

BAB 2

STUDI PUSTAKA

2.1. KARAKTERISTIK LEDAKAN ^[4]

2.1.1. Gambaran Umum

Ledakan terjadi apabila sejumlah material gas, cairan, ataupun padat mengalami reaksi kimia yang cepat. Apabila ledakan terjadi, produk gas hasil reaksi dibentuk dalam suhu dan tekanan yang sangat tinggi. Tekanan gas yang tinggi ini menyebar dengan cepat ke daerah sekitarnya, menyebabkan daerah tersebut bertekanan tinggi pula, dan terbentuklah gelombang kejut. Karena adanya pergerakan gas, maka udara di sekitarnya pun ikut bergerak. Kerusakan yang ditimbulkan oleh ledakan disebabkan oleh proses perpindahan udara bertekanan pada gelombang kejut tersebut, dan perpindahan yang disebabkan oleh molekul udara bertekanan dinamis, biasa disebut dengan ‘angin ledakan’.

Gelombang ledakan menyebar dalam kecepatan supersonik dan dapat dipantulkan serta dipecah-pecah akibat pertemuan dengan berbagai objek di daerah sekitar tersebut. Sebagaimana gelombang ledakan tersebut semakin menyebar dari sumber ledakan, intensitas ledakan akan semakin berkurang dan efeknya pada benda-benda disekitarnya pun berkurang. Bagaimanapun juga, dalam suatu daerah seperti terowongan atau daerah tertutup, gelombang kejut ledakan akan berpindah dengan pengurangan intensitas atau efek yang kecil. Tekanan yang mengalami pemantulan akan menyebabkan pembesaran intensitas yang lebih besar dari nilai awalnya.

Harus diperhatikan pada daerah dan lingkungan yang kompleks di sekitar area ledakan yang sangat dekat dengan sumber ledakan. Di daerah tersebut, gelombang ledakan sedang dalam proses pembentukannya dan memiliki suhu

yang sangat tinggi, penyebaran gas berintensitas tinggi akan menjadikannya suatu beban dengan nilai tertentu yang sulit dihitung dengan tepat. Apabila gelombang ledakan sudah terbentuk dan mulai menyebar, benda-benda di sekitarnya akan mengalami pembebanan yang berbeda-beda. Dua efek yang sudah teridentifikasi, yaitu:

- a. Efek dari proses perubahan udara sekitar menjadi bertekanan tinggi (disebut gelombang kejut udara).
- b. Tekanan udara dan efek perpindahannya akibat kumpulan gas dari reaksi kimia ledakan tersebut (disebut tekanan dinamis).

2.1.2. Gelombang Kejut Udara

Gelombang kejut udara ini menghasilkan penambahan tekanan berlebih dan diatas nilai normal daerah sekitarnya dalam waktu yang hampir seketika. Hal ini biasa disebut dengan tekanan berlebih (*overpressure*). Nilai puncak dari tekanan berlebih ini akan turun dengan cepat, diikuti dengan fase dimana tekanan dibawah nilai atmosferik, yaitu fase negatif. Fase negatif ini terjadi dalam durasi yang lebih lama dengan intensitas yang lebih rendah dari fase positif sebelumnya.

Bahasan mengenai durasi dari beberapa fase gelombang kejut dan rata-rata penyebarannya dari sumber ledakan berkaitan dengan tipe dan ukuran peledak diluar dari topik ini. Bagaimanapun juga, kecuali peledak berjumlah sangat besar, seperti yang diproduksi oleh nuklir, sangat penting terhadap konteks kerusakan struktural untuk mengetahui dan mengerti bahwa skala waktu yang diperlukan dari fase positif dan negatif dari sebagian besar bahan peledak sangatlah pendek. Hasilnya, meskipun tekanan yang terjadi sangat besar, namun waktu kontak yang terjadi pada tiap elemen struktur sangatlah pendek, sehingga tiap elemen harus merespon dalam waktu yang singkat sebelum fase negatif dimulai.

Hal yang sudah diketahui adalah bahwa efek ledakan yang terjadi sangat dipengaruhi oleh rasio antara durasi fase positif dengan periode getar natural dari elemen struktur yang dianalisa. Apabila rasio tersebut dibawah 0,2, maka efeknya dinilai sebagai suatu impulse (*impulsive*). Sedangkan apabila lebih besar dari itu, katakanlah 10, efeknya dinilai mendekati statik (*quasi-static*), dan diantaranya dinilai memiliki efek dinamik.

Besaran intensitas dan skala waktu dari berbagai fase dapat berubah-ubah sesuai tipe dan efek yang dihasilkan akibat faktor pemantulan dan pemecahan ledakan, akan tetapi, efek ini akan selalu berkurang seiring bertambahnya jarak dengan sumber ledakan. Bagaimanapun juga, berbagai macam kondisi tak tentu yang bergantung pada sejumlah hal di atas sangat susah untuk diprediksi dalam tingkat akurasi tertentu mengenai efek sebenarnya dari ledakan pada jarak tertentu.

2.1.3. Tekanan Dinamis

Dalam estimasi kasar, 1 kg bahan peledak dapat memproduksi sekitar 1 m³ gas. Sebagaimana gas ini menyebar, perilakunya pada udara di sekitar ledakan adalah membuatnya berpindah dan menambah tekanan pada udara tersebut. Pergerakan udara bertekanan ini dapat mempengaruhi benda-benda di sekitarnya dan menimbulkan kerusakan tertentu. Terkecuali dimana efek ledakan ini ingin dijaga, seperti pada kondisi-kondisi tertentu, efek dari tekanan dinamis ini akan berkurang dengan cepat seiring bertambahnya jarak dari sumber ledakan.

2.2. RESPON STRUKTUR TERHADAP LEDAKAN ^[5]

2.2.1. Tahanan Struktur

Apabila suatu gelombang kejut mengenai suatu struktur atau sebagian elemen struktur, tekanan yang terjadi akan cenderung mengakibatkan elemen tersebut untuk memantulkannya, mengalami kegagalan struktural, ataupun terpisah dari sambungan tertentu. Skala perpindahan elemen tersebut akan bergantung pada faktor-faktor sebagai berikut:

- a. massa elemen
- b. interkoneksi terhadap elemen struktur disekitarnya, serta respon koneksi tersebut terhadap tekanan dan beban yang ditransfer dari bagian lain
- c. periode tekanan sebenarnya dan tingkat rata-rata penyebarannya
- d. kemampuan elemen tersebut untuk menahan defleksi dan selalu bereaksi cukup terhadap tekanan yang terjadi.

Beberapa material dapat menghasilkan tahanan reaksi yang cukup besar dengan sifat deformasi elastis dan plastis yang dimilikinya. Sehingga, material

seperti baja dan beton bertulang memiliki kemampuan untuk menahan efek tekanan yang sedemikian rupa hingga batasan tertentu. Bangunan berbahan dasar getas, seperti gips, batu bata ringan, ataupun material-material lepas lainnya, seperti lantai, batu, dan genteng ringan, tidak memiliki perilaku elastis ataupun plastis untuk kondisi seperti ini. Elemen-elemen berat serta meterial lain yang memiliki periode natural cukup lama, cenderung untuk mengalami kerusakan yang lebih kecil.

Peristiwa dimana bagian struktural dari sebuah elemen dapat berdeformasi dalam beban ledakan tertentu tanpa mengalami keruntuhan, maka yang terjadi sebenarnya adalah penyerapan energi ledakan tersebut. Karena alasan inilah, perkuatan berupa pegas dengan lapisan tertentu ataupun bangunan dengan daktilitas tinggi akan mengalami kerusakan yang lebih sedikit apabila dibandingkan dengan lapisan pada sambungan getas ataupun struktur bertipe getas. Secara umum, bangunan dengan struktur utama beton bertulang dan portal baja dengan sambungan yang dianalisa secara detail memiliki frekuensi yang lebih tinggi dalam menahan tekanan dan getaran yang dihasilkan oleh ledakan tanpa mengalami kerusakan permanen yang berarti.

2.2.2. Kerusakan Bangunan Secara Umum

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, terdapat kemungkinan-kemungkinan yang harus diasumsikan terjadi tanpa pemikiran yang mendalam. Asumsi tersebut adalah kerusakan bangunan di awal peristiwa terjadinya ledakan. Dalam siklus bangunan pada umumnya, beberapa elemen dapat mengalami kerusakan (cacat) secara natural, beberapa penyebab kerusakan tersebut adalah:

- a. Penyusutan
- b. Perubahan temperatur
- c. Cacat akibat cuaca
- d. Umur maksimal dari material
- e. Kerusakan akibat beban berlebih
- f. Karat
- g. Efek dari beban terpusat tertentu dan penyalahgunaan fungsi bangunan
- h. Desain ataupun proses konstruksi yang tidak sesuai

Biasanya, apabila hal tersebut terjadi, maka kemampuan layan dari struktur akan sedikit direduksi.

Kerusakan/cacat yang terjadi tersebut dapat saja diakibatkan oleh ledakan ataupun terjadi sebelumnya. Untuk kerusakan yang terjadi sebelum ledakan, hal tersebut dapat disebabkan karena perawatan yang kurang ataupun kerusakan tersebut dinilai belum begitu signifikan untuk diperbaiki.

2.2.3. Kerusakan Pada Struktur Baja

Struktur baja, baik yang berdiri sendiri, ataupun didesain secara komposit dengan pelat lantai dari beton bertulang, memiliki kapasitas layan tertentu dikarenakan penggunaan bentuk tertentu dipilih bukan untuk memenuhi kapasitas tegangan maksimalnya, namun pemilihannya cenderung untuk memenuhi lendutan ijinnya, kemudahan dalam fabrikasi, ataupun nilai ekonomisnya. Sambungan antar bagian seringkali diabaikan dalam desain, akan tetapi efeknya sangat terasa dalam lendutan yang besar. Dalam hal ini, kerusakan-kerusakan kecil seperti distorsi lokal yang dekat dengan sambungan dimana kemungkinan tekuk sangat kecil terjadi, atau kesalahan kecil dalam pemasangan *tension flange* dari balok, tidak memerlukan perbaikan.

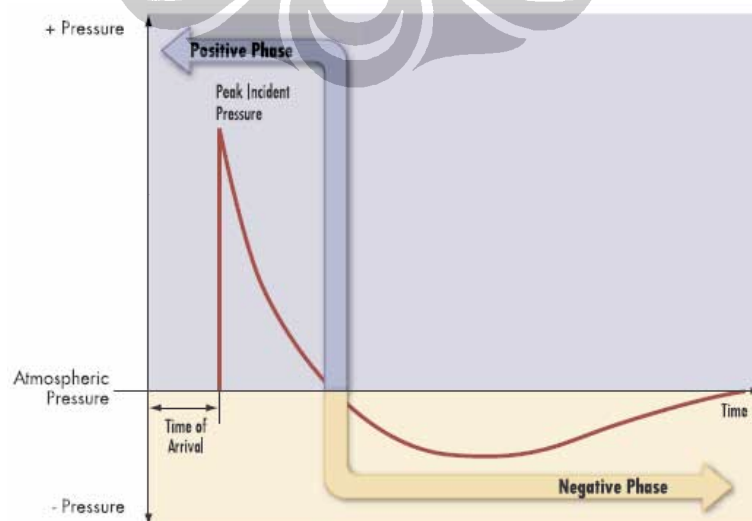
Dalam menentukan tingkat perbaikan yang harus dilakukan, hal utama yang harus dilakukan adalah mengetahui bahwa lendutan residu dari struktur baja tersebut telah mengurangi kapasitas layan sampai dibawah tingkatan keamanan yang diperlukan struktur tersebut. Apabila hal ini terjadi, maka perbaikan ataupun perkuatan pada bagian-bagian tertentu akan lebih baik daripada pergantian elemen. Penambahan perkuatan seperti las ataupun baut akan lebih 'memuaskan' daripada melakukan pergantian bagian yang rusak, dengan alasan bahwa pergantian tersebut akan membutuhkan pekerjaan lain yang rumit.

2.3. EFEK LEDAKAN DARI BAHAN PELEDAK ^[6]

Apabila sejumlah bahan peledak terdetonasi, terjadilah proses reaksi kimia eksotermik yang sangat cepat. Selama reaksi ini berlangsung, bahan peledak, baik yang berbentuk padat ataupun cair, berubah bentuk menjadi gas yang sangat panas, tebal dan bertekanan tinggi. Hasil dari ledakan ini menyebar dalam kecepatan yang sangat tinggi dalam rangka memperoleh keseimbangan dengan

udara di sekitarnya, menyebabkan terjadinya gelombang kejut. Gelombang kejut ini terdiri dari udara yang bertekanan sangat tinggi, bergerak secara radial keluar dari sumber ledakan dalam kecepatan supersonik. Hanya sepertiga dari energi kimia yang ada pada bahan peledak tersebut yang dilepaskan dalam proses ledakan tersebut. Sisa duapertiganya dilepaskan dalam waktu yang lebih lama, selama hasil ledakan utama bercampur dengan udara dan terbakar. Proses pembakaran (*afterburning*) akhir ini memiliki efek yang lebih sedikit apabila dibandingkan dengan gelombang ledakan utama karena kejadiannya yang lebih lambat daripada ledakan utama tersebut. Tekanan pun akan semakin menghilang dengan bertambahnya waktu, (secara eksponensial) dan keberadaannya memiliki rentang waktu yang sangat sedikit, diukur dalam seperseribu detik, atau milidetik. Sebuah ledakan dapat divisualisasikan sebagai ‘gelembung’ yang terdiri dari udara bertekanan tinggi yang menyebar sampai memperoleh titik seimbang dengan udara di sekitarnya.

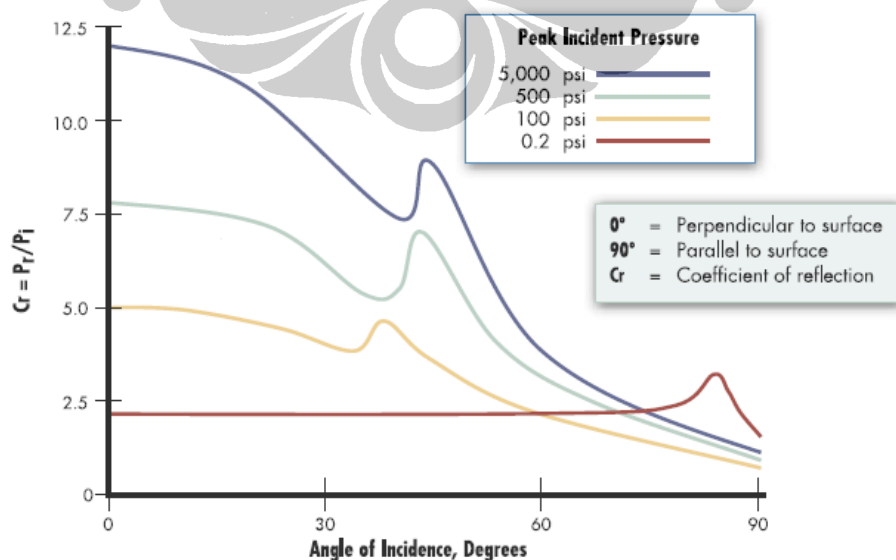
Detonasi sebuah bahan peledak menciptakan peristiwa terjadinya gelombang ledakan, yang memiliki nilai menanjak dari tekanan atmosfer hingga tekanan sangat berlebih (*peak overpressure*) hampir dalam waktu seketika. Selama gelombang kejut menyebar, tekanan akan semakin berkurang sampai kembali ke tekanan awalnya, fase tekanan negatif dapat timbul dalam waktu yang biasanya lebih lama dari fase tekanan positifnya. Fase negatif biasanya tidak begitu penting dalam perencanaan desain bangunan daripada fase positif.



Gambar 2.1. Hubungan Tekanan Dengan Waktu Pada Ledakan ^[6]

Apabila tekanan tersebut mengenai suatu struktur yang tidak paralel dengan arah gelombang ledakan utama, tekanan tersebut akan dipantulkan dan bergabung dengan tekanan di belakangnya, biasa disebut dengan tekanan terpantul (*reflected pressure*). Tekanan pantulan tersebut biasanya bernilai lebih besar dari tekanan awal dalam jarak yang sama dengan ledakan. Nilai dari tekanan pantulan ini biasanya bervariasi seiring dengan sudut yang memantulkan gelombang ledakan utama. Sehingga apabila gelombang ledakan mengenai struktur yang tegak lurus dengan arah penyebaran gelombang ledakan, titik pertemuannya akan mengalami tekanan pantulan yang maksimum. Apabila permukaan pantulan paralel dengan arah gelombang ledakan, maka permukaan tersebut akan mengalami baik tekanan utama ataupun tekanan pantulan yang minimum. Hal lain yang mempengaruhi besaran tekanan pantulan selain sudut, yaitu berat bersih bahan peledak, dan jarak suatu permukaan dari titik terjadinya ledakan (*detonation*).

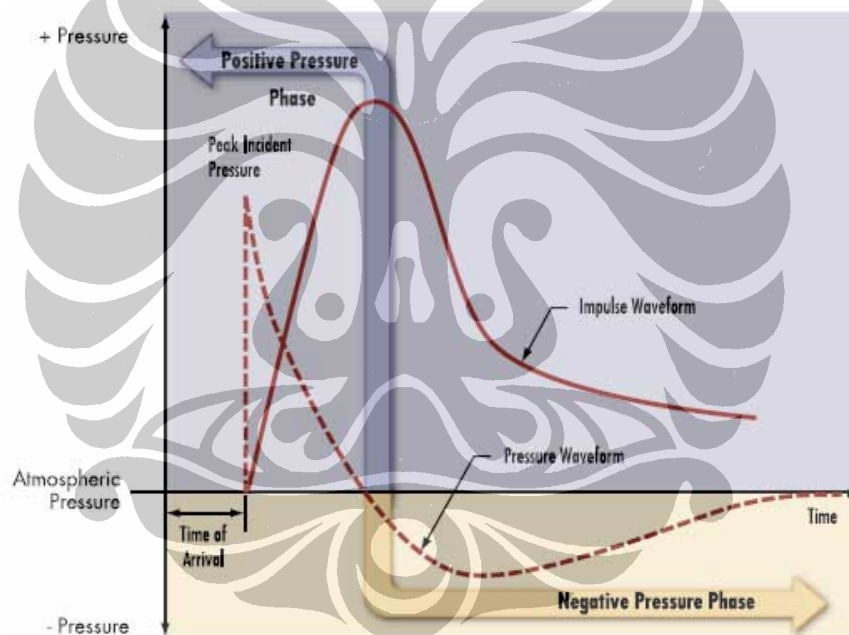
Gambar 2.2 menunjukkan koefisien tekanan pantulan terhadap arah kejadian untuk empat tekanan puncak utama yang berbeda. Koefisien dari tekanan pantulan ini akan sama dengan rasio dari tekanan puncak hasil pantulan dibandingkan dengan tekanan utama. Gambar 2.2 menunjukkan bahwa tekanan akibat bahan peledak hasil pantulan dapat mencapai besaran 13 kali lipat dari puncak tekanan utama, serta, untuk seluruh kejadian ledakan, tekanan hasil pemantulan akan selalu lebih besar dari tekanan akibat ledakan utama.



Gambar 2.2. Koefisien Tekanan Pantulan Terhadap Sudut Permukaan ^[6]

Impuls adalah besaran energi dari suatu ledakan yang mengenai bangunan. Baik fase positif ataupun fase negatif dari grafik hubungan tekanan dan waktu akan memberikan kontribusinya pada impuls yang dihasilkan. Gambar 2.3 menunjukkan bagaimana impuls dan tekanan akan bervariasi dengan waktu dari suatu peristiwa ledakan. Besaran dan distribusi dari beban ledakan terhadap struktur akan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut:

- Sifat ledakan (tipe peledak, energi yang dikeluarkan, dan kuantitas peledak).
- Lokasi relatif ledakan terhadap struktur.
- Perkuatan gelombang ledakan terhadap interaksinya dengan tanah ataupun struktur (efek pemantulan).



Gambar 2.3. Bentuk Impuls Hasil Ledakan Secara Umum ^[6]

Tekanan dan impuls yang dipantulkan adalah gaya-gaya yang harus direpson oleh bangunan di sekitar terjadinya ledakan. Gaya-gaya yang tersebut dapat bervariasi seiring dengan perbedaan waktu dan ruang di permukaan terbuka suatu bangunan, serta bergantung pula kepada lokasi sumber ledakan relatif terhadap bangunan. Oleh karena itu, dalam menganalisa struktur yang mengalami beban ledakan, hal yang harus dianalisa secara hati-hati adalah penentuan lokasi kejadian ledakan terburuk.

Dalam konteks ledakan sebagai bencana (seperti gempa bumi, angin, ataupun banjir), peristiwa ledakan memiliki beberapa efek merugikan, seperti:

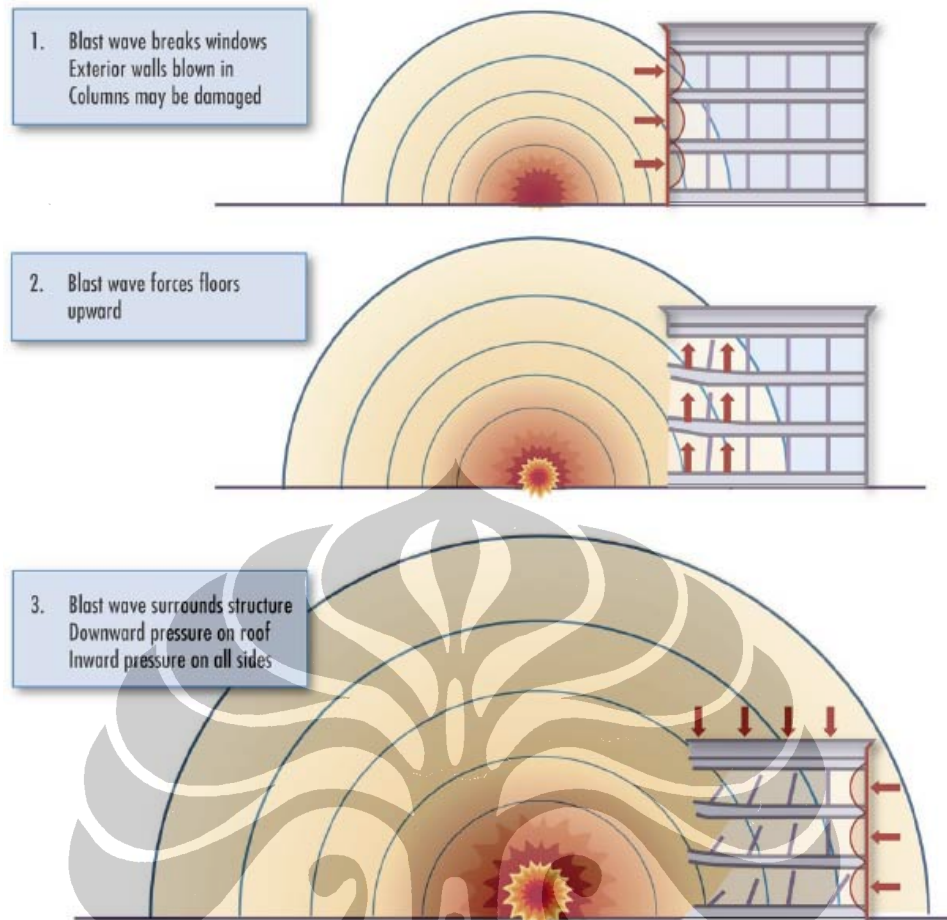
- a. Intensitas tekanan yang mengenai bangunan dapat memiliki nilai beberapa tingkat lebih besar dibandingkan dengan bencana lainnya. Bukan merupakan hal biasa bagi suatu bangunan untuk mengalami tekanan sampai melebihi 100 *psi* (setara dengan 703 kg/m^2 atau 7,03 *kPa*) di daerah perkotaan akibat ledakan mobil di pelataran parkir. Pada tingkat tekanan sedemikian besar, kemungkinan kerusakan dan kegagalan struktur sangat besar.
- b. Tekanan ledakan akan berkurang secara drastis seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber ledakan. Oleh karena itu, kerusakan pada sisi bangunan yang dekat dengan sumber ledakan akan lebih besar daripada sisi bangunan sebaliknya. Konsekuensinya, struktur yang terkena gelombang ledakan secara langsung cenderung mengalami kerusakan secara lokal. Bagaimanapun juga di daerah perkotaan, efek pemantulan akibat bangunan-bangunan di sekitarnya akan meningkatkan kerusakan di sisi bangunan sebaliknya.
- c. Durasi dari peristiwa ledakan sangat singkat, hanya dihitung dalam besaran seperseribu detik, atau disebut dengan milidetik. Hal ini sangat berbeda dengan bencana alam lainnya, seperti gempa bumi dan angin puyuh, yang durasinya dihitung dalam satuan detik, ataupun pada situasi banjir, yang dihitung dalam satuan jam. Karena hal ini, massa dari suatu bangunan sangat berpengaruh dalam mengurangi efek respon struktur tersebut, karena membutuhkan waktu yang tidak sedikit untuk mempengaruhi keseluruhan massa struktur. Seiring dengan bertambahnya waktu untuk mempengaruhi keseluruhan massa struktur, beban ledakan akan hilang, begitu pula respon struktur yang diperlukan untuk mengurangi beban ledakan tersebut. Hal ini sangat berkebalikan dengan gempa, dimana gaya yang dihasilkan secara kasar akan sama dengan responnya terhadap massa bangunan, menyebabkan efek resonansi yang akan memperburuk kerusakan pada bangunan.

2.3.1. Kerusakan Bangunan

Luas dan besaran kerusakan dan cedera yang diakibatkan peristiwa ledakan tidak dapat diprediksi secara akurat. Peristiwa-peristiwa yang sudah terjadi mengindikasikan bahwa urutan kegagalan suatu bangunan yang bersifat unik antara suatu bangunan dengan bangunan lainnya memberikan efek yang besar terhadap level kerusakan yang terjadi pada bangunan tersebut. Meskipun terdapat ketidakpastian seperti ini, sangat mungkin untuk memprediksi kerusakan dan cedera akibat peristiwa ledakan hingga level tertentu. Hal ini dapat diperkirakan dengan perhitungan terhadap ukuran bahan peledak, jarak dari sumber ledakan, serta asumsi terhadap konstruksi bangunan tersebut.

Kerusakan akibat gelombang ledakan dapat dibagi menjadi dua, yaitu efek langsung dan keruntuhan secara berangsur-angsur. Efek langsung adalah kerusakan yang diakibatkan gelombang ledakan yang bertekanan sangat tinggi yang dekat dengan sumber ledakan dan dapat menyebabkan kegagalan lokal dari dinding eksterior, jendela, sistem lantai, kolom dan balok.

Gelombang ledakan adalah faktor utama penyebab kerusakan dalam suatu peristiwa ledakan. Tekanan yang diakibatkannya pada permukaan bangunan dapat beberapa tingkat lebih besar daripada beban layan bangunan tersebut. Gelombang ledakan tersebut juga bekerja pada arah yang berbeda dengan arah beban desain bangunan pada umumnya, misalnya bekerja pada arah berlawanan gravitasi pada pelat lantai. Dalam hal urutan respon, hal yang pertama-tama dikenai oleh gelombang ledakan adalah bagian terlemah dari bangunan yang dekat dengan sumber ledakan, biasanya bagian eksterior bangunan. Ledakan akan menekan bagian dinding eksterior pada lantai bawah, serta akan mengakibatkan kegagalan dinding dan pemecahan jendela. Selama penyebaran gelombang ledakan tersebut, gelombang tersebut akan masuk ke dalam bangunan, selanjutnya menekan lantai baik ke arah atas ataupun bawah. Ilustrasi pemaparan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Efek Ledakan Terhadap Struktur ^[6]

Kegagalan pada lantai sangat mungkin dalam serangan bom dengan mobil besar, dikarenakan pelat lantai biasanya memiliki permukaan yang sangat luas dan ketebalan yang kecil dimana tekanan hasil ledakan dapat bekerja dengan efek yang lebih. Dalam hal durasi ledakan dibutuhkan untuk menghancurkan bangunan tersebut, gelombang ledakan hanya membutuhkan sepuluh sampai seratus milidetik dari waktu peledakan. Apabila terjadi urutan keruntuhan bangunan secara berangsur-angsur, maka hal itu akan terjadi dalam hitungan detik.

Kaca biasanya merupakan bagian terlemah dari suatu bangunan, dapat hancur dalam tekanan rendah apabila dibandingkan dengan komponen-komponen bangunan lainnya, seperti lantai, dinding, ataupun kolom. Data historis menunjukkan bahwa kehancuran dari kaca ini dapat mencapai jarak bermil-mil dari sumber ledakan untuk ledakan eksternal yang cukup besar. Pecahan-pecahan kaca yang menyebar dengan cepat diketahui sebagai faktor utama penyebab

cedera pada suatu peristiwa ledakan. Pada peristiwa ledakan yang terjadi di daerah perkotaan, reruntuhan kaca menyebabkan bencana yang sangat berbahaya bagi pejalan kaki serta memperlama proses penyelamatan setelah bencana dan usaha pembersihan dengan meninggalkan berton-ton pecahan kaca di jalanan.

2.4. API DAN PANAS ^[7]

2.4.1. Bahan Bakar

2.4.1.1. 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.

2.4.1.2. 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. Dapat dilihat bahwa untuk material seperti kayu yang memiliki kandungan air di bawah rata-rata, nilai kalori efektifnya $\Delta H_{c,n}$ (MJ/kg) dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta H_{c,n} = H_c (1 - 0,001m_c) - 0,025m_c \quad (2.1)$$

dimana m_c adalah kandungan air dalam persen, dihitung dengan:

$$m_c = \frac{100m_d}{100 + m_d} \quad (2.2)$$

dimana m_d adalah kandungan air dalam persen terhadap berat kering, sebagaimana biasa digunakan dalam perhitungan-perhitungan produk kayu.

Contohnya, untuk kayu biasa dengan $\Delta H_c = 19 \text{ MJ/kg}$, dan kandungan air $m_d = 12\%$, dengan persamaan diatas, didapat $m_c = 10,7\%$, sehingga nilai $\Delta H_{c,n} = 16,7 \text{ MJ/kg}$ pada kandungan air 12%.

Tabel 2.1. Nilai Kalori Material Yang Dapat Terbakar (Combustible) [7]

Solids	MJ/kg	Plastics	MJ/kg
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		
Liquids	MJ/kg	Gases	MJ/kg
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		

Persamaan yang menyatakan nilai maksimum dari kemungkinan energi E (MJ) yang dihasilkan adalah:

$$E = M \times \Delta H_c \tag{2.3}$$

untuk bahan bakar kering, atau

$$E = M \times \Delta H_{c,n} \tag{2.4}$$

untuk bahan bakar yang memiliki kandungan air, dimana M adalah massa dari bahan bakar (kg).

2.4.1.3. Beban Api

Beban api pada bangunan biasa dinyatakan dengan *Fire Load Energy Density* (FLED) per meter persegi. Untuk setiap ruangan, perumusan FLED e_f (MJ/m^2) dinyatakan dengan:

$$e_f = E/A_f \quad (2.5)$$

dimana A_f adalah luas lantai ruangan.

Sedangkan sebagian besar referensi di Eropa menyatakan beban api sebagai jumlah energy yang dihasilkan per meter persegi dari total permukaan dalam suatu ruangan. Jumlah energi ini dinyatakan dalam rumus:

$$e_t = E/A_t \quad (2.6)$$

dimana A_t adalah luas total permukaan pada suatu ruangan (termasuk lantai, langit-langit, dinding dan bukaan jendela).

Dari rumus tersebut, dapat diketahui bahwa nilai e_t akan lebih kecil dari e_f sesuai dengan rasio A_f/A_t . Sangat penting untuk mengetahui dengan pasti akan pemakaian rumus yang digunakan untuk mengetahui beban api yang terjadi pada situasi tertentu. Penyalahgunaan rumus akan berakibat cukup fatal.

Hasil survey dari beberapa besaran beban api yang berbahaya akan bervariasi antara 100 hingga 100000 MJ/m^2 luas lantai. Solusi menurut *New Zealand Building Code* (BIA 1992), besaran yang dapat dipakai adalah 400, 800, dan 1200 MJ/m^2 luas lantai untuk perumahan, perkantoran, dan hunian lainnya yang didalamnya terdapat gudang penyimpanan. Nilai ini terlihat sedikit terlalu rendah untuk menghasilkan desain yang aman. Eurocode (ECI 1994) memberikan lima klasifikasi (I hingga V) terhadap beban, yang bervariasi antara 250 sampai 2000 MJ/m^2 luas lantai.

Pembebanan desain untuk api harus dilakukan serupa dengan penentuan beban-beban bencana lainnya, seperti angin atau gempa bumi, sehingga nilai beban desain api tersebut akan mewakili kejadian api yang sebenarnya. Beban desain api tersebut harus memiliki 10% kemungkinan terjadi dalam 50 tahun umur bangunan tersebut. Dengan demikian, maka beban tersebut akan mendekati nilai maksimum yang dapat diperkirakan. Baik kebakaran di satu tempat ataupun beberapa tempat harus diperhitungkan pula. Apabila beban kebakaran tersebut

diambil berdasarkan suatu survey atau penelitian tertentu, maka nilai tersebut harus lebih besar dari beberapa titik di tempat yang berbeda.

2.4.1.4. Tingkat Pelepasan Panas

Untuk setiap kebakaran, tingkat pelepasan panas (dalam *MW*) dapat dihitung apabila jumlah panas yang dilepaskan (*MJ*) dalam suatu waktu tertentu (biasanya dalam detik) diketahui jumlahnya. Sehingga nilai rata-rata tingkat pelepasan panas *Q* (*MW*) dapat dihitung dengan:

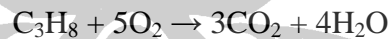
$$Q = \frac{E}{t} \quad (2.7)$$

Dimana *E* adalah total energi yang terdapat dalam suatu bahan bakar (*MJ*), dan *t* adalah waktu pembakaran.

2.4.2. Pembakaran ^[8]

2.4.2.1. 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.

2.4.2.2. 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.

2.4.2.3. *Pencampuran dalam Api*

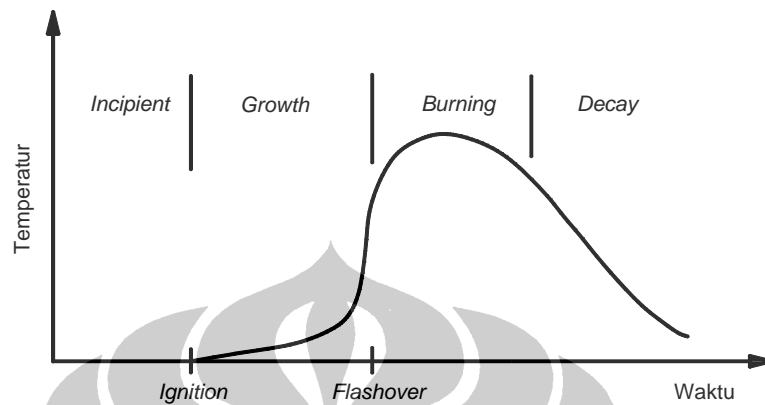
Proses pembakaran untuk setiap material akan membutuhkan ketersediaan oksigen untuk menghasilkan reaksi oksidasi. Proses pembakaran yang paling efisien adalah hasil pencampuran antara bahan bakar berbentuk gas dengan oksigen ataupun udara yang mengandung oksigen sebelum sumber bahan bakar tersebut mulai 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.

2.4.2.4. *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.

2.4.2.5. Tahapan-tahapan pada Kebakaran ^[9]

Terdapat 4 tahapan penting pada proses terjadinya kebakaran. Tahapan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5. Tahapan-Tahapan Dalam Perkembangan Kebakaran ^[9]

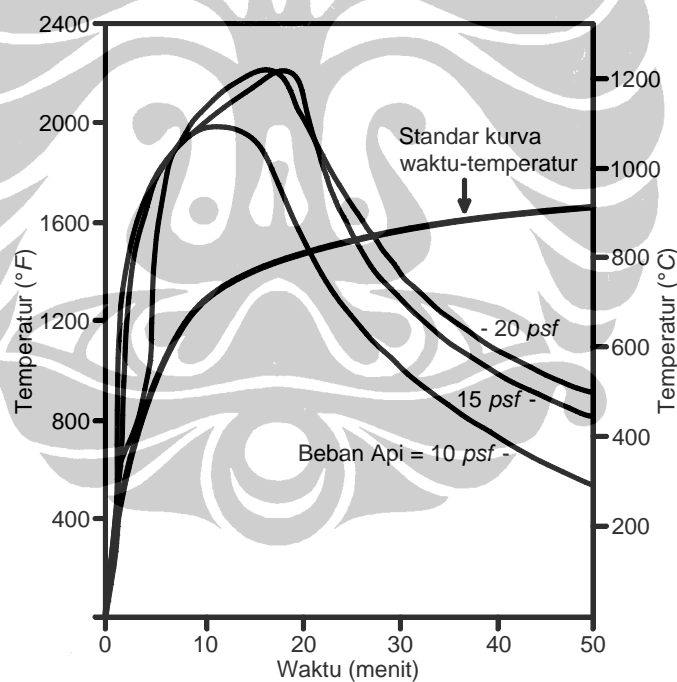
Tahapan pertama adalah fase penyalaan awal (*incipient ignition*), dimana terjadi pemanasan bahan bakar potensial. Tahapan selanjutnya adalah fase perkembangan (*growth*), dimana mulai terlihat lidah api hasil pembakaran. Selama pertumbuhan api, sehingga api mencapai temperatur yang cukup tinggi (sekitar 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 penyalaaan (*ignition*), perkembangan (*growth*), pembakaran (*burning*), dan penurunan (*decay*).

2.4.2.6. 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 2.6. Grafik Hubungan Waktu Dan Temperatur Pada Kebakaran ^[9]

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 ^[9]

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

2.4.2.7. 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.

2.4.2.8. Transfer Panas ke Struktur di Sekitarnya

Secara maksimal, tidak hanya temperatur api yang mengontrol respon struktur, akan tetapi juga input panas dan penambahan temperatur yang timbul pada material struktur yang digunakan. Umumnya, transfer panas ini dapat terjadi dengan 3 cara, yaitu: konduksi, konveksi, dan radiasi.

Konduksi adalah proses perpindahan panas melalui benda padat, dipengaruhi oleh tipe kepadatan material, serta tipe konduktifitas dari panas dan suhu dari material tersebut. Konveksi adalah perpindahan panas melalui benda fluida, baik cairan ataupun gas, yang merupakan fungsi linier dari temperatur gas. Radiasi adalah perpindahan panas melalui gelombang elektromagnetik, yang bergantung pada kenaikan temperatur gas.

Untuk baja dengan proteksi, penambahan temperatur akibat api merupakan hasil utama dari radiasi proteksi material serta konduksi melalui proteksi tersebut, dimana dipengaruhi utama oleh tipe insulator dan ketebalannya. Bagaimanapun juga, temperatur pada baja terproteksi akan lebih rendah dari temperatur yang diproduksi dari api di sekitarnya. Tingkat pengurangannya akan bergantung oleh ketebalan dan sifat alamiah dari bahan yang digunakan, sebagaimana ukuran dan berat dari profil baja yang digunakan juga akan memberikan pengaruhnya. Hal yang tidak kalah pentingnya adalah sifat fisik material proteksi terhadap penambahan suhu, seperti kohesi dan adhesi pada saat terjadinya kebakaran.

Untuk baja polos (tidak terproteksi), penambahan temperatur akan sepenuhnya dipengaruhi oleh radiasi dan konveksi. Dalam kondisi ini, temperatur baja polos tersebut akan menyamai level yang sama dengan suhu puncak api pada kebakaran. Kenaikan temperatur baja polos ini merupakan fungsi dari sifat alamiah api serta berat dan luasan profil baja yang terpanasi. Oleh karena itu, waktu yang diperlukan oleh baja polos tersebut untuk mencapai suhu ekuilibrium dengan lingkungan di sekitarnya akan bergantung pada hal-hal diatas. Pada saat temperatur ekuivalen sudah terjadi, hal ini akan dipertahankan hingga durasi kebakaran berakhir. Apabila efek pemanasan yang terjadi diakibatkan oleh api secara langsung, satu-satunya cara untuk mengurangi penambahan suhu yang terjadi adalah dengan memroteksinya.

2.4.2.9. Massa Termal dan Inersia Termal

Massa termal biasa digunakan dalam mengklasifikasikan suatu kapasitas efektif suatu pemanasan ataupun pemanasan spesifik efektif (*effective spesific heat*). Pemanasan efektif spesifik adalah jumlah energi per satuan massa atau berat material yang diperlukan untuk menaikkan temperatur sebesar satu satuan (biasa ditulis dalam $J/[kg \text{ } ^\circ C]$). 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 $J/[m^3 \text{ } ^\circ C]$). 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 $W^2s/[m^4 \text{ } ^\circ C^2]$). 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° 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.

2.4.3. **Tingkat Ketahanan Struktur Baja Terhadap Api** ^[10]

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

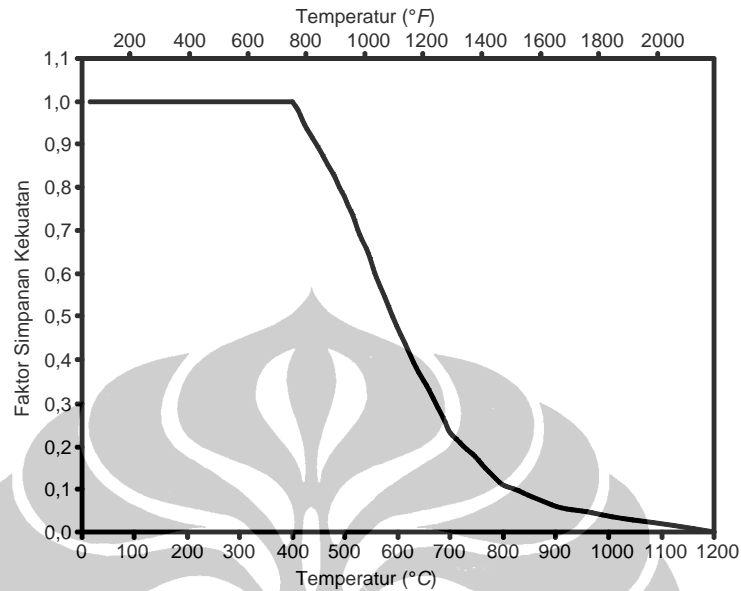
Ketahanan terhadap api adalah durasi yang dibutuhkan suatu struktur untuk mempertahankan stabilitas, bentuk, dan perubahan termperturnya, nilai ini biasanya didapat dari hasil percobaan. Percobaan ini dilakukan dengan standar tingkatan api untuk percobaan. Standar tingkatan api ini biasanya diberikan dalam jumlah jam dan memberikan hasil berupa kemampuan sruktur 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.

2.4.3.2. *Efek Temperatur Tinggi Terhadap Struktur Baja*

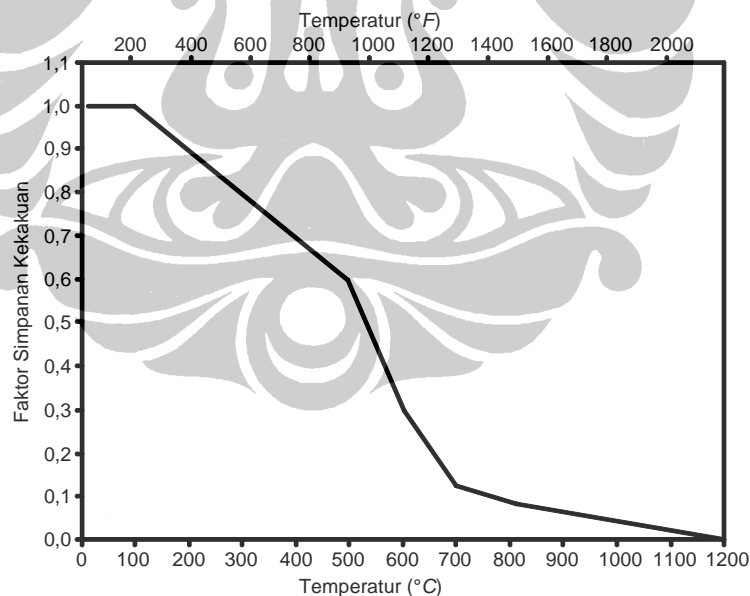
Baja merupakan bahan tahan api. Baja merupakan bahan tidak mudah terbakar dengan tingkat ketahanan tinggi serta sifat-sifat struktur lain yang tinggi. Akan tetapi, efek dari pemanasan yang terus-menerus akan terlihat pada setiap material, seperti kerusakan, dan distorsi. Lendutan struktural akibat pemanasan 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 2.7 dan Gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2.7. Pengaruh Kenaikan Suhu Pada Kekuatan Struktur Baja ^[10]



Gambar 2.8. Pengaruh Kenaikan Suhu Pada Modulus Elastisitas Struktur Baja ^[10]

Gambar 2.7 dan Gambar 2.8 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.

2.4.3.3. 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.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu dibawah ataupun berkisar antara 600 °C tidak mempengaruhi kekuatan dari baut A490. Akan tetapi, batasan tegangan dan sifat detail serta perilaku baut, las dan sambungan serta perkuatan lainnya masih belum diketahui secara pasti apabila mengalami kenaikan suhu. Keterbatasan data ini disebabkan banyaknya variasi sambungan, baik sebagai penahan momen lentur ataupun hanya menahan geser atau beban aksial saja, serta diakibatkan juga oleh ukuran dan konfigurasi sambungan yang berbeda-beda di setiap struktur.

2.4.3.4. Perilaku Struktur Baja Dalam Kebakaran ^[11]

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 pertambahan suhu tidak mencapai 700 °C selama 20 menit.

2.4.3.5. Fenomena Lain yang Terjadi pada Baja dalam Suhu Tinggi

Akibat pertambahan panjang disertai dengan pengurangan kekuatan dan kekakuan baja karena efek pertambahan 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 °C. Dengan pengekangan sempurna pada batang, proses ini akan terjadi lebih cepat, yaitu pada suhu 120 °C. Efek tekuk akan sangat mungkin terjadi pada suhu 650 sampai 760 °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. Batasan beban yang dapat menyebabkan terjadinya tekuk dapat dihitung berdasarkan rumus berikut ini ^[12]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (2.8)$$

Akibat tambahan dari distrorsi tekuk pada batang profil, baja akan mengalami pertambahan 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.

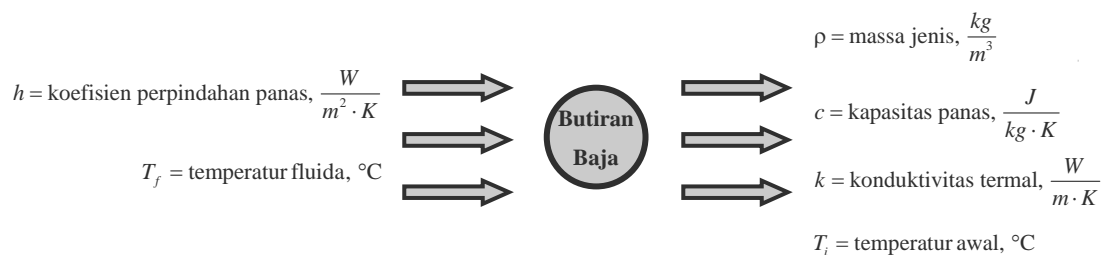
Apabila baja dipanaskan hingga suhu yang sangat tinggi, akan sangat mungkin terjadi perubahan penampilan luar dan warna. Bila suhu pemanasan tidak mencapai sekitar 700 °C, lapisan yang disebut sebagai *tightly adherent mill scale* akan tetap tersisa, menyebabkan warna baja akan tetap normal. Pada suhu 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.

2.4.3.6. 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.

2.5. PERHITUNGAN TRANSFER PANAS DENGAN PENDEKATAN METODE ELEMEN HINGGA ^[13]

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 2.9. Peristiwa Pendinginan Butiran Baja Kecil ^[13]

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:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{stored} \quad (2.9)$$

Serta dalam permasalahan ini, kondisi batasnya adalah:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{gen} = 0 \quad (2.10)$$

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

$$\dot{E}_{out} = -hA(T - T_f) \quad (2.11)$$

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

$$\dot{E}_{stored} = \rho c V \frac{dT}{dt} \quad (2.12)$$

Persamaan 2.10, 2.11, dan 2.12 apabila disubstitusikan dengan Persamaan 2.9 akan menjadi:

$$-hA(T - T_f) = \rho c V \frac{dT}{dt} \quad (2.13)$$

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 2.13 menjadi konstan. Sehingga Persamaan 2.13 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:

$$-hA\Theta = \rho c V \frac{d\Theta}{dt} \Rightarrow \frac{\rho c V}{hA} \int_{\Theta_i}^{\Theta} \frac{d\Theta}{\Theta} = - \int_0^t dt \Rightarrow t = \frac{\rho c V}{hA} \ln \frac{\Theta_i}{\Theta} \quad (2.14)$$

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

$$t = \frac{\rho c V}{hA} \ln \frac{T_i - T_f}{T - T_f} \quad (2.15)$$

Selanjutnya apabila kita ingin mengetahui temperatur dari butiran tersebut pada waktu tertentu, Persamaan 2.15 dapat diubah menjadi seperti berikut ini:

$$\frac{T_i - T_f}{T - T_f} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) \quad (2.16)$$

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:

$$Q = \int_0^t hA(T - T_f) dt \quad (2.17)$$

Dengan mensubstitusikan $T - T_f$ pada Persamaan 2.16 kepada Persamaan 2.17 serta mengintegrasinya, akan didapatkan:

$$Q = \rho c V (T_i - T_f) \left[1 - \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) \right] \quad (2.187)$$

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:

$$Bi = \frac{hL_c}{k_{\text{solid}}} \quad (2.19)$$

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:

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (2.20)$$

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:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{T}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (2.21)$$

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

Untuk kondisi permasalahan *transient*, harus diikutsertakan perhitungan penyimpanan energi termal, yang akan merubah bentuk Persamaan 2.21 menjadi:

$$[\mathbf{C}]\{\mathbf{T}'\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{T}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (2.22)$$

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

Dalam perhitungan untuk memperoleh solusi, pada titik diskrit (*discrete point*) waktu tertentu, berdasarkan sistem formula pada Persamaan 2.22, 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:

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} = b \quad (2.23)$$

Dapat diperoleh besaran Δt , dengan:

$$\Delta t = b \frac{(\Delta x)^2}{\alpha}, \text{ dimana } 0,1 \leq b \leq 0,5 \quad (2.24)$$

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

$$(Fo)(Bi) = \left[\frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \right] \left[\frac{h \Delta x}{k_{\text{solid}}} \right] = b \quad (2.25)$$

Dapat diperoleh besaran Δt , dengan:

$$\Delta t = b \frac{(\Delta x) k_{\text{solid}}}{h \alpha} = b \frac{(\Delta x) \rho c}{h}, \text{ dimana } 0,1 \leq b \leq 0,5 \quad (2.26)$$

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

$$\{T^{p+1}\} = \{T^p\} + (1-\theta) \Delta t \{\dot{T}^p\} + \theta \Delta t \{\dot{T}^{p+1}\} \quad (2.27)$$

Pada Persamaan 2.27, 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 2.27 pada Persamaan 2.22, maka:

$$\overbrace{\left(\frac{1}{\theta \Delta t} [C] + [K] \right)}^{\text{Setara matriks } K} \{T^{p+1}\} = \overbrace{\{F\} + [C] \left(\frac{1}{\theta \Delta t} \{T^p\} + \frac{(1-\theta)}{1} \{\dot{T}^p\} \right)}^{\text{Setara matriks } F} \quad (2.28)$$

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:

$$R_{n+1} = R(u_{n+1}) = P(u_{n+1}) - f = 0 \quad (2.29)$$

Persamaan tersebut dapat dinyatakan dalam ekspansi deret Taylor dengan mengambil dua suku pertamanya yaitu

$$R(u_{n+1}^{i+1}) \approx R(u_{n+1}^i) + \left(\frac{\partial R}{\partial u} \right)_{n+1}^i \partial u_n^i \quad (2.30)$$

Dimana i merupakan hitungan integrasi yang dimulai dari

$$u_{n+1}^i = u_n \quad (2.31)$$

Dan

$$\frac{\partial R}{\partial u} = \frac{\partial P}{\partial u} = K_T \quad (2.32)$$

Dengan K_T adalah matriks Jacobian atau dalam struktur dikenal sebagai matriks kekakuan yang berhubungan dengan arah tangensial. Dengan mendistribusikan Persamaan 2.29 hingga Persamaan 2.32 di atas, maka diperoleh:

$$K_T^i \partial u_n^i = -R_{n+1}^i \quad (2.33)$$

$$u_{n+1}^{i+1} = u_n + \Delta u_n^i = u_{n+1}^i + \partial u_n^i \quad (2.34)$$

$$\Delta u_n^i = \sum_{k=1}^i \partial u_n^k \quad (2.35)$$

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 Iterasi

1. $\hat{k}_T \Delta u^j = \Delta R^j \rightarrow \Delta u^j$

2. $u_{i+1}^j = u_{i+1}^{j-1} + \Delta u^j$

$$3. \Delta f^j = f_s^i - f_s^{j-1} + (\widehat{k}_T - k_T) \Delta u^j$$

$$4. \Delta R^{j+1} = \Delta R^j - \Delta f^j$$

2.6. LITERATUR JEMBATAN KRASAK

2.6.1. Jembatan Krasak Secara Umum

2.6.1.1. Data Teknis

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

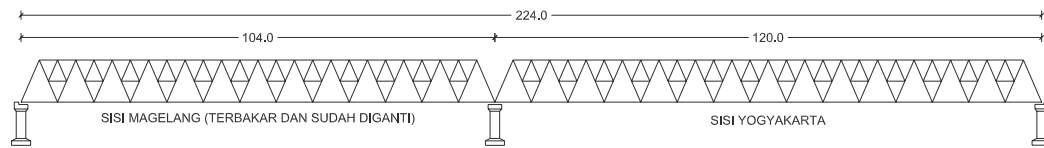
- Panjang Total: 224 m
- Bentang Terpanjang : 120 m
- Lebar : 1,00 + 7,00 + 1,00 m
- Tipe Bangunan Atas : Jembatan Rangka Baja Callendar Hamilton
- Tipe Bangunan Bawah: Pondasi Langsung dan Sumuran
- Lokasi : Km 19 dari Yogyakarta ke arah Magelang
- Waktu Pembangunan : 1974 – 1976 ^[14]

Gambaran mengenai lokasi Jembatan Krasak dapat dilihat di bawah ini:



Gambar 2.10. Peta Lokasi Jembatan Krasak ^[14]

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



Gambar 2.11. Sketsa Jembatan Krasak ^[14]

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^[15].

Tabel 2.3. Tegangan Leleh Profil Baja Struktur Jembatan Krasak^[15]

Grade	Tensile Strength N/mm^2	Yield Stress Min				
		Up to and including 16 mm N/mm^2	Over 16 mm and including 25 mm 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	-	-

2.6.1.2. Bahan Bagian-Bagian Jembatan Callendar Hamilton

^[16]

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.*

2.6.2. Sifat Material Jembatan Krasak

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

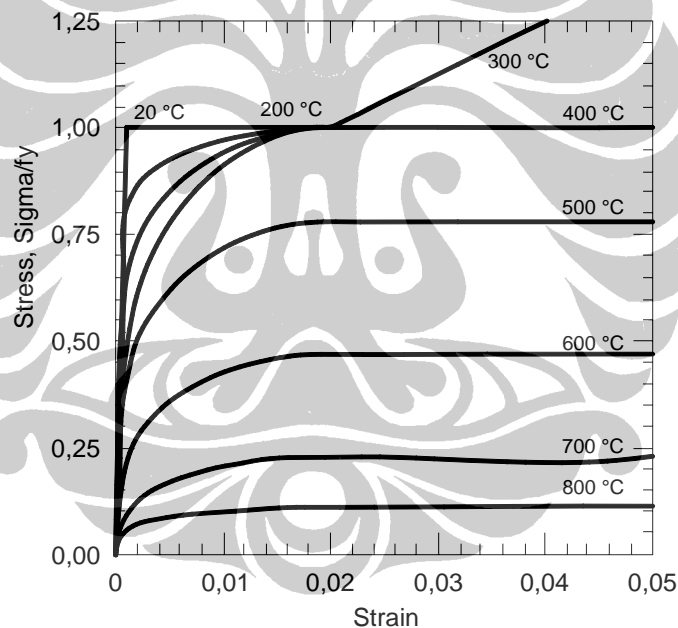
- Modulus Elastisitas (E_s) : 200.000 MPa^[17]
- Tegangan Leleh (f_y) : 450 MPa^[15]
- Tegangan Ultimate (f_u) : 700 MPa^[15]

- Massa Jenis : 7850 kg/m^3 [17]

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_1), konduktivitas termal (k), serta kapasitas panas (C_p). Nilai dari sifat material tersebut terhadap perubahan suhu dapat dilihat seperti berikut ini:

- Kondisi tegangan-regangan (*stress-strain*) baja [18].

Hubungan antara tegangan-regangan (*stress-strain*) baja yang bervariasi terhadap perubahan suhu dapat dilihat pada Gambar 2.12 di bawah ini:



Gambar 2.12. Grafik Hubungan Tegangan-Regangan Baja Akibat Pertambahan Temperatur [18]

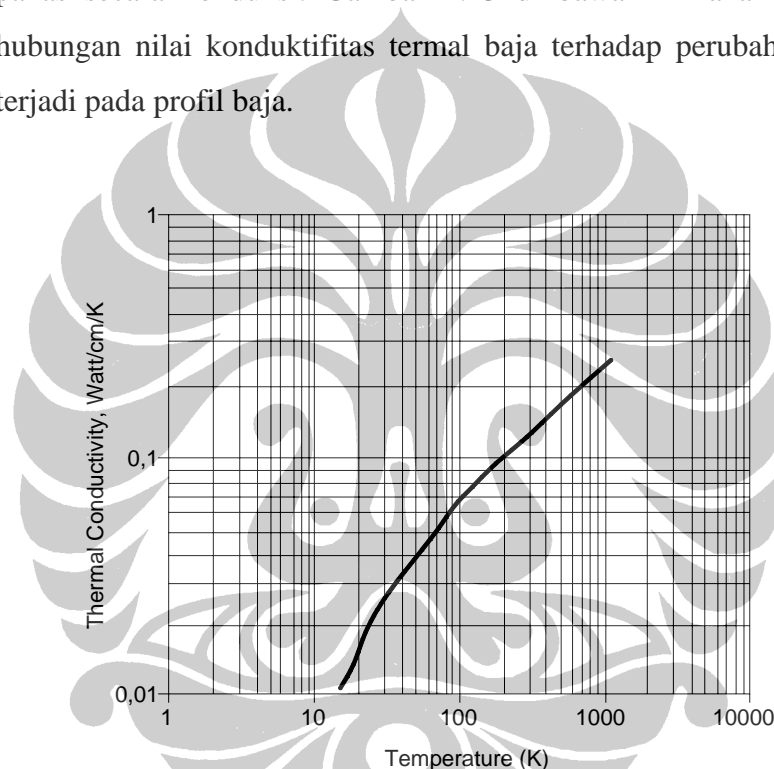
Dari grafik tersebut, jelas terlihat bahwa kekuatan profil baja akan menurun seiring dengan bertambahnya suhu. Pada aplikasinya terhadap program yang digunakan untuk analisa, nilai *stress* pada grafik ini akan dikali dengan besaran tegangan leleh (f_y) baja, yaitu 450 MPa , untuk mendapatkan hubungan nilai tegangan-regangan yang sebenarnya.

- Koefisien Perpanjangan Linear terhadap Suhu (α) ^[17]

Koefisien ini merupakan sifat material yang menunjukkan nilai perpanjangan material akibat efek pemanasan batang baja. Berdasarkan literatur, hanya didapatkan satu nilai koefisien ini dengan kondisi suhu yang berbeda-beda, yaitu $12 \times 10^{-6} (\text{°C}^{-1})$.

- Konduktifitas Termal (k) ^[19]

Sifat material ini menunjukkan kemampuan material untuk memindahkan panas secara konduksi. Gambar 2.13 di bawah ini akan menunjukkan hubungan nilai konduktifitas termal baja terhadap perubahan suhu yang terjadi pada profil baja.

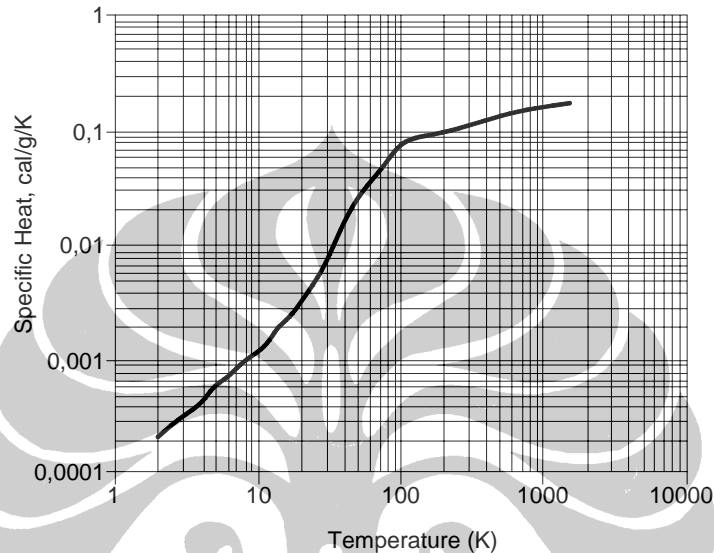


Gambar 2.13. Grafik Hubungan Konduktifitas Termal Baja Akibat Pertambahan Temperatur ^[19]

Gambar 2.13 menunjukkan hal yang berbeda apabila dibandingkan dengan grafik hubungan tegangan-regangan, yaitu nilai konduktivitas termal yang bertambah seiring dengan bertambahnya suhu. Pada aplikasinya terhadap program yang digunakan untuk analisa, nilai pada grafik ini akan dikali dengan 100, untuk menjadikan satuan yang sesuai dengan SI, yaitu *Watt/m-K*.

- Kapasitas Panas (C_p) ^[19]

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. Nilai dari kapasitas panas baja dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Grafik Hubungan Kapasitas Panas Baja Akibat Pertambahan Temperatur ^[19]

Perilaku yang sama terjadi antara kapasitas panas dan konduktifitas termal pada baja, yaitu sama-sama mengalami kenaikan nilai seiring dengan bertambahnya suhu. Pada aplikasinya terhadap program yang digunakan untuk analisa, nilai pada grafik ini akan dikali dengan 4186,8, untuk menjadikan satuan yang sesuai dengan SI, yaitu $J/kg-K$.

2.7. ANALISA DARI PENELITIAN SEBELUMNYA ^[20]

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. Pemuaiian 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-rumusny 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 penjalaran 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.”

2.8. HIPOTESIS KERUNTUHAN JEMBATAN KRASAK

Hasil yang diharapkan dari penulisan ini adalah mengetahui karakteristik dan perilaku sebenarnya dari keruntuhan Jembatan Krasak akibat ledakan truk

gandeng pembawa 16000 liter premix. Beberapa dugaan yang ada mengenai mekanisme keruntuhan Jembatan Krasak ini adalah:

1. Pertama: Energi yang ditimbulkan dari ledakan premix secara berangsur-angsur mengurangi kemampuan baja dalam menahan beban struktural di atasnya, bahkan beban baja itu sendiri. Hal ini diakibatkan sedemikian besar energi ledakan dan kebakaran yang dihasilkan dari reaksi kimia premix dengan jumlah yang besar tersebut merubah bentuk dan jenis dari baja. Bentuk padat dari baja dikarenakan terkena energi ledakan dan kebakaran yang sedemikian besar dapat meleleh, sehingga kemampuan utamanya sebagai penahan beban pun hilang secara cepat. Dalam hal ini, efek samping tahanan tangki diabaikan karena jumlah yang sedemikian besar. Dugaan pertama ini merupakan dugaan yang cukup kuat.
2. Kedua: Jembatan Krasak runtuh hanya akibat kebakaran yang ditimbulkan dari percikan kendaraan dengan aspal yang mengenai tumpahan bahan bakar dari tangki truk. Kebakaran ini akan menyebabkan kegagalan pada beberapa batang rangka jembatan, mengakibatkan ketidakmampuannya menahan bahkan berat sendiri dari struktur jembatan. Ketidakmampuan ini disebabkan karena modulus elastisitas yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya suhu, sedangkan tegangan pada baja akan semakin meningkat akibat pertambahan panjang baja (*elongation*) karena kenaikan suhu dan beban layan yang tetap. Dugaan kedua ini merupakan dugaan terkuat, karena didukung baik oleh penelitian yang sudah ada maupun beberapa bukti di lapangan yang tidak menyatakan adanya ledakan pada Jembatan Krasak.
3. Ketiga: Kemungkinan terlemparnya truk tangki premix akibat ledakan, kemudian truk tersebut mengenai sisi jembatan, menyebabkan kekuatan struktural pada bagian sisi jembatan menjadi sangat berkurang. Bahkan dapat menyebabkan putusnya bagian tersebut, sehingga baja penahan di bagian bawah mengalami kelebihan tegangan akibat beban dan kebakaran di atasnya, menyebabkan keruntuhan pada jembatan. Dugaan kedua ini termasuk mungkin, namun kurang kuat apabila dibandingkan dengan dua dugaan sebelumnya.