Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat
Volume 22, Nomor 2, Agustus 2025
1819-796X (p-ISSN); 2541-1713 (e-ISSN)
https://ppjp.ulm.ac.id/journal/index.php/f

Evaluasi Struktur Bangunan Gedung Beton Bertulang Pasca Kebakaran

Wiku Adhiwicaksana Krasna*), Nursiah Chairunnisa
Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

Email korespodensi : wakrasna@ulm.ac.id

DOI: https://doi.org/10.20527/flux.v22i2.21981

Submited: 22 Februari 2025; Revised: 23 Juni 2025; Accepted: 27 Juni 2025

ABSTRAK

Insiden kebakaran dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada elemen struktur bangunan, yang berdampak pada keselamatan, fungsi, dan keberlanjutan bangunan tersebut. Banyak bangunan yang rusak akibat kebakaran memiliki fungsi vital bagi masyarakat, sehingga menimbulkan kebutuhan yang tinggi untuk segera digunakan kembali. Selain itu, pembangunan gedung baru memerlukan waktu dan biaya yang besar, sehingga muncul harapan kuat untuk segera merehabilitasi bangunan yang terdampak kebakaran. Untuk mencapai hal tersebut, penilaian struktur sangat penting guna memastikan keselamatan bangunan yang terdampak. Dengan mengintegrasikan inspeksi visual, pengujian material, dan analisis struktural, studi ini bertujuan memberikan pedoman bagi para insinyur untuk menentukan tingkat kerusakan dan menyusun rencana penanganan yang tepat.
Kata Kunci: Bangunan pasca-kebakaran; Penilaian struktur; Tingkat kerusakan; Rehabilitasi struktur.

ABSTRACT

Fire incidents can cause significant damage to building structural elements, impacting their safety, functionality, and sustainability. Many fire-damaged buildings serve critical societal functions, resulting in high demand for their prompt reuse. Moreover, constructing new buildings entails substantial time and financial resources, leading to strong expectations for the immediate rehabilitation of fire-damaged structures. To achieve this, structural assessments are essential to ensure the safety of the affected buildings. By integrating visual inspections, material testing, and structural analysis, this study aims to provide guidelines for engineers to determine the extent of damage and develop appropriate mitigation plans.
Keywords: Post-fire buildings; Structural assessment; Damage level; Structural rehabilitation.

PENDAHULUAN

Kebakaran adalah salah satu bencana yang sering terjadi dan memiliki dampak besar terhadap bangunan. Material bangunan seperti beton, baja, dan kayu dapat kehilangan kekuatannya karena paparan suhu tinggi. Karenanya sering muncul pertanyaan apakah bangunan tersebut masih dapat digunakan, diperbaiki atau bahkan harus dihancurkan untuk dibangun kembali. Karena persyaratan desain struktural terkait keselamatan kebakaran lebih berfokus pada evakuasi yang aman dan pencegahan keruntuhan struktur, penilaian kondisi pasca-kebakaran sejauh ini masih kurang mendapat perhatian. Namun, metodologi penilaian pasca-kebakaran yang memadai sangat diperlukan untuk menghindari renovasi atau pembongkaran struktur yang tidak perlu, sekaligus tetap menjamin keamanan struktural. Pemeriksaan pasca kebakaran diperlukan untuk menentukan apakah bangunan masih aman untuk digunakan dan untuk merancang perbaikan yang diperlukan.

Evaluasi struktur bangunan adalah proses penilaian keamanan dan kinerja

struktur, baik untuk bangunan baru maupun bangunan eksisting. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa bangunan tersebut memenuhi standar keamanan yang terbaru. Evaluasi meliputi analisis kondisi material dan elemen struktur serta mengidentifikasi potensi kerusakan yang dapat mempengaruhi kinerja bangunan dalam jangka Panjang (Sadowski, 2022).

Bangunan yang terbuat dari struktur beton pada umumnya terlihat masih berdiri setelah terjadinya kebakaran, hal ini berbeda dengan bangunan dari struktur lain seperti baja dan kayu. Baja kehilangan sekitar 50% kekuatannya pada suhu 550°C (EN 1992-1-2, 2004) sehingga baja berdeformasi akibat kekuatannya yang berkurang. Struktur kayu akan terbakar dan akan kehilangan kekuatan sepenuhnya setelah terkarbonasi (Gosain et al., 2008). Meskipun beton adalah material yang tidak mudah terbakar, karakteristik fisik, kimia, dan mekanisnya akan menurun jika terpapar suhu tinggi (Qin et al., 2022).

Suhu tinggi pada kebakaran menyebakkan kerusakan yang cukup parah, kerusakan termal *spalling* (Kowalski et al., 2025). Paparan panas kebakaran membawa kerusakan pada elemen struktur, bahkan *Steel-reinforced concrete-filled steel tube* (SRCFST) yang dikenal memiliki ketahanan yang baik pada kebakaran juga mengalami degradasi, dimana spesimen SRCFST pasca-kebakaran yang mengalami benturan lateral mengalami kerusakan lentur global (Ji et al., 2023). Kebakaran juga menyebabkan pergeseran posisi sumbu netral pada zona yang terbakar. Perubahan posisi sumbu netral akibat kebakaran dapat digunakan untuk menilai kapasitas elemen struktur pasca-kebakaran secara lebih akurat (Reynders et al., 2025).

Untuk melakukan pemeriksaan struktur pasca kebakaran perlu diketahui metode kerja, alat, dan langkah-langkah evaluasi yang dibutuhkan, serta analisis dampak kebakaran pada elemen struktur utama seperti beton, baja, dan kayu, serta metode pemeriksaan yang melibatkan pengujian *destruktif test* (DT) dan *non-destruktif test* (NDT). Pengujian NDT pada bangunan pasca kebakaran dapat menggunakan *Hammer Test*, *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dan *Vibration Test* (Van Cao et al., 2024).

METODOLOGI

Pengumpulan Informasi

Tahapan awal yang diperlukan dalam penyelidikan struktur pada bangunan pasca kebakaran adalah pengumpulan informasi dasar struktur, seperti lokasi, kondisi sekitar bangunan, data desain dan konstruksi bangunan. Dengan data ini insinyur dapat mendapatkan informasi mengenai fungsi bangunan secara umun, fungsi ruang dalam bangunan, material konstruksi yang digunakan dan perkiraan material yang terbakar bersamaan dengan bangunan tersebut, yang kemudian dapat digunakan untuk mengidentifikasi risiko penyelidikan langsung di lokasi bangunan dan juga untuk mengidentifikasi suhu kebakaran berdasarkan sisa material yang ada.

Penilaian awal kondisi teknis struktur beton bertulang (RC) setelah kebakaran, harus diperhitungkan bagaimana dan seberapa intensif masing-masing elemen struktural dibebani. Kerusakan kecil sekalipun pada elemen yang menopang beban berat dapat mengakibatkan risiko kegagalan bagi struktur. (Kowalski et al., 2025). Untuk penilaian pasca-kebakaran, degradasi kuat lekat antar tulangan dengan beton (*bond strength degradation*) harus dipertimbangkan, terutama pada elemen struktural yang mengalami tegangan tarik tinggi. Kekuatan lekatan akan menurun seiring dengan peningkatan suhu pada antarmuka baja tulangan-beton. Evaluasi pasca-kebakaran tidak boleh mengabaikan degradasi luat lekat, terutama pada elemen struktur yang menahan tegangan tarik (Tajik et al., 2025).

Identifikasi Risiko

Identifikasi risiko merupakan tahapan awal yang dilakukan untuk memastikan keamanan lokasi sebelum pemeriksaan dimulai, mencakup semua faktor risiko yang dapat memengaruhi kinerja bangunan terhadap kebakaran. Semua tindakan keselamatan kebakaran secara keseluruhan dapat memengaruhi asumsi/keputusan yang

Tabel 1. Efek Temperatur pada Perubahan Fisik Beton (Gosain et al., 2008).

Suhu	Perubahan Warna	Perubahan fisik dan suhu acuan	Kondisi Beton
0 - 290 °C	Tidak ada	Tidak terpengaruh	Tidak terpengaruh
290-590 °C	Merah muda ke Merah	Rerak permukaan pada 300°C Retakan dalam pada 550°C Agregat kuarsa mulai pecah pada 575°C	Kekuatan berkurang secara signifikan
590-950 °C	Abu-abu keputihan	Jelaga seperti bubuk berwarna terang 575°C Permukaan beton mulai terkelupas 800°C	Sangat lemah dan rapuh
>950 °C	Krem kekuningan	*Spalling*/terkelupasnya permukaan beton yang sangat parah	Sangat lemah dan rapuh

dibuat selanjutnya (Ingham & Tarada, 2007). Identifikasi ini juga diperlukan untuk memastikan keamanan lokasi sebelum pemeriksaan, sehingga dapat mengurangi risiko bagi tim evaluasi yang melakukan pengujian lapangan.

Pemeriksaan Visual

Pada tahapan awal pengamatan visual dilakukan untuk mengidentifikasi retakan, deformasi, dan kerusakan karbonisasi pada permukaan struktur. Pengamatan dilakukan pada material sisa kebakaran baik material struktural dan non struktural. Dokumentasi data pada kerusakan visual dilakukan secara detail untuk mengetahui kerusakan yang terjadi dan juga dapat memberikan gambaran suhu kebakaran yang terjadi.

Tabel 2. Efek Temperatur pada Kekuatan dan Elastisitas Beton (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004).

Suhu	Sisa Kuat Tekan (%)	Sisa Modulus Elastisitas (%)
200 °C	80	60
300 °C	70	50
400 °C	60	40
500 °C	40	30
600 °C	20	10
800 °C	10	5
1000 °C	0	0

Elemen beton panas yang sangat tinggi dapat menyebabkan reaksi kimia yang membentuk kristal atau mengubah sifat/warna material dan atau agregat pada beton. Reaksi kimia akibat suhu yang tinggi dapat menyebabkan *microcracking* pada permukaan beton. Selain itu, pendinginan beton yang cepat akibat semprotan air pemadam kebakaran dapat menyebabkan retak termal dan pengelupasan pada permukaan beton (Gosain et al., 2008). Baja tulangan beton juga mengalami perlemahan akibat suhu, pada suhu 600 °C baja tulangan mengalami penurunan kekuatan sampai 53% (EN 1992-1-2, 2004). 2 menggambarkan perubahan karakteristik beton akibat suhu.

Baja struktural umum (A36 dan A992) dan baja paduan berkekuatan tinggi masih mampu mempertahankan sekitar 90% kekuatannya pada suhu hampir 300°C. Perubahan dimensi dan deformasi yang signifikan terjadi pada suhu di atas 427°C (National Codes and Standards Council of the Concrete and Masonry Industries, 1994).

Tabel 3. Tabel Perkiraan Titik Leleh untuk Material Umum (CMHA TEK 07-05A, 2007).

Material	Titik Leleh (°C)
Polyethelyne	110-121
Timah	327
Seng	421
Aluminium *alloy*	482-649
Aluminium	649
Kaca	593-732
Perak	960
Kuningan, perunggu	871-982
Tembaga	1082
Cast iron	1149-1371
Baja	1399

Elemen struktur kayu, api membakar bahan kayu dari luar ke dalam, bahan luar yang hangus membantu melindungi bahan dalam. Ada atau tidaknya kayu yang hangus/terbakar dapat membantu menentukan suhu dan durasi kebakaran. Selain itu material lain yang ikut terbakar

bersama-sama dengan bangunan juga dapat menjadi petunjuk mengenai besarnya suhu kebakaran yang terjadi. Kondisi dari beberapa material lain akibat terpapar kebakaran atau suhu tinggi juga dapat digunakan sebagai acuan perkiraan suhu kebakaran yang terjadi seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3** (CMHA TEK 07-05A, 2007).

Evaluasi struktur bangunan adalah proses penting dalam *Structural Health Monitoring* (SHM) dalam rangka memastikan keselamatan dan ketahanan bangunan dan dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan yakni yang dikenal sebagai pengujian (*non-destructive testing*/NDT) dan pengujian (*destructive testing*/DT). Pendekatan NDT biasanya lebih banyak digunakan dikarenakan mampu mengevaluasi keadaan struktur tanpa merusak elemen struktur pada struktur yang di uji. Metode dalam pengujian NDT ini yang cukup lengkap memungkinkan dengan cepat dan efektif dalam mengetahui retakan, korosi atau nilai mutu material pada struktur (Kot et al., 2021).

Pengujian NDT memiliki sejumlah kelebihan dibandingkan dengan pengujian destruktif (DT). Salah satu keunggulan utamanya adalah efisiensi biaya, karena metode NDT umumnya memerlukan peralatan dan proses yang lebih terjangkau. Selain itu, penggunaan alat-alat NDT relatif mudah dan praktis, sehingga tidak membutuhkan prosedur yang kompleks. Dari sisi sumber daya manusia, pengujian ini juga lebih efisien karena memerlukan lebih sedikit tenaga kerja. Prosesnya yang lebih cepat menjadikan NDT pilihan yang tepat dalam situasi yang membutuhkan hasil evaluasi dalam waktu singkat. Keunggulan paling penting dari NDT adalah kemampuannya untuk memeriksa properti material tanpa menimbulkan kerusakan fisik, sehingga struktur atau komponen yang diuji tetap dapat digunakan seperti semula setelah pengujian selesai. (Lehner & Hrabová, 2022).

Metode NDT dengan menggunakan *Rebound Hammer* (RH) dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) ataupun penggunaan pengujian NDT lainnya yang dikombinasikan dengan inspeksi visual struktur bangunan bisa digunakan untuk penilaian struktur bangunan tua ataupun bangunan pasca kebakaran.

Uji *Rebound Hammer* di gunakan untuk mengukur kekuatan beton secara cepat. Pengujian ini digunakan untuk mendapatkan keseragaman kekerasan beton yang dikorelasikan dengan kuat tekan beton. Alat yang digunakan untuk pengujian RH disebut dengan *Schmidt Hammer Test* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Berdasarkan ASTM C805-18, (2018), *Schmit Hammer Test* hanya dapat mengukur kekerasan beton pada lapisan permukaan saja dan karena itu pada elemen struktur dengan dimensi besar, uji RH hanya memberikan indikasi awal mengenai kualitas dan variasi mutu beton. Permukaan beton yang diuji harus bersih dan rata untuk mendapatkan hasil yang aktual dalam perolehan data *rebound* dari ujung *Schmit Hammer test* di permukaan beton.

Gambar 1. *Schmidt Hammer Test.*

Ultrasonic Pulse Velocity Test adalah cara untuk memperkirakan kekerasan beton yang didasarkan pada hubungan kecepatan gelombang UPV melalui media beton dengan kekuatan tekan beton itu (IAEA-TCS-17, 2002). Pengujian UPV adalah salah satu pengujian tidak merusak. Metode uji ini dimaksudkan sebagai acuan dan pegangan dalam pengujian kecepatan rambat gelombang melalui beton. Adapun tujuannya adalah untuk mengetahui keseragaman dan mutu beton relatif, mengindikasi adanya lubang atau retak pada beton dan untuk evaluasi agar dapat dilakukan perbaikan retak secara efektif. Pengujian dilakukan dengan cara identifikasi benda uji, penetapan koreksi kalibrasi alat, penetapan waktu tempuh dan perhitungan kecepatan rambat gelombang.

Hasil pengujian dinyatakan dalam indeks kecepatan perambatan yang mencerminkan kualitas beton sebagai bahan bangunan.

Terdapat tiga metode utama dalam pengujian kualitas material beton menggunakan UPV, yaitu metode langsung (*direct*), tidak langsung (*indirect*) dan *semi-direct*. Berdasarkan ASTM C597-02 UPV menggunakan frekuensi gelombang sebesar 54 kHz (ASTM C597-22, 2022). Teknik ini melibatkan dua komponen utama yaitu, transduser pengirim dan transduser penerima seperti pada Gambar 2. Transduser pengirim berfungsi mengubah sinyal listrik menjadi pulsa gelombang tegangan longitudinal, yang kemudian dirambatkan melalui beton. Setelah melalui beton, pulsa ini diterima oleh transduser penerima, yang mengubahnya kembali menjadi sinyal listrik. Dengan prinsip ini, waktu tempuh gelombang yaitu (T) antara kedua transduser dapat diukur. Kecepatan pulsa yaitu (V) dihitung berdasarkan jarak antara kedua transduser yaitu (L) dan waktu tempuh gelombang menggunakan Pers. (1).

Gambar 2. *Ultrasonic Pulse Velocity.*

$$V = L/T \quad (1)$$

Kecepatan pulsa dalam beton juga berkaitan langsung dengan sifat-sifat elastis dan densitasnya. Hubungan antara kecepatan gelombang, modulus elastisitas dinamis (E), *Poisson ratio* (μ), dan densitas beton (ρ) dijelaskan sebagai dengan Pers. (2).

$$V = \sqrt{\left(E(1-\mu)/\rho(1+\mu)(1-2\mu)\right)} \quad (2)$$

Persamaan (2) berdasarkan ASTM C597-02 UPV tidak hanya memberikan pengukuran jarak secara langsung tetapi juga memberikan gambaran sifat material seperti densitas dan elastisitas yang bisa menunjukkan kondisi internal material beton. Hubungan kecepatan gelombang dengan korelasi kualitas beton dijelaskan pada Tabel 4.

Pada kondisi tertentu jika hasil pengujian tidak merusak tidak dapat dilakukan, atau hasil yang didapatkan masih dianggap tidak dapat mewakili kondisi sesungguhnya maka perlu dilakukan pengujian merusak (*destructive test*). Pengujian destruktif adalah metode pengujian yang dilakukan dengan cara merusak spesimen atau elemen beton untuk mengevaluasi sifat mekanis dan kekuatannya. Hasil dari pengujian ini memberikan data akurat tentang kemampuan beton menahan beban tertentu sebelum gagal.

Tabel 4. Klasifikasi kualitas beton berdasarkan *Pulse Velocity* (IAEA-TCS-17, 2002).

Longitudinal pulse velocity		*Quality of*
km/s .10^3	ft/s	*Concrete*
>4,5	>15	*Excellent*
3,5-4,5	12-15	*Good*
3,0-3,5	10-12	*Doubtful*
2,0-3,0	7-10	*Poor*
<2,0	<7	*Very Poor*

Pengujian ini dilakukan dengan mengambil sampel beton inti dengan melakukan pengeboran (*core drill*) pada elemen struktur yang diinginkan. Sampel beton ini kemudian diuji di laboratorium untuk mendapatkan kekuatan sisa beton setelah mengalami penurunan kekuatan material akibat paparan panas.

Pengujian *core drill* memiliki beberapa kelebihan yang menjadikannya metode penting dalam evaluasi kekuatan beton pada struktur eksisting. Salah satu keunggulan utama dari metode ini adalah kemampuannya untuk memberikan data kekuatan beton secara langsung. Hal ini dimungkinkan karena sampel beton diambil langsung dari bagian struktur yang telah selesai dibangun, sehingga hasil pengujian dapat merepresentasikan kondisi aktual beton di lapangan. Selain itu, pengujian *core drill* juga efektif digunakan dalam mengevaluasi kerusakan pada beton, seperti adanya retakan dalam, segregasi, atau indikasi penurunan mutu beton akibat faktor lingkungan dan beban kerja.

Namun demikian, metode ini tidak lepas dari sejumlah keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Pengambilan inti beton bersifat destruktif, karena secara langsung melubangi elemen struktur, sehingga diperlukan tindakan perbaikan setelah sampel diambil untuk menjaga kelayakan dan keselamatan struktur. Di samping itu, pengambilan sampel dalam jumlah yang berlebihan dapat berdampak pada integritas elemen beton, karena mengurangi luas penampang efektif serta dapat mempercepat proses degradasi. Proses pengujian ini juga relatif memakan waktu lebih lama dan memerlukan peralatan khusus serta tenaga kerja yang terlatih, yang secara tidak langsung menambah kompleksitas dan biaya pelaksanaan di lapangan.

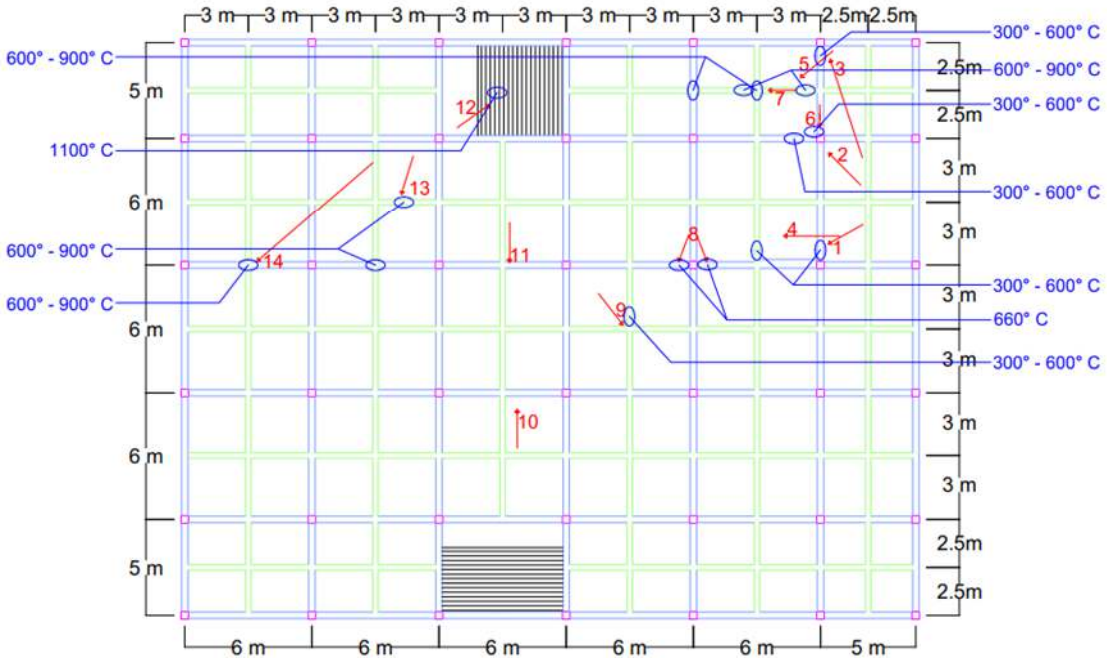
Uji *core drill* adalah metode yang efektif untuk mengevaluasi kekuatan beton di lapangan secara langsung. Meskipun bersifat destruktif, uji ini memberikan data yang sangat akurat mengenai kekuatan beton aktual pada struktur. Namun, penting untuk melaksanakan uji ini secara hati-hati agar tidak merusak integritas struktur secara signifikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi Kasus Evaluasi Struktural

Dalam studi kasus ini diambil kasus kebakaran yang terjadi pada sebuah pasar yang terjadi pada tahun 2018. Berikut adalah hasil pengujian visual lapangan yang dipetakan dalam tabel penyelidikan panas seperti terlihat pada Gambar 3. Dari pengamatan visual maka dapat dipetakan perkiraan suhu pada saat kebakaran terjadi seperti pada Gambar 3.a terlihat terdapat jelaga berwarna hitam dan kemerahan dengan suhu kebakaran mencapai 550°C. Pada Gambar 3.b di mana *rolling door* baja sudah mulai meleleh yang menunjukkan suhu kebakaran mencapai suhu lebih dari 650°C. Lebih lanjut Gambar 3.c menunjukkan bahwa kolom beton bertulang dengan jelaga krem kekuningan, dan permukaan beton mulai mengelupas, hal ini menunjukkan suhu kebakaran mencapai 950°C dan pada Gambar 3.d ditemukan kaca atau botol kaca yang

Gambar 3 Kondisi visual bangunan pasca kebakaran, (a) Jelaga pada portal beton, (b) *Rolling door* yang memuai, (c) Jelaga pada kolom, dan (d) Botol kaca yang meleleh.



Gambar 4. Denah perkiraan suhu kebakaran.

meleleh yang mengindikasikan suhu kebakaran mencapai 593-732 °C. Dari pengamatan kemudian dapat dipetakan perkiraan suhu kebakaran seperti pada Gambar 4.

Dari pemeriksaan visual yang dilakukan perkiraan suhu kebakaran dapat diprediksi dan dari pemeriksaan awal kondisi beton setelah kebakaran menunjukkan terjadi penurunan kualitas yang cukup signifikan seperti yang disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan evaluasi pemeriksaan visual maka direkomendasikan untuk dilakukan pengujian NDT ataupun DT sesuai dengan kebutuhan pada bangunan gedung pasca kebakaran dengan menggunakan beberapa metode yang telah disampaikan sebelumnya.

Pengujian lanjutan dengan NDT maupun DT perlu dilakukan untuk mengumpulkan data yang lebih lengkap mengenai sisa kekuatan aktual elemen struktur bangunan. Data yang didapatkan pada pengujian visual dan NDT tersebut digunakan untuk analisis struktur dan pembahasan lain untuk dapat memberikan kesimpulan apakah bangunan tersebut dapat digunakan kembali, atau harus diperbaiki dan diperkuat sebelum digunakan kembali, atau bahkan harus dihancurkan demi keselamatan masyarakat.

Tabel 5 Rerata mutu beton berdasarkan pengujian *Hammer Test.*

Elemen Struktur	Hasil Uji (MPa)
Kolom	23,44
Balok	27,34
Pelat	15,26

Pengujian NDT berupa penggujian dengan menggunakan *hammertest* dilakukan pada bagunan tersebut, pengujian dilakukan berdasarkan standar pengujian (ASTM C805-18, 2018) dan (SNI 03-4430-1997, 1997) hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 5. Pengujian *hammer test* dilakukan pada elemen balok, kolom dan pelat bangunan beton pasca kebakaran. Dari pengujian dapat dilihat bahwa mutu beton pada pelat lantai dua memiliki mutu yang lebih rendah, akibat panas api dari bagian bawah.

Perlindungan Bangunan pada Kebakaran

Beberapa metode untuk perlindungan beton terhadap kebakaran dapat dipilih seperti penggunaan plester insulasi modern sebagai lapisan pelindung beton (Ustabas et al., 2024). Penambahan lapisan perlindung juga terbukti dapat menambah jangka waktu sebelum kerusakan mulai terjadi pada baja prategang (Zhang et al., 2024).

Metode lain yang juga dapat digunakan dalam perlindungan dan perbaikan struktur

beton pasca kebakaran adalah penggunaan material dengan kemampuan penyembuhan sendiri (*bacterial self-healing mechanisms*) seperti penambahan *carbon fiber bacteria balls* (CFBB) pada beton, dimana pemulihan kekuatan tekan hingga 85% pada beton dengan CFBB (Vedrtnam et al., 2025).

Selain itu pada tahapan perencanaan bangunan baru dapat menggunakan pendekatan berbasis kinerja (*performance-based*) dalam perancangan struktur tahan kebakaran dengan mengidentifikasi *fire intensity measure* (IM) yang paling sesuai dan berkorelasi dengan respons struktural (*engineering demand parameters, EDPs*) pada elemen balok dan kolom beton bertulang saat terjadi kebakaran (Baheti et al., 2025).

KESIMPULAN

Kebakaran dapat menyebabkan berbagai tingkat kerusakan pada material struktur, tergantung pada intensitas api dan durasi paparan. Pemeriksaan yang sistematis sangat penting untuk menilai tingkat kerusakan dan menyusun rencana mitigasi untuk juga dapat memastikan keamanan dan keselamatan pada proses penyelidikan struktur di lapangan secara langsung.

Pemeriksaan pasca kebakaran perlu melibatkan insinyur yang kompeten, insinyur yang kompeten diharapkan mampu menerapkan DT dan NDT untuk mendapatkan hasil akurat. Serta dapat melakukan analisa kekuatan dan memberikan rekomendasi mengenai perkuatan, perbaikan atau bahkan saran pembongkaran pada bangunan pasca kebakaran demi menjamin keamanan dan keselamatan struktur serta penggunanya.

Penggunaan material tahan api dalam perencanaan, dan atau perbaikan struktur untuk meningkatkan ketahanan bangunan serta penerapan sistem manajemen keselamatan kebakaran pada bangunan publik untuk mengurangi risiko terhadap masyarakat pengguna maupun struktur bangunan itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM C597-22. (2022). *Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0597-22

ASTM C805-18. (2018). *Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0805_C0805M-18

Baheti, A., Lange, D., & Matsagar, V. (2025). Appropriate Fire Intensity Measures for Reinforced Concrete Beam and Column Elements. *Engineering Structures*, *323*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119223

CMHA TEK 07-05A. (2007). *Tech Note 07-05A Evaluating Fire-Exposed Concrete Masonry Walls Walls After a Fire*.

Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2004). *Pd T-08-2004-C: Pemeriksaan Konstruksi Bangunan Beton Bertulang Pasca Kebakaran*.

EN 1992-1-2. (2004). *EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*.

Gosain, N. K., Drexler, R. F., & Choudhuri, D. (2008, September). Evaluation and Repair of Fire-Damaged Buildings. *Structural Forensics*. www.STRUCTUREmag.org

IAEA-TCS-17. (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*.

Ingham, J., & Tarada, F. (2007). Turning up the heat – full service fire safety engineering for concrete structures. *Concrete*, 27–30.

Ji, S. H., Wang, W. Da, Chen, W., Shi, Y. L., & Xian, W. (2023). Lateral impact behaviour of post-fire steel-reinforced concrete-filled steel tubular members: Experiment and evaluation method. *Engineering Structures*, *293*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116612

Kot, P., Muradov, M., Gkantou, M., Kamaris, G. S., Hashim, K., & Yeboah, D. (2021). Recent advancements in non-destructive testing techniques for structural health monitoring. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 6). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/app11062750

Kowalski, R., Głowacki, M., Wróblewska, J., Senatorska-Dobrowolska, M., & Smardz, P. (2025). Dangerous damage of RC structural members caused by thermal spalling of concrete during fire in an enclosed car park of residential building. *Fire Safety Journal*, *152*. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2025.104352

Lehner, P., & Hrabová, K. (2022). Relationship of Time-Dependent Parameters from Destructive and Non-Destructive Tests of Structural Concrete. *Mathematics*, *10*(3). https://doi.org/10.3390/math10030460

National Codes and Standards Council of the Concrete and Masonry Industries. (1994). *Assessing the Condition and Repair Alternatives of Fire-Exposed Concrete and Masonry Members, Fire Protection Planning Report*.

Qin, D., Gao, P. K., Aslam, F., Sufian, M., & Alabduljabbar, H. (2022). A comprehensive review on fire damage assessment of reinforced concrete structures. *Case Studies in Construction Materials*, *16*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00843

Reynders, E. P. B., Godeau, J., Jovanović, B., van de Velde, M., Anastasopoulos, D., Lombaert, G., Caspeele, R., & Van Coile, R. (2025). Experimental analysis of the influence of moderate fire damage on the dynamic and incremental static behavior of reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, *323*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119213

Sadowski, Ł. (2022). Non-Destructive Testing for Building Evaluation. In *Buildings* (Vol. 12, Issue 7). MDPI. https://doi.org/10.3390/buildings12071030

SNI 03-4430-1997. (1997). *SNI 03-4430-1997: Metode pengujian elemen struktur beton dengan alat palu beton tipe N dan NR*.

Tajik, N., Elhami-Khorasani, N., Ranade, R., & Tessari, A. (2025). Experimental study of post-fire bond strength between steel reinforcing bars and concrete using beam-end specimens. *Engineering Structures*, *336*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120450

Ustabas, I., Cuce, P. M., Alvur, E., Kesepara, D., Yilmaz, Y. N., Cuce, E., & Alshahrani, S. (2024). Fire retardation, compressive strength and durability analysis of concrete reinforced with novel plasters: An experimental, computational and statistical research. *Case Studies in Thermal Engineering*, *55*. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104156

Van Cao, V., Nguyen, V. N., Ronagh, H., Nguyen, C. Q., Le, P. B. N., Nguyen, L. H., Nguyen, H. M., & Van Bui, H. (2024). Nondestructive Evaluation of Postfire Full-Scale Reinforced Concrete Frames: Field Tests. *Journal of Nondestructive Evaluation*, *43*(2). https://doi.org/10.1007/s10921-024-01050-3

Vedrtnam, A., Gunwant, D., Kalauni, K., & Palou, M. T. (2025). Experimental and numerical study on sustainable post-fire repair of concrete structures using bacterial self-healing mechanisms. *Construction and Building Materials*, *474*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141175

Zhang, Y., Zhang, X., Zhang, R., Ni, W., Zhi, W., & Wang, L. (2024). Fire and post-fire performance of unbonded semi-precast prestressed reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, *308*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117961.