



**VALIDASI EKSPERIMENTAL LABORATORIUM PERILAKU
LENTUR STRUKTUR BALOK BETON SANDWICH
TERHADAP PENGARUH TEMPERATUR TINGGI**

NAMA : Vembri Affiano

NPM : 23540015

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS SAINS TERAPAN DAN TEKNOLOGI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL
JAKARTA
AGUSTUS 2025**

**VALIDASI EKSPERIMENTAL LABORATORIUM PERILAKU
LENTUR STRUKTUR BALOK BETON *SANDWICH*
TERHADAP PENGARUH TEMPERATUR TINGGI**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik Sipil**

NAMA : Vembri Affiano

NPM : 23540015

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS SAINS TERAPAN DAN TEKNOLOGI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL
JAKARTA
AGUSTUS 2025**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Vembri Affiano
NPM : 23540015
Tanggal : 29 Agustus 2025



HALAMAN PERNYATAAN NON-PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Vembri Affiano
NPM : 23540015
Mahasiswa : Magister Teknik Sipil
Tahun Akademik : 2024/2025

Menyatakan bahwa saya tidak melakukan kegiatan plagiat dalam penulisan Tesis yang berjudul Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku Lentur Struktur Balok Beton *Sandwich* Terhadap Pengaruh Temperatur Tinggi.

Apabila suatu saat nanti terbukti saya melakukan plagiat maka saya akan menerima sanksi yang telah ditetapkan.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Jakarta, 29 Agustus 2025



Vembri Affiano

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Vembri Affiano
NPM : 23540015
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Judul Tesis : Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku
Lentur Struktur Balok Beton *Sandwich* Terhadap
Pengaruh Temperatur Tinggi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, Institut Sains dan Teknologi Nasional.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Suryawan Murtiadi M.Eng.,Ph.D. (.....)

Penguji : Ir. Syahril Taufik M.Eng.Sc.,Ph.D. (.....)

Penguji : Ir. Taufik Ramlan Wijaya, M.Eng.Sc.,Ph.D. (.....)

Penguji : Dr. Ir. M. Idrus Alatas, M.Sc. (.....)

Penguji : Ir. Suryawan Murtiadi M.Eng.,Ph.D. (.....)

Ditetapkan di Jakarta

Tanggal : 29 Agustus 2025

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, kesehatan serta kesempatan yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku Lentur Struktur Balok Beton *Sandwich* terhadap Pengaruh Temperatur Tinggi. Penulisan tesis ini merupakan bagian akhir dari perjalanan studi pada Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, Institut Sains dan Teknologi Nasional.

Perjalanan penyusunan tesis ini bukanlah hal yang mudah. Ada banyak tantangan, keterbatasan dan dinamika yang harus dilalui. Namun, di balik setiap kesulitan selalu ada pembelajaran yang berharga dalam memperkaya proses ini. Setiap masukan, dukungan dan dorongan dari berbhai pihak menjadi kekuatan yang membuat penulis terus melangkah hingga tahap akhir ini.

Penulis berharap hasil karya ini dapat memberikan manfaat, baik sebagai kontribusi akademik di bidang Teknik Sipil, maupun sebagai referensi praktis yang dapat digunakan oleh pihak-pihak yang berkepentingan.

Dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang tulus kepada:

1. Allah SWT, atas segala karunia dan kemudahan yang diberikan sepanjang proses penulisan tesis ini.
2. Bapak Dr. Ir. Isnuwardianto, DEA selaku Rektor Institut Sains dan Teknologi Nasional yang telah memfasilitasi seluruh proses perkuliahan hingga penyelesaian tesis.
3. Bapak Dr. Ir. R. Kun Wardana Abyoto, M.T. selaku Dekan Fakultas Sains Terapan dan Teknologi atas dukungan selama penulis menempuh studi.
4. Bapak Ir. Suryawan Murtiadi, M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Program Studi dan Dosen Pembimbing yang selalu memberikan motivasi dan bimbingan selama perkuliahan hingga penyelesaian tesis.
5. Bapak Ir. Syahril Taufik M.Sc.Eng., Ph.D. dan Bapak Ir. Taufik Ramlan Wijaya, M.Sc.Eng., Ph.D. yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan hingga penyusunan tesis.

6. Seluruh dosen dan staf administrasi di Fakultas Sains Terapan dan Teknologi yang telah membantu dengan pelayanan selama melaksanakan kegiatan belajar.
7. Orang tua tercinta, Ayahanda Ir. H. H. Affidin, BAE, MM dan Ibunda Rr. Budi Suwasti yang menjadi sumber doa, kekuatan dan inspirasi terbesar dalam hidup penulis.
8. Istri tercinta, Sugiah yang selalu memberikan doa, semangat dan motivasi selama melaksanakan proses perkuliahan sampai dengan tesis ini selesai.
9. Anak-anak tercinta, Rafa Affiano dan Ramadhan Affiano semoga bisa mengikuti jejak orang tua dalam menempuh studi belajar hingga cita-cita tercapai.
10. Bapak Hartono Santoso selaku Pimpinan di PT. Bumitama Gunajaya Agro yang selalu memberikan inspirasi, nasehat dan motivasi untuk tetap berkarya untuk mencapai kesuksesan dalam proses perkuliahan sampai dengan tesis ini selesai.
11. Bapak Didik Dharma Winarta selaku Pimpinan CV. Berkah Makmur Abadi yang telah memberikan dukungan dalam bentuk data gambar struktur bangunan untuk dilakukan analisis pada tesis ini.
12. Sahabat dan rekan seperjuangan di Program Studi Magister Teknik Sipil angkatan 2023 yang selalu berbagai tawa, dukungan dan cerita selama perjalanan studi ini.
13. Seluruh pihak yang telah memberikan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung ,yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa karya ini masih jauh dari sempurna. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan berlipat ganda dari Allah SWT.

Jakarta, 29 Agustus 2025

Vembri Affiano, ST

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Institut Sains dan Teknologi Nasional, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Vembri Affiano
NPM : 23540015
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Fakultas : Teknik Sipil Fakultas Sains Terapan dan Teknologi
Jenis Karya : Tesis

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Institut Sains dan Teknologi Nasional Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku Lentur Struktur Balok Beton *Sandwich* Terhadap Pengaruh Temperatur Tinggi

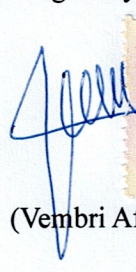
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Institut Sains dan Teknologi Nasional berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database) *softcopy* dan *hardcopy*, merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 29 Agustus 2025

Yang menyatakan


(Vembri Affiano)



ABSTRAK

VALIDASI EKSPERIMENTAL LABORATORIUM PERILAKU LENTUR STRUKTUR BALOK BETON *SANDWICH* TERHADAP PENGARUH TEMPERATUR TINGGI

Penelitian ini bertujuan menganalisis perilaku lentur balok beton *Sandwich* terhadap pengaruh temperatur tinggi melalui pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS, yang disesuaikan dengan hasil uji eksperimental laboratorium. Parameter yang dianalisis meliputi kapasitas beban, distribusi tegangan berdasarkan kriteria *von mises*, dan *deflection* balok pada berbagai kondisi suhu. Pemodelan dilakukan dengan metode elemen hingga (*finite element method*) dalam bentuk tiga dimensi yang disesuaikan dengan spesimen uji di laboratorium. Variasi model terdiri atas balok beton normal dan balok beton *Sandwich* dengan dimensi balok 200×300×4000 mm serta kolom 300×300×1000 mm. Pemodelan dibagi menjadi elemen berukuran 20×20×50 mm. Mutu beton untuk balok normal adalah 25 MPa, sedangkan beton *sandwich* 15 MPa, dengan selimut beton 20 mm. Tulangan baja sesuai pengujian laboratorium terdiri dari tulangan tarik 3Ø12 mm, tulangan tekan 2Ø12 mm, dan kekuatan leleh (*yield strength*) baja 300 MPa. Beban diletakkan pada dua titik masing-masing di 1/3 bentang balok, sesuai referensi penelitian terdahulu. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kapasitas beban balok beton normal pada suhu 20°C, 100°C, 200°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C dan 800°C berturut-turut adalah 15,419 KN; 15,010 KN; 13,657 KN; 11,153 KN; 8,300 KN; 7,381 KN; 6,541 KN dan 6,074 KN. Sementara itu, kapasitas beban balok beton *Sandwich* pada suhu yang sama berturut-turut adalah 14,804 KN; 14,591 KN; 13,442 KN; 11,877 KN; 10,079 KN; 8,710 KN, 8,665 KN dan 7,750 KN. Analisis memperlihatkan bahwa balok beton *Sandwich* memiliki performa yang relatif lebih stabil dibandingkan balok beton normal dalam mempertahankan kapasitas beban pada variasi temperatur tinggi.

Kata Kunci: balok beton, suhu tinggi, tegangan, kapasitas beban

ABSTRACT

EXPERIMENTAL LABORATORY VALIDATION OF FLEXURAL BEHAVIOR OF *SANDWICH* CONCRETE BEAMS UNDER HIGH TEMPERATURE EXPOSURE

This study objective to analyze the flexural behavior of *sandwich* concrete beams under elevated temperature exposure through numerical modeling using *ANSYS* software, validated by experimental laboratory tests. The investigated parameters include load-carrying capacity, stress distribution based on the *von Mises* criterion, and beam *deflection* under various temperature conditions. The modeling employed the finite element method (FEM) in a three-dimensional configuration consistent with laboratory test specimens. Two beam types were modeled: normal concrete beams and *sandwich* concrete beams, with dimensions of 200×300×4000 mm, and columns measuring 300×300×1000 mm. The model was discretized into elements measuring 20×20×50 mm. The concrete compressive strength was 25 MPa for the normal beams and 15 MPa for the *sandwich* beams, with a concrete cover of 20 mm. Reinforcement detailing followed the laboratory specimens, consisting of 3Ø12 mm tensile reinforcement, 2Ø12 mm compressive reinforcement, and steel yield strength of 300 MPa. The loading configuration adopted two-point loading positioned at one-third of the beam span, based on previous research. The simulation results showed that the load-carrying capacity of normal concrete beams at 20°C, 100°C, 200°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C and 800°C was 15.600 KN, 15.361 KN, 14.052 KN, 13.842 KN, 10.625 KN, 7.381 KN, and 6.074 KN, respectively. Meanwhile, the *sandwich* concrete beams achieved load capacities of 14,804 KN; 14,591 KN; 13,442 KN; 11,877 KN; 10,079 KN; 8,710 KN, 8,665 KN and 7,750 KN at the same temperature levels. The analysis indicates that *sandwich* concrete beams exhibit relatively more stable performance in maintaining load capacity compared to normal concrete beams when subjected to elevated temperature variations.

Keywords: concrete beam, high temperature, stress, load-carrying capacity

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN NON-PLAGIAT	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	7
1.5 Batasan Masalah.....	7
1.6 Sistematika Penelitian	9
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1 Karakteristik dan Perilaku Beton pada Suhu Tinggi	11
2.1.1 Sifat Termal Beton	11
2.1.2 Mutu Beton	14
2.1.3 Tegangan-Regangan Beton secara Umum	14
2.1.4 Tegangan-Regangan Beton	15
2.1.5 Modulus Elastisitas Beton	18
2.1.6 Tegangan Leleh Baja.....	20

2.1.7 Hubungan Variasi Suhu dengan Waktu dalam Penelitian Struktur Balok Beton Bertulang.....	23
2.2 Studi Terdahulu.....	24
2.3 Model Elemen <i>Solid Hexahedral 8-Node</i> Metode Elemen Hingga	33
2.3.1 Fungsi Bentuk (<i>Shape Function</i>)	34
2.3.2 Matriks Kekakuan Elemen.....	35
2.3.3 Matriks Konstitutif Material	35
2.4 Implementasi dalam Perangkat Lunak ANSYS.....	35
2.5 Interpretasi Koefisien Determinasi (R^2) pada Fungsi Logaritma Natural ..	39
BAB 3 METODE PENELITIAN	41
3.1 Pendekatan Sistem.....	41
3.2 Bagan Alur Penelitian.....	42
3.3 Jadwal Penelitian	44
3.4 Tahapan Pelaksanaan Model	44
3.5 Pengaturan Properti Material.....	58
3.5.1 Properti Material Balok Beton	58
3.5.2 Properti Material Kolom Beton.....	63
3.5.3 Properti Material Tulangan Baja	64
3.5.4 Bagan Alur Proses Analisis Metode Elemen Hingga ANSYS	65
3.6 Model dan <i>Deflection</i> Balok.....	69
3.6.1 Model Balok dan Kolom Beton pada ANSYS	69
3.6.2 <i>Displacement Ratio</i> terhadap <i>Deflection</i> Balok Beton.....	72
3.7 Integrasi Pengaturan Variasi Suhu Tinggi dengan Metode Elemen Hingga	72
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	74
4.1 Hasil Penelitian Model Balok Beton Normal	74
4.2 Hasil Penelitian Model Balok Beton <i>Sandwich</i>	80
4.3 Perbandingan Tegangan terhadap Suhu Beban Balok Beton Normal dengan Beton <i>Sandwich</i>	86
4.4 Perbandingan <i>Deflection</i> terhadap Suhu Beban Balok Beton Normal dengan Beton <i>Sandwich</i>	86

4.5 Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton Normal dengan Beton <i>Sandwich</i>	87
4.6 Ringkasan Hasil Analisis Balok Beton Normal dan <i>Sandwich</i>	89
4.7 Hasil Pengembangan Model Balok Beton Normal dan <i>Sandwich</i>	90
4.7.1 Hasil Analisis Model Balok Beton VAF-M1.....	91
4.7.2 Hasil Analisis Model Balok Beton VAF-M2.....	93
4.7.3 Hasil Analisis Model Balok Beton VAF-M3.....	97
4.7.4 Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton VAF-M1, VAF-M2 dan VAF-M3	100
4.7.5 Ringkasan Hasil Analisis Balok Beton VAF-M1, M2 dan M3	103
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	105
5.1 Kesimpulan.....	105
5.2 Saran	106
DAFTAR PUSTAKA.....	107
DAFTAR LAMPIRAN	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Foto Udara Kebakaran di Glodok Plaza-Jakarta	2
Gambar 2. 1 Grafik Variasi Konduktivitas Termal Beton dengan Kekuatan Normal	11
Gambar 2. 2 Perubahan Bentuk Fisik Beton Akibat Perubahan Suhu	13
Gambar 2. 3 Perubahan Bentuk Fisik Beton pada Berbagai Suhu.....	13
Gambar 2. 4 Kurva Tegangan dan Regangan Beton Normal	15
Gambar 2. 5 Kurva Tegangan dan Regangan Beton pada Suhu Tinggi.....	16
Gambar 2. 6 Kurva Tegangan-Regangan Beton pada Suhu Tinggi	17
Gambar 2. 7 Grafik Hubungan Modulus Elastisitas Beton pada Suhu Tinggi	18
Gambar 2. 8 Grafik Hubungan Modulus Elastisitas Beton Normal pada Variasi Suhu Tinggi	19
Gambar 2. 9 Kurva Tegangan-Regangan Baja	21
Gambar 2. 10 Kurva Standart ISO 834-1 (Suhu vs Waktu)	24
Gambar 2. 11. Sketsa Spesimen Balok Beton Bertulang	25
Gambar 2. 12. Tungku Pembakaran di Laboratorium.....	26
Gambar 2. 13. Detail Pemasangan Termokopel pada Balok Beton	26
Gambar 2. 14. Kurva Temperatur-Waktu Balok Beton Normal Saat Terjadi Pembakaran	27
Gambar 2. 15. Kurva Temperatur-Waktu Balok Beton Sandwich Saat Terjadi Pembakaran	27
Gambar 2. 16. Kurva Temperatur Pada Permukaan Balok	28
Gambar 2. 17 Kurva Temperatur Pada Tulangan Beton	28
Gambar 2. 18. Kurva Deflection dan Waktu Pembakaran Beton Normal	29
Gambar 2. 19. Kurva Deflection dan Waktu Pembakaran Beton Sandwich	29
Gambar 2. 20. Kurva Kekakuan Antara Beton Normal dan Beton Sandwich	30
Gambar 2. 21 Kurva Kekakuan Lentur Beton Normal Terhadap Temperatur	31
Gambar 2. 22. Kurva Kekakuan Lentur Beton Sandwich Terhadap Temperatur..	32
Gambar 2. 23. Deflection Terhadap Temperatur Akumulatif.....	32
Gambar 2. 24 Struktural Solid Geometry	33
Gambar 2. 25. Tampilan Main Window ANSYS	37

Gambar 2. 26. Model Balok Pada Tampilan Graphic Window Huruf-E	38
Gambar 2. 27. Tampilan Text Output Window ANSYS	38
Gambar 3. 1 Penampang Model Balok 200x300x4000 mm	42
Gambar 3. 2 Bagan Alur Penelitian.....	43
Gambar 3. 3 Input Create Block by Dimensions Elemen Balok Beton	51
Gambar 3. 4 Penampang Element Kecil Balok Beton 20x20x50 mm	51
Gambar 3. 5 Input Copy Volume Elemen 20x20x50 mm	52
Gambar 3. 6 Penampang Elemen Balok 20x50x200 mm	52
Gambar 3. 7 Input Copy Volume Element 20x50x200 mm	53
Gambar 3. 8 Penampang Elemen Balok 200x300x50 mm	53
Gambar 3. 9 Input Copy Volume Elemen 200x300x4000 mm	54
Gambar 3. 10 Penampang Elemen Balok 200x300x4000 mm	54
Gambar 3. 11 Model Tulangan Baja Balok Beton 200x300x4000 mm	55
Gambar 3. 12 Perletakkan Loading Plat SOLID185.....	56
Gambar 3. 13 Perletakkan Tumpuan Kolom.....	57
Gambar 3. 14 Titik Coupling di Loading Plat.....	58
Gambar 3. 15 Kurva Tegangan dan Regangan Beton Normal.....	59
Gambar 3. 16 Kurva Tegangan dan Regangan Beton Sandwich	59
Gambar 3. 17 Kurva Tegangan-Regangan Tulangan Baja.....	64
Gambar 3. 18 Bagan Alur Proses Analisis Finite Element ANSYS.....	66
Gambar 3. 19 Model Balok Beton 200x300x4000 mm dan Kolom 300x300x1000mm	70
Gambar 3. 20 Tulangan Baja Balok Beton 200x300x4000 mm	71
Gambar 3. 21 Tulangan Baja Kolom Beton 300x300x1000 mm.....	71
Gambar 4. 1 Perbandingan Hasil Fungsi Logaritma antara Hasil Laboratorium dan Analisis ANSYS pada Beton Normal	76
Gambar 4. 2 Hubungan Waktu dengan <i>Deflection</i> Beton Normal	77
Gambar 4. 3 Kapasitas Beban Beton Normal (VAL-BN).....	78
Gambar 4. 4 Pola Kontur Tegangan Von Misses Balok Beton Normal	79
Gambar 4. 5 Pola Retak Ketiga Balok Beton Normal	79
Gambar 4. 6 Perbandingan Hasil Fungsi Logaritma antara Hasil Laboratorium dan Analisis ANSYS pada Beton <i>Sandwich</i>	81

Gambar 4. 7 Hubungan Waktu dengan <i>Deflection</i> Beton <i>Sandwich</i>	82
Gambar 4. 8 Kapasitas Beban Beton Normal (VAL-BN)	83
Gambar 4. 9 Pola Kontur Tegangan Von Misses Balok Beton <i>Sandwich</i> (Material Properti: Beton <i>Sandwich</i>)	84
Gambar 4. 10 Pola Retak Ketiga Balok Beton <i>Sandwich</i> (Material Properti: Beton <i>Sandwich</i>).....	84
Gambar 4. 11 Pola Kontur Tegangan Von Misses Balok Beton <i>Sandwich</i> (Material Properti: Beton Normal).....	85
Gambar 4. 12 Pola Retak Ketiga Beton <i>Sandwich</i> (Material Properti: Beton Normal)	85
Gambar 4. 13 Hubungan Tegangan vs Suhu pada Beton Normal dan <i>Sandwich</i> .	86
Gambar 4. 14 Perbandingan Waktu - <i>Deflection</i> pada Balok Beton Normal dan Beton <i>Sandwich</i>	87
Gambar 4. 15 Kapasitas Beban Balok Beton Normal dengan Balok Beton <i>Sandwich</i>	88
Gambar 4. 16 Tegangan-Suhu Balok Beton VAF-M1	92
Gambar 4. 17 Kapasitas Beban Beton Normal (VAF-M1)	93
Gambar 4. 18 Tegangan-Suhu Balok Beton VAF-M2	95
Gambar 4. 19 Kapasitas Beban Beton Normal (VAF-M2)	96
Gambar 4. 20 Tegangan-Suhu Balok Beton VAF-M3	99
Gambar 4. 21 Kapasitas Beban Beton VAF-M3-SW	100
Gambar 4. 22 Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton VAF-M1,M2,M3...	101
Gambar 4. 23 Tegangan Von Misses Countur pada bagian Kolom.....	102
Gambar 4. 24 Tegangan Von Misses Countur pada Bagian Kolom - Balok	102
Gambar 4. 25 Pola Retak Ketiga.....	103

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Persamaan Hubungan Modulus Elastisitas Beton pada Variasi Suhu Tinggi	19
Tabel 2. 2 Sifat Mekanis Tulangan Baja Tulangan Beton	22
Tabel 3. 1. Jadwal Penelitian	44
Tabel 3. 2 Tabel Material Beton Normal 200x300x4000 mm	47
Tabel 3. 3 Tabel Material Beton <i>Sandwich</i> 200x300x4000 mm	48
Tabel 3. 4 Nilai Properti Beton pada Suhu Normal (20°C)	49
Tabel 3. 5 Nilai Properti Baja pada Suhu Normal (20°C)	50
Tabel 3. 6 Tabel <i>Non-Metal Plasticity Beton</i>	60
Tabel 3. 7 Variasi Model	62
Tabel 3. 8 Kurva Tegangan dan Regangan Kolom Beton	63
Tabel 3. 9 Modulus Elastisitas Baja pada Variasi Suhu	65
Tabel 4. 1 Hasil Analisis ANSYS pada Beton Normal	75
Tabel 4. 2 Hasil Analisis ANSYS pada Beton <i>Sandwich</i>	80
Tabel 4. 3 Hasil Analisis ANSYS pada Beton VAF-M1	91
Tabel 4. 4 Hasil Analisis ANSYS pada Beton VAF-M2	94
Tabel 4. 5 Hasil Analisis ANSYS pada Beton VAF-M3	98

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Data Eksperimental Laboratorium	111
Lampiran B. Material Properti Beton.....	116
Lampiran C. Stress-Strain Baja.....	133
Lampiran D. Tabel Material Properti Balok Beton	139
Lampiran E. Kontur Tegangan dan Pola Retak.....	144
Lampiran F. Lembar Surat Penugasan Dosen Pembimbing.....	155
Lampiran G. Lembar Asistensi Tesis	156
Lampiran H. Lembar Catatan Perbaikan Seminar Tesis	158
Lampiran I. Pemeriksaan Plagiarisme.....	164



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konstruksi bangunan gedung adalah wujud fisik hasil pekerjaan konstruksi yang menyatu dengan tempat kedudukannya, sebagian atau seluruh berada di atas dan/atau didalam tanah dan/atau air yang berfungsi sebagai tempat manusia melakukan kegiatannya, baik untuk hunian atau tempat tinggal, kegiatan keagamaan, kegiatan usaha, kegiatan sosial, budaya maupun kegiatan khusus (UU nomor 28 Tahun 2022).

Kebakaran gedung merupakan bencana yang menyebabkan kerusakan dan kehilangan nyawa manusia dan menjadi permasalahan bagi pemilik gedung karena diperlukan biaya yang cukup tinggi untuk membangun kembali. Tercatat pada tanggal 22 Agustus 2020 telah terjadi kebakaran selama sebelas jam di Gedung Kejaksaan Agung Jakarta Selatan yang membakar seluruh bangunan (<https://www.tempo.co/arsip/daftar-kejadian-kebakaran-gedung-tinggi-di-jakarta-sebelum-k-link-tower-hari-ini-166580>).

Pada Januari 2025 kebakaran melanda pada gedung Glodok Plaza di Jakarta, kebakaran melanda lantai 7 sampai lantai 9 dan diduga berawal dari ruang hiburan. Kejadian ini terjadi pada hari Rabu malam tanggal 15 Januari 2025 sekitar pukul 21.30 WIB. Api dengan cepat menyebar ke seluruh gedung dikarenakan ruang hiburan malam yang menggunakan material pelapis akustik berbahan *glasswool*, yang sangat mudah terbakar dan mempercepat perambatan api antar lantai. Petugas pemadam kebakaran mengerahkan 45 unit mobil pemadam dan 230 personel untuk memadamkan api. Proses pemadaman dan pendinginan berlangsung hingga Jumat, 17 Januari 2025. Berdasarkan berita yang dikutip dari www.metrotvnews.com bahwa pada kejadian kebakaran di gedung ini yaitu terdapat 12 korban tewas dan 14 yang dilaporkan hilang.



Gambar 1. 1 Foto Udara Kebakaran di Glodok Plaza-Jakarta
<https://www.kompas.id/artikel/glodok-plaza-terbakar-diduga-9-pengunjung-sempat-terjebak>

Beton merupakan salahsatu komponen struktur pada konstruksi gedung dan memiliki kekuatan tekan yang tinggi, beton akan mengalami penurunan kuat beton seiring lama prose pembakaran pada beton, bahkan untuk beberapa variasi pembakaran maka penurunan kuat tekan beton bisa mencapai dua kali lipat setiap jam (Adiguna & Alkhamuddin, 2018).

Schneider (1990), ketika temperatur beton naik diatas 100°C , pasta semen mulai mengalami dehidrasi karena kelembapan hilang. Partikel agregat mengalami 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 dan 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 Murtiadi et al., 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, 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.

Penelitian perihal perilaku balok beton bertulang menggunakan analisis perhitungan metode elemen hingga dengan bantuan *software* ANSYS dilakukan oleh (Tjitradi et al., 2017) bahwa balok beton dengan kondisi keruntuhan tarik memiliki kapasitas lentur yang lebih rendah dan perilaku keruntuhan lebih daktail daripada balok dengan kondisi keruntuhan tekan dan seimbang. Penelitian ini merupakan representasi beban titik ultimit hingga hancur yang merupakan representasi mekanisme keruntuhan beton bertulang dengan kondisi kurang tulangan ($\rho \leq 0,75.\rho_b$), tulangan seimbang ($\rho = \rho_b$) dan tulangan berlebih ($\rho > 0,75.\rho_b$).

Penelitian menggunakan sampel beton berbentuk silinder berdiameter 150 mm, tinggi 300 mm dimodelkan sebagai bahan uji eksperimental. Struktur beton yang terpapar suhu tinggi dapat mempengaruhi kekuatan struktur beton, pengujian dilakukan menggunakan mutu beton 25 MPa dan disimulasikan terpapar suhu secara konstan dengan variasi suhu 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C dan

700°C. Analisis model disimulasikan menggunakan *software* LUSAS v.16 dengan tujuan mengamati sifat material beton akibat terpapar suhu tinggi. Hasil penelitian mendapatkan semakin tinggi suhu yang diterima beton maka kekuatan beton semakin menurun. Beton yang terbakar hingga suhu 300°C masih mempunyai kekuatan sebesar 82% dan pada suhu 700°C kekuatan beton tersisa sebesar 30%. Pada suhu 700°C regangan beton pada tegangan maksimum meningkat menjadi 423% dari regangan pada kondisi normal (Suryanita et al., 2019).

Penyelidikan perilaku balok beton bertulang yang dibebani dan terpapar api dilakukan juga oleh (Kadhun, 2018), penelitian ini menggunakan spesimen balok beton persegi panjang dengan ukuran 15x15x100 cm dengan suhu yang terpapar pada spesimen yaitu 400°C, 600°C dan 800°C dengan durasi paparan suhu selama 1 dan 2 jam. Hasil penelitian ini menunjukkan pengurangan yang signifikan dalam kekuatan lentur setelah terpapar api. Kekuatan lentur residual adalah 81% dan 88% dengan paparan api selama 1 dan 2 jam masing-masing pada suhu api 400°C sedangkan residual pada suhu api 600°C sebesar 53% dan 66% dengan waktu paparan selama 1 dan 2 jam. Penelitian ini juga memprediksi kapasitas momen lentur pada suhu 400°C dan menggunakan Kode ACI 318/2008.

Penelitian yang dilakukan oleh Kodur, 2014 menyatakan bahwa beton pada suhu tinggi mengalami perubahan fisik dan kimia yang signifikan. Perubahan ini menyebabkan penurunan sifat-sifat beton pada suhu tinggi dan menimbulkan kompleksitas tambahan seperti terjadinya *spalling* pada beton mutu tinggi (*High Strength Concrete/HSC*). Sifat beton pada suhu tinggi sangat penting untuk model respons struktur beton bertulang terhadap kebakaran. Penelitian yang dilakukan oleh Kodur, 2014 membandingkan nilai tegangan dan regangan yang terjadi pada beton normal mutu tinggi (HSC) dengan berbagai peraturan / *codes* yang berlaku tiap negara.

(Laka Suku, 2018) melakukan penelitian Model dan analisis perilaku balok beton bertulang yang berbeda diameter akibat variasi tata letak tulangnya menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* ANSYS, hasil penelitian ini yaitu tata letak tulangan mempengaruhi perilaku balok beton bertulang, tulangan satu lapis mempunyai kapasitas beban dan kekakuan lebih besar tetapi daktilitasnya lebih kecil dari tulangan dua lapis, tata letak tulangan secara

umum tidak mempengaruhi pola retak, keruntuhan balok tanpa sengkang. disebabkan oleh tegangan tarik diagonal sedangkan balok bersengkang oleh geser dan pecah akibat tekan.

ANSYS adalah salah satu *software* yang digunakan untuk menganalisis berbagai macam struktur, aliran fluida dan perpindahan panas selain *software* Nastran, CATIA, *Fluent* dan yang lain. Ada tiga jenis analisis utama antara analisis struktur, aliran fluida dan perpindahan panas yang sering dijumpai dalam keilmu teknikan (Pinem, 2017).

Pengujian terhadap kolom beton mutu normal dengan metode elemen hingga 3-D menggunakan *software* ANSYS dilakukan oleh Taufik, S et al., 2020 dengan tujuan menganalisis kemampuan beban aksial ultimit, pola distribusi tegangan-regangan dan pola retak pada element beton dan daktilitas kolom. Pengujian beberapa model dan variasi jarak pengekanan pada kolom pendek mutu beton normal dengan tulangan longitudinal baja ulir dan tulangan transversal baja carbon. Kolom dianalisis menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dengan bantuan Aplikasi ANSYS 3-D *full scale*, dengan material properties untuk beton menggunakan SOLID65 dan tulangan baja menggunakan LINK8 serta loading plat SOLID45.

Penelitian menggunakan perangkat lunak ANSYS dilakukan 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.

Fiana, L., Ngudiyono, (2024) melakukan penelitian menggunakan *software* ANSYS dengan tujuan nilai kapasitas beban maksimal terhadap kolom berlubang dengan variasi diameter lubang. Hasil yang diperoleh yaitu semakin besar ukuran lubang pada kolom beton bertulang, maka semakin kecil kapasitas aksial kolom tersebut dalam memikul beban. Hasil pemodelan kolom dengan variasi lubang berdiameter 1,5 inci, 2 inci, dan 3 inci menunjukkan bahwa persentase penurunan kapasitas aksial masing-masing sebesar 2,27%, 3,42%, dan 7,73%.

Penelitian yang dilakukan oleh Ngongo, Adi. (2025) tentang perilaku model *fire resistance* kolom beton bertulang dan kolom komposit dengan metode elemen hingga dilakukan menggunakan *software* ANSYS, untuk memperoleh nilai kapasitas beban yang dapat diterima oleh kolom akibat pengaruh variasi suhu tinggi dari 20°C sampai dengan 600°C. Hasil penelitian ini yaitu kapasitas memikul beban kolom beton bertulang pada suhu ruangan, suhu 200°C, suhu 400°C dan suhu 600°C berturut-turut adalah 3997.05 KN, 3043.76 KN, 2066.71 KN dan 1423.24 KN. Besarnya deformasi pada beban 1400 KN saat suhu ruangan, suhu 200°C, suhu 400°C dan suhu 600°C berturut-turut adalah 1.91 mm, 3.80 mm, 7.61 mm dan 36.38 mm.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, pertimbangan yang menjadi batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana tegangan yang diperoleh setelah dilakukan analisis model struktur balok beton bertulang dengan sejumlah variasi mutu beton akibat pengaruh variasi suhu tinggi menggunakan analisis ANSYS?
2. Bagaimana kapasitas beban maksimum balok beton bertulang menerima beban maksimum akibat pengaruh variasi suhu tinggi menggunakan analisis ANSYS?
3. Bagaimana *deflection* yang terjadi pada balok beton bertulang akibat pengaruh variasi suhu tinggi menggunakan analisis ANSYS?
4. Apakah ANSYS bisa dipakai untuk validasi hasil eksperimen pengujian balok beton akibat pengaruh suhu tinggi menggunakan interpretasi koefisien determinasi fungsi logaritma R^2 ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu model tiga dimensi struktur balok beton normal dan *Sandwich* akibat pengaruh variasi suhu tinggi antara lain:

1. Memperoleh nilai tegangan model struktur balok beton normal dan balok beton *Sandwich* dengan variasi mutu beton akibat pengaruh variasi suhu tinggi dengan analisis ANSYS.
2. Memperoleh nilai kapasitas beban maksimum yang dapat diterima model struktur balok beton normal dan balok beton *Sandwich* akibat pengaruh variasi

suhu tinggi dengan analisis ANSYS.

3. Memperoleh nilai *deflection* model struktur balok beton normal dan balok beton *Sandwich* akibat pengaruh variasi suhu tinggi menggunakan analisis ANSYS.
4. Mendapatkan hasil validasi dari model ANSYS akibat pengaruh variasi suhu tinggi menggunakan interpretasi koefisien determinasi fungsi logaritma R^2 .

Model tiga dimensi menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) dengan bantuan *software* ANSYS *Mechanical* APDL dilakukan analisis terhadap data dari hasil eksperimental terdahulu atau sumber lain yang relevan sehingga model tersebut dapat bermanfaat dalam analisis perilaku lentur struktur balok beton bertulang.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian perihal analisis perilaku keruntuhan Model balok beton menggunakan FEM dengan bantuan *software* ANSYS antara lain:

1. Memberikan nilai tambah literatur ilmiah perihal struktur balok beton normal dan balok beton *Sandwich* terhadap pengaruh temperatur akibat kebakaran menggunakan FEM dengan bantuan *software* ANSYS.
2. Dapat menjadi bahan bantuan teknis bagi perencana, pelaksana dalam memaksimalkan desain rancangan struktur bangunan gedung.
3. Penelitian ini merupakan penelitian lebih lanjut terhadap penelitian terdahulu perihal struktur balok beton normal maupun *Sandwich* terhadap bahaya kebakaran dengan model skala tiga dimensi menggunakan metode FEM dengan bantuan perangkat lunak ANSYS sehingga tidak memerlukan biaya dan waktu dibanding dilakukan di laboratorium.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dilaksanakan dengan beberapa pembatasan masalah sehingga pembahasan tidak meluas dan menjadi terarah sesuai tujuan, maka batasan masalah antara lain:

1. Model balok beton (*reinforce concrete beam*) menggunakan ukuran balok 200 x 300 mm, panjang 4000 mm dan kolom menggunakan ukuran 300x300x1000 mm.
2. Model balok beton (*reinforce concrete beam*) menggunakan ukuran balok 300 x 400 mm, panjang 4000 mm dan kolom menggunakan ukuran 400x400x1000 mm.
3. Mutu beton (f_c') yang digunakan f_c' : 25MPa untuk beton normal dan 15 MPa digunakan balok beton *Sandwich*, kolom beton menggunakan f_c' : 30 MPa.
4. Model balok beton ukuran 200x300x4000 mm menggunakan tulangan utama menggunakan 2Ø10 mm dan 3Ø12 mm dengan tegangan leleh f_y =300 MPa. Tulangan sengkang menggunakan Ø8-100/200 mm dengan tegangan leleh f_y =300 MPa. Nilai modulus elastisitas, tegangan-regangan dipengaruhi oleh variasi suhu.
5. Model balok beton ukuran 300x400x4000 mm menggunakan tulangan utama menggunakan 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.
6. Model kolom beton ukuran 300x300x1000 mm menggunakan tulangan utama 4D16 dengan tegangan leleh f_y =420 MPa. Tulangan sengkang menggunakan D13-100 mm dengan tegangan leleh f_y =420 MPa.
7. Model kolom beton ukuran 400x400x1000 mm menggunakan tulangan utama 16D16 dengan tegangan leleh f_y =420 MPa. Tulangan sengkang menggunakan D13-100 mm dengan tegangan leleh f_y =420 MPa.
8. Tebal selimut balok beton menggunakan 20 mm.
9. Tebal beton *Sandwich* 200 mm untuk kedua model balok beton.
10. Tebal selimut kolom menggunakan 40 mm.
11. Temperatur pada balok beton diasumsikan sama antara luar balok beton dan pada bagian dalam balok beton. Variasi temperatur menggunakan 200°C sampai dengan 800°C.
12. Kolom diasumsikan tidak terkena paparan suhu tinggi.
13. *Loading plat* pada balok beton 200x300x4000 mm menggunakan ukuran 200x100 mm dengan ketebalan 20 mm, sedangkan balok beton 300x400x4000

mm menggunakan ukuran 300x200 mm dengan ketebalan 20 mm. Nilai modulus elastisitas, tegangan-regangan dipengaruhi oleh variasi suhu.

14. Faktor waktu tidak diperhitungkan saat proses beton terpapar suhu tinggi.
15. Perletakkan dua *loading plat* dengan posisi $1/3$ bentang balok dengan memberikan nilai *loading factor* 0,8 di kedua *loading plat*.
16. Nilai *shear-strength* dihitung berdasarkan akibat variasi suhu.
17. Asumsi model beton berada di zona gempa rendah (SPRMB).
18. Tumpuan berada pada kedua kolom dengan perletakkan sendi-sendi yang berada di permukaan atas dan bawah kolom.
19. Model pengembangan mereferensi pada Proyek Gedung di Jawa Timur dengan mengambil balok beton ukuran 300x400x4000 mm pada kode balok B34-1.
20. Analisis menggunakan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak ANSYS Mechanical APDL.
21. Model dilakukan menggunakan sistem *Graphical User Interface* (GUI) dan *command files* perangkat lunak ANSYS Mechanical APDL.

1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika pada penulisan Tesis ini sebagai berikut:

BAB. I Pendahuluan

Latar belakang penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB. II Tinjauan Pustaka

Tentang teori yang mendasari penelitian dan digunakan dalam menyelesaikan masalah.

BAB. III Metodologi Penelitian

Membahas tentang metode dan prosedur dalam penyelesaian masalah.

BAB. IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini membahas dan menganalisis data yang diperoleh dari simulasi model.

BAB. V Kesimpulan dan Saran

Menyimpulkan hasil-hasil yang didapat dari pengolahan dan Analisis data dan memberikan saran untuk hasil tersebut.



BAB 2

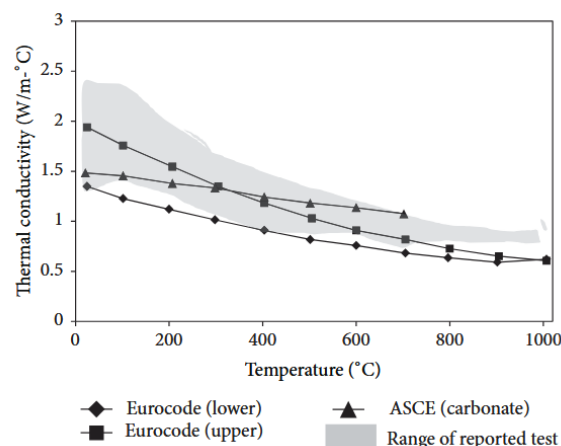
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik dan Perilaku Beton pada Suhu Tinggi

2.1.1 Sifat Termal Beton

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. Konduktivitas thermal beton pada suhu ruang berada antara 1,4 hingga 3,6 W/m²K dan nilainya bervariasi terhadap suhu. Pada Gambar 2.1 menunjukkan variasi konduktivitas termal beton normal (*Normal Strength Concrete/NSC*) sebagai fungsi suhu berdasarkan data hasil uji yang telah dipublikasikan secara empiris (Kodur, 2013).

Variasi hasil uji yang diukur ditunjukkan melalui area berarsir pada Gambar 2.1. Perbedaan data mengenai konduktivitas termal ini disebabkan oleh kandungan kelembapan, jenis agregat, kondisi pengujian dan teknik pengukuran yang digunakan dalam eksperimen. Pada Gambar 2.1 ditampilkan nilai batas area dan batas bawah konduktivitas termal sesuai ketentuan dalam EC2 yang mencakup semua jenis agregat. Konduktivitas termal yang ditampilkan pada Gambar 2.1 berdasarkan hubungan dari ASCE hanya berlaku untuk beton dengan agregat karbonat (Kodur, 2013).

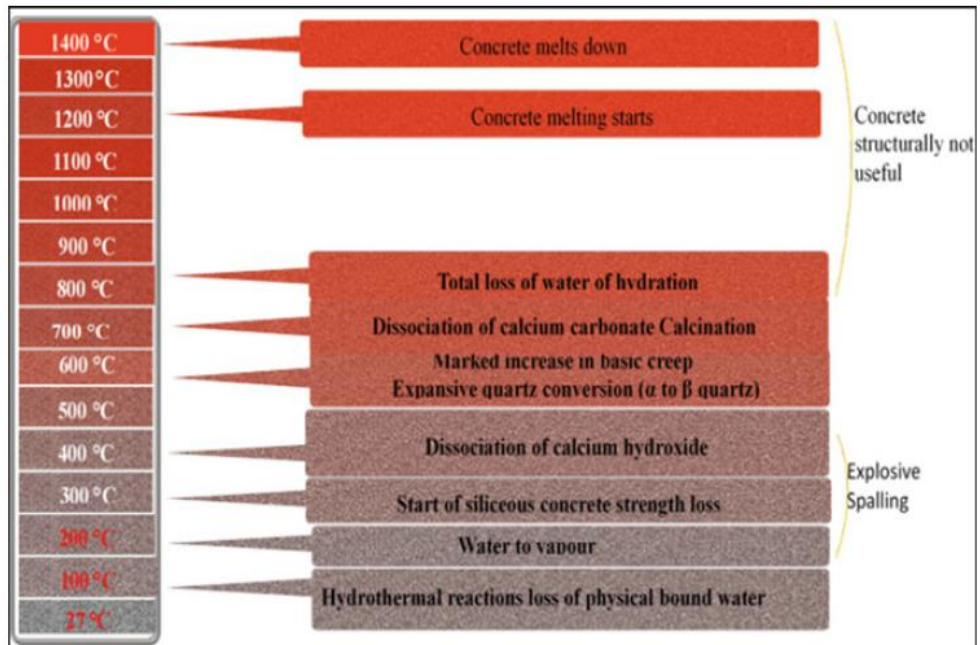


Gambar 2. 1 Grafik Variasi Konduktivitas Termal Beton dengan Kekuatan Normal
Kodur, 2013

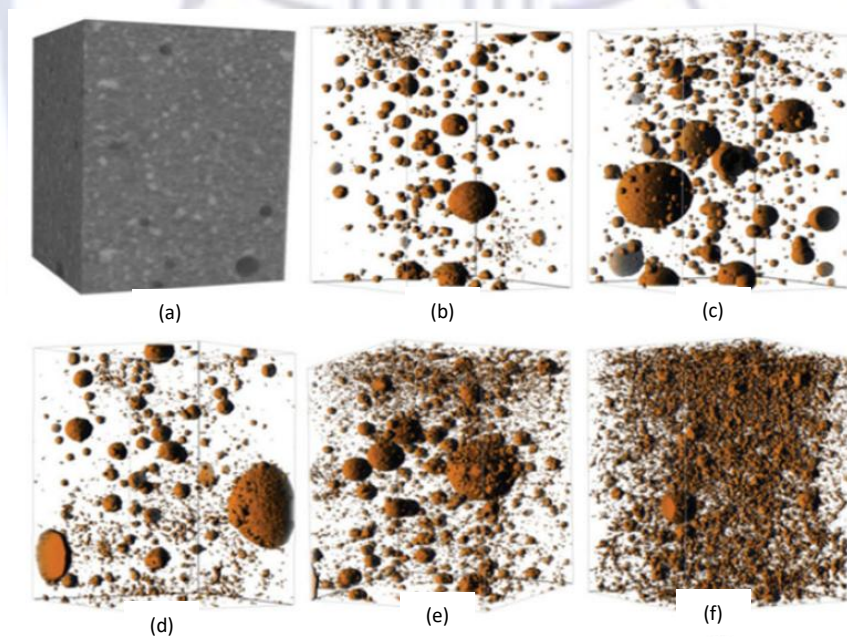
Nilai konduktivitas termal dapat bervariasi, nilai ini tergantung dengan beberapa faktor seperti proporsi campuran, jenis agregat, kadar air, permeabilitas dan densitas beton. Konduktivitas termal meningkat seiring dengan meningkatnya densitas beton, kadar air dan suhu (Kim KH et.al., 2003).

Khaliq W et al., 2012, konduktivitas termal pada beton yang diperkuat tulangan baja menunjukkan pola yang sebanding dengan beton normal ketika tulangan baja dan serat *polypropilena*, tetapi dengan adanya penambahan serat tidak mempengaruhi konduktivitas termal pada rentang suhu antara 20°C sampai dengan 800°C.

Perubahan fisik dan kimia terjadi ketika beton dipanaskan yang berakibat mengubah karakteristik termomekanik material dan ditunjukkan efek peningkatan suhu beton pada berbagai tahapan (Rao et al., 2017). Gambar 2.2 dijelaskan bahwa pada suhu 20°C sampai dengan 800°C, beton terjadi kehilangan air kapiler secara bertahap akibat penguapan 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 et al., 2024). Bagan seluruh tahapan perubahan fisik pada beton akibat perubahan suhu ditunjukkan pada Gambar 2.2 dibawah ini dan foto perubahan bentuk fisik dari beton dengan adanya perubahan suhu ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 2 Perubahan Bentuk Fisik Beton Akibat Perubahan Suhu
Pavani HP et al., 2020



Keterangan

(a) Bentuk awal spesimen beton, (b) Suhu 27°C, (c) Suhu 100°C, (d) Suhu 100°C, (e) Suhu 400°C, (f) Suhu 500°C - 800°C

Gambar 2. 3 Perubahan Bentuk Fisik Beton pada Berbagai Suhu
Praneeth PH et al., 2020

2.1.2 Mutu Beton

2.1.3 Tegangan-Regangan Beton secara Umum

Beton memiliki sifat utama yaitu sangat kuat menerima beban tekan yang dipengaruhi oleh nilai mutu beton. Selain itu, nilai kuat tarik dan modulus elastisitas beton dapat dikorelasikan terhadap kuat tekan beton. Menurut SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, mutu beton minimum yang digunakan untuk elemen struktural utama pada bangunan tahan gempa adalah mutu beton minimum untuk elemen struktural pada bangunan yang termasuk dalam kategori desain seismik menengah dan tinggi adalah 20 MPa ($f_c' \geq 20$ MPa), dan pada beberapa kasus direkomendasikan menggunakan $f_c' \geq 25$ MPa atau lebih, tergantung pada klasifikasi bangunan dan lokasi seismik dengan klasifikasi sebagai berikut.

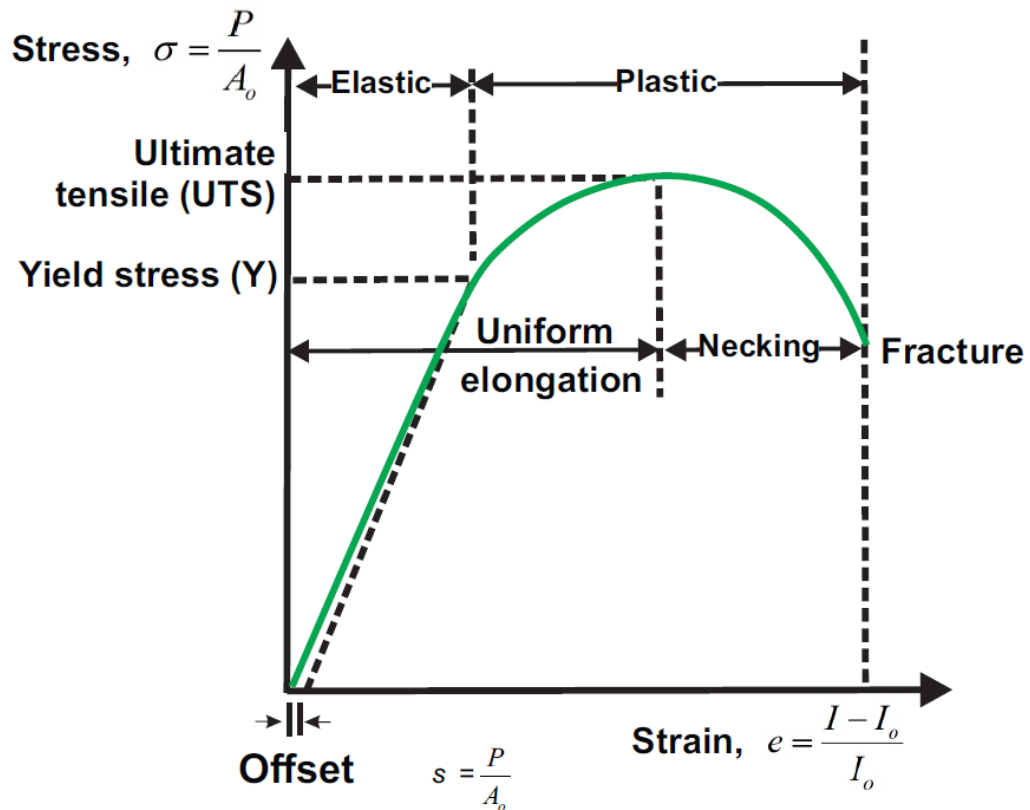
1. Mutu beton (f_c') kurang dari 10 MPa dapat digunakan untuk beton non-struktural seperti kolom praktis, balok ring pada rumah tinggal.
2. Mutu beton (f_c') antara 10 MPa sampai dengan 20 MPa digunakan pada beton struktural seperti balok, kolom, pelat beton struktural serta struktural pondasi.
3. Mutu beton (f_c') diatas 20 MPa digunakan untuk struktural beton yang direncanakan tahan gempa. Menurut Paulay dan Priestley (1992), dalam desain struktural tahan gempa diperlukan mutu beton yang cukup tinggi untuk memastikan kapasitas dan daktilitas yang memadai pada elemen tekan seperti kolom dan dinding geser.

Dikarenakan kuat tekan beton dipengaruhi oleh beban (P) sehingga terjadi tegangan pada beton (σ_c) sebesar beban (P) dibagi dengan luas penampang (A) sehingga dirumuskan

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

Penambahan beban mengakibatkan spesimen mengalami deformasi elastisitas non-linier pada tegangan yang disebut batas proporsional. Ketika berada di daerah elastis linier, tegangan dan regangan tidak proporsional tetapi ketika diturunkan maka spesimen kembali ke bentuk awal. Pada tegangan leleh tercapai

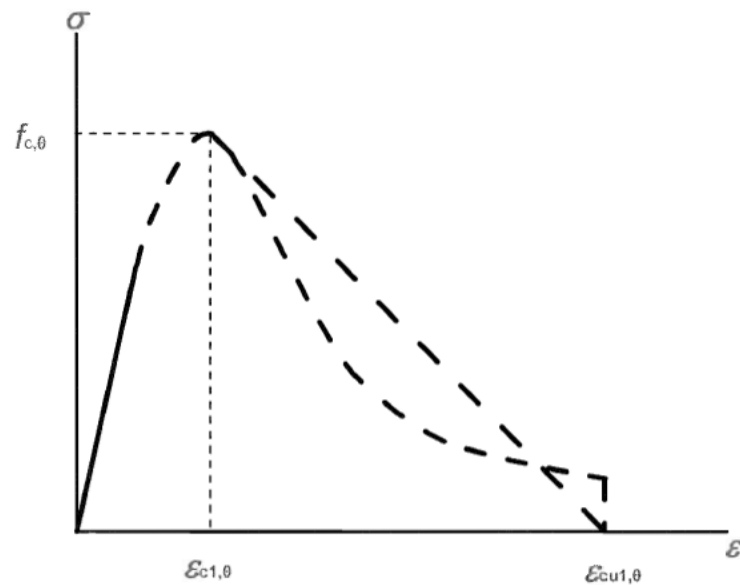
maka deformasi menjadi permanen. Hal ini dapat ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 2. 4. Kurva Tegangan dan Regangan Beton Normal
<https://pttensor.com/2024/02/17/kurva-tegangan-regangan-pada-material/>

2.1.4 Tegangan-Regangan Beton

Sesuai penjelasan dari EN 1992-1-2:2004 (E) bahwa Hubungan antara kekuatan dan sifat deformasi beton yang diberik tekanan uniaxial pada suhu tinggi dapa diperoleh dari hubungan tegangan-regangan seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.2. berupa grafik hubungan tegangan dan regangan beton pada suhu tinggi. Terdapat dua parameter hubungan tegangan-regangan yang dinotasikan kekuatan tekan $f_{c,\theta}$ sedangkan regangan $\varepsilon_{c1,\theta}$ terhadap $f_{c,\theta}$.



Gambar 2. 5 Kurva Tegangan dan Regangan Beton pada Suhu Tinggi
EN 1992-1-2:2004 (E)

Persamaan model tegangan-regangan beton pada suhu tinggi apabila nilai $\epsilon \leq \epsilon_{c1,\theta}$ menggunakan persamaan 2.2 yaitu:

$$\sigma = \frac{3\epsilon f_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana:

ϵ = regangan

$f_{c,\theta}$ = nilai karakteristik kuat tekan beton terhadap suhu (celcius) pada regangan tertentu

$\epsilon_{c1,\theta}$ = tegangan tekan beton disaat kebakaran

Persamaan perhitungan hubungan tegangan beton pada suhu tinggi NSC-ASCE

Manual 1992 memberikan persamaan sebagai berikut dengan ketentuan $\epsilon < \epsilon_{\max,T}$

dan $\epsilon > \epsilon_{\max,T}$.

$$\sigma_c = f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{max,T}}{\varepsilon_{max,T}} \right)^2 \right], \varepsilon \leq \varepsilon_{max,T} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\sigma_c = f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{max,T} - \varepsilon}{3\varepsilon_{max,T}} \right)^2 \right], \varepsilon > \varepsilon_{max,T} \dots\dots\dots (2.4)$$

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

$$\varepsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.047T^2) \times 10^{-6} \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana:

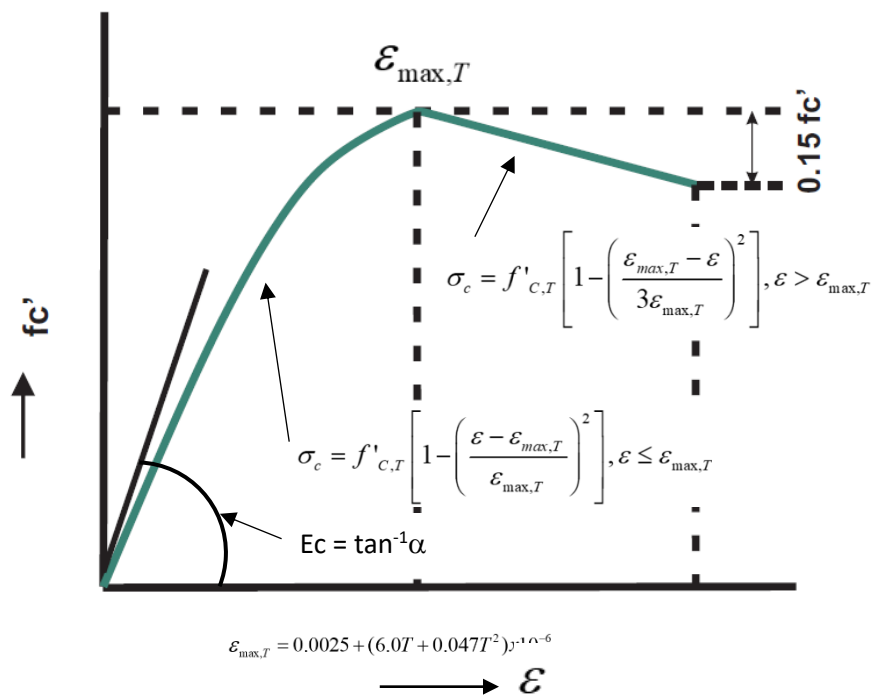
σ_c = Tegangan beton pada suhu-T (°C)

$f'_{c,T}$ = Mutu mutu beton pada suhu-T (°C)

ε = Nilai regangan beton

ε_{max} = Nilai regangan maksimum beton

Grafik hubungan antara tegangan dan regangan sesuai dengan persamaan 2.3 dan 2.4 maka dapat ditampilkan pada Gambar 2.6 berikut ini.



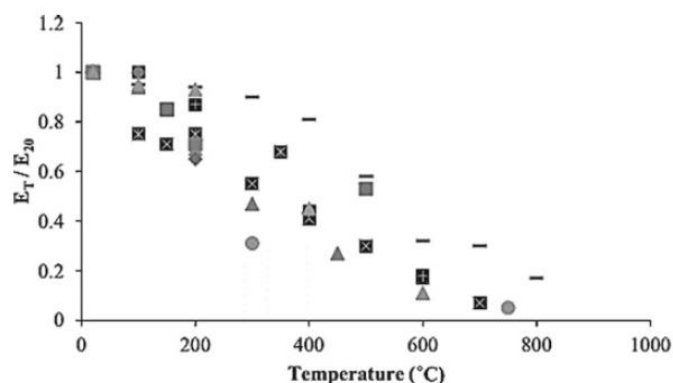
Gambar 2. 6 Kurva Tegangan-Regangan Beton pada Suhu Tinggi
Sumber : Hasil olahan sendiri

2.1.5 Modulus Elastisitas Beton

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 $0,45f_c'$. Modulus elastisitas untuk beton sensitif terhadap modulus elastisitas agregat dan proporsi campuran beton (Pauw, 1960). Nilai E_c pada beton normal dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut

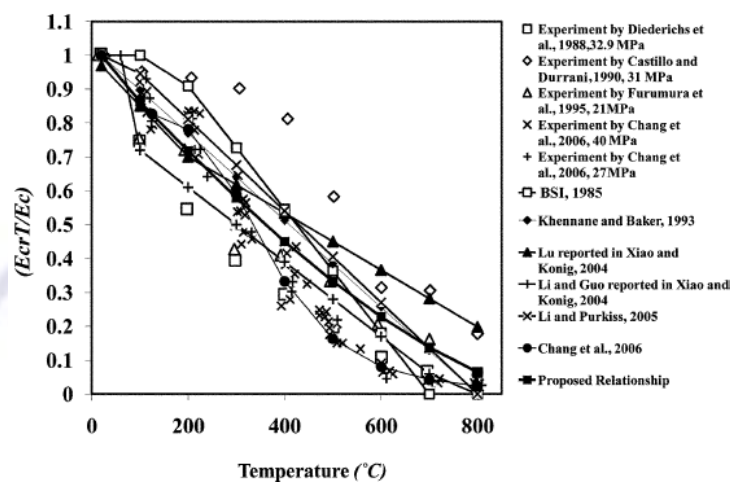
$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (2.6)$$

Modulus elastisitas beton akibat pengaruh suhu tinggi pernah dijelaskan oleh Rao et al., 2020 dimana nilai modulus elastisitas beton menurun seiring dengan peningkatan suhu sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 . Paparan beton terhadap suhu tinggi menyebabkan material semen terhidrasi terurai dan ikatan-ikatan pada tingkat mikro menjadi rusak sehingga mengurangi modulus elastisitas. Pada suhu 400°C modulus elastisitas beton mengalami penurunan akibat penyusutan dan retak mikro yang disebabkan kehilangan kelembapan. Proses degradasi ikatan antara material pasta semen dan agregat akibat perubahan suhu terjadi pada suhu 750°C .



Gambar 2. 7 Grafik Hubungan Modulus Elastisitas Beton pada Suhu Tinggi
Rao et al., 2020

Modulus elastisitas beton pada dasarnya dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor yang sama pada kuat tekan beton (Malhotra, 1983). Dalam penentuan modulus elastisitas beton pada suhu tinggi dalam penelitian ini dirangkum dalam Tabel 2.1. Evaluasi yang dilakukan (Farhad Aslani & Bastami, 2018) tentang nilai modulus elastisitas beton pada suhu tinggi dilakukan menggunakan analisis regresi yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Analisis ini mempertimbangkan perubahan nilai eksperimental pada beton normal pada berbagai suhu tinggi.



Gambar 2. 8 Grafik Hubungan Modulus Elastisitas Beton Normal pada Variasi Suhu Tinggi
Farhad Aslani & Bastami, 2018

Tabel 2. 1 Persamaan Hubungan Modulus Elastisitas Beton pada Variasi Suhu Tinggi

Referensi	Persamaan Hubungan Modulus Elastisitas Beton pada Variasi Suhu
BSI (1985)	$E_{crT} = \left(700 - \frac{T}{550}\right) E_c \leq E_c \dots\dots\dots(2.7)$
Schneider (1986)	Beton normal (<i>Normalweight concrete</i>):
	$E_{crT} = (-0.001552T + 1.03104)g E_c \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C} \dots\dots\dots(2.8)$
	$E_{crT} = (-0.00025T + 0.25)g E_c \quad 600^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C} \dots\dots\dots(2.9)$
	Beton ringan (<i>Lightweight concrete</i>) :
	$E_{crT} = (-0.00102T + 1.0204)g E_c \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C} \dots\dots\dots(2.10)$
	dengan
	$g = 1 + \frac{f_{ci}}{f'_c} \frac{T-20}{100} ; \frac{f_{ci}}{f'_c} \leq 3.0 \dots\dots\dots(2.11)$

Keterangan:

E_c = Modulus elastisitas (N/mm^2)

E_{crT} = Modulus elastisitas pada Suhu-T (N/mm^2)

g = Faktor koreksi

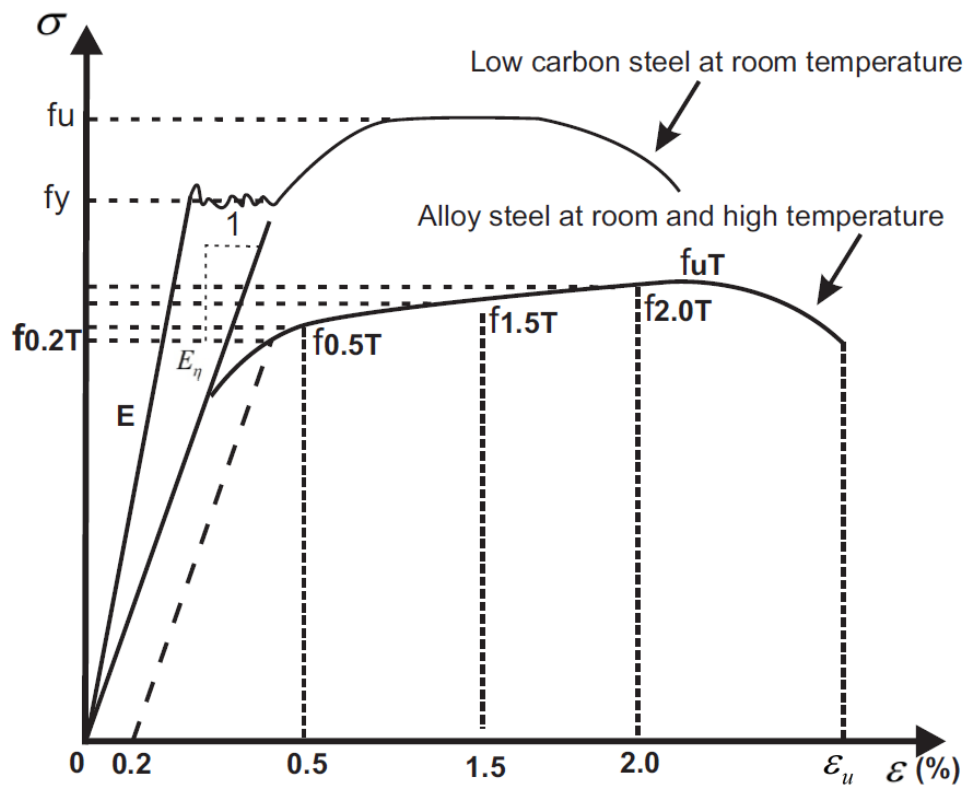
2.1.6 Tegangan Leleh Baja

Pada umumnya baja memiliki karakter kuat leleh (*yield strength*) dan modulus elastisitas. Baja karbon rendah (*mild steel*) pembentukan *cottrell atmosphere* terjadi dengan mudah, sehingga baja jenis ini pada suhu ruang menunjukkan leleh yang jelas dan terdefinisi dengan baik saat dilakukan pengujian tarik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Definisi kuat leleh baja pada suhu tinggi dapat bervariasi antar standar desain yang berlaku di berbagai negara karena tidak ada titik leleh yang terdefinisi secara jelas pada baja (Wang et al., 2013).

European Convention for Constructional Steelwork (ECCS, 2001) menyatakan bahwa kuat leleh pada suhu ruang ditentukan pada tingkat regangan sebesar 0,2% sedangkan suhu diatas 400°C, kuat leleh diasumsikan pada tingkat regangan nominal sebesar 0,5%. Untuk rentang suhu 25°C sampai dengan 400°C, nilai kuat leleh diasumsikan berdasarkan interpolasi antara tingkat regangan 0,2% dan regangan nominal 0,5%.

Standar BS5950 (BSI, 1990) menentukan bahwa kuat leleh pada suhu tinggi dapat diambil pada tingkat regangan nominal sebesar 0,5%, 1,5% atau 2% tergantung pada jenis elemen struktur yang dianalisis. Eurocode 3 (EC3) (CEN, 2005b) dan Eurocode 4 (EC4) (CEN, 2006), kuat leleh pada suhu tinggi ditetapkan berdasarkan tingkat regangan 0,2%.

Kirby dan Preston (1988) merekomendasikan penggunaan tingkat regangan nominal sebesar 1% dalam mengevaluasi kuat leleh baja pada suhu tinggi. Di sisi lain, AISC (2005) mengadopsi nilai-nilai sifat mekanik baja pada suhu tinggi berdasarkan *ECCS Model Code on Fire Engineering* (2001).



Gambar 2. 9 Kurva Tegangan-Regangan Baja
Wang et al., 2013

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.

$$\frac{E(T)}{E(30)} = 1.0 + \left\{ \frac{T}{2000 \left[\ln \left(\frac{T}{1100} \right) \right] \right\} \quad \text{untuk } 0^\circ\text{C} < T < 600^\circ\text{C} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\frac{E(T)}{E(30)} = \frac{690 \left(1 - \frac{T}{1100} \right)}{T - 53.5} \text{ untuk } 600^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C} \dots \dots \dots (2.13)$$

dimana,

$E(T)$ = Modulus elastisitas baja pada suhu-T

$E(30)$ = Modulus elastisitas pada suhu 30°C (dianggap 210 MPa)

Sifat mekanis tulangan baja diatur dalam peraturan SNI 2052-2017 sesuai tabel dibawah ini.

Kelas baja tulangan	Uji tarik			Uji lengkung		Rasio TS/YS (Hasil Uji)
	Kuat luluh/leleh (YS)	kuat tarik (TS)	Regangan dalam 200 mm, Min.	sudut lengkung	diameter pelengkung	
	MPa	MPa	%		mm	
BjTP 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 ($d \leq 10$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	-
			12 ($d \geq 12$ mm)	180°	5d ($d \geq 19$ mm)	
BjTS 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 ($d \leq 10$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25
			12 ($d \geq 13$ mm)	180°	5d ($d \geq 19$ mm)	
BjTS 420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	9 ($d \leq 19$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25
			8 ($22 \leq d \leq 25$ mm)	180°	5d ($19 \leq d \leq 25$ mm)	
			7 ($d \geq 29$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	
BjTS 420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	14 ($d \leq 19$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25
			12 ($22 \leq d \leq 36$ mm)	180°	5d ($19 \leq d \leq 25$ mm)	
			10 ($d > 36$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	
BjTS 520	Min. 520 Maks. 645	Min. 650	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,25
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	
BjTS 550	Min. 550 Maks. 675	Min. 687,5	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,25
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	
BjTS 700	Min. 700 Maks. 825	Min. 805	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,15
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	
Keterangan: 1. d adalah diameter nominal baja tulangan beton 2. hasil uji lengkung tidak boleh menunjukkan retak pada sisi luar lengkungan benda uji lengkung						

Tabel 2. 2 Sifat Mekanis Tulangan Baja Tulangan Beton
SNI 2052-2017

2.1.7 Hubungan Variasi Suhu dengan Waktu dalam Penelitian Struktur Balok Beton Bertulang

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 dimana perilaku balok beton bertulang akibat variasi suhu tinggi dipresentasikan hubungan temperatur dengan elemen struktur menggunakan persamaan 2.13.

$$T(t) = T_0 + 345 \log_{10}(1 + 8t) \dots\dots\dots(2.14)$$

atau

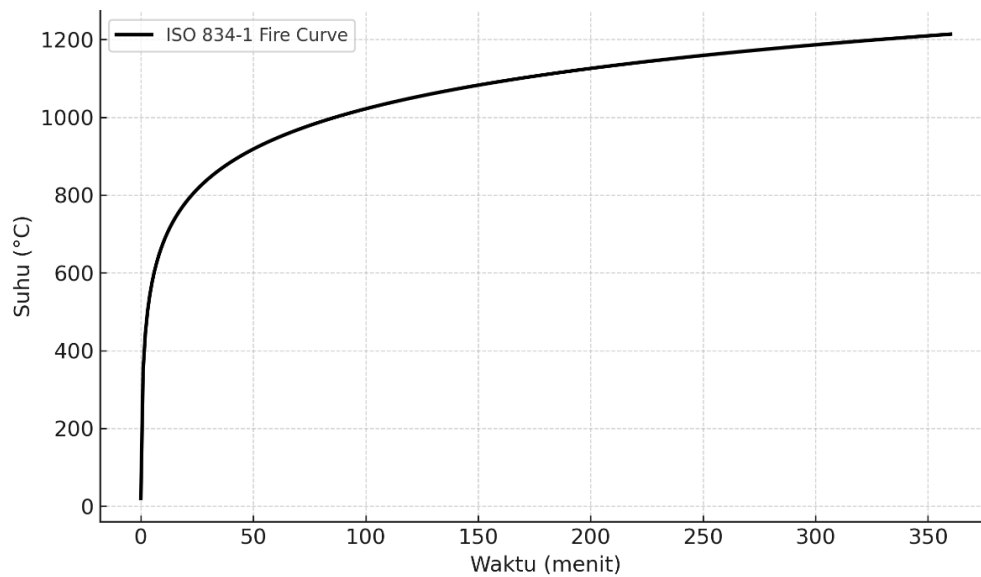
$$t(T) = \frac{10^{\frac{T-T_0}{345}} - 1}{8} \dots\dots\dots(2.15)$$

dimana,

T_0 = suhu awal (suhu ruang menggunakan 20°C)

t = waktu (menit)

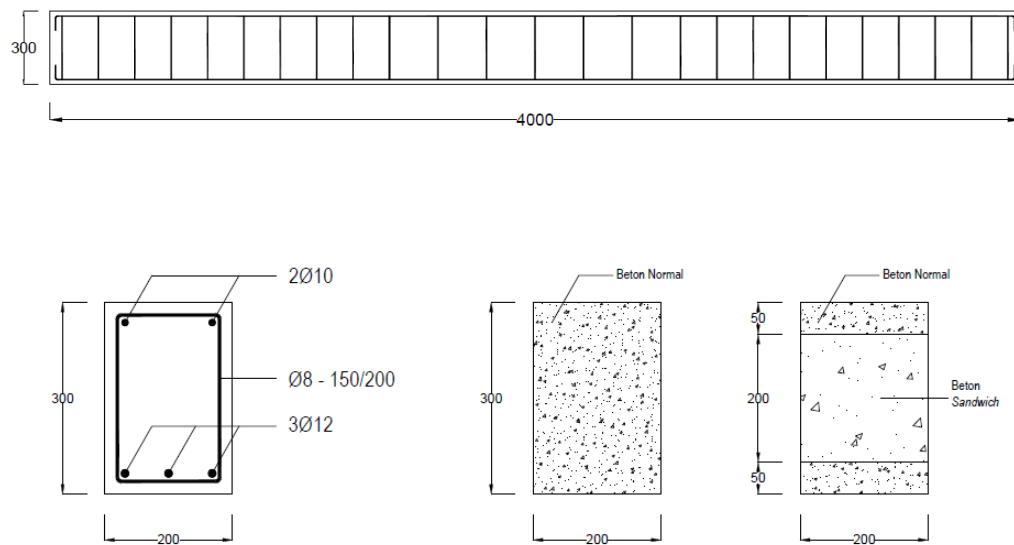
Standart ini digunakan secara global dalam pengujian resistensi api termasuk dalam Eurocode 1 (EN-1991-1-2), konsep kesetaraan paparan waktu (*time equivalence*) mendekati persamaan yang sama dalam literasi rekayasa kebakaran untuk memvalidasi hasil antara paparan uji laboratorium dan simulasi kebakaran yang realistis. Kurva standar ISO-834-1 ini digunakan untuk menentukan riwayat beban termal dalam studi perilaku struktur ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Kurva Standart ISO 834-1 (Suhu vs Waktu)
(ISO 834-1)

2.2 Studi Terdahulu

Penelitian perihwal perilaku lentur balok beton bertulang terhadap pengaruh temperatur tinggi telah dilakukan oleh (Murtiadi et al., 2020) dengan balok beton bertulang berukuran 200x300x400 mm berupa dua spesimen yaitu balok beton normal (N) dan balok beton *Sandwich* (SW) dengan tebal selimut beton 50 mm dan 200 mm. Kuat tekan (f_c') permukaan beton sebesar 25 MPa dan kuat tekan pada sisi inti beton sebesar 15 MPa. Tulangan tarik menggunakan diameter 3Ø12 mm dan tulangan tarik menggunakan diameter 2Ø10, masing-masing diameter tulangan memiliki kekuatan leleh (f_y) sebesar 300 MPa.



Gambar 2. 11. Sketsa Spesimen Balok Beton Bertulang

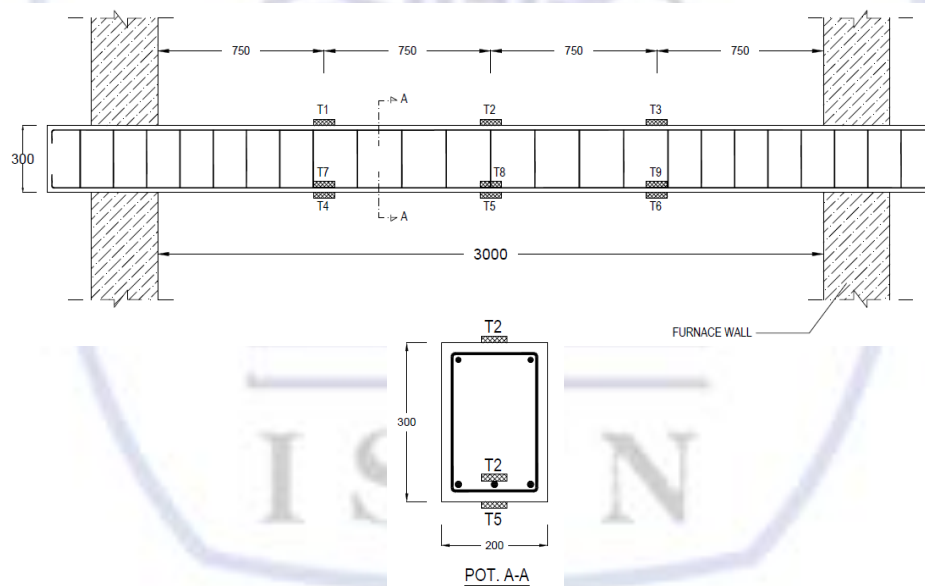
Murtiadi et al., 2020

Metode pengujian balok beton menggunakan tungku pembakaran dan ditempatkan sejumlah termokopel (Gambar 2.11). Termokopel adalah sensor suhu yang bekerja berdasarkan efek *seebeck*, yaitu timbulnya tegangan listrik pada sambungan dua logam berbeda akibat adanya perbedaan suhu antara kedua ujung sambungan. Ujung yang ditempatkan pada objek pengukuran disebut *hot junction*, sedangkan ujung lainnya disebut *cold junction*. Tegangan yang dihasilkan sebanding dengan perbedaan suhu antara kedua *junction* tersebut dan dapat dikonversi menjadi nilai suhu melalui sistem kalibrasi atau perangkat pembaca (Omega Engineering, 2019).

Pada pengujian eksperimental di laboratorium, termokopel dipasang berada di bagian bawah dan atas permukaan balok beton serta pada tulangan tarik yang tertanam di dalam balok beton. Notasi termokopel yang terpasang menggunakan notasi T1, T2, T3, sampai dengan T9 yang ditunjukkan Gambar 2.12.



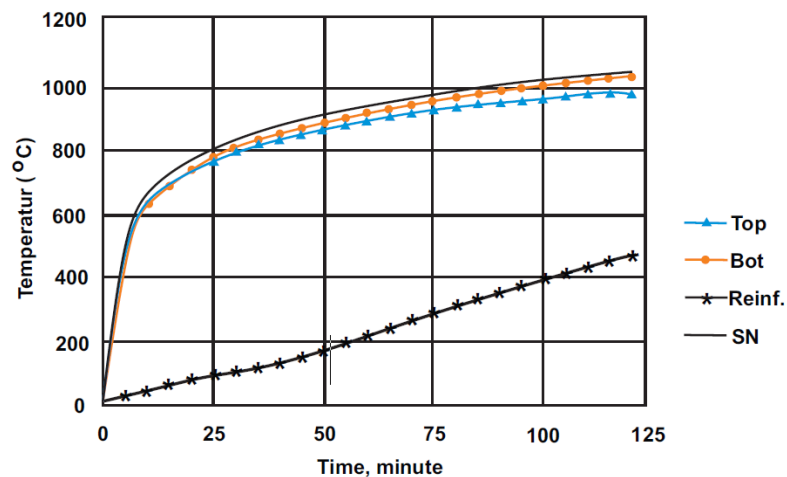
Gambar 2. 12. Tungku Pembakaran di Laboratorium
Murtiadi et al., 2020



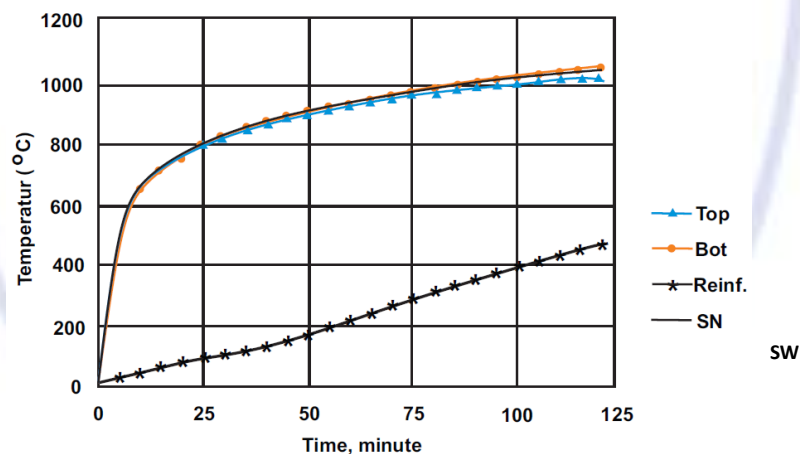
Gambar 2. 13. Detail Pemasangan Termokopel pada Balok Beton
Murtiadi et al., 2020

Hasil pengujian perilaku struktur balok beton normal (N) dan balok beton *Sandwich* (SW) terhadap temperatur yang disajikan Gambar 2.13 dan 2.14 bahwa temperatur pada permukaan balok beton selama waktu pembakaran untuk kedua balok tidak ada perbedaan yang signifikan, pembakaran dengan waktu 5 menit

pertama dapat diketahui temperatur permukaan balok beton telah diatas 500°C . Temperatur tulangan meningkat seiring dengan waktu pembakaran, temperatur tulangan maksimum tercapai pada waktu 120 menit pada balok beton normal sebesar 474°C sedangkan balok beton *Sandwich* sebesar 447°C .



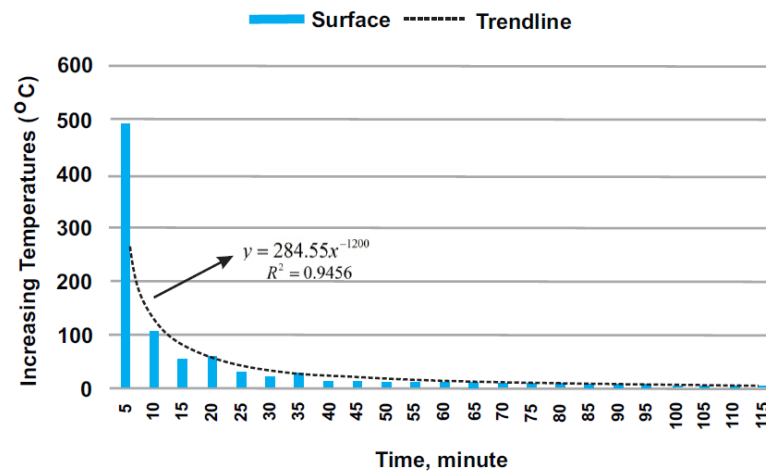
Gambar 2. 14. Kurva Temperatur-Waktu Balok Beton Normal Saat Terjadi Pembakaran
(Murtiadi et al., 2020)



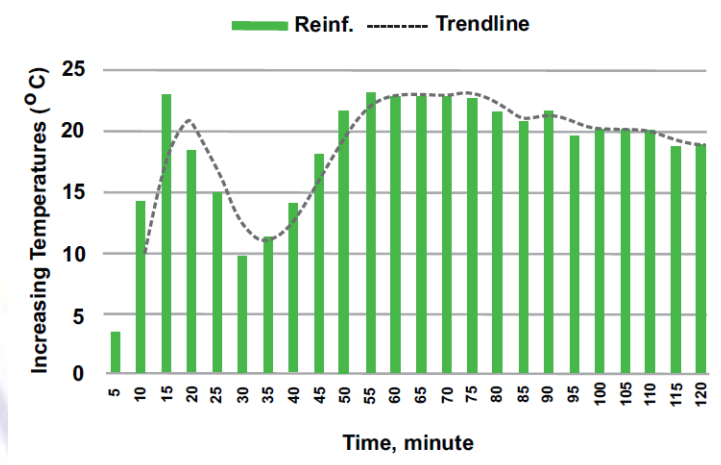
Gambar 2. 15. Kurva Temperatur-Waktu Balok Beton *Sandwich* Saat Terjadi Pembakaran

(Murtiadi et al., 2020)

Temperatur permukaan balok tidak meningkat ekstrem seperti yang terjadi pada waktu 5 menit pertama dengan temperatur 500°C , sedangkan temperatur 100°C menurun drastis menjadi 5°C pada waktu diatas 5 menit (Gambar 2.15). Perubahan temperatur yang drastis dipengaruhi oleh peningkatan suhu tulangan yang tertanam didalam balok dengan nilai yang fluktuatif (Gambar 2.16).

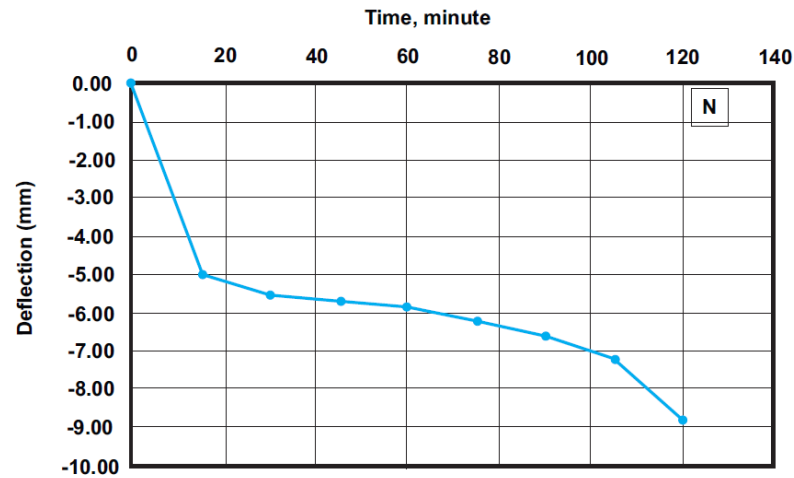


Gambar 2. 16. Kurva Temperatur Pada Permukaan Balok
(Murtiadi et al., 2020)

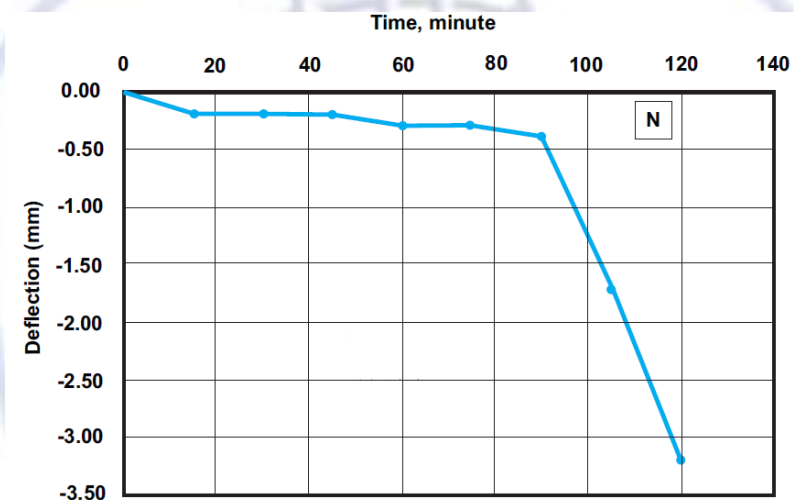


Gambar 2. 17 Kurva Temperatur Pada Tulangan Beton
(Murtiadi et al., 2020)

Hubungan waktu dengan *deflection* balok beton normal dan balok beton *Sandwich* ditunjukkan pada Gambar 2.17 dan 2.18, benda uji diberi beban tetap sebesar 13,790 KN dengan cara kerja dua beban titik bekerja pada bentang 1/3 balok atau dengan total beban pada kedua titik tersebut yaitu 27,580 KN, pengamatan ini berfokus pada nilai lendutan disaat pembakaran berlangsung. Berdasarkan kedua grafik tersebut bahwa balok beton *Sandwich* lebih kaku dibandingkan balok beton normal disaat pembakaran.



Gambar 2. 18. Kurva *Deflection* dan Waktu Pembakaran Beton Normal
(Murtiadi et al., 2020)



Gambar 2. 19. Kurva *Deflection* dan Waktu Pembakaran Beton *Sandwich*
Sumber: (Murtiadi et al., 2020)

Berdasarkan syarat stabilitas menurut SNI 1741-2008 menggunakan persamaan 2.11 dapat disimpulkan kedua jenis balok beton termasuk dalam kondisi stabil dikarenakan nilai batas lendutan sebesar 92,21 mm belum terlampaui. Batas satabilitas menurut persamaan 2.13 tidak diterapkan dikarenakan lendutan yang terjadi pada kedua balok masih kecil dari $L/30$ atas setara 100 mm.

$$D = \frac{L^2}{4000d} \dots\dots\dots(2.16)$$

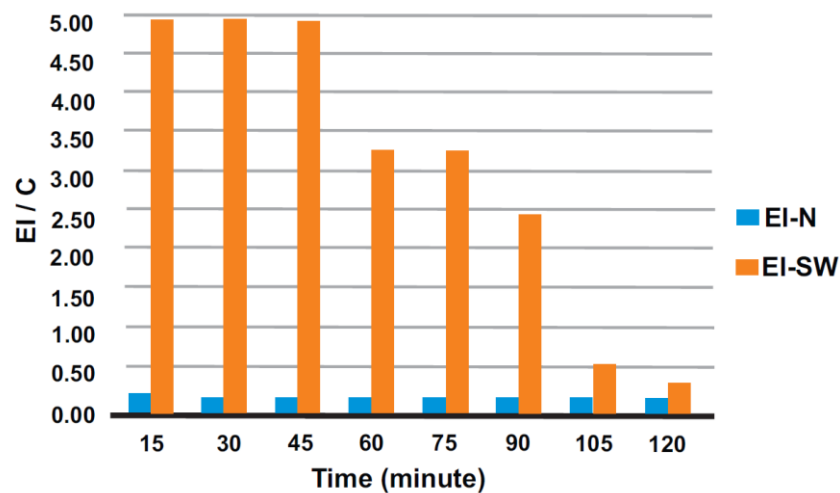
$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} \dots\dots\dots(2.17)$$

dengan

L = bentang bersih benda uji (mm)

d = jarak dari serat tekan terluar ke titik berat tulangan tarik terluar (mm),
lihat Gambar B.3 pada SNI 1741-2008

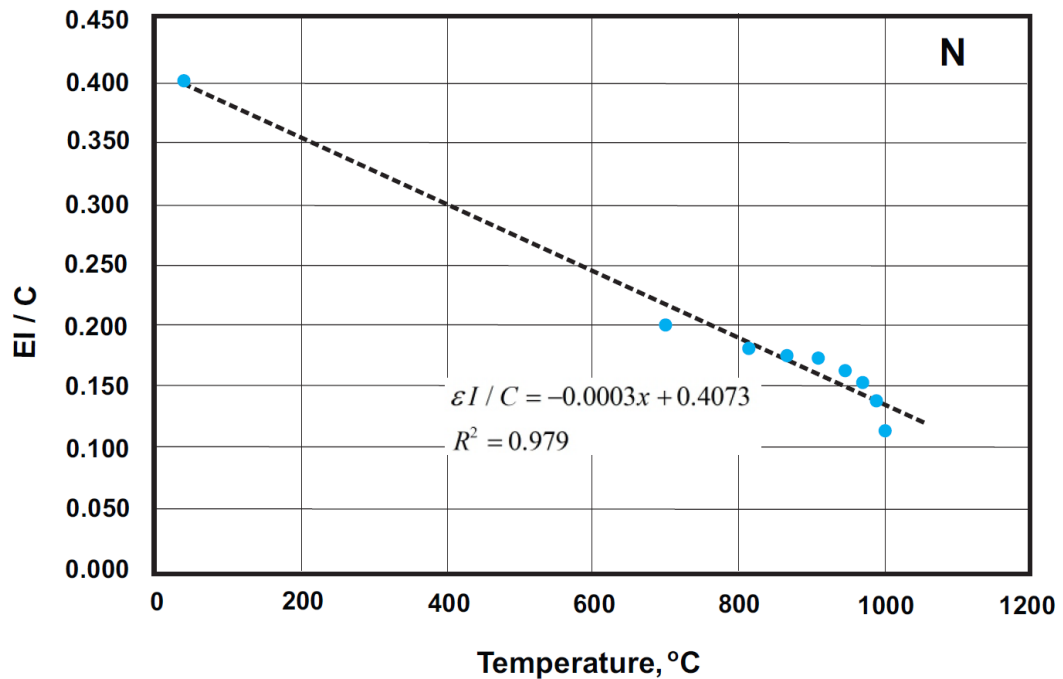
Nilai kekakuan lentur antara balok beton normal dan balok beton *Sandwich* yaitu balok beton *Sandwich* memiliki nilai kekakuan yang lebih kaku daripada balok beton normal, hal ini ditunjukkan pada grafik Gambar 2.19 dimana perbedaan signifikan antara beton normal dan beton *Sandwich*.



Gambar 2. 20. Kurva Kekakuan Antara Beton Normal dan Beton *Sandwich*
(Murtiadi et al., 2020)

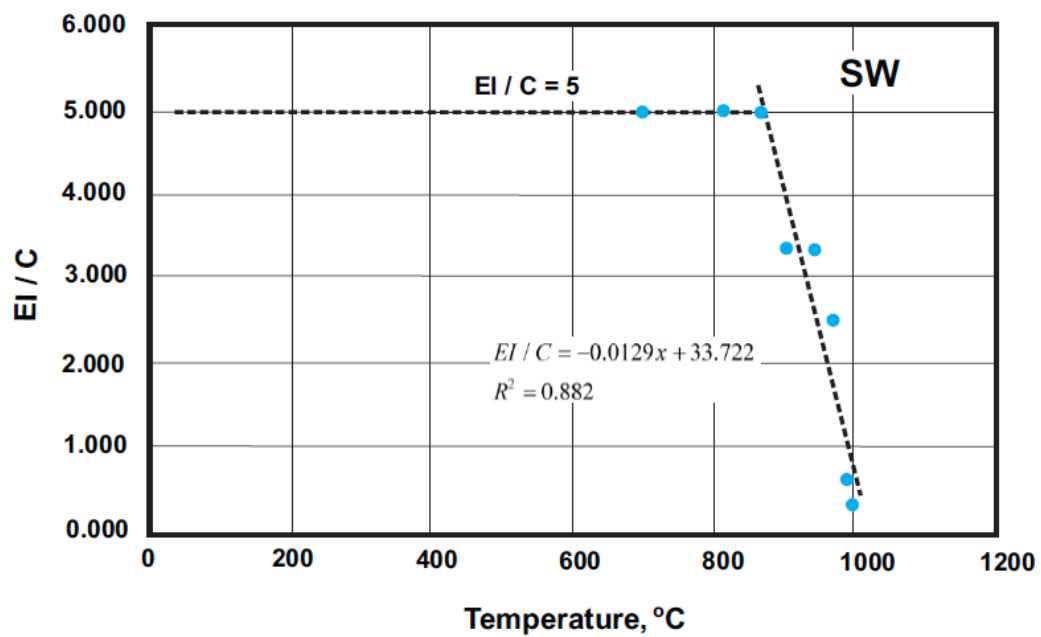
Nilai kekakuan lentur balok beton normal menurun signifikan dari temperatur ruangan 39,4°C sampai 690°C dengan waktu 0 menit sampai dengan 15 menit dan temperatur menurun secara bertahap sampai dengan temperatur 1000°C pada waktu pembakaran 120 menit. Untuk menguji validasi data maka diperlukan perhitungan koefisien determinasi R^2 yang ditunjukkan pada grafik regresi

Gambar 2.20 dengan nilai $R^2 = 0,979$ sehingga kekuatan lentur memiliki hubungan yang kuat dengan temperatur.



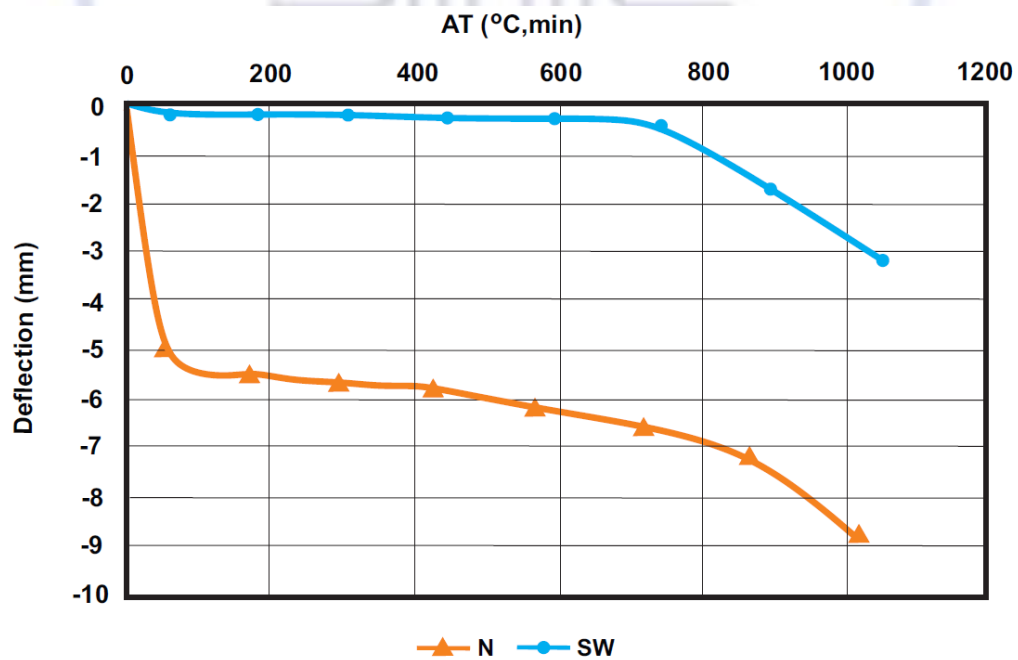
Gambar 2. 21 Kurva Kekakuan Lentur Beton Normal Terhadap Temperatur
(Murtiadi et al., 2020)

Kekakuan balok beton *Sandwich* relatif lebih stabil selama 45 menit pertama disaat pembakaran, kemudian nilai kekakuan menurun seperti yang ditunjukkan pada grafik Gambar 2.21. Nilai regresi linier R^2 yaitu 0,882 menyimpulkan bahwa kekakuan lentur balok beton *Sandwich* dipengaruhi oleh suhu dan lama pembakaran.



Gambar 2. 22. Kurva Kekakuan Lentur Beton *Sandwich* Terhadap Temperatur (Murtiadi et al., 2020)

Deflection terhadap temperatur akumulatif pada kedua jenis balok memiliki perilaku yang sama tetapi perbedaan antara kedua jenis tersebut terletak pada nilai lendutan selama pembakaran dimana balok beton *Sandwich* lebih kaku dari pada balok beton normal.

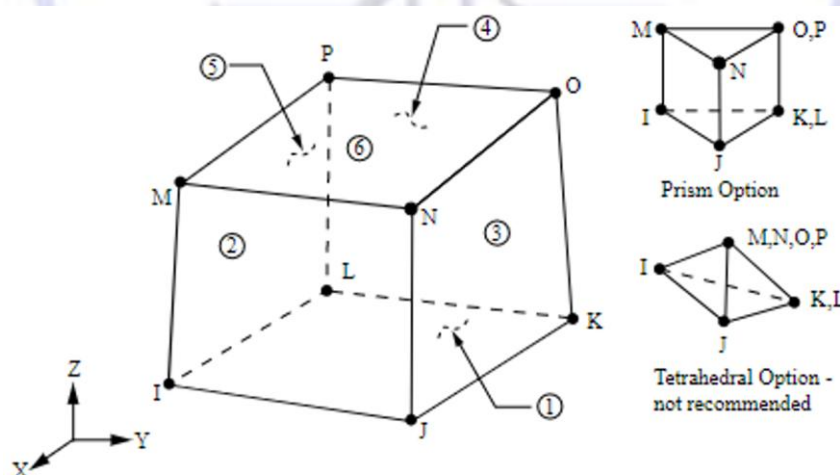


Gambar 2. 23. *Deflection* Terhadap Temperatur Akumulatif (Murtiadi et al., 2020)

2.3 Model Elemen *Solid Hexahedral 8-Node Metode Elemen Hingga*

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) merupakan salah satu pendekatan numerik yang paling luas digunakan dalam analisis struktur, khususnya untuk membuat model respons material terhadap beban mekanis, termal, dan lingkungan lainnya. Dalam aplikasi praktis FEM, salah satu aspek fundamental yang sangat memengaruhi akurasi hasil analisis adalah pemilihan jenis elemen yang digunakan dalam proses diskretisasi domain. Dalam konteks Model tiga dimensi (3D), elemen *solid hexahedral 8-node* merupakan pilihan utama yang direkomendasikan karena kemampuannya dalam menghasilkan solusi yang stabil dan akurat, serta efisiensi dalam konvergensi numerik dibandingkan dengan elemen tetrahedral (Ansys Inc, 2023).

Gambar 2.23 memperlihatkan sebuah representasi geometri balok 3D yang digunakan sebagai domain analisis. Geometri ini terdiri dari delapan titik simpul (*node*), yaitu: I, J, K, L, M, N, O, dan P. Bentuk dasar dari elemen ini adalah *hexahedral* atau biasa dikenal sebagai *brick element*. Masing-masing permukaan elemen diberi penomoran satu sampai dengan enam yang lazim digunakan dalam perangkat lunak ANSYS untuk mendefinisikan batas (*boundary*) dan aplikasi beban.



Gambar 2. 24 Struktural Solid Geometry
Mavlonov et al., 2023

Struktural *solid geometry* menunjukkan dua pendekatan diskretisasi geometri antara lain:

1. *Prims option* yang menggunakan satu elemen hexahedral dengan delapan simpul membentuk satu volume tertutup yang utuh.
2. *Tetrahedral option* membagi domain ke dalam beberapa elemen tetrahedral atau empat simpul namun pendekatan ini tidak direkomendasikan untuk kasus struktur karena dapat menimbulkan masalah numerik seperti *volumetric locking* dan membutuhkan jumlah elemen yang lebih banyak untuk mencapai konvergensi hasil elemen hexahedral 8-node atau dikenal juga sebagai *brick element* yaitu elemen tiga dimensi yang memiliki delapan titik simpul (*node*) dan enam bidang permukaan. Setiap node memiliki tiga derajat kebebasan atau *Degree of Freedom* (DOF) yaitu perpindahan dalam arah X, Y dan Z sehingga elemen hexahedral memiliki total 24-DOF dengan rincian 8 node x 3 DOF/node.

2.3.1 Fungsi Bentuk (*Shape Function*)

Fungsi bentuk (*shape function*) $N_i(\xi, \eta, \zeta)$ untuk elemen hexahedral 8-node dalam koordinat natural ($\xi, \eta, \zeta \in [-1, 1]$) didefinisikan sebagai:

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \dots\dots\dots(2.18)$$

ξ, η, ζ = Koordinat natural (koordinat lokal elemen)

ξ_i, η_i, ζ_i = Tanda lokal masing-masing simpul, bernilai ± 1 tergantung posisi node ke-i

Fungsi ini digunakan untuk menginterpolasi nilai perpindahan didalam elemen dari nilai beberapa nilai *node*.

2.3.2 Matriks Kekakuan Elemen

Matriks kekakuan elemen hexahedral 8-node dirumuskan sebagai berikut.

$$K^{(e)} = \int_{V^{(e)}} B^T D B dV \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

dimana:

$K^{(e)}$ = Matriks kekakuan elemen

B = Matriks regangan-perpindahan (*strain-displacement matriks*)

D = Matriks konstanta material (contoh untuk elastisitas linier isotropik 3D)

$V^{(e)}$ = Volume elemen

2.3.3 Matriks Konstitutif Material

Material elastisitas linier isotropik, matriks konstitutif (D) dalam kondisi tegangan tiga dimensi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

dimana:

E = Modulus elastisitas material

ν = *Possion ratio*

2.4 Implementasi dalam Perangkat Lunak ANSYS

Perangkat lunak *Finite Element Method (FEM)* ANSYS menurut (Nakasone et al.,2006) merupakan program Model elemen hingga untuk memecahkan numerik

berbagai permasalahan mekanis seperti analisis statis dan dinamis, analisis struktur linier maupun non-linier, perpindahan panas, aliran fluida dan elektromagnetik.

Dalam perangkat lunak ANSYS, elemen solid *hexahedral 8-node* direpresentasikan dengan tipe elemen seperti SOLID65 atau SOLID185. Elemen ini mampu menangani perilaku linear maupun nonlinear, serta cocok untuk analisis elastisitas, plastisitas, dan termal

Analisis FEM ANSYS dibagi beberapa tahapan antara lain:

1. *Preprocessing* yaitu mendefinisikan langkah-langkah utama dalam pemrosesan yang terdiri dari:
 - a. *Define keypoints, lines, areas, volume.*
 - b. *Define element type dan material, geometric properties.*
 - c. *Define mesh lines, areas, volume.*
2. *Solution*, langkah ini berupa menetapkan nilai beban berupa beban titik, translasi dan rotasi.
3. *Postprocessing* merupakan pemrosesan lebih lanjut dan mendapatkan hasil. Langkah ini dapat melihat daftar perpindahan nodal (*list of nodal displacement*), elemen gaya dan momen, diagram kontur tegangan serta *temperature maps*.

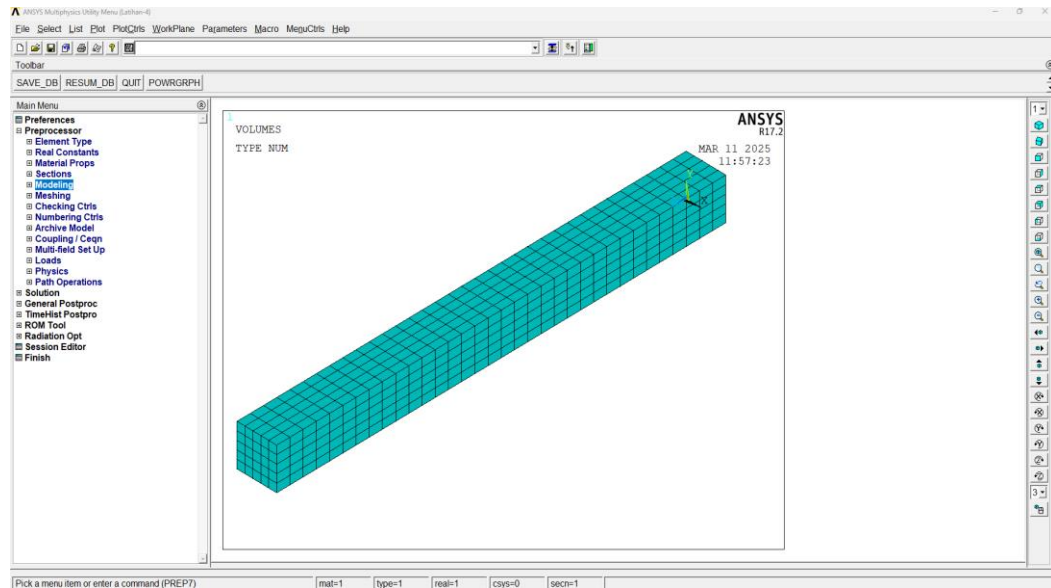
Terdapat dua metode menggunakan perangkat lunak FEM ANSYS yang dijelaskan oleh Nakasone et al., 2006 yaitu menggunakan *Graphical User Interface* (GUI) dan menggunakan *command files*. Metode GUI dapat digunakan menggunakan sistem operasi yang populer yaitu Windows sedangkan metode *command files* memiliki tingkat kurva penggunaan bagi user yang lebih tajam tetapi keuntungan metode ini adalah seluruh analisis dapat dijelaskan dalam berkas teks (*text file*). FEM ANSYS memiliki dua tampilan muka yaitu *main window* dan *output window*. *Main window* terdiri dari lima bagian yang ditunjukkan pada Gambar. 2.24 antara lain:

1. *Utility menu* ditunjukkan huruf-A berisi fungsi-fungsi yang tersedia di seluruh versi ANSYS seperti *file controls, selections, graphic controls* dan *parameters*.
2. *Input line* ditunjukkan huruf-B menampilkan pesan perintah program dan untuk mengetik perintah secara langsung.

3. *Toolbar* ditunjukkan huruf-C berisi tombol tekan yang menjalankan perintah ANSYS.
4. *Main menu* ditunjukkan huruf-D berisi fungsi-fungsi utama ANSYS yang disusun berdasarkan *preprocessor*, *solution*, *general postprocessor* dan *design optimizer*. Melalui menu ini semua perintah Model dikeluarkan.
5. *Graphic windows* ditunjukkan huruf-E merupakan pemilihan dan menampilkan grafik, melalui *graphic window* ini maka Model dapat terlihat dimulai dari proses tahap konstruksi dan hasil analisis Model. Contoh Model pada *graphic windows* huruf-E ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2. 25. Tampilan *Main Window* ANSYS
Nakasone et al., 2006



Gambar 2. 26. Model Balok Pada Tampilan *Graphic Window* Huruf-E (telah diolah kembali)

Gambar. 2.26 menjelaskan tampilan *text output* dari program seperti *listing of data*. Tampilan ini diposisikan berada di belakang *graphic window* dan dapat dirubah perletakkan tampilan sesuai kebutuhan.



Gambar 2. 27. Tampilan *Text Output Window* ANSYS
Nakasone et al., 2006

2.5 Interpretasi Koefisien Determinasi (R^2) pada Fungsi Logaritma Natural

Koefisien determinasi (R^2) merupakan indikator statistik yang digunakan untuk mengukur tingkat kecocokan (*goodness of fit*) antara model regresi dengan data hasil pengujian. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, di mana semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa model regresi mampu menjelaskan sebagian besar variasi data yang diamati (Montgomery et al., 2012). Secara umum, interpretasi kekuatan nilai R^2 dapat dibedakan menjadi beberapa kategori (Gujarati & Porter, 2009), yaitu:

- $R^2 < 0,3$ dianggap sangat lemah
- $0,3 \leq R^2 < 0,5$ moderat
- $0,5 \leq R^2 < 0,7$ cukup kuat
- $0,7 \leq R^2 < 0,9$ kuat
- $R^2 \geq 0,9$ sangat kuat

Secara teoritis, bentuk kurva logaritma natural menggambarkan fenomena degradasi material yang umumnya tidak bersifat linier. Pada beton, penurunan kekuatan cenderung tajam pada kenaikan suhu rendah hingga menengah (100–400 °C), akibat penguapan air bebas, dehidrasi gel C-S-H, serta hilangnya ikatan kimia pada matriks semen (Neville, 2011). Pada suhu lebih tinggi (>500 °C), kerusakan mikrostruktur sudah dominan, sehingga penurunan kekuatan berlangsung lebih stabil (Kodur & Phan, 2007). Oleh karena itu, pemodelan logaritma natural dapat digunakan sebagai pendekatan matematis yang sesuai untuk menganalisis hubungan antara tegangan dan suhu pada beton.

Koefisien determinasi dilambangkan R^2 yaitu ukuran statistik yang menyatakan proporsi varian variabel terikat (Y) dan dapat dijelaskan menggunakan model regresi yang digunakan secara matematis. Persamaan perhitungan R^2 dijelaskan sebagai berikut ini.

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \text{ (total sum of squares)(2.21)}$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \text{ (regression sum of squares)(2.22)}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \text{ (error sum of squares) } \dots\dots\dots(2.23)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \dots\dots\dots(2.24)$$

dimana,

y_i = nilai observasi

$\hat{y}$ = nilai yang diprediksi oleh model

$\bar{y}$ = rata-rata observasi

R^2 = berkisar antara nilai 0 sampai dengan 1, semakin mendekati nilai 1 maka semakin besar proporsi varian Y yang dijelaskan oleh model.



BAB 3 METODE PENELITIAN

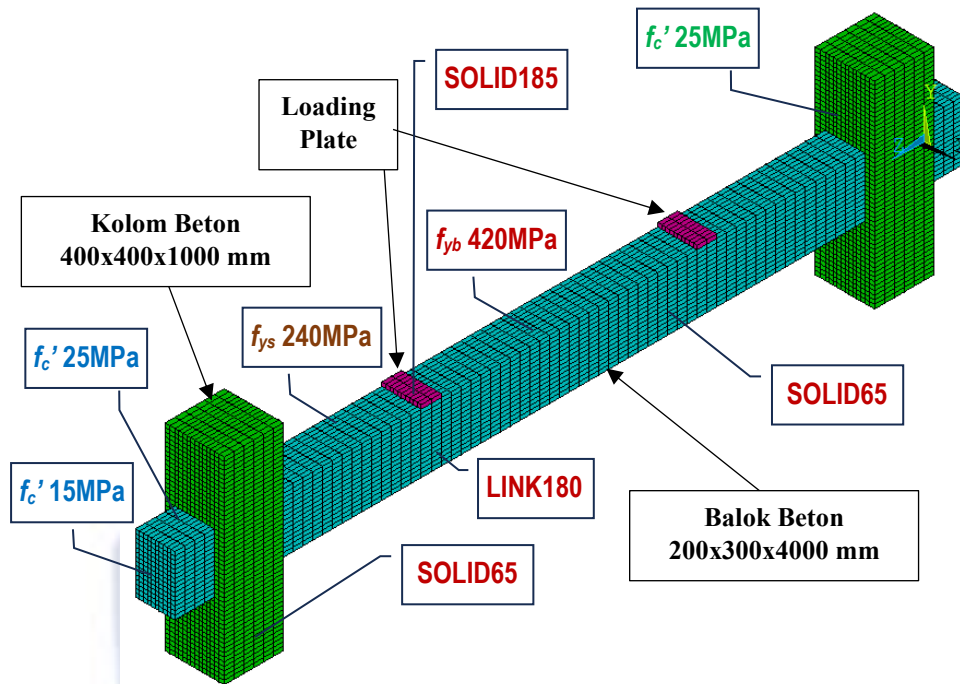
3.1 Pendekatan Sistem

Model balok beton bertulang dalam penelitian ini menggunakan analisis metode elemen hingga atau *Finite Element Method* (FEM) dengan perangkat lunak program ANSYS. Analisis Model menggunakan ANSYS dalam meneliti kuat lentur balok beton bertulang terhadap pengaruh suhu menggunakan *command files* dan *Graphical User Interface* (GUI) dalam bentuk Model tiga dimensi. Model ini disesuaikan dengan hasil penelitian terdahulu seperti dimensi, bentuk, bahan beton, mutu beton, jenis dan diameter tulangan baja sehingga hasil penelitian ini diharapkan sama yang dilakukan oleh peneliti pendahulu di laboratorium.

Data-data dari publikasi penelitian terdahulu berupa jurnal pengujian di laboratorium dikumpulkan sebagai referensi penelitian ini sehingga analisis validasi Model untuk mendapatkan nilai perbandingan efektivitas kekuatan dan pola keruntuhan balok beton bertulang akibat pengaruh variasi temperatur diambil dari salahsatu penelitian terdahulu kemudian dilakukan Model menggunakan perangkat lunak program ANSYS. Model ini dilakukan dengan menyamakan dari dimensi, properti material seperti mutu beton, jenis dan diameter tulangan serta beban yang bekerja pada spesimen yang diuji di laboratorium. Tahap selanjutnya yaitu melakukan analisis model validasi terhadap spesimen yang diuji di laboratorium. Model pada perangkat lunak ANSYS diperlukan Model kolom dengan tujuan sebagai pengganti struktur penjepit balok beton di laboratorium dan disimulasikan sama dengan kondisi di lapangan yaitu *strong column-weak beam*. Analisis penelitian selanjutnya dilanjutkan ke tahap pengembangan yaitu menggunakan Model beton ukuran 300x400x4000 mm dengan nilai properti material disamakan dengan Model saat melakukan validasi.

Simulasi Model balok beton bertulang menggunakan perangkat lunak ANSYS berdasarkan batasan masalah yang dibahas pada Bab I maka model material balok beton menggunakan elemen *type* SOLID65 sedangkan material tulangan baja menggunakan elemen *type* LINK180, untuk menahan beban yang bekerja pada balok beton sebelum dilakukan pembebanan diperlukan landasan atau

alas pada atas balok beton berupa plat baja yang sebagai *loading plate* yang dimodelkan sebagai elemen *type* SOLID185. Seluruh *input* Model *elemen type* menggunakan perangkat lunak ANSYS ditunjukkan pada Gambar 3.1.

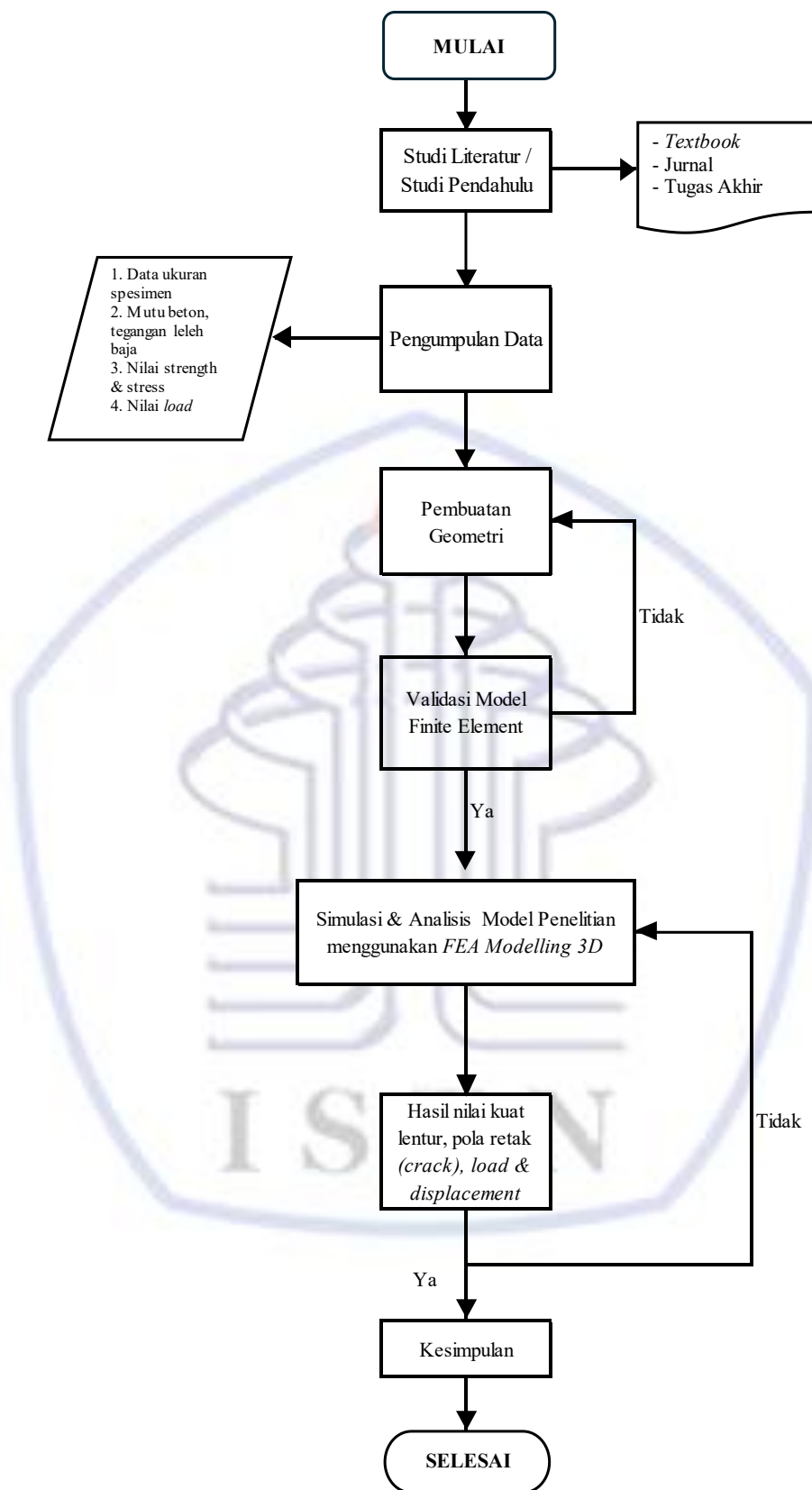


Gambar 3. 1 Penampang Model Balok 200x300x4000 mm

Nilai mutu beton normal yang digunakan yaitu 25 MPa sedangkan mutu beton 15 MPa digunakan pada beton *Sandwich*. Nilai tegangan leleh (f_y) baja tulangan utama yaitu 420 MPa dan tulangan sengkang menggunakan 240 MPa. Nilai tegangan dan regangan beton diperoleh dengan menghitung menggunakan referensi rumus peraturan NSC-ASC Manual 1992 sedangkan nilai modulus elastisitas menggunakan rumus BSI (1985) dan Schneider (1986).

3.2 Bagan Alur Penelitian

Tahapan-tahapan proses penelitian ini dapat digambarkan pada bagan alur Gambar 3.2 dibawah ini untuk mempermudah disaat melakukan perencanaan sampai dengan melakukan analisis.



Gambar 3. 2 Bagan Alur Penelitian

3.3 Jadwal Penelitian

Berdasarkan Sub Bab 3.2 perihal bagan alur penelitian maka diperlukan perencanaan jadwal dengan tujuan penelitian ini dapat diselesaikan pada target yang ditentukan dan jadwal penelitian ditunjukkan dalam Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3. 1. Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan																			
		Mar				Apr				Mei				Jun				Jul			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Penyusunan Proposal	■	■																		
2	Seminar Proposal						■														
3	Pemodelan Data			■	■	■	■														
4	Analisis Data					■	■	■	■	■	■	■	■								
5	Pembuatan Laporan													■	■	■	■	■	■	■	■
6	Seminar Tesis																		■	■	■
7	Penyempurnaan Tesis																		■	■	■
8	Sidang Tesis																			■	■
9	Jurnal																			■	■

Estimasi waktu penelitian dimulai dari bulan Maret tahun 2025 dan diharapkan penelitian ini dapat selesai pada bulan September 2025 dengan total waktu selama enam bulan. Setiap kegiatan pelaksanaan penelitian terdapat *milestone* atau pencapaian serta evaluasi penelitian, dengan adanya jadwal ini diharapkan penelitian dapat dilakukan dengan konsisten.

3.4 Tahapan Pelaksanaan Model

Model dan analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS pada penelitian ini terdapat beberapa hal antara lain:

1. Model direferensikan sebagai struktural dimana pada ANSYS terdapat menu *preferences* dan pilih *structural*.
2. Model beton, tulangan baja dan *loading plate* dibuat menggunakan menu *preprocessor* kemudian pilih *element type*, pilih *add/edit/delete* dan pilih *add* pada jendela *element type* setelah menu *add* terbuka maka bisa membuat data Model yang disesuaikan pada penelitian di laboratorium. *Element type* yang digunakan sebagai berikut:

- a. Type-1 merupakan Model balok beton 200x300x4000 mm dengan *element type* yaitu SOLID65
- b. Type-2 merupakan Model tulangan utama balok beton diameter 12 mm dengan *element type* yaitu LINK180
- c. Type-3 merupakan Model tulangan utama balok beton diameter 10 mm dengan *element type* yaitu LINK180
- d. Type-4 merupakan Model tulangan sengkang balok beton diameter 8 mm dengan *element type* yaitu LINK180
- e. Type-5 merupakan Model loading plate ukuran 100x200 mm tebal 20 mm dengan *element type* yaitu SOLID185
- f. Type-6 merupakan Model kolom beton 400x400x1000 mm dengan *element type* yaitu SOLID65
- g. Type-7 merupakan Model tulangan utama kolom diameter 16 mm dengan *element type* yaitu LINK180
- h. Type-8 merupakan Model tulangan utama kolom diameter 13 mm dengan *element type* yaitu LINK180
- i. Type-9 merupakan Model tulangan sengkang kolom diameter 13 mm dengan *element type* yaitu LINK180
- j. Type-10 merupakan Model tulangan ekstra kolom diameter 16 mm dengan *element type* yaitu LINK180

Langkah pemilihan sebagai validasi beton *sandwich* dilakukan dengan cara yang sama dengan balok beton normal.

3. Setelah melakukan pada nomor-2 maka langkah selanjutnya melakukan definisi material model yaitu memilih menu *preprocessor* kemudian pilih *material models*. Pemilihan *material models* disesuaikan dengan *element type* yang sudah dibuat.
 - a. *Material Model Number-1* yaitu didefinisikan dengan *element Type-1* SOLID65
 - b. *Material Model Number-2* yaitu didefinisikan dengan *element Type-2* LINK180
 - c. *Material Model Number-3* yaitu didefinisikan dengan *element Type-3* LINK180

- d. *Material Model Number-4* yaitu didefinisikan dengan *element Type-4* LINK180
- e. *Material Model Number-5* yaitu didefinisikan dengan *element Type-5* SOLID185
- f. *Material Model Number-6* yaitu didefinisikan dengan *element Type-6* SOLID65
- g. *Material Model Number-7* yaitu didefinisikan dengan *element Type-7* LINK180
- h. *Material Model Number-8* yaitu didefinisikan dengan *element Type-8* LINK180
- i. *Material Model Number-9* yaitu didefinisikan dengan *element Type-9* LINK180
- j. *Material Model Number-10* yaitu didefinisikan dengan *element Type-10* LINK180

Tabel 3.2 dan 3.3 merupakan definisi material model pada ANSYS sebagai data validasi beton normal, beton *Sandwich* dengan masing-masing ukuran 200x300x4000 mm dan pengembangan beton dengan ukuran 300x400x4000 mm dengan variasi beton normal dan beton *Sandwich*.

Tabel 3. 2 Tabel Material Beton Normal 200x300x4000 mm

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.		Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3
BALOK 200X300X4000 MM	1	SOLID65	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
	2	LINK180	Cross section area (mm)	113.10 (tulangan utama Ø12 mm)		
			Initial strain	0		
	3	LINK180	Cross section area (mm)	78.54 (tulangan utama Ø10 mm)		
			Initial strain	0		
	4	LINK180	Cross section area (mm)	50.27 (tulangan sengkang Ø8 mm)		
			Initial strain	0		
	5	SOLID185	Dimension (mm)	200x100x20 Loading Plate		
			Initial strain	0		
KOLOM 300X300X100 MM	6	SOLID65	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
	7	LINK180	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan utama D16 mm)		
			Initial strain	0		
	8	LINK180	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan utama D13 mm)		
			Initial strain	0		
	9	LINK180	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan sengkang D13 mm)		
			Initial strain	0		
	10	LINK180	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan ekstra D16 mm)		
			Initial strain	0		

Berikut tabel material model untuk validasi beton *Sandwich*

Tabel 3. 3 Tabel Material Beton *Sandwich* 200x300x4000 mm

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.	Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3	
BALOK 200X300X4000 MM	1	SOLID65	Material No. Volume Ratio Orientation angle Orientation angle	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
	2	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	113.10 (tulangan utama Ø12 mm) 0		
	3	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	78.54 (tulangan utama Ø10 mm) 0		
	4	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	50.27 (tulangan sengkang Ø8 mm) 0		
	5	SOLID185	Dimension (mm) Initial strain	200x100x20 Loading Plate 0		
	6	SOLID65	Material No. Volume Ratio Orientation angle Orientation angle	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
	7	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	201.06 (tulangan utama D16 mm) 0		
	8	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	132.73 (tulangan utama D13 mm) 0		
	9	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	132.73 (tulangan sengkang D13 mm) 0		
	10	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	201.06 (tulangan ekstra D16 mm) 0		

Tambahan untuk SOLID65 (*Sandwich-SW*)

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.	Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3	
BALOK 200X300X4000 MM	11	SOLID65	Material No. Volume Ratio Orientation angle Orientation angle	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0

Setiap material model diperlukan input nilai properti beton dan baja. Nilai properti beton diisi berupa nilai modulus elastisitas, nilai tegangan-regangan, *Open Shear*

Transfer Coefisien, Uniaxial Cracking Stress, Uniaxial Crushing Stress, Tensile Crack Factor. Berikut contoh tabel properti beton pada suhu normal (20°C).

Tabel 3. 4 Nilai Properti Beton pada Suhu Normal (20°C)

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal

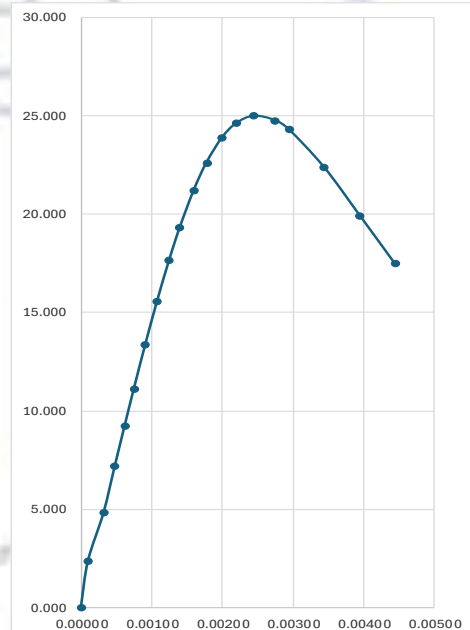
25 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			
Mutu Beton	fc'	25	Mpa
Suhu	T	20	°C
Modulus of Elasticity	Ec	23500	Mpa
Poisson Ratio	v	0.2	
Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity -Mises Plasticity - Multilinear (General)			
Strain (ε c)		Stress (σ)	
0.00000		0.000	
0.00010		2.350	
0.00032		4.795	
0.00048		7.175	
0.00062		9.230	
0.00075		11.100	
0.00091		13.356	
0.00108		15.572	
0.00125		17.647	
0.00140		19.305	
0.0016		21.21881	
0.00178		22.618	
0.00200		23.885	
0.0022		24.613	
0.00245		24.990	
0.00275		24.767	
0.00295		24.293	
0.00345		22.364	
0.00395		19.935	
0.00445		17.474	

Formula Code: BSI (1985)

Range	Stress α(θ)
$\epsilon \leq \epsilon_{c,0.8}$	$\frac{3\epsilon f_{c,0.8}}{\epsilon_{c,1.8} \left(2 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c,1.8}} \right)^3 \right)}$
$\epsilon_{c,0.8} < \epsilon \leq \epsilon_{c,0.18}$	For numerical purposes a descending branch should be adopted. Linear or non-linear models are permitted.

$$E_{crT} = (700 - T / 550) E_c \leq E_c$$



Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	3.5	(ft = 0.70√fc')
Uniaxial Crushing Stress	25	fc'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Nilai properti tulangan baja pada suhu normal 20°C diisi berupa nilai pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 5 Nilai Properti Baja pada Suhu Normal (20°C)

Material Rebar LINK 180 (diameter < 13 mm)

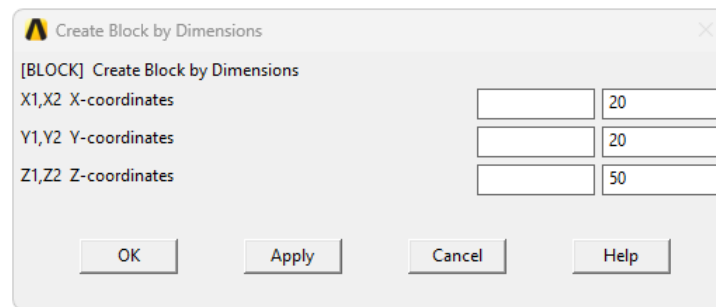
Structural-Linear - Elastic - Isotropic		
Young's Modulus of Steel	E_s	2.0×10^5 Mpa
Poisson Ratio	V_s	0.3
Structural-Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic		
Yields Stress	f_y	300 Mpa
Modulus of Elasticity	E_c	2.0×10^4 Mpa

Material Rebar LINK 180 (diameter $\geq$ 13 mm)

Structural-Linear - Elastic - Isotropic		
Young's Modulus of Steel	E_s	2.0×10^5 Mpa
Poisson Ratio	V_s	0.3
Structural-Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity -Mises Plasticity - Bilinear		
Yields Stress	f_y	420 Mpa
Modulus of Elasticity	E_c	2.0×10^4 Mpa

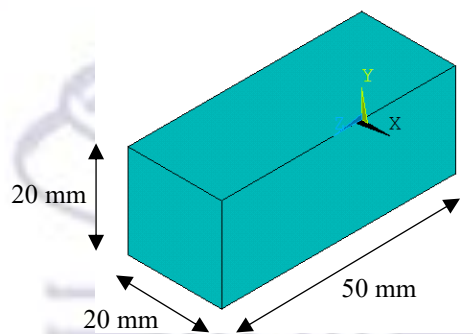
Data lengkap perihal nilai properti beton normal, *Sandwich*, *loading plate* dan tulangan baja dibahas pada Sub Bab 3.5 Prosedur Pelaksanaan Analisis.

4. Tahapan setelah melakukan definisi *element type* dan *material model* maka dilanjutkan membuat elemen-elemen kecil dengan ukuran 20x20x50 mm dengan mengikuti arah sumbu-x, y dan z. Pilih *preprocessor-modelling-create-volume-block-by dimensions*, isi nilai pada sumbu-x,y dan z secara berturut-turut yaitu 20; 20; 50 seperti pada gambar dibawah ini.



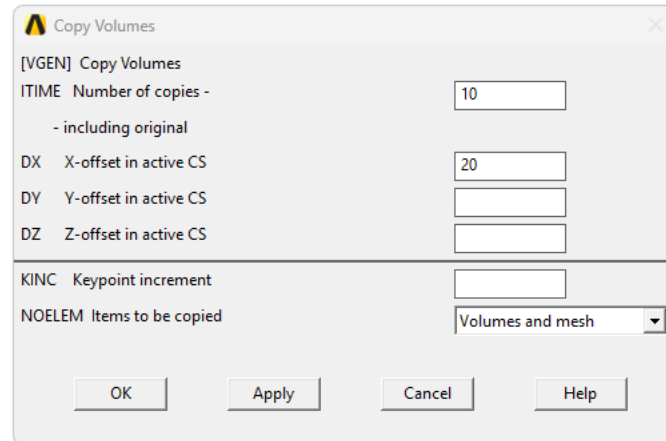
Gambar 3. 3 *Input Create Block by Dimensions* Elemen Balok Beton

Setelah terisi dengan masing-masing sumbu maka didapatkan hasil elemen kecil balok ukuran 20x20x50 mm seperti Gambar 3.4 dibawah ini.



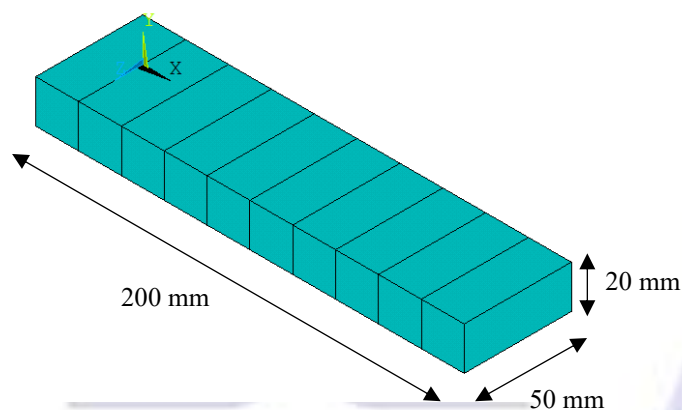
Gambar 3. 4 Penampang Element Kecil Balok Beton 20x20x50 mm

Lakukan ekstruksi ke arah sumbu-x dengan mengisi parameter *preprocessor-modelling-copy-volumes* setelah jendela *copy volume* terbuka dilanjutkan pilih *box* dan pilih gambar elemen kecil kemudian isi seperti pada gambar dibawah ini.



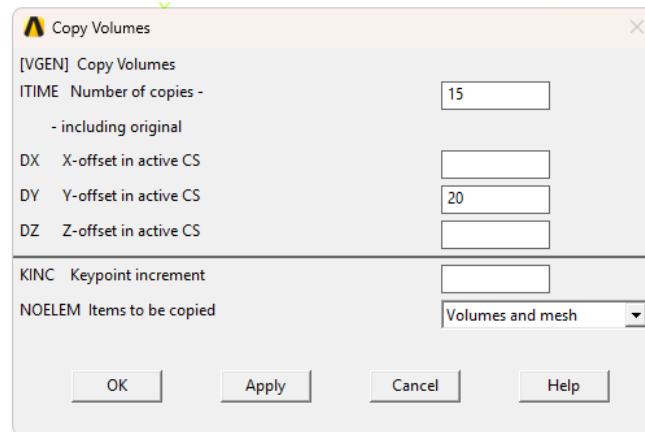
Gambar 3. 5 *Input Copy Volume* Elemen 20x20x50 mm

Setelah melakukan input *copy volume* maka dihasilkan bentuk *element* berukuran 200x20x50 mm yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.

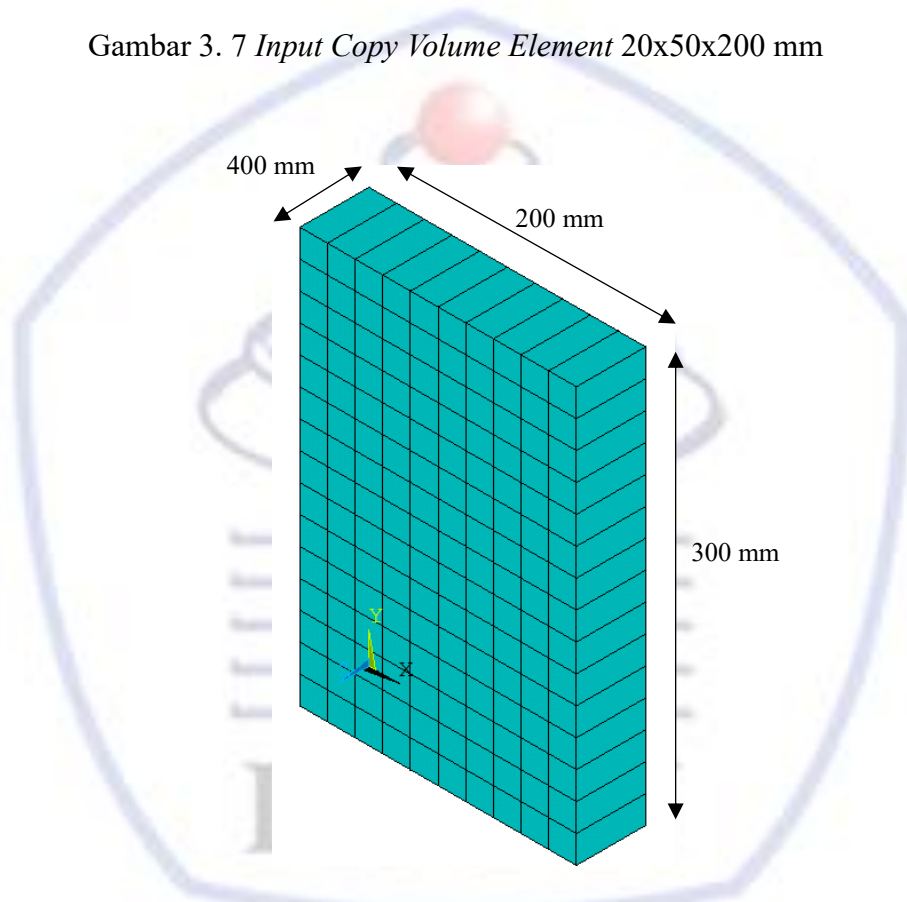


Gambar 3. 6 Penampang Elemen Balok 20x50x200 mm

Elemen ukuran 200x20x50 mm kemudian dilakukan ekstruksi ke arah sumbu-y dengan cara mengisi parameter *preprocessor-modelling-copy-volumes* setelah jendela *copy volume* terbuka dilanjutkan pilih *box* dan pilih gambar elemen 20x50x200 mm kemudian isi *number of copies* sejumlah 15 dan *Y-offset* diisi dengan nilai 20 (Gambar 3.7) dan hasil ekstruksi ditampilkan pada Gambar 3.7.



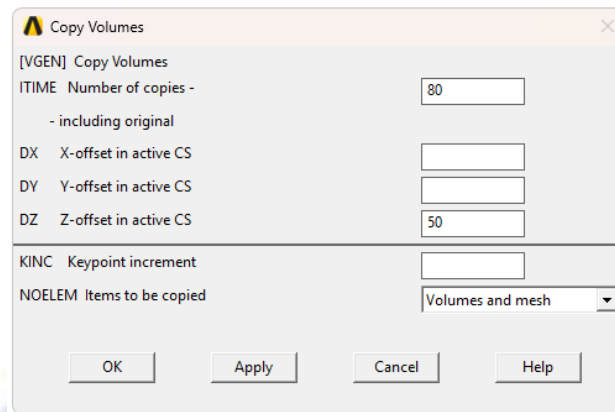
Gambar 3. 7 *Input Copy Volume Element 20x50x200 mm*



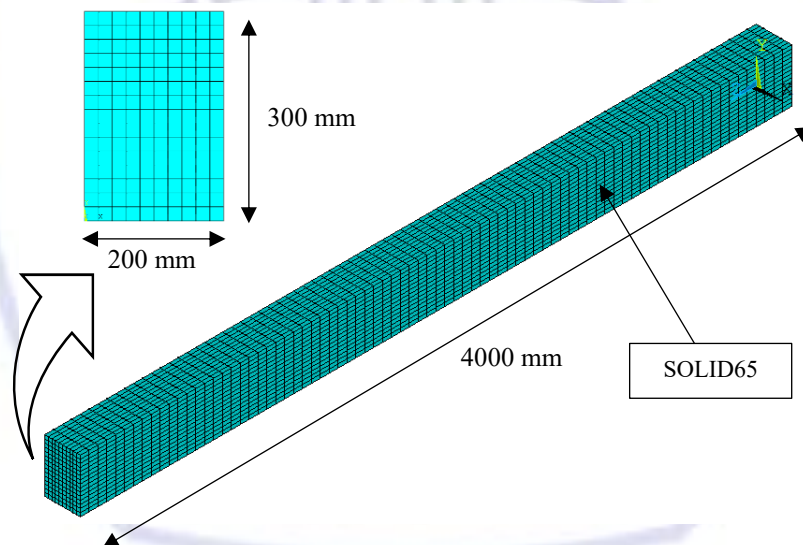
Gambar 3. 8 *Penampang Elemen Balok 200x300x50 mm*

Penampang balok beton 200x300x50 mm telah selesai maka selanjutnya membuat balok beton dengan panjang 4000 mm ke arah sumbu-z. Langkah yang sama yaitu memilih *preprocessor-modelling-copy-volumes* setelah jendela *copy volume* terbuka dilanjutkan pilih *box* dan pilih gambar elemen beton ukuran

200x300x50 mm kemudian isi *number of copies* sejumlah 80 dan *Z-offset* diisi dengan nilai 50 (Gambar 3.9) dan hasil ekstruksi ditampilkan pada Gambar 3.10.



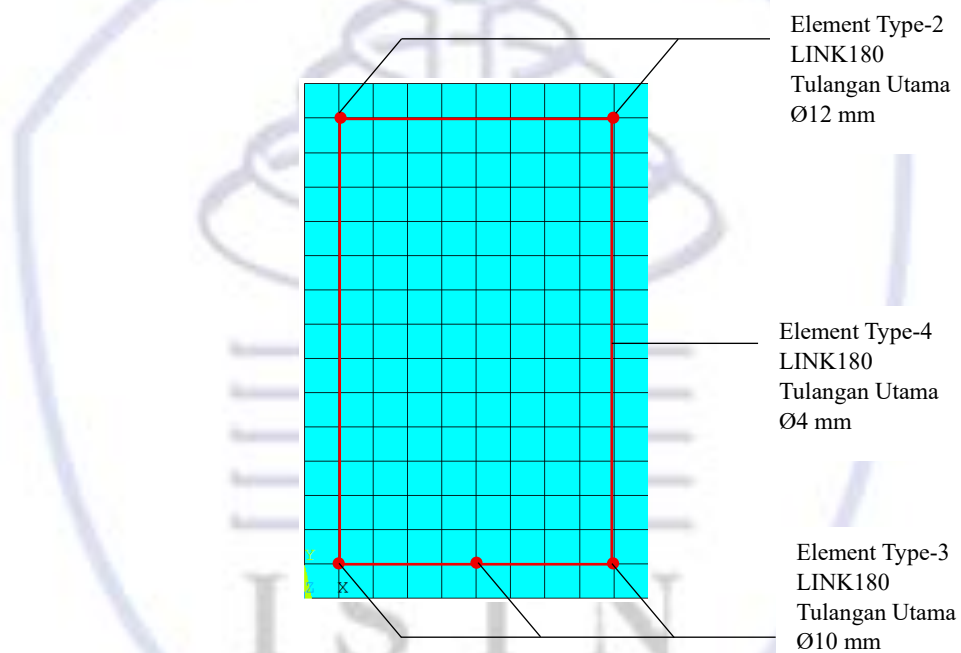
Gambar 3. 9 Input Copy Volume Elemen 200x300x4000 mm



Gambar 3. 10 Penampang Elemen Balok 200x300x4000 mm

Sebelum penampang balok 200x300x4000 mm didefinisi sebagai material model-1 dengan elemen type-1 SOLID65 harus dilakukan proses *glue* atau proses penggabungan yang bertujuan menjadikan komponen elemen-elemen kecil balok beton menjadi satu-kesatuan yang bersifat masif.

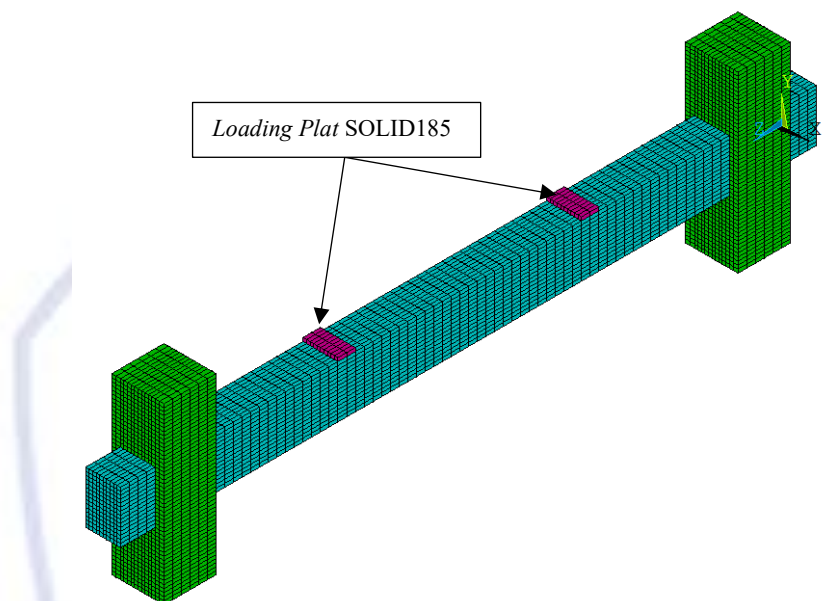
5. Balok beton yang sudah masif maka dilakukan definisi *meshing attribute* sesuai dengan jenis elemen pembentuk material. Pada balok beton 200x300x4000 mm maka *meshing attribute* memilih *Material Model Number-1* yaitu didefinisikan dengan *element Type-1* SOLID65. Mekanisme pembuatan Model kolom beton dari pembuatan elemen kecil sampai dengan menjadi kolom 400x400x1000 mm sama dengan pembuatan Model balok beton.
6. Model tulangan baja pada balok didefinisikan sebagai *element type* LINK180 dengan penomoran *element type* nomor 2,3 dan 4 seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.3. Model tulangan baja menggunakan *peprocessor-meshing-mesh attributes-pick lines*, definisi LINK180 pada titik-titik tulangan ditampilkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Model Tulangan Baja Balok Beton 200x300x4000 mm

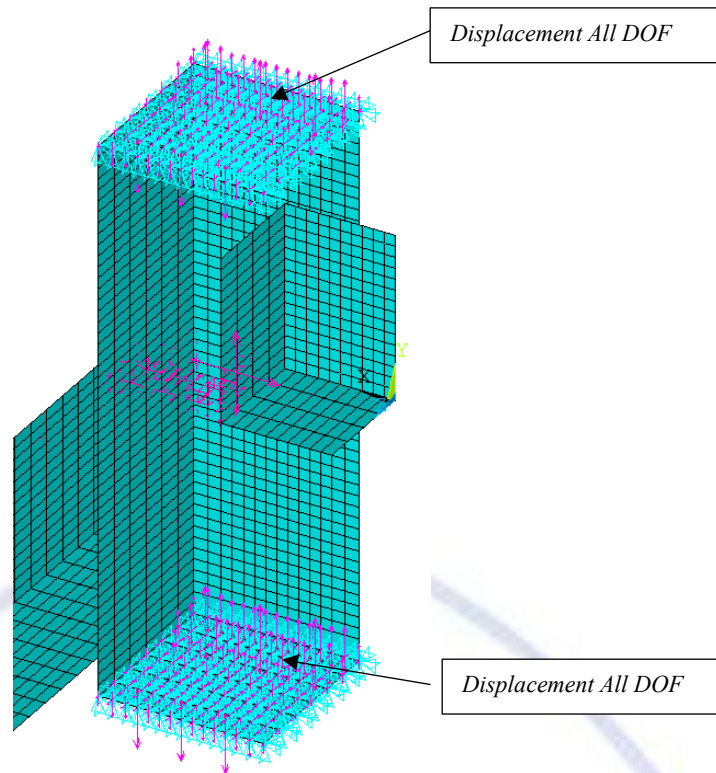
Letak *loading plat* berada 1/3 bentang balok beton sejumlah dua titik. *Loading plat* dinontasikan menggunakan *element type* SOLID185 dengan material elemen *bricknode8* dikarenakan model ini mempunyai delapan *nodes* dengan tiga derajat kebebasan (3-DOF) dengan translasi arah sumbu koordinat x,y dan z. *Bricknode8* pada SOLID185 mampu menggambarkan tegangan dan regangan elastis, kekakuan tegangan serta deformasi.

Elemen *Bricknode8* SOLID185 adalah material yang *isotropic* dan dapat bekerja dengan material lain seperti model beton SOLID65. Perletakan *loading plat* ditunjukkan pada Gambar 3.12. Dimensi *loading plat* disesuaikan dengan lebar penampang balok yaitu 200 mm pada koordinat ke arah-x, dan arah-z menggunakan dimensi 100 mm, tebal 20 mm.



Gambar 3. 12 Perletakkan *Loading Plat* SOLID185

Tumpuan Model balok dan kolom beton menggunakan perangkat lunak ANSYS didefinisikan sebagai tumpuan sendi-send, perletakkan tumpuan beradap pada permukaan atas kolom dan permukaan bawah kolom seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini. Pemilihan definisi tumpuan pada ANSYS yaitu *solution-define loads-apply-structural-displacement-on Area* dan untuk *constrain* dipilih all DOF.



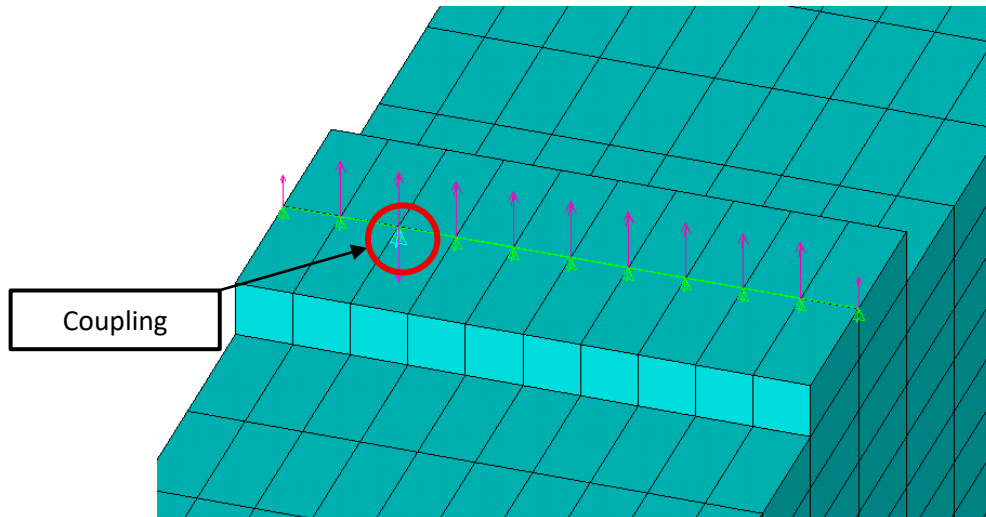
Gambar 3. 13 Perletakkan Tumpuan Kolom

Pemilihan constrain all DOF pada sisi x,y dan z pada displacement ini menandakan bahwa *node* pada tumpuan kolom arah UX, UY dan UZ dikunci supaya tidak bergerak ke arah X,Y dan Z. Kondisi ini pada *node* pada semua arah tidak dapat berpindah.

Sebelum dilakukan analisis maka diperlukan penentuan *loading factor* sebesar 0,2 sampai dengan 1,00. Peneliti telah melakukan simulasi *loading factor* pada Model dan hasil simulasi bahwa untuk nilai *loading factor* yang digunakan yaitu 0,80 pada model beton normal pada suhu 20°C, dengan memberikan nilai 0,8. Langkah pemberian *loading factor* harus dilakukan proses *coupling* pada posisi tengah plat di kedua *loading plat*.

Proses *coupling* telah diselesaikan maka langkah selanjutnya yaitu *define load* menggunakan *structural-displacement-on node* dan isi *node number* yang terkecil yang tertera pada *loading plat* yang ditunjukkan pada Gambar 3.14. Setelah memilih nilai *node number* yang terkecil maka input nilai *displacement*

yang sesuai dengan hasil analisis Model dengan *loading factor* 0,80 maka analisis dilakukan dan dihasilkan nilai tegangan maksimum.



Gambar 3. 14 Titik *Coupling* di Loading Plat

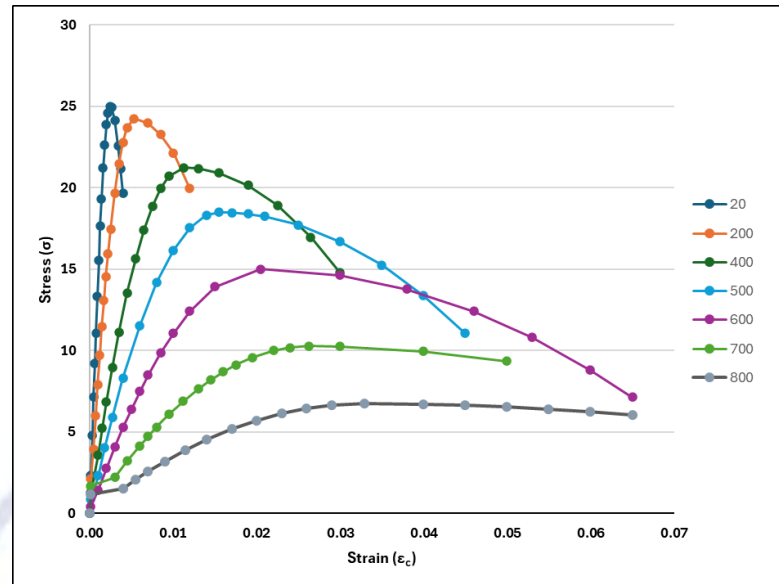
3.5 Pengaturan Properti Material

Prosedur analisis Model struktur balok dan kolom beton yang disesuaikan dengan uji laboratorium menggunakan perangkat lunak ANSYS dengan model 3D. Analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS diharapkan mendapatkan gambaran bagaimana perilaku kelenturan struktur balok beton yang dipengaruhi oleh suhu tinggi dengan output antara lain beban ultimit, nodal *displacement*, nilai tegangan yang diakibatkan oleh beban yang bekerja serta pengaruh adanya suhu tinggi.

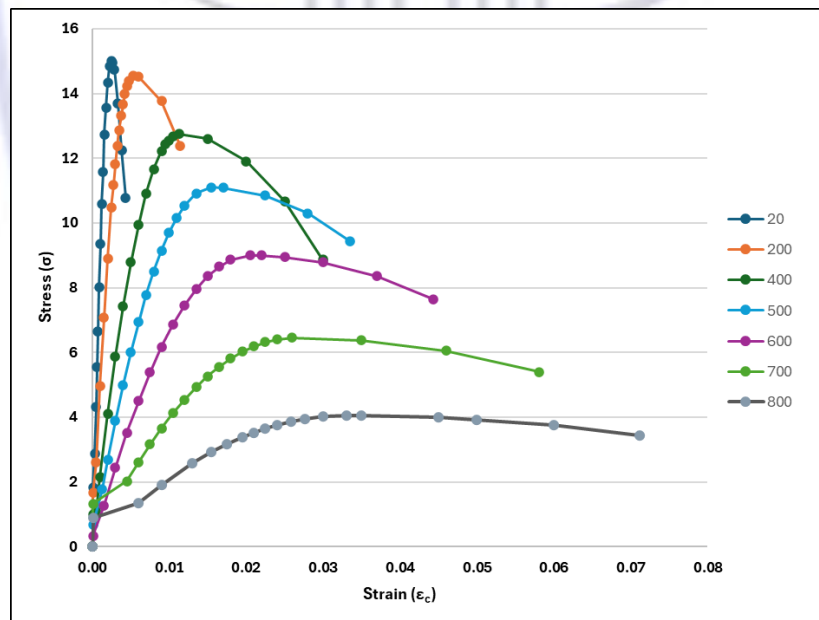
3.5.1 Properti Material Balok Beton

Material properti pada beton berupa kuat tekan beton pada simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS disesuaikan dengan pengujian laboratorium antara lain nilai mutu beton normal (N) yaitu 25 MPa untuk beton normal sedangkan nilai mutu beton *Sandwich* (SW) yaitu 15 MPa. Nilai tegangan (σ_c), regangan maksimum (ϵ_{max}) dan mutu beton (f'_cT) akibat pengaruh variasi suhu menggunakan referensi NSC-ASCE Manual 1992, kurva tegangan dan regangan beton normal dan *Sandwich* akibat suhu tinggi ditunjukkan pada Gambar 3.13 dan

3.14. Modulus elastisitas beton pada suhu dibawah $\leq 600^{\circ}\text{C}$ menggunakan referensi BSI (1985) sedangkan modulus elastisitas pada beton normal dan *Sandwich* diatas suhu $>600^{\circ}\text{C}$ sampai dengan $\leq 1000^{\circ}\text{C}$ menggunakan referensi Schneider (1986).



Gambar 3. 15 Kurva Tegangan dan Regangan Beton Normal



Gambar 3. 16 Kurva Tegangan dan Regangan Beton *Sandwich*

Model balok beton normal dan *Sandwich* menggunakan model SOLID65 masing-masing yaitu *element type-1* sebagai beton normal dan *element type-11*

sebagai beton *Sandwich*. Model SOLID65 mampu menggambarkan perilaku retak dalam tiga sumbu koordinat x-y-z, kehancuran, deformasi plastis dan rayapan (*creep*). Nilai-nilai tersebut diinput dengan memilih pada *preprocessor-material model-nonlinear-inelastic-non metal plasticity-concrete*. Nilai koefisien geser awal (*open shear transfer coef.*) untuk retak pada beton diisi nilai antara 0,00 sampai dengan 1,00, nilai 0,00 merupakan gambaran retak halus dan nilai 1,00 merupakan retak kasar. Pada penelitian ini nilai geser awal menggunakan 0,3 untuk beton normal. Koefisien transfer geser akhir (*closed shear transfer coef.*) pada beton normal menggunakan nilai 1,00.

Koefisien tarik uniaksial (f_t) atau *uniaxial cracking stress* merupakan tegangan tarik retak beton dengan nilai $0,7\sqrt{f_c'}$ untuk masing-masing mutu beton normal maupun *Sandwich*. Tegangan tekan hancur pada beton atau *uniaxial crushing stress* disamakan dengan nilai f_c' , faktor retak tarik atau *tensile crack factor* digunakan nilai 0,6. Pada penelitian ini nilai biaxial crushing stress, hydrostatic pressure tidak digunakan, nilai-nilai faktor yang telah disebutkan sebelumnya ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 6 Tabel *Non-Metal Plasticity* Beton

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	3.5	($f_t = 0.70\sqrt{f_c'}$)
Uniaxial Crushing Stress	25	f_c'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Perencanaan Model balok beton normal dan *Sandwich* dibagi dalam empat jenis Model antara lain dua jenis Model disesuaikan dengan pengujian laboratorium dan dua jenis Model merupakan model pengembangan dimensi balok dan kolom.

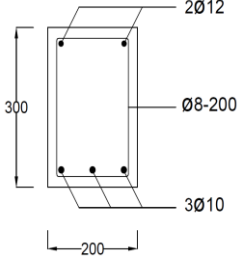
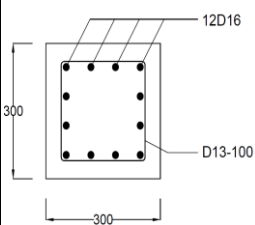
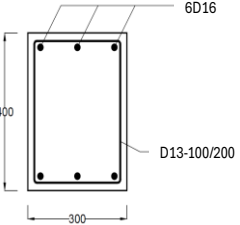
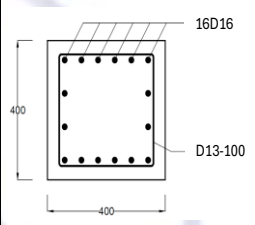
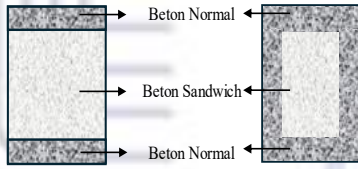
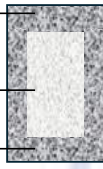
1. Model balok beton normal 200x300x4000 mm dengan variasi nilai mutu beton, mutu baja dan tegangan-regangan akibat variasi suhu tinggi. Kolom beton

menggunakan dimensi 300x300x1000 mm dengan nilai mutu beton (f_c') yaitu 30 MPa serta diasumsikan tidak terkena paparan suhu tinggi.

2. Model balok beton normal dan *Sandwich* 200x300x4000 mm dengan variasi nilai mutu beton, mutu baja dan tegangan-regangan akibat variasi suhu tinggi. Kolom beton menggunakan dimensi 300x300x1000 mm dengan nilai mutu beton (f_c') yaitu 30 MPa serta diasumsikan tidak terkena paparan suhu tinggi.
3. Pengembangan Model menggunakan balok beton normal 300x400x4000 mm dengan variasi nilai mutu beton, mutu baja dan tegangan-regangan akibat variasi suhu tinggi. Kolom beton menggunakan dimensi 400x400x1000 mm dengan nilai mutu beton (f_c') yaitu 30 MPa serta diasumsikan tidak terkena paparan suhu tinggi.
4. Pengembangan Model menggunakan balok beton normal dan *Sandwich* 300x400x4000 mm dengan variasi nilai mutu beton, mutu baja dan tegangan-regangan akibat variasi suhu tinggi. Kolom beton menggunakan dimensi 400x400x1000 mm dengan nilai mutu beton (f_c') yaitu 30 MPa serta diasumsikan tidak terkena paparan suhu tinggi.

Variasi model balok beton ditunjukkan pada Tabel 3.7 dengan analisis model pengaruh variasi suhu tinggi.

Tabel 3. 7 Variasi Model

No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu Beton (Mpa)		Tebal Selimut (mm)	MODEL	
			NORMAL	SANDWICH		BALOK	KOLOM
1	VAL-BN-20	20	25	-	20		
2	VAL-BN-100	100	25	-	20		
3	VAL-BN-200	200	24.25	-	20		
4	VAL-BN-400	400	21.25	-	20		
5	VAL-BN-500	500	18.5	-	20		
6	VAL-BN-600	600	15	-	20		
7	VAL-BN-700	700	10.75	-	20		
8	VAL-BN-800	800	6.75	-	20		
9	VAL-SW-20	20	25.00	15.00	20		
10	VAL-SW-100	100	25.00	15.00	20		
11	VAL-SW-200	200	24.25	14.55	20		
12	VAL-SW-400	400	21.25	12.75	20		
13	VAL-SW-500	500	18.50	11.10	20		
14	VAL-SW-600	600	15.00	9.00	20		
15	VAL-SW-700	700	10.75	6.45	20		
16	VAL-SW-800	800	6.75	4.05	20		
17	VAF-M1-20	20	25	-	20		
18	VAF-M1-100	100	25	-	20		
19	VAF-M1-200	200	24.25	-	20		
20	VAF-M1-400	400	21.25	-	20		
21	VAF-M2-500	500	18.5	-	20		
22	VAF-M1-600	600	15	-	20		
23	VAF-M1-700	700	10.75	-	20		
24	VAF-M1-800	800	6.75	-	20		
25	VAF-M2-20	20	25.00	15.00	50		
26	VAF-M2-100	100	25.00	15.00	50		
27	VAF-M2-200	200	24.25	14.55	50		
28	VAF-M2-400	400	21.25	12.75	50		
29	VAF-M2-500	500	18.50	11.10	50		
30	VAF-M2-600	600	15.00	9.00	50		
31	VAF-M2-700	700	10.75	6.45	50		
32	VAF-M2-800	800	6.75	4.05	50		
33	VAF-M3-20	20	25.00	15.00	50		
34	VAF-M3-100	100	25.00	15.00	50		
35	VAF-M3-200	200	24.25	14.55	50		
36	VAF-M3-400	400	21.25	12.75	50		
37	VAF-M3-500	500	18.50	11.10	50		
38	VAF-M3-600	600	15.00	9.00	50		
39	VAF-M3-700	700	10.75	6.45	50		
40	VAF-M3-800	800	6.75	4.05	50		

Keterangan:

Contoh pembacaan kode pengujian model

Kode VAL-BN-20 diartikan Validasi Beton Normal pada Suhu 20°C

Kode VAF-M1-20 diartikan Vembri Affiano Model Pengembangan-1 Suhu 20°C

VAL : Validasi

BN : Beton Normal

SW : Beton *Sandwich*

VAF : Inisial nama peneliti (VAF : Vembri Affiano)

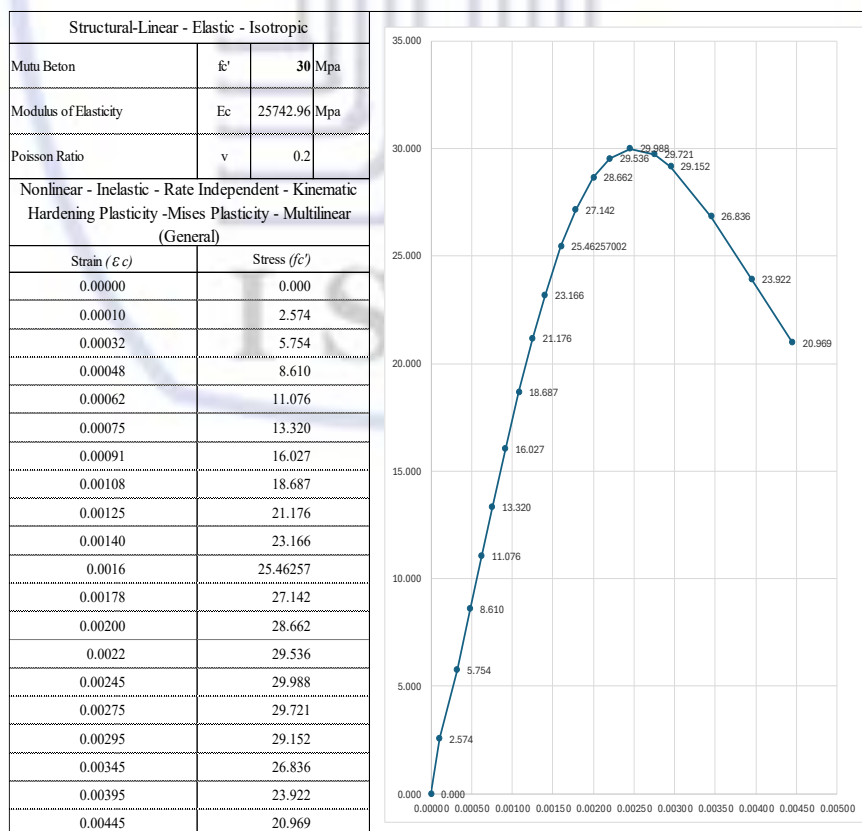
M : Model pengembangan ke-n

Model balok beton 200x300x4000 mm menggunakan ANSYS dapat dilihat pada Gambar 3.11. Model balok beton dibentuk menggunakan elemen-elemen kecil ukuran 20x20x50 mm yang disusun menjadi satu-kesatuan secara masif menggunakan metode *glue* sehingga menjadi balok beton 200x300x4000 mm.

3.5.2 Properti Material Kolom Beton

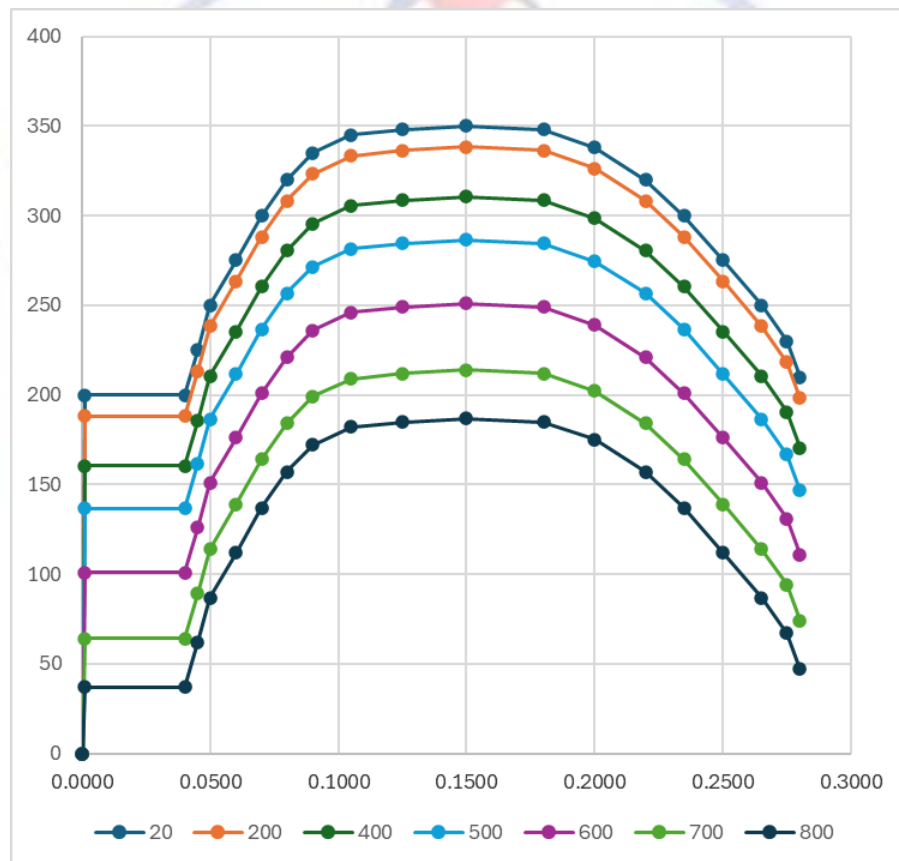
Kolom beton dimodelkan menggunakan ukuran 300x300x1000 mm dengan mutu beton f_c' sebesar 30 MPa. Material properti kolom beton menggunakan modulus elastisitas 25743 MPa pada suhu normal 20°C, *element type* menggunakan SOLID65 dengan material model nomor-6. Nilai *open shear transfer* senilai 0,3, *closed shear transfer* menggunakan nilai 1,00, *uniaxial cracking stress* $0,70 \sqrt{f_c'}$ yaitu 3,834 MPa, *uniaxial crushing stress* senilai f_c' dan *tensile crack factor* senilai 0,60. Pemilihan material properti pada ANSYS dipilih *nonlinear-inelastic-rate independent-kinematic hardening plasticity-mises plasticity-multilinear (general)*, kurva tegangan-regangan kolom beton dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Tabel 3. 8 Kurva Tegangan dan Regangan Kolom Beton



3.5.3 Properti Material Tulangan Baja

Penetapan properti tulangan baja ditentukan menggunakan eksperimental laboratorium dimana nilai $f_y = 300$ MPa. Diameter tulangan utama menggunakan diameter ($\varnothing$) = 12 mm sebagai tulangan tarik sejumlah tiga batang dan $\varnothing 10$ mm sebagai tulangan tekan sejumlah dua batang, sedangkan tulangan sengkang menggunakan $\varnothing 8$ mm jarak 150 mm dan 200 mm. Tulangan baja dinotasikan ke dalam *element type* LINK180 dengan *2-nodes* dan merupakan material *isotropic*. Nilai dan kurva tegangan dan regangan tulangan baja ditampilkan pada gambar 3.17.



Gambar 3. 17 Kurva Tegangan-Regangan Tulangan Baja

Nilai modulus elastisitas pada properti baja tulangan dihitung menggunakan persamaan 2.11 dan 2.12 sehingga didapatkan nilai modulus elastisitas pada tabel diibawah ini.

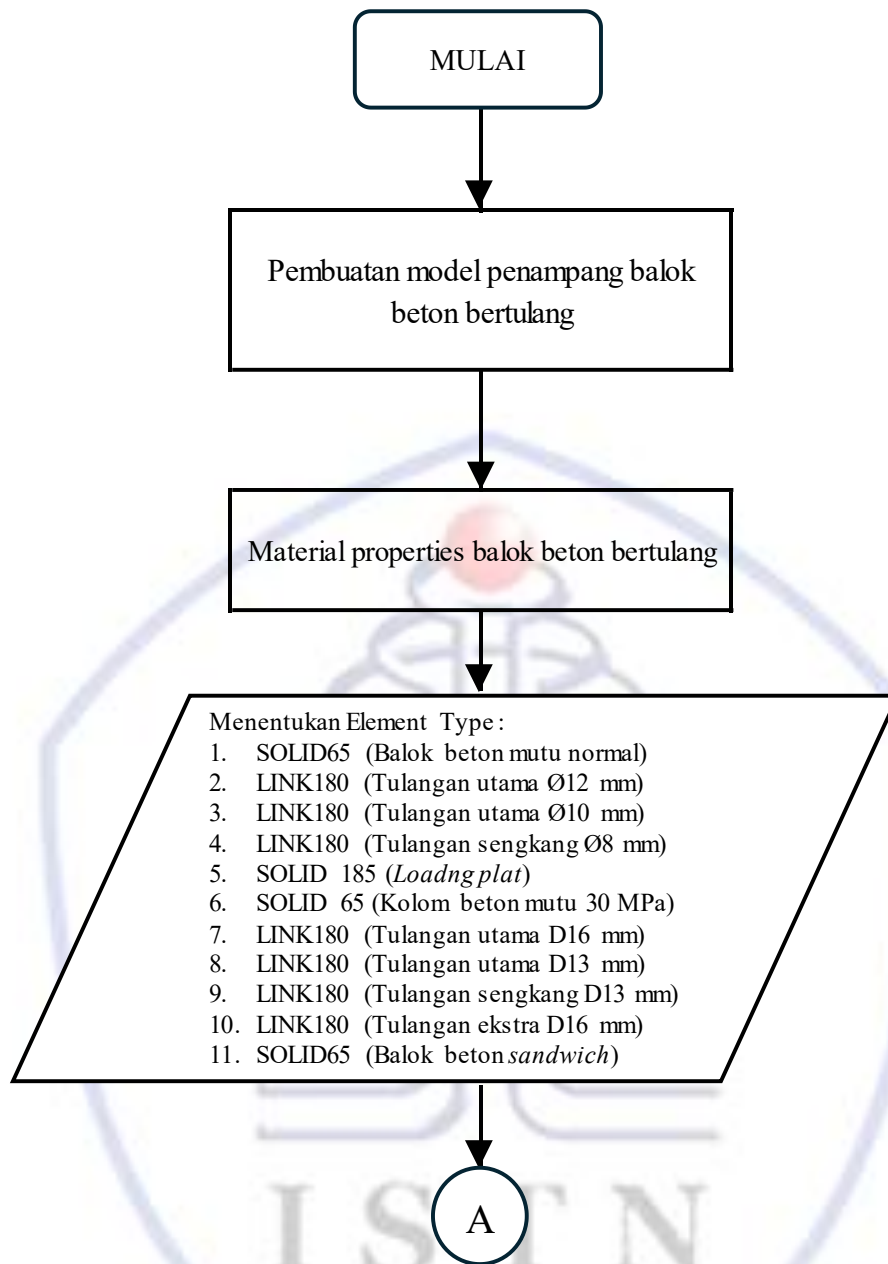
Tabel 3. 9 Modulus Elastisitas Baja pada Variasi Suhu

T (°C)	E(T)
20	200,000
100	195,830
200	188,268
300	176,910
400	160,459
425	155,309
450	149,654
500	136,585
550	120,652
600	101,012
700	64,037
750	49,533
800	36,973

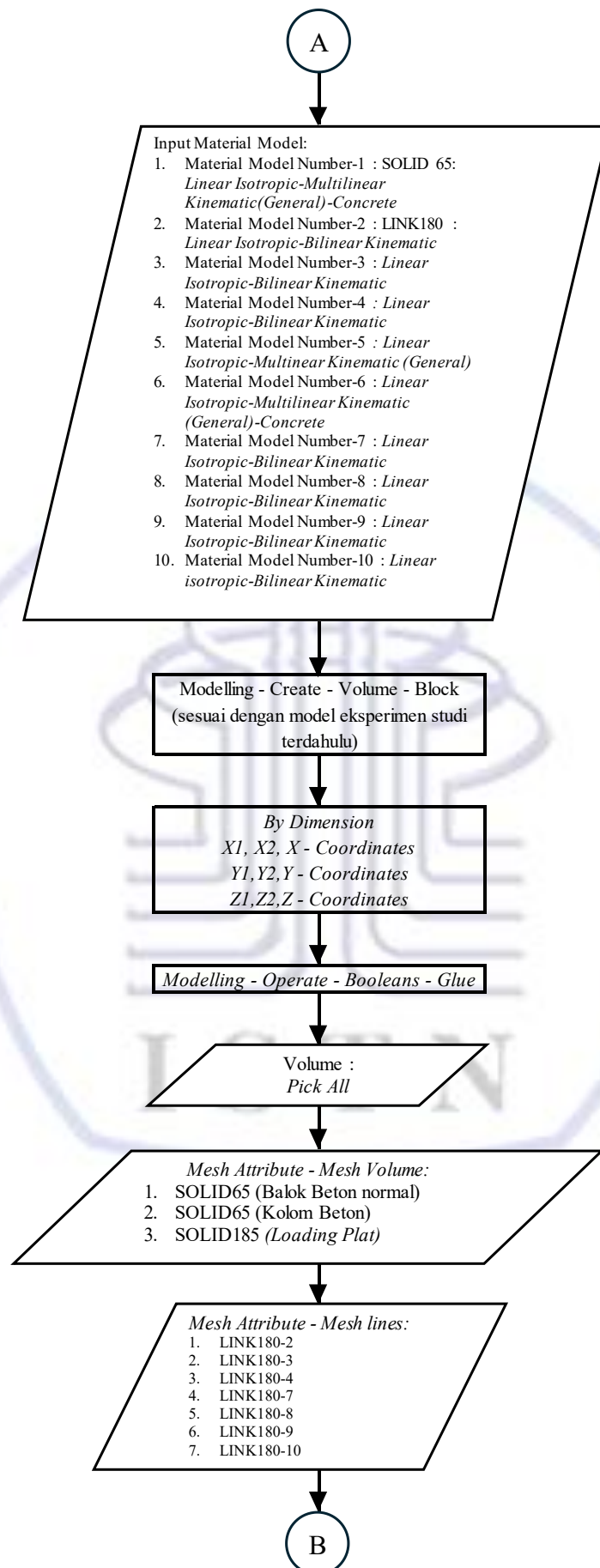
3.5.4 Bagan Alur Proses Analisis Metode Elemen Hingga ANSYS

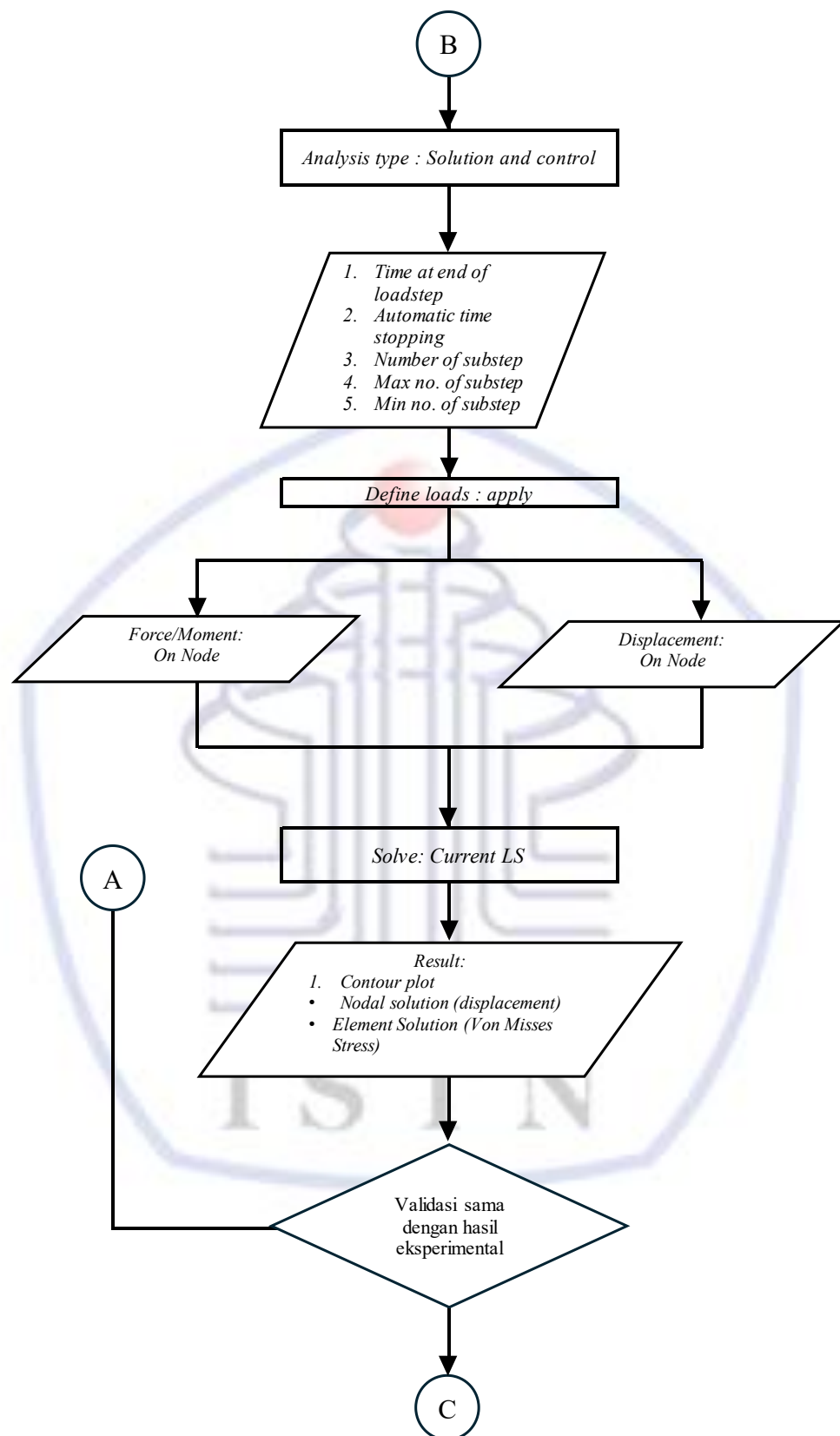
Bagan alur analisis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) menggunakan perangkat lunak ANSYS secara sistematis menggambarkan tahapan-tahapan yang harus dilakukan dalam proses pembuatan model dan analisis numerik suatu struktur. Prosedur atau tahapan ini diawali dengan proses pra-promrosesan (*pre-processing*) yaitu membuat geometri model, pemilihan jenis elemen, penentuan mesh dan penentuan sifat material serta kondisi batas. Tahap berikutnya adalah proses *solving* yaitu proses komputasi yang dilakukan ANSYS untuk menyelesaikan sistem persamaan linear berdasarkan input parameter yang telah ditentukan.

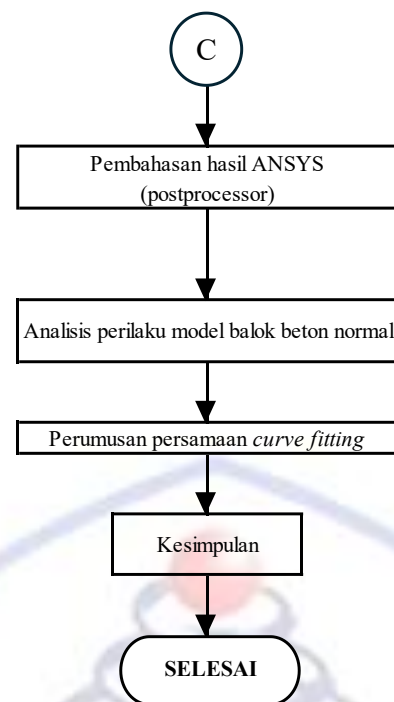
Setelah melakukan proses *solving* dilanjutkan tahap pasca-pemrosesan (*post-processing*) untuk evaluasi hasil analisis seperti distribusi tegangan, regangan dan deformasi. Seluruh alur kerja ini diharapkan mendapatkan analisis yang terstruktur dan terkontrol dalam evaluasi perilaku mekanik suatu struktur. Berikut bagan alur keseluruhan proses analisis menggunakan ANSYS dalam penelitian ini.



Gambar 3. 18 Bagan Alur Proses Analisis *Finite Element* ANSYS







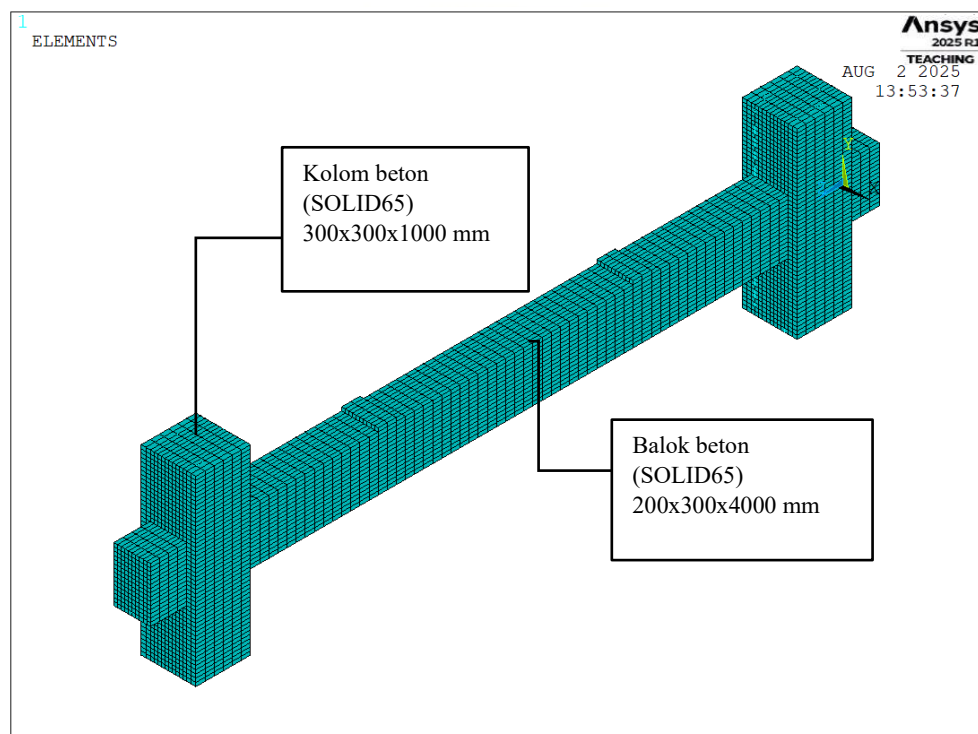
3.6 Model dan *Deflection* Balok

3.6.1 Model Balok dan Kolom Beton pada ANSYS

Semua proses analisis model menggunakan ANSYS diperlukan proses validasi model. Validasi ini dilakukan dengan analisis ulang terhadap sampel beton dari penelitian terdahulu yang telah dilakukan di laboratorium. Seluruh paramater yang berkaitan dengan karakteristik fisik dan mekanik balok antara lain ukuran, mutu material dan properti lainnya dimasukkan ke dalam ANSYS, selanjutnya dilakukan pembuatan model geometri. Hasil pengujian menggunakan ANSYS diharapkan mendapat hasil kesesuaian yang tinggi dengan data eksperimen antara lain grafik hubungan antara suhu ($^{\circ}\text{C}$) dan beban (KN) sehingga hasil tersebut dinyatakan valid dan dapat menjadi dasar untuk analisis model balok beton selanjutnya.

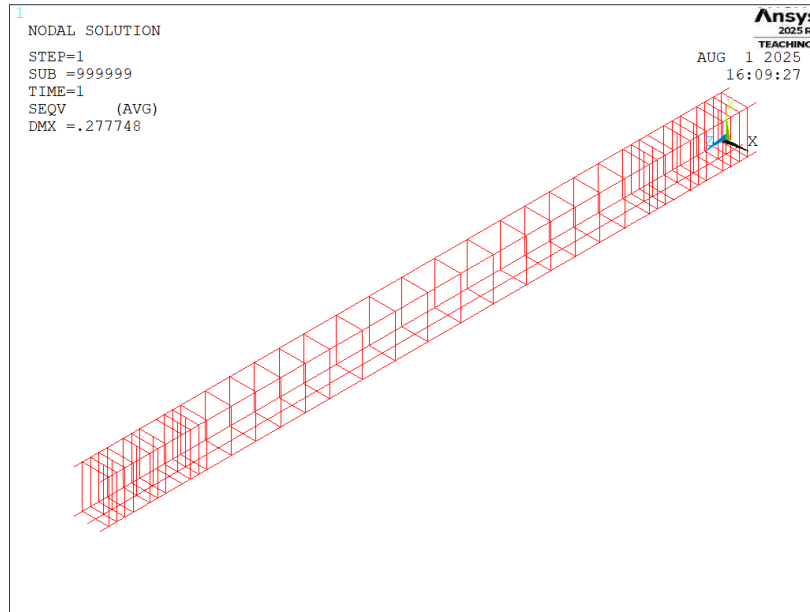
Model balok beton yang digunakan sebagai objek validasi merupakan hasil dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Murtiadi et al, 2020. Pembuatan model geometri dan seluruh data eksperimental yang tersedia sebagai dasar proses model numerik menggunakan ANSYS. Hasil validasi model yang telah dibuat ditunjukkan pada Gambar 3.19 , dikarenakan pada penelitian terdahulu merupakan

penelitian di laboratorium maka balok beton dijepit menggunakan *furnace wall* sehingga untuk mengganti parameter *furnace wall* tersebut pada model geometri sebagai pengganti *furnace wall* diganti menggunakan kolom beton ukuran 300x300x4000 mm supaya karakteristik balok beton terjepit pada kedua sisi untuk menjadikan balok menjadi kaku. Model balok beton 200x300x4000 mm menggunakan *element type* SOLID65 dan kolom beton 300x300x1000 mm menggunakan *element type* SOLID65.



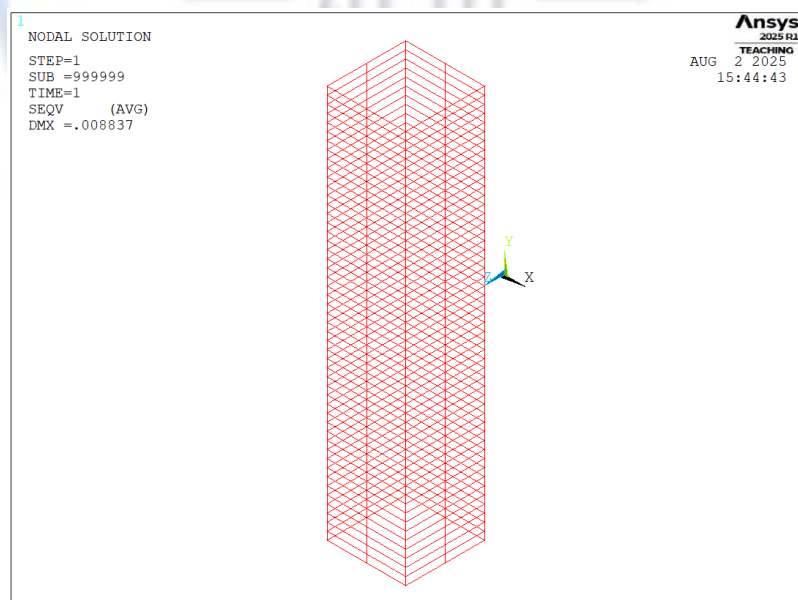
Gambar 3. 19 Model Balok Beton 200x300x4000 mm dan Kolom 300x300x1000mm

Model balok beton ukuran 200x300x4000 mm menggunakan tulangan utama menggunakan 2Ø10 mm dan 3Ø12 mm. Tulangan sengkang menggunakan Ø8-100/200 mm. *Element type* pada kedua model tulangan baja menggunakan LINK180. Model tulangan baja ditunjukkan pada Gambar 3.20 dibawah ini.



Gambar 3. 20 Tulangan Baja Balok Beton 200x300x4000 mm

Model kolom beton ukuran 300x300x1000 mm menggunakan tulangan utama 4D16. Tulangan sengkang menggunakan D13-100 mm. *Element type* pada kedua model tulangan baja menggunakan LINK180. Model tulangan baja ditunjukkan pada Gambar 3.21 dibawah ini.



Gambar 3. 21 Tulangan Baja Kolom Beton 300x300x1000 mm

3.6.2 Displacement Ratio terhadap Deflection Balok Beton

Hasil validasi *deflection* yang dapat diterima oleh model balok beton normal 200x300x4000 mm dengan memberikan nilai *load factor* dari nilai 2,00 sampai dengan 5,00 pada suhu 20°C sampai dengan 800°C dengan tujuan untuk mendapatkan nilai validasi *deflection* antara pengujian eksperimental dan ANSYS. Analisis menggunakan ANSYS dilakukan hanya di suhu 800°C dikarenakan ANSYS hanya mampu melakukan analisis sampai dengan suhu 800°C. 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 (Tabel. 3.10)

Tabel 3. 10 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 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.

3.7 Integrasi Pengaturan Variasi Suhu Tinggi dengan Metode Elemen Hingga

Variasi suhu tinggi pada balok beton diatur pada tahap analisis balok beton menggunakan metode elemen hingga dengan melakukan integrasi analisis termal dan analisis struktural pada perangkat lunak ANSYS. Kurva suhu waktu standar seperti yang diatur dalam SNI 1741-2008 digunakan sebagai input kondisi batas termal sehingga distribusi temperatur dalam penampang balok dapat dibuat model secara realistis. Analisis termal menggunakan ANSYS dihubungkan dengan analisis mekanik melalui definisi *temperature-dependent material properties*,

sebagaimana yang direkomendasikan dalam Eurocode 2 dan 3 sehingga variasi suhu tinggi yang ditetapkan dalam penelitian yaitu pada suhu 200°C, 400°C, 600°C dan 800°C. Variasi suhu tinggi ini dipresentasikan secara numerik untuk mempelajari penurunan kapasitas lentur, deformasi serta perubahan distribusi tegangan-regangan balok akibat paparan suhu tinggi.

Pengaturan variasi suhu tinggi pada penelitian ini terhadap balok beton didefinisikan sebagai skenario termal sesuai kurva standar suhu-waktu dari kode-kode internasional yang berlaku, pengaturan tersebut meliputi:

1. *Boundary condition termal* yaitu temperatur luar ditetapkan sesuai kurva kebakaran standar, seperti suhu mencapai 800°C dengan laju pemanasan 10°C/menit.
2. Distribusi panas, ANSYS menyelesaikan persamaan konduksi panas dalam material beton dengan mempertimbangkan sifat termal seperti kapasitas panas, massa jenis yang bervariasi terhadap suhu.
3. *Coupled Thermal-Structural Analysis* merupakan hasil temperatur pada tiap elemen yang digunakan sebagai input beban termal pada analisis mekanik.

Pada penelitian ini digunakan variasi suhu tinggi menggunakan peraturan-peraturan yang berlaku dari suhu 20°C, 100°C, 200°C, 400°C, 600°C dan 800°C dengan mendefinisikan berbagai skenario sesuai tiga hal diatas untuk mendapatkan nilai penurunan kapasitas lentur, deformasi serta perubahan distribusi tegangan-regangan balok akibat paparan suhu tinggi dengan metode analisis mekanik melalui definisi *temperature-dependent material properties*.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian Model Balok Beton Normal

Analisis model struktur balok beton bertulang ukuran 200x300x4000 mm menggunakan model yang disamakan dengan eksperimental dengan nilai material properti balok beton normal yaitu Kuat tekan (f_c') permukaan beton sebesar 25 MPa dan kuat tekan pada sisi inti beton sebesar 15 MPa. Tulangan tarik menggunakan diameter 3Ø12 mm dan tulangan tarik menggunakan diameter 2Ø10, masing-masing diameter tulangan memiliki kekuatan leleh (f_y) sebesar 300 MPa serta selimut beton menggunakan tebal 20 mm. Model balok beton dilanjutkan dengan memberikan nilai *shear-strength*, modulus elastisitas dan nilai properti material lainnya akibat pengaruh variasi suhu tinggi dari suhu 20°C, 100°C, 200°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C dan 800°C sebagai *temperature-dependent material properties*. Faktor waktu tidak diperhitungkan saat proses beton terpapar suhu tinggi saat analisis dilakukan menggunakan ANSYS.

Model balok beton diberi nilai beban berupa *structural-pressure* pada area loading plat dengan memberikan rasio beban sebesar 0,8 dengan tujuan analisis ini mendapatkan nilai lendutan awal (nilai DMX) yang selanjutnya sebagai nilai rasio yang dimasukkan disaat analisis untuk mencari nilai tegangan dan nilai lendutan maksimum pada analisis menggunakan beban *displacement-nodes*. Hasil analisis setelah memberikan rasio beban pada *structural-pressure* dilanjutkan analisis menggunakan beban *displacement-nodes* sebesar yang dihasilkan oleh analisis *structural-pressure*, sebagai contoh pada suhu 20°C dimana nilai *displacement ratio* pada Tabel 4.1 sebesar 0,286 dan dilakukan analisis menggunakan beban *displacement-nodes* pada kedua *loading plat* dengan sistem *coupling* maka hasil analisis lendutan (DMX) sebesar 0,278 mm dengan nilai tegangan maksimal (SMX) sebesar 16,926 MPa. Analisis ini dilanjutkan menggunakan metode yang sama sampai paparan suhu 800°C dengan konversi waktu selama 22,67 menit maka dihasilkan nilai tegangan akhir maksimum sebesar 2,245 MPa dengan nilai lendutan sebesar 0,268 mm.

Tabel 4. 1 Hasil Analisis ANSYS pada Beton Normal

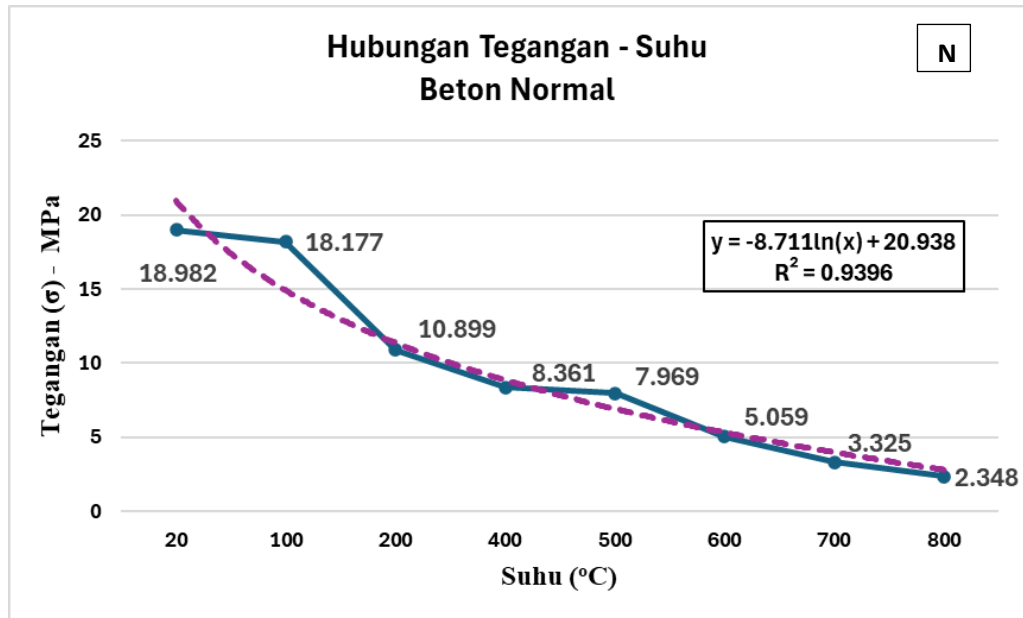
HASIL ANALISIS BETON NORMAL								
No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu	Tebal Selimut (mm)	Displacement Ratio	SMX	DMX	Waktu (menit)
			Beton (Mpa)			(Mpa)	(mm)	
1	VAL-BN-20	20	25.000	20	2.00	18.982	1.853	0.00
2	VAL-BN-100	100	25.000	20	2.50	18.177	1.857	0.10
3	VAL-BN-200	200	24.250	20	3.00	10.899	1.839	0.29
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

Tabel diatas menunjukkan hasil pengujian terhadap beberapa spesimen balok beton yang dipengaruhi oleh suhu tinggi sehingga pengujian tersebut dapat memberikan evaluasi pengaruh temperatur terhadap kemampuan balok dalam menahan tegangan. Parameter utama yang ditunjukkan dalam tabel diatas meliputi variasi suhu, tegangan maksimum (SMX/σ_{max}), deformasi (DMX/δ) serta penurunan tegangan terhadap kondisi perubahan suhu.

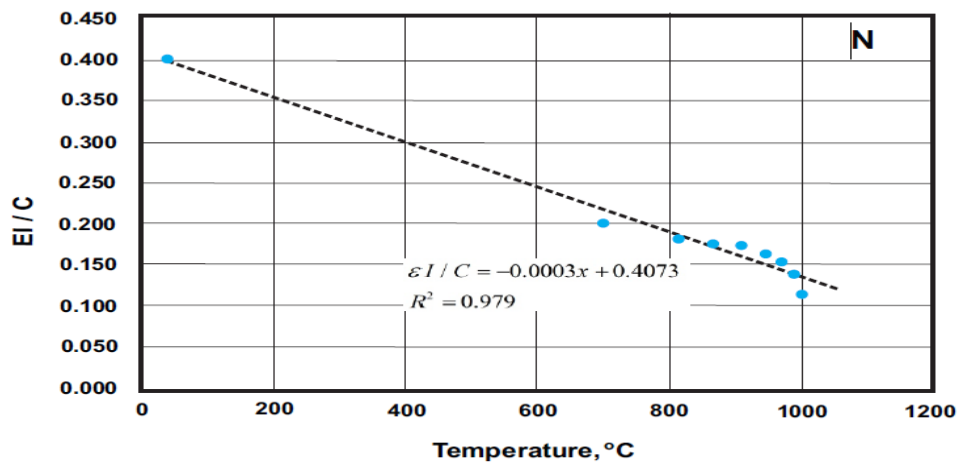
Secara umum, terdapat kecenderungan penurunan kapasitas tegangan maksimum balok beton seiring dengan peningkatan suhu. Pada suhu normal (20°C), balok beton menunjukkan nilai tegangan maksimum tertinggi yaitu 18,982 MPa, ketika suhu dinaikkan menjadi 200°C tegangan maksimum mengalami sedikit penurunan 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.

Perbandingan hasil berdasarkan fungsi logaritma antara hasil eksperimental laboratorium dengan hasil analisis model menggunakan metode elemen hingga bantuan perangkat lunak ANSYS ditunjukkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tegangan pada balok beton normal mengalami penurunan seiring dengan meningkat suhu, hal ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur memiliki pengaruh langsung terhadap degradasi kapasitas beton dalam menahan beban. Nilai koefisien determinasi atas fungsi logaritma $R^2 = 0,9396$ menunjukkan tingkat korelasi yang sangat kuat antara suhu dengan penurunan tegangan. Fungsi logaritma natural pada model ini menunjukkan bahwa

penurunan tegangan tidak bersifat linier melainkan cenderung tajam selaras dengan degradasi material. Model logaritma natural memberikan representasi yang tepat dalam menjelaskan hubungan tegangan dan suhu pada beton normal.



(a) Hasil ANSYS



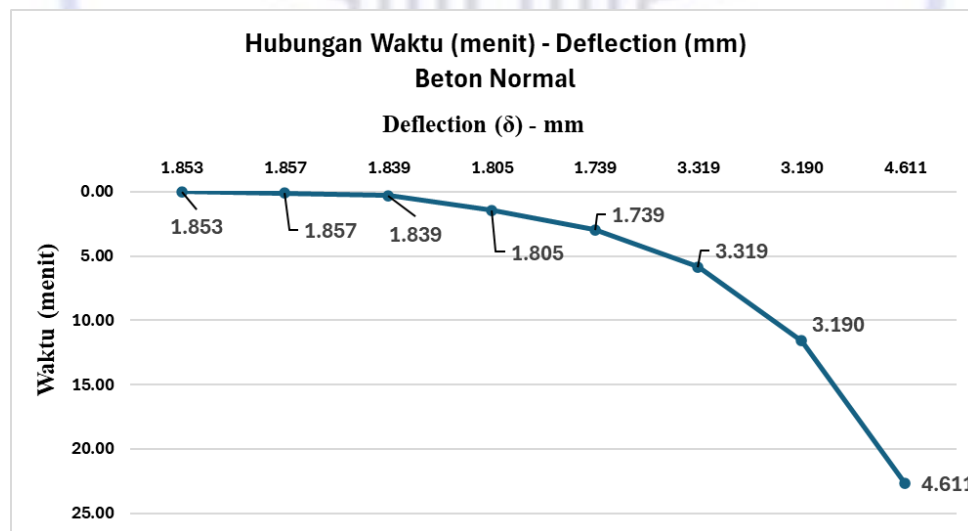
(b) Hasil Eksperimental Laboratorium

Gambar 4. 1 Perbandingan Hasil Fungsi Logaritma antara Hasil Laboratorium dan Analisis ANSYS pada Beton Normal

Pada Gambar 4.1 (a) bahwa hubungan antara tegangan terhadap suhu menggunakan perangkat lunak ANSYS sedangkan pada (b) menampilkan hubungan rasio kekakuan lentur (EI/C) terhadap suhu hasil uji eksperimental laboratorium. Kedua grafik ini secara umum memperlihatkan tren yang konsisten.

Nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,979$ menunjukkan tingkat relevansi yang sangat tinggi antar model dengan data hasil simulasi sedangkan pada hasil eksperimental laboratorium menunjukkan kecenderungan yang serupa pada aspek kekakuan lentur (EI/C) dimana nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,979$ yang menunjukkan hubungan linear yang sangat kuat. Pada kedua grafik tersebut diatas menunjukkan bahwa nilai determinasi R^2 memiliki deviasi sebesar 4,02% antara hasil analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS terhadap hasil eksperimen laboratorium.

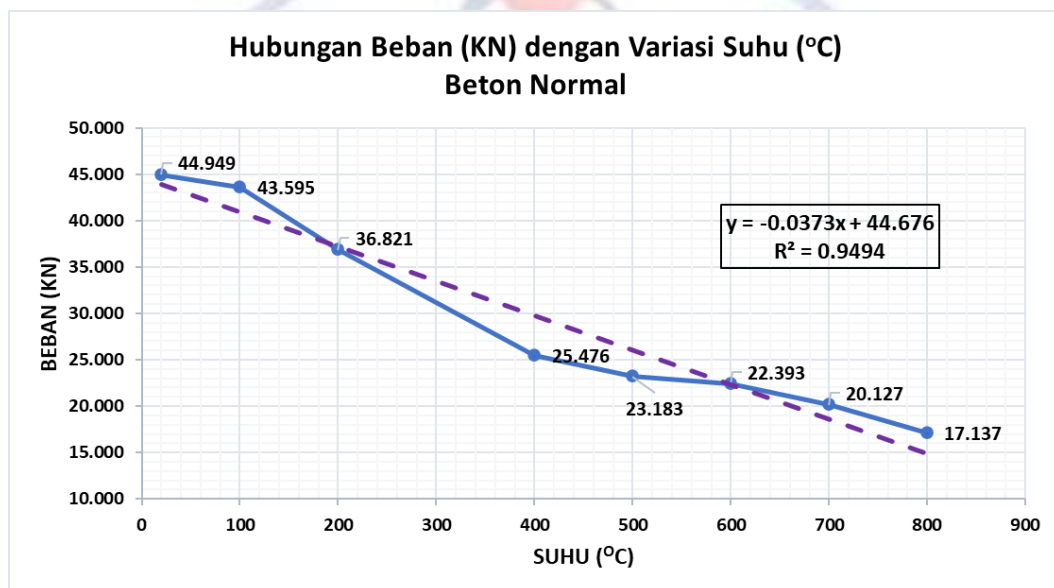
Hasil nilai *deflection* terhadap waktu pada beton normal ditunjukkan pada Gambar 4.2 dibawah ini, pada waktu awal 0,00 menit dengan suhu ruang 20°C beton mengalami *deflection* sebesar 1,853 mm. Nilai *deflection* mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambah variasi suhu tinggi hingga pada waktu ke 22,67 menit dengan suhu 800°C, beton mengalami *deflection* sebesar 4,611 mm. Pada hasil eksperimental beton normal yang sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.10 bahwa nilai *deflection* yang terjadi yaitu sebesar 5,00 mm, hal ini terdapat selisih 7,78% antara beton normal pada eksperimental dengan hasil analisis ANSYS.



Gambar 4. 2 Hubungan Waktu dengan *Deflection* Beton Normal

Kapasitas beban maksimal yang dapat ditahan oleh balok beton bertulang akibat variasi suhu ditunjukkan dalam Gambar 4.3. Balok beton pada suhu 20°C memiliki kapasitas menahan beban sebesar 44,949 KN dan menurun secara linear

seiring penambahan variasi suhu. Penurunan kapasitas beban menurun signifikan pada suhu 400°C sampai dengan 500°C masing-masing mampu menahan kapasitas beban sebesar 25,476 KN dan 23,183 KN, penurunan secara linear kembali terjadi pada suhu 600°C sampai 800°C dengan kapasitas beban masing-masing sebesar 22,393 KN dan 17,137 KN. Nilai koefisien determinasi atas fungsi logaritma $R^2 = 0,9494$ menunjukkan tingkat korelasi yang sangat kuat antara suhu dengan kapasitas beban yang diterima oleh balok beton normal akibat pengaruh variasi suhu tinggi. Model logaritma natural memberikan representasi yang tepat dalam menjelaskan hubungan kapasitas beban dan kenaikan variasi suhu pada beton normal.

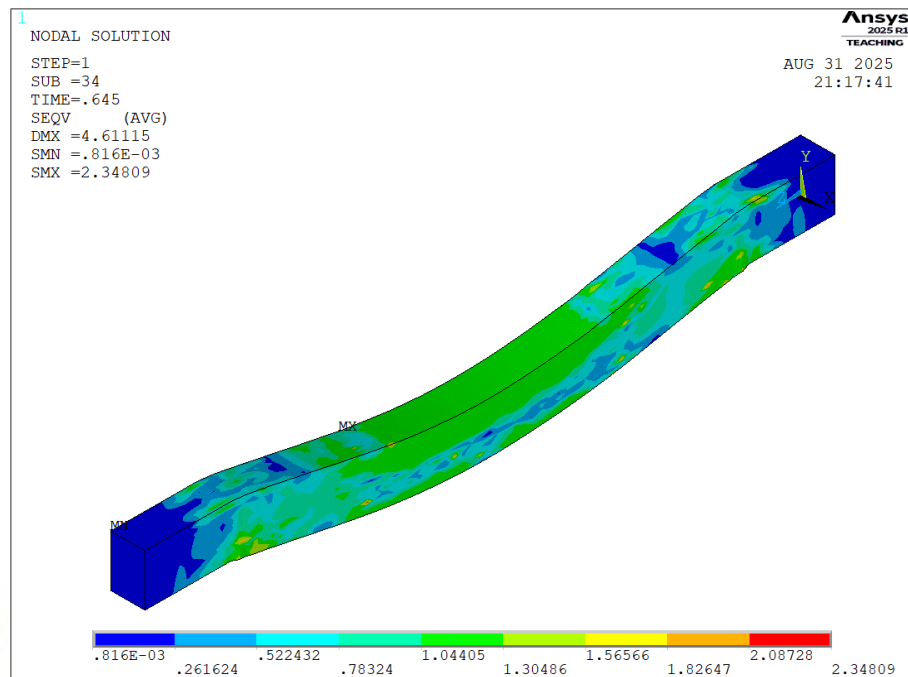


Gambar 4. 3 Kapasitas Beban Beton Normal (VAL-BN)

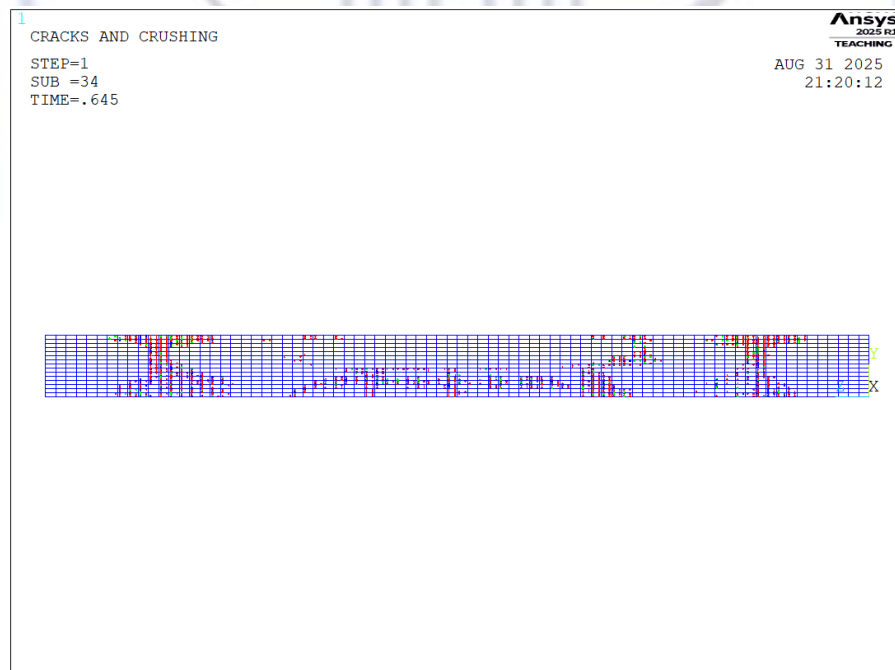
Ilustrasi gambar *plotting von mises* pada model beton normal ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan 4.5 dibawah ini, memperlihatkan kondisi terjadi perubahan tegangan pada suhu puncak 800°C dengan nilai tegangan yaitu 2,348 MPa. Hasil distribusi tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan 4.5. Pola retak ketiga *plotting von misses* pada *crack and crush* terjadi pada daerah *mid-span* dan di sebelah atas daerah *joint* – balok-kolom.

Untuk memperlihatkan perubahan perilaku mekanikal pada struktur beton bertulang pada komponen balok, dapat dilihat pola retak yang terjadi pada kondisi beban ultimit, seperti terlihat pada Gambar 4.5 berikut. Pola perubahan kontur

tegangan, *crack and crush* dari suhu 20°C sampai dengan 800°C dapat dilihat pada Lampiran E.



Gambar 4. 4 Pola Kontur Tegangan *Von Misses* Balok Beton Normal



Gambar 4. 5 Pola Retak Ketiga Balok Beton Normal

4.2 Hasil Penelitian Model Balok Beton *Sandwich*

Berdasarkan Tabel 4.3, terlihat bahwa seiring dengan peningkatan suhu terjadi penurunan kapasitas tegangan maksimum secara signifikan. 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.

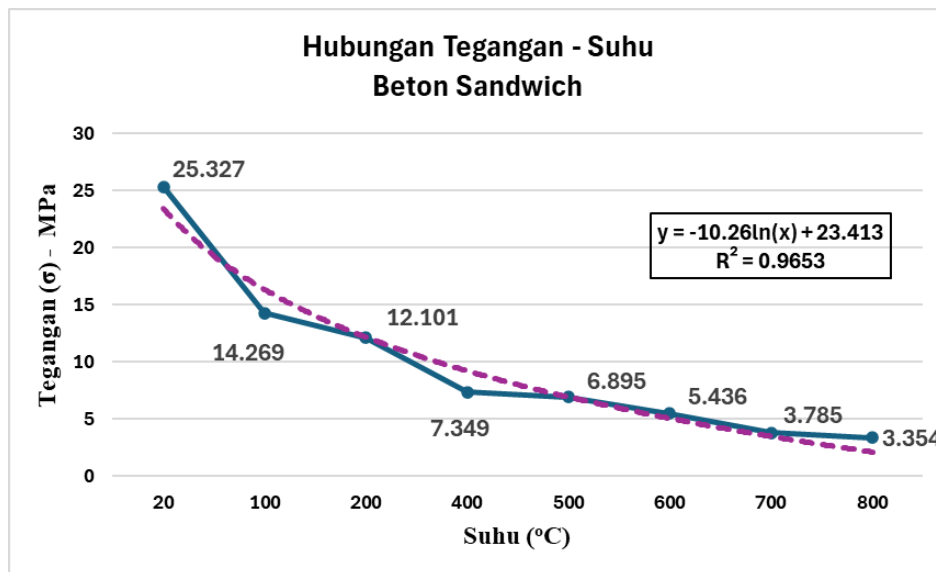
Tabel 4. 2 Hasil Analisis ANSYS pada Beton *Sandwich*

HASIL ANALISIS BETON <i>SANDWICH</i>									
No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu Beton (Mpa)		Tebal Selimut (mm)	Displacement Ratio	SMX	DMX	Waktu
			NORMAL	SANDWICH			(MPa)	(mm)	
1	VAL-SW-20	20	25.000	15.000	50	2.50	25.327	0.900	0
2	VAL-SW-100	100	25.000	15.000	50	2.50	14.269	1.721	0.1
3	VAL-SW-200	200	24.250	14.550	50	2.50	12.101	1.623	0.29
4	VAL-SW-400	400	21.250	12.750	50	3.00	7.349	1.731	1.45
5	VAL-SW-500	500	18.500	11.100	50	4.00	6.895	1.801	2.95
6	VAL-SW-600	600	15.000	9.000	50	4.50	5.436	3.358	5.87
7	VAL-SW-700	700	10.274	6.450	50	5.00	3.785	3.538	11.57
8	VAL-SW-800	800	6.750	4.050	50	5.50	3.354	4.419	22.67

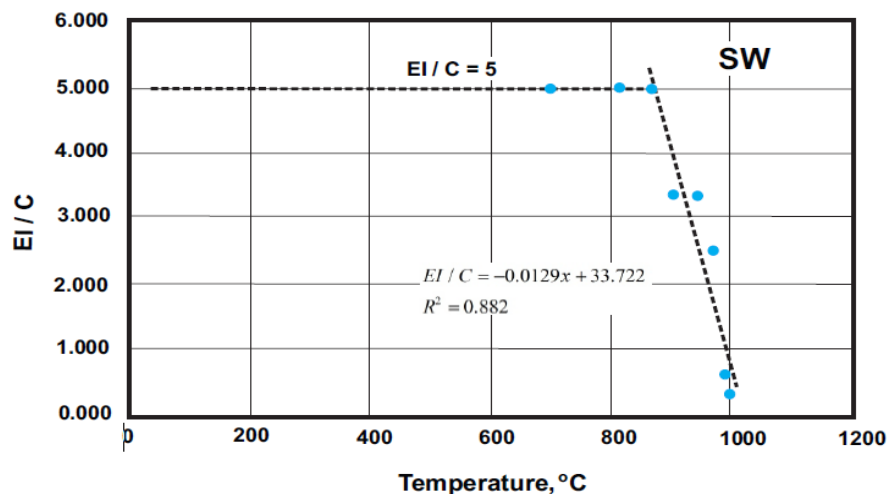
Hasil analisis hubungan tegangan terhadap suhu pada balok beton *Sandwich* menggunakan perangkat lunak ANSYS (Gambar 4.6a) menunjukkan bahwa suhu 20°C sampai dengan 200°C mengalami penurunan tegangan yang cukup signifikan yaitu dari 25,327 MPa menjadi 3,354 MPa, selanjutnya pada suhu menengah yaitu 200°C sampai dengan 500°C nilai tegangan sebesar 12,101 MPa dan 6,895 MPa, grafik menunjukkan penurunan linier dengan nilai tegangan akhir yaitu 3,354 MPa pada suhu 800°C. 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.

Hasil eksperimental laboratorium yang ditunjukkan pada Gambar 4.6b menunjukkan perilaku kekakuan lentur balok *Sandwich* yang ditunjukkan melalui parameter EI/C terhadap variasi suhu tinggi. Pada suhu 20°C sampai dengan 600°C, nilai EI/C relatif mendekati 5, hal ini menunjukkan bahwa struktur masih mampu

mempertahankan kekakuan lentur walaupun telah mengalami pemanasan sampai dengan suhu 800°C dan mengalami penurunan yang drastis pada suhu 1000°C. Hubungan antara suhu dan kekakuan tersebut ditunjukkan dalam model regresi linear fungsi logaritma dengan persamaan $EI/C = -0,0129T + 33,722$ dan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,882$, hal ini menunjukkan bahwa beton mampu bertahan pada suhu menengah akibat berkurang nilai modulus elastisitas.



(a) Hasil ANSYS

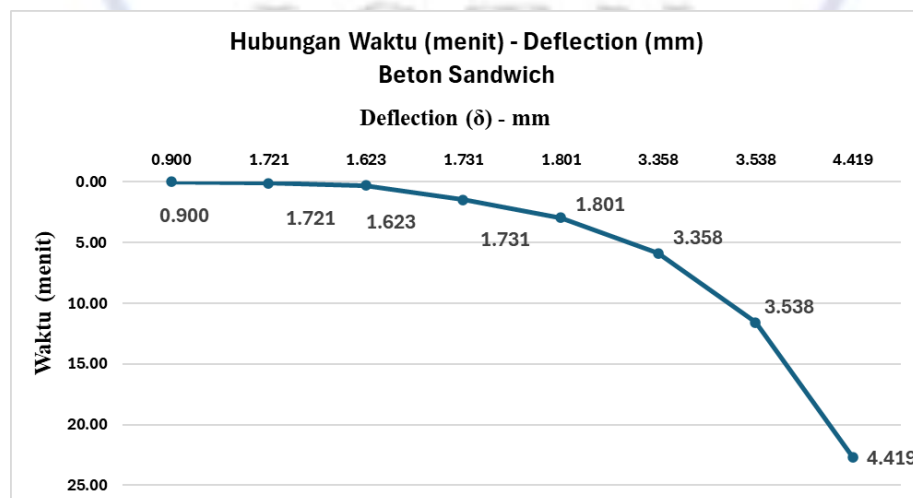


(b) Hasil Eksperimental Laboratorium

Gambar 4. 6 Perbandingan Hasil Fungsi Logaritma antara Hasil Laboratorium dan Analisis ANSYS pada Beton Sandwich

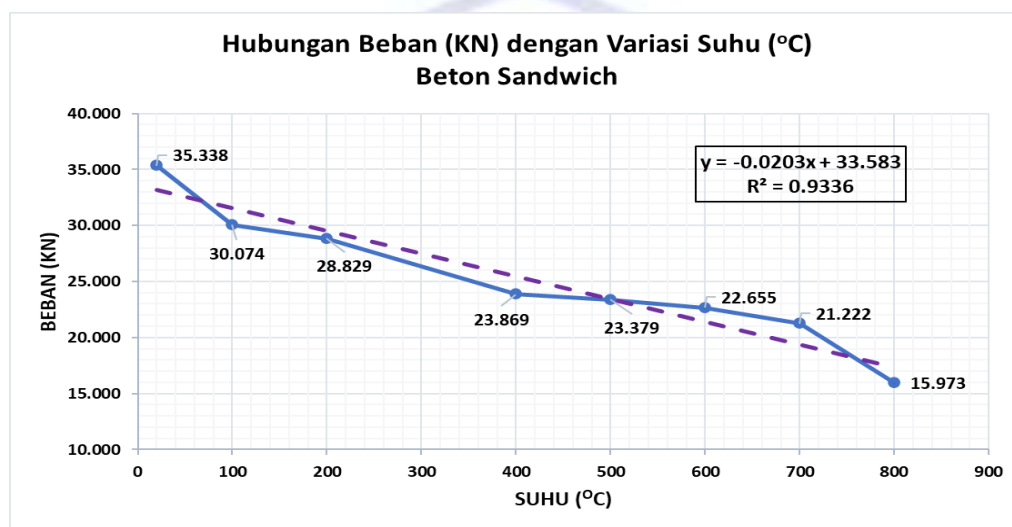
Perbandingan hasil analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS dan eksperimen di laboratorium menunjukkan tren yang konsisten bahwa peningkatan suhu berdampak langsung terhadap penurunan kapasitas struktur balok beton *Sandwich*. Perbedaan karakteristik penurunan dimana hasil ANSYS memprediksi penurunan tegangan secara gradual dari suhu 200°C sedangkan hasil eksperimen menunjukkan kestabilan relatif sampai suhu kritis dari suhu 600°C sampai dengan 800°C sebelum terjadi degradasi yang tajam. Perbedaan ini dapat diinterpretasikan sebagai konsekuensi dari asumsi ideal dalam model numerik ANSYS yang tidak sepenuhnya mempresentasikan fenomena fisik aktual di lapangan seperti retak mikro, distribusi kelembapan internal maupun perilaku spalling yang diakibatkan tekanan uap pada suhu tinggi. Hasil penelitian menggunakan perangkat lunak ANSYS menegaskan bahwa validasi eksperimen sangat penting untuk memperoleh gambaran kinerja struktur beton *sandwich* yang lebih representatif pada kondisi paparan suhu tinggi.

Hasil nilai *deflection* terhadap waktu pada beton normal ditunjukkan pada Gambar 4.7 dibawah ini, pada waktu awal 0,00 menit dengan suhu ruang 20°C beton mengalami *deflection* sebesar 0,900 mm. Nilai *deflection* mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambah variasi suhu tinggi hingga pada waktu ke 22,67 menit dengan suhu 800°C, beton mengalami *deflection* sebesar 4,611 mm. Pada hasil eksperimental beton normal yang sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.10 bahwa nilai *deflection* yang terjadi yaitu sebesar 0,200 mm.



Gambar 4. 7 Hubungan Waktu dengan *Deflection* Beton *Sandwich*

Kapasitas beban maksimal yang dapat ditahan oleh balok beton *Sandwich* akibat variasi suhu ditunjukkan dalam Gambar 4.6. Balok beton pada suhu 20°C memiliki kapasitas menahan beban sebesar 35,338 KN dan menurun secara linear seiring penambahan variasi suhu. Penurunan kapasitas beban menurun signifikan pada suhu 400°C sampai dengan 600°C masing-masing sebesar 23,869 KN dan 22,655 KN, kapasitas beban mengalami penurunan yang tidak signifikan pada suhu 700°C sampai dengan 800°C masing-masing sebesar 21,222 KN dan 15,973 KN.

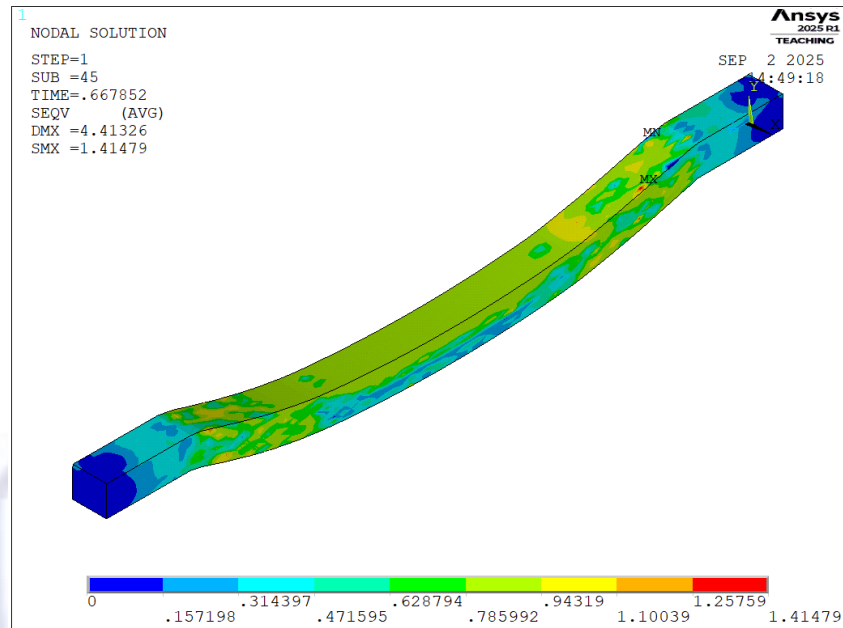


Gambar 4. 8 Kapasitas Beban Beton Normal (VAL-BN)

Nilai koefisien determinasi atas fungsi logaritma $R^2 = 0,9336$ menunjukkan tingkat korelasi yang sangat kuat antara suhu dengan kapasitas beban yang diterima oleh balok beton *sandwich* akibat pengaruh variasi suhu tinggi. Model logaritma natural memberikan representasi yang tepat dalam menjelaskan hubungan kapasitas beban dan kenaikan variasi suhu pada beton *Sandwich*.

Ilustrasi gambar *plotting von mises* pada model beton *sandwich* ditunjukkan pada Gambar 4.9 sampai dengan 4.12 dibawah ini, memperlihatkan kondisi terjadi perubahan tegangan pada suhu puncak 800°C dengan nilai tegangan yaitu 1,415 MPa. Hasil distribusi tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan 4.12. Pola retak ketiga *plotting von misses* pada *crack and crush* terjadi pada daerah *mid-span* dan di sebelah atas daerah *joint* – balok-kolom.

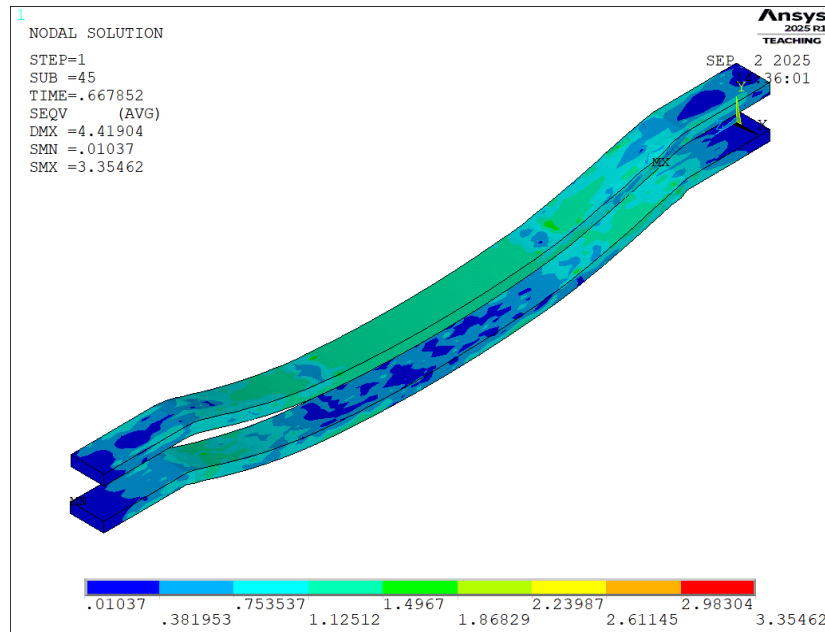
Untuk memperlihatkan perubahan perilaku mekanikal pada struktur beton bertulang pada komponen balok terlihat pada Gambar 4.10 dan 4.12 berikut. Pola perubahan kontur tegangan, *crack and crush* dari suhu 20°C sampai dengan 800°C dapat dilihat pada Lampiran E.



Gambar 4. 9 Pola Kontur Tegangan *Von Misses* Balok Beton *Sandwich* (Material Properti: Beton *Sandwich*)



Gambar 4. 10 Pola Retak Ketiga Balok Beton *Sandwich* (Material Properti: Beton *Sandwich*)



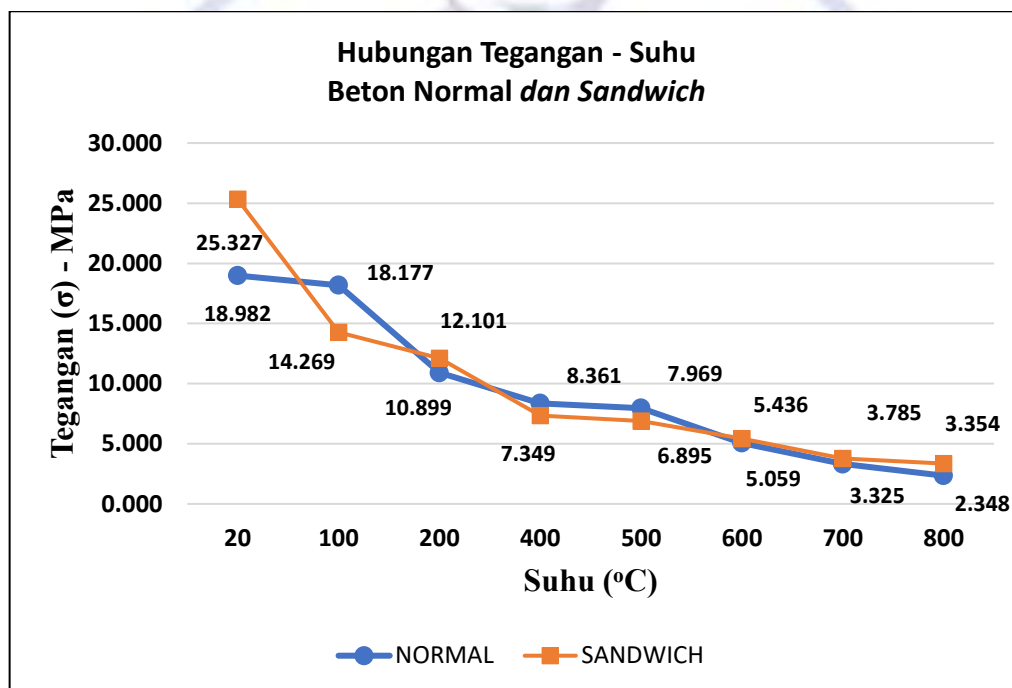
Gambar 4. 11 Pola Kontur Tegangan *Von Misses* Balok Beton *Sandwich* (Material Properti: Beton Normal)



Gambar 4. 12 Pola Retak Ketiga Beton *Sandwich* (Material Properti: Beton Normal)

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

Tegangan yang terjadi 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 balok *sandwich* mengalami penurunan drastis menjadi 14,269 MPa sedangkan 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 mengalami nilai tegangan yang stabil dimana selisih perbedaan tidak signifikan tetapi pada suhu akhir 800°C, balok beton *sandwich* memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi dibanding dengan balok beton normal yaitu 3,354 MPa.



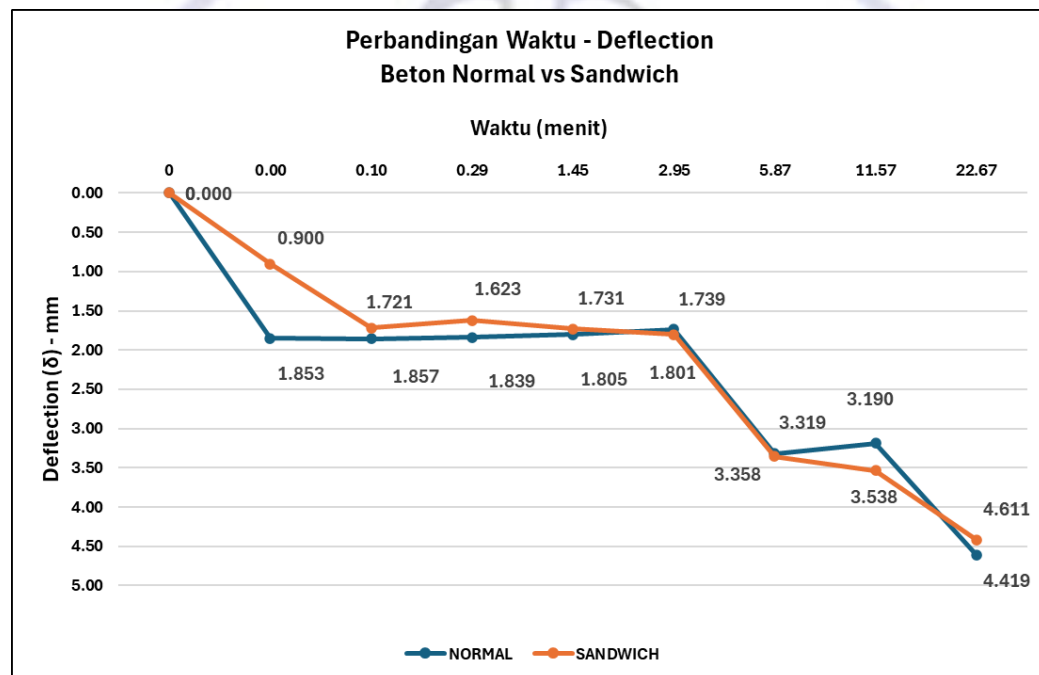
Gambar 4. 13 Hubungan Tegangan vs Suhu pada Beton Normal dan *Sandwich*

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

Nilai perbandingan antara waktu dan *deflection* pada balok beton normal dan balok beton *sandwich* ditunjukkan pada Gambar 4.14 dibawah ini bahwa pada nilai *deflection* yang terjadi pada balok beton *sandwich* pada menit pertama atau

pada suhu awal 20°C memiliki selisih 0,953 mm dimana 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.

Dari gambar 4.14, dapat dinyatakan bahwa melihat dari nilai *deflection* maka balok beton *sandwich* memiliki nilai *deflection* yang kecil dan stabil dibanding dengan balok beton normal. Hal ini disebabkan oleh faktor isolasi termal beton normal yang berada di atas dan di bawah balok beton *sandwich*.

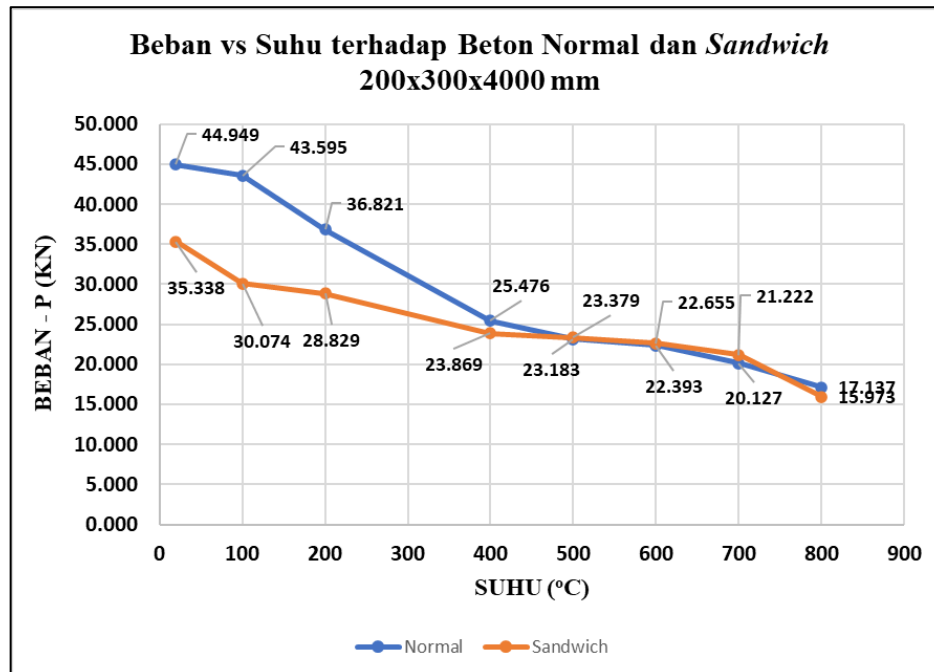


Gambar 4. 14 Perbandingan Waktu - *Deflection* pada Balok Beton Normal dan Beton *Sandwich*

4.5 Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton Normal dengan Beton *Sandwich*

Pengujian terhadap balok beton normal dan balok beton *sandwich* dengan dimensi 200×300 4000 mm menunjukkan adanya penurunan kapasitas beban (P) seiring dengan peningkatan suhu (Gambar 4.15). Secara umum, kedua tipe balok mengalami degradasi kapasitas lentur pada rentang suhu 20–400 °C, namun

terdapat perbedaan signifikan dalam pola penurunan beban yang ditunjukkan oleh kedua material.



Gambar 4. 15 Kapasitas Beban Balok Beton Normal dengan Balok Beton *Sandwich*

Pada suhu rendah (≤ 400 °C), kapasitas beban kedua tipe balok memiliki perbedaan yang signifikan yaitu pada balok beton normal menunjukkan kapasitas beban maksimal sebesar 44,949 KN sedangkan pada balok beton *sandwich* sebesar 35,338 KN. Rentang suhu 400–800 °C, kapasitas kedua balok mulai menunjukkan kestabilan yang lebih nyata dalam menerima kapasitas beban. Pada suhu 400 °C, kapasitas 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 400-700°C, kedua balok mengalami penurunan kapasitas beban pada suhu 800°C dimana balok beton normal menerima kapasitas beban sebesar 17,137 KN dan balok beton *sandwich* sebesar 15,973 KN. Dengan demikian, dapat dilihat bahwa 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 dibawah dari balok beton normal.

4.6 Ringkasan Hasil Analisis Balok Beton Normal dan *Sandwich*

Hasil analisis antara balok beton normal dan balok beton *sandwich* berdasarkan penelitian eksperimental dan analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS bahwa:

1. Balok beton normal menunjukkan bahwa tegangan awal pada suhu 20°C sebesar 18,982 MPa dan mengalami penurunan secara bertahap akibat kenaikan suhu sehingga nilai tegangan akhir pada suhu 800°C dengan sebesar 2,348 MPa atau rasio penurunan antar suhu awal dan suhu akhir sebesar 87,63%. Balok beton *sandwich* menunjukkan bahwa tegangan awal pada suhu 20°C sebesar 25,327 MPa atau mengalami kenaikan sebesar 25,05% dari balok beton normal. Pada suhu 800°C, balok beton *sandwich* mengalami penurunan nilai tegangan sebesar 3,354 MPa. Tegangan yang dihasilkan oleh kedua jenis balok tersebut bahwa balok beton *sandwich* memiliki tegangan yang lebih tinggi dari balok beton normal dikarenakan faktor isolasi termal yang berpengaruh memperlambat laju panas ke bagian inti beton. Berdasarkan Gambar 4.13 dapat dinyatakan bahwa balok beton *sandwich* memiliki tegangan yang lebih tinggi pada suhu awal 20°C sedangkan balok beton normal terdapat selisih 6,345 MPa dibawah dari balok beton *sandwich*.
2. Nilai *deflection* yang dihasilkan analisis balok beton normal menggunakan perangkat lunak ANSYS pada suhu awal 20°C sebesar 1,853 mm pada suhu 800°C nilai *deflection* sebesar 4,611 mm apabila dibandingkan dengan hasil eksperimental *deflection* yang dihasilkan sebesar 5,50 mm atau selisih sebesar 0,389 mm. Analisis balok beton *sandwich* menggunakan ANSYS dihasilkan nilai *deflection* sebesar 4,419 mm sedangkan hasil eksperimental didapatkan nilai 0,200 mm.
3. Kapasitas beban maksimal balok beton normal yang dihasilkan menggunakan perangkat lunak ANSYS pada suhu normal 20°C sebesar 44,949 KN dimana seiring penambahan suhu maka kapasitas beban balok beton pada suhu akhir 800°C sebesar 17,137 KN, dibandingkan dengan balok beton *sandwich* nilai

kapasitas beban maksimal yang diterima pada suhu normal 20°C sebesar 35,338 KN sedangkan pada suhu akhir 800°C sebesar 15,973 KN. Berdasarkan dari Gambar 4.15 kapasitas beban yang diterima oleh balok beton *sandwich* pada suhu awal berada dibawah balok beton normal, seiring bertambah suhu kapasitas beban maksimal balok beton *sandwich* lebih stabil dibanding balok beton normal sampai dengan suhu akhir 800°C.

4.7 Hasil Pengembangan Model Balok Beton Normal dan *Sandwich*

Dari hasil penelitian yang dilakukan pada Sub Bab 4.1 dan 4.2 maka penelitian selanjutnya melakukan tahap pengembangan berdasarkan pengambilan *sample* gambar kerja struktur pada Proyek Gedung di Jawa Timur. Pengembangan balok beton dengan variasi model balok antara lain:

1. Model balok beton normal 300x400x4000 mm, mutu beton normal (f_c') yang digunakan $f_c' : 25\text{MPa}$ mm menggunakan tulangan utama menggunakan 6Ø16 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420\text{ MPa}$. Tulangan sengkang menggunakan D13-100/200 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420\text{ MPa}$. Nilai modulus elastisitas, tegangan-regangan dipengaruhi oleh variasi suhu.
2. Model balok beton normal dan *Sandwich* 300x400x4000 mm mutu beton normal (f_c') yang digunakan $f_c' : 25\text{MPa}$ mm, mutu beton *Sandwich* (f_c') yang digunakan $f_c' : 15\text{ MPa}$ menggunakan tulangan utama menggunakan 6Ø16 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420\text{ MPa}$. Tulangan sengkang menggunakan D13-100/200 mm dengan tegangan leleh dan $f_y = 420\text{ MPa}$. 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 mutu beton normal (f_c') yang digunakan $f_c' : 25\text{MPa}$ mm, mutu beton *Sandwich* (f_c') yang digunakan $f_c' : 15\text{MPa}$ mm menggunakan tulangan utama menggunakan 6Ø16 mm dengan tegangan leleh $f_y = 420\text{ MPa}$. Tulangan sengkang menggunakan D13-100/200 mm dengan tegangan leleh dan $f_y = 420\text{ MPa}$. Nilai modulus elastisitas, tegangan-regangan dipengaruhi oleh variasi suhu. Beton normal berada sekeliling beton *Sandwich* dengan tebal beton normal yaitu 50 mm.

Masing-masing model balok beton pada kedua poin diatas dianalisis terhadap variasi nilai mutu beton, mutu baja dan tegangan-regangan akibat variasi suhu tinggi sedangkan kolom diasumsikan tidak terkena paparan suhu tinggi sehingga nilai properti material kolom adalah sama di setiap pengujian.

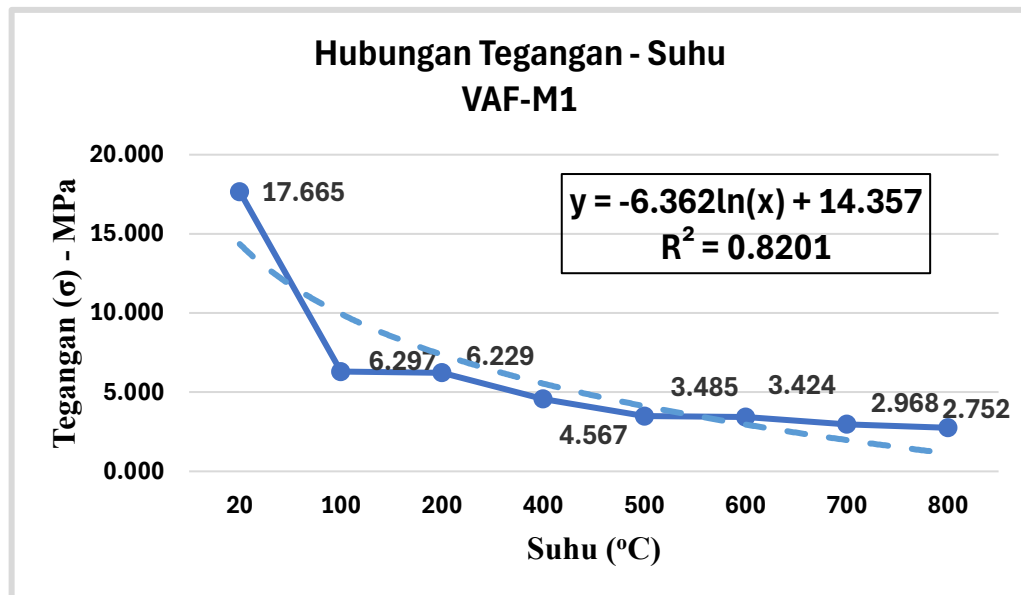
4.7.1 Hasil Analisis Model Balok Beton VAF-M1

Tabel 4.4 dan Gambar 4.16 menunjukkan hubungan antara tegangan (σ) terhadap variasi suhu tinggi pada balok beton VAF-M1. Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa tegangan beton mengalami penurunan signifikan seiring dengan meningkatnya suhu. Pada kondisi suhu awal 20°C, tegangan maksimum yang dicapai adalah sebesar 17,326 MPa dengan *deflection* sebesar 0,201 mm. Namun, ketika suhu meningkat menjadi 100°C, tegangan turun drastis menjadi 6,297 MPa dengan nilai *deflection* sebesar 0,215 mm, yang menunjukkan terjadinya penurunan kekuatan struktural sebesar lebih dari 60% dari kondisi awal.

Tabel 4. 3 Hasil Analisis ANSYS pada Beton VAF-M1

HASIL ANALISIS BETON NORMAL (300X400 MM)							
No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu	Tebal Selimut	Displacement Ratio	SMX	DMX
			Beton (Mpa)	(mm)		(MPa)	(mm)
1	VAF-M1-20	20	25,000	20	2,50	17,665	2,886
2	VAF-M1-100	100	25,000	20	2,50	6,297	3,087
3	VAF-M1-200	200	24,250	20	2,50	6,229	2,537
4	VAF-M1-400	400	21,250	20	2,50	4,567	3,390
5	VAF-M1-500	500	18,500	20	2,50	3,485	2,691
6	VAF-M1-600	600	15,000	20	2,50	3,424	2,203
7	VAF-M1-700	700	10,274	20	2,50	2,968	3,215
8	VAF-M1-800	800	6,750	20	2,50	2,752	3,099

Selanjutnya, pada rentang suhu 200–400°C, penurunan tegangan masih berlanjut namun relatif lebih lambat, dengan nilai tegangan sebesar 6,229 MPa pada 200°C dengan nilai *deflection* sebesar 2,537 mm dan menurun menjadi 4,567 MPa pada 400°C sebesar 3,390 mm. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun penurunan tidak sedrastis pada fase awal (20–100°C), suhu tinggi tetap berpengaruh signifikan terhadap degradasi kapasitas material.



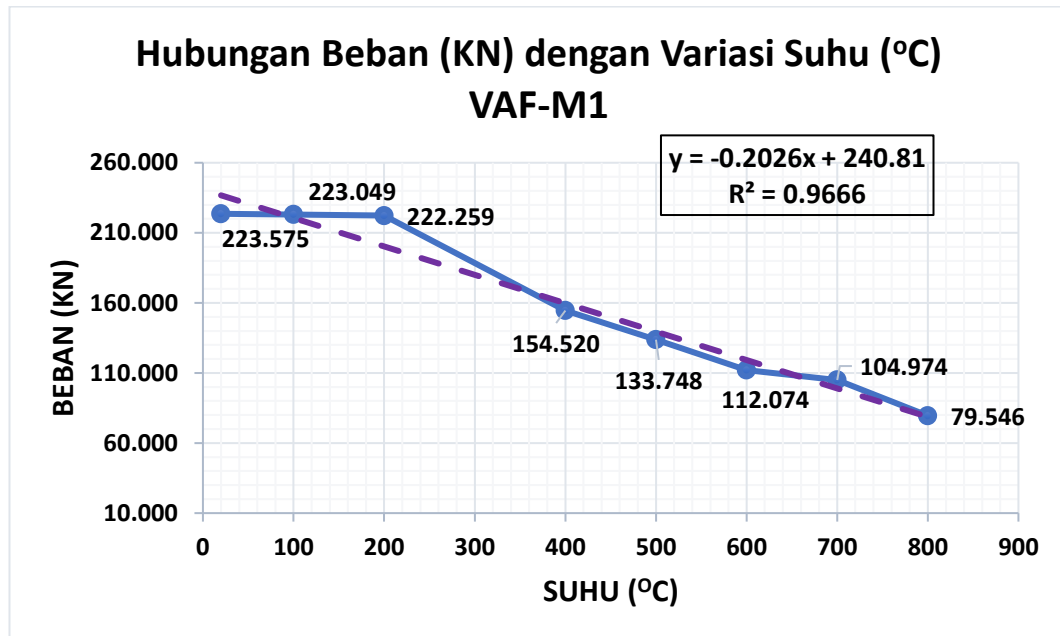
Gambar 4. 16 Tegangan-Suhu Balok Beton VAF-M1

Pada rentang suhu 500°C–800°C, kurva menunjukkan kecenderungan melandai dengan tegangan berkisar antara 3,485 MPa hingga 2,752 MPa dengan masing-masing nilai *deflection* sebesar 2,691 mm dan 2,203 mm. Pola ini menggambarkan bahwa setelah suhu melewati titik kritis tertentu, tegangan beton cenderung stabil pada nilai yang lebih rendah, yang menandakan berkurangnya kemampuan balok dalam menahan beban akibat kerusakan mikrostruktur beton (retak termal, dehidrasi kalsium hidroksida, dan degradasi ikatan antar material penyusun).

Persamaan regresi yang diperoleh adalah $y = -6,232 \ln(x) + 14,142$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,825$. Nilai ini menunjukkan bahwa hubungan antara suhu dan tegangan adalah kuat menggunakan model fungsi logaritma, di mana 82,5% variasi tegangan dapat diprediksi oleh variabel suhu. Hal ini menegaskan bahwa peningkatan suhu memiliki pengaruh dominan terhadap penurunan kekuatan balok beton VAF-M1.

Gambar 4.17 merupakan hubungan kapasitas beban maksimum terhadap variasi suhu pada balok beton VAF-M1, terlihat bahwa peningkatan suhu berbanding lurus dengan penurunan kapasitas beban yang mampu diterima oleh balok beton. Pada kondisi suhu 20°C, balok mampu menahan beban sebesar 223,575 KN kemudian pada suhu 200°C kapasitas relatif stabil dengan nilai beban

sebesar 222,359 KN yang menunjukkan bahwa pada suhu tersebut degradasi struktur material beton belum signifikan.



Gambar 4. 17 Kapasitas Beban Beton Normal (VAF-M1)

Suhu meningkat diatas 200°C, terjadi penurunan kapasitas beban secara lebih nyata. Pada suhu 400°C beban maksimum yang terjadi menjadi 154,520 KN dan terus mengalami penurunan pada suhu 500°C sebesar 133,748 KN sampai dengan nilai minimum sebesar 79,546 KN pada suhu 800°C. Fenomena ini konsisten dengan perilaku termal beton dimana pada suhu 300° – 400°C mulai terjadi kerusakan mikrostruktur beton seperti retak akibat ekspansi suhu agregat.

Hubungan antara suhu dan kapasitas beban dapat didekati dengan persamaan $y = -0,2026x + 240,81$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9666$ yaitu menunjukkan bahwa model linier memiliki hubungan sangat kuat dalam mempresentasikan hubungan kenaikan suhu dengan kapasitas beban yang bersifat konsisten.

4.7.2 Hasil Analisis Model Balok Beton VAF-M2

Tabel 4.5 menunjukkan hubungan antara tegangan (σ) terhadap variasi suhu tinggi pada balok beton VAF-M2. Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa

tegangan beton mengalami penurunan signifikan seiring dengan meningkatnya suhu. Pada kondisi suhu awal 20°C, tegangan maksimum yang dicapai adalah sebesar 14,831 MPa dengan *deflection* sebesar 0,220 mm. Namun, ketika suhu meningkat menjadi 100°C, tegangan turun drastis menjadi 12,205 MPa dengan nilai *deflection* sebesar 0,198 mm, yang menunjukkan terjadinya penurunan kekuatan struktural sebesar lebih dari 17,71% dari kondisi awal.

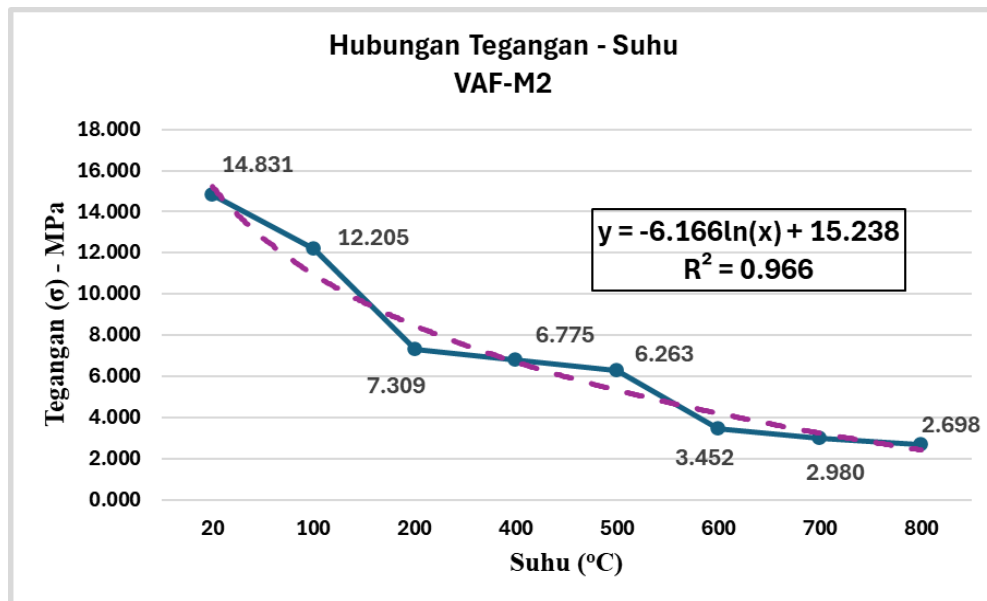
Tabel 4. 4 Hasil Analisis ANSYS pada Beton VAF-M2

HASIL ANALISIS BETON SANDWICH (300x400 MM)								
No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu Beton (Mpa)		Tebal Selimut (mm)	Displacement Ratio	SMX	DMX
			NORMAL	SANDWICH			(MPa)	(mm)
1	VAL-SW-20	20	25,000	15,000	50	1,28	14,831	2,201
2	VAL-SW-100	100	25,000	15,000	50	2,50	12,205	1,982
3	VAL-SW-200	200	24,250	14,550	50	2,50	7,309	2,192
3	VAL-SW-400	400	21,250	12,750	50	2,50	6,775	3,483
4	VAL-SW-500	500	18,500	11,100	50	2,50	6,263	2,152
5	VAL-SW-600	600	15,000	9,000	50	2,50	3,452	2,852
6	VAL-SW-700	700	10,274	6,450	50	2,50	2,980	1,631
7	VAL-SW-800	800	6,750	4,050	50	2,50	2,698	1,702

Selanjutnya, pada rentang suhu 200–400°C, penurunan tegangan masih berlanjut namun relatif lebih lambat, dengan nilai tegangan sebesar 7,309 MPa pada 200°C dengan nilai *deflection* sebesar 2,192 mm dan menurun menjadi 6,775 MPa pada 400°C sebesar 3,483 mm. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun penurunan tidak stabil pada fase awal (20–100°C), suhu tinggi tetap berpengaruh signifikan terhadap degradasi kapasitas material.

Gambar 4.18 dibawah ini menunjukkan kurva hubungan antara tegangan (σ) terhadap variasi suhu pada balok beton tipe VAF-M2. Secara umum, grafik memperlihatkan kecenderungan penurunan kapasitas tegangan seiring dengan meningkatnya suhu pemanasan, yang mengindikasikan adanya degradasi sifat mekanis material beton akibat paparan temperatur tinggi.

Pada suhu awal 20°C, nilai tegangan yang dicapai adalah sebesar 14,831 MPa, menunjukkan kondisi beton dalam keadaan optimal. Namun, ketika suhu dinaikkan hingga 100 °C, tegangan turun menjadi 12,205 MPa, atau mengalami penurunan sekitar 17,706%.



Gambar 4. 18 Tegangan-Suhu Balok Beton VAF-M2

Penurunan yang lebih signifikan terlihat pada rentang 100–200 °C, di mana tegangan turun hingga 7,309 MPa. Fase ini menunjukkan bahwa suhu tinggi mulai merusak ikatan pasta semen dan agregat, serta menyebabkan pelepasan ikatan kimiawi (dehidrasi senyawa hidrat). Selanjutnya, pada rentang suhu 200–500 °C, penurunan tegangan relatif lebih lambat dengan nilai berkisar antara 6,775 MPa pada 400°C dan 6,263 MPa pada 500°C. Kondisi ini menandakan bahwa beton masih mampu mempertahankan sebagian kekuatannya meskipun terjadi degradasi struktur internal.

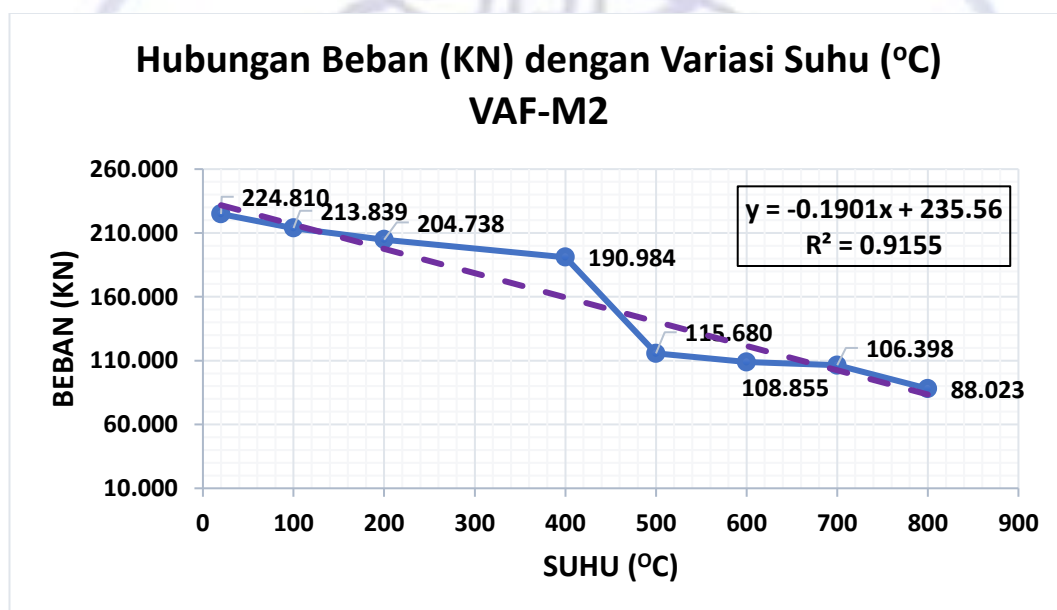
Namun, penurunan kembali drastis terjadi setelah melewati 500 °C, di mana pada 600°C tegangan hanya mencapai 3,452 MPa, kemudian semakin menurun menjadi 2,980 MPa pada 700°C, hingga mencapai nilai terendah 2,698 MPa pada 800°C. Penurunan pada fase ini berhubungan erat dengan kerusakan signifikan pada jaringan mikrostruktur beton, termasuk keretakan luas pada pasta semen, hilangnya kekompakan matriks, serta perubahan sifat mineral agregat yang mengalami ekspansi termal.

Persamaan regresi logaritma yang diperoleh yaitu $y = -6,166\ln(x) + 15,238$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,966$, menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi antara data eksperimen dan model matematis. Hal ini membuktikan

bahwa hubungan antara tegangan dan suhu pada balok beton VAF-M2 dapat diprediksi dengan sangat kuat menggunakan fungsi logaritmik.

Gambar 4.19 menunjukkan hubungan antara kapasitas beban maksimum (KN) terhadap variasi suhu pada balok beton VAF-M2. Secara umum, grafik memperlihatkan tren penurunan kapasitas beban seiring meningkatnya suhu, yang menandakan bahwa paparan temperatur tinggi secara signifikan menurunkan performa mekanis balok beton.

Pada kondisi awal suhu 20°C, kapasitas beban maksimum tercatat sebesar 224,810 KN. Ketika suhu meningkat hingga 100 °C, nilai kapasitas beban sedikit menurun menjadi 213,839 KN, atau mengalami penurunan sekitar 4,88%. Penurunan ini masih relatif kecil karena kerusakan mikrostruktur beton belum signifikan, meskipun sudah terjadi pelepasan kelembaban (evaporasi air bebas) dari pori-pori beton.



Gambar 4. 19 Kapasitas Beban Beton Normal (VAF-M2)

Kapasitas beban terus menurun secara bertahap hingga suhu 400 °C, dengan nilai sebesar 190,984 KN. Penurunan hingga titik ini menunjukkan bahwa proses dehidrasi kimiawi pada senyawa hidrat semen mulai berlangsung, sehingga ikatan antara pasta semen dan agregat melemah.

Penurunan drastis terjadi ketika suhu mencapai 500°C, di mana kapasitas beban turun tajam menjadi 115,680 KN, atau berkurang hampir 40% dari kapasitas

awal. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu kritis telah tercapai, ditandai dengan kerusakan signifikan pada struktur internal beton, pelepasan air terikat kimiawi (*chemically bound water*), serta munculnya retakan mikro yang berkembang menjadi retakan makro.

Pada rentang 500–700 °C, kapasitas beban relatif menurun lebih lambat dengan kisaran antara 108,55 KN hingga 106,398 KN. Namun, setelah mencapai suhu 800 °C, nilai kapasitas beban turun kembali menjadi 88,02 KN, atau hanya sekitar 39% dari kapasitas awal. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu tinggi mendekati 800°C, beton mengalami degradasi hampir menyeluruh akibat kerusakan mikrostruktur dan perubahan sifat mineral agregat yang tidak lagi mampu menahan beban secara efektif.

Persamaan regresi linier yang diperoleh yaitu $y = -0,1901x + 235,56$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,9155$, menandakan tingkat kesesuaian yang sangat kuat antara data eksperimen dengan model matematis. Hal ini memperkuat bahwa penurunan kapasitas beban pada balok VAF-M2 mengikuti pola linier negatif terhadap peningkatan suhu.

4.7.3 Hasil Analisis Model Balok Beton VAF-M3

Tabel 4.6 menunjukkan hubungan antara tegangan (σ) terhadap variasi suhu tinggi pada balok beton VAF-M3. Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa tegangan beton mengalami penurunan signifikan seiring dengan meningkatnya suhu. Pada kondisi suhu awal 20°C, tegangan maksimum yang dicapai adalah sebesar 20,373 MPa dengan *deflection* sebesar 2,689 mm. Namun, ketika suhu meningkat menjadi 100°C, tegangan turun drastis menjadi 11,335 MPa dengan nilai *deflection* sebesar 2,952 mm, yang menunjukkan terjadinya penurunan kekuatan struktural sebesar lebih dari 44,36% dari kondisi awal.

Tabel 4. 5 Hasil Analisis ANSYS pada Beton VAF-M3

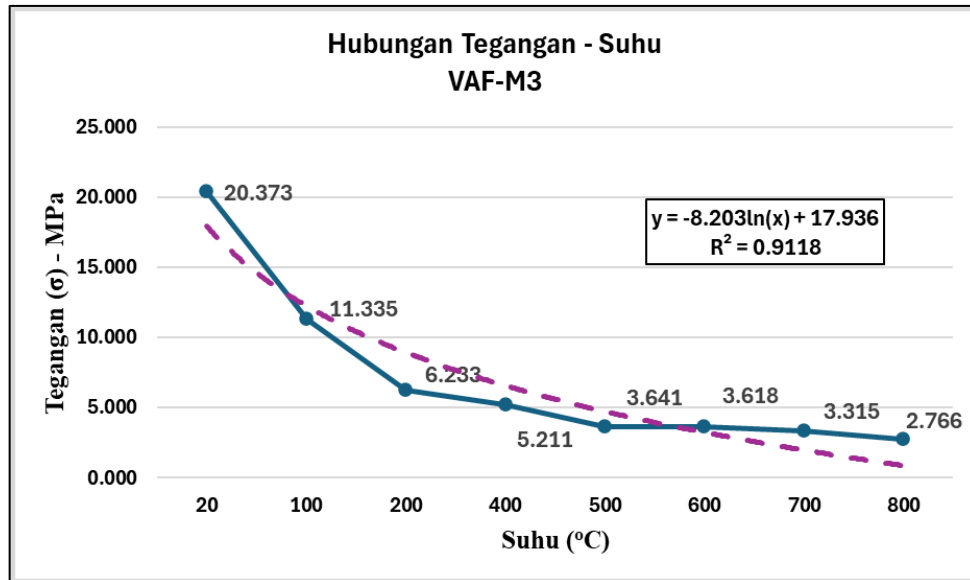
HASIL ANALISIS BETON SANDWICH (300x400 MM)								
No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu Beton (MPa)		Tebal Selimut (mm)	Displacement Ratio	SMX (MPa)	DMX (mm)
			NORMAL	SANDWICH				
1	VAL-SW-20	20	25,000	30,000	50	2,5	20,373	2,689
2	VAL-SW-100	100	25,000	30,000	50	2,5	11,335	2,952
3	VAL-SW-200	200	24,250	29,100	50	2,5	6,233	2,506
3	VAL-SW-400	400	21,250	25,500	50	2,5	5,211	3,148
4	VAL-SW-500	500	18,500	22,200	50	2,5	3,641	3,148
5	VAL-SW-600	600	15,000	18,000	50	2,5	3,618	2,165
6	VAL-SW-700	700	10,274	12,900	50	2,5	3,315	3,135
7	VAL-SW-800	800	6,750	8,100	50	2,5	2,766	2,178

Pengujian balok beton model VAF-M3 dilakukan dengan memberikan variasi suhu sampai dengan suhu maksimal 800°C. Hasil uji menunjukkan bahwa tegangan yang mampu diterima oleh balok beton pada suhu 20°C mampu menahan tegangan sebesar 20,373 MPa selanjutnya suhu dinaikkan 100°C, tegangan menurun drastis menjadi 11,335 MPa atau 55,6% dari tegangan awal (Gambar 4.10).

Selanjutnya, pada rentang suhu 200–400°C, penurunan tegangan masih berlanjut namun relatif lebih lambat, dengan nilai tegangan sebesar 6,233 MPa pada 200°C dengan nilai *deflection* sebesar 2,506 mm dan menurun menjadi 5,221 MPa pada 400°C sebesar 3,148 mm. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun penurunan tidak stabil pada fase awal (20–100°C), suhu tinggi tetap berpengaruh signifikan terhadap degradasi kapasitas material.

Penurunan berlanjut pada suhu 400°C dengan nilai tegangan sebesar 5,211 MPa. Pada suhu 500°C sampai dengan 700°C, tegangan mengalami penurunan yang kecil atau cenderung melandai dengan masing-masing tegangan sebesar 3,641 MPa, 3,618 MPa dan 3,315 MPa. Tegangan akhir pada suhu 800°C sebesar 2,766 MPa atau mengalami penurunan sebesar 86% dari tegangan awal.

Berdasarkan pada Gambar 4.20 terlihat bahwa hubungan antara tegangan dan suhu menunjukkan pola penurunan non-linier dengan karakteristik logaritma dengan persamaan regresi $y = -8,203\ln(T) + 17,936$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,9118$.

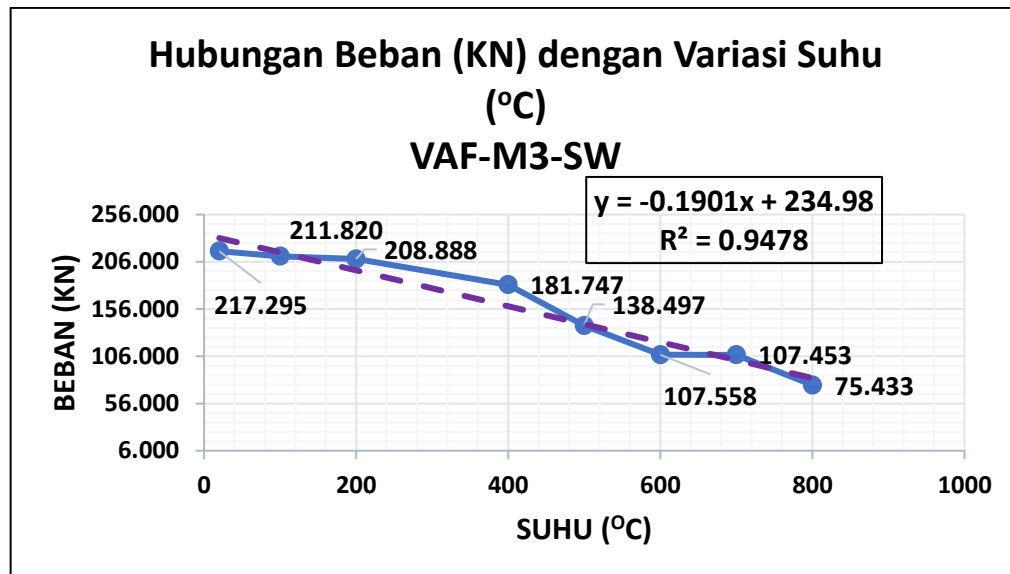


Gambar 4. 20 Tegangan-Suhu Balok Beton VAF-M3

Hal ini menunjukkan bahwa model regresi logaritma mampu menjelaskan 91% variasi data hasil pengujian yaitu sesuai untuk mempresentasikan perilaku degradasi tegangan balok model VAF-M3 pada variasi suhu tinggi.

Analisis hubungan kapasitas beban terhadap variasi suhu pada balok beton VAF-M3 ditunjukkan pada Gambar 4.20, secara umum kurva memperlihatkan kecenderungan penurunan kapasitas beban seiring dengan meningkat suhu pemanasan. Pada kondisi awal pada suhu 20°C, kapasitas beban sebesar 217,295 KN kemudian relatif menurun secara bertahap hingga mencapai 208,888 KN pada suhu 200°C. Penurunan kapasitas beban yang signifikan terjadi mulai pada suhu 400°C dimana kapasitas beban turun menjadi 181,747 KN dan semakin menurun tajam pada suhu 600°C sebesar 107,558 KN. Pada suhu 600°C dan 700°C kapasitas beban mengalami stabil yaitu 107,558 KN dan 107,453 KN sebelum terjadi penurunan kembali pada suhu 800°C sebesar 75,433 KN.

Persamaan regresi linier yang dihasilkan pada kurva diatas yaitu $y = -0,1901x + 234,98$ dengan nilai $R^2 = 0,9478$ dimana nilai koefisien determinasi R^2 mendekati nilai satu bahwa model regresi linier memiliki hubungan antara suhu dengan kapasitas beban sangat kuat.

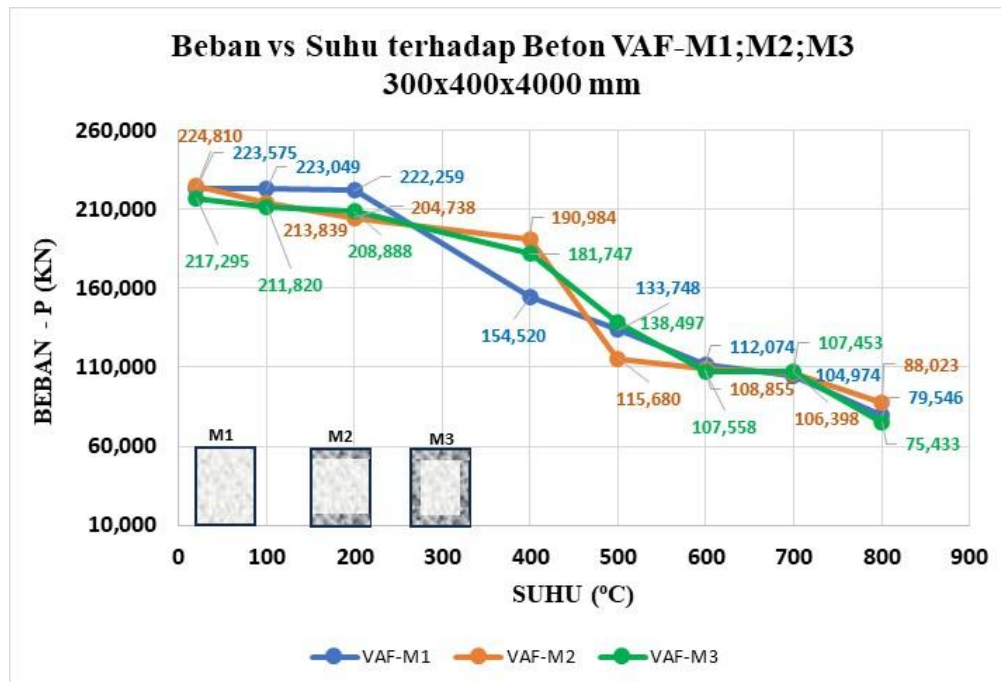


Gambar 4. 21 Kapasitas Beban Beton VAF-M3-SW

Peningkatan suhu merupakan faktor dominan yang berkontribusi terhadap penurunan kapasitas beban. Koefisien *slope* bernilai negatif yaitu -0,1901 menunjukkan bahwa setiap kenaikan suhu sebesar 1°C akan menurunkan kapasitas beban sebesar 19,01 KN.

4.7.4 Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton VAF-M1, VAF-M2 dan VAF-M3

Berdasarkan grafik hubungan beban (P) terhadap suhu (°C) yang ditunjukkan pada Gambar 4.22 pada balok beton VAF-M1, VAF-M2, dan VAF-M3 dengan ukuran 300×400×4000 mm, terlihat adanya penurunan kapasitas beban maksimum seiring dengan peningkatan suhu pemanasan. Secara umum, ketiga variasi balok menunjukkan tren yang serupa, yaitu penurunan kapasitas yang relatif lambat pada suhu rendah 100–300°C, kemudian mengalami degradasi signifikan pada suhu menengah hingga tinggi 400–800°C.



Gambar 4. 22 Perbandingan Kapasitas Beban Balok Beton VAF-M1,M2,M3

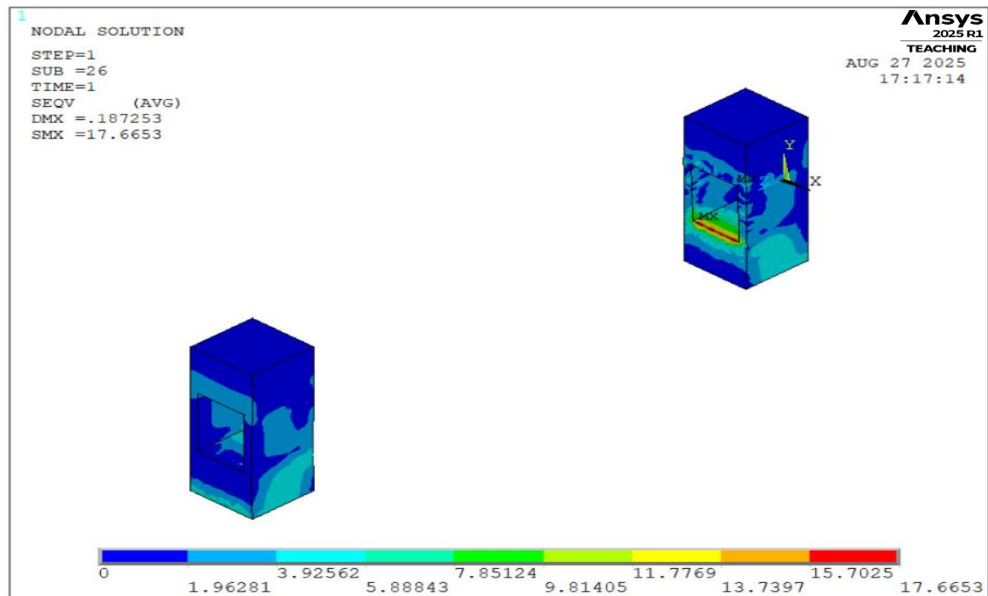
Pada kondisi awal suhu 20°C, balok beton VAF-M2 memiliki kapasitas beban maksimum tertinggi sebesar 224,81 kN, sedikit lebih tinggi dibandingkan VAF-M1 (223,575 kN) dan VAF-M3 (217,295 kN). Hal ini mengindikasikan bahwa VAF-M2 memiliki performa awal yang lebih baik terhadap beban aksial. Namun, pada 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 190,984 kN, sedangkan VAF-M1 dan VAF-M3 masih mampu mempertahankan kapasitas masing-masing 181,747 kN dan 208,888 kN.

Fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun VAF-M2 unggul pada suhu rendah, ketahanannya terhadap suhu tinggi relatif rendah dibandingkan kedua variasi lainnya. Sebaliknya, VAF-M3 menunjukkan ketahanan termal yang lebih baik, di mana pada suhu 600-700°C kapasitasnya stabil mencapai 107,453 kN dan 107,558 kN, dibanding VAF-M1 dan VAF-M2 berada di posisi menengah, dan ketiga variasi mengalami penurunan cukup signifikan mendekati suhu ekstrem.

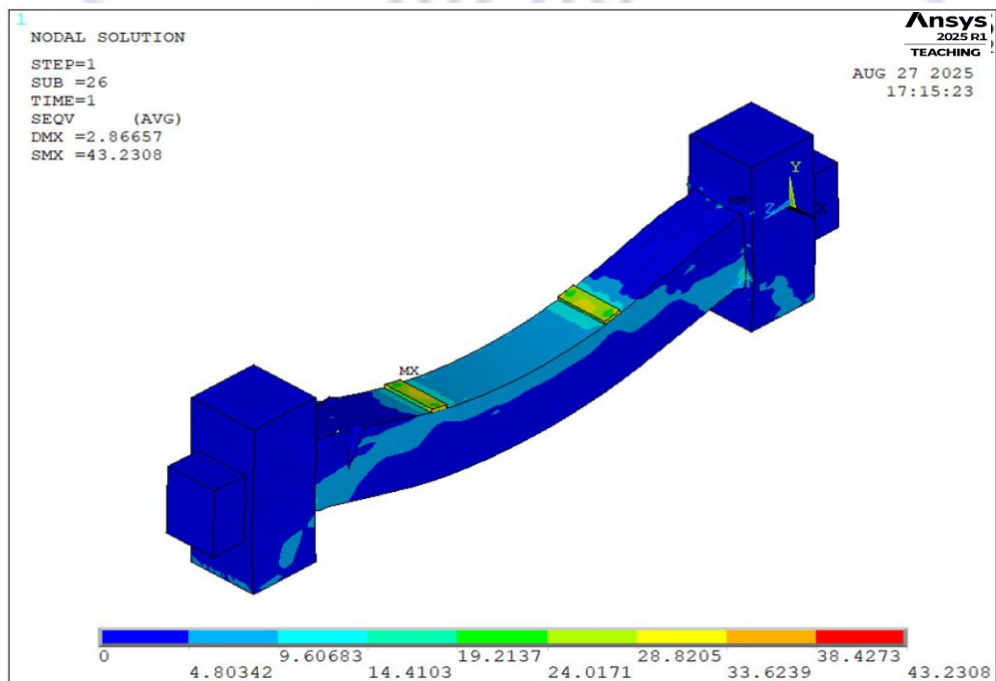
Dari segi kecenderungan kurva, dapat dikatakan bahwa VAF-M2 memiliki *initial strength* yang tinggi pada suhu awal 20°C namun penurunan yang tajam pada suhu 400-600°C; sedangkan VAF-M3 relatif stabil dan paling konsisten dalam

mempertahankan kapasitas pada suhu tinggi, sedangkan VAF-M1 berada pada kondisi transisi yang lebih moderat antara kedua jenis lainnya.

Ilustrasi gambar *plotting von Mises* pada model VAF-M1 berikut, memperlihatkan kondisi terjadi perubahan tegangan pada posisi pertemuan balok dan kolom dengan nilai tegangan ekivalen mencapai 17,66 MPa. Hasil distribusi tegangan pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 4.23 dan 4.24.

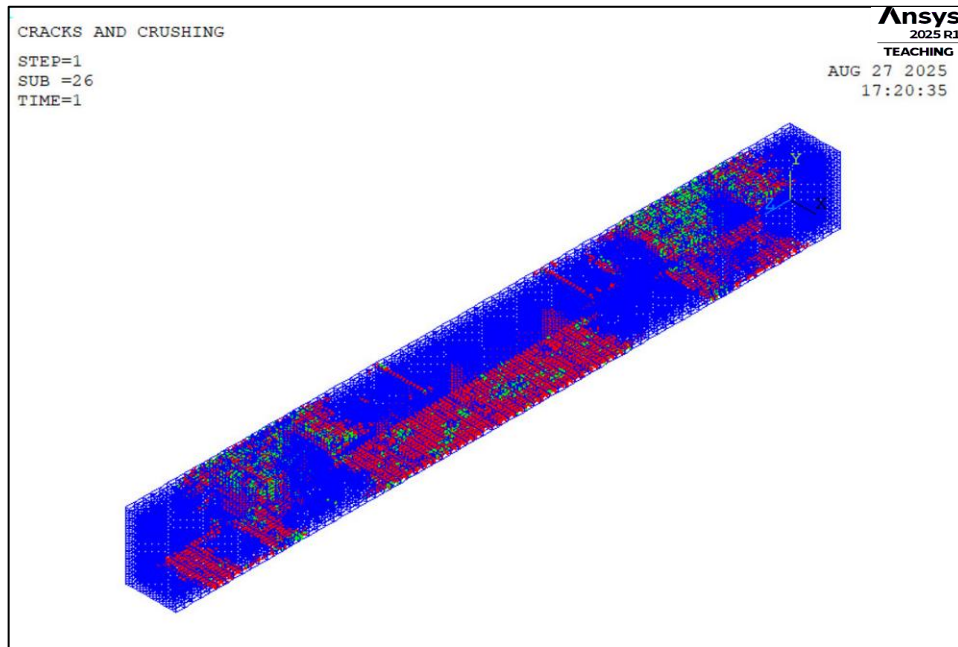


Gambar 4. 23 Tegangan Von Misses Countur pada bagian Kolom



Gambar 4. 24 Tegangan *Von Misses Countur* pada Bagian Kolom - Balok

Untuk memperlihatkan perubahan perilaku mekanikal pada struktur beton bertulang pada komponen balok, dapat dilihat pola retak yang terjadi pada kondisi beban ultimit, seperti terlihat pada Gambar 4.25 berikut.



Gambar 4. 25 Pola Retak Ketiga

Dari Gambar 4.24, terlihat bahwa pola distribusi konsentrasi tegangan terjadi pada bagian lapangan di posisi balok dan terjadi pada bagian atas pertemuan balok-kolom. Pola yang sama juga terjadi retak seperti pada Gambar 4.25, dimana konsentrasi retak terjadi di bagian bawah sekitar *mid-span* balok dan di sebelah atas daerah *joint* – balok-kolom.

4.7.5 Ringkasan Hasil Analisis Balok Beton VAF-M1, M2 dan M3

Hasil analisis antara balok beton VAF-M1, M2 dan M3 berdasarkan penelitian eksperimental dan analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS bahwa:

1. Balok beton VAF-M1 menunjukkan bahwa tegangan awal pada suhu 20°C sebesar 17,665 MPa dan mengalami penurunan secara bertahap akibat kenaikan suhu sehingga nilai tegangan akhir pada suhu 800°C dengan sebesar 2,752 MPa atau rasio penurunan antar suhu awal dan suhu akhir

sebesar 84,42%. Balok beton VAF-M2 menunjukkan bahwa tegangan awal pada suhu 20°C sebesar 14,831 MPa, pada suhu 800°C mengalami penurunan nilai tegangan sebesar 2,698 MPa sedangkan balok beton VAF-M3 menunjukkan tegangan awal pada suhu 20°C sebesar 20,373 MPa dan pada suhu 800°C mengalami penurunan tegangan menjadi 2,766 MPa.

2. Nilai *deflection* yang terjadi pada balok beton VAF-M1 pada suhu awal 20°C sebesar 2,886 mm dan pada suhu akhir 800°C menjadi 3,099 mm. Balok beton VAF-M2 pada suhu awal 20°C sebesar 2,201 mm kemudian seiring bertambah suhu maka pada suhu akhir 800°C *deflection* menjadi 1,702 mm. Balok beton VAF-M3 pada suhu awal 20°C sebesar 2,689 mm dan suhu akhir 800°C *deflection* menjadi 2,178 mm.
3. Kapasitas beban maksimal balok beton VAF-M1 yang dihasilkan menggunakan perangkat lunak ANSYS pada suhu awal 20°C sebesar 223,575 KN dimana seiring penambahan suhu maka kapasitas beban balok beton pada suhu akhir 800°C turun menjadi 79,546 KN, balok beton VAF-M2 kapasitas beban maksimal pada suhu awal 20°C sebesar 224,810 KN sedangkan suhu akhir 800°C kapasitas beban menjadi 88,023 KN. Balok beton VAF-M3 kapasitas beban maksimal pada suhu awal 20°C sebesar 217,295 KN dan pada suhu akhir 800°C kapasitas beban menjadi 75,433 KN.
4. Dari hasil pengujian ketiga jenis balok beton maka dapat disimpulkan bahwa balok beton dengan kode VAF-M3 memiliki *initial strength* yang tinggi, VAF-M1 relatif stabil dan paling konsisten dalam mempertahankan kapasitas pada suhu tinggi; sedangkan VAF-M2 berada pada kondisi transisi yang lebih moderat antara kedua jenis lainnya.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS terhadap beton bertulang normal dan beton *Sandwich* yang dapat disimpulkan bahwa :

1. 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).
2. Kapasitas beban maksimum balok beton *sandwich* memiliki memiliki kapasitas beban yang lebih stabil dibanding dengan balok beton normal, pada balok beton normal kapasitas beban yang dihasilkan menurun drastis pada suhu awal 20°C menuju diatas suhu 100°C dibanding dengan penurunan kapasitas beban yang dihasilkan oleh balok beton *sandwich*.
3. Nilai *deflection* pada balok beton *sandwich* lebih kecil dibanding balok beton normal pada suhu awal 20°C, diatas 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.
4. Program perangkat lunak ANSYS menjadi salahsatu alternatif program metode elemen hingga (*finite element method*) bidang teknik sipil untuk penelitian dan perhitungan struktur bangunan serta dapat digunakan sebagai penelitian kekuatan elemen struktur yang diakibatkan temperatur tinggi, serta dapat menjadi alternatif perbandingan pengujian antara penelitian eksperimental

laboratorium dengan analisis menggunakan ANSYS berdasarkan fungsi logaritma koefisien R^2 yang dihasilkan pada pengujian tersebut..

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan perangkat lunak ANSYS pada penelitian ini terhadap pengaruh suhu untuk mengetahui nilai kapasitas beban pada balok beton bertulang normal dan *Sandwich* maka beberapa saran dapat diajukan untuk penelitian selanjutnya dengan tujuan memperdalam pemahaman terhadap perilaku struktural balok beton bertulang akibat pengaruh suhu tinggi. Adapun saran dari penelitian telah dilakukan antara lain:

1. 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.
2. Penelitian ini hanya menguji terhadap paparan suhu puncak untuk mengetahui kekuatan tekan disarankan untuk melakukan pengujian lanjutan dengan mempertimbangkan durasi waktu terhadap variasi paparan suhu tinggi.
3. Dalam segi analisis ekonomis dan aplikatif di lapangan diperlukan kajian ekonomis dan teknis terhadap penerapan beton *Sandwich* sebagai alternatif material tahan api dalam konstruksi bangunan. Hal ini mencakup evaluasi efisiensi biaya, kemudahan pelaksanaan konstruksi (*workability*) dan manfaat jangka panjang terkait ketahanan struktural pasca paparan suhu tinggi.
4. Pengujian beban lain seperti lentur dan geser pada suhu tinggi disarankan untuk penelitian selanjutnya mengingat aplikasi beton *Sandwich* masih belum banyak diterapkan di lapangan sebagai elemen struktural.
5. Model tiga dimensi menggunakan *software* ANSYS diperlukan model *simple beam* sehingga memudahkan dalam analisis nilai *deflection* dan kapasitas beban yang diterima oleh balok beton akibat variasi suhu tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiguna., & Alkhamuddin, Alim. (2018). *Simulasi Perubahan Kuat Tekan Beton Pada Kondisi Ekstrim Pasca Pembakaran*. Palembang : Jurnal Deformasi Universitas PGRI Palembang.
- Afrizal, Yuzuar. (2014). *Analisis Kekuatan Beton Pascabakar Dengan Metode Numerik*. Bengkulu : Teknosia Universitas Bengkulu.
- ANSYS *Mechanical Academic Teaching Version* (2025). License No. cc28aadbb66f, ISTN, Jakarta.
- Aslani, F., & Bastami, M. (2018). Constitutive model for normal- and high-strength concretes at elevated temperatures. *Structural Concrete*, 19(1), 91–108. <https://doi.org/10.1002/suco.201700050>
- Aslani., & Bastami. (2011). *Constitutive Relationships for Normal- and High-Strength Concrete at Elevated Temperatures*. Technical Paper: ACI Materials Journal.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 1729:2002: *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2018). SNI : 1741-2008 : *Cara Uji Ketahanan Api Komponen Struktur Bangunan untuk Pencegahan Bahaya Kebakaran pada Bangunan Rumah dan Gedung*. Jakarta : BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847-2019 : *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta : BSN.
- 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*. Mataram: SSRG International Journal of Civil Engineering
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic Econometrics* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- International Organization for Standardization. (1999). *ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests—Elements of building construction—Part 1: General requirements*. ISO. Retrieved from <https://www.flammabilitytestingequipment.com>
- Kadhum, Mohammed Mansour. (2018). *Effect of Burning by Fire Flame on the Behavior of Reinforced Concrete Beam Models*. Babylon : Journal of Babylon University.
- Khoury, G. A. (2000). *Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures*. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429-447.
- Kodur., & Wang. (2013). *Effect of Temperature on Strength and Elastic Modulus of High-Strength Steel*. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Laka Suku, L. (2018). *Model dan Analisis perilaku Balok Beton Bertulang yang Berbeda Diameter Akibat Variasi Tata Letak Tulangannya Menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Bantuan Software ANSYS*. Papua: Universitas Cenderawasih.
- Li, L., & Purkiss, J. (2005). *Stress–strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures*. *Fire Safety Journal*, 40(7), 669–686.
- Malhotra, V. M. (1983). *High-strength concrete*. Ottawa: Canadian Government Publishing Centre.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis* (5th ed.). New Jersey: Wiley.

- Murtiadi, S., Akmaluddin, A., Anshari, B. (2020). *Flexural Stiffness of Normal and Sandwich Reinforced Concrete Beam Exposed to Fire Under Fixed Loading*. Amerika Serikat: I.RE.C.E.
- 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.
- Nakasone, N., (2006). *Engineering Analysis With ANSYS Software*. Burlington, MA : Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete (5th ed.)*. Pearson Education Limited.
- Omega Engineering. (2019). *Thermocouple Theory and Application*. Retrieved from <https://www.omega.com/>
- Pavani, H. P. (2020). *Micro-Structure Based Multi-Scale Thermo-Mechanical Characterization Of Portland Cements*. (Doctoral dissertation, National Institute of Technology, Warangal).
- Pauw, A. (1960). *Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density*. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 57, No. December 1960.
- 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, 83–91.
- Pinem, Daud. (2017). *ANSYS Menganalisis Berbagai Permasalahan Dalam Ilmu KeteKNikan*. Bandung : Informatika.
- Rao., & Tadepalli. (2024). *High-Temperature Behaviour of Concrete: A Review*. India: Conference Paper.
- Republik Indonesia. (2002). *Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung*. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Schneider, U. (1990). *Behaviour of concrete at high temperatures*. *ACI Materials Journal*, 87(2), 160–165

Suryanita, Reni., Ramadhan, W., Kamaldi, A. (2019). *Model Perilaku Tegangan dan Regangan Beton pada Suhu Tinggi dengan Software LUSAS*. Pekanbaru : Media Komunikasi Teknik Sipil.

Taufik, S., Tjitradi, D., Eliatun. (2017). *3D ANSYS Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beam Behavior under Different Collapsed Mechanisms*. Banjarmasin : International Journal of Mechanics and Applications.

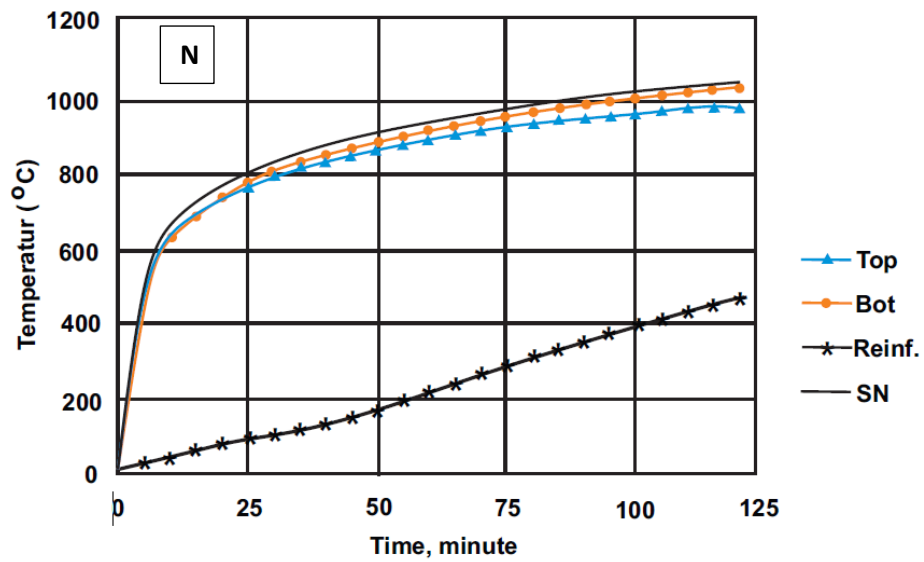
The European Union. (2004). *Design Of Concrete Structures - Part 1-2: General Rules Structural Fire Design*. Europe : The European Union Per Regulation.

Wuragil, Zacharias. (2023). *Daftar Kejadian Kebakaran Gedung Tinggi di Jakarta Sebelum K-Link Tower Hari Ini. Juli 15, 2024.*
<https://www.tempo.co/arsip/daftar-kejadian-kebakaran-gedung-tinggi-di-jakarta-sebelum-k-link-tower-hari-ini-166580>.

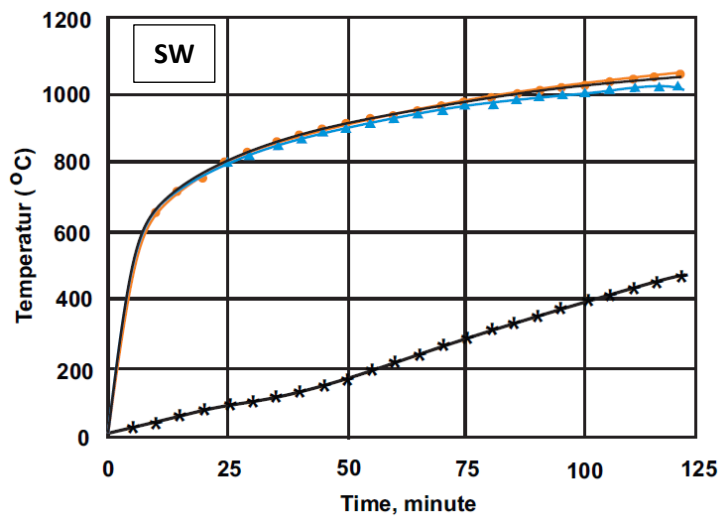


DAFTAR LAMPIRAN

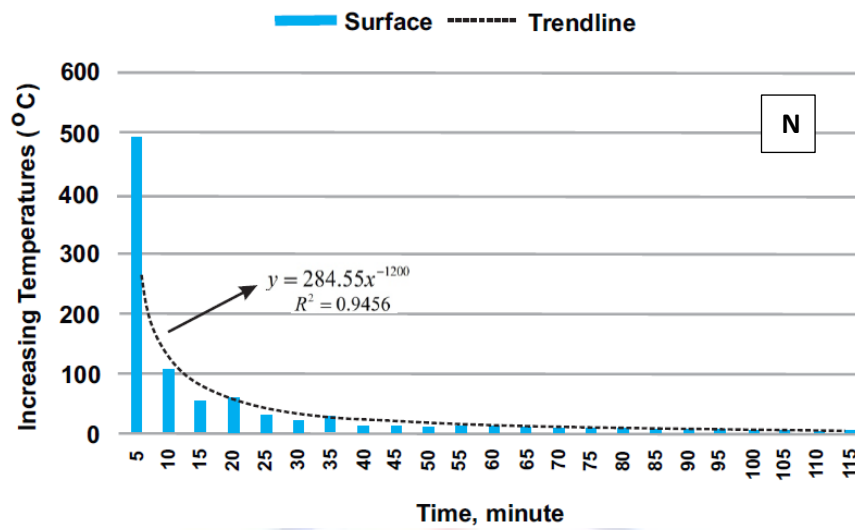
Lampiran A. Data Eksperimental Laboratorium



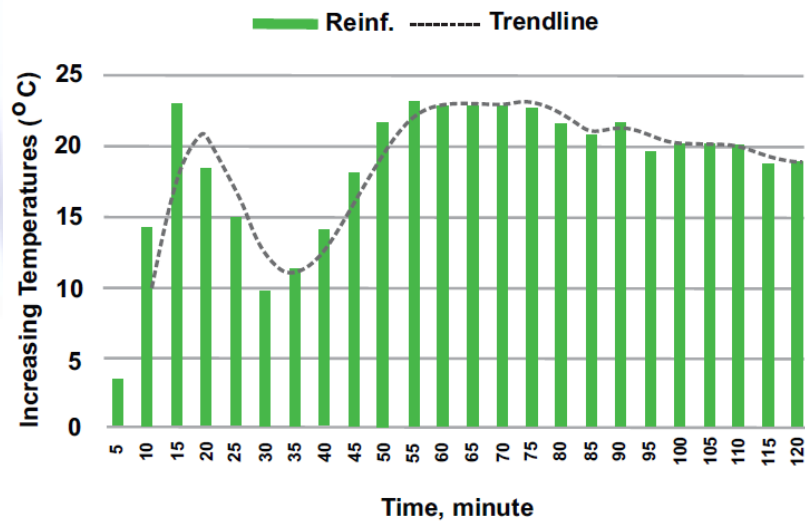
Grafik Hubungan Suhu dan Waktu Balok Beton Normal



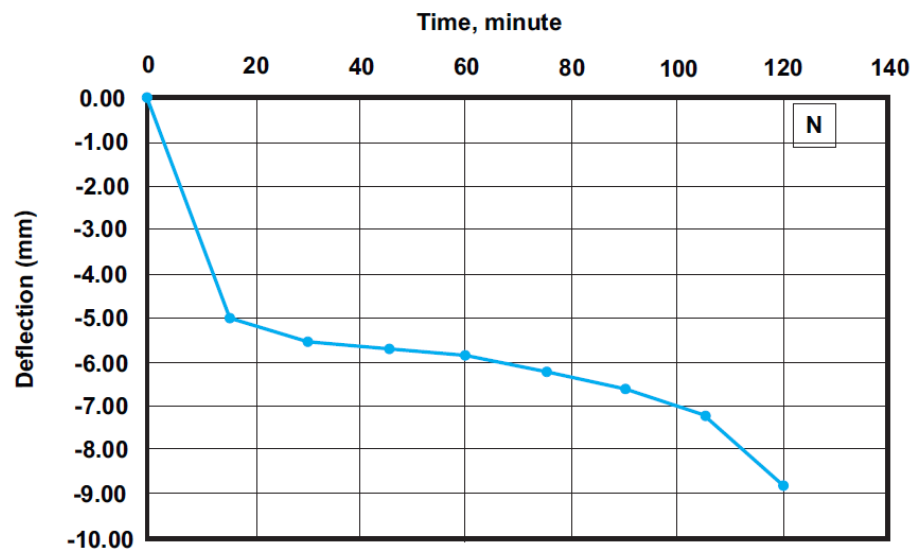
Grafik Hubungan Suhu dan Waktu Balok Beton *Sandwich*



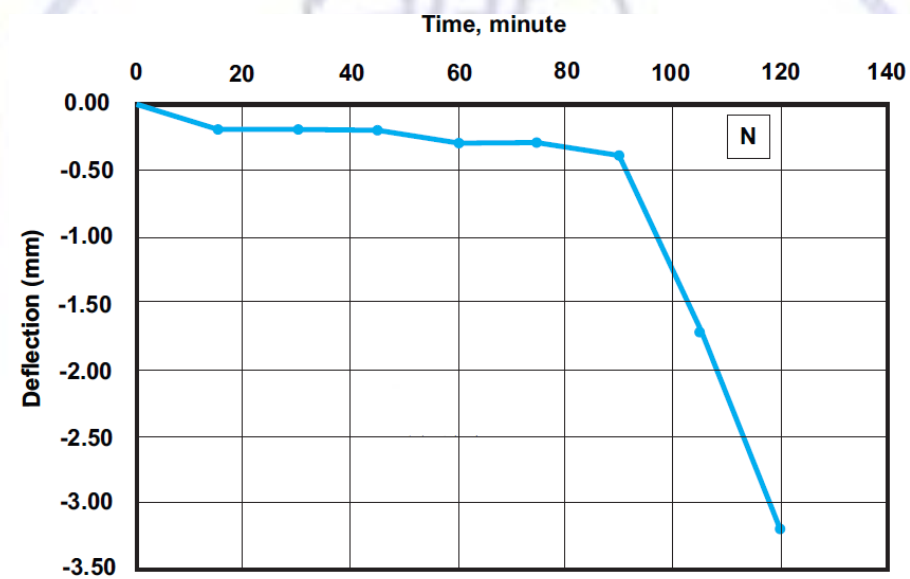
Grafik Hubungan Suhu dan Waktu pada Permukaan Balok Beton Normal



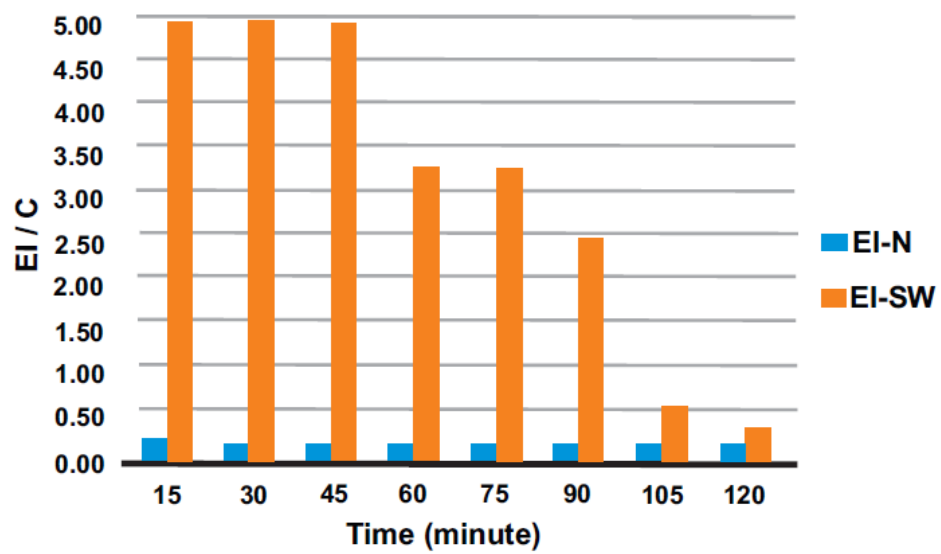
Grafik Hubungan Suhu dan Waktu pada Tulangan Balok Beton Normal



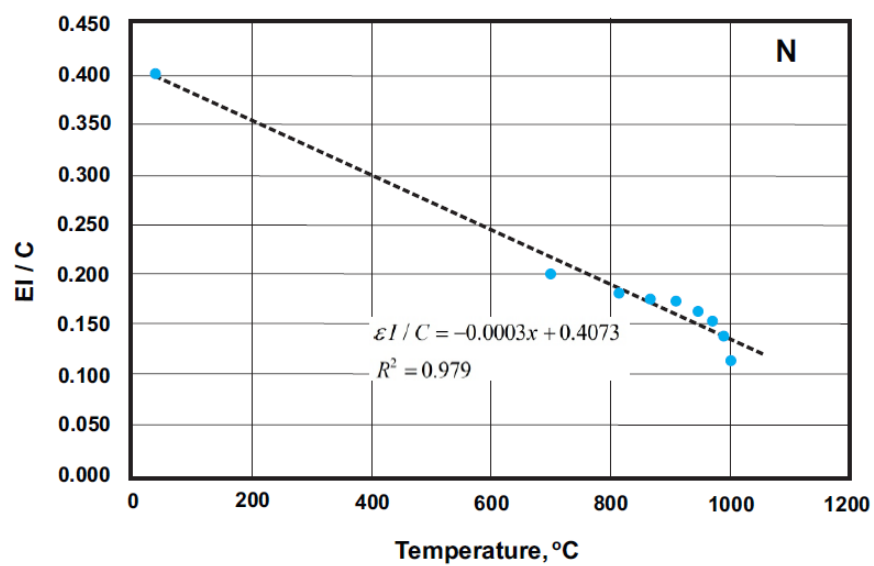
Grafik Hubungan *Deflection* terhadap Waktu pada Balok Beton Normal



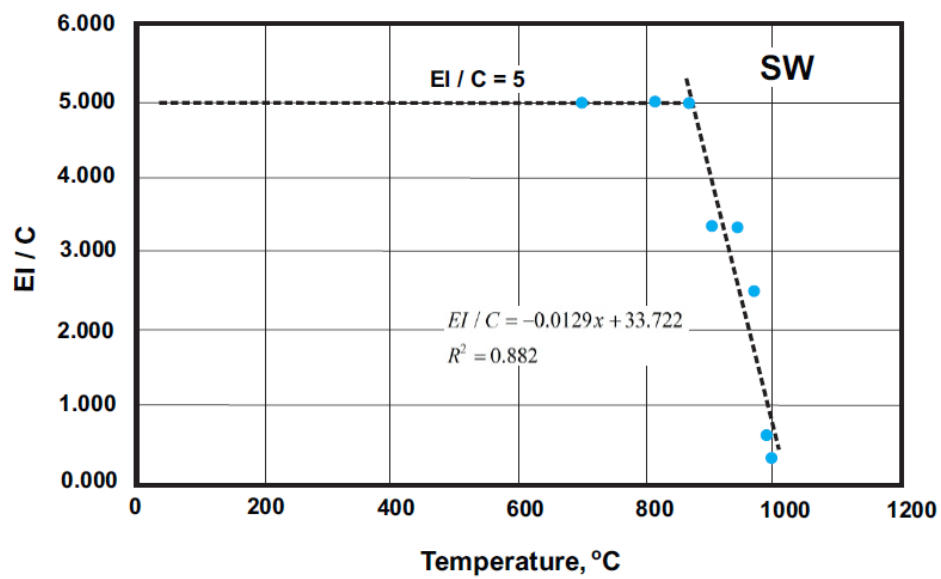
Grafik Hubungan *Deflection* terhadap Waktu pada Balok Beton *Sandwich*



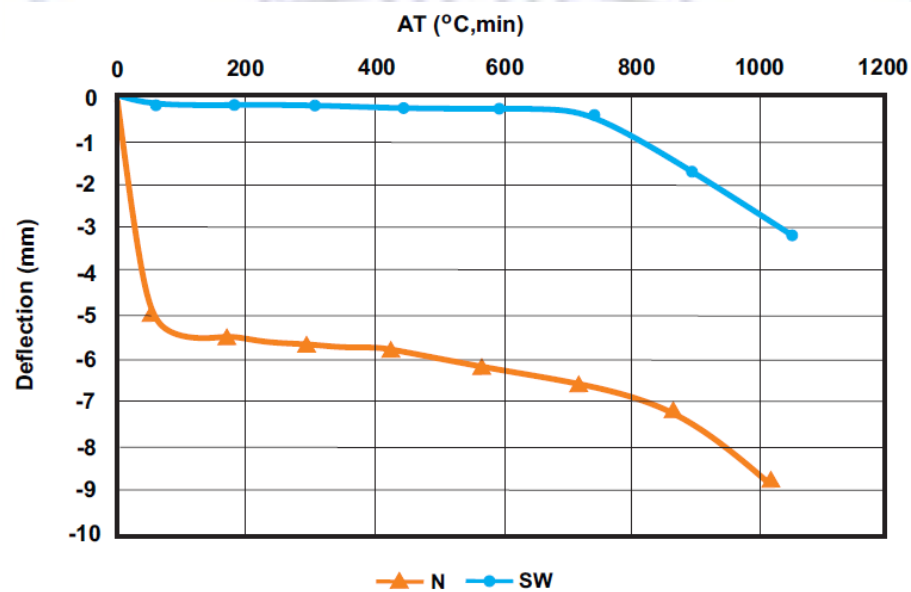
Grafik Kekakuan Lentur Balok Beton Normal dan *Sandwich*



Grafik Regresi Kekakuan Lentur Balok Beton Normal



Grafik Regresi Kekakuan Lentur Balok Beton *Sandwich*



Grafik Perbandingan *Deflection* Balok Beton Normal dan *Sandwich*

Lampiran B. Material Properti Beton

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal **25** Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code
Mutu Beton	f_c' T	25 Mpa	EN
Suhu	T	100 °C	
Modulus of Elasticity	E_c	23500 Mpa	
Modulus of Elasticity -T	$E_{c,T}$	25636.36 Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	ν	0.2	
Strain max.	$\epsilon_{max,T}$	0.0035	ASCE Manual 1992
Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity -Mises Plasticity - Multilinear (General)			

Strain (ϵ_c)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.00000	0.0000
0.00010	2.5636
0.00030	4.1020
0.00045	6.0153
0.00060	7.8367
0.00080	10.1224
0.00100	12.2449
0.00130	15.1224
0.00160	17.6327
0.00190	19.7755
0.00220	21.5510
0.00250	22.9592
0.00280	24.0000
0.00310	24.6735
0.00350	25.0000
0.00380	24.8163
0.00420	24.0000
0.00460	22.5306
0.00500	20.4082

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	3.5	(ft = 0.70√f'c')
Uniaxial Crushing Stress	25	f'c'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal

25 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic				Code
Mutu Beton	fc'T	24.25	Mpa	EN
Suhu	T	200	°C	
Modulus of Elasticity	Ec	23500	Mpa	
Modulus of Elasticity - T	EcrT	21363.64	Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	v	0.2		
Strain max.	εmax,T	0.0053		ASCE Manual 1992
Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity -Mises Plasticity - Multilinear (General)				

NSC—ASCE Manual 1992

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$

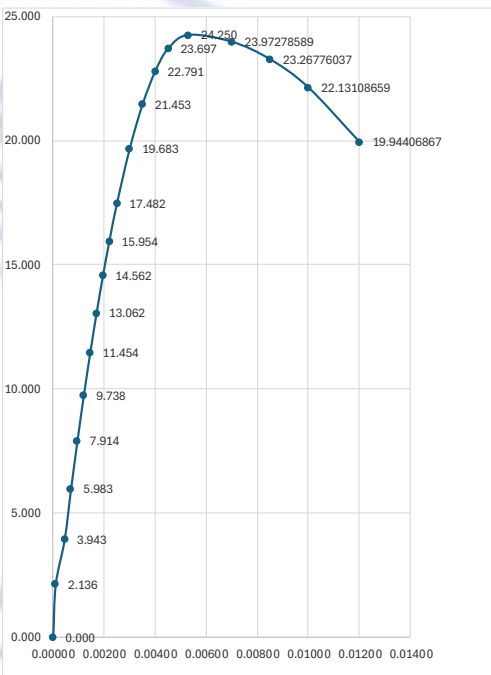
Stress-strain relationships

$$f'_{c,T} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T, \end{cases}$$

$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

$$E_{crT} = (700 - T / 550)E_c \leq E_c$$

Strain (εc)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.00000	0.000
0.00010	2.136
0.00045	3.943
0.0007	5.983
0.00095	7.914
0.0012	9.738
0.00145	11.454
0.0017	13.062
0.00195	14.562
0.0022	15.954
0.00250	17.482
0.00300	19.683
0.00350	21.453
0.00400	22.791
0.00450	23.697
0.00530	24.250
0.00700	23.97279
0.00850	23.26776
0.01000	22.13109
0.01200	19.94407



Strain (εc)	Stress (σ)
0.00000	0.000
0.00010	2.136
0.00045	3.943
0.0007	5.983
0.00095	7.914
0.0012	9.738
0.00145	11.454
0.0017	13.062
0.00195	14.562
0.0022	15.954
0.00250	17.482
0.00300	19.683
0.00350	21.453
0.00400	22.791
0.00450	23.697
0.00530	24.250
0.00700	23.97279
0.00850	23.26776
0.01000	22.13109
0.01200	19.94407

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	3.4471	(ft = 0.70√fc')
Uniaxial Crushing Stress	24.25	fc'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal 25 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code
Mutu Beton	f_c' T	21.25 Mpa	EN
Suhu	T	400 °C	
Modulus of Elasticity	E_c	23500 Mpa	
Modulus of Elasticity - T	$E_{cr,T}$	12818.18 Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	ν	0.2	
Strain max.	$\epsilon_{max,T}$	0.0113	ASCE Manual 1992

Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity - Mises Plasticity - Multilinear (General)	
Strain (ϵ_c)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.0000	0.0000
0.0001	1.2818
0.0010	3.5946
0.0015	5.2672
0.0020	6.8564
0.0027	8.9417
0.0035	11.1251
0.0045	13.5548
0.0055	15.6517
0.0065	17.4157
0.0075	18.8469
0.0085	19.9453
0.0095	20.7108
0.0113	21.2500
0.0130	21.1966
0.0155	20.9238
0.0190	20.1537
0.0225	18.9304
0.0250	17.7794

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	3.22684	(ft = 0.70√f _{c'})
Uniaxial Crushing Stress	21.25	f _{c'}
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal 25 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code
Mutu Beton	f_c' T	18.5 Mpa	EN
Suhu	T	500 °C	
Modulus of Elasticity	E_c	23500 Mpa	
Modulus of Elasticity - T	E_{crT}	8545.455 Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	ν	0.2	
Strain max.	$\epsilon_{max,T}$	0.0155	ASCE Manual 1992

Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity - Mises Plasticity - Multilinear (General)	
Strain (ϵ_c)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.00000	0.000
0.00010	0.855
0.001	2.310
0.0018	4.047
0.0027	5.884
0.004	8.316
0.00600	11.550
0.00800	14.169
0.01000	16.171
0.01200	17.557
0.01400	18.327
0.01550	18.500
0.01700	18.48075
0.01900	18.39519
0.02100	18.24118
0.02500	17.72783
0.03000	16.70112
0.03500	15.24662
0.04000	13.36432
0.04500	11.05423

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	3.01081	(ft = 0.70 $\sqrt{f_c'}$)
Uniaxial Crushing Stress	18.5	f_c'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

NSC—ASCE Manual 1992

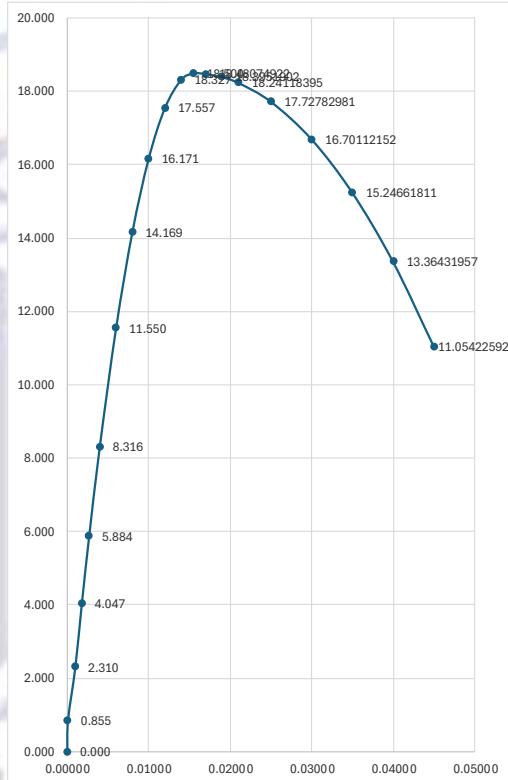
$$\sigma_c = \begin{cases} f_{c,T}' \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f_{c,T}' \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$

Stress-strain relationships

$$f_{c,T}' = \begin{cases} f_c', & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f_c' \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T \end{cases}$$

$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

$$E_{crT} = (700 - T / 550) E_c \leq E_c$$



Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal

25 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code
Mutu Beton	fc'T	15 Mpa	EN
Suhu	T	600 °C	
Modulus of Elasticity	Ec	23500 Mpa	
Modulus of Elasticity - T	EcrT	4272.727 Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	v	0.2	
Strain max.	εmax,T	0.0205	ASCE Manual 1992

Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity - Mises Plasticity - Multilinear (General)	
Strain (εc)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.0000	0.000
0.0001	0.427
0.001	1.428
0.0020	2.784
0.003	4.069
0.0040	5.283
0.005	6.425
0.0060	7.496
0.007	8.495
0.0085	9.860
0.01	11.065
0.0120	12.421
0.014	13.492
0.0155	14.108
0.0170	14.563
0.0190	14.920
0.0205	15.000
0.0300	14.642
0.0380	13.785
0.0443	12.754

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	2.71109	(ft = 0.70√fc')
Uniaxial Crushing Stress	15	fc'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

NSC-ASCE Manual 1992

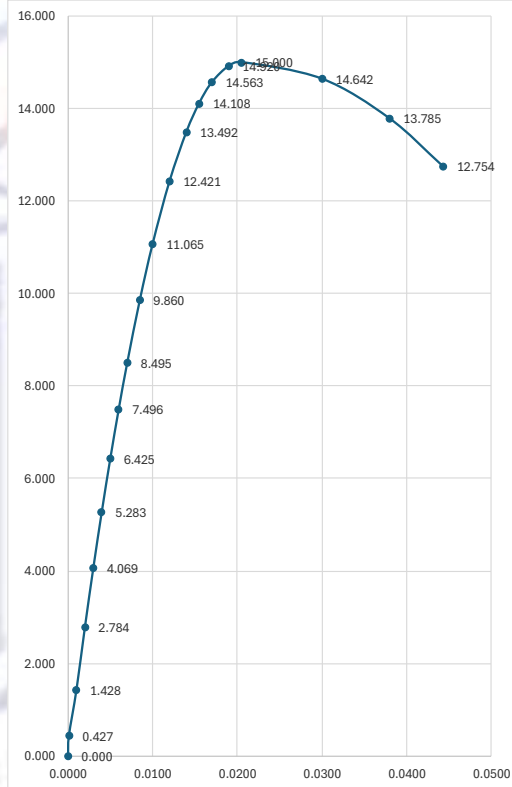
$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$

Stress-strain relationships

$$f'_{c,T} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T \end{cases}$$

$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

$$E_{crT} = (700 - T / 550) E_c \leq E_c$$



Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal 25 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code
Mutu Beton	fc'T	6.75 Mpa	EN
Suhu	T	800 °C	
Modulus of Elasticity	Ec	23500 Mpa	
Modulus of Elasticity - T	EcrT	11639.55 Mpa	Schneider (1986)
Poisson Ratio	v	0.2	
Strain max.	εmax,T	0.0329	ASCE Manual 1992

Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity - Mises Plasticity - Multilinear (General)	
Strain (εc)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.00000	0.00000
0.00010	1.16396
0.00400	1.54156
0.00550	2.06820
0.00700	2.56677
0.00900	3.18789
0.01150	3.89412
0.01400	4.52241
0.01700	5.17346
0.02000	5.71225
0.02300	6.13880
0.02600	6.45310
0.02900	6.6551492
0.03290	6.75000
0.04000	6.71507
0.04500	6.64855
0.05000	6.54739
0.05500	6.41158
0.06000	6.24113
0.06500	6.03603

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	1.81865	(ft = 0.70√fc')
Uniaxial Crushing Stress	6.75	fc'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

NSC-ASCE Manual 1992

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{cr} \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f'_{cr} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$

Stress-strain relationships

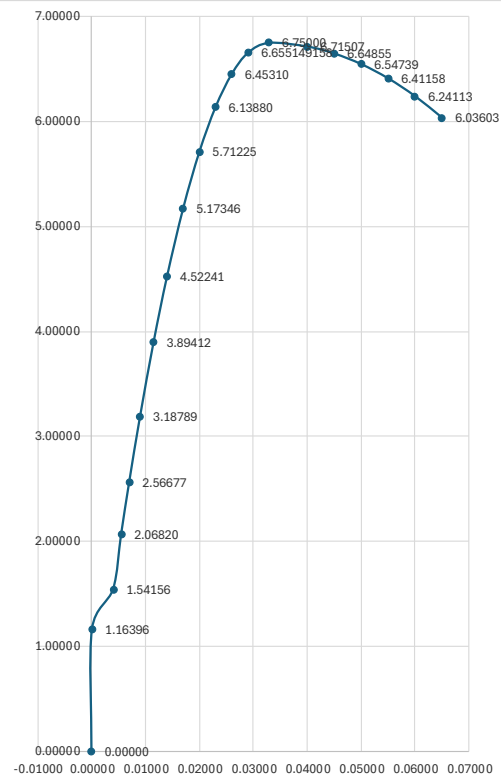
$$f'_{cr} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T-20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T \end{cases}$$

$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

g 9.906

$$E_{crT} = (-0.00025 T + 0.25) g E_c \quad 600^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$$

$$g = 1 + \frac{f_{ci}}{f_c} \frac{T-20}{100}; \frac{f_{ci}}{f_c} \leq 3.0$$



Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal **25** Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic				Code	NSC—ASCE Manual 1992 $\sigma_c = \begin{cases} f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{\max,T}}{\epsilon_{\max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{\max,T} \\ f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{\max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{\max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{\max,T} \end{cases}$ Stress-strain relationships $f'_{c,T} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T \end{cases}$$\epsilon_{\max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$ g 9.906 $E_{cr,T} = (-0.00025 T + 0.25) g E_c \quad 600^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$$g = 1 + \frac{f_{cl}}{f'_c} \frac{T - 20}{100}; \frac{f_{cl}}{f'_c} \leq 3.0$
Mutu Beton	$f'_c T$	6.75	Mpa	EN	
Suhu	T	800	°C		
Modulus of Elasticity	E_c	23500	Mpa		
Modulus of Elasticity -T	$E_{cr,T}$	11639.55	Mpa	Schneider (1986)	
Poisson Ratio	ν	0.2			
Strain max.	$\epsilon_{\max,T}$	0.0329		ASCE Manual 1992	
Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity -Mises Plasticity - Multilinear (General)					
Strain (ϵ)		Stress (σ)			
ASCE Manual 1992					
0.00000		0.00000			
0.00010		1.16396			
0.00400		1.54156			
0.00550		2.06820			
0.00700		2.56677			
0.00900		3.18789			
0.01150		3.89412			
0.01400		4.52241			
0.01700		5.17346			
0.02000		5.71225			
0.02300		6.13880			
0.02600		6.45310			
0.02900		6.6551492			
0.03290		6.75000			
0.04000		6.71507			
0.04500		6.64855			
0.05000		6.54739			
0.05500		6.41158			
0.06000		6.24113			
0.06500		6.03603			

Strain (ϵ)	Stress (σ)
0.00000	0.00000
0.00010	1.16396
0.00400	1.54156
0.00550	2.06820
0.00700	2.56677
0.00900	3.18789
0.01150	3.89412
0.01400	4.52241
0.01700	5.17346
0.02000	5.71225
0.02300	6.13880
0.02600	6.45310
0.02900	6.6551492
0.03290	6.75000
0.04000	6.71507
0.04500	6.64855
0.05000	6.54739
0.05500	6.41158
0.06000	6.24113
0.06500	6.03603

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	1.81865	($\text{ft} = 0.70\sqrt{f'_c}$)
Uniaxial Crushing Stress	6.75	f'_c
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

No	SUHU													
	20		200		400		500		600		700		800	
	Strain (ϵ)	Stress (σ)	Strain (ϵ)	Stress (σ)	Strain (ϵ)	Stress (σ)	Strain (ϵ)	Stress (σ)	Strain (ϵ)	Stress (σ)	Strain (ϵ)	Stress (σ)	Strain (ϵ)	Stress (σ)
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	2.350	0.000	2.136	0.000	1.282	0.000	0.855	0.000	0.427	0.000	1.691	0.000	1.164
3	0.000	4.795	0.000	3.943	0.001	3.595	0.001	2.310	0.001	1.428	0.003	2.210	0.004	1.542
4	0.000	7.175	0.001	5.983	0.002	5.267	0.002	4.047	0.002	2.784	0.005	3.215	0.006	2.068
5	0.001	9.230	0.001	7.914	0.002	6.856	0.003	5.884	0.003	4.069	0.006	4.153	0.007	2.567
6	0.001	11.100	0.001	9.738	0.003	8.942	0.004	8.316	0.004	5.283	0.007	4.741	0.009	3.188
7	0.001	13.356	0.001	11.454	0.004	11.125	0.006	11.550	0.005	6.425	0.008	5.300	0.012	3.894
8	0.001	15.572	0.002	13.062	0.005	13.555	0.008	14.169	0.006	7.496	0.010	6.082	0.014	4.522
9	0.001	17.647	0.002	14.562	0.006	15.652	0.010	16.171	0.007	8.495	0.011	6.887	0.017	5.173
10	0.001	19.305	0.002	15.954	0.007	17.416	0.012	17.557	0.009	9.860	0.013	7.647	0.020	5.712
11	0.002	21.219	0.003	17.482	0.008	18.847	0.014	18.327	0.010	11.065	0.015	8.206	0.023	6.139
12	0.002	22.618	0.003	19.683	0.009	19.945	0.016	18.500	0.012	12.421	0.016	8.698	0.026	6.453
13	0.002	23.885	0.004	21.453	0.010	20.711	0.017	18.481	0.015	13.920	0.018	9.124	0.029	6.655
14	0.002	24.613	0.004	22.791	0.011	21.250	0.019	18.395	0.021	15.000	0.020	9.587	0.033	6.750
15	0.002	24.990	0.005	23.697	0.013	21.197	0.021	18.241	0.030	14.642	0.022	9.999	0.040	6.715
16	0.003	24.961	0.005	24.250	0.016	20.924	0.025	17.728	0.038	13.785	0.024	10.195	0.045	6.649
17	0.003	24.142	0.007	23.973	0.019	20.154	0.030	16.701	0.046	12.421	0.026	10.274	0.050	6.547
18	0.003	22.589	0.009	23.268	0.023	18.930	0.035	15.247	0.053	10.811	0.030	10.251	0.055	6.412
19	0.004	21.176	0.010	22.131	0.027	16.978	0.040	13.364	0.060	8.812	0.040	9.964	0.060	6.241
20	0.004	19.685	0.012	19.944	0.030	14.784	0.045	11.054	0.065	7.147	0.050	9.347	0.065	6.036

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal **15** Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic				Range		Stress $\sigma(\epsilon)$	
Mutu Beton	f_c'	15	Mpa	$\epsilon \leq \epsilon_{c1B}$		$\frac{3\epsilon f_{cB}}{\epsilon_{c1B} \left(2 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c1B}} \right)^3 \right)}$	
Suhu	T	20	°C	$\epsilon_{c1(0)} < \epsilon \leq \epsilon_{c2(0)}$		For numerical purposes a descending branch should be adopted. Linear or non-linear models are permitted.	
Modulus of Elasticity	E_c	18203.02	Mpa	g	1.000		
Poisson Ratio	ν	0.2		EcrT	18203	schneider hasil sama dengan rumus BSI (1985) dibawah ini	
Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity -Mises Plasticity - Multilinear (General)				$E_{crT} = (700 - T / 550)E_c \leq E_c$			
Strain (ϵ_c)		Stress (σ)					
0.00000		0.000					
0.00010		1.820					
0.00032		2.877					
0.00048		4.305					
0.00062		5.538					
0.00075		6.660					
0.00091		8.013					
0.00108		9.343					
0.00125		10.588					
0.00140		11.583					
0.0016		12.73129					
0.00178		13.571					
0.00200		14.331					
0.00225		14.841					
0.00245		14.994					
0.00265		14.948					
0.00285		14.735					
0.00335		13.686					
0.00385		12.261					
0.00435		10.773					

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	2.71109	(ft = 0.70√f'c)
Uniaxial Crushing Stress	15	f'c
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal 15 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic				Code
Mutu Beton	fc'T	15 Mpa	EN	
Suhu	T	100 °C		
Modulus of Elasticity	Ec	18203.02 Mpa		
Modulus of Elasticity -T	EcrT	19857.84 Mpa	BSI (1985)	
Poisson Ratio	v	0.2		
Strain max.	εmax,T	0.0035	ASCE Manual 1992	
Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity -Mises Plasticity - Multilinear (General)				

NSC—ASCE Manual 1992

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$
$$f'_{c,T} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T, \end{cases}$$
$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}.$$

Stress-strain relationships

$$E_{crT} = (700 - T / 550) E_c \leq E_c$$

Strain (ε c)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.00000	0.000
0.00010	1.986
0.00030	2.461
0.00060	4.702
0.00090	6.722
0.00120	8.522
0.00150	10.102
0.00180	11.461
0.00210	12.600
0.00240	13.518
0.00270	14.216
0.00300	14.694
0.00350	15.000
0.00380	14.988
0.00410	14.951
0.00440	14.890
0.00470	14.804
0.00510	14.652
0.00540	14.509
0.00570	14.3415

Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	2.71109	(ft = 0.70√fc')
Uniaxial Crushing Stress	15	fc'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

NSC—ASCE Manual 1992

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$

Stress-strain relationships

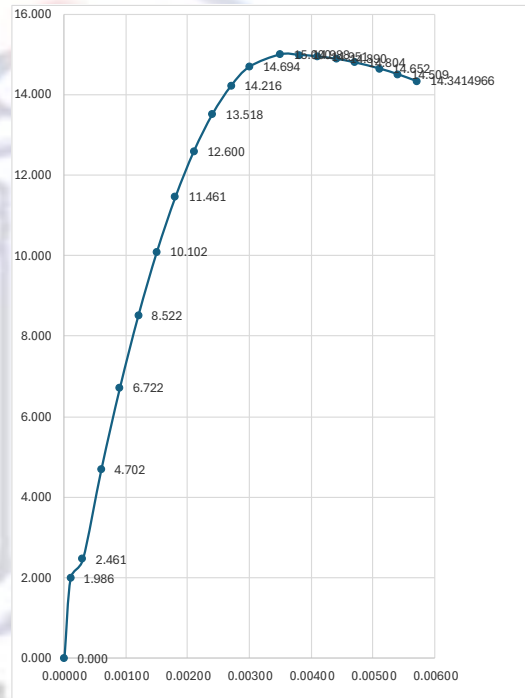
$$f'_{c,T} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T-20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T \end{cases}$$

$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

g 1.8

EcrT 30091.8

$$E_{crT} = (700 - T / 550) E_c \leq E_c$$



Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal **15** Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic				Code
Mutu Beton	f_c' T	14.55	Mpa	EN
Suhu	T	200	°C	
Modulus of Elasticity	E_c	18203.02	Mpa	
Modulus of Elasticity -T	E_{crT}	16548.2	Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	ν	0.2		
Strain max.	$\epsilon_{max,T}$	0.0053		ASCE Manual 1992
Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity -Mises Plasticity - Multilinear (General)				
Strain (ϵ_c)		Stress (σ)		
ASCE Manual 1992				
0.00000		0.000		
0.00010		1.65482		
0.00050		2.616		
0.00100		4.973		
0.00150		7.070		
0.00200		8.909		
0.00250		10.489		
0.00275		11.18185		
0.00300		11.810		
0.00325		12.3732		
0.00350		12.872		
0.00375		13.30556		
0.00400		13.675		
0.00425		13.97893		
0.00450		14.218		
0.00475		14.393		
0.00530		14.550		
0.00600		14.5218		
0.00900		13.7621		
0.01145		12.3732		

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{c,T}' \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f_{c,T}' \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$

Stress-strain relationships

$$f_{c,T}' = \begin{cases} f_c', & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f_c' \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T \end{cases}$$
$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}.$$

g 2.746

EcrT 40808.2

$$E_{crT} = (700 - T / 550)E_c \leq E_c$$

Strain (ϵ_c)		Stress (σ)	
ASCE Manual 1992			
0.00000		0.000	
0.00010		1.65482	
0.00050		2.616	
0.00100		4.973	
0.00150		7.070	
0.00200		8.909	
0.00250		10.489	
0.00275		11.181	
0.00300		11.810	
0.00325		12.373	
0.00350		12.872	
0.00375		13.306	
0.00400		13.675	
0.00425		13.979	
0.00450		14.218	
0.00475		14.393	
0.00530		14.550	
0.00600		14.522	
0.00900		13.762	
0.01145		12.373	

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	2.67011	(ft = 0.70√f _{c'})
Uniaxial Crushing Stress	14.55	f _{c'}
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal 15 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code
Mutu Beton	fc'T	12.75 Mpa	EN
Suhu	T	400 °C	
Modulus of Elasticity	Ec	18203.02 Mpa	
Modulus of Elasticity - T	EcrT	9928.921 Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	v	0.2	
Strain max.	Emax,T	0.0113	ASCE Manual 1992

Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity - Mises Plasticity - Multilinear (General)	
Strain (εc)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.0000	0.0000
0.0001	0.99289
0.0005	1.1034
0.0010	2.1568
0.0020	4.1139
0.0030	5.8713
0.0040	7.4289
0.0050	8.7869
0.0060	9.9452
0.0070	10.9038
0.0080	11.6626
0.0090	12.2218
0.0095	12.4265
0.0099	12.5543
0.0105	12.6861
0.0113	12.7500
0.0125	12.7340
0.0150	12.5981
0.0200	11.9103
0.0244	10.8373

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	2.4995	(ft = 0.70√fc')
Uniaxial Crushing Stress	12.75	fc'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

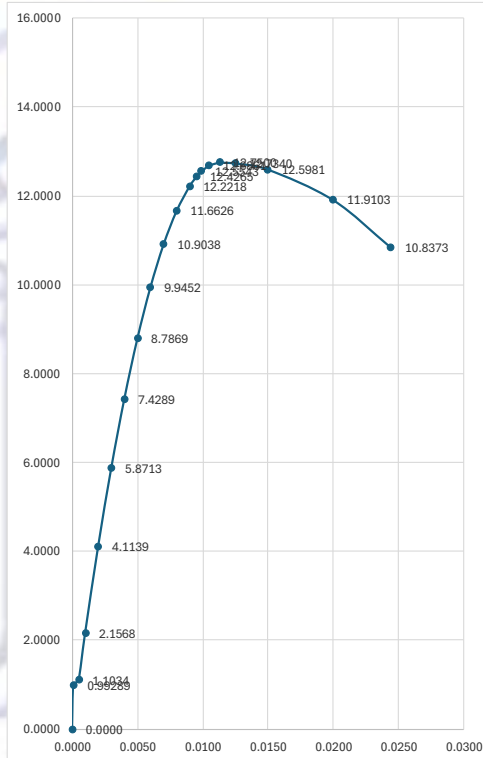
NSC—ASCE Manual 1992

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$

$$f'_{c,T} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T, \end{cases}$$

$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

$$E_{crT} = (700 - T / 550) E_c \leq E_c$$



Concrete Beam Material Properties by SOLID65Mutu Beton Normal **15** Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic				Code
Mutu Beton	fc'T	11.1	Mpa	EN
Suhu	T	500	°C	
Modulus of Elasticity	Ec	18203.02	Mpa	
Modulus of Elasticity - T	EcrT	6619.281	Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	v	0.2		
Strain max.	εmax,T	0.0155		ASCE Manual 1992

Strain (εc)		Stress (σ)
ASCE Manual 1992		
0.00000		0.000
0.00010		0.66193
0.00130		1.784
0.00200		2.680
0.00300		3.881
0.00400		4.990
0.00500		6.006
0.00600		6.930
0.00700		7.762
0.00800		8.501
0.00900		9.147971
0.01000		9.702
0.01100		10.16441
0.01200		10.534
0.01350		10.91519
0.01550		11.100
0.01700		11.08845
0.02250		10.84846
0.02800		10.29788
0.03350		9.436733

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	2.33217	(ft = 0.70√fc')
Uniaxial Crushing Stress	11.1	fc'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

NSC—ASCE Manual 1992

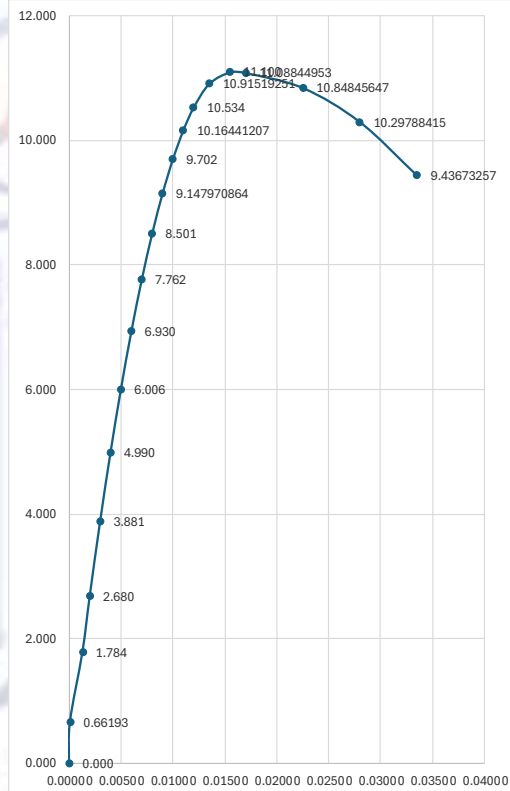
$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{max,T}}{\varepsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_{max,T} \\ f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{max,T} - \varepsilon}{3\varepsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \varepsilon > \varepsilon_{max,T}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

Stress-strain relationships

$$f'_{c,T} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T \end{cases}$$

$$\varepsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

$$E_{crT} = (700 - T / 550) E_c \leq E_c$$



Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal **15** Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code
Mutu Beton	fc'T	9 Mpa	EN
Suhu	T	600 °C	
Modulus of Elasticity	Ec	18203.02 Mpa	
Modulus of Elasticity - T	EcrT	3309.64 Mpa	BSI (1985)
Poisson Ratio	v	0.2	
Strain max.	εmax,T	0.0205	ASCE Manual 1992

Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity - Mises Plasticity - Multilinear (General)	
Strain (εc)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.0000	0.000
0.0001	0.33096
0.0015	1.269
0.0030	2.441
0.0045	3.518
0.0060	4.497
0.0075	5.381
0.0090	6.168
0.0105	6.858
0.0120	7.453
0.0135	7.951
0.0150	8.352
0.0165	8.657
0.0180	8.866
0.0205	9.000
0.0220	8.995
0.0250	8.952
0.0300	8.785
0.0370	8.352
0.0443	7.652

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	2.1	(ft = 0.70√fc')
Uniaxial Crushing Stress	9	fc'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal 15 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code	NSC—ASCE Manual 1992 $\sigma_c = \begin{cases} f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{\max,T}}{\epsilon_{\max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{\max,T} \\ f'_{c,T} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{\max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{\max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{\max,T} \end{cases}$ Stress-strain relationships $f'_{c,T} = \begin{cases} f'_c, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f'_c \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T, \end{cases}$ $\epsilon_{\max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}.$ g 9.724 $E_{crT} = (-0.00025\,T + 0.25)g\,E_c \quad 600^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$ $g = 1 + \frac{f_{cl}}{f'_c} \frac{T - 20}{100}; \frac{f_{cl}}{f'_c} \leq 3.0$
Mutu Beton	f _c 'T	6.45 Mpa	EN	
Suhu	T	700 °C		
Modulus of Elasticity	Ec	18203.022 Mpa		
Modulus of Elasticity - T	E _{crT}	13275.46 Mpa	Schneider (1986)	
Poisson Ratio	v	0.2		
Strain max.	ε _{max,T}	0.0263	ASCE Manual 1992	
Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity - Mises Plasticity - Multilinear (General)				
Strain (ε c)		Stress (σ)		
ASCE Manual 1992				
0.00000		0.0000		
0.00010		1.3275		
0.00450		2.0184		
0.00600		2.6073		
0.00750		3.1542		
0.00900		3.6591		
0.01050		4.1221		
0.01200		4.5431		
0.01350		4.9222		
0.01500		5.2593		
0.01650		5.5544		
0.01800		5.8076		
0.01950		6.0188		
0.02100		6.1881		
0.0225		6.3153		
0.02400		6.4007		
0.02600		6.4492		
0.03500		6.372		
0.04600		6.048		
0.05811		5.402		

Strain (ε)	Stress (σ) [MPa]
0.00000	0.0000
0.00010	1.3275
0.00450	2.0184
0.00600	2.6073
0.00750	3.1542
0.00900	3.6591
0.01050	4.1221
0.01200	4.5431
0.01350	4.9222
0.01500	5.2593
0.01650	5.5544
0.01800	5.8076
0.01950	6.0188
0.02100	6.1881
0.0225	6.3153
0.02400	6.4007
0.02600	6.4492
0.03500	6.372
0.04600	6.048
0.05811	5.402

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	1.77778	(ft = 0.70√f _c)
Uniaxial Crushing Stress	6.45	f _c '
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

Concrete Beam Material Properties by SOLID65

Mutu Beton Normal 15 Mpa

Structural-Linear - Elastic - Isotropic			Code
Mutu Beton	f_c' T	4.05 Mpa	EN
Suhu	T	800 °C	
Modulus of Elasticity	E_c	18203.022 Mpa	
Modulus of Elasticity - T	E_{crT}	9015.96 Mpa	Schneider (1986)
Poisson Ratio	ν	0.2	
Strain max.	$\epsilon_{max,T}$	0.0329	ASCE Manual 1992

Nonlinear - Inelastic - Rate Independent - Kinematic Hardening Plasticity - Mises Plasticity - Multilinear (General)	
Strain (ϵ_c)	Stress (σ)
ASCE Manual 1992	
0.00000	0.00000
0.00010	0.90160
0.00600	1.34250
0.00900	1.91273
0.01300	2.56827
0.01550	2.91718
0.01750	3.16263
0.0195	3.37815
0.02100	3.52014
0.0225	3.64530
0.02400	3.75362
0.0258	3.86138
0.02760	3.94490
0.03000	4.01853
0.03300	4.04996
0.03500	4.04817
0.04500	3.98913
0.05000	3.92843
0.06000	3.74468
0.07110	3.44334

Nonlinear - Inelastic - Non-metal Plasticity - Concrete		
Open Shear Transfer Coef	0.3	
Closed Shear Transfer Coef	1	
Uniaxial Cracking Stress	1.40872	($f_t = 0.70\sqrt{f_c'}$)
Uniaxial Crushing Stress	4.05	f_c'
Biaxial Crushing Stress	0	
Hydrostatic Pressure	0	
Hydro Biax Crush Stress	0	
Hydro Uniax Crush Stress	0	
Tensile Crack Factor	0.6	

NSC-ASCE Manual 1992

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cr}' \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{max,T}}{\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon \leq \epsilon_{max,T} \\ f_{cr}' \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{max,T} - \epsilon}{3\epsilon_{max,T}} \right)^2 \right], & \epsilon > \epsilon_{max,T} \end{cases}$$

Stress-strain relationships

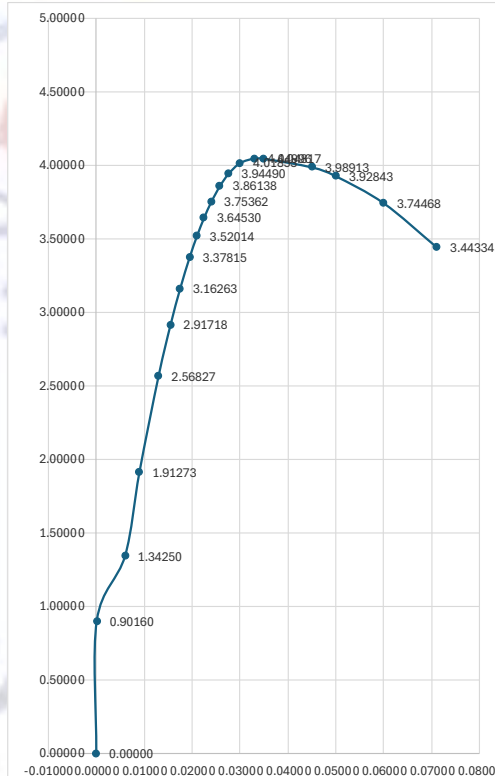
$$f_{cr}' = \begin{cases} f_c', & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ f_c' \left[2.011 - 2.353 \left(\frac{T-20}{1000} \right) \right], & 450^\circ\text{C} < T \leq 874^\circ\text{C} \\ 0, & 874^\circ\text{C} < T \end{cases}$$

$$\epsilon_{max,T} = 0.0025 + (6.0T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

$g = 9.906$

$$E_{crT} = (-0.00025 T + 0.25) g E_c \quad 600^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$$

$$g = 1 + \frac{f_{ci}}{f_c} \frac{T-20}{100}; \frac{f_{ci}}{f_c} \leq 3.0$$

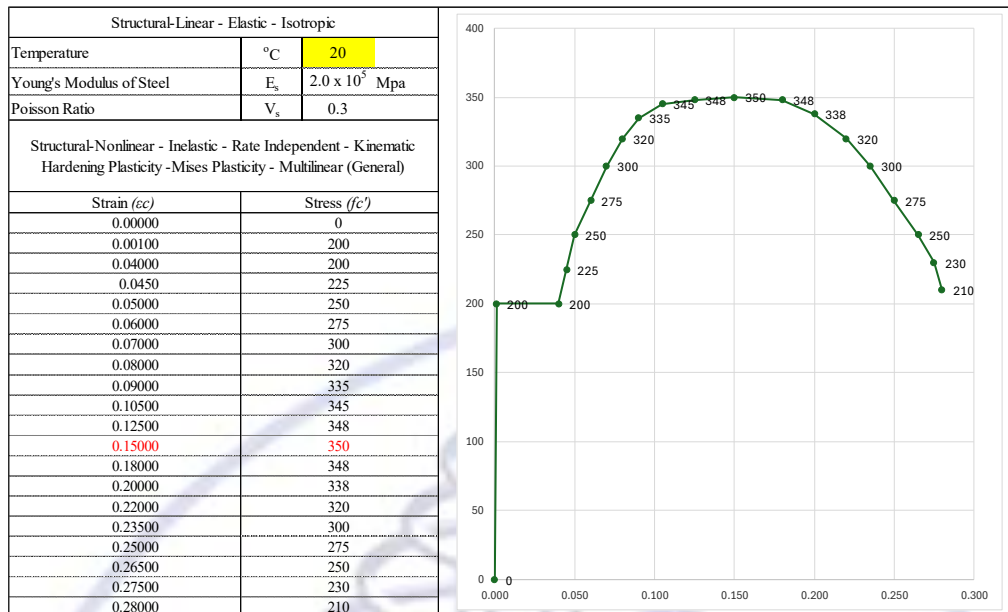


MUTU BETON (FC') = 15 MPA

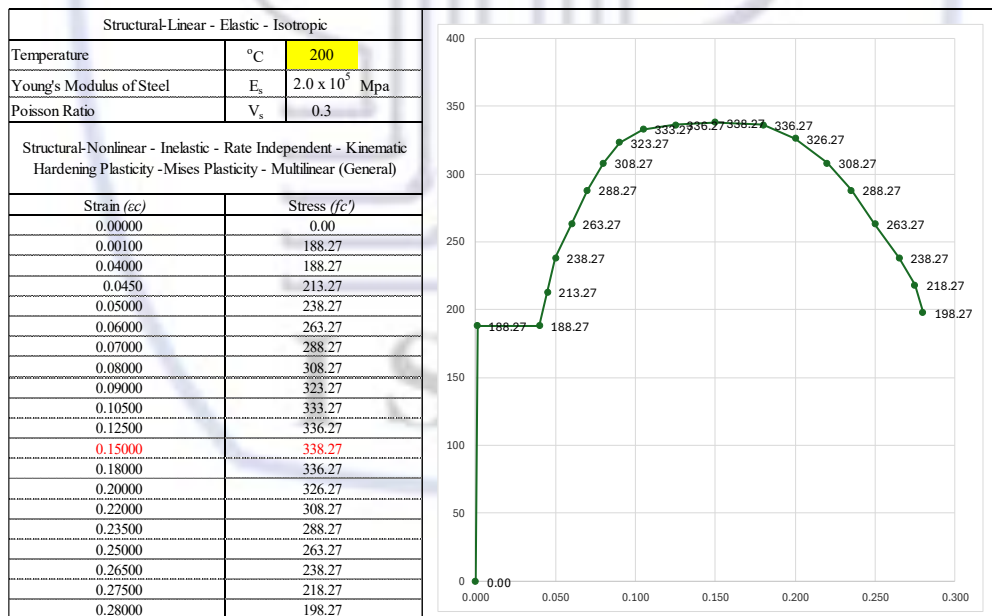
No	SUHU													
	20		200		400		500		600		700		800	
	Strain (ϵ_c)	Stress (σ)	Strain (ϵ_c)	Stress (σ)	Strain (ϵ_c)	Stress (σ)	Strain (ϵ_c)	Stress (σ)	Strain (ϵ_c)	Stress (σ)	Strain (ϵ_c)	Stress (σ)	Strain (ϵ_c)	Stress (σ)
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0
2	0.00010	1.82030	0.00010	1.65482	0.00010	0.99289	0.00010	0.66193	0.00010	0.33096	0.00010	1.32755	0.00010	0.901596
3	0.00032	2.87698	0.00050	2.61579	0.00050	1.10336	0.00130	1.78385	0.00150	1.26889	0.00450	2.01839	0.00600	1.342504
4	0.00048	4.30477	0.00100	4.97259	0.00100	2.15679	0.00200	2.67971	0.00300	2.44140	0.00600	2.60727	0.00900	1.912732
5	0.00062	5.53777	0.00150	7.07040	0.00200	4.11387	0.00300	3.88096	0.00450	3.51755	0.00750	3.15418	0.01300	2.568269
6	0.00075	6.66009	0.00200	8.90922	0.00300	5.87125	0.00400	4.98980	0.00600	4.49732	0.00900	3.65912	0.01550	2.917178
7	0.00091	8.01348	0.00250	10.48905	0.00400	7.42893	0.00500	6.00624	0.00750	5.38073	0.01050	4.12211	0.01750	3.16263
8	0.00108	9.34336	0.00275	11.18185	0.00500	8.78691	0.00600	6.93028	0.00900	6.16776	0.01200	4.54313	0.01950	3.378149
9	0.00125	10.58824	0.00300	11.80990	0.00600	9.94518	0.00700	7.76191	0.01050	6.85842	0.01350	4.92219	0.02100	3.520145
10	0.00140	11.58293	0.00325	12.37320	0.00700	10.90375	0.00800	8.50114	0.01200	7.45271	0.01500	5.25929	0.02250	3.645303
11	0.00160	12.73129	0.00350	12.87175	0.00800	11.66262	0.00900	9.14797	0.01350	7.95062	0.01650	5.55443	0.02400	3.753624
12	0.00178	13.57084	0.00375	13.30556	0.00900	12.22179	0.01000	9.70239	0.01500	8.35217	0.01800	5.80760	0.02580	3.861383
13	0.00200	14.33121	0.00400	13.67462	0.00950	12.42648	0.01100	10.16441	0.01650	8.65735	0.01950	6.01881	0.02760	3.944897
14	0.00225	14.84060	0.00425	13.97893	0.00990	12.55429	0.01200	10.53403	0.01800	8.86615	0.02100	6.18806	0.03000	4.018533
15	0.00245	14.99392	0.00450	14.21849	0.01050	12.68610	0.01350	10.91519	0.02050	9.00000	0.02250	6.31535	0.03300	4.049963
16	0.00265	14.94822	0.00475	14.39331	0.01130	12.75000	0.01550	11.10000	0.02200	8.99465	0.02400	6.40067	0.03500	4.048167
17	0.00285	14.73484	0.00530	14.55000	0.01500	12.59812	0.01700	11.08845	0.02500	8.95181	0.02600	6.44916	0.04500	3.989132
18	0.00335	13.68556	0.00600	14.52180	0.02000	11.91025	0.02250	10.84846	0.03000	8.78525	0.03500	6.37158	0.05000	3.928434
19	0.00385	12.26057	0.00900	13.76210	0.02500	10.66766	0.02800	10.29788	0.03700	8.35217	0.04600	6.04790	0.06000	3.744677
20	0.00435	10.77322	0.01145	12.37320	0.03000	8.87034	0.03350	9.43673	0.04430	7.65214	0.05811	5.40159	0.07110	3.443337

Lampiran C. Stress-Strain Baja

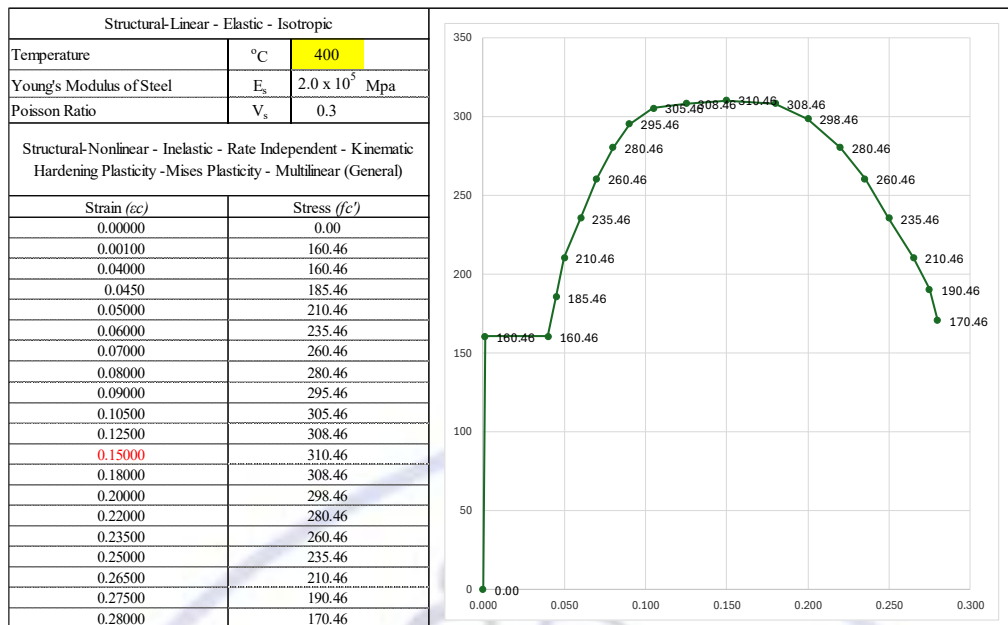
Material SOLID 185



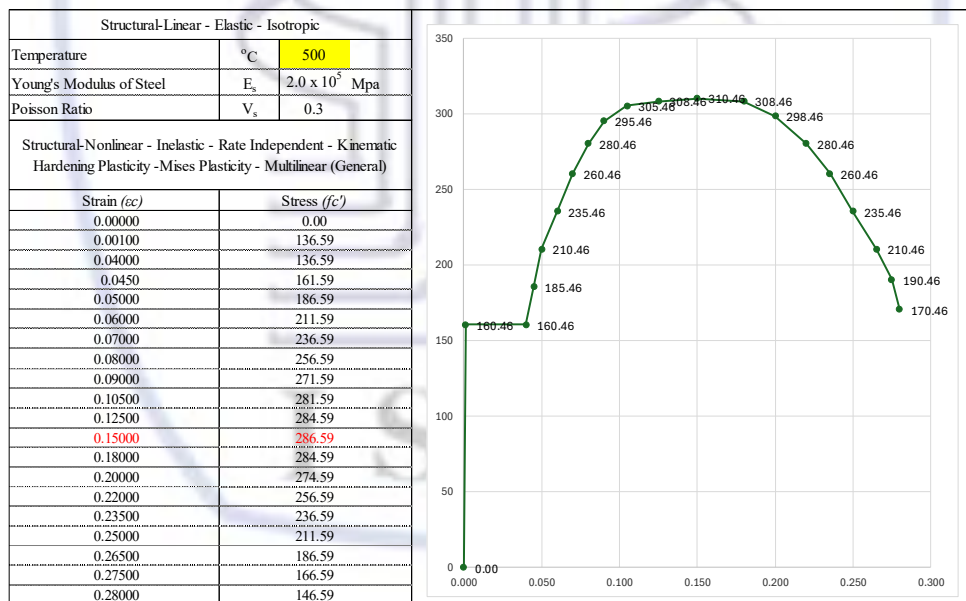
Material SOLID 185



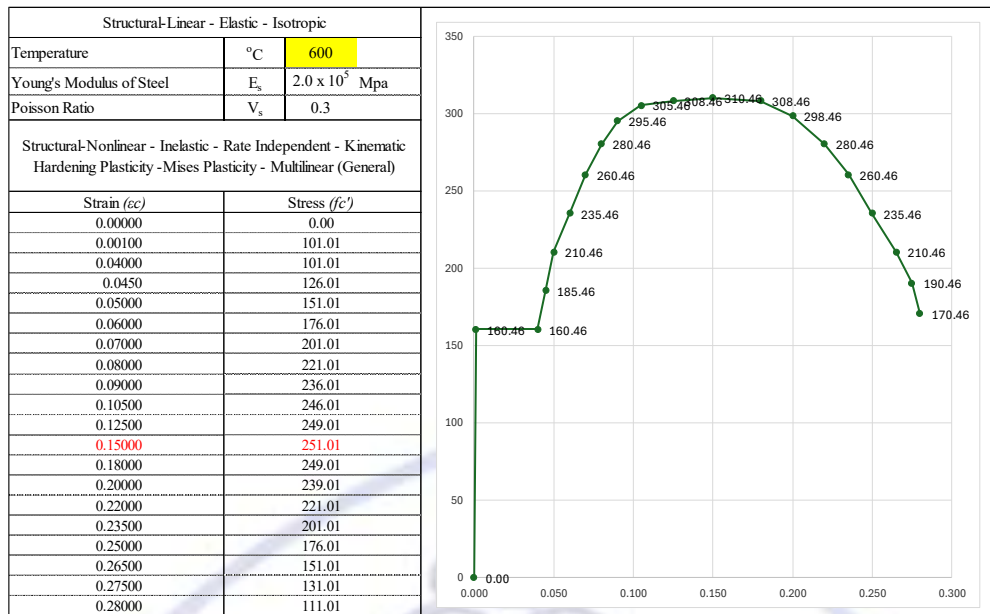
Material SOLID 185



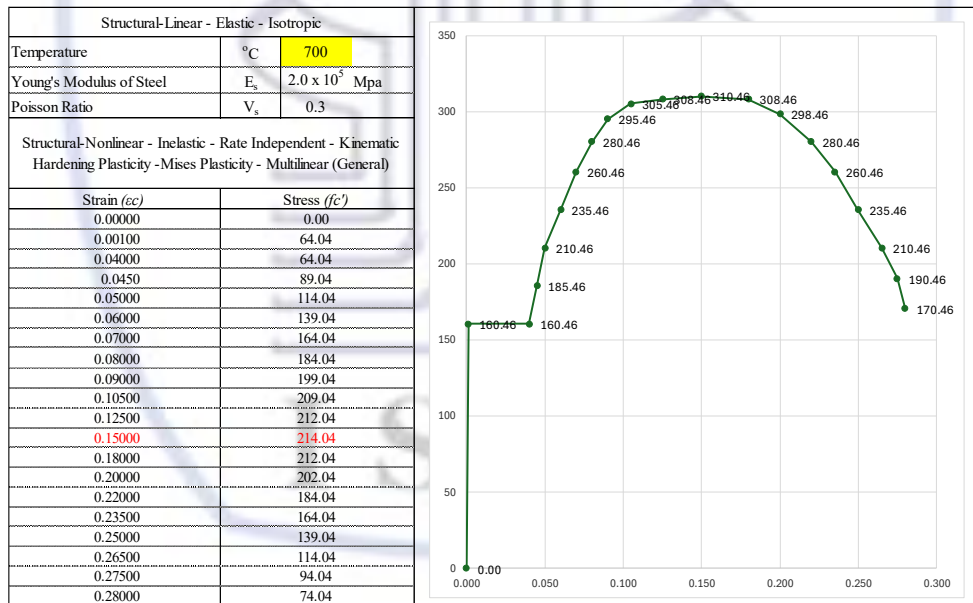
Material SOLID 185



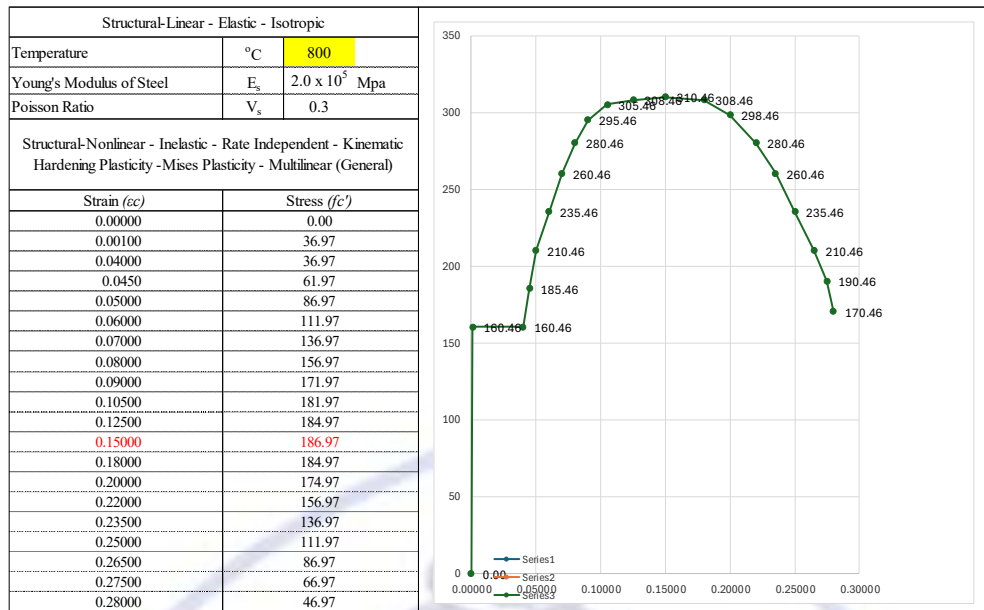
Material SOLID 185

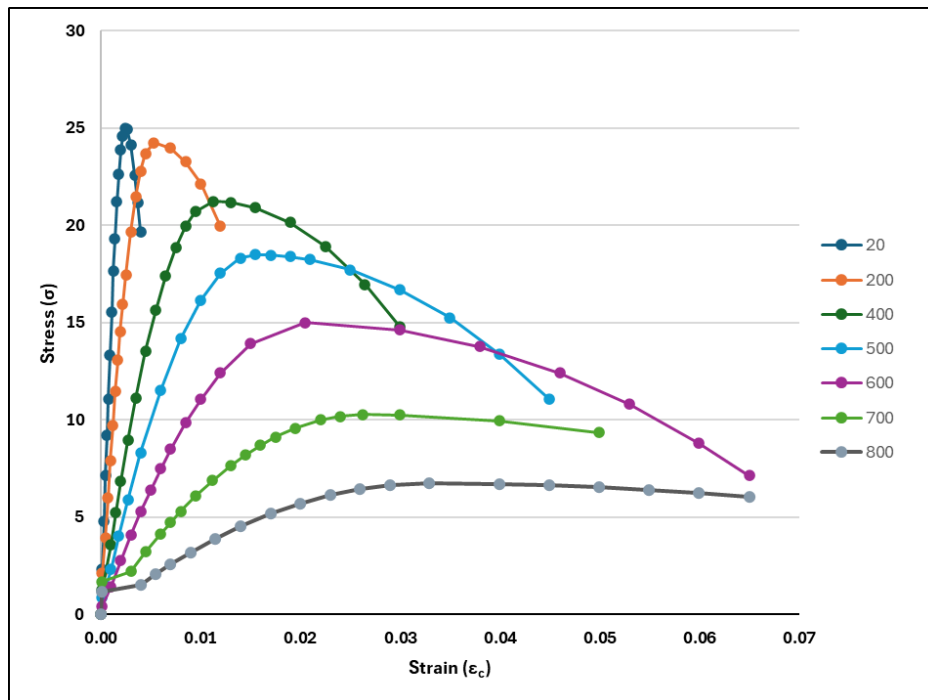


Material Steel Plates SOLID 185

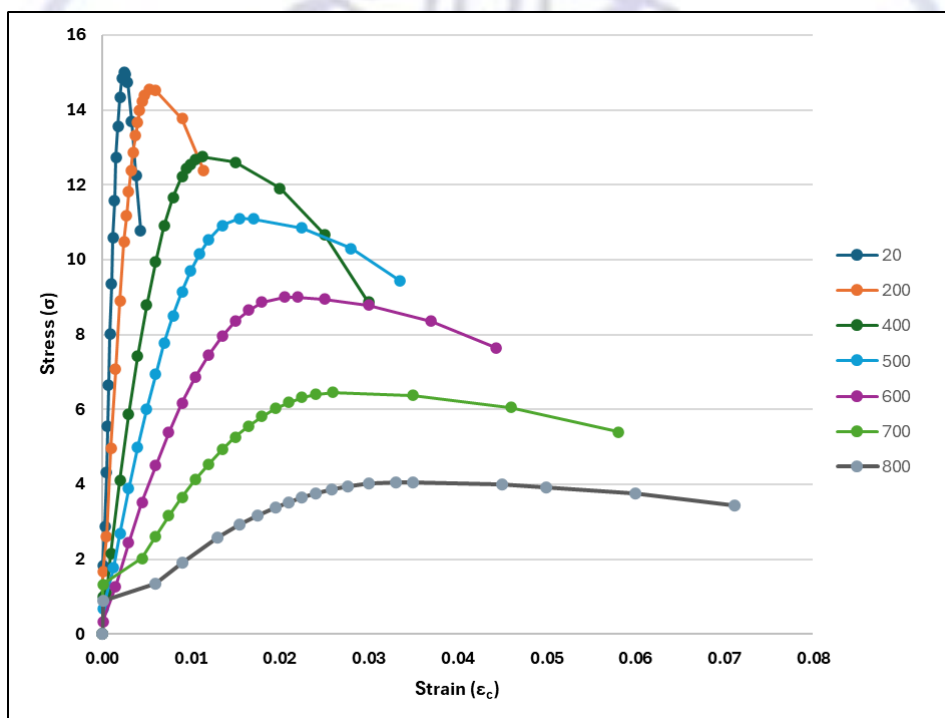


Material SOLID 185

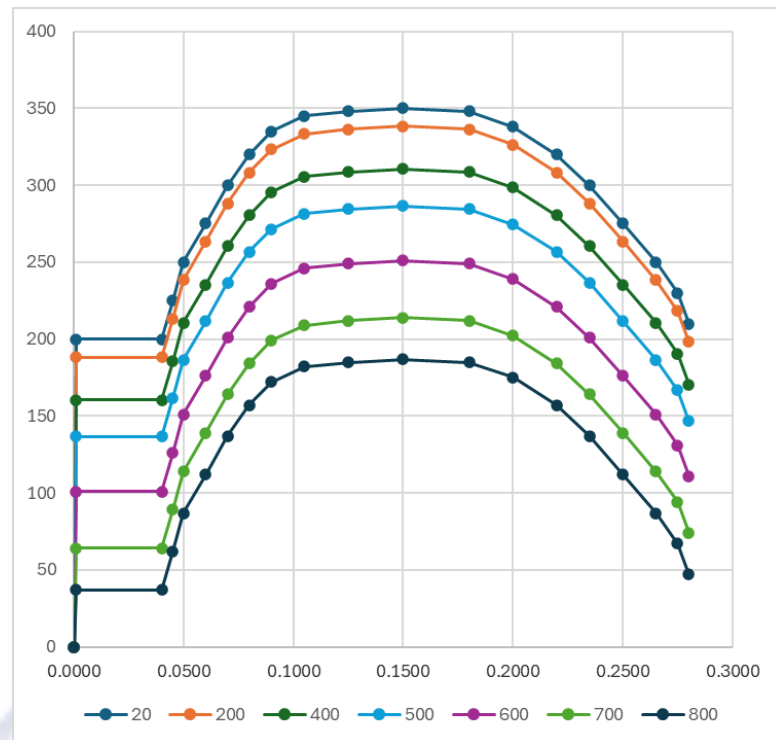




Kurva *Stress-Strain* Beton Normal



Kurva *Stress-Strain* Beton Sandwich



Kurva *Stress-Strain* Tulangan Baja

Lampiran D. Tabel Material Properti Balok Beton

Tabel Material Properti Balok Beton Normal 200x300x4000 mm

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.	Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3	
BALOK 200X300X4000 MM	1	SOLID65	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
	2	LINK180	Cross section area (mm)	113.10 (tulangan utama Ø12 mm)		
			Initial strain	0		
	3	LINK180	Cross section area (mm)	78.54 (tulangan utama Ø10 mm)		
			Initial strain	0		
	4	LINK180	Cross section area (mm)	50.27 (tulangan sengkang Ø8 mm)		
			Initial strain	0		
	5	SOLID185	Dimension (mm)	200x100x20 Loading Plate		
			Initial strain	0		
KOLOM 300X300X100 MM	6	SOLID65	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
	7	LINK180	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan utama D16 mm)		
			Initial strain	0		
	8	LINK180	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan utama D13 mm)		
			Initial strain	0		
	9	LINK180	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan sengkang D13 mm)		
			Initial strain	0		
	10	LINK180	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan ekstra D16 mm)		
			Initial strain	0		

Tabel Material Properti Balok Beton *Sandwich* 200x300x4000 mm

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.	Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3	
BALOK 200X300X4000 MM	1	SOLID65	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
	2	LINK180	Cross section area (mm)	113.10 (tulangan utama Ø12 mm)		
			Initial strain	0		
	3	LINK180	Cross section area (mm)	78.54 (tulangan utama Ø10 mm)		
			Initial strain	0		
	4	LINK180	Cross section area (mm)	50.27 (tulangan sengkang Ø8 mm)		
			Initial strain	0		
KOLOM 300X300X100 MM	5	SOLID185	Dimension (mm)	200x100x20 Loading Plate		
			Initial strain	0		
	6	SOLID65	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
	7	LINK180	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan utama D16 mm)		
			Initial strain	0		
	8	LINK180	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan utama D13 mm)		
			Initial strain	0		
	9	LINK180	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan sengkang D13 mm)		
			Initial strain	0		
	10	LINK180	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan ekstra D16 mm)		
			Initial strain	0		

Tambahan untuk SOLID65 (*Sandwich-SW*)

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.	Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3	
BALOK 200X300X4000 MM	11	SOLID65	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0

Tabel Material Properti Balok Beton Normal 300x400x4000 mm

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.	Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3	
BALOK 300X400X4000 MM	1	SOLID65 (1)	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
	2	LINK180 (2)	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan utama D16 mm)		
			Initial strain	0		
	3	LINK180 (3)	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan utama D16 mm)		
			Initial strain	0		
	4	LINK180 (4)	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan sengkang D13 mm)		
			Initial strain	0		
	5	SOLID185 (5)	Dimension (mm)	300x100x20 Loading Plate		
			Initial strain	0		
KOLOM 400X400X100 MM	6	SOLID65 (6)	Material No.	0	0	0
			Volume Ratio	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
			Orientation angle	0	0	0
	7	LINK180 (7)	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan utama D16 mm)		
			Initial strain	0		
	8	LINK180 (8)	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan utama D13 mm)		
			Initial strain	0		
	9	LINK180 (9)	Cross section area (mm)	132.73 (tulangan sengkang D13 mm)		
			Initial strain	0		
	10	LINK180 (10)	Cross section area (mm)	201.06 (tulangan ekstra D16 mm)		
			Initial strain	0		

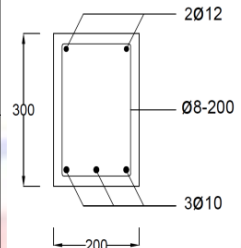
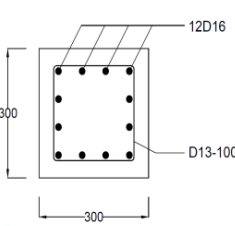
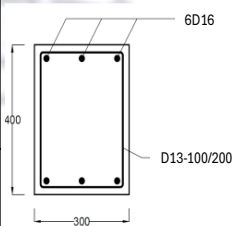
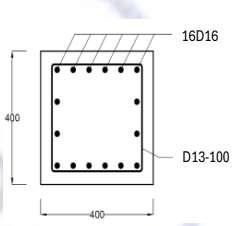
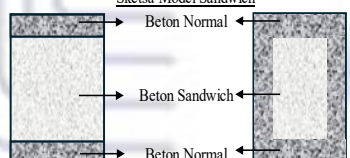
Tabel Material Properti Balok Beton *Sandwich* 300x400x4000 mm

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.		Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3
BALOK 300X400X4000 MM	1	SOLID65	Material No. Volume Ratio Orientation angle Orientation angle	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
	2	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	201.06 (tulangan utama D16 mm) 0		
	3	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	201.06 (tulangan utama D16 mm) 0		
	4	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	132.73 (tulangan sengkang D13 mm) 0		
	5	SOLID185	Dimension (mm) Initial strain	300x100x20 Loading Plate 0		
	6	SOLID65	Material No. Volume Ratio Orientation angle Orientation angle	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
	7	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	201.06 (tulangan utama D16 mm) 0		
	8	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	113.10 (tulangan utama D13 mm) 0		
	9	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	132.73 (tulangan sengkang D13 mm) 0		
	10	LINK180	Cross section area (mm) Initial strain	201.06 (tulangan ekstra D16 mm) 0		

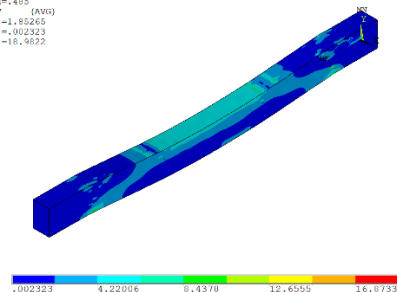
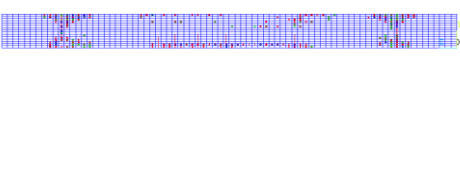
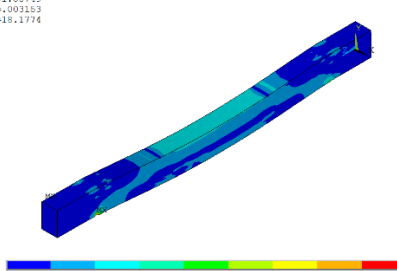
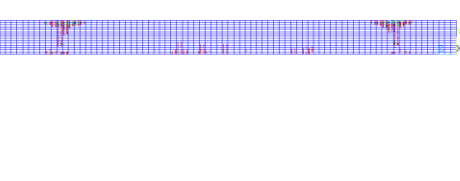
Tambahan untuk SOLID65 (*Sandwich-SW*)

Preprocessor - Material Props - Material Models						
Real Constant Set No.		Element Types		Real Constant for rebar 1	Real Constant for rebar 2	Real Constant for rebar 3
BALOK 300X400X4000 MM	11	SOLID65	Material No. Volume Ratio Orientation angle Orientation angle	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0

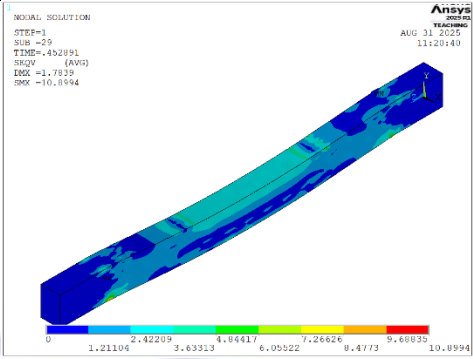
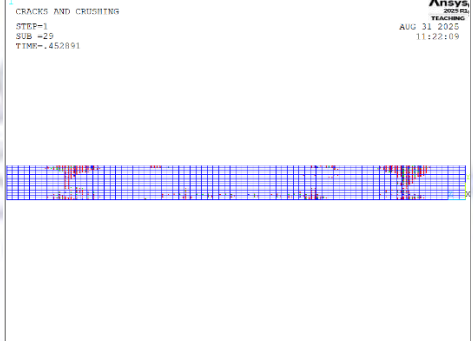
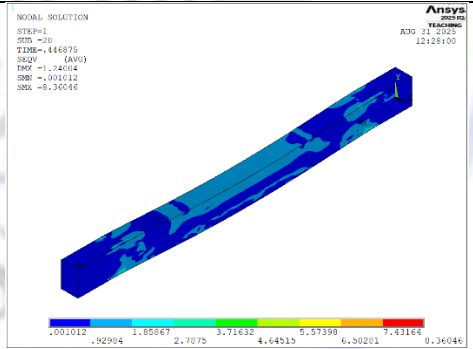
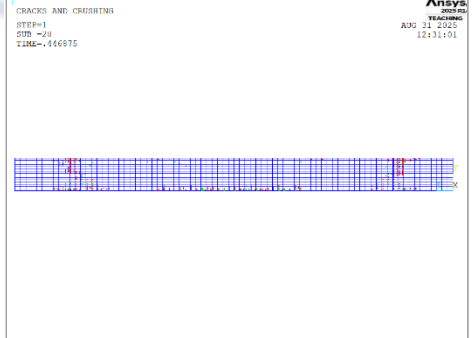
Tabel Variasi Model Balok Beton

No	Kode Model	Suhu (°C)	Mutu Beton (Mpa)		Tebal Selimut (mm)	MODEL	
			NORMAL	SANDWICH		BALOK	KOLOM
1	VAL-BN-20	20	25	-	20		
2	VAL-BN-100	100	25	-	20		
3	VAL-BN-200	200	24.25	-	20		
4	VAL-BN-400	400	21.25	-	20		
5	VAL-BN-500	500	18.5	-	20		
6	VAL-BN-600	600	15	-	20		
7	VAL-BN-700	700	10.75	-	20		
8	VAL-BN-800	800	6.75	-	20		
9	VAL-SW-20	20	25.00	15.00	20		
10	VAL-SW-100	100	25.00	15.00	20		
11	VAL-SW-200	200	24.25	14.55	20		
12	VAL-SW-400	400	21.25	12.75	20		
13	VAL-SW-500	500	18.50	11.10	20		
14	VAL-SW-600	600	15.00	9.00	20		
15	VAL-SW-700	700	10.75	6.45	20		
16	VAL-SW-800	800	6.75	4.05	20		
						Penampang model eksperimental: VAL	
17	VAF-M1-20	20	25	-	20		
18	VAF-M1-100	100	25	-	20		
19	VAF-M1-200	200	24.25	-	20		
20	VAF-M1-400	400	21.25	-	20		
21	VAF-M2-500	500	18.5	-	20		
22	VAF-M1-600	600	15	-	20		
23	VAF-M1-700	700	10.75	-	20		
24	VAF-M1-800	800	6.75	-	20		
25	VAF-M2-20	20	25.00	15.00	50		
26	VAF-M2-100	100	25.00	15.00	50		
27	VAF-M2-200	200	24.25	14.55	50		
28	VAF-M2-400	400	21.25	12.75	50		
29	VAF-M2-500	500	18.50	11.10	50		
30	VAF-M2-600	600	15.00	9.00	50		
31	VAF-M2-700	700	10.75	6.45	50		
						Penampang model pengembangan: VAF	
						Sketsa Model Sandwich	
							
						Kode: VAL-SW ; VAF-M2	
						Kode: VAF-M3	

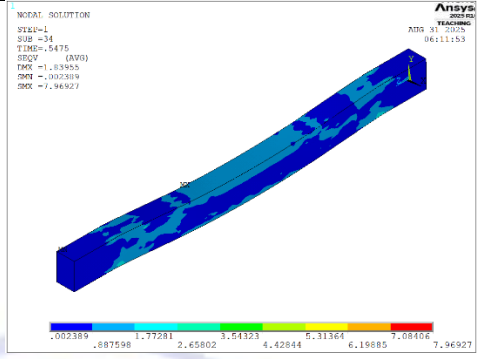
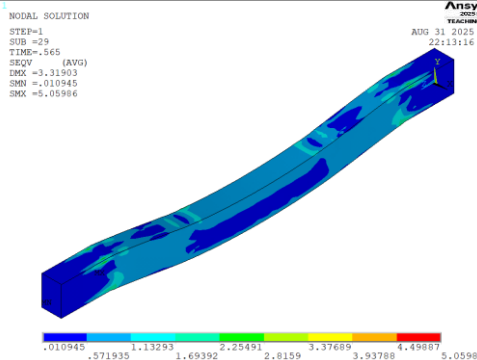
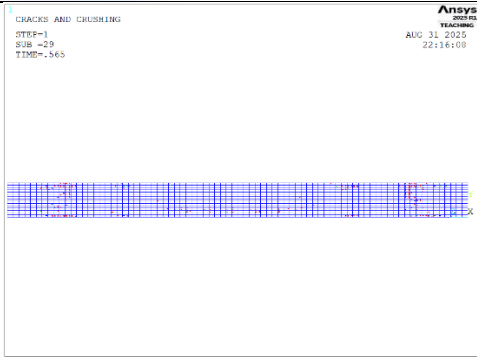
Lampiran E. Kontur Tegangan dan Pola Retak Beton Normal

1	Model: VAL-BN-20	
	Suhu: 20°C	
Kontur Tegangan		ANSYS 2025 R2 TEACHING AUG 30 2025 17:52:26 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =26 TIME=.485 SEV (AVG) DMX =1.85265 SMN =-.002323 SMX =18.9822  -.002323 4.22006 8.4378 12.6555 16.8733 18.9822 2.11119 6.32893 10.5467 14.7644
Pola Retak		ANSYS 2025 R2 TEACHING AUG 30 2025 17:57:55 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =26 TIME=.485 
2	Model: VAL-BN-100	
	Suhu: 100°C	
Kontur Tegangan		ANSYS 2025 R2 TEACHING AUG 30 2025 19:53:15 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =26 TIME=.485 SEV (AVG) DMX =1.85749 SMN =-.003153 SMX =18.1774  -.003153 4.04107 8.08059 12.1193 16.158 18.1774 2.02291 6.06123 10.0999 14.1387
Pola Retak		ANSYS 2025 R2 TEACHING AUG 30 2025 19:55:23 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =26 TIME=.485 

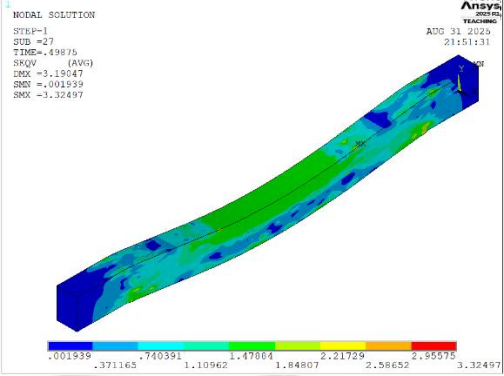
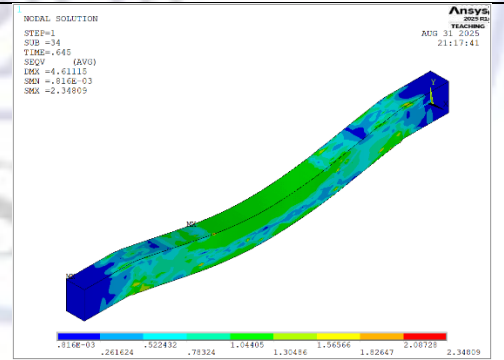
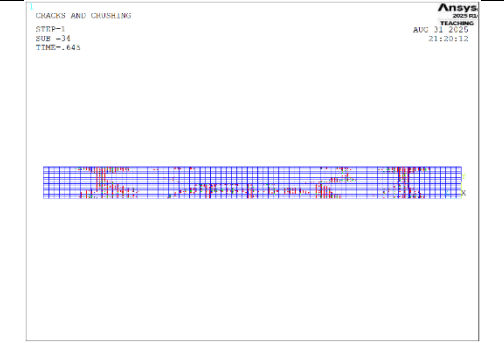
(lanjutan)

3	Model: VAL-BN-200	
	Suhu: 200°C	
	Kontur Tegangan	 ANSYS WORKBENCH TEACHING AUG 31 2025 11:20:40 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =29 TIME=-.452891 SEQV (AVG) SMX =1.7839 SMN =-10.8994
	Pola Retak	 ANSYS WORKBENCH TEACHING AUG 31 2025 11:22:09 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =29 TIME=-.452891
4	Model: VAL-BN-400	
	Suhu: 400°C	
	Kontur Tegangan	 ANSYS WORKBENCH TEACHING AUG 31 2025 12:12:00 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =29 TIME=-.446875 SEQV (AVG) SMX =1.24014 SMN =-0.001012
	Pola Retak	 ANSYS WORKBENCH TEACHING AUG 31 2025 12:11:01 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =29 TIME=-.446875

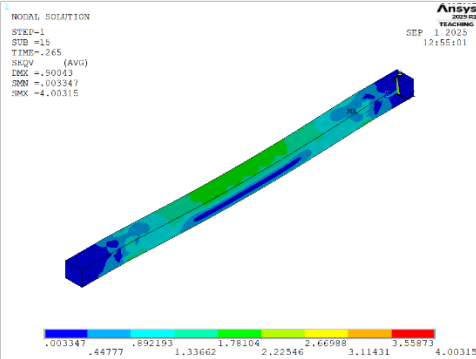
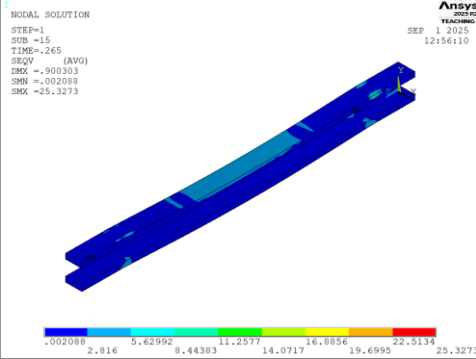
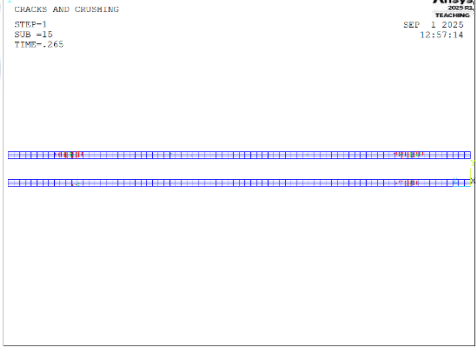
(lanjutan)

5	Model: VAL-BN-500	
	Suhu: 500°C	
	Kontur Tegangan	
	Pola Retak	
6	Model: VAL-BN-600	
	Suhu: 600°C	
	Kontur Tegangan	
	Pola Retak	

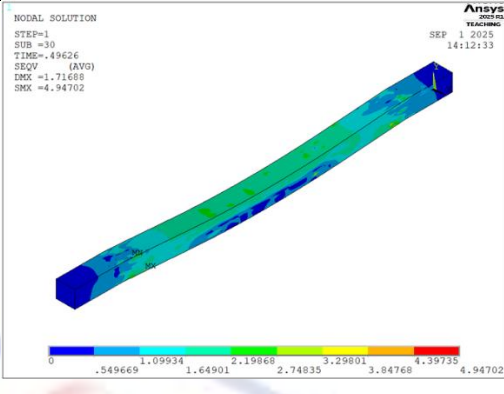
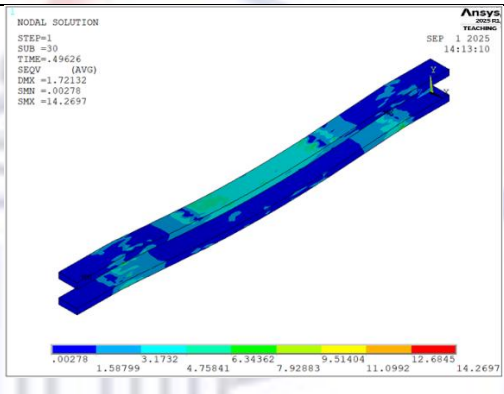
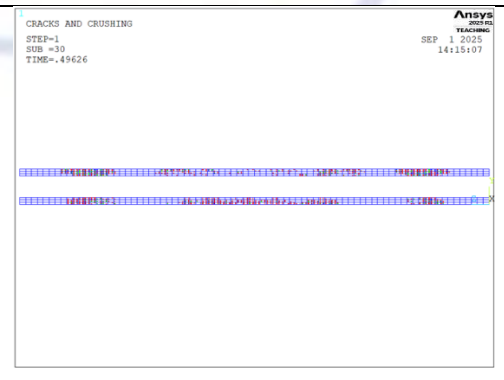
(lanjutan)

7	Model: VAL-BN-700	
	Suhu: 700°C	
	Kontur Tegangan	 MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =27 TIME=.49875 SEQV (AVG) MAX =3.19047 MIN =.001939 SMX =3.32497
	Pola Retak	 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =27 TIME=.49875
8	Model: VAL-BN-800	
	Suhu: 800°C	
	Kontur Tegangan	 MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =34 TIME=.645 SEQV (AVG) MAX =4.63115 MIN =.016E-03 SMX =2.34859
	Pola Retak	 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =34 TIME=.645

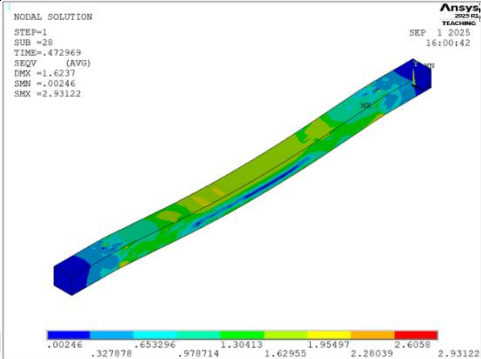
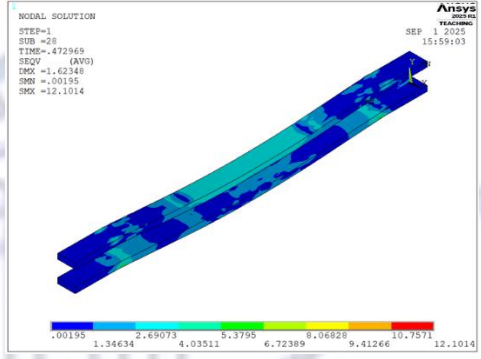
Beton Sandwich

1	Model: VAL-SW-20	
	Suhu: 20°C	
	Kontur Tegangan Beton Normal	 ANSYS 2022 R1 TEACHING SEP 1 2025 12:55:01 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =15 TIME=.265 SEQV (AVG) IMX =.90043 SMN =-.003347 SMX =4.00315
	Kontur Tegangan Beton Sandwich	 ANSYS 2022 R1 TEACHING SEP 1 2025 12:56:10 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =15 TIME=.265 SEQV (AVG) IMX =.900303 SMN =-.002088 SMX =25.3273
	Pola Retak Beton Normal	 ANSYS 2022 R1 TEACHING SEP 1 2025 12:57:50 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =15 TIME=.265
	Pola Retak Beton Sandwich	 ANSYS 2022 R1 TEACHING SEP 1 2025 12:57:14 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =15 TIME=.265

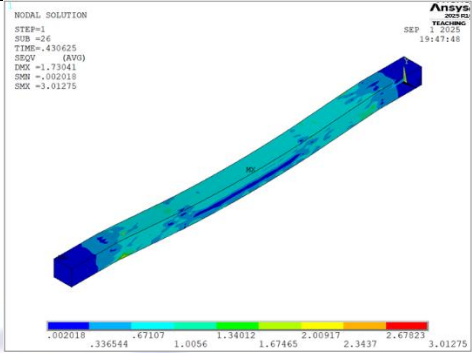
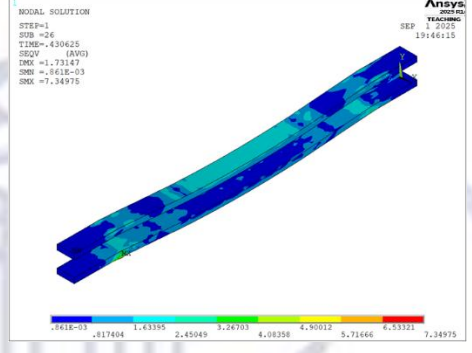
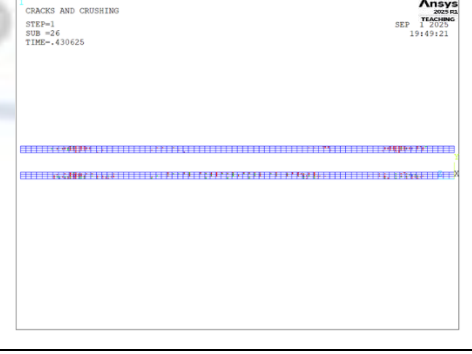
(lanjutan)

2	Model: VAL-SW-100	
	Suhu: 100°C	
Kontur Tegangan Beton Normal		 ANSYS 2025 R1 TEACHING NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =30 TIME=-.49626 SEQV (AVG) DMX =-1.71688 SMX =4.94702 SEP 1 2025 14:12:33 0 1.09934 2.19868 3.29801 4.39735 4.94702 .549669 1.64901 2.74835 3.84768
Kontur Tegangan Beton <i>Sandwich</i>		 ANSYS 2025 R1 TEACHING NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =30 TIME=-.49626 SEQV (AVG) DMX =-1.72132 SMX =14.2697 SEP 1 2025 14:13:10 .00278 3.1732 6.34362 9.51404 12.6845 14.2697 1.58799 4.75841 7.92883 11.0992
Pola Retak Beton Normal		 ANSYS 2025 R1 TEACHING 1 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =30 TIME=-.49626 SEP 1 2025 14:14:22
Pola Retak Beton <i>Sandwich</i>		 ANSYS 2025 R1 TEACHING 1 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =30 TIME=-.49626 SEP 1 2025 14:15:07

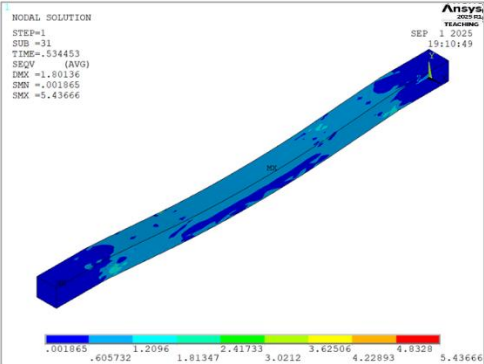
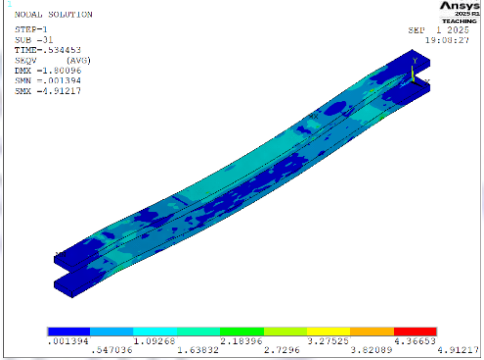
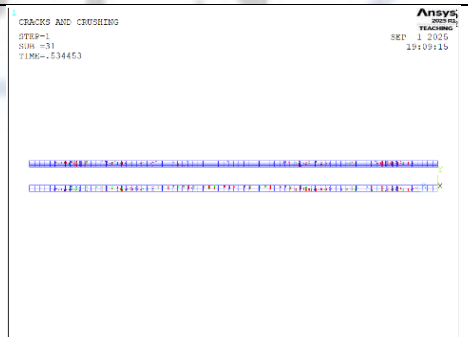
(lanjutan)

3	Model: VAL-SW-200	
	Suhu: 200°C	
	Kontur Tegangan Beton Normal	 ANSYS 2025 R2 TEACHING SEP 1 2025 16:00:42 NOODAL SOLUTION STEP=1 SUB =28 TIME=-.472969 SEQV (AVG) DMX =1.6237 SMN =.00246 SMX =2.93122
	Kontur Tegangan Beton <i>Sandwich</i>	 ANSYS 2025 R2 TEACHING SEP 1 2025 15:59:03 NOODAL SOLUTION STEP=1 SUB =28 TIME=-.472969 SEQV (AVG) DMX =1.62148 SMN =.00195 SMX =12.1014
	Pola Retak Beton Normal	 ANSYS 2025 R2 TEACHING SEP 1 2025 16:19:19 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =28 TIME=-.472969
	Pola Retak Beton <i>Sandwich</i>	 ANSYS 2025 R2 TEACHING SEP 1 2025 16:18:41 CRACKS AND CRUSHING STEP=1 SUB =28 TIME=-.472969

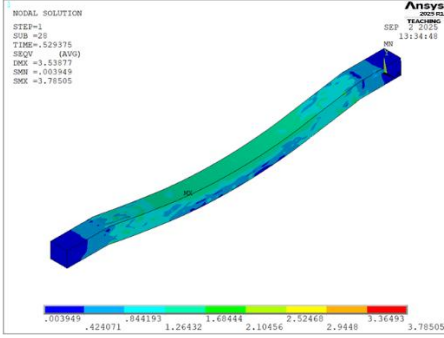
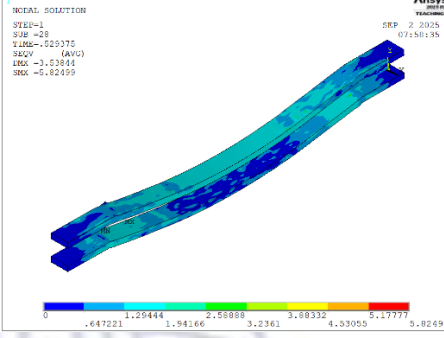
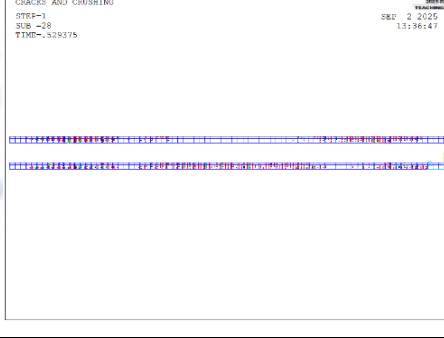
(lanjutan)

4	Model: VAL-SW-400	
	Suhu: 400°C	
	Kontur Tegangan Beton Normal	 ANSYS Thermal Stress Contour Plot for Normal Concrete. The plot shows a curved beam under stress. The color scale ranges from -0.002018 (blue) to 3.01275 (red). The maximum stress is 3.01275.
	Kontur Tegangan Beton Sandwich	 ANSYS Thermal Stress Contour Plot for Sandwich Concrete. The plot shows a curved beam under stress. The color scale ranges from -0.641E-03 (blue) to 7.34975 (red). The maximum stress is 7.34975.
	Pola Retak Beton Normal	 ANSYS Thermal Cracks and Crushing Plot for Normal Concrete. The plot shows a curved beam with a grid. The color scale ranges from -0.002018 (blue) to 3.01275 (red). The maximum stress is 3.01275.
	Pola Retak Beton Sandwich	 ANSYS Thermal Cracks and Crushing Plot for Sandwich Concrete. The plot shows a curved beam with a grid. The color scale ranges from -0.002018 (blue) to 3.01275 (red). The maximum stress is 3.01275.

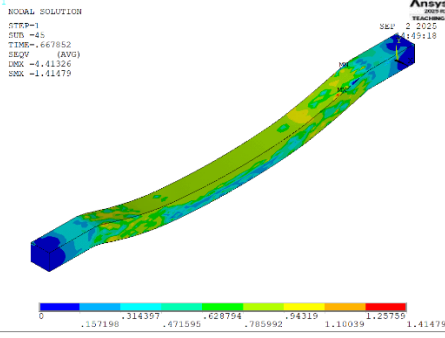
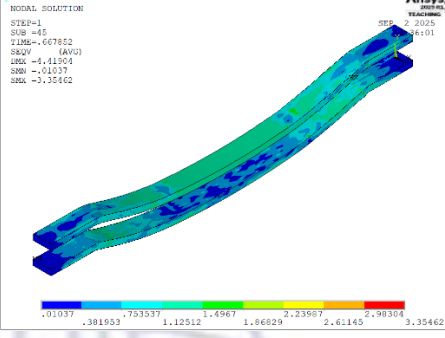
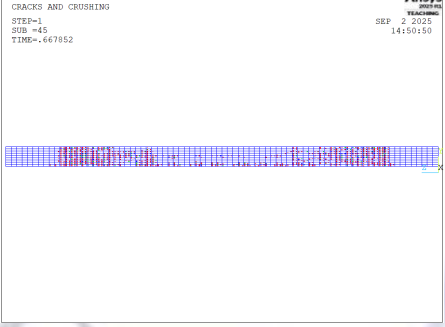
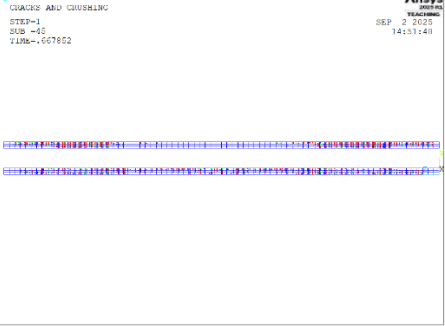
(lanjutan)

5	Model: VAL-SW-500	
	Suhu: 500°C	
	Kontur Tegangan Beton Normal	 ANSYS 2025 R1 TEACHING SEP 1 2025 19:10:49 STEP=1 SUB =31 TIME=-.534453 SEQV (AVG) DMX =1.80136 SMN =-.001865 SMX =5.43666
	Kontur Tegangan Beton <i>Sandwich</i>	 ANSYS 2025 R1 TEACHING SEP 1 2025 19:00:27 STEP=1 SUB =31 TIME=-.534453 SEQV (AVG) DMX =1.80096 SMN =-.001394 SMX =4.91217
	Pola Retak Beton Normal	 ANSYS 2025 R1 TEACHING SEP 1 2025 19:11:49 STEP=1 SUB =31 TIME=-.534453
	Pola Retak Beton <i>Sandwich</i>	 ANSYS 2025 R1 TEACHING SEP 1 2025 19:09:15 STEP=1 SUB =31 TIME=-.534453

(lanjutan)

6	Model: VAL-SW-600		
	Suhu: 600°C		
	Kontur Tegangan Beton Normal		
	Kontur Tegangan Beton Sandwich		
	Pola Retak Beton Normal		
	Pola Retak Beton Sandwich		

(lanjutan)

7	Model: VAL-SW-800		
	Suhu: 800°C		
Kontur Tegangan Beton Normal			
Kontur Tegangan Beton <i>Sandwich</i>			
Pola Retak Beton Normal			
Pola Retak Beton <i>Sandwich</i>			

Lampiran F. Lembar Surat Penugasan Dosen Pembimbing


**YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**

Jl. Moch Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640 Telp. (021) 727 0090, 787 4645, 787 4647

Fax. (021) 786 6955

<http://www.istn.ac.id> E-mail: rektorat@istn.ac.id

SURAT PENUGASAN

NO. : 030/02-D.10/IV/2025

Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik - Institut Sains dan Teknologi Nasional Jakarta, menugaskan kepada

Ir. Suryawan Murtiadi, M.Eng.Ph.D sebagai Dosen Pembimbing Mahasiswa

Nama	: Vembri Affiano
NIM	: 23540015
Program Studi / Fakultas	: Magister Teknik Sipil / Teknik
Konsentrasi	: Struktur

Dalam penyusunan Tesis berjudul :

"Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku Lentur Struktural Balok Beton Sandwich terhadap Pengaruh Temperatur Tinggi"

Tesis akan diselesaikan oleh mahasiswa yang bersangkutan dalam waktu selama semester Genap 2024/2025 yakni terhitung mulai tanggal 16 April 2025 – 31 Agustus 2025. Jika tidak diselesaikan pada waktunya, maka wajib diprogram kembali pada semester berikutnya, sedangkan bimbingannya dapat berlanjut dengan judul yang sama.

Dosen Pembimbing bertanggungjawab mengarahkan dan memonitor mahasiswa/i bimbingan dalam menyelesaikan Tesis dan akan diberikan honorarium sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Sains dan Teknologi Nasional (ISTN).

Penugasan ini berlaku 1 semester sejak dikeluarkan sampai dengan berakhirnya dalam jangka waktu penyusunan tesis tersebut serta dapat diperpanjang 1 kali perpanjangan waktu (1 semester).

Demikianlah, surat ini dibuat untuk keperluan dan agar dapat dipergunakan dengan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 16 April 2025

Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil



Ir. Suryawan Murtiadi, M.Eng., Ph.D

NIP: -

ISTN

Lampiran G. Lembar Asistensi Tesis



YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

Jl. Moh. Kahfi II, BumiSrengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp: 081291030024
Email: humas@istn.ac.id Website: www.istn.ac.id

LEMBAR ASISTENSI TESIS

Nama Mahasiswa : Vembri Affiano
Nomor Pokok : 23540015
Program Studi/Konsentrasi : Magister Teknik Sipil / Struktur
Pembimbing I : Ir. Suryawan Murtiadi M.Eng., Ph.D
Pembimbing II :
Judul Tesis : *Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku Lentur Struktural Balok Beton Sandwich terhadap Pengaruh Temperatur Tinggi*

No	Tanggal	Komentar/Saran	Paraf
1	23/4/2025	Bab 1: - Pertajam Latar Belakang - Perbaiki Rumusan Masalah + Tujuan	<u>At</u>
2	14/5/2025	Bab 2: - Pelajari state of The Art dari referensi - Tambahkan referensi yang relevan	<u>At</u>
3	28/5/2025	Bab 3: - Metode penelitian sudah bagus - Tambahkan flow-chart untuk mempermudah keterbacaan	<u>At</u>
4	18/6/2025	Bab 4: - Perbaiki notasi satuan: Mpa → MPa - Periksa Gambar 4.2 → Hubungan antara Beban vs Suhu	<u>At</u>
5	25/6/2025	- Periksa Gambar 4.3: Tegangan vs Deflection Beton Sandwich - Periksa dan perbaiki Gambar 4.4: Beban vs Suhu (Beton Sandwich)	<u>At</u>

(lanjutan)



**YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**

Jl. Moh. Kahfi II, BumiSrengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7888955, hp: 081291030024
Email: humas@istn.ac.id Website: www.istn.ac.id

6	2/7/2025	- Halaman 76: Tabel 4.2 mestinya Tabel 4.4 - Beri narasi Tabel 4.6 (atau 4.9) → hal. 86 - Hal. 88 Tabel 4.9 (Tabel 4.10?) → cek Sandwich!	<u>Ar</u>
7	16/7/2025	- Buat tabel perbandingan antara Eksperimen vs Modeling - Justifikasi perbedaan hasil Exp vs Model	<u>Ar</u>
8	30/7/2025	Bab 5: - Tidak perlu lagi ada tabel maupun gambar pada Bab 5 - Kesimpulan → menjawab Tujuan Penelitian	<u>Ar</u>
9	6/8/2025	- Lengkapi semua berkas dan siapkan maju Seminar / Sidang Tesis - Siapkan artikel untuk dikirim ke jurnal.	<u>Ar</u>
10			
11			
12			
13			

Lampiran H. Lembar Catatan Perbaikan Seminar Tesis



**YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**

Jl. Moh. Kahfi II, BumiBrengeeng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7868955, hp. 081291030024
Email : humas@istn.ac.id Website : www.istn.ac.id

**LEMBAR CATATAN PERBAIKAN SEMINAR TESIS
PRODI MAGISTER TEKNIK SIPIL
PERIODE SEMESTER GENAP 2024/2025**

Nama : Vembri Affiano
 NIM : 23540015
 Program Studi : Magister Teknik Sipil
 Judul Tesis : Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku Lentur Struktural Balok Beton Sandwich terhadap Pengaruh Temperatur Tinggi
 Dosen Pembimbing : Ir. Suryawan Murtiadi M.Eng., Ph.D

Dosen Penguji :

No	Dosen Penguji
1.	Ir. Syahril Taufik M.Sc.Eng., Ph. D.
2.	Ir. Taufik Ramlan Wijaya, M.Sc. Eng., Ph.D
3.	Dr. Ir. M. Idrus Alatas, M.Sc

No.	Hal.	Bab / Sub Bab	Uraian Perbaikan / Comments
1.		Ringkasan/ Jurnal	
		Ringkasan/ Jurnal	
2.		Presentasi PPT	
		Presentasi PPT	
3.		Bagian Awal	
		Bagian Awal	
4.		Bab 1	Jumlah item yang ada sama dengan item
		Bab 1	kesimpulan, klasifikasi
5.		Bab 2	
		Bab 2	
6.		Bab 3	
		Bab 3	

(lanjutan)



**YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**

Jl. Moh. Kahfi II, BumiSrengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12840
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp: 081291030024
Email: humas@istn.ac.id Website: www.istn.ac.id

No.	Hal.	Bab / Sub Bab	Uraian Perbaikan / Comments
7		Bab 4	GAMBAR TABEL 9.2 → DIBERHASKAN JADI GAMBAR
		Bab 4	DI MASUKKAN Dlm Lampiran dan NO GAMBAR ..
		Bab 4	
		Bab 4	HASIL GBR XG DIBERHASKAN Dlm BAB IV
9		Bab 5	TDK PERLU DIGISI SUMBER : peneliti.
10		Daftar Pustaka	CEK SEMUA DAFTAR PUSTAKA BER CITATION YA DIBERHASKAN, BERTURUTAN SEBELUMNYA.
11		Lampiran	
		Lampiran	

Jakarta, 15 Agustus 2025
Dosen Penguji,



(lanjutan)



YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

Jl. Moh. Kahfi II, BumiSrengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
 Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7868955, hp. 081291030024
 Email: humas@istn.ac.id Website: www.istn.ac.id

LEMBAR CATATAN PERBAIKAN SEMINAR TESIS
PRODI MAGISTER TEKNIK SIPIL
PERIODE SEMESTER GENAP 2024/2025

Nama : Vembri Alfiano
 NIM : 23540015
 Program Studi : Magister Teknik Sipil
 Judul Tesis : Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku Lentur Struktural Balok Beton Sandwich terhadap Pengaruh Temperatur Tinggi
 Dosen Pembimbing : Ir. Suryawan Murtiadi M.Eng., Ph.D
 Dosen Penguji :

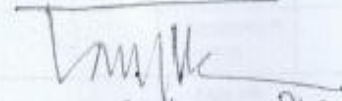
No	Dosen Penguji
1.	Ir. Syahril Taufik M.Sc.Eng., Ph. D.
2.	Ir. Taufik Ramlan Wijaya, M.Sc. Eng., Ph.D
3.	Dr. Ir. M. Idrus Alatas, M.Sc

No.	Hal.	Bab / Sub Bab	Uraian Perbaikan / Comments
1.		Ringkasan/ Jurnal	Penelitian ini layak terbit dalam jurnal terakreditasi
		Ringkasan/ Jurnal	
2.		Presentasi PPT	Pemajemukan judul dan ringkas
		Presentasi PPT	
3.		Bagian Awal	
		Bagian Awal	
4.		Bab 1	pastikan rumusan masalah, atau masalah pokok penelitian, anda jawab secara deskriptif & kesimpulan
		Bab 1	
5.		Bab 2	
		Bab 2	
6.		Bab 3	
		Bab 3	

(lanjutan)


**YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**
 Jl. Moh. Kahfi II, BumiSrengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
 Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp. 081291030024
 Email: bumas@istn.ac.id Website: www.istn.ac.id

No.	Hal.	Bab / Sub Bab	Uraian Perbaikan / Comments
7		Bab 4	* pengembangan gunakan mutu beton & suhu sesuai SNI.
		Bab 4	
		Bab 4	
		Bab 4	
9		Bab 5	
10		Daftar Pustaka	pastikan literatur dalam DP ada dalam teks dan yg di dalam teks tercantum dalam DP.
11		Lampiran	
		Lampiran	

Jakarta, 15 Agustus 2025
 Dosen Penguji,

Dr. Taufik R. Wijaya, PhD.

(lanjutan)



**YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**

Jl. Moh. Kahfi II, BumiSrengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12540
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp. 081291030024
Email : humas@isn.ac.id Website : www.isn.ac.id

**LEMBAR CATATAN PERBAIKAN SEMINAR TESIS
PRODI MAGISTER TEKNIK SIPIL
PERIODE SEMESTER GENAP 2024/2025**

Nama : Vembri Affiano
NIM : 23540015
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Judul Tesis : Validasi Eksperimental Laboratorium Perilaku Lentur Struktural Balok Beton Sandwich terhadap Pengaruh Temperatur Tinggi
Dosen Pembimbing : Ir. Suryawan Murtiadi M.Eng., Ph.D
Dosen Penguji :

No	Dosen Penguji
1.	Ir. Syahril Taufik M.Sc.Eng., Ph. D.
2.	Ir. Taufik Ramlan Wijaya, M.Sc. Eng., Ph.D
3.	Dr. Ir. M. Idrus Alatas, M.Sc

No.	Hal.	Bab / Sub Bab	Uraian Perbaikan / Comments
1.		Ringkasan/ Jurnal	Buat format artikel Jurnal Sainstech max 14 hal.
		Ringkasan/ Jurnal	
2.		Presentasi PPT	Perbanyak gambar.
		Presentasi PPT	
3.		Bagian Awal	Perbaiki abstrak.
		Bagian Awal	
4.		Bab 1	Tujuan disesuaikan.
		Bab 1	Batasan Masalah diperjelas
5.		Bab 2	Referensi tentang Aasys ditambahkan.
		Bab 2	
6.		Bab 3	Penyajian gambar harus jelas
			Penyajian Tabel harus jelas
		Bab 3	

(lanjutan)

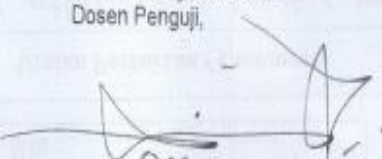


**YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**

Jl. Moh. Kahfi II, Bhumirengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp: 081291030024
Email: humas@istn.ac.id Website: www.istn.ac.id

No.	Hal.	Bab / Sub Bab	Uraian Perbaikan / Comments
7		Bab 4	Plot gambar yang jelas .
		Bab 4	Pengembangan beton Sandwich
		Bab 4	
		Bab 4	
9		Bab 5	Sesuaikan dengan tujuan .
10		Daftar Pustaka	Lengkap
11		Lampiran	Tambahkan
		Lampiran	

Jakarta, 15 Agustus 2025
Dosen Penguji,


SYAHRIL TAUFIK

Lampiran I. Pemeriksaan Plagiarisme

(1b.4) DRAFT TESIS-R3 - Vembri Affiano.pdf

ORIGINALITY REPORT

14%	12%	6%	4%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	moam.info Internet Source	2%
2	text-id.123dok.com Internet Source	1%
3	123dok.com Internet Source	1%
4	Submitted to Syiah Kuala University Student Paper	1%
5	repository.umsu.ac.id Internet Source	<1%
6	ft.unri.ac.id Internet Source	<1%
7	journal.umpr.ac.id Internet Source	<1%
8	repository.ub.ac.id Internet Source	<1%
9	repository.unhas.ac.id Internet Source	<1%
10	Submitted to Universitas Brawijaya Student Paper	<1%
11	core.ac.uk Internet Source	<1%

(lanjutan)

12	Hayder H. H. Kamonna, Qasim M. Shakir, Haider A. Al-Tameemi. "Behavior of High-Strength Self-Consolidated Reinforced Concrete T-Deep Beams", The Open Construction and Building Technology Journal, 2020 Publication	<1 %
13	www.iiste.org Internet Source	<1 %
14	docplayer.info Internet Source	<1 %
15	herbycalvinpascal.files.wordpress.com Internet Source	<1 %
16	sipil.studentjournal.ub.ac.id Internet Source	<1 %
17	"Mechanical Properties of Strengthened RC Beams using Steel Plates", International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2020 Publication	<1 %
18	www.coursehero.com Internet Source	<1 %
19	Submitted to Curtin University of Technology Student Paper	<1 %
20	repository.its.ac.id Internet Source	<1 %
21	Wei-yong Wang, Bing Liu, Venkatesh Kodur. "Effect of Temperature on Strength and Elastic Modulus of High-Strength Steel", Journal of Materials in Civil Engineering, 2013 Publication	<1 %

(lanjutan)

22	es.scribd.com Internet Source	<1 %
23	Liaqat Ali Qureshi, Usman Muhammad. "Effects of incorporating steel and glass fibers on shear behavior of concrete column-beam joints", KSCE Journal of Civil Engineering, 2017 Publication	<1 %
24	id.scribd.com Internet Source	<1 %
25	Yudhiarma Yudhiarma, Herry Prabowo, Mochammad Hilmy. "Tinjauan Kapasitas dan Detailing Lentur Dan Geser Balok Beton Bertulang Konvensional Berdasarkan SNI 2847:2013 Dengan Pertimbangan Aspek Kemudahan Praktik Di Lapangan dan Acuan Rules Of Thumb Studio Arsitektur", Jurnal Vokasi, 2021 Publication	<1 %
26	id.123dok.com Internet Source	<1 %
27	pendidikan-sains.fmipa.unesa.ac.id Internet Source	<1 %
28	mafiadoc.com Internet Source	<1 %
29	rc.library.uta.edu Internet Source	<1 %
30	Submitted to IAIN Purwokerto Student Paper	<1 %
31	Submitted to Sriwijaya University Student Paper	<1 %

(lanjutan)

32	Fahmuji Kurniawan, Alfian Kamaldi, Enno Yuniarto, Ridwan. "Perkuatan Balok Beton Bertulang Yang Mengalami Kegagalan Geser Menggunakan Metode Deep Embedment", Journal of Infrastructure and Construction Technology, 2023 Publication	<1 %
33	archive.org Internet Source	<1 %
34	repository.unj.ac.id Internet Source	<1 %
35	1pdf.net Internet Source	<1 %
36	academic-accelerator.com Internet Source	<1 %
37	Submitted to Coventry University Student Paper	<1 %
38	Submitted to University of Adelaide Student Paper	<1 %
39	digilib.unhas.ac.id Internet Source	<1 %
40	ejournal.unib.ac.id Internet Source	<1 %
41	klinikkonstruksi.jogjaprovo.go.id Internet Source	<1 %
42	Submitted to Ohio University Student Paper	<1 %
43	pt.scribd.com Internet Source	<1 %

(lanjutan)

44	www.scribd.com Internet Source	<1 %
45	fdocuments.net Internet Source	<1 %
46	jurnal.univpgri-palembang.ac.id Internet Source	<1 %
47	ugspace.ug.edu.gh:8080 Internet Source	<1 %
48	Submitted to iGroup Student Paper	<1 %
49	jurnal.umj.ac.id Internet Source	<1 %
50	jurnal.uns.ac.id Internet Source	<1 %
51	www.researchgate.net Internet Source	<1 %
52	Submitted to Universitas Pancasila Student Paper	<1 %
53	repository.unwira.ac.id Internet Source	<1 %
54	Submitted to Chulalongkorn University Student Paper	<1 %
55	Submitted to Fakultas Teknik Student Paper	<1 %
56	Submitted to SDM Universitas Gadjah Mada Student Paper	<1 %
57	travel.tempo.co Internet Source	<1 %

(lanjutan)

58	Submitted to Corporación Universitaria del Caribe Student Paper	<1 %
59	Submitted to STIE Mahardhika Student Paper	<1 %
60	Sarhan M. Musa, A.V. Kulkarni, V.K. Havanur. "Chapter 3: Finite Element Analysis of Axially Loaded Members", Walter de Gruyter GmbH, 2013 Publication	<1 %
61	Submitted to Universitas Merdeka Malang Student Paper	<1 %
62	docshare.tips Internet Source	<1 %
63	eprints.walisongo.ac.id Internet Source	<1 %
64	iptek.its.ac.id Internet Source	<1 %
65	americandreamcoalition.org Internet Source	<1 %
66	openjournal.unpam.ac.id Internet Source	<1 %
67	repositori.uma.ac.id Internet Source	<1 %
68	Hala Mamdouh, Nasr Zenhom, Ahmed Essam. "Strengthening of concrete columns using core reinforced bars and steel fibers", Case Studies in Construction Materials, 2023 Publication	<1 %

Submitted to Universitas Borneo Tarakan

(lanjutan)

69	Student Paper	<1 %
70	authorzilla.com Internet Source	<1 %
71	www.ijaerd.co.in Internet Source	<1 %
72	Ahmed Abdel-Bary, Ayman Hosny, Wael Montaser. "THEORETICAL EVALUATION OF UNIAXIAL FLEXURAL BEHAVIOR OF ULTRAHIGH PERFORMANCE REINFORCED CONCRETE MEMBERS", Journal of Al-Azhar University Engineering Sector, 2020 Publication	<1 %
73	de.scribd.com Internet Source	<1 %
74	digilib.uinsby.ac.id Internet Source	<1 %
75	elib.unikom.ac.id Internet Source	<1 %
76	eprints.ums.ac.id Internet Source	<1 %
77	journal.umpalangkaraya.ac.id Internet Source	<1 %
78	livrosdeamor.com.br Internet Source	<1 %
79	openknowledge.worldbank.org Internet Source	<1 %
80	repository.upi.edu Internet Source	<1 %

(lanjutan)

81	stiabandung.ac.id Internet Source	<1 %
82	trends.tribunnews.com Internet Source	<1 %
83	Submitted to CSU, San Diego State University Student Paper	<1 %
84	Koilal Alokabel, Jusuf Wilson Meynerd Rafael, Abdul Syukur Hadi Suwito, Alva Yuventus Lukas. "ANALISIS DAN PERANCANGAN CAMPURAN BETON MENGGUNAKAN AGREGAT DARI QUARRY NOEMUTI KABUPATEN TTU", FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil), 2024 Publication	<1 %
85	Submitted to University of Melbourne Student Paper	<1 %
86	Venkatesh Kodur. "Properties of Concrete at Elevated Temperatures", ISRN Civil Engineering, 2014 Publication	<1 %
87	eprints.itn.ac.id Internet Source	<1 %
88	eprints.politeknikpu.ac.id Internet Source	<1 %
89	eprints.undip.ac.id Internet Source	<1 %
90	eprints.unram.ac.id Internet Source	<1 %
91	jurnal.polban.ac.id Internet Source	<1 %

(lanjutan)

92	repository.ar-raniry.ac.id Internet Source	<1 %
93	repository.unej.ac.id Internet Source	<1 %
94	Rifky Zaidani, Mochamad Mas'ud. "STRESS ANALYSIS OF SUSPENSION BRACKETS ON A 12-METER ELECTRIC BUS USING THE FINITE ELEMENT METHOD", Media Mesin: Majalah Teknik Mesin, 2023 Publication	<1 %

