

**“ ANALISA PENGARUH TEGANGAN SISA PENGELASAN  
TERHADAP KEKUATAN RANGKA TUBULAR ”**

**SKRIPSI**

*Dijadikan untuk memenuhi salah satu syarat guna meraih gelar  
Sarjana Teknik Kelautan pada Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin  
Makassar*



Nama: M. AMAL AMRULLAH

NIM: D32116001

**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2020**



## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah in:

Nama : M. Amal Amrullah

NIM : D32116001

Departemen : S1 Teknik Kelautan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi tugas akhir yang saya tulis ini benar-benar hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila kemudian hari saya terbukti bahwa keseluruhan skripsi ini hasil dari karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 23 september 2020

Penulis,



M. Amal Amrullah

D32116001



**LEMBAR PENGESAHAN**

Judul Skripsi:

**"ANALISIS PENGARUH TEGANGAN SISA PENGELASAN TERHADAP  
KEKUATAN RANGKA TUBULAR"**

OLEH

M. AMAL AMRULLAH

D321 16 001

Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing pada :

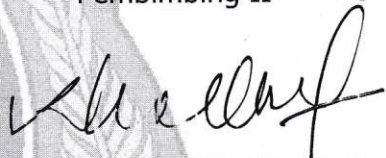
Tanggal : 26 Juli 2020

Di : Gowa

Pembimbing I

Pembimbing II

  
Muhammad Zubair Muis Alie, ST, MT, Ph.D  
Nip. 197506082005011003

  
Daeng Paroka, ST.,MT.,Ph.D  
Nip: 197201181998021001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Kelautan

  
Dr. Taufiqur Rachman, ST, MT  
196908021997021001



## LEMBAR PENGESAHAN KOMISI PENGUJI

Judul Skripsi

### "ANALISIS PENGARUH TEGANGAN SISA PENGELOASAN TERHADAP KEKUATAN RANGKA TUBULAR"

OLEH

M. AMAL AMRULLAH

D321 16 001

Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing pada :

Tanggal : 26 Juli 2020

Di : Gowa

Dengan Panel Ujian Skripsi

1. Ketua : Muhammad Zubair Muis Alie, ST, MT, Ph.D
2. Sekertaris : Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D
3. Anggota 1 : Ir. Juswan, MT
4. Anggota 2 : Dr. Taufiqur Rachman, ST, MT

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Kelautan

  
Dr. Taufiqur Rachman, ST, MT

196908021997021001





## ABSTRAK

**M. AMAL AMRULLAH**, *Analisa Tegangan Sisa Pengelasan Terhadap Kekuatan Rangka Tubular*. Dibimbing Oleh (**Muhammad Zubair Muis Alie dan Daeng Paroka**)

Tegangan sisa adalah gaya elastis yang dapat mengubah jarak antar atom dalam bahan tanpa adanya beban dari luar. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam dalam suatu bahan, antara lain akibat perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan pada bahan yang mengalami proses pengelasan. Permasalahan utama proses pengelasan adalah terjadinya tegangan sisa, analisa pengaruh tegangan sisa ini dilakukan dengan memberikan suhu pengelasan pada salah satu ujung *brace* yang melekat pada permukaan *chord* sebesar 1500°C dengan variasi ketebalan *brace* yaitu 9,5 mm, 16 mm, dan 19 mm, suhu pengelasan akan menimbulkan tegangan di sekitar sumbu las dengan tegangan terbesar terdapat pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), tegangan sisa minimal terdapat pada *brace* dengan ketebalan 19 mm di posisi 180° dengan harga tegangan yaitu sebesar 399,4 N/mm<sup>2</sup> dan tegangan sisa maksimal terdapat pada *brace* dengan ketebalan 9,5 mm di posisi 90° dengan harga tegangan 459,8 N/mm<sup>2</sup>. Dari hasil tersebut perhitungan dapat digunakan untuk memprediksi tegangan sisa untuk model rangka tubular dan tebal pelat lainnya.

**Kata Kunci:** *Tegangan Sisa, Pengelasan, Heat Affected Zone (HAZ), Rangka Tubular*



## ABSTRACT

**M. AMAL AMRULLAH**, Analysis of the Welding Residual Stress on the Strength of the Tubular Joint. Supervised by **(Muhammad Zubair Muis Alie and Daeng Paroka)**

Residual stress is an elastic force that can change the distance between atoms in a material without any external load. Residual stresses are caused by non-uniform plastic deformation in a material, partly due to uneven heat treatment or differences in the rate of cooling of the material undergoing the welding process. The main problem of the welding process is the residual stress, the analysis of the effect of the residual stress is carried out by giving the welding temperature at one end of the brace attached to the chord surface at 1500°C with variations in brace thickness of 9,5 mm, 16 mm, and 19 mm, welding temperature will cause the stress around the welding axis with the greatest stress in the Heat Affected Zone (HAZ) area, the minimum residual stress is in the brace with a thickness of 19 mm at 180° position with a stress value of 399,4 N/mm<sup>2</sup> and the maximum residual stress is in the brace with a thickness of 9,5 mm in the 90° position with a stress value of 459,8 N/mm<sup>2</sup>. From these results calculations can be used to predict residual stresses for tubular joint models and other plate thicknesses.

**Keywords:** *Residual Stress, Welding, Heat Affected Zone (HAZ), Tubular Joint*



## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Alhamdulillahirabbilalamin, puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, banyak nikmat yang Allah berikan kepada kita namun sedikit sekali yang kita ingat. Segala puji hanya layak untuk Allah tuhan seru sekalian alam atas segala berkat, rahmat, taufik, serta hidayah-Nya yang tiada terkira besarnya,

Skripsi ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan studi guna meraih gelar sarjana pada Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.

Skripsi ini dapat diselesaikan berkat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu patut disyukuri dan mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Muhammad Zubair Muis Alie, ST, MT, Ph.D selaku pembimbing pertama dan Bapak Daeng Paroka, ST.,MT.,Ph.D. selaku pembimbing kedua yang senantiasa membimbing serta memberikan kritikan dan saran sejak dimulainya pembuatan skripsi ini sampai selesai.

Tidak lupa juga terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung penulis hingga selesainya skripsi ini, karena itu di ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua, Ayahanda Amrullah Ibunda Sarnawiah. dan Kakanda Amsar, Amsir dan Asriani yang telah memberi bantuan moril maupun materil selama ini.
2. Bapak Dr. Taufiqur Rachman, ST, MT. selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Bapak Ashury, ST, MT. selaku Sekretaris Departemen Teknik Kelautan Fakutas Teknik Universitas Hasanuddin.



4. Bapak Ir. Juswan, MT. dan Dr. Taufiqur Rachman, ST, MT. selaku dosen penguji yang memberikan kritik membangun pada penelitian saya.
5. Segenap staf pengajar dan administrasi Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu kelancaran perkuliahan dan administrasi.
6. Kanda Fuad Mahfud Assidiq, ST.,MT, terima kasih atas bantuan dan bimbingannya selama ini
7. Teman-teman Teknik Kelautan 2016 serta adinda Teknik Kelautan.
8. Teman-teman Posko KKN Desa Galesong Baru Kecamatan Galesong Kabupaten Takalar Gelombang 103 Universitas Hasanuddin, terima kasih atas kebersamaannya selama di Posko KKN.
9. Dan seluruh orang yang tak mungkin disebutkan satu-satu persatu, terima kasih atas seluruh bantuan moril maupun materil yang telah diberikan selama ini.

Penulis menyadari bahwa di dalam laporan ini masih terdapat beberapa kekurangan yang semata-mata dikarenakan oleh keterbatasan sebagai insan biasa. Untuk itu, penulis akan senantiasa menerima kritikan dan saran-saran dari pembaca yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini.

Harapan penulis kedepannya, kiranya skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan bagi semua pihak yang berkenan untuk membaca dan mempelajarinya serta menjadi penambah cakrawala berfikir bagi orang yang membacanya.

Gowa, 26 Juli 2020

**M. Amal Amrullah**





# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN KOMISI PENGUJI</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN</b> .....	<b>xvi</b>
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1.Latar Belakang .....	1
1.2.Rumusan Masalah.....	2
1.3.Tujuan Penulis.....	3
1.4.Manfaat Penelitian .....	3
1.5.Sistematika Penulis .....	3
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1.Rangka Tubular .....	5
2.1.1.Sambungan Sederhana .....	6
2.1.2.Distribusi Tegangan pada Rangka Tubular .....	8
2.1.3.Parameter Desain Sambungan Rangka Tubular .....	10
2.1.4.Hubungan antara Tegangan Aksial dengan Dimensi Rangka Tubular .....	11



2.2.Desain Pengelasan Rangka Tubular.....	13
2.2.1.Pengalasan pada <i>Chord</i> .....	13
2.2.2.Pengalasan pada <i>Brace</i> .....	14
2.3. Kapasitas Sambungan Tubular.....	16
2.4. <i>Strength Factor</i> .....	17
2.5. <i>Chord Load Factor</i> .....	18
2.6. Tegangan Sisa Pengelasan .....	18
2.6.1 Teori Dasar .....	18
2.6.2. Pengaruh Tegangan Sisa Pengelasan .....	23
2.6.3.Distribusi Tegangan Sisa Hasil Pengelasan .....	24
2.7. Analisa FEM .....	25
2.8. <i>Transient Analysis</i> .....	27
2.9. <i>Structure Analysis</i> .....	28

**BAB 3. METODE PENELITIAN ..... 30**

3.1.Lokasi dan Waktu Penelitian .....	30
3.2.Penyajian Data Penelitian .....	30
3.3.Teknik Pengumpulan Data.....	30
3.4.Metode dan Analisa Data.....	30
3.4.1.Metode.....	30
3.4.2.Analisa Data .....	31
3.5.Alur Penelitian .....	39

**ANALISA DAN PEMBAHASAN ..... 40**

4.1. <i>Meshing</i> .....	41
---------------------------	----



4.2. <i>Boundari Condition</i> .....	45
4.3. <i>Meshing Sensitivity</i> .....	48
4.4. Hasil Analisa Tegangan dan Deformasi.....	48
4.4.1. <i>Brace 1</i> .....	49
4.4.2. <i>Brace 2</i> .....	51
4.4.3. <i>Brace 3</i> .....	53
4.5. Hasil Analisa Tegangan Sisa Pengelasan <i>Residual Stress</i> .....	55
4.5.1. <i>Stress Analysis</i> akibat Pengelasan .....	56
4.5.2. <i>Residual Stress Analysis</i> .....	57
<b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>59</b>
5.1. Kesimpulan.....	59
5.2. Saran .....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>61</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>63</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Sambungan Rangka Tubular .....	6
Gambar 2.2 Klasifikasi Sambungan Sederhana .....	7
Gambar 2.3 Distribusi Tegangan pada Rangka Tubular.....	9
Gambar 2.4 Konsentrasi Tegangan Rangka Tubular T .....	9
Gambar 2.5 Diameter Luar <i>Brace</i> dan Tegangan Aksial.....	11
Gambar 2.6 Diameter Luar <i>Brace</i> dan Faktor Kekuatan.....	11
Gambar 2.7 Ketebalan <i>Brace</i> dan Tegangan Aksial.....	12
Gambar 2.8 Ketebalan <i>Brace</i> dan <i>In Plan Bending</i> .....	12
Gambar 2.9 Ketebalan <i>Brace</i> dan <i>Out Plan Bending</i> .....	13
Gambar 2.10 <i>Fillet Welded Lap Joint</i> (Tubular) .....	13
Gambar 2.11 Transisi Ketebalan Sambungan Butt di Bagian Ketebalan yang Tidak Sama (Tubular) .....	14
Gambar 2.12 Sambungan Tubular Prakuifikasi untuk <i>Fillet Welded</i> ..	14
Gambar 2.13 Detail Celah ( <i>gap</i> ) pada Rangka Tubular .....	15
Gambar 2.14 Tegangan Sisa Pengelasan pada Pelat.....	21
Gambar 2.15 Tegangan Sisa Pengelasan pada Pelat <i>Stiffener</i> .....	22
Gambar 2.16 Distribusi Tegangan Sisa pada Arah Garis Lasan .....	25
Gambar 3.1 Geometri Pemodelan <i>Joint 3007</i> .....	31
Gambar 3.2 Geometri Rangka Tubular.....	33
Gambar 3.3 Gap pada Sambungan <i>Chord-Brace</i> .....	33
Gambar 3.4 Model Rangka tubular dalam 2 Dimensi.....	33
Gambar 3.5 Menu Utama ANSYS Workbench .....	34
Gambar 3.6 Proses <i>Import model</i> .....	34
Gambar 3.7 Proses Pembagian Face.....	35
Gambar 3.8 Geometri Pengelasan .....	35
Gambar 3.9 <i>Slice Model</i> .....	36
Gambar 3.10 Tampilan Menu Proses <i>Meshing</i> .....	36



Gambar 3.11 <i>Automatic Method</i> .....	37
Gambar 3.12 Proses <i>Mesh Sizing</i> .....	37
Gambar 3.13 Hasil <i>Meshing</i> .....	38
Gambar 3.14 Hasil <i>Meshing</i> pada Area Sambungan .....	38
Gambar 4.1 Pemodelan <i>Mesh</i> pada <i>Brace</i> .....	45
Gambar 4.2 Geometri <i>Edge Sizing</i> dengan <i>Bias Factor</i> .....	45
Gambar 4.3 Teknik <i>Face Meshing</i> .....	46
Gambar 4.4 Geometri <i>Face Meshing</i> .....	46
Gambar 4.5 <i>Mesh</i> .....	47
Gambar 4.6 <i>Mesh</i> pada <i>Chord Area</i> .....	47
Gambar 4.7 <i>Mesh</i> pada <i>Weld Geometry</i> .....	48
Gambar 4.8 <i>Mesh Weld Geometry</i> tampak samping .....	48
Gambar 4.9 <i>Boundary Condition</i> .....	49
Gambar 4.10 <i>Fixed Support</i> pada Ujung <i>Chord</i> .....	50
Gambar 4.11 <i>Analysis Settings</i> .....	50
Gambar 4.12 Posisi <i>Max Stress &amp; Min Stress</i> .....	51
Gambar 4.13 <i>Max Stress</i> dan <i>Min Stress</i> .....	51
Gambar 4.14 <i>Meshing Sensitivity</i> .....	52
Gambar 4.15 <i>Equivalent Stress</i> .....	53
Gambar 4.16 <i>Total Deformation</i> .....	53
Gambar 4.17 <i>Node</i> pada Ujung <i>Brace</i> dengan Ketebalan 9,5 mm .....	54
Gambar 4.18 Tegangan yang Terjadi pada Ujung <i>Brace</i> dengan Ketebalan 9,5 mm .....	54
Gambar 4.19 <i>Equivalent Stress</i> .....	55
Gambar 4.20 <i>Total Deformation</i> .....	55
Gambar 4.21 <i>Node</i> pada ujung <i>Brace</i> dengan Ketebalan 16 mm .....	56
Gambar 4.22 Tegangan yang Terjadi pada <i>Ujung Brace</i> dengan Ketebalan 16 mm .....	56
Gambar 4.23 <i>Equivalent Stress</i> .....	57
Gambar 4.24 <i>Total Deformation</i> .....	57





Gambar 4.25 <i>Node</i> pada ujung <i>Brace</i> dengan Ketebalan 19 mm .....	58
Gambar 4.26 Tegangan yang Terjadi pada <i>Ujung Brace</i> dengan Ketebalan 19 mm .....	58
Gambar 4.27 <i>Thermal Distribution</i> . .....	59
Gambar 4.28 <i>Stress Distribution</i> pada <i>brace</i> 1 dan 2 .....	60
Gambar 4.29 <i>Stress Distribution</i> pada <i>brace</i> 1 dan 3 .....	60
Gambar 4.30 Posisi Titik ( <i>Node</i> ) dan Harga Tegangan ( <i>Stress</i> ) .....	61
Gambar 4.31 Posisi Titik ( <i>Node</i> ) dan Harga Regangan ( <i>Strain</i> ) .....	62
Gambar 4.32 <i>Residual Stress</i> pada Pengelasan .....	62



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Geometri dan Parameter $\beta$ .....	10
Tabel 2.2 Geometri dan Parameter $\tau$ .....	10
Tabel 2.3 Minimal L untuk Tiap Zona .....	15
Tabel 2.4 Faktor Kekuatan ( $Q_u$ ) .....	17
Tabel 2.5 Tegangan Sisa Tarik .....	22
Tabel 3.1 Geometri Pemodelan <i>Joint</i> 3007 .....	31
Tabel 3.2 Pembebanan pada tiap <i>Brace</i> pada <i>Joint</i> 3007.....	31
Tabel 4.1 <i>Mesh Size</i> .....	40
Tabel 4.2 Beban yang diberikan .....	45
Tabel 4.3 Tabulasi Simulasi (Hasil Olahan, 2020).....	48



## DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
<b>P</b>	Beban Aksial	N
<b>A</b>	Luas Penampang	mm <sup>2</sup>
<b>M</b>	Momen Lentur	N.mm
<b>L</b>	Panjang	m
<b>Dc</b>	Diameter <i>Chord</i>	mm
<b>tc</b>	Ketecalan <i>Chord</i>	mm
<b>d</b>	Diameter dalam	mm
<b>Db</b>	Diameter <i>Brace</i>	mm
<b>tb</b>	Ketebalan <i>Brace</i>	mm
<b>Lb</b>	Panjang <i>Brace</i>	mm
<b>g</b>	Gap antara <i>Brace - Chord</i>	mm
<b>Pa</b>	Beban Aksial yang diizinkan untuk <i>Brace</i>	N
<b>Ma</b>	Momen Lentur yang diizinkan untuk <i>Brace</i>	N.mm
<b>Qf</b>	Faktor Beban <i>Chord</i>	N
<b>Lc</b>	Panjang Efektif <i>Chord</i>	mm
<b>Fyb</b>	Tegangan Luluh	N/mm <sup>2</sup>
<b>σ(z)</b>	Tegangan Sisa	N/mm <sup>2</sup>
<b>α</b>	Koefisien Muai Panjang	°C <sup>-1</sup>
<b>E</b>	Modulus Young	N/mm <sup>2</sup>
<b>Tf</b>	Suhu Maksimal	°C
<b>Ts</b>	Suhu Minimal	°C
<b>L</b>	½ Ketebalan <i>Brace</i>	mm
<b>Fx</b>	Gaya Arah X	N
<b>My</b>	Momen Arah y	N.mm
	Momen Arah z	N.mm
	Suhu	°C



## DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

<b>Istilah/Singkatan</b>	<b>Arti/Keterangan</b>
IPB	<i>In Plan Bending</i>
OPB	<i>Out Plan Bending</i>
HAZ	<i>Heat Affected Zone</i>
FEM	<i>Finite Elemen Methode</i>
GUI	<i>Graphic User Interface</i>
G-I-G-O	<i>Garbage-in-Grabege-Out</i>
PDE	<i>Partial Differential Equation</i>
NLFEA	<i>Nonlinear Finite Element Analysis</i>
<i>Slice</i>	Memotong bagian geometri
<i>Mesh</i>	Membagi menjadi banyak elemen



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di bidang konstruksi yang semakin maju tidak dapat dipisahkan dari pengelasan karena mempunyai peranan penting dalam rekayasa dan reparasi logam. Pembangunan konstruksi dengan logam pada masa sekarang ini banyak melibatkan unsur pengelasan khususnya bidang rancang bangun karena sambungan las merupakan salah satu pembuatan sambungan yang secara teknis memerlukan keterampilan yang tinggi bagi pengelasnya agar diperoleh sambungan dengan kualitas baik.

Faktor yang mempengaruhi las adalah prosedur pengelasan yaitu suatu perencanaan untuk pelaksanaan penelitian yang meliputi cara pembuatan konstruksi las yang sesuai rencana dan spesifikasi dengan menentukan semua hal yang diperlukan dalam pelaksanaan tersebut. Faktor produksi pengelasan adalah jadwal pembuatan, proses pembuatan, alat dan bahan yang diperlukan, urutan pelaksanaan, persiapan pengelasan (meliputi: pemilihan mesin las, penunjukan juru las, pemilihan elektroda, penggunaan jenis kampuh) (Wiryosumarto, 2000).

Pada bangunan lepas pantai tipe jacket platform banyak menggunakan pipa baja untuk strukturnya. Ini karena bagian tubular memiliki sifat yang melekat dalam meminimalkan gaya hidrodinamik, dan memiliki kekakuan torsi yang tinggi serta rasio kekuatan terhadap berat yang lebih tinggi dibandingkan dengan sebagian baja konvensional.

seputar pengelasan banyak dijumpai pada anjungan lepas pantai ya pada bagian sambungan rangka tubular antara *chord* dan *brace*, ea ini membutuhkan perhatian khusus dari segi pengelasan





terkhusus pada tegangan sisa pengelasan. Setiap tipe sambungan rangka tubular memiliki perlakuan yang berbeda jika diberikan beban. Area kelelahan yang paling sensitif dalam anjungan lepas pantai adalah lasan pada sambungan tubular.

Dalam proses pengelasan bagian yang dilas menerima panas pengelasan setempat dan selama proses berjalan suhunya berubah terus sehingga distribusi suhu tidak merata, karena panas tersebut maka pada bagian yang dilas terjadi pengembangan termal. Sedangkan bagian yang dingin tidak berubah sehingga terbentuk penghalangan pengembangan yang mengakibatkan terjadinya peregangan yang rumit. Jika tidak dihindari, peregangan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan bentuk tetap yang disebabkan adanya perubahan besaran mekanik, disamping terjadi perubahan bentuk yang menyebabkan terjadi regangan dan tegangan yang sifatnya tetap tersebut disebut tegangan sisa.

Tegangan sisa timbul karena adanya perbedaan temperatur yang besar sedangkan distorsi terjadi jika logam las dibiarkan bergerak leluasa selama proses pendinginan. Tegangan sisa yang terjadi pada kampuh las ini dapat menyebabkan kegagalan (*fatigue*) yang mana dapat mengurangi kekuatan dari struktur dan komponen. Oleh karena itu tegangan sisa dalam pengelasan harus dikurangi sampai sekecil mungkin untuk mencegah kegagalan desain suatu komponen. Dengan mengerti mekanisme terjadinya tegangan sisa dapat dipelajari untuk mengambil langkah-langkah meminimalisasikan tegangan sisa yang terjadi pada saat pengelasan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah Penelitian ini adalah:

a. Bagaimana perilaku distribusi tegangan pada tubular?

b. Bagaimana pengaruh tegangan sisa pengelasan terhadap kekuatan

tubular?



### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Untuk mengetahui perilaku distribusi tegangan pada tubular.
- b. Untuk mengetahui pengaruh tegangan sisa pengelasan terhadap kekuatan tubular

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah Mengetahui hasil dari grafik tegangan sisa pengelasan terhadap kekuatan tubular dan untuk penerapannya terhadap bangunan lepas pantai.

### 1.5 Batasan Masalah

1. Rangka tubular yang digunakan adalah multi bidang (*multi-planar*)
2. Beban yang digunakan adalah beban titik
3. Tumpuan yang digunakan adalah tumpuan jepit
4. Tumpuan diletakkan pada kedua ujung *chord*
5. Suhu yang digunakan adalah titik leleh dari material baja
6. Kesalahan dalam proses pengelasan diabaikan
7. Tipe pengelasan tidak ditentukan
8. Ketebalan dari pengelasan tidak ditentukan
9. Nilai pada gambar adalah hasil konversi dari Satuan Internasional ke satuan *British*.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika dalam penulisan skripsi ini terbagi dalam lima bab dengan harapan maksud dan tujuan dari penulisan ini dapat terangkum secara keseluruhan. Pembagian bab tersebut adalah sebagai berikut:



PENDAHULUAN

merupakan gambaran awal yang menguraikan tentang informasi menyeluruh dari penelitian yang meliputi latar belakang, rumusan

masalah, tujuan penulisan, manfaat penulisan dan sistematika penulisan

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan secara singkat tentang teori-teori dasar mengenai rangka tubular dan analisa tegangan sisa pengelasan terhadap kekuatan tubular.

## BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, perolehan data, penyajian data dan tahapan-tahapan penelitian.

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengamatan, analisa dan pembahasan dari pengolahan data yang diperoleh dengan menggunakan teori-teori yang telah dijelaskan sebelumnya sehingga nanti dapat diharapkan hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian.

## BAB V PENUTUP

Bab ini menyajikan kesimpulan yang diperoleh dari hasil yang telah dilakukan serta saran-saran yang diharapkan mampu menjadi masukan untuk penelitian berikutnya.

## DAFTAR PUSTAKAN

## LAMPIRAN



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Rangka Tubular

Struktur tiga dimensi yang dibuat dari bagian tabung baja banyak digunakan saat ini di berbagai struktur seperti rangka, bangunan bertingkat tinggi, menara untuk turbin angin lepas pantai, dan instalasi bangunan lepas pantai. Ini karena bagian tubular memiliki sifat yang melekat dalam meminimalkan gaya hidrodinamik, dan memiliki kekakuan torsi yang tinggi serta rasio kekuatan terhadap berat yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian baja konvensional. Oleh karena itu, dari biaya konstruksi serta sudut pandang kekuatan, sangat menguntungkan dengan menggunakan bagian berongga tubular dalam berbagai penerapan, terutama untuk struktur lepas pantai. (Saini, 2016)

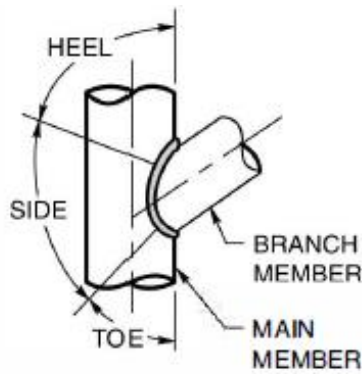
Bagian tubular yang biasa digunakan dalam anjungan lepas pantai adalah bagian berongga melingkar (*circular hollow sections*). Namun, dalam kasus struktur rangka, jembatan dan bangunan bertingkat tinggi, bagian berongga persegi panjang (*rectangular hollow section*) atau bagian berongga persegi (*square hollow section*) umumnya digunakan. Sambungan antara dua atau lebih bagian tubular disebut sebagai tubular joint. Untuk sambungan tubular yang terdiri dari dua pipa dengan diameter berbeda, pipa berdiameter lebih besar disebut *chord* dan yang lebih kecil dikenal sebagai *brace*.

Struktur menerima beberapa jenis beban lingkungan / operasional secara berkala misalnya Angin, gelombang, es, dan beban lalu lintas selama operasinya. Akibatnya, kerusakan kelelahan terjadi pada sambungan di struktur. Area kelelahan yang paling sensitif dalam anjungan lepas pantai adalah lasan pada sambungan tubular.

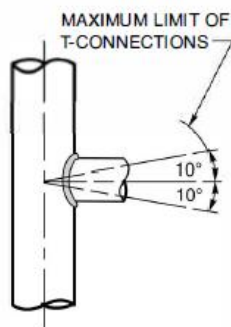


### 2.1.1 Sambungan Sederhana

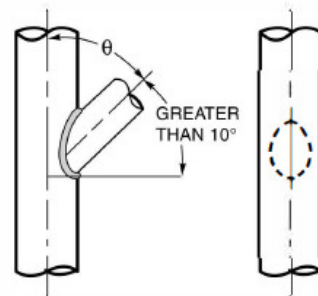
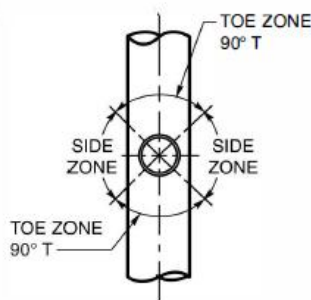
Berikut pada gambar 2.1 adalah tipe-tipe sambungan sederhana rangka tubular yang sering digunakan pada bangunan lepas pantai tipe *jacket platform*: (AWS, 2020)



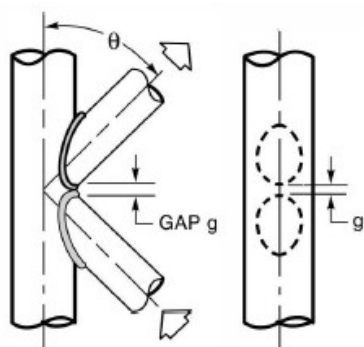
A. Bagian Rangka Tubular



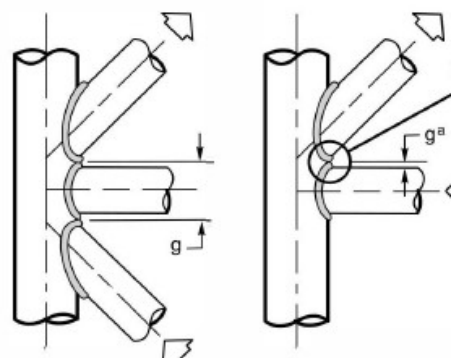
C. Sambungan T



B. Sambungan Y



E. Sambungan K



① K(T-K)      ② K(T-Y)

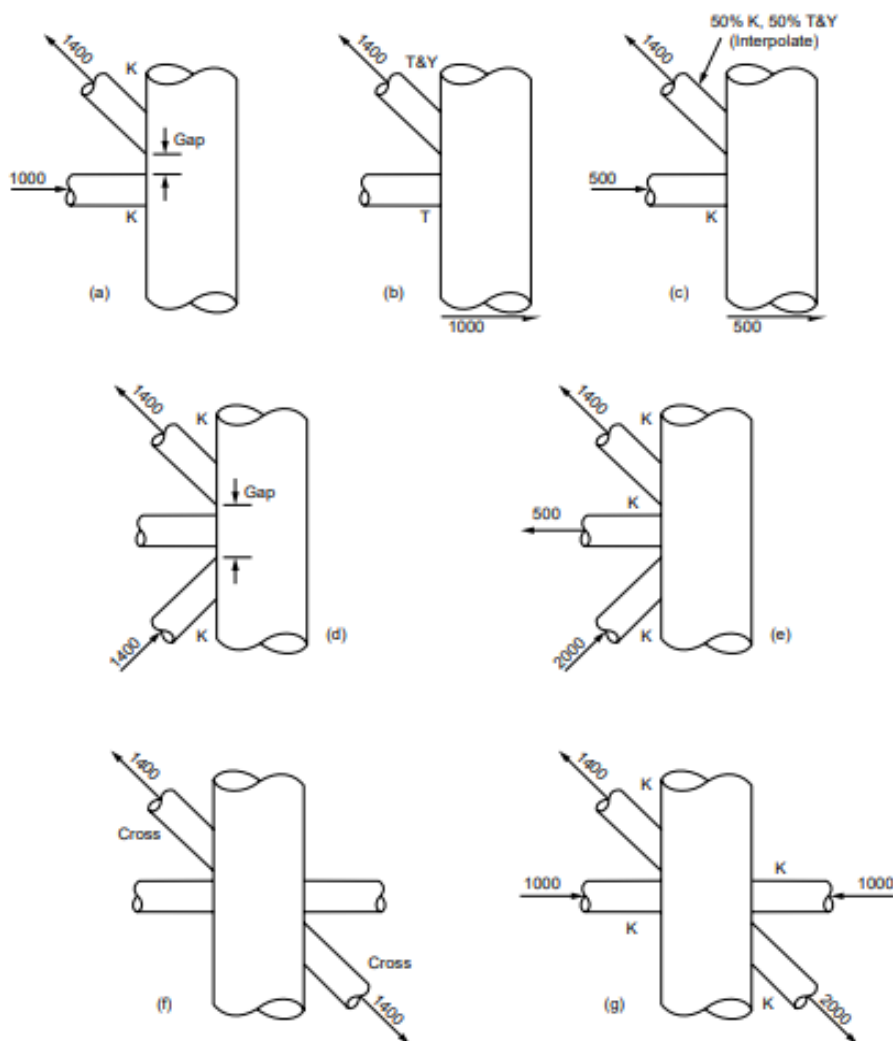
D. Sambungan Kombinasi



Gambar 2.1 Klasifikasi sambungan rangka tubular



Klasifikasi sambungan K, T & Y, atau X berlaku untuk masing-masing *brace* sesuai dengan pola beban untuk setiap kasus pembebanan. Untuk dianggap sebagai K-joint, beban yang diterima *brace* pada dasarnya harus seimbang dengan beban pada *brace* lain. Pada sambungan T dan Y, beban yang menerpa menjadi balok geser pada *chord*. Pada sambungan silang, beban yang menerpa didistribusikan melalui *chord* ke *brace* di sisi yang berlawanan. (API, 2000). Contohnya ditunjukkan pada gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 Klasifikasi sambungan sederhana

### 2.1.2 Distribusi Tegangan pada Rangka Tubular

Total tegangan pada sambungan dapat didefinisikan sebagai hasil dari tekanan yang berbeda dalam sambungan tubular. Ini terutama disebabkan oleh aksi struktural (*nominal stress*), tegangan timbul untuk menjaga kompatibilitas antara berbagai rangka (*geometric stress*) dan karena diskontinuitas pada rangka (*local stress*). Deskripsi singkat dari tegangan ini adalah sebagai berikut: (Saini, 2016)

a. *Nominal Stress*

*Nominal stress* ( $\sigma_{nom}$ ) dapat dihitung dengan menggunakan teori balok sederhana tanpa mempertimbangkan efek las lokal dan diskontinuitas geometrik. Tegangan nominal dapat ditentukan sebagai berikut: (Saini, 2016)

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{I} y \dots\dots\dots(2-1)$$

dimana:

- P = beban tekan aksial yang diberikan (N)
- A = luas penampang (mm<sup>2</sup>)
- M = momen lentur (N.mm)
- Y =posisi *extreme fiber*. (mm)

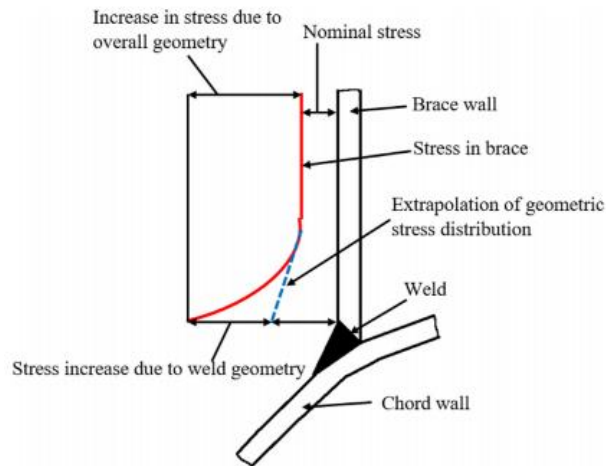
b. *Geometric Stress*:

*Geometric stress* ( $\sigma_G$ ) juga dikenal sebagai *hot-spot stress* / *struktural stress*, digunakan untuk menghitung umur kelelahan dari sambungan tubular. Karena perbedaan deformasi antara *brace* dan *chord* dari rangka, dinding tubular akan mengalami kondisi tekuk (*buckling*) untuk mempertahankan kompatibilitas dan karenanya, menimbulkan tegangan is dan tegangan pada sambungan.



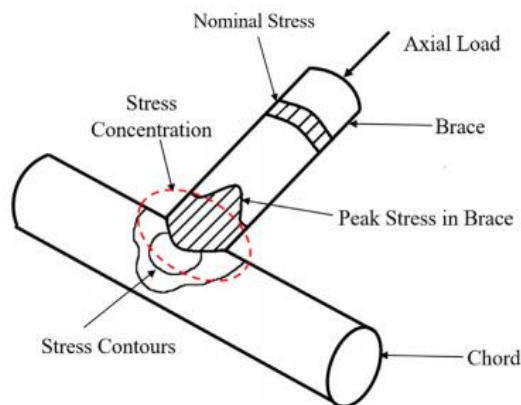
c. *Local Stress.*

*Local stress* disebabkan terutama karena lasan pada *brace* dan *chord*. Ini adalah fungsi dari geometri dan ukuran las. Dengan demikian, tegangan lokal terutama tergantung pada kualitas pengelasan dan pengerjaan. (Saini, 2016)



Gambar 2.3 Distribusi tegangan pada rangka tubular

Gambar 2.4 mengilustrasikan fenomena konsentrasi tegangan karena beban aksial. Gambar ini jelas menunjukkan bahwa tegangan lokal pada sambungan las beberapa kali lebih tinggi daripada tegangan nominal karena konsentrasi tegangan. Dapat dicatat bahwa tegangan puncak lokal sangat dipengaruhi oleh profil pengelasan. (Saini, 2016)



Gambar 2.4 Konsentrasi tegangan rangka tubular T



### 2.1.3 Parameter desain Sambungan Rangka Tubular

- a. *Diameter ratio* ( $\beta$ ) - rasio diameter *brace* dengan diameter *chord* ( $d / D$ ). Parameter ini bervariasi dari 0 hingga 1.0 dan memberikan indikasi kekompakan sambungan. Studi parametrik dengan memvariasikan diameter luar *brace* tanpa memvariasikan ketebalan *brace* dan geometri *chord* seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1. (Aswindas, 2014)

Tabel 2.1 Geometri dan parameter  $\beta$

Set Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diameter (cm)	21,91	27,3	32,00	35,56	40,64	45,70	50,80	55,90	61,00	66,00
$\beta$ Value	0,205	0,255	0,299	0,332	0,380	0,427	0,475	0,522	0,570	0,617

- b. *Wall thickness Ratio* ( $\tau$ ) - rasio ketebalan dinding *brace* dengan ketebalan dinding *chord* ( $t / T$ ). Parameter ini digunakan untuk menentukan kemungkinan fraktur *brace* sebelum dinding *chord* gagal. Studi parametric dengan memvariasikan ketebalan dinding *brace* tanpa memvariasikan diameter luar *brace* dan geometri chord seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.2.

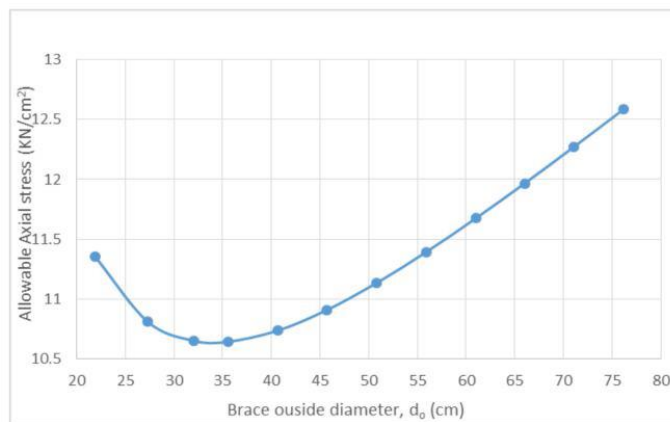
Tabel 2.2 Geometri dan parameter  $\tau$

Set Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Thickness (cm)	1,270	1,113	1,031	0,953	0,874	0,838	0,792	0,714	0,635	0,556
$\tau$ Value	0,363	0,318	0,294	0,272	0,250	0,239	0,226	0,204	0,181	0,159



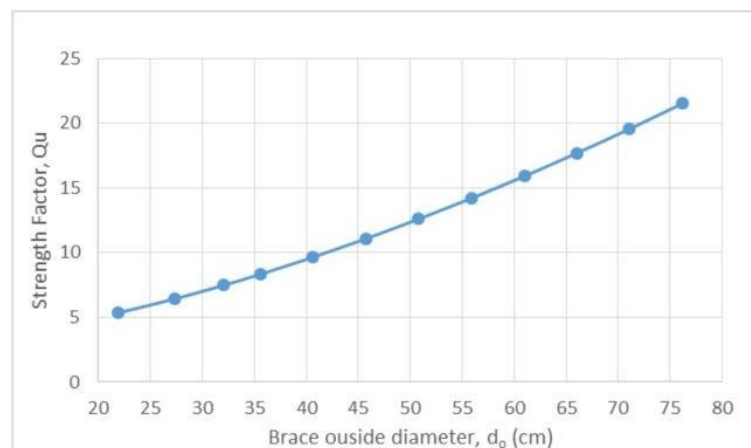
### 2.1.4 Hubungan antara Tegangan Aksial dengan Dimensi Rangka Tubular.

- a. Gambar 2.5 memberikan hubungan antara diameter luar *brace* diplot pada sumbu x dan tegangan aksial *brace* di sepanjang sumbu y. Diamati bahwa tegangan aksial *brace* yang diijinkan meningkat hampir secara linear dengan peningkatan diameter *brace* di luar, tetapi ketika mencapai lebih dekat ke batas bawah, variasi perilaku terlihat. (Aswindas, 2014)



Gambar 2.5 Diameter luar *brace* dan tegangan aksial

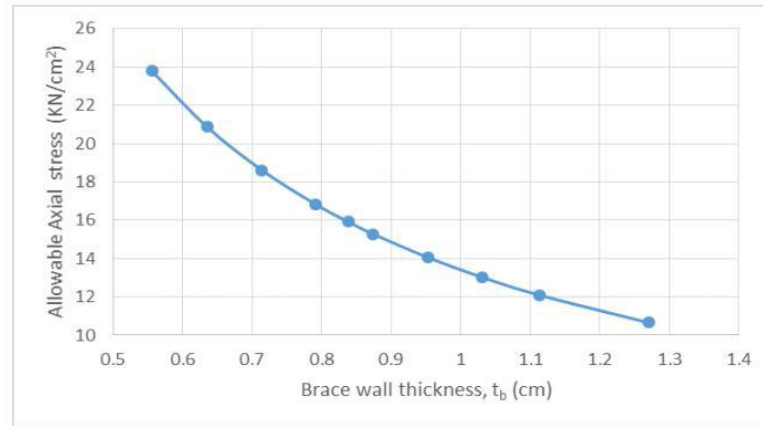
- b. Gambar 2.6 menunjukkan hubungan antara diameter luar diplot sepanjang sumbu x dan faktor kekuatan ( $Q_u$ ) sepanjang sumbu y. Peningkatan linear dalam  $Q_u$  diamati dengan peningkatan diameter luar *brace*.



Gambar 2.6 Diameter luar *brace* dan faktor Kekuatan

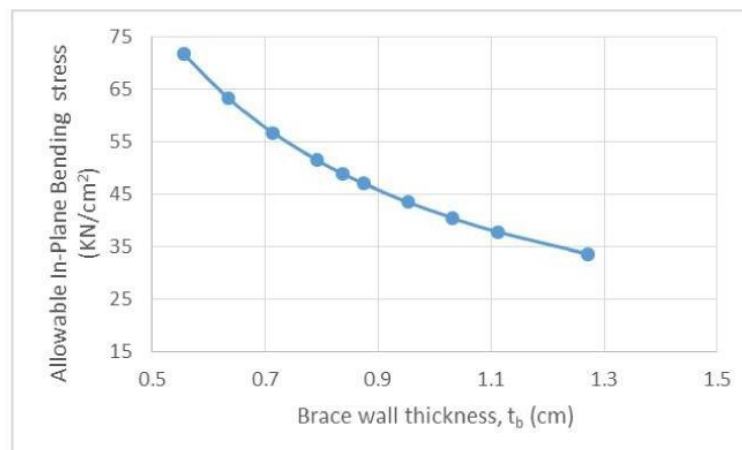


- c. Gambar 2.7 memberikan hubungan antara ketebalan *brace* diplot dalam sumbu x dan *brace* tegangan aksial yang diizinkan sepanjang sumbu y. Diamati bahwa dengan peningkatan ketebalan *brace* ada penurunan yang luar biasa dalam tekanan aksial *brace* yang diijinkan.



Gambar 2.7 Ketebalan *brace* dan tegangan aksial

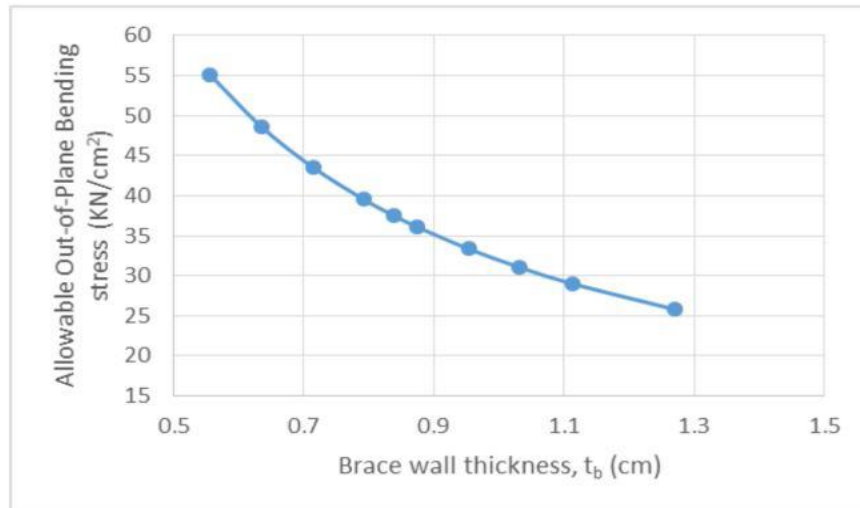
- d. Gambar 2.8 memberikan hubungan antara ketebalan dinding *brace* yang diplot pada sumbu x dengan tegangan lentur inplane (*In Plan Bending*) di sepanjang sumbu y. Diamati bahwa dengan meningkatnya ketebalan dinding *brace*, tegangan IPB yang diijinkan dalam *brace* berkurang secara signifikan.



Gambar 2.8 Ketebalan *brace* dan *In Plan Bending*



- e. Gambar 2.9 memberikan hubungan antara tebal dinding *brace* yang diplot pada sumbu x dengan tegangan lentur bidang yang diizinkan (*Out Plan Bending*) di sepanjang sumbu y.

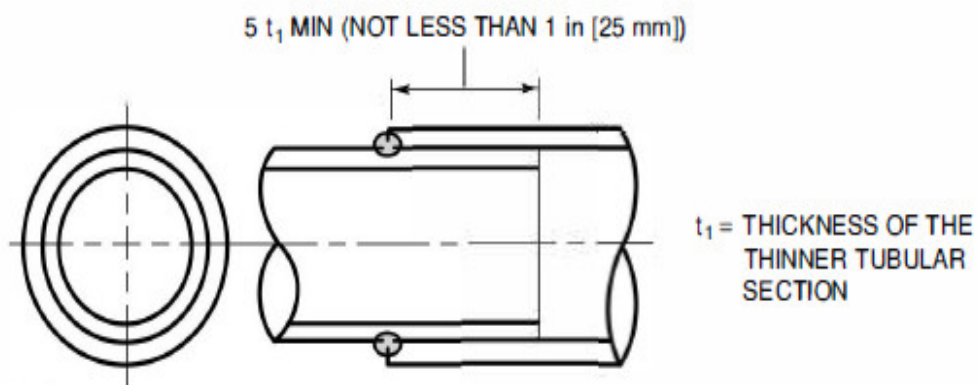


Gambar 2.9 Ketebalan *brace* dan *Out Plan Bending*

## 2.2 Desain Pengelasan Rangka tubular

### 2.2.1 Pengelasan pada *Chord*

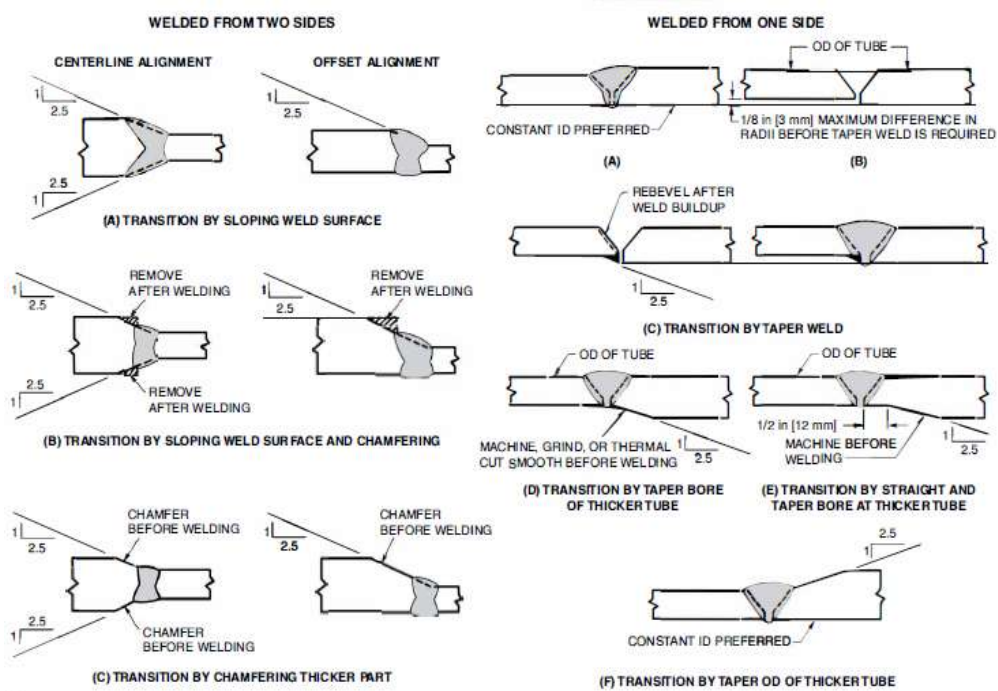
Berikut adalah posisi pengelasan yang digunakan pada penyambungan antara *jacket* dan *chord* : (AWS, 2020)



Gambar 2.10 *Fillet welded lap joint* (Tubular)



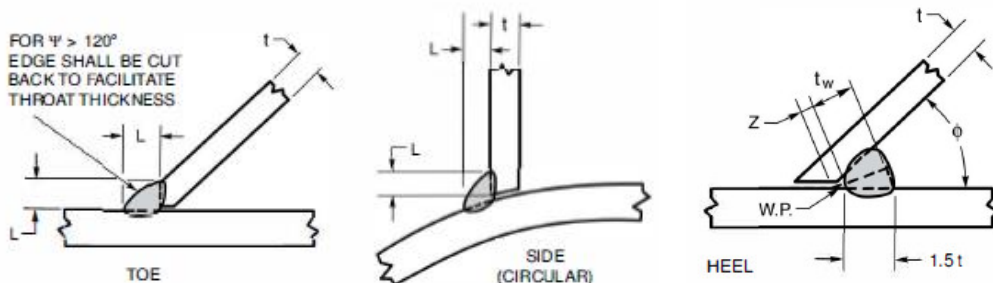
Gambar 2.11 menunjukkan posisi pengelasan pada pelat yang berbeda ketebalan: (AWS, 2020)



Gambar 2.11 Transisi ketebalan sambungan *butt* di bagian ketebalan yang tidak sama (Tubular)

### 2.2.2 Pengelasan pada *Brace*

Berikut pada gambar 2.12 adalah tipe-tipe pengelasan untuk menyambungkan *brace* pada chord : (AWS, 2020)



Gambar 2.12 Sambungan tubular prakualifikasi untuk fillet welded





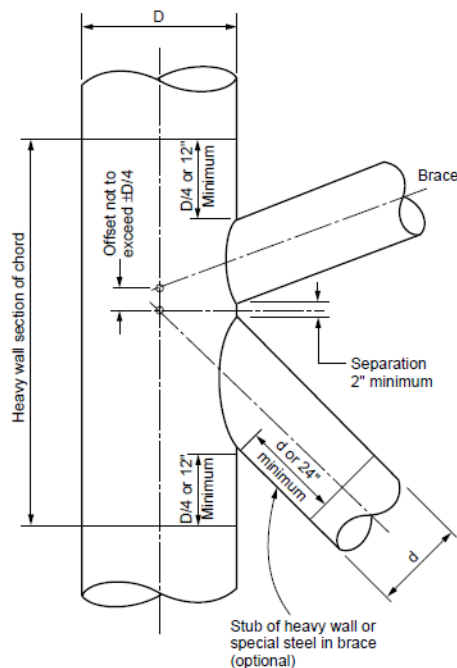
Tabel 2.3 Minimal L untuk tiap zona

	$E=0,7t$	$E=t$	$E=1,07t$
<b>HEEL <math>&lt; 60^\circ</math></b>	1,5t	1,5t	1,5t atau 1,4t + Z
<b>SIDE <math>\leq 100^\circ</math></b>	t	1,4t	1,5t
<b>SIDE 100-110<math>^\circ</math></b>	1,1t	1,6t	1,75t
<b>SIDE 110-120<math>^\circ</math></b>	1,2t	1,8t	2,0t
<b>TOE <math>&gt; 120^\circ</math></b>	t BEVEL	1,4t BEVEL	FULL BEVEL 60-90 $^\circ$ GROOVE

Keterangan:

- t = ketebalan bagian yang lebih tipis
- L = ukuran minimum (yang mungkin membutuhkan ukuran lasan untuk kombinasi selain logam dasar 250 ksi [250 MPa] dan elektroda 70 ksi [485 MPa]).
- Tidak memenuhi syarat untuk  $\phi < 30^\circ$ .

Berikut adalah detail celah (*gap*) pada rangka tubular : (API, 2020)



Gambar 2.13 Detail celah (*gap*) pada rangka tubular



### 2.3 Kapasitas Sambungan Tubular

Persamaan (2-2) dan (2-3) adalah kapasitas dari sambungan tubular sederhana tanpa *brace* tumpang tindih (*overlap*) dan tanpa *stiffener*. (Aswindas, 2014)

$$Pa = Qu Qf \frac{Fyc T^2}{FS \sin\theta} \dots\dots\dots(2-2)$$

$$Ma = Qu Qf \frac{Fyc T^2 d}{FS \sin\theta} \dots\dots\dots(2-3)$$

*Pa* mengacu pada kapasitas yang diijinkan untuk beban aksial *brace*, *Ma* mengacu pada kapasitas yang diijinkan untuk momen lentur *brace*, *Qu* mengacu pada faktor kekuatan, *Qf* mengacu pada faktor beban *chord*, *Fyc* mengacu pada tegangan leleh *chord* pada sambungan (atau 0,8 dari kekuatan tarik) dalam MPa, *T* menunjukkan ketebalan dinding *chord*, *FS* mengacu pada faktor keselamatan yang direkomendasikan sebagai 1,60, *d* menunjukkan penjepit dengan diameter luar dan  $\theta$  menunjukkan penjepit yang termasuk sudut. (Aswindas, 2014)

Untuk sambungan Y dan X sederhana yang dibebani secara aksial dimana sambungan menebal dapat ditentukan, kapasitas aksial yang diijinkan (*Pa*) tidak boleh melebihi batas kapasitasnya, sebagaimana dimaksud dalam persamaan (2-4). (Aswindas, 2014)

$$Pa = [r + (1 - r)(Tn/Tc)^2](Pa)c \dots\dots\dots(2-4)$$

(*Pa*)*c* mengacu pada kapasitas yang diijinkan untuk beban aksial *brace* sebagaimana yang dimaksud pada persamaan (2-2). Nilai parameter *r* dijelaskan pada persamaan (2-5) untuk  $\beta \leq 0,9$  dan persamaan (2-6) untuk  $\beta > 0,9$ . *Tn* mengacu pada ketebalan nominal dari *chord*. *Tc* mengacu pada ketebalan *can chord*. (Aswindas, 2014)

$$r = Lc/(2,5D) \dots\dots\dots(2-5)$$

$$r = (4\beta - 3)Lc/(1,5D) \dots\dots\dots(2-6)$$

acu pada panjang efektif *chord* dan *D* adalah diameter luar *chord*.



## 2.4 Strength Factor

*Strength factor (Qu)* didefinisikan sebagai teori *ultimate strength* pada sambungan sederhana. Termasuk pengaruh rasio diameter ( $\beta$ ). Factor geometri  $Qg$  mengacu pada persamaan (2-7) untuk  $\beta > 0,6$  dan  $\beta \leq 0,6$ . Untuk menghitung  $Qu$  untuk beban aksial *brace* pada sambungan K, *Gap Factor* mengacu pada persamaan (2-8) untuk gap pada rasio diameter luar ( $g/D \geq 0,05$  dan pada persamaan (2-9) untuk  $g/D < 0,05$ . (Aswindas, 2014)

$$Q\beta = \frac{0,3}{\beta(1-0,833\beta)} \dots\dots\dots(2-7)$$

$$Qg = 1 + 0,2[1 - 2,8\frac{g}{D}]^3 \dots\dots\dots(2-8)$$

$$Qg = 0,13 + 0,65\phi\gamma^{0,5} \dots\dots\dots(2-9)$$

Persamaan (2-9) diberikan nilai dari parameter  $\phi$  dan  $\gamma$  disebut rasio ketebalan *chord*. (Aswindas, 2014)

$$\phi = t Fyb / T Fy \dots\dots\dots(2-10)$$

$t$  adalah ketebalan dinding *brace*,  $Fyb$  mengacu pada tegangan luluh (*yield stress*) pada *brace*,  $T$  adalah ketebalan dinding *chord* dan  $Fy$  mengacu pada tegangan luluh *chord* dalam Psi.  $Qu$  bervariasi sesuai dengan jenis sambungan dan tipe pembebanannya diilustrasikan pada table 2.3.

Tabel 2.4 Faktor Kekuatan (Qu)

Join Type	Brace Load			
	Axial Tension	Axial Compression	In-Plane Bending	Out-Plane Bending
K	(1,6+1,2 $\gamma$ ) $\beta^{1,2}$ Qg but $\leq 40 \beta^{1,2}$ Qg		(5+0,71 $\gamma$ ) $\beta^{1,2}$	2,5+(4,5+0,21 $\gamma$ ) $\beta^{2,6}$
T/Y	30 $\beta$	2,8 +(20+0,8 $\gamma$ ) $\beta^{1,6}$ but $\leq 2,8 +36 \beta^{1,6}$		
	23 $\beta$ for $\beta \leq 0,9$ 20,7 +( $\beta$ -0,9)(17 $\gamma$ -220) for $\beta > 0,9$	[2,8+(12+0,1 $\gamma$ ) $\beta$ ]Q $\beta$		



## 2.5 Chord Load Factor

*Chord load factor*,  $Q_f$  dapat didefinisikan secara sederhana sebagai rasio antara beban brace maksimum yang bekerja pada *chord* dan beban *brace* maksimum yang bekerja pada *chord*. Faktor beban *chord* dihitung dengan menggunakan persamaan (2-11) untuk menjelaskan keberadaan beban nominal dalam *chord*. (Aswindas, 2014)

$$Q_f = [1 + C_1 \left(\frac{F_S P_c}{P_y}\right) - C_2 \left(\frac{F_S M_{ipb}}{M_p}\right) - C_3 A^2] \dots \dots \dots (2-11)$$

$$A = \left| \left(\frac{F_S P_c}{P_y}\right)^2 + \left(\frac{F_S M_c}{M_p}\right)^2 \right|^{0,5} \dots \dots \dots (2-12)$$

$C_1$ ,  $C_2$ , dan  $C_3$  mengacu pada koefisien tergantung pada jenis sambungan dan beban, Parameter  $A$  disebut pada persamaan (2-12),  $P_c$  mengacu pada beban aksial nominal dalam *chord*,  $P_y$  mengacu pada kapasitas aksial *chord*,  $M_p$  mengacu pada kapasitas momen plastik dari *chord* dan  $M_c$  mengacu pada resultan lentur.

## 2.6 Tegangan Sisa Pengelasan

Tegangan sisa adalah gaya elastis yang dapat mengubah jarak antar atom dalam bahan tanpa adanya beban dari luar. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam dalam suatu bahan, antara lain akibat perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan pada bahan yang mengalami proses pengelasan. Walaupun tegangan sisa secara visual tidak nampak, namun sesungguhnya tegangan sisa tersebut juga bertindak sebagai beban yang tetap yang akan menambah nilai beban kerja yang diberikan dari luar. (Dai H, 2009)

### 2.6.1 Teori Dasar

Tegangan sisa adalah tegangan yang bekerja pada bahan setelah gaya-gaya luar yang bekerja pada bahan tersebut dihilangkan.



### 2.6.1.1 Penyebab Terjadinya Tegangan Sisa:

1. Tegangan sisa sebagai akibat dari tegangan *thermal* seperti pada pengelasan dan perlakuan panas.
2. Tegangan sisa yang disebabkan karena transformasi fasa (seperti baja karbon)
3. Tegangan sisa karena deformasi plastis yang tidak merata yang disebabkan gaya-gaya mekanis seperti pada pengerjaan dingin selama pengerolan, penempaan, pembentukan logam atau pekerjaan lain yang dilakukan dengan mesin.

### 2.6.1.2 Sifat-sifat Tegangan Sisa :

1. Tegangan sisa sangat tinggi biasanya terjadi di daerah las dan daerah HAZ
2. Tegangan sisa maksimum biasanya sampai tegangan luluh (*yield stress*)
3. bahan yang mengalami transformasi fasa misalkan baja karbon rendah, tegangan sisa mungkin bervariasi pada permukaan dan bagian dalam dari logam induk.

### 2.6.1.3 Pengaruh Tegangan Sisa :

1. Tegangan sisa yang disebabkan oleh proses pengelasan dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanis struktur las seperti patah getas, kelelahan, dan retak karena kombinasi tegangan dan korosi.
2. Pengaruh tegangan sisa menurun jika tegangan yang bekerja pada bahan meningkat.
3. Pengaruh tegangan sisa pada struktur las biasa diabaikan jika tegangan yang bekerja pada struktur tersebut melebihi tegangan luluhnya

Pengaruh tegangan sisa menurun setelah pembenan berulang.



Tegangan sisa dapat dihitung melalui besarnya regangan sisa yang terjadi dengan menggunakan hukum *Hooke*. Sedangkan besarnya regangan sisa dapat diukur dari perubahan ukuran antara batang sebelum dipotong, yaitu ukuran yang digambarkan pada bagian yang akan ditentukan tegangan sisanya dan ukuran sebenarnya yang didapat setelah bagian yang akan diuji dipotong. Dari hukum *Hooke* jelas bahwa perubahan ukuran ini disebabkan oleh adanya tegangan, karena itu besarnya tegangan dapat dihitung.

Dalam hal terjadi tegangan sisa dengan dua dimensi dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan (2.13) dan (2.14). (Randy, 2005)

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \dots\dots\dots(2.14)$$

Tegangan sisa karena pengaruh pemanasan dapat dihitung dengan persamaan berikut : (Oswald, 1998)

$$\sigma(z) = -\frac{2}{3}\alpha E(T_s - T_f) \left(\frac{3z^2}{2L^2} - \frac{1}{2}\right) \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

$\sigma(z)$  = Tegangan sisa (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha$  = Koefisien muai panjang (°C<sup>-1</sup>)

$E$  = *Modulus young* (N/mm<sup>2</sup>)

$T_f$  = Suhu maksimal (°C)

$T_s$  = Suhu pemadatan (°C)

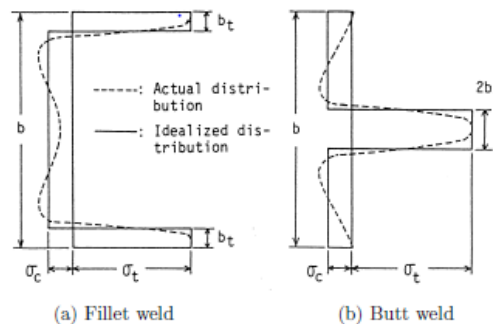
$L$  = ½ dari ketebalan (mm)

= Posisi ( $z = L$ ) (mm)



### 2.6.1.4 Tegangan Sisa Pengelasan pada Pelat

Berikut adalah tegangan sisa yang terjadi pada pelat: (Yao. T, 1980)



Gambar 2.14 Tegangan sisa pengelasan pada pelat

Secara umum, tegangan sisa dalam arah pengelasan berada dalam tegangan di dekat garis lasan, sedangkan tekanan berada di area yang terpisah dari garis lasan. Garis putus-putus pada Gambar 2.14 (a) menunjukkan tegangan sisa pengelasan akibat pengelasan *fillet* dari *stiffener* ke pelat, dan pada Gambar 2.14 (b) karena pengelasan *butt* dari dua pelat. Tegangan sisa pengelasan tersebut dapat diperkirakan dengan garis splid bentuk persegi panjang dalam gambar. 2.14 (a) dan (b)

Tegangan sisa pengelasan bersifat menyeimbangkan sendiri karena diproduksi tanpa aksi beban eksternal. Kondisi *self-equilibrium* dari tegangan sisa pengelasan menghasilkan persamaan berikut: (Yao. T, 1980)

$$2b_t\sigma_t = (b - 2b_t)\sigma_c \dots\dots\dots(2.16)$$

di mana  $b_t$  mewakili luas area di mana tegangan tarik dihasilkan, lihat Gambar 2.14. Luasnya ini ditentukan dari kondisi pengelasan, yaitu input panas las,  $\Delta Q_{max}$  (Cal / cm), dan diberikan untuk *fillet weld* pada persamaan 2.17: (Yao. T, 1980)

$$b_t = t_w/2 + 0.26\Delta Q_{max}/(t_w + 2t_p) \dots\dots\dots(2.17)$$

untuk *butt weld* :

$$b_t = 0.13\Delta Q_{max}/t_p \dots\dots\dots(2.18)$$



Di sisi lain, besarnya tegangan sisa tarik tergantung pada bahan dan dinyatakan sebagai berikut:

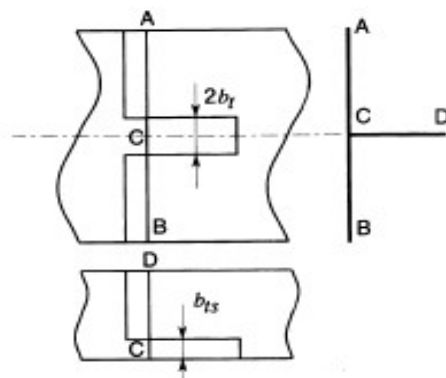
Tabel 2.5 Tegangan sisa tarik

Material Baja	Tegangan Sisa Tarik
SM41	$\sigma_t = \sigma_Y$
SM50	$\sigma_t = \sigma_Y$
SM53	$\sigma_t = \sigma_Y$
SM58	$\sigma_t = 0.8\sigma_Y$

Di mana  $\sigma_Y$  adalah *yielding stress*. Diketahui bahwa tegangan sisa tarik sama dengan tegangan leleh material jika baja biasa. Namun, untuk baja dengan tegangan leleh tinggi, tegangan sisa tarik,  $\sigma_t$ , tidak mencapai tegangan leleh material. Ini karena ekspansi volume yang terkait dengan transformasi struktur kristal pada bagian lebur selama proses pendinginannya.

Ketika  $\sigma_t$  dan  $b_t$  diketahui, tegangan sisa tekan,  $\sigma_c$ , ditentukan dengan Persamaan (2.10) sebagai berikut: (Yao. T, 1980)

$$\sigma_c = \frac{2b_t}{b-2b_t} \sigma_t \dots\dots\dots(2.19)$$



Gambar 2.15 Tegangan sisa pengelasan pada pelat *stiffener*

etika pelat yang kaku dipertimbangkan, tegangan sisa pengelasan diperkirakan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.15. Dalam hal





ini, tegangan sisa tekan pada panel dan *stiffener* dapat ditunjukkan sebagai berikut. (Yao. T, 1980)

$$\sigma_{cp} = \frac{2b_t}{b-2b_t} \sigma_{tp} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$\sigma_{cs} = \frac{2b_{ts}}{b-2b_{ts}} \sigma_{ts} \dots\dots\dots(2.21)$$

### 2.6.2 Pengaruh Tegangan Sisa Pengelasan

Tegangan sisa pengelasan sangat berpengaruh pada kekuatan statis material, kekuatan *fatigue* material, patah getas, dan pengaruh terhadap tekuk serta korosi retak tegang material.

#### 2.6.2.1 Pengaruh terhadap Kekuatan Statis

Karena patahan statis untuk material yang dilas dan ulet akan terjadi setelah deformasi plastis, maka tegangan sisa tidak akan berpengaruh terhadap kekuatan statis. Mengingat tegangan sisa memiliki kesetimbangan mandiri (*selfequilibrium*), maka tegangan sisa tidak berpengaruh terhadap kekuatan luluh. (Winarto, 2011)

#### 2.6.2.2 Pengaruh terhadap Kekuatan *Fatigue*

Karena patahan *fatigue* akan terinisiasi pada daerah di bawah tegangan yang relatif kecil di daerah elastis maka kekuatan *Fatigue* dipengaruhi oleh tegangan sisa. Jika sebuah celah (takik) terinisiasi akibat dari cacat lasan seperti retak dan fusi yang tidak sempurna atau konsentrasi tegangan pada struktur tersebut berada. Dengan adanya tegangan sisa tarik, akan menurunkan tegangan rata-rata secara keseluruhan dan menurunkan kekuatan *fatigue*. Dalam kondisi *fatigue* siklus rendah, adanya tegangan sisa tidak signifikan mempengaruhi kekuatan *fatigue*. Fenomena yang terjadi sedemikian rupa sehingga tegangan sisa menurun oleh beban tinggi berulang-ulang sebelum retak *fatigue* terinisiasi dan pengaruh dari tegangan sisa akan menghilang.



### 2.6.2.3 Pengaruh terhadap Patah Getas

Karena adanya tegangan sisa tarik pada takikan yang memiliki efek yang sama akibat siklus tegangan, maka patah getas dapat terjadi pada tegangan yang jauh lebih kecil daripada ketika tegangan sisa tarik tidak ada.

### 2.6.2.4 Pengaruh terhadap Tekuk dan *stress corrosion cracking* (korosi retak tegang)

Tegangan sisa, terutama tekan, menurunkan kekuatan tekuk buckling suatu struktur. *Stress Corrosion Cracking* (SCC) adalah fenomena yang diamati bila baja ini mengalami tegangan tarik pada lingkungan tertentu. Akibatnya, adanya tegangan sisa tarik yang disebabkan oleh pengelasan umumnya mempercepat korosi retak tegang.

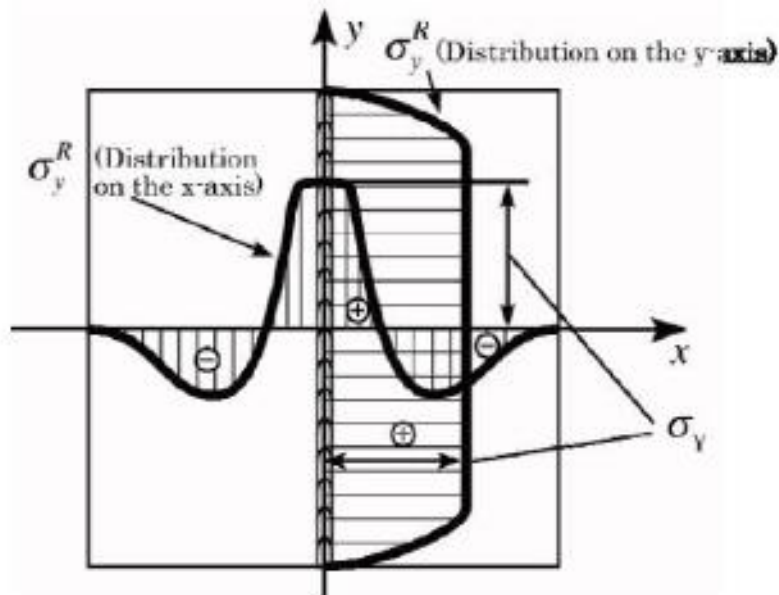
### 2.6.3 Distribusi Tegangan Sisa Hasil Pengelasan

Gambar 2.16 menunjukkan distribusi tegangan sisa dengan panjang sisi *butt joint* lebih dari 500 mm. Logam cenderung menyusut saat didinginkan, penyusutan pada arah y (arah lasan) berhenti akibat kondisi logam induk yang dingin, sehingga tegangan muncul. Pada arah garis pengelasan, tegangan tarik sisa ( $\sigma_y^R$ ) sebesar *yield stress* saat temperatur ruang ( $\sigma_y$ ) dihasilkan di sekitar daerah lasan. Pada sumbu x, tegangan kompresi sisa dihasilkan pada kedua sisi dari tegangan tarik sisa untuk menyeimbangkan tegangan tarik sisa hingga total tegangan = nol (setimbang). (Winarto, 2011)

Karena tegangan tarik sisa ( $\sigma_y^R$ ) sama dengan *yield stress* pada temperature ruang ( $\sigma_y$ ) di sumbu y, yang merupakan garis tengah logam lasan, tegangan sisa pada sumbu y memiliki distribusi untuk mencapai tegangan normal pada permukaan bernilai nol di dekat kedua ujung

gan lasan.





Gambar 2.16 Distribusi tegangan sisa pada arah garis lasan

Ketika suhu logam dasar di bawah 32°F (0°C), logam dasar harus dipanaskan terlebih dahulu hingga minimum 70°F (20°C) dan suhu interpass minimum harus dipertahankan selama pengelasan. (AWS, 2020)

## 2.7 Analisa FEM

*Finite element method* (metode elemen hingga) atau FEM adalah salah satu metode numerik yang paling banyak dipakai di dunia engineering (sipil, mesin, penerbangan, mikroelektronik, *bioengineering*, material) dan diajarkan di dunia (baik akademika maupun industri). Usianya lebih dari 40 tahun, dan hingga kini masih tetap dipakai, bahkan makin disukai. Metode ini berusaha memecahkan *partial differential equations* dan persamaan integrasi lainnya yang dihasilkan dari hasil diskritisasi benda kontinu. Meski berupa pendekatan, metode ini dikenal cukup ampuh memecahkan struktur-struktur yang kompleks dalam analisis mekanika benda padat (*solid mechanics*) dan perpindahan panas (*heat transfer*). Biasanya

dikawan mencari *closed-form solution* untuk suatu kasus fisika, dan mentok mereka lalu memanfaatkan metode numerik ini untuk menyelesaikan kasusnya. (Bhafikatti, 2005)



Saat ini, banyak sekali software FEM berkeliaran dengan berbagai mutu dan kemudahan. Software ini biasanya sangat ramah-sama-pengguna (*user-friendly*) tapi tidak *dompet-friendly* (mahal). Contoh dari software ini adalah MSC.NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, LSDYNA, dan lainnya. Pengguna software FEM kemudian terbiasa melihat GUI (*Graphic User Interface*) di mana suatu benda didiskritisasi menjadi sekian puluh bahkan ribu elemen. Istilah baru kemudian muncul yaitu *Finite Element Modeling*, karena pengguna hanya memodelkan fisik suatu benda dengan elemen-elemen kecil, mendefinisikan sifat-sifat material, memberikan kondisi batas dan pembebanan, menjalankan software. Ini yg dinamakan *pre-processing*. Fase *post-processing* biasanya lebih sulit karena pengguna diharapkan bisa menginterpretasi hasil, menganalisis angka dan fisik yang dihasilkan dan melakukan *trouble-shooting* jika hasilnya kurang memuaskan. Ada yang bilang FEM software ini G-I-G-O alias *garbage-in-garbage-out*. Dan ini benar, Apa saja yg kita masukkan ke dalam software tentu akan menghasilkan sesuatu, entah itu berupa angka atau berupa error message. Kalau memasukan sampah ya keluaranya juga sampah (begitu arti literalnya). Untuk mengatasi ini, pengguna diharapkan sudah memahami formulasi, jenis elemen, kelebihan dan kelemahan suatu metode sebelum menggunakan FEM *software*. (Hutton F, 2004)

*Finite Element Analysis* dibangun sebagai metode numeric untuk analisa tegangan, tapi sekarang pemakainanya telah meluas sebagai metode yang umum untuk banyak permasalahan engineering kompleks dan ilmu-ilmu fisika. Mengandung banyak perhitungan, pertumbuhannya berhubungan dekat dengan pengembangan teknologi komputer.

*Finite Element* adalah salah satu dari metode numerik yang memanfaatkan operasi matrix untuk menyelesaikan masalah-masalah fisik.

lain yang adalah metode analitik, yang untuk melakukannya an suatu persamaan matematik yang merupakan model dari fisik. Semakin rumit perilaku fisiknya (karena kerumitan bentuk



geometri, banyaknya interaksi beban, *constrain*, sifat material, dll) maka semakin sulit atau bahkan mustahil di bangun suatu model matematik yang bisa mewakili permasalahan tersebut. Alternatif metodenya adalah dengan cara membagi kasus tadi menjadi bagian-bagian kecil yang sederhana yang mana pada bagian kecil tersebut kita bisa membangun model matematik dengan lebih sederhana. Kemudian interaksi antar bagian kecil tersebut ditentukan berdasarkan fenomena fisik yang akan diselesaikan. Metode ini dikenal sebagai metode elemen hingga, karena kita membagi permasalahan menjadi sejumlah elemen tertentu (*finite*) untuk mewakili permasalahan yang sebenarnya jumlah elemennya adalah tidak berhingga (kontinum). (Klaus, 1996)

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*, FEM) adalah suatu metode numerik dengan tujuan memperoleh pemecahan pendekatan dari suatu persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*, PDE). Meskipun cikal bakal teori FEM sudah ada sejak tahun 1940-an, baru pada tahun 1970-an metode ini dirumuskan secara formal. Pada awalnya metode ini digunakan dibidang teknik penerbangan untuk perhitungan kekuatan bangun-raga (*structure*) pesawat pada industri pesawat terbang. Tetapi dewasa ini FEM telah diterapkan dalam berbagai persoalan teknik: seperti struktur, dinamika fluida, perpindahan panas, akustik, maupun elektromagnetik.

*Finite Element Method* (FEM) atau Metode Elemen Hingga dewasa ini telah menjadi bagian tak terpisahkan dari solusi numerik di dunia teknik rekayasa. FEM diaplikasikan secara luas mulai dari analisa *stress* (tegangan) dan deformasi (perubahan bentuk) pada bidang struktur bangunan, jembatan, penerbangan, dan otomotif, sampai pada analisa aliran fluida, perpindahan panas, medan magnet, dan masalah non-struktur lainnya.



## 2.8 Transient Analysis

Analisa transien adalah analisa yang berhubungan dengan perubahan beban berdasarkan fungsi waktu dan posisi yang dapat menghasilkan stress transient benda tertentu.

Respon waktu sistem kendali terdiri dari respon "*transien*" dan "*steady state*". Respon transien adalah respon sistem yang berlangsung dari keadaan awal sampai dengan keadaan akhir, sedangkan respon steady state adalah kondisi keluaran sesudah habis respon transien sehingga waktu relative tak terhingga. Sehingga diketahui pengaruh *steady state* dan *transien* terhadap respon waktu

## 2.9 Structure Analysis

Analisis struktur mungkin merupakan aplikasi yang paling umum dari metode elemen hingga. Istilah struktural (atau struktur) tidak hanya menyiratkan struktur teknik sipil seperti jembatan dan bangunan, tapi juga struktur kapal, aeronautika, dan mekanis seperti lambung kapal, badan pesawat terbang, dan casing mesin, serta komponen mekanis seperti piston, bagian mesin, dan alat-alat. (Irwansyah, 2017)

Struktur yang termasuk dalam jenis analisis ini mencakup semua yang harus tahan terhadap beban, seperti bangunan, jembatan, dan lain-lain . Analisis struktural menggunakan bidang mekanika terapan, ilmu material dan matematika terapan untuk menghitung deformasi struktur, kekuatan internal, tekanan, reaksi pendukung, percepatan, dan stabilitas. Hasil analisis digunakan untuk memverifikasi kebugaran struktur untuk digunakan, seringkali menghalangi pengujian fisik. Analisis struktural merupakan bagian penting dari desain struktur struktur.

Pada struktur stabil, deformasi yang diakibatkan beban pada skala kecil dan gaya dakhil (*interna*) yang timbul dalam struktur memiliki kecenderungan mengembalikan bentuk semula apabila beban dihilangkan. Pada struktur tidak stabil, deformasi yang



diakibatkan oleh beban pada umumnya mempunyai kecenderungan untuk terus bertambah selama struktur dibebani. Struktur yang tidak stabil mudah mengalami keruntuhan secara menyeluruh dan seketika begitu dibebani. Sebagai contoh, bayangkan tiga buah balok disusun membentuk rangka segiempat. Berikan gaya horizontal diujung rangka atas balok tersebut. Maka lama kelamaan rangka itu roboh. Salah satu cara untuk membuatnya lebih stabil dengan *bracing* atau mengisinya dengan dinding. Selain dengan yang disebutkan tadi, ketidakstabilan struktur bisa diakibatkan juga oleh kelemahan kolom yang diakibatkan tekuk maupun efek *P-Delta*.

