

**VALIDASI EKSPERIMENTAL LABORATORIUM PERILAKU LENTUR STRUKTUR
BALOK BETON SANDWICH TERHADAP PENGARUH TEMPERATUR TINGGI**
*Experimental Laboratory Validation: Flexural Behaviour of Sandwich Concrete Beams
Under High-Temperature Exposure*

Vembri Affiano*, Suryawan Murtiadi*, Syahril Taufik*, Akmaluddin**

***Magister Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi Terapan, Institut Sains dan Teknologi
Nasional, Jl. Moh. Kahfi II, Jagakarsa, Jakarta Selatan, Indonesia, 12640**

**** Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl Majapahit 62 Mataram
Email: vembri.affiano@gmail.com, suryawan@istn.ac.id, syahril_taufik@istn.ac.id,
akmaluddin@unram.ac.id**

Manuscript received: 16 September 2025

Accepted: 20 Oktober 2025

Abstrak

Beton merupakan material utama yang sering dipakai pada elemen struktur bangunan karena memiliki kuat tekan tinggi. Namun beton normal dan sandwich mengalami penurunan tegangan yang signifikan saat terekspos pada temperatur 400°C masing-masing sebesar 8,361 MPa dan 7,349 MPa. Penelitian ini membahas perilaku lentur balok beton normal dan sandwich terhadap pengaruh temperatur tinggi. Pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS dilaksanakan untuk memvalidasi hasil uji eksperimental laboratorium. Analisis meliputi kapasitas beban, distribusi tegangan berdasarkan kriteria von mises, dan defleksi balok. Variasi model terdiri atas beton normal dan beton sandwich dengan dimensi balok 200×300×4000 mm. Mutu beton normal 25 MPa, sedangkan beton ringan pada core sandwich 15 MPa, dengan selimut beton 20 mm. Tulangan baja sesuai pengujian laboratorium terdiri dari tulangan tarik 3Ø12 mm, tulangan tekan 2Ø12 mm, dengan kuat leleh baja 300 MPa. Beban diletakkan simetris pada dua titik masing-masing berjarak 1/3 bentang dari perletakan. Hasil analisis menunjukkan kapasitas beban balok beton normal pada suhu 20°C, 200°C, 400°C, 600°C, dan 800°C berturut-turut adalah 18,982 kN; 10,899 kN; 8,361 kN; 5,059 kN dan 2,348 kN. Sedangkan balok beton sandwich berturut-turut 25,327 kN; 12,101 kN; 7,349 kN; 5,436 kN dan 3,354 kN. Dapat disimpulkan bahwa balok beton sandwich memiliki performa lebih stabil dibandingkan beton normal pada temperatur tinggi dalam mempertahankan kapasitas beban.

Kata kunci : Balok beton, Sandwich, Temperatur, Tegangan, Kapasitas Beban.

PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu komponen struktur pada konstruksi gedung dan memiliki kekuatan tekan yang tinggi. Namun beton akan mengalami penurunan kuat tekan saat terekspos pada temperatur tinggi atau pembakaran. Bahkan pada beberapa variasi pembakaran maka penurunan kuat tekan beton bisa mencapai dua kali lipat setiap jam (Adiguna & Alkhamuddin, 2018). Schneider (1990) menyatakan ketika temperatur beton naik diatas 100°C, pasta semen mulai mengalami dehidrasi karena kelembaban hilang. Partikel agregat mengembang sehingga menghasilkan regangan diferensial yang besar dan menyebabkan retakan mikro yang luas pada pasta semen. Disintegrasi beton terjadi pada tahap ini meskipun tanpa mengalami kehilangan kekuatan beton. Kekuatan beton berkurang 80-90% dari kekuatan awal pada temperatur 200°C. Pada temperatur 300°C, agregat pada beton mulai pecah sementara kekuatan leleh baja tulangan mulai berkurang sehingga kekuatan beton berkurang menjadi 70% dari kekuatan awal. Selanjutnya kekuatan beton akan berkurang secara kontinyu akibat kenaikan temperatur.

Kekakuan lentur balok beton sangat dipengaruhi oleh nilai akumulasi temperatur dan waktu pembakaran. Kekuatan balok beton turun secara signifikan pada waktu 15 menit dan modulus elastisitas beton menurun secara signifikan pada temperatur akumulatif 800°C. Penelitian ini menggunakan spesimen balok berukuran 200x300x4000 mm dengan beban 8,63 KN pada 1/3 bentang balok dilakukan oleh Akmaluddin, dkk., 2020. Terkait dengan peningkatan temperatur yang terjadi pada suatu bangunan akibat kebakaran akan mempengaruhi sifat-sifat beton dan mengurangi kuat tekan beton telah diteliti oleh Afrizal, 2014 saat struktur mengalami kebakaran bahwa perambatan panas pada beton mulai dari lapis luar merambat ke bagian dalam beton seiring dengan lamanya waktu kebakaran. Metode penelitian ini menggunakan metode numerik dengan beton mutu beton normal f'_c sebesar 24,5 MPa dengan variasi temperatur 250°C, 350°C, 450°C, dan 550°C dengan waktu pemanasan selama 15 menit pertama dan pada titik (node) 3,75 cm dihasilkan nilai kuat tekan sebesar 17,3 MPa, 15,1 MPa, 13,7 MPa dan 11,11 MPa.

Analisis model rangka terdiri atas balok beton bertulang dengan kuat tekan normal dan kolom beton bertulang berkekuatan tinggi kinerja struktur rangka beton yang terpapar kebakaran lokal dilakukan oleh Murtiadi et al., 2022. Seluruh elemen dianalisis menggunakan elemen hingga tiga dimensi berbentuk tetrahedral dengan empat derajat kebebasan. Respon temperatur diperoleh dari penelitian terdahulu, sedangkan pembebanan mewakili kondisi batas kebakaran. Model konstitutif menggunakan pendekatan empiris sederhana, dan analisis dilakukan dengan perangkat lunak ANSYS dengan mempertimbangkan efek transien. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan signifikan antara perilaku elemen tunggal dan struktur secara keseluruhan, sehingga pengembangan analisis rekayasa kebakaran berbasis perilaku struktur menyeluruh sangat dianjurkan.

Penelitian menggunakan perangkat lunak ANSYS dilakukan juga oleh Murtiadi et al., 2023 yaitu analisis model elemen hingga untuk sebuah bangunan beton bertingkat tujuh yang mewakili tipikal gedung kantor komersial yang dirancang sesuai standar Eropa. Hasil penelitian ini yaitu perpindahan panas secara horisontal pada plat lantai akibat ekspansi termal. Perpindahan ekspansi termal mengakibatkan pergerakan lateral plat lantai dan menimbulkan momen tambahan pada kolom-kolom eksternal.

Analisis menggunakan model tiga dimensi dengan bantuan perangkat lunak ANSYS bertujuan untuk memperoleh nilai tegangan, nilai kapasitas beban maksimum, nilai validasi dan mendapatkan hasil validasi antara model yang dilakukan di laboratorium dan menggunakan ANSYS akibat pengaruh suhu tinggi.

TINJAUAN PUSTAKA

Sifat termal beton karena pengaruh suhu tinggi bergantung pada suhu antara lain konduktivitas termal, kapasitas panas dan kehilangan massa. Sifat-sifat ini sangat dipengaruhi oleh jenis agregat, kadar air dan komposisi campuran beton (Murtiadi & Akmaluddin, 2023). Konduktivitas termal beton pada suhu ruang berada antara 1,4 hingga 3,6 W/m²K dan nilainya bervariasi terhadap suhu. Gambar 1 menunjukkan variasi konduktivitas termal beton normal (Normal Strength Concrete/NSC) sebagai fungsi suhu berdasarkan data hasil uji yang telah dipublikasikan secara empiris, perbedaan data mengenai konduktivitas termal ini disebabkan oleh kandungan kelembapan, jenis agregat, kondisi

pengujian dan teknik pengukuran yang digunakan dalam eksperimen. Nilai batas area dan batas bawah konduktivitas termal sesuai ketentuan dalam EC2 yang mencakup semua jenis agregat. Konduktivitas termal yang ditampilkan berdasarkan hubungan dari ASCE hanya berlaku untuk beton dengan agregat karbonat (Kodur, 2014).

Perubahan fisik dan kimia terjadi ketika beton dipanaskan yang berakibat mengubah karakteristik termomekanik material dan ditunjukkan efek peningkatan suhu beton pada berbagai tahapan. Pada suhu 20°C sampai dengan 800°C, beton terjadi kehilangan air kapiler secara bertahap akibat pemuain air, suhu 800°C sampai 1000°C terjadi dehidrasi dan dekomposisi dimana air yang terikat secara fisik dari material semen dan agregat menguap sehingga menyebabkan peningkatan retak mikro akibat porositas kapiler. Beton mulai mengalami dehidrasi dan dekomposisi dengan kehilangan air pada suhu 100°C sampai dengan 200°C dan kekuatan beton tetap terjaga bahkan meningkat pada suhu 300°C karena lapisan semen menjadi lebih padat. Beton mengalami kehilangan kekuatan dan kekakuannya secara signifikan pada suhu diatas 300°C. Pada suhu antara 400°C sampai dengan 600°C, beton mengalami retak mikro pada pasta semen akibat adanya dekomposisi senyawa CH, rentang suhu 600°C sampai dengan 800°C beton mengalami penurunan kekuatan yang sangat signifikan dan suhu 800°C sampai 1200°C terjadi retak mikro yang intens pada beton yang diakibatkan fase-fase yang telah mengalami dehidrasi (Rao & Tadepalli, 2024).

Kuat tekan beton dipengaruhi oleh beban P (KN) sehingga terjadi tegangan pada beton σ_c (MPa) sebesar beban P dibagi dengan luas penampang A (m²) sehingga dirumuskan

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (1)$$

Sesuai penjelasan dari EN 1992-1-2:2004 (E) tegangan σ (MPa) pada material saat regangan ε bahwa hubungan antara kekuatan dan sifat deformasi beton yang diberikan tekanan uniaxial pada suhu tinggi dapat diperoleh dari hubungan tegangan-regangan. Persamaan model tegangan-regangan beton pada suhu tinggi apabila nilai $\varepsilon < \varepsilon_{c1,\theta}$ menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan: σ = tegangan pada material saat regangan ε (MPa), $f_{c,\theta}$ = kuat tekan maksimum pada suhu atau kondisi θ (MPa), ε = regangan (*strain*) (tanpa satuan), $\varepsilon_{c1,\theta}$ = regangan saat tegangan maksimum ($f_{c,\theta}$) (tanpa satuan), θ = parameter kondisi berupa temperatur (°C)

Persamaan perhitungan hubungan tegangan beton pada suhu tinggi NSC-ASCE Manual 1992 memberikan persamaan sebagai berikut dengan ketentuan $\varepsilon < \varepsilon_{\max,T}$ dan $\varepsilon > \varepsilon_{\max,T}$.

$$\sigma_c = f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\max,T}}{\varepsilon_{\max,T}} \right)^2 \right], \varepsilon \leq \varepsilon_{\max,T} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_c = f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{max,T} - \varepsilon}{3\varepsilon_{max,T}} \right)^2 \right], \varepsilon > \varepsilon_{max,T} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan: σ_c = tegangan pada material saat regangan ε (MPa), $f'_{c,\theta}$ = kuat tekan maksimum pada suhu atau kondisi θ (MPa), ε = regangan (*strain*) (tanpa satuan), $\varepsilon_{max,T}$ = regangan saat tegangan maksimum ($f'_{c,T}$) (tanpa satuan), T = parameter kondisi berupa temperatur (°C)

dengan nilai regangan maksimum (ε_{max}) dihitung menggunakan persamaan

$$\varepsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.047T^2) \times 10^{-6} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan: $\varepsilon_{max,T}$ = regangan saat tegangan maksimum (tanpa satuan), T = parameter kondisi berupa temperatur (°C)

Menurut SNI 2847-2019 menerangkan pengertian modulus elastisitas beton yaitu rasio tegangan normal terhadap regangan. Nilai modulus elastisitas (E_c) dipengaruhi oleh umur beton, sifat-sifat agregat dan semen, kecepatan pembebanan, jeni serta dimensi benda uji. Nilai E_c didefinisikan sebagai kemiringan garis yang digambar dari tegangan nol hingga tegangan tekan sebesar $0,45f'_c$.

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan: E_c = modulus elastisitas beton (MPa), f'_c = kuat tekan beton (Mpa), 4700 = koefisien empiris (tanpa satuan)

European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). (2001). Fire Safety of Steel Structures: A Handbook. ECCS Technical Committee 3 menyatakan bahwa modulus elastisitas baja merupakan salah satu parameter mekanik yang mengalami penurunan signifikan seiring dengan meningkatnya suhu. Penurunan ini dapat diprediksi menggunakan persamaan empiris yang dikembangkan dari hasil pengujian laboratorium. Salah satu pendekatan untuk memperkirakan rasio penurunan modulus elastisitas pada suhu tinggi diberikan oleh persamaan berikut.

$$\frac{E(T)}{E(30)} = 1.0 + \left\{ \frac{T}{2000 \left[\ln \left(\frac{T}{1100} \right) \right]} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{E(T)}{E(30)} = \frac{690 \left(1 - \frac{T}{1100} \right)}{T - 53.5} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan: $E(T)$ = modulus elastisitas beton pada suhu T (MPa), $E(30)$ = modulus elastisitas beton pada suhu 30°C (Mpa), T = temperatur beton (°C), $\ln(-)$ = logaritma natural (tanpa satuan)

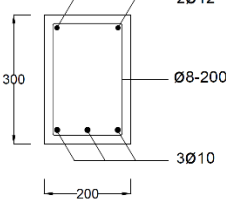
Perilaku mengenai struktur balok beton bertulang akibat variasi suhu tinggi salahsatu fundamental adalah penetapan hubungan antara kenaikan suhu (T) terhadap waktu(t). Sesuai landasan teori yang diatur dalam kurva standar ISO 834-1 dengan perilaku balok beton bertulang akibat variasi suhu tinggi dipresentasikan hubungan temperatur dengan elemen struktur menggunakan persamaan:

$$T(t) = T_0 + 345 \log_{10}(1 + 8t) \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan: $T(t)$ = temperatur pada waktu- t ($^{\circ}\text{C}$), T_0 = temperatur awal (suhu lingkungan sebelum pemanasan ($^{\circ}\text{C}$), t = waktu pemanasan atau paparan api (menit), 345 = konstanta empiris dari kurva standart kebakaran ISO 834-1 (tanpa satuan), $\log_{10}$ = logaritma basis 10 (tanpa satuan)

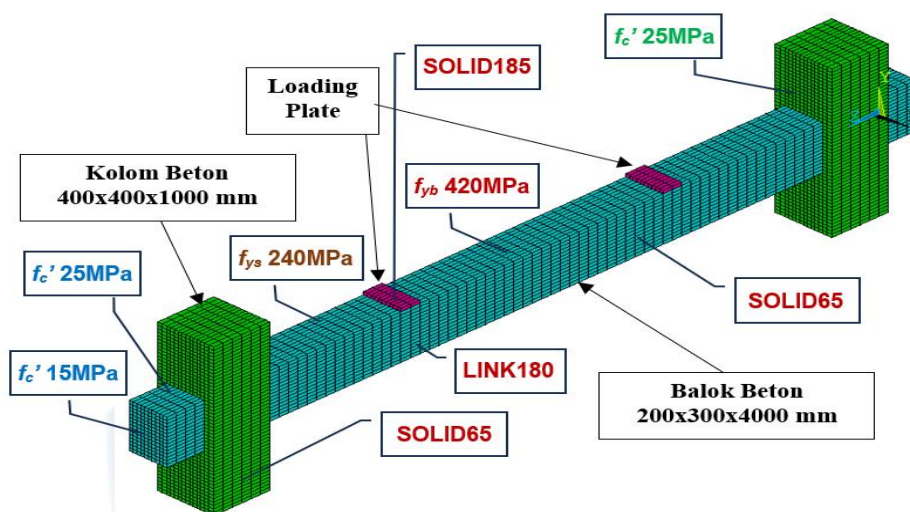
METODE PENELITIAN

Penelitian perihal perilaku lentur balok beton bertulang terhadap pengaruh temperatur tinggi telah dilakukan oleh (Akmaluddin, dkk., 2020) dengan balok beton bertulang berukuran 200x300x4000 mm berupa dua spesimen yaitu balok beton normal (N) dan balok beton *Sandwich* (SW) dengan tebal selimut beton 50 mm. Kuat tekan (f_c') permukaan beton sebesar 25 MPa dan kuat tekan pada sisi inti beton sebesar 15 MPa. Tulangan tarik menggunakan 3Ø12 mm dan tulangan tarik menggunakan 2Ø10, masing-masing diameter tulangan memiliki kekuatan leleh (f_y) sebesar 300 MPa yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Tulangan	Model Beton	
	 Beton Normal (25MPa)	 Beton Normal (25 MPa) Beton Sandwich (15 MPa) Beton Normal (25 MPa)

Gambar 1 Penampang Model Balok 200x300x4000 mm

Model material balok beton menggunakan elemen type SOLID65 sedangkan material tulangan baja menggunakan elemen type LINK180 dan plat baja yang sebagai *loading plat* yang dimodelkan sebagai elemen type SOLID185 (Nakasone, dkk., 2006). Selanjutnya seluruh pemodelan menggunakan software *ANSYS Mechanical Academic Teaching Version* (2025). Seluruh input model elemen type menggunakan perangkat lunak ANSYS ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Penampang Model Balok 200x300x4000 mm

HASIL DAN PEMBAHASAN

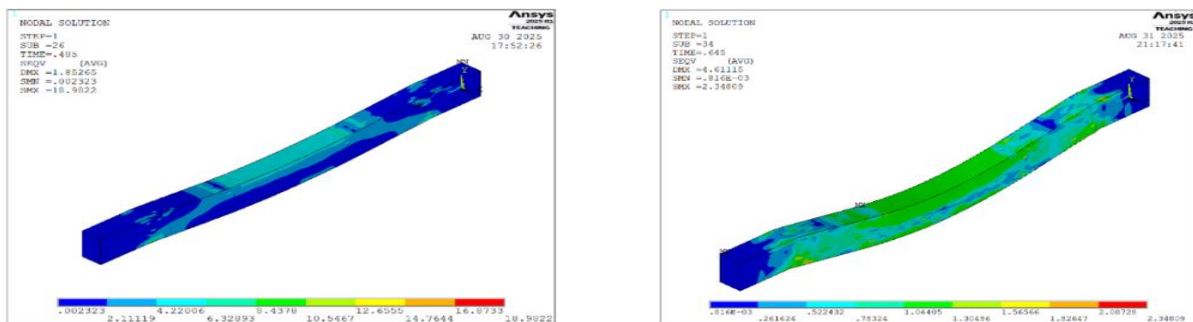
Hasil Penelitian Model Balok Beton Normal

Pada suhu ruangan (20°C), balok beton menunjukkan nilai tegangan maksimum tertinggi yaitu 18,982 MPa, ketika suhu dinaikkan menjadi 200°C tegangan maksimum mengalami sedikit penurunan menjadi 18,177 MPa. Penurunan ini semakin signifikan pada suhu yang lebih tinggi yaitu 8,361 MPa pada suhu 500°C dan pada suhu 800°C menunjukkan nilai tegangan maksimum 2,348 MPa.

Tabel 1 Hasil Analisis ANSYS pada Beton Normal

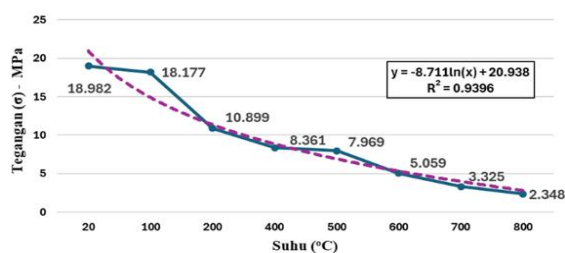
No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu Beton (MPa)	Tebal Selimut (mm)	Displacement Ratio	SMX (MPa)	DMX (mm)	Waktu (menit)
1	VAL-BN-20	20	25.000	20	2.00	18.982	1.853	0.00
2	VAL-BN-100	100	25.000	20	2.50	18.177	1.857	0.10
3	VAL-BN-200	200	24.250	20	3.00	10.899	1.839	0.29
4	VAL-BN-400	400	21.250	20	3.50	8.361	1.805	1.45
5	VAL-BN-500	500	18.500	20	4.00	7.969	1.739	2.95
6	VAL-BN-600	600	15.000	20	4.50	5.059	3.319	5.87
7	VAL-BN-700	700	10.750	20	5.00	3.325	3.190	11.57
8	VAL-BN-800	800	6.750	20	5.50	2.348	4.611	22.67

Hasil analisis tegangan dan defleksi pada suhu 20°C dan 800°C menggunakan kriteria *von mises* ditunjukkan pada Gambar 3.

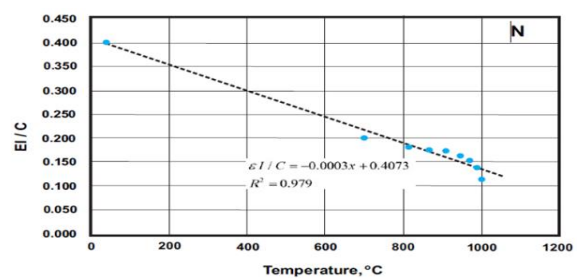


Gambar 3 Kontur Tegangan dan *Deflection* pada Suhu 20°C (Kiri) dan 800°C (Kanan)

Nilai koefisien determinasi atas fungsi logaritma $R^2 = 0,9396$ yang ditunjukkan pada garis warna ungu menunjukkan tingkat korelasi yang sangat kuat antara suhu dengan penurunan tegangan menggunakan ANSYS yang ditunjukkan garis warna biru, kedua grafik ini secara umum memperlihatkan tren yang konsisten. Nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,979$ menunjukkan tingkat relevansi yang sangat tinggi pada hasil eksperimental laboratorium sehingga kedua grafik menunjukkan hubungan linear yang sangat kuat.



(a) Hasil ANSYS



(b) Hasil Eksperimental

Gambar 4 Perbandingan Hasil Fungsi Logaritma Hasil Laboratorium dan Analisis ANSYS pada Beton Normal

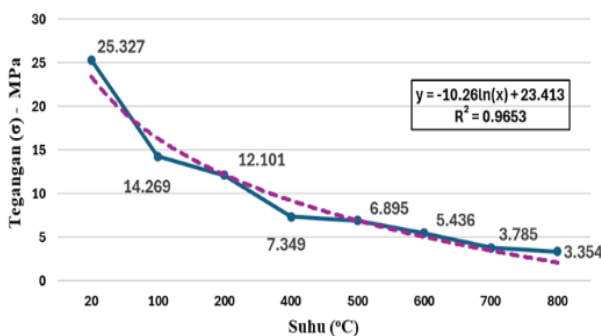
Hasil Penelitian Model Balok Beton *Sandwich*

Pada suhu 20°C atau kondisi suhu ruang, model balok beton menunjukkan tegangan maksimum tertinggi yaitu sebesar 25,327 MPa dengan nilai *deflection* sebesar 0,900 mm, namun setelah paparan suhu mencapai 200°C sampai dengan 800°C, nilai tegangan maksimum menurun secara bertahap hingga mencapai titik minimum sebesar 3,354 MPa dengan nilai *deflection* sebesar 4,419 mm ditunjukkan pada Tabel 2.

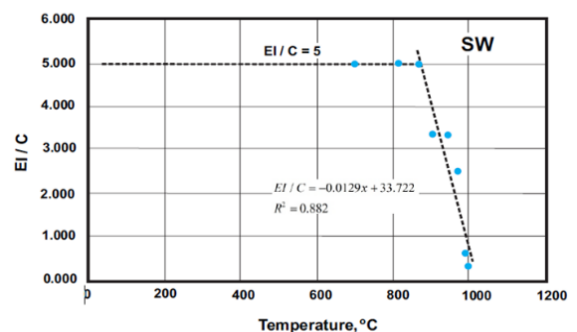
Pola penurunan ini ditunjukkan menggunakan persamaan regresi fungsi logaritma dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9653$ yang menunjukkan bahwa model ini memiliki tingkat validasi yang kuat terhadap hasil simulasi. Nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,882$ menunjukkan tingkat relevansi yang sangat tinggi pada hasil eksperimental laboratorium sehingga kedua grafik menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat.

Tabel 2 Hasil Analisis ANSYS pada Beton *Sandwich*

No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu Beton (MPa)		Tebal Selimut (mm)	Displacement Ratio	SMX (MPa)	DMX (mm)	Waktu (menit)
			NORMAL	SANDWICH					
1	VAL-BN-20	20	25.000	15.000	50	2.50	25.327	0.900	0.00
2	VAL-BN-100	100	25.000	15.000	50	2.50	14.269	1.721	0.10
3	VAL-BN-200	200	24.250	14.450	50	2.50	12.101	1.623	0.29
4	VAL-BN-400	400	21.250	12.750	50	3.00	7.349	1.731	1.45
5	VAL-BN-500	500	18.500	11.100	50	4.00	6.895	1.801	2.95
6	VAL-BN-600	600	15.000	9.000	50	4.50	5.438	3.358	5.87
7	VAL-BN-700	700	10.750	6.450	50	5.00	3.785	3.538	11.57
8	VAL-BN-800	800	6.750	4.050	50	5.50	3.354	4.419	22.67



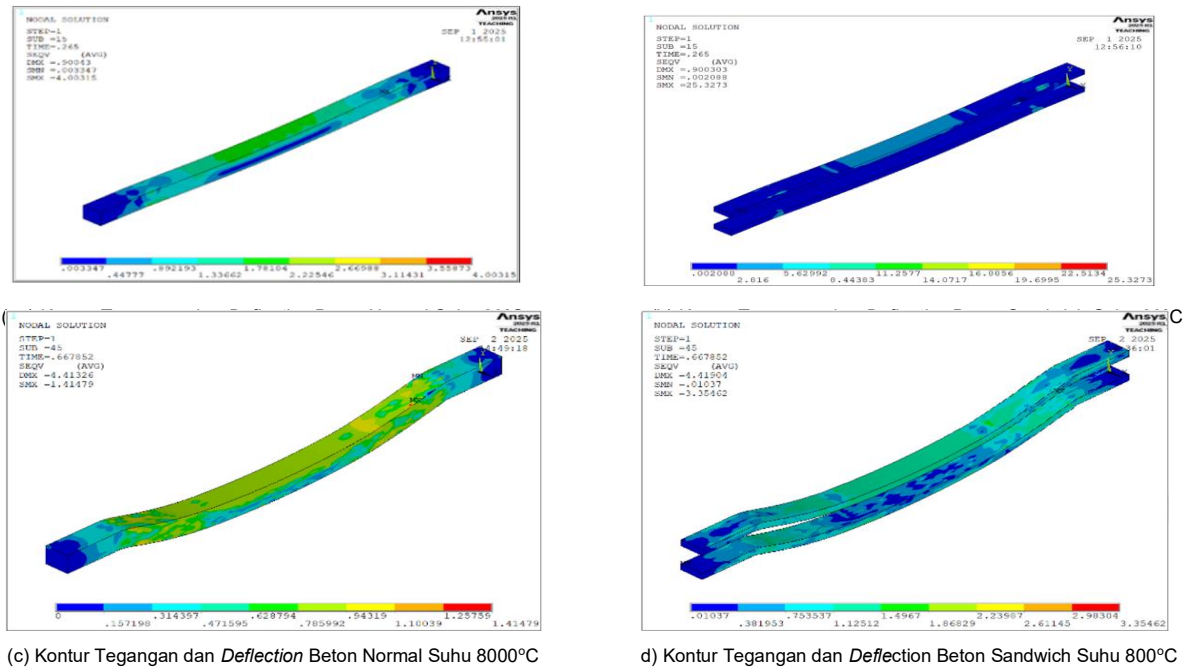
(a) Hasil ANSYS



(b) Hasil Eksperimental

Gambar 5 Perbandingan Hasil Fungsi Logaritma antara Hasil Laboratorium dan Analisis ANSYS pada Beton *Sandwich*

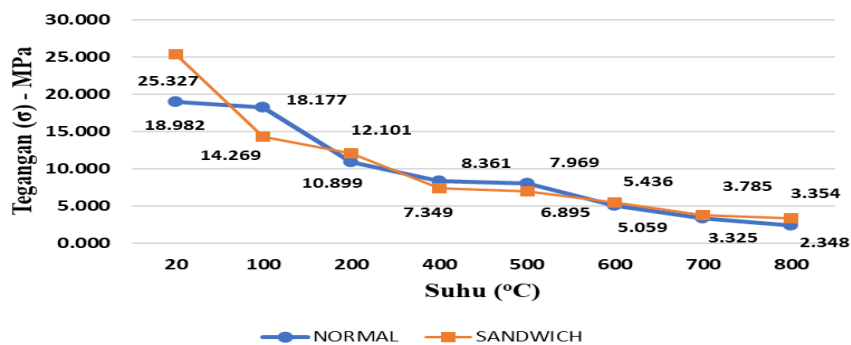
Hasil analisis tegangan dan *deflection* pada suhu 20°C dan 800°C menggunakan kriteria *von mises* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Kontur Tegangan dan Deflection Beton Normal dan *Sandwich*

Perbandingan Tegangan terhadap Suhu Beban Balok Beton Normal dengan Beton *Sandwich*

Balok beton *sandwich* pada suhu awal 20°C memiliki tegangan yang lebih tinggi dibanding balok beton normal yaitu sebesar 25,327 MPa atau lebih besar 25,05% dari balok beton normal, pada suhu 100°C mengalami penurunan drastis menjadi 14,269 MPa, nilai tegangan pada balok beton normal lebih unggul sebesar 3,908 MPa dari balok beton normal atau senilai 18,177 MPa. Suhu 200°C sampai dengan 700°C kedua balok terdapat selisih perbedaan tidak signifikan tetapi pada suhu akhir 800°C, tegangan yang lebih tinggi dibanding dengan balok beton normal yaitu 3,354 MPa ditunjukkan pada Gambar 7.

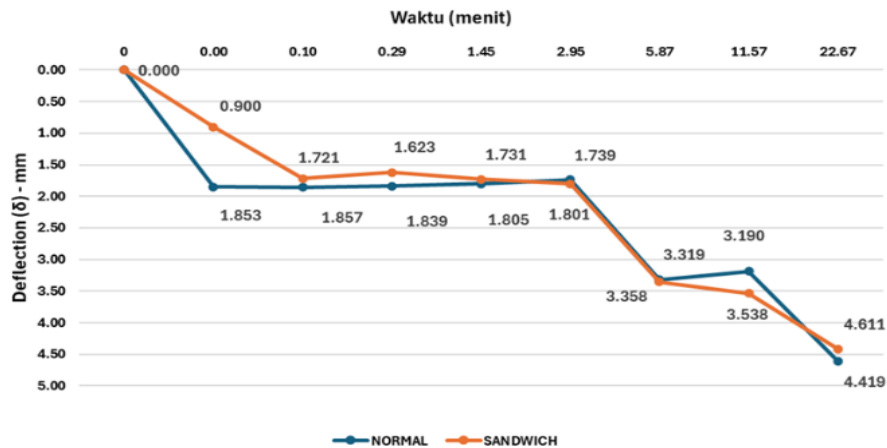


Gambar 7 Hubungan Tegangan vs Suhu pada Beton Normal dan *Sandwich*

Perbandingan *Deflection* terhadap Suhu Beban Balok Beton Normal dengan Beton *Sandwich*

Nilai *deflection* yang terjadi pada balok beton *sandwich* pada menit pertama atau pada suhu awal 20°C memiliki selisih 0,953 mm dengan balok beton *sandwich* memiliki nilai *deflection* yang lebih kecil dari beton normal. Pertambahan waktu pada 0,10 menit sampai 2,95 menit kedua balok tersebut memiliki kestabilan yang sama, dengan garis grafik cenderung landai. Pada waktu 2,95 menit keatas kedua balok mengalami penurunan *deflection* yang drastis pada waktu 5,87 menit sampai dengan 22,67

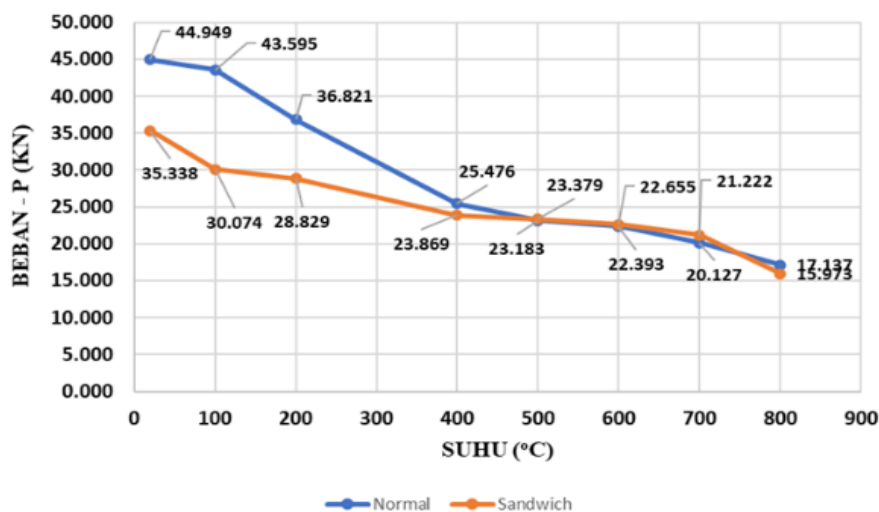
menit dengan nilai akhir *deflection* sebesar 4,611 mm pada balok beton *sandwich* dan 4,419 mm pada balok beton normal.



Gambar 8 Perbandingan Waktu - *Deflection* pada Balok Beton Normal dan Beton *Sandwich*

Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton Normal dengan Beton *Sandwich*

Pada suhu rendah ($\leq 400^{\circ}\text{C}$), kapasitas beban kedua tipe balok memiliki perbedaan yang signifikan yaitu 44,949 KN sedangkan pada balok beton *sandwich* sebesar 35,338 KN. Rentang suhu $400\text{--}800^{\circ}\text{C}$, kapasitas kedua balok mulai menunjukkan kestabilan yang lebih nyata dalam menerima kapasitas beban. Pada suhu 400°C , balok normal tercatat 25,476 KN sedangkan balok *sandwich* mencapai 23,869 KN atau terdapat deviasi senilai 1,607%. Kedua balok tersebut mengalami kestabilan dalam menerima kapasitas beban maksimal pada setiap kenaikan suhu yang dimulai pada suhu $400\text{--}700^{\circ}\text{C}$, kedua balok mengalami penurunan kapasitas beban pada suhu 800°C dengan balok beton normal sebesar 17,137 KN dan balok beton *sandwich* sebesar 15,973 KN. Balok *sandwich* menunjukkan retensi kapasitas yang lebih baik, yang dapat dikaitkan dengan efek isolasi termal dari lapisan *sandwich* yang mampu memperlambat propagasi panas menuju inti beton dan tulangan walaupun pada suhu awal pada balok beton *sandwich* memiliki kapasitas beban maksimum di bawah balok beton normal.



Gambar 9 Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton Normal dengan Balok Beton *Sandwich*

Hasil nilai validasi pada pengujian menggunakan perangkat lunak ANSYS pada beton normal yaitu sebesar 4,611 mm pada suhu 800°C sedangkan pada eksperimental sebesar 5,00 mm. Hasil analisis *deflection* pada eksperimental pada beton *sandwich* didapatkan yaitu sebesar 0,200 mm pada suhu 800°C sedangkan pada ANSYS didapatkan nilai sebesar 4,419 mm (Tabel 3).

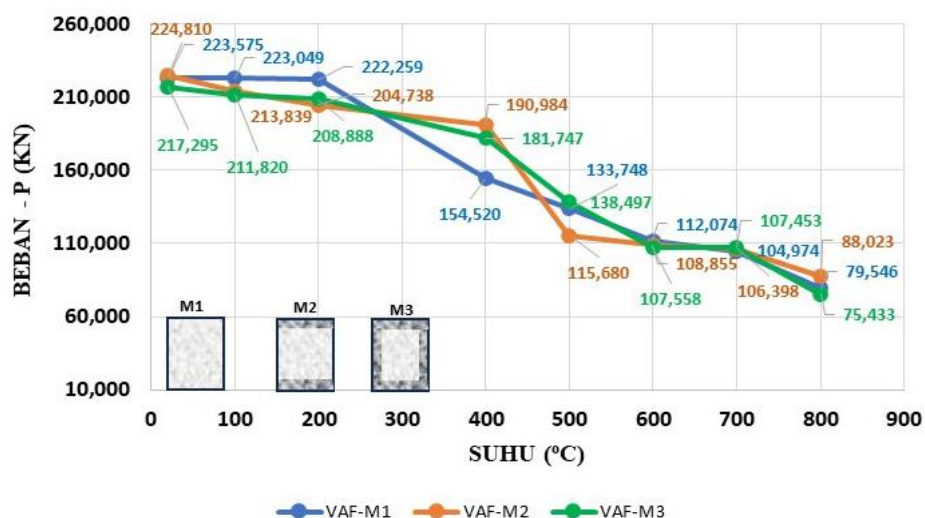
Tabel 3 Hasil Perbandingan Deflection antara Eksperimental dengan ANSYS

Waktu (menit)	Suhu (°C)	Deflection (mm)			
		Normal		Sandwich	
		Eksperimental	ANSYS	Eksperimental	ANSYS
0	20	0.000	1.850	0.000	0.000
15	800	5.000	4.611	0.200	4.419

Hasil Pengembangan Model Balok Beton Normal dan *Sandwich*

Pengembangan balok beton dengan variasi model balok antara lain:

1. Model balok beton normal 300x400x4000 mm dengan kode VAF-M1, mutu beton normal (f_c') yang digunakan f_c' 25MPa menggunakan tulangan utama 6Ø16 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420$ MPa. Tulangan sengkang menggunakan D13-100/200 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420$ MPa. Nilai modulus elastisitas, tegangan-regangan dipengaruhi oleh variasi suhu.
2. Model balok beton normal dan *sandwich* 300x400x4000 mm dengan kode VAF-M2, mutu beton normal (f_c') yang digunakan f_c' 25MPa mm, mutu beton ringan pada *sandwich* (f_c') yang digunakan f_c' 15 MPa menggunakan tulangan utama 6Ø16 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420$ MPa. Tulangan sengkang menggunakan D13-100/200 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420$ MPa. Nilai modulus elastisitas, tegangan-regangan dipengaruhi oleh variasi suhu. Beton normal berada di bagian atas dan bawah dari beton *sandwich* dengan tebal beton normal yaitu 50 mm.
3. Model balok beton normal dan *sandwich* 300x400x4000 mm dengan kode VAF-M3, mutu beton normal (f_c') yang digunakan f_c' 25MPa, mutu beton *sandwich* (f_c') yang digunakan f_c' 15Mpa menggunakan tulangan utama 6Ø16 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420$ MPa. Tulangan sengkang menggunakan D13-100/200 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420$ MPa. Nilai modulus elastisitas, tegangan-regangan dipengaruhi oleh variasi suhu. Beton normal ditempatkan sekeliling dari beton *sandwich* dengan tebal 50 mm.



Gambar 10 Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton VAF-M1,M2,M3

Pada kondisi awal suhu 20°C, balok beton VAF-M2 memiliki kapasitas beban maksimum tertinggi sebesar 224,81 KN, sedikit lebih tinggi dibandingkan VAF-M1 (223,575 KN) dan VAF-M3 (217,925 KN). Hal ini mengindikasikan bahwa VAF-M2 memiliki performa awal yang lebih baik terhadap beban aksial. Namun, pada peningkatan suhu di atas 400°C, penurunan kapasitas beban VAF-M2 berlangsung lebih drastis dibandingkan VAF-M1 dan VAF-M3. Misalnya pada suhu 400°C, kapasitas VAF-M2 turun hingga 69,234 KN, sedangkan VAF-M1 dan VAF-M3 masih mampu mempertahankan kapasitas masing-masing 181,747 KN dan 190,984 KN.

Dari segi kecenderungan kurva, dapat dikatakan bahwa VAF-M2 memiliki initial strength yang tinggi pada suhu awal 20°C namun mengalami penurunan yang tajam pada suhu 400-600°C; sedangkan VAF-M3 relatif stabil dan paling konsisten dalam mempertahankan kapasitas pada suhu tinggi, sedangkan VAF-M1 berada pada kondisi transisi yang lebih moderat antara kedua jenis lainnya.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Nilai tegangan yang dihasilkan menggunakan analisis ANSYS pada balok beton *sandwich* lebih tinggi dibanding balok beton normal pada suhu awal 20°C, seiring kenaikan suhu tinggi kedua balok memiliki nilai tegangan yang stabil cenderung linier sampai dengan pada suhu akhir 800°C. Pola retak atau *crack-crush* yang dihasilkan analisis ANSYS pada balok beton normal maupun balok beton *sandwich* berada di area *mid-span* balok beton atau area retak lentur beton yang berada pada momen tarik beton (momen positif). Kapasitas beban maksimum balok beton *sandwich* memiliki kapasitas lebih stabil dibanding dengan balok beton normal. Pada balok beton normal kapasitas beban yang dihasilkan menurun drastis pada suhu awal 20°C menuju di atas suhu 100°C dibanding dengan penurunan kapasitas beban yang dihasilkan oleh balok beton *sandwich*. Nilai *deflection* pada balok beton *sandwich* lebih kecil dibanding balok beton normal pada suhu awal 20°C. Di atas suhu 100°C atau pada waktu 0,10 menit sampai dengan suhu 500°C atau pada waktu 2,95 menit nilai *deflection* pada kedua balok beton memiliki nilai yang seimbang dan mengalami penurunan drastis setelah melewati suhu 500°C pada kedua balok beton tersebut. Hasil pengujian ANSYS, balok beton *sandwich* memiliki nilai *deflection* yang lebih kecil dan stabil dari balok beton normal.

Saran

Penggunaan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga seperti ANSYS dapat disarankan untuk melakukan simulasi termomekanik, guna memvalidasi data eksperimental dan memperkirakan perilaku struktur beton *sandwich* dalam kondisi beban dan suhu yang lebih bervariasi dan kompleks. Model penelitian ini hanya menguji terhadap paparan suhu puncak. Untuk mengetahui penurunan kekuatan tekan yang lebih detil dari waktu ke waktu disarankan melakukan pemodelan lanjutan dengan mempertimbangkan durasi waktu terhadap variasi paparan suhu tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Afrizal, Y. (2014). Analisis Kekuatan Beton Pascabakar Dengan Metode Numerik. Jurnal Teknosia Universitas Bengkulu.

- Akmaluddin, A., Murtiadi, S., & Anshari, B. (2020). *Flexural Stiffness of Normal and Sandwich Reinforced Concrete Beam Exposed to Fire Under Fixed Loading*. International Review of Civil Engineering (IRECE), Vol. 11, No. 1, pp. 36-44. DOI: 10.15866/irece.v11i1.17550.
- ANSYS Mechanical Academic Teaching Version (2025). License No. cc28aadbb66f, ISTN, Jakarta.
- Adiguna., & Alkhamuddin, A. (2018). *Simulasi Perubahan Kuat Tekan Beton pada Kondisi Ekstrim Pasca Pembakaran*. Jurnal Deformasi Universitas PGRI Palembang.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847-2019: *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional (BSN), Jakarta.
- CEN (2005). *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design (EN 1993-1-2)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). (2001). *Fire Safety of Steel Structures: A Handbook*. ECCS Technical Committee 3.
- Fiana, L., Ngudiyono., Kencanawati, N., & Murtiadi, S. (2024). *Modeling the Effect of Hole Diameter on Axial Capacity Columns Using ANSYS Software*. SSRG International Journal of Civil Engineering.
- Kodur, W. (2013). *Effect of Temperature on Strength and Elastic Modulus of High-Strength Steel*. Journal of Materials in Civil Engineering.
- Murtiadi, S., & Akmaluddin, A. (2023). *Performance of Concrete Building Structure Exposed to Localized Fire*. Civil Engineering and Architecture 11(1): 114-122, 2023 <http://www.hrpub.org>. DOI: 10.13189/cea.2023.110110.
- Murtiadi, S., Mahendra, M., Karyawan, I. D. M. A., Akmaluddin, A., & Pradjoko, E. (2023). *Constitutive Model of Concrete Frame Structure under Localized Fire Simulations*. Mandalika International Multiconference on Science and Engineering, MIMSE-C-A 2022, AER 215, pp. 65–75. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-088-6_8.
- Nakasone, Y., Yoshimoto, S., & Stolarski, T.A. (2006). *Engineering Analysis with ANSYS Software*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford.
- Pauw, A. (1960). *Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density*. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 57, No. December 1960.
- Schneider, U. (1990). Behaviour of concrete at high temperatures. ACI Materials Journal, 87(2), 160–165.
- Rao, S.K.P, & Tadepalli, T. (2024). *High-Temperature Behaviour of Concrete: A Review*. Conference: International Conference on Cement and Building Concrete for a Sustainable and Resilient Infrastructur, pp. 167-186, India. DOI:10.1007/978-981-99-7464-1_13.