



Pemodelan Keruntuhan Balok Baja Akibat Paparan Api Lokal  
dengan Program Abaqus

*Modeling Of Steel Beam Collapse Due To Local Fire Exposure  
using The Abaqus Program*

**SKRIPSI**

Oleh:

Thilal Syihabuddin

NIM 161910301134

Program Studi S1 Teknik Sipil

Jurusan Teknik Sipil - Fakultas Teknik

Universitas Jember

2020



Pemodelan Keruntuhan Balok Baja Akibat Paparan Api Lokal  
dengan Program Abaqus

*Modeling Of Steel Beam Collapse Due To Local Fire Exposure  
using The Abaqus Program*

**SKRIPSI**

Disusun dan diajukan sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi S1  
Teknik Sipil Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas jember dan  
mencapai gelar sarjana

Oleh:

Thilal Syihabuddin

NIM 161910301134

Program Studi S1 Teknik Sipil

Jurusan Teknik Sipil - Fakultas Teknik

Universitas Jember

2020

## MOTTO

لَا تَحْزَنُ إِنَّ اللَّهَ مَعَنَا

Janganlah Berduka Cita, Allah Beserta Kita

(QS. At-Taubah : 40)

خَيْرُ النَّاسِ أَنْفَعُهُمْ لِلنَّاسِ

Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia

(HR. Ahmad, ath-Thabrani, ad-Daruqutni. Hadits ini dihasankan oleh al-Albani di dalam Shahihul Jami' no:3289)

*Success Consists of Going From Failure to Failure Without Loss of Enthusiasm*

Sukses terdiri dari keberlanjutan kesalahan demi kesalahan tanpa kehilangan rasa antusias

(Winston Churchill)

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga kecilku yang selalu memberikan Doa, Semangat, Saran, Bimbingan dan bantuan baik secara moril dan materiil.
2. Almamater Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil Universitas Jember.
3. Bapak Dr. Ir. Krisnamurti M.T. dan Ibu Winda Triwahyuningtyas S.T.,M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa sabar dalam membimbing saya, serta dosen dan tenaga pengajar lain yang membantu saya dalam proses belajar.
4. Sahabat senyum yang sudah menemani penulis sejak masa mahasiswa baru.
5. Kawan-Kawan Biji Besi teknik sipil 2016, sebagai keluarga baru bagi penulis selama melakukan studi S1 di Universitas Jember.
6. Semua pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu. Terimakasih atas bantuannya.

## PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Thilal Syihabuddin

NIM : 161910301134

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya tulis ilmiah yang berjudul “Pemodelan Keruntuhan Balok Baja Akibat Paparan Api Lokal dengan Program Abaqus” adalah benar-benar karya sendiri, kecuali kutipan yang telah disebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan jiplakan. Saya bertanggung jawab akan keabsahaan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini penulis berikan dengan sebenarnya tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 27 Mei 2020

Yang menyatakan,

Thilal Syihabuddin

NIM. 161910301134

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Pemodelan Keruntuhan Balok Baja Akibat Paparan Api Lokal dengan Program Abaqus” telah diuji dan disahkan pada :

Hari /Tanggal : Jum’at / 19 Juni 2020

Tempat :

Tim Pembimbing,

Dosen Pembimbing Utama

Dosen Pembimbing Anggota

Dr. Ir. Krisnamurti, M.T.

Winda Tri Wahyuningtyas, S.T., M.T

NIP. 19661228 199903 1 002

NIP. 760016771

Tim Penguji,

Dosen Penguji Utama

Dosen Penguji Anggota

Luthfi Amri Wicaksono, S.T., M.T.

Akhmad Hasanuddin, S.T.,M.T.

NIP. 760016771

NIP.19710327 199803 1 003

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.

NIP. 197008261997021001

**HALAMAN PEMBIMBING  
SKRIPSI**

“Pemodelan Keruntuhan Balok Baja Akibat Paparan Api Lokal  
dengan Program Abaqus”

*“Modeling Of Steel Beam Collapse Due To Local Fire Exposure  
using The Abaqus Program”*

Oleh :

Thilal Syihabuddin

NIM. 161910301134

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Ir. Krisnamurti, M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Winda Tri Wahyuningtyas, S.T., M.T



## RINGKASAN

**Pemodelan Keruntuhan Balok Baja Akibat Paparan Api Lokal dengan Program Abaqus**, Thilal Syihabuddin, 161910301134, 2020; Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember.

Baja akan mengalami pelemahan kekuatannya ketika terpapar oleh api, sehingga informasi mengenai penurunan kekuatan baja akibat paparan api diperlukan terutama kemampuannya dalam menahan beban terlebih lagi mengingat besarnya lendutan yang terjadi pada baja saat terpapar api. Penelitian ini bertujuan membuat pemodelan tiga dimensi menggunakan metode elemen hingga untuk menentukan kemampuan baja dalam menahan beban saat terpapar api. Pembebanan yang diberikan pada balok baja berupa beban gravitasi dan beban pemanasan menggunakan paparan api nonlinier. Pemodelan paparan api hanya diberikan dalam fase pemanasan.

Penelitian ini menyajikan lendutan yang terjadi pada baja ketika diberi beban gravitasi dan kemudian diberikan paparan api hingga mencapai suhu 770°C. Besar lendutan yang terjadi berbanding lurus dengan jumlah gaya reaksi yang dibatasi, dimana besar lendutan yang paling sesuai dengan data uji adalah -271.52 mm. Tingkat kesesuaian hasil pemodelan jika dibandingkan dengan data uji sebesar 0,85%, sehingga dapat dinyatakan bahwa hasil pemodelan sesuai dengan data uji. Besarnya lendutan yang terjadi dipengaruhi oleh adanya tahanan aksial dan torsi.



## SUMMARY

**Modeling Of Steel Beam Collapse Due To Local Fire Exposure using The Abaqus**, Thilal Syihabuddin, 161910301134, 2020; Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember.

Steel will experience a weakening of strength when exposed to fire, so the information about the decrease in strength of steel due to fire exposure is needed, especially its ability to withstand loads considering the big deflection that occurs in steel when exposed to fire. This study aims to make a three-dimensional model using the finite element method to determine the ability of steel to withstand the load when exposed to fire. The Load given to steel beams is in the form of gravity loads and heating loads using nonlinear fire exposure. Fire exposure modeling is only given in the heating phase.

This reasearch presents deflection that occurs in steel when given a gravity load and then given exposure to fire until it reaches a suhu of 770°C. The deflection value that occurs is directly proportional to the limited number of reaction forces, where the deflection size that best matches the test data is -271.52 mm. The suitability level of the modeling results when compared with the test data is 0.85%, so it can be stated that the modeling results are in accordance with the test data. The amount of deflection that occurs is influenced by the presence of axial resistance and torque

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT selalu penulis panjatkan, atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga tugas akhir yang berjudul “Pemodelan Keruntuhan Balok Baja Akibat Paparan Api Lokal dengan Program Abaqus ” dapat terselesaikan. Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Strata 1 pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penulis menyadari dalam penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang senantiasa memberikan perhatian, bimbingan, dan petunjuk baik secara langsung maupun tidak langsung. Dalam kesempatan ini pula, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Dr. Gusfan Halik S.T.,M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember serta Dosen Pembimbing Akademik penulis selama 8 semester perkuliahan.
3. Ibu Dr. Anik Ratnaningsih, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sipil Universitas Jember.
4. Bapak Dr. Ir. Krisnamurti M.T. dan Ibu Winda Triwahyuningtyas S.T.,M.T. selaku dosen pembimbing serta dosen-dosen lain yang membantu saya dalam proses belajar.

Pembahasan penelitian tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, untuk itu penulis berharap adanya saran dan kritik yang membangun pada penulisan tugas akhir ini. Akhirnya, penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat. Aamiin.

Jember, 27 Mei 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL LUAR</b> .....	<b>i</b>
<b>HALAMAN JUDUL DALAM</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	<b>iv</b>
<b>PERNYATAAN</b> .....	<b>v</b>
<b>HALAMAN PEMBIMBING</b> .....	<b>vi</b>
<b>PENGESAHAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>viii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>ix</b>
<b>PRAKATA</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GRAFIK</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvi</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Paparan Api Lokal.....	11
2.3 Penyerapan Panas.....	12
2.4 Penyebaran Api.....	13
2.5 Pemuaian Baja.....	13
2.6 Pemodelan Menggunakan Program Bantu Abaqus.....	14

2.6.1 Satuan ( <i>Units</i> ) .....	15
2.6.2 Tipe Elemen .....	15
2.6.3 Geometri Elemen Balok.....	16
2.7 Deformasi Pada Balok.....	16
2.7.1 Deformasi Izin.....	17
<b>BAB 3 METODOLOGI.....</b>	<b>18</b>
3.1. Jenis Penelitian .....	18
3.2. Data-Data Penelitian.....	18
3.2.1. Dimensi Baja.....	18
3.2.2. Mutu Baja.....	19
3.3. Tahapan Penelitian .....	20
3.3.1. Pemodelan dengan Menggunakan Program Bantu Abaqus....	20
3.3.2. Validasi. ....	21
3.3.3. Perbandingan Hasil Pemodelan dengan Hitungan Manual....	21
3.3.4. Analisis Hasil dan Pembahasan. ....	21
3.4. Bagan Alir Penelitian .....	22
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>23</b>
4.1 Model Baja. ....	23
4.1.1 Baja yang dimodelkan.....	23
4.1.2 Data Material.....	25
4.1.3 Pembebanan .....	27
4.1.4 <i>Mesh</i> dan Elemen .....	28
4.2 Kondisi Batas.....	28
4.3 Pembebanan Thermal .....	30
4.3.1 Detail Pembebanan Thermal.....	30
4.3.2 Defleksi pada Data uji dari Li dan Guo (2008).....	32
4.4 Hasil dan Analisis Pemodelan. ....	33
4.4.1 Pengaruh Kondisi Batas .....	35
4.4.2 Validasi .....	38
4.4.3 Perbandingan dengan hitungan manual .....	41
4.4.4 Pengaruh Paparan Api Lokal .....	42

<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>46</b>
5.1 Kesimpulan.....	46
5.2 Saran.....	47
<b>Daftar Pustaka.....</b>	<b>48</b>



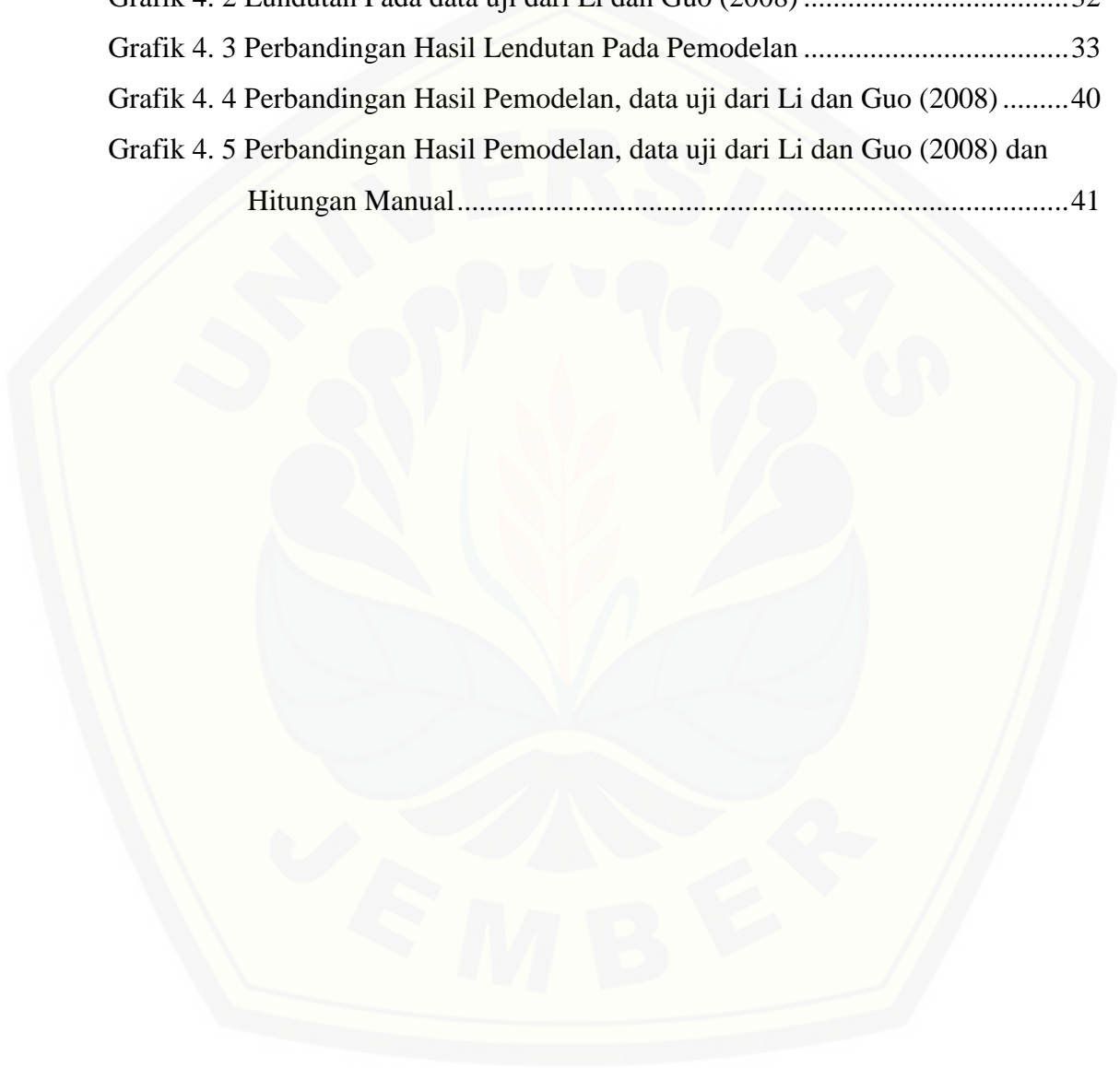
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Posisi Paparan api lokal pada balok baja .....	6
Gambar 2.2 Kurva perubahan suhu yang terjadi akibat paparan api lokal yang diaplikasikan balok baja.....	6
Gambar 2.3 Perbandingan beban runtuh untuk W30X292 hanya didukung balok dengan beban yang terdistribusi (a) secara analitik, (b) metode numerik elemen hingga. (Sumber: Hemmati, 2019).....	7
Gambar 2.4 Prediksi defleksi di tengah bentang dengan menggunakan beberapa aplikasi dan skema numerik (Sumber: Gillie, 2009) .....	8
Gambar 2.5 Gradasi suhu dengan distribusi tidak merata pada balok baja akibat paparan api lokal pada struktur. (Sumber : Zheng, 2013) .....	9
Gambar 2.6 Distribusi suhu pada balok yang terkena api lokal pada fase pemanasan dan pendinginan (Sumber:Zheng, 2013) .....	10
Gambar 2.7 Distribusi Suhu pada balok baja akibat paparan Api Lokal (Sumber : Hemmati, 2019) .....	11
Gambar 2. 8 Distribusi Penyerapan Panas, (Sumber : Hemmati, 2019) .....	12
Gambar 2. 9 Elemen yang sering digunakan, .....	15
Gambar 2. 10 Geometri Elemen yang sering digunakan, (Sumber : Simula,2014). 16	
Gambar 3 1 Ilustrasi Baja Profil WF.....	19
Gambar 4. 1 (a) Baja yang akan dimodelkan (b) Sketsa Baja (Li and Guo, 2008)..	24
Gambar 4. 2 (a) Seluruh Model (b) Detail Sketsa Model .....	25
Gambar 4. 3 Detail Pembebanan.....	27
Gambar 4. 4 Mesh 50 mm.....	28
Gambar 4. 5 <i>Constraint</i> Pada Reference Point (RP-1) .....	29
Gambar 4. 6 Kondisi Batas <i>Stiffner</i> .....	29



## DAFTAR GRAFIK

Grafik 4. 1 Peningkatan Suhu pada bagian-bagian baja .....	31
Grafik 4. 2 Lundutan Pada data uji dari Li dan Guo (2008) .....	32
Grafik 4. 3 Perbandingan Hasil Lendutan Pada Pemodelan .....	33
Grafik 4. 4 Perbandingan Hasil Pemodelan, data uji dari Li dan Guo (2008) .....	40
Grafik 4. 5 Perbandingan Hasil Pemodelan, data uji dari Li dan Guo (2008) dan Hitungan Manual .....	41





## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Satuan Konsisten.....	15
Tabel 2. 2 Batas Deformasi.....	17
Tabel 3. 1 Dimensi Balok digunakan.....	18
Tabel 3. 2 Perubahan kekuatan baja akibat adanya peningkatan suhu. ....	19
Tabel 4. 1 Penurunan Mutu baja akibat Perubahan Suhu .....	26
Tabel 4. 2 Kondisi Batas .....	30
Tabel 4. 3 Detail lendutan pemodelan tiap 4 menit .....	34
Tabel 4. 4 Perbandingan Hasil Lendutan pada Kondisi Batas (1) dan (2).....	35
Tabel 4. 5 Perbandingan Hasil Lendutan pada Kondisi Batas (3) dan (4).....	36
Tabel 4. 6 Perbandingan Hasil Lendutan pada Kondisi Batas (5) dan (6).....	37
Tabel 4. 7 Validasi Lendutan .....	38
Tabel 4. 8 Perbandingan Hasil Pemodelan dan data uji dari Li dan Guo (2008).....	39
Tabel 4. 9 Plastisitas yang terjadi pada Baja.....	43
Tabel 4. 10 Perpanjangan Longitudinal Baja.....	44
Tabel 4. 11 Tekanan yang terjadi pada baja.....	45

## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada saat ini pemakaian baja untuk pembangunan di Indonesia semakin meningkat. Hal ini dapat dilihat dari pertumbuhan konsumsi baja yang lebih agresif hingga 84 kg/ kapita pada tahun 2020 (Rusli, 2018). Peningkatan anggaran Infrastruktur dan Relokasi ibu kota dari Jakarta ke Kalimantan timur menunjukkan potensi permintaan baja dalam jangka panjang. Selain itu, peningkatan produksi baja akibat investasi pada industri pembuatan baja menunjukkan akan adanya peningkatan penggunaan baja di Indonesia.

Banyak studi secara eksperimental maupun numerik tentang baja dengan tujuan untuk mengukur keruntuhannya saat terjadi kebakaran. Studi tersebut diawali oleh runtuhnya gedung World Trade Center di New York akibat serangan kelompok teroris pada tahun 2001. Indonesia juga pernah mengalami teror serupa pada tahun 2002 yaitu terjadi pengeboman di Bali. Kemudian, pada tahun 2017 terjadi kebakaran selama 60 jam pada Grenfell tower, Inggris. Kejadian-kejadian tersebut menunjukkan keruntuhan suatu bangunan akibat paparan api atau biasa disebut kebakaran.

Kebakaran umumnya akan mengalami enam tahap, yaitu: pengapian, pertumbuhan, *flashover*, pengembangan api penuh atau pembakaran terus-menerus, peredupan, dan pemadaman api (Drysdale, 1999). Kebakaran pada areal yang luas dan memiliki tingkat pelepasan panas tinggi dapat menyebabkan *flashover* dan mengakibatkan api menyebar ke seluruh bagian konstruksi yang dikategorikan pada Paparan Api Non-Lokal. Akan tetapi, bila tingkat pelepasan panas akibat kebakaran tidak cukup untuk mencapai *flashover* sehingga kebakaran hanya terjadi

pada lokasi tertentu , maka pemanasan baja pada konstruksi bersifat tidak merata yang dikategorikan Paparan Api Lokal (Hemmati and Mahmoud, 2019). Material baja umumnya akan mengalami penurunan kekuatan seiring dengan meningkatnya suhu.

Pada umumnya baja memiliki keunggulan dibandingkan beton, tetapi baja akan mengalami penurunan tegangan leleh apabila terjadi peningkatan suhu akibat paparan api. Belum banyak penelitian yang melaporkan mengenai ketahanan konstruksi baja akibat paparan api. Sementara itu, jumlah kebakaran yang terjadi di Indonesia cukup tinggi. Pada tahun 2018 terdapat 692 kejadian kebakaran di DKI Jakarta, rata-rata kebakaran terjadi di pemukiman (Jakarta Open Data, 2019). Kemudian, kebakaran hutan yang terjadi di pulau Sumatra dan Kalimantan juga menunjukkan bahwa banyak kejadian kebakaran di Indonesia. Oleh karena itu informasi tentang perubahan kekuatan konstruksi baja akibat terkena api sangat dibutuhkan sebagai pertimbangan terhadap kondisi bangunan pasca terjadinya kebakaran.

Meskipun keruntuhan bangunan dari baja pada saat terjadi kebakaran jarang terjadi. Akan tetapi, Pemahaman mengenai perilaku struktural baja saat terjadi kebakaran sangat dibutuhkan sebagai pertimbangan terhadap kondisi baja setelah kebakaran serta dapat mengurangi kerugian ekonomi dan sosial ketika terjadi kebakaran pada sebuah bangunan baja.

Li dan Guo (2008) melakukan eksperimen mengenai karakteristik baja apabila dipanaskan dalam kondisi terkekang secara aksial yang menunjukkan adanya peningkatan deformasi seiring meningkatnya suhu balok baja, meskipun lebih kecil hasilnya bila dibandingkan dengan baja pada kondisi terisolasi.

Pada Penelitian ini struktur balok baja dalam penelitian Li dan Guo (2008) akan dimodelkan dengan beberapa perletakan sederhana dengan

menggunakan program Abaqus. Kemudian, hasil dari pemodelan akan dibandingkan dengan hasil dari data uji dari Li dan Guo (2008).

#### 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana kesesuaian antara pemodelan menggunakan program bantu abaqus dengan data uji dan hitungan manual mengenai besarnya lendutan pada balok baja yang diberi paparan api lokal?
2. Bagaimana pengaruh kondisi batas pada perletakan terhadap lendutan yang terjadi pada pemodelan?
3. Bagaimana efek paparan api lokal terhadap peningkatan lendutan balok akibat penurunan tegangan leleh baja?

#### 1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui kesesuaian hasil antara pemodelan menggunakan program bantu abaqus dengan data uji dan hitungan manual dengan indikator besarnya lendutan pada balok baja yang diberi paparan api lokal.
2. Mengetahui dan menganalisis pengaruh kondisi batas pada perletakan terhadap lendutan yang terjadi pada pemodelan.
3. Mengetahui dan menganalisis efek paparan api lokal terhadap peningkatan lendutan balok akibat penurunan tegangan leleh baja.

#### 1.4 Manfaat

1. Mampu menganalisis dan menentukan kesesuaian antara pemodelan dengan data uji dan hitungan manual.
2. Mampu menganalisis pengaruh kondisi batas pada perletakan terhadap lendutan yang terjadi pada pemodelan.
3. Mampu menganalisis pengaruh efek paparan api lokal terhadap lendutan yang terjadi pada pemodelan.

4. Sebagai Rujukan dalam mendesain ulang baja akibat paparan api lokal.

#### 1.5 Batasan Masalah

1. Pemodelan balok baja dilakukan pada saat baja mengalami paparan api lokal dengan distribusi suhu memanjang tidak merata dengan asumsi tidak adanya *Lateral Torsional Buckling*.
2. Interaksi antara balok dengan struktur sekitarnya diabaikan.
3. Koefisien pemuaian baja adalah  $1.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ . (SNI 1729-2015).
4. Lendutan yang diambil adalah lendutan di tengah bentang.
5. Paparan api yang diberikan pada baja hanya pada fase pemanasan.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian telah dilakukan mengenai respon material baja terhadap paparan api lokal. (Hemmati and Mahmoud, 2019) melakukan penelitian dengan tujuan pengembangan rumusan matematis untuk mencari beban maksimum pada bangunan kondisi suhu tinggi karena api lokal dengan nilai kekuatan baja menurun seiring dengan suhu. Validasi ditunjukkan melalui perbandingan antara hasil analisis dan hasil yang diperoleh dengan menggunakan ABAQUS 6.14. perangkat lunak elemen hingga. Rumusan yang dikembangkan digunakan dalam kerangka kerja *performance-based fire engineering* (PBFE) probabilistik menggunakan MATLAB 8.6 untuk mengembangkan kurva kerapuhan untuk balok di bawah bahaya kebakaran lokal. Pembebanan yang diberikan berupa beban mekanik dan thermal pada balok baja. Beban mekanik terdiri dari beban mati dan beban hidup yang berubah titik dalam waktu, sedangkan beban thermal kejadiannya diungkapkan dengan persamaan (1)

$$\vartheta_g = 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-0.7t^*} - 0.427e^{-19t^*}) + 120^\circ C \quad (1)$$

dimana  $t^*$  dan  $\Gamma$  dihitung dengan persamaan (2) dan (3)

$$t^* = \Gamma t \quad (2)$$

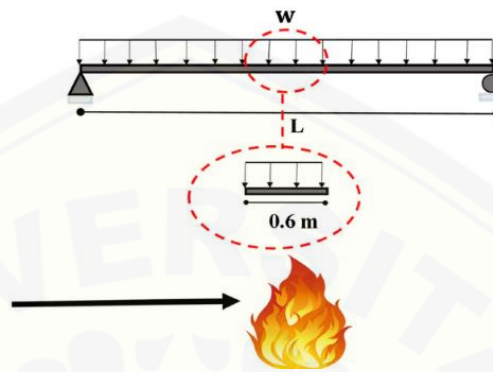
dan

$$\Gamma = \left[ \frac{\left(\frac{O}{0.04}\right)^2}{\left(\frac{b}{160}\right)^2} \right] \quad (3)$$

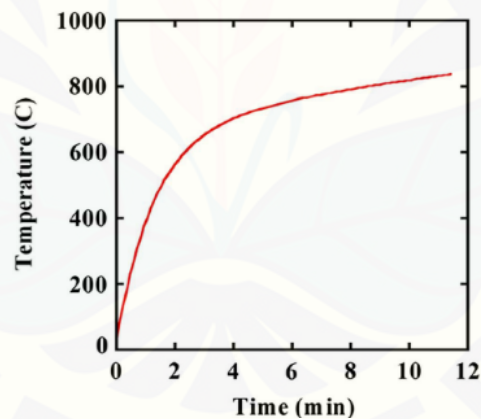
dimana  $t$  adalah waktu,  $O$  adalah faktor pembuka dan  $b$  adalah absorpsivitas thermal. Diasumsikan bahwa kepadatan beban api dimulai dari  $0 \text{ MJ/m}^2$  sampai  $1000 \text{ MJ/m}^2$  dengan peningkatan  $25 \text{ MJ/m}^2$ . Kepadatan beban api



spesifik diterapkan pada segmen 0,6 m dari balok (0,3 m ke kanan dan ke kiri tengah balok) seperti Gambar 2.1 diperoleh kurva suhu versus seperti Gambar 2,2.



Gambar 2. 1 Posisi Paparan api lokal pada balok baja  
(Sumber: Hemmati, 2019)

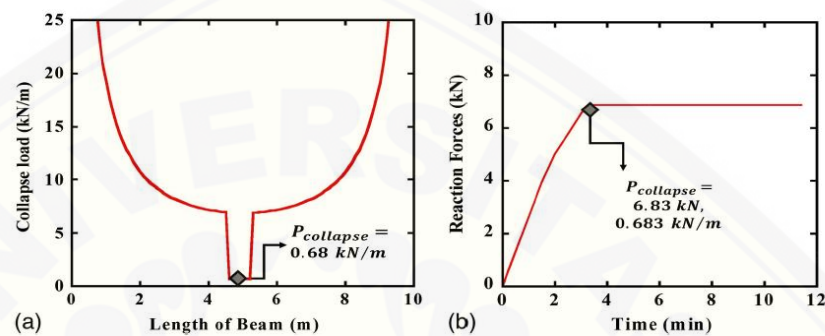


Gambar 2. 2 Kurva perubahan suhu yang terjadi akibat paparan api lokal yang diaplikasikan balok baja

(Sumber: Hemmati, 2019)



Analisis keruntuhan dilakukan secara analitik menggunakan software MATLAB diperoleh seperti Gambar 2.3(a), dimana beban keruntuhannya 0,68 kN/m. Analisis dengan metode numerik elemen hingga dilakukan menggunakan software ABAQUS 6.14 hasilnya terlihat pada Gambar 2.3(b), dimana beban keruntuhannya 0,683 kN/m.



Gambar 2. 3 Perbandingan beban runtuh untuk W30X292 hanya didukung balok dengan beban yang terdistribusi (a) secara analitik, (b) metode numerik elemen hingga. (Sumber: Hemmati, 2019)

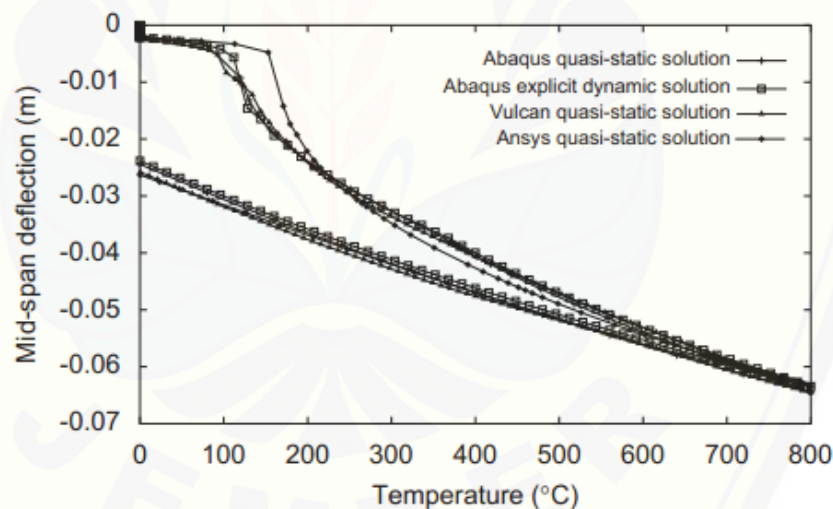
dapat disimpulkan bahwa pendekatan analitis yang dilakukan oleh Hemmati (2019) berdasarkan posisi sendi plastis yang bergerak dari sisi kiri dan kanan sejauh 0.1 meter mendapatkan hasil yang sama dengan analisis dengan program bantu abaqus. Dengan keruntuhan terjadi di tengah bentang dan distribusi suhu tidak merata akibat paparan api lokal.

(Gillie, 2009) memberikan sebuah patokan dalam menganalisis balok baja pada kondisi kebakaran. Pemodelan dilakukan dengan program bantu abaqus dengan kondisi mulai kebakaran sampai pemadaman api. Model balok baja diberikan suhu  $0^{\circ}\text{C}$  -  $800^{\circ}\text{C}$  dengan distribusi suhu merata pada setiap bentang kemudian suhu diturunkan kembali dari  $800^{\circ}\text{C}$  -  $0^{\circ}\text{C}$ .

Data-data yang digunakan untuk mengestimasi perilaku balok dilakukan pemodelan dengan program bantu abaqus; Kekuatan leleh baja ( $f_y$ ) berkurang secara linear dari 250 MPa sampai 0 Mpa pada suhu  $0^{\circ}\text{C}$

sampai 1000°C. Modulus Young's (E) dan Koefisien ekspansi termal berturut-turut 207 GPa dan  $1.4 \times 10^{-5}$  °C. Penelitian ini dapat menjadi patokan untuk mendesain struktur pada kondisi suhu tinggi. Pada Penelitian ini dicontohkan sebuah balok baja sederhana dengan bentang 1 meter dengan 3D model berbentuk Shell yang digunakan untuk menghitung deformasi di tengah bentang yang berubah seiring dengan perubahan suhu seperti yang tertera pada Gambar 2.4.

Gambar 2.4 menunjukkan kenaikan deformasi pada balok baja seiring naiknya suhu dari beberapa analisis dengan program dan metode berbeda. Didapatkan hasil lendutan yang mirip, akan tetapi pada fase pertama pemanasan bentuk kurva bervariasi yang menandakan perbedaan deformasi pada fase pertama setiap analisis.



Gambar 2. 4 Prediksi defleksi di tengah bentang dengan menggunakan beberapa aplikasi dan skema numerik (Sumber: Gillie, 2009)

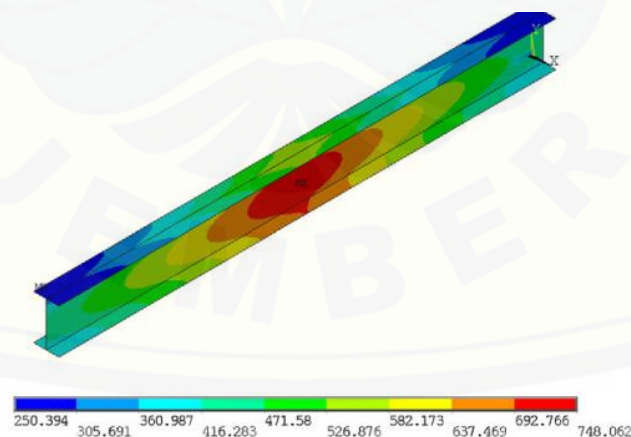
Dari penelitian ini, Gillie (2009) memberikan sebuah patokan pada saat mendesain bangunan ketika terjadi kebakaran, pada pemodelan struktur saat terjadi kebakaran seharusnya juga memerhatikan siklus pemanasan dan pendinginan secara penuh. Gillie (2009) menunjukkan

bahwa perubahan suhu pada struktur balok baja dapat meningkatkan defleksi yang menunjukkan kerusakan pada struktur baja. Sehingga, ketika membuat desain dan analisis saat terjadi kebakaran diperlukan untuk mengidentifikasi kondisi dan posisi struktur yang paling rusak.

(Marx, 2018) melakukan eksperimen pada sistem lantai pada balok seluler baru (novel cellular beam) berupa balok lantai dan baja struktural yang dilakukan untuk menentukan tingkat kesalahan model elemen hingga pada program abaqus, hasilnya model abaqus dinyatakan memiliki nilai korelasi yang baik.

(Iqbal and Harichandran, 2010) melakukan prediksi kapasitas lentur pada struktur ketika terjadi kebakaran, pada kondisi balok dengan tumpuan sederhana kapasitas lentur dianalisa sesuai dengan AISC. Iqbal (2010) melakukan penelitian pada gedung perkantoran di USA.

(Zhang, Gross and McAllister, 2013) melakukan penelitian tentang pengaruh api lokal dan gradasi suhu terhadap perilaku baja WF pada kondisi paparan api lokal ISO834 dibandingkan dengan distribusi suhu merata sepanjang bentang.

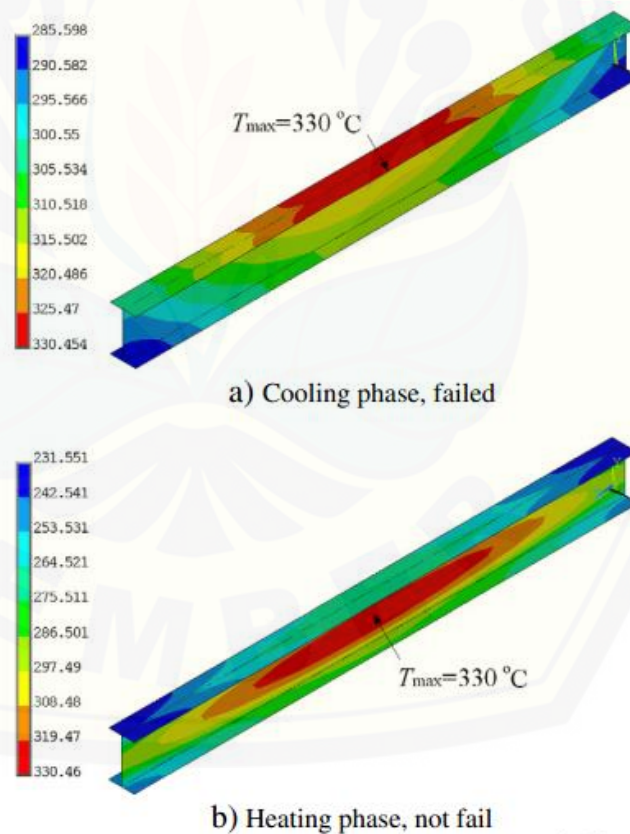


Gambar 2. 5 Gradasi suhu dengan distribusi tidak merata pada balok baja akibat paparan api lokal pada struktur. (Sumber : Zheng, 2013)

Pada kondisi paparan api lokal adalah distribusi suhu tidak merata seperti yang tertera pada Gambar 2.5. Gradasi warna merah mewakili suhu

692°C, warna kuning 582 °C, sampai dengan warna biru pada suhu 250 °C. Suhu paling tinggi berada di tengah bentang dengan karena letak api lokal berada di tengah bentang.

Pada penelitian ini Zhang (2013) menghitung aliran panas akibat paparan api lokal. Serta, tempertaur baja yang terkena paparan panas dan sifat baja pada suhu tinggi. Pada penelitian ini, Zhang (2013) menyatakan bahwa gradasi suhu memengaruhi kapasitas tekuk torsi lateral pada kondisi kebakaran dan suhu kritis dari balok baja pada kondisi lapangan mungkin ratusan derajat lebih rendah dibandingkan paparan api lokal ISO834. Hasil tertera pada Gambar 2.6 dengan nilai suhu maksimal 330°C. Serta, diketahui balok baja mengalami keruntuhan pada fase pendinginan.



Gambar 2. 6 Distribusi suhu pada balok yang terkena api lokal pada fase pemanasan dan pendinginan (Sumber:Zheng, 2013)

## 2.2 Paparan Api Lokal

Kebakaran umumnya akan mengalami enam tahap: pengapian, pertumbuhan, flashover, pengembangan api penuh atau pembakaran terus-menerus, peredupan, dan pemadaman api. Flashover adalah transisi cepat antara kebakaran dilokalisasi dengan paparan api lokal dan kebakaran kompartemen ketika semua permukaan bahan bakar terbakar. (Drysedale, 1999)

Beban Kebakaran dibagi menjadi dengan kebakaran dengan paparan api lokal dan kebakaran kompartemen. Penelitian ini akan membahas mengenai kebakaran dengan paparan api lokal dan beban keruntuhan akibat adanya distribusi suhu memanjang tidak merata, dikarenakan pada pembakaran setempat di tengah bentang balok baja, pada kebakaran dengan paparan api lokal suhu di dekat sumber lebih panas dibandingkan yang jauh dari sumber, ilustrasi penyebaran panas pada api lokal terdapat pada Gambar 2.7. Serta, LTB pada suhu tak merata memiliki Suhu Kritis lebih rendah dari Suhu Merata (Zhang, Gross and McAllister, 2013)



Gambar 2. 7 Distribusi Suhu pada balok baja akibat paparan Api Lokal  
(Sumber : Hemmati, 2019)



### 2.3 Penyerapan Panas

Penyerapan panas merupakan kemampuan material menyerap panas,  $b$ , adalah jumlah panas yang dapat diserap oleh sebuah material. nilai penyerapan panas dapat dihitung dengan : (Iqbal, 2010)

$$b = \sqrt{k\rho c_p} \quad (4)$$

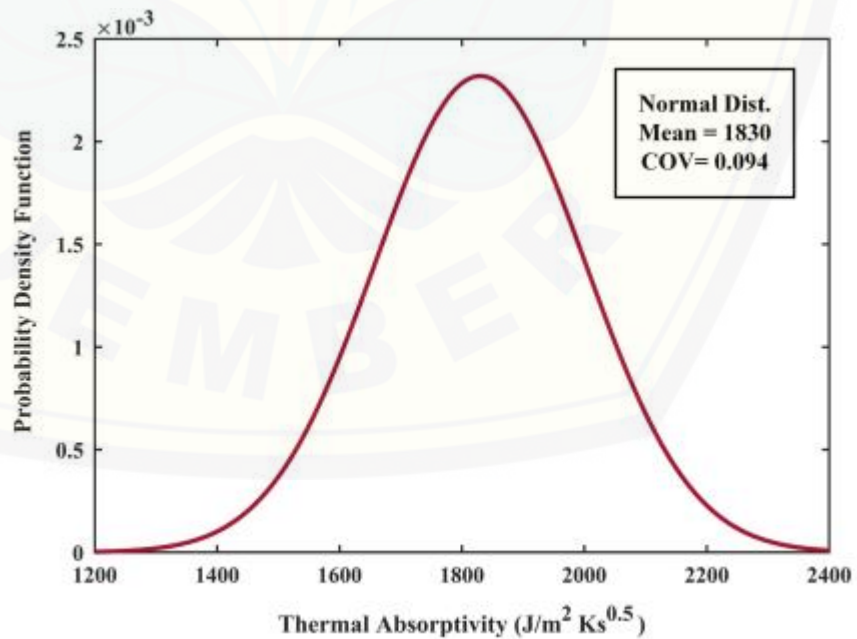
dimana:

$k$  = konduktivitas suhu

$\rho$  = massa jenis

$c_p$  = Suhu Spesifik Material

Hemmati (2019) mendapatkan nilai rata-rata dan koefisien distribusi penyerapan panas adalah  $1830 \text{ J/m}^2$  dan  $0.094$ . Gambar 2.8 menjelaskan mengenai grafik distribusi penyerapan panas oleh Hemmati (2019)



Gambar 2. 8 Distribusi Penyerapan Panas, (Sumber : Hemmati, 2019)

#### 2.4 Penyebaran Api

Material Baja Umumnya diberi Proteksi dari api baik berupa Spray maupun dengan menggunakan Sistem Papan. Meskipun Penyebaran Panas Umumnya bervariasi bergantung pada suhu, keruntuhan untuk baja struktural adalah pada suhu 400°C sampai 600°C. Sehingga suhu kritis yang bisa digunakan dalam desain adalah 500°C. Nilai Umum dari Penyebaran Api adalah 0.15 W/ m·K dan 0.20 W/ m·K (Iqbal, 2010)

#### 2.5 Pemuaian Baja

Pemuaian Terjadi ketika baja dipanaskan sehingga partikel baja saling menjauh yang membuat baja memuai. Koefisien muai termal sesuai dengan SNI 1729-2015 Lampiran 4.2.3.1(a) tentang Perpanjangan akibat Termal, koefisien muai : “Untuk perhitungan pada suhu dibawah 150 °F (65°C), koefisien muai termal harus  $7.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$  ( $1.4 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )”.

Pada suhu lebih tinggi digunakan koefisien muai termal  $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ . sesuai dengan RSNI T-03-2005 dan Gillie (2009). Perhitungan panjang balok akibat kenaikan suhu dapat ditulis sebagai berikut:

$$L_1 = L_0(1 + \alpha(T_2 - T_1)) \quad (5)$$

Dimana :

$L_1$  : Panjang Akhir (m)

$L_0$  : Panjang Awal (m)

$\alpha$  : Koefisien Muai ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_2$  : Suhu Akhir ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_1$  : Suhu Awal ( $^{\circ}\text{C}$ )



## 2.6 Pemodelan Menggunakan Program Bantu Abaqus

Pemodelan dengan program bantu abaqus digunakan untuk menganalisis perilaku struktur ketika diberikan beban dengan pendekatan secara numerik. Program bantu elemen hingga seperti abaqus melakukan analisis dengan membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil dengan bentuk geometri tertentu kemudian menganalisis elemen-elemen kecil tersebut sampai pada kondisi inelastis.

Abaqus merupakan program bantu elemen hingga yang dapat melakukan analisis mulai dari analisis linier sederhana sampai analisis nonlinier. Program abaqus memiliki beberapa model material yang dapat mensimulasikan perilaku sebagian besar bahan. Bahan yang termasuk logam, karet, polimer, komposit, beton bertulang, busa yang lentur dan kuat, dan bahan geoteknik seperti tanah dan batuan.

### 2.6.1 Satuan (*Units*)

Abaqus tidak memiliki satuan langsung dalam program, sehingga data-data yang dimasukkan harus memiliki suatu satuan konsisten. Satuan yang digunakan umumnya adalah salah satu dari 4 satuan konsisten yang tertera pada Tabel 2.1.

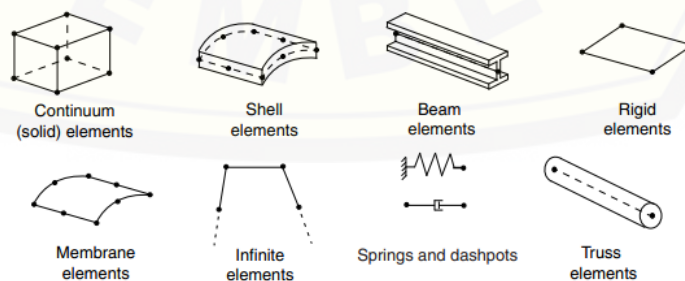
Tabel 2. 1 Satuan Konsisten

Satuan	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
<b>Panjang</b>	m	mm	ft	in
<b>Gaya</b>	N	N	lbf	lbf
<b>Massa</b>	Kg	Ton	Slug	lbf s <sup>2</sup> /in
<b>Tegangan</b>	Pa (N/m <sup>2</sup> )	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	lbf/ft <sup>2</sup>	psi(lbf/ft <sup>2</sup> )
<b>Waktu</b>	s	s	s	s
<b>Energi</b>	J	mJ (10 <sup>-3</sup> J)	ft lbf	in lbf
<b>Massa Jenis</b>	Kg/m <sup>3</sup>	Ton/mm <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	lbf s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>

(Sumber : Dassault Systèmes, 2014)

### 2.6.2 Tipe Elemen

Abaqus menyediakan beberapa elemen yang dapat digunakan, elemen tersebut diadaptasi dari perhitungan dan rumus pada analisis dengan metode elemen hingga. Beberapa perhitungan yang tersedia dalam program bantu abaqus; elemen-elemen yang sering digunakan pada program bantu abaqus dapat dilihat pada gambar 2.9.

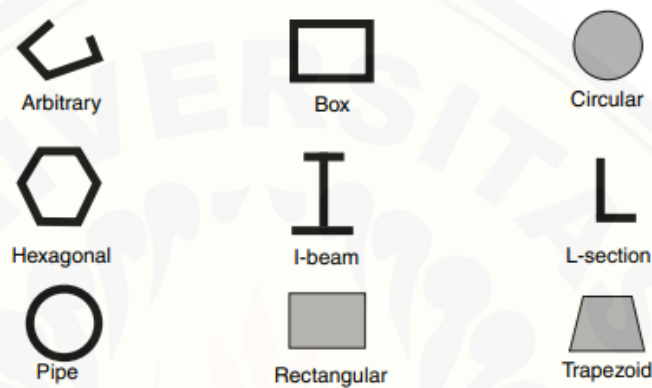


Gambar 2. 9 Elemen yang sering digunakan,

Sumber : Dassault Svstèmes .2014

### 2.6.3 Geometri Elemen Balok

Pemodelan geometri elemen balok bisa dilakukan dengan menggunakan balok yang sudah ada di abaqus maupun dengan menentukan sendiri dimensi balok. Abaqus memiliki beberapa geometri elemen balok yang dapat digunakan, seperti yang terlihat pada Gambar 2.10 (Dassault Systèmes, 2014)



Gambar 2. 10 Geometri Elemen yang sering digunakan,  
(Sumber : Simula,2014)

### 2.7 Deformasi Pada Balok

Deformasi adalah salah satu indikator yang digunakan untuk mengontrol kesetabilan elemen balok terhadap kekuatannya. Deformasi menyatakan perubahan elemen struktur dalam sebuah lengkungan ( $\varphi$ ) dan perubahan posisi sebuah titik bentang balok ke titik yang lain atau lendutan akibat pemberian beban pada balok tersebut.

Deformasi pada balok dengan beban merata sepanjang bentang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (6) :

$$\Delta = \frac{PL^3}{24EI} \times \left[ \frac{3a}{L} - \frac{4a^3}{L^3} \right] \quad (6)$$

Dimana :

$\Delta$  : Lendutan (m)

P : Beban Terpusat ( Kg)

E : Modulus Elastisitas Baja (MPa)

I : Inersia Balok ( $m^4$ )

L: Panjang Balok (m)

a: Jarak antara Perletakan dan Beban (m)

#### 2.7.1 Deformasi Izin

Deformasi izin merupakan batas-batas kemampuan layan yang disesuaikan dengan sifat struktur, fungsi penggunaan, sifat pembebanan, serta elemen-elemen yang didukung oleh struktur tersebut. Syarat deformasi izin tertera pada SNI – 03 – 1729 -2002 (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Syarat ini menggunakan SNI lama karena belum ada perubahan syarat derformasi izin pada SNI Terbaru.

Batas-batas kemampuan layang tersebut bisa berupa batas-batas lendutan seperti yang tertera pada Tabel 2.2, dengan nilai L adalah panjang batang, h adalah tinggi tingkat, beban tetap adalah beban mati dan hidup, beban sementara meliputi beban gempa atau beban angin. (SNI – 03 – 1729 -2002 )

Tabel 2. 2 Batas Ledutan Maksimum

Komponen struktur dengan beban tidak terfaktor	Beban tetap	Beban sementara
Balok pemikul dinding atau finishing yang getas	L/360	-
Balok biasa	L/240	-
Kolom dengan analisis orde pertama saja	h/500	h/200
Kolom dengan analisis orde kedua	h/300	h/200

( Sumber : SNI – 03 – 1729 -2002)

## BAB 3 METODOLOGI

### 3.1. Jenis Penelitian

Penelitian Ini pemodelan sebuah balok baja pada kondisi paparan api lokal yang kemudian dibandingkan dengan yang diprasyarkan oleh SNI 1729:2015 menggunakan program bantu abaqus, sehingga akan didapatkan perbandingan kekuatan struktur dari deformasi yang terjadi.

### 3.2. Data-Data Penelitian

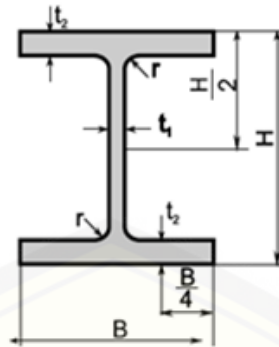
Seluruh data yang digunakan dalam pemodelan ini diambil dari data uji penelitian Li dan Guo (2008). Data-data yang diambil berupa dimensi baja, Mutu baja, pembebanan setempat, suhu yang terjadi pada balok baja. Sedangkan, data-data yang diperlukan namun tidak disebutkan akan diasumsikan sesuai dengan data umum yang ada, seperti besarnya perpanjangan thermal. Validasi Juga menggunakan data lendutan dari data uji Li dan Guo (2008).

#### 3.2.1. Dimensi Baja

Pada Studi ini digunakan Baja WF dengan Bentang 4,5 Meter. detail profil tertera di Tabel 3.1 dengan H adalah tinggi, B adalah lebar,  $T_1$  adalah tebal web, dan  $T_2$  adalah tebal flange. Serta, ilustrasi gambar profil baja pada gambar 3.1.

Tabel 3. 1 Dimensi Balok digunakan

Desain Profil	H	B	$T_1$	$T_2$
Baja	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
WF 250.250	250	250	8	12



Gambar 3 1 Ilustrasi Baja Profil WF

### 3.2.2. Mutu Baja

Digunakan Baja dengan mutu  $f_y = 271$  MPa. Kekuatan baja nantinya akan berubah seiring dengan meningkatnya suhu. Detail koefisien tertera dalam Tabel 3.2 dengan  $k_E$  adalah koefisien *modulus young*;  $k_P$  adalah koefisien batas proporsional;  $k_y$  adalah koefisien tegangan leleh minimum;  $k_u$  adalah koefisien kuat Tarik minimum.

Tabel 3. 2 Perubahan kekuatan baja akibat adanya peningkatan suhu.

Suhu Baja °F (°C)	$k_E = E(T)/E = G(T)/G$	$k_p = F_p(T)/F_y$	$k_y = F_y(T)/F_y$	$k_u = F_u(T)/F_y$
68 (20)	1.00	1.00	1.00	1.00
200 (93)	1.00	1.00	1.00	1.00
400 (204)	0.90	0.80	1.00	1.00
600 (316)	0.78	0.58	1.00	1.00
750 (399)	0.70	0.42	1.00	1.00
800 (427)	0.67	0.40	0.94	0.94
1000 (538)	0.49	0.29	0.66	0.66
1200 (649)	0.22	0.13	0.35	0.35
1400 (760)	0.11	0.06	0.16	0.16
1600 (871)	0.07	0.04	0.07	0.07
1800 (982)	0.05	0.03	0.04	0.04
2000 (1093)	0.02	0.01	0.02	0.02
2200 (1204)	0.00	0.00	0.00	0.00

(Sumber: SNI 1729-2015)



Koefisien yang digunakan nantinya adalah Modulus elastisitas dan tegangan plastis yang terjadi. Data uji (Li and Guo, 2008) menyatakan bahwa Kekuatan Baja dalam kondisi suhu ruangan adalah sebagai berikut:

- Modulus Elastisitas (E) = 200000 MPa
- Tegangan Leleh (fy) = 271 MPa
- Tegangan Ultimate (fu) = 455 MPa
- Poisson Ratio (v) = 0.3

### 3.3. Tahapan Penelitian

#### 3.3.1. Pemodelan dengan Menggunakan Program Bantu Abaqus.

##### 1. Membuat *Part*.

Pembuatan *part* balok disesuaikan dengan balok baja pada eksperimen yang dilakukan oleh (Li and Guo, 2008) , kemudian hasil penelitian tersebut digunakan sebagai data uji pada penenilitian ini, dengan detail baja yang digunakan, Baja WF 250.250.8.14 dengan bentang 4,5 Meter.

##### 2. Menginput Data Material.

Penulisan Data Material dari bahan yang akan dimodelkan dilakukan pada tahap ini. Data-data tersebut antara lain Plastisitas, Elastisitas, Berat Jenis dan Perpanjangan Thermal.

##### 3. Membuat dan Menetapkan Section.

Setelah menginput data material (*properties*), data tersebut kemudian di-*assign* pada *part* yang ditentukan.

##### 4. *Assembly* Model.

*Assembly* merupakan penggabungan seluruh struktur yang ada pada abaqus menjadi satu. Dalam pemodelan ini hanya digunakan satu balok baja sehingga *assembly* langsung digunakan pada seluruh bentang balok.

##### 5. Membuat Step-Step Pembebanan.

Pada tahap *Step* dipilih tipe pembebanan yang cocok digunakan dalam penelitian, dengan banyaknya variasi metode yang dapat digunakan.



#### 6. Membuat Constraint.

Pada tahap *Constraint* diberikan hubungan-hubungan yang sesuai dan diperlukan dalam model. Pada Penelitian ini *Constraint* diberikan pada perletakan dan *Stiffner*.

#### 7. Pembebanan dan Kondisi Batas.

Pada tahap ini diberikan beban dan kondisi batas sesuai dengan *Step-Step* yang telah dibuat sebelumnya.

#### 8. Meshing Model.

Mesh dilakukan untuk membagi sebuah model dalam elemen-elemen dengan ukuran tertentu. Setelah itu dipilih tipe elemen yang cocok dengan *step* yang dipilih. Terakhir, *Run Job* dilakukan untuk memulai Analisis.

#### 3.3.2. Validasi.

Hasil dari pemodelan akan divalidasi dengan hasil dari data uji dan diambil hasil yang paling sesuai dengan lapangan sebagai hasil paling akurat. Validasi perlu dilakukan mengingat adanya faktor-faktor *Human Error* yang memungkinkan adanya kesalahan pada model.

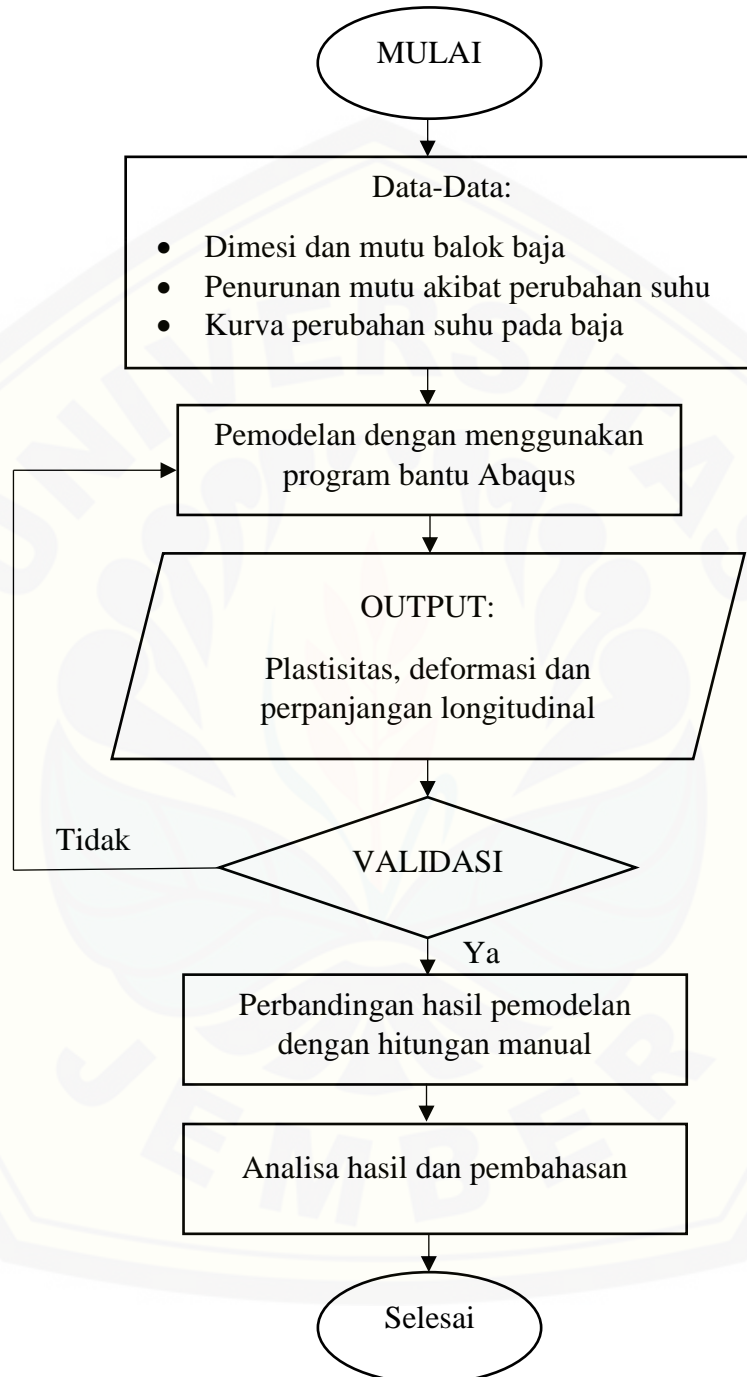
#### 3.3.3. Perbandingan Hasil Pemodelan dengan Hitungan Manual.

Selain Validasi dengan data uji, Hasil dari pemodelan juga dibandingkan dengan hitungan manual dengan menggunakan rumus, hal ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan antara hasil pemodelan yang membutuhkan waktu cukup lama dan rumus sederhana yang umumnya digunakan serta memiliki waktu pengerjaan yang lebih cepat. Hasil yang dianggap paling akurat adalah hasil yang paling mendekati data uji.

#### 3.3.4. Analisis Hasil dan Pembahasan.

Hasil dari Pemodelan Kemudian dianalisis, mengenai besarnya lendutan, posisi plastisitas, perpanjangan yang terjadi pada kondisi batas atau perletakan tertentu. Hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk gambar maupun grafik pada hasil pemodelan dengan *abaqus*. Besarnya deformasi yang merupakan fokus penelitian ini digunakan sebagai pembanding utama antar kondisi batas.

## 3.4. Bagan Alir Penelitian



## BAB 5 KESIMPULAN

### 5.1 Kesimpulan.

Penelitian ini merupakan pemodelan sebuah balok baja dalam kondisi dipanaskan. Detail dari beban terpusat dan perubahan suhu tertulis di bab 4. Kemudian, hasil dari pemodelan dengan program bantu elemen hingga telah dipresentasikan. Kesimpulan dari Penelitian ini tertulis dibawah:

1. Pemodelan dengan menggunakan program bantu abaqus memiliki tingkat kesesuaian yang hampir sama dengan data uji dengan nilai paling mendekati pada pemodelan dengan kondisi batas (5) dengan nilai validasi 0.85%. akan tetapi, hitungan manual memiliki nilai yang terlampaui jauh dengan hasil pemodelan dengan nilai perbandingan 21%.
2. Kondisi batas yang memiliki tahanan aksial dan momen torsi membuat lendutan yang terjadi pada balok baja semakin kecil.
3. Selain menurunnya nilai modulus elastisitas, paparan api lokal pada baja juga mengakibatkan penurunan tegangan leleh. Sehingga, beban yang ditumpu oleh baja pada suhu tinggi dapat menjadikan baja dalam kondisi plastis. Ketika baja sudah tidak kuat menahan beban, maka terjadi *Catenary Action* yang merupakan sifat baja untuk bertahan dari beban dengan memanfaatkan kekakuan (rigid) material baja.

## 5.2 Saran.

Berdasarkan penelitian ini terdapat beberapa saran yang bisa digunakan sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Pemodelan dilakukan tidak hanya pada sebuah baja, melainkan dapat dilakukan pemodelan struktur balok baja dalam satu lantai, hubungan balok baja dan kolom, balok baja yang diberi proteksi tahanan api seperti asbes atau bahan lain, sampai dengan pemodelan sebuah gedung.
2. Pemodelan dilakukan dengan jenis paparan api yang lebih relevan dengan kejadian kebakaran di Indonesia.
3. Pemodelan dilakukan saat terjadi bencana alam, seperti gempa bumi, yang diikuti dengan kebakaran.
4. Pemodelan paparan api dengan menggunakan simulasi tingkat pelepasan paparan api. Sehingga, beberapa jenis paparan api dapat disimulasikan.

## Daftar Pustaka

Badan Standardisasi Nasional (2002) *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung (SNI-03-1729-2002)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. Available at: [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id).

Badan Standardisasi Nasional (2015) *Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (SNI 03-1729-2015)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. Available at: [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id).

Dassault Systèmes (2014) *Abaqus 6.14 Abaqus/Cae User's Guide*. Providence: Dassault Systèmes Simulia Corp.

Drysdale, D. (1999) *an introduction to fire dynamics*. Thrid. Chichester: Wiley.

Gillie, M. (2009) 'Analysis of heated structures: Nature and modelling benchmarks', *Fire Safety Journal*, 44(5), pp. 673–680. doi: 10.1016/j.firesaf.2009.01.003.

Hemmati, M. and Mahmoud, H. N. (2019) 'A Framework for Collapse Vulnerability Assessment of Steel Beams Subjected to Increasing Loads and Nonuniform Longitudinal Temperature', *Journal of Structural Engineering*, 145(5), p. 04019017. doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002287.

Hosseini, S. A., Zeinoddini, M. and Darian, A. S. (2014) 'Modelling of I-shaped beam-to-tubular column connection subjected to post-fire conditions', *International Journal of Steel Structures*, 14(3), pp. 513–528. doi: 10.1007/s13296-014-3008-7.

Iqbal, S. and Harichandran, R. S. (2010) 'Capacity Reduction and Fire Load Factors for Design of Steel Members Exposed to Fire', *Journal of Structural Engineering*, 136(12), pp. 1554–1562. doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000256.

Kloos, M. and Walls, R. S. (2019) 'Finite Element Modelling of the Structural Behaviour of a Novel Cellular Beam Non-composite Steel Structure in Fire', *International Journal of Steel Structures*. doi: 10.1007/s13296-019-00215-5.

Li, G. Q. and Guo, S. X. (2008) 'Experiment on restrained steel beams subjected to heating and cooling', *Journal of Constructional Steel Research*, 64(3), pp. 268–274. doi: 10.1016/j.jcsr.2007.07.007.

Marx, H. (2018) *Thermal behaviour of a novel cellular beam structural system in fire*. Stellenbosch University.

Najafi, M. and Wang, Y. C. (2017) 'Axially restrained steel beams with web openings at elevated temperatures, part 1: Behaviour and numerical simulation results', *Journal of Constructional Steel Research*, 128, pp. 745–761. doi: 10.1016/j.jcsr.2016.10.002.

Rusli (2018) 'Pembentukan Masyarakat Konstruksi Baja Indonesia', in. Jakarta Selatan.

Zhang, C., Gross, J. L. and McAllister, T. P. (2013) 'Lateral torsional buckling of steel W-beams subjected to localized fires', *Journal of Constructional Steel Research*. Elsevier Ltd, 88, pp. 330–338. doi: 10.1016/j.jcsr.2013.06.004.

