



TESIS - RC142501

**STUDI PERILAKU SAMBUNGAN T-JOINT PIPA BAJA
AKIBAT BEBAN CYCLIC DENGAN SIMULASI FINITE
ELEMENT METHOD**

DAFIT ARIFANTO
NRP 3113 202 003

DOSEN PEMBIMBING
Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



TESIS - RC142501

**STUDI PERILAKU SAMBUNGAN T-JOINT PIPA BAJA
AKIBAT BEBAN CYCLIC DENGAN SIMULASI FINITE
ELEMENT METHOD**

DAFIT ARIFianto
NRP 3113 202 003

DOSEN PEMBIMBING
Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA



THESIS - RC142501

HYSTERETIC OF T-JOINT CONNECTION OF STEEL PIPE UNDER CYCLIC LOADING USING FINITE ELEMENT METHOD

DAFIT ARIFIAN TO
NRP 3113 202 003

SUPERVISOR
Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D

MASTER PROGRAM
STRUCTURE ENGINEERING DIVISION
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS - RC142501

**HYSTERETIC OF T-JOINT CONNECTION OF
STEEL PIPE UNDER CYCLIC LOADING
USING FINITE ELEMENT METHOD**

DAFIT ARIFANTO
NRP 3113 202 003

SUPERVISOR
Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D

MASTER PROGRAM
STRUCTURE ENGINEERING DIVISION
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

**STUDI PERILAKU SAMBUNGAN T-JOINT PIPA BAJA AKIBAT BEBAN
CYCLIC DENGAN SIMULASI *FINITE ELEMENT METHOD***

**Thesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)**


**di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**DAFIT ARIFANTO
NRP. 3113202003**

**Tanggal Ujian : 19 Juni 2015
Periode Wisuda : September 2015**

Disetujui Oleh :


**1. Budi Suswanto, ST., MT., PhD
NIP. 197301281998021002**

(Pembimbing)

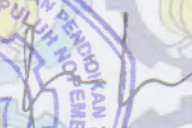

**2. Data Iranata, ST., MT., PhD
NIP. 198004302005011002**

(Penguji)


**3. Endah Wahyuni, ST., M.Sc., PhD
NIP. 197002011995122001**

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,


**Prof. Dr. Ir. Agus Soeprijanto, M.T
NIP. 196404051990021001**

**PROGRAM
PASCASARJANA**

STUDI PERILAKU SAMBUNGAN T-JOINT PIPA BAJA AKIBAT BEBAN CYCLIC DENGAN SIMULASI FINITE ELEMENT METHOD

Nama : Dafit Arifianto
NRP : 3113 202 003
Jurusan : Teknik Sipil FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Budi Suswanto ST., MT., PhD

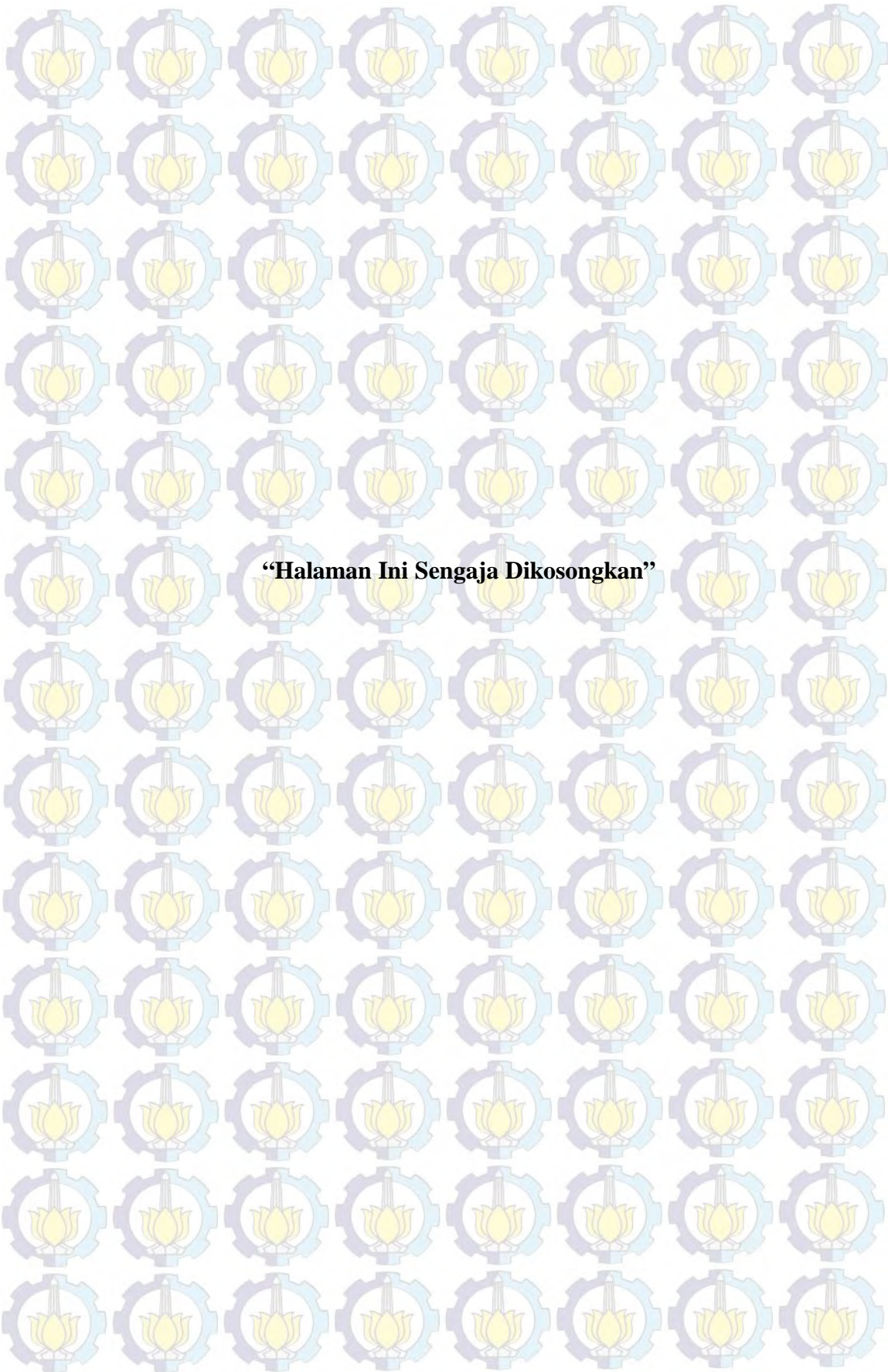
ABSTRAK

Struktur pipa baja sudah banyak digunakan dalam dunia konstruksi baja, mengingat geometri pipa baja yang mempunyai material properties sama di dua sisi. Akan tetapi Gempa Northridge dan Gempa Kobe telah mengekspos kelemahan struktur terutama pada sambungan-sambungan baja. Salah satu Tipe sambungan pipa baja yang banyak digunakan adalah *T-Joint*. Pada *T-Joint* pipa *chord* berada tegak lurus dengan pipa *brace*. Dengan bentuk sambungan seperti ini, gaya yang bekerja pada sambungan akibat beban tekan atau tarik dan in-plane bending cukup besar dibanding bentuk sambungan pipa baja yang lain seperti Y, X, K.

Penelitian ini menjelaskan perilaku sambungan pipa baja *T-Joint* akibat dua tipe beban cyclic yaitu *axially load* dan *in-plane bending load* dengan menggunakan simulasi *Finite Element Method* (FEM). Karena pemilihan tipe mesh berperan dalam simulasi FEM maka dua tipe mesh yaitu C3D20R (hexahedron) dan C3D4 (Tetrahedon) digunakan dalam simulasi FEM dengan tujuan untuk mendapatkan perbandingan mana yang memberikan hasil cukup akurat yaitu mendekati hasil eksperimental. Pada pemodelan lanjutan mekanisme retak pada sambungan pipa baja *T-Joint* disimulasikan dengan menggunakan fitur tambahan pada FEM yaitu *Extended Finite Element Method* (XFEM) dengan menambahkan parameter-parameter lain seperti *Maximum Principle Stress* dan *Critical Release Energy*.

Hasil simulasi FEM akibat axially cyclic load menunjukkan bahwa kegagalan utama akibat tekan adalah *local buckling* pada *chord wall* dan sekitar sambungan, sedangkan akibat tarik adalah terjadi *crack* pada sambungan pipa baja. Hasil simulasi FEM akibat *in-plane bending cyclic load* kegagalan utama adalah *local buckling* dan *punching shear* pada daerah sambungan pipa baja. Hasil simulasi XFEM mekanisme retak awal akibat beban tarik terjadi pada daerah *saddle point*, ini menunjukkan bahwa pada daerah *saddle point* terjadi konsentrasi tegangan dan ini sesuai dengan hasil dari experimental.

Kata kunci : Sambungan Pipa Baja *T-Joint*, Beban Cyclic, Perilaku Sambungan, *Extended Finite Element Method*, Mekanisme Retak.



HYSTERETIC OF T-JOINT CONNECTION OF STEEL PIPE UNDER CYCLIC LOADING USING FINITE ELEMENT METHOD

Name : Dafit Arifianto
Student's ID Number : 3113 202 003
Department : Civil Engineering FTSP-ITS
Supervisor : Budi Suswanto ST., MT., PhD

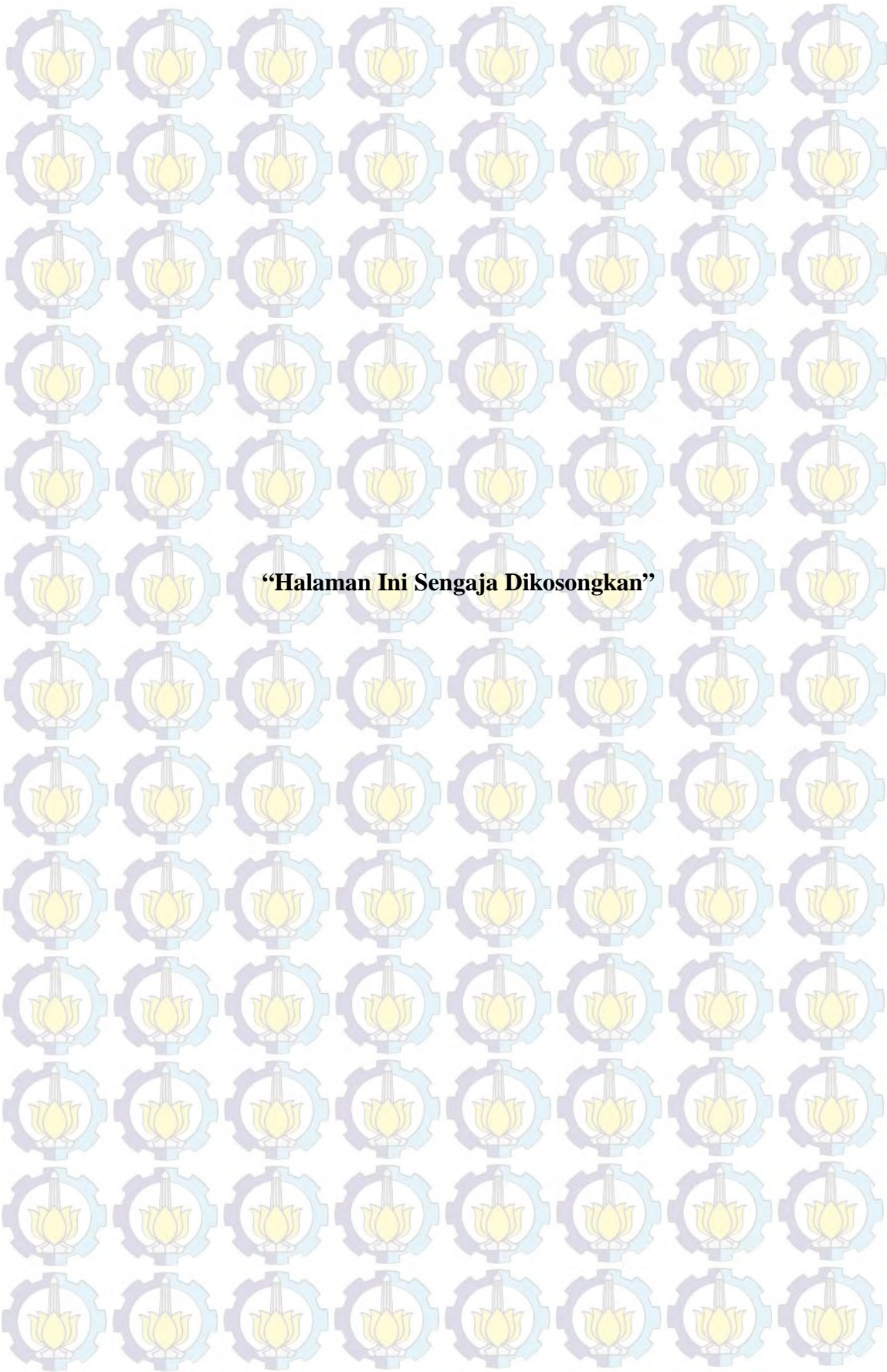
ABSTRACT

Structure of steel pipe (CHS) has been widely used in construction all over the world because of their advantages such as light weight, easy erection and same material properties in two directions. However Kobe earthquake and Northridge earthquake exposed the weaknesses of steel connection especially. There are many of type of pipe connections which are T-Joint, X-Joint, K-Joint, Y-Joint. However, T-Joint has different characteristic in order to resistance the loads especially axial load and in-plane bending load.

This paper describes the behavior of steel pipe connection of T-Joint under cyclic loading using Finite Element Method (FEM). Two kinds of cyclic loads are subjected for this simulation, which are Axially Cyclic Load and In-Plane Bending Cyclic Load. Under simulation two type of mesh are used C3D20R (hexahedron) and C3D4 (Tetrahedon). Once simulation complete and the result is close enough with the previous experimental. Next simulation is using Extended Finite Element Method (XFEM). This feature allows fracture mechanism in steel pipe connection of T Joint. There are additional parameters to complete this feature which are the maximum principle stress and critical release energy.

The results of FEM simulation under axially cyclic load shows the main failure is local buckling on chord wall (compression) and weld cracking (tension). The results of FEM simulation under in-plane bending cyclic load shows the main failure happened is local buckling and punching shear in connection area. Fracture mechanism using XFEM can be seen that the first crack occurs in saddle point as well as increasing of stress in connection area. This is close enough with the previous experimental.

Keywords : *Steel Pipe Connection T-Joint, Cyclic Loads, Hysteretic of Connection, Extended Finite Element Method, Fracture Mechanism.*



“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena atas berkah dan limpahan rahmat-Nyalah penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Tesis ini adalah sebagai salah satu persyaratan yang harus dikerjakan oleh setiap mahasiswa Teknik Sipil ITS untuk menyelesaikan masa studi tingkat masternya (S-2). Tesis ini sudah diseminarkan dalam ujian tesis yang telah dilaksanakan pada tanggal 19 Juni 2015.

Penulis menyadari bahwa dalam tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu sangat diharapkan kritik atau saran yang bersifat membangun demi semakin sempurnanya tesis ini.

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah berkenan meluangkan waktu untuk asistensi pada laporan tesis ini.
2. Ayah dan Ibu yang telah memberikan dukungan untuk saya dalam menyelesaikan tesis ini.
3. Ibu mertua yang telah memberikan waktunya untuk menjaga cucu-cucunya.
4. Istriku Rezania Indri W dan anak-anakku Ayshlynnaira Dafreil C, Ghiffary Dafreil S yang mau dibagi waktunya untuk bisa terselesainya laporan tesis ini.
5. Semua dosen karyawan Jurusan Teknik Sipil FTSP – ITS.
6. Semua teman - teman Teknik Sipil S2 tahun ajaran 2013.

Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Juni 2015

Penulis



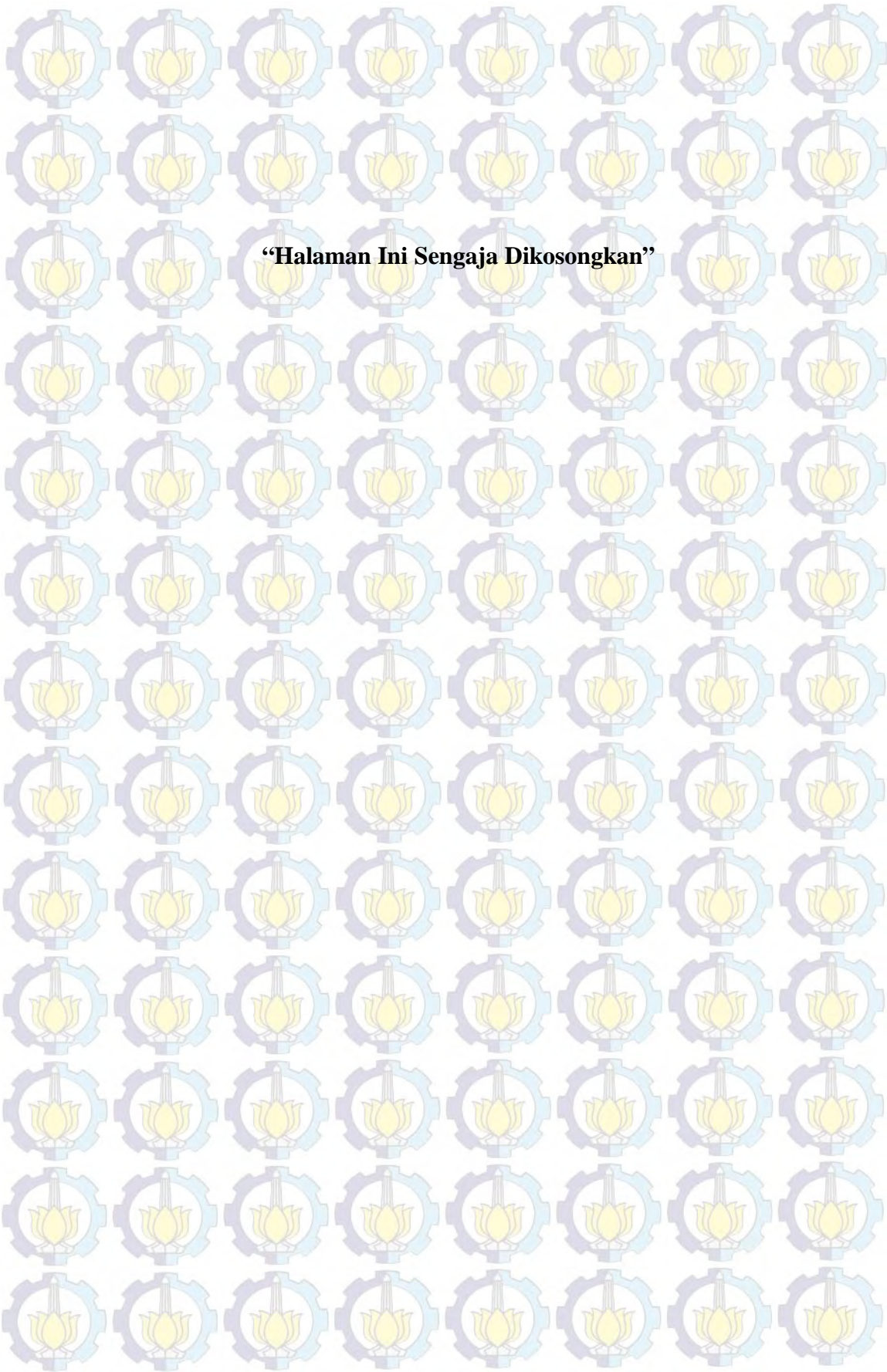
“Halaman Ini Sengaja Dikосongkan”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Umum.....	5
2.2 Penelitian-Penelitian Terdahulu.....	5
2.3 Sambungan Las.....	10
2.4 Pengelasan Melingkar	11
2.5 Stress Intesity Factor (SIF).....	12
2.6 Stress Concentration Factor (SCF).....	12
2.7 Platification Failure dan Punching Shear Failure	13
2.8 Kapasitas Join (Joint Strength)	13
2.9 Deformation Limit pada Sambungan.....	15
2.10 Bilinear Kinematic Hardening.....	16
2.11 Beban Cyclic (Beban Bolak-Balik).....	17
2.12 FEM (Finite Element Method).....	17
2.13 Mesh C3D20R dan C3D4.....	19
BAB 3 METODOLOGI.....	21
3.1 Flow Chart Methodologi Penelitian.....	21
3.2 Studi Literatur.....	22

3.3	Pemodelan Awal	22
3.3.1	Konfigurasi Spesimen yang digunakan	22
3.3.2	Arah Pembebanan Axial Cyclic Loading.....	23
3.3.3	Arah Pembebanan In-Plane Bending Cyclic Loading	24
3.3.4	Konfigurasi dan Besar pembebanan yang digunakan.....	25
3.3.5	Pemodelan dalam Finite Element Method (FEM).....	25
a.	Input Geometri.....	26
b.	Material Properties.....	26
c.	Assembly Parts	28
d.	Boundary Conditions	29
e.	Meshing Parts dan Element Parts	30
f.	Loading	31
h.	Output	32
3.4.	Verifikasi Pemodelan Awal	33
3.4.1	Axially Load Strength Connection on Tube	34
3.4.2	In-Plane Bending Load Strength Connection on Tube.....	35
3.5.	Desain Pemodelan Lanjutan.....	36
BAB 4 PEMBAHASAN		37
4.1	Umum	37
4.2	Pemodelan Awal	37
4.2.1	Konsistensi Satuan.....	37
4.2.2	Spesimen Penelitian.....	38
4.2.3	Pemodelan Spesimen pada Program.....	41
4.2.4	Data-data Material (Material Properties)	43
4.2.5	Constraint dan Boundary Conditions.....	46
4.2.6	Element Meshing	48
4.2.7	Data-Data Pembebanan.....	51
4.2.8	Hasil Analisa Pemodelan Awal	52
a.	Akibat Axially Cyclic Load Spesimen A Tipe 1.....	52
b.	Akibat Axially Cyclic Load Spesimen A Tipe 2.....	56
c.	Akibat In-Plane Bending Cyclic Load Spesimen B Tipe 1	59

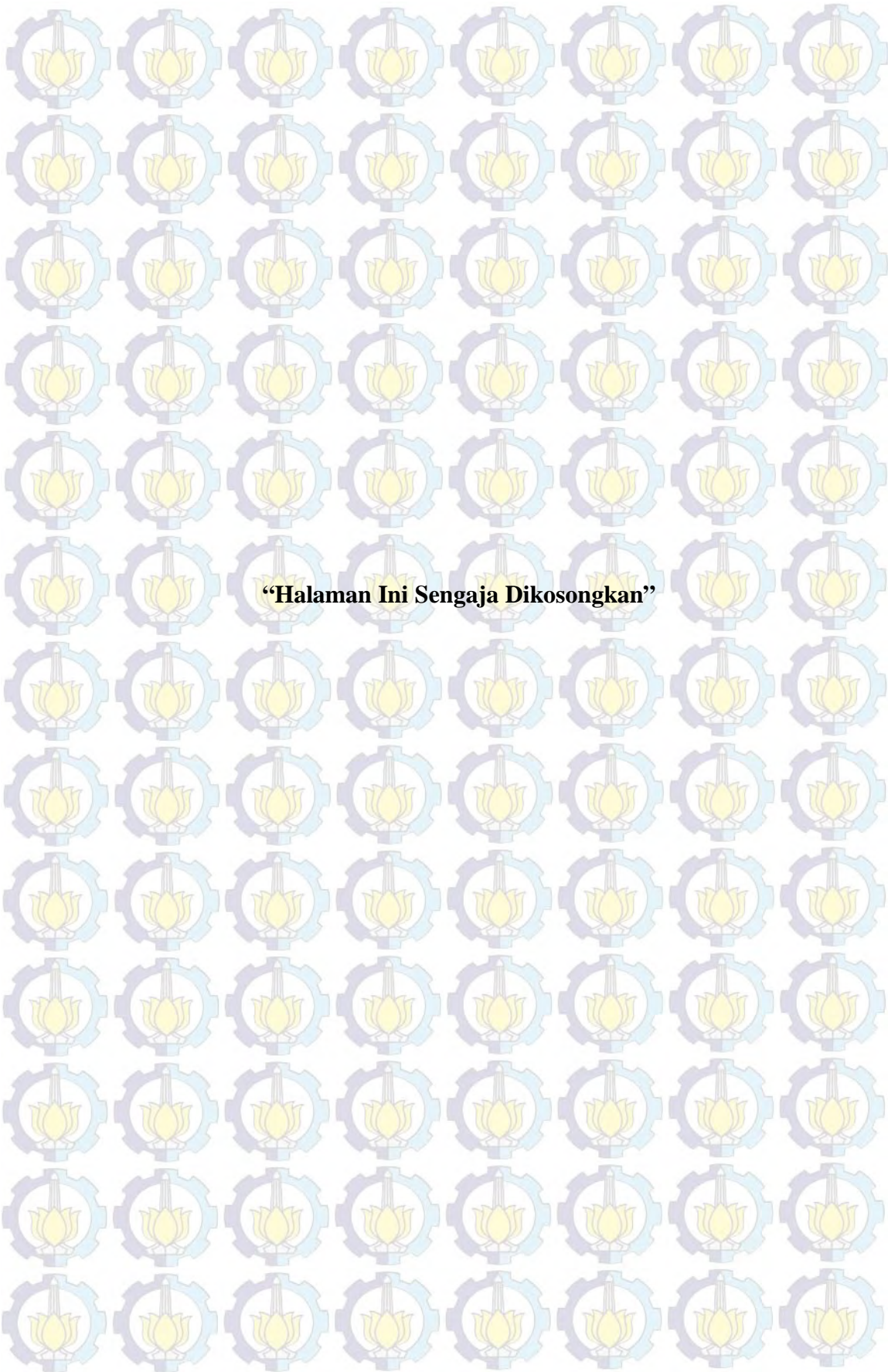
d. Akibat In-Plane Bending Cyclic Load Spesimen B Tipe 2	62
e. Verifikasi Hasil Pemodelan Awal dengan Experimental	65
4.2.9 Kapasitas Sambungan Berdasarkan Peraturan	66
a. Spesimen A (Axially Load)	67
b. Spesimen B (In-Plane Bending).....	68
4.2.10 Verifikasi Hasil Experiment, FEM dan Peraturan.....	69
4.3 Pemodelan Lanjutan	69
4.3.1 Umum	69
4.3.2 Material Tambahan untuk Pemodelan XFEM	70
4.3.3 Pembebanan pada Pemodelan Lanjutan.....	71
4.3.4 Pemodelan XFEM	71
4.3.5 Hasil Pemodelan XFEM	73
4.3.6 Validasi Hasil Pemodelan XFEM	75
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	77
5.1 Kesimpulan.....	77
5.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	79



“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Geometri Spesimen Pipa Penelitian	6
Tabel 2.2 Loading history untuk axial loading test	7
Tabel 2.3 Konsistensi Units (Abaqus, 2004).....	18
Tabel 3.1 Material Spesimen yang digunakan untuk penelitian.....	23
Tabel 3.2 Material Grade untuk spesimen yang digunakan pada penelitian.....	23
Tabel 3.3 Beban displacement yang digunakan untuk spesimen A dan B	25
Tabel 4.1 Tipikal satuan (units) yang digunakan. (Abaqus, 2004).....	38
Tabel 4.2 Dimensi Spesimen Pipa “ <i>T-Joint</i> ”	39
Tabel 4.3 Pemodelan Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> pada FEM.....	41
Tabel 4.4 Data-data material dari coupon test (Wang dan Chen, 2006).....	43
Tabel 4.5 Data-data material yang digunakan dalam pemodelan.....	43
Tabel 4.6 Stress – Strain Test dan Stress – Strain Pemodelan mutu baja (f_y) 345 Mpa	44
Tabel 4.7 Stress – Strain Test dan Stress – Strain Pemodelan mutu baja (f_y) 398 Mpa	45
Tabel 4.8 Beban Displacement Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A dan B Tipe 1 dan 2	51
Tabel 4.9 Tabel Perbandingan <i>Deformation Shaped</i> antara Experimental, Spesimen A, B Tipe 1 dan 2.....	65
Tabel 4.10 Tabel Perbandingan <i>Kurva Cyclic</i> antara Experimental, Spesimen A, B Tipe 1 dan 2.....	66
Tabel 4.11 Perbandingan Kapasitas Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i>	69
Tabel 4.12 Tabel Material untuk Pemodelan XFEM.....	70
Tabel 4.13 Tabel Material Fracture toughness	71
Tabel 4.14 Crack position terjadi pada Saddle Point.....	75



“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

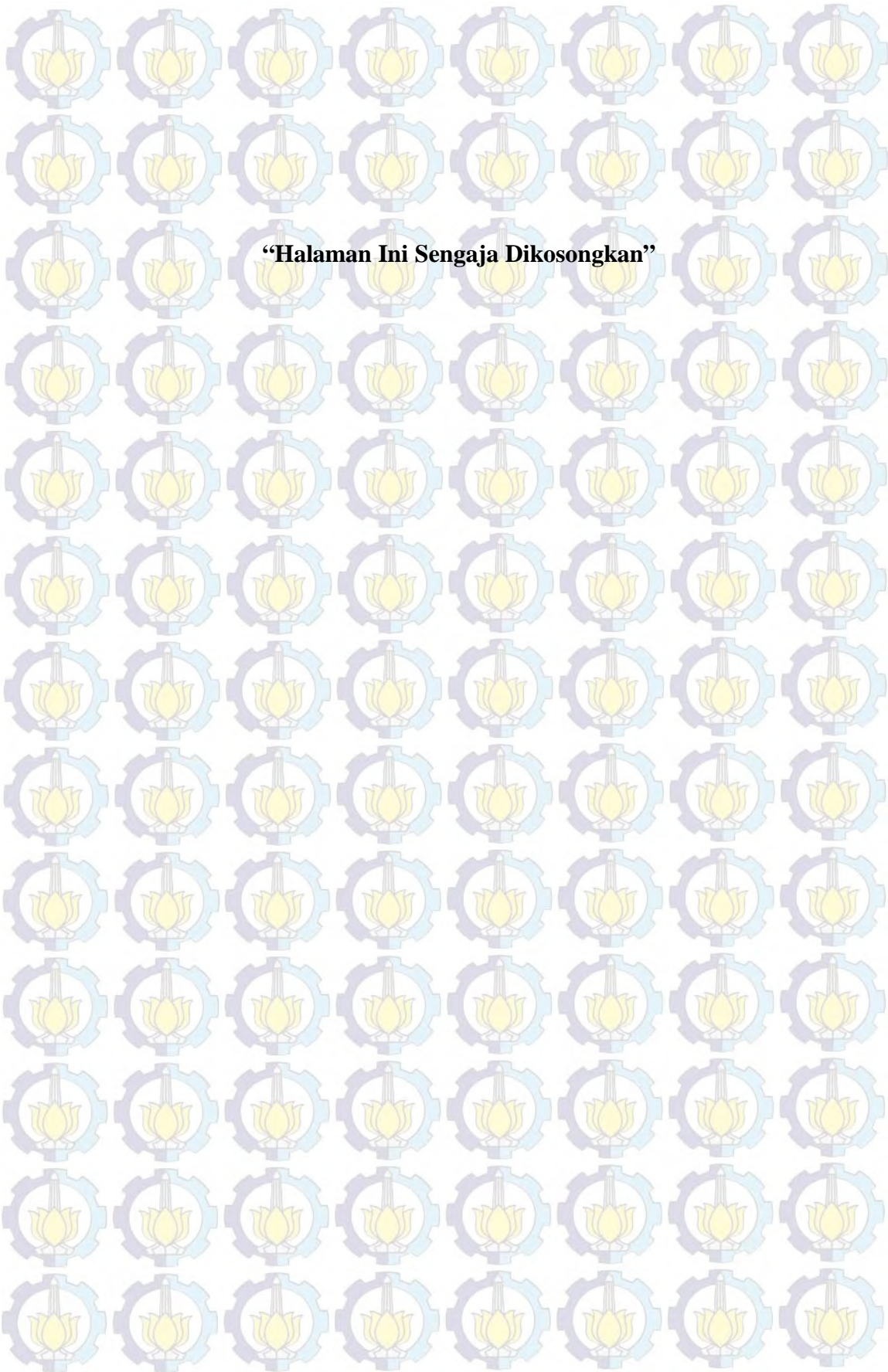
Gambar 2.1 Joint Specimen Tipe A (Wang dan Chen 2006).....	7
Gambar 2.2 Joint Specimen Tipe B (Wang dan Chen 2006).....	7
Gambar 2.3 Loading history untuk In-Plane Bending Load (Wang dan Chen 2006).....	8
Gambar 2.4 Hasil Spesimen Tipe A akibat beban cyclic axial (Wang dan Chen 2006).....	8
Gambar 2.5 Hasil Spesimen Tipe B akibat beban cyclic In-Plane Bending (Wang dan Chen 2006).....	9
Gambar 2.6 Model kegagalan las specimen A1 akibat axial cyclic loading test (Wang dan Chen 2006).....	9
Gambar 2.7 Model kegagalan face plastification specimen A3 akibat axial cyclic loading test (Wang dan Chen 2006).....	10
Gambar 2.8 Model kegagalan face plastification dan punching shear specimen B2 dan B3 akibat in-plane cyclic loading test (Wang dan Chen 2006).....	10
Gambar 2.9 Penyebaran tegangan sisa pada pipa (Akbar dan Santoso, 2012)	11
Gambar 2.10 Definisi hot-spot pada sambungan las (Tang, 2010)	13
Gambar 2.11 Bentuk-bentuk kegagalan pada sambungan pipa (Wardenier dkk, 2008)	13
Gambar 2.12 Konfigurasi Dasar Sambungan Pipa (CIDECT Wardenier dkk, 2008).....	14
Gambar 2.13 Konfigurasi Dasar Detail Las pada Pipa (CIDECT Wardenier dkk, 2008).....	15
Gambar 2.14 Deformation Limit pada Sambungan (Lu dkk, 1994 dalam Santos dkk).....	16
Gambar 2.15 Bilinear Kinematic Hardening (Arifianto, 2015)	16
Gambar 2.16 Contoh Beban Cyclic (Krawinkler, 2000)	17
Gambar 2.17 Basic Element pada FEM (Abaqus, 2004).....	19

Gambar 2.18 Mesh C3D20R (<i>Abaqus, 2004</i>)	20
Gambar 2.19 Mesh C3D4 (<i>Abaqus, 2004</i>)	20
Gambar 3.1 Flow-chart Metodologi	21
Gambar 3.2 Pemodelan Sambungan Las T Joint pada Pipa dengan Axial Loading (Wang dan Chen, 2006)	22
Gambar 3.3 Pemodelan Sambungan Las T Joint pada Pipa dengan In-Plane Bending Loading (Wang dan Chen, 2006)	23
Gambar 3.4 Arah Pembebanan Spesimen A	24
Gambar 3.5 Arah pembebanan specimen B	25
Gambar 3.6 Input Geometri Pipa 245x8 (Chord)	26
Gambar 3.7 Plasticity Material dalam FEM	27
Gambar 3.8 Input Material dalam FEM	27
Gambar 3.9 Constraint Rigid Body Tie dalam FEM	28
Gambar 3.10 Constraint Equations dalam FEM	29
Gambar 3.11 BC “Encastre” dalam FEM	29
Gambar 3.12 BC “XSYMM” dalam FEM	30
Gambar 3.13 Finer Meshing Spesimen Tipe 1 dalam FEM (C3D20R)	31
Gambar 3.14 Finer Meshing Spesimen Tipe 2 dalam FEM (C3D4)	31
Gambar 3.15 Beban Defleksi pada Spesimen A dan B	32
Gambar 3.16 Point-point yang digunakan untuk Output	33
Gambar 3.17 Axially Load pada Sambungan Pipa (Wardenier dkk, 2008)	34
Gambar 3.18 In-Plane Bending Load pada pipa (Wardenier dkk, 2008)	35
Gambar 4.1 Tampak Penampang Global Struktur Pipa “ <i>T-Joint</i> ” (Beban Aksial)	40
Gambar 4.2 Tampak Penampang Global Struktur Pipa “ <i>T-Joint</i> ” (Beban In-Plane Bending)	40
Gambar 4.3 Cross Section Penampang Pipa dalam program (a) Chord (b) Brace	41
Gambar 4.4 Global View Spesimen Pipa “ <i>T-Joint</i> ” dalam Pemodelan tipe 1	42
Gambar 4.5 Global View Spesimen Pipa “ <i>T-Joint</i> ” dalam Pemodelan tipe 2	42
Gambar 4.6 Kurva hubungan Stress-Strain coupon test mutu baja (f_y) 345 Mpa	44

Gambar 4.7 Kurva hubungan Stress-Strain Pemodelan mutu baja (fy) 345 Mpa	44
Gambar 4.8 Kurva hubungan Stress-Strain coupon test mutu baja (fy) 398 Mpa	45
Gambar 4.9 Kurva hubungan Stress-Strain Pemodelan mutu baja (fy) 398 Mpa	45
Gambar 4.10 Constraint pada sambungan pipa baja “ <i>T-Joint</i> ” pada pertemuan chord dan brace (Pemodelan Tipe 1)	46
Gambar 4.11 <i>Equation Constraint</i> pada sambungan Pipa “ <i>T-Joint</i> ” pada pertemuan <i>top plate dan brace</i> (Pemodelan tipe 1)	46
Gambar 4.12 Boundary Condition tipe “ENCASTRE” pada pemodelan sambungan pipa baja <i>T-Joint</i> FEM (Pemodelan tipe 1 dan 2).....	47
Gambar 4.13 Boundary Condition tipe “XSYMM” pada pemodelan sambungan pipa baja <i>T-Joint</i> FEM (Pemodelan tipe 1 dan 2)	48
Gambar 4.14 <i>Global View Meshing</i> Pemodelan Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen tipe-1 (tipe C3D20R).....	49
Gambar 4.15 <i>Finer Meshing</i> pada <i>intersection</i> Pemodelan Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen Tipe-1 (tipe C3D20R)	49
Gambar 4.16 <i>Global View Meshing</i> pada <i>intersection</i> Pemodelan Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen Tipe-2 (tipe C3D4)	50
Gambar 4.17 <i>Finer Meshing</i> pada <i>intersection</i> Pemodelan Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen Tipe-2 (tipe C3D4)	50
Gambar 4.18 Beban <i>Displacement</i> arah Vertikal Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 1	51
Gambar 4.19 Beban <i>Displacement</i> arah Vertikal Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2	52
Gambar 4.20 Beban <i>Displacement</i> arah Horisontal Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 1 dan 2.....	52
Gambar 4.21 Prediksi <i>Deformation Shape</i> akibat gaya Tarik pada Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Pemodelan A Tipe 1	53
Gambar 4.22 Prediksi <i>Deformation Shape</i> akibat gaya Tekan pada Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Pemodelan A Tipe 1	53

Gambar 4.23 <i>Stress Contour</i> pada Saddle Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A akibat Tarik (S22).....	54
Gambar 4.24 <i>Stress Contour</i> pada Saddle Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A akibat Tekan (S22)	54
Gambar 4.25 Idealisasi Kurva $P-\delta v$ Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 1	55
Gambar 4.26 Prediksi <i>Deformation Shape</i> akibat gaya Tekan pada Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Pemodelan A Tipe 2.....	56
Gambar 4.27 Prediksi <i>Deformation Shape</i> akibat gaya Tarik pada Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Pemodelan A Tipe 2.....	56
Gambar 4.28 <i>Stress Contour</i> pada <i>intersection</i> akibat Tekan Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2 (S22).....	57
Gambar 4.29 <i>Stress Contour</i> pada <i>intersection</i> akibat Tarik Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2 (S22)	57
Gambar 4.30 <i>Stress Contour</i> pada <i>intersection</i> akibat Tekan Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2 (S12)	58
Gambar 4.31 Idealisasi Kurva $P-\delta v$ Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2	59
Gambar 4.32 Prediksi <i>Deformation Shaped</i> Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 1	60
Gambar 4.33 Prediksi <i>Deformation Shaped</i> Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 1	60
Gambar 4.34 Kontur tegangan (S22) Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 1	61
Gambar 4.35 Kontur tegangan (S12) Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 1	61
Gambar 4.36 Idealisasi Kurva $M-\theta$ Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 1	62
Gambar 4.37 <i>Deformation Shaped</i> akibat In-Plane Bending Load Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 2	63
Gambar 4.38 <i>Stress Contour</i> (S22) akibat In-Plane Bending Load Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe	63

Gambar 4.39 <i>Stress Contour</i> (S_{23}) akibat In-Plane Bending Load Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 2	64
Gambar 4.40 Idealisasi Kurva $M-\theta$ Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen B Tipe 2	64
Gambar 4.41 Fitur crack pada Pemodelan XFEM.....	72
Gambar 4.42 Remeshing Element dalam Pemodelan XFEM (C3D4)	72
Gambar 4.43 Remeshing Element pada Intersection dalam Pemodelan XFEM (C3D4)	73
Gambar 4.44 Tegangan pada Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2 pada saat terjadi retak pertama.....	74
Gambar 4.45 Maximum Principle Stress pada Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2 pada saat terjadi retak pertama.....	74
Gambar 4.46 Panjang Retak Pertama pada Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2	74
Gambar 4.47 Panjang Retak Susulan pada Sambungan Pipa Baja <i>T-Joint</i> Spesimen A Tipe 2	75



“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Untuk semua jenis konstruksi idealnya dalam mendesain tidak diinginkan adanya sambungan dari elemen konstruksi tersebut, ini dikarenakan didaerah sambungan adalah sumber kelemahan dari suatu struktur. Akan tetapi dalam kenyataannya ada banyak dijumpai sambungan ini disebabkan karena kebutuhan atau suatu hal pilihan yang perlu dilakukan. (Messler, 2004).

Pada umumnya ada 4 faktor untuk menentukan berhasil atau tidaknya suatu perencanaan yaitu fungsionalitas, manufaktur, biaya dan terakhir adalah estetika atau keindahan. Dari keempat aspek diatas, aspek yang pertama fungsionalitas adalah yang paling penting. Agar penggunaannya sesuai dengan kondisi yang diperlukan, maka bahan harus disambung melalui beberapa cara seperti penyambungan dengan baut atau paku keeling, sambungan yang lebih dan tahan terhadap beban-beban salah satunya dengan cara pengelasan (Welding). (Ashby, 1999; Charles dkk, 1997 dalam Messler, 2004).

Danarbroto (2012) menjelaskan dalam pengelasan hal yang memang terjadi perhatian lebih adalah ketika proses penyambungan logam las ditargetkan karena rentan cacat las yang terbentuk. Walaupun cacat las memang tidak direncanakan dalam proses pengelasan, aktualnya sering terjadi ketika pengelasan. Cacat las secara aktual sering terjadi dalam sambungan las, diantaranya retak (crack) dan incomplete penetration yaitu cacat yang disebabkan distribusi arus induksi panas yang tidak merata. Kecuali itu juga terjadi porositas yaitu cacat oleh udara atau gas yang terkurung oleh las, sehingga terjadi rongga besar atau kecil. Hasil survei lapangan di PT. Indonesia Steel Tube Works (PT. ISTW Semarang) menunjukkan bahwa, umumnya sering terjadi masalah pada sambungan las pipa baja berdiameter kecil ($\leq 1,5$ inchi), hal ini mengakibatkan nilai elongasi rendah sehingga terjadi keretakan atau pecahan pada sambungan las tersebut.

Akbar dan Santoso (2012) lebih lanjut menjelaskan bahwa proses penyambungan logam dengan pengelasan sudah sering digunakan dalam industry

fabrication, termasuk pembuatan kapal, perbaikan kapal, dari penyambungan konstruksinya, seperti penyambungan gading, sekat, pembujur dan lain sebagainya, diantara manfaat tersebut meliputi tingginya efisiensi sambungan struktur. Namun, tegangan sisa dan distorsi dapat terjadi di dekat daerah las karena pemanasan lokal oleh proses pengelasan dan pendinginan cepat. Tegangan sisa yang tinggi di daerah dekat las dapat menimbulkan brittle fractures, fatigue, atau stress corrosion cracking. Sementara itu tegangan sisa pada pelat dapat mengurangi kekuatan tekuk pada struktur. Oleh karena itu, tegangan sisa pengelasan harus diminimalisasi agar tidak terjadi kegagalan struktur sesuai dengan persyaratan masing-masing. Pada beberapa kasus pengelasan ada beberapa cara untuk mengurangi tegangan sisa, diantaranya preheating, heat treatment, hammering, dan weld sequencing.

Struktur pipa baja sudah sangat banyak digunakan dalam dunia konstruksi baja, mengingat struktur geometry pipa baja yang mempunyai material properties yang sama di dua sisi. Akan tetapi Gempa Northridge dan Gempa Kobe telah mengekspos kelemahan struktur baja terutama pada sambungan pipa baja. Peneliti-peneliti sebelumnya telah melakukan penelitian tentang sambungan pipa dimana *unstiffened pipe* mempunyai kapasitas sambungan yang rendah dibandingkan dengan *stiffened pipe*. Banyak penelitian yang focus mempelajari kapasitas ultimate sambungan pipa, akan tetapi sedikit yang mempelajari perilaku sambungan pipa terhadap beban cyclic. (Wang dan Chen, 2006)

FEM adalah suatu pendekatan numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan dan sifat-sifat material yang rumit. Hal ini sulit diselesaikan dengan solusi analisa matematis. Pendekatan metode elemen hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (node). Dalam proses penentuan titik simpul yang di sebut dengan pendeskritan (discretization), suatu sitem dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara. (Akbar dan Santoso 2012).

Pada penelitian kali ini, penulis akan mensimulasi ulang sambungan T pada pipa (CHS) dari penelitian yang dilakukan oleh Wang (2006) dalam

jurnalnya “*Hysterictic Behavior Of Tubular Joints Under Cyclic Loading*” dengan metode *Finite Element Method*. Dengan menggunakan model tipe-tipe meshing yang berbeda-beda, perilaku sambungan pada sambungan pipa baja “T-Joint” dapat digambarkan. Disamping itu dalam penelitian lebih lanjut akan membahas mekanisme retak pada sambungan las tersebut. Semua hasil dijabarkan dalam Bab. 4. Untuk mengontrol apakah pemodelan yang digunakan sudah benar, langkah terakhir adalah validasi hasil dengan menggunakan peraturan CIDECT. Pemodelan mekanisme retak akan dijelaskan pada pemodelan lanjutan dengan menggunakan pemodelan XFEM (*Extended Finite Element Method*).

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka permasalahan yang dapat dikemukakan pada penelitian kali ini adalah

- Bagaimana pengaruh tipe-tipe meshing terhadap perilaku sambungan pipa baja berbentuk T (*T-Joint*) dalam simulasi FEM
- Bagaimana pengaruh kegagalan local buckling akibat cyclic load pada sambungan pipa baja berbentuk T (*T-Joint*) dalam simulasi FEM
- Bagaimana pengaruh simulasi FEM terhadap validasi antara experimental dan Peraturan (CIDECT)
- Bagaimana pengaruh XFEM (*Extended Finite Element Method*) terhadap mekanisme retak pada sambungan pipa baja berbentuk T (*T-Joint*).

1.3 Tujuan

Adapun tujuan utama yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah

- Meneliti pengaruh tipe-tipe meshing terhadap perilaku sambungan pipa baja berbentuk T (*T-Joint*) dalam simulasi FEM
- Meneliti bentuk kegagalan *local buckling* pada sambungan pipa baja berbentuk T (*T-Joint*) akibat *cyclic load* dengan simulasi FEM
- Meneliti berapa persen perbedaan kapasitas sambungan pipa baja berbentuk T (*T-Joint*) yang dihasilkan antara experimental, simulasi FEM dan Peraturan (CIDECT)

- Meneliti mekanisme crack pada sambungan pipa baja berbentuk T (*T-Joint*) dengan menggunakan simulasi XFEM (*Extended Finite Element Method*)

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini agar permasalahan tidak meluas maka penulis membatasi permasalahan yaitu

- Konfigurasi spesimen dan material yang dilakukan dalam penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Wang dan Chen (2006).
- Konfigurasi pembebanan axial cyclic loading dan in-plane cyclic bending mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Wang dan Chen (2006).

1.5 Manfaat

- Dapat digunakan acuan untuk menentukan *Stress Concentration Factor* pada sambungan las yang erat hubungannya dengan fatigue pada lokasi hot-spot (sambungan).
- Dapat digunakan acuan untuk meneliti *crack fatigue mekanisme*.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Akbar dan Santoso (2012) menjelaskan proses pengelasan menyebabkan pemanasan tinggi yang tidak merata pada bagian-bagian yang akan disambung tersebut, dimana area dari benda kerja yang dilas mengalami pemanasan hingga mencapai $\pm 1600^{\circ}$ C, kemudian mengalami penurunan suhu secara bertahap.

Pemanasan lokal dan laju pendinginan bertahap menyebabkan perubahan volume yang akhirnya menghasilkan penyebaran panas, deformasi dan tegangan sisa.

Teng dan Chan (1998) dalam *Yaghi (2004)* menjelaskan bahwa sambungan las mempunyai peranan yang penting dalam dunia industri baja seperti jembatan, kapal, *pressure vessels* dan struktur industri baja lainnya. Residual stress mempunyai peranan penting dalam mekanisme retak sambungan las. Dengan mempelajari perilaku mekanisme retak dapat memudahkan engineer untuk meminimalisir potensi bahaya sambungan terhadap struktur secara keseluruhan.

Salah satu cara untuk memprediksi perilaku atau mekanisme retak dengan menggunakan simulasi berbasis *Extended Finite Element Method*.

2.2 Penelitian-Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Wang dan Chen (2006) menjelaskan perilaku sambungan pipa bentuk “T” dengan menggunakan sambungan las akibat beban cyclic (beban berulang-ulang) pada struktur rangka pipa dengan experimental dan disimulasi ulang dengan menggunakan program berbasis Finite Element Analysis yaitu ANSYS. Ada delapan specimen pipa yang diobservasi dalam penelitiannya. Empat diantaranya diberi beban cyclic axial load dan empat sisanya diberi beban cyclic in-plane bending sesuai dengan Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.

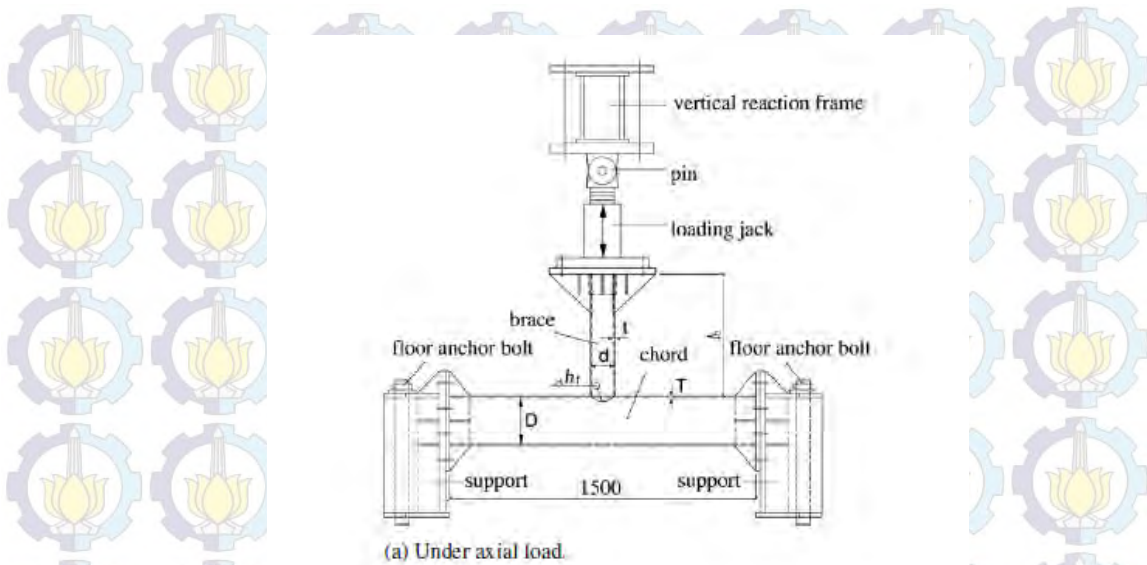
Sesuai dengan Gambar 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 dan 2.8 hasil penelitian menjelaskan bahwa bentuk kegagalan utama akibat beban cyclic axial load adalah weld cracking akibat beban tarik (tension) dan chord face plastification akibat beban tekan (compression). Akan tetapi sambungan (joints) akibat beban cyclic in-plane bending baik punching shear dan chord plastification menjadi penentu utama faktor kegagalan disertai dengan kegagalan sambungan las setelahnya. Tabel 2.1 adalah geometri spesimen pipa yang digunakan Wang dan Chen dalam penelitiannya. Sedangkan Tabel 2.2 dan Gambar 2.3 adalah pola pembebanan beban *cyclic*.

Dalam penelitian yang sama, Wang menggunakan batasan defleksi (*deformation limit*) untuk menentukan ultimate strength dari sambungan dari beberapa experiment yang dilakukan oleh para peneliti sebelumnya seperti Yura et al. (1981) dan Lu et al (1994).

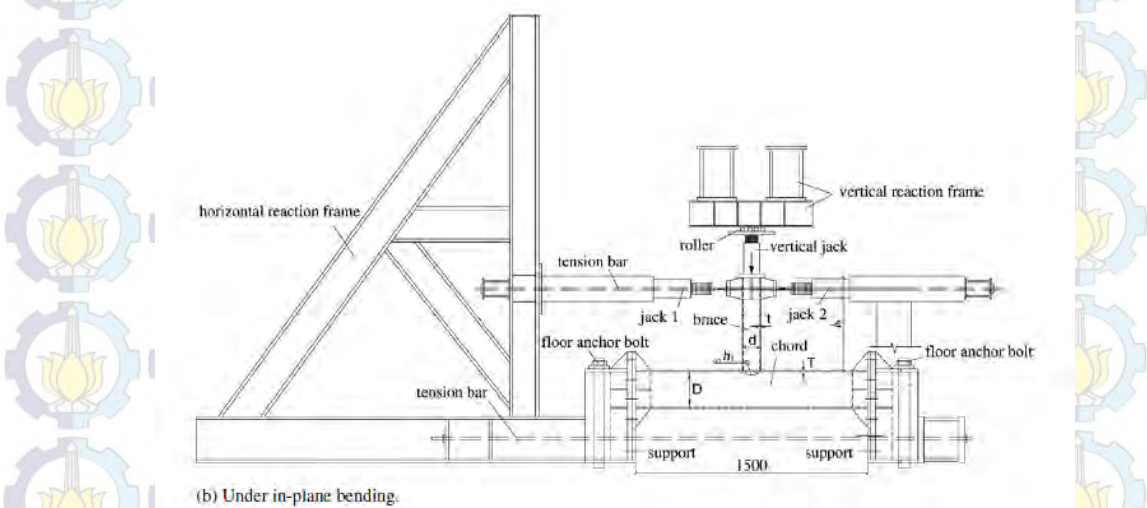
Tabel 2.1 Geometri Spesimen Pipa Penelitian

Specimen	$D \times T$	$d \times t$	l_b	h_f	β	γ	τ
A1	245 × 8	121 × 6	600	12	0.49	15.3	0.75
A2	245 × 8	121 × 6	600	12	0.49	15.3	0.75
A3	245 × 12	121 × 8	600	12	0.49	10.2	0.75
A4	245 × 8	194 × 6	1000	8	0.79	15.3	0.75
B1	245 × 8	121 × 6	600	12	0.49	15.3	0.75
B2	245 × 8	121 × 6	600	12	0.49	15.3	0.75
B3	245 × 12	121 × 8	600	12	0.49	10.2	0.75
B4	245 × 8	194 × 6	1000	8	0.79	15.3	0.75

Sumber : Wang dan Chen 2006



Gambar 2.1 Joint Specimen Tipe A (Wang dan Chen 2006)

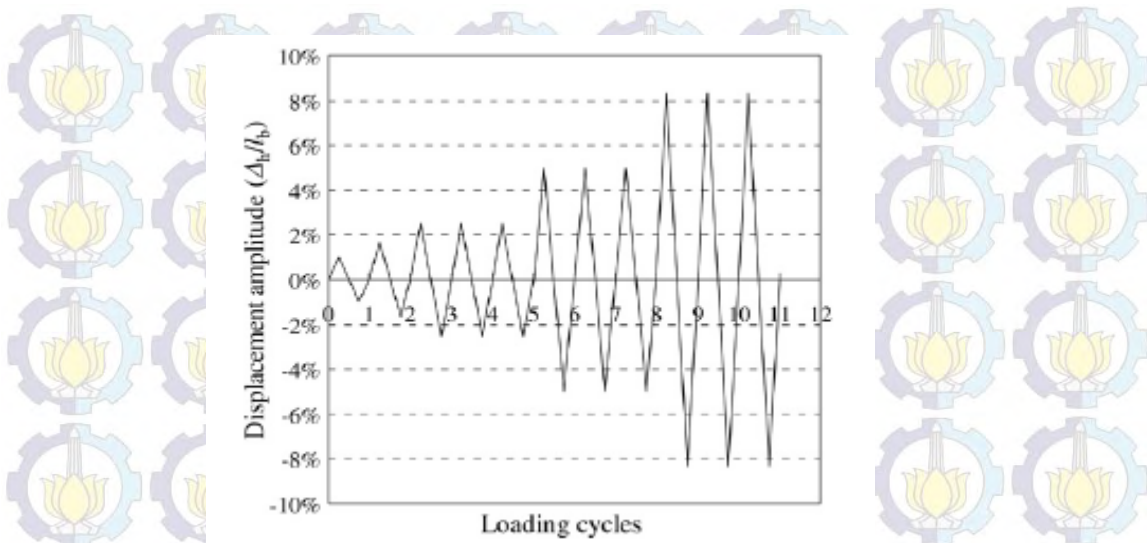


Gambar 2.2 Joint Specimen Tipe B (Wang dan Chen 2006)

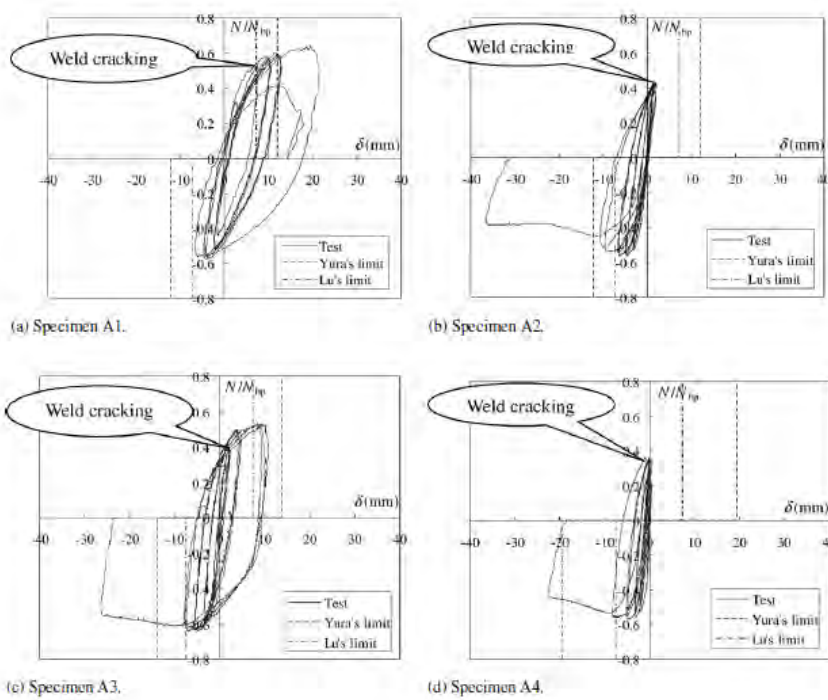
Tabel 2.2 Loading history untuk axial loading test

Specimen A1 Δ_v (mm)	Specimen A2 Δ_v (mm)	Specimen A3 Δ_v (mm)	Specimen A4 Δ_v (mm)	Number of cycles
$\pm 6.6, -1.8$	$\pm 1.0, -2.0$	$\pm 1.6, -1.4$	$\pm 1.1, -1.5$	1
$\pm 14.9, -2.8$	$\pm 2.0, -3.6$	$\pm 6.7, -5.2$	$\pm 2.0, -3.6$	1
$\pm 19.3, -3.5$	$\pm 6.1, -8.1$	$\pm 9.0, -8.2$	$\pm 4.4, -8.1$	3
$\pm 22.6, -5.7$	$\pm 8.1, -10.5$	$\pm 15.3, -11.3$	$\pm 7.2, -10.2$	3
$\pm 30.3, -8.2$	$\pm 9.5, -12.6$	$\pm 26.9, -14.0$	$\pm 11.8, -13.0$	3
	$\pm 10.2, -14.3$		$\pm 12.2, -16.7$	3

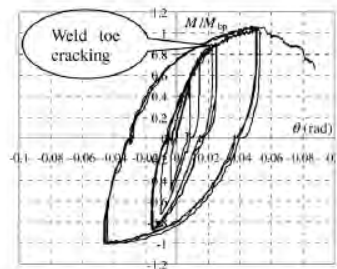
Sumber :Wang dan Chen 2006



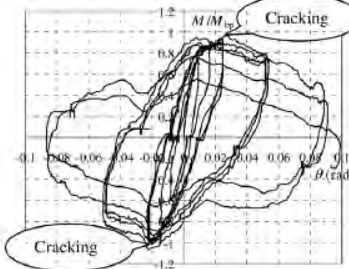
Gambar 2.3 Loading history untuk In-Plane Bending Load (Wang dan Chen 2006)



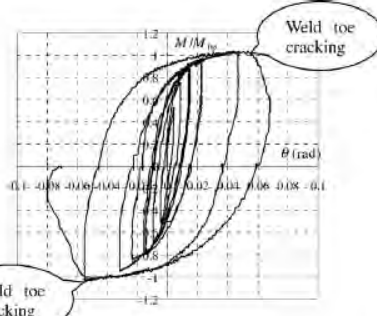
Gambar 2.4 Hasil Spesimen Tipe A akibat beban cyclic axial (Wang dan Chen 2006)



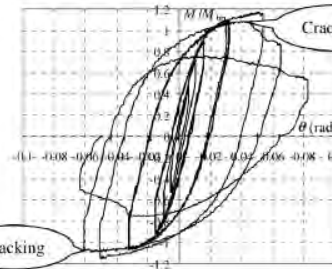
(a) Specimen B1.



(b) Specimen B2.

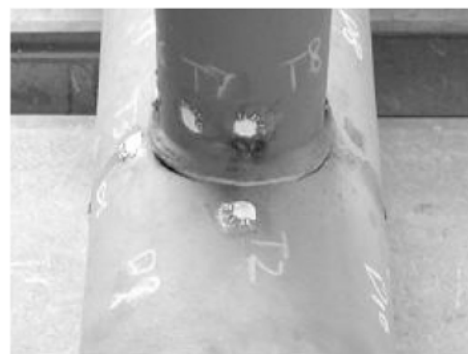
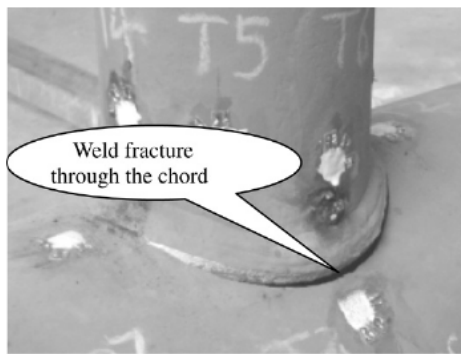


(c) Specimen B3.

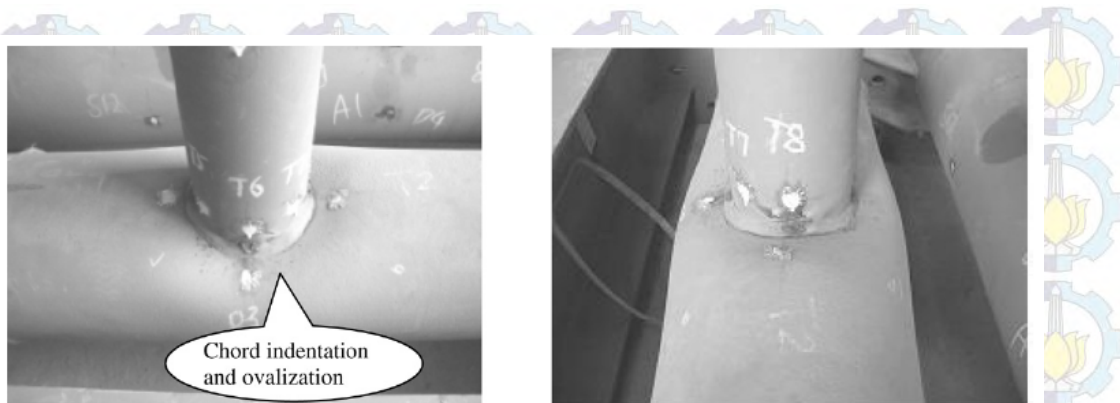


(d) Specimen B4.

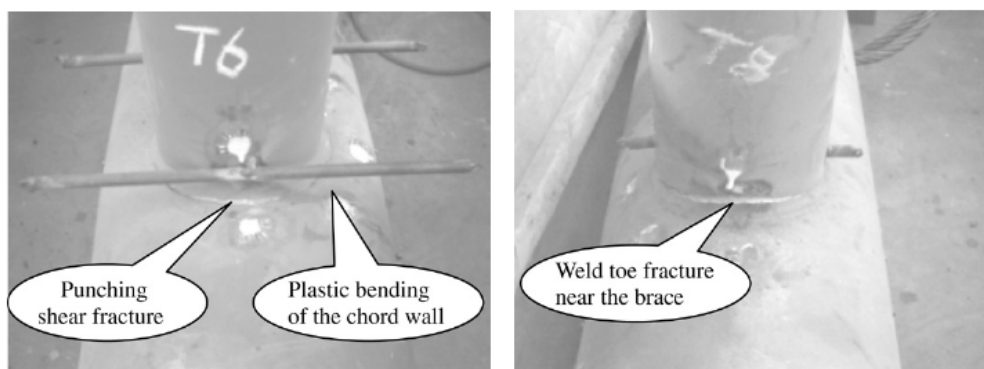
Gambar 2.5 Hasil Spesimen Tipe B akibat beban cyclic In-Plane Bending
(Wang dan Chen 2006)



Gambar 2.6 Model kegagalan las specimen A1 akibat axial cyclic loading test
(Wang dan Chen 2006)



Gambar 2.7 Model kegagalan face plastification specimen A3 akibat axial cyclic loading test (Wang dan Chen 2006)



Gambar 2.8 Model kegagalan face plastification dan punching shear specimen B2 dan B3 akibat in-plane cyclic loading test (Wang dan Chen 2006)

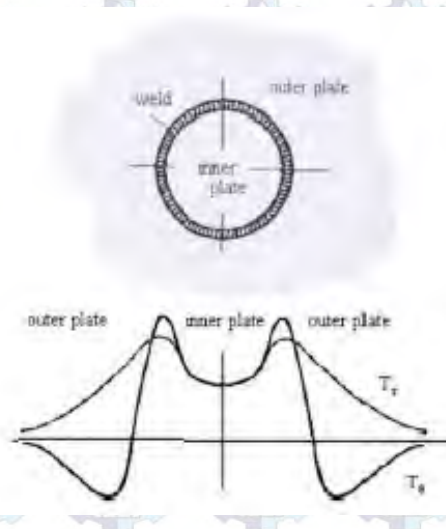
2.3 Sambungan Las

Tipe Joint Las dipilih berdasarkan metode pengelasan dan ketebalan pelat. Pemilihan tipe joint las idealnya dapat memberikan kekuatan struktural dan kualitas yang baik sesuai dengan volume joinnya. Biaya pengelasan akan meningkat sesuai dengan ukuran las dan jika heat awalnya besar akan menyebabkan masalah seperti kekuatan akan berkurang dan terjadi distortion. Persiapan pada waktu pengelasan juga bisa menyebabkan biaya yang mahal. (Klas 2003).

Salah satu contoh sambungan las adalah Las Tumpul. Las Tumpul (Butt-Welds) mempunyai perbedaan dengan beberapa tipe-tipe las yang lain seperti fillet welds, plug welds dan surfacing welds. Pada las jenis tumpul dapat dihasilkan kekuatan kapasitas las lebih tinggi karena adanya full penetration weld. Akan tetapi dalam proses pengelasan jenis ini memerlukan beberapa persiapan-persiapan sebagai contoh apabila tebal pelat yang disambung lebih tebal maka diperlukan suatu bevel, disamping itu proses pengelasan memerlukan beberapa layer las (weld-passes), dengan adanya weld passes akan menimbulkan panas dan penurunan panas pada las yang berbeda-beda, sehingga kenapa butt-weld mempunyai residual stress yang tinggi (Messler 2004).

2.4 Pengelasan Melingkar

Ketentuan-ketentuan untuk pengelasan sambungan bevel butt joint pada pengelesan melingkar pada pelat berbeda dengan pengelasan horizontal pelat datar. Perbedaan ini disebabkan karena pada proses pengelasan melingkar pada pelat terjadi pemuaihan dan penyusutan pada logam las dalam arah radial dan tangensial. Karena penyusutan yang dialami oleh inner plate dan tertahan oleh sekeliling dari outer plate, maka dari kondisi tersebut timbulah tegangan sisa. Tegangan sisa terbesar terjadi pada daerah kampuh las lihat Gambar 2.9. Nilai maksimum tegangan sisa melingkar lebih besar dibandingkan dengan nilai maksimum tegangan sisa radial. (Akbar dan Santoso, 2012).



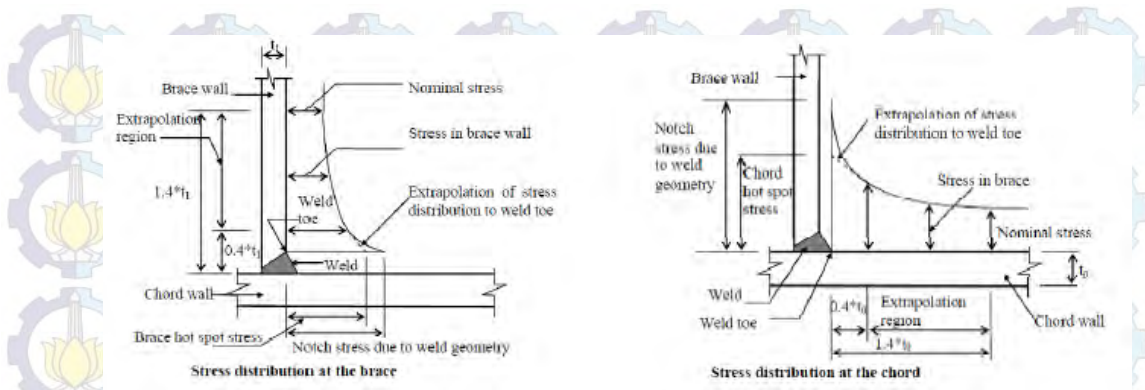
Gambar 2.9 Penyebaran tegangan sisa pada pipa (Akbar dan Santoso, 2012)

2.5 Stress Intesity Factor (SIF)

Fracture dan *Failure* sering terjadi pada dunia konstruksi terlebih industri baja. Salah satu contoh mekanismen *fracture* dan *failure* adalah mekanisme retak pada sambungan las. Mekanisme retak pada sambungan las bisa terjadi akibat beberapa faktor seperti beban, proses konstruksi atau cacat dari produksi. Dalam ilmu pengetahuan yang semakin modern, *fracture mechanism* mempunyai peranan penting dalam meningkatkan mekanikal performa dalam mekanikal komponen. *Stress Intesity Factor (SIF)* adalah salah satu parameter yang paling penting dalam memprediksi usia kegagalan suatu kompoenen struktur terutama sambungan las. Akan tetapi dalam kenyataannya *Stress Intesity Factor (SIF)* adalah sebuah penyelesaian yang sangat kompleks dari *applied loading, boundary condition, crack growth, geometri dan material properties*. Dengan menggunakan *Stress Intesity Factor (SIF)* dan *Paris Law* kita bisa menafsirkan kekuatan sambungan las dari segi *fatigue crack growth*. (Hedayati dan Vahedi, 2013).

2.6 Stress Concentration Factor (SCF)

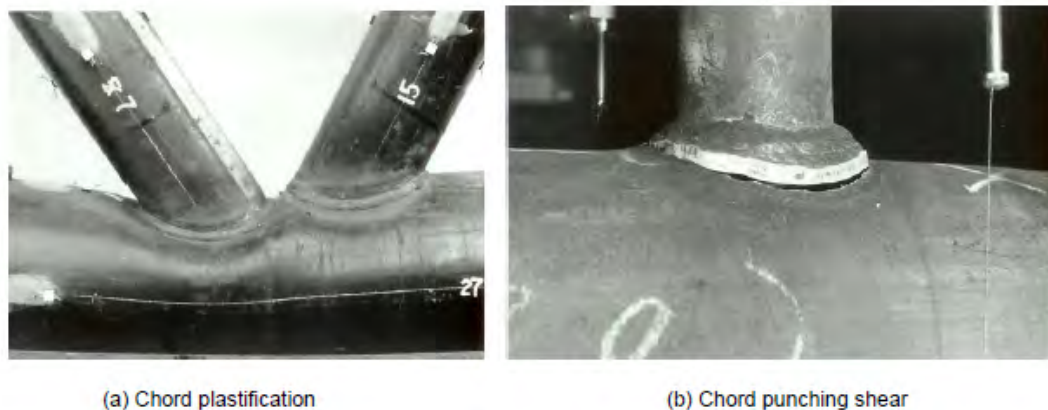
SCH (Tubular) mempunyai kapabilitas yang baik dalam menahan beban akibat *bending, torsion* dan *buckling*. Disamping itu SCH mempunyai berat yang ringan, oleh karena itu banyak konstruksi baja yang menggunakan pipa sebagai komponen utamanya. Akan tetapi dalam SCH sering dijumpai sambungan las sebagai sambungan utamanya, ini sangat bahaya apabila ada beban gempa. Karena pada sambungan pipa banyak dijumpai konsentrasi tegangan yang menumpuk pada satu titik, sehingga memunculkan *hot spot* pada sambungan las tersebut. Salah satu parameter selain SIF dalam mendesain sambungan las akibat *fatigue* adalah dengan menghitung *Stress Concentration Factor (SCF)*. *Stress Concentration Factor (SCF)* adalah ratio perbandingan antara tegangan hot spot pada titik las dibagi dengan tegangan nominal pada penampang baja sesuai dengan Gambar 2.10. (Tang, 2010)



Gambar 2.10 Definisi *hot-spot* pada sambungan las (Tang, 2010)

2.7 Platification Failure dan Punching Shear Failure

Pada Gambar 2.11 menjelaskan bahwa *Chord Face Plastification* adalah bentuk kegagalan yang dialami oleh batang akibat tekanan dari batang lainnya, bentuk kegagalan ini mengakibatkan penampang pipa mengalami bending (leleh), sedangkan kegagalan akibat *punching shear* pada sambungan adalah batang tersebut sobek atau crack akibat gaya lateral akan tetapi sambungan las masih menyatu dari batang yang akan disambung. (Wardenier dkk, 2008).

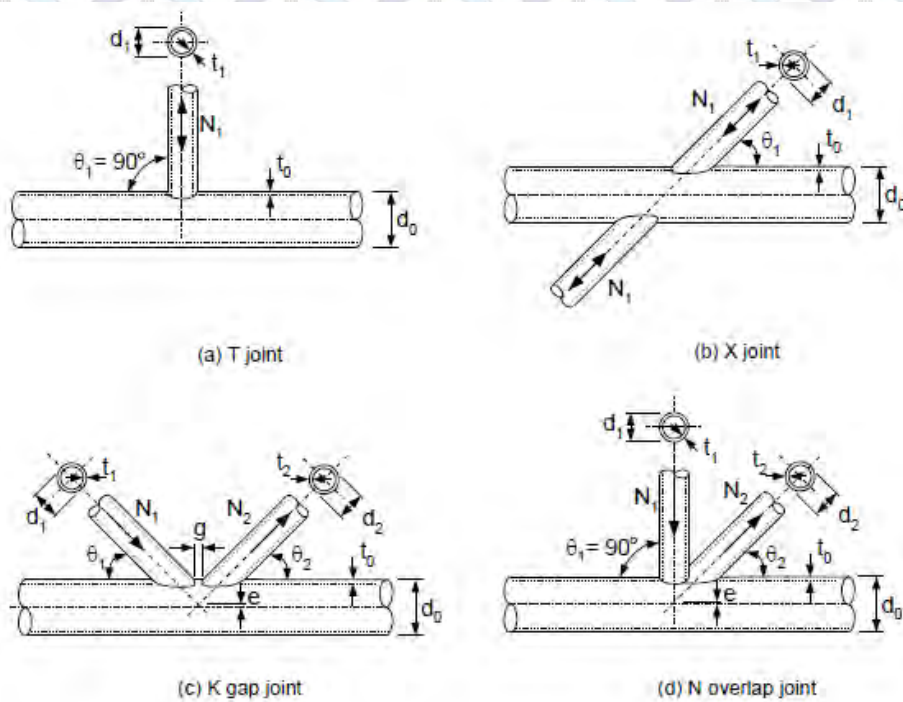


Gambar 2.11 Bentuk-bentuk kegagalan pada sambungan pipa (Wardenier dkk, 2008)

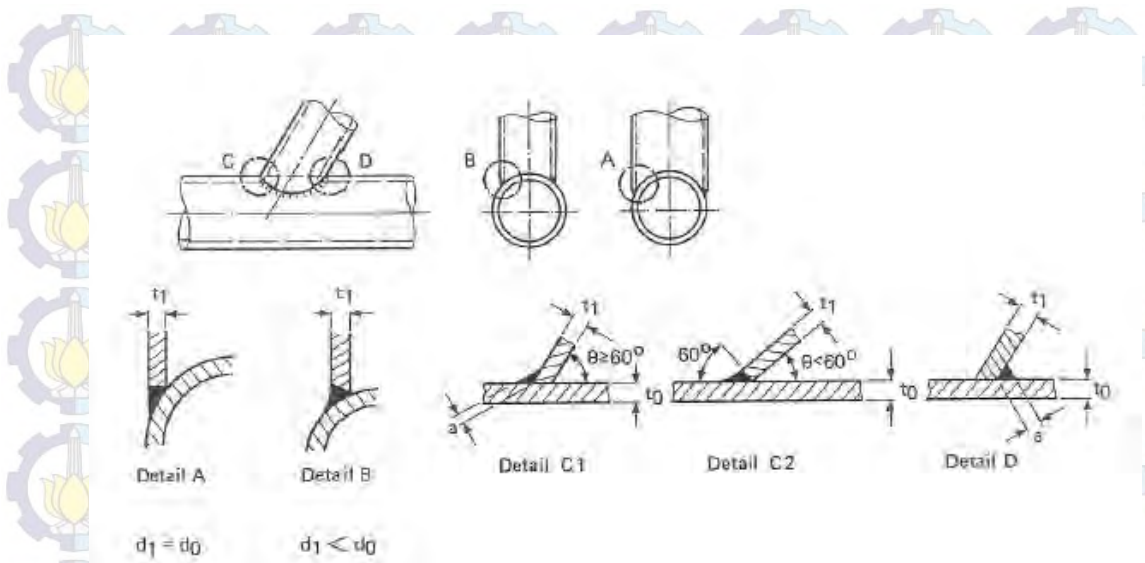
2.8 Kapasitas Join (Joint Strength)

Metode kegagalan pada sambungan pipa tergantung bentuk geometri (model sambungan) pipa seperti bentuk “T”, “Y”, “X” atau kombinasi antara “T” dan “Y” sesuai dengan Gambar 2.12 dan Gambar 2.13. Selain bentuk atau model

sambungan pipa, bentuk kegagalan sambungan pipa tergantung pada jenis beban yang bekerja seperti beban axial, in-plane bending dan out-plane bending. Pada umumnya dalam menentukan kapasitas sambungan pipa tergantung dari mode failure batang yang disambungkan. Mode kegagalan local buckling (*face plastification failure*) dan *punching shear* lebih umum dipakai dalam menentukan sambungan tersebut gagal atau tidak. Jadi bukan kegagalan akibat putusnya sambungan las yang dijadikan acuan. Pada beban akibat cyclic tekan dan tarik kombinasi kegagalan akibat plastification failure dan crack pada sambungan terjadi. (CIDECT Wardenier dkk, 2008)



Gambar 2.12 Konfigurasi Dasar Sambungan Pipa (CIDECT Wardenier dkk, 2008)

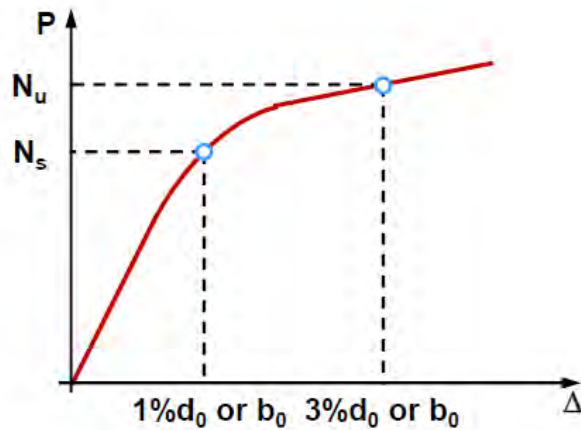


Gambar 2.13 Konfigurasi Dasar Detail Las pada Pipa (CIDECT Wardenier dkk, 2008)

2.9 Deformation Limit pada Sambungan

Deformation limit pada sambungan baik itu akibat tekan dan tarik sangat diperlukan karena *deformation limit* ini menentukan kapasitas sambungan. *Deformation limit* pada sambungan dapat mengacu pada Lu dkk (1994) seperti pada Gambar 2.14.

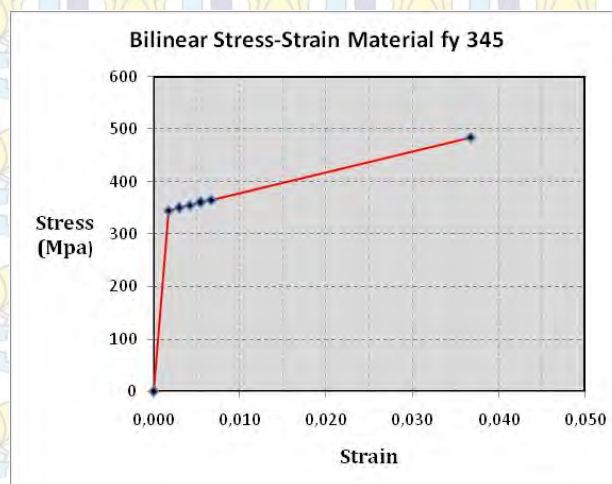
3% ϵ_0 sebagai batas deformasi sudah banyak digunakan dan bahkan persyaratan tersebut sudah digunakan dalam peraturan *International Institute of Welding (IIW, 1989)*. N_u adalah batas ultimate tekan atau tarik pada 3% ϵ_0 . Sedangkan N_s adalah batas service tekan atau tarik pada 1% ϵ_0 . Dalam beberapa penelitian termasuk penelitian yang dilakukan oleh Wang dan Chen 2006, 3% ϵ_0 digunakan untuk menentukan batas ultimate gaya tekan atau tarik. (Santos, dkk)



Gambar 2.14 Deformation Limit pada Sambungan (Lu dkk, 1994 dalam Santos dkk)

2.10 Bilinear Kinematic Hardening

Bilinear Kinematic Hardening adalah suatu cara sederhana pemodelan material akibat beban cyclic. Selain itu kombinasi antara isotropic dan kinematic hardening bisa digunakan apabila data-data yang tersedia non-linear. Kekurangan dari kinematic hardening adalah plastic strain yang digunakan kurang dari 0.005. *Effect Bauschinger* terjadi pada pemodelan bilinear kinematic hardening. (Abaqus, 2004). Bentuk model stress-strain material bilinear kinematik hardening sesuai dengan Gambar 2.15.

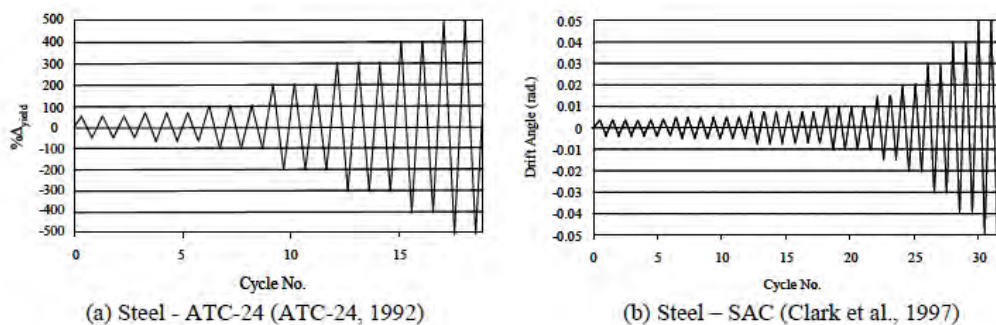


Gambar 2.15 Bilinear Kinematic Hardening (Arifianto, 2015)

2.11 Beban Cyclic (Beban Bolak-Balik)

Beban gempa merupakan salah satu contoh beban cyclic (bolak-balik). Beban cyclic bisa berupa beban bolak-balik arah vertikal ataupun arah horizontal. Acuan pembebanan bisa menggunakan Displacement sebagai control atau Load sebagai kontrol. Hasil yang didapatkan dalam analisa struktur menggunakan beban cyclic berupa kurva histeristik hubungan antara $P-\delta$ atau $M-\theta$. Berikut adalah contoh acuan beban cyclic menurut *Krawinkler, 2000*.

Gambar 2.16 adalah salah satu contoh beban cyclic dari salah satu standard protokol pengujian SAC.



Gambar 2.16 Contoh Beban Cyclic (*Krawinkler, 2000*)

2.12 FEM (Finite Element Method)

Salah satu cara untuk menyelesaikan masalah dalam analisa struktur yang kompleks adalah dengan pendekatan Finite Element Method. Akan tetapi dalam simulasi Finite Element Method diperlukan data-data yang akurat supaya hasil yang didapatkan sesuai dengan yang diinginkan. Pendekatan dengan simulasi Finite Element Method sering digunakan untuk validasi sebuah experimental (*Arifianto, 2015*)

Pendekatan metode elemen hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (node). Dalam proses penentuan titik simpul yang disebut dengan pendeskritan (discretization), suatu sistem dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara. (*Akbar dan Santoso 2012*).

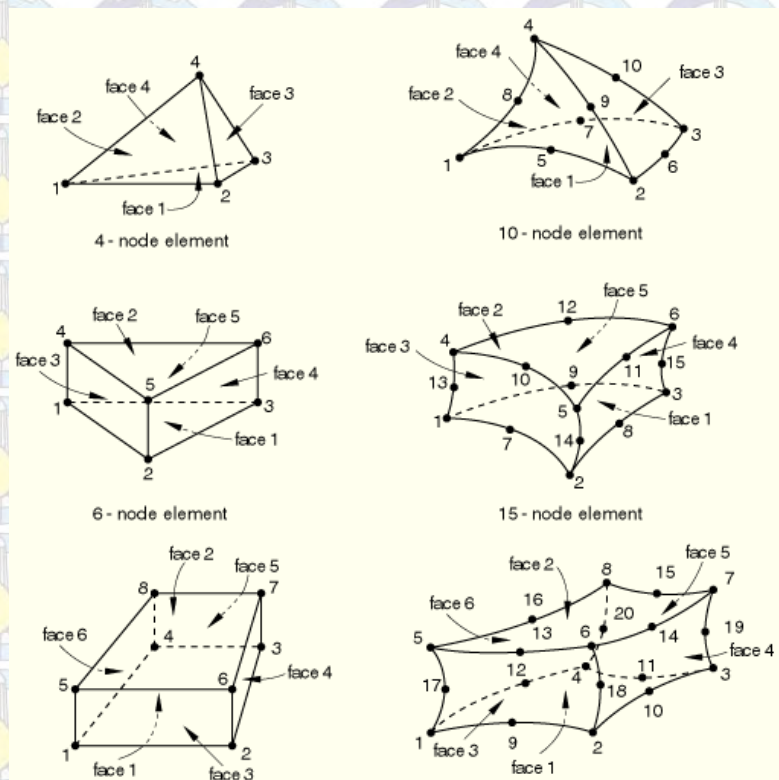
Bagian-bagian kecil tersebut berupa node yang merupakan bagian dari element. Element dalam FEM mempunyai peranan penting dalam analisa suatu struktur. Untuk solid ada dua tipe dasar element yaitu hex (kotak) atau tetra (prisma). Untuk memodelkan sambungan las, pemodelan las dengan tipe las yang dimaksud perlu dimodelkan supaya mendapatkan hasil yang lebih akurat. Pemodelan las untuk tipe element kotak, C3D20R sering digunakan karena bentuk element yang kotak sehingga mempermudah analisa pada titik-titik tersebut, disamping itu tipe kotak dapat meminimalisir kesalahan-kesalahan yang dilakukan oleh program. (Arifianto, 2015)

FEM juga dapat memprediksi mekanisme retak pada element, salah satu caranya dengan menggunakan fasilitas XFEM (Extended Finite Element Method). Dalam XFEM kita bisa menganalisa beberapa tipe crack seperti *crack growth*, *cracking propagation*. Parameter-parameter tambahan digunakan untuk menunjang analisa mekanisme retak seperti batas maximum tegangan normal (max.principle stress), batas ultimate, *critical energy release*. Ada salah satu hal yang sangat penting dalam simulasi FEM yaitu konsistensi units. Tidak seperti program analisa lainnya, FEM tidak mempunyai standard baku satuan. Tabel 2.3 adalah salah satu standard baku yang digunakan oleh program FEM. (Abaqus, 2004)

Tabel 2.3 Konsistensi Units

Quantity	SI	SI(mm)
Length	m	mm
Force	N	N
Time	s	s
Stress	Pa(N/m ²)	MPa (N/mm ²)
Young's modulus	Pa(N/m ²)	MPa (N/mm ²)

Sumber :Abaqus, 2004



Gambar 2.17 Basic Element pada FEM (Abaqus, 2004)

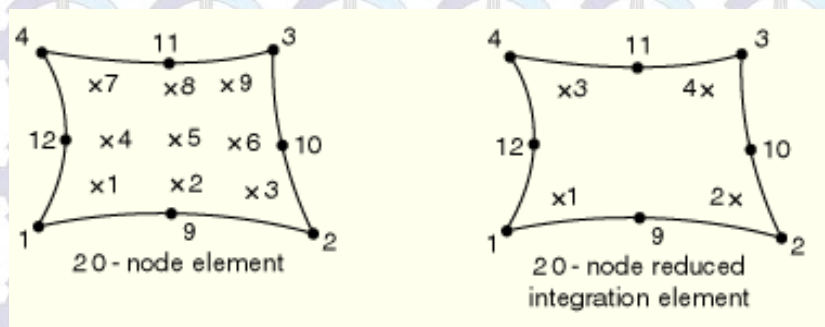
Dalam suatu analisa FEM, satu hal yang membutuhkan *effort* lebih yaitu bagaimana melakukan *meshing*. Meshing yang baik tidak menimbulkan *convergence* pada waktu analisa. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal dengan melakukan *try and error* diperlukan terlebih jika struktur yang kita analisa begitu kompleks. Gambar 2.17 adalah tipe-tipe meshing yang digunakan dalam simulasi model dengan menggunakan FEM.

2.13 Mesh C3D20R dan C3D4

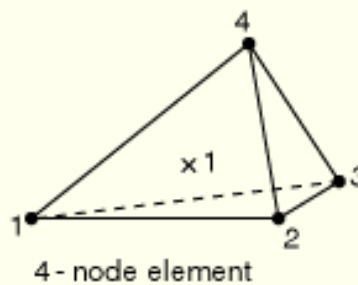
Tipe mesh C3D20R atau disebut dengan (20-node quadratic brick, reduced integration) adalah tipe mesh bentuk kotak (*brick*) yang paling banyak digunakan dalam pemodelan. 20 titik pada element menunjukkan bahwa tipe ini mempunyai nilai akurasi yang tinggi karena analisisnya menggunakan orde-dua (quadratic). Dengan menggunakan reduction integration, tipe ini bisa memaksimalkan analisa dengan mengurangi (*reduce*) formula. Akan tetapi model

ini membutuhkan waktu yang lama untuk sebuah pemodelan yang kompleks. Gambar 2.18 adalah model element tipe C3D20R.

Tipe mesh C3D4 atau disebut dengan (4-node linear tetrahedron) adalah tipe mesh yang berbentuk *tetra*. 4 titik dengan 1 integration element tipe mesh C3D4 ini mempunyai kelebihan mengurangi konvergensi antar element, sehingga cocok digunakan untuk element yang kompleks sesuai dengan Gambar 2.19. Dengan sistem analisa linear (orde-1) penyelesaian model pada FEM tidak membutuhkan waktu yang lama.



Gambar 2.18 Mesh C3D20R (Abaqus, 2004)

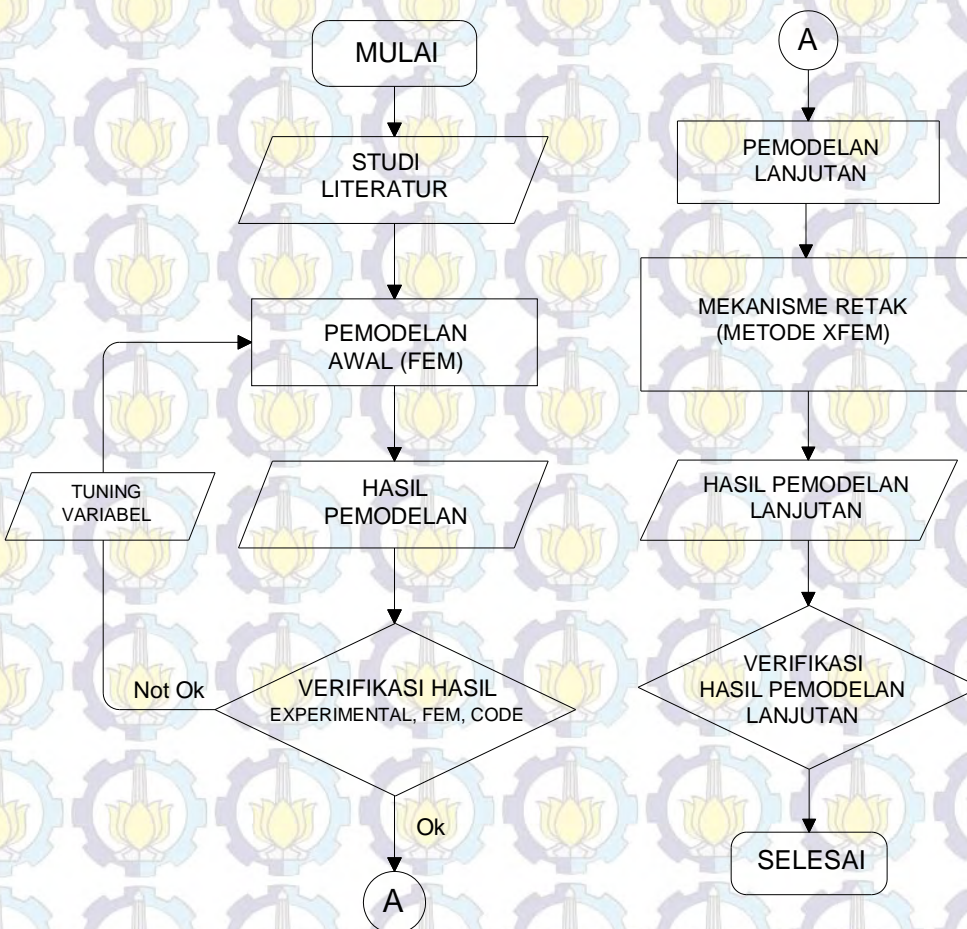


Gambar 2.19 Mesh C3D4 (Abaqus, 2004)

BAB 3 METHODOLOGI

3.1 Flowchart Methodologi Penelitian

Untuk mencapai tujuan yang diinginkan maka diperlukan langkah – langkah dalam menyelesaikan masalah yang telah dirumuskan dalam Bab 1 dan berikut akan ditampilkan diagram alir untuk menyelesaikan masalah tersebut.



Gambar 3.1 Flow-chart Metodologi

3.2 Studi Literatur

Tahap awal studi literature adalah mencari jurnal dan hasil experimental untuk dilakukan verifikasi ulang. Jurnal dan experimental dan verifikasi hasil penelitian mengacu pada *Hysteristic behavior of tubular joints under cyclic loading* (Wang dan Chen, 2006). Selain jurnal diatas, jurnal tentang simulasi berbasis Finite Element Method dengan permasalahan yang sama juga sangat penting. Ini erat kaitannya dengan bagaimana mengolah data dari pemodelan FEM.

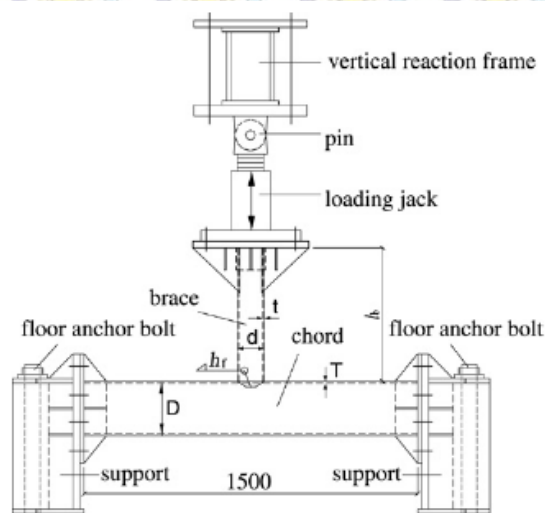
3.3 Pemodelan Awal

3.3.1 Konfigurasi Spesimen yang digunakan

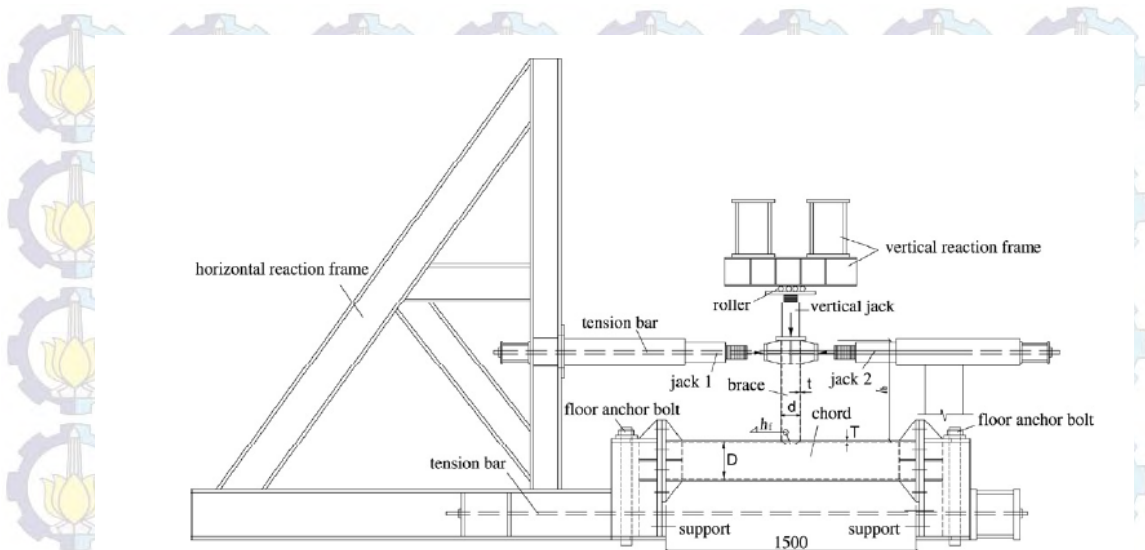
Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada jurnal *Hysteristic behavior of tubular joints under cyclic loading* (Wang dan Chen, 2006).

Skematik sambungan pipa baja T yang akan diuji dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan 3.3. Sedangkan untuk karakteristik material benda uji dapat dilihat pada Table 3.1 dan 3.2. Tipikal sambungan T pada pipa benda uji adalah menyambung jadi satu kesatuan antara chord dan brace dengan menggunakan sambungan las.

Pemodelan awal ini dilakukan dengan menggunakan program berbasis *Finite Element Method*.



Gambar 3.2 Pemodelan Sambungan Las T Joint pada Pipa dengan Axial Loading (Wang dan Chen, 2006).



Gambar 3.3 Pemodelan Sambungan Las T Joint pada Pipa dengan In-Plane Bending Loading (Wang dan Chen, 2006).

Tabel 3.1 Material Spesimen yang digunakan untuk penelitian

Spesimen No.	D x T mm	d x t mm	lb mm	hf	β	γ	τ
A	245 x 8	121 x 6	600	12	0,49	15,3	0,75
B	245 x 8	121 x 6	600	12	0,49	15,3	0,75

Dimana D = Outer diameter Chord, T = ketebalan Chord, d = outer diameter brace, t = ketebalan brace

Tabel 3.2 Material Grade untuk spesimen yang digunakan pada penelitian

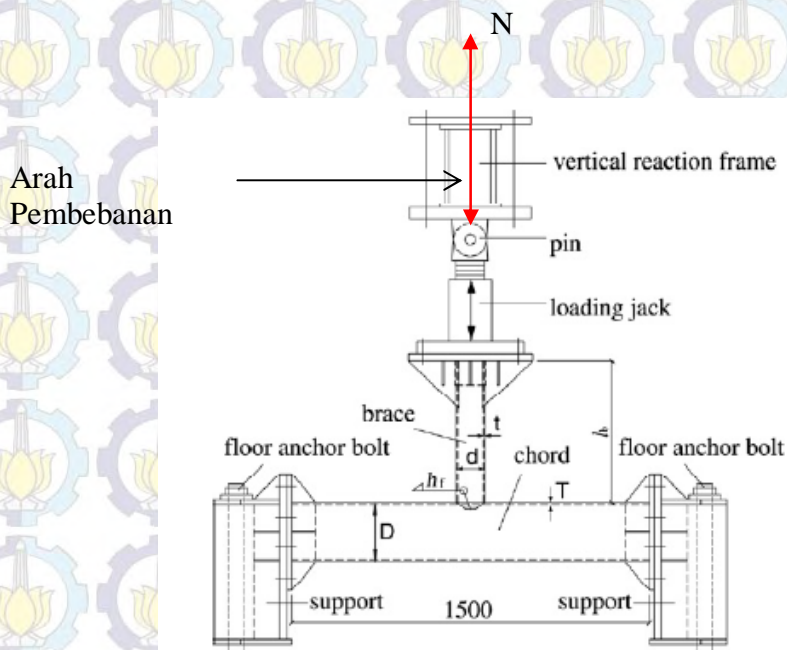
Section Size	Coupon Test			Pemodelan				
	f_y Mpa	f_u Mpa	Elongation (%)	f_y Pa (N/m ²)	f_u Pa (N/m ²)	E Pa (N/m ²)	E_t Pa (N/m ²)	ν
121 x 6	345	485	26	3,5E+08	4,9E+08	2,0E+11	4,0E+09	0,3
245 x 8	398	564	28	4,0E+08	5,6E+08	2,0E+11	4,0E+09	0,3

3.3.2 Arah Pembebanan Axial Cyclic Loading

Ada dua tipe pembebanan yang akan digunakan untuk penelitian yaitu cyclic axial loading dan in-plane cyclic loading. Spesimen A menggunakan pembebanan tipe cyclic axial loading, sedangkan specimen B menggunakan pembebanan tipe cyclic in-plane loading. Bentuk pembebanan seperti arah pembebanan dan beban yang digunakan menentukan dalam pemodelan ulang di

program FEM. Pemodelan pembebanan dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5.

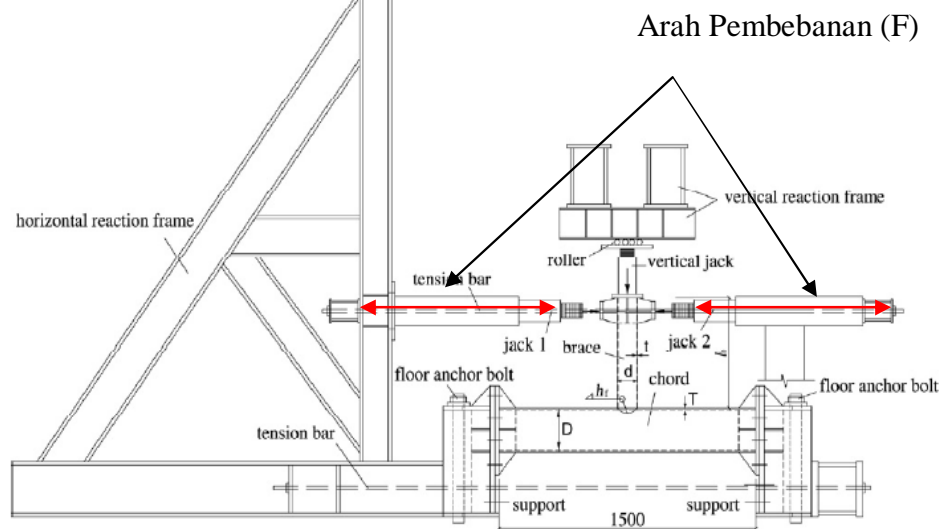
Arah pembebanan yang digunakan dalam pemodelan specimen A adalah beban cyclic sejajar dengan batang diagonal (brace), sesuai dengan Gambar 3.4. Batang utama (chord) dikekang didua sisinya dengan panjang 1500 mm, sedangkan batang diagonal brace dikekang salah satu ujungnya, ujung yang lain disambung jadi satu dengan menggunakan sambungan las.



Gambar 3.4 Arah Pembebanan Spesimen A

3.3.3 Arah Pembebanan In-Plane Bending Cyclic Loading

Arah pembebanan yang digunakan dalam pemodelan specimen B adalah beban cyclic tegak lurus dengan batang diagonal (brace), sesuai dengan Gambar 3.5. Batang utama (chord) dikekang didua sisinya dengan panjang 1500 mm, sedangkan batang diagonal brace dikekang salah satu ujungnya dengan tipe rol (bergerak arah horizontal saja), ujung yang lain disambung jadi satu dengan menggunakan sambungan las.



Gambar 3.5 Arah pembebanan specimen B

3.3.4 Konfigurasi dan Besar pembebanan yang digunakan

Tabel 3.3 adalah konfigurasi pembebanan yang digunakan dalam spesimen A dan B. Jenis beban yang digunakan adalah beban defleksi.

Tabel 3.3 Beban displacement yang digunakan untuk specimen A dan B

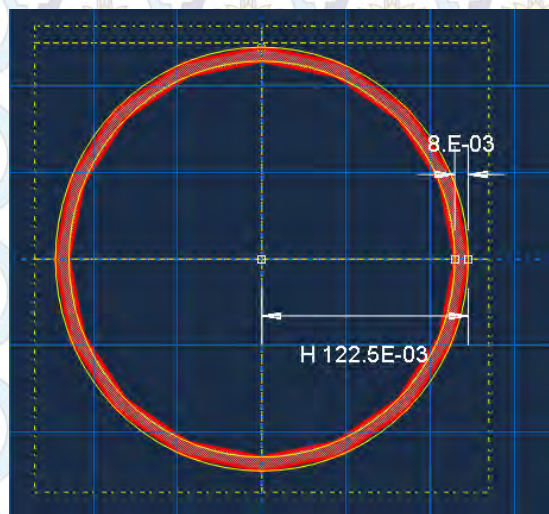
No. of Cycles	Spesimen Tipe 1		Spesimen Tipe 2		
	A δ_v (mm)	B δ_H (mm)	A		B δ_H (mm)
	Tarik		Tarik	Tekan	
1	1	± 6	1	2	± 6
1	2	$\pm 10,5$	2	3,6	$\pm 10,5$
3	6,1	$\pm 13,5$	6,1	8,1	$\pm 13,5$
3	8,1	± 30	8,1	10,5	± 30
3	9,5	$\pm 49,5$	9,5	12,6	$\pm 49,5$
3	10,2	-	10,2	14,3	-

3.3.5 Pemodelan dalam Finite Element Method (FEM)

Pada dasarnya pemodelan spesimen baik itu spesimen A dan B dalam program berbasis Finite Element Method meliputi *Input geometri (Part)*, *Material Properties*, *Assembly Parts*, *Boundary Conditions*, *Meshing Parts* dan *Element Types*, *Loading* dan *Output*.

a *Input Geometri*

Dalam awal pemodelan *input geometri*, konsistensi unit diperlukan dalam pemodelan spesimen di FEM. Dalam FEM tidak ada standard baku satuan, standard satuan dalam FEM dapat dilihat pada Tabel 2.3. Dalam pemodelan kali ini peneliti menggunakan standar satuan dalam SI (m). Pada Gambar 3.6 adalah dimensi pipa *chord* pada *input geometri* dalam satuan SI (m).



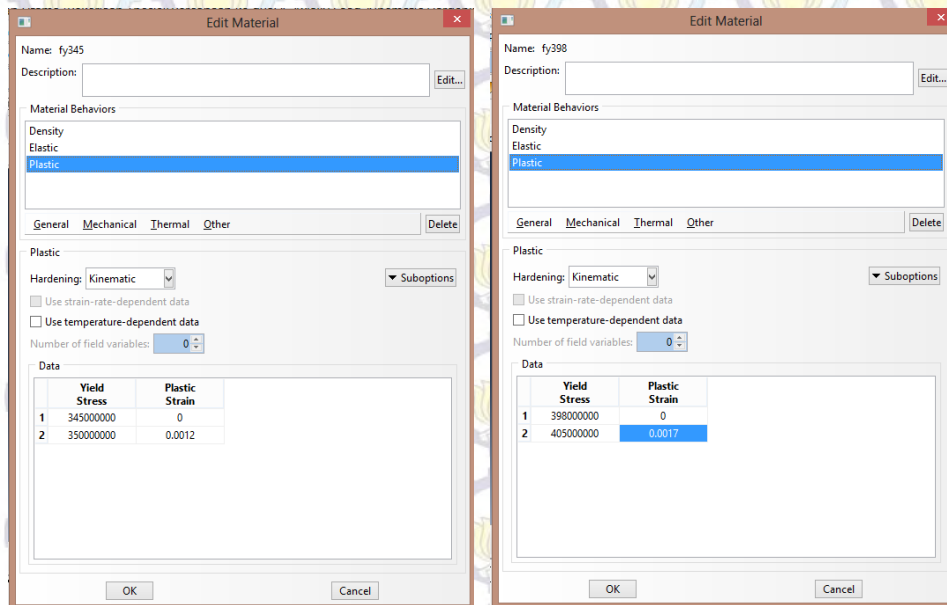
Gambar 3.6 Input Geometri Pipa 245x8 (*Chord*)

Tipe 3D deformable digunakan untuk mempresentasikan spesimen. Ada dua tipe *part* dalam pemodelan spesimen yaitu *Part Pipe Chord* (245x8) dan *Part Pipe Brace* (121x6). Kedua tipe *parts* memiliki panjang yang berbeda-beda. Untuk *chord* memiliki panjang 1.5 m dan untuk *brace* memiliki panjang 0.6m.

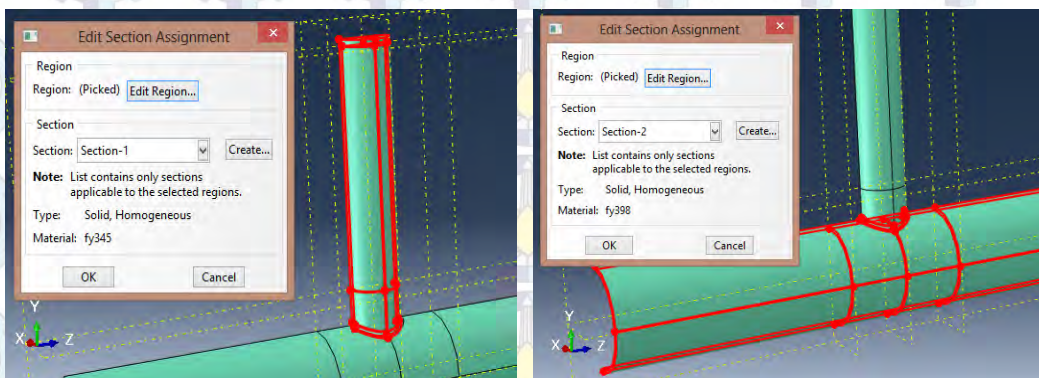
b *Material Properties*

Material properties mempunyai peranan yang penting dalam analisa di Finite Element Method. Perilaku dari spesimen ditentukan oleh *material properties*-nya. Dalam jurnal yang diteliti, tidak dijelaskan secara detail *material properties* spesimen. Data-data yang didapatkan dijelaskan pada Tabel 3.2. Mengingat data-data yang tidak lengkap dan pola pembebanan

yang diberikan pada spesimen adalah beban cyclic, maka peneliti menggunakan tipe material “*Bilinear Kinematic Hardening*”. Tipe ini disarankan untuk penyederhanaan akibat beban cyclic sesuai dengan petunjuk dari program Finite Element Method. Pada Gambar 3.7 dijelaskan ada 2 section material, section 1 adalah untuk material dengan mutu 345 Mpa, sedangkan untuk section 2 untuk material dengan mutu 398 Mpa. Section 1 digunakan untuk pipa brace dan Section 2 digunakan untuk pipa chord, sesuai dengan Gambar 3.8



Gambar 3.7 *Plasticity Material* dalam FEM

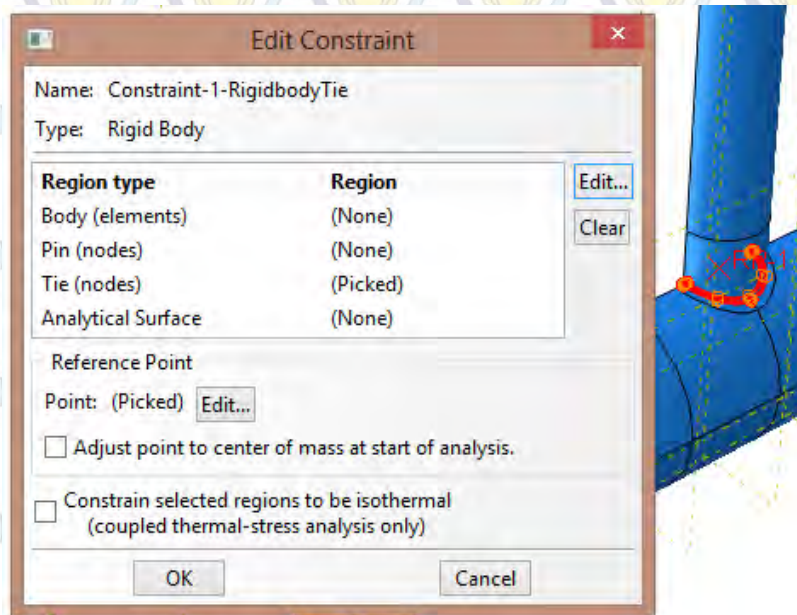


Gambar 3.8 *Input Material* dalam FEM

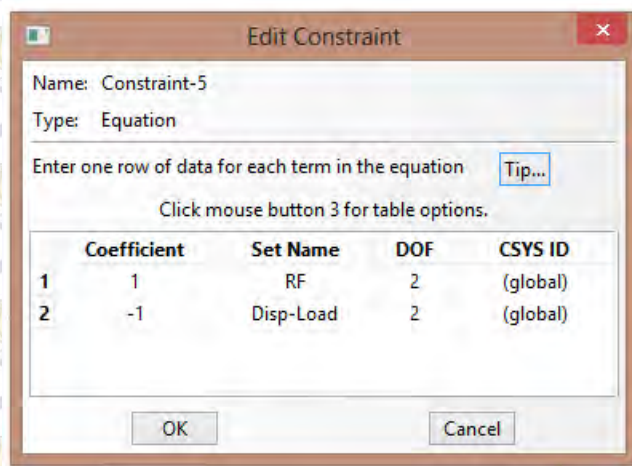
c *Assembly Parts*

Assembly Parts digunakan untuk menggabungkan dua material yang mempunyai karakteristik yang berbeda, seperti ukuran dimensi, material, panjang dan spesifikasi lainnya. *Assembly parts* bisa menggunakan fitur *Constraint*. Ada beberapa tipe constraint dalam FEM salah satunya yang digunakan dalam pemodelan kali ini adalah *TIE*, *Rigid Body*, *Constraint Equation*. Pemodelan yang menggunakan fasilitas tersebut adalah Spesimen A dan B Tipe 1 (yang akan dijelaskan pada Bab. 4)

TIE ataupun *Rigid Body Tie* mempunyai karakteristik yang sama. Keduanya mempunyai perilaku yang sama yaitu sebuah rigid point, tidak ada rotasi ataupun deformasi, perilaku ini hampir sama dengan perilaku sambungan las sesuai dengan Gambar 3.9. *Constraint Equation* adalah satu cara untuk menampilkan hasil reaksi dari pembeban yang digunakan selain menggunakan hasil reaksi dari *Boundary Condition*. *Constraint Equation* pada simulasi FEM dapat dilihat pada Gambar 3.10



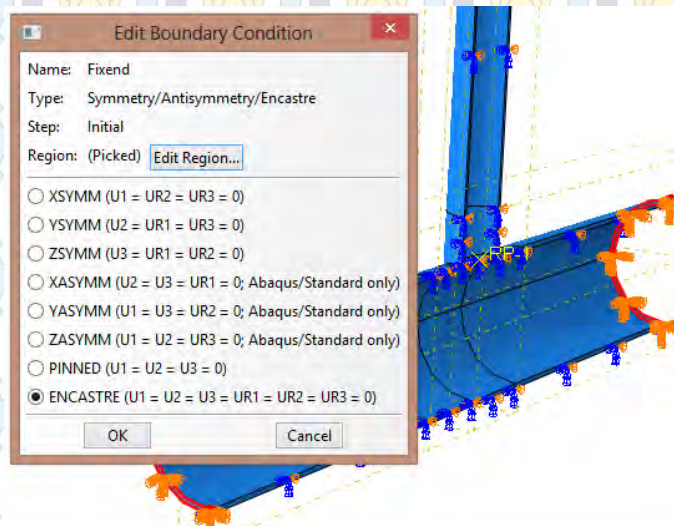
Gambar 3.9 *Constraint Rigid Body Tie* dalam FEM



Gambar 3.10 *Constraint Equations* dalam FEM

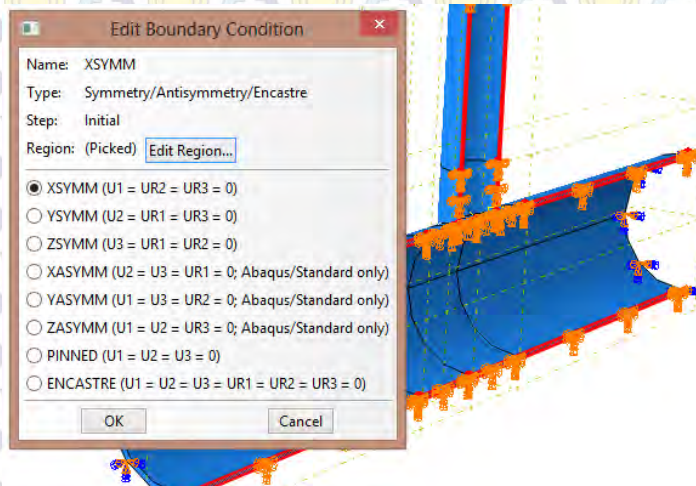
d **Boundary Conditions**

Boundary Conditions atau perletakan digunakan untuk menstabilkan analisa suatu struktur. Ada beberapa tipe BC dalam pemodelan FEM. Dalam pemodelan kali ini peneliti menggunakan perletakan terjepit penuh pada kedua sisi pipa chord. Pemodelan terjepit penuh untuk 3D model menggunakan tipe BC “Encastre” sesuai dengan Gambar 3.11.



Gambar 3.11 BC “Encastre” dalam FEM

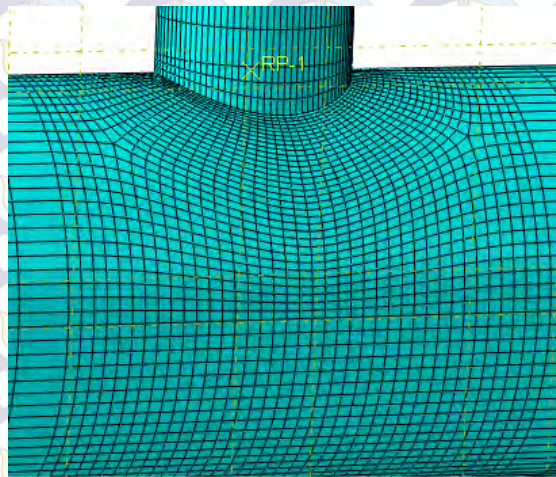
Selain tipe BC “Encastre” fitur lain dalam pemodelan kali ini adalah BC “XSYMM” yaitu Simetri Plan dalam arah X sesuai dengan Gambar 3.12. Ini digunakan apabila element atau spesimen mempunyai dimensi yang sama baik arah X, Y dan Z. Fitur ini sangat berguna untuk meningkatkan efisiensi waktu selama analisa berjalan.



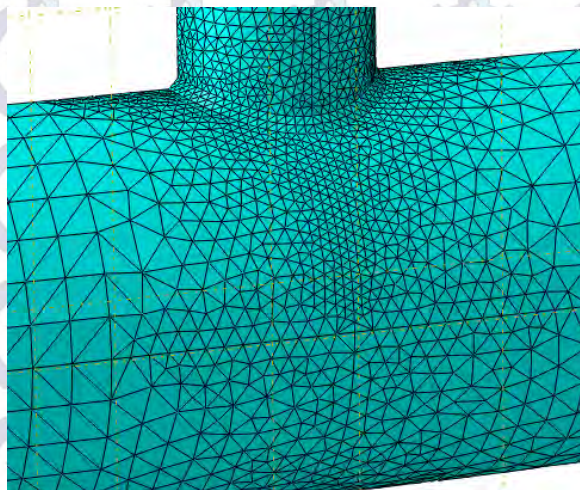
Gambar 3.12 BC “XSYMM” dalam FEM

e *Meshing Parts dan Element Parts*

Langkah selanjutnya adalah meshing parts. Dalam step ini diperlukan *effort* lebih, karena meshing mempunyai pengaruh yang significant dalam hasil yang dikeluarkan oleh FEM. Finer meshing disarankan digunakan untuk beberapa titik yang akan ditinjau. Tipe meshing yang digunakan dalam pemodelan ada dua. Spesimen tipe 1 menggunakan tipe C3D20R (20-node quadratic brick, dengan reduced integration) sedangkan tipe 2 menggunakan C3D4(4-node linear tetrahedron). Finer meshing tiap tipe-tipe element mesh dapat dilihat pada Gambar 3.13 dan Gambar 3.14.



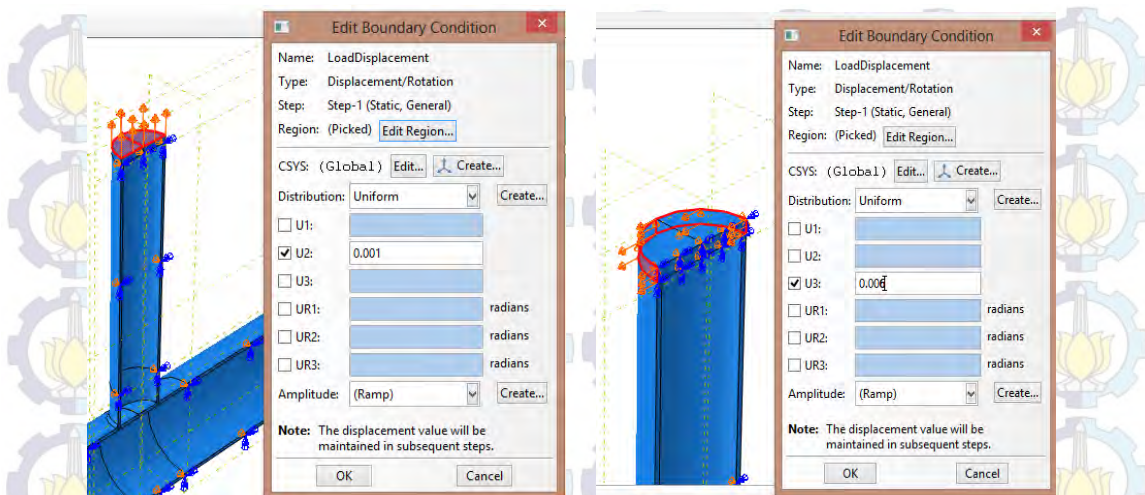
Gambar 3.13 *Finer Meshing* Spesimen Tipe 1 dalam FEM (C3D20R)



Gambar 3.14 *Finer Meshing* Spesimen Tipe 2 dalam FEM (C3D4)

f Loading

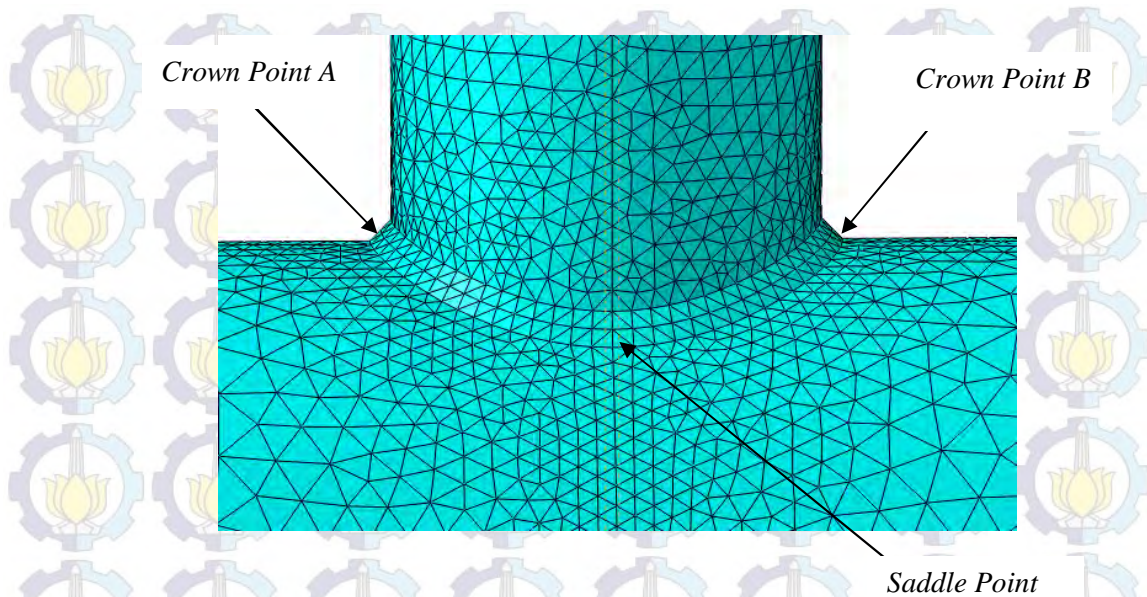
Baik Spesimen Tipe 1 dan 2, pola pembebanan yang digunakan sama, yaitu sesuai dengan Tabel 3.3. Jenis pembebanan yang digunakan adalah beban defleksi, sehingga defleksi sebagai control terhadap gaya yang dihasilkan. Beban defleksi pada FEM termasuk pada Boundary Condition dengan merubah nilai defleksi sesuai dengan nilai beban yang dimasukkan.



Gambar 3.15Beban Defleksi pada Spesimen A dan B

h Output

Banyak variable output yang dikeluarkan dalam FEM. Dalam kasus ini variable yang digunakan dalam acuan adalah *Reaction Force (RF)*, *Bending Moment (M)* *Deformation (U)* dan *Rotation (UR)*. Keempat variable tersebut akan digunakan dalam memodelkan kurva perilaku sambungan akibat beban cyclic (*Hysteristic Curve*). Lokasi (point) yang digunakan dalam acuan mencari keempat variable tersebut terdapat pada pertemuan antara pipa *chord* dan *brace*, meliputi *crown point* dan *saddle point*. Untuk defleksi menggunakan rata-rata dari nilai defleksi yang dihasilkan pada *crown point* dan *saddle point* sesuai dengan Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Point-point yang digunakan untuk Output

3.4 Verifikasi Pemodelan Awal

Model yang telah dibuat dengan komponen dan variabel yang telah ditentukan akan dibandingkan hasilnya dengan eksperimen dari jurnal yaitu berupa mode failure yang terjadi pada sambungan T dan kurva histeristik antara $P-\delta$ dan $M-\theta$. Jika hasil dari model masih belum memenuhi harapan dengan asumsi yang ada maka akan dilakukan tuning variabel terhadap model yang kita gunakan hingga tercapai hasil yang menyerupai eksperimen yang dilakukan oleh Wang (2006).

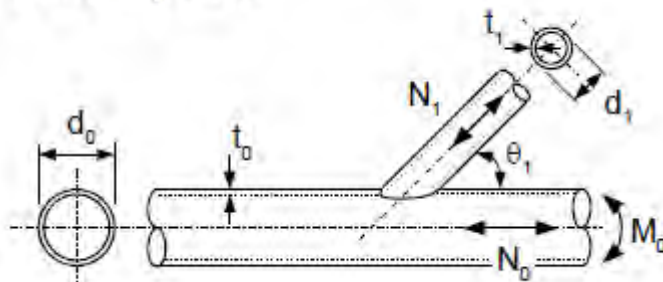
Mode failure yang terjadi dalam kasus ini (sambungan T) yaitu akibat beban cyclic axial loading dan in-plane bending adalah yang pertama *cracking* pada sambungan las akibat tarik, yang kedua kegagalan chord plastification akibat beban tekan dan ketiga kegagalan punching shear akibat geser. Untuk pembebanan axial cyclic loading kegagalan tipe pertama dan kedua mempunyai peranan yang penting, sedangkan untuk pembebanan tipe in-plane cyclic loading kegagalan kedua dan ketiga mempunyai peranan yang penting disusul dengan *cracking* pada sambungan.

Hasil akhir FEM perlu dilakukan validasi dengan mengacu pada standard-standard yang berlaku. Pada kasus ini, validasi menggunakan peraturan dari CIDECT Wardenier dkk, 2008) yang berjudul "*Design Guide For Circular*

Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading". Gambar 3.17 adalah tipe sambungan pipa baja berbentuk T atau Y Joint akibat beban *Axially Load*. Sedangkan Gambar 3.18 adalah tipe sambungan pipa baja berbentuk T, Y dan X joint akibat beban *In-Plane Bending Load*.

3.4.1 Axially Load Strength Connection on Tube

T and Y joints



Gambar 3.17 Axially Load pada Sambungan Pipa (Wardenier dkk, 2008)

$$N_{i,1} = Q_u Q_f \frac{f_{y0} t_o^2}{\sin \theta_i} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$N_{i,2} = 0,58 f_{y0} \pi d_i t_o \frac{k_a}{\sin \theta_i} \dots \dots \dots (3.2)$$

$$Q_u = 2,6(1 + 6,8\beta^2)\gamma^{0,15} \dots \dots \dots (3.3)$$

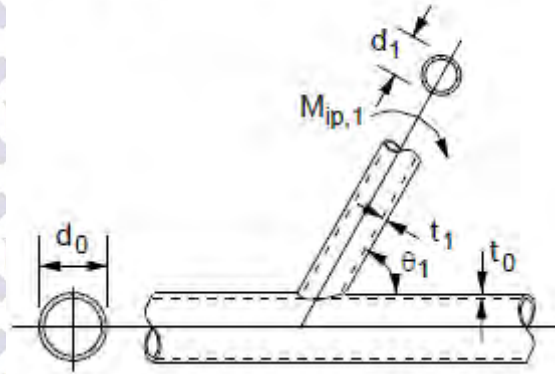
$$Q_f = (1 - |n|)^{c1} \dots \dots \dots (3.4)$$

$$n = \frac{N_o}{N_{pl,o}} + \frac{M_o}{M_{pl,o}} \dots \dots \dots (3.5)$$

$$k_a = \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin \theta_i} \dots \dots \dots (3.6)$$

3.4.2 In-Plane Bending Load Strength Connection on Tube

T, Y, X joints



Gambar 3.18 In-Plane Bending Load pada pipa (Wardenier dkk, 2008)

$$M_{i,1} = Q_u Q_f \frac{f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_i} d_1 \dots \dots \dots (3.7)$$

$$M_{i,2} = 0,58 f_{y0} d_1^2 t_0 \frac{k_b}{\sin \theta_i} \dots \dots \dots (3.8)$$

$$Q_u = 4,3 \beta \gamma^{0,5} \dots \dots \dots (3.9)$$

$$Q_f = (1 - |n|)^{c1} \dots \dots \dots (3.10)$$

$$n = \frac{N_o}{N_{pl,o}} + \frac{M_o}{M_{pl,o}} \dots \dots \dots (3.11)$$

$$k_b = \frac{1+3\sin \theta_i}{4\sin \theta_i} \dots \dots \dots (3.12)$$

- Dimana,
- d0 = Outer diameter chord (mm)
 - t0 = Tebal pipa chord (mm)
 - d1 = Outer diameter brace (mm)
 - t1 = Tebal pipa brace (mm)
 - β = Ratio antara d1 dan d0
 - γ = do/2to

$N_{i,1}$	= Joint resistance (chord plastification) (kN)
$N_{i,2}$	= Joint resistance (chord punching shear) (kN)
$M_{i,1}$	= Joint resistance (chord plastification) (kN-m)
$M_{i,2}$	= Joint resistance (chord punching shear) (kN-m)
Q_u	= Design strength akibat konfigurasi sambungan (kN)
Q_f	= Chord stress (Mpa)
C_1	= 0,45 s/d 0,25 β (untuk compression pada chord $n < 0$)
	= 0,20 (untuk tension pada chord $n \geq 0$)
k_a, k_b	= sambungan parameter pada brace fungsi θ

3.5 Desain Pemodelan Lanjutan

Setelah analisa pemodelan awal selesai dan sudah divalidasi dengan perhitungan manual yang mengacu pada peraturan, langkah selanjutnya adalah pemodelan lanjutan. Pemodelan lanjutan ini berfokus pada mekanisme retak pada sambungan dengan menggunakan program berbasis Finite Element Method. Langkah-langkah pemodelan lanjutan mengikuti langkah-langkah pemodelan awal dengan menambahkan parameter-parameter lain seperti maximum principle stress dan maximum defleksi yang terjadi.

Mekanisme crack pada sambungan menggunakan fitur XFEM (Extended Finite Element Method). Dimana pada fitur tersebut program akan memprediksi alur crack pada spesimen yang dimaksud.

Material tambahan yang digunakan dalam XFEM meliputi maximum *principle stress*, *maximum deflection* dan *critical release energy*.

BAB 4

PEMBAHASAN

4.1. Umum

Struktur pipa baja sudah sangat banyak digunakan dalam dunia konstruksi baja, mengingat struktur geometry pipa baja yang mempunyai material properties yang sama di dua sisi. Akan tetapi Gempa Northridge dan Gempa Kobe telah mengekspos kelemahan struktur baja terutama pada sambungan baja. Banyak penelitian yang mempelajari perilaku struktur pipa baja salah satunya seperti yang dilakukan oleh Mamaghani (2012) dalam jurnalnya yang berjudul “Cyclic Elastoplastic Large Displacement Analysis and Stability Evaluation of Steel Tubular Braces”. Akan tetapi tidak banyak studi tentang perilaku sambungan struktur pipa baja terutama sambungan las. Pada thesis kali ini, peneliti mencoba mereview ulang perilaku sambungan pipa baja “*T-Joint*” dari percobaan yang dilakukan oleh Wang dan Chen (2006) akibat beban cyclic dengan metode Finite Element Method. Beberapa percobaan digunakan untuk mendapatkan parameter-parameter yang sesuai dengan experimental. Parameter-parameter awal tersebut berupa data-data material, data-data beban, simulasi model dengan konfigurasi yang berbeda-beda. Selain itu peneliti juga mengkaji ulang sambungan dengan menambahkan parameter-parameter sambungan las seperti mekanisme retak pada FEM. Mekanisme keretakan pada simulasi FEM menggunakan XFEM (Extended Finite Element Method).

4.2. Pemodelan Awal

4.2.1 Konsistensi Satuan

Tidak seperti program analisa struktur lainnya, dalam pemodelan spesimen dengan program berbasis Finite Element Method, konsistensi satuan (units) sangat penting mengingat dalam program tersebut tidak ada units yang dipatenkan. Berikut adalah tipikal satuan (units) yang digunakan. Dalam penelitian ini satuan atau units yang digunakan mengacu pada system MKS, dimana satuan panjang (L) dalam m, massa (M) dalam kg, Gaya (F) dalam N, stress (σ) dalam Pa

(N/m²), Young modulus (E) dalam Pa (N/m²), berat jenis atau density dalam kg/m³, defleksi (δ) dalam m, sudut atau angle dalam radians, Moment dalam N-m.

Tabel 4.1 Tipikal satuan (units) yang digunakan. (Abaqus, 2004)

System:	MKS	mmNS	FPS	IPS
Length	m	mm	ft	in
Time	sec	sec	sec	sec
Mass	Kg	tonne	slug	lbf-sec ²
Force	N	N	lbf	lbf
Temperature	°C	°C	°F	°F
Area	m ²	mm ²	ft ²	in ²
Volume	m ³	mm ³	ft ³ (cu-ft)	in ³ (cu-in)
Velocity	m/sec	mm/sec	ft/sec	in/sec
Acceleration	m/sec ²	mm/sec ²	ft/sec ²	in/sec ²
Angle, rotation	rad	rad	rad	rad
Angular Velocity	rad/sec ²	rad/sec ²	rad/sec ²	rad/sec ²
Mass density	Kg/m ³	Tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf-sec ² /in ⁴
Moment, torque	N-m	N-mm	ft-lbf	in-lbf
Line load	N/m	N/mm	lbf/ft	lbf/in
Surface load	N/m ²	N/mm ²	lbf/ft ²	lbf/in ²
Stress, pressure	Pa	MPa		Psi
Youngs modulus	Pa	MPa		Psi
Thermal exp. coef.	/°C (/K)	/°C (/K)	/°F (/K)	/°F (/K)
Beam cross-section inertia I	m ⁴	mm ⁴	ft ⁴	in ⁴
Energy, Work, Heat	J	mJ	ft-lbf	in-lbf
Power, heat transfer rate \dot{Q}	W	mW	ft-lbf/sec	in-lbf/sec
Temperature gradient	°C/m	°C/mm	°F/ft	°F/in
Heat flux	W/m ²	mW/mm ²	lbf/ft-sec	lbf/in-sec
Therm. conductivity	W/m-°C	mW/mm-°C	lbf/sec-°F	lbf/sec-°F
Specific heat C_p	J/Kg-°C	mJ/tonne-°C	ft-lbf/slug-°F	in ² /sec ² -°F

4.2.2 Spesimen Penelitian

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wang dan Chen 2006. Keseluruhan spesimen adalah struktur baja Pipa yang dipasang tegak lurus berbentuk “T”, dimana yang bagian bawah disebut “Chord” sedangkan yang tegak lurus *chord* adalah *brace*. Spesimen ada dua tipe yaitu Spesimen A dan Spesimen B. Perbedaan notasi “A” dan “B” menunjukkan tipe beban yang bekerja. Tipe “A” spesimen diberi beban *axially cyclic*, sedangkan spesimen tipe “B” diberi beban “in plane bending”.

Dimensi pipa *chord* lebih besar daripada dimensi pipa *brace*. Panjang pipa *brace* bervariasi ada yang panjangnya 600mm dan 1000 mm. Panjang pipa *brace* (lb) diukur dari permukaan atas pipa *chord*. Panjang pipa *chord* 1500mm

untuk semua jenis spesimen. Dimensi dan karakteristik lainnya dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Dimensi Spesimen Pipa “*T-Joint*”

Spesimen No.	D x T mm	d x t mm	lb mm	hf	β	γ	τ
A	245 x 8	121 x 6	600	12	0,49	15,3	0,75
B	245 x 8	121 x 6	600	12	0,49	15,3	0,75

Spesimen No.	hf	β	γ	τ
A	12	0,49	15,3	0,75
B	12	0,49	15,3	0,75

Dimana

D = diameter pipa *chord*

T = tebal pipa *chord*

d = diameter pipa *brace*

t = tebal pipa *brace*

lb = panjang pipa *brace* diukur dari permukaan atas pipa *chord*

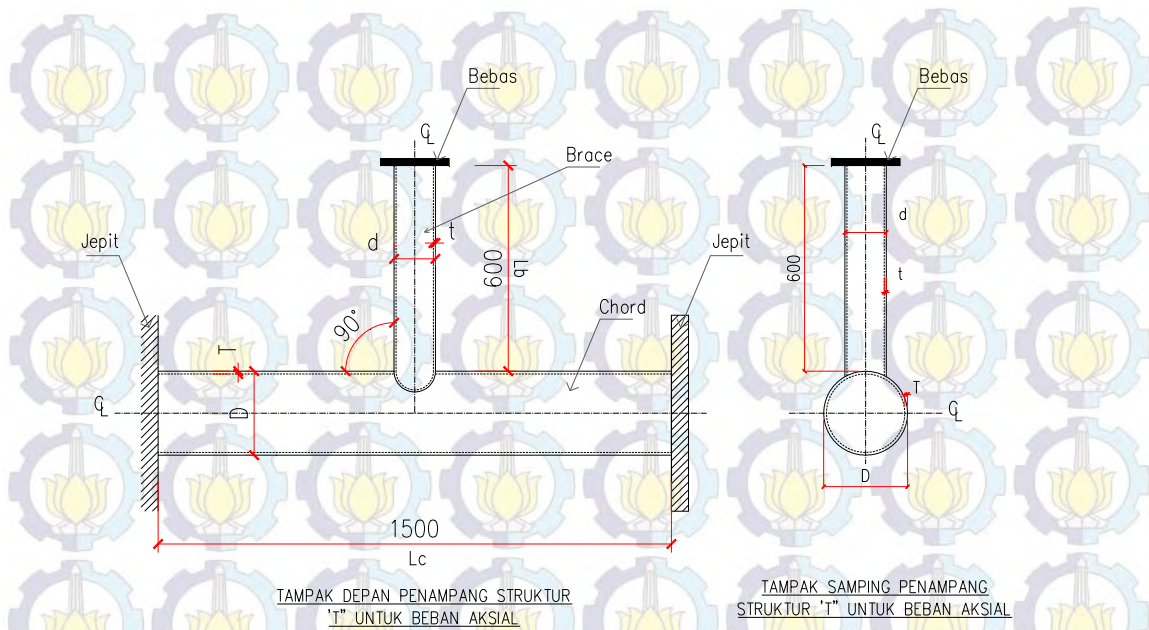
β = ratio antara d/D

γ = ratio D/(2T)

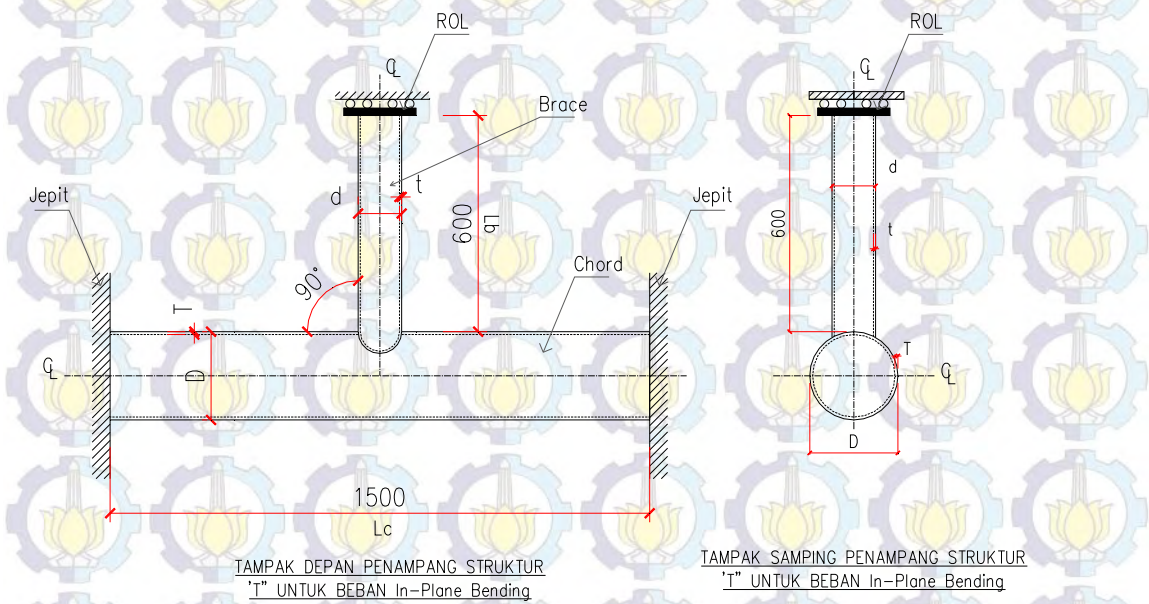
τ = ratio antara t/T

Pemodelan spesimen A dan B menggunakan program berbasis *Finite Element Method* dengan data-data geometri pipa seperti pada Tabel 4.2.

Gambaran umum tentang spesimen yang akan diteliti seperti pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.

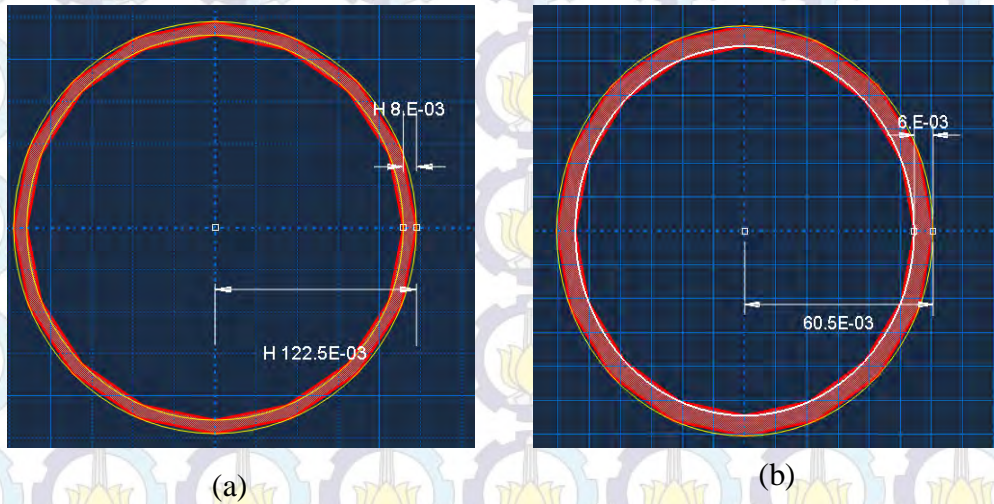


Gambar 4.1 Tampak Penampang Global Struktur Pipa "T-Joint" (Beban Aksial)



Gambar 4.2 Tampak Penampang Global Struktur Pipa "T-Joint" (Beban In-Plane Bending)

4.2.3 Pemodelan Spesimen pada Program



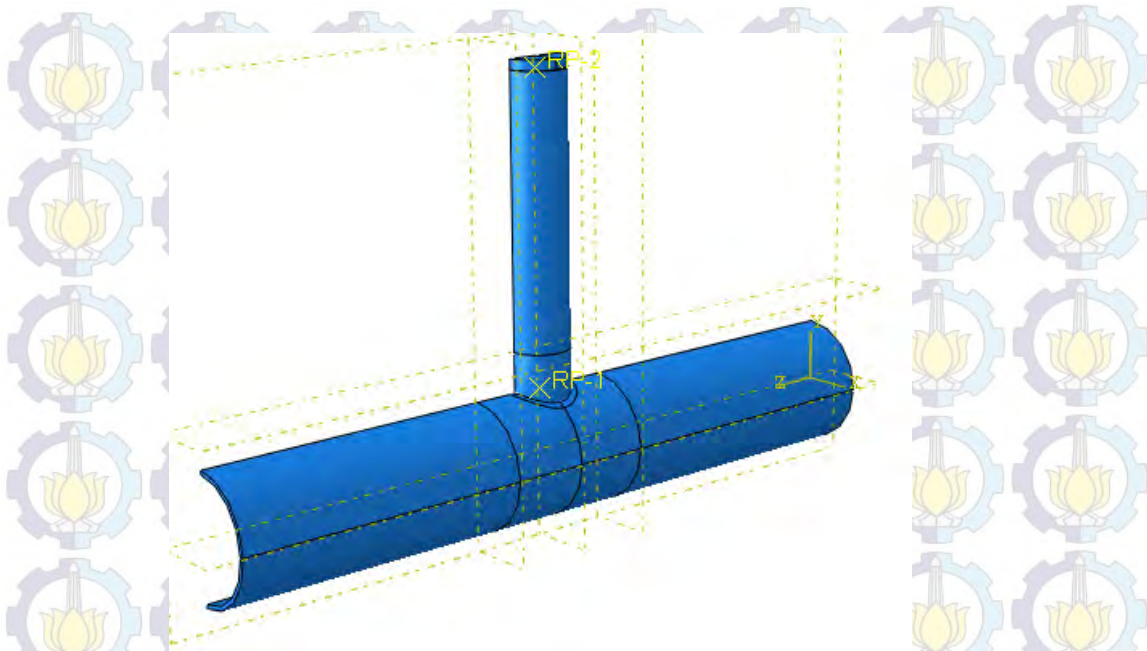
Gambar 4.3 Cross Section Penampang Pipa baja dalam program

(a) Chord (b) Brace

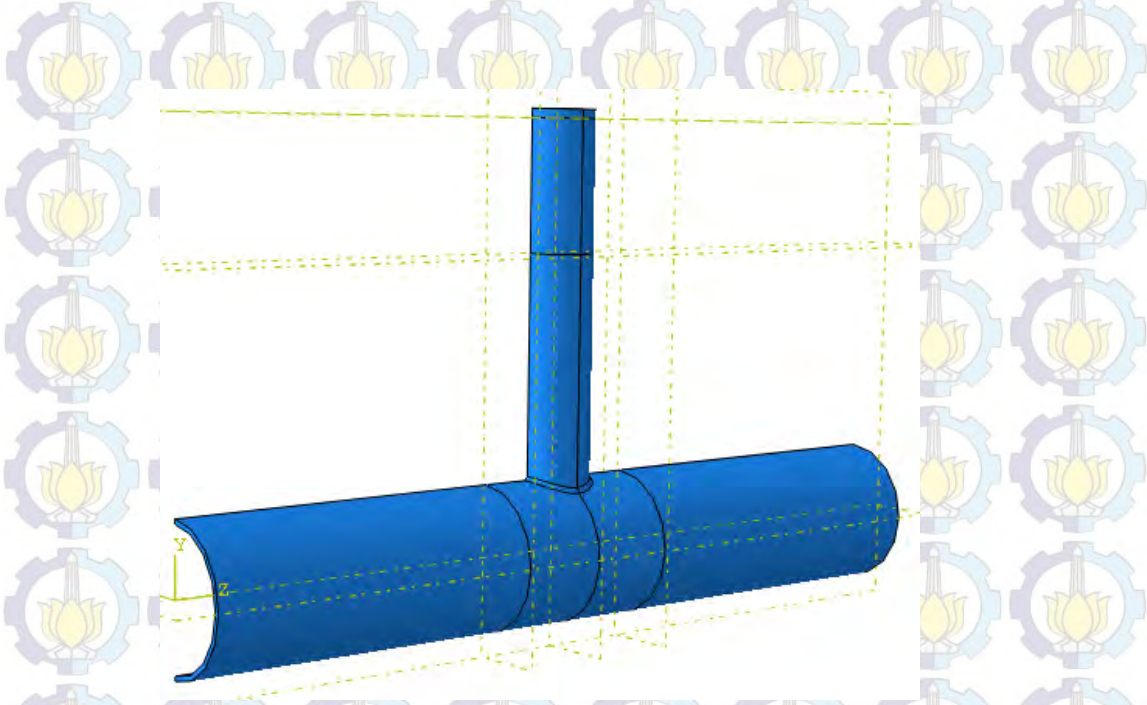
Pemodelan direncanakan menggunakan 2 Model yaitu Model tipe 1 dan tipe 2. Perbedaan model tipe 1 dan 2 pada aspek geometri terlihat pada tipe meshing yang dipakai dan pemodelan sambungan las. Tabel 4.3 dijelaskan lebih detail perbedaan antara dua model Tipe 1 dan 2. Untuk Material yang digunakan model tipe 1 menggunakan dua jenis material yang berbeda, sedangkan pada model tipe 2 menggunakan satu jenis material.

Tabel 4.3 Pemodelan Sambungan Pipa Baja *T-Joint* pada FEM

Pemodelan Type	Pemodelan FEM		
	Type Meshing	Weld	Spesimen No
PEMODELAN AWAL			
1	C3D20R (20-node quadatric brick, dengan reduced integration)	Tidak dimodelkan	A, B
2	C3D4 (4-node linear tetrahedron)	Dimodelkan dengan tebal 6mm	A, B
PEMODELAN LANJUT			
2	C3D4 (4-node linear tetrahedron)	Dimodelkan dengan tebal 6mm	A



Gambar 4.4 *Global View* Spesimen Pipa “T-Joint” dalam Pemodelan tipe 1



Gambar 4.5 *Global View* Spesimen Pipa “T-Joint” dalam Pemodelan tipe 2

Pada bagian atas brace dipasang *top plate* baik di pemodelan pada Gambar 4.4 dan pemodelan pada Gambar 4.5. Fungsi *top plate* ini untuk menyalurkan beban secara merata pada brace. *Top Plate* ini juga digunakan untuk spesimen tipe A dan B.

4.2.4 Data-data Material (Material Properties)

Material spesimen mempunyai peranan penting dalam analisa suatu struktur, jika data-data material tidak akurat, akan berpengaruh terhadap hasil yang tidak akurat juga. Dalam penelitian ini data-data material yang digunakan berdasarkan hasil coupon test sesuai dengan Tabel 4.4. Data-data material yang digunakan selain pada Tabel 4.4 adalah *Young Modulus*(E) 200000 Mpa, *poison ratio* (ν) 0.3, berat jenis baja 7850 kg/m², Tangent Modulus digunakan 2% E yaitu 4000 Mpa.

Tabel 4.4 Data-data material dari coupon test (Wang dan Chen, 2006)

Section Size	Coupon Test		
	fy Mpa	fu Mpa	Elongation (%)
121 x 6	345	485	26
245 x 8	398	564	28

Tabel 4.5 Data-data material yang digunakan dalam pemodelan

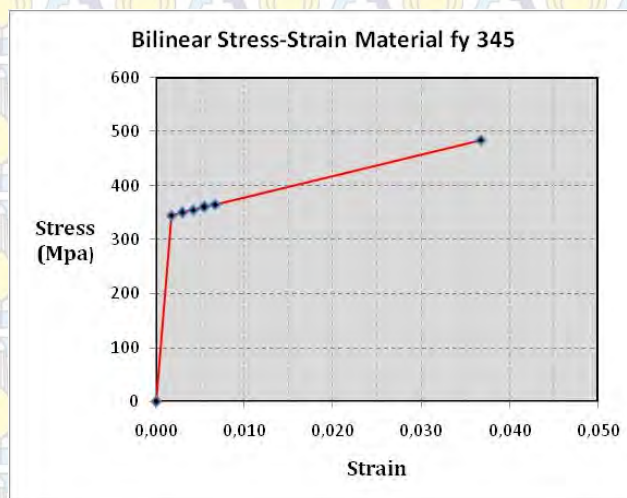
Section Size	Pemodelan				
	fy Pa (N/m ²)	fu Pa (N/m ²)	E Pa (N/m ²)	Et Pa (N/m ²)	ν
121 x 6	3,5E+08	4,9E+08	2,0E+11	4,0E+09	0,3
245 x 8	4,0E+08	5,6E+08	2,0E+11	4,0E+09	0,3

Model material Bilinear Kinematik Hardening digunakan dalam penelitian kali ini, dimana model stress dan strain berbentuk linear. Ini adalah satu model yang paling sederhana dalam pemodelan terutama akibat beban cyclic. Dari data-data Tabel 4.5 dapat dijabarkan dalam tabel diagram stress-strain sesuai dengan Tabel 4.6 dan Tabel 4.7. Gambar 4.6, 4.7, 4.8 dan 4.9 adalah pemodelan kurva material stress-strain dari Tabel 4.6 dan Tabel 4.7. Perhitungan stress-strain mengacu pada rumus dibawah ini.

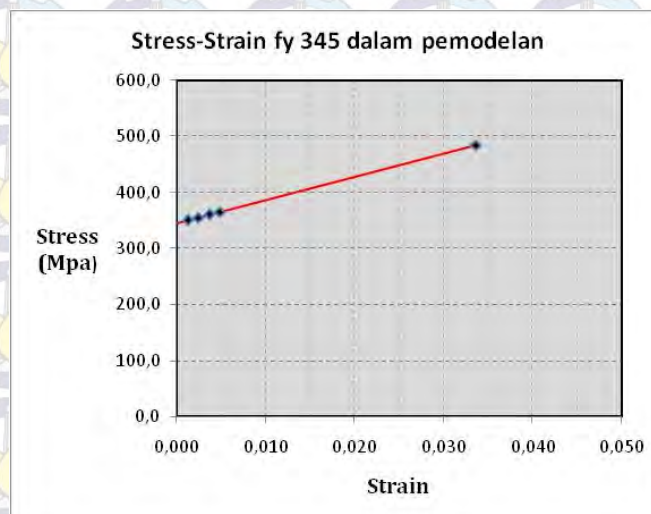
$$\sigma_i = ((\sigma_2 - \sigma_1) / E_t) + \epsilon \dots \dots \dots (4.1)$$

Tabel 4.6 Stress – Strain Test dan Stress-Strain Pemodelan mutu baja (fy) 345 Mpa

Stress-Strain Test		Stress-Strain Pemodelan	
Strain	Stress (Mpa)	Plastic Strain	Stress (Mpa)
0,000000	0		0,0
0,001724	345	0,0000	345,0
0,002971	350	0,0012	350,0
0,004216	355	0,0024	355,0
0,005460	360	0,0037	360,0
0,006702	365	0,0049	365,0
0,036067	485	0,0336	485,0



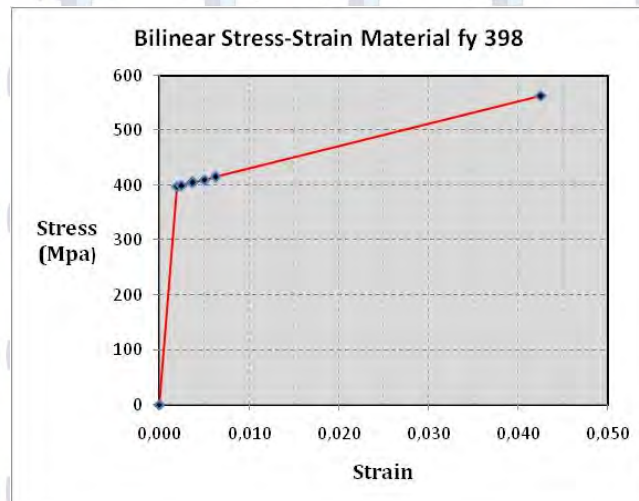
Gambar 4.6 Kurva hubungan Stress-Strain coupon test mutu baja (fy) 345 Mpa



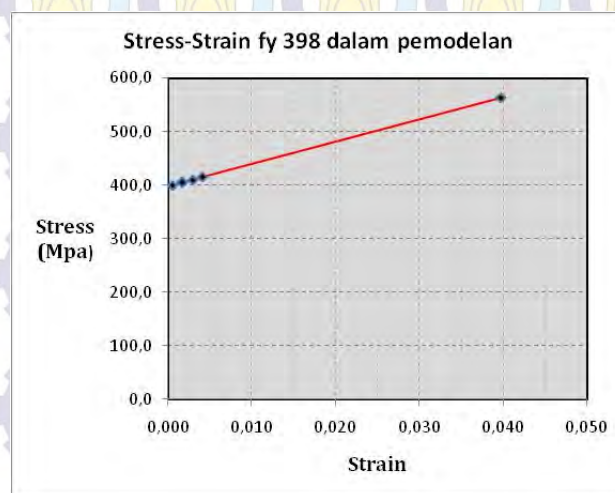
Gambar 4.7 Kurva hubungan Stress-Strain Pemodelan mutu baja (fy) 345 Mpa

Tabel 4.7 Stress – Strain Test dan Stress – Strain Pemodelan mutu baja (fy) 398 Mpa

Stress-Strain Test		Stress-Strain Pemodelan	
Strain	Stress (Mpa)	Plastic Strain	Stress (Mpa)
0,000000	0		0,0
0,001988	398	0,0000	398,0
0,002487	400	0,0005	400,0
0,003733	405	0,0017	405,0
0,004978	410	0,0029	410,0
0,006221	415	0,0041	415,0
0,042571	564	0,0398	564,0



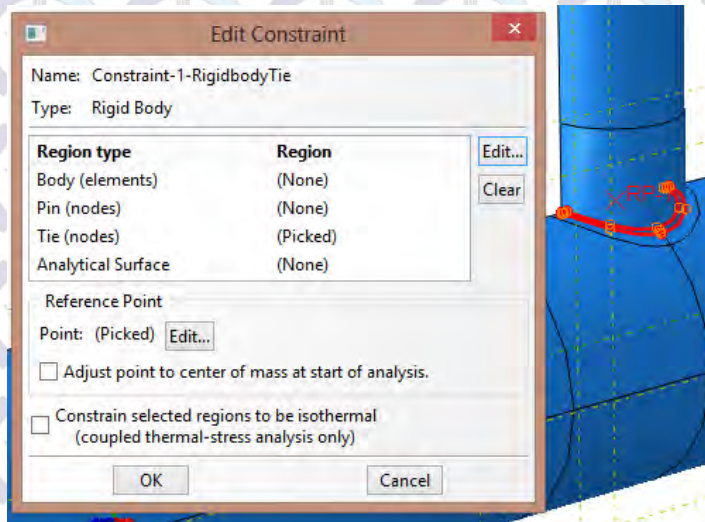
Gambar 4.8 Kurva hubungan Stress-Strain coupon test mutu baja (fy) 398 Mpa



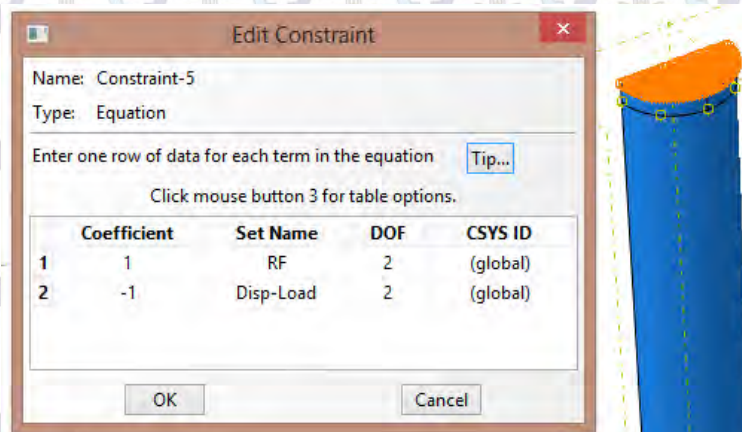
Gambar 4.9 Kurva hubungan Stress-Strain Pemodelan mutu baja (fy) 398 Mpa

4.2.5 Constraint dan Boundary Conditions

Salah satu cara untuk menggabungkan dua part atau dua material yang berbeda untuk menjadi satu kesatuan struktur perlu dilakukan metode constraint. Constraint tergantung dari pemodelan sambungan apakah disambung dengan las, baut atau hanya sebatas contact saja. Mengacu pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 dua material yang berbeda yaitu brace dan chord disambung dengan menggunakan las. Pemodelan las pada pemodelan di FEM bisa menggunakan tipe constraint "RIGID BODY" tipe "TIE" sesuai dengan Gambar 4.10. Constraint "RIGID BODY" tipe "TIE" hanya digunakan untuk Pemodelan Tipe 1.

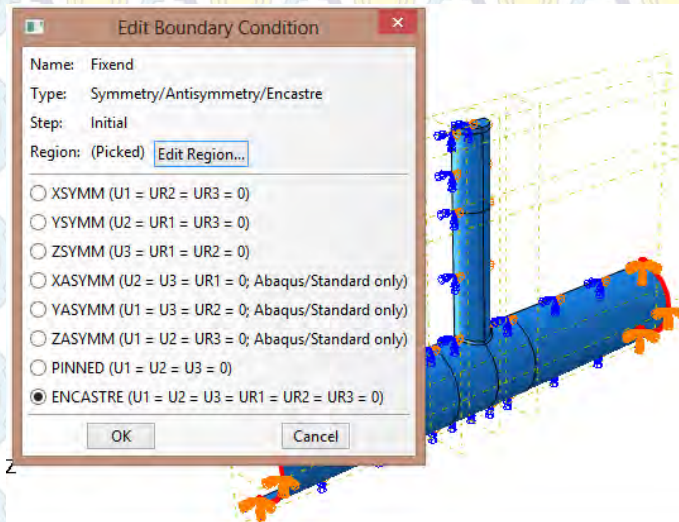


Gambar 4.10 Constraint pada sambungan pipa baja "T-Joint" pada pertemuan chord dan brace (Pemodelan Tipe 1)



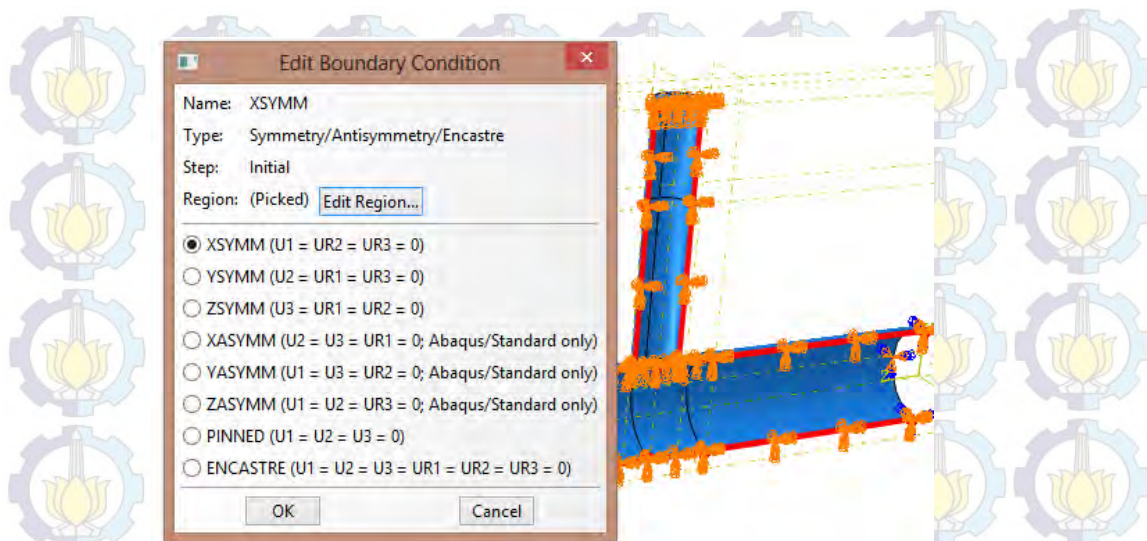
Gambar 4.11 Equation Constraint pada sambungan Pipa "T-Joint" pada pertemuan top plate dan brace (Pemodelan tipe 1)

Boundary condition atau perletakan yang digunakan adalah terjepit penuh di kedua sisinya, ini sesuai dengan spesifikasi pengetesan yang dilakukan oleh Wang dan Chen (2006). Pemodelan jepit penuh berupa “ENCASTRE” seperti pada Gambar 4.12. *Boundary Condition* tipe ini digunakan untuk Pemodelan tipe 1 dan tipe 2.



Gambar 4.12 Boundary Condition tipe “ENCASTRE” pada pemodelan sambungan pipa baja *T-Joint* FEM (Pemodelan tipe 1 dan 2)

Untuk meningkatkan efisiensi pada waktu analisa, pemodelan yang simple diperlukan supaya bisa mendapatkan hasil yang akurat. Pada program berbasis Finite Element Method, salah satu caranya adalah dengan menggunakan fitur XSYMM (Simetri pada arah X). Karena spesimen yang digunakan mempunyai bentuk dan konfigurasi pembebanan yang sama baik *axially* dan *in plane bending load* pada arah X untuk meningkatkan efisiensi selama analisa fitur XSYMM dapat digunakan. *Boundary Condition* tipe XSYMM digunakan untuk Pemodelan tipe 1 dan 2 sesuai dengan Gambar 4.13.

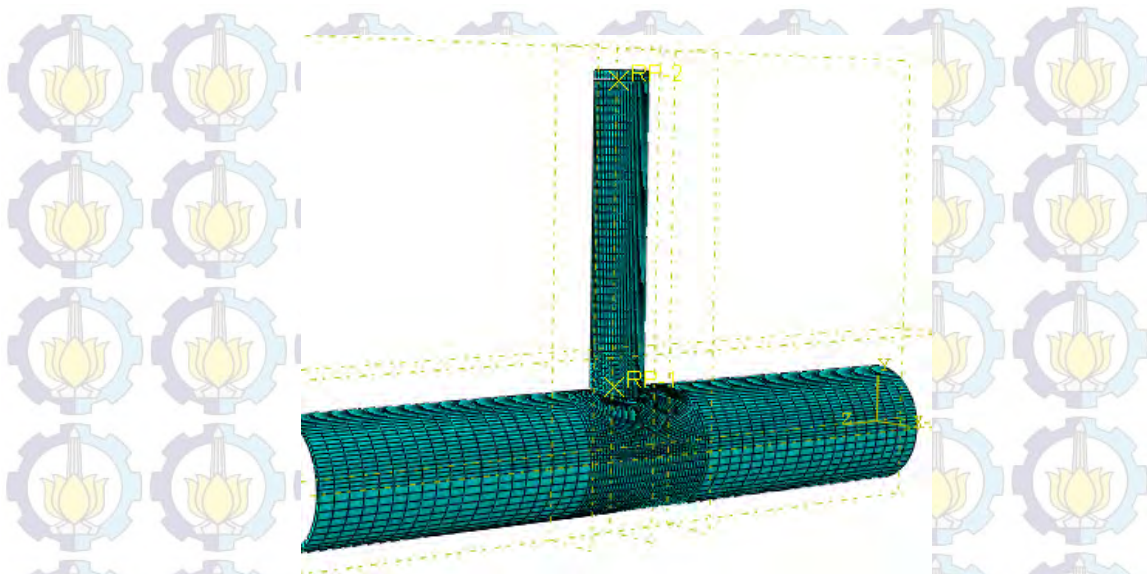


Gambar 4.13 Boundary Condition tipe “XSYMM” pada pemodelan sambungan pipa baja *T-Joint* FEM (Pemodelan tipe 1 dan 2)

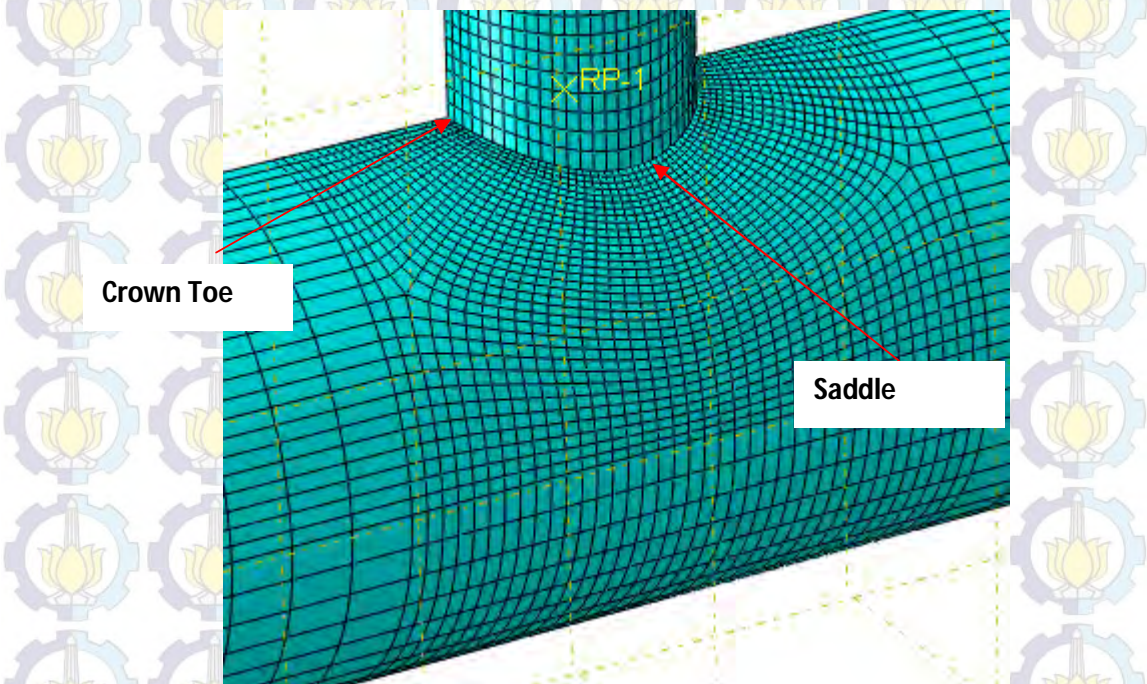
4.2.6 Element Meshing

Pada Pemodelan Tipe 1, model meshing yang digunakan adalah tipe C3D20R (*20-node quadratic brick, dengan reduced integration*). *Finer Meshing* diterapkan pada bagian *intersection* antara pipa chord dan brace untuk mendapatkan hasil yang akurat pada pertemuan joint tersebut. Sedangkan untuk Pemodelan tipe 2, model meshing yang digunakan adalah C3D4 (*4-node linear tetrahedron*). Kedua tipe pemodelan tipe mesh dapat dilihat pada Gambar 4.14, 4.15, 4.16 dan 4.17.

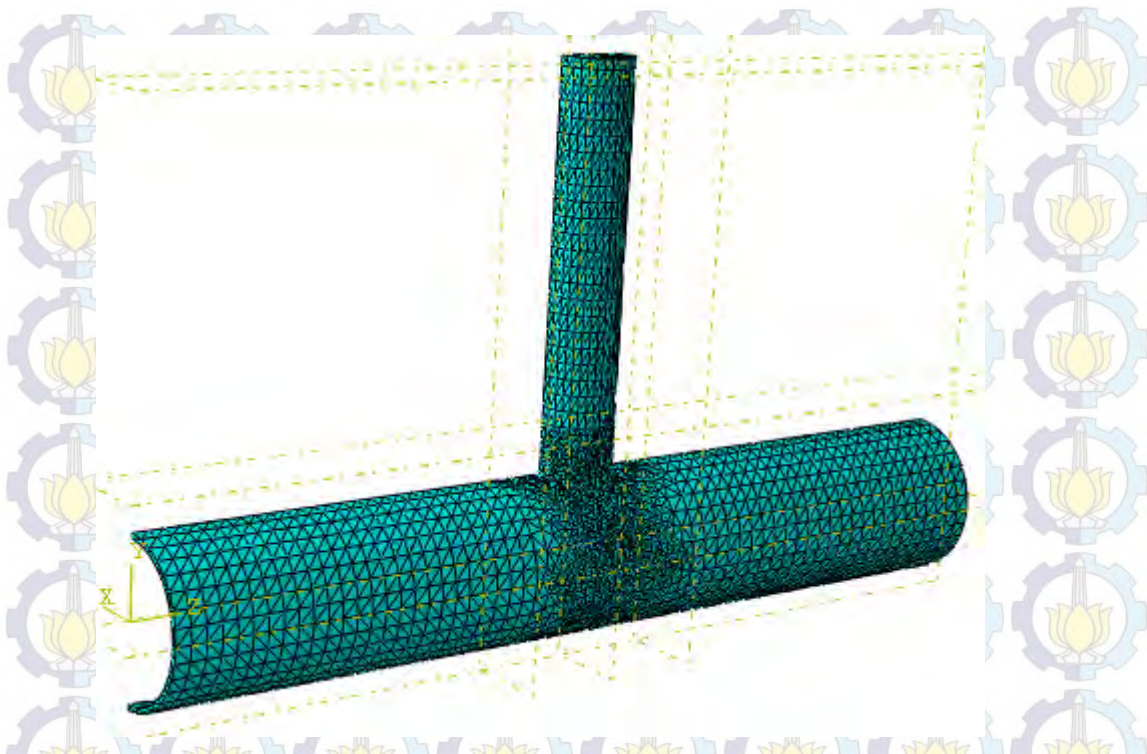
Pada Tabel 4.3 ada perbedaan antara penggunaan tipe element *mesh* pada pemodelan tipe 1 dan 2. Pada tipe element quadratic brick metode ini sangat mudah diterapkan dan bisa mengurangi konvergensi meshing jadi untuk menunjang analisa yang lebih akurat quadratic digunakan untuk tipe *hex*. Sedangkan tipe *tetra* digunakan dalam pemodelan tipe 2 karena pada pemodelan bentuk *weld* di pertemuan antara *chord* dan *brace* tipe hex begitu kompleks dan sulit digunakan. Sehingga dengan berbagai percobaan digunakan tipe tetra dengan sistem element linear.



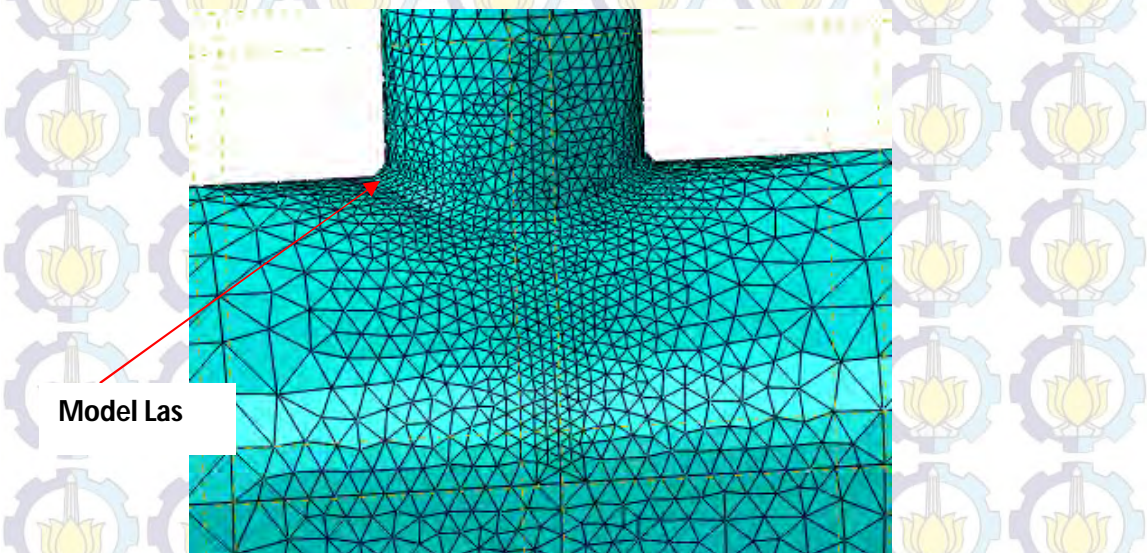
Gambar 4.14 *Global View Meshing* Pemodelan Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen tipe-1 (tipe C3D20R)



Gambar 4.15 *Finer Meshing* pada *intersection* Pemodelan Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen Tipe-1(tipe C3D20R)



Gambar 4.16 *Global View Meshing* pada *intersection* Pemodelan Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen Tipe-2(tipe C3D4)



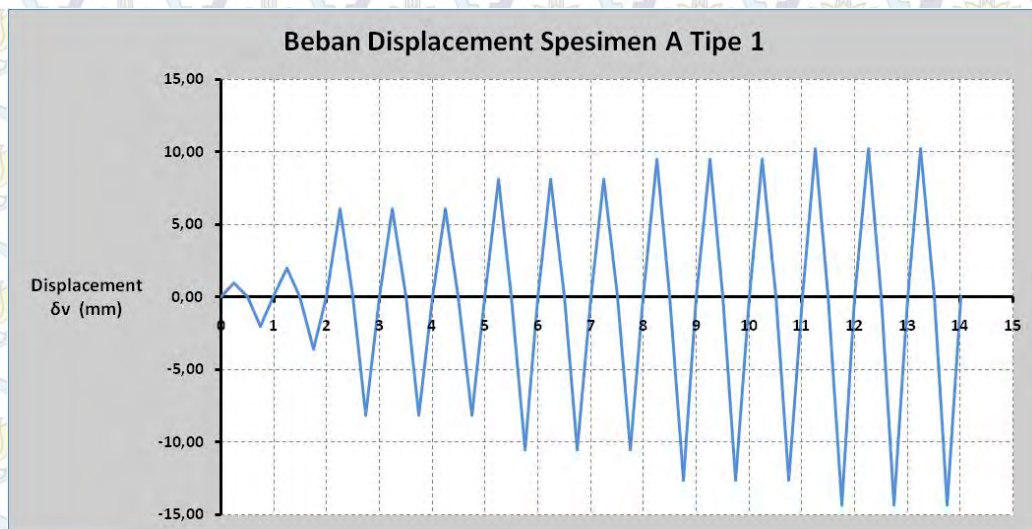
Gambar 4.17 *Finer Meshing* pada *intersection* Pemodelan Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen Tipe-2(tipe C3D4)

4.2.7 Data-Data Pembebanan

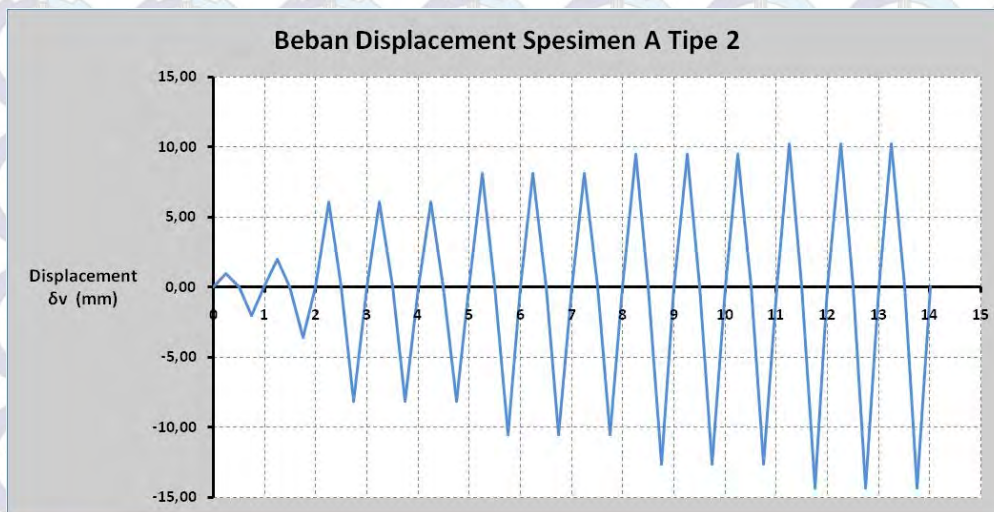
Pola pembebanan yang digunakan dalam pemodelan sesuai dengan experimental yang telah dilakukan oleh Wang dan Chen 2006 yaitu beban defleksi. Pola pembebanan berupa cyclic atau beban bolak-balik baik itu secara vertikal maupun secara horizontal. Detail pembebanan dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.18, 4.19 dan 4.20.

Tabel 4.8 Beban Displacement Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A dan B Tipe 1 dan 2

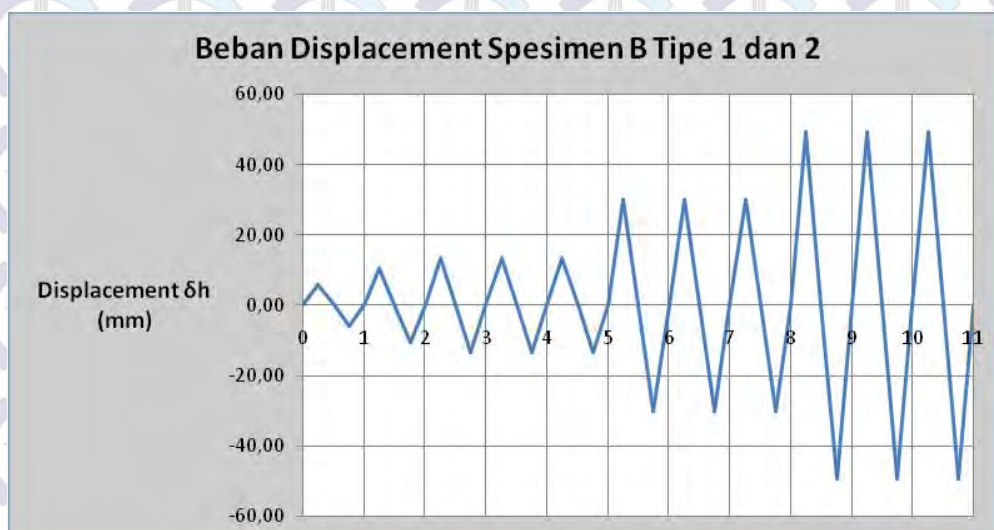
No. of Cycles	Spesimen Tipe 1			Spesimen Tipe 2		
	A δ_v (mm)		B δ_H (mm)	A		B δ_H (mm)
	Tarik	Tekan		Tarik	Tekan	
1	1	2	± 6	1	2	± 6
1	2	3,6	$\pm 10,5$	2	3,6	$\pm 10,5$
3	6,1	8,1	$\pm 13,5$	6,1	8,1	$\pm 13,5$
3	8,1	10,5	± 30	8,1	10,5	± 30
3	9,5	12,6	$\pm 49,5$	9,5	12,6	$\pm 49,5$
3	10,2	14,3	-	10,2	14,3	-



Gambar 4.18 Beban *Displacement* arah Vertikal Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A Tipe 1



Gambar 4.19 Beban *Displacement* arah Vertikal Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A Tipe 2



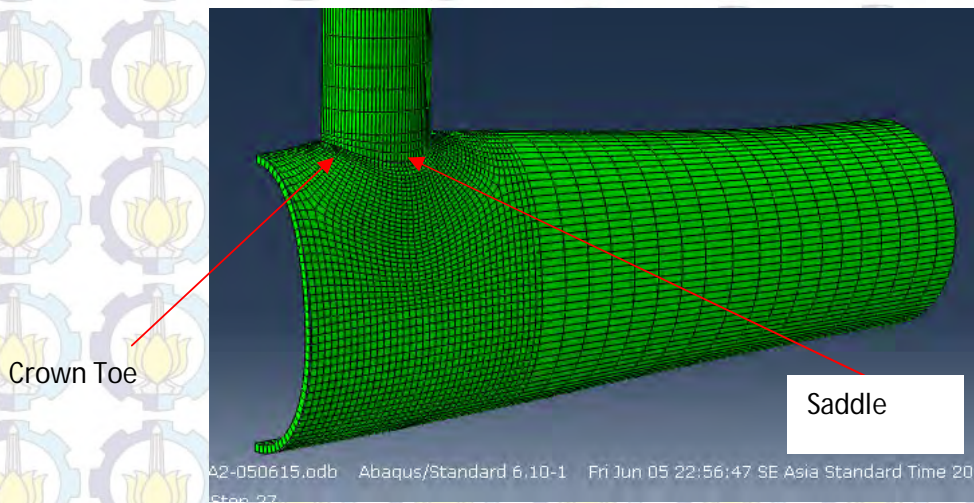
Gambar 4.20 Beban *Displacement* arah Horizontal Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 1 dan 2

4.2.8 Hasil Analisa Pemodelan Awal

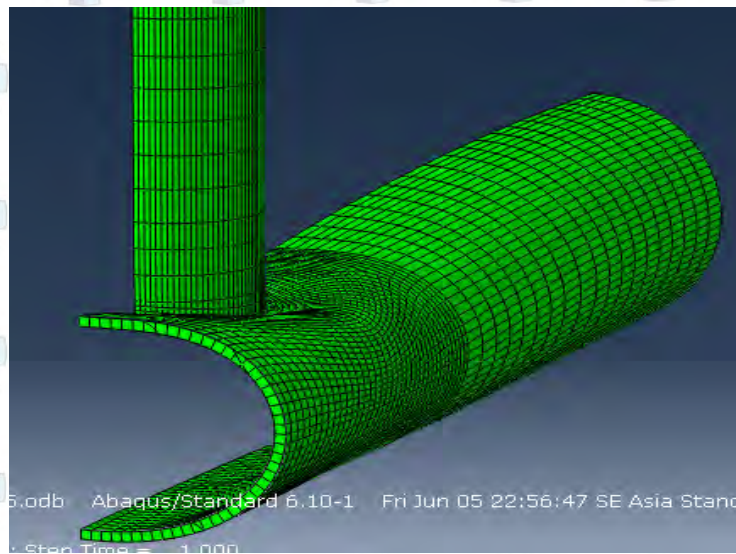
a. Akibat Axially Cyclic Load Spesimen A Tipe 1

Dari data-data material pipa dan pola pembebanan yang digunakan sebagai parameter *input* dalam program berbasis Finite Element Method, akan didapatkan hasil berupa *deformation shape* dan kurva *cyclic* hubungan

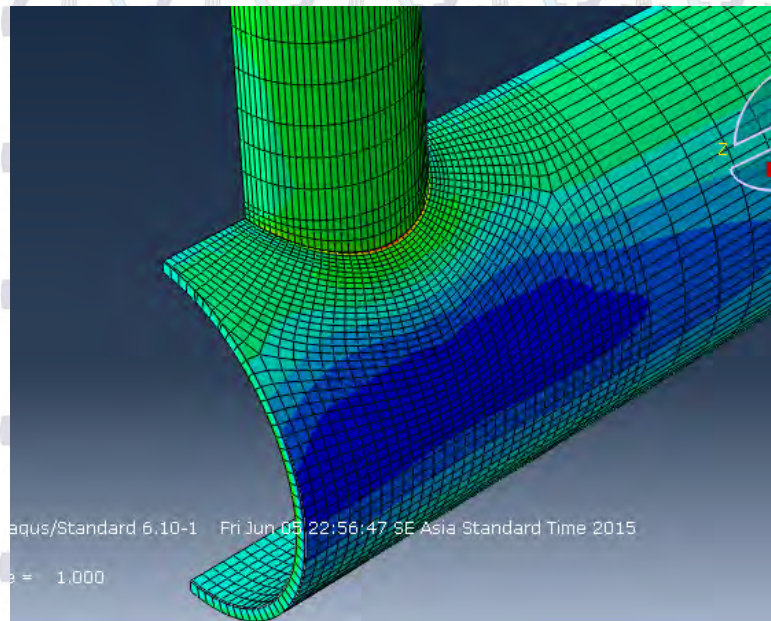
antara $P - \delta$ pada sambungan joint. P adalah beban yang bekerja akibat beban defleksi sedangkan δ adalah defleksi yang terjadi pada joint. Nilai P diambil pada posisi dimana beban tersebut bekerja sedangkan nilai δ didapatkan dari rata-rata defleksi pada *crown point* dan *saddle point*. Salah satu cara untuk mendapatkan nilai P pada pemodelan yaitu dengan menggunakan fitur yang terdapat pada *constraint equation*.



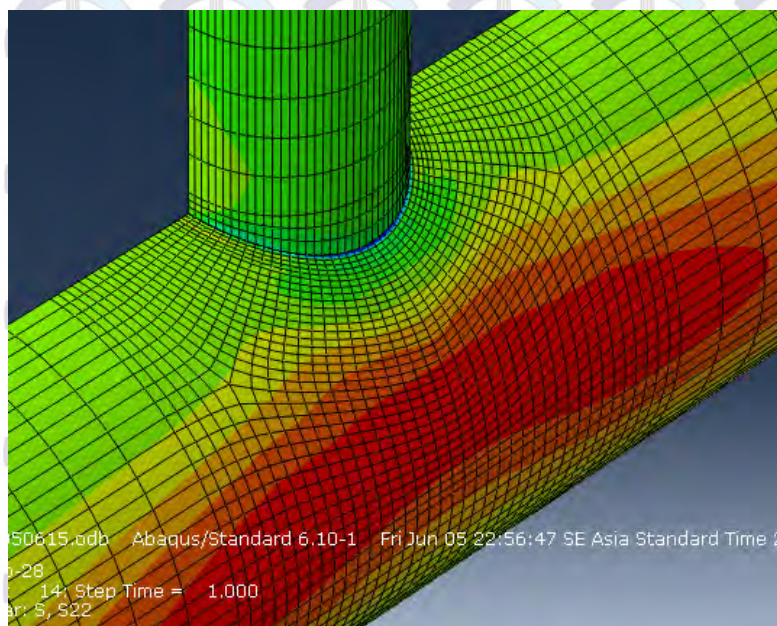
Gambar 4.21 Prediksi *Deformation Shape* akibat gaya Tarik pada Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Pemodelan A Tipe 1



Gambar 4.22 Prediksi *Deformation Shape* akibat gaya Tekan pada Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Pemodelan A Tipe 1



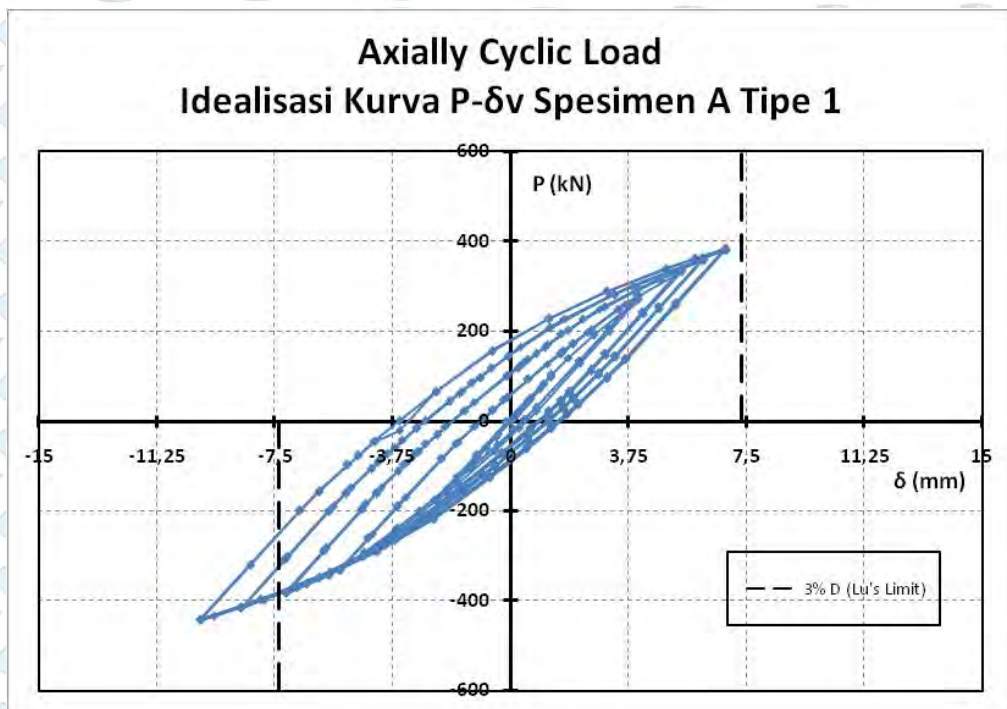
Gambar 4.23 *Stress Contour* pada Saddle Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A akibat Tarik (S22)



Gambar 4.24 *Stress Contour* pada Saddle Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A akibat Tekan (S22)

Pada spesimen A dimana beban aksial atau tekan mempunyai *magnitude* lebih besar dibanding dengan beban tension atau tarik. Pada tipe

beban seperti ini crack pada sambungan joint (*saddle point*) terjadi setelah di daerah sekitar sambungan tersebut local stress telah melampaui tegangan leleh penampang baja chord. Seperti apa yang diharapkan, konsentrasi stress terjadi pada *saddle point* yaitu intersection antara pipa chord dan brace dan di daerah sekitar sambungan terjadi *face plastification failure*, Gambar 4.23 dan Gambar 4.24.

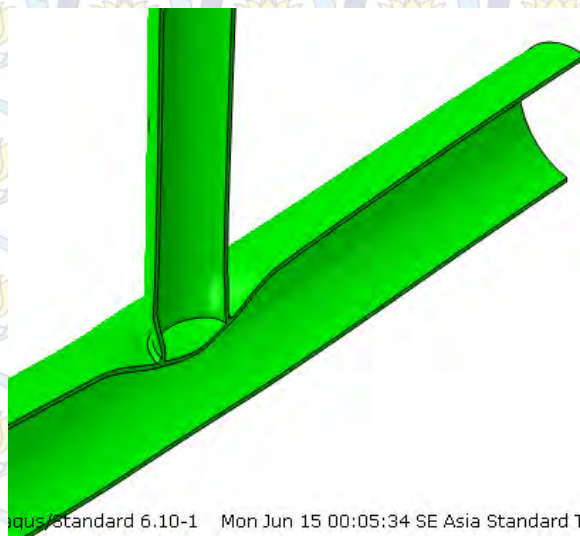


Gambar 4.25 Idealisasi Kurva P-δv Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A Tipe 1

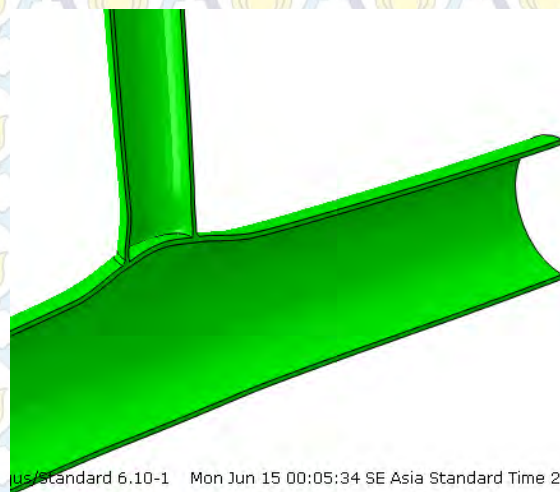
Gambar 4.25 adalah kurva hubungan antara *Force*(P) dan defleksi (δ) pada lokasi sambungan spesimen A Tipe 1. Gaya ultimate akibat tekan (P_{uc}) sebesar 442 kN dan defleksi yang terjadi sebesar 9,87 mm. Sedangkan gaya ultimate akibat tarik (P_{tc}) sebesar 384 kN dengan defleksi yang terjadi sebesar 6,838 mm. Kurva ini sesuai dengan bentuk *mode face failure* yaitu melebar ke samping. Dilihat dari bentuk kurva, pemodelan tipe 1 tidak sesuai dengan yang diharapkan.

b. Akibat Axially Cyclic Load Spesimen A Tipe 2

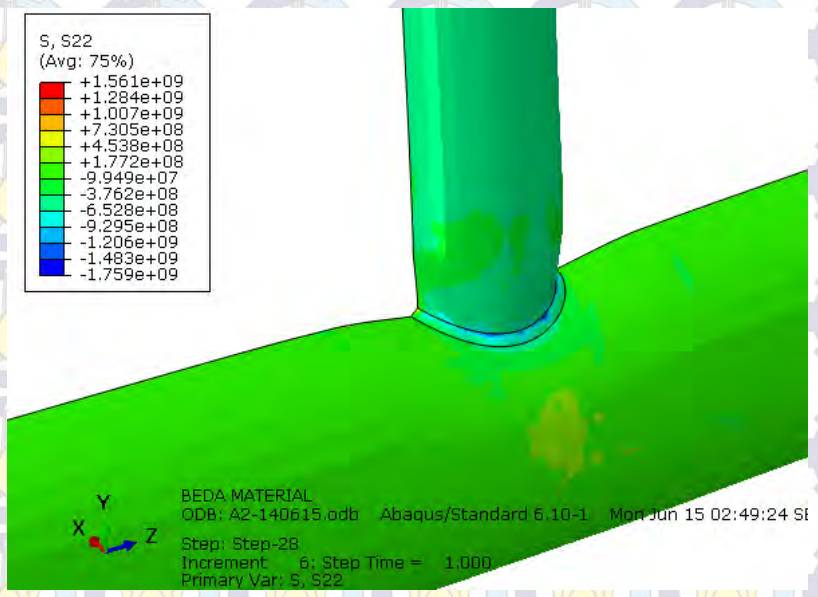
Seperti halnya dengan sub-bab sebelumnya, hasil dari pemodelan spesimen tipe 2 akibat beban cyclic load berupa *deformation shaped*, *stress contour* dan kurva $P-\delta_v$. Perhitungan defleksi pada sambungan hampir samadengan perhitungan sebelumnya yaitu rata-rata defleksi di *crown point* dan *saddle point*. Hasil deformasi akibat tekan dan tarik dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan Gambar 4.27



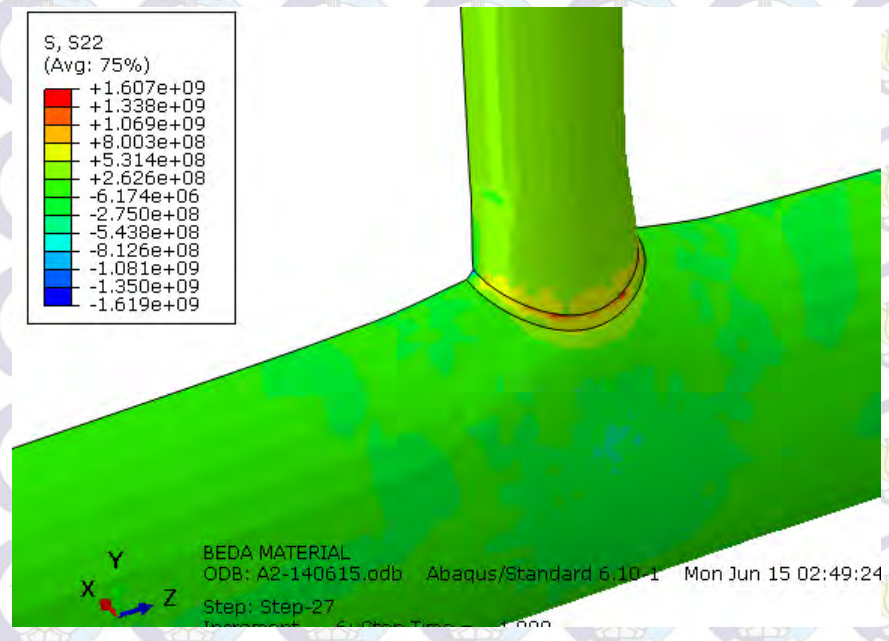
Gambar 4.26 Prediksi *Deformation Shape* akibat gaya Tekan pada Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Pemodelan A Tipe 2



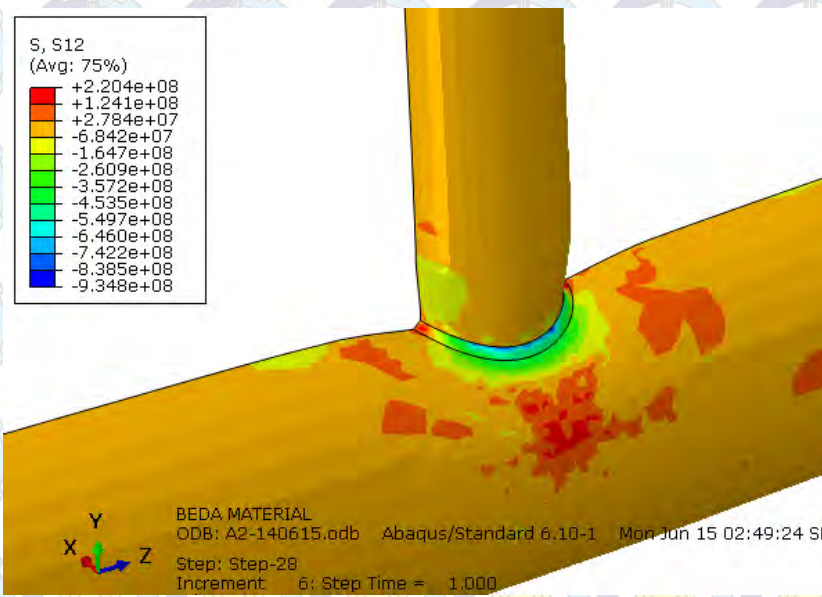
Gambar 4.27 Prediksi *Deformation Shape* akibat gaya Tarik pada Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Pemodelan A Tipe 2



Gambar 4.28 Stress Contour pada *intersection* akibat Tekan Sambungan Pipa Baja T-Joint Spesimen A Tipe 2 (S22)

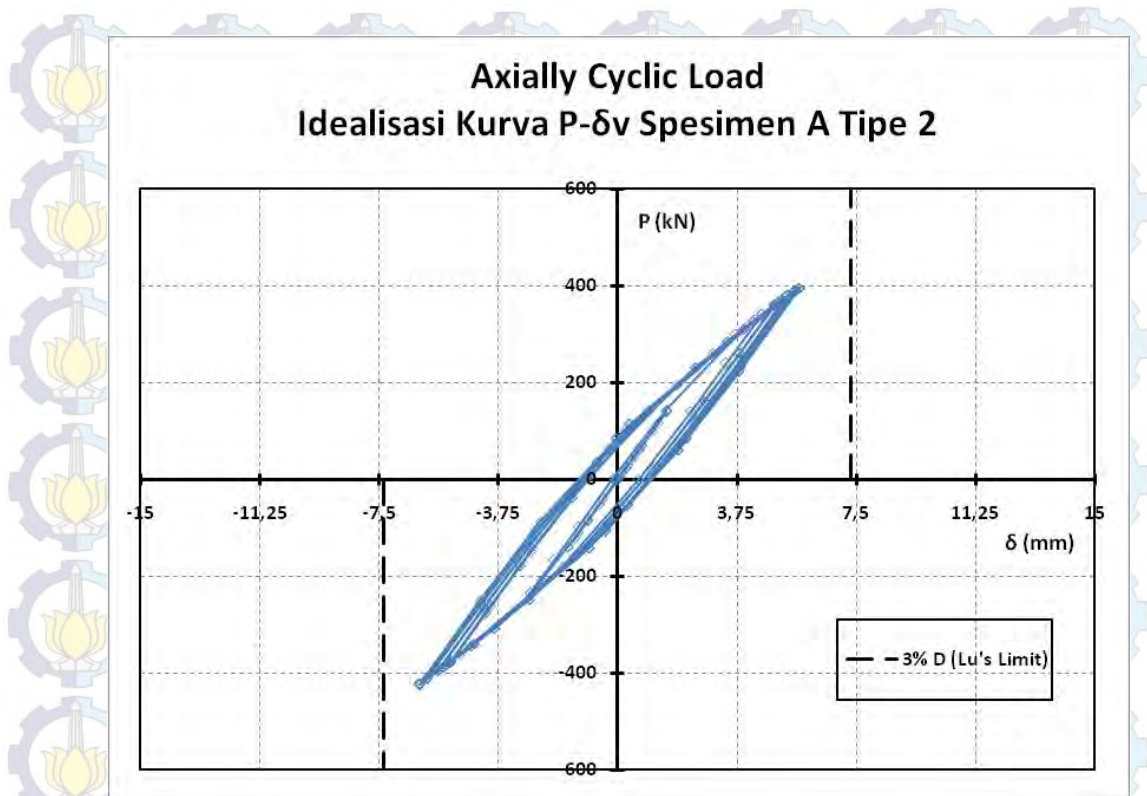


Gambar 4.29 Stress Contour pada *intersection* akibat Tarik Sambungan Pipa Baja T-Joint Spesimen A Tipe 2 (S22)



Gambar 4.30 Stress Contour pada *intersection* akibat Tekan Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A Tipe 2 (S12)

Gambar 4.28, 4.29 dan 4.30 menjelaskan maximum stress yang terjadi pada sambungan adalah arah S22 dan untuk geser adalah arah S12. Terlihat bahwa maksimum stress baik S22 dan S12 terletak pada sambungan dan daerah sambungan. Pada tipe ini (Tipe2) bentuk deformation shaped lebih mendekati *deformation shaped* dari experimental. Ini terlihat dari deformation shaped akibat gaya tekan. Jadi untuk pemodelan lanjutan menggunakan pemodelan tipe 2.



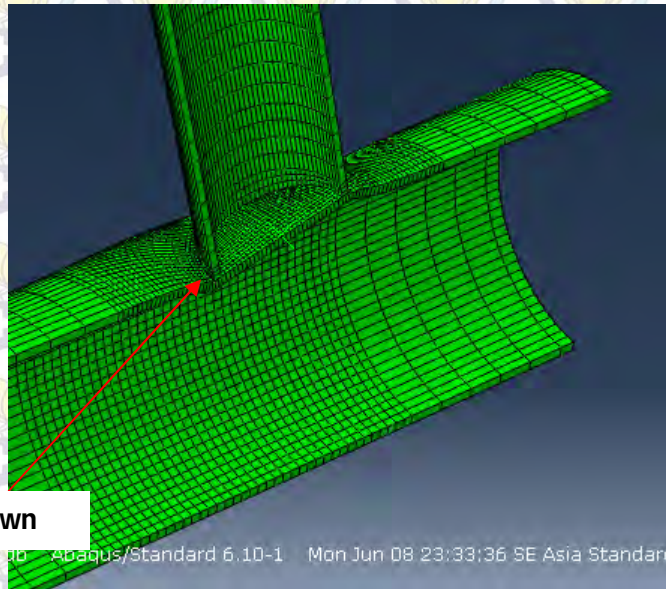
Gambar 4.31 Idealisasi Kurva P- δ v Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A Tipe 2

Gambar 4.31 adalah kurva hubungan antara *Force*(P) dan defleksi (δ) pada lokasi sambungan spesimen A Tipe 2. Gaya ultimate akibat tekan (P_{uc}) sebesar 423,79 kN dan defleksi yang terjadi sebesar 6,2387 mm. Sedangkan gaya ultimate akibat tarik (P_{uc}) sebesar 395 kN dengan defleksi yang terjadi sebesar 5.72 mm. Dilihat dari nilai defleksi ultimate yang dihasilkan baik oleh experimental dan simulasi FEM, kedua-duanya masih di batas aman menurut Lu's Limit Deformation yaitu sebesar 3%D (7.35mm)

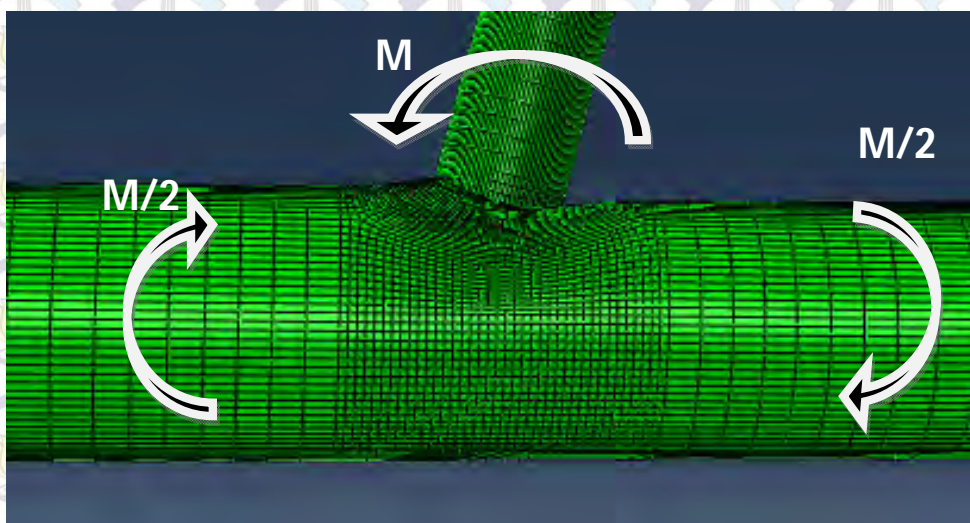
c. *Akibat In-Plane Bending Cyclic Load Spesimen B Tipe 1*

Pada spesimen B akibat *in-plane bending* mode failure yang umum terjadi adalah *face plastification failure* dan *punching shear failure* Gambar 4.32 dan 4.33. Setelah ke-dua tipe ini terjadi crack pada sambungan mulai terjadi pada daerah crown. Seperti apa yang telah diharapkan, konsentrasi

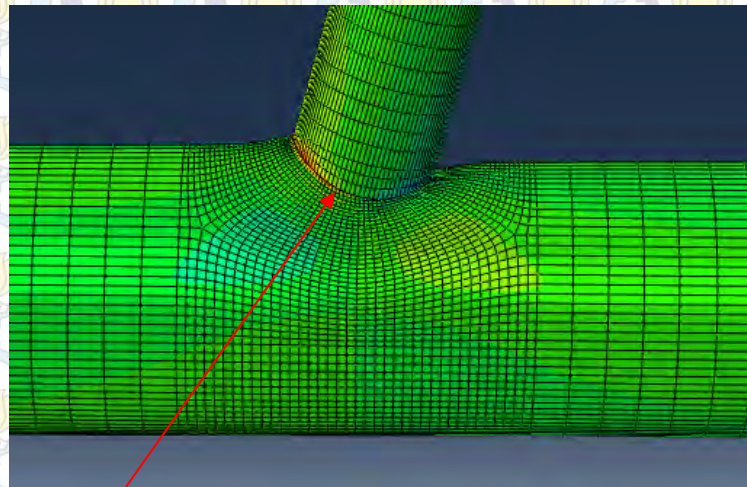
tegangan terjadi pada daerah crown point di pertemuan antara batang *chord* dan batang *brace* Gambar 4.34 dan Gambar 4.35. Pola pembebanan *in-plane bending* dihasilkan kurva hubungan antara momen (M) dan rotasi (θ). Momen (M) diukur dari *crown point* pada batang pipa *chord*, sedangkan rotasi (θ) didapatkan dari hasil pemodelan FEM pada daerah *crown point*.



Gambar 4.32 Prediksi *Deformation Shaped* Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 1

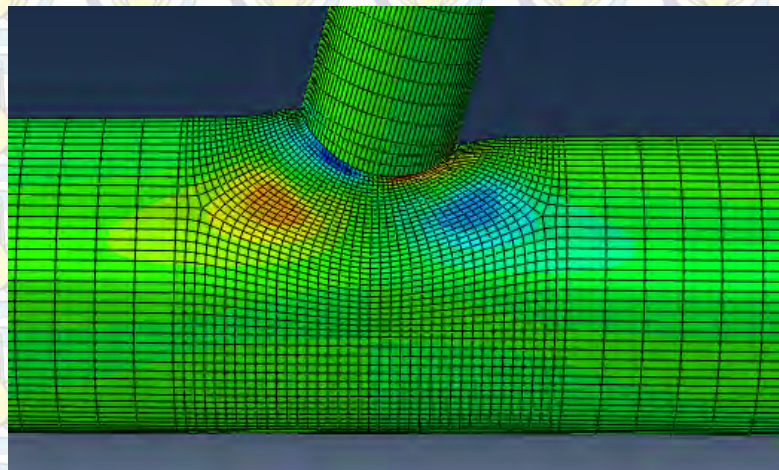


Gambar 4.33 Prediksi *Deformation Shaped* Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 1

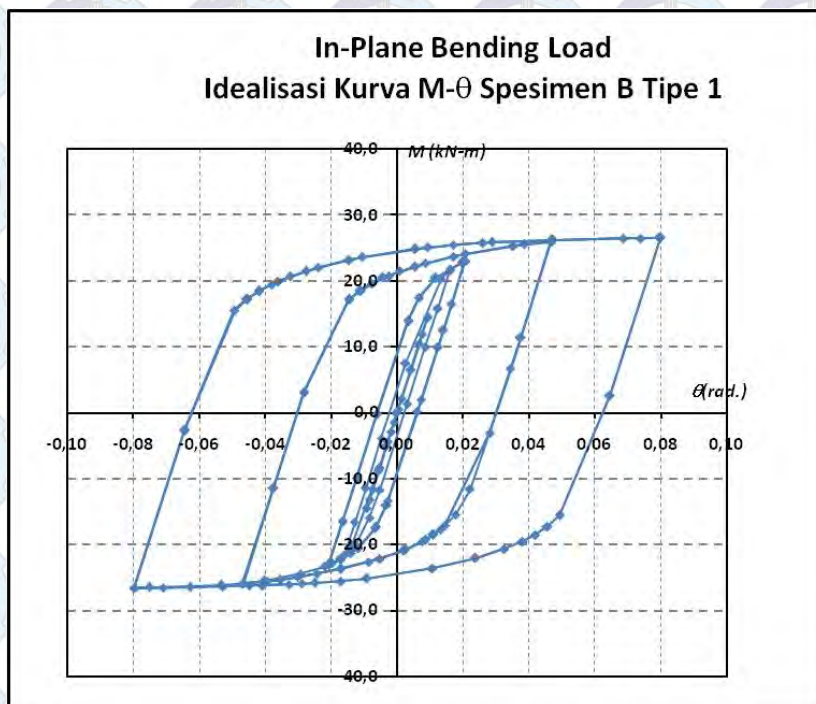


Concentration Stress pada Crown Point

Gambar 4.34 Kontur tegangan (S22) Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 1



Gambar 4.35 Kontur tegangan (S12) Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 1

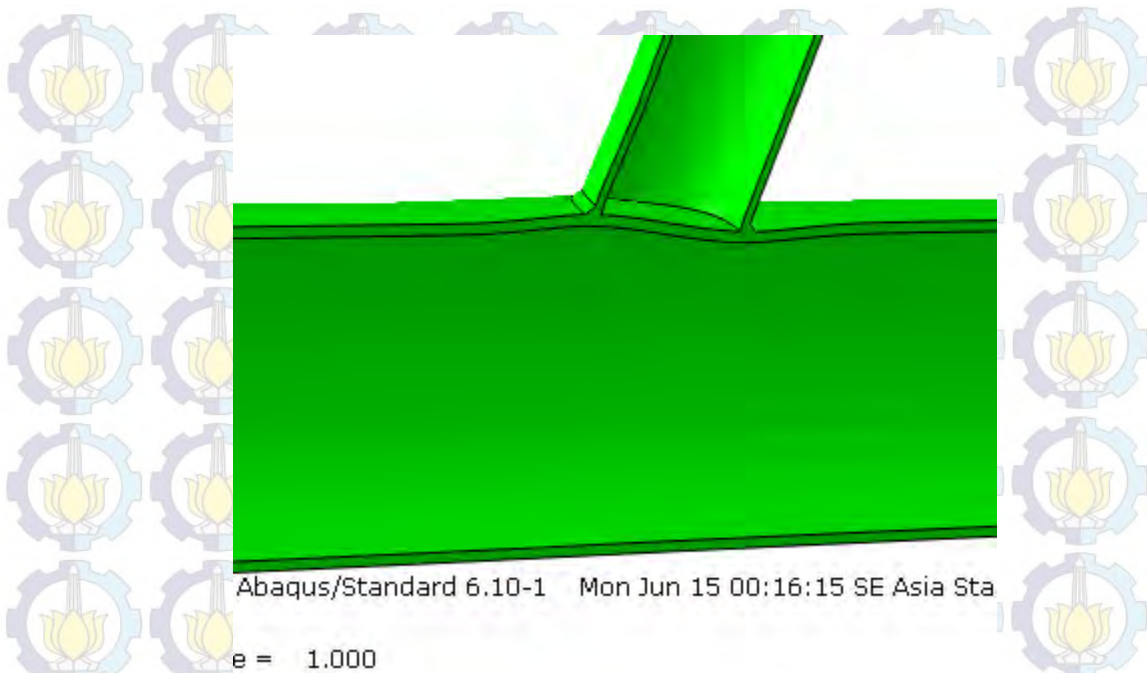


Gambar 4.36 Idealisasi Kurva $M-\theta$ Sambungan Pipa Baja T -Joint Spesimen B Tipe 1

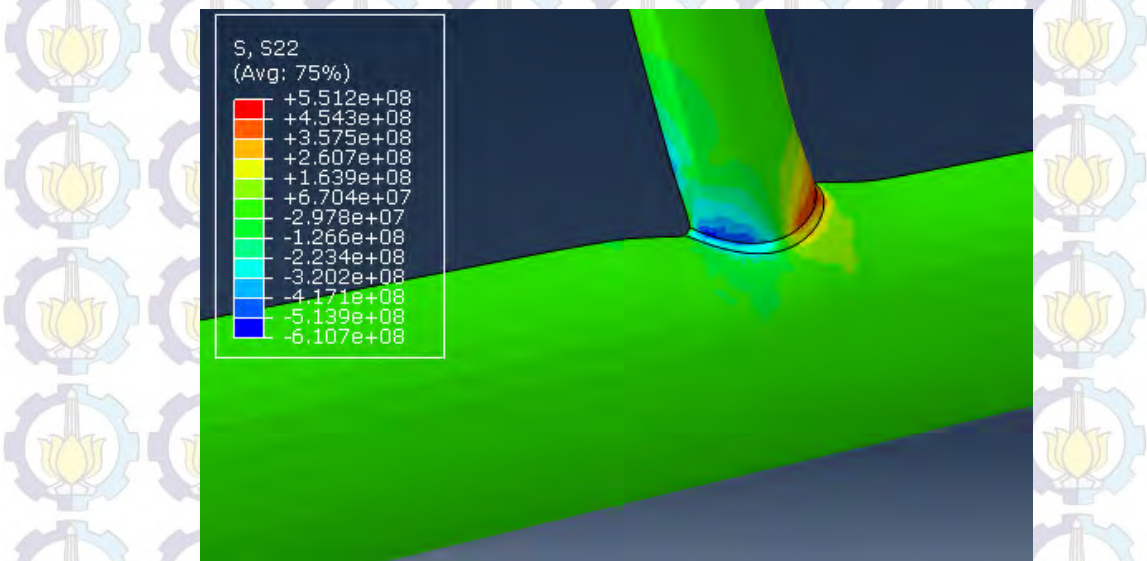
Gambar 4.36 menunjukkan hubungan antara Momen dan rotasi pada sambungan antara pipa chord dan brace. Dari data-data pembebanan *cyclic in-plane bending* maksimum Momen Ultimate (M_u) sebesar 26.6 kN-m dan maksimum rotasi pada sambungan sebesar 0.08 rad. Dilihat dari nilai rotasi yang dihasilkan baik oleh experimental dan simulasi FEM, kedua-duanya masih di batas aman menurut Lu's Limit Deformation yaitu sebesar 0.15 rad. ($80f_y/E$).

d. Akibat *In-Plane Bending Cyclic Load* Spesimen B Tipe 2

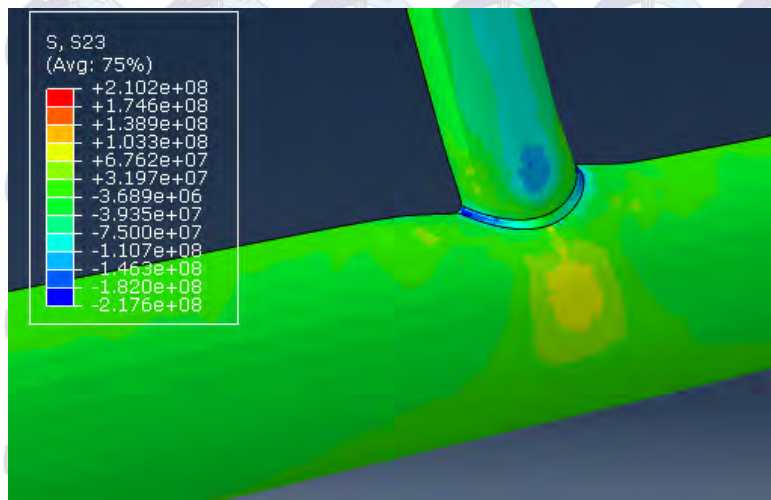
Gambar 4.37 adalah bentuk *deformation shapes* sambungan pipa baja akibat beban *in-plane bending*. Maksimum konsentrasi stress pada sambungan terjadi pada arah S22 dan arah S23 sesuai dengan Gambar 4.38 dan Gambar 4.39.



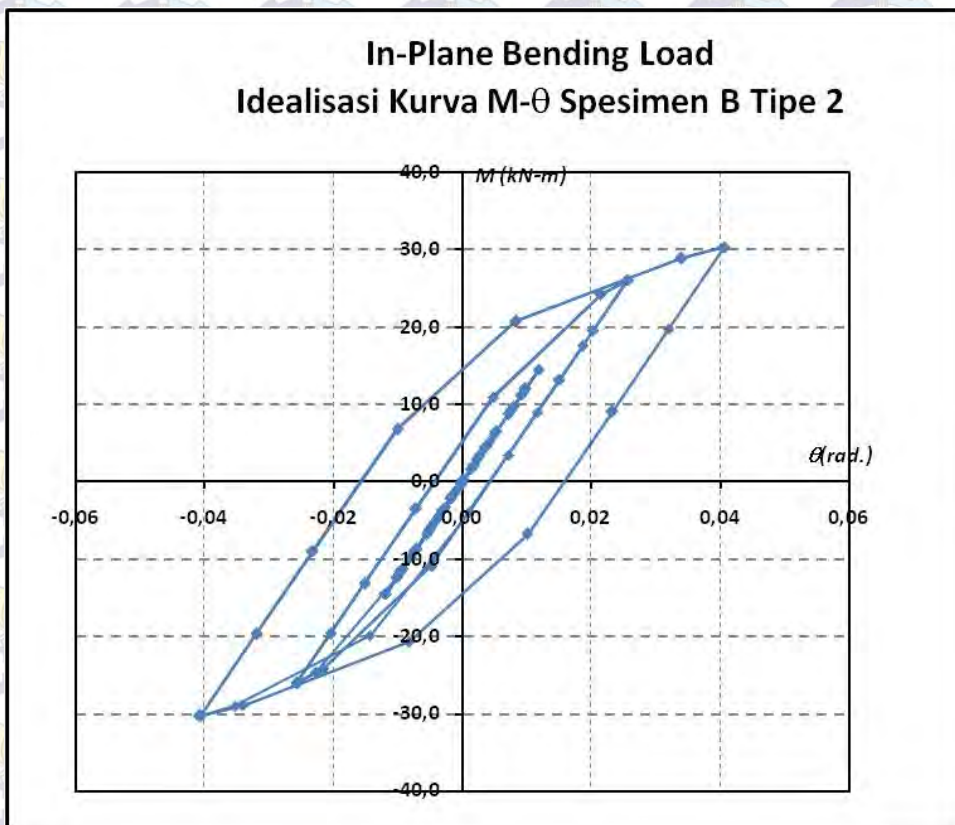
Gambar 4.37 *Deformation Shaped* akibat In-Plane Bending Load Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 2



Gambar 4.38 *Stress Contour (S22)* akibat In-Plane Bending Load Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 2



Gambar 4.39 *Stress Contour (S23)* akibat In-Plane Bending Load Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 2



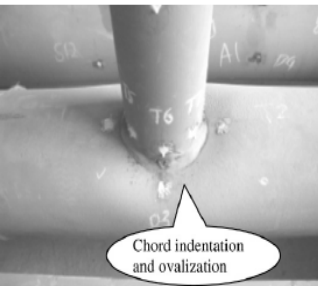
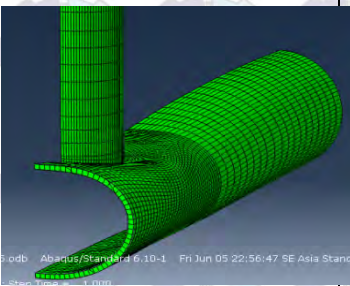
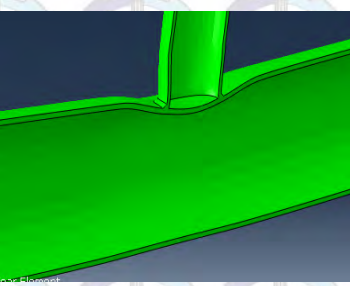
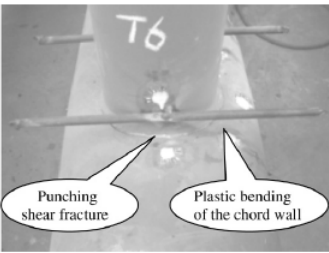
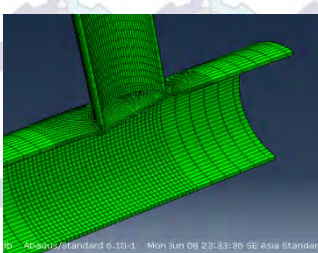
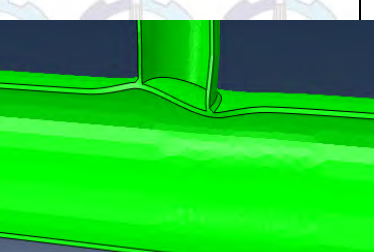
Gambar 4.40 Idealisasi Kurva M- θ Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen B Tipe 2

Gambar 4.40 menunjukkan hubungan antara Momen dan rotasi pada sambungan antara pipa chord dan brace. Dari data-data pembebanan *cyclic in-plane bending* maksimum Momen Ultimate (M_u) sebesar 30 kN-m dan maksimum rotasi pada sambungan sebesar 0.0402 rad. Perhitungan rotasi (rad.) diperoleh dari jumlah defleksi vertikal pada *crown point* dibagi diameter pipa *brace*. Dilihat dari nilai rotasi yang dihasilkan baik oleh experimental dan simulasi FEM, kedua-duanya masih di batas aman menurut Lu's Limit Deformation yaitu sebesar 0.15 rad. ($80f_y/E$)

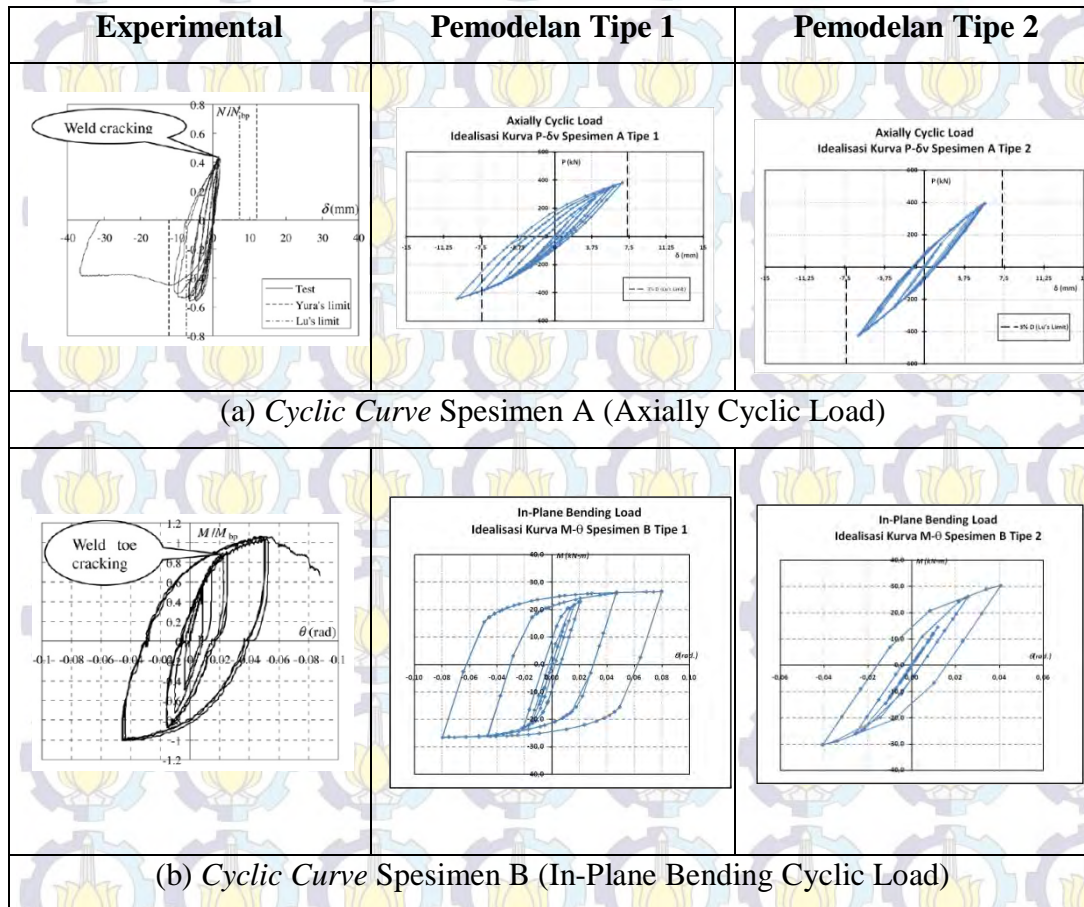
e. *Verifikasi Hasil Pemodelan Awal dengan Experimental*

Verifikasi dalam sub.bab ini membahas tentang *deformation shaped, cyclic curves* sambungan Pipa Baja *T-Joint* dari hasil experimental dan beberapa percobaan yakni spesimen tipe 1 dan tipe 2.

Tabel 4.9 Tabel Perbandingan *Deformation Shaped* antara Experimental, Spesimen A, B Tipe 1 dan 2

Experimental	Pemodelan Tipe 1	Pemodelan Tipe 2
 <p>Chord indentation and ovalization</p>		
(a) Face Plastification failure Shaped Spesimen A (Axially Cyclic Load)		
 <p>Punching shear fracture</p> <p>Plastic bending of the chord wall</p>		
(b) Face Plastification failure Shaped Spesimen B (In-Plane Bending Cyclic Load)		

Tabel 4.10 Tabel Perbandingan *Kurva Cyclic* antara Experimental, Spesimen A, B Tipe 1 dan 2



Pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 dari hasil *deformation shaped* dan *cyclic curve* baik hubungan antara $P-\delta$ dan $M-\theta$ diatas dapat disimpulkan bahwa *deformation shaped* sambungan Pipa Baja *T-Joint* tipe 2 yang mendekati hasil experimental. Sehingga untuk pemodelan lanjutan menggunakan Spesimen Tipe 2.

4.2.9 Kapasitas Sambungan Berdasarkan Peraturan

Bentuk kegagalan yang digunakan sebagai dasar acuan pada sambungan tipe "T" ini adalah *Chord Plastification Failure* dan diikuti oleh kegagalan akibat *crack welding* untuk beban akibat axial baik tekan dan tarik. Sedangkan untuk beban akibat *in-plane bending* model kegagalan *Chord Plastification Failure* dan *Punching Shear* digunakan sebagai acuan dasar.

Peraturan yang digunakan dalam perhitungan kapasitas sambungan mengacu pada CIDECT (Wardenier dkk, 2008 dan Packer dkk, 2008). Untuk Spesimen A yaitu spesimen yang diberi beban *Axially Load* perhitungan kapasitas sambungan mengacu pada sub.bab 3.4.1. Sedangkan untuk Spesimen B yaitu spesimen yang diberi beban *In-Plane Bending Load* perhitungan kapasitas sambungan mengacu pada sub.bab 3.4.2.

Dari formula-formula yang tercantum pada sub.bab 3.4.1 dan sub.bab 3.4.2 berikut adalah perhitungan kapasitas sambungan menurut peraturan CIDECT.

a. *Spesimen A (Axially Load)*

Data-data penampang pipa

D (diameter chord)	= 245 mm
T (tebal chord)	= 8 mm
d (diameter brace)	= 121 mm
t (tebal chord)	= 6 mm
A (Luas penampang chord)	= 5956,46 mm ²
a (Luas penampang brace)	= 2167,70 mm ²
$\beta(d/D)$	= 0.49
$\gamma(D/2T)$	= 15,3
θ	= 90°
F_{yc} (chord)	= 398 Mpa
F_{uc} (chord)	= 564 Mpa
F_{yb} (brace)	= 345 Mpa
F_{ub} (brace)	= 485 Mpa

Perhitungan Kapasitas Sambungan

N_{pl} (chord) [$F_{yc} A$]	= 2370.67 kN
M_{pl} (chord) [$F_{yc} Z_{pl}$]	= 178.91 kN-m
N_{pl} (brace) [$F_{yb} A$]	= 747.86 kN
M_{pl} (brace) [$F_{yb} Z_{pl}$]	= 27.40 kN-m
Q_u [$2.6(1+6.8\beta^2)\gamma^{0.2}$]	= 11.93

C_1	$= 0.20 (n=0.81)$
$Qf [(1- n)^{C_1}]$	$= 0.72$
$N_I [Qu Qf (F_{yb} T^2 / \sin \theta)]$	$= 219.03 \text{ kN}$
b. Spesimen B (In-Plane Bending)	
<u>Data-data penampang pipa</u>	
D (diameter chord)	$= 245 \text{ mm}$
T (tebal chord)	$= 8 \text{ mm}$
d (diameter brace)	$= 121 \text{ mm}$
t (tebal chord)	$= 6 \text{ mm}$
A (Luas penampang chord)	$= 5956,46 \text{ mm}^2$
a (Luas penampang brace)	$= 2167,70 \text{ mm}^2$
$\beta (d/D)$	$= 0.49$
$\gamma (D/2T)$	$= 15,3$
θ	$= 90^\circ$
F_{yc} (chord)	$= 398 \text{ Mpa}$
F_{uc} (chord)	$= 564 \text{ Mpa}$
F_{yb} (brace)	$= 345 \text{ Mpa}$
F_{ub} (brace)	$= 485 \text{ Mpa}$
<u>Perhitungan Kapasitas Sambungan</u>	
N_{pl} (chord) [$F_{yc} A$]	$= 2370.67 \text{ kN}$
M_{pl} (chord) [$F_{yc} Z_{pl}$]	$= 178.91 \text{ kN-m}$
N_{pl} (brace) [$F_{yb} A$]	$= 747.86 \text{ kN}$
M_{pl} (brace) [$F_{yb} Z_{pl}$]	$= 27.40 \text{ kN-m}$
Qu [$4.3\beta\gamma^{0.5}$]	$= 8.31$
C_1	$= 0.327 (n=1,01)$
$Qf [(1- n)^{C_1}]$	$= 0.67$
$kb [(1+3 \sin \theta)/4 \sin \theta] = 1$	
$M_1 [Qu Qf (F_{yb} T^2 / \sin \theta) d]$	$= 17,18 \text{ kN-m (plastification failure)}$
$M_2 [0.58 F_{yb} d^2 T (kb / \sin \theta)]$	$= 27,04 \text{ kN-m (punching shear failure)}$

4.2.10 Verifikasi Hasil Experiment, FEM dan Peraturan

Tabel 4.11 adalah perbandingan kapasitas joint pada sambungan T akibat *Axially Cyclic Load* dan *In-Plane Cyclic Load* berdasarkan hasil experimental, FEM (*Prediction*) dan CIDECT (*Prediction*).

Tabel 4.11 Perbandingan Kapasitas Sambungan Pipa Baja *T-Joint*

Spesimen	Nu (TEST) (kN)	Nu (FEM) (kN)	N1 (CIDECT) (kN)	RATIO	
				Nu (FEM) / Nu (Test)	Nu (CIDECT) / Nu (Test)
A	418,00	423,79	219,03	1,014	0,52

Spesimen	Mu (TEST) (kN-m)	Mu (FEM) (kN-m)	Mu (CIDECT) kN-m		RATIO	
			Face Plastification Failure	Punching Shear Failure	Mu (FEM) / Mu (Test)	Mu (CIDECT) / Mu (Test)
B	27,70	30,00	17,18	27,04	1,083	0,62

Tabel 4.11 menunjukkan bahwa antara pemodelan dan experimental menghasilkan perbedaan yang wajar yaitu rata-rata dibawah 4.5%.

4.3. Pemodelan Lanjutan

4.3.1 Umum

Sudah disebutkan dalam sub.bab sebelumnya, pemodelan lanjutan ini menggunakan Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A Tipe 2. Spesimen A digunakan karena pada analisa sebelumnya tipe pembebanan *axially cyclic load* akibat *tension* menjadi dominan dibanding dengan *in-plane bending load*. Pada pemodelan lanjutan dalam bab ini, peneliti membahas *crack propagation* (mekanisme crack) pada sambungan pipa berbentuk *T-Joint*. Dimana dalam sub-bab sebelumnya mekanisme crack pada las tidak dimasukkan sebagai parameter. Untuk bisa memodelkan perilaku mekanisme retak pada sambungan diperlukan fitur tambahan dalam software tersebut. Sambungan las dimodelkan dalam pemodelan dan tipe las yang digunakan adalah kombinasi antara *fillet weld* dan *butt weld* dengan tebal las ± 6 mm. *Crack propagation* menggunakan fitur XFEM (*Extended Finite Element Method*).

Dalam XFEM tipe element meshing mempunyai pengaruh yang besar. Membutuhkan *effort* lebih untuk bisa memodelkan *meshing* yang akurat. Untuk mengurangi *konvergance* pada waktu proses simulasi tipe linear pada element digunakan. Hasil yang diharapkan dalam simulasi lanjutan ini adalah posisi awal dimana terjadi cracking dan penyebarannya. Validasi akhir yang digunakan dalam simulasi lanjutan ini adalah membandingkan posisi retak yang terjadi dengan hasil experimental.

4.3.2 Material Tambahan untuk Pemodelan XFEM

Pada pemodelan XFEM material tambahan perlu dimasukkan seperti *Maximum Principle Stress*, *Batas Lendutan Spesimen* dan *Critical Release Energy*. Pada Tabel 4.12 dibawah ini adalah material tambahan untuk menunjang simulasi mekanisme retak pada sambungan. Panjang crack tergantung pada material bahan yang digunakan dalam hal ini adalah *fracture toughness*. *Fracture toughness* mempunyai nilai yang berbeda-beda, nilai *fracture toughness* dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.12 Tabel Material untuk Pemodelan XFEM

Spesimen	Pemodelan XFEM		
	E Pa (Mpa)	Max. Principle Stress Mpa	Critical Release Energy J
A	2,0E+05	564	12000

Tabel 4.13 Tabel Material *Fracture toughness*

Material	$G_{Ic}(\text{kJm}^{-2})$	$K_{Ic}(\text{MNm}^2)$	$E(\text{GPa})$
Steel alloy	107	150	210
Aluminum alloy	20	37	69
Polyethylene	20 (J_{Ic})	—	0.15
High-impact polystyrene	15.8 (J_{Ic})	—	2.1
Steel — mild	12	50	210
Rubber	13	—	0.001
Glass-reinforced thermoset	7	7	7
Rubber-toughened epoxy	2	2.2	2.4
PMMA	0.5	1.1	2.5
Polystyrene	0.4	1.1	3
Wood	0.12	0.5	2.1
Glass	0.007	0.7	70

Sumber : Roylance, 2001

Mengingat hasil yang diharapkan nanti crack awal terjadi setelah di daerah sambungan mengalami local failure, maka nilai *Maximum Principle Stress* menggunakan mutu putus (*ultimate yield*) penampang pipa baja chord seperti pada tabel 4.12. Batas maksimum defleksi mengacu pada pemodelan awal sambungan pipa baja T-Joint Spesimen A tipe 2.

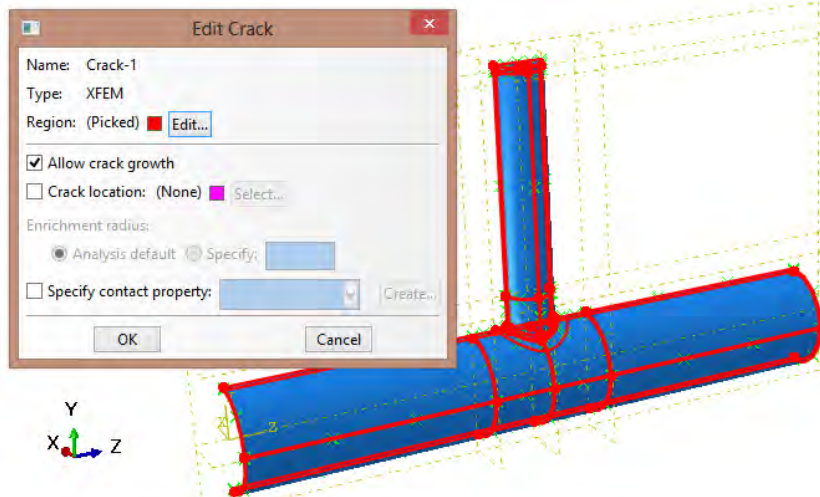
4.3.3 Pembebanan pada Pemodelan Lanjutan

Karena pada beban cyclic begitu kompleks diterapkan dalam pemodelan XFEM, maka pola pembebanan baru digunakan dalam Pemodelan Lanjutan. Jenis beban yang digunakan adalah beban defleksi akibat *Tarik* pada pemodelan Sambungan Pipa Baja T-Joint Spesimen A sebelumnya, yaitu sebesar 5,72 mm.

4.3.4 Pemodelan XFEM

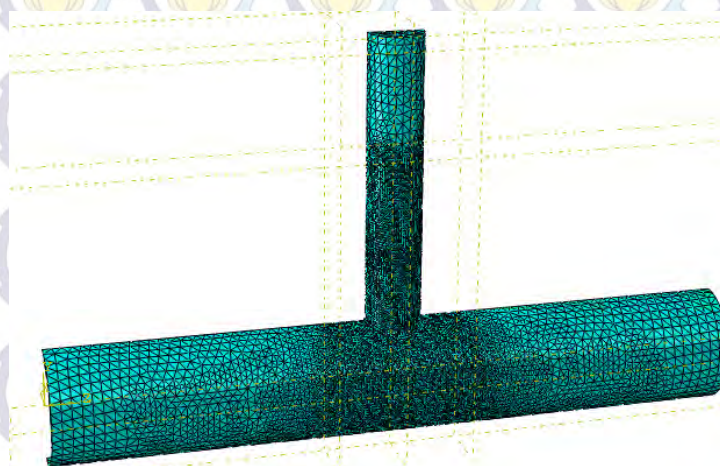
Terdapat *Interaction Modul* pada pemodelan mekanisme crack menggunakan FEM. Dalam *Interaction Modul* tersebut terdapat menu *Special* dan selanjutnya ada menu *Crack*. Pada modul *Crack* metode XFEM dipilih dalam simulasi mekanisme retak. Satu *part* atau *instances* diperlukan apabila menggunakan fitur ini. Gambar 4.41 adalah gambaran model fitur crack pada XFEM. Untuk *crack location* sengaja dikosongkan dengan maksud supaya XFEM

bisa mensimulasi secara otomatis posisi dimana crack tersebut terjadi. Untuk pemodelan tambahan material dalam pemodelan bisa dilihat pada Gambar 4.44.

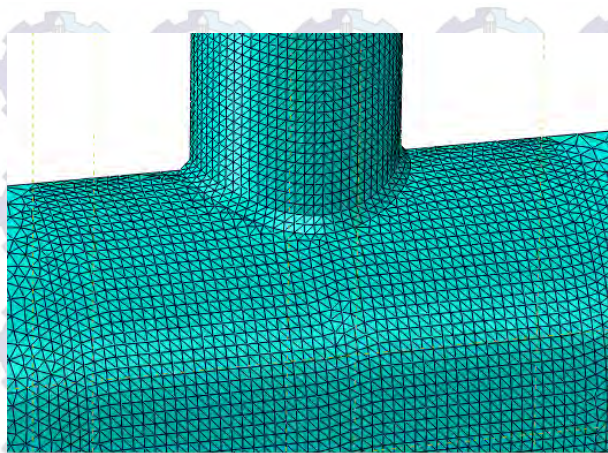


Gambar 4.41 Fitur crack pada Pemodelan XFEM

Untuk mendapatkan posisi retak *remeshing* perlu dilakukan dengan tanpa merubah parameter-parameternya, sesuai dengan gambar 4.42 dan 4.43.



Gambar 4.42 Remeshing Element dalam Pemodelan XFEM (C3D4)



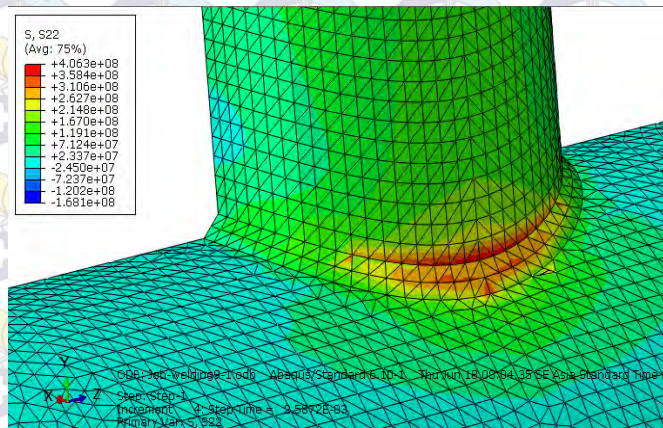
Gambar 4.43 Remeshing Element pada Intersection dalam Pemodelan XFEM (C3D4)

Fitur lain yang digunakan untuk mendapatkan posisi dan panjang crack adalah *Phlsm*. *Phlsm* menggambarkan fungsi jarak dari Φ (*level set value phi*) dan Φ (*phi*) adalah nilai dari suatu nodal yang ditentukan pada permukaan retak.

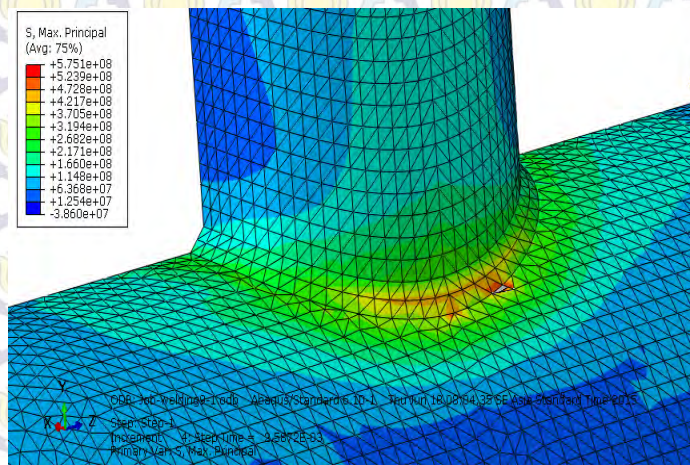
4.3.5 Hasil Pemodelan XFEM

Dengan menggunakan prosedur-prosedur yang sudah dijelaskan di Sub.Bab 4.3.1 sampai dengan 4.3.4 didapatkan hasil mekanisme retak pada sambungan pipa baja. Total step increment 515, pada step increment ke 4 dimana *maximum principle stress* melebihi 564 Mpa (Gambar 4.45), terjadi retak pertama dan tegangan yang terjadi sebesar 406 Mpa melebihi tegangan leleh pipa chord (Gambar 4.44).

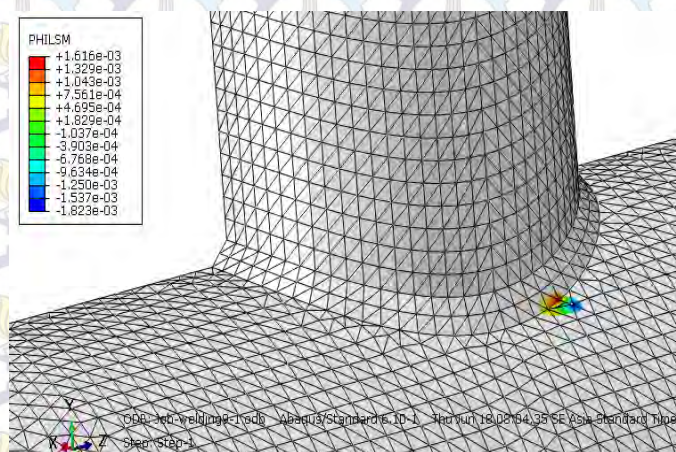
Pada Gambar 4.46 panjang retak pada pemodelan XFEM menggunakan fitur *Phlsm*. Panjang pertama saat terjadi retak sebesar 1,82 mm, dengan bertambahnya beban bertambah pula panjang retak (Gambar 4.47)



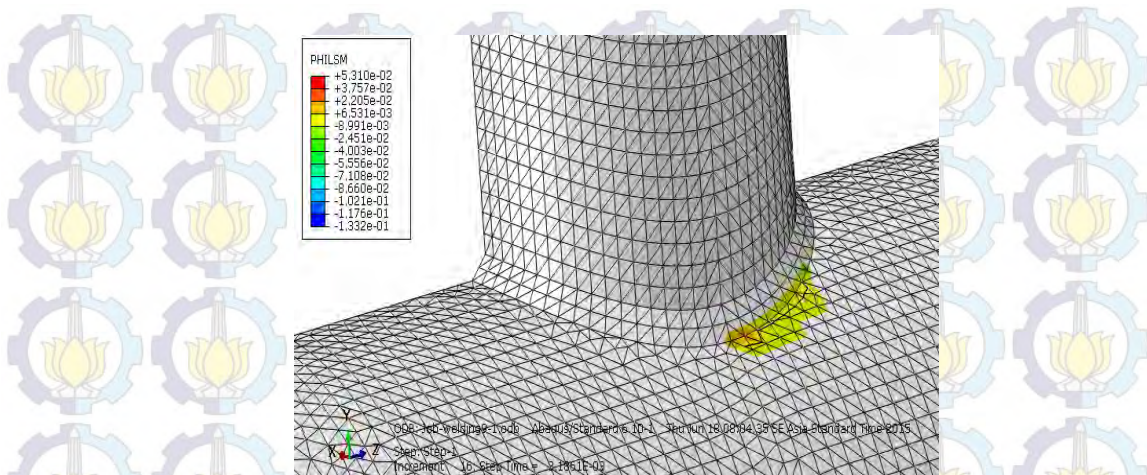
Gambar 4.44 Tegangan pada Sambungan Pipa Baja T-Joint Spesimen A Tipe 2 pada saat terjadi retak pertama



Gambar 4.45 Maximum Principle Stress pada Sambungan Pipa Baja T-Joint Spesimen A Tipe 2 pada saat terjadi retak pertama



Gambar 4.46 Panjang Retak Pertama pada Sambungan Pipa Baja T-Joint Spesimen A Tipe 2



Gambar 4.47 Panjang Retak Susulan pada Sambungan Pipa Baja *T-Joint* Spesimen A Tipe 2

4.3.6 Validasi Hasil Pemodelan XFEM

Tabel 4.14 adalah perbandingan antara retak yang terjadi di Sambungan Pipa Baja “T” Joint pada Spesimen A pada Experimental dan Simulasi FEM. Gambar pada Tabel 4.14 menjelaskan bahwa retak awal terjadi didaerah sambungan akibat beban tarik dan menyebar ke daerah sambungan.

Tabel 4.14. *Crack position* terjadi pada *Saddle Point*

Experimental	XFEM
	

Dengan menggunakan fitur XFEM kita dapat menentukan posisi retak secara otomatis dimana konsentrasi tegangan terjadi di daerah timbulnya retak.



"Halaman Ini Sengaja Dikосongkan"

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari berbagai pemodelan yang dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Parameter tipe mesh dengan tipe2(C3D4) yang digunakan dalam pemodelan ulang di FEM menghasilkan perilaku *local buckling* yang lebih sesuai dengan hasil experiment daripada tipe mesh 1 (C3D20R). Hal ini disebabkan karena model spesimen yang begitu kompleks sehingga diperlukan element tipe C3D4 untuk menghindari konvergensi antar element.
2. Dari kontur tegangan yang dihasilkan oleh simulasi FEM, kegagalan utama sambungan las pipa berbentuk “T” akibat pengaruh axially cyclic load adalah cracking (*tension*) dan local buckling (*compression*) pada *chord wall*. Ini terlihat pada daerah tersebut tegangannya lebih tinggi daripada daerah lainnya. Sedangkan akibat *in-plane bending load* kegagalan utama adalah *local bukling* dan *punching shearp* pada daerah sambungan.
3. Akibat beban cyclic hasil validasi antara experimental dan simulasi menunjukkan masih dibatas normal (*good agreement*) yaitu dibawah rata-rata 4.5%. Hasil simulasi menunjukkan lebih tinggi dibanding dengan experimental, karena pada simulasi FEM mekanismeretak tidak digunakan mengingat parameter-parameter yang begitu kompleks.
4. Posisi retak awal pada sambungan dapat disimulasikan dengan XFEM dan memberikan hasil yang akurat yaitu di posisi dimana tegangannya tinggi (*saddle point*). Retak pada sambungan terjadi pada saat tegangan disekitar sambungan sudah melebihi tegangan leleh baja pipa chord (398 MPa).

5.2 Saran

Berdasarkan proses analisa yang berlangsung, maka dapat ditarik kesimpulan mengenai saran-saran yang akan digunakan sebagai proses lanjutan nantinya antara lain:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pola-pola meshing dan tipe-tipe cracking dalam analisa suatu sambungan pada FEM.

DAFTAR PUSTAKA

ABAQUS. 2004. "ABAQUS Analysis User's Manual". ABAQUS Inc.

A.A. Yaghi, A.A. Becker. 2004. "State of The Arc Review-Weld Simulation Using Finite Element Methods". School of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, The University of Nottingham. UK.

Akbar Taufik dan Santoso Budie. 2012. "Analisa Dari Pengaruh Welding Sequence Terhadap Tegangan Sisa Dan Deformasi Pada Circular Patch Weld Double Butt-Joint Plat ASTM A36 Menggunakan Metode Element Hingga". Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Perkapalan. Surabaya.

Anca Andreas, Cardona Alberto and Fachinotti Victor. 2008. "Finite Element Modeling Of Welded Joints". Argentina.

American Welding Society D1.1. 2010. "Structural Welding Code Steel".

B. Brickstad and B.L Josefson. 1998. "A Parametric Study Of Residual Stresses In Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes". Swedia.

Colegrove Paul. 2009. "The Welding Process Impact On Residual Stress And Distortion". Cranfield University, Bedfordshire MK43 0AL. UK. Welding Engineering Research Centre.

Danarbroto Heru. 2012. "Karakterisasi Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pipa Baja JIS Z 2201". Jurusan Teknik Mesin Universitas Pandanaran

Elofsson Johan and Martinsson Per. 2004. "Welding Simulation With Finite Element Analysis". University of Trollhattan/Uddevalla, Department of Technology, Mathematics and Computer Science, Trollhattan. Swedia.

Jiang Jing and Zhao Mingshan. 2012. "Influence Of Residual Stress On Stress Concentration Factor For High Strength Steel Welded Joints". Singapore.

J.N. DuPont and A.R. Merder. 1995. "The Effect Of Welding Parameters And Process Type On Arc And Melting Efficiency Is Evaluated". Departement of Material Science and Engineering, Lehigh Univ., Bethlehem.

J. Wardenier, Y. Kurobane, J.A. Packer, G.J. van der Vegte and X.-L. Zhao. 2008, "Design Guide For Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading". Belanda.

Klas Weman. 2003. "Welding Processes Handbook". Cambridge.

Messler Robert. W. 2004. "Joining Of Material And Structures", Elsevier's Science & Technology Rights Department. Oxford.

Nur Syahroni, Hidayat Mas Irfan Purbawanto. 2012. "3D Finite Element Simulation Of T-Joint Fillet Weld Effect Of Various Welding Sequences Of The Residual Stresses And Distortions Chapter 24". INTECH. Surabaya.

Rasidi Nawir, Soehardjono Agoes MD, Dewi Sri Murni. 2011. "Performance Of Steel Structures Under Fatigue Cyclic Loading", Jurusan Teknik Sipil, Universitas Brawijaya. Malang.

Suratman Rochim. 2012. "API (Asosiasi Pengelasan Indonesia) - Beberapa Kasus Pada Pengelasan Baja". <http://www.api-iws.org/berita/artikel/26-beberapa-kasus-pada-pengelasan-baja.html>.

S. Ziaee, M. H. Kadivar and K. Jafarpur. 2008. "A Sequence Scheme To Reduce The Residual Stresses In Welding Of Circular Elements", Shiraz University Dept. of Mechanical Engineering. Iran.

Teng, T.L. dan Lin, C.C. 1998. "Effect Of Welding Conditions On Residual Stresses Due To Butt Welds, International Journal Of Pressure Vessels And Piping, Vol. 75, 857-864".

Teng, T.L, Fung, C.P., Chang, P.H. dan Yang, W.C. 2001. "Analysis Of Residual Stresses And Distortions In T-Joint Fillet Welds, International Journal Of Pressure Vessels And Piping, Vol. 78, 523-538".

Teng, T.L, Chang, P.H. dan Tseng, W.C. 2003. "Effect Of Welding Sequences On Residual Stresses, Computers And Structures, Vol. 81, 273-286".

ULTIMET®. "Welding Guidelines". Haynes International, California. USA

W. Piekarska, M. Kubiak, Z. Saternus. 2011. "Numerical Modelling Of Thermal Phenomena In Laser Beam And Hybrid Welding Processes Using Abaqus FEA". Department of Mechanics and Machine Design Foundations, Czestochowa University of Technology, Dabrowskiego 73, 42-200 Czestochowa, Poland.

Wang Wei, Chen Yi-Yi. 2006. "Hysterictic Behavior Of Tubular Joints Under Cyclic Loading". Department of Building Engineering, Tongji University. Shanghai, China.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di kota Kertosono pada tanggal 12 September 1983, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Dengan nama **Dafit Arifianto**, penulis telah menempuh sekolah formal TK, SDN Kutorejo 1, SLTP 1 Kertosono dan SLTA 1 Negeri Kertosono. Pada tahun 2002 penulis melanjutkan sekolah di Perguruan Tinggi Negeri Institut Teknologi Sepuluh Nopember ITS Jurusan D3 Teknik Sipil ITS. Setelah lulus Jurusan D3 Teknik Sipil ITS, penulis melanjutkan ke jenjang yang lebih tinggi S1 Teknik Sipil ITS Surabaya pada tahun 2006 dan lulus pada tahun 2010. Kemudian melanjutkan studi Program Pascasarjana Bidang Struktur di Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS Surabaya dan terdaftar dengan NRP 3113202003 pada tahun 2013 dan lulus pada tahun 2015.

Di Jurusan Teknik Sipil ini penulis mengambil Tesis bidang Finite Element Method dengan judul “STUDI PERILAKU SAMBUNGAN T-JOINT PIPA BAJA AKIBAT BEBAN CYCLIC DENGAN SIMULASI FINITE ELEMENT METHOD”. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam mengikuti berbagai macam seminar.

Apabila pembaca ingin berkorespondensi dengan Penulis, dapat menghubungi melalui email : ayra0909@gmail.com.

Penulis