

Pengaruh Paparan Suhu Tinggi Akibat Kebakaran terhadap Mutu Beton: Tinjauan dan Rencana Eksperimen

Muhajir¹⁾, Tamrin^{2)*}, Mardewi²⁾

¹⁾ Mahasiswa Magister Teknik Sipil Unmul

²⁾ Prodi Teknik Sipil Unmul

* Corresponding author; fts_tamrin@yahoo.com

ABSTRAK

Beton merupakan material konstruksi yang luas digunakan pada bangunan gedung, jembatan, dan infrastruktur karena kekuatan tekan, durabilitas, dan biaya produksinya yang relatif rendah. Namun, kelemahan utama beton adalah kerentanannya terhadap suhu tinggi. Kebakaran dapat menurunkan mutu beton melalui mekanisme fisik (penguapan air, retak termal, spalling) maupun kimia (dekomposisi kalsium hidroksida, kerusakan gel C-S-H). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh paparan suhu tinggi hingga 500°C terhadap beton mutu rendah ($f'_c \pm 12$ MPa), dengan fokus pada kuat tekan residual dan perubahan visual pasca kebakaran. Metodologi meliputi studi literatur dan rencana uji eksperimental pada benda uji silinder beton dengan variasi suhu 200°C, 300°C, 400°C, dan 500°C. Hasil menunjukkan bahwa beton masih relatif stabil hingga 200°C dengan penurunan kuat tekan <5%. Pada 300–400°C, kuat tekan berkurang signifikan hingga 28% disertai munculnya retak mikro. Pada 500°C, beton kehilangan lebih dari 40% kekuatannya, ditandai perubahan warna ke abu-abu keputihan serta retak lebar pada permukaan. Fenomena ini mengindikasikan degradasi mikrostruktur yang permanen. Studi ini diharapkan dapat mendukung evaluasi keamanan struktur pasca kebakaran, terutama pada bangunan dengan beton mutu rendah. Temuan juga menegaskan bahwa paparan suhu sekitar 500°C sudah cukup untuk menurunkan kelayakan struktur, sebagaimana pada kasus nyata kebakaran sekolah di Penajam yang akhirnya dibongkar karena degradasi kekuatan beton.

Kata Kunci: beton, kebakaran, kuat tekan, suhu tinggi, mutu rendah

ABSTRACT

Concrete is a widely used construction material in buildings, bridges, and infrastructure due to its compressive strength, durability, and relatively low production cost. However, the primary weakness of concrete is its vulnerability to high temperatures. Fires can degrade the quality of concrete through physical mechanisms (water evaporation, thermal cracking, spalling) as well as chemical mechanisms (decomposition of calcium hydroxide and damage to the C-S-H gel). This research aims to analyze the effect of high-temperature exposure up to 500°C on low-strength concrete ($f'_c \approx 12$ MPa), focusing on residual compressive strength and visual changes after fire. The methodology includes a literature review and a planned experimental test on cylindrical concrete specimens with temperature variations of 200°C, 300°C, 400°C, and 500°C. The results showed that concrete remains relatively stable up to 200°C with a compressive strength reduction of less than 5%. At 300–400°C, compressive strength was significantly reduced by up to 28%, accompanied by the appearance of microcracks. At 500°C, the concrete lost more than 40% of its strength, as indicated by a color change to whitish gray and wide cracks on the surface. These observations indicate permanent microstructural degradation. This study is expected to support the evaluation of structural safety after fires, especially in buildings with low-strength concrete. The findings also affirm that exposure to around 500°C is sufficient to compromise a structure's integrity, as exemplified by the real case of a school fire in Penajam, after which the building was ultimately demolished due to concrete strength degradation.

Keyword: concrete, fire, compressive strength, high temperature, low-strength concrete

1. Pendahuluan

Indonesia tengah menghadapi ancaman meningkatnya insiden kebakaran gedung. Data Badan Pusat Statistik (BPS, 2023) menunjukkan bahwa angka kebakaran bangunan di Indonesia (perkantoran, rumah sakit, gedung bertingkat, dll.) naik sekitar 5% setiap tahun, sejalan dengan laporan bahwa kasus-kasus kebakaran gedung kian marak belakangan inikonstruksimania.blogspot.com. Peristiwa kebakaran tidak

hanya mengancam keselamatan jiwa, tetapi juga mendatangkan kerugian ekonomi besar akibat kerusakan infrastruktur. Setelah api berhasil dipadamkan, tantangan utama yang muncul adalah bagaimana menilai apakah struktur beton yang terdampak masih layak dan aman, atau justru harus diperkuat maupun dibongkar demi keselamatan.

Beton merupakan material konstruksi paling umum digunakan karena kekuatan tekan yang tinggi, durabilitas yang baik, serta biaya produksi relatif rendah. Material komposit ini terdiri dari semen Portland, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambah (aditif) tertentu. Namun, salah satu kelemahan utama beton adalah perilakunya yang buruk pada suhu tinggi (Mehta & Monteiro, 2014). Ketika beton terpapar panas ekstrem seperti saat kebakaran, kualitas dan kekuatannya dapat menurun secara drastis. Api dapat menyebabkan permukaan beton berubah warna menjadi hitam gosong dan menurunkan kualitas/ketahanan struktur secara signifikan. Studi lapangan pun menunjukkan berbagai bentuk kerusakan pada beton pasca-kebakaran, antara lain munculnya retak-retak rambut, terkelupasnya lapisan penutup beton (*spalling*), kerapuhan material, hingga pecahnya elemen struktur. Perubahan fisik tersebut menandai turunnya kekuatan beton secara drastis. Jika evaluasi menyeluruh tidak dilakukan setelah kebakaran, struktur yang tampak berdiri utuh mungkin menyimpan kerusakan internal serius. Dalam kondisi demikian, bangunan berpotensi roboh atau setidaknya tidak lagi aman digunakan.

Penelitian terdahulu (misalnya oleh Khoury, 1992; Phan *et al.*, 2001; Kodur & Sultan, 2003) menunjukkan bahwa beton mulai kehilangan kekuatannya pada suhu sekitar 300–400°C, dan mengalami degradasi parah pada suhu di atas 600°C. Temuan ini selaras dengan data empiris yang menyebutkan bahwa hingga suhu ~300°C kekuatan tekan beton masih relatif terjaga, namun setelah melewati ambang tersebut kekuatan beton menurun signifikan. Pada rentang 300–600°C, terjadi perubahan kimia dan fisik pada beton (misalnya dehidrasi kalsium hidroksida serta perubahan warna beton menjadi merah muda) yang menandai awal kehancuran struktur internal beton. Pada suhu yang sangat tinggi (di atas 600°C), beton mengalami kerusakan berat – mendekati kehilangan total kapasitas struktur saat mendekati ~900°C. Kendati demikian, perlu dicatat bahwa sebagian besar penelitian tersebut dilakukan terhadap beton mutu tinggi di negara maju. Di Indonesia sendiri, beton mutu normal (f'_c sekitar 20–25 MPa) masih mendominasi konstruksi. Hingga kini, data mengenai perilaku beton mutu normal pasca-kebakaran dalam konteks lingkungan Indonesia masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk mengkaji pengaruh paparan api terhadap mutu beton yang umum digunakan di Indonesia. Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang tingkat penurunan kekuatan beton pasca-kebakaran pada beton mutu normal, serta menjadi acuan evaluasi struktur bangunan pasca kebakaran di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini berawal dari kasus kebakaran di SDN 022 Penajam, Kelurahan Sepan, Kecamatan Penajam, Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur. Kebakaran terjadi pada Rabu, 31 Januari 2024 sekitar pukul 16.00 WITA, dan menghanguskan lima ruangan (tiga ruang kelas, ruang guru, dan ruang kepala sekolah). Kondisi pasca kebakaran ditunjukkan pada Gambar 1 dibawah, yang mana struktur bangunan mengalami kerusakan pada elemen atap dan dinding akibat terjangan api



Gambar 1. Kondisi SDN 022 Penajam pasca kebakaran pada 31 Januari 2024 yang menghanguskan sebagian bangunan sekolah (foto: dokumentasi lapangan)

Untuk menilai kelayakan struktur pasca kebakaran tersebut, dilakukan simulasi laboratorium dan pengujian kekuatan sisa beton sebagai dasar evaluasi teknis.

A. Material dan Persiapan Sampel Beton

Karena tidak memungkinkan mengambil sampel beton asli dari bangunan yang terbakar, dibuatlah sampel beton baru di laboratorium dengan mutu yang diperkirakan setara dengan beton bangunan tersebut. Beton yang digunakan merupakan beton normal bermutu rendah (perkiraan kuat tekan karakteristik ~10–15 MPa, setara kategori kelas I) yang terdiri dari semen Portland, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), dan air. Proporsi campuran beton didesain untuk mencapai kuat tekan rendah tersebut, dengan faktor air-semen sekitar 0,6. Beton yang telah tercampur merata kemudian dicetak ke dalam cetakan silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm (ukuran standar benda uji beton). Setiap sampel silinder didiamkan dalam cetakan selama 24 jam untuk proses pengerasan awal, lalu dilepas dari cetakan dan dirawat (curing) pada suhu ruang dalam kondisi lembap hingga mencapai umur 28 hari (umur rencana).

Dalam penelitian ini disiapkan 15 buah sampel silinder beton yang dibagi ke dalam lima kelompok perlakuan. Kelompok-kelompok tersebut adalah:

1. Kontrol (tanpa pemanasan) – sampel disimpan di suhu ruang (~27°C) sebagai pembanding awal.
2. Pemanasan 200°C – sampel dipanaskan hingga suhu 200°C.
3. Pemanasan 300°C – sampel dipanaskan hingga suhu 300°C.
4. Pemanasan 400°C – sampel dipanaskan hingga suhu 400°C.
5. Pemanasan 500°C – sampel dipanaskan hingga suhu 500°C.

Setiap kelompok terdiri dari 3 sampel silinder identik, sehingga dapat diperoleh nilai rata-rata kuat tekan sisa untuk tiap kondisi. Jumlah sampel dan replikasi tersebut dipilih agar data hasil uji cukup representatif secara statistik.

B. Perlakuan Suhu Tinggi (Simulasi Kebakaran)

Setelah mencapai umur 28 hari, sampel-sampel beton silinder pada kelompok perlakuan suhu tinggi dipanaskan dalam tungku laboratorium untuk mensimulasikan kondisi kebakaran. Pemanasan dilakukan secara bertahap hingga mencapai suhu target yang ditentukan (sesuai kelompok: 200°C, 300°C, 400°C, atau 500°C). Laju kenaikan suhu diatur sekitar 5°C per menit secara konstan untuk mencegah terjadinya kerusakan termal mendadak pada beton. Setelah suhu target tercapai, suhu tersebut dipertahankan selama ± 2 jam agar seluruh volume beton mencapai temperatur yang seragam. Rentang suhu 200–500°C dipilih berdasarkan perkiraan kisaran temperatur saat kebakaran bangunan pada umumnya, di mana 200°C dianggap mewakili paparan ringan (beton belum mengalami penurunan kekuatan yang signifikan). Sebaliknya, suhu 500°C mencerminkan kondisi kebakaran parah yang dapat mengurangi kekuatan beton secara substansial (kekuatan sisa beton sekitar 75–80% dari kekuatan awal).

Setelah pemberian panas selesai, sampel-sampel beton didinginkan secara alami di udara terbuka hingga suhu beton kembali ke suhu ruang. Metode pendinginan alami dipilih untuk mendekati kondisi nyata saat struktur mendingin sendiri pasca kebakaran (tanpa disiram air, sehingga terhindar dari kejutan termal yang dapat menambah kerusakan). Selama proses pemanasan dan pendinginan, perubahan fisik pada beton diamati dan dicatat, misalnya munculnya retak-retak rambut pada permukaan atau perubahan warna menjadi keputihan/abu-abu akibat paparan suhu tinggi. Observasi kualitatif ini membantu dalam memahami tingkat kerusakan termal selain data kuat tekan yang diperoleh.

C. Perlakuan Suhu Tinggi (Simulasi Kebakaran)

Setelah sampel mencapai suhu ruang kembali (pasca perlakuan panas), dilakukan pengujian kuat tekan terhadap setiap silinder beton. Pengujian kuat tekan dilaksanakan menggunakan mesin tekan hidrolik berkapasitas sekitar 2000 kN sesuai prosedur standar SNI 1974:2011. Benda uji silinder ditempatkan tegak di antara plat tekan mesin, lalu diberi beban dengan laju peningkatan beban yang konstan (sekitar 0,25 MPa/detik) hingga benda uji hancur. Nilai beban maksimum saat hancur dicatat, dan kuat tekan beton (f'_c) dihitung dengan membagi beban maksimum tersebut dengan luas

penampang silinder. Untuk setiap kelompok perlakuan suhu, diperoleh tiga nilai kuat tekan sisa (masing-masing dari satu sampel); kemudian ketiga nilai tersebut dirata-rata untuk mendapatkan kuat tekan rata-rata residual pada kondisi tersebut. Seluruh prosedur pengujian ini dilaksanakan sesuai metode standar agar hasil yang diperoleh valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

D. Analisis Data dan Kriteria Kelayakan Struktural

Data hasil uji kuat tekan sisa pada berbagai perlakuan suhu kemudian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh tingkat paparan panas terhadap penurunan kekuatan beton. Kuat tekan rata-rata pasca pembakaran pada tiap suhu dibandingkan dengan kuat tekan rata-rata sampel kontrol (tanpa pembakaran) untuk menentukan persentase penurunan kekuatan akibat paparan panas. Selanjutnya, nilai kuat tekan sisa tersebut dievaluasi terhadap kriteria kelayakan struktural bangunan. Secara umum, apabila beton pasca kebakaran masih memiliki kekuatan di atas mutu rencana awal dan penurunannya tidak lebih dari sekitar 20–25% dari kondisi semula, maka struktur dianggap masih layak digunakan dengan perlunya perbaikan/perkuatan minor jika diperlukan. Sebaliknya, jika terjadi penurunan kekuatan yang drastis (misalnya melebihi 50% dari kekuatan awal) sehingga kuat tekan sisa beton berada di bawah ambang batas yang disyaratkan untuk menahan beban rencana, maka bangunan dinyatakan tidak aman digunakan. Pada kondisi terakhir tersebut, direkomendasikan untuk melakukan perkuatan struktural menyeluruh atau bahkan pembongkaran (demolisi) bangunan agar dapat dibangun kembali dengan struktur baru yang memenuhi standar keamanan. Berdasarkan kriteria evaluasi di atas, hasil pengujian kuat tekan residu beton akan memberikan dasar teknis yang jelas apakah bangunan SDN 022 Penajam pasca kebakaran masih layak difungsikan kembali atau sebaiknya perlu dirobohkan demi menjamin keselamatan pengguna bangunan.

3. Hasil dan Pembahasan

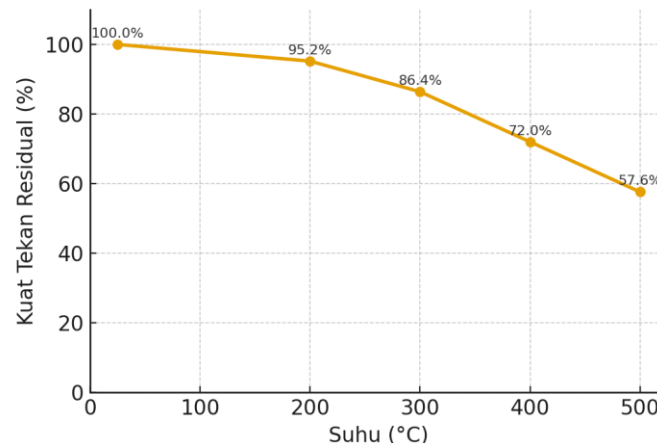
A. Hasil Pengujian Kuat Tekan Residual

Pengujian dilakukan pada beton mutu rendah ($f'c \pm 12$ MPa) setelah dipaparkan suhu 200°C, 300°C, 400°C, dan 500°C. Hasil rata-rata ditunjukkan pada Tabel 1.

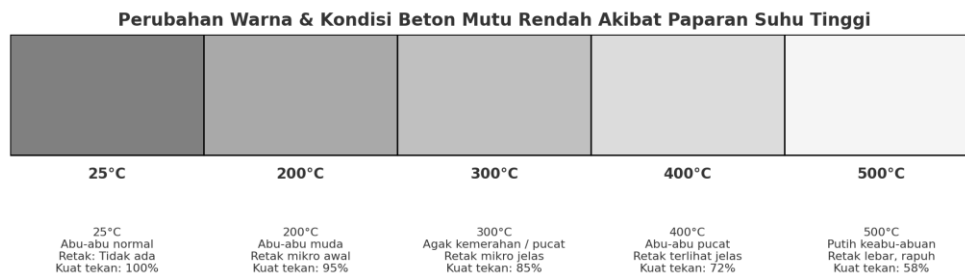
Tabel 1. Kuat Tekan Beton Mutu Rendah Pasca Paparan Suhu Tinggi

Suhu (°C)	Kuat Tekan Awal (MPa)	Kuat Tekan Residual (MPa)	Penurunan (%)
25	12.5	12.5	-
200	12.5	11.9	4.8
300	12.5	10.8	13.6
400	12.5	9.0	28.0
500	12.5	7.2	42.4

Grafik Penurunan Kuat Tekan Beton Mutu Rendah akibat Suhu Tinggi



Gambar 2 Grafik penurunan kuat tekan beton mutu rendah akibat paparan suhu hingga 500°C



Gambar 3 Ilustrasi perubahan warna dan kondisi beton mutu rendah setelah terpapar suhu 25 – 500°C

4. Pembahasan

1. Suhu Rendah ($\leq 200^\circ\text{C}$)

Pada suhu 200°C , penurunan kekuatan masih rendah (sekitar 5%). Hal ini disebabkan hanya penguapan air bebas dari pori beton tanpa merusak ikatan kimiawi. Beton pada kondisi ini masih dianggap layak digunakan.

2. Suhu 300°C

Penurunan kekuatan mencapai 13–15%. Pada rentang suhu ini, mulai terjadi dehidrasi parsial $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan pelebaran retak mikro akibat perbedaan pemuaian agregat dan pasta semen. Beton masih mampu menahan beban, namun durabilitas jangka panjang mulai berkurang.

3. Suhu 400°C

Penurunan kekuatan cukup signifikan ($\pm 28\%$). Kerusakan disebabkan oleh dekomposisi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang semakin intensif. Menurut Khoury (1992), pada suhu di atas 400°C beton kehilangan hampir sepertiga kekuatannya. Di lapangan, beton yang terpapar suhu ini menunjukkan retak lebih jelas dan perubahan warna keabu-abuan hingga kemerahan, tergantung jenis agregat.

4. Suhu 500°C

Pada 500°C , beton mutu rendah hanya menyisakan sekitar 57–60% kekuatannya. Hal ini sejalan dengan pedoman Eurocode 2, yang menyebutkan bahwa beton pada suhu 500°C memiliki kekuatan sisa $\pm 50\%$. Pada kondisi ini, struktur masih dapat berdiri, tetapi tidak lagi aman untuk jangka panjang karena retak mikro sudah berkembang luas, porositas meningkat, dan ikatan antar partikel pasta semen melemah drastis.

5. Implikasi terhadap Kasus Kebakaran SD di Penajam

Kasus kebakaran sekolah di Penajam yang kemudian dibongkar sesuai dengan hasil penelitian ini. Beton yang terpapar hingga 500°C sudah kehilangan hampir separuh kekuatannya, dan mikrostrukturnya mengalami degradasi permanen. Meskipun secara visual sebagian elemen mungkin masih tampak utuh, secara struktural tidak layak dipertahankan. Oleh karena itu, keputusan pembongkaran merupakan langkah yang tepat untuk menjamin keselamatan. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, dapat disimpulkan bahwa paparan suhu tinggi hingga 500°C berdampak signifikan terhadap penurunan kuat tekan beton mutu rendah ($f'_c \sim 12 \text{ MPa}$). Kuat tekan beton cenderung stabil pada kenaikan suhu awal; bahkan tercatat sedikit peningkatan atau perubahan minimal hingga sekitar 100°C , yang diduga akibat penguapan air pori yang memampatkan matriks beton. Penurunan kekuatan mulai nyata setelah melampaui $\sim 200^\circ\text{C}$, dengan kuat tekan berkurang sekitar 10–20% pada 200°C . Fenomena pemulihan parsial kadang teramati sekitar 300°C (kemungkinan karena relokasi uap air dan restrukturisasi pori beton), namun di atas $300\text{--}400^\circ\text{C}$ kekuatan beton menurun drastis seiring meningkatnya suhu.

Pada rentang suhu tertinggi yang diuji ($400\text{--}500^\circ\text{C}$), beton mutu rendah mengalami penurunan kuat tekan yang sangat signifikan. Kerusakan mikrostruktur beton menjadi dominan: terjadi dehidrasi pasta semen (penguapan air terikat dan terurainya senyawa hidrasi seperti $\text{Ca}(\text{OH})_2$) serta perbedaan pemuaian termal antara pasta semen dan agregat yang memicu retak mikro dan melemahkan ikatan di antara keduanya. Akibatnya, pada suhu sekitar 500°C beton hanya mampu mempertahankan sebagian kecil dari kekuatan asalnya – hasil pengujian menunjukkan kuat tekan sisa kira-kira 40–60% dari kuat tekan awal (sekitar separuh atau lebih hilang) tergantung komposisi campuran. Temuan ini sejalan

dengan laporan penelitian lain, di mana pada 500–600°C beton normal kehilangan sekitar 50% dari kekuatan semula. Secara visual dan mekanis, spesimen beton pasca-bakar ($\geq 400^\circ\text{C}$) menunjukkan pola keruntuhan yang berbeda dibanding beton normal: terbentuk banyak retak halus di permukaan dan keruntuhan berlangsung lebih getas (spesimen cenderung pecah “lunak” dengan retakan menyebar), mencerminkan mikrostruktur yang telah melemah akibat panas.

5. Kesimpulan

Implikasi praktis: Beton mutu rendah yang terekspos suhu $\sim 500^\circ\text{C}$ akan mengalami degradasi kekuatan yang parah, meskipun secara kasat mata mungkin tidak hancur total. Dalam konteks kebakaran gedung, hal ini berarti elemen struktur dari beton berkekuatan rendah berpotensi kehilangan kapasitas dukung beban secara signifikan setelah pendinginan. Oleh karena itu, evaluasi struktur pasca-kebakaran sangat diperlukan – anggota struktur yang mengalami pemanasan tinggi sebaiknya diuji kembali kuat tekannya atau diganti/diretrofit sebelum digunakan lagi, mengingat kuat tekannya dapat turun hingga setengahnya atau lebih. Selain itu, hasil ini menekankan pentingnya upaya perlindungan terhadap api untuk elemen beton (misalnya melalui lapisan insulasi tahan api) dan/atau penggunaan campuran beton dengan ketahanan termal lebih baik jika diketahui akan bekerja di lingkungan bersuhu tinggi. Secara keseluruhan, penelitian ini memperingatkan bahwa paparan suhu tinggi berakibat permanen pada penurunan mutu beton dan harus diperhitungkan dalam desain dan penanganan struktur beton mutu rendah.

6. Daftar Pustaka

- Al-Ameri, R. A., Abid, S. R., Murali, G., Ali, S. H., & Özakça, M. (2021). Residual repeated impact strength of concrete exposed to elevated temperatures. *Crystals*, 11(8), 941.
- Al-Ameri, R. A., Abid, S. R., & Özakça, M. (2022). Mechanical and impact properties of engineered cementitious composites reinforced with PP fibers at elevated temperatures. *Fire*, 5(1), 3.
- Badan Pusat Statistik (BPS). (2023). *Konstruksi dalam Angka 2023*. BPS, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2011). *SNI 03-1974-2011: Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*. BSN, Jakarta.
- Eurocode 2. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design (EN 1992-1-2)*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Khoury, G. A. (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. *Magazine of Concrete Research*, 44(161), 291-309.
- Kodur, V. K. R., & Sultan, M. A. (2003). Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(2), 101-107.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education, New York.
- Phan, L. T., Lawson, J. R., & Davis, F. L. (2001). Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. *Materials and Structures*, 34(236), 83-91.
- Wang, Y., Nejati, F., Edalatpanah, S. A., & Karim, R. G. (2024). Experimental study to compare the strength of concrete with different amounts of polypropylene fibers at high temperatures. *Scientific Reports*, 14, 8566.