



203/FT-01/TESIS/07/2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN KERUNTUHAN JEMBATAN KRASAK AKIBAT
KEBAKARAN TRUK TANGKI BAHAN BAKAR DENGAN
MEMPERHITUNGGAN BENTUK SEBENARNYA DARI
ELEMEN DIAGONAL RANGKA UTAMA DAN PENGAKU
ATAS JEMBATAN**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister

RIFKY NETRIADY

07 06 172 582

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN STRUKTUR
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Rifky Netriady

NPM : 07 06 172 582

Tanda Tangan : 

Tanggal : 9 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Rifky Netriady

NPM : 0706172582

Program Studi : Teknik Sipil / Struktur

Judul Tesis : Kajian Keruntuhan Jembatan Krasak Akibat Kebakaran Truk Tangki Bahan Bakar Dengan Memperhitungkan Bentuk Sebenarnya Dari Elemen Diagonal Rangka Utama Dan Pengaku Atas Jembatan.

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 Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Heru Purnomo, DEA.

()


Penguji : Ir. Syahril A. Rahim M.Eng.

()

Penguji : Dr. Ing. Ir. Henki Wibowo Ashadi

()

Penguji : Dr. -Ing. Josia Irwan Rastandi S.T., M.T.

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2010

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Jurusan Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Bapak Dr. Ir. Heru Purnomo, DEA., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
- 2) Pihak PT. Rekayasa Konstruksi, yang telah banyak membantu selama pendidikan.
- 3) Orang tua dan istri saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.
- 4) Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 20 Juli 2010

Rifky Netriady

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rifky Netriady

NPM : 07 06 172 582

Program Studi : Pasca Sarjana

Departemen : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada **Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Kajian Keruntuhan Jembatan Krasak Akibat Kebakaran Truk Tangki Bahan Bakar Dengan Memperhitungkan Bentuk Sebenarnya Dari Elemen Diagonal Rangka Utama Dan Pengaku Atas Jembatan

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), 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 : Depok

Pada tanggal : 20 Juli 2010

Yang menyatakan



(Rifky Netriady)

ABSTRAK

Nama	: Rifky Netriady
Program Studi	: Teknik Sipil
Judul	: Kajian Keruntuhan Jembatan Krasak Akibat Kebakaran Truk Tangki Bahan Bakar Dengan Memperhitungkan Bentuk Sebenarnya Dari Elemen Diagonal Rangka Utama Dan Pengaku Atas Jembatan

Pada tanggal 10 Mei 1990, terjadi peristiwa runtuhnya sebuah jembatan di atas Kali Krasak akibat kebakaran truk tangki bahan bakar. Sampai saat ini masih terjadi kesimpangsiuran tentang mengapa dan bagaimana sebenarnya keruntuhan tersebut dapat terjadi.

Prof. Ir. Sidharta S. Kamarwan, dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa keruntuhan disebabkan turunnya batas tegangan leleh baja menjadi 50% akibat kenaikan temperatur hingga 300 °C yang mengakibatkan struktur rangka atas tidak mampu menahan gaya tekan yang terjadi, kemudian dilanjutkan oleh Arya Perdana menyimpulkan bahwa kegagalan struktur terjadi pada temperatur rata-rata 1125°C.

Setelah membaca laporan tersebut, penulis merasa tertantang untuk meneruskan hasil penelitian beliau lebih lanjut, yaitu dengan merekonstruksi peristiwa tersebut melalui membuat *prototype* percobaan kemudian dari hasil percobaan tersebut dilanjutkan dengan simulasi menggunakan program ANSYS V11.0, salah satu program simulasi terbaik berbasis analisa elemen hingga.

Percobaan dengan *prototype* berbasis pada teori keserupaan dengan menggunakan material aluminium dapat memberikan petunjuk bahwa deformasi struktur yang terjadi dimulai akibat terjadinya kenaikan temperatur pada elemen rangka jembatan yang diikuti dengan buckling pada beberapa titik lokasi.

Kegagalan struktur mulai terjadi pada suhu 600 °C memiliki nilai modulus elastisitas sebesar ± 62000 Mpa, pada deformasi maksimum, nilai modulus elastisitas dari simulasi model jembatan krasak adalah 22000 MPa (11% dari Modulus Elastisitas awal).

Kata kunci:

Analisa Balik, Buckling, *Prototype*, Teori Keserupaan, Jembatan Model, Jembatan Krasak, Modulus Elastisitas.

ABSTRACT

Name	: Rifky Netriady
Study Program	: Postgraduate of Civil Engineering
Judul	: The Study Of The Krasak Bridge Collapse Due Fire Truck Fuel Tank With Taking Shape Actually From Diagonal Element Main Frame And Top Stiffness Of Bridge

On May 10, 1990, events in the collapse of a bridge Krasak by fire truck fuel tank. Until now there is still confusion about exactly why and how the collapse could occur.

Prof. Ir. Sidhartha S. Kamarwan, in his study concluded that caused the collapse of the yield stress is drop limit to be 50% due to a rise in temperature to 300 ° C which resulted in a frame structure above is not able to withstand compressive force occurs, followed by Arya Prime conclude that the failure of the structure occurs at temperatures average average 1125 ° C.

After reading the report, the authors feel challenged to continue his research further, by reconstructing events through prototyping experiments and from the results of the experiment followed by simulation using ANSYS V11.0 program, one of the best simulation program based on the finite element analysis.

Experiments with a prototype based on the similarity theory using aluminum materials can provide clues that the structural deformation that occurs due to the temperature rise begins in order to bridge the element followed by buckling at some point locations.

The failure of the structure began to occur at a temperature of 600 ° C has a modulus of elasticity values of $\pm 62\ 000$ MPa, the maximum deformation, modulus of elasticity of simulation models Krasak bridge is 22 000 MPa (11% from early Modulus of Elasticity).

Keyword:

Retro analysis, Buckling, *Prototype*, Similitude Theory, Bridge Model, Krasak Bridge, Modulus of Elasticity.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	ii
PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR / UCAPAN TERIMA KASIH	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
DAFTAR ISTILAH/SIMBOL	xvii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Pembatasan Masalah	3
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
2. STUDI PUSTAKA	6
2.1 Api dan Panas	6
2.1.1 Bahan Bakar	6
2.1.1.1 Material	6
2.1.1.2 Nilai Kalori.....	6
2.2 Pembakaran	7
2.2.1 Proses Kimia	7
2.2.1.1 Perubahan Fase dan Proses Dekomposisi	8
2.2.1.2 Pencampuran dalam Api	8
2.2.1.3 Difusi pada Pembakaran	9
2.2.2 Tahapan-Tahapan pada Kebakaran	9
2.2.2.1 Temperatur dan Waktu Kebakaran.....	10
2.2.2.2 Beban Api dan Radius Penyebarannya	12
2.2.2.3 Transfer Panas ke Struktur di Sekitarnya.....	13
2.2.2.4 Massa Termal dan Inersia Termal	14
2.2.3 Kurva Temperatur dan Model Api	15
2.2.3.1 Kurva Temperatur Nominal-Waktu.....	16
2.2.3.2 Beban Api (<i>Fire Load Density</i>).....	17
2.2.3.3 Laju Pelepasan Panas (<i>RHR</i>).....	18
2.2.3.4 Kehilangan Panas.....	19
2.2.3.5 <i>Parametric temperature-time curves</i>	19

2.3	Tingkat Ketahanan Struktur Baja Terhadap Api	21
2.3.1	Pengertian Ketahanan Terhadap Api (Fire Resistance)	21
2.3.2	Efek Temperatur Tinggi Terhadap Struktur Baja.....	21
2.3.3	Efek Kebakaran Pada Sambungan Baja.....	23
2.3.4	Perilaku Struktur Baja Dalam Kebakaran.....	24
2.3.4.1	Fenomena Lain yang Terjadi pada Baja dalam Suhu Tinggi.....	25
2.3.4.2	Hal yang Terjadi pada Fase Pendinginan Pasca Kebakaran.....	26
2.4	Literatur Jembatan Krasak	27
2.4.1	Jembatan Krasak Secara Umum	27
2.4.1.1	<i>Data Teknis</i>	27
2.4.1.2	Bahan Bagian-Bagian Jembatan <i>Callendar Hamilton</i>	29
2.4.2	Sifat Material Jembatan Krasak	30
2.4.2.1	Kondisi Tegangan-Regangan (<i>Stress-Strain</i>) Baja	31
2.4.2.2	Perpanjangan Linear Baja terhadap Suhu ($\Delta l / l$).....	32
2.4.2.3	Konduktifitas Termal Baja (<i>k</i>).....	33
2.4.2.4	Kapasitas Panas Baja (C_a).....	35
2.4.3	Sifat Material Jembatan Model	36
2.4.3.1	Kondisi Tegangan-Regangan (<i>stress-strain</i>) Aluminium	36
2.4.3.2	Perpanjangan Linear terhadap Suhu ($\Delta l / l$) Aluminium.....	37
2.4.3.3	Konduktifitas Termal Aluminium.....	37
2.4.3.4	Kapasitas Panas Aluminium.....	37
2.5	Analisa Dari Penelitian Sebelumnya	37
2.5.1	Penelitian Prof. Ir. Sidharta S Kamarwan.....	37
2.5.2	Penelitian Arya Perdana.....	39
2.6	Struktur Model	40
2.6.1	Skala Model.....	41
2.7	Perhitungan Transfer Panas Dengan Pendekatan Metode Elemen Hingga	43
3.	METODOLOGI PENELITIAN.....	49
3.1	Prosedur Analisa Umum	49
3.1.1	Proses Penelitian.....	50
3.1.2	Alur Pembebanan	51
3.2	Geometri Struktur Jembatan Krasak	52
3.2.1	Profil Baja Pada Struktur Jembatan Krasak	52
3.2.1.1	<i>Umum</i>	52
3.2.1.2	<i>Bagian Diagonal</i>	53
3.2.1.3	<i>Bagian Bawah</i>	53
3.2.1.4	<i>Bagian Atas</i>	54
3.2.2	Struktur Jembatan Model	55
3.3	Data Dimensi Truk Tangki	56
3.4	Data Pembebanan Pada Jembatan Krasak	57
3.4.1	Beban Gravitasi	57
3.4.2	Beban Termal	58
3.5	Proses Pemodelan Jembatan Krasak	62
3.6	Data Masukan	63
3.6.1	Model Struktur	63

3.6.2 Dimensi Struktur	63
3.6.3 Sifat Material	64
3.6.4 Pembebanan	64
3.7 Parameter yang Akan di Evaluasi	65
4. HASIL SIMULASI DAN ANALISA	66
4.1 Hasil Simulasi	66
4.1.1 Jembatan Model	66
4.1.2 Uji Statik	66
4.1.3 Gambaran Rangka Batang yang Ditinjau	67
4.1.3.1 Posisi Rangka yang Mengalami Kebakaran	67
4.1.3.2 Penyebaran Suhu pada Rangka Batang	68
4.1.4 Deformasi	69
4.1.4.1 Deformasi Percobaan Jembatan Model dan Simulasi Model	69
4.1.4.2 Deformasi pada Jembatan Krasak (<i>Prototype</i>)	71
4.1.5 Hubungan Tegangan Regangan	73
4.1.5.1 Tegangan dan Regangan Simulasi Jembatan Model	74
4.1.5.2 Tegangan dan Regangan Jembatan Krasak (<i>Prototype</i>)	77
4.2 Hasil Analisa Simulasi	79
4.2.1 Analisa Deformasi	79
4.2.1.1 Deformasi Simulasi Jembatan Model	79
4.2.1.2 Deformasi Jembatan Krasak (<i>Prototype</i>)	81
4.2.2 Analisa Tegangan dan Regangan	83
4.2.3 Analisa Keruntuhan Jembatan Krasak	85
5. KESIMPULAN DAN SARAN	87
5.1 Kesimpulan	87
5.2 Saran	89
DAFTAR REFERENSI	90
DAFTAR PUSTAKA	92
LAMPIRAN	94

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1.	Tahapan-Tahapan Dalam Perkembangan Kebakaran 9
Gambar 2.2.	Grafik Hubungan Waktu Dan Temperatur Pada Kebakaran 11
Gambar 2.3	Kurva Temperature Nominal Terhadap Waktu 17
Gambar 2.4.	Pengaruh Kenaikan Suhu Pada Kekuatan dan Modulus Elastisitas Struktur Baja 22
Gambar 2.5.	Peta Lokasi Jembatan Krasak 27
Gambar 2.6.	Sketsa Jembatan Krasak 27
Gambar 2.7.	Grafik Hubungan Tegangan-Regangan Baja Akibat Pertambahan Temperatur 31
Gambar 2.8.	Grafik Hubungan Tegangan-Regangan Baja Akibat Pertambahan Temperatur 32
Gambar 2.9.	Grafik Hubungan Perpanjangan (<i>Thermal Strain</i>) Baja Akibat Pertambahan Temperatur 33
Gambar 2.10.	Grafik Hubungan Konduktifitas Termal Baja Akibat Pertambahan Temperatur 34
Gambar 2.11.	Grafik Hubungan Konduktifitas Termal Baja Akibat Pertambahan Temperatur 34
Gambar 2.12.	Grafik Hubungan Kapasitas Panas Baja Akibat Pertambahan Temperatur 35
Gambar 2.13.	Grafik Hubungan Kapasitas Panas Baja Akibat Pertambahan Temperatur 36
Gambar 2.14.	Hubungan Tegangan-Regangan Aluminium terhadap Temperatur 36
Gambar 2.15.	Peristiwa Pendinginan Butiran Baja Kecil 43
Gambar 3.1.	Proses Penelitian 50
Gambar 3.2.	Alur Perhitungan Kapasitas Beban Suatu Struktur Terbuka Terhadap Api 51
Gambar 3.3.	Penamaan Profil Baja Jembatan Krasak Bagian Diagonal 52
Gambar 3.4.	Potongan Melintang Profil Balok 52
Gambar 3.5.	Potongan Melintang Profil Bracing Dan Redundant 53
Gambar 3.6.	Penamaan Profil Baja Jembatan Krasak Bagian Bawah 53
Gambar 3.7.	Potongan Melintang dan Tabel Data Profil 1, Profil 2, dan Profil 3 54
Gambar 3.8.	Penamaan Profil Baja Jembatan Krasak Bagian Atas 54
Gambar 3.9.	Potongan Melintang Profil I 55
Gambar 3.10.	Potongan Melintang Profil II 55
Gambar 3.11.	Potongan Melintang Profil III 55
Gambar 3.12.	Rangka Model bagian Atas 56
Gambar 3.13.	Rangka Model bagian Samping 56
Gambar 3.14.	Rangka Model Bagian Bawah 56
Gambar 3.15.	Truk Tangki Bahan Bakar 16000 Liter 56
Gambar 3.16.	Potongan Melintang Struktur Pelat Jalan Beton 58

Gambar 3.17	Grafik Perbandingan Temperatur Gas dan Temperatur Baja	61
Gambar 3.18	Foto Jembatan Krasak Setelah Runtuh	65
Gambar 3.19	Lokasi Pembebanan Termal Pada Jembatan Krasak	65
Gambar 4.1.	Struktur Jembatan Model (Skala 1:17)	66
Gambar 4.2.	Posisi Beban dan Dial Gage pada Uji Statik	67
Gambar 4.3.	Posisi Rangka Yang Mengalami Kenaikan Temperatur	67
Gambar 4.4.	Penyebaran Suhu ($^{\circ}\text{C}$) Pada Rangka Atas	68
Gambar 4.5.	Penyebaran Suhu ($^{\circ}\text{C}$) Pada Rangka Samping	68
Gambar 4.6.	Nodal Peninjauan Deformasi	68
Gambar 4.7.	Perpindahan Nodal 283 arah Z (Percobaan Jembatan Model)	69
Gambar 4.8.	Perpindahan Nodal 283 arah Z (Simulasi Jembatan Model)	70
Gambar 4.9.	Perpindahan Nodal 283 arah Z (Simulasi Jembatan Krasak)	71
Gambar 4.10.	Kondisi Jembatan Krasak pada menit ke-34 (Simulasi Jembatan Krasak)	72
Gambar 4.11.	Kondisi Jembatan Krasak pada menit ke-53 (Simulasi Jembatan Krasak)	72
Gambar 4.12.	Penomoran Elemen yang di Analisa	73
Gambar 4.13.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 910 (Simulasi Model)	74
Gambar 4.14.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 914 (Simulasi Model)	74
Gambar 4.15.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 1376 (Simulasi Model)	74
Gambar 4.16.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 1358 (Simulasi Model)	75
Gambar 4.17.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 2380 (Simulasi Model)	75
Gambar 4.18.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 2446 (Simulasi Model)	75
Gambar 4.19.	Lokasi Penempatan Starin Gage	76
Gambar 4.20.	Regangan Pada Elemen 2568	76
Gambar 4.21.	Regangan Elemen 2568 (Simulasi Model)	76
Gambar 4.22.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 910 (Simulasi Jembatan Krasak)	77
Gambar 4.23.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 914 (Simulasi Jembatan Krasak)	77
Gambar 4.24.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 1376 (Simulasi Jembatan Krasak)	77
Gambar 4.25.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 1358 (Simulasi Jembatan Krasak)	78
Gambar 4.26.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 2380 (Simulasi Jembatan Krasak)	78
Gambar 4.27.	Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 2446 (Simulasi Jembatan Krasak)	78
Gambar 4.28.	Deformasi Jembatan Model dan Model Simulasi	79
Gambar 4.29.	Perpindahan Nodal 283 arah Z (Simulasi Jembatan Krasak)	81
Gambar 4.30.	Kondisi Jembatan Krasak Sebenarnya Pasca Kebakaran	85

Gambar 4.31. Kondisi Jembatan Krasak Hasil Simulasi..... 86



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Nilai Kalori Material Yang Dapat Terbakar (<i>Combustible</i>)	6
Tabel 2.2. Hubungan Beban Api dan Waktu Pembakaran	11
Tabel 2.3. Koefisien Perpindahan Panas Secara Konveksi	14
Tabel 2.4. Tegangan Leleh Profil Baja Struktur Jembatan Krasak	29
Tabel 2.5. Perpanjangan Linear Aluminium (<i>Thermal Expansion</i>)	37
Tabel 2.6. Konduktifitas dan Kapasitas Panas Aluminium	37
Tabel 2.7. Faktor Skala Pada Model Statik Elastis	42
Tabel 2.8. Faktor Skala Pada Model Thermal	43
Tabel 3.1. Skala Jembatan Model	55
Tabel 3.2. Dimensi Truk Tangki Bahan Bakar	57
Tabel 3.3. Faktor Skala Pada Jembatan Model.....	62
Tabel 4.1. Hasil Uji Statik	55
Tabel 4.2. Deformasi dari Model Percobaan dan Simulasi.....	80
Tabel 4.3. Deformasi Jembatan Krasak (Simulasi Jembatan Krasak)	82
Tabel 4.4. Tegangan Kritis Elemen Rangka Atas.....	83
Tabel 4.5. Regangan Hasil Simulasi Jembatan Model.....	84
Tabel 4.6. Regangan Hasil Simulasi Jembatan Krasak.....	84

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A. Tipe Elemen dan Dimensi Satuan Dalam Program ANSYS V11.0	94
Lampiran B. Langkah-Langkah Simulasi Dengan Program ANSYS V11.0	100
Lampiran C. Input Data Program ANSYS V11.0	110
Lampiran D. Dokumentasi Jembatan Krasak	129
Lampiran E. Data Lapangan Hasil Percobaan	131



DAFTAR SINGKATAN

CH	Callendar Hamilton
FLED	Fire Load Energy Density
HYS	High Yield Steel
MYS	Mild Yield Steel



DAFTAR ISTILAH/SIMBOL

Simbol	Keterangan	Dimensi
<i>A</i>	Luas Penampang	<i>m</i> ²
<i>A_f</i>	Luas Lantai Pada Suatu Ruangan	<i>m</i> ²
<i>A_t</i>	Luas Permukaan Ruangan selain Ventilasi	<i>m</i> ²
<i>A_v</i>	Luas Ventilasi	<i>m</i> ²
<i>B_i</i>	Angka Biot	
<i>C_p</i>	Kapasitas Panas	<i>J/kg-K</i>
<i>E</i>	Energi	Joule
<i>E_{in}</i>	Energi Masuk	Joule
<i>E_{out}</i>	Energi Keluar	Joule
<i>E_{gen}</i>	Energi Yang Dihasilkan	Joule
<i>E_{stored}</i>	Energi Yang Disimpan	Joule
<i>ef</i>	<i>Fire Load Energy Density (FLED)</i>	<i>MJ/m</i> ²
<i>E_s</i>	Modulus Elastisitas Baja	<i>MPa</i>
<i>E_c</i>	Modulus Elastisitas Beton	<i>MPa</i>
<i>f_c'</i>	Kuat Tekan Beton umur 28 hari	<i>MPa</i>
<i>F_d</i>	Faktor distribusi beban api	
<i>F_i</i>	Faktor Pembakaran	
<i>F_o</i>	Angka Fourier	
<i>f_u</i>	Tegangan Ultimate	<i>MPa</i>
<i>F_v</i>	Faktor Ventilasi	
<i>f_y</i>	Tegangan Leleh	<i>MPa</i>
<i>h</i>	Koefisien Perpindahan Panas	<i>W/m</i> ² - <i>K</i>
<i>H_{ui}</i>	Nilai Kalori Material	<i>MJ/kg</i>
ΔH_c	Nilai Kalori Bersih	<i>MJ/kg</i>
ΔH	Nilai Kalori Efektif	<i>MJ/kg</i>
<i>H_v</i>	Ketinggian Ventilasi	<i>m</i>
<i>I_{YY}</i>	Tahanan Inersia Sumbu Y	<i>m</i> ⁴
<i>I_{ZZ}</i>	Tahanan Inersia Sumbu Z	<i>m</i> ⁴
<i>k</i>	Konduktifitas Termal	<i>W/m-K</i>
<i>K_d</i>	Konstanta distribusi beban api	
<i>L_c</i>	Panjang Karakteristik	<i>m</i>
<i>L_{eff}</i>	Lebar Efektif Web	<i>m</i>
<i>L_{fire}</i>	Beban Termal	<i>MJ/m</i> ²
<i>m</i>	Massa	<i>kg</i>
<i>m_c</i>	Persentase Kandungan Air	
<i>m_d</i>	Persentase Kandungan Air Terhadap Berat Kering	
<i>m_i</i>	Massa Bahan Bakar	<i>kg</i>
<i>n</i>	Rasio Modular	
<i>P</i>	Tekanan	<i>psi</i>
<i>Q</i>	Tingkat Pelepasan Panas	<i>MW</i>
<i>R</i>	Jari-jari lingkaran	<i>m</i>
<i>t</i>	Waktu	<i>s</i>

Δt	Perbedaan Waktu	s
T	Temperatur	$^{\circ}C$
V	Volume	m^3
Δx	Perbedaan Panjang	m
T_i	Temperatur Awal	$^{\circ}C$
T_f	Temperatur Fluida	$^{\circ}C$
α	Tingkat Penyebaran Panas	s/m^2
α_1	Koefisien Perpanjangan Linear terhadap Suhu	$^{\circ}C^{-1}$
θ	Parameter Euler	
ρ	Massa Jenis	kg/m^3



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Keselamatan dari banyak moda darat yang berbasis struktur penghubung merupakan hal sangat penting di perhatikan, terutama terhadap ancaman api. Ini telah dibuktikan oleh beberapa bencana, diantaranya yaitu runtuhnya Jembatan Kali Krasak sebelah barat pada 10 Mei 1991. Api yang tidak diinginkan adalah memiliki daya hancur yang menyebabkan ribuan kematian dan kerugian berjumlah jutaan dollar tiap tahun. Keamanan dari suatu tempat terhadap kebakaran bergantung pada banyak faktor dalam desain dan konstruksi, termasuk di dalamnya harapan bahwa bangunan tersebut dan bagian-bagiannya tidak hancur atau menimbulkan penyebaran api.

Runtuhnya Jembatan Krasak bersumber dari kebakaran sebuah truk tangki bahan bakar yang memuat 16.000 liter premix sekitar 50 meter setelah memasuki jembatan. Sehingga jembatan yang bernilai tiga milyar rupiah itu lenyap dalam 20 menit^[2]. Meskipun peristiwa ini sudah diberitakan di media massa, namun masih terdapat kesimpang-siuran peristiwa kebakaran yang sebenarnya terjadi.

Pembangunan kembali jembatan itu dimulai 23 Mei 1991 dan selesai 2 Agustus 1991. Diresmikan tanggal 6 Agustus 1991. Biaya perbaikan mencapai Rp 1,7 Milyar. Jembatan Krasak lama, dengan panjang 224 meter, dibangun tahun 1976 dan diresmikan 27 Januari 1977, berkonstruksi Callendar Hamilton buatan Inggris, seperti ruas jembatan di sisi selatan yang masih ada^[3].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Prof. Ir. Sidharta S. Kamarwan dalam laporan singkatnya yang berjudul “JEMBATAN RANGKA BAJAPUN DAPAT TERBAKAR DAN RUNTUH”. Laporan tersebut menyimpulkan bahwa perilaku keruntuhan Jembatan Krasak disebabkan turunnya batas tegangan leleh baja menjadi 50% akibat kenaikan temperatur hingga 300 °C dan dengan berat sendiri dari konstruksi baja mengakibatkan

struktur rangka atas tidak mampu menahan gaya tekan yang terjadi sehingga kemudian batang tersebut melengkung.

Pada penelitian kedua yang dilakukan oleh Arya Perdana dalam skripsinya yang berjudul “ANALISA BALIK (*RETRO ANALYSIS*) KERUNTUHAN JEMBATAN KRASAK AKIBAT KEBAKARAN TRUK TANGKI BAHAN BAKAR” menyimpulkan bahwa kegagalan struktur terjadi pada temperatur rata-rata 1125°C.^[1]

Dari beberapa referensi mengenai kebakaran struktur, Thomas W. Eagar dan Christopher Musso yang telah melakukan penelitian terhadap keruntuhan yang terjadi pada gedung WTC (*World Trade Center*), menyimpulkan bahwa kebakaran yang terjadi menimbulkan kenaikan temperature antara 500°C - 650°C, walaupun dari pengalamannya temperature dapat terjadi dalam batasan 750°C - 800°C.^[2]

Penelitian lain yang dilakukan Dr. Vytenis Babrauskas, menuliskan tentang temperature pada lidah api dan kebakaran (*Temperatures in Flames and Fires*) menyebutkan bahwa temperature api pada kebakaran di ruangan terbuka, berada dibawah temperature 900°C, yaitu pada posisi terdekat dari sumber api (*continuous flame region*).^[4]

1.2. PERMASALAHAN

Permasalahan yang dibahas dalam penulisan ini adalah keruntuhan Jembatan Krasak itu sendiri. Penyempurnaan struktur dalam pemodelan simulasi dengan memodelkan pengaku pada batang diagonal dan rangka atas jembatan, untuk mendapatkan hasil yang lebih mendekati kondisi seharusnya.

Percobaan terhadap struktur sebenarnya dilakukan dengan suatu pendekatan terhadap sebuah jembatan model yang direncanakan sesuai dengan teori kesamaan, untuk mendapatkan pola keruntuhan serta seberapa besar pengaruh dari kebakaran dalam proses keruntuhan jembatan tersebut.

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penulisan ini adalah mencari pola keruntuhan Jembatan Krasak yang mendekati keadaan sebenarnya melalui simulasi dan percobaan.

Simulasi dilakukan berdasarkan data-data historis dari peristiwa keruntuhan jembatan tersebut. Hasil dari simulasi ini nantinya akan dibandingkan dengan data-data dan dokumentasi historis yang ada.

1.4. PEMBATAAN MASALAH

Tulisan ini membatasi masalah dalam hal:

1. Jembatan Krasak runtuh akibat kebakaran (*fire*).
2. Kebakaran yang terjadi diasumsikan menghabiskan 1200 liter bahan bakar.
3. Analisa struktur dilakukan secara nonlinear, baik dari segi sifat material ataupun geometrinya.
4. Percobaan yang dilakukan hanya sebagai pendekatan terhadap kejadian sesungguhnya.

1.5. METODOLOGI

Tahapan-tahapan yang dilakukan penulis dalam melakukan thesis ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur. Penulis mencari dan mempelajari berbagai macam data mengenai hal-hal yang berhubungan dengan kebakaran, yaitu hal-hal yang menyebabkan dan diakibatkannya. Hal ini sudah dilakukan pada bab sebelumnya, tepatnya pada Bab 2, dari Subbab 2.1 hingga Subbab 2.5.
2. Studi data historis. Penulis mempelajari informasi-informasi dari penelitian sebelumnya, mengenai proses dan kejadian keruntuhan Jembatan Krasak sampai sedetail mungkin serta data yang berhubungan dengan dimensi struktur Jembatan Krasak dan beban truk tangki bermuatan 16000 liter premix. Dimana data-data tersebut akan dimanfaatkan dalam melakukan modelisasi struktur dan keadaan Jembatan Krasak pada kondisi yang semirip mungkin dengan aslinya. Data detail dimensi Jembatan Krasak hasil pengukuran secara langsung pada lokasi akan dibahas pada Bab 3, Subbab 3.2. Untuk data dimensi truk tangki bermuatan 16000 liter premix akan dibahas pada Bab 3, Subbab 3.3.

3. Perencanaan model dengan menentukan skala setiap parameter struktur berdasarkan ketentuan dari teori kesamaan yang akan dibahas pada Bab 3, Subbab 3.5.
4. Melakukan pengujian statik terhadap jembatan model.
5. Menghitung beban lalu lintas saat terjadinya kebakaran, dan beban termal yang dihasilkan dari proses pembakaran yang dinyatakan dengan gambar gradien temperatur pada tiap elemen profil rangka baja yang mengalami kenaikan suhu. Data pembebanan ini akan dibahas pada Bab 3, Subbab 3.5.
6. Melakukan analisa struktur terhadap jembatan model menggunakan bantuan program ANSYS v11.0 sebagai program simulasi guna mengetahui perilaku struktur berupa hubungan tegangan regangan yang terjadi dan pola deformasi rangka aluminium struktur dari jembatan model berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian. Hasil simulasi ini akan ditampilkan pada Bab 4
7. Melakukan analisa struktur terhadap *prototype* jembatan menggunakan bantuan program ANSYS v11.0 sebagai program simulasi guna mengetahui perilaku struktur berupa hubungan tegangan regangan yang terjadi dan pola deformasi rangka baja struktur dari Jembatan Krasak. Hasil simulasi ini akan ditampilkan pada Bab 4
8. Kesimpulan. Penulis membahas dan menyimpulkan hasil poin 1 sampai 7 di atas. Hal ini akan disajikan pada Bab 5.

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Laporan evaluasi ini terdiri atas lima bab, dan diharapkan dapat menjelaskan serta membuktikan secara teoritis mengenai perilaku keruntuhan Jembatan Krasak sampai sedetail mungkin. Laporan ini akan terdiri dari beberapa bagian seperti berikut ini:

Bab I: Pendahuluan berisi Latar Belakang, Permasalahan, Tujuan Penelitian, Pembatasan Masalah, Metodologi, dan Sistematika Penulisan.

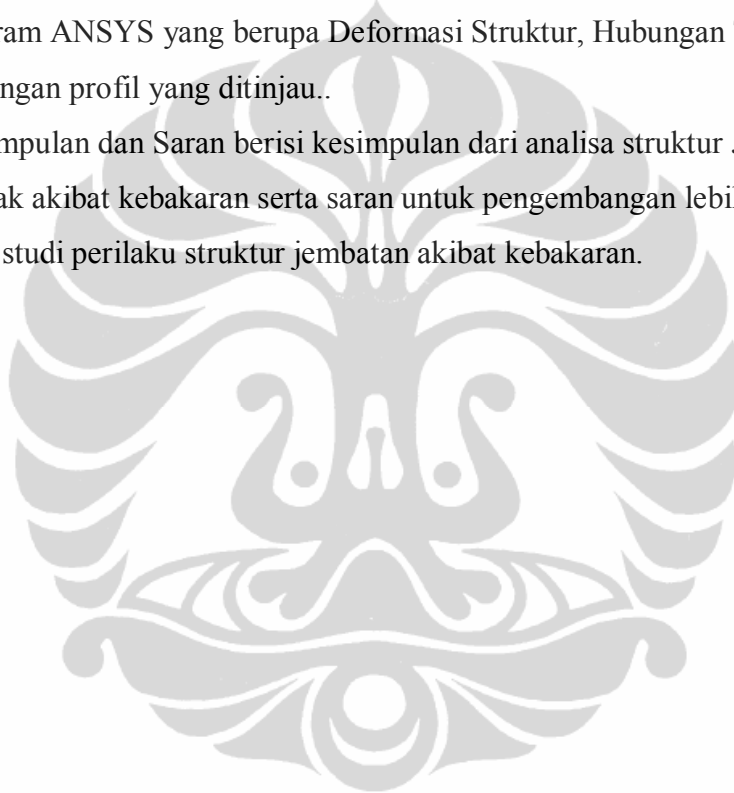
Bab II: Studi Pustaka terdiri dari Teori Api dan Panas, Efek Api serta Panas

terhadap Struktur Baja, Literatur Jembatan Krasak, Analisa dari Penelitian Sebelumnya, serta Hipotesis Keruntuhan Jembatan Krasak.

Bab III: Metodologi Penelitian akan membahas mengenai Prosedur Analisa, Data Dimensi Struktur Jembatan Krasak, Dimensi Truk Tangki Bahan Bakar, Perencanaan Jembatan Model, Perhitungan Pembebanan Pada Simulasi, Data Masukan, serta Parameter yang Akan Dievaluasi dalam penelitian ini.

Bab IV : Hasil Percobaan dan Simulasi serta Analisa berdasarkan data keluaran program ANSYS yang berupa Deformasi Struktur, Hubungan Tegangan-Regangan profil yang ditinjau..

Bab V : Kesimpulan dan Saran berisi kesimpulan dari analisa struktur Jembatan Krasak akibat kebakaran serta saran untuk pengembangan lebih lanjut pada studi perilaku struktur jembatan akibat kebakaran.



BAB 2

STUDI PUSTAKA

2.1. API DAN PANAS ^[5]

2.1.1. Bahan Bakar

2.1.1.1. Material

Sebagian besar bahan bakar pada bangunan yang terbakar adalah material organik yang berasal dari tumbuh-tumbuhan, binatang, ataupun produk minyak (*petrochemical*). Material bahan bakar tersebut bisa terdapat pada bagian dari struktur bangunan tersebut, material pembungkus, atau bagian-bagian lain, baik yang permanen ataupun sementara.

2.1.1.2. Nilai Kalori

Tingkat pelepasan panas pada suatu reaksi pembakaran dapat bergantung pada sifat alami material yang terbakar, besar api, serta jumlah udara yang tersedia. Nilai kalori atau panas dari suatu pembakaran adalah jumlah panas yang dilepaskan selama pembakaran suatu unit bahan bakar sampai habis. Sebagian besar bahan bakar yang berupa benda padat, cair, ataupun gas memiliki nilai kalori antara 15 sampai 50 *MJ/kg*. Nilai kalori bersih ΔH_c (*MJ/kg*) untuk sejumlah bahan bakar dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1. Nilai Kalori Material Yang Dapat Terbakar (*Combustible*) ^[5]

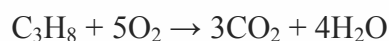
Liquids	<i>MJ/kg</i>	Gases	<i>MJ/kg</i>
Gasoline	44	Acetylene	48
Diesel Oil	41	Butane	46
Linseed Oil	39	Carbon Monoxide	10
Methanol	20	Hydrogen	120
Parafin Oil	41	Propane	46
Spirits	29	Methane	50
Tar	38	Ethanol	27
Benzene	40		

Solids	<i>MJ/kg</i>	Plastics	<i>MJ/kg</i>
Anthracite	34	ABS	36
Asphalt	41	Acrylic	28
Bitumen	42	Celluloid	19
Cellulose	17	Epoxy	34
Charcoal	35	Melamine Resin	18
Chlotes	19	Phenolformaldehyde	29
Coal, Coke	31	Polyester	31
Cork	29	Polyester, fibre-reinforced	21
Cotton	18	Polyethylene	44
Grain	17	Polysthylene	40
Grease	41	Petroleum	41
Kithen Refuse	18	Polyisocyanurate foam	24
Leather	19	Polycarbonate	29
Linoleum	20	Polypropylene	43
Paper, Cardboard	17	Polyurethane	23
Parafin wax	47	Polyurethane foam	26
Foam Rubber	37	Polyvinylchloride	17
Rubber Isoprene	45	Urea formaldehyde	15
Rubber Tire	32	Urea formaldehyde foam	14
Silk	19		
Straw	16		
Wood	19		
Wool	23		
Particle Board	18		

2.2. PEMBAKARAN ^[5]

2.2.1. Proses Kimia

Dalam bentuk yang paling sederhana, proses pembakaran material organik merupakan reaksi kimia eksotermik yang melibatkan proses oksidasi dari hidrokarbon yang menghasilkan uap air dan karbondioksida. Sebagai contoh, reaksi kimia untuk pembakaran sempurna dari propana dapat dituliskan:



Bentuk ini merupakan suatu penyederhanaan dari proses kimia. Sebenarnya, terdapat banyak faktor yang mempengaruhi reaksi kimia tersebut, seperti

temperatur, tekanan dan ketersediaan material. Dalam situasi pembakaran, sering dijumpai proses pembakaran yang tidak sempurna, mengakibatkan terjadinya produksi gas karbonmonoksida (CO) atau karbon padat (C), sebagai sisa partikel pembakaran atau asap. Reaksi kimia yang terjadi akan berubah seiring perubahan kondisi pembakaran.

2.2.1.1. Perubahan Fase dan Proses Dekomposisi

Pada suhu kamar, beberapa bahan bakar akan berwujud gas, namun sebagian besar akan berbentuk padat ataupun cair. Gas dapat bercampur dengan udara untuk terbakar secara langsung tanpa terjadinya perubahan fase, akan tetapi, bahan bakar berbentuk padatan dan cairan harus berubah dahulu menjadi fase udara sebelum dapat terbakar.

Untuk sebagian besar cairan, perubahan fase menjadi fase gas akibat suatu pemanasan disebut dengan evaporasi. Sedangkan untuk sebagian polimer, proses dekomposisi termal menyebabkannya berubah menjadi sesuatu yang lebih mudah menguap. Sebagian besar bahan bakar padat akan mencair apabila dipanaskan, menghasilkan cairan yang dapat berubah menjadi fase gas melalui proses evaporasi ataupun dekomposisi termal. Sedangkan beberapa bahan bakar padat lainnya, seperti jenis kayu, dapat terdekomposisi termal secara langsung dari fase padat menjadi fase gas. Proses dekomposisi termal tersebut dinamakan dengan pirolisis.

2.2.1.1. Pencampuran dalam Api

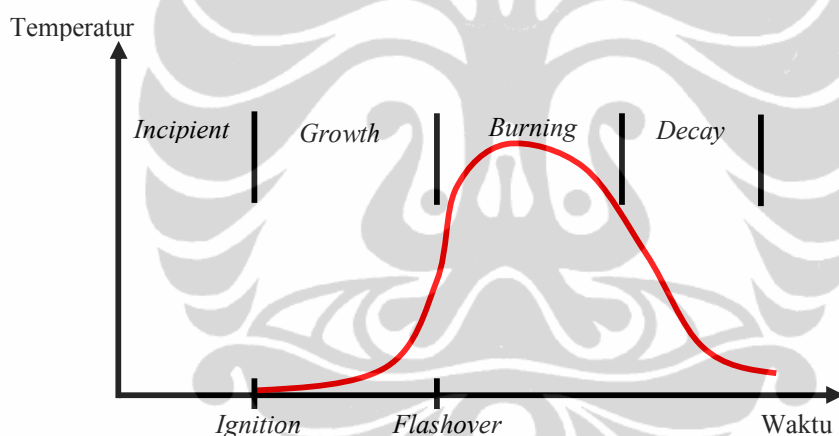
Proses pembakaran untuk setiap material akan membutuhkan ketersediaan oksigen untuk menghasilkan reaksi oksidasi. Proses pembakaran yang paling efisien adalah hasil pencampuran antara bahan bakar berbentuk gas dengan oksigen ataupun udara yang mengandung oksigen sebelum sumber bahan bakar tersebut mulai terbakar (seperti dalam pembakaran bunsen). Proses pembakaran akan terjadi dengan sangat cepat apabila bahan bakar gas tersebut tercampur dengan proporsi yang tepat (seperti dalam ruang pembakaran mesin). Pembakaran tidak akan terjadi apabila kekurangan ataupun kelebihan oksigen untuk suatu kondisi temperatur dan tekanan tertentu.

2.2.1.2. Difusi Pada Pembakaran

Pada sebagian besar kebakaran pada bangunan, ada yang dinamakan dengan proses pencampuran awal pembakaran (*premixed burning*), dan tingkat pembakaran akan selalu bergantung pada proses pencampuran udara dengan bahan bakar berbentuk gas yang ada. Lokasi pembakaran akan selalu terdapat pada tempat dimana terjadi pencampuran gas tersebut. Pencampuran tersebut biasanya diatur oleh daya angkat dan pergolakan hasil pergerakan-pergerakan konfektif dari lidah api dan hasil pembakaran lainnya di atas api.

2.2.2. Tahapan-Tahapan Pada Kebakaran ^[6]

Terdapat 4 tahapan penting pada proses terjadinya kebakaran. Tahapan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1. Tahapan-Tahapan Dalam Perkembangan Kebakaran ^[6]

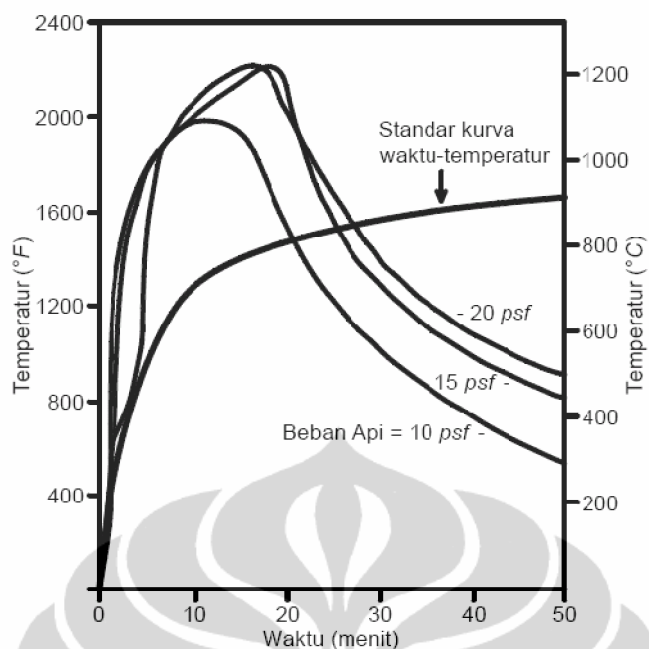
Tahapan pertama adalah fase penyalaan awal (*incipient ignition*), dimana terjadi pemanasan bahan bakar potensial. Tahapan selanjutnya adalah fase perkembangan (*growth*), dimana mulai terlihat lidah api hasil pembakaran. Selama pertumbuhan api, sehingga api mencapai temperatur yang cukup tinggi (sekitar 600°C), api akan berkembang secara sempurna dan mencapai suatu fase yang dinamakan kondisi penyalaan (*flashover*), dimana menandakan kedatangan fase ketiga, yaitu fase pembakaran (*burning*). Pada fase ini, temperatur dan perubahan panas yang terjadi sangatlah besar, terjadi pada seluruh permukaan

yang terkena api, serta ketersediaan ventilasi akan menentukan pelepasan panas yang terjadi. Bagian ini merupakan tahapan paling berbahaya yang dapat berakibat fatal pada elemen-elemen bangunan. Setelah sekian waktu, bahan bakar dan kebakaran yang terjadi pada akhirnya akan ‘capai’, dan api pun lama-kelamaan akan mulai menghilang dalam fase selanjutnya, yang dinamakan dengan periode penurunan (*decay*). Fase penurunan ini biasanya terjadi pada saat 70% bahan bakar yang tersedia sudah terpakai.

Dapat terlihat bahwa kebakaran yang terjadi pada suatu tempat akan dengan sendirinya menghilang atau berhenti (*extinguish*). Bagaimanapun juga penyebarannya harus dicegah semaksimal mungkin, karena api dapat dengan terus-menerus menyebar ke segala arah, baik vertikal ataupun horizontal. Penyebaran ini akan diikuti dengan pengulangan siklus api, yaitu penyalaan (*ignition*), perkembangan (*growth*), pembakaran (*burning*), dan penurunan (*decay*).

2.2.2.1. Temperatur dan Waktu Kebakaran

Temperatur maksimum yang dapat dicapai pada suatu pembakaran dinamakan temperatur api adiabatik (*adiabatic flame temperature*). Nilai teoritis dari temperatur maksimum ini dapat tercapai apabila hasil pembakaran dipanaskan dari suhu awalnya oleh panas yang dilepaskan oleh reaksi kimia pembakaran tanpa ada nilai yang hilang (*losses*) sama sekali. Pada pembakaran secara umum, nilai temperatur api adiabatik ini dapat tercapai pada sedikit daerah tengah pembakaran, akan tetapi, temperatur rata-rata dari pembakaran secara keseluruhan akan sangat di bawahnya.



Gambar 2.2. Grafik Hubungan Waktu Dan Temperatur Pada Kebakaran ^[6]

Nilai maksimum dari temperatur dan waktu suatu kebakaran pada suatu bangunan bergantung pada beberapa hal, termasuk didalamnya jumlah dan tipe bahan bakar yang tersedia, kondisi ventilasi, tipe penutup struktur, dan kondisi cuaca. Pada kebakaran biasa, seperti pada perkantoran dan perumahan atau tempat tinggal lainnya, temperatur maksimum yang dapat dicapai akan sulit untuk melebihi 815°C, meskipun nilai maksimum tersebut dapat bervariasi hingga 1093°C dalam keadaan tertentu. Temperatur maksimum ini hanya akan bertahan selama 10 hingga 20 menit pada fase puncak pembakaran.

Tabel 2.2. Hubungan Beban Api dan Waktu Pembakaran ^[6]

Average Fire Load (psf)	Average Fire Load (kg/m ²)	Equivalent Fire Endurance (Hours)
5	24,4	0,5
7,5	36,6	0,75
10	48,8	1
15	73,2	1,5
20	97,6	2
30	146,5	3
40	195,3	4,5
50	244,1	6
60	292,9	7,5

2.2.2.2. Beban Api dan Radius Penyebarannya

Beban api adalah jumlah semua material yang mudah terbakar (*combustible material*) dalam suatu ruangan. Secara tradisional, hal ini biasa diekspresikan dalam berat ekuivalen terhadap kayu struktural dalam suatu bangunan per luasan lantai bangunan. Berat sebenarnya dari *combustible material* ini disesuaikan menjadi berat ekuivalen kayu, berdasarkan potensi panas material ini apabila dibandingkan dengan potensi panas normal dari api. Selain itu, pengukuran beban api secara modern dilakukan dengan menentukan potensi panas dari isi bangunan per luasan lantai bangunan tersebut (MJ/m^2).

Beban api yang terjadi dapat ditentukan dengan ukuran ruangan dan kondisi alam di sekitarnya, serta jumlah dan susunan bahan *combustible* tersebut. Yang dikatakan beban api diantaranya adalah seluruh material *combustible*, termasuk perabotan kayu, peralatan, serta komponen struktural yang bersifat *combustible* lainnya.

Dalam keadaan sebenarnya, beban api yang terjadi pada suatu bangunan merupakan hasil keseluruhan dari penambahan perabotan serta peralatan lainnya yang ditempatkan setelah pembangunan selesai, dimana keberadaannya kurang dipastikan, sehingga perhitungannya dilakukan secara kurang akurat. Material *combustible* ini dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe. Pembagian tersebut biasa dilakukan terhadap nilai potensi panas, besaran kalori bersih, ataupun pemanasan yang diperlukan dalam pembakaran.

Satuan yang digunakan adalah energi panas per berat atau massa (MJ/kg). Kayu biasa digunakan dalam pedoman nilai yang digunakan, yaitu sebesar 16 sampai 18 MJ/kg . Plastik memiliki nilai yang lebih besar, yaitu 24 hingga 40 MJ/kg . Produk-produk hasil minyak bumi bervariasi antara 27 sampai 46 MJ/kg .

Bangunan perkantoran konvensional memiliki material *combustible*, diantaranya kayu dan plastik dengan potensi panas sekitar 16 hingga 40 MJ/kg dan kepadatan beban api untuk ruang perkantoran adalah 30 kg/m^2 , menghasilkan total nilai potensi panas sebesar 480 hingga 1200 MJ/m^2 luas lantai bangunan. Pada gudang dan perpustakaan, nilai ini dapat berlipat ganda hingga dua kalinya.

2.2.2.3. *Transfer Panas ke Struktur di Sekitarnya*

Perpindahan panas secara umum melibatkan tiga proses, yaitu: konduksi, konveksi dan radiasi, yang dapat terjadi secara terpisah atau bersama-sama tergantung pada keadaan.

Konduksi adalah mekanisme perpindahan panas pada bahan padat. Bahan yang baik menyalurkan panas, panas ditransfer dengan melibatkan interaksi dari elektron bebas. Pada bahan yg sulit menyalurkan panas, panas disalurkan melalui getaran mekanis dari kisi molekuler. Konduksi panas adalah faktor penting dalam kunci kontak permukaan padat, dan dalam perlawanan api dari hambatan dan anggota struktural.

Dalam kondisi yang kuat (stabil), perpindahan panas melalui konduksi berbanding lurus dengan perubahan suhu antara dua titik dan konduktivitas termal, λ , i.e. ^[5]

$$\dot{h} = \lambda d\theta/dx \quad (2.1)$$

dimana \dot{h} adalah aliran panas per satuan luas (W/m^2), λ adalah Konduktivitas termal (W/mK), θ adalah temperatur ($^{\circ}C$), dan x adalah jarak dalam arah aliran panas (m).

Transfer panas satu dimensi dengan konduksi tanpa pelepasan panas internal, diatur dalam persamaan berikut:

$$\delta^2\theta/\delta^2x = (1/\alpha)/(\delta\theta/\delta t) \quad (2.2)$$

Dimana, t adalah waktu (s) dan $\alpha = \lambda/\rho c$ adalah diffusivitas termal (m^2/s). Persamaan ini dapat diselesaikan dengan menggunakan analitis, grafik ataupun metode numerik.

Konveksi adalah perpindahan panas melalui pergerakan cairan, baik gas atau cairan. Untuk kondisi tertentu, perpindahan panas sebanding dengan perbedaan suhu antar bahan, sehingga aliran panas per satuan luas dapat dihitung dengan menggunakan:^[5]

$$\dot{h} = \alpha_c \Delta\theta \quad (2.3)$$

Dimana, α_c koefisien perpindahan panas konveksi (W/m^2K) dan $\Delta\theta$ perbedaan temperature antara permukaan benda padat dan cairan ($^{\circ}C$).

Table 2.3 Koefisien Perpindahan Panas Secara Konveksi^[7]

	α_c (W/m ² K)
Exposed sides	
the standard temperature-time curve is used	25
the external fire curve is used	25
the hydrocarbon temperature-time is used	50
the simplified fire models are used	35
the advanced fire models are used	35
Unexposed side of separating members	
the radiation effects are not included	4
the radiation effects are included	9

Radiasi adalah perpindahan energi oleh gelombang elektromagnetik yang dapat berjalan melalui ruang hampa atau melalui transparan padat atau cair. Radiasi adalah mekanisme utama untuk perpindahan panas dari bahan bakar api ke permukaan, dari asap panas untuk membangun objek dan dari gedung yang terbakar ke sebuah gedung yang bersebelahan. Aliran panas per satuan luas dapat dihitung sebagai ^[5] :

$$\dot{h} = \Phi \varepsilon \sigma [(\theta_e 273)^4 - (\theta_r 273)^4] \quad (2.4)$$

Dimana, Φ adalah faktor konfigurasi yang merupakan ukuran berapa banyak dari emitor adalah 'dilihat' oleh permukaan penerima. ε adalah Emisivitas resultan dua permukaan dan dapat dihitung sebagai $\varepsilon = 1/(1/\varepsilon_r + 1/\varepsilon_e - 1)$

λ adalah konstanta Stefan-Boltzmann dan nilainya $\lambda = 5,67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴. θ_e adalah temperatur pemancaran pada permukaan (°C) dan θ_r adalah suhu dari penerimaan pada permukaan (°C).

2.2.2.4. Massa Termal dan Inersia Termal

Massa termal biasa digunakan dalam mengklasifikasikan suatu kapasitas efektif suatu pemanasan ataupun pemanasan spesifik efektif (*effective specific heat*). Pemanasan efektif spesifik adalah jumlah energi per satuan massa atau berat material yang diperlukan untuk menaikkan temperatur sebesar satu satuan

(biasa ditulis dalam $J/[kg^{\circ}C]$). Dengan cara yang sama, kapasitas pemanasan efektif dimana biasa dikatakan sebagai pemanasan pada volume tertentu, adalah jumlah energi per satuan volume material yang diperlukan untuk menaikkan temperatur sebesar satu satuan (biasa ditulis dalam $J/[m^3^{\circ}C]$). Penurunan sifat ini merupakan hasil dari kepadatan dan efek pemanasan spesifik dari material.

Sifat turunan lainnya adalah inersia termal, yang merupakan hasil dari sifat konduktifitas termal, kepadatan dan efek pemanasan spesifik (biasa ditulis dalam $W^2s/[m^4^{\circ}C^2]$). Material dengan nilai inersia termal yang tinggi memiliki tingkat ketahanan yang lebih tinggi, dikarenakan temperatur yang tidak mudah naik. Pada sebagian besar material konstruksi, besar nilai efek pemanasan spesifik, kapasitas panas, dan konduktifitas termal, seluruhnya bergantung pada temperatur, sebagaimana dalam penurunan sifat inersia termal. Besaran dari sifat termal ini akan berubah secara signifikan terhadap tingkat perubahan temperatur yang terjadi, yaitu pada 40 sampai $1100^{\circ}C$, dikarenakan sebagian besar material mengalami perubahan sifat kimiafisik (*physiochemical*) pada tingkat perubahan temperatur diatas. Sifat termal ini juga sangat sensitif terhadap metode ujicoba yang dilakukan serta tingkat percepatan penambahan suhu yang terjadi. Bagaimanapun juga, sangat mungkin untuk menemui nilai dari sifat material terhadap termal yang berbeda-beda pada dalam literatur yang berbeda.

2.2.3. Kurva Temperatur dan Model Api

Ketika berhadapan dengan rambatan api dan yang berhubungan dengan api, seringkali proses rambatan api ini diabaikan pada suatu perencanaan, meskipun pada umumnya akibat dari rambatan api ini adalah yang paling penting bagi kehidupan manusia karena pada tahap ini api akan menghasilkan gas-gas beracun dan dapat mencapai suhu $100^{\circ}C$ dan banyak lagi. Untuk memilih model yang mendekati dengan proses rambatan api ini, rambatan api ini perlu didefinisikan. Berikut ini adalah alternatif terburuk yang mungkin terjadi, sejauh lokasi dan jumlah beban rambatan api yang memungkinkan^[8]. Misalnya :

- Pada ruangan yang kecil diasumsikan api berkembang sepenuhnya

- Pada ruangan yang luas, minimal dapat digunakan 2 asumsi, baik beban api terdistribusi seragam penuh ataupun lokal tergantung pada lokasi kemungkinan beban api.
- Untuk elemen yang terletak di luar gedung, api yang masuk melalui jendela dan pintu akan dipertimbangkan sebagai sumbernya.

Sebuah desain api harus dinyatakan sebagai hubungan antara temperatur, waktu dan ruang lokasi, yang dihubungkan menjadi^[8]:

- Kurva nominal temperature-waktu yang seragam dalam suatu ruangan.
- Suatu rambatan api yang nyata baik dikelompokkan dalam hal parameter api terbuka, dengan rumus analisis untuk kebakaran lokal, atau dengan pemodelan dengan computer.

2.2.3.1. Kurva Temperatur Nominal-Waktu

Kurva temperature nominal-waktu merupakan serangkaian kurva, di mana tidak ada parameter fisik yang diperhitungkan. Ketahanan terhadap api yang lebih spesifik banyak ditentukan dalam peraturan bangunan internasional yang berdasarkan tes, maka disepakati secara internasional kurva temperatur yang terdefiniskan dalam ISO834 (atau Eurocode 1 Bagian 2-2).

Hal yang menjadi pertimbangan terhadap ketahanan struktur terhadap api yaitu eksternal, dan temperatur atmosfer yang cenderung lebih rendah pada waktu tertentu (yang berarti bahwa suhu bahan bangunan akan lebih dekat sesuai suhu api), seperti kurva "*External Fire*" dapat digunakan. Dalam kasus di mana penyimpanan bahan hidrokarbon membuat kebakaran sangat parah, sebuah kurva "*Hydrocarbon Fire*" juga diberikan. Rumus untuk menggambarkan kurva ini diberikan sebagai berikut^[7]:

Untuk kurva temperature standar-waktu:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.5)$$

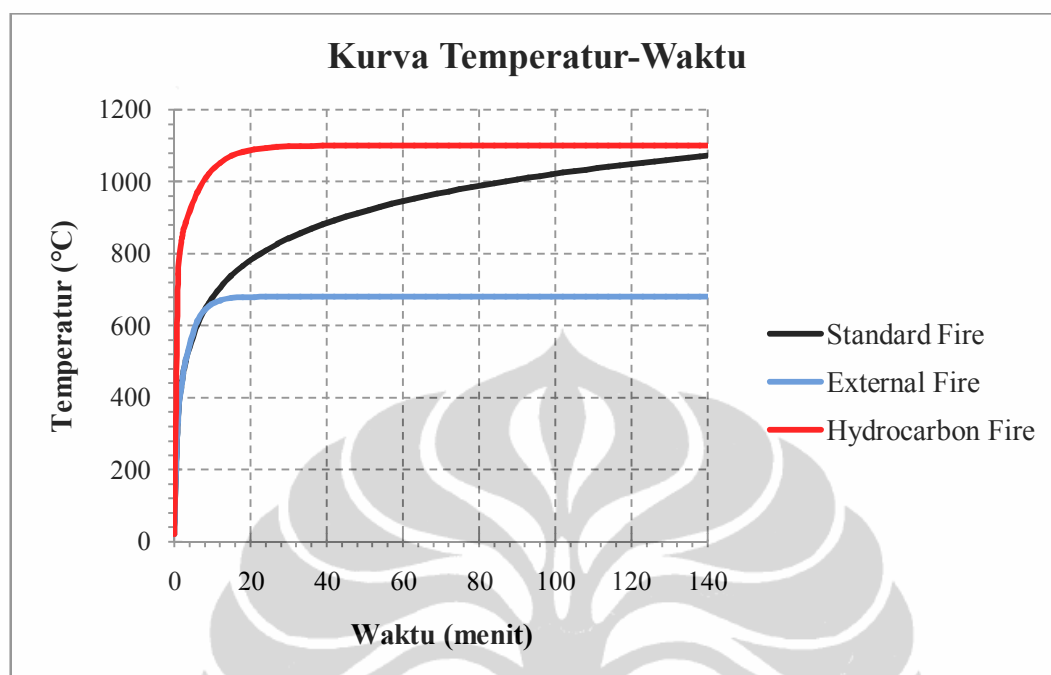
Untuk kurva *external fire*:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2.6)$$

Untuk kurva *hydrocarbon fire*:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (2.7)$$

Berdasarkan ketiga persamaan diatas diperoleh kurva temperature-waktu seperti gambar 2.3.



Gambar 2.3 Kurva Temperatur Nominal Terhadap Waktu

2.2.3.2. Beban Api (Fire load density)

Fire load density didefinisikan sebagai jumlah total pembakaran energi per unit luas lantai dan merupakan sumber perkembangan api. Beban api terdiri dari komponen-komponen bangunan seperti dinding dan langit-langit lapisan, dan isi bangunan seperti furnitur. Nilai karakteristik beban api kerapatan ini diperoleh dari:

$$q_{f,k} = [\sum M_{k,i} H_{ui} \Psi_1] / A \quad (2.8)$$

dimana :

$M_{k,i}$: bahan mudah terbakar [kg].

H_{ui} : nilai kalori bersih [MJ/kg].

$M_{k,i} H_{ui}$: jumlah total energi yang terkandung dalam material dan pelepasan dengan asumsi pembakaran yang sempurna.

Ψ_1 : faktor pilihan untuk mengakses api dilindungi beban. Misalnya dengan memasukkannya ke dalam kabinet.

A : luas lantai [m^2].

2.2.3.3. Laju Pelepasan Panas (RHR)

Perhitungan RHR (*Rate of heat release*) berbeda dari ventilasi pengendali api untuk mengendalikan api pada bahan bakar. Pengendalian api bahan bakar merujuk pada kasus dimana selalu ada cukup oksigen untuk mempertahankan pembakaran. Menurut Kawagoe (1958), tingkat pembakaran \dot{m} [kg/s] dapat dihitung sebagai ^[9]

$$\dot{m} = 0,092 A_v \sqrt{H_v} \quad (2.9)$$

dimana;

A_v adalah luas bukaan (m^2)

H_v adalah tinggi bukaan (m).

Persamaan ini berasal dari penelitian untuk kamar dengan satu pembukaan. Meskipun penelitian tersebut menunjukkan bahwa tingkat pembakaran tergantung pada bentuk ruangan dan lebar jendela ke dinding, persamaan ini berdasarkan perhitungan pasca kebakaran yang dilakukan.

Penyesuaian ventilasi mengendalikan tingkat panas yang dilepaskan (MW) untuk pembakaran tetap dihitung sebagai ^[5]:

$$Q_{vent} = \dot{m} H_{ui} \quad (2.10)$$

waktu kebakaran dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$t_b = E/Q_{vent} \quad (2.11)$$

Dimana E adalah kandungan energi bahan bakar yang tersedia untuk pembakaran (MJ). Selain itu, jumlah ventilasi dalam api kompartemen dijelaskan oleh faktor pembukaan O ($m^{0.5}$) yang diberikan oleh :

$$O = A_v \sqrt{H_{eq}/A_t} \quad (2.12)$$

dimana H_{eq} adalah tinggi rata-rata jendela pada semua dinding (m) dan pada luas keseluruhan (dinding, langit-langit dan lantai, m^2). Jika rumus ini dikalikan dengan gravitasi g , maka diperoleh kecepatan aliran gas melalui bukaan.

Penelitian menunjukkan bahwa jika bukaan ventilasi diperbesar, suatu kondisi yang akan dicapai di luar yang tingkat pembakaran akan tetap pada ukuran pembukaan dan akan ditentukan bukannya oleh permukaan dan karakteristik pembakaran bahan bakar. Untuk pengontrolan api oleh bahan bakar, durasi api dapat diasumsikan sebagai 25 menit untuk memperlambat laju pertumbuhan api, 20 menit untuk laju pertumbuhan menengah dan 15 menit untuk

laju pertumbuhan yang cepat. RHR dapat dihitung sebagai :

$$Q_{\text{fuel}} = E / t_{\text{lim}} \quad (2.13)$$

Ketika durasi waktu tidak diketahui, RHR diperkirakan dari informasi tentang bahan bakar dan suhu di kompartemen kebakaran. Pada Eurocode saat ini [7], RHR secara implisit dihitung menggunakan $A_v \sqrt{H_{\text{eq}}}$

2.2.3.4. Kehilangan Panas

Kehilangan panas (*heat loose*) pembakaran merupakan faktor penting dalam perkembangan suhu pembakaran. Kehilangan panas terjadi pada batas-batas tertentu melalui konveksi dan radiasi dan oleh aliran ventilasi [7]. Cara yang paling populer untuk memodelkan kehilangan panas ke kompartemen batas-batas adalah melalui konsep “*inersia termal*”, b , dari bahan dinding, yaitu :

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (2.14)$$

dimana:

λ adalah konduktifitas panas (*heat conductivity*) [W/mK].

c adalah kapasitas panas (*heat capacity*) [J/kgK].

ρ adalah massa jenis [kg/m³].

2.2.3.5. Parametric temperature-time curves

Saat ini Eurocode^[5] memberikan sebuah persamaan untuk kurva parameter temperature-waktu dengan beberapa kombinasi bahan bakar, bukaan ventilasi dan bahan pelapis dinding. Persamaan temperature Θ_g (°C) untuk fase pemanasan seperti berikut:

$$\Theta_g = 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) + 20 \quad (2.15)$$

Dimana t^* adalah waktu fiktif (jam) yang didapat dari:

$$t^* = t \times \Gamma \quad (2.16)$$

dimana t adalah waktu (jam) dan:

$$\Gamma = (O/b)^2 / (0,04/1160)^2 \quad (2.17)$$

Dalam kasus kompartemen dengan $O = 0,04 \text{ m}^{0,5}$ dan $b = 1160 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{0,5} \text{ K}$, kurva parameter hampir persis kurva ISO. Suhu udara maksimum terjadi pada:

$$t^* = t^*_{\text{max}} \quad (2.18)$$

dimana:

$$t_{max}^* = t_{max} \times \Gamma \quad (2.19)$$

dengan,

$$t_{max} = \max[(0,2 \times 10^{-3} q_{t,d}/o); t_{lim}] \quad (2.20)$$

Waktu t_{max} bersesuaian dengan temperatur maksimum dari t_{lim} dalam kasus api bahan bakar terkontrol. Jika $t_{max} = (0,2 \times 10^{-3} \times q_{t,d}/O)$, api itu dikendalikan ventilasi. Ketika $t_{max} = t_{lim}$, t^* maka rumus temperatur digantikan oleh : $t^* = t \times \Gamma_{lim}$ dengan:

$$\Gamma_{lim} = (O_{lim}/b)^2 / (0,04/1160)^2 \quad (2.21)$$

dimana:

$$O_{lim} = 0,1 \times 10^{-3} \times q_{t,d} / t_{lim} \quad (2.22)$$

Jika, $O > 0,04$ dan $q_{t,d} < 75$ dan $b < 1160$, Γ_{lim} harus dikalikan dengan k, dimana:

$$k = 1 + [(O-0,04)/0,04] \times [(q_{t,d}-75)/75] \times [(1160-b)/1160] \quad (2.23)$$

Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa pengaruh bukaan masih hadir ketika api dikontrol bahan bakar. [7] berdasarkan referensi tingkat kerusakan sama dengan 625°C per jam untuk api dengan durasi kurang dari setengah jam, menurun sampai 250°C selama api dengan durasi lebih dari dua jam. Kurva suhu dalam periode pendinginan diberikan oleh :

$$\text{Untuk, } t^* \leq 0.5 \quad : \Theta_g = \Theta_{max} - 625 (t^* - t_{max}^* \cdot x)$$

$$\text{Untuk, } 0.5 < t^* \leq 2 \quad : \Theta_g = \Theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*) (t^* - t_{max}^* \cdot x)$$

$$\text{Untuk, } t^* > 2 \quad : \Theta_g = \Theta_{max} - 250 (t^* - t_{max}^* \cdot x)$$

$$\text{dimana: } t^* = t \cdot \Gamma; t_{max} = (0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1.0, \text{ jika, } t_{max} > t_{lim},$$

$$x = t_{lim} \cdot \Gamma / t_{max}^*, \text{ jika, } t_{max} = t_{lim}$$

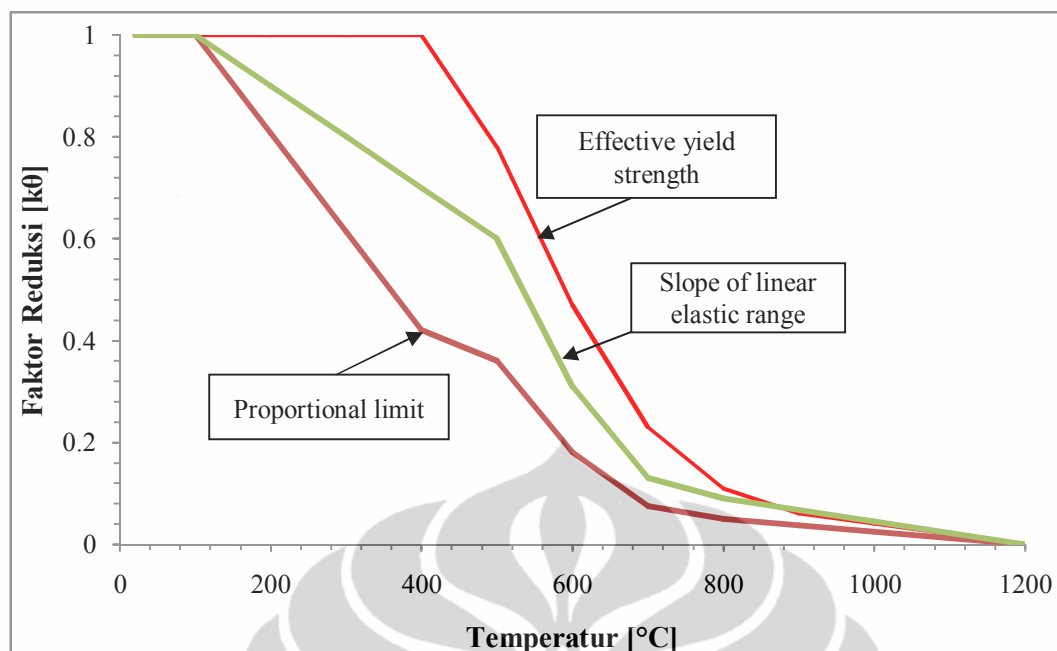
2.3. TINGKAT KETAHANAN STRUKTUR BAJA TERHADAP API ^[6]

2.3.1. Pengertian Ketahanan Terhadap Api (*Fire Resistance*)

Ketahanan terhadap api adalah durasi yang dibutuhkan suatu struktur untuk mempertahankan stabilitas, bentuk, dan perubahan temperturnya, nilai ini biasanya didapat dari hasil percobaan. Percobaan ini dilakukan dengan standar tingkatan api untuk percobaan. Standar tingkatan api ini biasanya diberikan dalam jumlah jam dan memberikan hasil berupa kemampuan struktur buatan untuk menahan api dan perbandingannya dengan struktur dengan model lain. Terdapat urutan kerja pengetesan dan evaluasi untuk balok, kolom, dinding, lantai, dan atap, serta elemen-elemen ini biasanya diuji cobakan untuk menahan beban api selama 1 hingga 4 jam.

2.3.2. Efek Temperatur Tinggi Terhadap Struktur Baja

Baja merupakan bahan tahan api. Baja merupakan bahan tidak mudah terbakar dengan tingkat ketahanan tinggi serta sifat-sifat struktur lain yang tinggi. Akan tetapi, efek dari pemanasan yang terus-menerus akan terlihat pada setiap material, seperti kerusakan, dan distorsi. Lendutan struktural akibat pemanasan yang lama dapat mencapai beberapa inci, bahkan kaki, dimana lendutan yang terjadi ini sangat besar apabila dibandingkan dengan lendutan elastik yang biasa terjadi dan diperhitungkan dalam desain struktur. Tekuk dan torsi juga dapat terjadi pada suhu tinggi. Pada suhu tinggi, baik kuat lentur dan tarik dari suatu struktur baja akan menurun, sebagaimana penurunan yang terjadi pada modulus elastisitasnya. Secara umum, baja akan menyisakan kekuatan dan kekakuannya sebesar 50 persen nilai sebenarnya pada kondisi suhu sebesar 593°C. Hal ini sebanding dengan yang terjadi pada pengurangan kekuatan dan kekakuan pada beton normal. Pada suhu 704°C, baja akan menyisakan sekitar 20 persen dari kekuatan dan kekakuannya. Titik suhu keruntuhan akan berkisar pada 1204°C. Perilaku kekuatan dan kekakuan baja terhadap perubahan suhu dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4. Pengaruh Kenaikan Suhu Pada Kekuatan dan Modulus Elastisitas Struktur Baja ^[7]

Gambar 2.4 didapat dari penelitian beberapa material secara kecil dan terpisah, yang dipanaskan secara merata di keseluruhan penampang melintangnya. Suhu yang terjadi pada penampang tersebut tidak akan benar-benar sama dengan suhu api. Berkaitan dengan hal ini, ada banyak kasus dimana pemanasan secara merata pada profil baja ini tidak terjadi dalam suatu kebakaran. Sebagai contoh, pada lantai komposit dengan kebakaran yang terjadi di bawahnya, maka baja komposit di bawahnya yang bersuhu paling tinggi adalah bagian bawah, atau *bottom flange*, yaitu bagian yang paling dekat dengan api. Sedangkan bagian terdingin yaitu di bagian paling atas, atau *top flange*, bagian yang bersentuhan dengan lantai beton. Untuk kejadian kebakaran seperti ini, dimana bagian *bottom flange* sudah mencapai suhu yang cukup untuk mengurangi sebagian besar kekuatan dan kekakuannya, sedangkan bagian *top flange* dapat lebih dingin dan dibawah titik kritis bagi baja. Di beberapa kasus percobaan, bagian *top flange* dapat lebih dingin dengan perbedaan hingga 400°C dibandingkan dengan bagian *bottom flange* dengan 2 jam percobaan kebakaran.

Pengurangan suhu ini berlaku selama suhu pada baja tidak melebihi 700°C selama 20 menit. Baja dengan kerusakan seperti itu, walaupun berdeformasi besar, namun masih dapat mengembalikan sifat-sifat sebelum kebakaran pada kondisi-kondisi tertentu. Bagaimanapun juga, suhu tinggi dan waktu sentuh yang lama akan menyebabkan proses *annealing* (pemanasan diikuti pendinginan secara perlahan-lahan untuk mengembalikan kekuatannya) serta pengurangan kekuatan lelehnya.

Dapat dikatakan dengan pasti bahwa baja struktural tidak akan meleleh akibat kebakaran, walaupun kejadian sedemikian sangatlah mungkin secara teori, seperti yang terjadi pada tungku pembakaran baja. Kebakaran tidak akan mencapai titik leleh baja, yaitu sekitar 1500°C .

2.3.3. Efek Kebakaran pada Sambungan Baja

Beberapa percobaan kebakaran yang telah dilakukan akhir-akhir ini menunjukkan bahwa sambungan pada struktur baja juga dapat meleleh, dimana hasil percobaan ini sangat bertentangan dengan beberapa studi analisis dan pengamatan pada kejadian-kejadian kebakaran yang sudah terjadi pada bangunan dengan struktur portal baja. Sambungan baja biasanya memiliki material yang lebih banyak pada pelat, siku, baut, dan elemen-elemen sambungan lainnya daripada batang profil yang disambungkannya, yang menyebabkan nilai tambah bagi ketahanan terhadap kebakaran. Selain itu, yang paling penting, sambungan di ujung batang profil biasanya cukup jauh dari sentuhan api dan penyebaran panas, menyebabkan panas dari api untuk tersebar pada lantai, balok dan kolom yang tidak mungkin terjadi secara simultan, melainkan secara berangsur-angsur. Sudah merupakan hal umum bahwa suhu akan bertambah secara cepat menuju pada batang profil baja dibandingkan dengan sambungan di ujung batang, kecuali letak kebakaran yang sangat dekat dengan ujung batang tersebut.

Hal lain yang tidak kalah pentingnya adalah gaya akibat suhu pada sistem struktur portal yang terjadi pada sambungan dan batang profil akibat perilaku tekan ataupun tarik akibat kebakaran dan setelahnya, yaitu pada fase pendinginan. Gaya dan momen lentur pada portal yang mengalami peningkatan suhu akan semakin bertambah secara dramatis pada suatu peristiwa kebakaran, walaupun beban gravitasi yang dilayani oleh struktur tersebut tetap sama. Sebagai contoh,

balok terkekang yang mengalami kenaikan suhu akan berdeformasi menjadi bertambah panjang, serta gaya tekan akan terjadi akibat arah deformasi struktur di sekelilingnya, dikombinasikan dengan momen lentur dan gaya geser yang terjadi akibat beban layan. Sebagaimana kebakaran semakin bertambah besar, sedangkan sifat struktur baja semakin menurun, balok struktur akan mengalami lendutan besar, yang akan meningkatkan gaya tarik pada serat bawah baja profil. Pertambahan gaya ini harus dapat diterima dan dipindahkan oleh sambungan batang. Biasanya, pertambahan gaya dan deformasi akibat kebakaran ini tidak terlalu diperhitungkan dalam desain struktur konvensional dari berbagai material apapun, dimana balok hanya didesain untuk tahan terhadap momen.

2.3.4. Perilaku Struktur Baja Dalam Kebakaran ^[6]

Dalam kondisi kebakaran, suhu dalam baja akan meningkat, mengakibatkan baik terjadinya ekspansi termal batang dan penurunan sifat mekaniknya. Tingkat kerusakan yang dihasilkannya bergantung dari beberapa faktor, baik dari tipe baja yang digunakan ataupun kondisi proteksi yang dimilikinya. Durasi dan kondisi alamiah pada titik sentuh baja dengan kebakaran akan mempengaruhi penyebaran kenaikan suhu pada penampang baja.

Pertambahan suhu dalam batang profil baja dapat ditentukan dengan prinsip perpindahan panas (*heat transfer*). Sebagai konsekuensi, harus diperhatikan bahwa suhu pada batang profil baja tidak akan sama dengan suhu api pada kebakaran yang terjadi. Baja dengan proteksi akan mengurangi pertambahan suhu lebih besar dibandingkan dengan baja polos. Selain itu, efek pemanasan akan semakin berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dengan api, kondisi ventilasi pun mempengaruhi pertambahan suhu, dimana ventilasi akan membantu mendinginkan batang baja dengan menyebarkan suhu ke lingkungan di sekitarnya. Hal lain yang juga berpengaruh adalah waktu pemanasan, dimana suhu tinggi dengan waktu sebentar akan lebih tidak merusak apabila dibandingkan dengan pertambahan suhu normal dengan waktu yang lebih lama. Hal ini merupakan bagian dari proses perpindahan panas yang bergantung kepada alam, intensitas api, durasi kebakaran, jarak api dengan batang profil baja, tipe dan sifat serta bentuk penampang baja, tipe dan sifat material proteksi api, serta kondisi termal

dan struktur di lingkungan sekitarnya.

Secara umum, efek api terhadap sifat dan kondisi metalurgis dari baja struktur hanya bersifat sementara, yaitu pada saat material baja mengalami kenaikan suhu. Dikarenakan baja secara umum relatif memiliki komposisi campuran karbon yang rendah, baja struktur biasanya dapat mengembalikan sifat-sifat awal sebelum terjadi kebakaran, pada proses pendinginan, hanya apabila penambahan suhu tidak mencapai $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 20 menit.

2.3.4.1. Fenomena Lain yang Terjadi pada Baja dalam Suhu Tinggi

Akibat penambahan panjang disertai dengan pengurangan kekuatan dan kekakuan baja karena efek penambahan suhu, efek pengekangan pada ujung perletakan batang, ketidaksempurnaan pemasangan, pembengkokan, ataupun pemusatan gaya, akan mengakibatkan tekuk, baik pada bagian *flange* ataupun *web*, juga tekuk pada keseluruhan batang, dengan suhu di atas $315\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dengan pengekangan sempurna pada batang, proses ini akan terjadi lebih cepat, yaitu pada suhu $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Efek tekuk akan sangat mungkin terjadi pada suhu 650 sampai $760\text{ }^{\circ}\text{C}$, dimana kekuatan dan kekakuan baja hanya tinggal 50 persen nilai awal. Pengalaman sebelum-sebelumnya dari pembengkokan (*curving*) dan pelurusan (*sraightening*) akibat api menunjukkan bahwa tekuk dapat terjadi secara tiba-tiba, baik pada rentang suhu seperti diatas, ataupun lebih.

Akibat tambahan dari distorsi tekuk pada batang profil, baja akan mengalami penambahan lendutan vertikal dan rotasi selama terjadinya kebakaran akibat beban layan berupa beban mati dan beban hidup. Dalam kondisi kebakaran, baik dalam percobaan atau kecelakaan, lendutan yang terjadi baik pada batang ataupun sistem lantai baja dapat mencapai besaran yang signifikan. Kebakaran yang sebenarnya akan menghasilkan lendutan yang bervariasi antara beberapa inci, hingga pada beberapa kasus dapat mencapai 3 sampai 4 *ft*, dimana lendutan ini melebihi batasan layan normal yang harus diantisipasi dalam suatu bangunan. Dalam setiap desain, harus selalu diperhatikan bahwa tujuan utama dari suatu perhitungan desain struktur adalah untuk menghasilkan bangunan yang tahan terhadap keruntuhan akibat bencana alam, meskipun struktur tersebut mengalami kehancuran, baik struktural ataupun nonstruktural yang sedemikian besar.

Bagaimanapun juga, bangunan yang didesain sedemikian rupa terhadap kebakaran pun masih dapat mengalami kerusakan struktural dan nonstruktural yang sangat besar dalam suatu peristiwa kebakaran.

Harus diperhatikan bahwa deformasi yang sedemikian besar bukanlah indikator utama bahwa struktur baja tersebut telah mengalami pemanasan hingga suhu diatas 700°C , dengan data-data bahwa peristiwa tekuk pada baja dapat terjadi pada suhu yang lebih rendah daripada itu, bergantung pada besaran beban yang sebenarnya terjadi. Bagaimanapun juga, dan yang paling penting, hal sebaliknya pun berlaku, yaitu baja yang tidak berdeformasi besar dan dianggap masih bisa diperbaiki kemungkinan tidak mengalami pemanasan hingga 700°C . Apabila baja dipanaskan hingga suhu yang sangat tinggi, akan sangat mungkin terjadi perubahan penampilan luar dan warna. Bila suhu pemanasan tidak mencapai sekitar 700°C , lapisan yang disebut sebagai *tightly adherent mill scale* akan tetap tersisa, menyebabkan warna baja akan tetap normal. Pada suhu yang lebih tinggi dari 700°C dan lebih dari 20 menit, permukaan baja akan terlihat teroksidasi dan berbintik-bintik, dengan sejumlah erosi dan pengurangan ketebalan penampang baja. Penampilan dari baja yang terbakar secara signifikan yaitu berwarna abu-abu muda atau putih, akan tetapi dapat juga berwarna sesuai dengan bahan bakarnya, seperti hitam untuk sisa pembakaran.

2.3.4.2. Hal-hal yang Terjadi pada Fase Pendinginan Pasca Kebakaran

Baja akan berkontraksi (*contract*) pada saat pendinginan. Apabila deformasi inelastis terjadi pada saat kebakaran dan akibat beban kerja serta pengekangan termal sebelumnya, struktur baja akan mengalami sisa deformasi secara permanen dan tidak akan kembali ke bentuk awalnya. Perubahan geometris akibat kebakaran dan pendinginan akan mengakibatkan beberapa sambungan baja mengalami kegagalan tarik.

2.4. LITERATUR JEMBATAN KRASAK

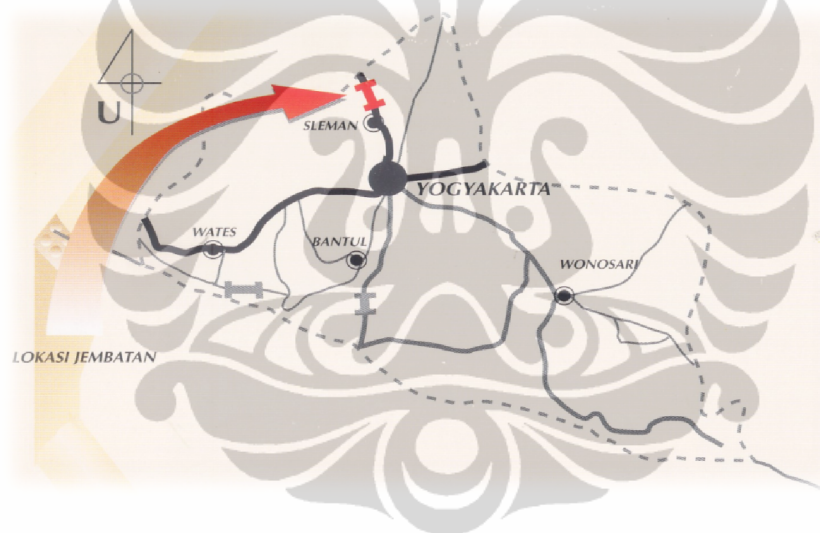
2.1.1. Jembatan Krasak Secara Umum

2.4.1.1. Data Teknis

Berikut ini adalah data-data umum mengenai spesifikasi Jembatan Krasak:

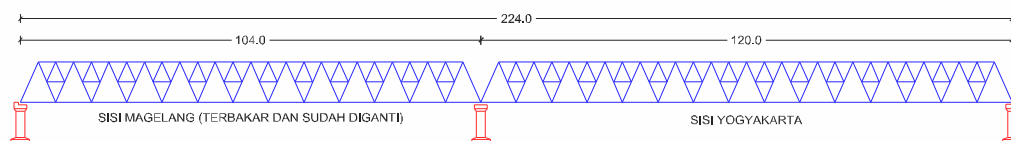
- Panjang Total: 224 m
- Bentang Terpanjang : 120 m
- Lebar : 1,00 + 7,00 + 1,00 m
- Tipe Bangunan Atas : Jembatan Rangka Baja Callendar Hamilton
- Tipe Bangunan Bawah: Pondasi Langsung dan Sumuran
- Lokasi : Km 19 dari Yogyakarta ke arah Magelang
- Waktu Pembangunan : 1974 – 1976 ^[10]

Gambaran mengenai lokasi Jembatan Krasak dapat dilihat di bawah ini:



Gambar 2.5. Peta Lokasi Jembatan Krasak ^[10]

Sedangkan sketsa dari Jembatan Krasak dapat dilihat seperti di bawah ini:



Gambar 2.6. Sketsa Jembatan Krasak ^[10]

Jembatan Krasak merupakan salah satu tipe Jembatan Callendar Hamilton (CH) dengan bentang terpanjang di Indonesia. Jembatan CH mulai digunakan di Indonesia pada pertengahan tahun tujuh puluhan dan merupakan jembatan rangka baja hasil produksi Balfour Beatty di Inggris. Terdapat dua tipe dari jembatan CH ini, yaitu *through-type* dan *deck-type*. Rangka baja pada tipe pertama berada di atas lantai jembatan, atau sering disebut juga dengan lantai bawah, sedangkan untuk tipe kedua bagian rangka baja dipasang di bawah lantai jembatan atau sering disebut juga dengan lantai atas. Pada umumnya jembatan CH yang banyak dipasang di Indonesia adalah dari tipe pertama. Jembatan Krasak pun merupakan tipe yang pertama tersebut, yaitu *through-type*.

Pada dasarnya jembatan CH terdiri dari rangkaian panel-panel rangka batang, dimana tiap panel mempunyai panjang 15 feet (4,58 meter). Panjang jembatan CH yang umum dijumpai merupakan rangkaian dari 7, 8, 9, 10, dan 11 panel. Berbeda dengan Jembatan Krasak, dikarenakan bentangnya yang cukup besar, maka digunakan panel dengan panjang 8 meter, serta merupakan gabungan dari 13 panel (sisi Magelang) dan 15 panel (Sisi Yogyakarta), sehingga memiliki bentang total 104 meter dan 120 meter. Sambungan-sambungan dilaksanakan dengan menggunakan baut dan mur, sehingga tidak diperlukan pekerjaan pengelasan atau pemotongan ditempat. Rangka baja yang besar dan panjang dapat di-demontase sedemikian rupa sehingga merupakan bagian-bagian yang kecil dan ringan. Untuk mencegah baja dari serangan korosi, maka semua elemen baja diberi lapisan seng (Zn) dengan cara *hot dip galvanized coating* sehingga baja akan terlindung dari korosi untuk jangka waktu minimal 15 tahun.

Semua bagian-bagian utama dari baja untuk jembatan CH terbuat dari *high yield steel* (HYS) yang memenuhi *British Standard Specification BS 4630 Grade 50B* atau *55C* dengan batas leleh 3550 kg/cm^2 dan 4500 kg/cm^2 . Sedangkan bagian-bagian sekundernya terbuat dari *mild yield steel* (MYS) yang memenuhi *BS Specification 4630 Grade 43A* dengan batas leleh 2550 kg/cm^2 , untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2.3 di bawah ini^[12].

Tabel 2.4. Tegangan Leleh Profil Baja Struktur Jembatan Krasak ^[12]

Grade	Tensile Strength N/mm ²	Yield Stress Min				
		Up to and including 16 mm N/mm ²	Over 16 mm and including 25mm N/mm ²	Over 25 mm and including 40 mm N/mm ²	Over 40 mm and including 63 mm N/mm ²	Over 63 mm and including 100 mm N/mm ²
43 A	430/510	255	245	240	230	225
50 B	490/620	355	345	345	340	325
55 C	550/700	450	430	415	-	-

2.4.1.2. Bagian-Bagian Jembatan Callendar Hamilton ^[11]

Bagian-bagian jembatan (*bridge elements*) CH direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat memenuhi hal-hal sebagai berikut:

- ✓ Bagian-bagian jembatan distandarisasi sehingga merupakan bagian-bagian standar yang tidak banyak macamnya.
- ✓ Bagian-bagian jembatan ini dapat disetel sedemikian rupa, sehingga dapat dibangun sebuah jembatan secara ekonomis, sesuai dengan bentang serta kekuatan yang dikehendaki.
- ✓ Bagian-bagian jembatan itu dapat dibuat dengan mudah serta murah dengan menggunakan bahan-bahan standar yang mudah diperoleh, dapat dibuat dengan ketelitian serta keseragaman yang tinggi.
- ✓ Bagian-bagian jembatan itu ringan, sehingga dengan mudah dapat diangkut.
- ✓ Seluruh jembatan dengan mudah dapat disetel serta dipasang lengkap tanpa menggunakan tenaga-tenaga yang khusus harus dididik untuk pekerjaan tersebut, sehingga tenaga buruh setempat, dengan sedikit bimbingan, dapat melaksanakan pemasangan jembatan tersebut.
- ✓ Berbagai macam lantai kendaraan dapat di pasang pada kendaraan ini.
- ✓ Semua bagian jembatan memperoleh pengolahan sedemikian rupa sehingga terlindung terhadap serangan korosi.
- ✓ Jembatan sewaktu-waktu dengan mudah dapat di demontase tanpa menimbulkan kerusakan-kerusakan pada bagian-bagiannya.

Bagian-bagian jembatan Callender Hamilton dibuat dari baja (*Hot Rolled Structural Steel*) yang diolah oleh *British Steel Corporation*. Bahan-bahan berupa pelat baja, angles, dan sebagainya harus memenuhi *British Standard Specification BS-4360 Weldable Structural Steels*. Semua bahan-bahan untuk bagian-bagian jembatan harus diuji sebelum digunakan dan harus disertai *test certificates* yang menyatakan bahwa bahan-bahan itu memenuhi persyaratan yang diminta, mendapat persetujuan para pemeriksa bahan-bahan yang khusus diangkat oleh Balfour – Beatty, untuk kemudian dipakai sebagai bahan baku bagi bagian-bagian jembatan CH.

Bagian-bagian utama dari jembatan Callender Hamilton, seperti:

- *Angles (top chord, bottom chord, diagonal chord).*
- *Angle cleats.*
- *Leg Plates.*
- *Crossbearers.*
- *Crossbearer cleats.*
- *Stringers.* Harus dibuat dari *High Yield Steel (HYS)* yang memenuhi *British Standard Specification BS 4360 Grade 50 B* atau *Grade 55 C.*

Bagian-bagian sekunder, seperti:

- *Redundant Angles (Horizontal, diagonal)*
- *Batten Plates*
- *Redundant Gusset Plates*
- *Crossbearer Diaphragms, harus dibuat dari Mild Steel yang memenuhi British Standard Specification BS 4360 Grade 43 A.*

2.4.2. Sifat Material Jembatan Krasak

Secara umum, sifat material Jembatan CH sudah disebutkan di bagian sebelumnya, yaitu dengan nilai rata-rata sebagai berikut:

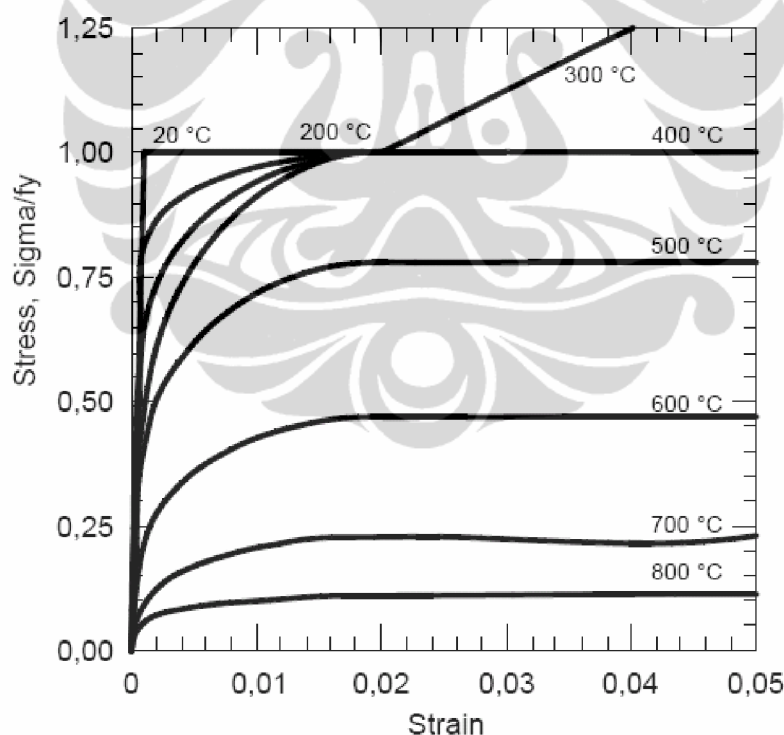
- Modulus Elastisitas (E_s) : $200.000 \text{ MPa}^{[7]}$
- Tegangan Leleh (f_y) : $450 \text{ MPa}^{[12]}$
- Tegangan Ultimate (f_u) : $700 \text{ MPa}^{[12]}$
- Massa Jenis : $7850 \text{ kg/m}^3^{[7]}$

Akan tetapi, dikarenakan analisa yang dilakukan pada tulisan ini

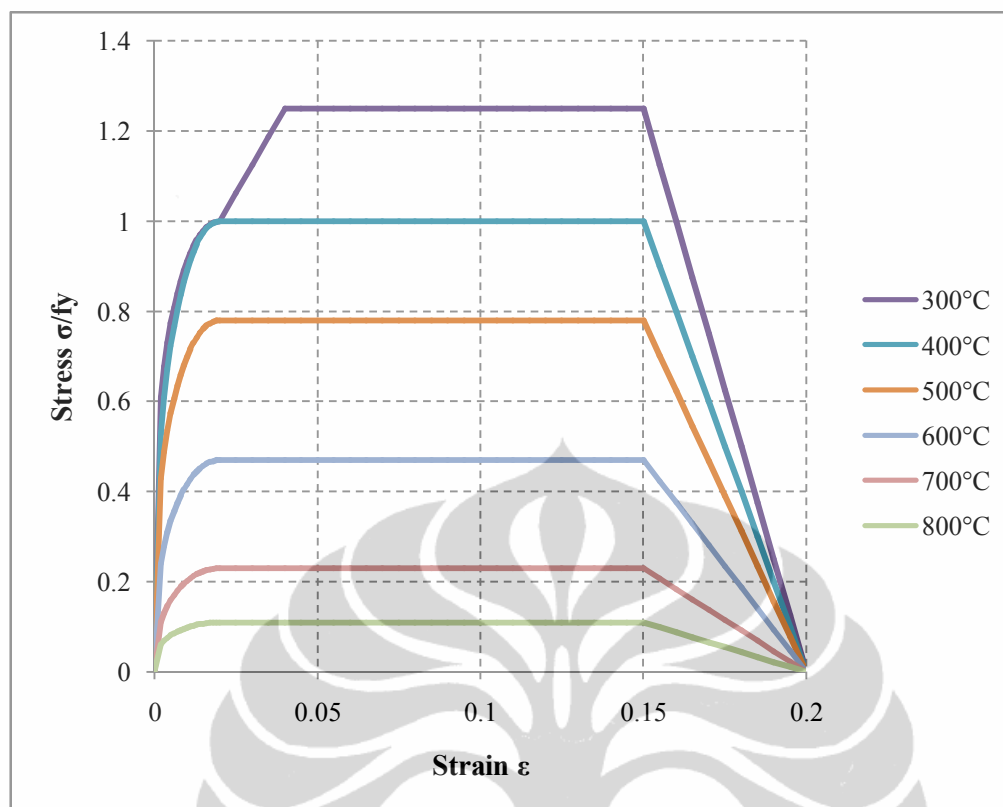
menggunakan variasi suhu sebagai bebannya, maka sifat material yang digunakan juga akan bervariasi sesuai dengan suhu batang baja pada saat itu. Selain itu, analisa profil baja terhadap suhu memerlukan beberapa *input* lain dari sifat material baja, yaitu koefisien perpanjangan linear terhadap suhu (α_l), konduktifitas termal (k), serta kapasitas panas (C_p). Nilai dari sifat material tersebut terhadap perubahan suhu dapat dilihat seperti berikut ini:

2.4.2.1. Kondisi Tegangan-Regangan (*stress-strain*) Baja ^[7].

Hubungan antara tegangan-regangan (*stress-strain*) baja yang bervariasi terhadap perubahan suhu. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan Arya Perdana, menggunakan kurva hubungan tegangan-regangan yang dapat dilihat pada Gambar 2.7, dimana kurva hubungan tegangan-regangan yang akan penulis gunakan (mengacu pada *Eurocode 1*) adalah sama seperti Gambar 2.8 di bawah ini:



Gambar 2.7. Grafik Hubungan Tegangan-Regangan Baja Akibat Peningkatan Temperatur^[1]



Gambar 2.8. Grafik Hubungan Tegangan-Regangan Baja Akibat Pertambahan Temperatur^[7]

Dari grafik tersebut, jelas terlihat bahwa kekuatan profil baja akan menurun seiring dengan bertambahnya suhu. Pada aplikasinya terhadap program yang digunakan untuk analisa, nilai *stress* pada grafik ini akan dikali dengan besaran tegangan leleh (f_y) baja, untuk mendapatkan hubungan nilai tegangan-regangan yang sebenarnya.

2.4.2.2. Perpanjangan Linear Baja terhadap Suhu ($\Delta l / l$)^[7]

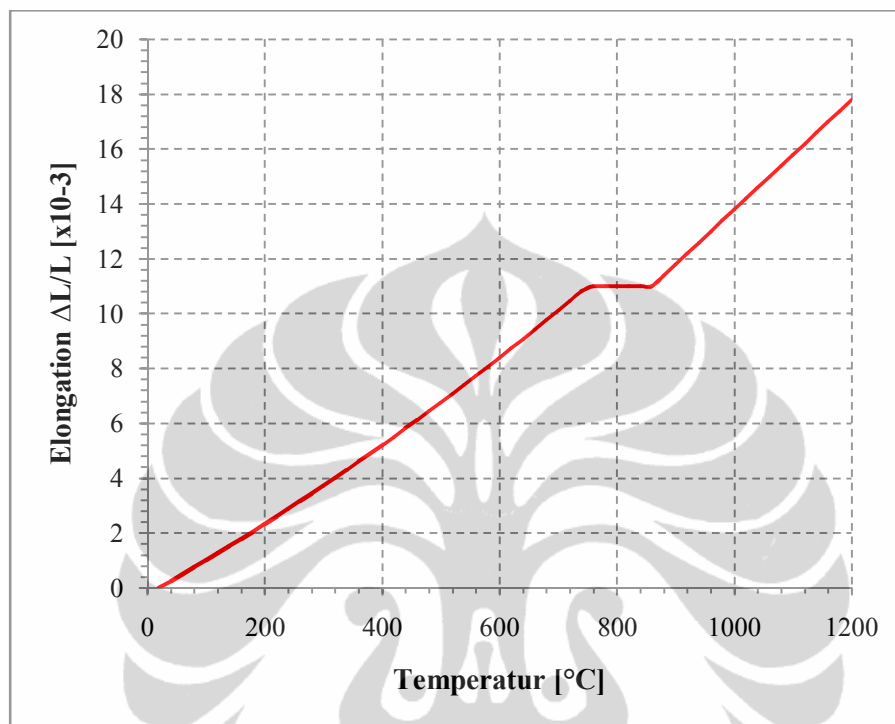
Nilai ini merupakan sifat material yang menunjukkan nilai perpanjangan material akibat efek pemanasan batang baja. Berdasarkan Eurocode 3, bagian 1.2^[7], perpanjangan akibat temperatur (*thermal strain*) di definisikan dalam fungsi temperatur dan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\Delta l / l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}) \quad (2.24)$$

$$\Delta l / l = 1,1 \times 10^{-2} \quad (750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}) \quad (2.25)$$

$$\Delta l / l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}) \quad (2.26)$$

dimana, l merupakan panjang saat suhu 20°C ; Δl adalah pertambahan panjang akibat kenaikan suhu, dan θ_a adalah temperature baja. Gambar 2.9 di bawah ini akan menunjukkan hubungan nilai perpanjangan termal baja terhadap perubahan suhu yang terjadi pada profil baja.



Gambar 2.9. Grafik Hubungan Perpanjangan (*Thermal Strain*) Baja Akibat Pertambahan Temperatur

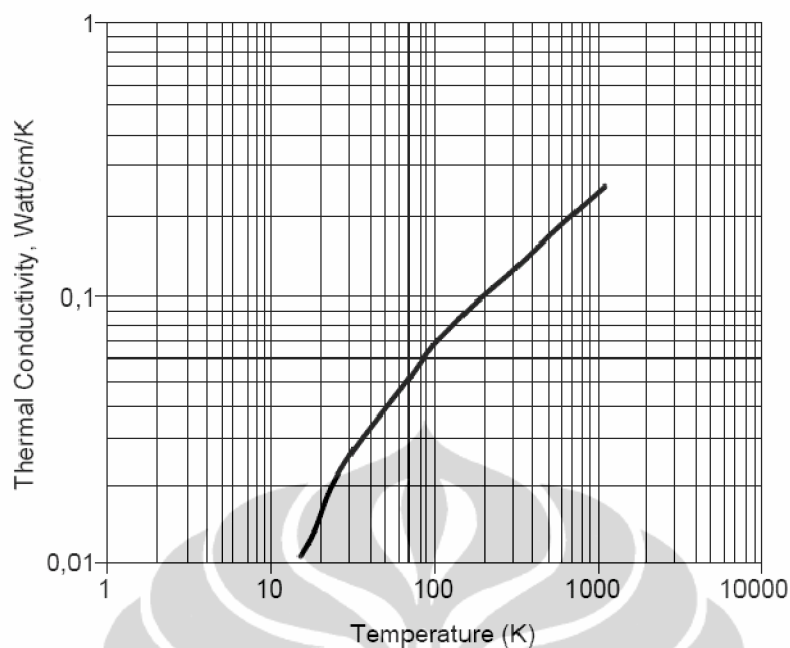
2.4.2.3. Konduktifitas Termal Baja (k) [7]

Sifat material ini menunjukkan kemampuan material untuk memindahkan panas secara konduksi yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

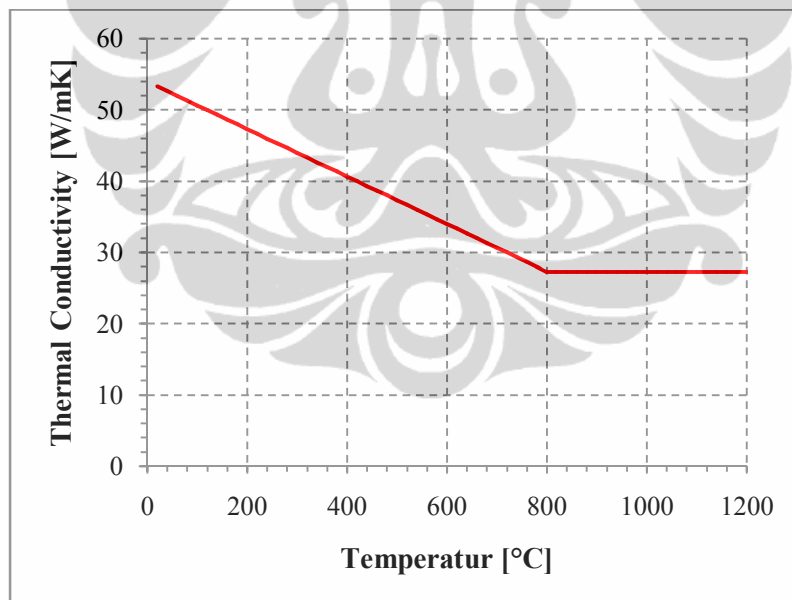
$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \cdot \theta_a \quad (20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 800^{\circ}\text{C}) \quad (2.27)$$

$$\lambda_a = 27,3 \quad (800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}) \quad (2.28)$$

Gambar 2.10 di bawah ini akan menunjukkan hubungan nilai konduktifitas termal baja terhadap perubahan suhu yang digunakan pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kenaikan suhu dan nilai konduktivitas berbanding lurus, dimana berbeda dengan kurva yang pada Gambar 2.11 yang berbanding terbalik.



Gambar 2.10. Grafik Hubungan Konduktifitas Termal Baja Akibat Pertambahan Temperatur ^[1]



Gambar 2.11. Grafik Hubungan Konduktifitas Termal Baja Akibat Pertambahan Temperatur ^[7]

2.4.2.4. Kapasitas Panas Baja (C_a)^[7]

Sifat material ini menunjukkan kemampuan material untuk menyerap panas dari lingkungan di sekitarnya, nilai dari kapasitas panas menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit kenaikan suhu.

Specific Heat pada baja (J/kgK) dapat ditentukan mengikuti persamaan:

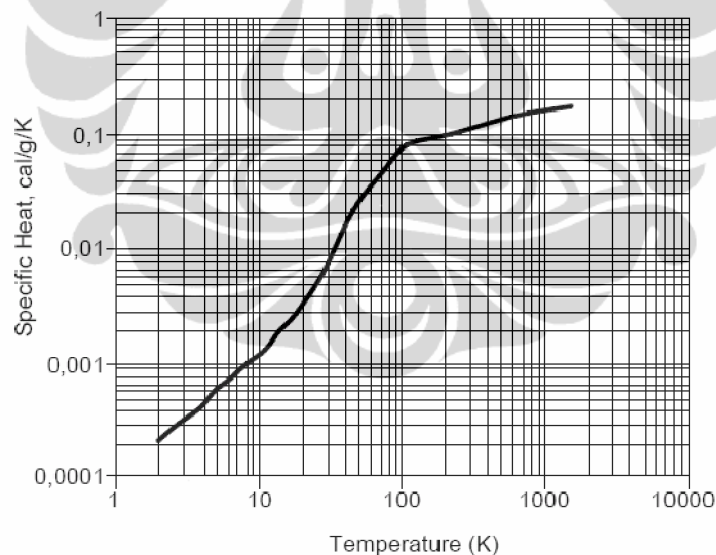
$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C})$$

$$c_a = 666 + 13002 / (738 - \theta_a) \quad (600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C})$$

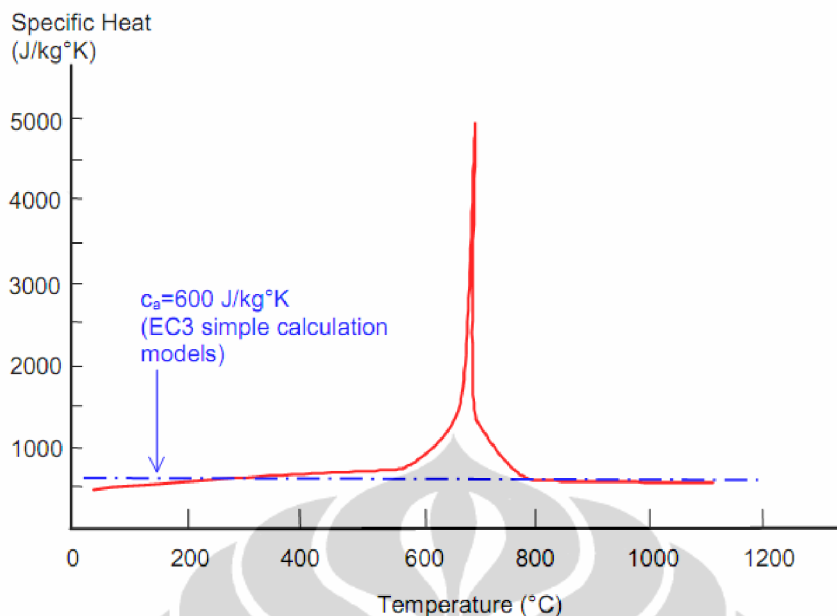
$$c_a = 545 + 17820 / (\theta_a - 731) \quad (735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C})$$

$$c_a = 650 \quad (900^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C})$$

Variasi kapasitas panas terhadap temperature pada Gambar 2.13, menunjukkan nilai kapasitas panas mengalami perubahan yang sangat jauh dalam kisaran 700-800°C, yang meningkat tajam ke nilai "tak terbatas" pada sekitar 735°. Nilai dari kapasitas panas baja dapat dilihat pada Gambar 2.13. Sedangkan pada penelitian sebelumnya ditunjukkan pada Gambar 2.12



Gambar 2.12. Grafik Hubungan Kapasitas Panas Baja Akibat Pertambahan Temperatur^[1]

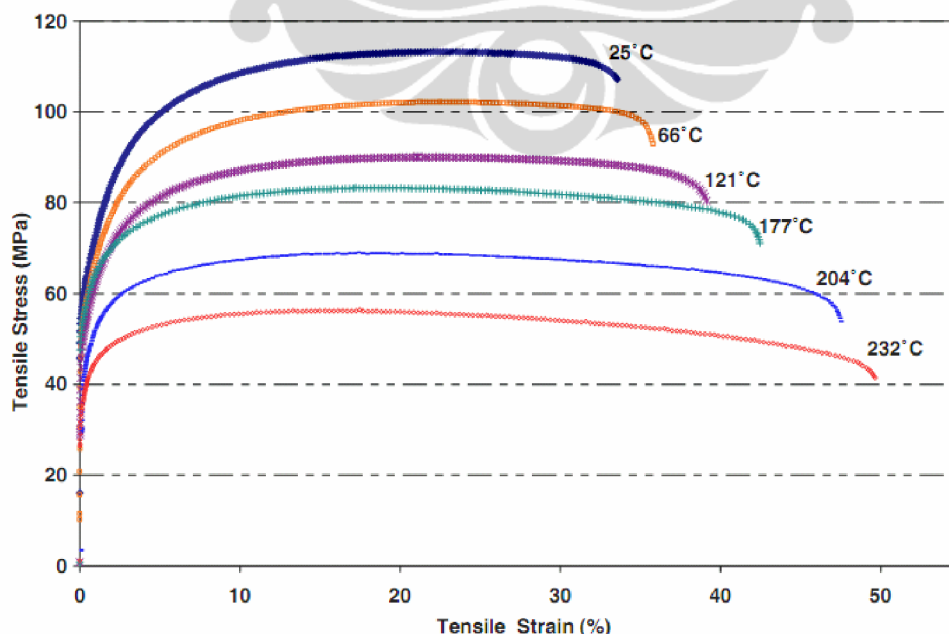


Gambar 2.13. Grafik Hubungan Kapasitas Panas Baja Akibat Pertambahan Temperatur ^[17]

2.4.3. Sifat Material Jembatan Model

2.4.3.1. Kondisi Tegangan-Regangan (*stress-strain*) Aluminium ^[17]

Untuk mengetahui hubungan antara tegangan-regangan (*stress-strain*) pada aluminium yang bervariasi terhadap perubahan suhu, penulis mengambil informasi dari salah satu jurnal sebagai acuan maupun pendekatan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Grafik Hubungan Tegangan-Regangan Aluminium terhadap Temperatur ^[17]

2.4.3.2. Perpanjangan Linear terhadap Suhu ($\Delta l / l$) Aluminium^[18]

Nilai ini merupakan sifat material yang menunjukkan nilai perpanjangan material akibat efek pemanasan batang aluminium terhadap waktu yang dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5. Perpanjangan Linear Aluminium (Thermal Expansion)^[18]

Temperature (C)	20	100	200	300	400	500	600	650
Thermal Expansion ($10^{-6}/C$)	22	25.4	26.5	27.8	29.9	32.5	35.5	37.2

2.4.3.3. Konduktifitas Termal Aluminium (k)^[18]

Sifat material ini menunjukkan kemampuan material untuk memindahkan panas secara konduksi yang dapat dilihat pada tabel 2.6.

2.4.3.4. Kapasitas Panas Aluminium (C_a)^[18]

Sifat material ini menunjukkan kemampuan material untuk menyerap panas dari lingkungan di sekitarnya, nilai dari kapasitas panas menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit kenaikan suhu yang dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6. Konduktifitas dan Kapasitas Panas Aluminium^[18]

Temperature (C)	-173	-73	27	127	327
Thermal Conductivity, k (W/m-K)	65	163	177	186	186
Specific Heat, c (J/kg-K)	473	787	875	925	1042

2.5. ANALISA DARI PENELITIAN SEBELUMNYA^[1]

2.5.1. Penelitian Prof. Ir. Sidharta S Kamarwan

Penelitian sebelumnya ini dilakukan oleh Prof. Ir. Sidharta S Kamarwan dalam laporan singkatnya yang berjudul “JEMBATAN RANGKA BAJAPUN DAPAT TERBAKAR DAN RUNTUH”. Pada laporan tersebut, beliau menuliskan perilaku keruntuhan Jembatan Krasak sebagai berikut: ”Penyebab runtuhnya jembatan dapat dipastikan oleh timbulnya kebakaran di Jembatan, yang mengakibatkan naiknya temperatur pada badan Jembatan. Kenaikan temperatur ini menyebabkan batang-batang baja memuai dan sekaligus menurunkan batas

leleh dan batas elastisitas baja. Akibat memuainya batang, maka akan timbul deformasi, baik ke arah memanjang ataupun arah melintang dari jembatan. Pemuaian ke arah panjang jembatan mengakibatkan timbulnya kenaikan tegangan normal pada tiap-tiap batang, dan pada saat yang bersamaan, justru tegangan leleh ijinnya menurun.

Akibat bertambahnya gaya aksial pada baja, terutama batang tepi atas dan turunnya tegangan ijin, akan mengakibatkan batang tepi ini mengalami tekuk. Apabila batang ini mulai mengalami tekuk, maka segera timbul pula gaya lentur (momen sekunder) yang semakin melemahkan fungsi batang-batang dalam rangka baja ini. Selanjutnya, muai ke arah melintang akan mengakibatkan deformasi melintang pada jembatan, yaitu bagian yang paling banyak terkena api, yang menimbulkan gaya tekan dengan arah tegak lurus rangka utama jembatan. Gaya lateral pada jembatan ini menambah timbulnya gaya lentur pada rangka batang utama, yang tentunya semakin memperlemah fungsi batang tepi atas yang bersifat tekan ini. Secara keseluruhan mempercepat deformasi, yang mengakibatkan runtuhnya jembatan.

Dari diagram 2 dan 3 serta rumus-rumusya dapat diketahui bahwa apabila temperatur akibat minyak yang terbakar dari tangki itu mengakibatkan kenaikan temperatur hingga 300 derajat saja sudah cukup untuk menurunkan batas tegangan leleh baja menjadi 50%, dan dengan berat sendiri dari konstruksi baja dan sekaligus deformasi yang timbul akan menyebabkan batang tepi atas tidak mampu lagi menahan gaya tekan yang kemudian menyebabkan batang tersebut melengkung. Apabila batang tersebut melengkung sedikit saja, menyimpang dari sumbu batangnya, maka hal tersebut akan menimbulkan lentur, serta selanjutnya batang tepi tersebut, yang tidak direncanakan untuk menahan beban lentur, maka akan segera melemah, dan akibat proses penjarangan panas, pada khususnya batang tepi atas, akan diikuti oleh menurunnya tegangan batas leleh batang atas tersebut, maupun batang lainnya yang berdekatan, dan selanjutnya diikuti olehnya timbulnya tegangan lentur yang terjadi pada batang-batang, yang lazimnya hanya diutamakan untuk menahan gaya aksial, maka jembatan itu secara perlahan-lahan menurun dan akhirnya runtuh.

Di lapangan pada tanggal 10 Mei 1991, masih terdapat kerangka jembatan yang ambruk tersebut. Jembatan yang terbakar adalah jembatan sisi Semarang, yang panjangnya 88 m. Bagian yang runtuh adalah pangkal jembatan yang menumpang pada abudment sisi Semarang. Sedangkan perletakan jembatan yang menumpang pada pilar tengah bersandar pada tiang tersebut.

Batang tepi atas jembatan yang terbakar kelihatan hangus, dan dalam keadaan kacae dan bengkok tidak karuan. Sedangkan batang tepi bawah terlihat lurus saja. Pada bagian jembatan ini tampak bangkai truk tangki yang terguling dan yang tegak. Dilaporkan bahwa setelah api padam, ternyata di dalam tangki masih menyimpan 1700 liter minyak yang tertinggal tidak terbakar. Dilaporkan pula bahwa tidak benar terjadi ledakan, mungkin yang terjadi hanya 'ngobos'.

Laporan ini dapat diterima, mengingat tutup tangki terbuka, sehingga tidak akan timbul tekanan besar di dalam truk tangki. Jadi tentunya tidak terjadi ledakan. Bila terdengar letusan, hal itu mungkin disebabkan oleh ban truk itu yang meletus. Tapi bukan meledak, yang memerlukan daya lebih besar. Seandainya timbul ledakan, tentunya tangki itu akan pecah atau peyot, yang ternyata tangki dari truk tersebut dalam keadaan baik.

Hal itu semua menguatkan dugaan bahwa ambruknya jembatan tersebut bukan disebabkan oleh ledakan, aka tetapi lebih disebabkan oleh tingginya temperatur yang menyebabkan timbulnya deformasi pada seluruh tubuh jembatan dan turunnya tegangan leleh Elastisitas bahan, yang melebihi batas yang direncanakan, sehingga secara jelas jembatan tersebut oleh berat sendiri dan beban truk tersebut berangsur-angsur runtuh. Saksi mata mengungkapkan turunnya badan jembatan tersebut 15 sampai 20 menit.”

2.5.2 Penelitian Oleh Arya Perdana

Penelitian yang dilakukan oleh Arya Perdana dengan melakukan simulasi pemodelan dengan model 2D dan 3D, menyimpulkan bahwa penggunaan Model 2D untuk menganalisa perilaku struktur akibat kenaikan suhu kurang tepat untuk dilakukan, dikarenakan perilaku struktur yang terjadi pada Model 2D hanya mendekati keadaan sebenarnya, baik nilai ataupun pola keruntuhannya, sampai

pada keadaan sebelum runtuh, lebih tepatnya sampai sekitar menit ke-190, atau ± 1075 °C.

Proses keruntuhan yang terjadi berbeda jauh dengan kondisi pada Model 3D, yang disebabkan hilangnya sejumlah elemen yang mengalami kenaikan suhu pada Model 2D, yaitu pada pengaku transversal atas.

2.6. STRUKTUR MODEL^[15]

Struktur model merupakan suatu struktur yang disederhanakan secara signifikan dengan tidak mengurangi atau menghilangkan sifat-sifat penting pada perilaku struktur yang sebenarnya atau disebut sebagai *Prototype*. Penyederhanaan struktur model harus direncanakan berdasarkan ketentuan hubungan persamaan (*similitude requirements*) struktur model terhadap struktur prototype.

Struktur model dapat dibagi menjadi tiga bagian, antara lain:

1. *True models*, dimana kesamaan dari keseluruhan model dapat dipertahankan (*complete similarity*). Seperti faktor skala berikut:

$$S_Q = S_l^2 S_E, \quad S_\varepsilon = 1$$

$$S_M = \frac{S_l^2 S_E}{S_a}, \quad S_\delta = S_l$$

$$S_\sigma = S_E, \quad S_\nu = 1$$

dimana,

S_Q : skala faktor gaya

S_l : skala faktor panjang

S_E : skala faktor modulus elastisitas

S_ε : skala faktor regangan

S_σ : skala faktor tegangan

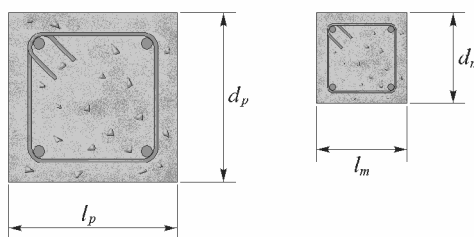
S_δ : skala faktor lendutan

S_a : skala faktor percepatan

S_M : skala faktor massa

S_ν : skala faktor angka poisson

Model dan prototype memiliki kesamaan bentuk dan perilaku seperti gambar dibawah ini:



$$\frac{l_p}{d_p} = \frac{l_m}{d_m} \quad \text{so} \quad \frac{A_p}{A_m} = \left(\frac{d_p}{d_m}\right)^2 = \left(\frac{l_p}{l_m}\right)^2$$

2. *Adequate models*, dimana kesamaan dari beberapa parameter model dapat dipertahankan.
3. *Distorted models*, dimana satu atau lebih parameter model tidak terpenuhi.

2.6.1. Skala Model

Hubungan perbandingan panjang dalam menyamakan posisi dan setara. Alternatif setiap panjang pada prototype menghasilkan faktor yang konstan disebut skala. Penyederhanaan model struktur dengan skala tertentu dilakukan dengan mengecilkan ukuran dari dimensi struktur tanpa menghilangkan sifat dan karakteristik terpenting dari struktur *prototype*.

$(P_1/P_2) = (B_1/B_2) = D_1/D_2) = (H_1/H_2)$ skala 1/100

Persamaan ini selalu ide dasar utama untuk metode membuat suatu persanaan, jika

$$P = B + H + (B_2 + H_2)^{1/2}$$

Dapat diperlihatkan seperti berikut ini ;

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{H_1}{H_2} = \frac{\sqrt{(B^2 + H^2)_1}}{\sqrt{(B^2 + H^2)_2}}$$

Catatan $\frac{(B_1^2 + H_1^2)}{(B_2^2 + H_2^2)} = \frac{H_1^2}{H_2^2}$: jika persamaan diatas betul kemudian

$$\frac{(B_1/H_1)^2 + 1}{(B_2/H_2)^2 + 1} = 1 \quad \text{Selanjutnya} \quad (B_1/H_1)^2 + 1 = (B_2/H_2)^2 + 1 \quad \text{---- (OK)}$$

Dalam bentuk umum $A + B + C + D + \dots = 0$

$$A_m/A_p = B_m/B_p = C_m/C_p = D_m/D_p = \dots\dots\dots$$

m = model ; p = prototype

Dimana A, B, C dst adalah suku persamaan koreksi dimensi.

Tujuan Dari Skala Model

1. Verifikasi model analisa terhadap hasil percobaan.
2. Mengetahui perilaku sistem struktur secara keseluruhan.
3. Mempelajari perilaku struktur dengan kombinasi jenis elemen yang berbeda.

Tabel 2.7. Faktor Skala Pada Model Statik Elastis^[15]

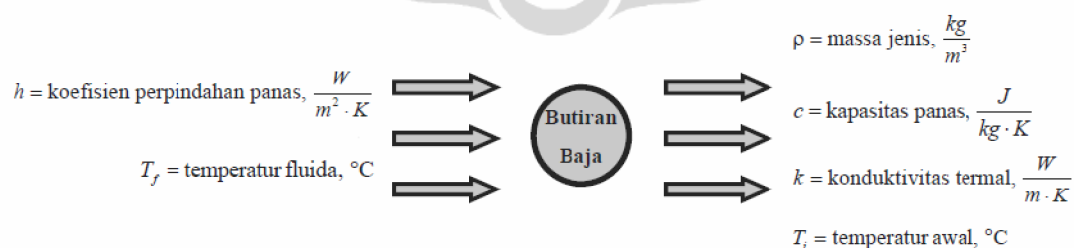
Kuantitas	Dimensional	Faktor Skala
Propertis Bahan		
Tegangan, σ	FL^{-2}	S_E
Modulus Elastisitas, E	FL^{-2}	S_E
Angka Poisson, ν	--	1
Berat Jenis, γ	FL^{-3}	S_E/S_L
Regangan, ϵ	--	1
Geometri		
Dimensi Linear, l	L	S_L
Displacement, δ	L	S_L
Area, A	L^2	S_L^2
Momen Inersia, I	L^4	S_L^4
Beban		
Beban Terpusat, Q	F	$S_E S_L^2$
Beban Merata, w	FL^{-1}	$S_E S_L$
Beban Area, q	FL^{-2}	S_E
Momen, M atau Torsi, T	FL	$S_E S_L^3$
Gaya Geser, V	F	$S_E S_L^2$

Tabel 2.8. Faktor Skala Pada Model Thermal^[15]

Kuantitas	Dimensional	True Model	Kesamaan pada Material dan Suhu	Distorted Skala Regangan
Tegangan, σ	FL^{-2}	S_E	1	$S_\alpha S_\theta S_E$
Regangan, ϵ	--	1	1	$S_\alpha S_\theta$
Modulus Elastisitas, E	FL^{-2}	S_E	1	S_E
Angka Poisson, ν	--	1	1	1
Koef. linear expansion, α	θ^{-1}	S_α	1	S_α
Thermal diffusivity, D	L^2T^{-1}	S_D	1	S_D
Dimensi Linear, l	L	S_L	S_L	S_L
Displacement, d	L	S_L	S_L	S_L
Temperatur, θ	θ	$1/S_\alpha$	1	S_θ
Time, t	T	S_L^2/S_D	S_L^2	S_L^2/S_D

2.7. PERHITUNGAN TRANSFER PANAS DENGAN PENDEKATAN METODE ELEMEN HINGGA^[16]

Dalam bagian ini akan dibahas perumusan dari perhitungan transfer panas dari beban termal yang bervariasi terhadap lokasi dan waktu (*unsteady heat transfer*). Sebagai contoh, diasumsikan terjadi efek pendinginan pada butiran baja bulat, seperti dalam Gambar 2.9 berikut ini:

Gambar 2.15. Peristiwa Pendinginan Butiran Baja Kecil^[16]

Nilai variabel termofisik (*thermophysical variables*) yang akan mempengaruhi hasil solusi terdapat pada gambar di atas. Dikarenakan butiran baja bulat yang relatif sangat kecil tersebut, maka perubahan temperatur terhadap

waktu di dalam butiran tersebut dapat diabaikan. Sehingga dapat didapatkan rumusan dari proses perubahan suhu terhadap waktu dengan rumus berikut ini:

$$E_{in} - E_{out} + E_{gen} = E_{stored} \quad (2.29)$$

Serta dalam permasalahan ini, kondisi batasnya adalah:

$$E_{in} = E_{gen} = 0 \quad (2.30)$$

Selain itu, perpindahan panas secara konveksi yang terjadi antara butiran tersebut dan fluida di sekitarnya dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$E_{out} = -hA(T - T_f) \quad (2.31)$$

Sedangkan besaran energi yang tersimpan (E_{stored}) merepresentasikan penurunan energi termal dari butiran tersebut dikarenakan efek pendinginan, yang dirumuskan dengan:

$$E_{stored} = \rho c V \frac{dT}{dt} \quad (2.32)$$

Persamaan 2.30, 2.31, dan 2.32 apabila disubstitusi dengan Persamaan 2.29 akan menjadi:

$$-hA(T - T_f) = \rho c V \frac{dT}{dt} \quad (2.33)$$

Dengan mengasumsikan bahwa proses pendinginan terjadi di tempat yang sangat besar, sangat masuk akal untuk mengkondisikan bahwa temperatur dari fluida di sekelilingnya tidak akan berubah terhadap waktu. Hal ini menyebabkan nilai T_f dalam Persamaan 2.33 menjadi konstan. Sehingga Persamaan 2.33 akan menjadi persamaan diferensial tingkat satu dan untuk menyelesaikannya, akan dianggap nilai $\Theta = T(t) - T_f$, serta dengan memisahkan variabelnya dan mengintegrasinya, akan didapat hasil:

$$-hA\Theta = \rho c V \frac{d\Theta}{dt} \Rightarrow \frac{\rho c V}{hA} \int_{\Theta_i}^{\Theta} \frac{d\Theta}{\Theta} = - \int_0^t dt \Rightarrow t = \frac{\rho c V}{hA} \ln \frac{\Theta_i}{\Theta} \quad (2.34)$$

Sehingga waktu yang dibutuhkan butiran tersebut untuk mencapai temperatur tertentu dapat dirumuskan dengan:

$$t = \frac{\rho c V}{hA} \ln \frac{T_i - T_f}{T - T_f} \quad (2.35)$$

Selanjutnya apabila kita ingin mengetahui temperatur dari butiran tersebut pada waktu tertentu, Persamaan 2.35 dapat diubah menjadi seperti berikut ini:

$$\frac{T_i - T_f}{T - T_f} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) \quad (2.36)$$

Untuk permasalahan *transient*, kita dapat juga menghitung jumlah panas yang dipindahkan pada fluida (atau dikeluarkan dari benda padat tersebut) dalam waktu t tertentu. Hal ini dapat dihitung dengan:

$$Q = \int_0^t hA(T - T_f) dt \quad (2.37)$$

Dengan mensubstitusikan $T - T_f$ pada Persamaan 2.36 kepada Persamaan 2.37 serta mengintegrasinya, akan didapatkan:

$$Q = \rho c V (T_i - T_f) \left[1 - \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) \right] \quad (2.38)$$

Dalam menghadapi analisa perpindahan panas secara *transient*, terdapat dua besaran tanpa dimensi (*dimensionless*), yaitu angka Fourier dan angka Biot, yang dapat sangat membantu. Angka Biot dapat menyatakan besar tahanan termal dari suatu benda padat (*solid*) yang mengalami pendinginan (dapat pula pemanasan) relatif terhadap tahanan termal dari proses pendinginan (atau pemanasan) dari fluida di sekitarnya. Angka Biot dapat didefinisikan dengan rumus berikut:

$$Bi = \frac{hL_c}{k_{\text{solid}}} \quad (2.39)$$

Dimana L_c adalah panjang karakteristik (*characteristic length*) dari suatu benda, serta dapat pula didefinisikan sebagai rasio dari volume suatu benda terhadap luas permukaan yang terbuka (*exposed*). Nilai dari angka Biot yang cukup kecil ($Bi < 0,1$) mengindikasikan bahwa tahanan termal dari benda padat tersebut dapat diabaikan dan sebagai konsekuensinya distribusi temperatur di dalam benda padat tersebut akan sama di setiap titik.

Variabel penting selanjutnya adalah angka Fourier, yang merupakan parameter waktu tanpa dimensi (*dimensionless*). Angka ini menyatakan nilai kecepatan konduksi (*rate of conduction*) dalam suatu benda padat secara relatif terhadap kecepatan penyimpanan termal (*rate of the thermal storage*). Angka Fourier didefinisikan dengan:

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (2.40)$$

Dimana α adalah tingkat penyebaran panas serta setara dengan $\alpha = k/\rho c$. Nilai dari tingkat penyebaran panas ini merepresentasikan seberapa baik material tersebut dalam kemampuannya mengkonduksikan panas apabila dibandingkan dengan kemampuannya menyimpan panas. Sehingga material dengan tingkat penyebaran panas yang kecil akan bersifat lebih baik dalam menyimpan energi termal dibandingkan dengan mengkonduksikannya.

Formulasi elemen hingga untuk permasalahan ini menuju pada bentuk formula umum (*general form*) berikut ini:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{T}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (2.41)$$

$$[\text{matriks konduktifitas}]\{\text{matriks temperatur}\} = \{\text{matriks beban termal}\}$$

Untuk kondisi permasalahan *transient*, harus diikutsertakan perhitungan penyimpanan energi termal, yang akan merubah bentuk Persamaan 2.41 menjadi:

$$[\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{T}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{T}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (2.42)$$

$$[\text{matriks simpanan panas}] + [\text{matriks konduktifitas}]\{\text{matriks temperatur}\} = \{\text{matriks beban termal}\}$$

Dalam perhitungan untuk memperoleh solusi, pada titik diskrit (*discrete point*) waktu tertentu, berdasarkan sistem formula pada Persamaan 2.42, harus dilakukan prosedur integrasi terhadap waktu. Pemilihan langkah waktu (*time step*) yang terlalu kecil akan menghasilkan perubahan hasil yang kurang akurat (*spurious oscillation*) dalam perhitungan solusi temperatur yang mengakibatkan hasil yang tidak bermakna (*meaningless*). Sebaliknya, apabila langkah waktu yang digunakan terlalu besar, maka gradien temperatur tidak dapat dihitung secara akurat. Kita dapat menggunakan angka Biot ($Bi = \frac{h\Delta x}{k_{\text{solid}}}$) dan angka Fourier

($Fo = \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2}$) terhadap langkah waktu yang masuk akal (*reasonable*). Nilai Δx

dan Δt masing-masing merepresentasikan nilai tengah panjang elemen dan langkah waktu. Untuk permasalahan dimana $Bi < 1$, maka ukuran langkah waktu dapat diperkirakan dengan mengeset angka Fourier setara dengan mengatur nilai b yang nilainya berkisar antara 0,1 hingga 0,5 seperti diperlihatkan di bawah ini:

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} = b \quad (2.43)$$

Dapat diperoleh besaran Δt , dengan:

$$\Delta t = b \frac{(\Delta x)^2}{\alpha}, \text{ dimana } 0,1 \leq b \leq 0,5 \quad (2.44)$$

Untuk permasalahan dengan $Bi > 1$, maka besar langkah waktu dapat diperkirakan dengan perkalian angka Fourier dan Biot seperti di bawah ini:

$$(Fo)(Bi) = \left[\frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \right] \left[\frac{h \Delta x}{k_{\text{solid}}} \right] = b \quad (2.45)$$

Dapat diperoleh besaran Δt , dengan:

$$\Delta t = b \frac{(\Delta x) k_{\text{solid}}}{h \alpha} = b \frac{(\Delta x) \rho c}{h}, \text{ dimana } 0,1 \leq b \leq 0,5 \quad (2.46)$$

ANSYS menggunakan skema Euler dalam integrasi waktu seperti di bawah ini:

$$\{T^{p+1}\} = \{T^p\} + (1-\theta) \Delta t \{\dot{T}^p\} + \theta \Delta t \{\dot{T}^{p+1}\} \quad (2.47)$$

Pada Persamaan 2.47, θ merupakan parameter Euler. Solusi temperatur dapat diperoleh untuk langkah waktu $p + 1$ berdasarkan data nilai temperatur pada langkah waktu sebelumnya p , dimulai dari waktu $t = 0$, sesuai dengan langkah waktu $p = 0$, dimana nilai temperatur awal diketahui. Untuk skema implisit, yang mutlak stabil, besaran nilai dari θ dibatasi antara $\frac{1}{2} \leq \theta \leq 1$. Apabila $\theta = \frac{1}{2}$, skema integrasi yang dilakukan biasa disebut dengan Crank-Nicolson. Skema tersebut menyediakan hasil yang akurat untuk sebagian besar masalah perpindahan panas secara *transient*. Apabila $\theta = 1$, teknik integrasi yang dilakukan dinamakan “Backward Euler” dan merupakan kondisi standar (*default setting*) pada ANSYS.

Dengan mensubstitusi Persamaan 2.47 pada Persamaan 2.22, maka:

$$\overbrace{\left(\frac{1}{\theta \Delta t} [C] + [K] \right)}^{\text{Setara matriks K}} \{T^{p+1}\} = \overbrace{\{F\} + [C] \left(\frac{1}{\theta \Delta t} \{T^p\} + \frac{(1-\theta)}{1} \{\dot{T}^p\} \right)}^{\text{Setara matriks F}} \quad (2.48)$$

Sistem formula dari Persamaan 2.28 dapat diselesaikan untuk memperoleh temperatur nodal pada titik waktu diskrit tertentu. Beban termal dapat diaplikasikan baik secara tiba-tiba (*stepped*), atau menanjak (*ramped*) dalam program ANSYS. Selain itu, dalam mencapai nilai konvergensi dalam persamaan

nonlinear, digunakan Metode Full Newton-Rhapson. Persamaan dasar yang digunakan adalah:

$$R_{n+1} = R(u_{n+1}) = P(u_{n+1}) - f = 0 \tag{2.49}$$

Persamaan tersebut dapat dinyatakan dalam ekspansi deret Taylor dengan mengambil dua suku pertamanya yaitu (\quad) (\quad)

$$R(u_{n+1}^{i+1}) \approx R(u_{n+1}^i) + \left(\frac{\partial R}{\partial u} \right)_{n+1}^i \partial u_n^i \tag{2.50}$$

Dimana i merupakan hitungan integrasi yang dimulai dari

$$u_{n+1}^i = u_n \tag{2.51}$$

Dan

$$\frac{\partial R}{\partial u} = \frac{\partial P}{\partial u} K_T \tag{2.52}$$

Dengan K_T adalah matriks Jacobian atau dalam struktur dikenal sebagai matriks kekakuan yang berhubungan dengan arah tangensial. Dengan mendistribusikan Persamaan 2.49 hingga Persamaan 2.52 di atas, maka diperoleh:

$$K_T^i \partial u_n^i = -R_{n+1}^i \tag{2.53}$$

$$u_{n+1}^{i+1} = u_n + \Delta u_n^i = u_{n+1}^i + \partial u_n^i \tag{2.54}$$

$$\Delta u_n^i = \sum_{k=1}^i \partial u_n^k \tag{2.55}$$

Langkah-langkah perhitungan metode iterasi Full Newton-Raphson :

- a. Perhitungan data awal

$$u_{i+1}^0 = u_i \quad f_s^0 = (f_s)_i \quad \Delta R^{j+1} = \Delta \hat{p}_i \quad \hat{k}_T = k_i$$

- b. Perhitungan data iterasi

1. $\hat{k}_T \Delta u^j = \Delta R^j \rightarrow \Delta u^j$
2. $u_{i+1}^j = u_{i+1}^{j-1} + \Delta u^j$
3. $\Delta f^j = f_s^i - f_s^{j-1} + (\hat{k}_T - k_T) \Delta u^j$
4. $\Delta R^{j+1} = \Delta R^j - \Delta f^j$

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

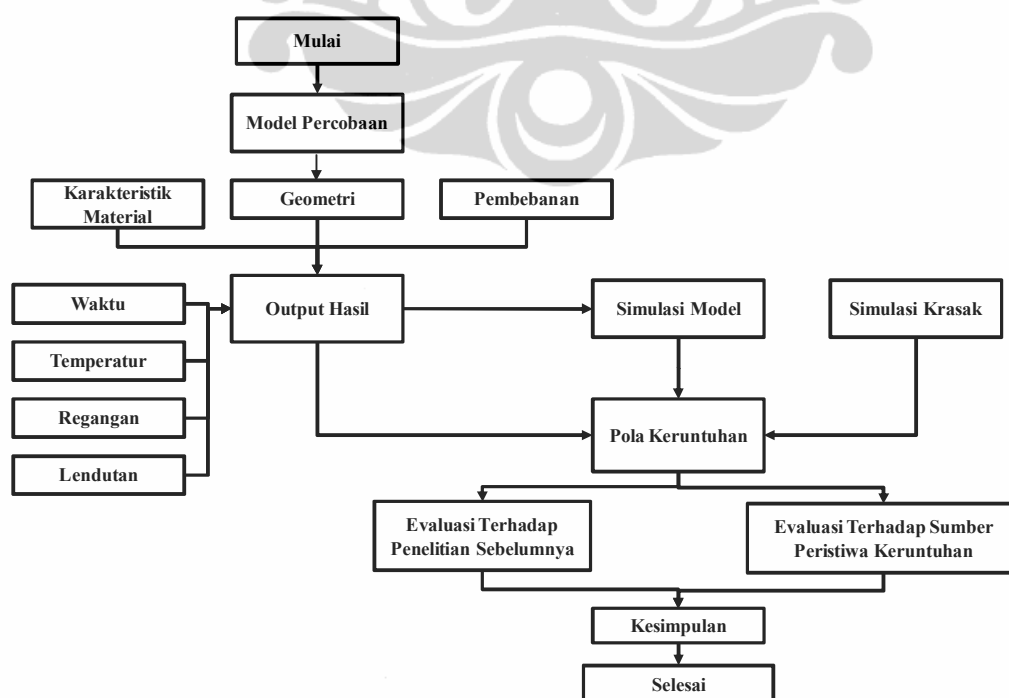
3.1. PROSEDUR ANALISA UMUM

Tulisan ini merupakan sebuah penelitian terhadap struktur Jembatan Krasak dengan suatu pendekatan dengan model berskala berdasarkan ketentuan dari teori kesamaan (*similitude theory*) yang kemudian dilanjutkan dengan proses simulasi menggunakan bantuan program ANSYS v11.0 sebagai program simulasi. Proses penelitian itu sendiri dilakukan sesuai dengan urutan pada Gambar 3.1. Adapun tahapan yang harus dilakukan pada saat menjalankan penulisan ini adalah:

1. Studi literatur. Penulis mencari dan mempelajari berbagai macam data mengenai hal-hal yang berhubungan dengan kebakaran, yaitu hal-hal yang menyebabkan dan diakibatkannya. Hal ini sudah dilakukan pada bab sebelumnya, tepatnya pada Bab 2, dari Subbab 2.1 hingga Subbab 2.5.
2. Studi data historis. Penulis mempelajari informasi-informasi dari penelitian sebelumnya, mengenai proses dan kejadian keruntuhan Jembatan Krasak sampai sedetail mungkin serta data yang berhubungan dengan dimensi struktur Jembatan Krasak dan beban truk tangki bermuatan 16000 liter premix. Dimana data-data tersebut akan dimanfaatkan dalam melakukan modelisasi struktur dan keadaan Jembatan Krasak pada kondisi yang semirip mungkin dengan aslinya. Data detail dimensi Jembatan Krasak hasil pengukuran secara langsung pada lokasi akan dibahas pada Bab 3, Subbab 3.2. Untuk data dimensi truk tangki bermuatan 16000 liter premix akan dibahas pada Bab 3, Subbab 3.3.
3. Perencanaan model dengan menentukan skala setiap parameter struktur berdasarkan ketentuan dari teori kesamaan yang akan dibahas pada Bab 3, Subbab 3.5.
4. Melakukan pengujian statik terhadap jembatan model.

5. Menghitung beban lalu lintas saat terjadinya kebakaran, dan beban termal yang dihasilkan dari proses pembakaran yang dinyatakan dengan gambar gradien temperatur pada tiap elemen profil rangka baja yang mengalami kenaikan suhu. Data pembebanan ini akan dibahas pada Bab 3.
6. Melakukan analisa struktur terhadap jembatan model menggunakan bantuan program ANSYS v11.0 sebagai program simulasi guna mengetahui perilaku struktur berupa hubungan tegangan regangan yang terjadi dan pola deformasi rangka aluminium struktur dari jembatan model berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian. Hasil simulasi ini akan ditampilkan pada Bab 4
7. Melakukan analisa struktur jembatan krasak menggunakan bantuan program ANSYS v11.0 sebagai program simulasi guna mengetahui perilaku struktur berupa hubungan tegangan regangan yang terjadi dan pola deformasi rangka baja struktur dari Jembatan Krasak. Hasil simulasi ini akan ditampilkan pada Bab 4
8. Kesimpulan. Penulis membahas dan menyimpulkan hasil poin 1 sampai 7 di atas. Hal ini akan disajikan pada Bab 5.

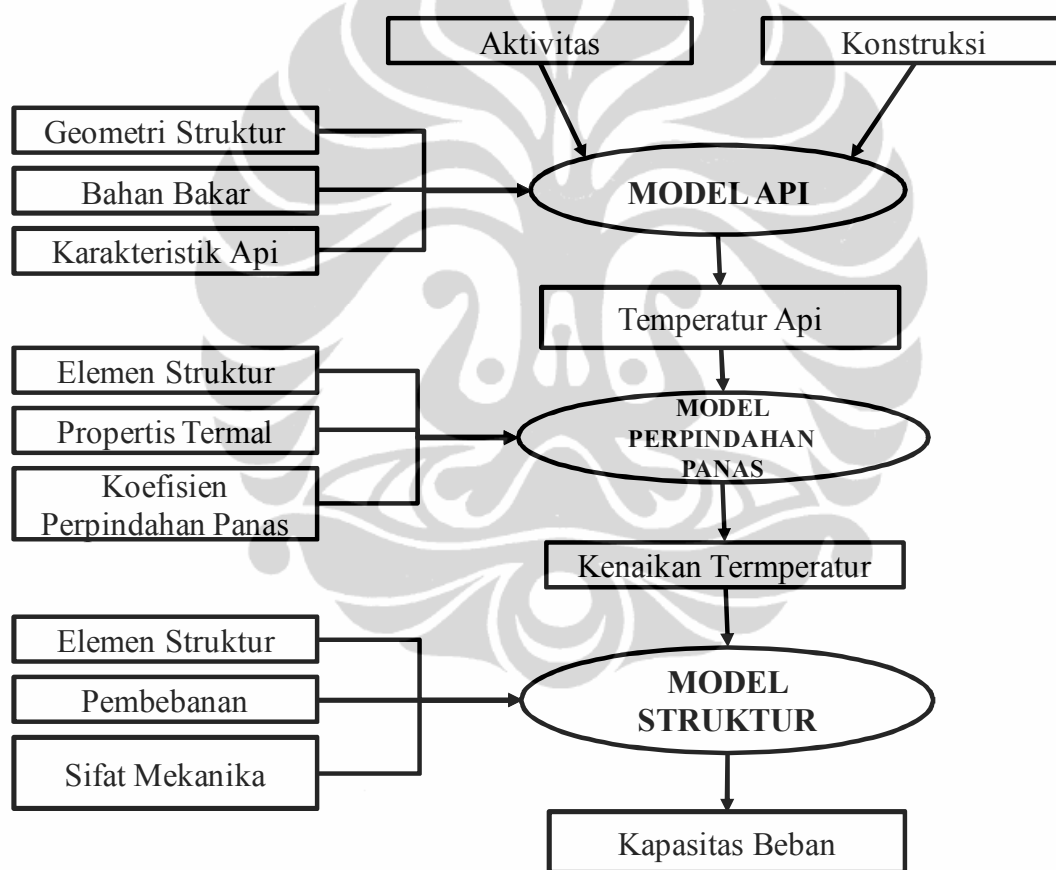
3.1.1. Proses Penelitian



Gambar 3.1. Proses Penelitian

3.1.2. Alur Pembebanan

Alur proses dalam analisa perilaku struktur ditunjukkan seperti Gambar 3.2 yang terdiri dari tiga model komponen penting, yaitu: model api, model perpindahan panas dan pemodelan struktur. Model Api dapat berupa kurva temperatur nominal dan kurva parameter temperatur. Untuk elemen struktur sederhana dengan tertentu akan menghasilkan suatu model perpindahan panas yang dapat digunakan secara langsung untuk menilai apakah temperatur kritis sudah terlewati.

Gambar 3.2. Alur Perhitungan Kapasitas Beban Suatu Struktur Terbuka Terhadap Api ^[5]

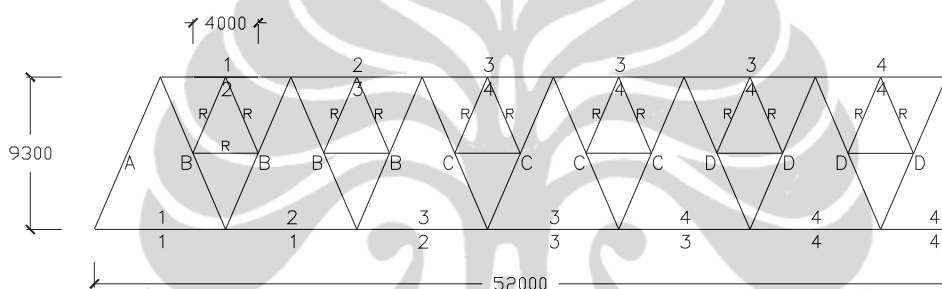
3.2. GEOMETRI STRUKTUR JEMBATAN KRASAK

3.2.1. Profil Baja Pada Struktur Jembatan Krasak

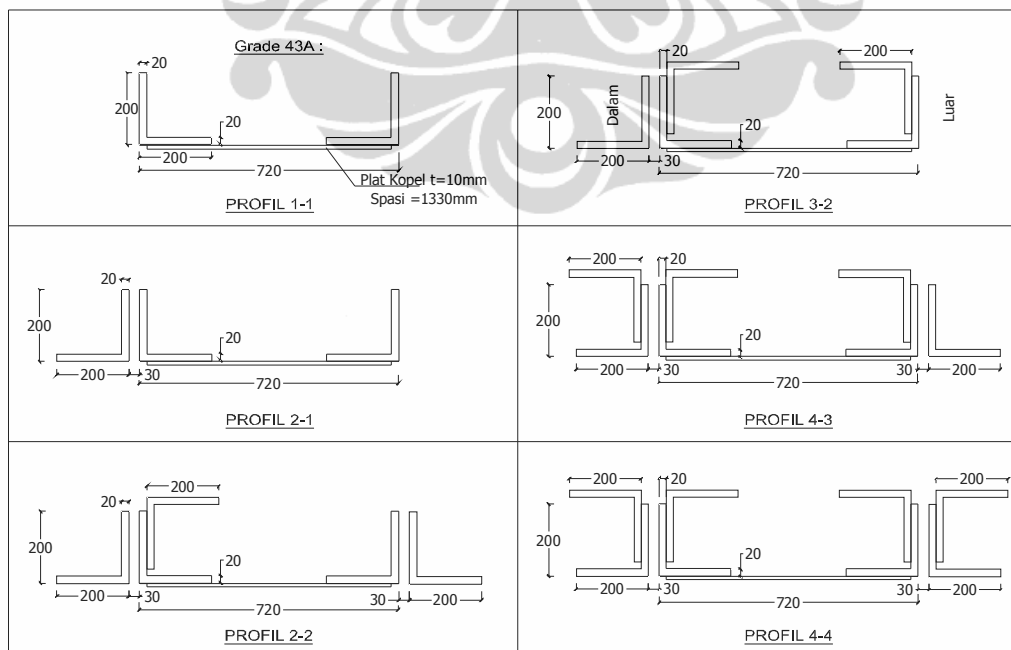
3.2.1.1. Umum

Secara keseluruhan, bagian-bagian pada Jembatan Krasak terdiri dari 3 bagian, yaitu bagian diagonal (sisi barat dan timur), bagian bawah (dek), serta bagian atas (pengaku). Ketiga bagian dari Jembatan Krasak tersebut akan dibahas lebih lanjut pada subbab selanjutnya dari tulisan ini. Pembahasan akan dilakukan mengenai profil yang digunakan dalam setiap bagian, dimensi

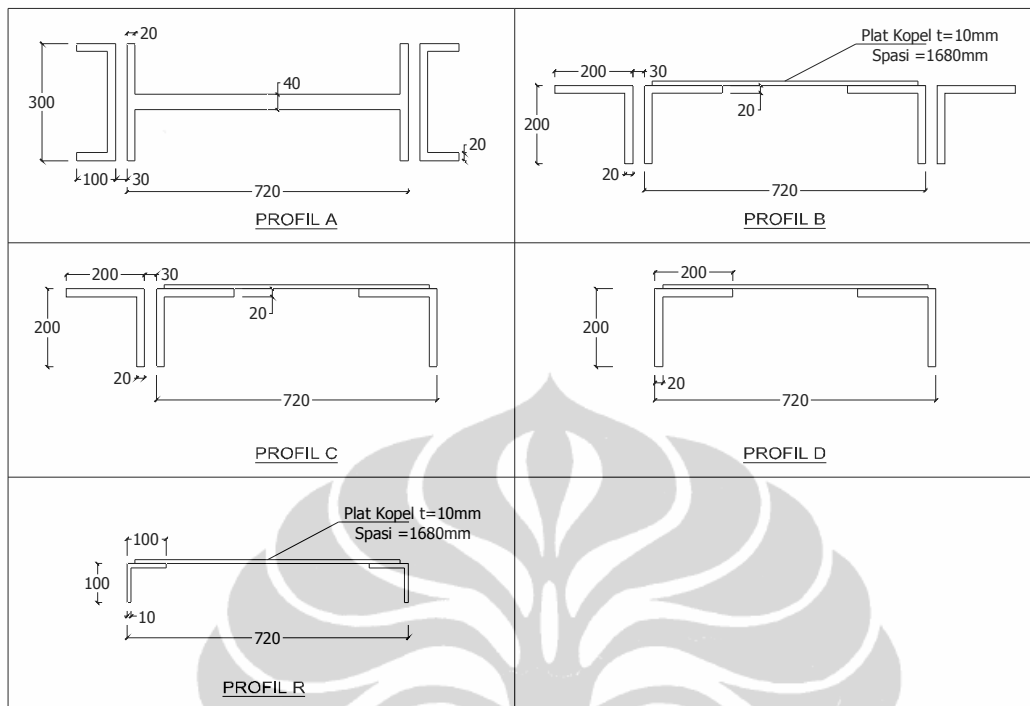
3.2.1.2. Bagian Diagonal



Gambar 3.3. Penamaan Profil Baja Jembatan Krasak Bagian Diagonal



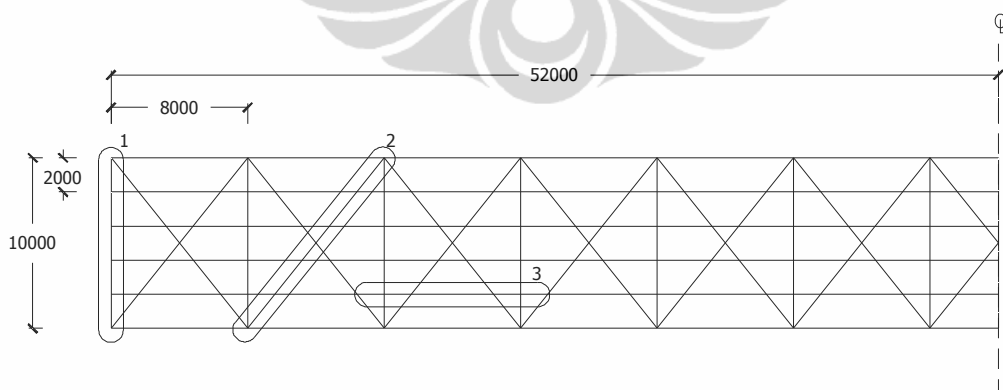
Gambar 3.4. Potongan Melintang Profil Balok



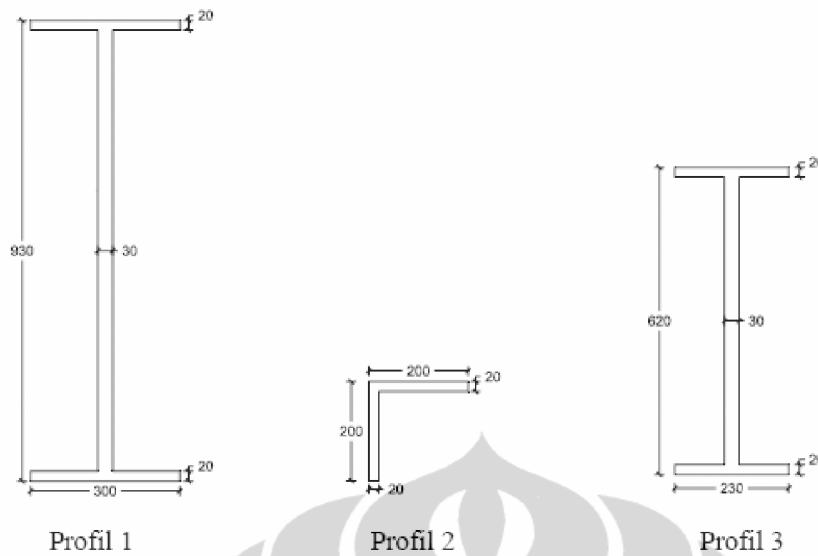
Gambar 3.5. Potongan Melintang Profil Bracing Dan Redundant

3.2.1.3. Bagian Bawah

Berikut ini adalah penamaan dari profil-profil baja yang ada pada Jembatan Krasak bagian bawah:



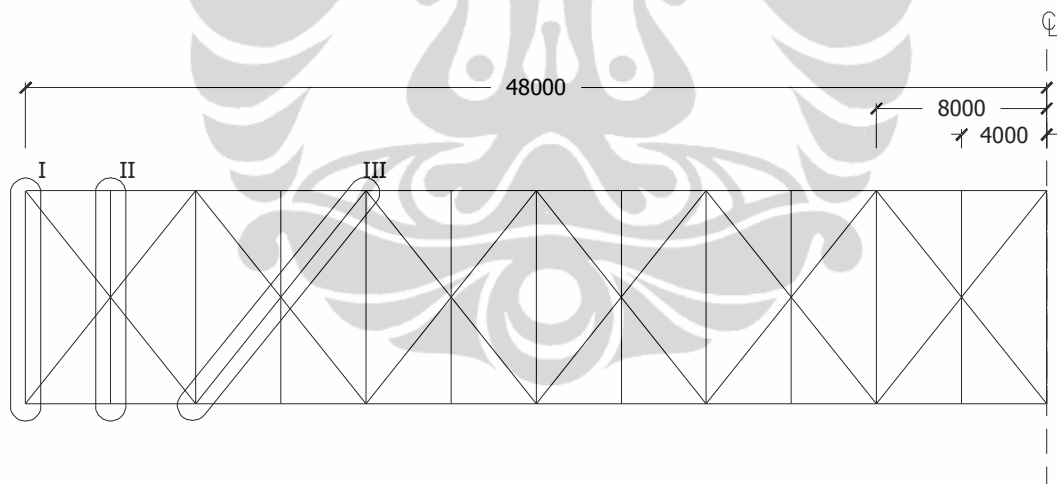
Gambar 3.6. Penamaan Profil Baja Jembatan Krasak Bagian Bawah



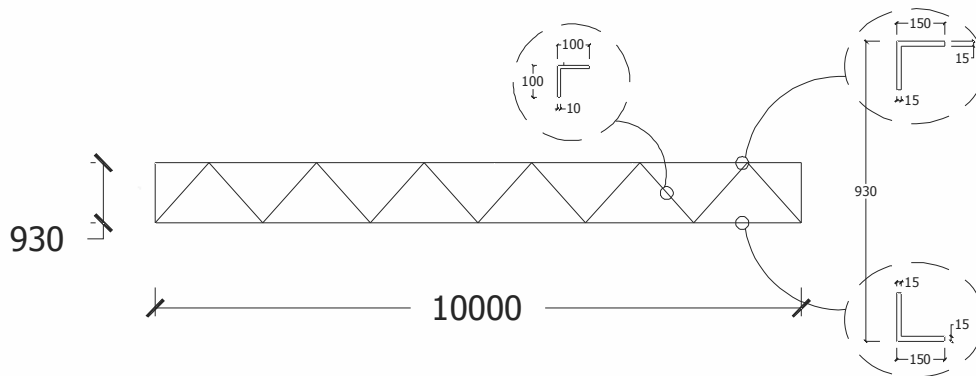
Gambar 3.7. Potongan Melintang dan Tabel Data Profil 1, Profil 2, dan Profil 3

3.2.1.4. Bagian Atas

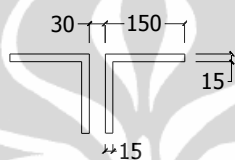
Berikut ini adalah penamaan dari profil-profil baja yang ada pada Jembatan Krasak bagian atas:



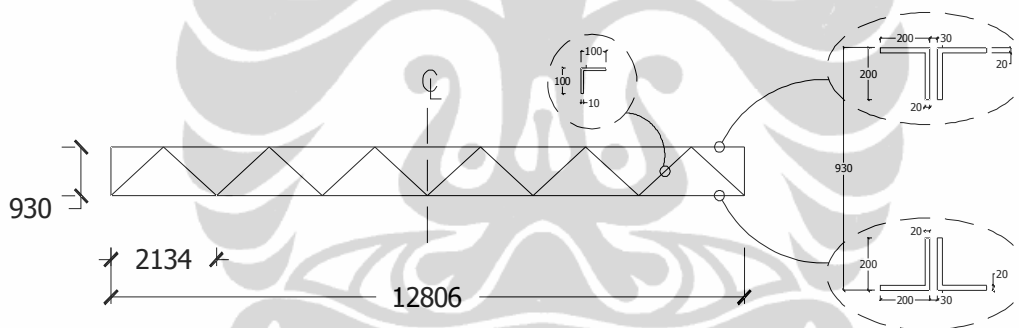
Gambar 3.8. Penamaan Profil Baja Jembatan Krasak Bagian Atas



Gambar 3.9. Potongan Melintang Profil I



Gambar 3.10. Potongan Melintang Profil II



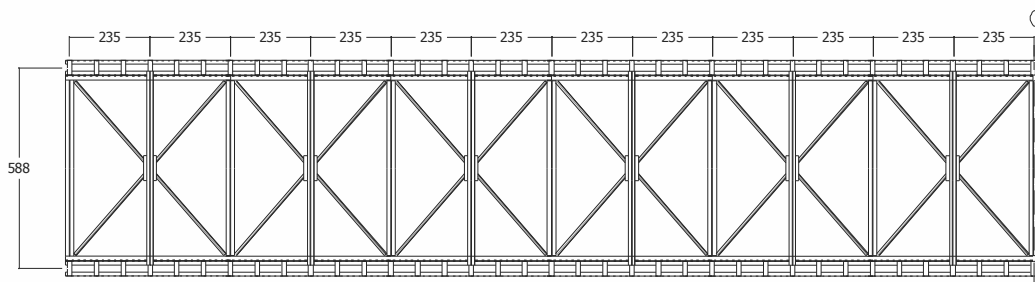
Gambar 3.11. Potongan Melintang Profil III

3.2.2. Struktur Jembatan Model

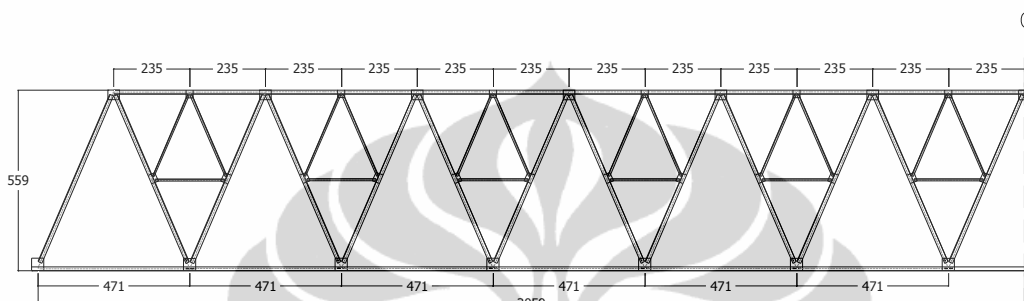
Struktur jembatan model direncanakan dengan skala geometri 1:17 yang ditentukan berdasarkan ketersediaan jenis dan ukuran profil yang tersedia di pasaran, seperti yang ada pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Skala Jembatan Model

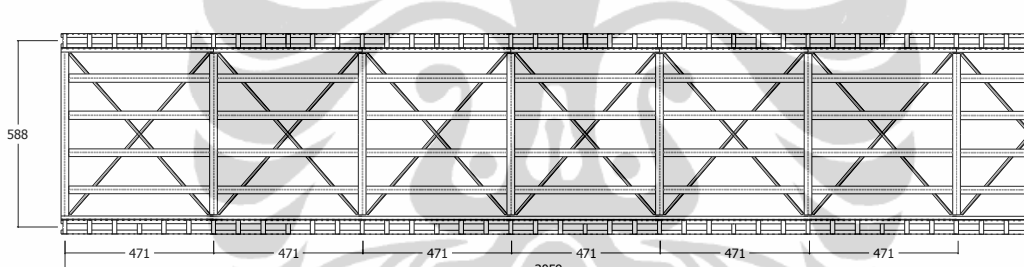
Tipe	Profil Prototype				Profil Model		
	Skala 1 : 1		Skala 1 : 17		Tipe	Skala 1 : 1	
	A (m ²)	I _{yy} = I _{zz} (m ⁴)	A (mm ²)	I _{yy} = I _{zz} (m ⁴)		A (mm ²)	I _{yy} = I _{zz} (m ⁴)
L 100x10	0,0019	1,80E-06	6,5744	2,155E+01	L 7x0,5	6,750	3,216E+01
L150x15	0,00427	9,11E-06	14,7751	1,091E+02	L 10x0,6	11,640	1,144E+02
L200x20	0,0076	2,88E-05	26,2976	3,448E+02	L 13,5x0,7	18,410	3,323E+02



Gambar 3.12. Rangka Model bagian Atas



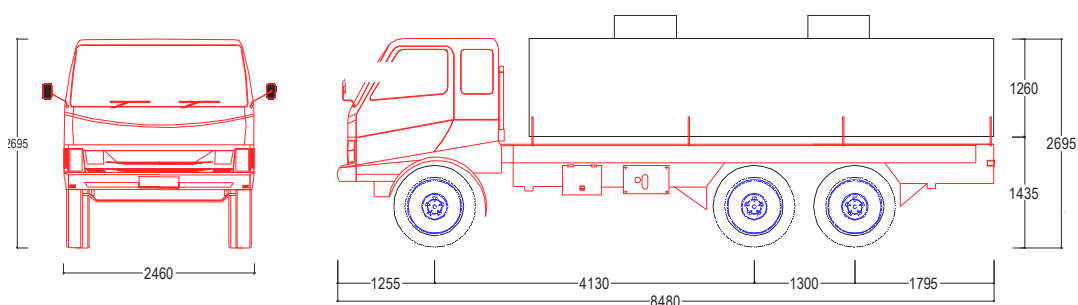
Gambar 3.13. Rangka Model bagian Samping



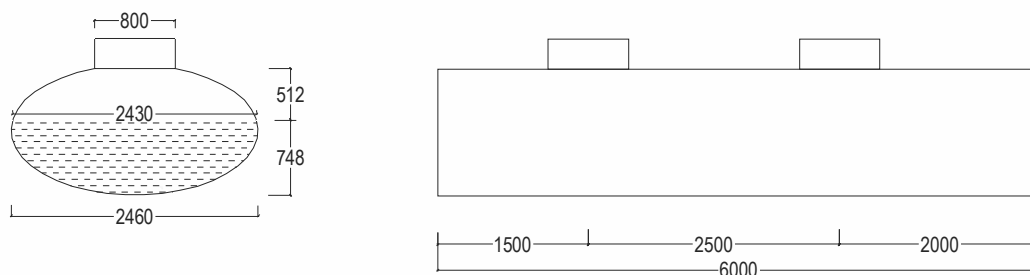
Gambar 3.14. Rangka Model Bagian Bawah

3.3. DATA DIMENSI TRUK TANGKI ^[13]

Dimensi dari truk tangki bahan bakar diperlukan untuk menentukan elemen-elemen mana saja yang mengalami efek kenaikan suhu (kebakaran). Data dimensi yang diperlukan adalah mengenai letak tangki bahan bakar yang diangkut oleh truk tersebut.



Gambar 3.15. Truk Tangki Bahan Bakar 16000 Liter ^[13]



Gambar 3.15. Truk Tangki Bahan Bakar 16000 Liter ^[13]

Data selengkapnya mengenai dimensi truk bahan bakar dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.2. Dimensi Truk Tangki Bahan Bakar ^[13]

Keterangan	Dimensi (<i>mm</i>)
Jarak Sumbu Roda	4130+1300
Total Panjang	8480
Total Lebar	2460
Total Tinggi	2695
Lebar Jejak Depan	1925
Lebar jejak Belakang	1855
Julur Belakang	1795

Berdasarkan data tersebut, maka dapat ditentukan panjang tangki bahan bakar terhadap skala panjang yaitu:

$$L_{model} = \frac{L_{prototype}}{S_l}$$

$$L_{model} = \frac{6000mm}{17}$$

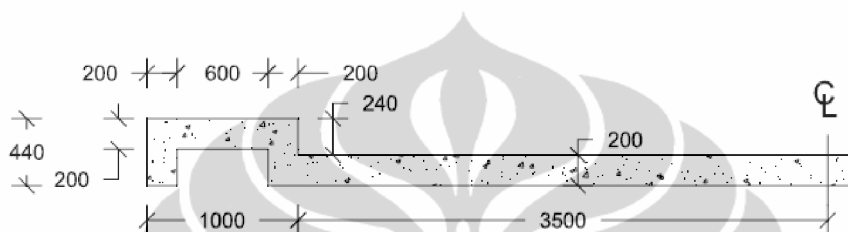
3.4. DATA PEMBEBANAN PADA JEMBATAN KRASAK

3.4.1. Beban Gravitasi

Perhitungan berat sendiri dari profil baja pada Jembatan Krasak maupun jembatan model dapat dilakukan dengan sendirinya oleh program ANSYS v11.0. Berat masing-masing profil akan sesuai dengan massa jenis dikali dengan luas penampang dan bentang panjang masing-masing profil.

Berat sendiri untuk profil baja ditentukan sebesar 7850 kg/m^3 dan untuk profil aluminium sebesar 2702 kg/m^3 . Untuk berat dari truk tangki yaitu $20 \text{ Ton}^{[13]}$ diskalakan menjadi $20/17^3 \text{ Ton}$ atau ekuivalen dengan berat 4 kg , yang akan didistribusikan pada nodal di sekeliling lokasi berhentinya truk tersebut.

Sedangkan untuk perhitungan berat total beton yang digunakan pada Jembatan Krasak, sebelumnya diperlukan perhitungan volume dari total beton yang digunakan. Apabila melihat pada potongan melintang dari beton di bawah ini:



Gambar 3.16. Potongan Melintang Struktur Pelat Jalan Beton

maka didapat luas penampang beton yang digunakan adalah $2,032 \text{ m}^2$. Dengan bentang Jembatan Krasak yang mencapai 104 m , maka total volume dari beton yang digunakan pada Jembatan Krasak adalah $211,328 \text{ m}^3$. Selanjutnya apabila diketahui berat jenis beton adalah 2400 kg/m^3 , maka total berat beton mencapai $507187,2 \text{ kg}$. Beban ini selanjutnya akan dibagi faktor skala berat ($S_w = 17^3$), menjadi $103,2 \text{ kg}$ yang akan didistribusikan secara merata pada balok memanjang untuk memudahkan input dan analisa pada model jembatan.

3.4.2. Beban Termal

Dalam penentuan beban termal yang terjadi pada peristiwa kebakaran Jembatan Krasak, maka dibutuhkan data pengamatan peristiwa kebakaran tersebut. Data tersebut terdiri dari 2 hal, yaitu data yang berasal dari media masa dan data hasil wawancara dengan saksi mata. Dari kedua sumber tersebut, beberapa kesimpulan yang dapat diambil mengenai peristiwa kebakaran pada Jembatan Krasak adalah:

- Kebakaran bermula dari truk tangki (tidak gandeng) premix berkapasitas 16000 liter yang terbakar di tengah bentang.
- Kebakaran terjadi selama 8 jam, dengan sekitar 2 jam awal mencapai suhu

puncaknya.

- Sisa premix sejumlah 4000 liter menandakan jumlah premix yang digunakan sebagai bahan bakar adalah 12000 liter.
- Efek peningkatan suhu hanya terjadi pada batang tepi atas jembatan, batang bawah masih dalam kondisi normal dan lurus.

Dari sejumlah kesimpulan tersebut, maka beban termal yang terjadi pada peristiwa kebakaran Jembatan Krasak dapat dihitung dengan rumusan seperti berikut^[14].

Beban termal rata-rata dalam suatu ruangan:

$$L_{fire} = \left(\frac{1}{A_f} \sum m_i \cdot H_{ui} \cdot (F_i) \right) \times F_d \times K_d \quad (3.1)$$

dimana:

- L_{fire} = Beban Termal (MJ/m^2).
- A_f = Luas Ruang yang Terbakar (m^2).
- m_i = Massa Bahan Bakar (kg).
- F_i = Faktor Pembakaran {*combustion*}.
- F_d = Faktor distribusi beban api.
- K_d = Konstanta distribusi beban api.
- H_{ui} = Nilai Kalori Material (MJ/kg).

Berdasarkan Gambar 3.15, dapat dihitung besaran A_f dengan mencari luas permukaan dari bahan bakar sebanyak 16000 liter. Dengan perhitungan luas permukaan sederhana, maka didapat $A_f = 2,43 m \times 6 m = 14,58 m^2$.

Massa bahan bakar didapat dengan mengalikan jumlah bahan bakar yang terbakar dengan massa jenisnya (gasoline = $737,22 kg/m^3$). Berdasarkan pengamatan saksi mata, kebakaran terjadi selama 8 jam, sehingga jumlah bahan bakar yang terbakar per jamnya adalah seperdelapan dari jumlah total bahan bakar yang terbakar. Sehingga didapat:

$$m_i = \frac{1}{8} \times 737,22 kg / m^3 \times 12000 L \times 0,001 m / L = 1105,83 kg$$

Parkinson^[14] dalam beberapa datanya menyatakan berturut-turut nilai $F_i = 0.7$; $F_d = 1$; dan $K_d = 1,65$, untuk kondisi asumsi tidak seluruh ruangan terbakar, distribusi merata, serta tercapai kondisi api 90% puncak (90th Peak).

Selanjutnya berdasarkan Tabel 2.1, didapat nilai kalori premix (dianggap sebagai gasoline) yaitu 44 MJ/kg .

Berdasarkan nilai-nilai tersebut di atas, dapat dihitung besar beban api:

$$L_{fire} = \frac{1}{14,58m^2} \times 1105,83kg \times 44MJ / kg \times 0.8 \times 1 \times 1.65 = 3828MJ / m^2$$

Selanjutnya dari beban termal tersebut, dihitung nilai dari faktor ventilasi (F_v) dapat dihitung dengan persamaan:

$$F_v = \frac{A_v \sqrt{H_v}}{A_t} \quad (3.2)$$

dimana:

- F_v = Faktor Ventilasi ($m^{0,5}$).
- A_v = Luas Ventilasi (m^2).
- H_v = Ketinggian Ventilasi (m).
- A_t = Luas Permukaan Ruang selain Ventilasi (m^2).

Berdasarkan gambar tangki pada Gambar 3.15, didapat data tutup tangki berdiameter $0,8 \text{ m}$ sebanyak 2 buah. Sehingga luas ventilasi (A_v) adalah:

$$A_v = 3 \times \pi \times 0,8m^2 = 1m^2$$

Ketinggian ventilasi (H_v) dari permukaan bahan bakar yaitu $0,8 \text{ m}$.

Sedangkan luas permukaan ruang selain ventilasi (A_t) yaitu $26,084 \text{ m}^2$.

Dengan mengetahui tiga nilai di atas, didapat nilai faktor ventilasi (F_v):

$$F_v = \frac{1m^2 \times \sqrt{0,8m}}{26,084m^2} = 0,034m^{0,5}$$

Selanjutnya untuk mendapatkan grafik hubungan waktu-temperatur dari api yang terdapat pada kompartemen tangki bahan bakar, maka perlu dihitung hubungan waktu-temperatur yang terjadi pada profil baja struktur jembatan yang berada di sekitar sumber api.

Perhitungan tersebut dilakukan dengan mengikuti teori Lie^[14] dengan rumus pendekatan sebagai berikut ini:

$$T_t = 250(10F_v)^{\frac{0,1}{F_v^{0,3}}} e^{-F_v^{2t}} \left[3(1 - e^{-0,6t}) - (1 - e^{-3t}) + (4 - e^{-12t}) \right] + C \left(\frac{600}{F_v} \right)^{0,5} \quad (3.3)$$

Sedangkan untuk fase penurunan (*decay*), Lie mengusulkan rumus pendekatan

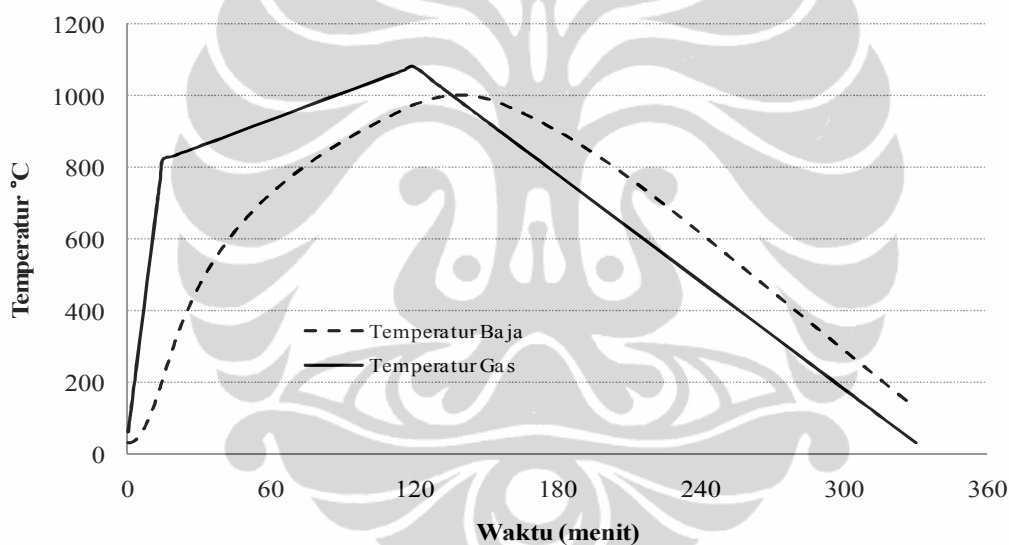
sebagai berikut:

$$T_t = -600 \left(\frac{t}{\tau} - 1 \right) + T_\tau \quad (3.4)$$

dimana:

$$\tau = \frac{L_{fire} A_t}{330 A_v (H_v)^{1/2}} \quad (3.5)$$

Dari persamaan (3.3) dan (3.4) maka dapat diperoleh grafik hubungan waktu-temperatur dari api yang terdapat pada kompartemen tangki bahan bakar, yang kemudian digunakan untuk mendapatkan grafik hubungan waktu-temperatur pada baja dengan menggunakan program ANSYS sebagai program simulasi, sehingga gabungan dan kedua grafik tersebut diperoleh sebagai berikut:



Gambar 3.17. Grafik Perbandingan Temperatur Gas dan Temperatur Baja
($L_{fire} = 3828 \text{ MJ/m}^2$)

Sedangkan untuk mendapatkan data mengenai temperatur api yang terjadi pada model jembatan, dapat diperoleh melalui pengujian terhadap model jembatan dengan menggunakan volume bahan bakar yang dapat di hitung dengan menggunakan skala volume (S_1) seperti berikut:

$$V_{\text{model}} = \frac{V_{\text{prototype}}}{S_1^3}$$

$$V_{\text{model}} = \frac{16.000 \text{ liter}}{17^3} = 3,25 \text{ liter}$$

3.5. PROSES PEMODELAN JEMBATAN KRASAK

Tahapan yang dilakukan dalam perencanaan model adalah sebagai berikut:

1. Mendefinisikan permasalahan dari percobaan yang dilakukan.
 - a. Respon struktur yang diinginkan.
 - b. Mekanisme keruntuhan yang terjadi.
2. Menentukan skala model

Tabel 3.3. Faktor Skala Pada Jembatan Model

Spesifikasi	Kuantitas	Dimensi	Skala Model	Baja	Aluminium	Skala Prototype
Properties Material	Tegangan, σ	FL^{-2}	$S_{\alpha}S_{\theta}S_E$			2,857
	Regangan, ϵ	-	$S_{\alpha}S_{\theta}$			0,498
	Modulus elastisitas, E	FL^{-2}	S_E	200.000	70.000	2,857
	Poisson ratio, ν	-	1			1
	Berat jenis, γ	FL^{-3}	$S_{\alpha}S_{\theta}S_E/S_I$	7.850	2.702	0,168
Geometri	Dimensi linear, l	L	S_I			17
	Displacement, δ	L	$S_aS_{\theta}S_I$			17
	Area, A	L^2	S_I^2			289
	Moment Inertia, I	L^4	S_I^4			83521
Thermal	Coefficient of linear expansion, α	θ^{-1}	S_{α}	1,17E-05	2,35E-05	0,498
	Thermal diffusivity, D	L^2T^{-1}	S_D	1,479E-05	8,518E-05	0,174
	Temperature, θ	θ	$1/S_{\alpha}$			2
Gaya	Concentrated load, Q	F	$S_aS_{\theta}S_E S_I^2$			825,714

3. Menentukan material yang akan digunakan sebagai model, yaitu material yang tersedia di pasaran.
4. Menentukan syarat similitude (*similitude requirements*), bisa sebagai model yang benar (*true model*) atau sebagai model yang menyimpang (*distorted model*).
5. Perencanaan dan pembuatan model.
6. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan untuk pengambilan data informasi perilaku dan respon struktur model.
7. Merekam respon yang terjadi sebagai data tambahan.

3.6. DATA MASUKAN

Untuk menghasilkan proses keruntuhan yang serupa dengan peristiwa kebakaran yang sudah terjadi, maka diperlukan suatu analisa secara 3 dimensi dengan memperhitungkan bentuk sebenarnya dari elemen diagonal rangka utama dan pengaku atas jembatan.

3.6.1. Model Struktur

Pemodelan struktur yang dilakukan dalam simulasi ini dibagi menjadi dua tipe, yaitu:

- 1) Simulasi model Jembatan Krasak, dari struktur rangka baja yang berada pada sisi bagian timur (jalur Magelang-Yogyakarta). Bagian tersebut digunakan karena mengalami pembebanan gravitasi dan termal terbesar, yaitu karena truk tangki berhenti dan terbakar pada bagian tersebut.
- 2) Simulasi model skala, merupakan model skala dari bahan alumunium berskala geometri 1:17 dari ukuran Jembatan Krasak sebenarnya dimana pembebanan gravitasi juga merupakan skala dari beban sebenarnya dan untuk beban termal mengacu pada hasil percobaan.

3.6.2. Dimensi Struktur

Dimensi struktur yang dijadikan sebagai data masukan dalam program ANSYS v11.0, baik profil baja, sambungan dan perletakannya, adalah sesuai dengan dimensi yang terdapat pada Subbab 3.2. Dalam tulisan ini, struktur yang dimodelkan yaitu struktur baja pada Jembatan Krasak dan struktur alumunium pada Jembatan Model. Data geometri yang dijadikan sebagai data masukan, yaitu:

- Bentuk potongan penampang
- Ketebalan Profil
- Lebar Profil
- Tinggi Profil

Struktur pelat (slab) jalan beton pada Jembatan Krasak dimodelkan sebagai beban yang terdistribusi merata pada balok atau gelagar melintang.

3.6.3. Sifat Material

Sama halnya dengan dimensi struktur, data masukan berupa sifat material pun dapat ditemukan pada bab sebelumnya pada tulisan ini, tepatnya pada Subbab 2.4.2 dan 2.4.3. Data sifat material yang dijadikan sebagai masukan, yaitu:

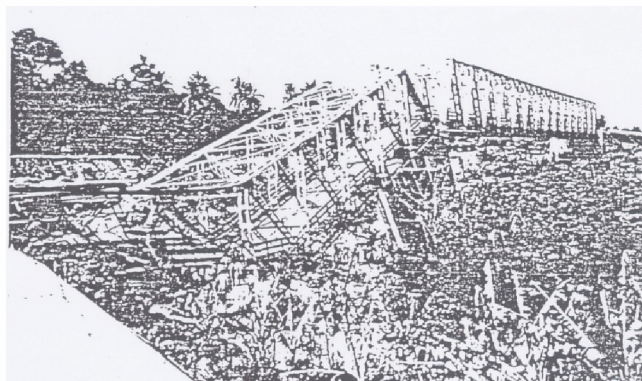
- Modulus Elastisitas (E_s)
- Tegangan Leleh (f_y) dan Tegangan Ultimate (f_u)
- Massa Jenis (kg/m^3)
- Kurva hubungan tegangan-regangan (*stress-strain*)
- Koefisien perpanjangan linear terhadap suhu (α)
- Konduktifitas Termal (k)
- Kapasitas Panas (C_p)

3.6.4. Pembebanan

Sesuai dengan hasil pembahasan pada Subbab 3.4, pembebanan yang terjadi pada peristiwa keruntuhan Jembatan Krasak hanya terdiri dari beban gravitasi, baik dari struktur jembatan itu sendiri ditambah dengan beban truk tangki, serta beban termal sesuai dengan Gambar 3.17 untuk simulasi Jembatan Krasak dan Gambar 4.4 dan 4.5 untuk simulasi Model Skala.

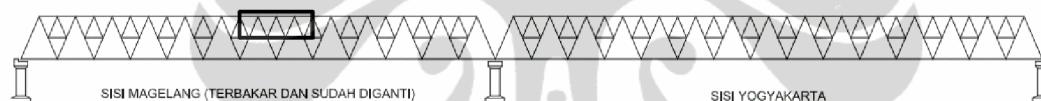
Selain itu, batasan dan asumsi yang diberikan pada beban termal ini adalah:

- a. Dalam keterangan saksi mata disebutkan bahwa peristiwa kebakaran yang terjadi memakan waktu sekitar 8 jam. Namun grafik beban termal hanya mencapai waktu 6 jam. Hal ini disebabkan keterbatasan referensi, sehingga diasumsikan suhu yang terjadi antara jam ke-6 hingga jam ke-8 memiliki gradien penurunan yang sama.
- b. Beban termal dilakukan dalam satuan menit, untuk memudahkan pembacaan hasil analisa struktur. Satuan menit dianggap nilai tengah dari satuan jam dan satuan detik.
- c. Lokasi pembebanan termal ini dilakukan berdasarkan referensi dari foto setelah kejadian runtuhnya Jembatan Krasak seperti pada Gambar 3.18 berikut:



Gambar 3.18. Foto Jembatan Krasak Setelah Runtuh ^[3]

Berdasarkan Gambar 3.18, dapat diambil kesimpulan bahwa peristiwa kebakaran terjadi pada segmen ke-6 dan ke-7 dihitung dari pilar tengah jembatan. Atau untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.19 berikut ini:



Gambar 3.19. Lokasi Pembebanan Termal Pada Jembatan Krasak

3.7. PARAMETER YANG AKAN DI EVALUASI

Parameter yang akan dievaluasi dari hasil analisa struktur dalam setiap langkah pembebanan (loadstep) adalah:

- a) Deformasi Struktur.
- b) Hubungan tegangan-regangan struktur.

Sehingga dari dua parameter inilah pola keruntuhan akibat kebakaran dapat ditampilkan serta dianalisa lebih lanjut.

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISA

4.1. HASIL SIMULASI

4.1.1. Jembatan Model

Jembatan model merupakan penyederhanaan dari Jembatan Krasak atau struktur sebenarnya (*prototype*) dengan skala geometri 1:17. Mekanisme tumpuan yang digunakan pada model ini ekuivalen dengan Jembatan Krasak yaitu mekanisme tumpuan sendi-rol pada ke-dua ujung jembatan. Sedangkan untuk mekanisme sambungan antara batang menggunakan 2 (dua) paku klem (*riffet*) sebagai pendekatan terhadap mekanisme sambungan *pin-joint* yang juga didefinisikan pada program simulasi ANSYS v11.0.

Berikut ini terlihat tampilan Jembatan Model dimana pada sisi kiri merupakan tumpuan roll dan sisi kanan dengan tumpuan tipe rol.

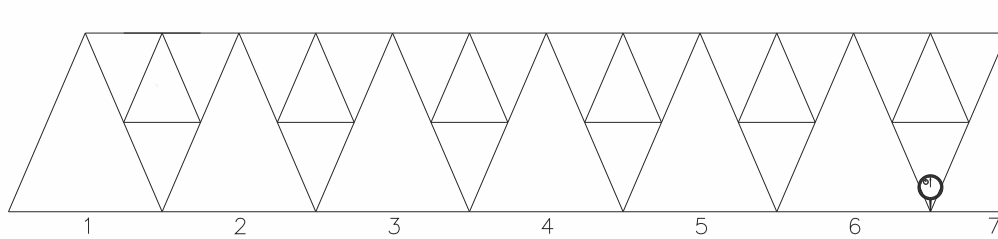


Gambar 4.1. Struktur Jembatan Model (Skala 1:17)

4.1.2. Uji Statik

Uji statik dilakukan pada jembatan model yaitu untuk memastikan mekanisme sambungan antara join sudah bekerja dengan baik. Berikut merupakan hasil uji statik yang dilakukan pada titik setengah bentang jembatan, yang merupakan titik yang berpeluang besar akan mengalami deformasi vertikal akibat berat gravitasi dari struktur jembatan itu sendiri, seperti yang terlihat pada gambar 4.2. Uji statik yang dilakukan dengan pemberian beban sebesar 12,7 kg yang

nilainya ekuivalen dengan berat benda uji beton berbentuk silinder ukuran 15 cm x 30 cm.



Gambar 4.2. Posisi Beban dan Dial Gage pada Uji Statik

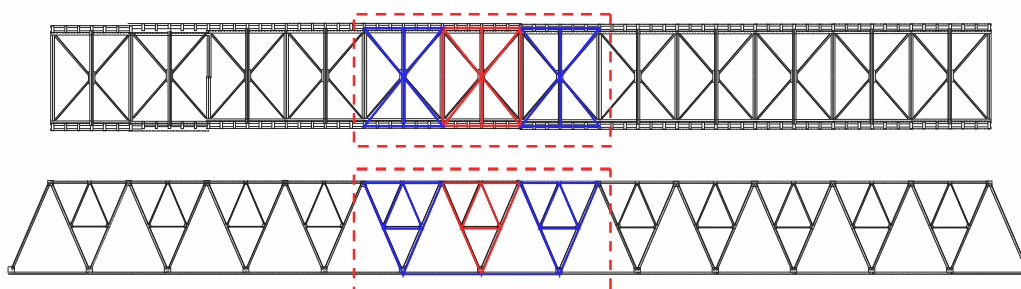
Tabel 4.1 Hasil Uji Statik

Posisi Beban	Bacaan Dial Gage		
	Tanpa Beban (Awal)	Dengan Beban	Tanpa Beban (Akhir)
	[mm]	[mm]	[mm]
1	0.00	-0.11	0.00
2	0.00	-0.19	0.00
3	0.00	-0.28	0.00
4	0.00	-0.36	0.00
5	0.00	-0.43	0.00
6	0.00	-0.64	-0.01

4.1.3. Gambaran Rangka Batang Yang Ditinjau

4.1.3.1. Posisi Rangka Yang Mengalami Kebakaran

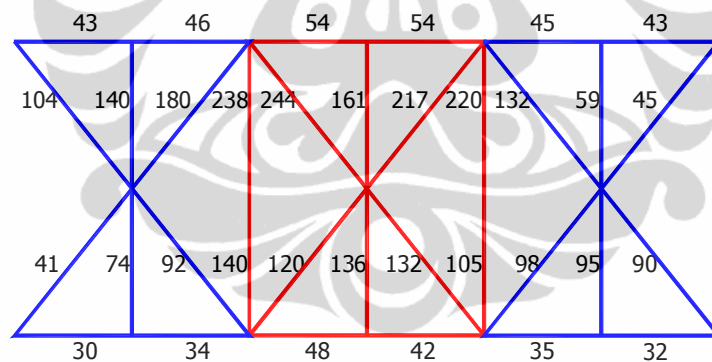
Pada percobaan yang dilakukan terhadap jembatan model ini, rangka yang mengalami perubahan temperatur berada diantara segmen ke-6 dan ke-7 yang terdiri dari rangka atas dan rangka samping seperti terlihat pada gambar 4.3. berikut ini.



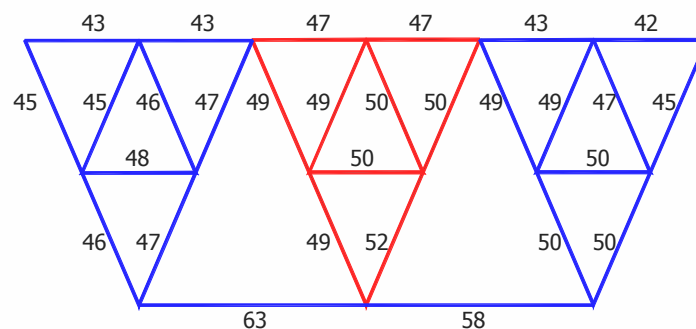
Gambar 4.3. Posisi Rangka Yang Mengalami Kenaikan Temperatur

4.1.3.2. Penyebaran Suhu Pada Rangka Batang

Pada jembatan model ini, kebakaran yang terjadi mengakibatkan terjadinya kenaikan temperatur pada masing-masing rangka batang dan sebagai gambaran sederhana maka penulis menyajikan gambar peta distribusi temperatur pada rangka atas dan rangka samping yang memiliki temperature lebih tinggi, seperti terlihat pada gambar 4.4 dan gambar 4.5 yang merupakan penyebaran temperatur hasil pengamatan pada menit ke-30 sampai menit ke-45 untuk rangka batang atas jembatan, sedangkan penyebaran temperatur yang terjadi pada rangka batang samping terjadi pada menit ke-35 sampai dengan menit ke-45. Dari data pengamatan tersebut, diketahui nilai temperatur terbesar yang terjadi pada rangka atas adalah sebesar 244 °C, sedangkan pada rangka samping penyebaran temperatur relative sama pada setiap batangnya dengan nilai temperatur terbesar yaitu berkisar pada 63 °C yang terletak pada gelagar memanjang dari jembatan model. Sedangkan untuk keseluruhan pengukuran temperatur mulai menit ke-1 sampai dengan menit ke-95 dapat dilihat pada lampiran E.



Gambar 4.4. Penyebaran Suhu (°C) Pada Rangka Atas

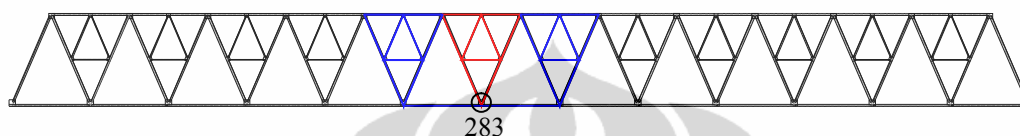


Gambar 4.5. Penyebaran Suhu (°C) Pada Rangka Samping

4.1.4. Deformasi

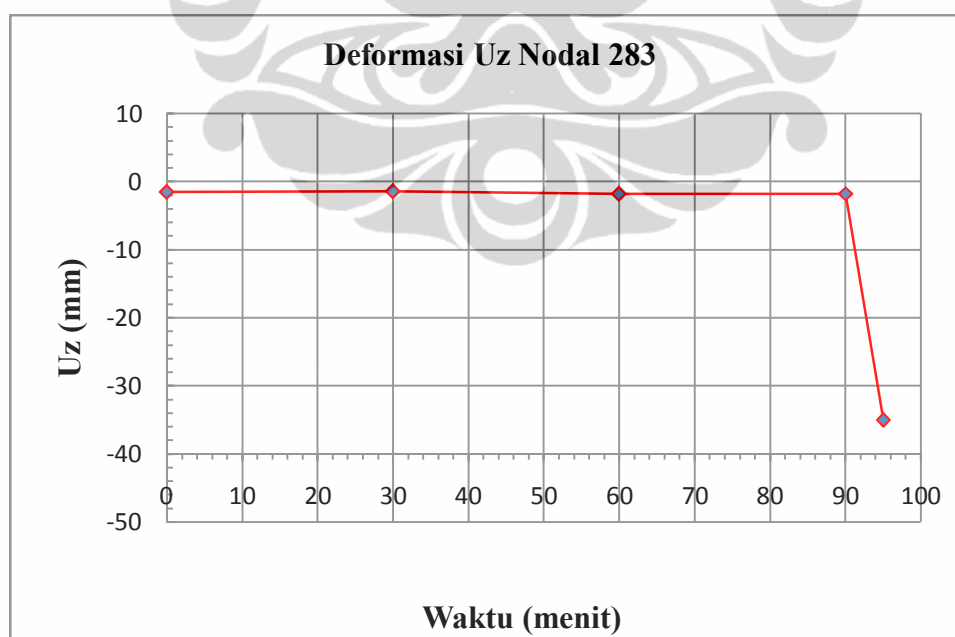
4.1.4.1. Deformasi Percobaan Jembatan Model dan Simulasi Model

Deformasi yang terjadi pada jembatan model ini, ditinjau besar perpindahan terhadap arah z (U_z) dari satu nodal dalam tiap jenis modelisasi struktur yang dilakukan. Nodal tersebut terletak pada bagian tengah dari segmen yang mengalami kebakaran seperti yang diuraikan pada subbab 4.1.3.2 pada gambar 4.4 dan gambar 4.5.



Gambar 4.6. Nodal Peninjauan Deformasi

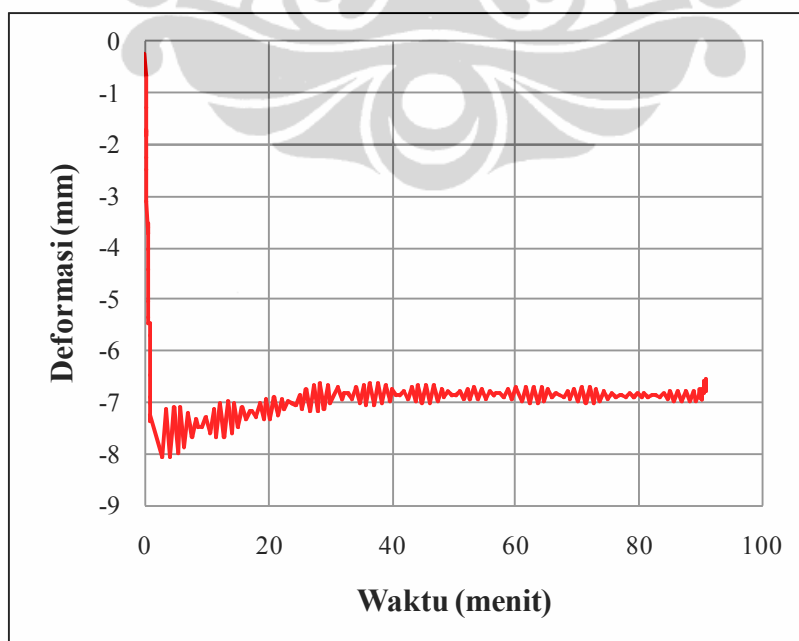
Data nodal yang akan diamati dari percobaan jembatan model ini disamakan dengan penomoran nodal pada model simulasi yaitu nodal 283, karena dianggap mengalami perpindahan terbesar akibat kombinasi beban gravitasi dan beban temperatur yang terjadi. Grafik perpindahan pada arah z (gravitasi) dapat dilihat pada Gambar 4.7 hingga Gambar 4.9.



Gambar 4.7. Perpindahan Nodal 283 arah Z (Percobaan Jembatan Model)

Pada jembatan percobaan ini telah terjadi deformasi awal akibat berat pelat lantai jembatan dan beban truk beserta muatannya dengan nilai penurunan sebesar 1,52 mm. Pada angka menit ke-60, atau tepatnya pada nilai temperatur sebesar 244 °C penurunan bertambah menjadi 1,8 mm, dimana ini merupakan temperatur terbesar yang terjadi pada rangka batang atas jembatan, dan pada angka menit ke-95, atau tepatnya nilai temperatur 367 °C pada gelagar memanjang, mengakibatkan struktur jembatan model mengalami penurunan yang signifikan yaitu sebesar 35,0 mm, yang ditandai dengan terjadinya buckling yang sangat besar pada balok utama atas atau elemen nomor 2446 dan 2380 berdasarkan penomoran elemen pada model simulasi. Secara visual terlihat bahwa terjadi kerusakan struktur seperti yang terlihat pada gambar 4.12.

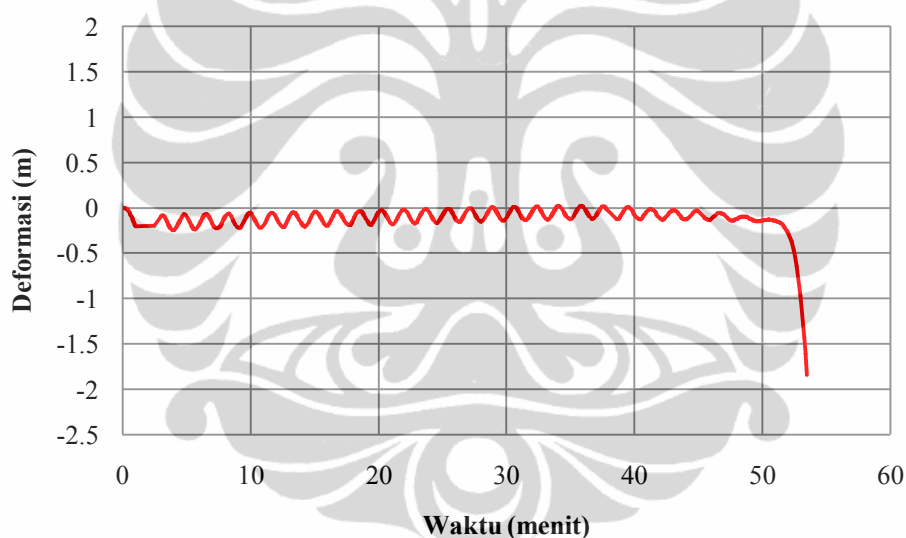
Sedangkan pada model simulasi, terlihat perilaku deformasi yang berbeda dengan model percobaan, dimana pada saat terjadinya peningkatan nilai temperatur tidak diikuti dengan penambahan nilai penurunan, namun terjadi sebaliknya yaitu pada angka menit ke-30 penurunan berkurang 9% terhadap penurunan awal akibat pengaruh berat sendiri struktur dan beban truk pada nilai 7,5 mm menjadi 6,8 mm. Berikut ini adalah grafik perpindahan arah z (gravitasi) pada nodal 283.



Gambar 4.8. Perpindahan Nodal 283 arah Z (Simulasi Jembatan Model)

4.1.4.2. Deformasi Pada Jembatan Krasak (Prototype)

Pada Jembatan Krasak ini, deformasi yang ditinjau merupakan besar perpindahan terhadap arah z (U_z) dari satu nodal dalam tiap jenis modelisasi struktur yang dilakukan. Nodal tersebut terletak pada bagian tengah dari segmen yang mengalami kebakaran. Data nodal yang akan ditampilkan dari model ini adalah pada nodal 283. Pada model ini, simulasi terhenti pada angka menit ke-53, atau tepatnya pada suhu berkisar antara 681 °C. Pada menit tersebut solusi yang dihitung melalui simulasi sudah tidak bersifat konvergen. Hal ini dikarenakan bentuk struktur dan kondisi material yang sudah tidak memungkinkan untuk dianalisa lebih lanjut. Dengan kata lain, struktur Jembatan Krasak dalam simulasi ini sudah mengalami keruntuhan. Grafik perpindahannya dapat dilihat pada Gambar 4.9.

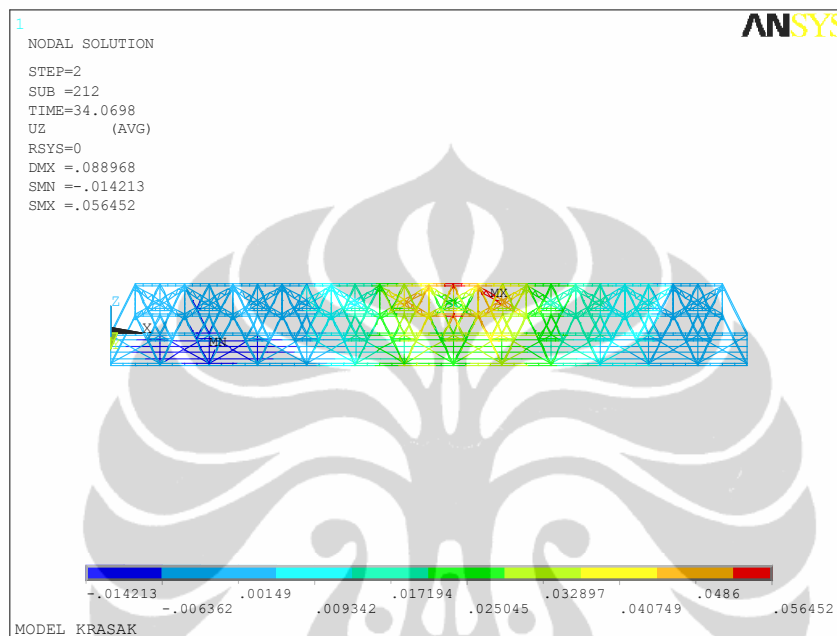


Gambar 4.9. Perpindahan Nodal 283 arah Z (Simulasi Jembatan Krasak)

Pada gambar 4.9. diatas terlihat bahwa di menit ke 34,07 terjadi kenaikan pada struktur sebesar 22,6 cm dimana pada saat tersebut nilai temperatur yang pada rangka baja yang terbakar yaitu sebesar 511 °C, dan dengan terjadinya peningkatan temperatur sejalan dengan berjalannya waktu maka pada menit ke-52 Jembatan Krasak mulai mengalami deformasi yang besar hingga menit ke-53 atau tepatnya pada nilai temperatur 681,6 °C yang ditandai dengan penurunan sebesar 185,3 cm. Pada menit tersebut solusi yang dihitung melalui simulasi sudah tidak bersifat konvergen. Hal ini dikarenakan bentuk struktur dan kondisi

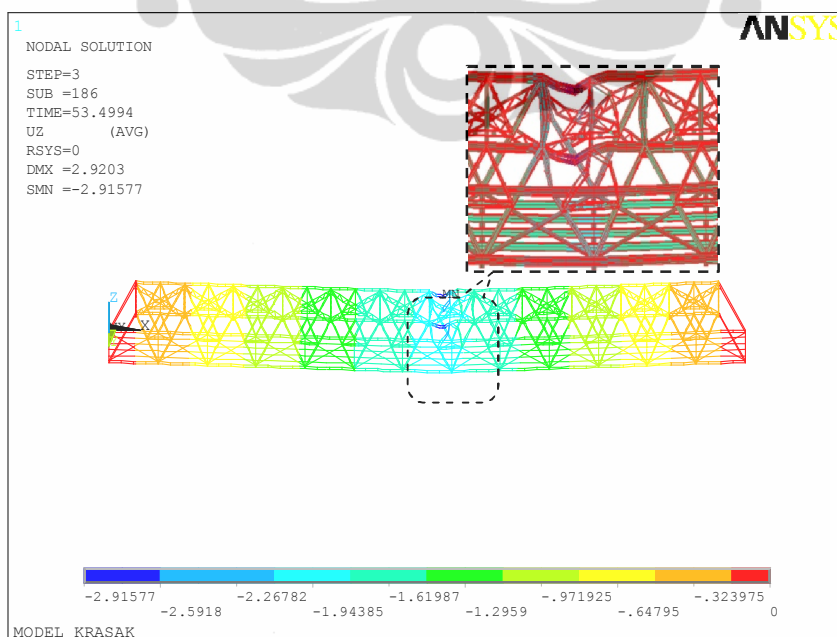
material yang sudah tidak memungkinkan untuk dianalisa lebih lanjut. Dengan kata lain, struktur Jembatan Krasak dalam simulasi ini sudah mengalami keruntuhan. Berikut ini gambaran hasil simulasi dari perilaku deformasi terhadap lama waktu terjadinya kebakaran :

Pada menit ke-34 ($T = 511\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_{Z-283} = 22,6\text{ cm}$)



Gambar 4.10. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-34 (Simulasi Jembatan Krasak)

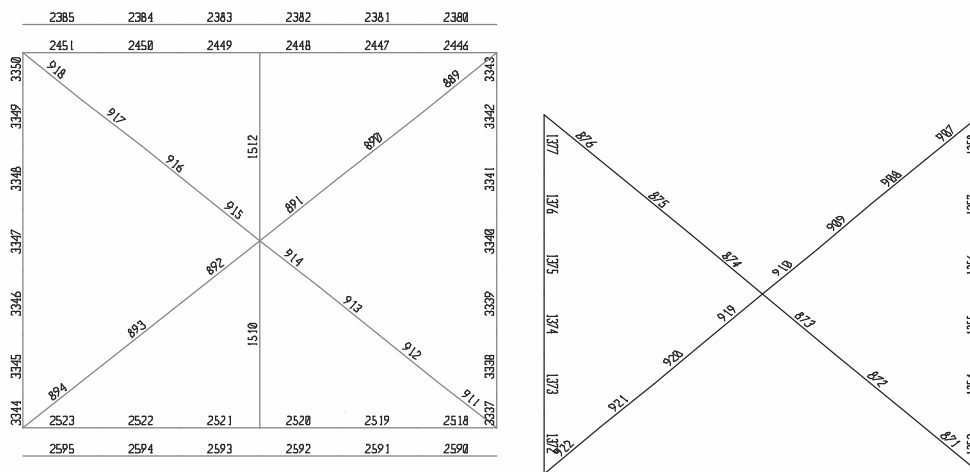
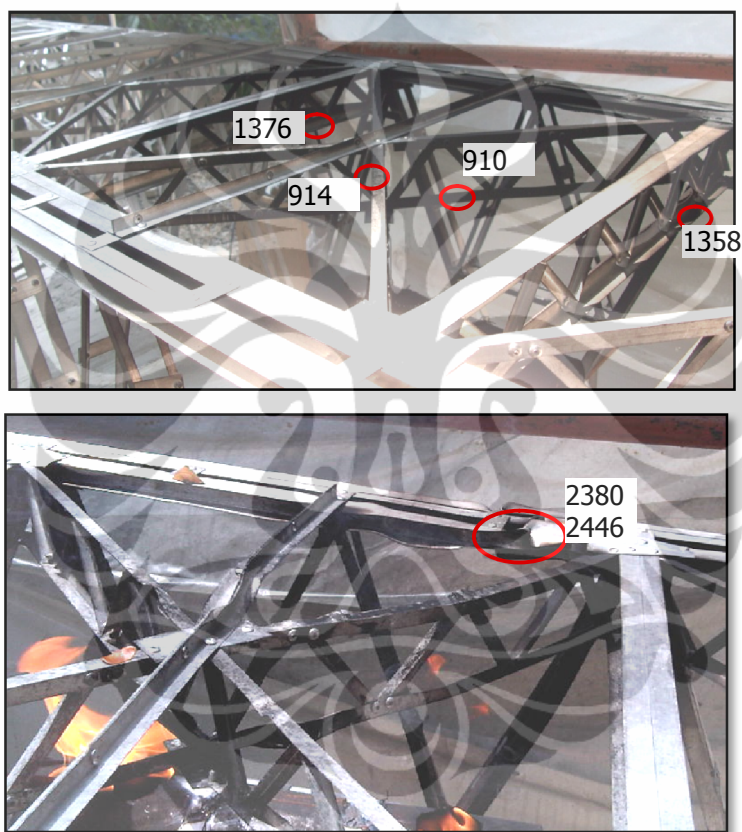
Pada menit ke-53 ($T = 681,60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_{Z-283} = 185,3\text{ cm}$)



Gambar 4.11. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-53 (Simulasi Jembatan Krasak)

4.1.5. Hubungan Tegangan Regangan

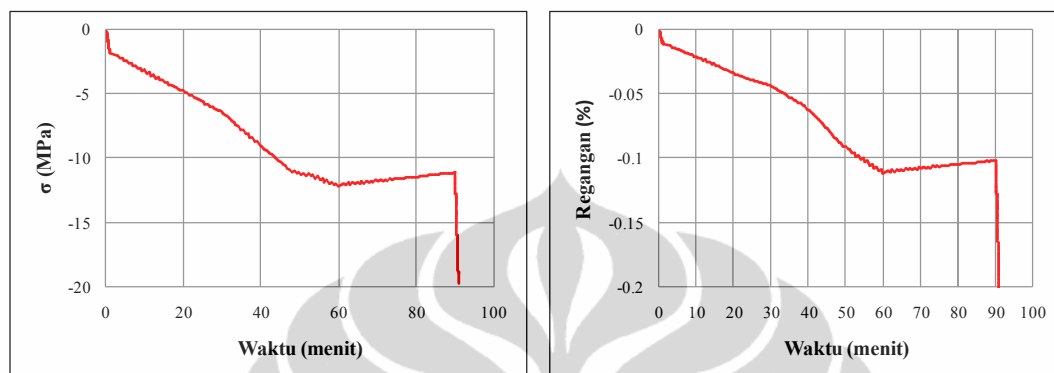
Pada model ini akan ditampilkan hubungan tegangan-regangan dari elemen elemen yang mewakili setiap jenis batang yang mengalami kebakaran dan mengalami transformasi, nomor dari elemen-elemen tersebut, yaitu: 910; 914; 1376; dan 1358. Sedangkan untuk elemen yang di ukur regangan dengan strain gage yaitu 2658. Letak elemen-elemen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.12 berikut ini.



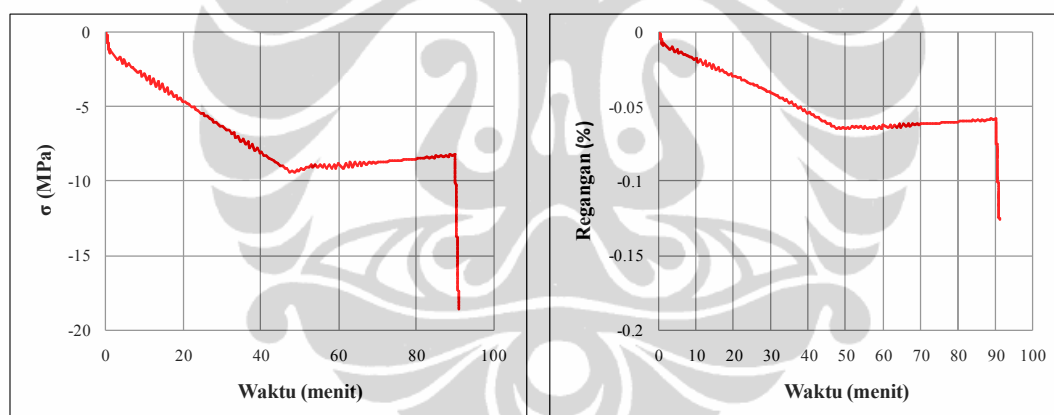
Gambar 4.12. Penomoran Elemen yang di Analisa**4.1.5.1. Tegangan dan Regangan Simulasi Jembatan Model**

Untuk hasil dari hubungan tegangan-regangan pada elemen-elemen tersebut, dapat dilihat pada Gambar 4.13 hingga Gambar 4.18 di bawah ini.

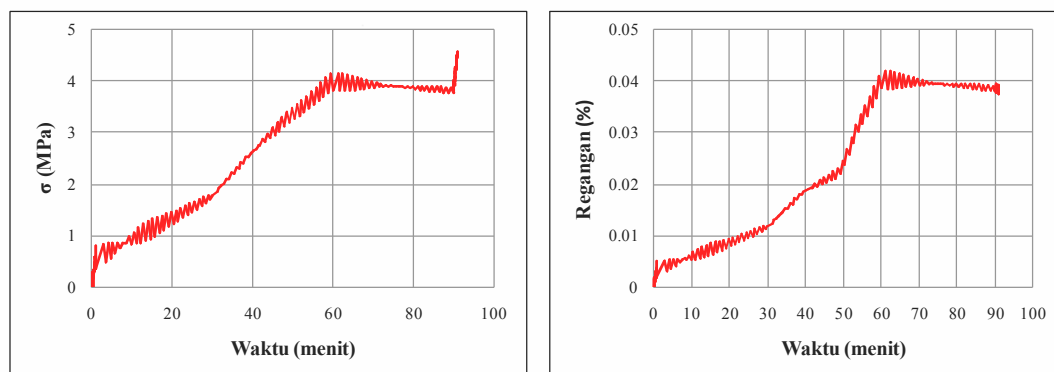
Pada elemen 910:

**Gambar 4.13. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 910 (Simulasi Model)**

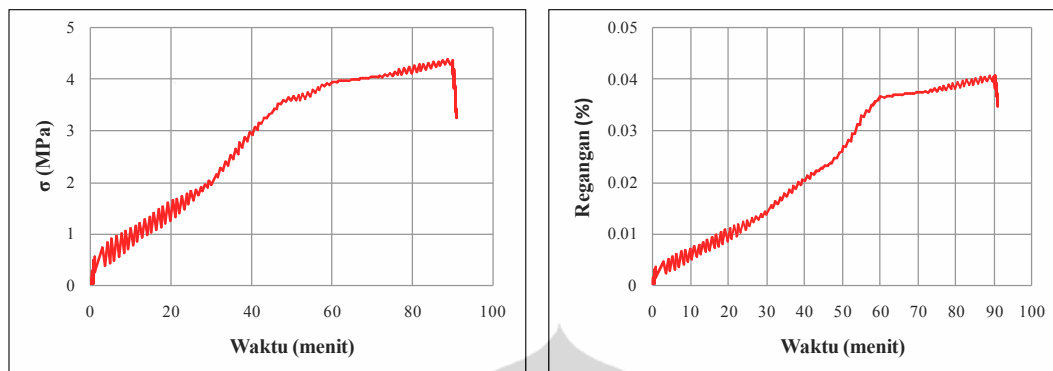
Pada elemen 914:

**Gambar 4.14. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 914 (Simulasi Model)**

Pada elemen 1376:

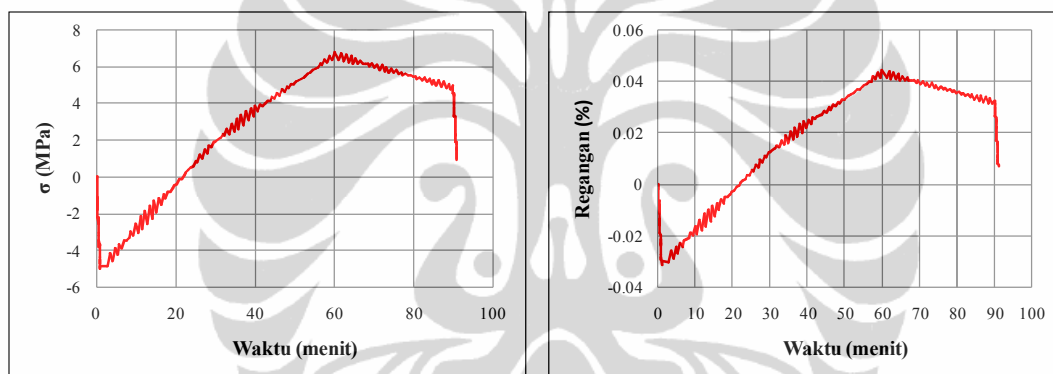
**Gambar 4.15. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 1376 (Simulasi Model)**

Pada elemen 1358:



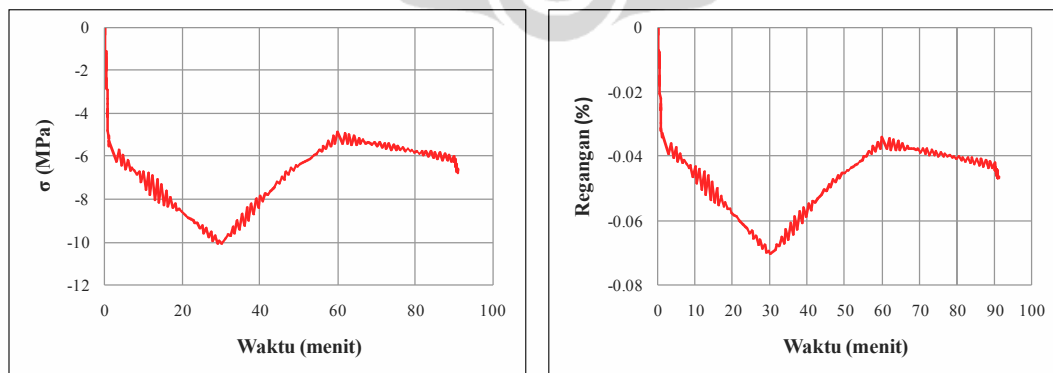
Gambar 4.16. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 1358 (Simulasi Model)

Pada elemen 2380:



Gambar 4.17. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 2380 (Simulasi Model)

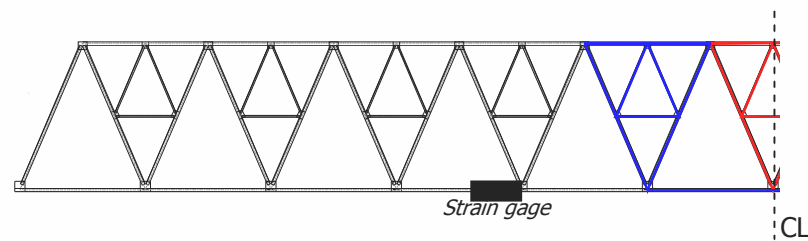
Pada elemen 2446:



Gambar 4.18. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 2446 (Simulasi Model)

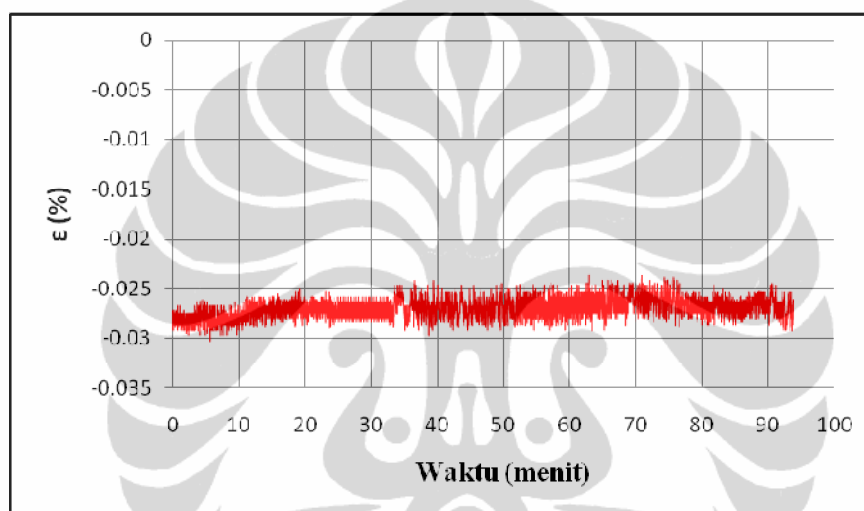
Pada jembatan model dilakukan pengamatan regangan pada elemen gelagar memanjang yang berada pada segmen ke-4 yang terjadi pada terhadap

jembatan model ini akan ditampilkan hubungan tegangan-regangan dari elemen elemen yang mewakili setiap jenis batang yang mengalami kebakaran,

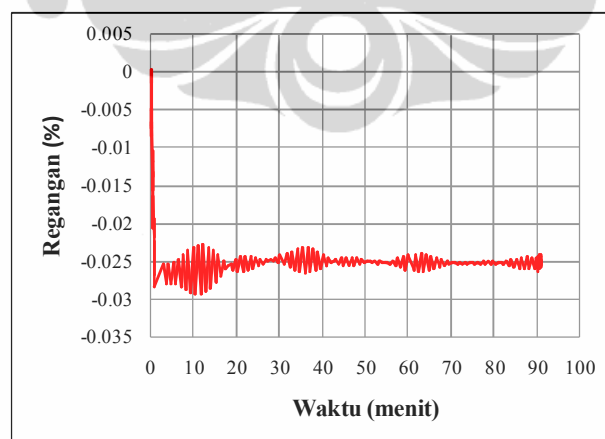


Gambar 4.19. Lokasi Penempatan Strain Gage

Pada elemen 2568:



Gambar 4.20. Regangan Pada Elemen 2568 (Percobaan Model)

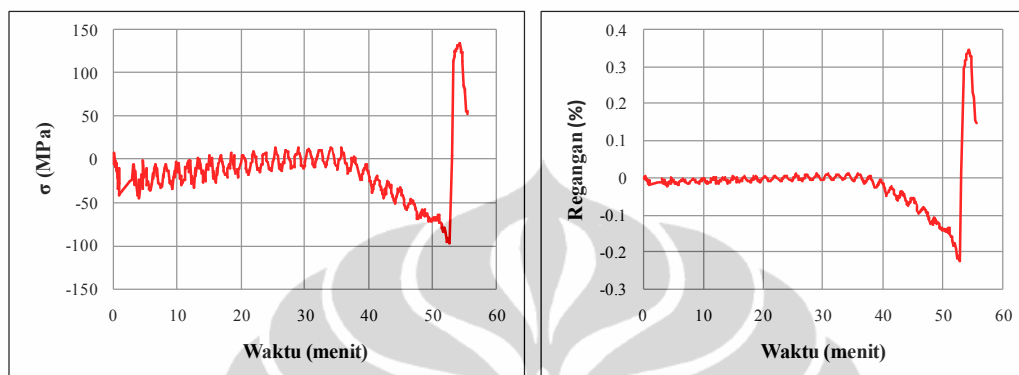


Gambar 4.21. Regangan Elemen 2568 (Simulasi Model)

4.1.5.2. Tegangan dan Regangan Jembatan Krasak (Prototype)

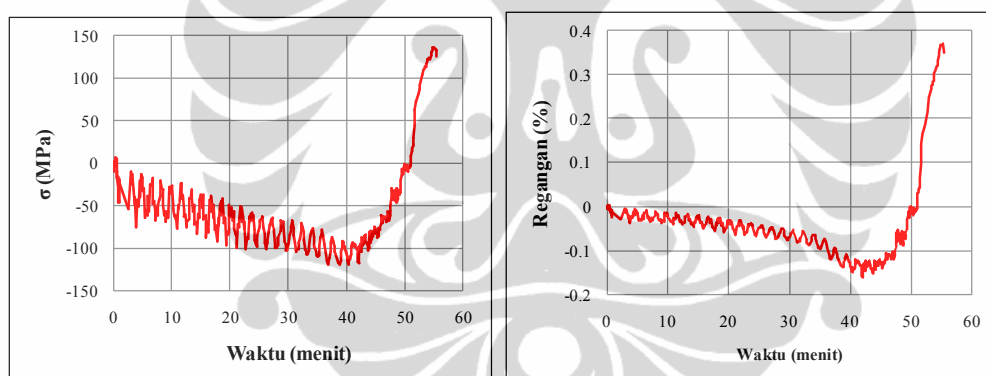
Pada prototipe ini akan ditampilkan hubungan tegangan-regangan dari elemen elemen yang mewakili setiap jenis batang yang mengalami kebakaran, nomor dari elemen-elemen tersebut serupa dengan jembatan model.

Pada elemen 910:



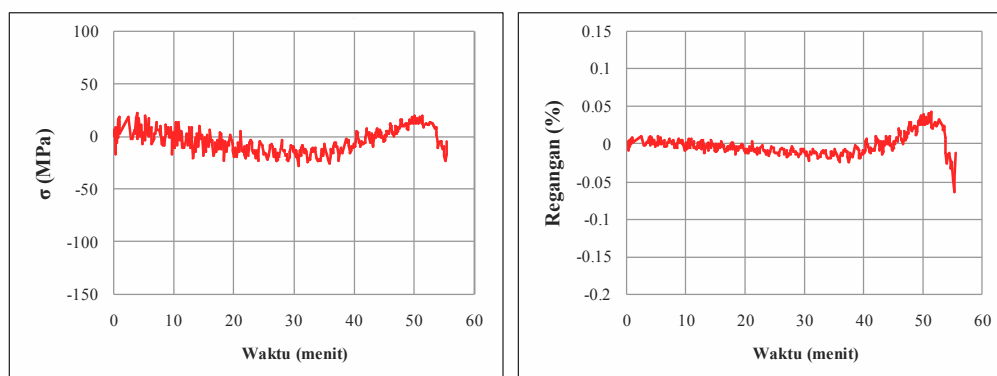
Gambar 4.22. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 910 (Simulasi Jembatan Krasak)

Pada elemen 914:



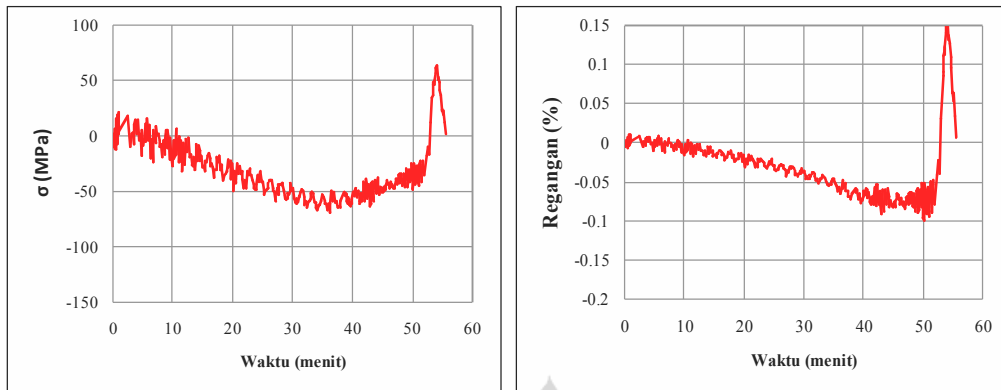
Gambar 4.23. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 914 (Simulasi Jembatan Krasak)

Pada elemen 1376:



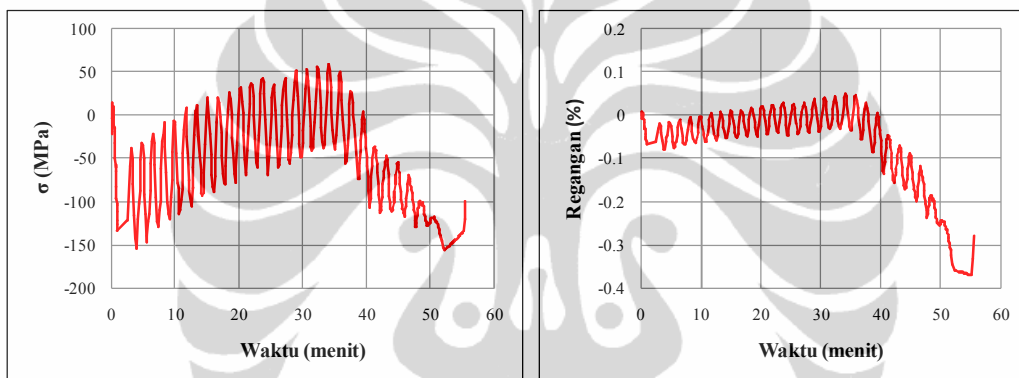
Gambar 4.24. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 1376 (Simulasi Jembatan Krasak)

Pada elemen 1358:



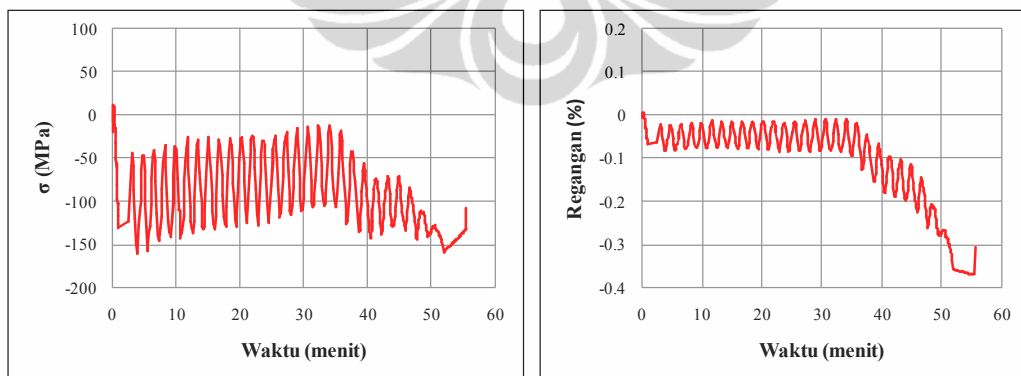
Gambar 4.25. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 1358 (Simulasi Jembatan Krasak)

Pada elemen 2380:



Gambar 4.26. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 2380 (Simulasi Jembatan Krasak)

Pada elemen 2446:



Gambar 4.27. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 2446 (Simulasi Jembatan Krasak)

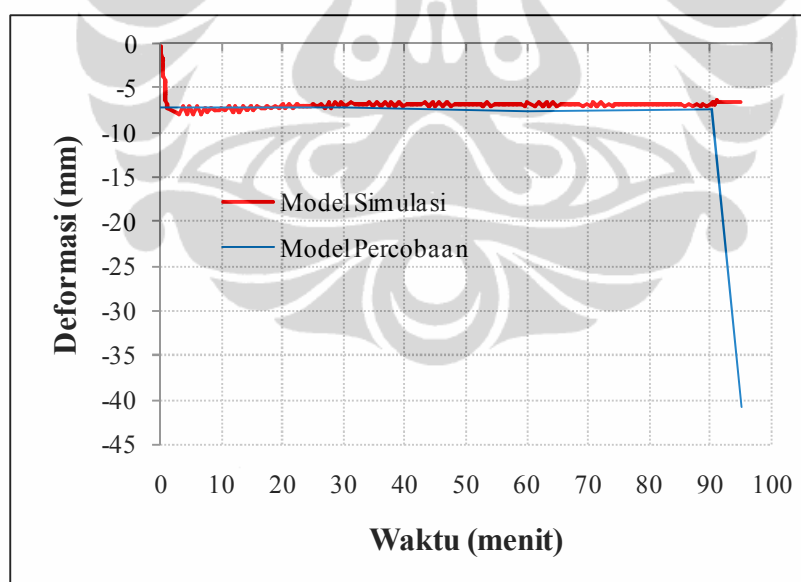
4.2. HASIL ANALISA SIMULASI

4.2.1. Analisa Deformasi

Dalam analisa hasil simulasi ini yang akan dijelaskan yaitu perbandingan hasil percobaan model dengan simulasi model serta menjelaskan, dimana dalam subbab ini pembahasan akan difokuskan pada nilai dan perilaku deformasi dari hasil simulasi. Perbandingan deformasi struktur yang terjadi terhadap kedua model (model percobaan dan model simulasi).

4.2.1.1. Deformasi Jembatan Model

Dalam analisa hasil percobaan Jembatan Model ini, terjadinya keruntuhan disebabkan oleh penurunan kekuatan pada batang utama dari balok geagar memanjang struktur atas yang ditandai dengan terjadinya *local bucling*, sehingga mengakibatkan penurunan secara mendadak sebesar 191 % dari kondisi sebelumnya atau pada angka menit ke-90. *Lokal bucling* tersebut diakibatkan nilai temperatur yang sangat tinggi yaitu sebesar 367 °C.



Gambar 4.28. Deformasi Jembatan Model dan Model Simulasi

Grafik perbandingan deformasi diatas, merupakan nilai deformasi vertikal pada arah sumbu z dari struktur jembatan model dan struktur model simulasi. Pada grafik terlihat bahwa pola deformasi pada interval waktu awal sampai

dengan menit ke-95, baik jembatan model dan model simulasi memiliki pola deformasi yang tidak sama terhadap peningkatan temperatur.

Perbedaan perilaku deformasi yang terjadi pada model percobaan dan model simulasi dikarenakan :

- a. Ketidaksamaan mekanisme sambungan pada struktur rangka dimana pada model simulasi mekanisme sambungan berupa *pin-joint*, sedangkan pada model percobaan menggunakan sambungan satu paku ripet dan setelah diamati mekanismenya menyerupai semi-jepit (tidak dapat translasi dan rotasi tertahan sebahagian).
- b. Ketidaksamaan propertis material struktur rangka disebabkan keterbatasan masalah dengan tidak dilakukan uji material terhadap material yang digunakan pada model percobaan, sehingga parameter material yang digunakan dalam melakukan simulasi mengacu pada beberapa literatur.
- c. Ketidaksamaan dalam hal pembebanan thermal (api) yang terjadi akibat kebakaran dimana keterbatasan alat dalam melakukan pengukuran temperatur pada rangka jembatan model percobaan dalam waktu bersamaan, sehingga yang dapat dilakukan yaitu melakukan pengukuran terhadap pertambahan waktu.

Tabel 4.2. Deformasi dari Model Percobaan dan Simulasi

<i>Suhu Maksimum</i> ($^{\circ}C$)	<i>Waktu</i> (<i>menit</i>)	<i>Percobaan</i> (<i>mm</i>)	<i>Simulasi</i> (<i>mm</i>)	<i>Modulus Elastisitas</i> (kg/m^2)
30	1	-7.2404	-7.2404	1.642E+09
161	30	-7.1604	-7.0166	1.487E+09
244	60	-7.5204	-6.7127	9.909E+08
244	90	-7.4604	-6.8174	9.909E+08
367	95	-40.7204	-6.6375	4.281E+08

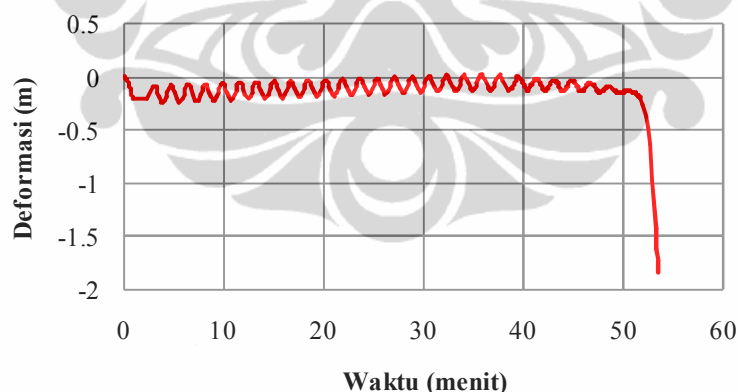
Apabila Gambar 4.28 tersebut ditabulasikan seperti terlihat pada Tabel 4.2, maka akan terlihat jelas bahwa deformasi penurunan pada model percobaan terus bertambah bersamaan dengan meningkatnya nilai temperatur, namun perilaku deformasi pada simulasi model terlihat bahwa dengan meningkatnya nilai temperatur maka struktur akan berdeformasi berlawanan terhadap gaya gravitasi, sehingga sampai menit ke-95 struktur jembatan model simulasi belum mengalami keruntuhan atau analisa masih konvergen.

Prilaku deformasi yang terjadi pada sekitar menit ke-95, atau kira-kira pada suhu 367 °C, tercatat kenaikan mencapai nilai 40,7 mm (model percobaan); 6,63 mm (model simulasi). Apabila dibandingkan dengan deformasi awal struktur yang terjadi pada suhu 30 °C, maka total perpindahan yang terjadi mencapai 33,48 mm untuk model percobaan, dan 0,6 mm untuk model simulasi.

Pada suhu 367 °C tersebut, besar modulus elastisitas aluminium (E_a) adalah $\pm 4,281 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$. Nilai tersebut setara dengan 26,08% dari nilai modulus elastisitas awal. Turunnya nilai modulus elastisitas ini akan mengakibatkan turunnya tegangan kritis tekuk dari batang profil baja yang mengalami kenaikan suhu. Dilihat dari prosentase penurunan modulus elastisitas, maka nilai tegangan tekuk kritis pun akan turun sebesar 74,10% untuk model simulasi.

4.2.1.2. Deformasi Jembatan Krasak (Prototype)

Deformasi yang di tinjau adalah searah dengan gravitasi atau sumbu z pada simulasi. Dalam grafik terlihat bahwa deformasi yang terjadi pada struktur rangka jembatan tidak langsung mengalami penurunan, namun terjadi kenaikan (arah z positif) sebelum mengalami penurunan. Hal ini dapat dipastikan dari garis pada grafik yang naik mendekati nilai nol.



Gambar 4.29. Perpindahan Nodal 283 arah Z (Simulasi Jembatan Krasak)

Apabila Gambar 4.29 tersebut ditabulasikan seperti terlihat pada Tabel 4.3, maka akan terlihat jelas bahwa kenaikan tersebut terjadi sampai pada sekitar menit ke-26, atau kira-kira pada suhu 400 °C. Pada waktu tersebut, tercatat kenaikan yang terjadi mencapai nilai 0,048 m. Apabila dibandingkan dengan deformasi awal struktur yang terjadi pada suhu 30 °C, maka total perpindahan yang terjadi

mencapai 0,157 m. Hal ini dapat dikatakan cukup besar, mengingat nilai tersebut setara dengan 0,15 % bentang keseluruhan struktur jembatan (104 m).

Kecepatan dari kenaikan struktur tersebut mencapai nilai 0,006158 m/menit atau 0,00042 m/°C. Pada suhu 400 °C ini modulus elastisitas baja bernilai sekitar ± 140000 MPa. Nilai modulus elastisitas tersebut setara dengan 70% dari modulus elastisitas awal baja.

Tabel 4.3. Deformasi Jembatan Krasak (Simulasi Jembatan Krasak)

Temperatur (°C)	Waktu (menit)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Deformasi (m)
30	1	200000	-0.206
100	9.32	200000	-0.194
200	14.67	180000	-0.118
300	19.58	160000	-0.161
400	25.51	140000	-0.014
500	32.90	120000	-0.090
600	42.66	62000	-0.067
650	48.03	44000	-0.838
700	55.97	22000	-6.417

Pada Gambar 4.29, dapat terlihat bahwa penurunan struktur secara cepat mulai terjadi pada sekitar menit ke-43, atau ± 600 °C. Pada suhu tersebut, besar modulus elastisitas baja (E_s) adalah ± 62000 MPa. Nilai tersebut setara dengan 31% dari nilai modulus elastisitas awal. Turunnya nilai modulus elastisitas ini akan mengakibatkan turunnya tegangan kritis tekuk dari batang profil baja yang mengalami kenaikan suhu.

Waktu yang dibutuhkan oleh model simulasi untuk mencapai deformasi maksimumnya yaitu sebesar 17 menit. Sehingga dapat disimpulkan bahwa waktu keruntuhan yang terjadi telang mendekati nilai yang disebutkan oleh saksi mata. Sehingga simulasi model 3D dengan memperhitungkan bentuk sebenarnya dari elemen diagonal rangka utama dan pengaku atas jembatan telah dapat merepresentasikan kondisi asli dari keruntuhan struktur Jembatan Krasak.

4.2.2. Analisa Tegangan dan Regangan

Tegangan yang terjadi pada elemen pengaku rangka atas akibat dari temperatur maksimum yang terjadi sebagai penyebab terjadinya mekanisme *local buckling* akan dibandingkan dengan perhitungan tegangan tekuk pada setiap jenis penampang seperti yang ada pada tabel 4.4 berikut ini :

Tabel 4.4. Tegangan Kritis Elemen Rangka Atas Hasil Simulasi Model Percobaan

No. Elemen	Profil	Temperatur (°C)	E (Mpa)	KL/r	σ Tekuk (Mpa)	σ Simulasi (Mpa)
910	L10x0.6	217	10929.49	29.412	124.571	21.598
914	L10x0.6	200	12003.61	29.412	136.814	20.996
1376	2L 13.5x0.7	244	9717.95	26.738	134.022	4.816
1358	2L 13.5x0.7	244	9717.95	26.738	134.022	4.389
2380	4L 13.5x0.7	367	4198.72	61.920	10.797	6.805
2446	4L 13.5x0.7	367	4198.72	61.920	10.797	0.070

Tabel 4.5. Tegangan Kritis Elemen Rangka Atas Hasil Simulasi Jembatan Krasak

No. Elemen	Profil	Temperatur (°C)	E (Mpa)	KL/r	σ Tekuk (Mpa)	σ Simulasi (Mpa)
910	L150x15	681	32840.00	32.468	307.159	5.076
914	L150x15	681	32840.00	32.468	307.159	103.391
1376	2L 200x20	681	32840.00	25.974	479.937	12.267
1358	2L 200x20	681	32840.00	25.974	479.937	12.892
2380	4L 200x20	681	32840.00	61.824	84.713	150.880
2446	4L 200x20	681	32840.00	61.824	84.713	150.877

Dari Tabel 4.4 dan Tabel 4.5, dapat dilihat bahwa tegangan hasil simulasi pada rangka pengaku atas yaitu elemen 910, 914, 1376 dan 1385 jauh lebih kecil dibandingkan dengan tegangan tekuk hasil perhitungan dengan selisih nilai rata-rata 350 % (simulasi model percobaan) dan 430 % (simulasi jembatan krasak), sedangkan tegangan hasil simulasi balok utama yaitu elemen 2380 dan 2446 lebih kecil 10 % (simulasi model percobaan) dan lebih besar 80 % (simulasi jembatan krasak) dibandingkan dengan tegangan tekuk batang.

Sedangkan elemen 910, 1358, 1376, 2380 dan 2446 yang diamati terjadinya *local bucling* tidak memberikan hasil yang sama dengan hasil simulasi model percobaan atau lebih tepatnya dalam simulasi model elemen rangka yang diamati belum terjadi bucling, namun elemen 2380 dan 2446 pada simulasi

jembatan krasak memberikan hasil yang mendekati dokumentasi kejadian. Prilaku tegangan yang terjadi pada setiap elemen tidak memiliki kesamaan, yang disebabkan oleh perbedaan mekanisme sambungan, beban thermal dan properties material antara model percobaan dengan model simulasi.

Efek selanjutnya yang terjadi akibat tegangan pada elemen adalah regangan struktur. Efek regangan yang terjadi pada setiap model akan dibandingkan dan dianalisa. Perbandingan regangan elemen tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6.

Tabel 4.5. Regangan Hasil Simulasi Jembatan Model

Waktu	Regangan Jembatan Model			
	Elemen No.			
(menit)	910	914	1376	1358
1	-2E-05	-3,6E-05	9,58E-06	8,67E-06
30	-0,00032	-0,00029	4,57E-05	9,31E-05
60	-0,00107	-0,00098	0,000426	0,000413
90	-0,00014	-0,00023	7,64E-06	7,88E-05
95	0,000203	0,000223	-0,0001	-4,9E-06

Tabel 4.6. Regangan Hasil Simulasi Jembatan Krasak

Waktu	Regangan Jembatan Prototype			
	Elemen No.			
(menit)	910	914	1376	1358
1	-0,00014	-0,00023	4,71E-05	3,79E-05
160	-0,00049	-0,00047	9,35E-05	0,000143
320	-0,00126	-0,00119	0,000464	0,000448
480	-0,0003	-0,00042	6,52E-05	0,000126
506	-0,00011	-0,0002	1,11E-05	0,000109

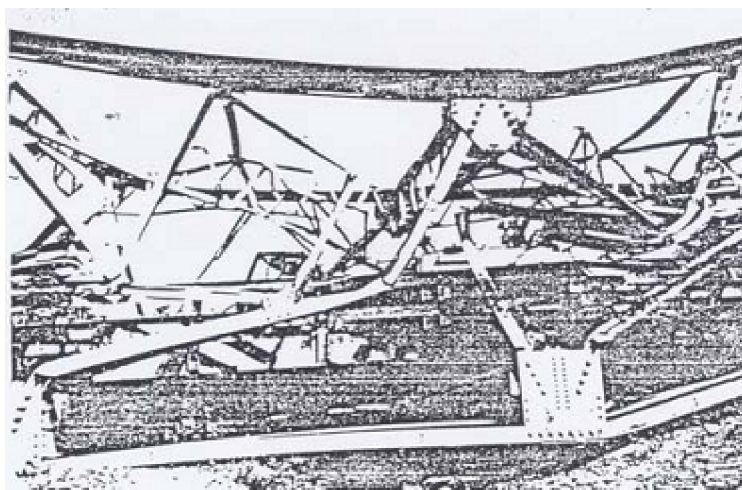
Pada Tabel 4.5 dan 4.6 tersebut dapat dilihat bahwa regangan yang terjadi akan naik hingga mencapai rata-rata 43 kali lipat pada menit ke-60 (jembatan model) dan 9 kali lipat pada menit ke-320 (jembatan prototype). Dan regangan yang akan kembali turun hingga mencapai rata-rata 24 kali lipat pada menit ke-60 (jembatan model) dan 15 kali lipat pada menit ke-320 (jembatan prototype).

4.2.3. Analisa Keruntuhan Jembatan Krasak

Pada Model Simulasi Jembatan Krasak, dapat terlihat dengan jelas bahwa keruntuhan yang terjadi diawali dengan kegagalan balok utama struktur atas jembatan dalam menahan besaran gaya yang terjadi, baik akibat beban gravitasi, ataupun akibat beban termal. Beban termal tersebut akan menyebabkan bertambahnya tegangan akibat efek perpanjangan elemen yang terkekang, sehingga tegangan akan meningkat dengan drastis seperti yang sudah dianalisa pada pembahasan sebelumnya. Bertambahnya tegangan pada profil tersebut disertai dengan berkurangnya kekuatan akan mempercepat proses keruntuhan.

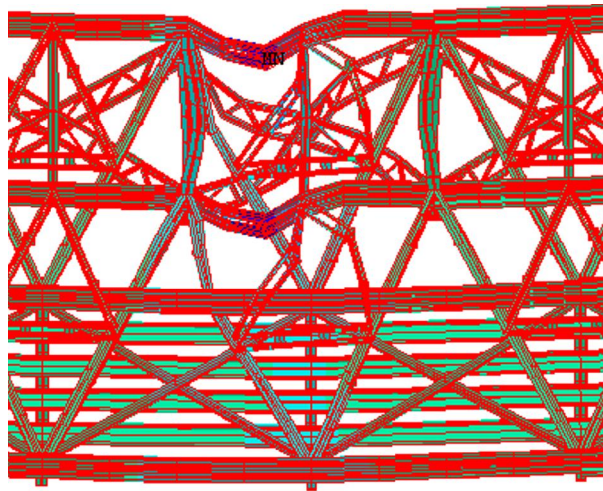
Efek tekuk yang mulai terjadi pada batang tersebut mengakibatkan kemampuannya dalam menahan beban semakin menurun, hal ini mengakibatkan berpindahannya beban yang seharusnya ditahan oleh profil tersebut kepada batang-batang profil di sekitarnya. Karena batang profil di sekitarnya juga mengalami hal yang sama, maka keseluruhan profil yang mengalami kenaikan temperatur seakan-akan menghilang, mengakibatkan fungsi utama batang-batang profil lain dalam membentuk satu kesatuan struktur jembatan rangka baja menghilang.

Hal lain yang terlihat dalam proses keruntuhan adalah efek rotasi yang terjadi pada batang profil diagonal yang mengalami kenaikan suhu. Hal ini diperkirakan terjadi akibat kombinasi antara efek tekuk dengan pengekangan pertambahan panjang dari batang profil tersebut. Selanjutnya, apabila melihat kondisi akhir sebenarnya dari Jembatan Krasak pada Gambar 4.43 berikut ini:



Gambar 4.30. Kondisi Jembatan Krasak Sebenarnya Pasca Kebakaran

Apabila kondisi sebenarnya tersebut dibandingkan dengan simulasi model jembatan krasak, seperti terlihat pada Gambar 4.31 berikut ini:



Gambar 4.31. Kondisi Jembatan Krasak Hasil Simulasi

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa perilaku struktur yang terjadi pada hasil simulasi Jembatan Krasak mendekati keadaan sebenarnya, baik nilai ataupun pola keruntuhannya, sampai pada keadaan sebelum runtuh, lebih tepatnya sampai sekitar menit ke-43, atau ± 600 °C.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Sesuai dengan pembahasan yang ada pada Bab 4, hasil akhir simulasi model percobaan yang dilakukan pada tulisan ini tidak menyerupai kondisi pada model percobaan. Dimana pola deformasi dan hubungan tegangan regangan yang dihasilkan dari percobaan dan analisa tidak menyerupai kondisi sebenarnya. Namun hasil simulasi jembatan krasak dan model percobaan memiliki kemiripan dalam hal deformasi dengan kondisi atau kejadian sebenarnya, dimana pola keruntuhan yang diakibatkan *local bucling* pada balok utama struktur atas jembatan mengakibatkan terjadinya penurunan secara drastis pada struktur jembatan.

Dalam percobaan dan simulasi ini, dapat disimpulkan beberapa hal seperti berikut:

1. Kenaikan suhu pada struktur Jembatan Krasak tidak langsung mengakibatkan penurunan struktur jembatan secara keseluruhan. Hal ini dapat dilihat pada suhu 400 °C dimana pada bagian tengah bentang jembatan mengalami kenaikan maksimumnya, yaitu sebesar 0,157 m atau setara dengan 0,15 % terhadap bentang keseluruhan struktur jembatan (104 m)
2. Kecepatan dari kenaikan struktur tersebut mencapai nilai 0,006158 m/menit atau 0,00042 m/°C.
3. Kegagalan struktur, dimana mulai terjadi titik balik dari proses kenaikan menjadi penurunan, yang terjadi pada suhu 600 °C memiliki nilai modulus elastisitas sebesar ± 62000 MPa.
4. Sedangkan pada deformasi maksimum, nilai modulus elastisitas dari simulasi model jembatan krasak adalah 22000 MPa (11% Es awal).
5. Waktu yang dibutuhkan oleh simulasi model jembatan krasak untuk mencapai deformasi maksimumnya yaitu sebesar 17 menit.

6. Kegagalan batang profil baja karena efek tekuk terjadi karena kenaikan tegangan sebesar 1,8 kali lipat, sedangkan modulus elastisitas turun hingga 89%.
7. Penyebab utama keruntuhan Jembatan Krasak adalah efek domino antara kenaikan suhu yang menyebabkan pengurangan kekuatan material (modulus elastisitas), yang kemudian menyebabkan terjadinya perilaku tekuk pada balok utama struktur atas disusul dengan tekuk pada batang pengaku transversal. Dengan terjadinya tekuk ini mengakibatkan pengurangan tahanan gaya dari batang tersebut sampai mendekati nilai nol. Pengurangan kemampuan untuk menahan beban ini mengakibatkan beban tersebut dipindahkan ke batang di sebelahnya. Pemindahan beban ini disertai berkurangnya kekuatan material akan mengakibatkan terjadinya perilaku tekuk berikutnya.
8. Perbedaan hasil antara model percobaan dengan simulasi model percobaan disebabkan banyak faktor yaitu ketidaksamaan mekanisme sambungan, beban termal akibat pengaruh angin dan perbedaan propertis material model percobaan dan dengan simulasi model percobaan.
9. Diperoleh hasil bahwa perilaku keruntuhan model percobaan menyerupai kondisi sebenarnya. Sehingga model percobaan dengan pendekatan menggunakan teori keserupaan (*similitude theory*) sudah dapat memberikan gambaran secara fisik penyebab terjadinya keruntuhan pada Jembatan Krasak.

Jembatan model direncanakan berdasarkan ketentuan teori keserupaan (*similitude theory*), namun dalam hal mekanisme sambungan, jembatan model hanya menggunakan paku rivet. Diameter baut dan jumlahnya tidak dapat menggunakan skala geometri karena keterbatasan ukuran yang tersedia di pasaran. Sehingga mekanisme sambungan antara struktur jembatan model dengan Jembatan Krasak merupakan salah satu penyebab ketidaksesuaian hasil.

Hal lain yang sangat mempengaruhi percobaan yang dilakukan terhadap model jembatan berskala 1:17 yaitu kondisi iklim dan frekuensi angin yang terjadi. Karena tingginya temperatur dan lidah api yang dihasilkan dari proses

pembakaran, sangat ditentukan oleh frekuensi angin yang masuk kedalam ruang bakar yang dalam hal ini yaitu tangki bahan bakar.

5.2. SARAN

Dalam tulisan ini, masih terdapat beberapa kekurangan yang dapat dilengkapi demi melakukan simulasi keruntuhan Jembatan Krasak akibat kebakaran dengan keadaan yang lebih menyerupai aslinya. Beberapa hal yang dapat dilakukan untuk melanjutkan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperbaiki mekanisme sambungan pada jembatan model dengan mengikuti teori keserupaan.
2. Melakukan pengukuran temperatur pada setiap batang dalam waktu yang bersamaan.
3. Membuat pendekatan pengaruh turbulensi angin terhadap kompartemen atau tangki bahan bakar.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Arya Perdana, “Analisa Balik (*Retro Analysis*) Keruntuhan Jembatan Krasak Akibat Kebakaran Truk Tangki Bahan Bakar”, Universitas Indonesia, Skripsi, Depok, 2008.
- [2] Thomas W. Eagar and Christopher Musso, “Why Did the World Trade Center Collapse? Science, Engineering, and Speculation”. Diakses 20 November 2009.
- [3] *Jembatan Krasak Normal Kembali*, 25 Juni 2003. Diakses 25 Januari 2007, dari Harian Utama. www.harianutama.co.id.
- [4] Vytenis Babrauskas, *Temperatures in Flames and Fires*, Diakses 20 November 2009.
- [5] Andrew H Buchanan, *Structural Design for Fire Safety* (West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2001).
- [6] Richard G Gewain, Nestor R Iwankiw, Farid Alfawakhiri, *Facts for Steel Building: Fire* (USA: American Institute of Steel Construction, Inc., 2003).
- [7] ENV-1993-1-2 Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: *General Rules-Structural Fire Design*, 1995
- [8] ECCS (2001). *Model Code on Fire Engineering, First Edition*.
- [9] Drysdale, D. *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley & Sons. 1999.
- [10] Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pekerjaan Umum, *Pembangunan Jembatan-Jembatan Panjang di Indonesia*, Edisi 1 – 1997.
- [11] M. Kusnadi, *Bahan-Bahan Jembatan Callender Hamilton*, Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pekerjaan Umum, halaman 2-6.

- [12] Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan, Badan Penelitian dan Pengembangan PU, Departemen Pekerjaan Umum, *Laporan Pengembangan "Penentuan Perkuatan Jembatan Callendar Hamilton"*, Januari 2000, halaman 3-5.
- [13] PT. Hino Motors, <http://www.hino.co.id/product.php?z=2&c=62>, Diakses 20 November 2009.
- [14] David Parkinson, *Performance Based Design Of Structural Steel For Fire Conditions*, Thesis, Degree Of Master Science, Worcester Polytechnic Institute, 2002.
- [15] Harris G. and Sabnis M., *Structural Modeling and Experimental Techniques*, Second Edition, Chapter 2, CRC Press, Washington DC.
- [16] Saeed Moaveni, *Finite Element Analysis : Theory And Application With ANSYS* (New Jersey: Pearson Education Inc., 2003), halaman 434-443.
- [17] Nader Abedrabbo, Farhang Pourboghra, John Carsley, *Forming of aluminum alloys at elevated temperatures – Part 1: Material characterization*, International Journal of Plasticity 22 (2006), halaman 314–341.
- [18] ME 477, *Transient Thermal Analysis of a Pipe Support Bracket*, ANSYS Example.

DAFTAR PUSTAKA

Andrew H Buchanan, *Structural Design for Fire Safety* (West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2001).

Arya Perdana, “Analisa Balik (*Retro Analysis*) Keruntuhan Jembatan Krasak Akibat Kebakaran Truk Tangki Bahan Bakar”, Universitas Indonesia, Skripsi, Depok, 2008.

DaimlerChrysler United Kingdom Ltd., *ATEGO Truck Brochure*, UK., July 2006.

David Parkinson, *Performance Based Design Of Structural Steel For Fire Conditions*, Thesis, Degree Of Master Science, Worcester Polytechnic Institute, 2002.

Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pekerjaan Umum, *Pembangunan Jembatan-Jembatan Panjang di Indonesia*, Edisi 1 – 1997.

Drysdale, D. *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley & Sons. 1999.

ECCS (2001). *Model Code on Fire Engineering, First Edition*.

EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions and Structures, Part 1-2: *General Actions-Actions on Structures Exposed to Fire*, 2002.

Harris G. and Sabnis M., *Structural Modeling and Experimental Techniques*, Second Edition, Chapter 2, CRC Press, Washington DC.

Jembatan Krasak Normal Kembali, 25 Juni 2003. Diakses 25 Januari 2007, dari Harian Utama. www.harianutama.co.id.

M. Kusnadi, *Bahan-Bahan Jembatan Callender Hamilton*, Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pekerjaan Umum, halaman 2-6.

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan, Badan Penelitian dan Pengembangan PU, Departemen Pekerjaan Umum, *Laporan Pengembangan "Penentuan Perkuatan Jembatan Callendar Hamilton"*, Januari 2000, halaman 3-5.

Richard G Gewain, Nestor R Iwankiw, Farid Alfawakhiri, *Facts for Steel Building: Fire* (USA: American Institute of Steel Construction, Inc., 2003).

Saeed Moaveni, *Finite Element Analysis : Theory And Application With ANSYS* (New Jersey: Pearson Education Inc., 2003), halaman 434-443.

Thomas W. Eagar and Christopher Musso, "Why Did the World Trade Center Collapse? Science, Engineering, and Speculation". Diakses 20 November 2009.

Vytenis Babrauskas, *Temperatures in Flames and Fires*, Diakses 20 November 2009.

LAMPIRAN A

ELEMEN DAN DIMENSI SATUAN DALAM PROGRAM ANSYS V11.0

A.1. ELEMEN

A.1.1. BEAM188

BEAM188 is suitable for analyzing slender to moderately stubby/thick beam structures. The element is based on Timoshenko beam theory which includes shear-deformation effects. The element provides options for unrestrained warping and restrained warping of cross-sections. The element is a linear, quadratic, or cubic two-node beam element in 3-D.

BEAM188 has six or seven degrees of freedom at each node. These include translations in the x, y, and z directions and rotations about the x, y, and z directions. A seventh degree of freedom (warping magnitude) is optional. This element is well-suited for linear, large rotation, and/or large strain nonlinear applications.

A.1.2. BEAM188 Input Summary

Nodes

I, J, K (K, the orientation node, is optional but recommended)

Degrees of Freedom

UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ if KEYOPT(1) = 0

UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ, WARP if KEYOPT(1) = 1

Section Controls

TXZ, TXY, ADDMAS

(TXZ and TXY default to $A \cdot GXZ$ and $A \cdot GXY$, respectively, where A = cross-sectional area)

Material Properties

EX, (PRXY, or NUXY), GXY, GXZ

ALPX, (or CTEX, or THSX)

DENS, DAMP

Surface Loads

Pressure

face 1 (I-J) (-z normal direction)

face 2 (I-J) (-y normal direction)

face 3 (I-J) (+x tangential direction)

face 4 (I) (+x axial direction)

face 5 (J) (-x axial direction)

I and J denote the end nodes.

Use a negative value for loading in the opposite direction.

For faces 1, 2, and 3, offsets apply only if you are using the cubic option (KEYOPT(3) = 3).

Body Loads

Temperatures -- T(0,0), T(1,0), T(0,1) at each end node

Special Features

Plasticity (PLASTIC, BISO, MISO, NLISO, BKIN, MKIN, KINH, CHABOCHE, HILL)

Viscoelasticity (PRONY, SHIFT)

Viscoplasticity/Creep (CREEP, RATE)

Other material (USER)

Stress stiffening

Large deflection

Large strain

Initial state

Nonlinear stabilization

Birth and death (requires KEYOPT(11) = 1)

Automatic selection of element technology

Generalized cross-section (nonlinear elastic, elasto-plastic, temperature-

dependent)

KEYOPT(1)

Warping degree of freedom:

- 0** -- Six degrees of freedom per node, unrestrained warping (default)
- 1** -- Seven degrees of freedom per node (including warping). Bimoment and bicurvature are output.

KEYOPT(2)

Cross-section scaling, applies only if **NLGEOM,ON** has been invoked:

- 0** -- Cross-section is scaled as a function of axial stretch (default)
- 1** -- Section is assumed to be rigid (classical beam theory)

KEYOPT(3)

Shape functions along the length:

- 0** -- Linear (default)
- 2** -- Quadratic
- 3** -- Cubic

KEYOPT(4)

Shear stress output:

- 0** -- Output only torsion-related shear stresses (default)
- 1** -- Output only flexure-related transverse-shear stresses
- 2** -- Output a combined state of the previous two types

KEYOPT(6), KEYOPT(7), and KEYOPT(9)

active only when **OUTPR,ESOL** is active:

KEYOPT(6)

Output control for section forces/moments and strains/curvatures:

- 0** -- Output section forces/moments and strains/curvatures at integration points along the length (default)
- 1** -- Same as **KEYOPT(6) = 0** plus current section area
- 2** -- Same as **KEYOPT(6) = 1** plus element basis directions (X,Y,Z)
- 3** -- Output section forces/moments and strains/curvatures extrapolated to the element nodes

KEYOPT(7)

Output control at integration points (not available when section subtype = ASEC):

- 0 -- None (default)
- 1 -- Maximum and minimum stresses/strains
- 2 -- Same as KEYOPT(7) = 1 plus stresses and strains at each section point

KEYOPT(9)

Output control for values extrapolated to the element and section nodes (not available when section subtype = ASEC):

- 0 -- None (default)
- 1 -- Maximum and minimum stresses/strains
- 2 -- Same as KEYOPT(9) = 1 plus stresses and strains along the exterior boundary of the cross-section
- 3 -- Same as KEYOPT(9) = 1 plus stresses and strains at all section nodes

KEYOPT(11)

Set section properties:

- 0 -- Automatically determine if preintegrated section properties can be used (default)
- 1 -- Use numerical integration of section

KEYOPT(12)

Tapered section treatment:

- 0 -- Linear tapered section analysis; cross-section properties are evaluated at each Gauss point (default). This is more accurate, but computationally intensive.
- 1 -- Average cross-section analysis; for elements with tapered sections, cross-section properties are evaluated at the centroid only. This is an approximation of the order of the mesh size; however, it is faster.

KEYOPT(15)

Results file format:

- 0 -- Store averaged results at each section corner node (default).

1 -- Store non-averaged results at each section integration point. (The volume of data may be excessive. This option is typically useful for built-up sections with multiple materials only.)

A.1.3. BEAM188 Output Data

It is customary in beam design to employ components of axial stress that contribute to axial loads and bending in each direction separately; therefore, BEAM188 provides a linearized stress output as part of its SMISC output record, as indicated in the following definitions:

SDIR is the stress component due to axial load.

$SDIR = F_x/A$, where F_x is the axial load (SMISC quantities 1 and 14) and A is the area of the cross-section.

SByT and SByB are bending-stress components.

$$SByT = -M_z * y_{max} / I_{zz}$$

$$SByB = -M_z * y_{min} / I_{zz}$$

$$SBzT = M_z * z_{max} / I_{yy}$$

$$SBzB = M_z * z_{min} / I_{yy}$$

where M_y , M_z are bending moments in the beam coordinate system (SMISC quantities 2,15,3,16). Coordinates y_{max} , y_{min} , z_{max} , and z_{min} are the maximum and minimum y , z coordinates in the cross-section measured from the centroid. Values I_{yy} and I_{zz} are moments of inertia of the cross-section. Except for the ASEC type of beam cross-section, the program uses the maximum and minimum cross-section dimensions. For the ASEC type of cross-section, the maximum and minimum in each of y and z direction is assumed to be +0.5 to -0.5, respectively.

Corresponding definitions for the component strains are:

$$EPELDIR = E_x$$

$$EPELByT = -K_z * y_{max}$$

$$EPELByB = -K_z * y_{min}$$

$$EPELBzT = K_z * z_{max}$$

$$EPELBzB = K_z * z_{min}$$

where E_x , K_y , and K_z are generalized strains and curvatures (SMISC quantities 7,8,9, 20,21 and 22).

The reported stresses are strictly valid only for elastic behavior of members. BEAM188 always employs combined stresses in order to support nonlinear material behavior. When the elements are associated with nonlinear materials, the component stresses can at best be regarded as linearized approximations and should be interpreted with caution.

When using KEYOPT(7) with the cubic option (KEYOPT(3) = 3), the integration point at the middle of the element is reported last in the integration-point printout.

A.2. DIMENSI SATUAN

Mechanical Parameter	MKS Unit	Dimension
Length	m	m
Force	N	(kg)(m)/(s) ²
Time	s	s
Mass	kg	kg
Pressure	Pa	(kg)/(m)(s) ²
Velocity	m/s	m/s
Acceleration	m/(s) ²	m/(s) ²
Density	kg/(m) ³	kg/(m) ³
Stress	Pa	kg/(m)(s) ²
Young's Modulus	Pa	kg/(m)(s) ²
Power	W	(kg)(m) ² /(s) ³

Thermal Parameter	MKS Unit	Dimension
Conductivity	W/(m)(°C)	(kg)(m)/(°C)(s) ³
Heat Flux	W/(m) ²	kg/(s) ³
Specific Heat	J/(kg)(°C)	(m) ² /(°C)(s) ²
Heat Flow	W	(kg)(m) ² /(s) ³
Heat Generation Per Volume	W/m ³	(kg)/(m)(s) ³
Convection Coefficient	W/(m) ² (°C)	kg/(s) ³ (°C)
Dynamic Viscosity	kg/(m)(s)	kg/(m)(s)
Kinematic Viscosity	(m) ² /s	(m) ² /s

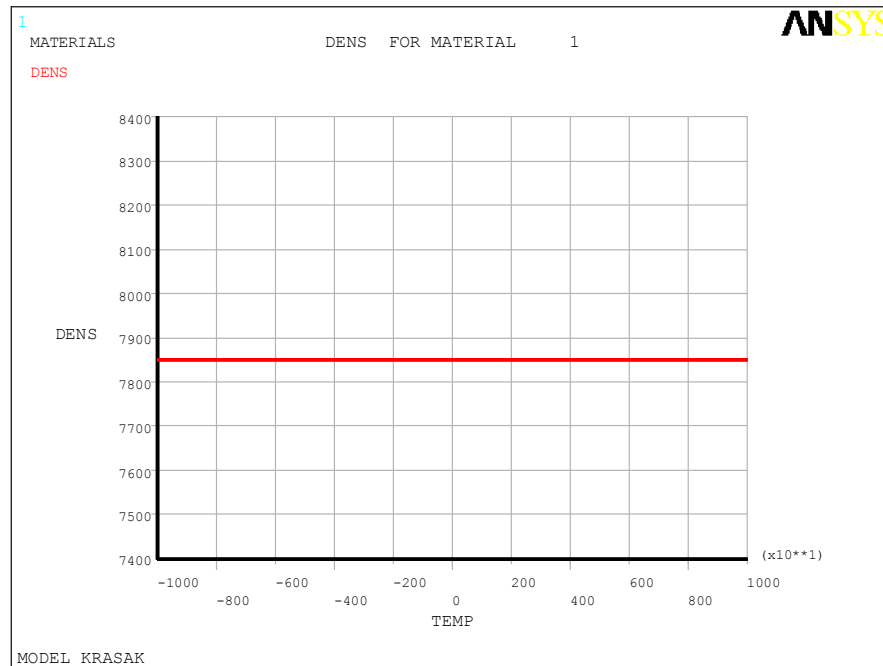
LAMPIRAN B

LANGKAH-LANGKAH SIMULASI DENGAN PROGRAM ANSYS V11.0

Dalam lampiran ini akan dibahas langkah-langkah yang dilakukan dalam menggunakan program ANSYS untuk keperluan simulasi pada tulisan ini. Langkah-langkah ini diusahakan akan dibuat sedetail mungkin, mulai dari mempersiapkan gambar struktur, memasukkan beban, serta membaca hasil keluaran dari program ANSYS tersebut. Uraian dari langkah-langkah tersebut, yaitu:

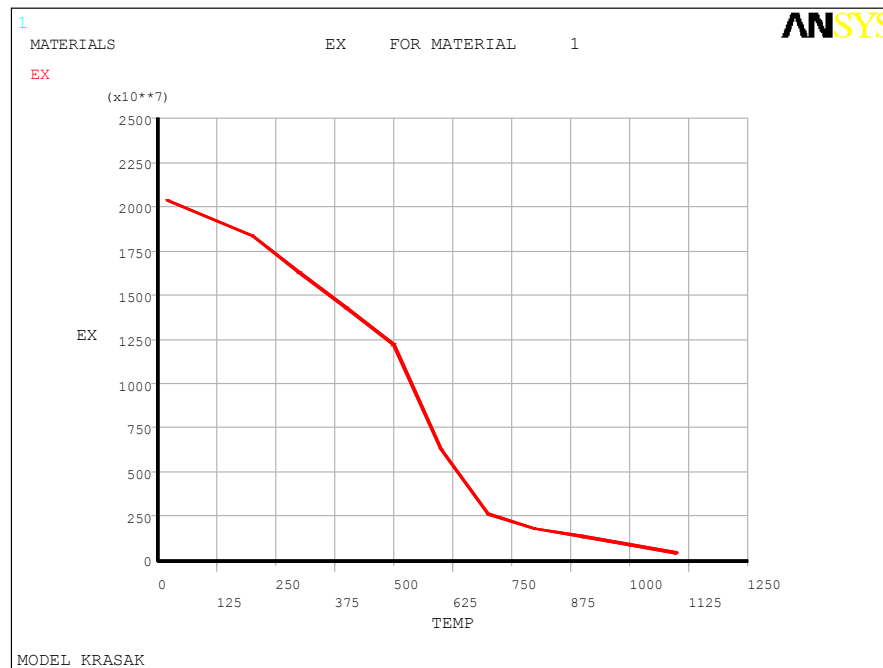
B.1. Fase *PREPROCESSING*: Memasukkan Data Struktur

1. Mengganti direktori folder penyimpanan data input dan output.
Utility Menu > File > Change Directory ...
2. Memberikan nama file yang akan disimpan.
Utility Menu > File > Change Jobname ...
3. Memberikan judul pekerjaan.
Utility Menu > File > Change Title ...
4. Mengubah tipe analisa menjadi struktural dan termal.
Main Menu > Preferences > Beri tanda pada
structural dan thermal > OK
5. Memasukkan tipe elemen. Karena dalam tulisan ini hanya digunakan elemen balok secara 3 dimensi, maka dipilih elemen BEAM188 (balok).
Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add > Structural Mass > Beam > 2
node 188 > OK > CLOSE
6. Memasukkan data geometri dari tiap profil baja yang digunakan.
Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections > Masukkan data ukuran profil (m)
> OK
7. Mengganti unit temperatur.
Preprocessor > Material Props > Temperature Units > Celcius > OK
8. Memasukkan data massa jenis material.
Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Density > Masukkan
nilai massa jenis material (DENSITY - kg/m^3) > OK



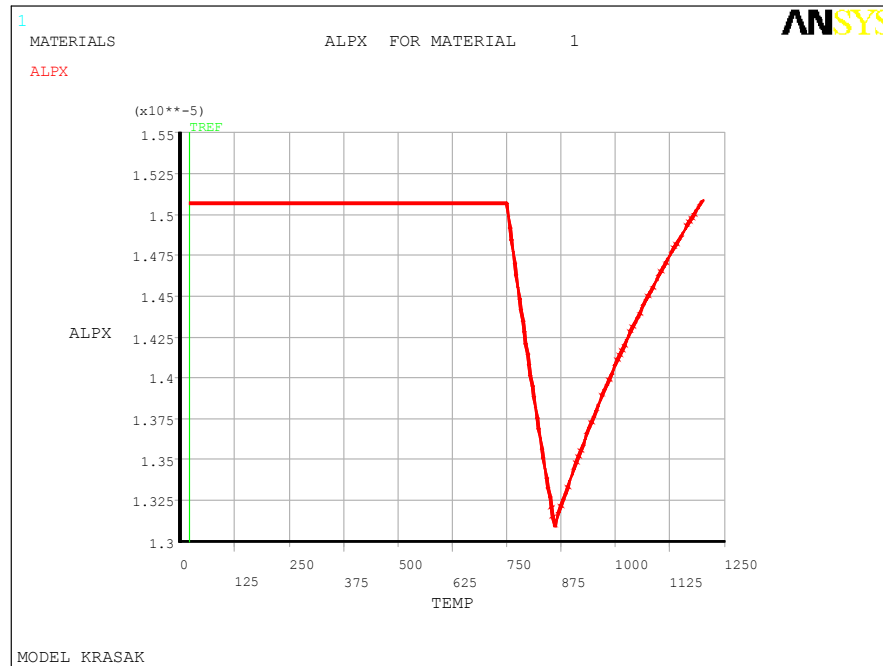
9. Memasukkan data modulus elastisitas dan poisson's ratio.

Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic > Masukkan nilai modulus elastisitas (EX - kg/m^2) dan poisson's ratio (PRXY) > OK



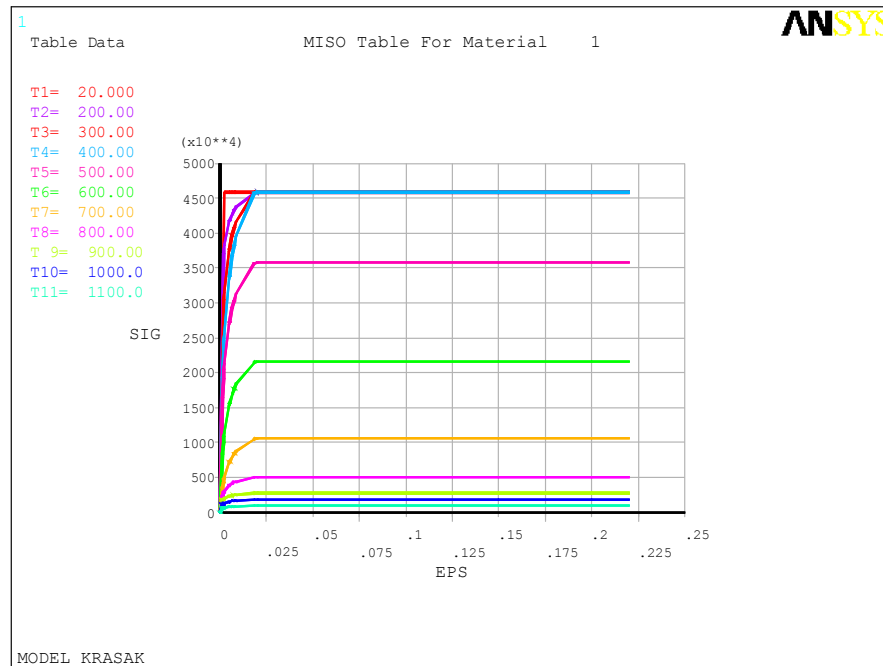
10. Memasukkan data koefisien perpanjangan termal material.

Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Thermal Expansion > Secant Coefficient > Isotropic > Masukkan nilai koefisien perpanjangan termal (ALPX - $^{\circ}\text{C}^{-1}$) > OK



11. Memasukkan data hubungan tegangan-regangan (*stress-strain*) nonlinear material.

Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Nonlinear > Inelastic > Rate Independent > Isotropic Hardening Plasticity > Mises Plasticity > Multilinear > Masukkan nilai hubungan Tegangan (STRESS – kg/m^2) dan Regangan (STRAIN) > OK (gunakan *TAB* “Add Temperature” untuk memasukkan nilai hubungan tegangan dan regangan pada keadaan suhu tertentu serta “Add Point” untuk menambah titik *input* hubungan tegangan dan regangan)

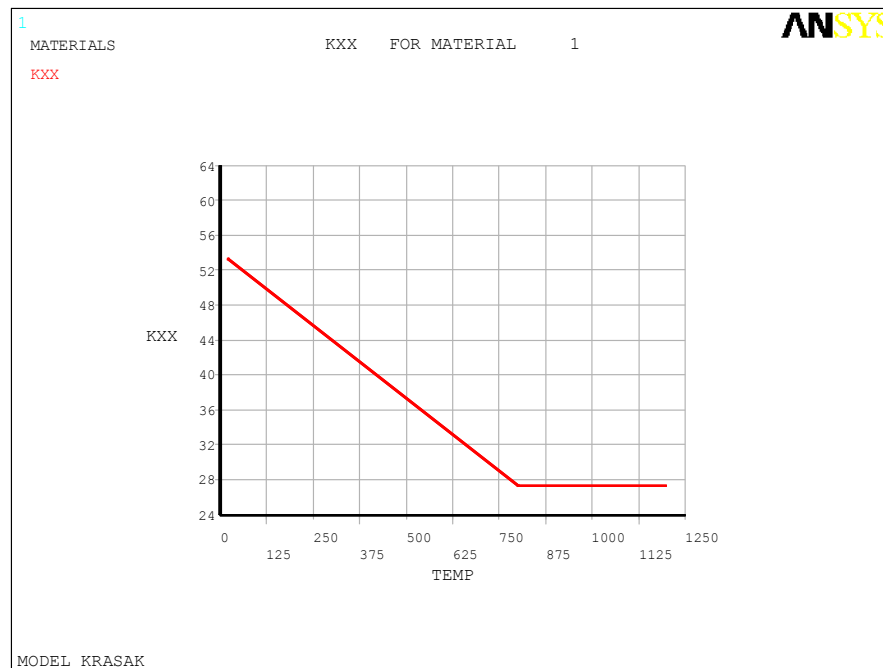


12. Memasukkan data konduktifitas termal material.

Preprocessor > Material Props > Material Models > Thermal > Conductivity > Isotropic >

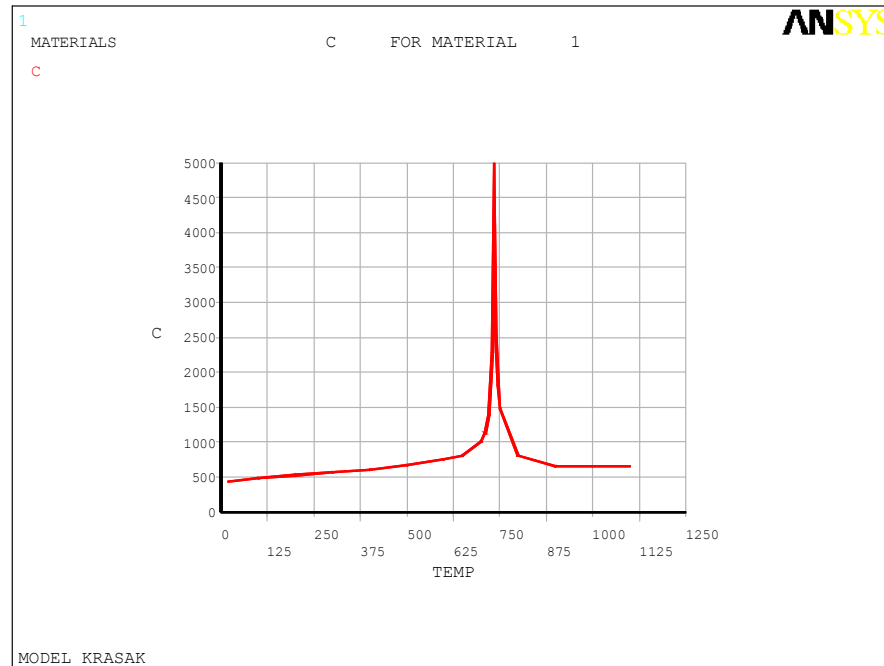
Masukkan nilai konduktifitas termal (KXX - *Watt/m-C*) > OK

(gunakan *TAB* "Add Temperature" untuk memasukkan nilai konduktifitas termal pada keadaan suhu tertentu).



13. Memasukkan data kapasitas panas material.

Preprocessor > Material Props > Material Models > Thermal > Specific Heat > Masukkan nilai kapasitas panas ($C - J/kg-C$) > OK



14. Memasukkan data koordinat nodal (nantinya digunakan untuk mendefinisikan letak elemen, dimana sebuah elemen BEAM188 akan menghubungkan 2 nodal).

Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS > Masukkan nomor nodal serta koordinatnya ($X,Y,Z - m$) > Apply > Ulangi masukkan nomor nodal serta koordinatnya sampai semua nodal terdata > OK

15. Memasukkan data elemen.

Langkah 1. Setiap akan memasukkan data nomor elemen dan dua nodal yang dihubungkannya, harus ditentukan data-data seperti Element Type, Real Constant dan Material Number dari elemen tersebut. Cara menentukannya dengan melakukan hal berikut:

Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes > Tentukan nomor urut Tipe Elemen, Real Constant, dan Material Number dari elemen tersebut > OK

Langkah 2. Selanjutnya adalah menentukan nomor elemen dan data dua nodal yang dihubungkannya. Hal tersebut dilakukan dengan cara seperti berikut:

Preprocessor > Modeling > Create > Elements > User Numbered > Thru Nodes > Masukkan nomor elemen > OK > Masukkan dua nomor nodal yang dihubungkan (Nodal-1,Nodal-2) > OK

(Setiap akan memulai memasukkan elemen dengan bentuk profil, jenis material, ataupun tipe elemen yang berbeda, maka harus mengulang dari langkah 1)

B.2. Fase *SOLUTION*: Memasukkan Data Beban dan Menjalankan Perhitungan pada Program ANSYS

1. Menentukan tipe analisa struktur yang dilakukan.

Solution > Analysis Type > New Analysis > Transient > OK > Full > OK

2. Mempersiapkan kondisi kontrol solusi (*solution controls*) pembebanan dan perletakan *loadstep* 1.

Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Pada layar yang muncul, isi dengan:

PADA TAB BASIC

- a. Analysis Options > Large Displacement Transient

- b. Time Control

Time At End of Loadstep > 1

Automatic Time Stepping > On

Number of Substeps > 15

Max No. Of Substeps > 25

Min No. Of Substeps > 10

- c. Write Items to Results File

Frequency > Write every Nth Substep

Where N= > 1

PADA TAB TRANSIENT

Full Transient Options > Ramped Loading

PADA TAB NONLINEAR

- a. Line Search > On

- b. Maximum Number of Iterations > 25

PADA TAB ADVANCED NL

Program Behavior upon Nonconvergence > Terminate but Do Not Exit > OK

3. Menentukan Perletakan.

Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes > Masukkan Nomor-nomor nodal yang menjadi perletakan (Nodal-1,Nodal-2,Nodal-n) > OK > DOFs to be Constrained (UX,UY,UZ) > Displacement Value > 0 (No) > OK

4. Memasukkan beban gravitasi (berat sendiri).
Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Pada Global Cartesian Z-comp > 1 > OK
5. Memasukkan beban nodal (Perkerasan beton atau Beban Truk).
Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes > Masukkan Nomor-nomor nodal yang mengalami beban nodal tambahan (Nodal-1,Nodal-2,Nodal-n) > OK > Masukkan nilai beban nodal (*kg*) > OK
6. Memasukkan beban suhu awal (20 °C) *loadstep* 1.
Suhu merata (*Uniform Temperature*).
Solution > Define Loads > Settings > Uniform Temp > 20 > OK
Suhu referensi peregangan elemen (*Reference Temperature*).
Solution > Define Loads > Settings > Reference Temp > 20 > OK
7. Menulis data-data kondisi pembebanan dan kontrol solusi pada file.
Solution > Load Step Opts > Write LS File > 1 > OK
8. Mempersiapkan kondisi kontrol solusi (*solution controls*) pembebanan dan perletakan *loadstep* 2.
Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Pada layar yang muncul, yang diganti hanya bagian waktu:
PADA TAB BASIC
Time At End of Loadstep > 38
Automatic Time Stepping > On
Number of Substeps > 25
Max No. Of Substeps > 250
Min No. Of Substeps > 5 > OK
9. Memasukkan beban termal pada elemen-elemen yang mengalami kenaikan suhu.
Solution > Define Loads > Apply > Structural > Temperature > On Elements > Masukkan Nomor-nomor elemen yang mengalami beban termal (Elemen-1,Elemen-2,Elemen-n) > OK > Masukkan nilai beban termal (°C) > OK
10. Menulis data-data kondisi pembebanan dan kontrol solusi pada file.
Solution > Load Step Opts > Write LS File > 2 > OK
(Jika terdapat *loadstep* selanjutnya, maka cukup dilakukan dengan mengulang dari langkah-8 hingga langkah-10)
11. Menjalankan proses perhitungan pada ANSYS.
Solution > Solve > From LS Files > Pada layar yang muncul > Starting LS file number > 1

Ending LS file number > 3

File number increment > 1 > OK

12. Karena proses perhitungan dilakukan dengan menggunakan beberapa *loadstep* dan sejumlah *substep*, maka proses ini akan cukup memakan waktu. Setelah perhitungan selesai akan terdapat pesan pada layar yang muncul.

Solution Is Done! > Close

B.3. Fase *POSTPROCESSING*: Melihat Hasil Perhitungan

1. Menentukan titik letak pembacaan hasil (pada waktu ke-sekian).
General Postproc > Read Results > By Time/Freq > Pada layar yang muncul > Value of time or freq > Masukkan waktu yang diinginkan > Results at or near TIME > Near TIME value > OK
2. Menampilkan data perpindahan nodal.
General Postproc > List Results > Nodal Solution > Item to be listed > DOF Solution > All DOFs DOF > OK
3. Menampilkan bentuk (hasil plot) gambar deformasi yang terjadi.
General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > Items to be plotted > Def + undeformed > OK
4. Menampilkan data reaksi perletakan
General Postproc > List Results > Reaction Solu > Item to be listed > All Items > OK
5. Menampilkan data pembebanan yang terdapat pada tiap nodal.
General Postproc > List Results > Nodal Loads > Load to be listed > All Items > OK
6. Menampilkan nilai tegangan aksial (*axial stress* - SA) pada seluruh elemen dalam *substep* tertentu.
Langkah 1. Mendefinisikan tabel data
General Postproc > Element Table > Define Table > Add > Pada Layar yang muncul > User label for item > SA Results data item > By sequence num > LS, 1 > OK
Langkah 2. Menampilkan data pada tabel
General Postproc > Element Table > List Elem Table > Items to be listed > SA > OK
7. Menampilkan nilai regangan aksial (*axial strain* - EA) pada seluruh elemen dalam *substep* tertentu.
Langkah 1. Mendefinisikan tabel data

General Postproc > Element Table > Define Table > Add > Pada Layar yang muncul > User label for item > EA Results data item > By sequence num > LEPEL, 1 > OK

Langkah 2. Menampilkan data pada tabel

General Postproc > Element Table > List Elem Table > Items to be listed > EA > OK

8. Menampilkan nilai perpindahan suatu nodal dalam keseluruhan rentang waktu perhitungan.

Langkah 1. Mendefinisikan variabel data

TimeHist Postpro > Define Variables > Add > Nodal DOF Result > OK > Masukkan satu nomor nodal yang akan ditampilkan datanya > OK > Pada layar yang muncul > User-Specified Label > UZ_ "Nomor Nodal" Data Item > DOF Solution > Translation UZ > OK

Langkah 2. Menampilkan data pada tabel

TimeHist Postpro > List Variables > 1st Variable to list > UZ_ "Nomor Nodal" > OK

9. Menampilkan nilai tegangan aksial (*axial stress* - SA) suatu elemen dalam keseluruhan rentang waktu perhitungan.

Langkah 1. Mendefinisikan variabel data

TimeHist Postpro > Define Variables > Add > ... by seq no. > OK > Masukkan satu nomor elemen yang akan ditampilkan datanya > OK > Pada layar yang muncul > User-Specified Label > SA_ "Nomor Elemen"

Data Item > LS

Sequence Number > 1 > OK

Langkah 2. Menampilkan data pada tabel

TimeHist Postpro > List Variables > 1st Variable to list > SA_ "Nomor Elemen" > OK

10. Menampilkan nilai regangan aksial (*axial strain* - EA) suatu elemen dalam keseluruhan rentang waktu perhitungan.

Langkah 1. Mendefinisikan variabel data

TimeHist Postpro > Define Variables > Add > ... by seq no. > OK > Masukkan satu nomor elemen yang akan ditampilkan datanya > OK > Pada layar yang muncul > User-Specified Label > EA_ "Nomor Elemen"

Data Item > LEPEL

Sequence Number > 1 > OK

Langkah 2. Menampilkan data pada tabel

TimeHist Postpro > List Variables > 1st Variable to list > EA_ "Nomor Elemen" > OK

11. Menampilkan grafik dari suatu variabel yang sudah ditentukan (dapat berupa perpindahan nodal, tegangan aksial elemen, ataupun regangan aksial elemen) terhadap keseluruhan rentang waktu perhitungan.

TimeHist Postpro > Graph Variables > 1st Variable to graph > Masukkan nama variabel
> OK

Demikianlah langkah-langkah yang sebagian besar dilakukan dalam menggunakan program ANSYS V11.0 untuk keperluan tulisan ini. Hal-hal lain yang berhubungan dengan tampilan dan pengaturan-pengaturan lainnya tidak dibahas dalam lampiran ini. Untuk keperluan selain seperti yang disebutkan dalam langkah-langkah di atas, diharap untuk membaca ANSYS Help ataupun ANSYS Tutorial yang terdapat baik dalam program ANSYS itu sendiri ataupun referensi referensi lainnya.

LAMPIRAN C

INPUT DATA PROGRAM ANSYS V11.0

Dalam lampiran ini akan diberikan data-data yang digunakan sebagai *input* pada program ANSYS. Data-data tersebut antara lain adalah data koordinat nodal, data elemen, serta data pembebanan yang menjadi input dalam simulasi dengan program ANSYS v11.0. Data input mengacu pada simulasi jembatan model dimensi, karena lebih mendekati model percobaan. Format data disesuaikan dengan format program ANSYS itu sendiri, untuk keterangan lebih lanjut dalam format data tersebut, diharapkan untuk mengacu pada referensi dari ANSYS Help yang disediakan pada *Utility Menu*.

C.1. Input Data Nodal

N,Node,X,Y,Z,Thxy,Thyz,Thzx

N,1,0,0,0,0,0,0

N,2,0.470588235294118,0,0,0,0,0

N,3,0.941176470588235,0,0,0,0,0

N,4,1.41176470588235,0,0,0,0,0

N,5,1.88235294117647,0,0,0,0,0

.

.

.

N,1823,5.72549,0.588235294117647,0.547058823529412,0,0,0

N,1824,5.72549,0.629411764705882,0.547058823529412,0,0,0

N,1825,5.80392176470588,0.588235294117647,0.547058823529412,0,0,0

N,1826,5.80392176470588,0.629411764705882,0.547058823529412,0,0,0

C.2. Input Data Elemen

Node-1, Node-2, 0,0,0,0,0, Mat, ElType,Real,Sect,0, ElNumber

2,332,0,0,0,0,0,2,1,2,1,0,1

332,333,0,0,0,0,0,2,1,2,1,0,2

333,28,0,0,0,0,0,2,1,2,1,0,3

28,334,0,0,0,0,0,2,1,2,1,0,4

334,335,0,0,0,0,0,2,1,2,1,0,5

335,15,0,0,0,0,0,2,1,2,1,0,6


```

.
.
.
3565,3566,0,0,0,0,0,2,1,1,1,0,5124
3566,3567,0,0,0,0,0,2,1,1,1,0,5125
3567,3568,0,0,0,0,0,2,1,1,1,0,5126
3568,499,0,0,0,0,0,2,1,1,1,0,5127

```

C.3. Input Data Pembebanan (*Loadstep*)

C.3.1. *Loadstep 1 (MODEL_KRASAK.S01)*

```

/COM,ANSYS RELEASE 11.0  UP20070125  11:19:58  07/06/2010
/NOPR
/TITLE,MODEL_KRASAK
_LSNUM= 1
ANTYPE, 4
NLGEOM, 1
TOFFST, 273.000000
TRNOPT,FULL,,DAMP
BFUNIF,TEMP, 30.0000000

NSUBST, 15, 25, 10,
KBC, 0
KUSE, 0
TIME, 1.00000000
TREF, 20.0000000
ALPHAD, 0.00000000
BETAD, 0.00000000
DMPRAT, 0.00000000
TIMINT,ON ,STRU
TINTP,R8.1, 5.000000000E-03,,
TINTP,R8.1, -1.00000000 , 0.500000000 , 5.00000000 ,,,,
TINTP,R8.1, 5.000000000E-03, 0.00000000

CRPLIM, 0.100000000 , 0
CRPLIM, 0.00000000 , 1
NCNV, 2, 0.00000000 , 0, 0.00000000 , 0.00000000
LNSRCH,ON
NEQIT, 0

ERESX,DEFA

```

OUTRES, ALL, ALL,
 ACEL, 0.00000000 , 0.00000000 , 1.00000000
 OMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 DOMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 CGLOC, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 CGOMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 DCGOMG, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 IRLF, 0

D, 1,UX , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 1,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 1,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 14,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 14,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 64,UX , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 64,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 64,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 77,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 77,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 127,UX , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 127,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 127,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 140,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 140,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 190,UX , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 190,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 190,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 203,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 203,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 F, 253,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 254,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 255,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 256,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 257,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 258,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 259,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 260,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 261,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 262,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 263,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 264,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 265,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 266,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 267,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 268,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 269,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 270,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 271,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 272,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 273,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 274,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 275,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 276,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 277,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 278,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 279,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 280,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 281,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 282,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 283,FZ , -18706.1711 , 0.00000000
F, 284,FZ , -18706.1711 , 0.00000000
F, 285,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 286,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 287,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 288,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 289,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 290,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 291,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 292,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 293,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 294,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 295,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 296,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 297,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 298,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 299,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 300,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 301,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

```

F, 302,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 303,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 304,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 305,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 306,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 307,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 308,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
/GOPR

```

C.3.2. Loadstep 2 (MODEL_KRASAK.S02)

```

/COM,ANSYS RELEASE 11.0 UP20070125 11:19:58 07/06/2010
/NOPR
/TITLE,MODEL_KRASAK
_LSNUM= 2
ANTYPE, 4
NLGEOM, 1
TOFFST, 273.000000
TRNOPT,FULL,,DAMP
BFUNIF,TEMP, 30.0000000

NSUBST, 25, 250, 5,
KBC, 0
KUSE, 0
TIME, 38.00000000
TREF, 20.0000000
ALPHAD, 0.00000000
BETAD, 0.00000000
DMPRAT, 0.00000000
TIMINT,ON ,STRU
TINTP,R8.1, 5.000000000E-03,,
TINTP,R8.1, -1.00000000 , 0.500000000 , 5.00000000 ,,,,
TINTP,R8.1, 5.000000000E-03, 0.00000000

CRPLIM, 0.100000000 , 0
CRPLIM, 0.000000000 , 1
NCNV, 2, 0.00000000 , 0, 0.00000000 , 0.00000000
LNSRCH,ON

```

NEQIT, 0

ERESX,DEFA

OUTRES, ALL, ALL,

ACEL, 0.00000000 , 0.00000000 , 1.00000000

OMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000

DOMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000

CGLOC, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000

CGOMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000

DCGOMG, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000

IRLF, 0

D, 1,UX , 0.00000000 , 0.00000000

D, 1,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 1,UZ , 0.00000000 , 0.00000000

D, 14,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 14,UZ , 0.00000000 , 0.00000000

D, 64,UX , 0.00000000 , 0.00000000

D, 64,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 64,UZ , 0.00000000 , 0.00000000

D, 77,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 77,UZ , 0.00000000 , 0.00000000

D, 127,UX , 0.00000000 , 0.00000000

D, 127,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 127,UZ , 0.00000000 , 0.00000000

D, 140,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 140,UZ , 0.00000000 , 0.00000000

D, 190,UX , 0.00000000 , 0.00000000

D, 190,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 190,UZ , 0.00000000 , 0.00000000

D, 203,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 203,UZ , 0.00000000 , 0.00000000

F, 253,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 254,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 255,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 256,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 257,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 258,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 259,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 260,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 261,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 262,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 263,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 264,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 265,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 266,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 267,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 268,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 269,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 270,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 271,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 272,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 273,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 274,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 275,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 276,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 277,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 278,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 279,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 280,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 281,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 282,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 283,FZ , -18706.1711 , 0.00000000
F, 284,FZ , -18706.1711 , 0.00000000
F, 285,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 286,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 287,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 288,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 289,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 290,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 291,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 292,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 293,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 294,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 295,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 296,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 297,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 298,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 299,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 300,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 301,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 302,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 303,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 304,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 305,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 306,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 307,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 308,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
BFE, 137,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 139,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 140,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 141,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 142,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 143,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 144,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 156,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 555,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 557,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 558,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 559,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 560,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 569,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 570,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 871,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 872,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 873,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 874,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 875,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 876,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 877,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 878,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 879,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 880,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 881,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 882,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 883,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 884,TEMP, 1, 552.722000

BFE, 885,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 886,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 887,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 888,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 889,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 890,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 891,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 892,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 893,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 894,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 895,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 896,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 897,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 898,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 899,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 900,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 901,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 902,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 903,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 904,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 905,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 906,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 907,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 908,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 909,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 910,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 911,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 912,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 913,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 914,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 915,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 916,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 917,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 918,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 919,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 920,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 921,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 922,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1210,TEMP, 1, 552.722000

BFE, 1212,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1213,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1215,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1237,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1353,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1354,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1355,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1356,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1357,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1358,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1359,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1360,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1361,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1362,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1363,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1364,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1365,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1366,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1367,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1368,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1369,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1370,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1372,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1373,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1374,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1375,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1376,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1377,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1378,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1379,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1380,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1381,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1382,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1383,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1384,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1385,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1386,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1387,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1388,TEMP, 1, 552.722000

BFE, 1389,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1509,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1510,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1511,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1512,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1587,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1592,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1677,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1682,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1856,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1857,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1862,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1863,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1994,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 1995,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2000,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2001,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2138,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2139,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2144,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2145,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2282,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2283,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2288,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2289,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2380,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2381,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2382,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2383,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2384,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2385,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2446,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2447,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2448,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2449,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2450,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2451,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2518,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2519,TEMP, 1, 552.722000

BFE, 2520,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2521,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2522,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2523,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2590,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2591,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2592,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2593,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2594,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2595,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2738,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2739,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2741,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2742,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2835,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2836,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2913,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2914,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2916,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 2917,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3014,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3015,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3101,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3102,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3104,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3105,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3260,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3261,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3263,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3264,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3337,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3338,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3339,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3340,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3341,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3342,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3343,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3344,TEMP, 1, 552.722000
BFE, 3345,TEMP, 1, 552.722000

BFE, 3346,TEMP, 1, 552.722000
 BFE, 3347,TEMP, 1, 552.722000
 BFE, 3348,TEMP, 1, 552.722000
 BFE, 3349,TEMP, 1, 552.722000
 BFE, 3350,TEMP, 1, 552.722000
 /GOPR

C.3.3. Loadstep 3 (MODEL_KRASAK.S03)

/COM,ANSYS RELEASE 11.0 UP20070125 11:19:58 07/06/2010
 /NOPR
 /TITLE,MODEL_KRASAK
 _LSNUM= 3
 ANTYPE, 4
 NLGEOM, 1
 TOFFST, 273.000000
 TRNOPT,FULL,,DAMP
 BFUNIF,TEMP, 30.0000000

 NSUBST, 60, 600, 20,
 KBC, 0
 KUSE, 0
 TIME, 74.0000000
 TREF, 20.0000000
 ALPHAD, 0.00000000
 BETAD, 0.00000000
 DMPRAT, 0.00000000
 TIMINT,ON ,STRU
 TINTP,R8.1, 5.000000000E-03,,
 TINTP,R8.1, -1.00000000 , 0.500000000 , 5.00000000 , ,,,
 TINTP,R8.1, 5.000000000E-03, 0.00000000

 CRPLIM, 0.100000000 , 0
 CRPLIM, 0.00000000 , 1
 NCNV, 2, 0.00000000 , 0, 0.00000000 , 0.00000000
 LNSRCH,ON
 NEQIT, 0

 ERESX,DEFA
 OUTRES, ALL, ALL,
 ACEL, 0.00000000 , 0.00000000 , 1.00000000
 OMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 DOMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 CGLOC, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 CGOMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 DCGOMG, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
 IRLF, 0

 D, 1,UX , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 1,UY , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 1,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
 D, 14,UY , 0.00000000 , 0.00000000

D, 14,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
D, 64,UX , 0.00000000 , 0.00000000
D, 64,UY , 0.00000000 , 0.00000000
D, 64,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
D, 77,UY , 0.00000000 , 0.00000000
D, 77,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
D, 127,UX , 0.00000000 , 0.00000000
D, 127,UY , 0.00000000 , 0.00000000
D, 127,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
D, 140,UY , 0.00000000 , 0.00000000
D, 140,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
D, 190,UX , 0.00000000 , 0.00000000
D, 190,UY , 0.00000000 , 0.00000000
D, 190,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
D, 203,UY , 0.00000000 , 0.00000000
D, 203,UZ , 0.00000000 , 0.00000000
F, 253,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 254,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 255,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 256,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 257,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 258,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 259,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 260,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 261,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 262,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 263,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 264,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 265,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 266,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 267,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 268,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 269,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 270,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 271,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 272,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 273,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 274,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 275,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 276,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 277,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 278,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 279,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 280,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 281,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 282,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 283,FZ , -18706.1711 , 0.00000000
F, 284,FZ , -18706.1711 , 0.00000000
F, 285,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 286,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 287,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 288,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 289,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 290,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 291,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 292,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 293,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
F, 294,FZ , -8882.17498 , 0.00000000

F, 295,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 296,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 297,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 298,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 299,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 300,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 301,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 302,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 303,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 304,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 305,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 306,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 307,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 F, 308,FZ , -8882.17498 , 0.00000000
 BFE, 137,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 139,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 140,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 141,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 142,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 143,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 144,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 156,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 555,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 557,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 558,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 559,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 560,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 569,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 570,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 871,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 872,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 873,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 874,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 875,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 876,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 877,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 878,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 879,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 880,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 881,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 882,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 883,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 884,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 885,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 886,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 887,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 888,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 889,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 890,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 891,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 892,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 893,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 894,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 895,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 896,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 897,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 898,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 899,TEMP, 1, 801.420000

BFE,	900,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	901,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	902,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	903,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	904,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	905,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	906,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	907,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	908,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	909,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	910,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	911,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	912,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	913,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	914,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	915,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	916,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	917,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	918,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	919,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	920,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	921,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	922,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1210,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1212,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1213,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1215,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1237,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1353,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1354,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1355,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1356,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1357,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1358,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1359,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1360,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1361,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1362,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1363,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1364,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1365,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1366,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1367,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1368,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1369,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1370,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1372,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1373,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1374,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1375,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1376,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1377,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1378,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1379,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1380,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1381,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1382,TEMP,	1,	801.420000
BFE,	1383,TEMP,	1,	801.420000

BFE, 1384,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1385,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1386,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1387,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1388,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1389,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1509,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1510,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1511,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1512,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1587,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1592,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1677,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1682,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1856,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1857,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1862,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1863,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1994,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 1995,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2000,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2001,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2138,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2139,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2144,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2145,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2282,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2283,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2288,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2289,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2380,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2381,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2382,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2383,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2384,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2385,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2446,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2447,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2448,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2449,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2450,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2451,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2518,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2519,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2520,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2521,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2522,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2523,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2590,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2591,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2592,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2593,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2594,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2595,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2738,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2739,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2741,TEMP, 1, 801.420000
BFE, 2742,TEMP, 1, 801.420000

BFE, 2835,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 2836,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 2913,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 2914,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 2916,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 2917,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3014,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3015,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3101,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3102,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3104,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3105,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3260,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3261,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3263,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3264,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3337,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3338,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3339,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3340,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3341,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3342,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3343,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3344,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3345,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3346,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3347,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3348,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3349,TEMP, 1, 801.420000
 BFE, 3350,TEMP, 1, 801.420000
 /GOPR

C.4. Hal-Hal Yang Harus Diperhatikan Pada Saat Input Data

Dalam menggunakan program ANSYS V11.0 ini, perlu diketahui bahwa ANSYS akan menulis keseluruhan hasil perhitungan pada *folder* yang sudah ditentukan pada awal penggunaan (lihat Lampiran B). Oleh karena itu, sebaiknya untuk setiap model yang berbeda, gunakanlah *folder* yang berbeda pula, hal ini untuk memudahkan dalam pembacaan hasil atau apabila ingin mengganti input data secara cepat.

Untuk memperoleh hasil yang selalu konvergen semaksimal mungkin, diperlukan selisih waktu ataupun perubahan gaya yang sekecil mungkin. Hal ini dapat dilakukan dengan memperbesar jumlah *substep* dalam setiap *step* pembebanan yang dilakukan. Jumlah *substep* yang semakin banyak akan mengakibatkan waktu perhitungan yang semakin lama. Apabila terjadi ketidak konvergenan dalam perhitungan, maka sebaiknya perhitungan tersebut diulang dengan jumlah *substep* 2 kali lipat lebih banyak, hal ini dilakukan secara terus

menerus sampai suatu batasan tertentu dimana memang sudah mencapai titik maksimalnya.

Secara *default*, ANSYS membatasi jumlah *substep* dalam suatu perhitungan hanya mencapai 1000 *substep*. Jumlah ini dapat ditingkatkan dengan menuliskan suatu perintah pada *Input Window*. Sebagai contoh, apabila jumlah tersebut ingin ditingkatkan hingga mencapai 20000, maka cukup dengan menuliskan “/CONFIG, NRES, 20000” pada *Input Window*. Perlu diperhatikan bahwa input ini harus dilakukan sebelum tahap *Preprocessing*. Keterangan lebih lanjut mengenai hal ini dapat dibaca pada ANSYS Help yang sudah disediakan oleh program itu sendiri.

Selanjutnya, dalam melakukan proses *input* data pada ANSYS, dapat dilakukan dengan dua hal, yaitu dengan memasukkannya satu persatu dalam keadaan program menyala, atau dengan menggunakan *text editor* seperti *Notepad* dalam keadaan tanpa menyalakan program. Dalam hal ini, penulis menyarankan untuk membiasakan memasukkan data secara satu persatu dalam mode GUI (*Graphical User Interface*), selanjutnya menuliskan hasil masukan tersebut dalam format “.txt” untuk memperoleh format yang harus diikuti dalam memasukkan *input* data melalui *text editor*. Hal ini sangat penting karena penggunaan jumlah spasi yang berbeda akan menghasilkan arti yang berbeda pula dalam input data tersebut. Setelah didapatkan format “.txt” dari ANSYS, maka kita dapat menambahkan data-data yang diperlukan sesuai dengan format yang diberikan dalam *file* tersebut. Semakin banyak mencoba maka akan semakin mengerti.

Untuk hal-hal lain yang berkaitan dengan trik dan tips dalam menggunakan ANSYS, penulis hanya dapat mengatakan bahwa pengalaman memang guru yang terbaik. Penulis menyarankan untuk menggunakan ANSYS sesering mungkin agar terbiasa dan fasih dengan fitur serta langkah-langkah dalam melakukan *input* data. Akan tetapi proses otodidak ini pun harus disertai dengan panduan berupa buku atau *tutorial*.

LAMPIRAN D

DOKUMENTASI JEMBATAN KRASAK

Dalam lampiran ini akan ditampilkan foto-foto dalam percobaan jembatan model yang dilaksanakan pada tanggal 22 Juli 2010.



Gambar D.1. Pemasangan Strain Gage (kiri) dan Uji Statik (kanan)



Gambar D.2. Tampak Jembatan (kiri) dan Bagian Bawah Jembatan (kanan)



Gambar D.3. Pengaku Diagonal Rangka Atas (kiri) dan Modelisasi Beban Truk (kanan)



Gambar D.4. Modelisasi Tangki Bahan Bakar (kiri) dan Kondisi Siap Uji (kanan)



Gambar D.5. Kebakaran Kondisi Angin Kecil (kiri) dan Efek Angin Dari Sebelah Kiri (kanan)



Gambar D.6. Kebakaran Pada Diagonal Rangka Atas



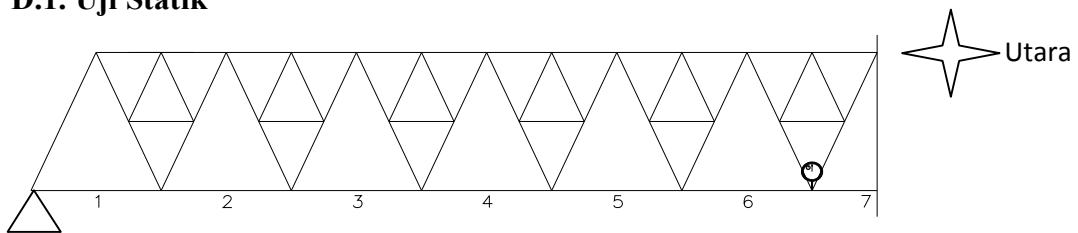
Gambar D.7. Kondisi Setelah Kebakaran

LAMPIRAN E

DATA LAPANGAN HASIL PERCOBAAN

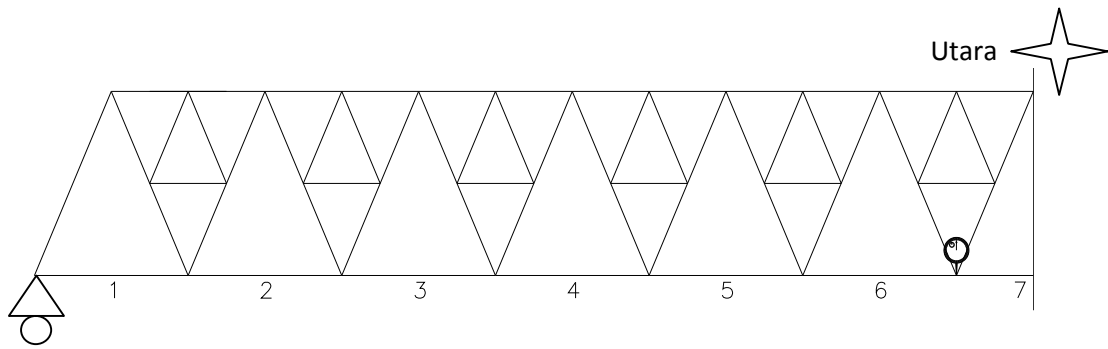
Dalam lampiran ini akan ditampilkan hasil pencatatan perubahan temperatur pada rangka jembatan serta penurunan yang terjadi terhadap waktu-waktu tertentu.

D.1. Uji Statik



Posisi Beban	Dial Gage-1						Delta [mm]	Ketelitian [%]
	Tanpa Beban (Awal)		Dengan Beban		Tanpa Beban (Akhir)			
	[mm]	[x 0.01 mm]	[mm]	[x 0.01 mm]	[mm]	[x 0.01 mm]		
1	20	0.00	19	89.50	20	0.00	0.105	100
2	20	0.00	19	81.00	20	0.00	0.190	100
3	20	0.00	19	72.00	20	0.00	0.280	100
4	20	0.00	19	63.80	20	0.00	0.362	100
5	20	0.00	19	57.20	20	0.00	0.428	100
6	20	0.00	19	36.50	19	99.20	0.635	100

Posisi Beban	Dial Gage-2						Delta [mm]	Ketelitian [%]
	Bacaan 1		Bacaan 2		Bacaan 3			
	[mm]	[x 0.01 mm]	[mm]	[x 0.01 mm]	[mm]	[x 0.01 mm]		
1	1	3.00	0	94.00	1	3.00	0.090	100
2	1	3.00	0	85.00	1	3.00	0.180	100
3	1	3.00	0	77.00	1	3.00	0.260	100
4	1	3.00	0	69.00	1	3.00	0.340	100
5	1	22.00	0	63.00	1	3.00	0.590	118
6	1	3.00	0	42.00	1	22.00	0.610	84



Posisi Beban	Dial Gage-1							
	Bacaan 1		Bacaan 2		Bacaan 3		Delta	Ketelitian
	[mm]	x 0.01 mm	[mm]	x 0.01 mm	[mm]	x 0.01 mm	[mm]	[%]
1	20	0.00	19	90.00	20	0.00	0.100	100
2	20	0.00	19	81.00	19	99.40	0.190	100
3	20	0.00	19	72.00	20	1.00	0.280	100
4	20	1.00	19	63.80	19	99.00	0.372	100
5	19	99.00	19	57.20	19	98.00	0.418	100
6	19	98.00	19	36.50	19	98.50	0.615	100

Posisi Beban	Dial Gage-2							
	Bacaan 1		Bacaan 2		Bacaan 3		Delta	Ketelitian
	[mm]	x 0.01 mm	[mm]	x 0.01 mm	[mm]	x 0.01 mm	[mm]	[%]
1	1	1.00	0	98.00	1	1.00	0.030	100
2	1	10.80	0	92.50	1	11.00	0.183	100
3	1	11.00	0	83.50	1	11.00	0.275	100
4	1	11.00	0	68.50	1	8.00	0.425	103
5	1	8.00	0	63.00	1	8.00	0.450	100
6	1	10.80	0	59.00	1	10.00	0.518	101

D.2. Data Temperatur

Data temperatur ditampilkan pada halaman berikut ini:

Hari/tanggal : Minggu / 20-6-2010

Waktu: 30.30

File Strain: [TES001-013.xlsx](#) TES011 & TES012

Kondisi: Berangin & Cerah

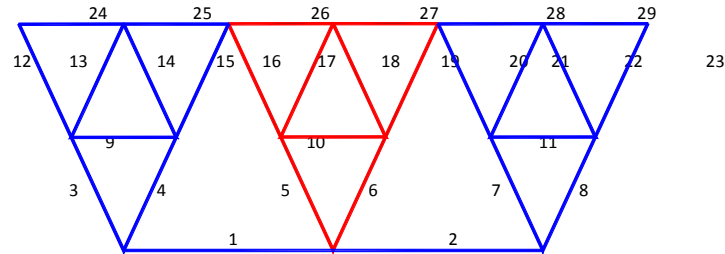
Kelembapan: 57.50%

Volume Premium: 2.5 ltr

Lama pembakaran: 01.28.45

Waktu (menit)	Temp. Api (°C)	Waktu (menit)	Dial (mm)	Delta (mm)
5	470	0	22	0
90	0	30	21.92	0.08
		60	22.28	-0.28
		90	22.22	-0.22

Bagian Depan



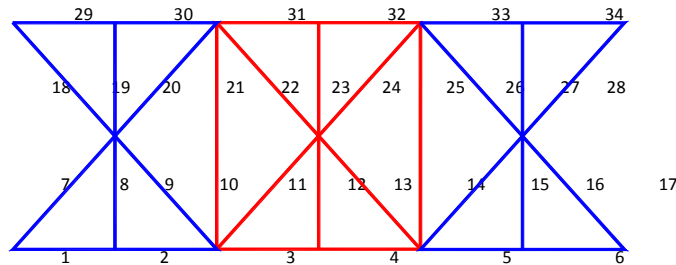
Waktu: 00.03.15 s/d 00.05.08

No.	Suhu
1	56
2	51
3	39
4	40
5	42
6	45
7	43
8	43
9	41
10	43

No.	Suhu
11	43
12	38
13	38
14	39
15	40
16	42
17	42
18	42
19	42
20	42

No.	Suhu
21	42
22	40
23	38
24	36
25	36
26	40
27	40
28	36
29	35

Bagian Atas



Waktu: 00.05.46 s/d 00.15.10

No.	Suhu
1	35
2	39
3	43
4	48
5	43
6	37
7	38
8	37
9	38
10	55
11	48

No.	Suhu
12	52
13	51
14	48
15	44
16	40
17	38
18	41
19	45
20	58
21	75
22	80

No.	Suhu
23	156
24	161
25	117
26	92
27	74
28	65
29	58
30	63
31	98
32	108
33	90
34	54

Hari/tanggal : Minggu / 20-6-2010

Waktu: 30.30

File Strain: [TES001-013.xlsx](#)

TES011 & TES012

Kondisi: Berangin & Cerah

Kelembapan: 57.50%

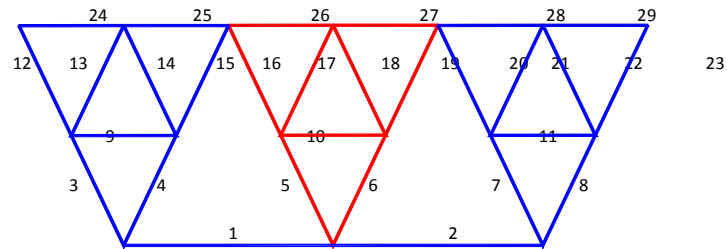
Volume Premium: 2.5 ltr

Lama pembakaran:

01.28.45

Waktu (menit)	Temp. Api (°C)	Waktu (menit)	Dial (mm)	Delta (mm)
5	470	0	22	0
90	0	30	21.92	0.08
		60	22.28	-0.28
		90	22.22	-0.22

Bagian Belakang



Waktu: 00.15.32

s/d

00.29.55

No.	Suhu
1	35
2	35
3	36
4	37
5	41
6	48
7	43
8	40
9	38
10	55

No.	Suhu
11	44
12	41
13	41
14	43
15	50
16	73
17	73
18	74
19	75
20	60

No.	Suhu
21	50
22	46
23	40
24	40
25	45
26	62
27	66
28	55
29	49

Hari/tanggal : Minggu / 20-6-2010

Waktu: 30.30

File Strain: [TES001-013.xlsx](#)

TES011 & TES012

Kondisi: Berangin & Cerah

Kelembapan: 57.50%

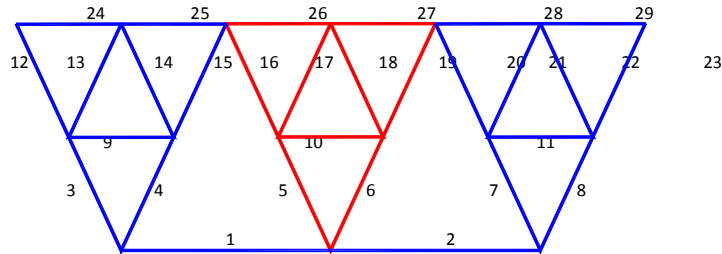
Volume Premium: 2.5 ltr

Lama pembakaran:

01.28.45

Waktu (menit)	Temp. Api (°C)	Waktu (menit)
5	470	0
90	0	30
		60
		90

Bagian Depan



Waktu: 00.30.01

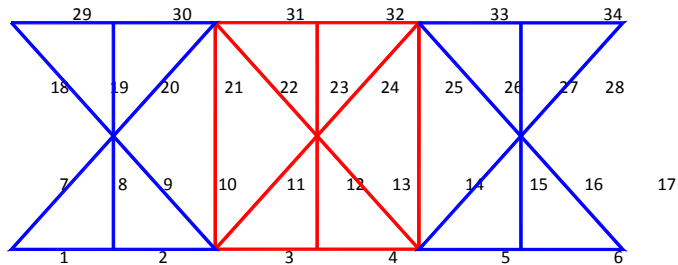
s/d 00.34.50

No.	Suhu
1	63
2	58
3	46
4	47
5	49
6	52
7	50
8	50
9	48
10	50

No.	Suhu
11	50
12	45
13	45
14	46
15	47
16	49
17	49
18	50
19	50
20	49

No.	Suhu
21	49
22	47
23	45
24	43
25	43
26	47
27	47
28	43
29	42

Bagian Atas



Waktu: 00.35.00

s/d 00.45.00

No.	Suhu
1	30
2	34
3	48
4	42
5	35
6	32
7	41
8	74
9	92
10	140
11	120

No.	Suhu
12	136
13	132
14	105
15	98
16	95
17	90
18	104
19	140
20	180
21	238
22	244

No.	Suhu
23	161
24	217
25	220
26	132
27	59
28	45
29	43
30	46
31	54
32	54
33	45
34	43

Hari/tanggal : Minggu / 20-6-2010

Waktu: 30.30

File Strain: [TES001-013.xlsx](#) TES011 & TES012

Kondisi: Berangin & Cerah

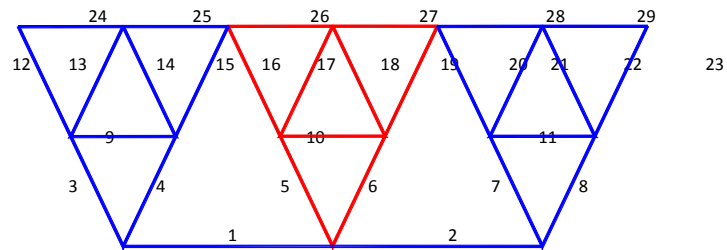
Kelembapan: 57.50%

Waktu (menit)	Temp. Api (°C)	Waktu (menit)
5	470	0
90	0	30
		60
		90

Volume Premium: 2.5 ltr

Lama pembakaran: 01.28.45

Bagian Belakang



Waktu: 00.45.52

s/d 01.01.50

No.	Suhu
1	35
2	35
3	34
4	34
5	62
6	63
7	33
8	33
9	32
10	41

No.	Suhu
11	32
12	32
13	32
14	32
15	34
16	99
17	102
18	93
19	85
20	40

No.	Suhu
21	35
22	34
23	32
24	32
25	34
26	36
27	37
28	36
29	35

Hari/tanggal : Minggu / 20-6-2010

Waktu: 30.30

File Strain: [TES001-013.xlsx](#) TES011 & TES012

Kondisi: Berangin & Cerah

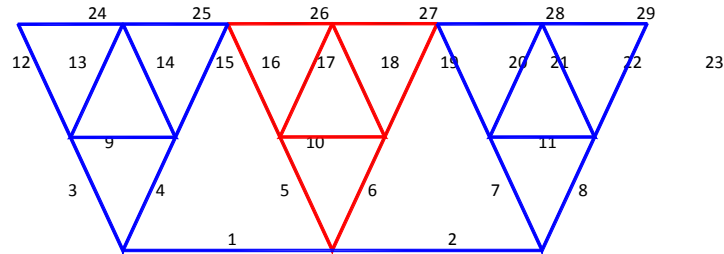
Kelembapan: 57.50%

Volume Premium: 2.5 Itr

Lama pembakaran: 01.28.45

Waktu (menit)	Temp. Api (°C)	Waktu (menit)
5	470	0
90	0	30
		60
		90

Bagian Depan



Waktu: 01.02.05

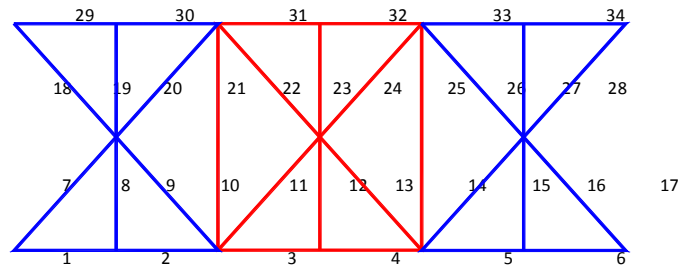
s/d 01.07.44

No.	Suhu
1	49
2	44
3	32
4	33
5	35
6	38
7	36
8	36
9	34
10	36

No.	Suhu
11	36
12	31
13	31
14	32
15	33
16	35
17	36
18	36
19	35
20	35

No.	Suhu
21	35
22	33
23	33
24	33
25	33
26	33
27	33
28	33
29	33

Bagian Atas



Waktu: 01.07.55

s/d 01.24.33

No.	Suhu
1	42
2	36
3	45
4	40
5	36
6	32
7	41
8	37
9	39
10	53
11	66

No.	Suhu
12	70
13	79
14	67
15	35
16	34
17	32
18	40
19	35
20	39
21	87
22	52

No.	Suhu
23	52
24	91
25	77
26	62
27	60
28	48
29	43
30	45
31	50
32	52
33	43
34	40

Hari/tanggal : Minggu / 20-6-2010

Waktu: 30.30

File Strain: [TES001-013.xlsx](#) TES011 & TES012

Kondisi: Berangin & Cerah

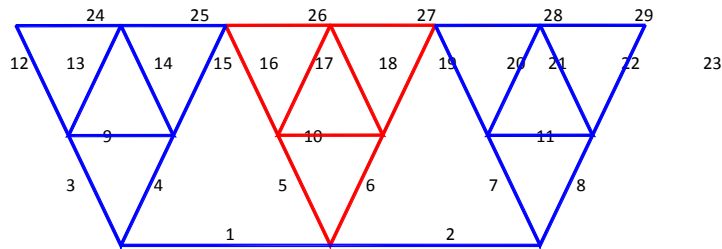
Kelembapan: 57.50%

Volume Premium: 2.5 Itr

Lama pembakaran: 01.28.45

Waktu (menit)	Temp. Api (°C)	Waktu (menit)
5	470	0
90	0	30
		60
		90

Bagian Belakang



Waktu: 01.24.45

s/d 01.28.45

No.	Suhu
1	39
2	38
3	40
4	45
5	51
6	50
7	42
8	32
9	32
10	60

No.	Suhu
11	32
12	32
13	32
14	32
15	33
16	40
17	60
18	150
19	181
20	73

No.	Suhu
21	33
22	33
23	32
24	33
25	33
26	71
27	38
28	33
29	33