 7-22 dan ANSI/AISC 360-22, yang menyediakan kriteria tambahan terkait penentuan beban dan evaluasi kinerja struktural dalam kerangka internasional yang konsisten.

Parameter Permodelan Struktur

Sifat material tulangan ditetapkan sesuai dengan SNI 2052:2017, dengan kuat leleh nominal sebesar 400 MPa dan modulus elastisitas 200000 MPa. Untuk memperhitungkan degradasi mikrostruktural akibat kebakaran, diterapkan reduksi konservatif sebesar 30% terhadap kuat leleh, sehingga diperoleh kuat leleh pasca-kebakaran yang efektif sebesar 280 MPa. Modulus elastisitas dipertahankan pada nilai suhu ruang, sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang menunjukkan pemulihan signifikan pada sifat elastis setelah pendinginan dari temperatur tinggi.

Asumsi pengurangan 30% terhadap kuat leleh baja setelah paparan kebakaran didasarkan pada temuan eksperimental dan pedoman desain internasional yang menunjukkan bahwa baja tulangan mengalami degradasi kekuatan yang signifikan pada rentang suhu 400–600°C. Penelitian oleh Della Corte et al. (2003) memperlihatkan bahwa pada suhu sekitar 550°C, baja hanya mempertahankan sekitar 60–70% dari kapasitas awalnya setelah pendinginan. Temuan ini konsisten dengan model evaluasi residual strength yang dikembangkan oleh Kodur & Agrawal (2016), yang menunjukkan bahwa baja tulangan cenderung kehilangan 20–40% kekuatannya bergantung pada laju pemanasan dan durasi ekspos. Oleh karena itu, penetapan pengurangan 30% dianggap konservatif namun masih merepresentasikan kondisi material secara realistis.

Berbeda dengan kuat leleh, modulus elastisitas baja dipertahankan pada nilai suhu ruang karena penelitian menunjukkan bahwa sifat elastis baja bersifat reversibel setelah siklus pemanasan–pendinginan. Jeffers et al. (2013) serta Purkiss & Li (2013) mencatat bahwa selama baja tidak mencapai suhu ekstrem di atas 700–800°C, struktur mikro material masih dapat kembali ke kondisi semula sehingga modulus elastisitas pulih hampir sepenuhnya. Dengan dasar temuan tersebut, penetapan modulus elastisitas baja pada nilai awalnya tetap valid untuk analisis linear elastik ETABS, sementara penurunan kuat leleh digunakan sebagai representasi degradasi permanen akibat kebakaran. Sifat material beton ditetapkan berdasarkan nilai kuat tekan spesifik elemen yang diperoleh dari pengujian lapangan, yaitu 25.95 MPa untuk kolom, 22.51 MPa untuk balok, 11.82 MPa untuk pelat lantai dua, dan 51.42 MPa untuk pelat pada lantai yang tidak terdampak. Parameter mekanis turunan dihitung berdasarkan hubungan yang ditetapkan dalam SNI 2847:2019. Modulus elastisitas beton ditentukan menggunakan persamaan empiris $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ (MPa), menghasilkan nilai berkisar dari sekitar 16.15 MPa untuk pelat lantai dua yang paling mengalami degradasi hingga 33.61 MPa untuk daerah berkuat beton lebih tinggi yang tidak terpengaruh. Diferensiasi parameter ini memungkinkan simulasi yang realistis terhadap variasi kinerja material secara spasial dalam model struktur.

Beban mati mencakup berat sendiri struktur, yang dihitung secara otomatis dalam ETABS berdasarkan berat jenis material, yaitu 2400 kg/m³ untuk beton dan

7850 kg/m³ untuk baja tulangan. Selain itu, beban mati tambahan meliputi finishing lantai (24 kg/m²), sistem plafon (18 kg/m²), lapisan plester (21 kg/m²), serta instalasi mekanikal dan elektrik (25 kg/m²), sehingga menghasilkan total sekitar 1.18 kN/m². Beban dinding pasangan bata diperkirakan sebesar 8,34 kN/m untuk ketinggian standar 4 m dan 2,45 kN/m untuk parapet setinggi 1 m. Beban hidup ditetapkan sesuai SNI 1727:2020, dengan nilai rencana 2.4 kN/m² untuk area perawatan pasien serta 2.0 kN/m² untuk atap. Kombinasi beban utama yang dianalisis adalah 1,0 DL + 1,0 LL, yang merepresentasikan kondisi layanan karakteristik dan mengecualikan faktor beban berbasis probabilitas untuk mencerminkan skenario beban operasional.

Analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak elemen hingga ETABS untuk mengembangkan model komprehensif bangunan, mencakup seluruh komponen utama dari pondasi hingga atap. Kolom dimodelkan sebagai elemen rangka prismatik dengan dimensi penampang tertentu, balok sebagai elemen rangka persegi dengan orientasi sumbu kuat tegak lurus bidang pelat, dan pelat sebagai elemen shell setebal 120 mm. Setiap elemen diberikan sifat material yang sesuai berdasarkan data kuat tekan residu beton serta karakteristik tulangan pasca-kebakaran yang telah disesuaikan. Koneksi antar elemen struktural dimodelkan sebagai sambungan kaku penuh, konsisten dengan perilaku monolitik sistem beton bertulang cor di tempat. Tumpuan pondasi diasumsikan sebagai kondisi batas jepit yang menahan semua enam derajat kebebasan.

Kondisi pembebanan, termasuk berat sendiri, beban mati tambahan, beban dinding, dan beban hidup, didefinisikan dalam ETABS menggunakan perintah standar dan didistribusikan secara otomatis berdasarkan prinsip area tributari. Analisis statik linier elastik dilakukan untuk menyelesaikan persamaan keseimbangan global $Ku = F$, di mana K merepresentasikan matriks kekakuan, u vektor perpindahan nodal, dan F vektor beban terapan. Prosedur pasca pemrosesan digunakan untuk menentukan gaya-gaya dalam anggota berdasarkan perpindahan nodal yang dihitung. Verifikasi model dilakukan dengan memeriksa keseimbangan reaksi, kontinuitas perpindahan, serta konvergensi numerik secara keseluruhan.

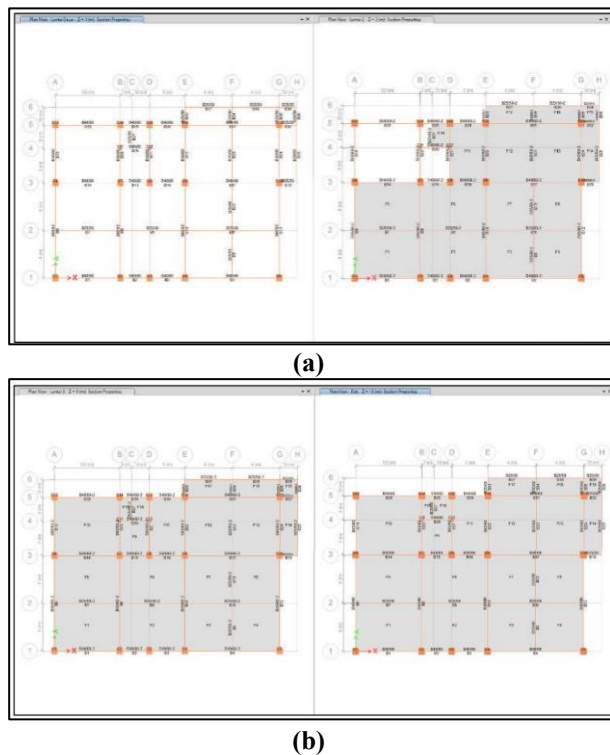
Kriteria Evaluasi Kinerja

Kinerja kolom dievaluasi dengan membandingkan kebutuhan tegangan hasil analisis dengan batasan kekuatan yang diizinkan. Tegangan kombinasi aksial dan lentur dihitung menggunakan persamaan, $\sigma = P/A \pm M/S$, dimana P merupakan beban aksial, A luas penampang, M momen lentur, dan S modulus penampang. Tegangan tarik yang diizinkan ditetapkan berdasarkan *modulus of rupture* (3.25 MPa untuk kolom), sedangkan tegangan tekan yang diizinkan didefinisikan sebagai $0,45 f'_c = 12.34$ MPa.

Untuk pelat lantai, evaluasi dilakukan berdasarkan analisis tegangan utama (*principal stress*) pada permukaan atas dan bawah. Batasan tegangan tarik ditentukan menggunakan nilai *modulus of rupture*

spesifik tiap lantai, yaitu 2.13 MPa untuk lantai dua yang terdampak kebakaran dan 4.45 MPa untuk lantai yang tidak terpengaruh. Sementara itu, batasan tegangan tekan didefinisikan sebagai $0.33 f'_c$, masing-masing sebesar 3.90 MPa dan 16.97 MPa.

Kelayakan balok dianalisis melalui evaluasi tegangan lentur dan geser. Tegangan lentur, yang dihitung menggunakan $\sigma = M/S$, dibandingkan dengan nilai *modulus of rupture* sebesar 2.94 MPa. Tegangan geser, $v = V/Av$, dievaluasi terhadap batas tegangan geser yang diizinkan sebesar 0.81 MPa. Hasil analisis disusun secara sistematis dalam bentuk tabel dan grafik, memuat identifikasi elemen, gaya-gaya dalam, tegangan hasil perhitungan, serta tingkat kesesuaian terhadap kriteria yang diperbolehkan.



Gambar 2. Konfigurasi Plat Lantai dan Plat Atap
Sumber: ETABS (2025)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisa Struktur

Integrasi antara pengujian *rebound hammer* dan pemodelan komputasional ETABS menunjukkan variasi kinerja struktural yang signifikan di antara berbagai jenis elemen serta pada setiap elevasi bangunan. Analisis tersebut mampu membedakan secara efektif antara elemen yang masih mempertahankan kapasitas memadai untuk menahan beban layan secara aman dan elemen yang menunjukkan kondisi tegangan berlebih sehingga memerlukan tindakan perbaikan segera. Temuan dari evaluasi tegangan kolom, analisis tegangan utama pada pelat lantai, serta pemeriksaan lentur-geser pada balok disajikan bersama interpretasi pola kerusakan yang teramati dan perumusan strategi rehabilitasi berbasis bukti.

Diagram konfigurasi struktur (Gambar 2) menggambarkan susunan rangka lengkap pada setiap lantai, memberikan konteks penting untuk menafsirkan hasil analisis elemen secara spesifik serta menjelaskan perilaku distribusi beban dalam sistem penahan gravitasi bangunan.

Evaluasi Kinerja Kolom

Hasil evaluasi kinerja kolom menunjukkan bahwa seluruh elemen berada dalam kondisi struktural yang memadai, di mana nilai tegangan tarik maupun tekan masih berada jauh di bawah batas izin. Dari 17 kolom yang dianalisis pada tiga tingkat lantai, kolom C10 di lantai dua merupakan elemen dengan tegangan terbesar, yaitu 2.93 MPa untuk tarik (setara 90% dari *modulus of rupture* 3.25 MPa) dan 8.55 MPa untuk tekan (69% dari batas izin 12.34 MPa). Nilai-nilai tersebut masih dalam rentang aman untuk kondisi layanan.

Tabel 2. Rekapitulasi Analisa Tegangan Kolom

Lantai	Kolom Kritis	σ_{max} (MPa) tarik	σ_{max} (MPa) tekan	Status
Lantai 3	C5	4.13	5.65	OK
Lantai 2	C10	2.93	8.55	OK
Lantai 1	C9	1.73	7.34	OK

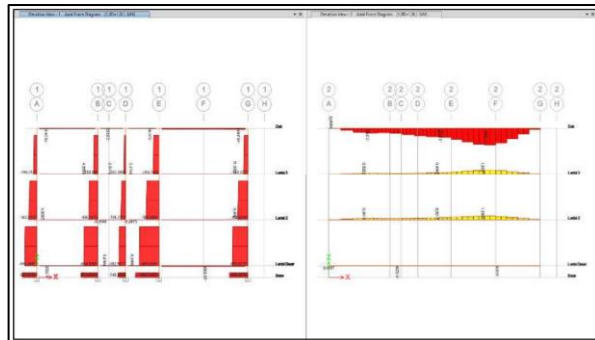
Sumber: Analisa Data

Tabel 2 merangkum hasil evaluasi ini dan menunjukkan bahwa seluruh kolom diklasifikasikan sebagai “OK,” meskipun beton pada beberapa lokasi mengalami penurunan mutu hingga 25.95 MPa. Konsistensi ini sejalan dengan pola gaya aksial yang ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu meningkatnya gaya tekan dari lantai atas menuju lantai bawah sebagai karakteristik transfer beban gravitasi yang normal dan stabil. Dengan demikian, hasil analisis memperkuat bahwa model struktural yang digunakan merepresentasikan perilaku sistem dengan akurat.

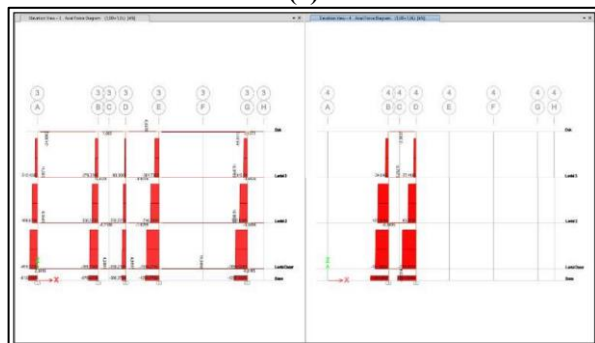
Kinerja kolom yang tetap memadai setelah terpapar kebakaran dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, beton pada bagian inti kolom kemungkinan tidak mencapai suhu kritis, sehingga kekuatan residualnya masih mencukupi untuk memikul beban aksial. Kedua, penampang kolom yang relatif besar (500×500 mm dan 250×250 mm) memberikan inersia termal yang signifikan, sehingga lapisan beton luar mampu menyerap panas dan melindungi tulangan di bagian dalam. Studi Kodur & Agrawal (2016) menunjukkan bahwa tulangan baja yang tertanam lebih dalam sekitar 50–75 mm dari permukaan beton biasanya mengalami suhu yang jauh lebih rendah dibandingkan permukaan yang terpapar langsung, sehingga degradasi kekuatan baja tetap terbatas.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa kolom belum mendekati *ultimate limit state* (ULS). Kerusakan yang terlihat seperti *spalling* dan retak termal lebih bersifat kosmetik atau merupakan indikasi kerusakan tingkat permukaan, bukan keruntuhan struktural. Selama kolom masih berada dalam batas *serviceability limit state* (SLS), kapasitas utama untuk memikul beban gravitasi tetap terjaga dan tidak menimbulkan bahaya instabilitas atau keruntuhan.

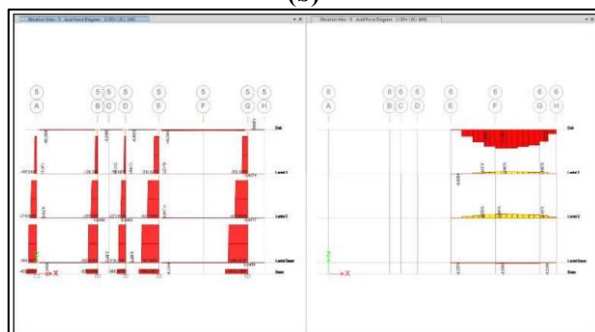
progresif. Implikasi dari temuan ini sangat penting bagi strategi rehabilitasi. Karena sistem kolom masih berada pada kondisi aman, upaya perbaikan dapat difokuskan pada elemen yang lebih kritis seperti pelat lantai dan balok. Pendekatan ini memungkinkan efisiensi waktu dan biaya yang signifikan, mengingat penggantian atau perkuatan besar pada kolom tidak diperlukan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. Axial Force Diagram
Sumber: ETABS (2025)

Evaluasi Kinerja Plat Lantai

Penilaian terhadap pelat lantai menunjukkan adanya variabilitas yang cukup besar pada kinerja struktural pasca-kebakaran, mulai dari panel yang masih bekerja dengan baik hingga panel yang mengalami *overstress* signifikan. Pola tegangan yang dihasilkan melalui diagram kontur tegangan utama (Gambar 4) memperlihatkan zona tarik-tekan yang tegas, sehingga lokasi konsentrasi tegangan kritis dapat diidentifikasi dengan jelas.

Pada tingkat atap, seluruh sembilan belas panel (F1-F19) menunjukkan respons struktural yang memadai. Tegangan tarik maksimum sebesar 4.93 MPa

pada panel F6 masih berada di bawah nilai *modulus of rupture*, sementara tegangan tekan maksimum 5.10 MPa berada jauh di bawah batas izin 16.97 MPa. Kinerja baik ini dipengaruhi oleh kekuatan beton residual yang masih tinggi (51.42 MPa), beban atap yang relatif ringan, serta rendahnya tingkat paparan panas pada zona ini.

Pada lantai tiga, mulai terlihat tanda-tanda distress, namun hanya terbatas pada dua panel, yaitu F2 dan F6. Pada kedua panel tersebut, tegangan tarik melampaui batas izin secara moderat, masing-masing sebesar 4.94 MPa (111%) dan 5.06 MPa (114%), menandakan awal terbentuknya retak lentur. Meskipun demikian, seluruh nilai tegangan tekan pada lantai ini masih berada pada tingkat aman, dengan tegangan maksimum 5.00 MPa atau 29% dari batas izin. Tabel 3 merangkum elemen-elemen yang mengalami *overstress* pada tiap tingkat lantai.

Tabel 3. Rekapitulasi Analisa Tegangan Plat Lantai

Lantai	Panel Bermasalah	Tenis Tegangan	Status
Atap	-	-	All OK
Lantai 3	F2, F6	Tarik	Overstressed
Lantai 2	F1-F8, F11-F13	Tarik	Overstressed
Lantai 2	F2, F6	Tekan	Overstressed

Sumber: Analisa Data

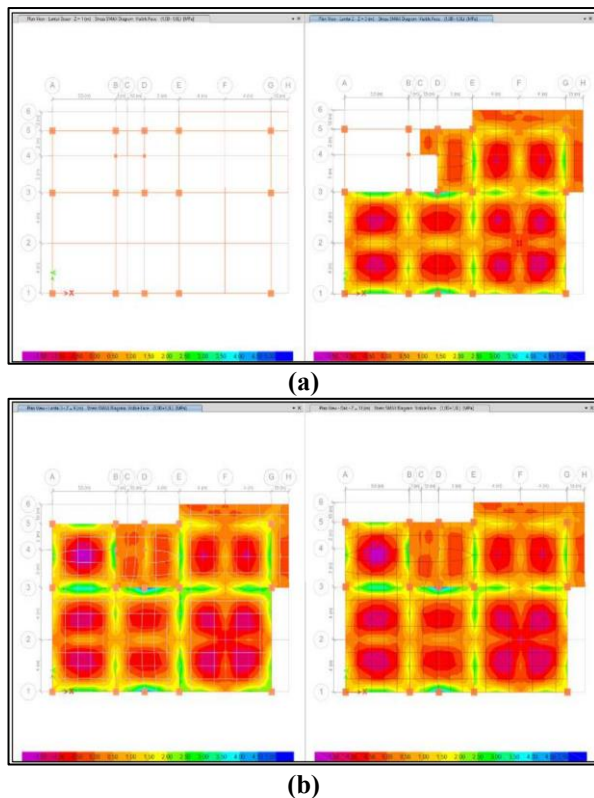
Kondisi paling kritis terjadi pada lantai dua, di mana sebelas dari enam belas panel ($\approx 69\%$) mengalami *overstress* yang sangat signifikan. Hal ini berkaitan langsung dengan penurunan mutu beton residual yang ekstrem (11.82 MPa; *modulus of rupture* 2.13 MPa; batas tekan 3.90 MPa). Panel-panel seperti F6 dan F2 menunjukkan tegangan tarik hingga 4.27 MPa (200% batas izin) dan 4.23 MPa (199%), serta tegangan tekan yang melampaui 107–109% dari nilai izin. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa pelat telah melampaui kapasitas dua arah (*biaxial stress capacity*), sehingga tidak lagi mampu menahan kombinasi lentur-tekan secara aman.

Perbedaan tajam antara kondisi lantai dua dan lantai lainnya menegaskan bahwa kerusakan bersifat terlokalisasi dan konsisten dengan zona yang menerima intensitas kebakaran paling tinggi. Penurunan kekuatan beton sebesar 77% (dari 51.42 MPa menjadi 11.82 MPa) sesuai dengan ekspos temperatur berkisar 600–800°C dalam durasi yang berkepanjangan, sebagaimana dilaporkan dalam penelitian Gernay & Franssen (2015).

Overstress yang terjadi pada pelat lantai dua menunjukkan bahwa nilai tegangan telah melampaui batas yang diperbolehkan pada kondisi layanan. Ketika tegangan mencapai hingga 200% dari batas tarik izin, elemen dipastikan mengalami retak lentur besar, penurunan kekakuan, dan potensi peningkatan lendutan hingga menyebabkan *spalling* yang mengekspos tulangan. Dalam kondisi ini, pelat berada pada kategori *serviceability failure*, yaitu kondisi di mana fungsionalitas struktural menurun, namun tidak secara otomatis berarti terjadi keruntuhan penuh. Dengan kata lain, struktur masih memiliki kapasitas cadangan untuk memikul beban gravitasi dan belum mencapai *ultimate limit state* (ULS).

Kegagalan ultimit baru terjadi apabila tulangan tarik luluh, beton tekan hancur, atau terbentuk sendi

plastis yang menyebabkan hilangnya kapasitas pemikul beban. Pada bangunan ini, kolom sebagai elemen utama penahan beban gravitasi tetap bekerja dalam batas aman, sehingga tidak menunjukkan gejala keruntuhan progresif. Oleh karena itu, meskipun panel lantai dua mengalami *overstress* yang signifikan, kerusakan bersifat lokal dan masih dapat ditangani melalui metode rehabilitasi seperti overlay beton atau perkuatan eksternal menggunakan FRP. Pemahaman mengenai perbedaan fundamental antara kegagalan layanan dan kegagalan ultimit sangat penting dalam menentukan apakah tindakan yang tepat adalah perbaikan lokal atau rekonstruksi penuh.



Gambar 4. *Principal Stresses* Plat Lantai dan Plat Atap
Sumber: ETABS (2025)

Evaluasi Kinerja Balok

Kinerja balok dievaluasi menggunakan dua parameter utama, yaitu kapasitas lentur dan kapasitas geser, sehingga dapat diperoleh gambaran komprehensif mengenai perilaku pasca-kebakaran. Diagram momen lentur (Gambar 5) memperlihatkan perkembangan momen negatif yang dominan di daerah sambungan balok-kolom, sementara momen positif terbesar terjadi pada mid-span. Pola ini menegaskan lokasi zona kritis lentur yang paling rentan terhadap kerusakan. Sementara itu, diagram gaya geser (Gambar 6) menunjukkan puncak gaya geser berada di dekat tumpuan, namun rasio tegangan geser maksimum hanya mencapai 76% dari batas izin, sehingga kapasitas geser seluruh balok tetap berada pada kondisi aman.

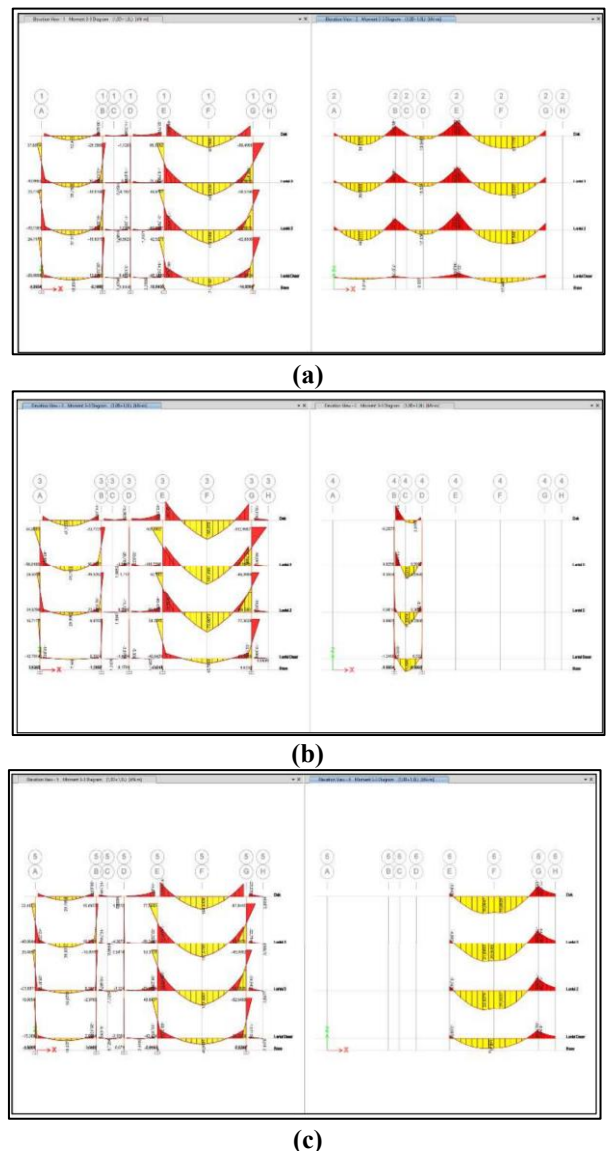
Pada lantai dasar, seluruh 39 balok memenuhi kriteria desain. Tegangan lentur maksimum sebesar

2.967 MPa hanya sedikit melampaui batas izin 2.94 MPa (101%), sedangkan tegangan geser maksimum berada pada tingkat yang sangat rendah, yaitu 0.308 MPa (38% dari batas izin). Tabel 3 merangkum balok-balok yang mengalami *overstress* pada tiap tingkat lantai dan jenis tegangan yang terlibat.

Tabel 3. Rekapitulasi Analisa Tegangan Balok

Lantai	Balok Bermasalah	Tipe Tegangan	Status
Atap	B4, B5, B6, B7, B8, B10-B13, B17	Lentur	<i>Overstressed</i>
Lantai 3	B4, B5, B6, B7, B8, B10-B13, B17, B31	Lentur	<i>Overstressed</i>
Lantai 2	B4, B5, B6, B7, B8, B10-B13, B17, B31	Lentur	<i>Overstressed</i>
Lantai 1	-	-	<i>All OK</i>

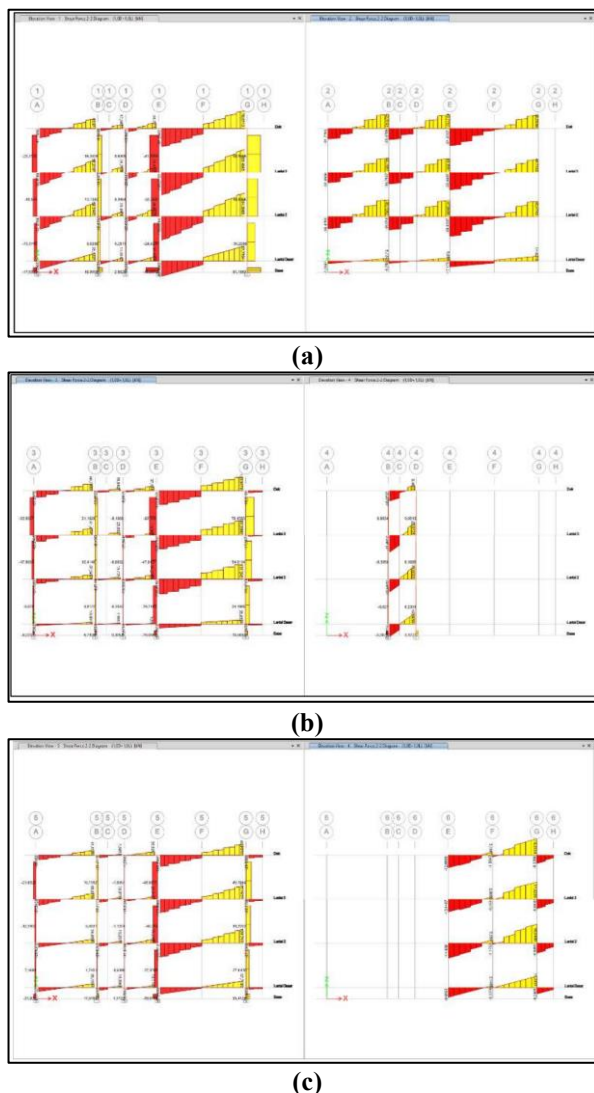
Sumber: Analisa Data



Gambar 5. *Moment Diagram 3-3*
Sumber: ETABS (2025)

Pada lantai dua, 13 dari 39 balok (33%) utamanya balok primer menunjukkan *overstress* lentur yang signifikan. Nilai tertinggi tercatat pada balok B10 dengan tegangan 7.230 MPa (246% dari batas izin), diikuti B17

dengan 7.195 MPa (245%). Tegangan geser tetap aman dengan nilai puncak 0.614 MPa (76% dari batas izin). Pola serupa terjadi pada lantai tiga, di mana 14 balok (36%) mengalami *overstress* lentur, dengan tegangan hingga 6.988 MPa pada B10 (238%) dan 6.729 MPa pada B17 (229%). Pada tingkat atap, *overstress* lentur terjadi pada 10 balok (26%), termasuk B4–B8, B10–B13, dan B17, dengan tegangan maksimum 6.988 MPa dan 6.877 MPa. Secara umum, seluruh evaluasi menunjukkan bahwa kapasitas geser tetap mencukupi pada seluruh elemen terbukti dari 156 pemeriksaan tegangan geser tanpa satu pun kasus *overstress*. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme kegagalan geser tidak menjadi ancaman utama pada struktur ini.



Gambar 6. *Shear Diagram 2-2*
Sumber: ETABS (2025)

Sebaliknya, *overstress* lentur merupakan isu dominan pada balok, terutama balok primer yang memikul bentang lebih besar dan menerima beban tributari yang lebih tinggi dibandingkan balok sekunder. Tegangan lentur yang mencapai lebih dari 230% pada beberapa balok, seperti B10 dan B17, menunjukkan bahwa serat tarik beton pada zona bawah telah melewati

batas modulus of rupture dan mengalami retak signifikan. Kondisi ini merupakan bentuk pelampauan *serviceability limit state* (SLS), yang ditandai oleh retak lentur, penurunan kekakuan, dan potensi terjadinya lendutan berlebih. Namun, karena geser tetap berada dalam batas aman dan tidak ditemukan indikasi luluhnya tulangan tarik maupun hancurnya beton tekan, struktur balok belum mencapai *ultimate limit state* (ULS). ULS pada balok seharusnya ditandai oleh terbentuknya sendi plastis, keruntuhan beton tekan pada serat atas, atau luluh total tulangan tarik. Model analisis ETABS menunjukkan bahwa gaya-gaya dalam masih dapat didistribusikan ulang, mengindikasikan bahwa kapasitas ultimit belum terlampaui. Dengan demikian, meskipun beberapa balok mengalami pelampauan batas layanan yang signifikan, kerusakan yang terjadi lebih bersifat fungsional daripada struktural.

Pola *overstress* yang konsisten pada grup balok primer juga menunjukkan bahwa perilaku tersebut bukan disebabkan oleh variasi acak temperatur kebakaran semata, tetapi merupakan hasil kombinasi antara penurunan mutu beton residual dan karakteristik pembebanan asli struktur. Hal ini membuka peluang rehabilitasi tanpa pembongkaran total elemen, misalnya melalui pemasangan FRP pada serat tarik, perkuatan mekanis pada zona joint, atau integrasi elemen tambahan sesuai kebutuhan.

Secara keseluruhan, meskipun beberapa balok menunjukkan *overstress* lentur hingga dua kali lipat batas izin, kondisi tersebut masih tergolong kegagalan layanan, bukan keruntuhan ultimit. Dengan demikian, tindakan rehabilitasi dapat difokuskan pada pemulihan kapasitas lentur dan kekakuan balok tanpa mengganti seluruh elemen. Pendekatan ini sangat relevan bagi bangunan rumah sakit, yang menuntut pemulihan cepat dan gangguan operasional yang minimal.

Hierarki Kinerja dan Prioritas Rehabilitasi

Analisis kinerja struktural menunjukkan adanya hierarki yang jelas dalam tingkat kerusakan pada bangunan rumah sakit pasca-kebakaran. Kolom menjadi elemen dengan kinerja terbaik karena seluruhnya berada dalam batas tegangan yang diizinkan, sehingga sistem penahan beban vertikal tetap stabil dan aman. Balok menunjukkan tingkat distress moderat, terutama pada elemen lentur, dengan sekitar 26–36% balok di lantai atas mengalami *overstress* lentur sementara kapasitas geser seluruhnya masih memadai. Kondisi paling kritis ditemukan pada pelat lantai, khususnya di lantai dua, di mana 69% panel melampaui batas izin, menandakan penurunan kapasitas layanan yang signifikan. Variasi kinerja ini sangat dipengaruhi oleh perbedaan intensitas paparan kebakaran, geometri dan ketebalan elemen, serta interaksi antara beban dan kapasitas material residual di seluruh struktur. Berdasarkan temuan tersebut, prioritas rehabilitasi harus diberikan pada elemen yang menunjukkan tingkat kerusakan tertinggi. Pelat lantai dua memerlukan tindakan segera berupa perkuatan permanen atau pemasangan perancah sementara untuk mengembalikan kemampuan layan dan mencegah

deformasi lanjutan. Panel F2 dan F6 pada lantai tiga juga memerlukan intervensi lokal karena menunjukkan *overstress* lentur yang moderat. Selain itu, kekuatan lentur pada balok-balok primer di lantai dua, tiga, dan atap diperlukan untuk meningkatkan stabilitas sistem dengan mengurangi risiko lendutan jangka panjang. Sementara itu, karena seluruh kolom tetap berada dalam kondisi aman, program rehabilitasi tidak memerlukan penggantian elemen penyangga utama, sehingga penghematan biaya dan waktu dapat dicapai secara signifikan.

Pemilihan metode rehabilitasi pada bangunan rumah sakit membutuhkan pendekatan yang tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga operasional karena fasilitas kesehatan harus tetap berfungsi selama proses perbaikan. Alternatif kekuatan seperti komposit *Fiber-Reinforced Polymer* (FRP) menawarkan solusi cepat dengan gangguan minimal terhadap aktivitas pelayanan medis, sehingga cocok untuk kekuatan lentur balok atau elemen lokal yang membutuhkan pemulihan segera. Namun demikian, keterbatasan FRP terhadap paparan suhu tinggi perlu dipertimbangkan, terutama jika terdapat risiko kebakaran ulang. Metode *overlay* beton dengan penambahan tulangan menawarkan ketahanan lebih tinggi dan peningkatan kapasitas lentur–geser secara simultan, meskipun memerlukan waktu pengerasan yang lebih lama. Untuk kerusakan yang sangat luas, rekonstruksi total pelat masih menjadi opsi paling permanen. Steel jacketing dapat digunakan pada kasus tertentu, terutama pada balok atau kolom yang membutuhkan peningkatan kapasitas signifikan. Untuk kemudahan evaluasi, perbandingan ringkas kelebihan masing-masing metode rehabilitasi terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Metode Rehabilitasi

Metode	Kecepatan	Biaya	Ketahanan	Cocok untuk
FRP (CFRP/GFRP)	Sangat cepat	Menengah	Sensitif suhu	Elemen lentur
<i>Concrete Overlay</i> + tulangan	Lambat	Rendah–Menengah	Sangat Tahan Lama	Area Luas
<i>Reconstruction</i> / pembongkaran total	Sangat lambat	Tinggi	Permanen	Keruntuhan ultimit
<i>Steel jacketing</i>	Cepat	Tinggi	Sangat Kuat	Kolom & Balok

Sumber: Studi Literatur

Selain aspek teknis, rehabilitasi pada lingkungan rumah sakit harus memperhatikan keberlanjutan operasional, termasuk kontrol debu dan kebisingan, pengaturan ventilasi selama pembongkaran, serta penjadwalan kerja agar mengurangi gangguan terhadap pasien. Dengan mempertimbangkan keseluruhan faktor tersebut, penggunaan *overlay* beton direkomendasikan untuk pelat lantai dua karena kerusakan yang meluas dan kebutuhan akan peningkatan kapasitas yang tahan lama, sementara kekuatan FRP dapat diterapkan pada balok yang mengalami *overstress* lentur untuk menyediakan solusi cepat dengan gangguan minimal. Pendekatan ini diharapkan mampu mencapai keseimbangan optimal antara kinerja struktural, efisiensi waktu, biaya, dan kelangsungan operasional rumah sakit.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mendemonstrasikan efektivitas integrasi antara pengujian non-destruktif dan pemodelan komputasional dalam evaluasi pasca-kebakaran pada bangunan rumah sakit berbahan beton bertulang. Pendekatan gabungan tersebut memberikan pemahaman menyeluruh yang mendukung pengambilan keputusan cepat dan perencanaan rehabilitasi berbasis bukti. Hasil pengujian *rebound hammer* mengungkap variasi spasial yang mencolok pada mutu beton residual, dengan kekuatan rata-rata sebesar 25.95 MPa pada kolom, 22.51 MPa pada balok, serta variasi ekstrem pada pelat lantai, mulai dari 11.82 MPa pada lantai dua yang terpapar panas intens hingga 51.42 MPa pada lantai atas yang relatif terlindungi. Rentang penurunan mutu hingga 77% pada area paling terdampak menunjukkan adanya konsentrasi panas yang terlokalisasi pada lantai dua, sejalan dengan pola kebakaran terkompartmenten yang membatasi rambatan api secara vertikal.

Analisis ETABS yang mengadopsi variasi mutu material secara spasial memperlihatkan hierarki kinerja struktural pada kondisi batas layanan. Kolom menunjukkan kinerja paling memadai, dengan tegangan tekan maksimum hanya 69% dari batas izin—mengonfirmasi stabilitas sistem penahan beban vertikal. Sebaliknya, pelat lantai menjadi elemen yang paling terdampak, di mana 69% panel lantai dua melampaui batas tarik maupun tekan yang diizinkan. Balok menempati tingkat kerusakan menengah, dengan 26–36% elemen pada lantai atas mengalami *overstress* lentur, meskipun kapasitas gesernya tetap aman di seluruh tingkat.

Temuan ini menjadi dasar penetapan prioritas rehabilitasi: (1) perbaikan segera pada sebelas panel pelat lantai dua yang mengalami *overstress* berat, (2) peningkatan lokal pada panel F2 dan F6 di lantai tiga, dan (3) peningkatan kapasitas lentur pada balok-balok primer yang menerima beban tributari lebih besar. Karena seluruh kolom masih dalam kondisi aman, upaya rehabilitasi dapat difokuskan pada sistem pelat dan balok tanpa perlu rekonstruksi besar, sehingga memberikan efisiensi biaya yang signifikan serta mempercepat pemulihan operasional fasilitas kesehatan.

Dari sisi metodologis, hasil penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi pengujian non-destruktif dan analisis komputasional merupakan pendekatan yang kuat dan dapat diandalkan untuk menilai kondisi pasca-kebakaran pada bangunan beton bertulang. Pengujian *rebound hammer* menyediakan data mutu material yang spesifik untuk masing-masing elemen, sementara pemodelan ETABS mampu memetakan distribusi tegangan secara detail dan mengidentifikasi area kritis dengan presisi tinggi. Integrasi kedua teknik ini menghasilkan kerangka evaluasi yang komprehensif, efisien, dan berbasis bukti untuk merumuskan strategi rehabilitasi bangunan pasca-kebakaran.

DAFTAR PUSTAKA

Annerel, E., Taerwe, L., & Vandeveld, P. (2011). Assessment of temperature increase and residual

- strength of concrete in fire exposed building structures. *Fire Technology*, 47(4), 935–950.
- Bastami, M., & Baghbadrani, M. (2012). Evaluating the compressive strength of concrete containing slag using Schmidt hammer test. *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, 2(1), 1–8.
- Behnam, B., & Ronagh, H. R. (2015). Behavior of moment-resisting tall steel structures exposed to a vertically traveling post-earthquake fire. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(6), 470–496.
- Bisby, L. A., Gales, J. A., & Maluk, C. (2013). A contemporary review of large-scale non-standard structural fire testing. *Fire Science Reviews*, 2(1), 1–27.
- Choe, G., Kim, G., Yoon, M., Hwang, E., Nam, J., & Guncunski, N. (2019). Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type. *Cement and Concrete Research*, 116, 1–10.
- Colombo, M., & Felicetti, R. (2007). New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures. *Fire Safety Journal*, 42(6–7), 461–472.
- Della Corte, G., Landolfo, R., & Mazzolani, F. M. (2003). Post-earthquake fire resistance of moment resisting steel frames. *Fire Safety Journal*, 38(7), 593–612.
- Dwaikat, M. B., & Kodur, V. K. R. (2010). Fire induced spalling in high strength concrete beams. *Fire Technology*, 46(1), 251–274.
- Ervine, A., Gillie, M., Stratford, T. J., & Pankaj, P. (2012). Thermal behaviour of heated concrete slabs. *Engineering Structures*, 43, 103–111.
- European Committee for Standardization. (2005). *Eurocode 3: EN 1993-1-2. Design of steel structures – Part 1-2: Structural fire design*.
- Felicetti, R. (2014). Assessment of fire damage in concrete structures: New inspection procedures based on drill-resistance. In *Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire* (pp. 1019–1026). Shanghai, China.
- Felicetti, R., & Gambarova, P. G. (1998). Effects of high temperature on the residual compressive strength of high-strength siliceous concretes. *ACI Materials Journal*, 95(4), 395–406.
- Foster, S. J., & Bisby, L. A. (2008). High temperature residual properties of externally-bonded FRP systems. In *Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering* (pp. 1–8). Vancouver, Canada.
- Gales, J., Bisby, L. A., & Gillie, M. (2011). Unbonded post tensioned concrete in fire: A review of data from furnace tests and real fires. *Fire Safety Journal*, 46(4), 151–163.
- Gernay, T., & Franssen, J.-M. (2015). A performance indicator for structures under natural fire. *Engineering Structures*, 100, 94–103.
- Gernay, T., Millard, A., & Franssen, J.-M. (2016). A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation: Theoretical formulation. *International Journal of Solids and Structures*, 79, 32–42.
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61(1), 145–154.
- Jeffers, A. E., Sotelino, E. D., & Balakrishnan, B. (2013). Nonlinear analysis of the response and failure of FRP-reinforced concrete columns exposed to fire. *Journal of Composite Materials*, 47(22), 2837–2854.
- Khalaf, J., & Huang, Z. (2019). Analysis of the bond behaviour between prestressed strands and concrete in fire. *Construction and Building Materials*, 128, 12–23.
- Kodur, V. K. R., & Agrawal, A. (2016). An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures*, 110, 293–306.
- Kodur, V. K. R., & Dwaikat, M. (2008). A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), 431–443.
- Mostafaei, H., & Kabeyasawa, T. (2007). Axial-shear-flexure interaction approach for reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, 104(2), 218–225.
- Phan, L. T., & Carino, N. J. (2002). Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Materials Journal*, 99(1), 54–66.
- Pournamazian, A., Samali, B., Shanian, A., Astaraki, F., & Perera, N. (2023). Experimental assessment of the fire resistance of post-fire concrete. *Fire Technology*, 59(2), 847–872.
- Purkiss, J. A., & Li, L.-Y. (2013). *Fire safety engineering design of structures* (3rd ed.). CRC Press.
- Quiel, S. E., & Garlock, M. E. M. (2010). Calculating the buckling strength of steel plates exposed to fire. *Thin-Walled Structures*, 48(9), 684–695.
- Raut, N., & Kodur, V. (2011). Response of high-strength concrete columns under design fire exposure. *Journal of Structural Engineering*, 137(1), 69–79.
- Serega, S. (2021). Assessment and rehabilitation of a fire damaged reinforced concrete structure. *Archives of Civil Engineering*, 67(3), 451–467.
- Shakil, S., Broman, G., & Enquist, B. (2020). Experimental studies on mechanical properties of S700 MC steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 172, 106233.
- Tashan, J., & Al-Mahaidi, R. (2014). Detection of cracks in concrete strengthened with CFRP systems using infra-red thermography. *Composites Part B: Engineering*, 64, 116–125.
- Wald, F., Chloubá, J., Uhlíř, A., Kallerová, P., & Štujberová, M. (2016). Temperatures during fire tests on structure and its prediction according to Eurocodes. *Fire Safety Journal*, 86, 1–6.
- Zaharia, R., & Dubina, D. (2006). Stiffness of joints in steel frames designed to Eurocode 3. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(3), 240–249.
- Zaharia, R., & Pintea, D. (2009). Fire after earthquake analysis of steel moment resisting frames.

International Journal of Steel Structures, 9(4), 275–
284.