

## Kajian Analitik Pengaruh Beban Termal Terhadap Stabilitas Tiang Pipa Baja

Sigit Darmawan <sup>1)</sup>  
Abdul Haris <sup>2)</sup>

### Abstrak

*Kolom pipa baja banyak dijumpai pada bangunan industri, khususnya pada bangunan instalasi kilang minyak. Banyak diantara kolom pipa baja direncanakan untuk beroperasi pada kondisi temperatur tinggi. Perencanaan beban termal hingga 800°C dari struktur pipa baja di lingkungan kilang minyak merupakan perencanaan yang tidak lazim dan ini memerlukan kajian khusus. Makalah ini menyampaikan kajian kondisi khusus dari tiang pipa baja yang ditumpu sederhana dan beroperasi pada beban termal tinggi yang terdistribusi sepanjang pipa hingga 800°C. Perencanaan di bawah aksi temperatur tinggi menjadikan pemecahan persoalan semakin sulit untuk mengikuti kriteria perencanaan yang tersedia. Kondisi ketidaksempurnaan awal kolom, seperti tegangan sisa, dan ketidaklurusan kolom juga merupakan besaran yang turut diperhitungkan di dalam simulasi ini. Stabilitas tiang pipa baja akan menjadi pertimbangan penting di dalam perencanaannya. Metoda numerik berbasis elemen hingga dipergunakan untuk mensimulasikan masalah yang diajukan ini. Hasil analisis menunjukkan bahwa stabilitas tiang pipa baja yang diindikasikan dengan suhu leleh pertama dan suhu runtuh tiang sangat dipengaruhi terutama oleh dimensi dari tiang, ketidaklurusan tiang, tegangan residu, serta distribusi beban termal. Beban antitekuk minimum meningkat nilainya seiring dengan meningkatnya beban termal, namun beban antitekuk maksimum menurun nilainya dengan meningkatnya beban termal.*

**Kata-kata kunci:** *Stabilitas, beban termal, tegangan sisa, ketidaklurusan tiang, suhu leleh pertama, suhu runtuh, beban antitekuk.*

### Abstract

*Steel pipes are found at almost industrial structures, especially in refinery plant. More and more often, steel pipes have to be designed to operate at higher temperature. Design temperature until 800°C which we find at refinery plant is not uncommon. This paper deals with particular case of pillar of steel pipe which is simply supported and operates at elevated and distributed temperature until 800°C. When the design of temperature is very high, it becomes increasingly difficult to meet the current design criterion. Initial imperfection like residual stress and out-of-straightness is covered in this simulation. In this simulation, initial imperfect column condition such as residual stress, out-of-straightness are considered as well. Stability becomes to be an important consideration. Numerical method based on finite element is used to simulate this case. The result of the analysis shows that the stability of steel pipe indicated by first yield temperature and collapse temperature are determined especially by dimension of steel pipe, out-of-straightness, residual stress, as well as thermal load distribution. The minimum antibuckle axial force increases with the thermal load, but the opposite condition for the maximum antibuckle axial force.*

**Keywords:** *Stability, thermal load, residual stress, out-of-straightness, first yield temperature, collapse temperature, antibuckle axial force.*

## 1. Pendahuluan

Tiang pipa baja sering digunakan sebagai elemen struktur karena efisiensi strukturalnya, disamping bentuknya yang dinamis untuk ekspresi-ekspresi arsitektural. Pada bangunan industri, seperti pada penyulingan/kilang minyak, tiang pipa baja digunakan juga sebagai salah satu instrumen proses penyulingan

minyak dalam lingkungan pengaruh termal yang tinggi. Hal ini tentu saja akan mempengaruhi perilaku struktural tiang pipa baja tersebut. Kriteria kinerja struktur tiang pipa baja terhadap beban aksial yang dipengaruhi oleh beban termal tinggi adalah kondisi stabilitasnya. Untuk tinjauan aspek stabilitas struktur, maka tiang pipa baja tersebut di dalam analisis ini dimodelkan sebagaimana ditunjukkan melalui

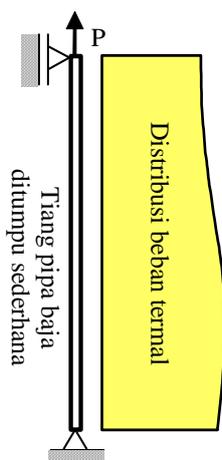
1. Anggota KK Rekayasa Struktur, FTSL - ITB, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132.

2. Alumni Program Magister Rekayasa Struktur, FTSL - ITB, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132.

**Gambar 1**, untuk mana panas yang dikenakan terdistribusi pada sepanjang tiang pipa baja.

Kebakaran adalah suatu peristiwa pembebanan termal pada struktur yang analog dengan kasus ini. Kebanyakan peraturan di berbagai negara memberikan angka faktor keamanan tertentu untuk disain struktur yang diharapkan memiliki resistensi terhadap kebakaran. Angka-angka tersebut umumnya diperoleh berdasarkan hasil eksperimen skala laboratorium. Dengan berkembangnya teknologi komputasi, terbuka peluang lain untuk menajaki/mengetahui perilaku struktur yang dikenakan beban termal, tahap demi tahap dimana temperatur berubah-ubah dengan pola tertentu.

Pada masalah stabilitas, *residual stress* dan *initial imperfection* berupa *out-of-straightness* menjadi berpengaruh besar dan membuat analisis menjadi non-linier. Selain itu untuk keperluan praktis di lapangan dibutuhkan **beban antitekuk** untuk menghindari terjadinya tekuk dari tiang pipa baja selama bekerjanya beban termal yang terus meningkat dan bertahan untuk beberapa lama. Beban antitekuk ini merupakan beban aksial tarik minimum yang perlu diberikan kepada tiang pipa baja untuk menjaga agar tiang pipa baja tidak mengalami tekuk. Beban antitekuk ini akan meningkat nilainya seiring dengan meningkatnya beban termal yang dikenakan kepada tiang pipa baja pasca kestabilannya terganggu. Tentunya beban antitekuk ini tidak boleh menyebabkan tegangan pada penampang pipa baja melebihi tegangan lelehnya, untuk mana tegangan leleh baja sebaliknya menurun seiring dengan meningkatnya beban termal yang diberikan. Studi ini dimaksudkan untuk mendapatkan beban termal kritis untuk mana stabilitas tiang mulai terganggu.



**Gambar 1.** Tiang pipa baja di bawah beban termal dan gaya aksial antitekuk P

## 2. Dasar Teori

Properti material baja pada temperatur tinggi dispesifikasikan terutama oleh hubungan tegangan-regangan, modulus elastisitas, tegangan leleh, Poisson's *ratio* serta koefisien ekspansi termal. Modulus elastisitas dan tegangan leleh baja akan mengalami degradasi sejalan dengan naiknya suhu dari ruang di mana pipa baja tersebut ditempatkan. Dalam makalah ini, material baja dianggap berperilaku isotropik.

### 2.1 Modulus elastisitas

Modulus elastisitas baja E di bawah pengaruh temperatur tinggi merupakan fungsi dari temperatur itu sendiri, dan menurut SNI 03-1729-2000 (Baja) dinyatakan sebagai:

$$\frac{E(T)}{E(30)} = 1.0 + \frac{T}{2000 \ln\left(\frac{T}{1100}\right)} ; 0^{\circ}\text{C} < T \leq 600^{\circ}\text{C}$$

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

dimana :

T : temperatur baja, dalam °C

E(T) : modulus elastisitas baja pada T °C

E(30) : modulus elastisitas baja pada 30 °C

### 2.2 Tegangan leleh

Tegangan leleh baja pada temperatur tinggi terutama di atas 215 °C akan mengalami reduksi selaras dengan kenaikan temperturnya. SNI 03-1729-2000 merumuskan fungsi tegangan leleh adalah sebagai berikut:

$$\frac{f_Y(T)}{f_Y(30)} = 1.0 ; 0^{\circ}\text{C} < T \leq 215^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{f_Y(T)}{f_Y(30)} = \frac{905 - T}{690} ; 215^{\circ}\text{C} < T \leq 905^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

### 2.3 Koefisien ekspansi termal

Koefisien ekspansi termal  $\alpha(T)$  berdasarkan BSI, 1995 *Eurocode 3 Design of Steel Structures, Part 1.2*: dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\alpha(T) = \left[ \left( 12.0 + \frac{T}{100} \right) \cdot 10^{-6} \right] ^{\circ}\text{C}^{-1} \quad (3)$$

### 2.4 Poisson's ratio

Poisson's *ratio*  $\nu$  didefinisikan sebagai nilai absolut dari rasio regangan arah lateral terhadap regangan arah aksialnya pada pembebanan aksial. Pada daerah elastik yang telah diidealisasikan, nilai Poisson's *ratio* dari baja struktural adalah sekitar 0.30 dan pada daerah plastis sekitar 0.50.

### 2.5 Teori stabilitas

Konsep stabilitas pada sebuah sistem keseimbangan statik dapat didefinisikan dengan mengobservasi hubungan antara masukan yang berupa suatu gangguan yang 'relatif kecil' dengan keluaran hasil yang berupa perpindahan. Sistem dikatakan stabil bila keluaran hasil perpindahannya juga 'relatif kecil'. Dan sistem dikatakan tidak stabil bila keluaran hasil perpindahannya 'relatif besar'.

Tiang pipa baja dengan kondisi yang lurus sempurna hampir tidak mungkin terjadi/ada dan bersifat teoritis untuk mengikuti teori tekuk Euler, dimana pada beban kritis tiang akan mengalami deformasi lateral yang tiba-tiba pada suatu nilai tertentu. Sedang tiang pipa baja yang realistis sebagai elemen struktur tidak lurus, dimana gangguan kecil dapat menghasilkan deformasi lateral yang besar, yang nilainya tidak dapat ditentukan pada suatu nilai tertentu. Walaupun demikian secara umum suatu nilai tertentu dapat diambil dengan menentukan batasan toleransi saat keluaran dianggap 'relatif besar'. Pada suhu kamar ketidakstabilan atau tekuk pada tiang terjadi apabila suatu struktur mengkonversikan energi regangan menjadi energi lentur tanpa perubahan beban eksternal.

Dalam masalah stabilitas elemen balok-kolom dengan penampang berupa cincin ada kemungkinan terjadi tekuk lokal terutama bila dinding pipa sangat tipis. Timoshenko menurunkan persamaan tekuk lokal untuk silinder berdinding tipis dimana tegangan kritis dirumuskan sebagai:

$$\sigma_{CRT} = D \left( \frac{200m^2 \pi^2}{234l^2} + \frac{16EI^2}{39a^2 Dm^2 \pi^2} \right) \quad (4)$$

Dengan anggapan bahwa  $\sigma_{CRT} = f(m\pi/l)$  kontinu, maka nilai minimum **Persamaan (4)** adalah:

$$\sigma_{CRT} = \frac{1.184}{a t} \sqrt{E_t D t} \quad (5)$$

yang terjadi pada saat:

$$\frac{m\pi}{l} = 0.832 \sqrt{\frac{E t}{a^2 D}}$$

Panjang setengah fungsi sinus ketika tekuk terjadi untuk nilai  $\nu = 0.30$  adalah:

$$\frac{l}{m} = 1.72 \sqrt{rt} \quad (6)$$

**Persamaan (5)** mengindikasikan bahwa tekuk pelat pipa baja akan terjadi pada daerah elastik bila pipa sangat tipis. Walaupun tidak tebal, pelat tiang pipa pada kajian ini tidak terlalu tipis, sehingga dapat diasumsikan tekuk lokal tidak terjadi. Bila struktur tiang pipa baja dikenakan beban termal yang tinggi akan mengakibatkan tiang pipa baja mencapai batas kritis tekuk akibat beban desain dan beban termal pada harga yang berbeda-beda yang proporsional dengan degradasi properti material baja.

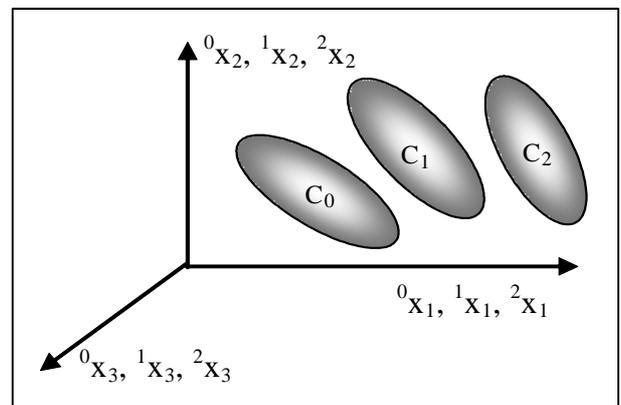
## 3. Analisis Non-linier

Secara umum dapat dipandang respon suatu sistem adalah non-linier, dimana bagian yang linier merupakan kasus yang khusus dari hal yang umum yang bersifat non-linier tersebut. Dengan demikian simulasi perilaku tiang baja sampai keruntuhan disusun berdasarkan analisis yang non-linier tersebut.

### 3.1 Formulasi Lagrangian

Formulasi Lagrangian adalah salah satu formulasi yang mendeskripsikan pergerakan/deformasi benda solid. Pada formulasi Lagrangian yang menjadi koordinat acuan adalah koordinat material sebelum mengalami deformasi. Selain konfigurasi awal ( $C_0$ ) dimana benda belum berdeformasi, terdapat dua konfigurasi lain untuk perumusan teori *incremental* dengan pendekatan Lagrangian untuk analisis non-linier. Kedua konfigurasi tersebut adalah konfigurasi deformasi yang terakhir terjadi ( $C_1$ ) dan konfigurasi yang sedang terjadi ( $C_2$ ), sebagaimana ditunjukkan melalui **Gambar 2**.

Analisis pada makalah ini menggunakan *Total Lagrangian Formulation* yang menetapkan konfigurasi  $C_0$  sebagai acuan.



**Gambar 2. Pergerakan benda solid dalam ruang**



dengan membuat tetap nilai kekakuan tangensialnya pada setiap inkremen beban. Untuk hasil yang lebih akurat, maka inkremen beban dibuat lebih kecil.

#### 4. Formulasi Metoda Elemen Hingga untuk Analisis Non-Linier

Analisis non-linier ini dilakukan dengan bantuan Metode Elemen Hingga, mengingat persamaan *closed form* cukup rumit dan tidak mudah untuk diselesaikan. Elemen yang digunakan untuk memodelkan tiang pipa baja dalam studi ini adalah elemen balok. Matriks kekakuan elemen balok diturunkan dengan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Walaupun terjadi deformasi yang cukup besar, regangannya dianggap kecil.
2. Regangan geser akibat momen lentur diabaikan dalam perhitungan mengikuti formulasi Bernoulli-Euler.
3. Penampang dari elemen balok yang dianalisis sebelum dan sesudah deformasi dianggap memiliki geometri penampang yang sama.

Hukum konstitutif inkremental yang mengandung unsur-unsur tegangan inkremental ( ${}^0S_{ij}$ ) dan regangan inkremental ( ${}^0\varepsilon_{ij}$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\int_{OV} {}^0C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \delta_o \varepsilon_{ij}^0 dV + \int_{OV} {}^tS_{ij} \delta_o^t \eta_{ij}^0 dV = {}^{t+\Delta t}R - {}^tR \quad (16)$$

Walaupun perpindahan non-liniernya relatif besar, tetapi dengan mengasumsikan bahwa regangan yang terjadi pada setiap tahapan inkremental adalah kecil, maka persamaan keseimbangan inkremental ekuivalen adalah:

$$\int_{OV} {}^0C_{ijkl} e_{kl} \delta_o e_{ij}^0 dV + \int_{OV} {}^tS_{ij} \delta_o^t \eta_{ij}^0 dV = {}^{t+\Delta t}R - {}^tR \quad (17)$$

Pada **Persamaan (17)** pengaruh suhu diasumsikan *uncoupled* dengan geometri elemen struktur. Hipotesis kinematik dapat dirumuskan sebagai:

$$u = x \frac{d\theta}{dy} \quad (17.a)$$

$$v = v(y) \quad (17.b)$$

Dari teori elastisitas hubungan regangan-perpindahan dapat dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (18)$$

Untuk teori balok Bernoulli-Euler sesuai geometri tiang, komponen regangan dominannya adalah:

$$\varepsilon_z = \frac{dw}{dz} + \frac{1}{2} \left( \frac{du}{dz} \right)^2 - x \left( \frac{d^2u}{dz^2} \right) \quad (19)$$

Persamaan konstitutif untuk tegangan dominannya adalah:

$$\sigma_z = E \varepsilon_z \quad (20)$$

Energi regangan pada balok yang berdeformasi:

$$U = \frac{1}{2} \int_V E \varepsilon_z^2 dA dz \quad (21)$$

Dengan mensubstitusikan **Persamaan (19)** ke dalam **Persamaan (21)** dan mengabaikan orde-orde tinggi, maka diperoleh:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A E \left[ \left( \frac{dw}{dz} \right)^2 + \frac{dw}{dz} \left( \frac{du}{dz} \right)^2 + x^2 \left( \frac{d^2u}{dz^2} \right)^2 \right] dA dz \quad (22)$$

dan perlu dicatat di sini bahwa:

$$\int_A z^2 dA = I, \quad \int_A E \frac{dw}{dz} dA = P \quad (23)$$

Dengan demikian **Persamaan (22)** dapat diuraikan menjadi 3 bagian persamaan, yaitu:

$$U = \int_0^L \frac{EA}{2} \left( \frac{dw}{dz} \right)^2 dx + \int_0^L \frac{P}{2} \left( \frac{du}{dz} \right)^2 dx + \int_0^L \frac{EI}{2} \left( \frac{d^2u}{dz^2} \right)^2 dx \quad (24)$$

Suku kedua dan ketiga membentuk matriks kekakuan elemen balok. Dengan 4 derajat kebebasan atau *Degree of Freedom (DOF)* pada tiap elemen balok, maka perpindahan transversal dinyatakan sebagai:

$$u = [N]\{d\}, \quad \text{dimana } [N] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] \quad (25)$$

sehingga:

$$\frac{du}{dy} = \left[ \frac{dN}{dy} \right] \{d\}$$

$$\text{dimana: } \left[ \frac{dN}{dy} \right] = \left[ \frac{dN_1}{dy} \ \frac{dN_2}{dy} \ \frac{dN_3}{dy} \ \frac{dN_4}{dy} \right] \quad (26)$$

dimana:

$[N]$  = Shape function,  $\{d\}$  = Node displacement

#### 4.1 Gaya-gaya dalam

Gaya-gaya dalam dihitung dengan menggunakan Metode Jenning. **Gambar 4** adalah konfigurasi elemen yang berdeformasi dengan panjang awal elemen  $L$  dan kemiringan awal  $\alpha$ .

Perpindahan nodal dinyatakan sebagai berikut:

$$X = \{x_1, z_1, \theta_1, x_2, z_2, \theta_2\} \quad (27)$$

Dan perpindahan relatif antara dua nodal:

$$DX = \{\Delta x, \Delta z, \theta_{12}, \theta_{21}\} \quad (28)$$

Perpindahan relatif balok-kolom dapat dinyatakan sebagai:

$$\overline{\Delta X} = \{e \quad \phi_{12} \quad \phi_{21}\} \quad (29)$$

dimana:

$$e = \sqrt{(L + \Delta x)^2 + \Delta z^2} - L$$

$$\phi_{12} = \theta_{12} - \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z}{L + \Delta x}\right)$$

$$\phi_{21} = \theta_{21} - \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z}{L + \Delta x}\right)$$

Dengan mengasumsikan bahwa  $\Delta x$  jauh lebih besar dari  $\Delta z$ , maka ketiga persamaan terakhir tersebut di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$e = \Delta z + \frac{z^2}{2L}$$

$$\phi_{12} = \theta_{12} - \frac{x}{L} \quad (30)$$

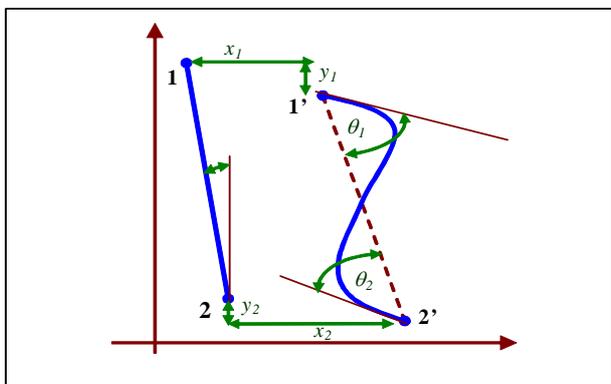
$$\phi_{21} = \theta_{21} - \frac{x}{L}$$

Komponen regangan balok akibat lentur adalah:

$$\frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{du}{dz}\right)^2 dz = \int_0^L \left[ \phi_{12} \frac{d(-z + 2z^2/L - z^3/L^2)}{dz} + \phi_{21} \frac{d(z^2/L - z^3/L^2)}{dz} \right]^2 dz = \frac{1}{30} (2\phi_{12}^2 - \phi_{12}\phi_{21} + 2\phi_{21}^2) \quad (31)$$

Gaya-gaya dalam elemen selanjutnya dapat dinyatakan sebagai:

$$P = AE \left[ \frac{e}{L} + \frac{1}{30} (2\phi_{12}^2 - \phi_{12}\phi_{21} + 2\phi_{21}^2) \right] \quad (32)$$



Gambar 4. Deformasi tiang pipa baja

$$M_{12} = \left(\frac{4EI}{L} + \frac{4PL}{30}\right)\phi_{12} + \left(\frac{2EI}{L} - \frac{PL}{30}\right)\phi_{21} \quad (33)$$

$$M_{21} = \left(\frac{2EI}{L} - \frac{PL}{30}\right)\phi_{12} + \left(\frac{4EI}{L} + \frac{4PL}{30}\right)\phi_{21} \quad (34)$$

#### 4.2 Material inelastis

Inkremen beban termal yang bekerja pada tiang pipa baja yang terus-menerus memungkinkan sebagian penampang tiang pipa baja akan meleleh. Untuk model elemen balok, kriteria leleh Von Mises tanpa *hardening* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\sqrt{\sigma_p^2 + 3\tau_p^2} = \sigma_{YO} \quad (35)$$

dimana:

$s_p$ : tegangan normal

$t_p$ : tegangan geser

$$\sigma_p - \sigma_R = \sigma_Y \quad (36)$$

dimana:

$\sigma_p$ : tegangan pada saat plastifikasi

$\sigma_R$ : tegangan residu (*initial stress*)

$\sigma_Y$ : tegangan leleh

Jika penampang dibagi menjadi  $m$  bagian yang sama luasnya, maka tegangan rata-rata pada tiap bagian adalah:

$$\overline{\sigma}_i = \overline{\sigma}_{Ri} - \frac{(P)}{(A_i)} \pm \frac{0.5(x_i)}{(I_i)} |M_{12} + M_{21}| \quad (37)$$

Perlu dicatat bahwa ketika beberapa bagian penampang meleleh, maka luas ( $A$ ) dan momen inersia ( $I$ ) dari seluruh penampang merupakan fungsi termal, yang dapat dinyatakan sebagai:

$$A(T) = \sum_{i=1}^m A_i - \sum_{i=1}^n A_i \quad (38)$$

$$I(T) = I_O(T) + \sum_{i=1}^m A_i x_i^2 - \sum_{i=1}^n A_i x_i^2 \quad (39)$$

dimana  $n$  adalah jumlah penampang yang telah meleleh, dan  $n \leq m$ . Dengan adanya tegangan residu dan lendutan awal, perilaku struktur secara keseluruhan menunjukkan *hardening* pada daerah plastis.

#### 5. Aplikasi Program dan Analisis

Analisis pada makalah ini dilakukan terhadap sejumlah model yang mendekati kasus aktual dengan melibatkan variasi terhadap geometri struktur serta distribusi temperatur yang dikenakan pada pipa baja. Analisis pertama adalah mencari temperatur kritis,

saat stabilitas tiang baja mulai terganggu, dengan tiga variasi distribusi temperatur seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 5**.

Variasi distribusi temperatur diwakili oleh nilai *gradient* yang bervariasi dari 1.00 sampai 1.25. Pada tiap variasi nilai *gradient*, beban termal kritis merupakan fungsi, masing-masing dari panjang, diameter dan ketebalan pipa. Pada saat panjang pipa menjadi variabel bebas, maka diameter dan ketebalan pipa dibuat konstan. Demikian juga halnya bila masing-masing diameter dan ketebalan pipa menjadi variabelnya.

Analisis kedua adalah mencari beban tarik (antitekuk) minimum untuk menjaga stabilitas tiang sedemikian rupa sehingga tidak menyebabkan lelehnya material baja. Beban tarik minimum bekerja sesaat setelah temperatur kritis terlampaui. Pada analisis ini beban tarik minimum merupakan fungsi temperatur. Analisis dilakukan dengan memvariasikan geometri tiang baja dan distribusi temperatur dengan cara yang analog dengan analisis pertama.

### 5.1 Data-data teknis

Tiang pipa baja yang dimodelkan dibagi menjadi 8 (delapan) elemen yang sama panjang dengan pembebanan akibat berat sendiri ditambah beban friksi dari insulator sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 6**. *Out-of-straightness* sebagai konsekuensi dari proses fabrikasi dibatasi maksimum 1/1000 panjang pipa.

Di lapangan diketahui bahwa di dalam ruang pipa diisi oleh insulator yang dapat memberikan beban friksi terhadap permukaan dalam dinding pipa. Beban friksi yang diperhitungkan dalam analisis ini adalah beban friksi antara insulator dengan permukaan dalam dinding pipa. Pada kenyataannya perumusan beban friksi tersebut sepanjang pipa adalah tidak sederhana dan bervariasi sepanjang kedalaman pipa serta diameter pipa selain bergantung kepada dimensi dan berat satuan dari insulator. Perubahan temperatur akan mempengaruhi koefisien friksi tersebut. Dalam makalah ini besaran friksi dianggap konstan sepanjang kedalaman pipa, dan beban friksi ini mulai aktif bekerja pada saat pipa mulai terjadi deformasi. Beban friksi ini diambil nilainya  $0.001 \text{ kgf/cm}^2$ . Untuk selanjutnya beban friksi ini langsung menjadi beban mati tambahan pipa baja.

Pada analisis ini properti tiang pipa baja diambil:

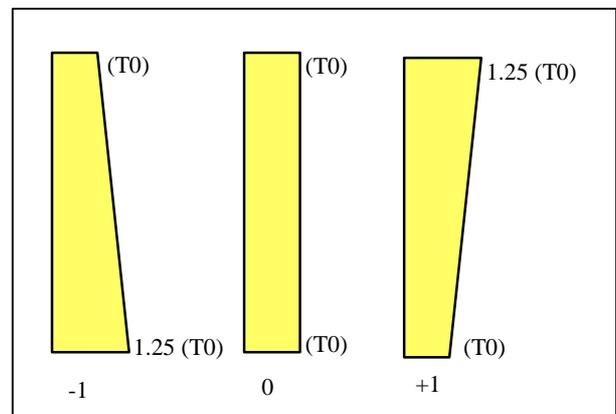
- modulus Young ( $E$ ) =  $2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
- angka Poisson ( $\nu$ ) = 0.30
- tegangan leleh ( $F_y$ ) = 240 MPa
- distribusi tegangan residu yang diidealisasikan seperti yang ditunjukkan **Gambar 7**, dengan nilai maksimum diambil sebesar  $0.3 F_y$ .

Tegangan residu yang ada ini walaupun bervariasi di sekeliling penampang namun dalam analisis ini dianggap konstan pada sepanjang tiang pipa baja.

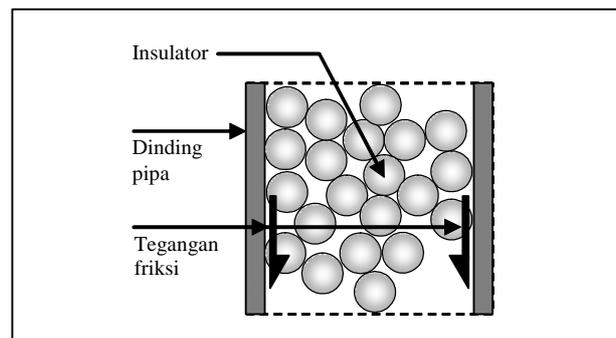
Selama proses transfer panas dari sumber panas ke struktur pipa baja sampai pada temperatur maksimumnya, dianggap distribusi panas pada arah ketebalan dinding pipa adalah konstan. Hal ini sehubungan ketebalan dinding pipa dianggap cukup tipis. Dengan asumsi ini, maka tidak terjadi *bowing actions*, yaitu aksi yang dapat menyebabkan timbulnya momen lentur pada dinding pipa.

### 5.2 Pemrograman

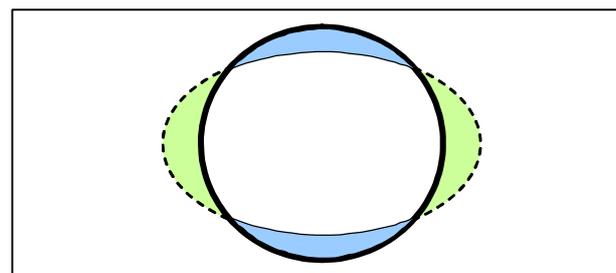
Pemrograman dilakukan dengan bantuan Software MATLAB 6.0 dengan sejumlah fungsi-fungsi buatan yang bertindak sebagai *subroutine*.



**Gambar 5. Gradient suhu (x: Grad 1, o: Grad 0 dan +: Grad -1)**



**Gambar 6. Tegangan friksi dari insulator**



**Gambar 7. Distribusi tegangan residu**

## 6. Hasil dan Pembahasan

Analisis pada model dilakukan dengan bantuan bahasa pemrograman yang difasilitasi oleh software MATLAB 6.0. Hasil aplikasi program disajikan pada beberapa grafik hubungan suhu ( $T$ ) dan perpindahan ( $U$ ). Pada umumnya perilaku struktur dari suatu analisis stabilitas direpresentasikan oleh hubungan antara gaya ( $P$ ) dan perpindahan ( $U$ ). Pada dasarnya grafik hubungan suhu ( $T$ ) dan perpindahan ( $U$ ) analog dengan grafik hubungan gaya ( $P$ ) dan perpindahan ( $U$ ), mengingat setiap inkremen suhu analog dengan dekremen kekakuan sehingga dapat juga dianggap sebagai inkremen beban.

Untuk verifikasi, program dieksekusi dengan sejumlah variasi antara lain variasi lendutan awal, panjang pipa, diameter pipa serta ketebalan pipa berikut variasi gradien suhu sepanjang pipa. Setiap variasi suatu parameter, maka parameter-parameter lainnya tetap atau konstan. Geometri referensi terdiri dari diameter pipa 0.15m, tebal pipa 0.006 m, panjang Tiang 4 m dan lendutan awal  $L/851$

Analisis pertama dengan variasi pembebanan dilakukan untuk beban aksial 7000 kgf, 14000 kgf dan 21000 kgf dengan lendutan awal tetap, yaitu dengan lendutan 0.47 mm ( $L/851$ ) serta fungsi lendutan fungsi setengah sinus. Hasilnya menunjukkan bahwa suhu pada saat sebagian penampang mengalami leleh pertama (suhu leleh) akan semakin rendah bila beban aksial yang bekerja pada tiang meningkat. Hasil analisis ditunjukkan pada **Gambar 8** dan **Tabel 1**:

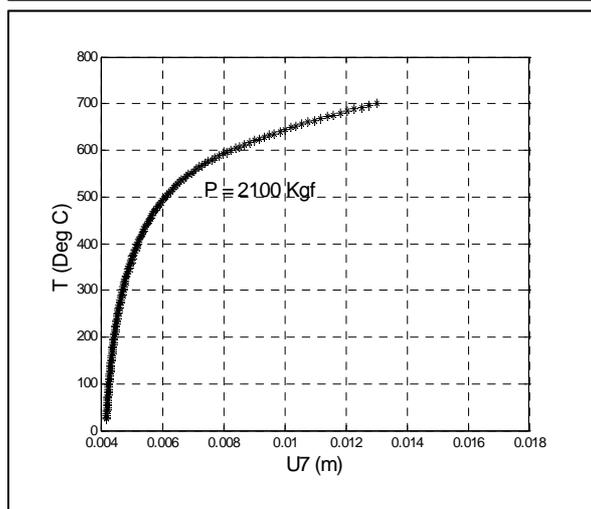
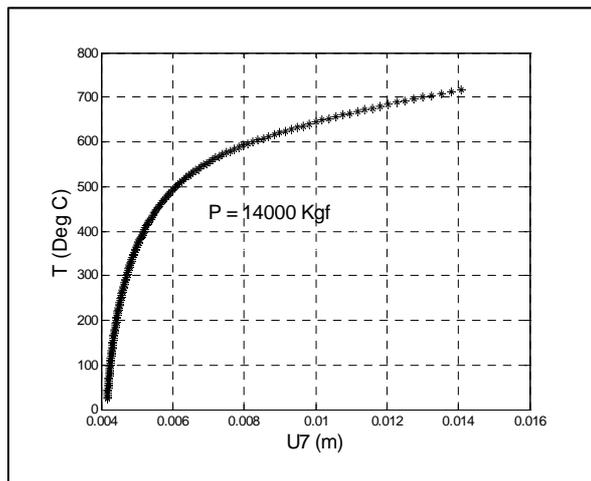
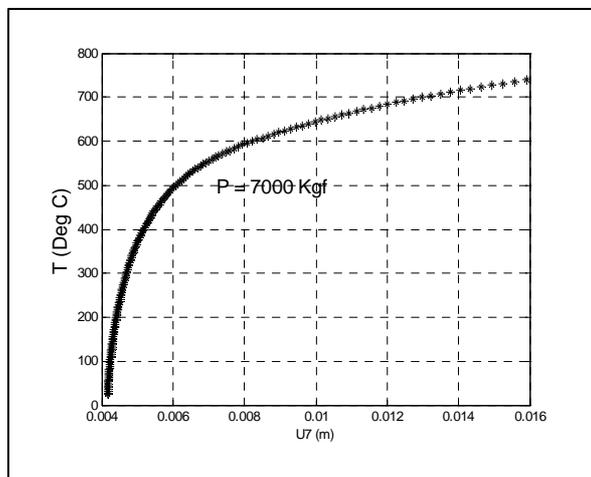
Hasil-hasil pada **Tabel 1** di atas juga menunjukkan bahwa semakin besar beban aksial yang bekerja, maka perbandingan antara perpindahan pada saat leleh pertama dengan perpindahan awal akan semakin mengecil. Hasil analisis tersebut di atas sesuai dengan *common sense*.

Analisis kedua adalah untuk variasi *gradient* suhu pada lendutan awal dan beban aksial tetap (0.0047 m dan 7000 kgf). *Gradient* suhu berturut-turut adalah 0.25 (membesar ke bawah), 0 (konstan) dan 0.25 (membesar ke atas) seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 9** dan **Tabel 2**.

Analisis ketiga adalah dengan variasi lendutan awal dengan beban aksial tetap 7000 kgf. Hasil analisis dapat dilihat pada **Gambar 10** dan **Tabel 3**. Dari hasil analisis yang ditunjukkan oleh **Tabel 3** pada umumnya sesuai dengan hipotesis umum bahwa semakin besar lendutan awal, maka akan semakin rendah suhu leleh pertamanya serta akan semakin kecil rasio lendutan leleh pertama dan lendutan awalnya.

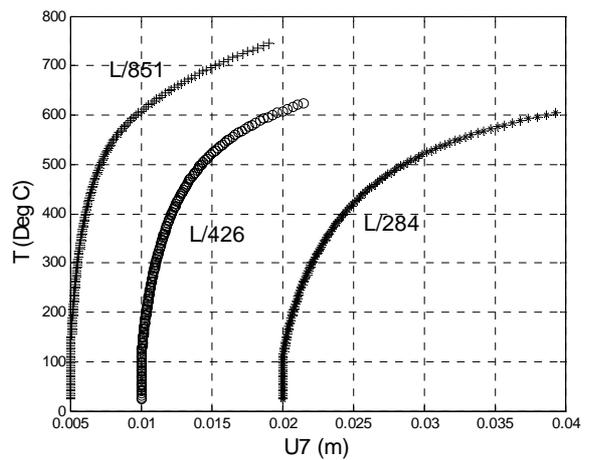
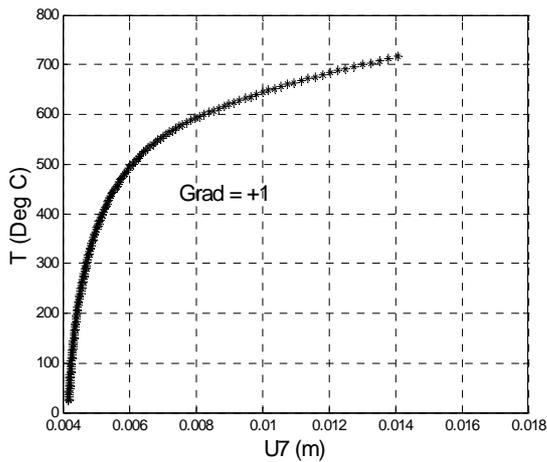
Analisis keempat adalah dengan variasi diameter pipa berturut-turut adalah 0.15, 0.20 dan 0.25 m. dengan

beban aksial, ketebalan pipa, panjang dan lendutan awal tetap. Hasil analisis dapat dilihat pada **Gambar 11**. Dari hasil analisis yang ditunjukkan oleh **Gambar 11** pada umumnya sesuai dengan hipotesis umum

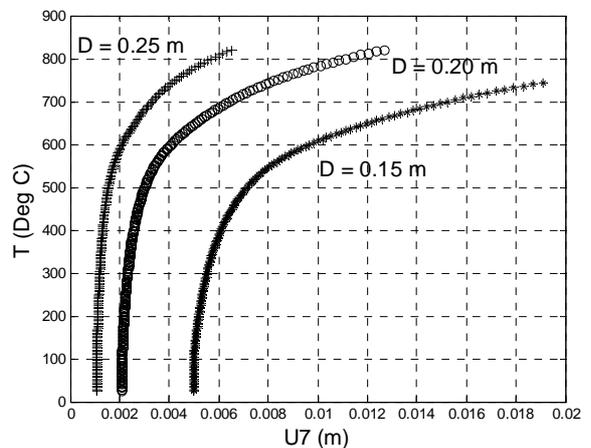
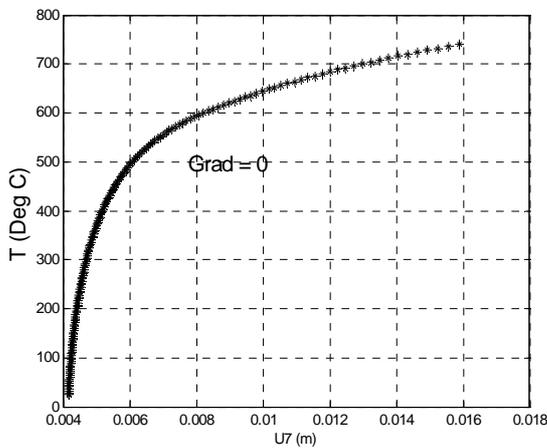


**Gambar 8. Hubungan suhu ( $T$ ) vs perpindahan lateral**

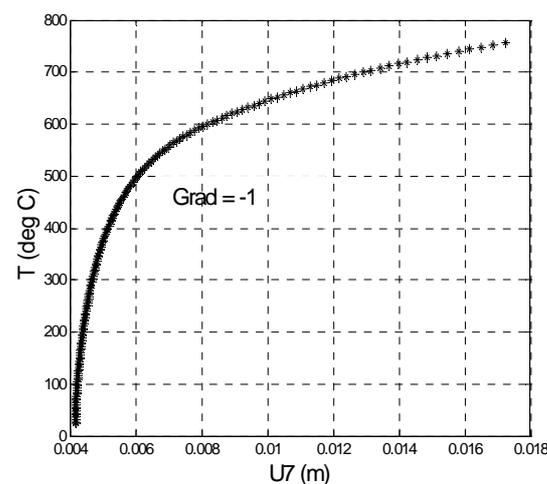
( $U_7$ ) dengan lendutan awal tetap dan beban aksial bervariasi (7000 kgf, 14000 kgf dan 21000 kgf )



Gambar 10. Hubungan Suhu (T) vs perpindahan lateral (U7) dengan variasi Lendutan Awal



Gambar 11. Hubungan Suhu (T) vs perpindahan lateral (U7) dengan variasi Diameter Tiang



Gambar 9. Hubungan Suhu (T) vs perpindahan lateral (U7) dengan variasi Gradient Suhu

bahwa semakin kecil diameter pipa, maka akan semakin rendah suhu leleh pertamanya serta akan semakin besar rasio lendutan leleh pertama dan lendutan awalnya.

Analisis kelima adalah dengan variasi panjang pipa berturut-turut adalah 4,5 dan 6 m. dengan beban aksial, ketebalan pipa, diameter pipa dan lendutan awal tetap. Hasil analisis dapat dilihat pada **Gambar 12**. Dari hasil analisis yang ditunjukkan oleh Grafik pada umumnya sesuai dengan hipotesis umum bahwa semakin panjang pipa, maka akan semakin rendah suhu leleh pertamanya serta akan semakin kecil rasio lendutan leleh pertama dan lendutan awalnya

Analisis keenam adalah dengan variasi ketebalan pipa berturut-turut adalah 6,7.5 dan 9 mm. dengan beban aksial, ketebalan pipa, diameter pipa dan lendutan awal tetap. Hasil analisis dapat dilihat pada **Gambar 13**. Dari hasil analisis yang ditunjukkan oleh Grafik pada umumnya sesuai dengan hipotesis umum bahwa

Tabel 1. Hasil analisis dengan lendutan awal tetap dan beban aksial bervariasi

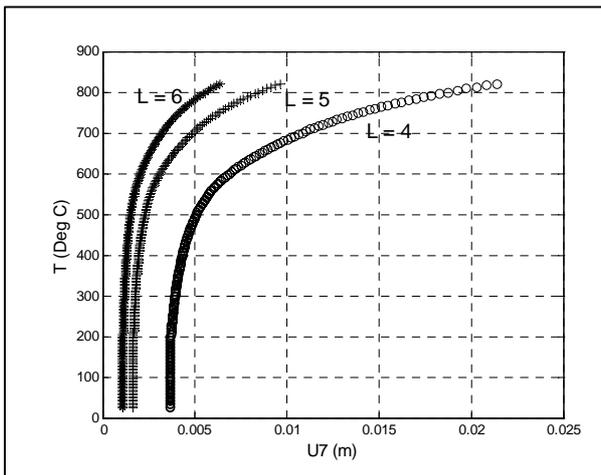
| No. | Beban Aksial (kgf) | $L_0$ | Suhu Leleh (°C) | Lendutan Leleh $U_{max_L}$ (m) | $U_{max_L}/U_{max_0}$ |
|-----|--------------------|-------|-----------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1   | 7000               | 1/851 | 740             | 0.0160                         | 3.4043                |
| 2   | 14000              | 1/851 | 716             | 0.0143                         | 3.0426                |
| 3   | 21000              | 1/851 | 694             | 0.0129                         | 2.7447                |

Tabel 2. Hasil analisis dengan beban aksial tetap, lendutan awal tetap, dan gradient suhu bervariasi

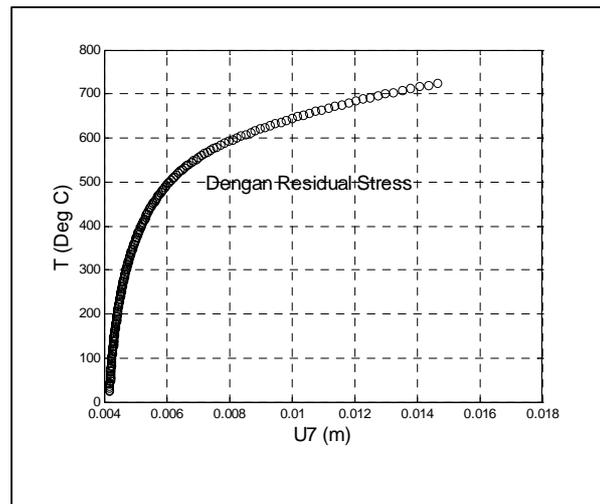
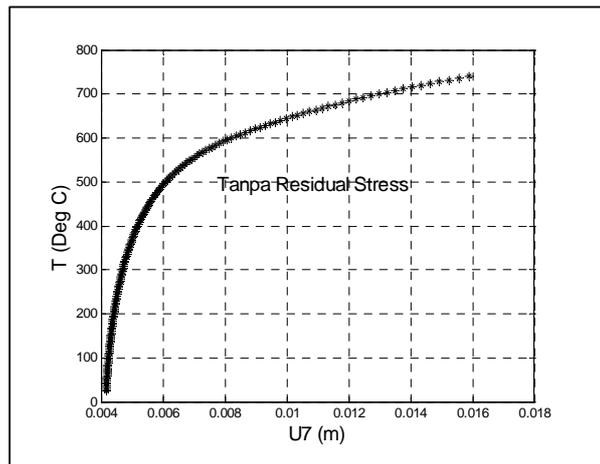
| No. | Gradient Suhu            | $U_{max_0}$ | Suhu Leleh (°C) | Lendutan Leleh $U_{max_L}$ (m) | $U_{max_L}/U_{max_0}$ |
|-----|--------------------------|-------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1   | 0                        | 1/851       | 740             | 0.0180                         | 3.8298                |
| 2   | 0.25 (membesar ke atas)  | 1/851       | 756             | 0.0093                         | 1.9787                |
| 3   | 0.25 (membesar ke bawah) | 1/851       | 726             | 0.0107                         | 2.2276                |

Tabel 3. Hasil analisis dengan beban tetap dan lendutan awal bervariasi

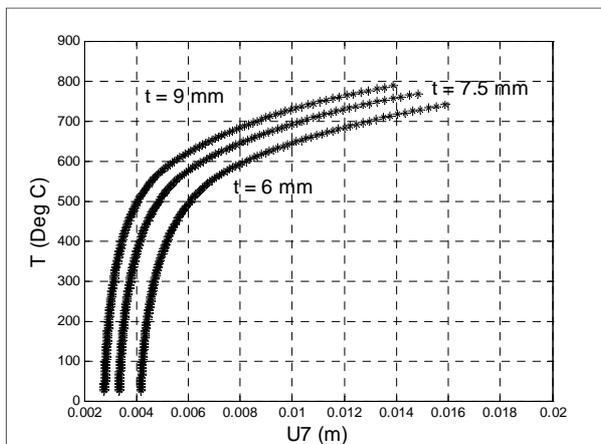
| No. | Lendutan Awal $U_{max_0}$ (m) | $U_{max_0}$ | Suhu Leleh (°C) | Lendutan Leleh $U_{max_L}$ (m) | $U_{max_L}/U_{max_0}$ |
|-----|-------------------------------|-------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1   | 0.0047                        | 1/851       | 740             | 0.0160                         | 3.4043                |
| 2   | 0.0094                        | 1/426       | 622             | 0.0143                         | 3.0426                |
| 3   | 0.0141                        | 1/284       | 601             | 0.0129                         | 2.7447                |



Gambar 12. Hubungan suhu (T) vs perpindahan lateral ( $U_7$ ) dengan variasi Panjang Tiang



Gambar 14. Hubungan Suhu (T) vs Perpindahan Lateral ( $U_7$ ) tanpa residual stress dan dengan residual stress



Gambar 13. Hubungan suhu (T) vs perpindahan lateral ( $U_7$ ) dengan variasi Ketebalan Tiang

semakin tipis pipa, maka akan semakin rendah suhu leleh pertamanya serta akan semakin besar rasio lendutan leleh pertama dan lendutan awalnya

Analisis terakhir dengan memasukkan pengaruh *residual stress* yang hasilnya ditunjukkan oleh **Gambar 14**, dimana leleh pertamanya akan semakin rendah. Sejumlah analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa program memenuhi hipotesis umum dengan asumsi-asumsi yang telah digariskan dibawah terutama yang berhubungan dengan batasan dimana geometri struktur sedemikian rupa bebas dari tekuk lokal.

## **7. Kesimpulan**

Dari hasil analisis dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini:

1. Distribusi beban termal yang tidak konstan sepanjang tiang memberikan nilai suhu leleh dan suhu runtuh yang lebih cepat atau kecil dibandingkan terhadap beban termal yang terdistribusi konstan/seragam.
2. Bila panjang pipa ditambah, maka suhu leleh pertama maupun suhu runtuh akan lebih cepat atau kecil.
3. Hasil kajian menunjukkan bahwa penambahan diameter pipa menghasilkan kenaikan suhu leleh pertama dan suhu runtuh.
4. Hasil kajian menunjukkan bahwa penambahan ketebalan pipa menghasilkan kenaikan suhu leleh pertama dan suhu runtuh.
5. Semakin besar lendutan awal, maka semakin rendah suhu leleh pertama dan suhu runtuhnya.
6. Peningkatan beban pada tiang akan memperpendek rentang plastifikasi tiang; dan kondisi akan diperburuk dengan membesarnya lendutan awal.
7. Tegangan residu dapat mempercepat terjadinya kelelahan pertama. Artinya, suhu leleh pertama akan menurun dengan adanya tegangan residu.
8. Untuk menghindari keruntuhan yang terjadi pada suhu-suhu yang tinggi, aplikasi program menunjukkan bahwa pemberian beban antitekuk sebelum beban termal diberikan sedemikian rupa sehingga tidak menimbulkan tegangan tekan pada struktur cukup menjamin struktur tidak akan sempat mengalami kelelahan sampai dengan suhu maksimal 800°C.
9. Nilai beban antitekuk minimum yang diberikan setelah leleh pertama terjadi meningkat seiring

dengan membesarnya beban termal; sebaliknya beban tarik maksimal menurun dengan membesarnya beban termal.

10. Untuk penelitian lebih lanjut hasil-hasil analisis diberikan dalam bentuk non dimensional.

## **Daftar Pustaka**

- Badan Standardisasi Nasional, 2002, "*Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*", SNI 03-1729-2002.
- Barthelemy, B., 1976, "*Heating Calculation of Structural Steel Members*", Journal Structural Div. ASCE, 102(8), 1549-1558.
- Bayazitogulu, Y. and Osizik, M.N., "*Element of Heat and Mass Transfer*", John Wiley & Sons.
- Bazant, Z.P. and Cedolin, L., 1991, "*Stability of Structures*", Oxford University Press.
- Brockenbrough, R.L., 1970, "*Theoretical Stresses and Strains from Heat Curving*", Journal St. Div ASCE 96(7), 1421-1444.
- BSI, 1995, "*Eurocode 3 Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design*".
- Chen, W.F. and Atsuta, T., "*Theory of Beam-Columns*", McGraw-Hill.
- Chung, W. and Ahmad, S.H., 1994, "*Model for Shear Critical High Strength Concrete Beams*", ACI Structural Journal, Vol. 91, No.1.
- Cook, R.D., Malkus, D.S. and Plesha, M.E., 1989, "*Concepts and Application of Finite Element Analysis*", John Wiley & Sons.
- Crisfield, M.A., 1991, "*Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*", Vol. 1, John Wiley & Sons, England.
- Crozier, D.A. and Wong, M.B., 1994, "*Collapse Temperature Analysis of Steel Frames*", Proceeding of The Australian Structural Engineering Conference, Sidney, 1005-1010.
- Crozier, D.A. and Wong, M.B., 1995, "*A Solution for Elastoplastic Analysis of Structure under Uniformly Distributed Loads*", Proceeding of Fifth Asia-Pasific Conference on Structural Engineering and Construction, Gold Coast, Australia, 91-96.

- Edwards, D.K. and Matavosian, R., 1990, "Emissivity Data for Gasses, section 5.5.5, Hemisphere Hand Book of Heat Transfer of Heat Exchanger Design".
- Englerkirk, R., 1993, "Steel Structures Controlling Behaviour Through Design", John Wiley & Sons.
- Guijit, J., 1990, "Upheaval Buckling of Offshore Pipelines: Overview and Introduction", The 22nd Annual OTC (Offshore Technology Conference), Houston, Texas.
- Incropera, F.P. and Dewit, D.P., "Fundamental of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons.
- Kyriakides Stelios, Klever Frans J. and Andrew Palmer C., 1994, "Limit – State Design of Higher-Temperature Pipelines", ASCM.
- Pi, Young Li and Trahair, N.S., 1994, "Inelastic Analysis of Steel Beam – Columns. I Theory", Journal of Structural Engineering, ASCE, 2041-2061.
- Pi, Young Li and Trahair, N.S., 1994, "Inelastic Analysis of Steel Beam – Columns. II Applications", Journal of Structural Engineering, ASCE, 2041-2061.
- Reddy, J.N., 1984, "Energy and Variational Methods in Applied Mechanics", John Wiley & Sons.
- Salmon, C.G. and Johnson, J.E., "Steel Structure: Design and Behavior", Harper & Row, Publishers, Inc.
- Siegel, R. and Howel, J.R., 1992, "Thermal Radiation Heat Transfer", Hemisphere Publishing Company.
- Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., 1961, "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill.
- Yang, Yeong Bin and Kuo, Shyh Rong, 1994, "Theory and Analysis of Non-linear Framed Structure", Prentice Hall, New York.
- Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., 1989 & 1991, "The Finite Element Method", Volume 1 & 2, McGraw-Hill.