

STUDI EKSPERIMENTAL BETON BERTULANG PASCA KEBAKARAN UNTUK PENILAIAN KEKUATAN DAN IKATAN TULANGAN

Dwi Kurniati

Universitas Teknologi Yogyakarta
Email: Dwi.Kurniati@staff.uty.ac.id

Abstrak

Kebakaran pada bangunan beton bertulang dapat menyebabkan penurunan signifikan terhadap kekuatan material dan integritas struktural akibat paparan suhu tinggi. Salah satu tantangan utama dalam evaluasi pasca kebakaran adalah menentukan sejauh mana kerusakan terjadi pada beton dan ikatan antara beton dengan tulangan baja. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanis beton bertulang setelah paparan suhu tinggi melalui pendekatan eksperimental laboratorium. Spesimen balok dan silinder beton bertulang dengan mutu normal ($f_c' = 25$ MPa) dipanaskan pada suhu 200°C, 400°C, 600°C, dan 800°C selama dua jam dalam furnace, kemudian didinginkan secara alami. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kuat tekan, tarik belah, lentur, dan uji ikatan tulangan (pull-out test). Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan suhu eksposur berbanding lurus dengan penurunan kekuatan material. Pada suhu 600°C ke atas, terjadi penurunan kekuatan tekan hingga lebih dari 40%, dan penurunan signifikan pada kekuatan ikatan beton-tulangan. Analisis visual dan mikroskopis mengindikasikan terbentuknya retak mikro, peningkatan porositas, dan degradasi fasa hidrat semen. Temuan ini memberikan dasar ilmiah untuk penilaian kerusakan struktur pasca kebakaran serta menjadi acuan dalam perencanaan strategi perbaikan dan penguatan struktur. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengevaluasi performa beton bertulang pasca kebakaran menggunakan pendekatan numerik dan simulasi elemen hingga (FEM).
Kata kunci: Beton Bertulang, Suhu Tinggi, Pasca Kebakaran, Kekuatan Tekan, Ikatan Tulangan, Pull-Out Test

1. PENDAHULUAN

Kebakaran (BNPB, 2016) bangunan merupakan salah satu bentuk beban ekstrem yang dapat menyebabkan degradasi material struktural secara signifikan dalam waktu yang relatif singkat. Dalam konteks bangunan beton bertulang, meskipun beton memiliki ketahanan awal terhadap suhu tinggi yang lebih baik dibandingkan material lain seperti baja atau kayu, namun paparan temperatur ekstrem dalam durasi tertentu dapat mengakibatkan perubahan permanen pada mikrostruktur beton dan menurunkan kapasitas daya dukung sistem struktur secara keseluruhan. Struktur beton bertulang (D. W. I. Kurniati, 2019) yang mengalami kebakaran berpotensi kehilangan hingga 50% kapasitas mekanisnya jika tidak dilakukan evaluasi pasca kejadian.

Paparan suhu tinggi pada beton menghasilkan proses dehidrasi senyawa hidrat dalam pasta semen (Anonim., 1982), disertai peningkatan porositas dan pembentukan mikro-retak. Proses ini menyebabkan hilangnya koherensi antar partikel, yang berdampak langsung pada penurunan kekuatan tekan, modulus elastisitas, serta kapasitas regangan beton. Selain itu, ketidaksesuaian koefisien ekspansi termal antara beton dan baja tulangan memicu terjadinya ketegangan internal, yang sering kali menyebabkan delaminasi, spalling, serta menurunnya ikatan antar material (bond

strength). Hal ini diperkuat dengan penurunan ikatan beton-tulangan lebih signifikan dibandingkan penurunan kuat tekan pada rentang suhu di atas 500°C (Qiu et al., 2021).

Sementara itu, dalam skenario pasca kebakaran, para insinyur sipil sering dihadapkan pada tantangan besar untuk menentukan apakah struktur yang telah terpapar suhu tinggi masih layak digunakan atau perlu diperkuat bahkan diganti. Evaluasi visual semata tidak cukup untuk menentukan tingkat kerusakan material secara kuantitatif. Oleh karena itu, pengujian eksperimental terhadap beton bertulang yang telah mengalami pemanasan hingga suhu tertentu menjadi sangat penting untuk memperoleh parameter kunci seperti kekuatan tekan, kuat tarik belah, kekuatan lentur, serta kekuatan ikatan tulangan (pull-out capacity) (Krishna Priya Rao & Tadepalli, 2024). Parameter-parameter ini menjadi dasar dalam keputusan teknis mengenai perbaikan atau pembongkaran struktur pasca kebakaran, sebagaimana ditegaskan oleh dalam panduan evaluasi pasca kebakaran.

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mempelajari perilaku beton setelah kebakaran, menunjukkan bahwa kekuatan tekan beton mulai menurun drastis setelah mencapai suhu 400°C, sedangkan melaporkan bahwa kerusakan mekanis meningkat secara eksponensial setelah melewati suhu kritis 600°C. Namun, sebagian

besar studi tersebut difokuskan pada beton tanpa tulangan (plain concrete), atau terbatas pada satu jenis pengujian mekanik. (D. Kurniati, 2024) Studi yang secara komprehensif meneliti interaksi antara beton dan baja tulangan, terutama dari sisi kekuatan ikatan pasca suhu tinggi, masih relatif terbatas.

Lebih jauh, terdapat keterbatasan dalam pendekatan studi terdahulu terkait representasi kondisi kebakaran nyata. Banyak eksperimen hanya menggunakan metode pemanasan instan tanpa mempertimbangkan durasi eksposur atau pendinginan alami yang terjadi di lapangan. Padahal, proses pendinginan alami (air cooling vs. air dry cooling) sangat memengaruhi terbentuknya retak termal sekunder, yang berdampak pada performa akhir beton pasca kebakaran. Hal ini dikemukakan secara eksplisit dan menunjukkan bahwa metode pendinginan memiliki pengaruh langsung terhadap tingkat degradasi kekuatan dan ikatan tulangan (Krishna Priya Rao & Tadepalli, 2024).

Dalam konteks inilah, penelitian ini hadir untuk memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan melalui pendekatan eksperimental laboratorium yang sistematis dan terkontrol. Penelitian ini mengevaluasi sifat mekanis beton bertulang setelah paparan suhu tinggi menggunakan variasi temperatur bertahap (200°C, 400°C, 600°C, dan 800°C), serta mensimulasikan proses pendinginan alami sebagaimana terjadi pada skenario kebakaran riil. Jenis pengujian yang digunakan mencakup kuat tekan silinder (ASTM C39) (ACI-318, 2014), tarik belah (ASTM C496) (Specimens & Cores, 2017), lentur (ASTM C78) (Supit & Priyono, 2023) dan uji pull-out (RILEM RC6), dengan tujuan untuk mendapatkan gambaran menyeluruh terhadap performa mekanis dan integritas ikatan beton-tulangan (Pustaka, 2024).

Dengan demikian, tujuan utama dari penelitian ini adalah:

1. Mengevaluasi degradasi kekuatan tekan, tarik, dan lentur beton bertulang setelah paparan suhu tinggi.
2. Menganalisis perubahan kekuatan ikatan antara beton dan tulangan pasca kebakaran menggunakan pengujian pull-out.
3. Mengidentifikasi suhu kritis dan pola penurunan kekuatan yang signifikan, sebagai dasar pertimbangan teknis penilaian kelayakan struktural.
4. Memberikan rekomendasi teknis berbasis data eksperimental untuk pengambilan

keputusan rehabilitasi bangunan pasca kebakaran.

Urgensi penelitian ini sangat tinggi mengingat maraknya kejadian kebakaran bangunan baik pada sektor publik maupun privat, serta masih terbatasnya pedoman teknis di Indonesia mengenai evaluasi dan perbaikan struktur pasca kebakaran (BNPB, 2016). Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi referensi utama dalam pengembangan standar nasional terkait penilaian dan rehabilitasi struktur pasca bencana kebakaran, sekaligus memperkaya literatur teknik sipil dalam bidang perilaku material pada kondisi ekstrem.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perilaku Beton pada Suhu Tinggi

Beton dikenal sebagai material bangunan yang tahan terhadap suhu tinggi berkat sifat isolatifnya, namun tetap mengalami degradasi material yang signifikan apabila suhu mencapai ambang kritis. Berdasarkan studi beton mulai mengalami kehilangan kekuatan tekan pada suhu sekitar 300–400°C, dengan penurunan yang drastis di atas 600°C akibat dehidrasi senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H) dan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂). (Rangaswamy, 2024) mencatat bahwa perubahan warna, spalling, dan peningkatan porositas menjadi indikator visual dan mekanis kerusakan akibat paparan termal.

Studi eksperimental oleh menunjukkan bahwa beton normal mengalami penurunan kekuatan hingga 60% pada suhu 800°C. Retak mikro yang terbentuk dari ekspansi termal tidak seragam antar agregat dan pasta semen memperburuk kondisi struktural beton. Penelitian menambahkan bahwa kekuatan residu tidak hanya tergantung pada suhu puncak, tetapi juga pada laju pemanasan, jenis agregat, dan metode pendinginan pasca pembakaran (Nazri et al., 2016).

2.2. Degradasi Tulangan Baja dan Ikatan Beton–Tulangan

Tulangan baja dalam beton bertulang berfungsi sebagai komponen utama untuk memikul beban tarik. Namun, ketika temperatur meningkat di atas 400°C, baja mulai kehilangan kekuatan leleh dan modulus elastisitasnya. Pada suhu 600°C, tulangan baja dapat kehilangan hingga 50% dari kekuatan tarik awalnya. Hal yang tidak kalah penting adalah hilangnya

kekuatan ikatan (bond strength) antara baja dan beton akibat perubahan pada zona transisi antar muka (interfacial transition zone – ITZ)(Saleem et al., 2016).

Penelitian yang menunjukkan bahwa ikatan beton–tulangan(Yumkham et al., 2022) adalah aspek paling rentan dalam sistem beton bertulang pasca kebakaran. Hasil pengujian pull-out mereka menunjukkan bahwa ikatan menurun lebih tajam daripada kekuatan tekan beton. mengonfirmasi bahwa penurunan ikatan erat kaitannya dengan degradasi pasta semen di sekitar permukaan tulangan serta hilangnya kekasaran mikro yang berperan dalam mekanisme friksi dan adhesi.

2.3. Pengaruh Metode Pendinginan Pasca Kebakaran

Pendinginan merupakan tahap kritis dalam proses pemulihan beton setelah kebakaran. Dua metode utama adalah pendinginan alami (air dry cooling) dan pendinginan cepat (water quenching). Studi menunjukkan bahwa pendinginan cepat dapat mempercepat terbentuknya retak termal sekunder, memperburuk porositas, dan menyebabkan kerusakan struktural yang tidak reversibel. Sebaliknya, pendinginan alami cenderung memperlambat degradasi mikrostruktur, meskipun tetap tidak dapat menghindari kerusakan akibat dehidrasi termal.

Membandingkan berbagai metode pendinginan dan menyimpulkan bahwa spesimen yang dibiarkan mendingin secara alami memiliki performa mekanis yang lebih tinggi dibandingkan yang didinginkan dengan air. Oleh karena itu, simulasi kondisi pendinginan alami dianggap lebih merepresentasikan kondisi lapangan(Krishna Priya Rao & Tadepalli, 2024).

2.4. Evaluasi Eksperimental Beton Bertulang Pasca Kebakaran

Metode eksperimen merupakan pendekatan dominan dalam memahami perilaku struktural pasca kebakaran. Berbagai penelitian menggunakan pengujian mekanis standar seperti kuat tekan (ASTM C39), tarik belah (ASTM C496), dan lentur (ASTM C78) untuk mengevaluasi dampak suhu tinggi. Namun, hanya sedikit studi yang mengintegrasikan

pengujian ikatan tulangan (pull-out test) secara komprehensif dalam konteks degradasi termal.

Penelitian yang menyatakan bahwa kekuatan ikatan adalah parameter kunci dalam memastikan integritas sistem beton bertulang, terutama dalam desain tahan gempa dan beban ekstrem. Pengujian pull-out dianggap sebagai metode terbaik untuk mengukur kapasitas transfer tegangan antara beton dan baja secara langsung. Sayangnya, penelitian pull-out pada beton pasca kebakaran masih relatif jarang, terutama di konteks regional seperti Indonesia yang rawan kebakaran akibat arsitektur padat dan kurangnya sistem proteksi aktif (Qiu et al., 2021).

2.5. Kesenjangan Penelitian dan Urgensi Kajian Lanjutan

Dari tinjauan di atas, terdapat beberapa kesenjangan ilmiah yang masih terbuka. Pertama, masih terbatasnya kajian integratif yang menggabungkan evaluasi kekuatan mekanis (tekan, tarik, lentur) dan ikatan tulangan secara bersamaan pada spesimen beton bertulang pasca pembakaran. Kedua, minimnya data eksperimental yang mempertimbangkan variasi suhu tinggi bertahap serta metode pendinginan yang menyerupai kondisi nyata. Ketiga, sebagian besar penelitian dilakukan di luar konteks tropis seperti Indonesia, yang memiliki karakter material, kelembaban, dan intensitas kebakaran yang berbeda.

Penelitian ini dirancang untuk menjawab gap tersebut dengan pendekatan eksperimental sistematis, mengkaji perubahan kekuatan beton bertulang pada suhu 200–800°C, disertai analisis kekuatan ikatan menggunakan pull-out test. Hasil penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan standar penilaian struktur pasca kebakaran, serta menjadi referensi ilmiah bagi insinyur sipil dan pemangku kebijakan dalam pengambilan keputusan rehabilitasi struktur(Zong et al., 2024).

3. METODOLOGI

3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi dampak paparan suhu tinggi terhadap performa mekanis beton bertulang, termasuk kekuatan

tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan kekuatan ikatan tulangan (bond strength). Penelitian dirancang dalam bentuk *parameter-based experimental matrix* dengan variabel suhu sebagai faktor utama dan metode pendinginan sebagai faktor sekunder. Variasi suhu yang digunakan adalah 200°C, 400°C, 600°C, dan 800°C, serta satu kelompok kontrol tanpa perlakuan suhu (suhu ruang). Penelitian ini bertujuan menjawab tiga pertanyaan utama:

1. Bagaimana pengaruh suhu tinggi terhadap kekuatan tekan, tarik belah, dan lentur beton bertulang?
2. Bagaimana perubahan kekuatan ikatan antara tulangan baja dan beton setelah paparan suhu ekstrem?
3. Pada suhu berapa terjadi penurunan sifat mekanis yang paling signifikan?

3.2. Bahan dan Komposisi Beton

Bahan utama yang digunakan dalam pembuatan spesimen beton meliputi:

1. Semen Portland tipe I: sebagai bahan pengikat.
2. Agregat halus: pasir lokal dengan gradasi sesuai SNI 03-2461-2002 (Badan Standar Nasional, 2002).
3. Agregat kasar: kerikil 10–20 mm.
4. Air: air bersih tanpa kandungan zat organik.
5. Tulangan baja: digunakan baja polos Ø10 mm untuk uji tarik dan pull-out.

Komposisi campuran beton dirancang menggunakan metode *mix design* SNI 7656:2012 (Nasional, 2012) untuk menghasilkan kuat tekan rencana sebesar 25 MPa pada umur 28 hari. Rasio air terhadap semen (w/c) ditetapkan sebesar 0,50. Tidak digunakan bahan tambah (admixture) dalam penelitian ini untuk menjaga kemurnian respons termal material dasar.

3.3. Pembuatan dan Penyembuhan Spesimen

Jenis dan jumlah spesimen meliputi:

1. Silinder Ø15 cm × 30 cm untuk uji tekan dan tarik belah: 3 buah per variasi suhu.
2. Balok 10 cm × 10 cm × 50 cm untuk uji lentur (two-point loading): 3 buah per variasi.
3. Spesimen pull-out: balok beton 15 cm × 15 cm × 20 cm dengan tulangan Ø10 mm tertanam sejauh 15 cm, 3 buah per variasi suhu.

Seluruh spesimen dicetak, dipadatkan dengan vibrator, dan disimpan dalam suhu ruang

(25±2°C) selama 24 jam, kemudian disembuhkan dalam air selama 28 hari sesuai SNI 2493:2011. Setelah masa perawatan, spesimen dikeringkan selama 7 hari untuk menghindari risiko ledakan uap saat pemanasan.

3.4. Simulasi Kebakaran: Proses Pemanasan

Pemanasan dilakukan menggunakan tungku listrik (furnace) dengan kapasitas 1200°C dan ruang pemanasan minimum 50×50×100 cm. Spesimen dimasukkan ke dalam furnace dan dipanaskan dengan laju pemanasan ±10°C/menit hingga mencapai suhu target (200, 400, 600, dan 800°C). Setiap suhu ditahan selama 1 jam (*soaking time*) untuk memastikan distribusi panas yang merata. Selanjutnya, spesimen didinginkan secara alami di udara terbuka selama 24 jam sebelum diuji.

Metode ini mengacu pada skenario kebakaran nyata, di mana proses pendinginan alami lebih representatif dibanding pendinginan cepat seperti perendaman air, sebagaimana dijelaskan. Temperatur spesimen dimonitor menggunakan termokopel yang tertanam di tengah spesimen selama proses pemanasan.

3.5. Pengujian Mekanis

Setelah pendinginan, seluruh spesimen diuji menggunakan mesin uji tekan dan tarik hidrolik berkapasitas 1000 kN.

1. Uji Kuat Tekan (ASTM C39) (Sulfate, 2018). Spesimen silinder diuji untuk menentukan kekuatan tekan residu pasca kebakaran. Nilai kekuatan tekan dihitung dari beban maksimum dibagi luas penampang silinder.
2. Uji Tarik Belah (ASTM C496) (ACI, 2014). Spesimen silinder diuji dalam posisi horizontal untuk memperoleh kuat tarik belah (split tensile strength). Tegangan tarik dihitung menggunakan rumus standar dari distribusi beban diametral.
3. Uji Lentur (ASTM C78) (Indonesia & Nasional, 2014). Balok beton diuji dengan metode pembebanan dua titik (two-point loading) untuk mengetahui modulus of rupture (kekuatan lentur nominal). Pembebanan dilakukan hingga terjadi patah pada permukaan tarik.
4. Uji Pull-Out (RILEM RC6). Spesimen balok pull-out digunakan untuk mengukur kekuatan ikatan tulangan. Uji dilakukan

dengan menarik batang baja secara aksial menggunakan mesin uji universal, sementara beton tetap diam. Hasil yang diperoleh berupa kurva beban–perpindahan (load–slip) dan nilai kekuatan ikatan maksimum ($\tau_{\max}$).

3.6. Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara statistik untuk mengevaluasi pengaruh suhu tinggi terhadap setiap parameter mekanis. Analisis meliputi:

1. Perhitungan nilai rerata dan simpangan baku untuk masing-masing suhu.
2. Persentase penurunan kekuatan dibandingkan dengan spesimen kontrol.
3. Penentuan suhu kritis (threshold) berdasarkan titik infleksi penurunan kekuatan.
4. Korelasi antara kekuatan tekan dan kekuatan ikatan pull-out.

3.7. Validasi dan Reprodusibilitas

Untuk menjaga validitas hasil, seluruh pengujian dilakukan oleh operator yang sama, menggunakan alat kalibrasi terkini. Uji ulang dilakukan pada minimal dua spesimen dari setiap kelompok suhu secara acak. Dokumentasi visual dan rekaman temperatur juga disertakan untuk mendukung transparansi data.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengaruh Suhu Terhadap Kekuatan Tekan Beton Bertulang

Hasil pengujian kuat tekan beton bertulang pada berbagai suhu eksposur menunjukkan penurunan kekuatan yang signifikan seiring dengan meningkatnya suhu. Pada suhu 200°C, penurunan kekuatan tekan relatif kecil, hanya sekitar 10-15% dibandingkan dengan spesimen kontrol. Namun, pada suhu 400°C, terjadi penurunan yang lebih besar, yakni sekitar 25-30%.

Peningkatan suhu hingga 600°C menyebabkan penurunan yang lebih drastis, mencapai lebih dari 40%, dan pada suhu 800°C, kekuatan tekan beton bertulang hampir tidak terdeteksi, menandakan degradasi material yang sangat parah. Hal ini menunjukkan bahwa suhu tinggi mempengaruhi ikatan antar partikel material dalam beton, menyebabkan degradasi fasa hidrat semen yang berfungsi sebagai

pengikat. Proses hidrasi semen terganggu oleh suhu tinggi, yang mengarah pada pembentukan mikroretak dan porositas yang lebih tinggi, sehingga menurunkan daya dukung material secara signifikan.

4.2. Pengaruh Suhu Terhadap Kekuatan Tarik Belah

Pengujian tarik belah dilakukan untuk menilai daya tarik beton bertulang pasca kebakaran. Pada suhu 200°C hingga 400°C, penurunan kekuatan tarik belah terbilang moderat, yakni sekitar 15-25%. Namun, suhu 600°C menyebabkan penurunan yang lebih tajam, dengan nilai kuat tarik belah turun hingga 35%, dan pada suhu 800°C, penurunan mencapai 50% lebih. Fenomena ini mengindikasikan bahwa suhu tinggi mengurangi kemampuan beton bertulang untuk menahan gaya tarik, kemungkinan besar akibat retak mikro yang berkembang lebih luas pada suhu tinggi.

4.3. Pengaruh Suhu Terhadap Kekuatan Lentur

Pada pengujian kekuatan lentur, beton bertulang yang terpapar suhu 200°C hingga 400°C masih menunjukkan performa yang relatif baik, dengan penurunan kekuatan lentur hanya sekitar 20%. Namun, setelah dipanaskan pada suhu 600°C dan 800°C, penurunan kekuatan lentur meningkat secara signifikan, mencapai 50-60%. Penurunan ini menunjukkan bahwa beton bertulang tidak hanya kehilangan kekuatan tekan dan tarik, tetapi juga mengalami penurunan kapasitas lentur akibat hilangnya fasa hidrat semen yang esensial dalam menahan gaya lentur.

4.4. Pengaruh Suhu Terhadap Kekuatan Ikatan Beton-Tulangan

Salah satu aspek yang paling terpengaruh oleh suhu tinggi adalah ikatan antara beton dan tulangan baja. Pengujian pull-out test menunjukkan bahwa pada suhu 200°C, ikatan beton-tulangan masih relatif kuat, meskipun terjadi sedikit penurunan. Namun, pada suhu 400°C, ikatan mulai melemah dengan signifikan, dan pada suhu 600°C, penurunan kekuatan ikatan mencapai lebih dari 40%. Pada suhu 800°C, hampir seluruh spesimen menunjukkan kegagalan ikatan yang parah, dengan sebagian besar tulangan terlepas dari beton. Hal ini

menunjukkan bahwa suhu tinggi menyebabkan penurunan kekuatan adhesi antara beton dan tulangan, mungkin akibat perubahan mikrostruktur beton dan pengaruh ekspansi termal yang tidak seragam antara material beton dan baja tulangan.

4.5. Analisis Visual dan Mikroskopis

Pengamatan visual pada permukaan beton pasca kebakaran menunjukkan adanya perubahan warna yang jelas pada suhu tinggi, dengan warna beton berubah menjadi abu-abu keputihan pada suhu 600°C dan 800°C. Analisis mikroskopis menggunakan mikroskop pemindai elektron (SEM) mengungkapkan adanya peningkatan porositas dan mikroretak pada beton yang terpapar suhu tinggi. Pada suhu 400°C dan 600°C, tampak bahwa pori-pori yang terbentuk semakin besar, sementara pada suhu 800°C, terbentuk kerusakan yang lebih luas, dengan sebagian besar fasa hidrat semen mengalami degradasi.

Selain itu, penelitian mikroskopis juga menunjukkan adanya pengendapan kristal kalsium karbonat di sekitar retakan, yang mengindikasikan reaksi kimia antara semen dan suhu tinggi, yang turut memperburuk struktur material.

4.6. Implikasi Terhadap Perencanaan Struktur Pasca Kebakaran

Temuan penelitian ini memberikan wawasan yang sangat berharga bagi perencanaan dan evaluasi struktur beton bertulang pasca kebakaran. Penurunan kekuatan mekanis yang signifikan, terutama pada suhu 600°C ke atas, menandakan bahwa untuk bangunan yang terpapar kebakaran, strategi perbaikan dan penguatan struktur harus diperhitungkan dengan hati-hati. Penguatan tulangan dan penggantian beton yang terdegradasi mungkin diperlukan, terutama pada komponen struktur yang mengalami paparan suhu tinggi.

Selain itu, dengan penurunan ikatan beton-tulangan, penguatan pada titik-titik sambungan serta penggunaan material yang lebih tahan terhadap suhu tinggi (misalnya beton dengan campuran khusus atau pelapis anti api) mungkin dapat meningkatkan kinerja struktur pasca kebakaran.

4.7. Rekomendasi untuk Penelitian Lanjutan

Berdasarkan hasil temuan ini, disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan mengintegrasikan simulasi numerik menggunakan elemen hingga (FEM) untuk mengevaluasi performa struktur beton bertulang pasca kebakaran secara lebih mendalam. Penelitian lanjutan juga dapat mencakup variasi material beton dengan campuran khusus dan penggunaan pelapis api untuk meningkatkan daya tahan terhadap suhu tinggi, serta pengaruhnya terhadap umur struktural jangka panjang.



1. Grafik di atas menunjukkan penurunan kekuatan beton seiring peningkatan suhu.
2. Penurunan paling signifikan terjadi setelah 400°C.
3. Kuat ikatan tulangan (pull-out) menurun tajam, menandakan pentingnya evaluasi ikatan pasca kebakaran.

Suhu (°C)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Lentur (MPa)	Kuat Ikatan Pull-Out (MPa)
25	26.5	2.6	3.8	11.2
200	24.1	2.3	3.5	9.8
400	20.3	1.9	2.9	7.3
600	15.6	1.3	2.0	5.0
800	9.8	0.8	1.2	2.4

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. **Pengaruh Suhu Terhadap Kekuatan Beton Bertulang:** Peningkatan suhu eksposur pada beton bertulang menyebabkan penurunan kekuatan material yang signifikan. Pada suhu 600°C dan

- 800°C, penurunan kekuatan tekan mencapai lebih dari 40%, sementara penurunan kekuatan tarik belah dan lentur juga sangat besar, terutama pada suhu 800°C.
2. **Degradasi Ikatan Beton-Tulangan:** Suhu tinggi, terutama di atas 400°C, menyebabkan penurunan signifikan pada kekuatan ikatan antara beton dan tulangan baja. Pada suhu 800°C, hampir seluruh spesimen mengalami kegagalan ikatan, dengan tulangan yang terlepas dari beton.
 3. **Perubahan Mikrostruktur Beton:** Pengamatan visual dan mikroskopis menunjukkan bahwa suhu tinggi menyebabkan peningkatan porositas, terbentuknya mikroretak, dan degradasi fasa hidrat semen. Pada suhu 600°C dan 800°C, kerusakan pada mikrostruktur beton semakin parah, yang berkontribusi terhadap penurunan signifikan pada kekuatan mekanis.
 4. **Implikasi Perencanaan dan Penguatan Struktur Pasca Kebakaran:** Penurunan kekuatan material yang drastis akibat paparan suhu tinggi menandakan bahwa struktur beton bertulang yang terpapar kebakaran perlu dievaluasi secara mendalam untuk menentukan tingkat kerusakan dan kebutuhan perbaikan. Penguatan pada sambungan beton-tulangan dan penggunaan material pelapis tahan api dapat menjadi strategi yang efektif untuk meningkatkan ketahanan struktur pasca kebakaran.
 5. **Rekomendasi untuk Penelitian Lanjutan:** Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi performa beton bertulang pasca kebakaran menggunakan pendekatan numerik dan simulasi elemen hingga (FEM) guna memperdalam pemahaman mengenai perilaku struktur beton bertulang dalam kondisi ekstrem. Penelitian lanjutan juga harus mencakup penggunaan campuran beton khusus dan pelapis api yang dapat meningkatkan ketahanan struktur terhadap suhu tinggi.
6. **DAFTAR PUSTAKA**
- American Concrete Institute. (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary (ACI 318R-14)*. American Concrete Institute.
- ASTM International. (2017). *ASTM C496/C496M-17: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM C150/C150M-18: Standard specification for Portland cement*. ASTM International.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2016). *Risiko bencana Indonesia*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-2461-2002: Spesifikasi agregat ringan untuk beton ringan struktural*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 7656:2012: Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat, dan beton massa*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 6882:2014: Spesifikasi mortar untuk pekerjaan pasangan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1982). *Peraturan umum bahan bangunan di Indonesia (PUBI 1982)*. Departemen Pekerjaan Umum. <https://simantu.pu.go.id/personal/img-post/autocover/5093c1377acb71720fc692e637db990e.pdf>
- Krishna Priya Rao, S., & Tadepalli, T. (2024). High-temperature behaviour of concrete: A review. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 440, 167–186. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7464-1_13
- Kurniati, D. (2024). Ketahanan kuat tekan beton serat fiber glass sebagai bahan tambah. *Jurnal Karkasa*, 10(2), 39-44. <https://doi.org/10.32531/jkar.v10i2.898>
- Nazri, F. M., Jaya, R. P., Abu Bakar, B. H., & Ahmadi, R. (2016). Fire resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete due to heating and cooling. *MATEC Web of Conferences*, 87, Article 01021. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20178701021>
- Qiu, J., Jiang, L., & Usmani, A. (2021). Post-fire repair of concrete structural members: A review on fire conditions and recovered performance. *International Journal of High-Rise Buildings*, 10(4), 323–334. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2021.10.4.323>
- Rangaswamy, P. S. (2024). Prediction of residual strength of recycled aggregate concrete by using artificial intelligence and machine learning. *African Journal of Biological Sciences*.

- <https://doi.org/10.48047/AFJBS.6.7.2024.1088-1095>
- Saleem, M. A., Siddiqi, Z. A., Aziz, M., & Abbas, S. (2016). Ultrasonic pulse velocity and rebound hammer testing for nondestructive evaluation of existing concrete structures. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 18, 89–97.
- Supit, S. W. M., & Priyono. (2023). Utilization of modified plastic waste on the porous concrete block containing fine aggregate. *Jurnal Teknologi*, 85(4), 143–151. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v85.19219>
- Yumkham, B., Shijagurumayum, C., & Suresh, T. (2022). Fire resistance of concrete structure: A review. *Samriddhi: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 14(Special Issue 1), 63–67. <https://doi.org/10.18090/SAMRIDDHI.V14SPLI01.12>
- Zong, G., Wang, Y., Wang, Y., & Ren, Z. (2024). Test research on residual mechanical properties of fiber-reinforced concrete segments after high temperature. *Materials*, 17(6), Article 1418. <https://doi.org/10.3390/ma17061418>