



Tesis - MO142528

**ANALISA *NOTCH-STRESS* DAN *STRESS INTENSITY FACTOR* UNTUK *FATIGUE ASSESSMENT* PADA
SAMBUNGAN LAS BERPENEGAR MEMANJANG**

AGUNG PRASETYO UTOMO

NRP. 4114 201 003

DOSEN PEMBIMBING

NUR SYAHRONI ST. MT. Ph.D.

Ir. HANDAYANU, M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK DAN PERANCANGAN BANGUNAN LAUT

PROGRAM PASCASARJANA TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016



Thesis - MO142528

NOTCH-STRESS AND STRESS INTENSITY FACTOR ANALYSIS FOR FATIGUE ASSESSMENT OF GUSSET FILLET WELDED JOINTS

AGUNG PRASETYO UTOMO

REG. 4114 201 003

SUPERVISOR

NUR SYAHRONI ST. MT. Ph.D.

Ir. HANDAYANU, M.Sc., Ph.D.

MASTER PROGRAM

STUDY PROGRAM IN DESIGN OF OCEAN STRUCTURE ENGINEERING

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

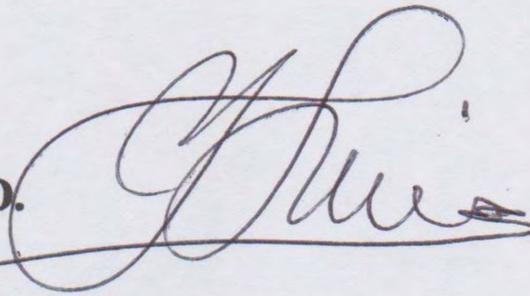
Agung Prasetyo Utomo

NRP. 4114 201 003

Tanggal Ujian : 22 Juli 2016
Periode Wisuda : September 2016

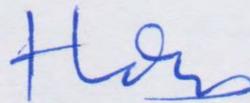
Disetujui oleh :

1. Nur Syahroni, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19730602 199903 1 002



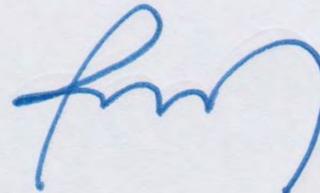
(Pembimbing I)

2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19630728 198803 1 001



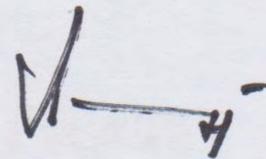
(Pembimbing II)

3. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, ST., MT.
NIP. 19710508 199703 1 001

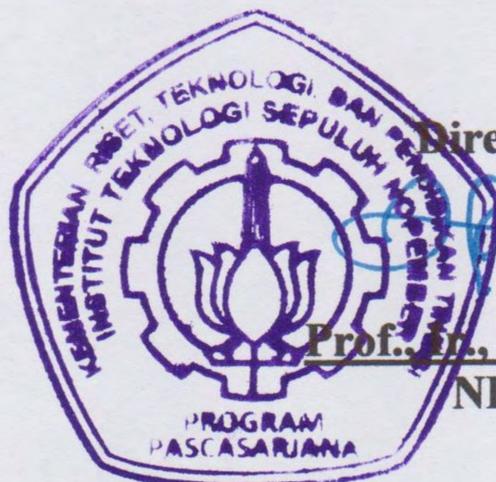


(Penguji)

4. Yoyok Setyo Hadiwidodo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19711105 199512 1 001



(Penguji)



Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Dr. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.

NIP. 19601202 198701 1 001

**ANALISA NOTCH-STRESS DAN STRESS INTENSITY FACTOR
UNTUK FATIGUE ASSESSMENT PADA SAMBUNGAN LAS
BERPENEGAR MEMANJANG**

Nama Mahasiswa : Agung Prasetyo Utomo
NRP : 4114 201 003
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, ST., MT., Ph.d.
Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.d.

ABSTRAK

Prediksi umur sambungan pengelasan pada struktur seperti pada kapal, dermaga serta bangunan lepas pantai saat ini menjadi hal yang sangat penting untuk dikaji. Hal ini dilakukan untuk menjamin struktur tersebut mampu memenuhi fungsinya dan bertahan dalam menahan moda keruntuhan pada saat operasional struktur tak hanya menahan beban statis pada struktur itu sendiri, tetapi juga mengalami pembebanan secara berulang-ulang yang berasal dari kondisi lingkungan. Faktor yang menyebabkan keruntuhan/kegagalan suatu struktur (*failure*) diantaranya: tubrukan dan kandas, *yielding* akibat tarikan, *buckling*, retak kelelahan (*fatigue*), serta kepecahan (*fracture*). Penelitian ini dilakukan untuk menentukan prediksi umur kelelahan melalui dua metode yang berbeda. Metode yang digunakan yaitu metode *notch stress* dan metode *fracture mechanics* terhadap suatu sambungan las berupa sambungan las berpenegar memanjang.

Notch stress adalah salah satu metode analisa perkiraan umur kelelahan dengan memodelkan bentuk las pada spesimen sesuai dengan keadaan sebenarnya. Saat pengelasan, akan timbul takikan (*notch*) akibat ketidaksempurnaan proses las. Diskontinuitas akibat perubahan geometri menyebabkan timbulnya konsentrasi tegangan di daerah tersebut yang diwakili dengan suatu parameter yang disebut dengan *Stress Concentration Factor* (SCF). Hasil akhir yang diperoleh diantaranya konsentrasi tegangan (SCF) sebesar 3.26 kali lebih besar dari tegangan yang diberikan, umur kelelahan spesimen sebesar $1,054 \times 10^6$ cycle yang bersesuaian dengan hasil eksperimen.

Pada metode *fracture mechanics* prediksi umur kelelahan dari spesimen dilakukan dengan menentukan retak awal, dilanjutkan dengan perhitungan *Stress Intensity Factor* (SIF) hingga retak akan menjalar dengan batas dari ketebalan spesimen hingga mengalami kegagalan. Peristiwa penjalaran retak ini dapat dianalisa dengan persamaan Paris-Law hingga didapatkan umur kelelahan pada spesimen. Hasil akhir yang diperoleh untuk umur kelelahan sebesar $1,132 \times 10^6$ cycle yang juga mendekati dengan hasil eksperimen.

Kata kunci : *Fatigue life, notch stress, SCF, fracture mechanics, SIF*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

NOTCH-STRESS AND STRESS INTENSITY FACTOR ANALYSIS FOR FATIGUE ASSESSMENT OF GUSSET FILLET WELDED JOINTS

Student Name : Agung Prasetyo Utomo
REG : 4114 201 003
Supervisor : Nur Syahroni, ST., MT., Ph.d.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.d.

ABSTRACT

Life prediction welded joints on structures such as ships, docks and offshore structures is very important procedure to ensure that structure is able to fulfill its function intended service life during operational stages, structure have to withstand not only the static load, but also dynamic loading from environmental conditions. Some factors may cause collapse / failure of a structure including: impact, yield, buckling, fatigue crack, and brittle fracture.

Notch stress is one of analysis methods for fatigue life by estimation modeling weld geometry of the specimen forms as closed as the real condition. Welding imperfections is normally occurred lead to geometrical discontinuities which causing stress concentrations that characterized by a parameter so called Stress Concentration Factor (SCF). From the finite element analysis, SCF for model 3.26 and the fatigue life is 1.054×10^6 cycle that in accordance with the experiments results.

Fatigue life assessment for specimens in fracture mechanics methods start with crack initiation then continued with calculation of Stress Intensity Factor (SIF). Crack propagation is subsequently carried out up to through thickness of spesimen. Crack propagation can be analyzed using Paris-law to obtain fatigue life of specimen. Fatigue life using fracture mechanics results in 1.132×10^6 cycle which closed to the experimental results.

Keywords : Fatigue life, notch stress, SCF, fracture mechanics, SIF

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	3
1.3 TUJUAN.....	4
1.4 MANFAAT.....	4
1.5 BATASAN MASALAH.....	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.2 DASAR TEORI	10
2.2.1 Konsep Pembebanan.....	11
2.2.2 Tegangan Lokal (<i>Nominal Stress, Hotspot Stress dan Notch Stress</i>).....	12
2.2.3 <i>Stress Concentration Factor (SCF)</i>	17
2.2.3 Kurva S-N	18
2.2.4 <i>Fracture Mechanics</i>	20
2.2.4.1 Tahap terjadinya retak	21
2.2.4.2 Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM).....	24
2.2.4.3 SIF dari Persamaan Retak Semi Elliptical	28
2.2.4.4 Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM).....	29
2.2.4.5 Umur Kelelahan.....	30
2.2.5 Pemodelan Numerik dengan Metode Elemen Hingga (FEM).....	30

BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1	DIAGRAM ALIR.....	33
3.2	PENJELASAN DIAGRAM ALIR Pengerjaan TESIS.....	34
3.2.1	Langkah-langkah pengerjaan.....	34
BAB 4	ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1	HASIL PEMODELAN DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1.1	Hasil Pemodelan dengan metode <i>notch stress</i>	51
4.1.1.1	Pembebanan statis dan kondisi batas (boundary condition).....	52
4.1.1.2	Meshing pada spesimen.....	54
4.1.1.3	Tegangan notch (notch stress) dan Stress Concentration Factor (SCF).....	55
4.1.1.4	Distribusi tegangan pada spesimen.....	57
4.1.1.5	SN Curve.....	58
4.1.1.6	Umur kelelahan.....	60
4.1.2	Hasil Pemodelan dengan metode <i>Fracture mechanics</i>	63
4.1.2.1	Pemodelan awal, pembebanan (load) dan kondisi batas (boundary condition).....	63
4.1.2.2	Stress Intensity Factor /SIF (K_I).....	65
4.1.2.3	Validasi Nilai SIF.....	68
4.1.2.4	Perbandingan nilai SIF (ΔK).....	69
4.1.2.5	Laju Perambatan Retak (Crack Propagation) dan Umur kelelahan (Fatigue Life).....	71
BAB 5	PENUTUP.....	73
5.1	KESIMPULAN.....	73
5.2	SARAN.....	75
	DAFTAR PUSTAKA.....	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1	Aplikasi las fillet tipe T pada girder kapal	1
Gambar 2-1	Letak Hot Spot Stress pada sambungan lasan dan asumsi fictitious notch radius (Effective Notch Stress) (Schijve, 2012)	8
Gambar 2-2	Jenis pembebanan dengan Constant-Amplitude Loading (Syahroni,2015).....	11
Gambar 2-3	Jenis pembebanan dengan Variable-Amplitude Loading (Syahroni,2015).....	12
Gambar 2-4	Nominal stress pada balok (beam) (Martinsson,2005).....	13
Gambar 2-5	Definisi dari tipe hot-spot stress (Neimi, Fricke & Maddox, 2006)	14
Gambar 2-6	Analisis dari effective notch stress (DNV-RP-C203,2010).....	15
Gambar 2-7	Bentuk rounding (notch) pada weldtoe untuk masing-masing butt-weld, fillet-weld dan butt weld disertai undercuts dengan kedalaman (IIW,2009).....	15
Gambar 2-8	Type mesh dengan menggunakan element quadratic (IIW,2009).	16
Gambar 2-9	Hubungan Nominal Strees, Hotspot Stress dan Notch Stress (DNV-RP-C203,2010).....	17
Gambar 2-10	Design dari kurva S-N (Syahroni,2015).....	20
Gambar 2-11	Perbandingan kurva S-N dengan fracture mechanics (Schijve,2012)	20
Gambar 2-12	Tahapan dari fatigue life serta faktor yang relevan (Jaap Schijve,2012).....	22
Gambar 2-13	Grafik Paris Law (Barsom dan Rolfe,1999).....	23
Gambar 2-14	Mode deformasi retak (Barsom dan Rolfe,1999).....	25
Gambar 2-15	Koordinat system dan komponen tegangan disekitar ujung retak (Barsom dan Rolfe,1999)	27
Gambar 2-16	Retak semi elliptical dan flaw shape parameter (Barsom dan Rolfe,1999).....	28
Gambar 2-17	Contoh jenis elemen dalam FEM (ANSYS,2013)	31
Gambar 2-18	Beberapa rekomendasi untuk element solid (Wang, et al., 2004) .	32

Gambar 3-1	Diagram alir untuk pengerjaan tesis	33
Gambar 3-2	Geometri spesimen sambungan las berpenegar memanjang (Syahroni,2014).....	36
Gambar 3-3	Langkah pemodelan profile las yang digunakan (Syahroni,2014)	36
Gambar 3-4	Kondisi batas/boundary conditions yang digunakan (Syahroni,2014).....	38
Gambar 3-5	Spesimen sambungan las berpenegar memanjang dengan notch ..	39
Gambar 3-6	Spesimen sambungan las berpenegar memanjang dengan notch untuk 1/8 bagian	39
Gambar 3-7	Spesimen sambungan las berpenegar memanjang dengan ukuran notch sebesar 1 mm	40
Gambar 3-8	ukuran mesh untuk setiap bagian pada sambungan las berpenegar memanjang	41
Gambar 3-9	Jenis dan besar pembebanan fatigue pada sambungan las berpenegar memanjang	42
Gambar 3-10	Spesimen untuk metode fracture mechanics	43
Gambar 3-11	Meshing pada spesimen.....	44
Gambar 3-12	Skema bentuk semi-elliptical crack.....	45
Gambar 3-13	Pengaturan awal untuk ukuran dari crack (a dan c) yang dianalisa	46
Gambar 3-14	Hasil pemodelan crack untuk nilai a = 0,5 mm dan c = 1,667 mm	46
Gambar 4-1	Pemodelan awal meshing spesimen dengan notch.....	51
Gambar 4-2	Pembebanan pada spesimen	52
Gambar 4-3	Berbagai kondisi batas yang diberikan pada spesimen	53
Gambar 4-4	Titik tinjauan dalam meshing sensitivity.....	54
Gambar 4-5	Grafik meshing sensitivity pada spesimen	55
Gambar 4-6	Nilai maximum prinsipal stress pada spesimen.....	56
Gambar 4-7	Nilai dan letak maximum prinsipal stress pada spesimen	56
Gambar 4-8	a. Analisa tegangan sepanjang garis dari spesimen menggunakan line path	58
Gambar 4-9	Kondisi pembebanan fatigue jenis constant amplitude loading (Syahroni,2014).....	59

Gambar 4-10 S-N Curve yang digunakan	59
Gambar 4-11 Ukuran mesh yang sudah sesuai serta hasil umur kelelahan yang diperoleh	60
Gambar 4-12 a. Hasil nilai umur kelelahan (fatigue) pada spesimen dengan pemodelan numerik FEM.....	62
Gambar 4-13 Pembebanan dan syarat batas yang dilakukan melalui metode numerik FE	63
Gambar 4-14 Nilai dan letak maksimum prinsipal stress pada spesimen	64
Gambar 4-15 Kondisi real spesimen pada saat eksperimen (Syahroni,2014)	65
Gambar 4-16 Pembuatan model dengan retakan (crack).....	66
Gambar 4-17 Perolehan nilai SIF dengan pemodelan FEM.....	67
Gambar 4-18 Grafik perbandingan nilai K_I melalui hasil metode analitis dan pemodelan numerik FEM.....	69
Gambar 4-19 Grafik Perbandingan penambahan panjang retak terhadap nilai SIF (K_I).....	70

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2-1	Rekomendasi untuk ukuran element (along and normal to notch surface) (IIW,2009)	16
Tabel 2-2	Rincian dari SN-Curve-dengan jenis pendinginan udara (Almar-Naess,1985)	19
Tabel 3-1	Data Geometri dari spesimen sambungan las berpenegar memanjang (Syahroni,2014).....	36
Tabel 3-2	Data material penyusun spesimen (Syahroni,2014)	37
Tabel 3-3	Mechanical properties dari spesimen (Syahroni,2014)	37
Tabel 3-4	Besar pembebanan yang digunakan (Syahroni,2014)	38
Tabel 3-5	Perhitungan nilai a dan 2C	45
Tabel 3-6	Variasi nilai a dan c untuk pemodelan numerik dengan FEM	47
Tabel 4-1	Hasil metode meshing sensitivity pada spesimen	54
Tabel 4-2	Nilai SCF pada tegangan notch	57
Tabel 4-3	Validasi umur kelelahan dengan nilai N	61
Tabel 4-4	Hasil perolehan nilai SIF yang diperoleh dari pemodelan numerik FEM.....	68
Tabel 4-5	Validasi nilai KI melalui perhitungan (analitis) vs pemodelan numerik FEM.....	69
Tabel 4-6	Hasil perolehan nilai perbandingan nilai SIF (ΔK)	70
Tabel 4-7	Perhitungan laju perambatan retak dan umur kelelahan (Fatigue Life) pada spesimen.....	71

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN 1 Data hasil eksperimen (Data Validasi)
- LAMPIRAN 2 SN-Curve
- LAMPIRAN 3 Perolehan nilai SIF untuk beberapa nilai (a dan c) yang berbeda melalui FEM
- LAMPIRAN 4 Proses perolehan nilai SIF melalui metode analitis

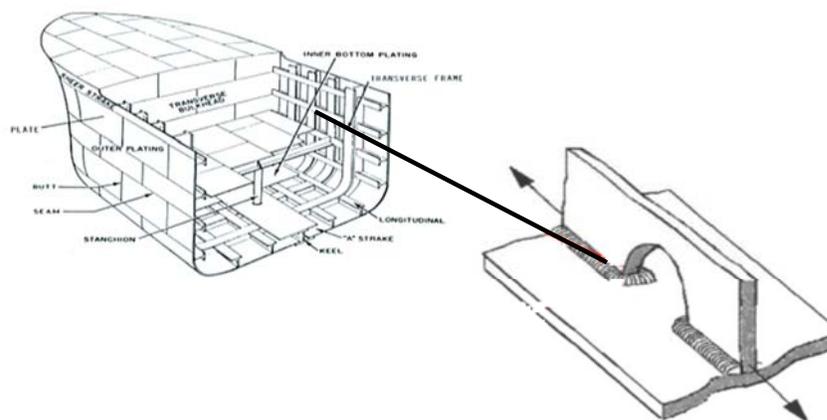
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Perkembangan dalam bidang industri perancangan bangunan lepas pantai, perkapalan, otomotif, dan bidang lainnya mengalami peningkatan jumlah produksi seiring dengan meningkatnya permintaan manusia akan kebutuhan ini. Pengelasan (*welding*) adalah salah satu bagian yang sangat mempengaruhi akan hasil produk yang dihasilkan. Menurut *American Welding Society* (1989), Pengelasan adalah proses penyambungan logam atau non logam yang dilakukan dengan memanaskan material yang akan disambung hingga temperatur las yang dilakukan secara dengan atau tanpa menggunakan tekanan (*pressure*), hanya dengan tekanan (*pressure*), atau dengan atau tanpa menggunakan logam pengisi (*filler*). Salah satu jenis pengelasan yaitu pada sambungan las plat berpenegar panjang yang banyak digunakan pada pembuatan girder-girder bentuk I atau H untuk *deck offshore platform*, penyambungan *girder* dan *stiffener* dengan lambung kapal, penyambungan struktur jembatan atau pada *frame* penyangga *pressure vessel*. Gambar 1.1 berikut merupakan contoh dari aplikasi pengelasan pada *girder* kapal.



Gambar 1-1. Aplikasi las *fillet* tipe T pada girder kapal

Proses penyambungan dengan menggunakan pengelasan memiliki kelebihan dimana biaya, dan waktu dapat berjalan secara efektif dan efisien serta

hasil produk yang dihasilkan lebih baik dari pada dengan metode penyambungan sebelumnya, namun sambungan yang dihubungkan dengan proses pengelasan juga memiliki kekurangan dimana biasanya kekuatan struktur akan mengalami penurunan didaerah pengelasan, hal ini disebabkan terjadi pemusatan tegangan dan biasanya retakan awal akan muncul pada sambungan lasan tersebut. Permasalahan yang sering timbul pada struktur lepas pantai adalah ketika fase operasional dimana struktur tak hanya menahan beban statis pada struktur itu sendiri, tetapi juga mengalami pembebanan secara berulang-ulang yang berasal dari kondisi lingkungan. Hal ini menyebabkan struktur mengalami kelelahan (*fatigue*) dan memiliki umur kelelahan tertentu, termasuk pada struktur las ini.

Menurut Rosyid dan Setyawan (2000), empat mekanisme utama yang menyebabkan kegagalan struktur disamping tubrukan dan kandas adalah luluh (*yield*) akibat tarikan atau tekanan yang berlebih, *buckling* akibat ketidakstabilan geser atau tekan, retak kelelahan (*fatigue*), serta kepecahan (*fracture*). *Fatigue* secara sederhana dideskripsikan sebagai kelelahan suatu struktur setelah menerima beban yang berulang-ulang (*cyclic loading*). Hal ini biasanya terjadi pada sambungan las yang mengalami beban berulang karena daerah tersebut merupakan daerah *diskontinuitas* yang rentan terhadap cacat dan keretakan akibat adanya konsentrasi tegangan. Akumulasi kegagalan tersebut dapat menyebabkan pengurangan properti mekanik seperti *strength* dan *stiffness* secara perlahan-lahan dan signifikan, sehingga nantinya terjadi keretakan (*fracture*) dan berakhir pada kegagalan struktur (Shenoi dan Wekkicome, 1993).

Beberapa pendekatan untuk mengetahui nilai tegangan yang terjadi didaerah las dapat menggunakan beberapa model pendekatan diantaranya *Nominal Stress*, *Hotspot Stress* dan *Notch Stress*. Perbedaan diantara ketiga model pendekatan tersebut terletak pada kebutuhan ketelitian data yang akan diperoleh. Menurut Syahroni (2014) pendekatan *notch stress* adalah salah satu dari beberapa pendekatan lokal stress (tegangan lokal) yang mencakup efek kombinasi dari global geometri dan lokal geometri yang disebabkan oleh takikan las (*weld notch*), pendekatan ini merupakan pendekatan yang paling teliti dibandingkan dengan lainnya. Konsentrasi tegangan lokal pada struktur atau spesimen akibat beban luar biasanya disebut dengan

Stress Concentration Factor (SCF). SCF ini akan memperbesar tegangan yang terjadi yang berakibat semakin besar pula *fatigue damage* sambungan. Sehingga semakin besar *fatigue damage*, semakin pendek *fatigue life* sambungan.

Selain pencarian konsentrasi tegangan melalui nilai SCF, analisa lainnya untuk struktur yang ada telah mengalami keretakan dapat dilakukan dengan metode pendekatan *fracture mechanics*. Didalam *fracture mechanics* dapat diperoleh banyak informasi tentang beberapa parameter yang dapat menunjukkan dalam memprediksi umur dari suatu komponen (sambungan las) berdasarkan waktu perjalanan retak. Diantaranya menggunakan persamaan *paris law* dengan *Stress Intensity Factor* (SIF) yaitu intensitas *stress* yang terdapat pada bagian ujung *crack* atau retakan akibat akumulatif beban. Nilai SIF inilah yang merupakan salah satu komponen penting dalam penghitungan *fracture mechanics* yang nantinya akan menuju pada umur kelelahan sampai struktur ini akan bertahan menahan beban luar.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Dengan mengacu pada latar belakang permasalahan yang sudah dijabarkan diatas, maka permasalahan utama yang akan dibahas dalam tesis ini adalah :

1. Bagaimana mendapatkan tegangan *notch (notch stress)* dan mendapatkan nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) pada sambungan las berpenegar memanjang ?
2. Bagaimana mendapatkan *Stress Intensity Factor* (SIF) pada sambungan las berpenegar memanjang ?
3. Bagaimana memprediksi umur kelelahan dengan menggunakan jenis tegangan *notch (notch stress)* pada sambungan las berpenegar memanjang ?
4. Bagaimana memprediksi umur kelelahan menggunakan metode *fracture mechanics* dengan pendekatan *Stress Intensity Factor* (SIF) pada sambungan las berpenegar memanjang ?

1.3 TUJUAN

Penulisan tesis ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui cara memperoleh dan menghitung tegangan *notch* (*notch stress*) dan mendapatkan nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) pada sambungan las berpenegar memanjang
2. Mengetahui cara memperoleh dan menghitung *Stress Intensity Factor* (SIF) pada sambungan las berpenegar memanjang
3. Menghitung perkiraan umur kelelahan dengan menggunakan jenis tegangan *notch* (*notch stress*) pada sambungan las berpenegar memanjang
4. Menghitung perkiraan umur kelelahan dengan menggunakan metode *fracture mechanics* dengan pendekatan *Stress Intensity Factor* (SIF) pada sambungan las berpenegar memanjang

1.4 MANFAAT

Pemodelan numerik dengan pendekatan *Notch Stress dan Fracture Mechanics* pada sambungan las plat berpenegar panjang dengan menggunakan bantuan metode numerik FEM, diharapkan dapat membantu akademisi maupun praktisi dalam menghitung tegangan *notch* dan perolehan nilai SIF serta memperkirakan umur kelelahan yang terjadi pada struktur las khususnya pelat berpenegar panjang, dikarenakan sebelum melakukan pada studi pemodelan ini telah dilakukan sebuah eksperimen terhadap benda uji (spesimen) yang kemungkinan dapat diambil kesimpulan yang lebih umum.

1.5 BATASAN MASALAH

Berikut ini batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam pengerjaan tesis antara lain:

1. Objek penelitian adalah sambungan las berpenegar panjang
2. Bentuk objek serta pengelasan mengikuti bentuk spesimen saat eksperimen

3. Nilai radius *notch* mengikuti kriteria (DNV-RP-C203,2010), (J.Martinsson,2005) dan (Radaj, 2006) dengan nilai $\rho=1$ mm
4. Data material yang digunakan mengikuti data spesimen saat eksperimen (Syahroni,2014)
5. Jenis retak yang dianalisa adalah *surface crack*
6. Metode yang digunakan adalah *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM)
7. Nilai perbandingan a dan $2c$ sebesar 0,15 dan *increment crack* sebesar 1,1 mm serta nilai a_{cr} hingga batas ketebalan spesimen sebesar 12 mm.
8. Material yang digunakan adalah *Ferrite Pearlite Steel*.
9. Besar dan jenis pembebanan adalah 100 MPa dengan jenis pembebanan tipe *constant amplitud loading* ($R=0$)
10. *Residual stress* yang terjadi pada spesimen diabaikan

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan tesis ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang tesis yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang akan dicapai, manfaat dari penelitian, batasan-batasan masalah serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini mencakup tinjauan pustaka berupa penelitian-penelitian yang berhubungan dengan tesis ini, serta dasar-dasar teori yang akan digunakan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah-langkah pengerjaan tesis, data-data yang akan digunakan, serta pemodelan dan perhitungan yang akan dilakukan.

BAB IV ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil analisa, baik pemodelan maupun perhitungan dalam pengerjaan tesis.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menyajikan tesis dari analisa yang telah dilakukan sesuai perumusan masalah, serta saran yang dapat digunakan unuk menyempurnakan penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

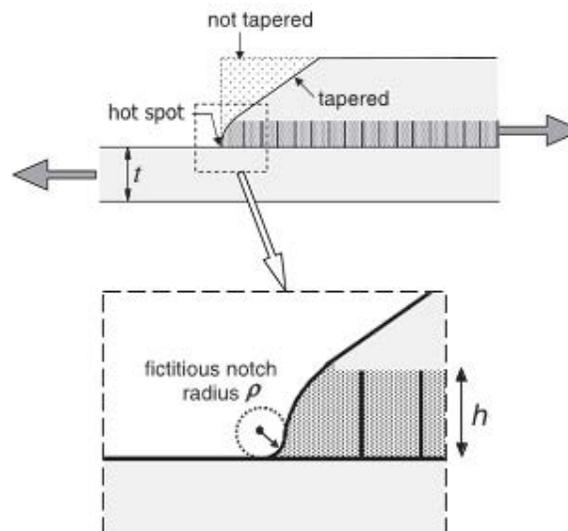
Pada bab ini, akan dibahas secara rinci tentang tinjauan pustaka dan dasar teori yang berkaitan dengan permasalahan yang dibahas pada tesis, sehingga dapat menjadikan tambahan bahan rujukan yang telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya, maupun teori yang berkaitan dengan permasalahan.

2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi mendorong manusia menciptakan inovasi dan banyak melakukan studi baik penelitian, eksperimen maupun pendekatan numerik dalam hal mencari jawaban dari permasalahan yang selama ini terjadi, begitu juga pada perkembangan industri. Material yang digunakan menjadi hal yang utama dalam melakukan desain agar aman dan tidak mengalami kelelahan serta kegagalan. Kelelahan pada material dapat didefinisikan sebagai patahnya material setelah mengalami pembebanan berulang dalam sejumlah siklus dengan mengalami beberapa tahapan diantaranya retak awal (*crack initiation*), perambatan retak (*crack propagation*) dan patah akhir secara cepat (*final fracture*). Retakan ini dapat tumbuh seiring dengan perubahan waktu karena berbagai macam sebab seperti *fatigue*, *creep* dan tegangan kritis (Cahyono, 2004). Pada struktur yang dikenai pembebanan maka distribusi tegangan disekitar ujung retak (*crack*) sangat ditentukan oleh suatu parameter yang disebut *Stress Intensity Factor* (SIF), dimana syarat kepatahan (*fracture*) akan terjadi bila intensitas tegangan yang bekerja pada suatu area mencapai intensitas tegangan kritis.

Pembahasan pada tesis ini akan dimulai dari analisa saat struktur belum mengalami retak yang akan didekati dengan pendekatan *notch stress*, selanjutnya dilakukan juga pemodelan tentang struktur yang mengalami retakan (*crack*) dengan menggunakan metode *fracture mechanics*. Dengan hasil akhir yang akan didapatkan adalah tentang umur kelelahan struktur.

Schijve (2012) mengatakan bahwa telah banyak makalah penelitian tentang *effective notch stress* dari sambungan las. Pada sambungan las, distribusi tegangan lokal di daerah *weld toe* (kaki lasan) umumnya dianggap sebagai masalah dasar dari sifat kelelahan pada sambungan las. Dimana yang telah diketahui dalam teori *Stress Concentration Factor* (SCF) bahwa nilai ini tidak dapat langsung diberikan pada *weld toe* (kaki lasan). Ia berfikir bahwa apa yang disebut SCF dapat digunakan sebagai suatu parameter alternatif untuk analisa lokal didaerah tegangan *hot spot* (*hot spot stress*). *Hot spot stress* sendiri adalah tingkat tegangan (*stress level*) pada permukaan material yang dekat dengan kaki las.



Gambar 2-1 letak *Hot Spot Stress* pada sambungan lasan dan asumsi *fictitious notch radius* (*Effective Notch Stress*) (Schijve, 2012)

Tingkat tegangan (*stress level*) dapat diperoleh dengan cara :

1. Ekstrapolasi hasil strain gages melalui percobaan, serta
2. Perhitungan dengan Metode Elemen Hingga / *Finite Elemen Method* (FEM).

Pendekatan kedua lebih disarankan dalam *International Institute of Welding* (IIW,2009) walaupun dalam konsep *meshing* masih kasar. Namun permasalahan lain muncul ketika dalam mendefinisikan *meshing* seperti pada Gambar 2.1 diatas, permasalahan muncul pada saat sudut yang tajam (*runcing*) mengakibatkan singularitas yang konsentrasi tegangan yang tidak terbatas. Sehingga dapat dipergunakan sebagai informasi tambahan untuk *crack initiation life* (permulaan pertumbuhan retak).

Melanjutkan dari hal diatas, model pendekatan lain yang mulai banyak digunakan adalah *Effective Notch Stress*, sebuah model dengan profile lasan menggunakan radius, tidak berupa sudut yang tajam atau runcing, melainkan berupa radius yang melingkar. Sonsino, *et al* (2012) telah melakukan banyak eksplorasi dengan metode ini, hal yang penting adalah geometri pada struktur yang dikenai las dengan menggunakan *Effective Notch Stress* akan memiliki karakter takik (*notch*) tidak tajam. Ini menyiratkan bahwa perhitungan puncak tegangan (*peak stress*) berhubungan dengan nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) seperti pada takik (*notched*) struktur *non-welded*. Namun nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) akan tergantung pada distribusi beban dalam struktur lasan, sehingga hal ini dapat memberikan manfaat informasi untuk keperluan desain. Hal lain yang perlu dipertimbangkan adalah nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) tergantung juga oleh pemilihan *root radius* (ρ) dari *Effective Notch Stress*. Dimana nilai *root radius* (ρ) yang diusulkan yaitu $\rho = 1,0$ mm untuk pelat tebal ($t > 5$ mm) dan $\rho = 0,05$ mm untuk pelat tipis ($t \leq 5$ mm).

Setelah membahas tentang konsentrasi tegangan melalui metode *notch stress* dengan memperoleh nilai *Stress Concentration Factor* (SCF), metode selanjutnya untuk spesimen yang terdapat crack dalam hal ini adalah metode *fracture mechanics*. Dimana dalam menentukan *Stress Intensity Factor* (SIF) dapat dilakukan dengan cara metode eksperimen dan metode elemen hingga. Namun pada metode eksperimen ini masih terkendala waktu dan biaya, sehingga dikembangkan melalui metode elemen hingga untuk menentukan SIF. Teori yang dikembangkan untuk memahami hubungan antara ukuran, bentuk dan sifat suatu cacat (*flaws*) atau retak (*crack*) disebut mekanika kepecahan (*fracture mechanics*) (Brostow dan Cornelliuss, 1986).

Pada penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan penelitian dengan jenis eksperimen maupun dengan menggunakan pemodelan numerik untuk melakukan analisis umur kelelahan dengan metode *fracture mechanics*. (Ghidini dan Donne, 2009) telah berhasil menunjukkan kemungkinan penggunaan *fracture mechanics* untuk memprediksi umur kelelahan struktur. Dengan melakukan uji kelelahan untuk berbagai kondisi pengujian struktur yang dapat memberikan dasar praktis dan dipertanggungjawabkan untuk analisis struktur pada kondisi beban *in-service*, dengan

adanya korosi, atau dengan adanya tegangan sisa. Dimana hasil yang diperoleh pada eksperimen diperiksa lagi menggunakan *software* sehingga hasilnya valid.

Carpinteri, *et al* (2015) dalam jurnal tentang “*Fracture mechanics based approach to fatigue analysis of welded joints*” membahas tentang struktur las yang berbentuk *T-Joint* telah menunjukkan bahwa *fatigue crack* umumnya berkembang dan terjadi di daerah las dikarenakan di kedua bahan terjadi sifat heterogenitas (*mismatch*) dan adanya konsentrasi tegangan. Di dalam jurnal ini, perilaku *fatigue* pada material logam yang dilas dengan *T-joint* mengalami *siklik bending*. Perambatan retak dilakukan secara numerik dengan menggunakan *nilai stress-intensity factor* (SIF) yang diperoleh melalui analisa *finite element*. Selanjutnya geometri dan ukuran lasan *T-Joint* dipakai untuk membandingkan hasil numerik dengan data eksperimen yang ada dalam literatur. Setelah dilakukan analisa, diperoleh tentang hasil uji *fatigue* pada tahap eksperimental spesimen dan dilakukan komparasi dengan hasil analisa numerik, kesimpulan yang diperoleh adalah cukup memuaskan dimana pada hasil keduanya menunjukkan hasil hampir sama dan baik untuk dilakukan penilaian umur kelelahan (*fatigue life assessment*).

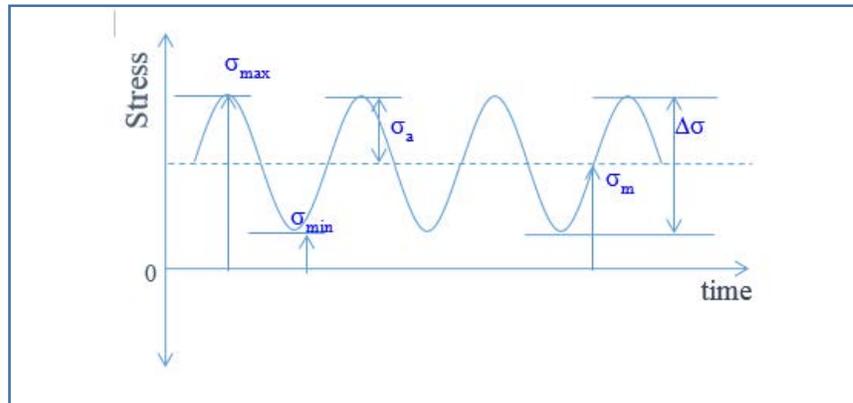
Berdasarkan permasalahan diatas, penulis ingin melakukan studi numerik melalui pemodelan spesimen pada sambungan las berpenegar memanjang dengan menggunakan bantuan metode numerik FEM, dimulai dari analisa struktur (*statis*) untuk mendapatkan nilai tegangan dan *displacemen* dengan dua pendekatan *notch stress* dan *fracture mechanics*, dilanjutkan pemodelan untuk mencari umur kelelahan dari struktur dengan hasil akhir berupa nilai N (jumlah siklus) pada masing-masing metode dengan menyesuaikan nilai N dari hasil eksperimen (dimana nilai N pada hasil eksperimen yang digunakan sebagai validasi).

2.2 DASAR TEORI

Berikut ini akan dibahas tentang dasar teori yang berkaitan dengan permasalahan yang akan diangkat pada penulisan proposal tesis ini.

2.2.1 Konsep Pembebanan

Menurut (Syahroni, 2015) secara garis besar pembebanan dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu *Constant-Amplitude Loading* dan *Variable-Amplitude Loading*. Untuk *Constant-Amplitude Loading* dapat dilihat pada Gambar 2.2 dibawah ini :



Gambar 2-2 Jenis pembebanan dengan *Constant-Amplitude Loading* (Syahroni,2015)

Dengan beberapa parameter :

- Parameter utama yang mempengaruhi dalam *fatigue* diantaranya adalah *stress range* ($\Delta\sigma$)

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.1)$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a \quad (2.2)$$

- *Mean stress* (σ_m)

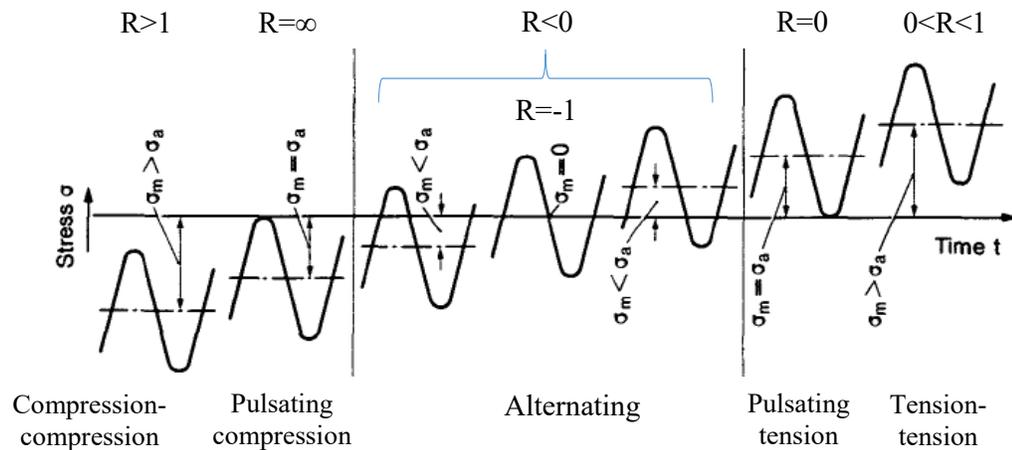
$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \quad (2.3)$$

- *Stress ratio* (R)

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.4)$$

Pada jenis pembebanan dengan *Variable-Amplitude Loading* berbeda dengan pembebanan yang terjadi dimana jenis pembebanan adalah fungsi sangat kompleks, dimana *probabilitas* dari urutan yang sama dan besarnya *stress range*

selama interval waktu sangat kecil. Jenis pembebanan dengan *Variable-Amplitude Loading* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut



Gambar 2-3 Jenis pembebanan dengan *Variable-Amplitude Loading* (Syahroni,2015)

2.2.2 Tegangan Lokal (*Nominal Stress, Hotspot Stress dan Notch Stress*)

Fatigue merupakan fenomena yang khas pada struktur (baik struktur pada daratan maupun struktur yang terletak pada perairan) yang terutama yang terbuat dari material baja. *Fatigue* merupakan kombinasi tegangan lokal yang bersifat dinamis (*dynamics stress*), tegangan sisa (*residual stress*), cacat (*defects*), kekasaran permukaan dan parameter lainnya. Dalam struktur yang dilas, daerah pada lasan merupakan kondisi paling lemah, dimana pada kondisi inilah pertumbuhan retak (*crack growth*) dimulai.

Tegangan lokal yang menyebabkan terjadinya *fatigue* diantaranya *Nominal Strees, Hotspot Stress, dan Notch Stress*. Pengertian *nominal stress* menurut Syahroni (2014) adalah suatu pendekatan konvensional untuk analisa *fatigue*, dimana tipe *stress* yang terjadi termasuk dalam *beam theory* untuk struktur sederhana, sehingga persamaan untuk *Nominal Strees* dirumuskan sebagai :

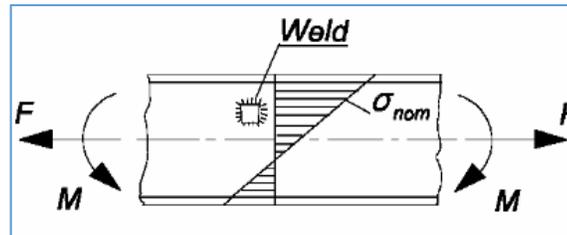
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

dimana :

σ = Nominal stress

F = Gaya

A = Luasan / Area



Gambar 2-4 *Nominal stress* pada balok (*beam*) (Martinson,2005)

Pada Gambar 2.4 diatas adalah ilustrasi tentang *nominal stress*. Selain memiliki kelebihan dengan persamaan yang hanya sederhana, namun pendekatan *nominal stress* memiliki kelemahan utama, yaitu :

- Dalam kasus geometri kompleks dan pembebanan kompleks, *nominal stress* tidak dapat mengartikan dengan jelas,
- Dalam pembuatan *design* dimensi las yang mempunyai geometri khusus, pendekatan *nominal stress* kemungkinan tidak sesuai dengan rincian struktural diklasifikasikan.

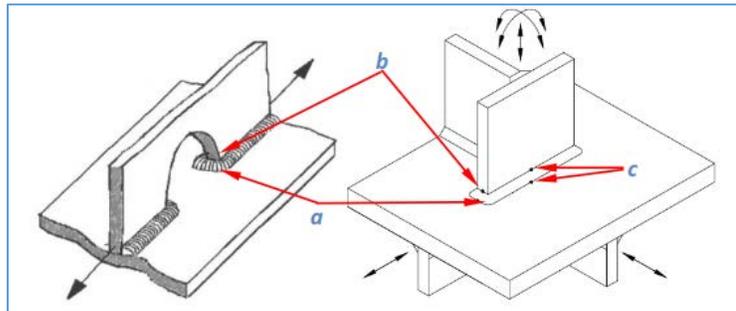
Berdasarkan beberapa kelemahan diatas, maka dilakukan cara untuk mengatasi keterbatasan ini dengan pendekatan yang bernama *Hotspot Stress* (Radaj, 1996; Bai, 2003; Neimi, Fricke & Maddox, 2006). *Hot-Spot Stress* adalah suatu istilah khusus yang digunakan untuk menggambarkan tegangan struktur pada lokasi *weld toe* dengan memperhitungkan konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang disebabkan oleh diskontinuitas struktur, namun dalam analisisnya masih belum memperhitungkan bentuk dari lasan. *Hot-Spot Stress* biasanya dikembangkan pada *offshore tubular joint*, dimana jika menggunakan pendekatan *nominal stress* maka sedikit informasi diperoleh untuk *design fatigue* sehingga muncul pendekatan ini, Syahroni (2014). *Hospot Stress* secara matematis dapat dirumuskan dalam persamaan 2.6 berikut

$$\sigma_{hs} = K_s \times \sigma_{nom} \quad (2.6)$$

Hotspot Stress pada struktur lempeng (*plate*) dikategorikan menjadi tiga jenis yakni berdasarkan lokasi pada lempeng (*plate*) dan orientasinya atau arah *weld toe*

- Hot spot tipe “a” yaitu lokasi *weld toe* diatas permukaan dari pelat dasar (*base plate*),
- Hot spot tipe “b” yaitu dibagian tepi/samping dari pelat penguat (*stiffener*)
- Hot spot tipe “c” yaitu dibagian sepanjang las memanjang, baik dipermukaan pelat dasar (*base plate*) dan pelat penguat (*stiffener*)

Gambaran tentang ketiga jenis *hotspot stress* ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2-5 Definisi dari tipe *hot-spot stress* (Neimi, Fricke & Maddox, 2006)

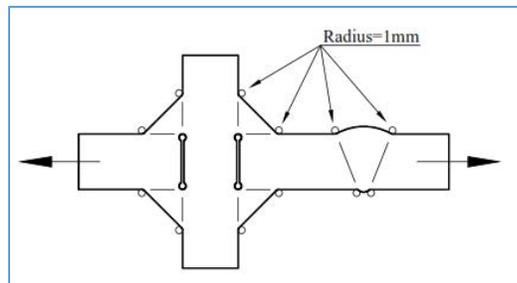
Sedangkan *Notch Stress* atau *Effective Notch Stress* adalah suatu pendekatan yang digunakan dalam analisa *fatigue assesment* selain dengan metode *nominal stress* dan *hot-spot stress* yang telah dibahas diatas. Pada metode *notch stress* bentuk geometri dari las dimodelkan sebagaimana saat eksperimen (mendekati kenyataan). Sebagaimana diketahui pada proses pengelasan, sangat sulit didapatkan adanya geometri (bentuk) las yang sempurna (*smooth*) sehingga muncul ketidaksempurnaan dalam hal geometri pengelasan. Ketidaksempurnaan dalam proses pengelasan salah satunya adalah berbentuk takikan (*notch*), hal inilah yang akan dimodelkan melalui metode *finite element* dengan bantuan *software* numerik untuk mendapatkan total tegangan pada *root* dari sebuah takikan (*notch*).

Beberapa literatur dan *Guidlines* untuk analisa *Notch Stress* diantaranya diterbitkan oleh (DNV-RP-C203,2010) dan (IIW,2009). Menurut DNV-RP C203,2010 untuk baja struktural nilai *effective notch radius root* sebesar

$r = 1,0 \text{ mm}$ yang telah diverifikasi untuk memberikan hasil yang konsisten, serta metode *effective notch stress* terbatas untuk beberapa kondisi diantaranya :

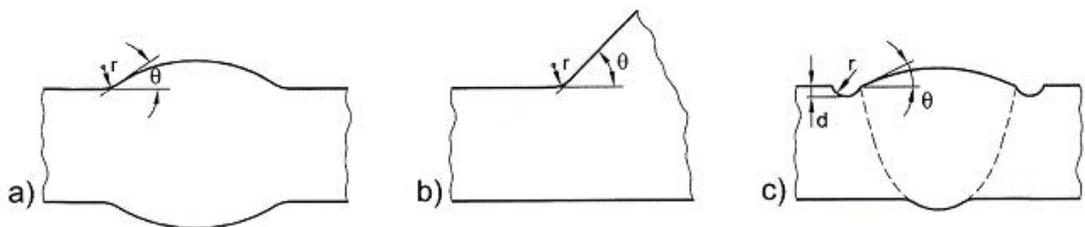
- Terbatas pada sambungan las yang diharapkan gagal dari *weld toe* atau *weld root*.
- Tidak berlaku di mana komponen tegangan yang cukup sejajar dengan las atau sejajar dengan celah *root*.
- Metode ini terbatas pada ketebalan $t \geq 5 \text{ mm}$. Untuk ketebalan dinding yang lebih kecil, metode ini belum diverifikasi.
- Metode ini cocok untuk perbandingan geometri alternatif.
Serta disarankan untuk *sudut flank* dari 30° untuk lasan butt dan 45° untuk pengelasan fillet.

Analisa dari *effective notch stress* dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut :



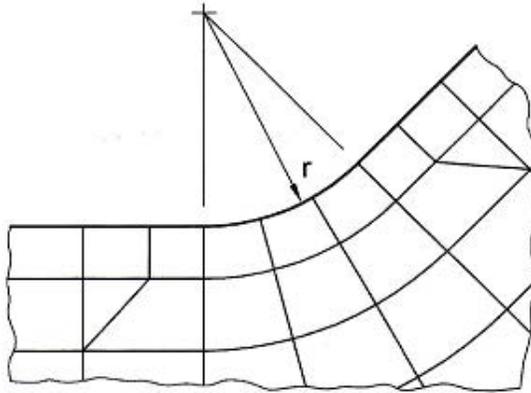
Gambar 2-6 Analisis dari *effective notch stress* (DNV-RP-C203,2010)

Pada *Guidlines* yang diterbitkan oleh *International Institute of Welding* (IIW, 2009) memberikan gambaran lebih dalam untuk modelling bentuk dan posisi *notch* pada lasan. Beberapa bentuk untuk model *notch* untuk beberapa jenis pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut :



Gambar 2-7 Bentuk *rounding (notch)* pada *weldtoe* untuk masing-masing *butt-weld*, *fillet-weld* dan *butt weld* disertai *undercuts* dengan kedalaman (IIW,2009)

Dokumen IIW juga dijelaskan bagaimana melakukan analisa tegangan serta meshing dengan beberapa tipe elemen yang akan digunakan pada analisa numerik menggunakan bantuan metode numerik FEM. Pada Gambar 2.8 berikut menjelaskan *type mesh* pada analisa *notch stress* dengan *element quadratic*.



Gambar 2-8 Type mesh dengan menggunakan *element quadratic* (IIW,2009)

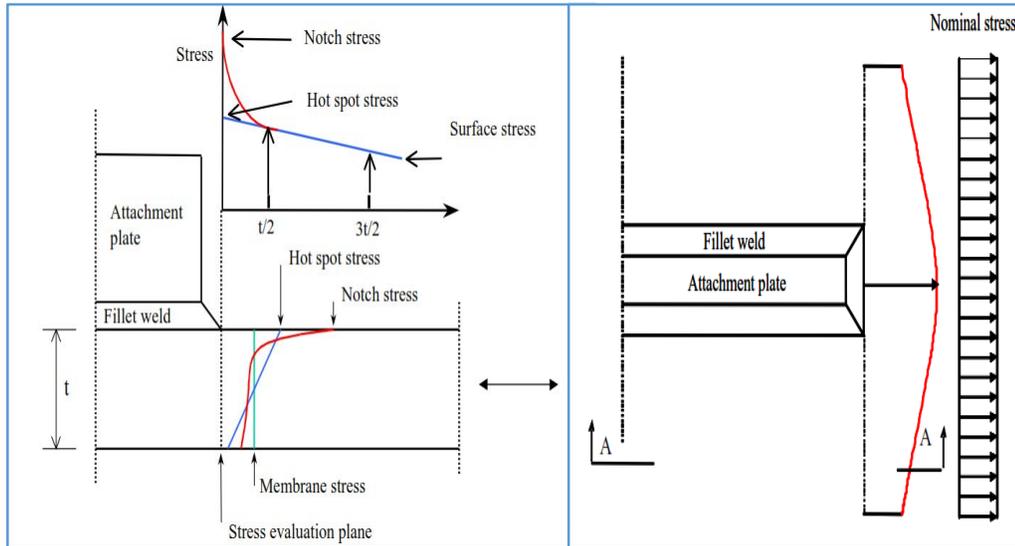
Berikut ini beberapa rekomendasi (IIW,2009) terkait masalah ukuran element dan jenis yang dapat digunakan sebagai pedoman dalam analisa *fatigue assesment* menggunakan metode *notch stress* dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2-1 Rekomendasi untuk ukuran element (*along and normal to notch surface*) (IIW,2009)

<i>Elemen type</i> (<i>displacement function</i>)	<i>Relative size</i>	<i>Size for</i> $r = 1 \text{ mm}$	<i>Size for</i> $r = 0,05 \text{ mm}$	<i>No. of elements over</i> 45 deg arc	<i>No. of elements over</i> 360 deg arc
<i>quadratic</i> (<i>e.g. with mid-side nodes</i>)	$\leq r/4$	$\leq 0,25 \text{ mm}$	$\leq 0,012 \text{ mm}$	≥ 3	≥ 24
<i>Linear*</i>	$\leq r/6$	$\leq 0,15 \text{ mm}$	$\leq 0,008 \text{ mm}$	≥ 5	≥ 40

**) Tegangan dapat menggunakan eksrapolasi pada free edge*

Dari ketiga jenis tegangan lokal yang terdapat pada sambungan las, baik *Nominal Strees*, *Hotspot Stress* dan *Notch Stress*, saling berkaitan antara jenis yang satu dengan yang lainnya, sehingga dapat digambarkan dalam sebuah persamaan berupa grafik keterkaitan anatara jenis yang satu dengan yang lain dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut :



Gambar 2-9 Hubungan *Nominal Strees, Hotspot Stress* dan *Notch Stress* (DNV-RP-C203,2010)

2.2.3 *Stress Concentration Factor (SCF)*

Stress Concentration Factor (SCF) yaitu sebuah efek konsentrasi tegangan pada struktur akibat beban luar atau perbandingan antara tegangan maksimum pada sambungan dengan tegangan nominal. Sedangkan menurut Tawekal, R.L, (2005) *Stress Concentration Factor (SCF)* adalah perbandingan antara tegangan di didaerah *hotspot* (tegangan maksimum) pada sambungan dengan tegangan nominal pada pemanpang.

Dalam sambungan las biasanya terjadi SCF pada lokasi tersebut. SCF ini akan memperbesar tegangan yang terjadi yang berakibat semakin besar pula *fatigue damage* sambungan. Sehingga semakin besar *fatigue damage*, semakin pendek *fatigue life* sambungan. Faktor ini dipengaruhi oleh besaran-besaran dari sambungan, konfigurasi sambungan, dan *load path* gaya. Jika SCF dirumuskan dalam persamaan, maka persamaan yang akan terbentuk yaitu

$$K_S = \frac{\sigma_{Hot-spot}}{\sigma_{nominal}} \quad (2.7)$$

Nilai SCF inilah yang merupakan salah satu komponen penting dalam perhitungan *fatigue damage* pada saat periode awal retak (*initial crack*), yang akan

dibahas lebih mendalam pada bagian selanjutnya. SCF diperlukan karena tegangan yang terjadi pada sambungan las tidak menyebar secara merata.

2.2.3 Kurva S-N

Kurva S-N atau S-N *curve* merupakan suatu pendekatan fatigue dengan berdasarkan konsep *strain energy*, dimana konsep *strain energy* menyatakan bahwa kerusakan akan terjadi ketika total *strain energy* pada saat n siklus dari variabel amplitudo pembebanan adalah sama dengan total energi dari N siklus dari konstan amplitudo pembebanan, dapat ditulis dalam persamaan matematik sebagai persamaan 2.8 berikut:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_m}{N_m} \quad (2.8)$$

Dimana n_i adalah jumlah siklus rentang tegangan (S_i) akibat pembebanan gelombang yang sebenarnya terjadi dan N_i adalah jumlah siklus rentang tegangan (S_i) yang menyebabkan kegagalan pada sambungan yang dapat diketahui melalui kurva *S-N*.

Data pengujian fatigue diperoleh dari amplitudo pembebanan yang konstan dan dianalisa secara statistik dan digambarkan dalam hubungan skala log-log dengan ΔS (*stress range*) vs N (*number of cycle to failure*), dengan persamaan sebagai berikut :

$$(\Delta S)^m \cdot N = K \quad (2.9)$$

atau dalam logaritmik adalah :

$$m \cdot \log (\Delta S) + \log N = \log K \quad (2.10)$$

dimana :

ΔS = *stress range*

N = *number of cycle to failure*

m = kemiringan dari kurva S-N

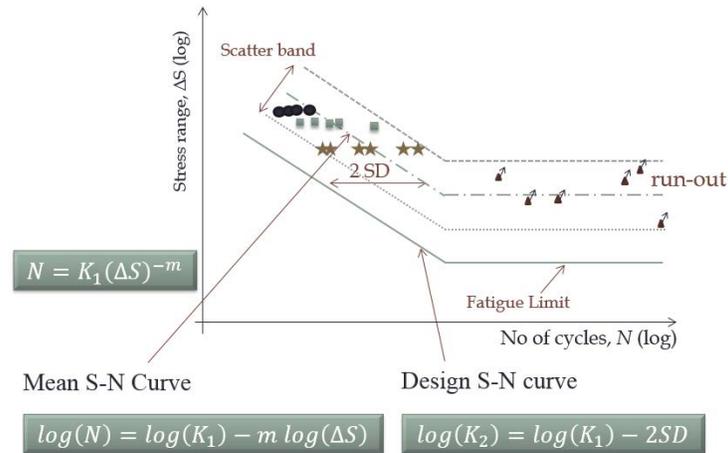
K = titik batas dari intercept diantara kurva S-N dan garis vertikal

Persamaan 2.10 merupakan suatu persamaan umum untuk mendapatkan nilai N yakni Nilai (jumlah siklus) dari suatu spesimen sampai mengalami kegagalan atau *failure*. Namun pada saat menganalisa menggunakan kurva S-N, diperlukan beberapa nilai awal berdasarkan jenis material yang dipergunakan pada saat eksperimen. Almar-Naess (1985) memberikan kriteria untuk beberapa kelas material sesuai dengan proses pendinginan yang dapat dilihat Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2-2 Rincian dari SN-Curve-dengan jenis pendinginan udara (Almar-Naess,1985)

N ≤ 10 ⁷					N > 10 ⁷	
Class	log a	log s	log ā	m	log ā	m
B	15,3697	0,1821	15,01	4,0	16,01	5,0
C	14,0342	0,2041	13,63	3,5	16,47	5,0
D	12,6007	0,2095	12,18	3,0	15,63	5,0
E	12,5169	0,2509	12,02	3,0	15,37	5,0
F	12,2370	0,2183	11,80	3,0	15,00	5,0
F2	12,0900	0,2279	11,63	3,0	14,72	5,0
G	11,7525	0,1793	11,39	3,0	14,32	5,0
W	11,5662	0,1846	11,20	3,0	14,00	5,0
T	12,6606	0,2484	2,16	3,0	15,62	5,0

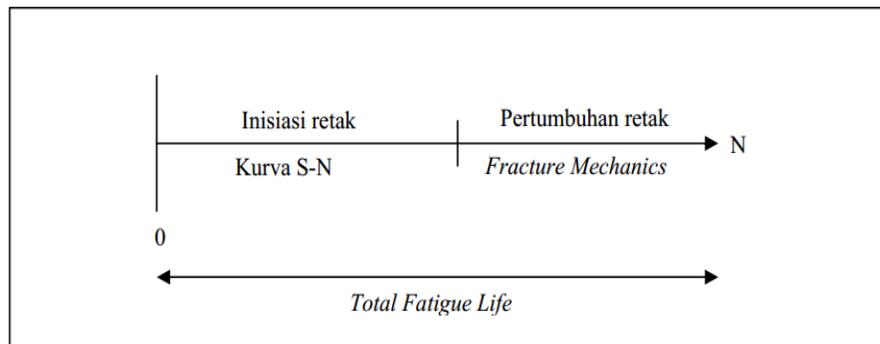
Nilai pada tabel inilah yang akan digunakan sebagai nilai masukan awal, sehingga pada saat analisa menggunakan bantuan metode numerik FEM dapat dihasilkan nilai N . Berikut ini adalah gambaran secara umum bentuk dari kurva S-N dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2-10 Design dari kurva S-N (Syahroni,2015)

2.2.4 Fracture Mechanics

Fracture mechanics (mekanika kepecahan) merupakan salah satu bagian dari mekanika yang membahas tegangan dan regangan pada struktur yang mengandung retak. Metode ini dikembangkan karena ketidakcocokan konsep perencanaan konvensional yang hanya didasarkan pada sifat-sifat umum material seperti kekuatan tarik (*tensile strength*), batas mulur (*yield stress*) maupun tegangan mulur (*buckling stress*) dimana konsep tersebut sangat tepat digunakan hanya pada struktur yang tidak memiliki cacat.



Gambar 2-11 Perbandingan kurva S-N dengan *fracture mechanics* (Schijve,2012)

Dari Gambar 2.11 dapat dilihat bahwa *Fracture mechanics* (mekanika kepecahan) digunakan untuk menganalisa bagaimana pertumbuhan retak atau perambatan retak jika dikenai beban berulang. Perambatan retak inilah yang nantinya digunakan

untuk menentukan umur kelelahan dan panjang retak yang dapat ditoleransi sebelum terjadi kegagalan struktur.

Menurut Broke (1987), metode mekanika kepecahan (*fracture mechanics*) bertujuan untuk :

1. Menentukan kekuatan umur sisa struktur sebagai fungsi ukuran retak
2. Menentukan ukuran retak yang diterima struktur
3. Menentukan waktu yang dibutuhkan bagi retak untuk merambat hingga mencapai ukuran kritisnya
4. Menentukan ukuran retak yang mungkin terjadi pada struktur pada awal masa operasinya
5. Menentukan jadwal inspeksi retak pada struktur

Dalam perkembangannya, teori mekanika kepecahan (*fracture mechanics*) dikelompokkan menjadi dua yaitu :

a. *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM)

Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) didasarkan pada prosedur analitis yang menghubungkan besarnya daerah tegangan dan distribusi tegangan elastic disekitar ujung retak (*elastic stress field*) dengan tegangan nominal yang dikenakan pada struktur dengan ukuran retak (*diskontinuitas*), bentuk retak dan sifat-sifat dari material itu sendiri (Barsom dan Rolfe, 1999).

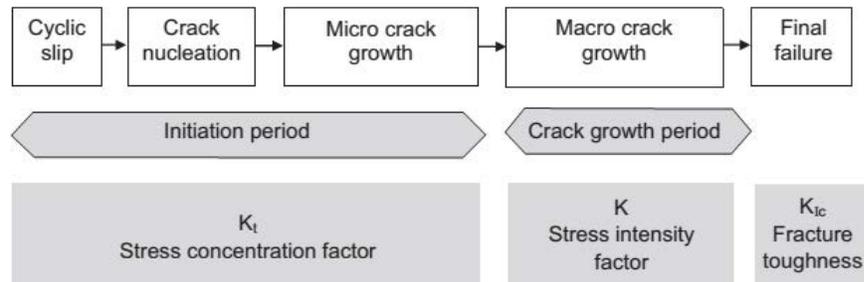
b. *Elastic Plastic Fracture Mechanics* (EPFM)

Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM) lebih sering digunakan pada material yang bersifat ductile (mudah berubah bentuk), dimana terjadi perilaku elastic-plastic pada material akibat pembebanan yang terjadi. Metode ini adalah pengembangan dari metode *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM), dengan penambahan analisa yang dapat menunjukkan deformasi plastis dari suatu material.

2.2.4.1 Tahap terjadinya retak

Mekanika kepecahan dibagi dalam beberapa tahap yaitu tahap awal

terjadinya retakan (*crack initiation*), tahap perambatan retak (*crack propagation*) dan patah (*final fracture*) lihat Gambar 2.12 serta penjelasan lebih rinci.



Gambar 2-12 Tahapan dari *fatigue life* serta faktor yang relevan (Jaap Schijve,2012)

a. Retak Awal (*Crack initiation*)

Fatigue crack tak hanya terjadi pada struktur yang mengalami beban fluktuasi. Komponen-komponen struktur lepas pantai pada umumnya merupakan material logam yang disusun ketika proses fabrikasi. Retak awal dianggap sudah ada sejak proses fabrikasi, salah satu contohnya karena proses pengelasan atau perlakuan panas yang tidak sesuai. Retak awal yang terbentuk juga tergantung pada kekakuan dan kekuatan material.

b. Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

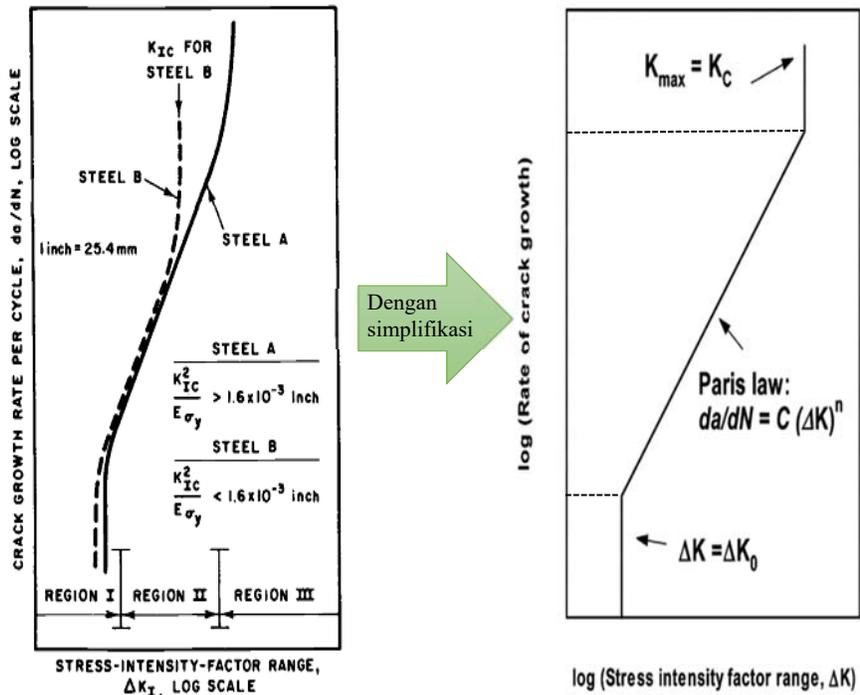
Struktur mengalami perambatan retak setelah retak awal terjadi akibat pembebanan berulang yang bekerja pada struktur. Perambatan retak berbanding lurus dengan jumlah pembebanan. Pada pembebanan normal, perambatan retak terjadi sangat lambat.

c. *Final Fracture*

Tahap ini merupakan yang paling akhir dimana struktur mengalami kerusakan yang mengakibatkan kegagalan. Pada tahap ini, perambatan retak terjadi dengan sangat cepat (*fast fracture*). Suatu struktur dapat dikatakan mengalami kegagalan bila mengalami *fast fracture* sekalipun tegangan yang ditimbulkan masih jauh dibawah nilai *yield strength*. *Fast fracture* terjadi jika nilai ($K = K_{IC}$)

Penjelasan tentang tahap terjadinya retak dapat juga dijelaskan dengan pernyataan dari Paris law, dimana Paris Law atau sering disebut juga dengan Paris-

Endorgan Law merupakan pendekatan fatigue dengan konsep retakan. Berikut ini hubungan Paris-law bila dikaitkan dengan laju pertumbuhan retak plot grafik (log-log) pada Gambar 2.13 berikut :



Gambar 2-13 Grafik Paris Law (Barsom dan Rolfe,1999)

Dengan mengabaikan Region I dan Region III, dikarenakan Region I merupakan *initial crack* (biasanya diperoleh data dari lapangan) serta Region III yaitu tahap *failure* dimana terjadi *fast fracture* dimana laju kecepatan retak sangat cepat (tepat akan patah) dengan syarat nilai nilai ($K = K_{Ic}$), sehingga cukup diwakilkan pada region II yang biasanya disebut dengan daerah transisi (daerah perambatan retak) dimana persamaan paris law untuk perambatan retak dapat berlaku dengan baik pada region II ini.

Menurut Barsom dan Rolfe (1999), dalam perkembangan *fracture mechanics*, ada tiga faktor utama yang dapat mengontrol kemungkinan suatu struktur mengalami *brittle fracture*, yaitu:

- a. Material Toughness (K_c , K_{Ic} , K_{Id})

Material toughness adalah kemampuan suatu material untuk menerima

beban dan berdeformasi secara plastis. *Material toughness* bisa dideskripsikan sebagai *stress intensity factor* kritis dalam kondisi *plane stress* (K_{Ic}) atau *plane strain* (K_{IIc}) untuk pembebanan yang lambat atau bersifat linier elastis. Sedangkan K_{IId} adalah ukuran ketangguhan kritis material dalam kondisi *constrain* maksimum (*plane strain*) dan pembebanan dinamis.

b. Ukuran Retak (a)

Diskontinuitas struktur tak hanya dapat mengalami kelelahan karena pembebanan berulang, tetapi juga dapat mengalami cacat sejak proses fabrikasi. Ukuran retak pada diskontinuitas struktur ini memungkinkan struktur mengalami *brittle fracture*.

c. Tegangan (σ)

Tegangan tarik yang bekerja pada struktur, baik tegangan *nominal* maupun *residual* memungkinkan struktur mengalami *brittle fracture*.

2.2.4.2 *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM)

Analisa tegangan dan displacement dalam perhitungan mekanika kepecahan, pembebanan pada ujung retak (*crack*) dapat digolongkan dalam tiga mode deformasi (Broek,1987), biasanya dikenal dengan *Stress Intensity Factor* (*SIF/K*) yaitu salah satu parameter yang digunakan untuk melakukan analisa keretakan (karakteristik tegangan disekitar ujung retak), sebagaimana berikut :

a. Mode I (*opening mode*)

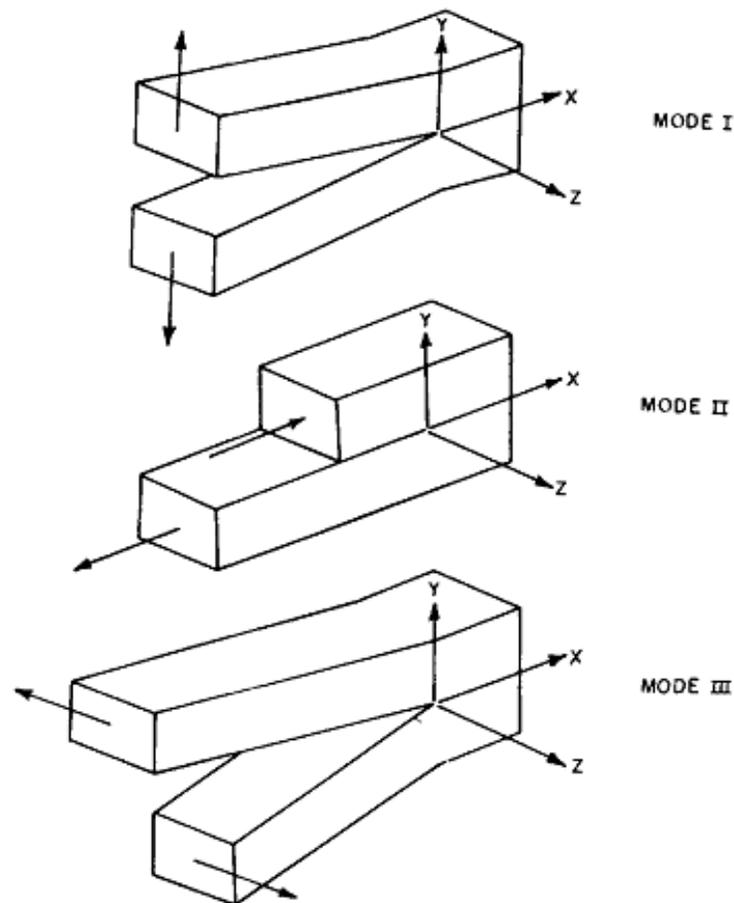
Retak yang diakibatkan oleh adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap arah atau bidang penjalaran retak, sehingga dapat disimpulkan bahwa *displacement* permukaan tegak lurus bidang retak.

b. Mode II (*sliding mode*)

Retakan yang diakibatkan oleh tegangan geser yang seraha dengan penjalaran retak, *displacement* permukaan retak adalah dalam bidang retak dan tegak lurus leasng edge dari retak.

c. Mode III (*tearing mode*)

Retak yang dikibatkan karena tegangan geser yang bekerja pada arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penjalaran retak.



Gambar 2-14 Mode deformasi retak (Barsom dan Rolfe,1999)

Gambar 2.14 adalah ilustrasi tentang Mode deformasi yang terjadi pada struktur atau spesimen. Dengan menggunakan Irwin formula, kita dapat menghitung tegangan dan displacement yang terjadi disekitar ujung retak (Barsom dan Rolfe,1999) :

Mode I (*Opening Mode*)

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.11)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.12)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.13)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y), \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.14)$$

$$u = \frac{K_I}{G} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.15)$$

$$\nu = \frac{K_I}{G} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.16)$$

$$w = 0 \quad (2.17)$$

Mode II (*Sliding Mode*)

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.18)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.19)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.20)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y), \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.21)$$

$$u = \frac{K_{II}}{G} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.22)$$

$$\nu = \frac{K_{II}}{G} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.23)$$

$$w = 0 \quad (2.24)$$

Mode III (*Tearing Mode*)

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.25)$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (2.26)$$

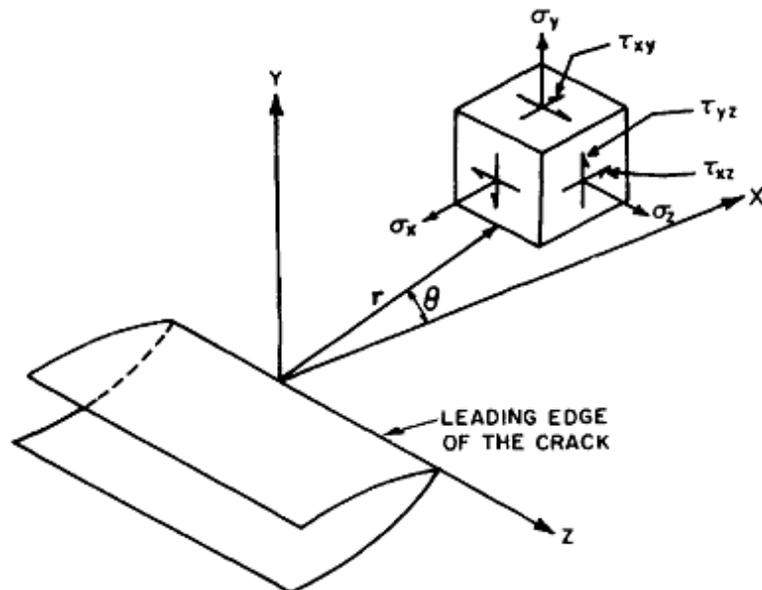
$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \quad (2.27)$$

$$w = \frac{K_{III}}{G} \left[2 \frac{r}{\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.28)$$

$$u = v = 0 \quad (2.29)$$

dengan

r adalah jarak antara ujung tegangan dengan node sedangkan θ adalah sudut antara r dengan sumbu lokal x . Persamaan diatas hanya dapat dilakukan pada nilai r yang mendekati nol atau sangat kecil dibandingkan dimensi planar x - y , hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.15 berikut.



Gambar 2-15 Koordinat system dan komponen tegangan disekitar ujung retak (Barsom dan Rolfe,1999)

2.2.4.3 SIF dari Persamaan Retak *Semi Elliptical*

Berikut ini adalah persamaan untuk *Stress Intensity Factor* secara umum dapat dituliskan sebagai :

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(g) \quad (2.30)$$

dimana :

a = Panjang retak

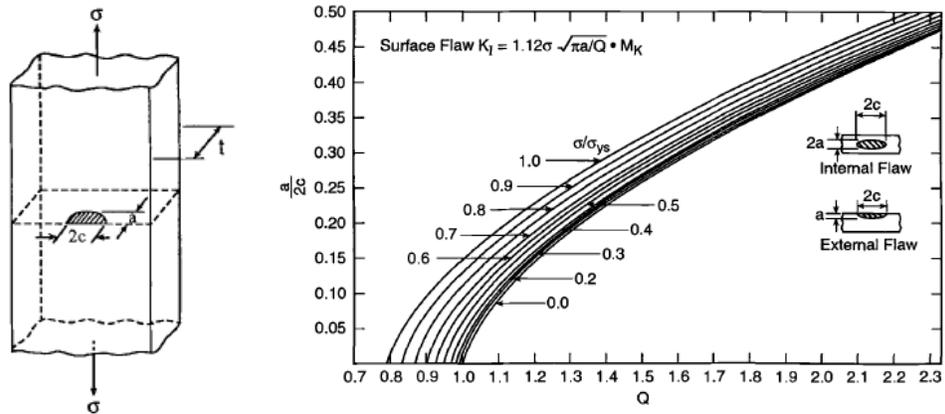
σ = Tegangan pada retak

f(g) = Fungsi koreksi terhadap dimensi dan geometri serta posisi retak

Sedangkan persamaan *Stress Intensity Factor* untuk retak berbentuk *semi elliptical* pada suatu pelat atau spesimen yang mengalami pembebanan (beban tarik) dihitung melalui persamaan SIF dimana nilai $\beta = \pi/2$ (*semi elliptical*) yaitu :

$$K_I = 1,12\sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \cdot M_K \quad (2.31)$$

Dimana nilai Q adalah *flaw shape parameter* yang dapat dilihat pada Gambar 2.16 berikut.



Gambar 2-16 Retak *semi elliptical* dan *flaw shape parameter* (Barsom dan Rolfe,1999)

Serta M_K adalah faktor koreksi *back surface*, yang besarnya :

$$M_K = 1,0 + 1,2 \left(\frac{a}{t} - 0,5 \right) \quad (2.32)$$

2.2.4.4 Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM)

Metode *Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM)* adalah metode yang mengembangkan dari metode *Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)*, dimana pada struktur besar yang menggunakan baja berkekuatan rendah atau sedang (*low* sampai *medium strength*) karena zona plastis yang cukup besar diseitar retak, sehingga menyebabkan timbulnya elastis-plastis. Metode ini dikembangkan untuk menunjukkan karakteristik dari perilaku plastis material. Beberapa variabel yang sering digunakan pada Metode *Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM)* diantaranya :

a. *R-curve analysis*

Prosedur yang digunakan untuk menentukan ketahanan struktur terhadap perambatan retak yang konstan, disimbolkan dengan K_R .

b. *Crack Tip Opening Displacement (CTOD)*

Pengukuran deformasi yang terjadi pada ujung retak yang tajam pada perilaku material inelastic. CTOD dirumuskan sebagai berikut :

$$\delta = \frac{\pi \sigma^2 a}{E \sigma_{ys}} \quad (2.33)$$

$$\frac{\delta}{\varepsilon_{ys}} = \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.34)$$

dimana

δ = *Crack Tip Opening Displacement (CTOD)*

σ_{ys} = tegangan ijin material

ε_{ys} = regangan ijin material

c. *J-Integral*

J-Integral adalah pengukuran medan tegangan dan regangan rata-rata yang terjadi disekitar ujung retak pada perilaku elastic plastic, disimbolkan dengan J . Hubungan J dengan K_I dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$J = \frac{K_I^2}{E'} \quad (2.35)$$

dimana

$E' = E$ untuk Plane stress

$E' = \frac{E}{(1-\nu)}$ untuk plane strain

$E = \text{modulus young}$

$\nu = \text{poisson ratio.}$

2.2.4.5 Umur Kelelahan

Dalam proses pengerjaan tesis ini, pembebanan yang telah dilakukan pada saat uji spesimen dilaboratorium adalah jenis pembebanan dengan amplitudo konstan dengan siklus pembebanan yang dinamis terhadap faktor intensitas tegangan. Oleh karena itu hubungan antara keduanya dapat dinyatakan dengan dalam *paris law* (Anderson, 1994). Dimana persamaan yang digunakan pada paris law adalah :

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (2.36)$$

Pada persamaan 2.27 diatas istilah disisi kiri disebut dikenal dengan laju pertumbuhan retak. Disisi kanan C dan m adalah konstanta material.

$$\Delta K = \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} \cdot f(g) \quad (2.37)$$

dimana :

da = Pertambahan panjang retak

dN = Pertambahan *cycle* dari beban

C, m = Konstanta material

ΔK = Rentang Faktor Intensitas Tegangan (Rentang SIF)

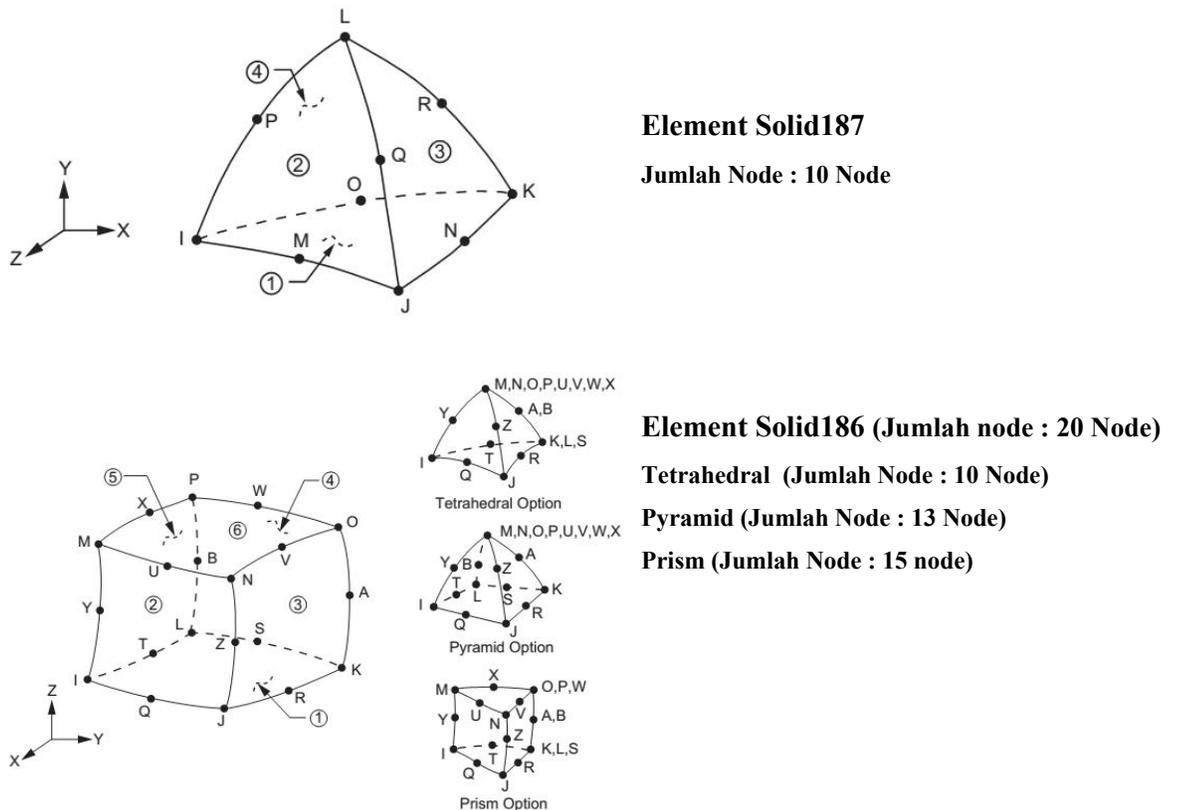
N = Jumlah *cycle* sampai panjang retak tertentu (sampai patahnya spesimen)

2.2.5 Pemodelan Numerik dengan Metode Elemen Hingga (FEM)

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan dan sifat-sifat dari material yang sangat rumit. Hal ini tidak dapat atau sulit diselesaikan dengan solusi analisa matematis (Logan, 2000). Pendekatan metode elemen hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam proses penentuan titik simpul yang disebut 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 menyeluruh.

Didalam metode elemen hingga terdapat beberapa hal yang perlu diketahui dan dipahami sebelum memulai pemodelan, salah satu diantaranya adalah jenis elemen. Penentuan dari jenis elemen harus disesuaikan dengan kondisi spesimen saat dilapangan maupun dalam perlakuan eksperimen. Pada kasus pemodelan dengan mekanika struktural terdapat dua jenis elemen yang biasanya banyak digunakan diantaranya jenis elemen tetrahedral dan elemen hexahedra. Perbedaan diantara dua jenis elemen ini secara umum terletak pada jumlah elemen dan node yang ada. Berikut contoh dari kedua jenis elemen tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.17



Gambar 2-17 Contoh jenis elemen dalam FEM (ANSYS,2013)

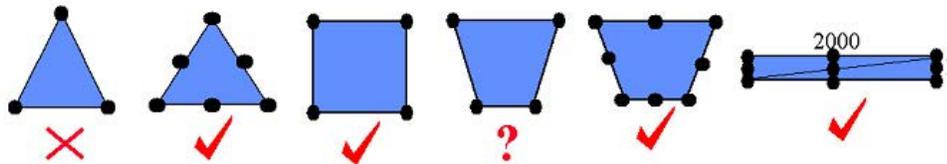
Untuk jenis elemen yang digunakan pada analisa structural biasanya jenis elemen solid186 banyak digunakan dan disarankan. Pada elemen solid yang

biasanya jenis elemen tetrahedral dan elemen hexahedra terdapat kriteria khusus diantaranya: jenis linier maupun jenis quadratic hal ini berbeda tentang jumlah node yang dimiliki. Pada jenis linier letak node terletak pada bagian ujung/sudut saja sedangkan pada jenis quadratic ada tambahan node pada bagian tengah dari elemen.

Pada Gambar 2.17 diatas dapat dijelaskan bahwa semakin banyak jumlah node untuk pada setiap elemen, maka waktu dalam komputasi jauh lebih lama serta kebutuhan akan memori juga semakin besar, begitu pula sebaliknya. Menurut Wang, *et al*, (2004) memberikan kesimpulan tentang kelebihan dan kekurangan antara jenis elemen tetrahedral dan elemen hexahedral diantaranya:

- a. Usahakan tidak menggunakan elemen linear tetrahedral,
- b. Jenis elemen quadratic tetrahedral memberikan hasil yang baik dan dapat digunakan kapan saja,
- c. Jenis elemen *quadratic hexahedral* sangat handal dan sangat baik namun pemodelan ini membutuhkan komputasi yang lebih.

Jadi bisa disimpulkan bahwa penggunaan jenis elemen solid baik untuk jenis elemen tetrahedral maupun hexahedral dapat digunakan namun dengan catatan bahwa jenis ini adalah *quadratic*. Gambar 2.18 mengilustrasikan tentang rekomendasi jenis mesh yang dapat digunakan dalam FEM.

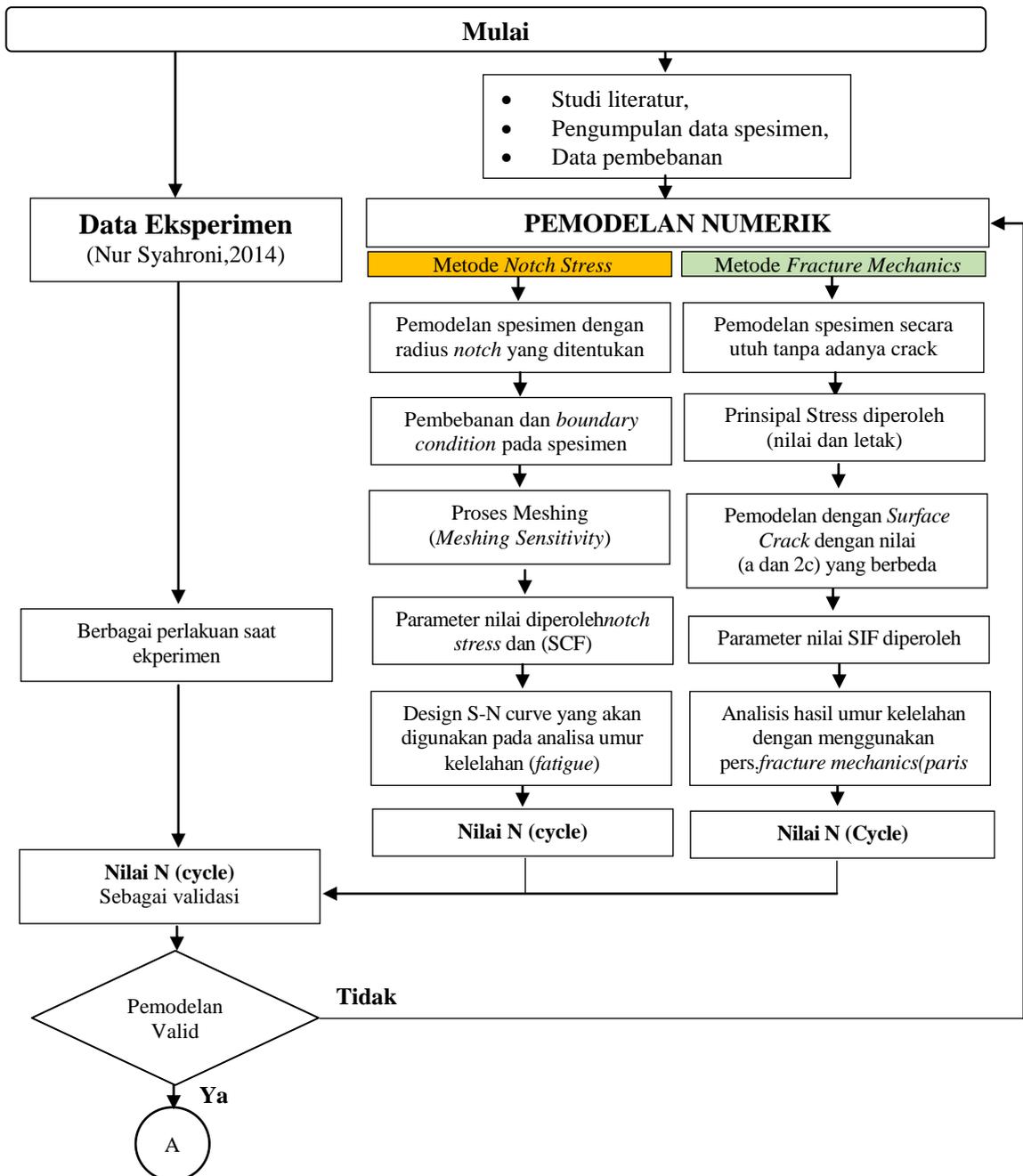


Gambar 2-18 Beberapa rekomendasi untuk element solid (Wang, *et al.*, 2004)

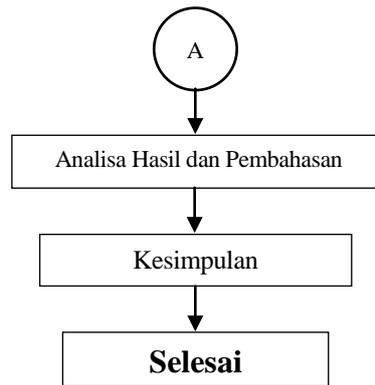
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR

Dalam pengerjaan tesis ini dilakukan beberapa tahapan, yang dapat disusun dalam diagram alir pada Gambar 3.1 (*flow chart*) berikut:



Gambar 3-1 Diagram alir untuk pengerjaan tesis



Gambar 3.1 Diagram alir untuk pengerjaan tesis (lanjutan)

3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR Pengerjaan Tesis

3.2.1 Langkah-langkah pengerjaan

Metodologi yang dipakai untuk mencapai tujuan dari rumusan masalah dalam tugas akhir ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

A. Studi literatur

Studi literatur yang dimaksud adalah studi pendahuluan pada tentang sumber-sumber yang relevan untuk menunjang penulisan proposal tesis ini, diantaranya buku (*handbook*), jurnal ilmiah, tesis sebelumnya serta tugas akhir yang dapat dipertanggung jawabkan kebenarannya.

Hal yang perlu diperhatikan dalam mencari sumber untuk studi literatur ini, berkaitan tentang pokok bahasan tesis, diantaranya :

a. Tegangan Lokal

Nominal Stress, *Hotspot Stress* serta *Notch Stress*, dimana sebelum mencari tentang prinsip tegangan pada *Notch (Notch Stress)*, kita perlu mengetahui tahapan-tahapan terjadinya prinsip ini. Pada konsep tegangan, nominal stress (tegangan nominal) merupakan bagian kasar dalam untuk mencari tegangan dimana meshing yang digunakan masih kasar, dilanjutkan dengan *Hotspot Stress* (tegangan nominal) yakni tegangan didaerah dekat lasan dimana meshing yang digunakan mulai halus, serta *Notch Stress* (tegangan notch) dengan melakukan meshing dengan sangat halus.

b. Fracture Mechanics

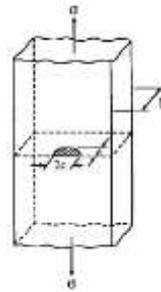
Fracture mechanics (mekanika kepecahan) pada pembahasan ini lebih pada hal membahas tegangan dan regangan pada struktur yang mengandung retak. Dimana telah terjadi retak awal (a_0), kemudian dilanjutkan analisa untuk

mencari beberapa parameter yang akan disubsitusikan pada persamaan umur kelelahan.

c. SIF (K)

SIF untuk *surface crack* dengan bentuk menyerupai thumbnail pada sebuah plat dengan mengalami beban tarik dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan berikut :

$$K_I = 1,12\sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \cdot M_k$$



d. *Fracture Toughness* (Kc)

Fracture Toughness adalah kemampuan suatu material untuk menerima beban dan berdeformasi secara plastis. Syarat suatu struktur/spesimen mengalami *unstable fracture* ketika nilai :

$$K \geq Kc$$

Dimana nilai *Kc* biasanya diperoleh saat melakukan eksperimen, serta nilai *K* adalah tahap desain.

e. Umur Kelelahan

Umur kelelahan inilah yang menjadi suatu parameter akhir dalam pembahasan ini, sampai kapan suatu spesimen yang telah ditetapkan bentuk dan jenisnya dapat bertahan saat dikenai pembebanan, selanjutnya dilakukan analisis secara numerik (dengan menggunakan metode *surface crack*) dengan memainkan bentuk, besar radius, dan sudut bukaan crack. Agar hasil lebih baik, proses validasi akan dilakukan dengan membandingkan nilai output numerik dan hasil eksperimen.

B. Pengumpulan data

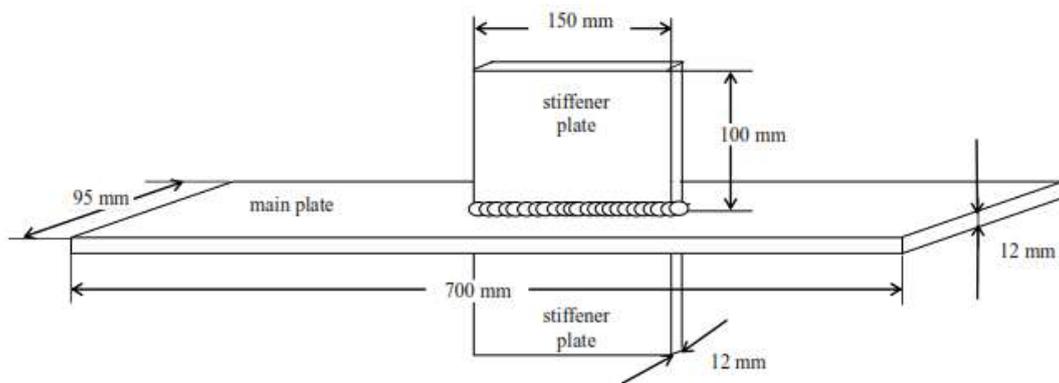
Data yang akan digunakan pada pembahasan proposal tesis adalah data yang telah diperoleh melalui eksperimen, sehingga proses pengumpulan data ini sangat penting dan dijadikan sebagai acuan

- Data Geometri Spesimen

Berikut ini bagian-bagian serta ukuran dari geometri spesimen yang dilakukan saat eksperimen dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.2.

Tabel 3-1Data Geometri dari spesimen sambungan las berpenegar memanjang (Syahroni,2014)

No	Description	Unit	Quantity
1	Panjang <i>main plate</i>	700	mm
2	Lebar <i>main plate</i>	95	mm
3	Tebal <i>main plate</i>	12	mm
4	Tinggi <i>stiffener plate</i>	100	mm
5	Panjang <i>stiffener plate</i>	150	mm
6	Tebal <i>stiffener plate</i>	12	mm



Gambar 3-2Geometri spesimen sambungan las berpenegar memanjang (Syahroni,2014)

- Geometri Sambungan las

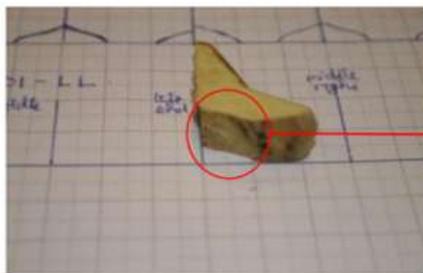
Geometri sambungan las yang digunakan mengikuti bentuk sesungguhnya dari eksperimen yang telah dilakukan seperti terlihat pada Gambar 3.3 berikut ini.



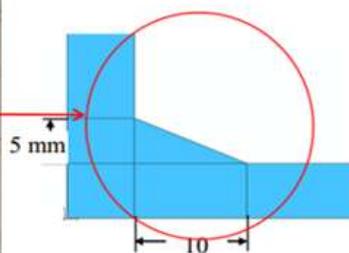
a. Bentuk/profile las yang digunakan



b. Pemotongan replika las



c. Plot profile las pada kertas milimeter



d. Bentuk profile las yang digunakan pada FE

Gambar 3-3Langkah pemodelan profile las yang digunakan (Syahroni,2014)

- Data Material

Data material pada eksperimen yang telah dilakukan adalah jenis baja karbon, yang komposisinya dapat dilihat pada Tabel 3.2 yaitu :

Tabel 3-2 Data material penyusun spesimen (Syahroni, 2014)

No	Elemen (%)	Speciment batch 1		Speciment batch 2	
		Main plate	Stiffener	Main plate	Stiffener
1	C	0,170	0,140	0,056	0,056
2	Mn	0,152	0,670	0,750	0,750
3	Si	0,370	0,250	0.010	0.010
4	P	0,011	0,010	0,007	0,007
5	S	0,005	0,020	0,004	0,004
6	Al	0,028	-	0,036	0,036
7	Nb	0,044	-	0,026	0,026
8	V	0,002	-	0,006	0,006
9	Ni	0,001	0,001	-	-
10	Cr	0,002	0,001	-	-
11	Cu	0,003	0,003	-	-
12	Nb	0,044	-	0,026	0,026
13	N	0,0070	0,0100	-	-

Selain komposisi dari penyusun material, data material lain yang juga penting yaitu modulus elastisitas, konduktivitas termal, densitas, *specific heat*, koefisien ekspansi, rasio Poison, *yield strength*, *tensile strength*, *elongation* dan *coefisien of reduction of area*. Dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut

Tabel 3-3 Mechanical properties dari spesimen (Syahroni, 2014)

No	Properties	Speciment batch 1		Speciment batch 2	
		Main plate	Stiffener	Main plate	Stiffener
1	Yeild strength R_{cH} (N/mm ²)	0,170	0,140	0,056	0,056
2	Tensile stength R_m (N/mm ²)	0,152	0,670	0,750	0,750
3	Elongation ΔL (%)	0,370	0,250	0,010	0,010
4	Coef. of reduction of area R.A (%)	0,011	0,010	0,007	0,007

- Pembebanan pada spesimen sambungan las berpenegar memanjang

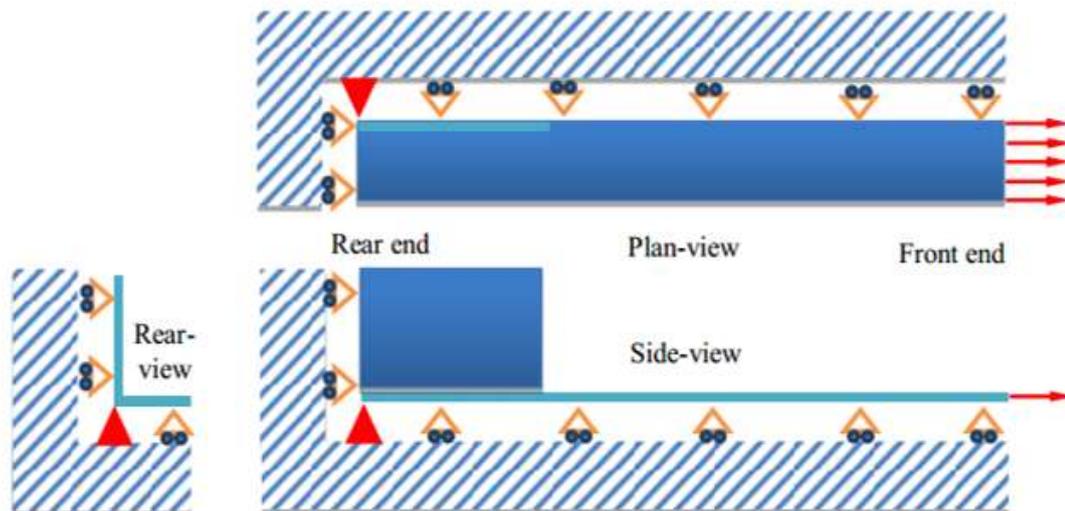
Pembebanan yang mengenai spesimen pelat fillet tipe T menggunakan data pembebanan sesuai pada saat perlakuan eksperimen. Tabel 3.4 dibawah ini akan menjelaskan besaran pembebanan yang digunakan pada spesimen.

Tabel 3-4 Besar pembebanan yang digunakan (Syahroni,2014)

No	Specimen No.	R	$\Delta\sigma_{nom}$
1	A-17	0	100
2	A-01	0	100
3	A-07	0	100

- Kondisi batas (*boundary conditions*) dalam pemodelan

Kondisi batas yang digunakan pada metode *finite elemen* dengan software mengikuti kondisi batas yang dilakukan sesungguhnya saat eksperimen yang ditunjukkan oleh Gambar 3.4 berikut ini



Gambar 3-4 Kondisi batas/*boundary conditions* yang digunakan (Syahroni,2014)

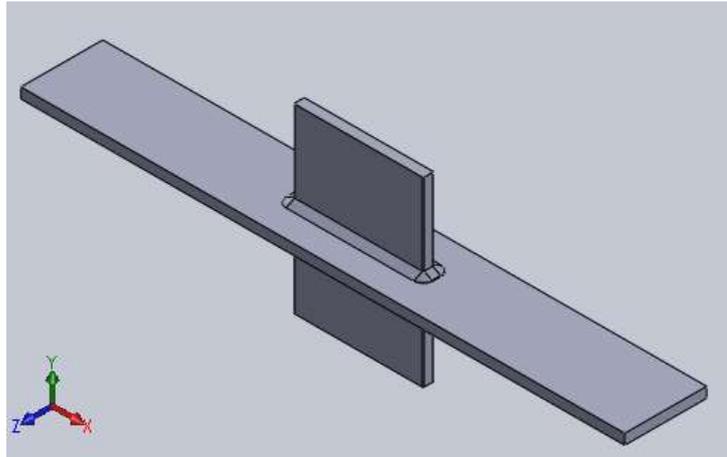
C. Pemodelan spesimen pelat fillet tipe T dengan metode numerik FEM

Berikut ini secara garis besar langkah pemodelan numerik dalam pendekatan dengan menggunakan metode *notch stress* dan metode *fracture mechanics*.

Pendekatan dengan menggunakan metode *notch stress*

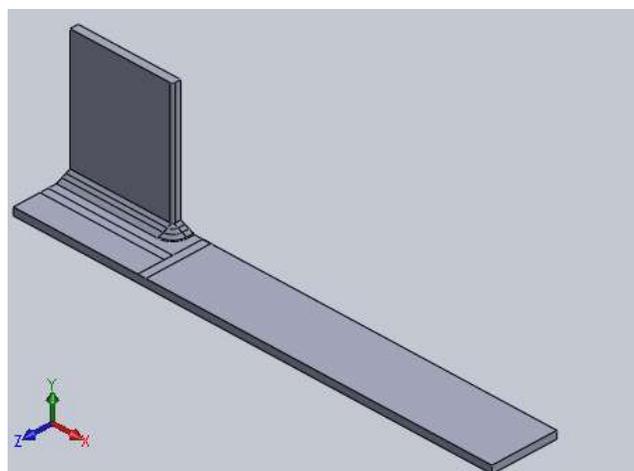
1. Pemodelan struktur/spesimen serta analisa secara statis

Dalam tahap ini akan dilakukan pemodelan spesimen, dimulai dengan pembuatan spesimen dengan memasukkan parameter data geometri yang telah ada. Selanjutnya pada pemodelan numerik dilakukan analisa tegangan (statis) dengan memperoleh tegangan dan *displacement*.



Gambar 3-5Spesimen sambungan las berpenegar memanjang dengan notch menggunakan pemodelan numerik

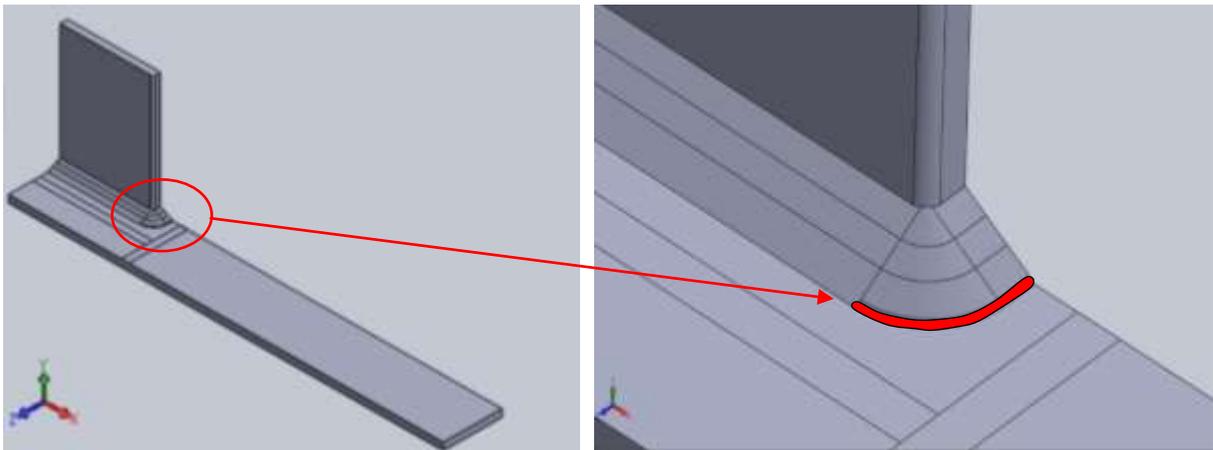
Dari Gambar 3.5 dan data geometri spesimen pada Tabel 3.1 diatas, diperoleh kesimpulan bahwa bentuk spesimen yang digunakan adalah spesimen yang memiliki simetri baik simetri bidang secara bentuk/ukuran (bidang x-y, bidang x-z dan bidang y-z) maupun simetri dalam pembebanan. Sehingga untuk mempercepat dan kontrol meshing pada saat proses analisa dengan software, maka dapat digunakan (1/8) dari bagian utuh spesimen. Sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut



Gambar 3-6Spesimen sambungan las berpenegar memanjang dengan notch untuk 1/8 bagian

2. Pemodelan dengan variasi radius yang berbeda untuk mendapatkan *notch stress* yang sesuai dilanjutkan dengan input pembebanan statis

Pada tahap ini pengerjaan sudah dilakukan penuh pada software, dimana dengan memberikan *notch* (takikan) pada spesimen las (lihat Gambar 3.7). Pada tahap ini akan dilakukan beberapa variasi untuk radius *notch*. Nilai radius notch yang akan digunakan menggunakan *guidline* dari IIW sebesar 1 mm.



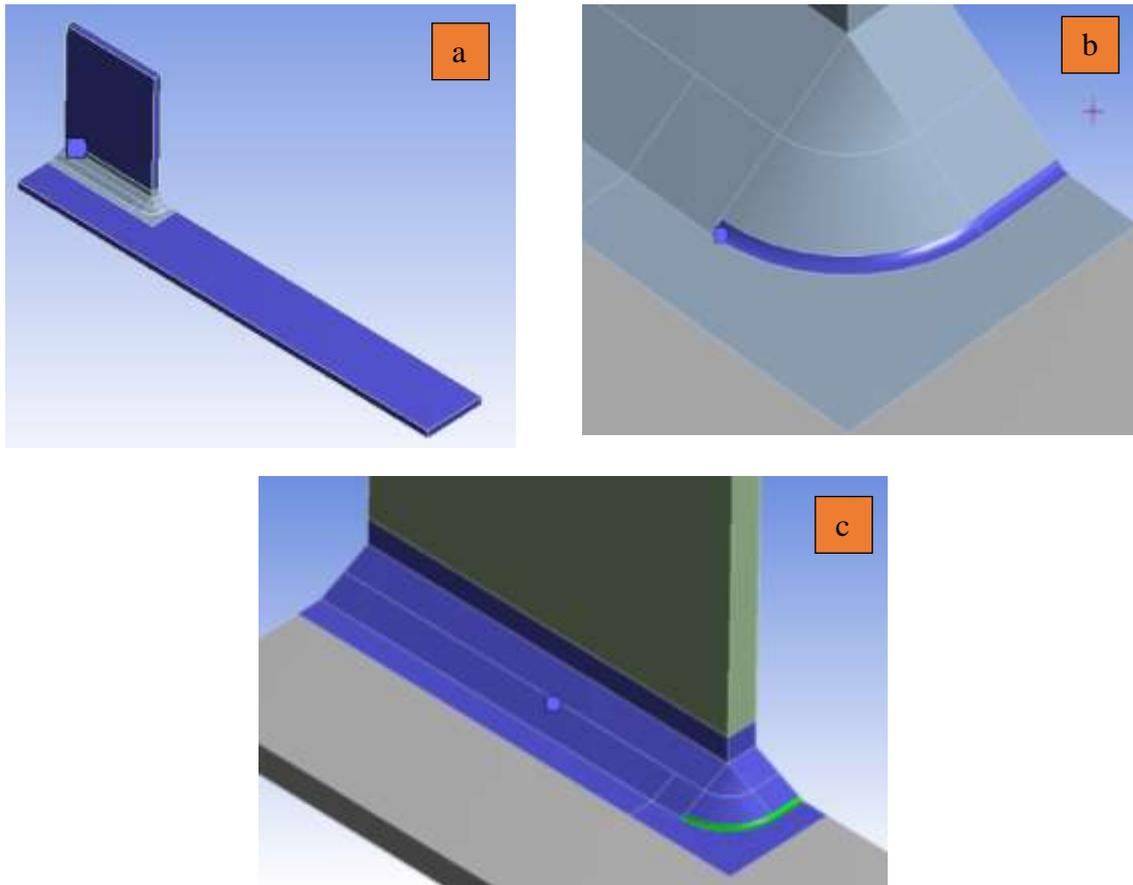
Gambar 3-7 Spesimen sambungan las berpenegar memanjang dengan ukuran *notch* sebesar 1 mm

3. Proses meshing

Pada proses meshing dilakukan dengan mengikuti aturan dari IIW dengan ukuran notch yang dimodelkan sebesar 1 mm dengan syarat mesh dengan bentuk type elemen *quadratic* dan ukuran mesh minimal sebesar $\leq 0,25$ mm pada bagian notch.

Pada tahap ini akan dilakukan proses *meshing sensitivity* dengan mengubah ukuran mesh selain pada bagian notch yang telah ditentukan sebelumnya. Meshing sensitivity akan memberikan gambaran tentang berapakah ukuran yang akan digunakan untuk analisa lebih lanjut. Berikut ini Gambar 3.8 merupakan bagian yang nantinya akan diubah ukuran meshing dengan penjelasan sebagai berikut :

- a. Bagian a mesh global (main plate+stiffner) = bagian ini adalah meshing global spesimen.
- b. Bagian b (notch) = ukuran pada bagian ini akan konstan/tetap dengan nilai 0,25 mm (mengikuti code yang ada)
- c. Bagian c (weld bead) = bagian ini yang akan diubah hingga mendapatkan output dalam hal ini berupa tegangan yang mulai konstan.



Gambar 3-8 Screenshot mesh untuk setiap bagian pada sambungan las berpengetasan memanjang

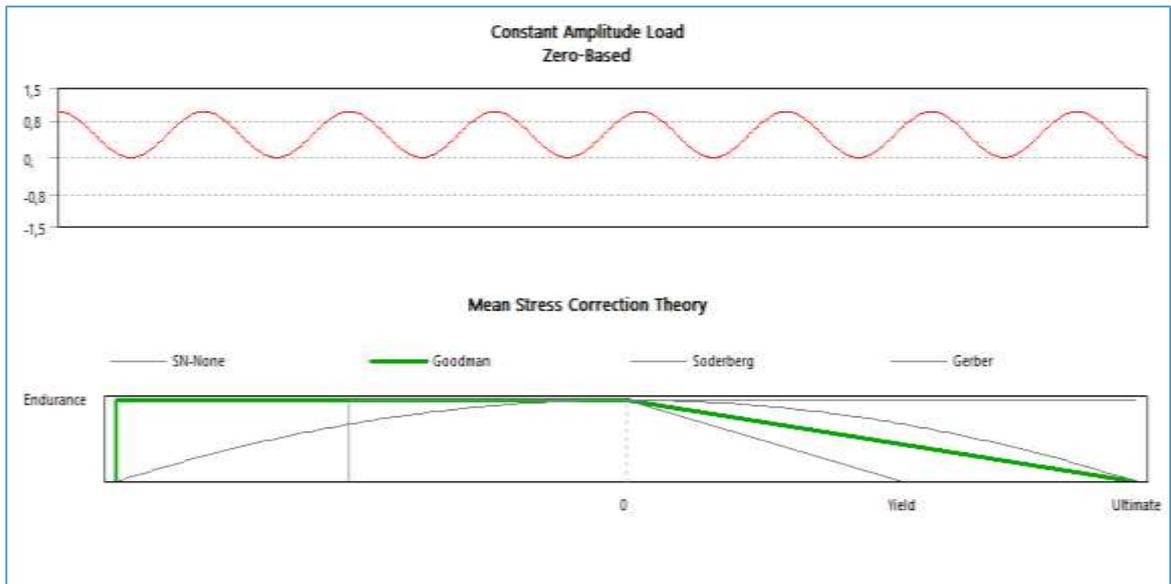
4. Parameter nilai diperoleh (SCF)

Setelah melakukan pemodelan dengan variasi radius notch, maka salah satu parameter nilai yang diperoleh adalah *Stress Concentration Factor* (SCF). Besar nilai SCF menunjukkan seberapa besar konsentrasi tegangan yang terjadi pada spesimen las yang diteliti tersebut.

5. Membuat variasi pembebanan *fatigue* diperoleh hubungan nilai S dan N

Langkah selanjutnya adalah melakukan variasi pembebanan (S) hingga diperoleh jumlah siklus (N).

Pembebanan yang dilakukan dengan menggunakan nilai beban (S) sebesar 100 MPa serta jenis pembebanan dengan *Constant-Amplitude Loading* dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3-9Jenis dan besar pembebanan *fatigue* pada sambungan las berpenegar memanjang

Pembebanan fatigue yang dimaksud disini adalah jenis pembebanan siklik yang dilakukan pada saat eksperimen, dengan mengambil data pembebanan pada saat eksperimen kemudian diolah pada software, setelah itu akan ada ouput berupa hasil (N).

6. Hasil dilakukan analisis dengan kurva S-N

Setelah dilakukan variasi beban, maka hasil yang diperoleh berupa nilai variasi pembebanan dengan jumlah siklus. Dengan beberapa hasil ini dilakukan analisa terhadap bentuk kurva S-N. Sehingga diperoleh nilai yang sesuai dengan validasi nilai (N) dari hasil eksperimen.

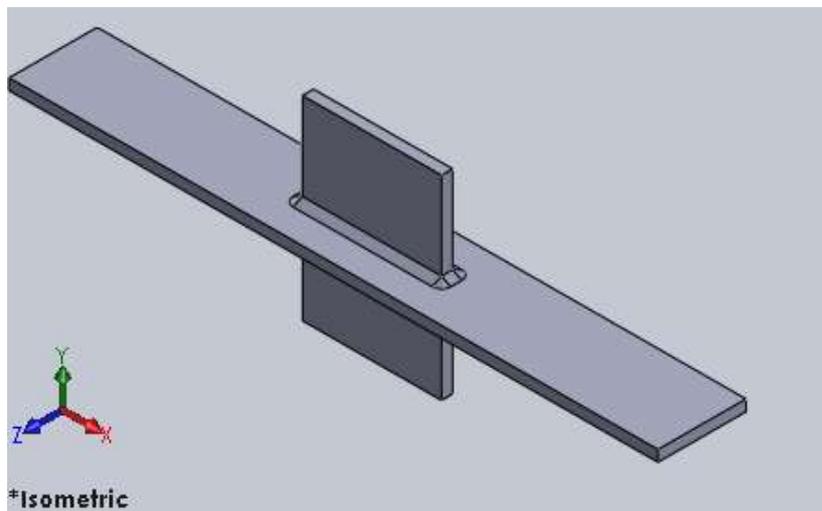
Begitu selanjutnya, jika nilai (N) masih belum sesuai dengan hasil ekperimen maka dilakukan kajian ulang seperti pada langkah diatas hingga benar-benar diperoleh nilai (N) yang sesuai dengan hasil eksperimen.

Pendekatan dengan menggunakan metode *fracture mechanics*

1. Pemodelan spesimen serta analisa secara statis dengan metode numerik FEM

Dalam tahap ini akan dilakukan pemodelan spesimen, dimulai dengan pembuatan spesimen dengan memasukkan parameter data geometri yang telah ada.

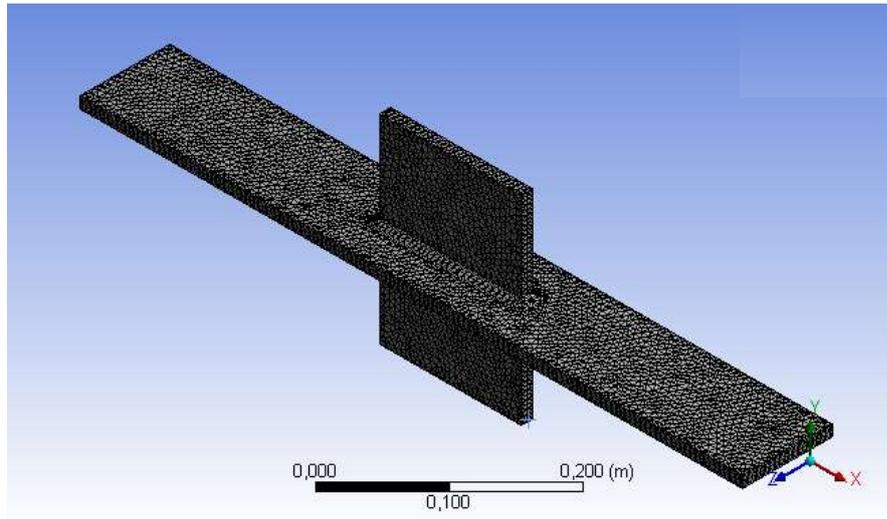
Perbedaan untuk spesimen pada metode *fracture mechanics* dengan metode sebelumnya yaitu bentuk spesimen yang digunakan merupakan bentuk spesimen utuh yang dilakukan pada saat tes di laboratorium, yang dapat dilihat pada Gambar 3.10 berikut ini.



Gambar 3-10 Spesimen untuk metode *fracture mechanics*

2. Proses *meshing*

Untuk langkah kedua adalah melakukan *meshing* pada spesimen dengan perbedaan ukuran *mesh* yang digunakan, secara umum langkah *meshing* pada metode *fracture mechanics* yaitu ukuran (*size*) pada daerah sambungan las harus lebih rapat/kecil dibandingkan dengan daerah jauh dari las dikarenakan pada daerah tersebut memerlukan tingkat ketelitian yang lebih serta menghemat waktu pada proses *running*. Namun jika perangkat komputer sudah memadai dan spesimen yang dimodelkan tidak begitu kompleks maka ukuran *meshing* dapat diperhalus dan diperkecil untuk semua bagian, pada pemodelan ini ukuran *mesh* sebesar 3 mm (lihat Gambar 3.11).



Gambar 3-11 Meshing pada spesimen

3. Pembebanan dan kondisi batas

Setelah dilakukan proses *meshing*, langkah selanjutnya adalah dengan memasukkan nilai beban dan kondisi batas pada spesimen yang digunakan yang telah dibahas diatas. Selanjutnya diperoleh beberapa hasil diantaranya :

- a. *Total deformation*
- b. *Max. prinsipal stress*

Nilai *Max. prinsipal stress* yang diperoleh pada tahap inilah yang menjadi indikasi retak awal atau *crack initiation* dan letak terjadinya *crack*.

4. Pemodelan dengan retak (*Crack*)

Pada pemodelan *crack*, jenis atau type crack yang akan digunakan adalah jenis/type surface crack (*semi-elliptical crack*) dengan memanfaatkan letak *crack initiation* dari model full sebelumnya.

Beberapa parameter utama diantaranya :

- a. Penentuan a_0 yakni kedalaman crack (mm)

Nilai a_0 pada kasus ini adalah sebesar (0,5 mm) dengan mengikuti kriteria (DNV-RP-C203-2010)

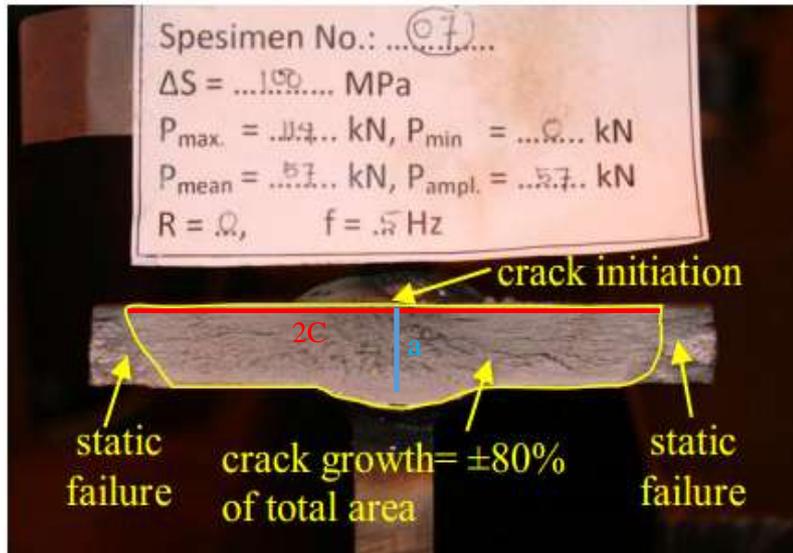
- b. Penentuan $2c$ yakni lebar crack (mm)

Untuk penentuan nilai $2c$ yang digunakan menyesuaikan dari perbandingan nilai

$\frac{a}{2c}$ yang digunakan

c. Perbandingan nilai $\frac{a}{2c}$

Perolehan nilai perbandingan nilai a dan 2c menggunakan pendekatan dengan melihat hasil akhir eksperimen seperti pada Gambar 3.12 berikut



Gambar3-12Skema bentuk *semi-elliptical crack*

Dari Gambar 3.12 dapat dihitung nilai dari panjang kedalaman retak (a) dan lebar dari retak (2c), sehingga jika ukuran retak pada gambar disesuaikan dengan ukuran sebenarnya, maka dapat dihitung dengan perbandingan dengan melihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3-5Perhitungan nilai a dan 2C

No.	Bagian	Ukuran sketsa Gambar (mm)	Ukuran sebenarnya (mm)
1	Kedalaman retak (a)	51 mm	12 mm
2	Panjang retak (2c)	294 mm	x mm

Dengan persamaan perbandingan nilai, maka panjang retak sebenarnya diperoleh sebesar 69,176 mm. Jika hasil ini disubsitusikan dalam perbandingan $\frac{a}{2c}$, maka nilai akhir diperoleh sebagai berikut :

$$\frac{a}{2c} = \frac{12}{69,176}$$

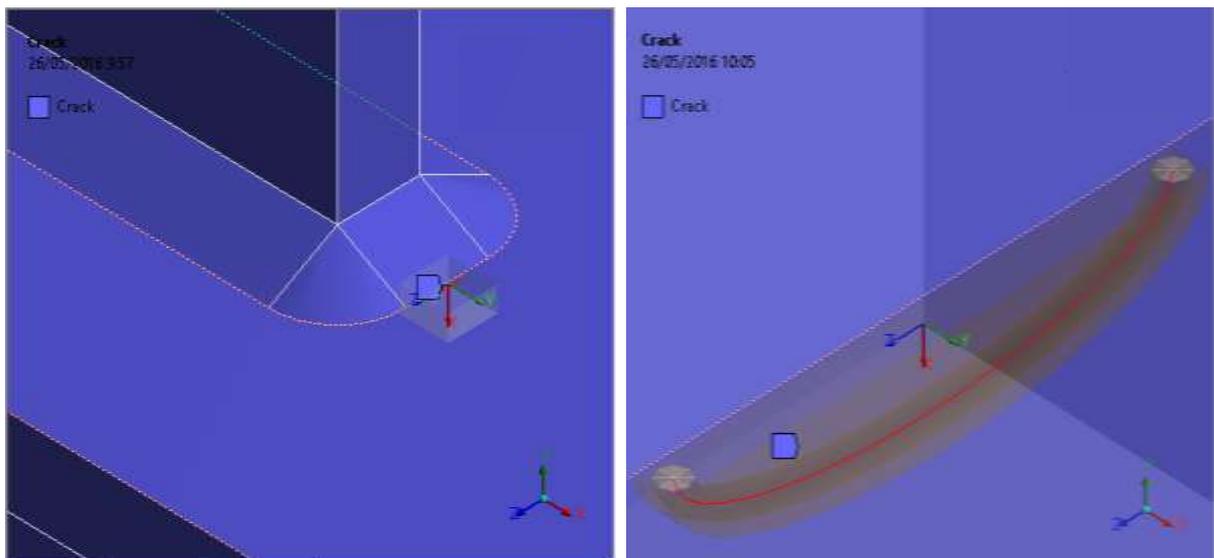
$$\approx 0,15$$

Berikut ini Gambar 3.13 dan Gambar 3.14 akan menjelaskan langkah untuk pembuatan retakan/*crack* dalam pemodelan melalui *finite element*.

Details of "Crack"	
Source	Crack
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Coordinate System	notch depan weld toe
Align with Face Normal	Yes
Project to Nearest Surface	Yes
Crack Shape	Semi-Elliptical
<input type="checkbox"/> --Major Radius	1,667 mm
<input type="checkbox"/> --Minor Radius	0,5 mm

Gambar 3-13 pengaturan awal untuk ukuran dari crack (a dan c) yang dianalisa

Setelah dilakukan pengaturan awal terhadap ukuran untuk nilai a dan c dari pemodelan numerik, hasil Gambaran crack dapat dilihat pada Gambar 3.14. Perhatikan juga arah dari perjalanan crack apakah telah sesuai dengan menembus ketebalan dari spesimen.



Gambar 3-14 Hasil pemodelan crack untuk nilai a = 0,5 mm dan c = 1,667 mm

Pada Gambar 3.14 diatas adalah hasil dari pemodelan crack untuk (nilai a = 0,5 mm dan c = 1,667 mm), langkah selanjutnya mengikuti langkah yang telah ada. Namun dengan beberapa variasi nilai a dan 2c (*increment*) sebesar 1,1 mm sertanilai $\frac{a}{2c} = 0,15$ (konstan), dapat dilihat pada Tabel 3.6 sebagai berikut :

Tabel 3-6 Variasi nilai a dan c untuk pemodelan numerik dengan FEM

No	a (m)	c (m)	$\frac{a}{2c}$	Keterangan
1	0,0005	0,001667	0,15	Running 1
2	0,0016	0,005333		Running 2
3	0,0027	0,009		Running 3
4	0,0038	0,012667		Running 4
5	0,0049	0,016333		Running 5
6	0,0060	0,02		Running 6
7	0,0071	0,023667		Running 7
8	0,0082	0,027333		Running 8
9	0,0093	0,031		Running 9
10	0,0104	0,034667		Running 10
11	0,0115	0,038333		Running 11

Kondisi batas untuk nilai $a_{critical}$ (kedalaman crack) dibatasi hingga akan mendekati range dari ketebalan dari spesimen yang dipakai sebesar 12 mm atau 0,012 meter.

5. Variabel nilai diperoleh

Hasil akhir yang diperoleh pada pemodelan dengan *surface crack* menyesuaikan dengan kebutuhan data yang akan diolah pada proses selanjutnya. Pada kasus ini beberapa variabel nilai yang ingin diperoleh diantaranya :

- a. *Total deformation*
- b. *Equivalent stress (von-misses)*
- c. *Max. prinsipal stress*
- d. SIFS (K_I)

Nilai SIF inilah yang akan diolah pada proses selanjutnya untuk perhitungan perambatan retak hingga mendapatkan nilai umur kelelahan spesimen.

6. Validasi nilai SIF

Hasil SIF yang diperoleh dari hasil running dengan metode numerik FEM selanjutnya divalidasi dengan hasil perhitungan analitis menggunakan persamaan *surface crack* berikut:

$$K_I = 1,12 \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \cdot M_k$$

Dengan nilai M_k berlaku (untuk nilai $\frac{a}{t} \geq 0,5$)

$$M_k = 1,0 + 1,2 \left(\frac{a}{t} - 0,5 \right)$$

(Barsom dan Rolfe, 1999)

7. Analisis umur kelelahan menggunakan persamaan *fracture mechanics (paris law)*

Tahap selanjutnya adalah menganalisa parameter hasil, kedalam persamaan *fracture mechanics (paris law)* yakni :

Persamaan awal

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m$$

Pada hasil analisis menggunakan pemodelan numerik dengan FEM diperoleh data berupa Δa dan ΔK , maka persamaan awal dari *paris law* dapat didekati dengan persamaan :

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN} &= C \Delta K^m \cong \frac{\Delta a}{\Delta N} = C \Delta K^m \\ \frac{\Delta a}{\Delta N} &= C \Delta K^m \\ \Delta N &= \frac{\Delta a}{C \Delta K^m} \end{aligned}$$

Nilai C (konstanta) diperoleh dari material yang digunakan yaitu jenis ferrite-pearlite steels sebesar $3,6 \times 10^{-10}$, serta nilai m atau *slope* sebesar $m=3$, sehingga persamaan diatas menjadi :

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{3,6 \times 10^{-10} \cdot \Delta K^3}$$

Dengan nilai N adalah akumulasi dari jumlah ΔN yang ada ;

$$N = \Delta N_1 + \Delta N_2 + \Delta N_3 + \dots + \Delta N_n$$

Nilai N inilah yang akan disesuaikan dengan validasi dari hasil eksperimen yang telah dilakukan. Jika nilai N masih belum sesuai maka perlu dilakukan analisa ulang dengan memasukkan variasi yang telah disebutkan diatas hingga nilai N sesuai.

D. Validasi

Pemodelan baik dengan metode *notch stress* maupun metode *fracture mechanics* (SIF) dilakukan mengikuti standart atau code yang dikeluarkan oleh lembaga maupun dari jurnal, buku, dll yang akhirnya validasikan dengan hasil penelitian eksperimen yang dilakukan sebelumnya, diantaranya :

1. Metode *notch stress*
 - Nilai N (jumlah siklus hingga patah) atau umur kelelahan,
2. Metode *fracture mechanics* (SIF)
 - Nilai N (jumlah siklus hingga patah) atau umur kelelahan,
 - Letak retak awal (*crack initiation*), dan
 - Nilai SIF dari perhitungan analitis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

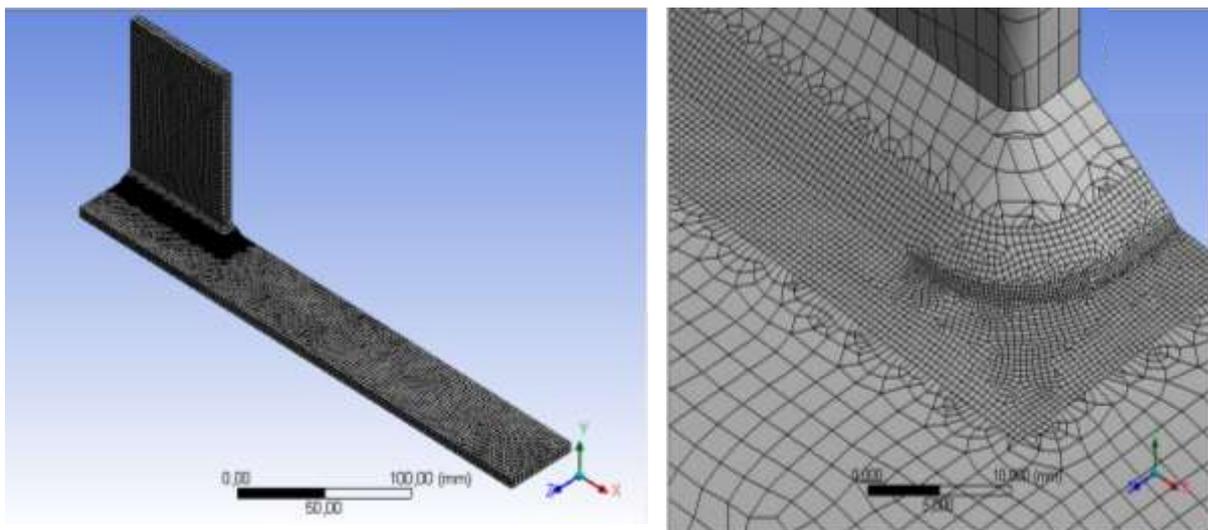
ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas tentang hasil pemodelan dan perhitungan analitis yang telah dilakukan untuk mendapatkan beberapa jenis tegangan baik dari metode *notch stress* maupun *fracture mechanics* (SIF) serta dilanjutkan dalam memprediksi umur kelelahan pada sambungan las berpenegar memanjang.

4.1 HASIL PEMODELAN DAN PEMBAHASAN

4.1.1 Hasil Pemodelan dengan metode *notch stress*

Pada pemodelan yang telah dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga, pemodelan dimulai dengan pembuatan model awal menggunakan 1/8 bagian dari spesimen beberapa pertimbangan kesimetrisan geometri dan pembebanan pada spesimen yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Selanjutnya pemodelan ukuran radius *notch*/takikan sebesar 1mm serta ukuran mesh dengan bentuk type elemen *quadratic* dan ukuran mesh minimal sebesar $\leq 0,25$ mm pada bagian *notch*(IIW,2009). Dalam pemodelan pada spesimen dengan FEM, type elemen yang digunakan adalah type solid 186 dikarenakan type ini sesuai dan cocok digunakan pada analisa struktural. Berikut Gambar 4.1 hasil pemodelan awal *notch* dengan meshing.



Gambar 4-1 Pemodelan awal *meshing* spesimen dengan *notch*

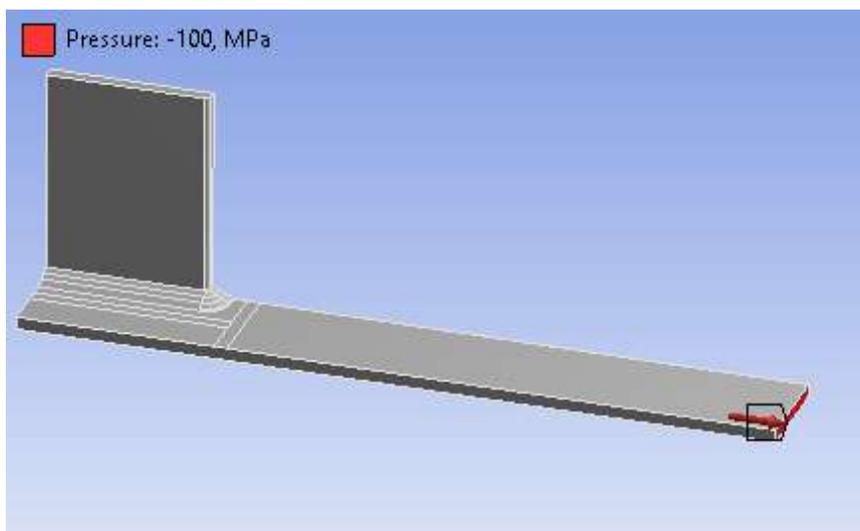
Pemilihan ukuran mesh sangat mempengaruhi parameter yang diperoleh, namun adanya bantuan code dari (IIW,2009) untuk ukuran mesh pada bagian *notch* sebesar $\leq 0,25$ mm sangat membantu dalam proses pemodelan. Proses meshing pada spesimen akan melalui

tahapan *mesh sensitivity* dimana dalam penentuan ukuran meshing pada bagian lain selain pada bagian notch harus diperoleh nilai yang dianggap telah stabil.

Pada Gambar 4.1 diatas, ukuran mesh pada bagian *notch* telah mengikuti aturan minimal dari ukuran *mesh* yang diberikan oleh (IIW,2009) yakni minimal sebesar $\leq 0,25$ mm. Gambaran ukuran dari *mesh* yang digunakan jelas terlihat pada gambar, dengan ukuran mesh pada area *notch* sebesar 0,25 mm serta ukuran pada bagian sisi depan, kanan dan kiri serta pada stiffner spesimen semakin membesar. Jenis *meshing* yang digunakan dalam pemodelan metode numerik FEM adalah jenis mesh *quadratic hexahedral* (type solid 186). Setelah dilakukan proses *mesh* pada spesimen *notch* maka perolehan beberapa nilai tegangan akan diketahui melalui ouput hasil yang diinginkan. Untuk pembahasan tentang meshing dan meshing sensitivity akan dibahas pada sub bab selanjutnya.

4.1.1.1 Pembebanan statis dan kondisi batas (*boundary condition*)

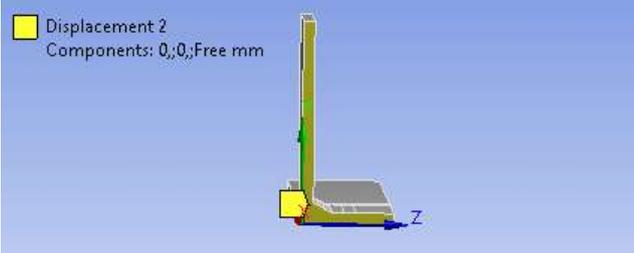
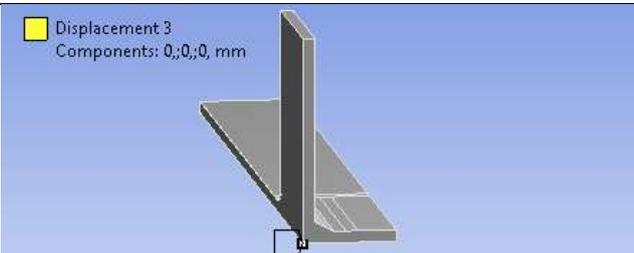
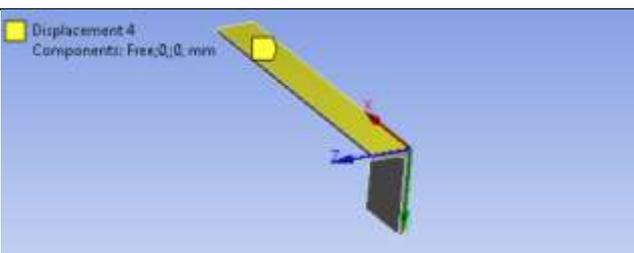
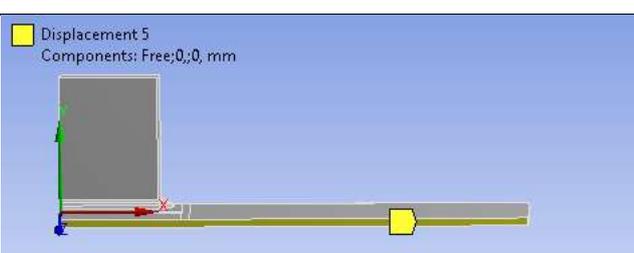
Setelah dilakukan pemodelan spesimen dilanjutkan *meshing*, maka langkah selanjutnya memberikan beberapa pembebanan (*load*) dan kondisi batas (*boundary condition*) pada spesimen dengan mengikuti keadaan sebenarnya yang terjadi pada saat eksperimen. Nilai pembebanan dan kondisi batas dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan Gambar 3.4 sebelumnya. Untuk memperjelas dalam input nilai pembebanan serta kondisi batas (*boundary condition*) pada spesimen yang dilakukan pada metode numerik FE dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3berikut ini.



Gambar 4-2 Pembebanan pada spesimen

Pada Gambar 4.2 diatas menjelaskan tentang jenis pembebanan yang dilakukan pada spesimen dengan metode numerik FE mengikuti perlakuan sebelumnya melalui metode eksperimen. Untuk jenis tegangan yang diberikan adalah jenis tegangan tarik dengan nilai sebesar 100 MPa. Besar dan jenis tegangan yang diberikan pada spesimen akan

mempengaruhi hasil tegangan yang akan dianalisa lebih lanjut. Setelah memberikan besar dan jenis tegangan langkah selanjutnya adalah penentuan kondisi batas dari spesimen, secara umum dari hasil eksperimen telah diberikan melalui Gambar 4.3, sehingga jika diaplikasikan dalam metode numerik FE akan diperoleh gambaran sebagai berikut.

No.	Gambaran kondisi batas	Keterangan
1		Free : x Fix : y dan z
2		Free : z Fix : x dan y
4		Free : - Fix : x, y dan z
5		Free : x Fix : y dan z
6		Free : x Fix : y dan z

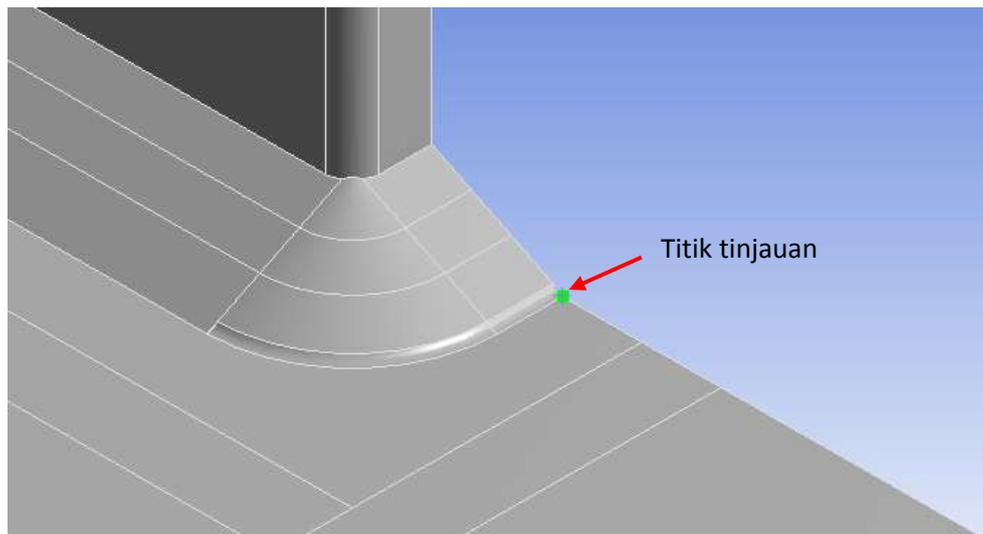
Gambar 4-3 Berbagai kondisi batas yang diberikan pada spesimen

Gambar 4.3 di atas menjelaskan tentang cara *input boundary condition* pada spesimen yang digunakan mengikuti kondisi real saat dilakukan melalui metode eksperimen. Ketiga

koordinat (x, y dan z) menyatakan arah dari spesimen dapat bergerak maupun diam/fix.

4.1.1.2 Meshing pada spesimen

Secara umum hasil proses meshing telah dijelaskan pada bagian awal serta bisa dilihat pada Gambar 4.1, namun penentuan ukuran meshing pada bagian lain selain pada bagian notch menjadi masalah ketika dilakukan pemodelan FEM. Berikut Gambar 4.4 dan Tabel 4.1 tentang lokasi/ titik yang ditinjau serta hasil (ouput) dari metode meshing sensitivity dan hasil yang diperoleh dengan melihat karakteristik nilai tegangan dan nodes.



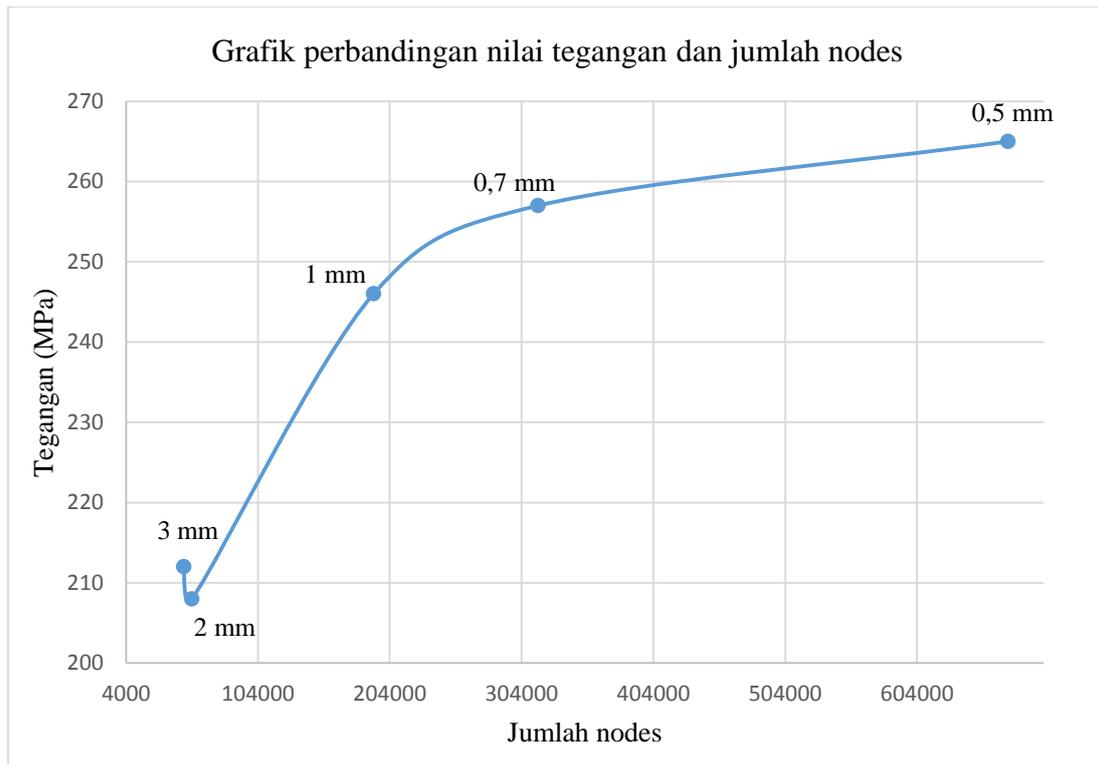
Gambar 4-4 Titik tinjauan dalam *meshing sensitivity*

Titik tinjauan pada Gambar 4.4 merupakan acuan dalam mendapatkan output berupa nilai stress (MPa) dan jumlah node yang ada. Dengan menetapkan nilai mesh pada bagian notch dari dokumen IIW serta mesh global untuk tiap bagian (lihat Gambar 3.8), maka diperoleh hasil sebagai berikut.

Tabel 4-1 Hasil metode *meshing sensitivity* pada spesimen

Ukuran mesh (mm)			Output	
Mesh global (main plate+stiffner)	Mesh sekitar notch	Weld bead	Stress (MPa)	Jumlah Nodes
3	0,25	0.5	265	673219
		0.7	257	316636
		1	246	191747
		2	208	53947
		3	212	47759

Dari Table 4.1 diatas jika dibentuk dalam grafik hubungan stress dan jumlah nodes, maka bisa dilihat pada Gambar 4.5 berikut



Gambar 4-5 Grafik *meshing sensitivity* pada spesimen

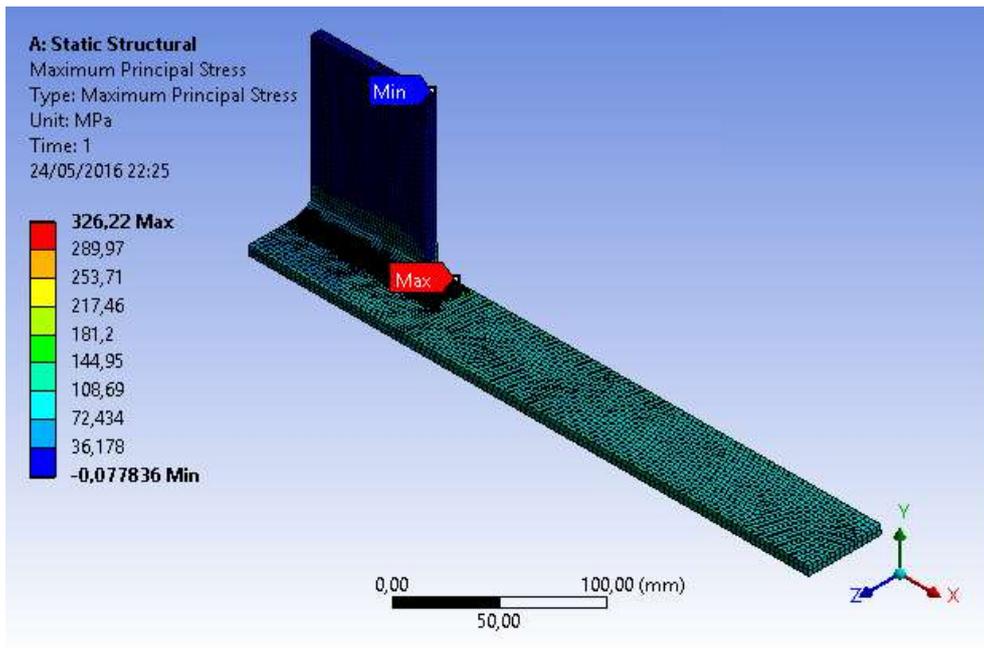
Dari Gambar 4.5 tentang *meshing sensitivity* diatas, maka dapat diambil kesimpulan bahwa nilai ukuran *meshing* sudah mulai stabil dan digunakan untuk pemodelan selanjutnya terdapat pada nilai sebesar 0,7 mm.

4.1.1.3 Tegangan notch (*notch stress*) dan *Stress Concentration Factor* (SCF)

Langkah selanjutnya setelah dilakukan input pembebanan, kondisi batas serta proses *meshing* pada spesimen, maka pada tahap ini akan diperoleh hasil berupa tegangan. Tegangan yang diperoleh adalah jenis tegangan yang berada didaerah notch atau disebut dengan notch stress. Jenis Notch stress disini yaitu tegangan maksimum/terbesar pada daerah notch akibat dari diskontinuitas dari spesimen. Berikut hasil yang diperoleh, diantaranya :

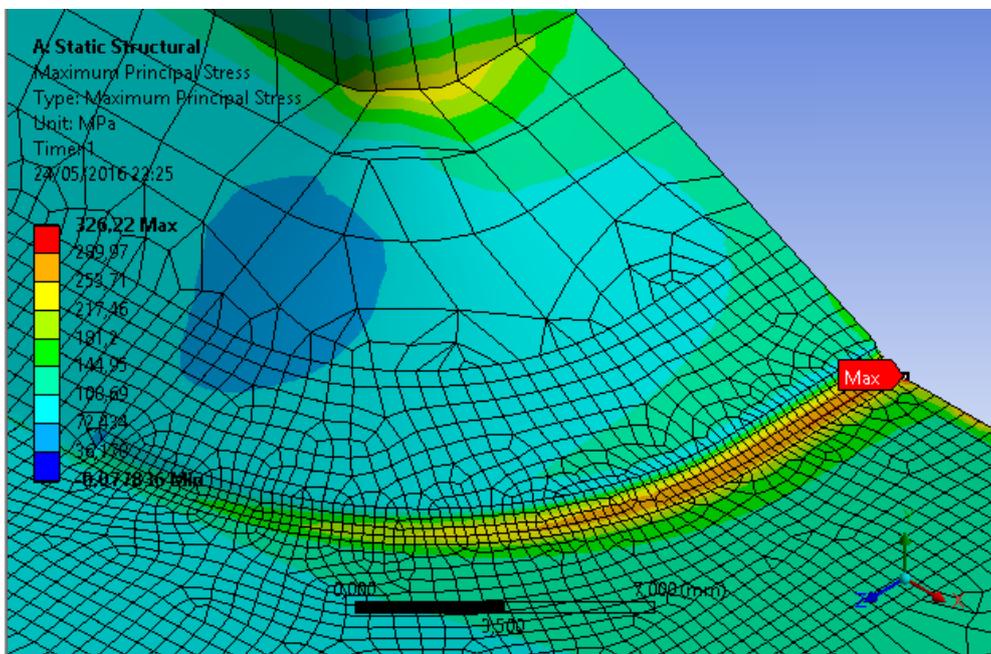
- a. Tegangan *maximum prinsipal stress*,
- b. Nilai SCF untuk tegangan *maximum prinsipal stress*.

Pada nilai *maximum prinsipal stress* untuk pemodelan spesimen dengan metode *notch* diperoleh hasil sebesar 326,22 MPa yang dapat dilihat pada Gambar 4.6. Nilai max. pada gambar dengan warna merah menyatakan tegangan maksimum *prinsipal stress* dengan nilai dan posisi didaerah yang ditunjukkan. Selain itu bisa dilihat tegangan minimum prinsipal stress bernilai sangat kecil dan letaknya jauh dari daerah *notch* pada spesimen, ini menandakan bahwa didaerah tersebut pengaruh dari bentuk *notch* sangatlah kecil.



Gambar 4-6 Nilai *maximum prinsipal stress* pada spesimen

Gambar 4.7 berikut menampilkan letak detail dari tegangan maksimum prinsipal stress untuk spesimen yang digunakan. Terlihat dengan detail bahwa letak dari nilai maximum prinsipal stress terletak pada bagian ujung kiri dari geometri notch. Sehingga bisa disimpulkan bahwa letak tegangan maksimum prinsipal pada spesimen dipengaruhi oleh geometri notch.



Gambar 4-7 Nilai dan letak *maximum prinsipal stress* pada spesimen

Setelah diperoleh nilai masing-masing tegangan untuk metode *notch stress*, maka dapat dihitung nilai SCF untuk masing-masing tegangan tersebut dengan menggunakan persamaan nilai SCF, yaitu :

$$K_s = \frac{\sigma_{notch\ stress}}{\sigma_{nominal}} \quad (4.1)$$

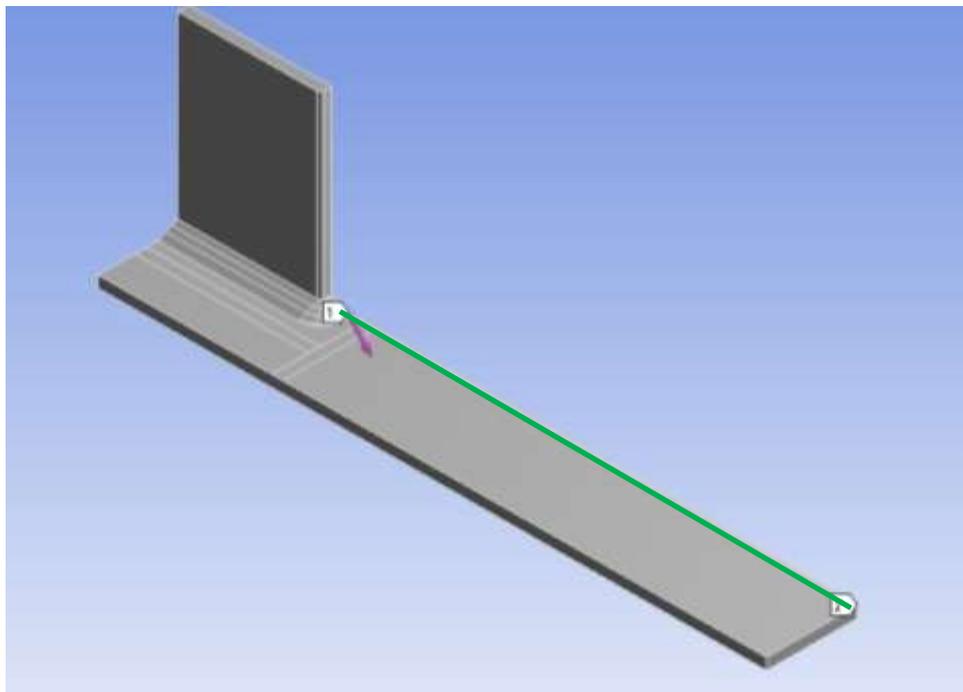
Tabel 4-2 Nilai SCF pada tegangan *notch*

No.	SCF Jenis tegangan	Besar tegangan (MPa)	Tegangan nominal (MPa)	Nilai SCF
1	K_s <i>prinsipal</i>	326,22	100	3,26

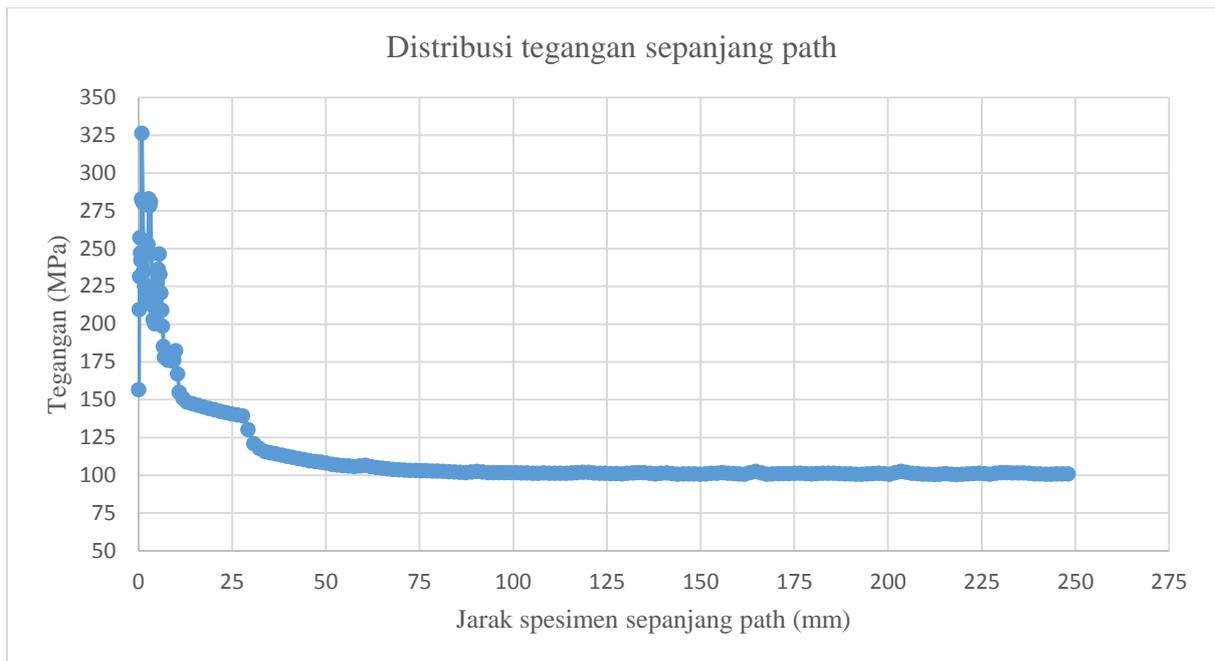
Dengan diperoleh nilai SCF pada Tabel 4.2 diatas, maka dapat diartikan telah terjadi tegangan sebesar 3,26 kali dari tegangan nominal yang terletak pada posisi maksimum pada spesimen, yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 diatas.

4.1.1.4 Distribusi tegangan pada spesimen

Setelah diperoleh berbagai jenis tegangan pada *notch* serta perhitungan nilai SCF, selanjutnya dilakukan analisa lanjutan pada spesimen untuk mengetahui distribusi tegangan yang pada spesimen dengan menggunakan *line path* sebagaimana dilihat pada Gambar 4.8 berikut.



(a)



(b)

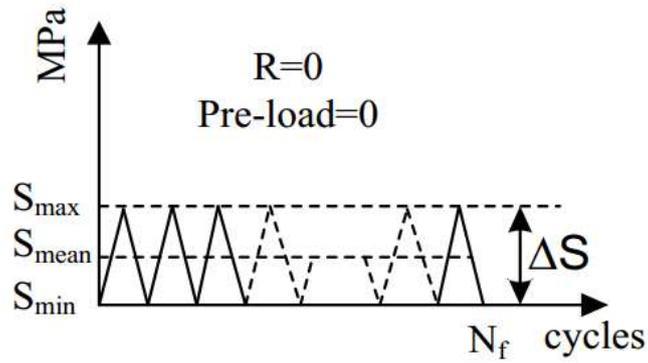
Gambar 4-8 a. Analisa tegangan sepanjang garis dari spesimen menggunakan *line path*

b. Distribusi tegangan prinsipal sepanjang path

Berdasarkan Gambar 4.8 (a) dan (b) dapat jelaskan bahwa nilai distribusi tegangan dimulai dari 156,57 kemudian membesar hingga mencapai *pick* (puncak) dengan nilai maksimum 326,22 MPa yang berada tepat pada geometri notch hingga kemudian mengecil kembali dan konstan pada nilai sekitar 100 MPa.

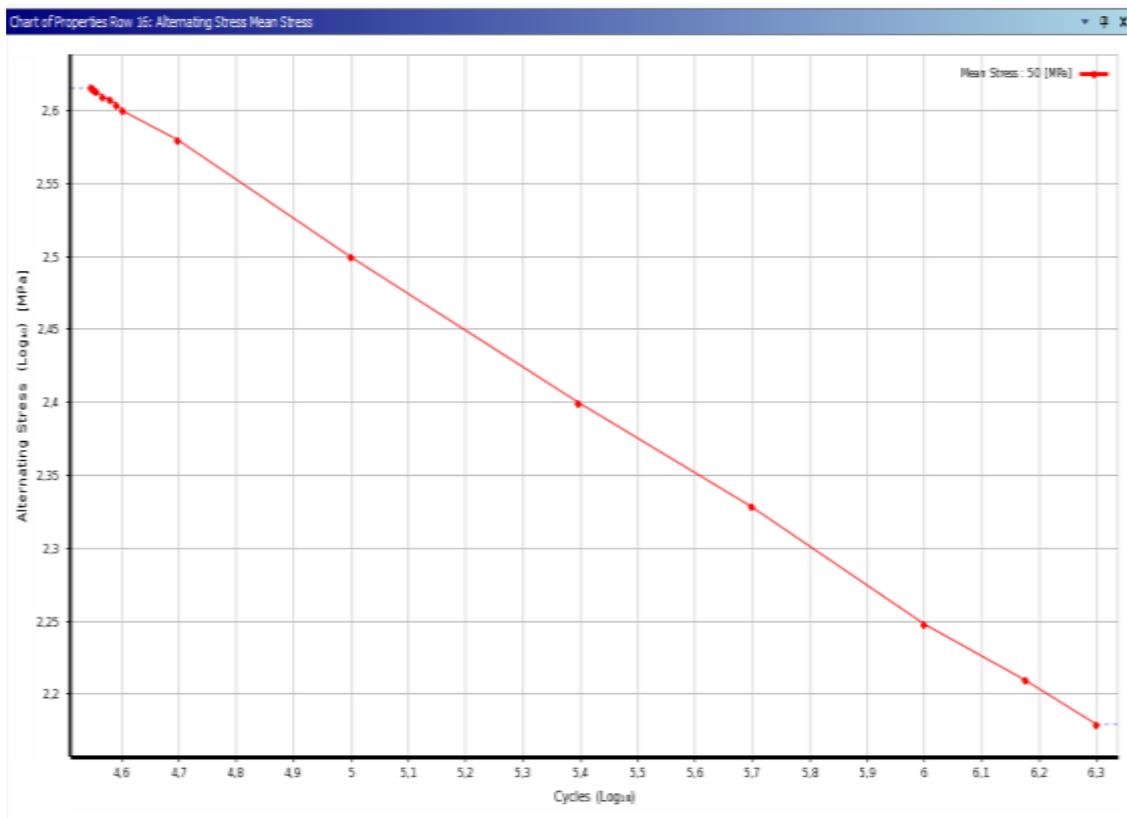
4.1.1.5SN Curve

Langkah untuk mendapatkan umur kelelahan pada spesimen diperoleh dengan melanjutkan analisa numerik sebelumnya dengan mengikuti beberapa *guidlines* sebagai pedoman yang telah disebutkan dalam dokumen (IIW,2009). Penyesuaian nilai variasi pembebanan *fatigue* pada tahap ini menyesuaikan dengan keadaan real pada saat eksperimen yaitu menggunakan jenis *Constant Amplitude Loading* dengan nilai beban (*load*) sebesar 100 MPa, dengan ilustrasi pada Gambar 4.9 berikut.



Gambar 4-9 Kondisi pembebanan *fatigue* jenis *constant amplitude loading* (Syahroni,2014)

Selanjutnya pada tahap analisa nilai *S-N Curve* yang digunakan, dimana kriteria yang digunakan dalam pemodelan ini dapat dilihat pada Tabel 2.2 diberikan oleh Almerneiss ataupun *guidelines* dalam dokumen (IIW,2009). Nilai ini disubsitusikan pada *engineering data* dalam metode numerik FEM sehingga dalam proses *running* yang dilakukan metode numerik FEM sudah mengikuti sifat material dari spesimen yang digunakan. Berikut Gambar 4.10 untuk *S-N Curve* yang digunakan.

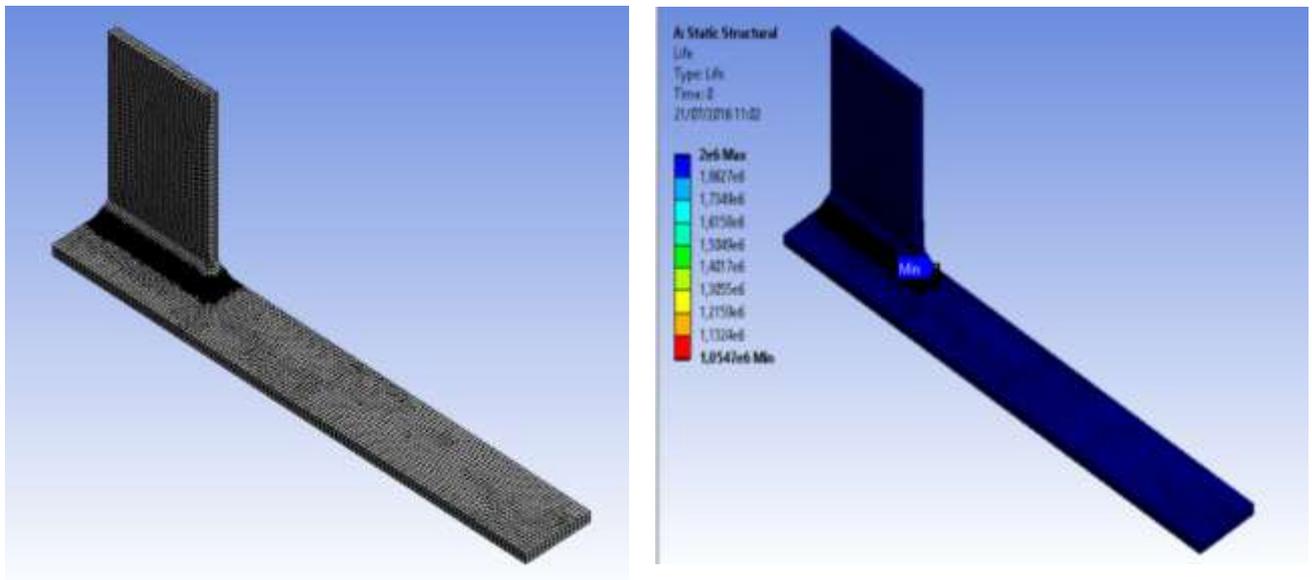


Gambar 4-10 *S-N Curve* yang digunakan

Setelah langkah-langkah diatas dilakukan secara berurutan, maka hasil terakhir adalah perolehan nilai umur kelelahan (*fatigue*) dengan melakukan *running* pada pemodelan dengan FEM hingga diperoleh umur kelelahan berupa nilai N yang sesuai dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan.

4.1.1.6 Umur kelelahan

Tahap terakhir dalam pemodelan numerik FEM dengan metode *notch* adalah membandingkan nilai yang diperoleh saat eksperimen dengan hasil dari pemodelan menggunakan metode numerik FEM melalui hasil umur kelelahan berupa nilai N (jumlah siklus hingga patah) yang telah dilakukan pada proses *running* sebelumnya. Berikut hasil *running* perolehan umur kelelahan pada spesimen dengan nilai *meshing* yang sudah ditentukan, dapat dilihat pada Gambar 4. 11.



Gambar 4-11 Ukuran mesh yang sudah sesuai serta hasil umur kelelahan yang diperoleh

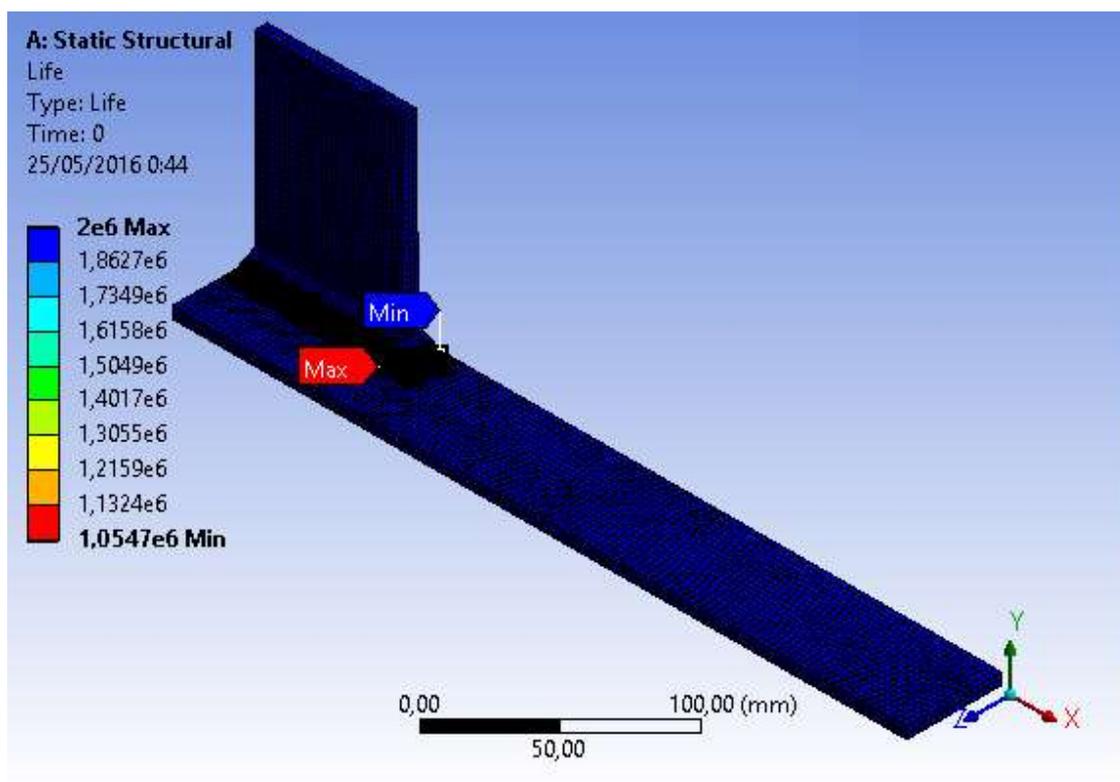
Hasil perolehan umur kelelahan lebih mendetail dapat dilihat pada Gambar 4.12, dengan melihat keterangan *minimum life* pada pemodelan numerik sebesar 1.049.000 siklik, yang berarti spesimen ini akan bertahan menahan pembebanan secara berulang hingga batas 1.054.700 siklik dan akhirnya akan mengalami kegagalan/*failure*.

Perolehan dengan metode numerik ini selanjutnya akan divalidasikan dengan hasil eksperimen seperti dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

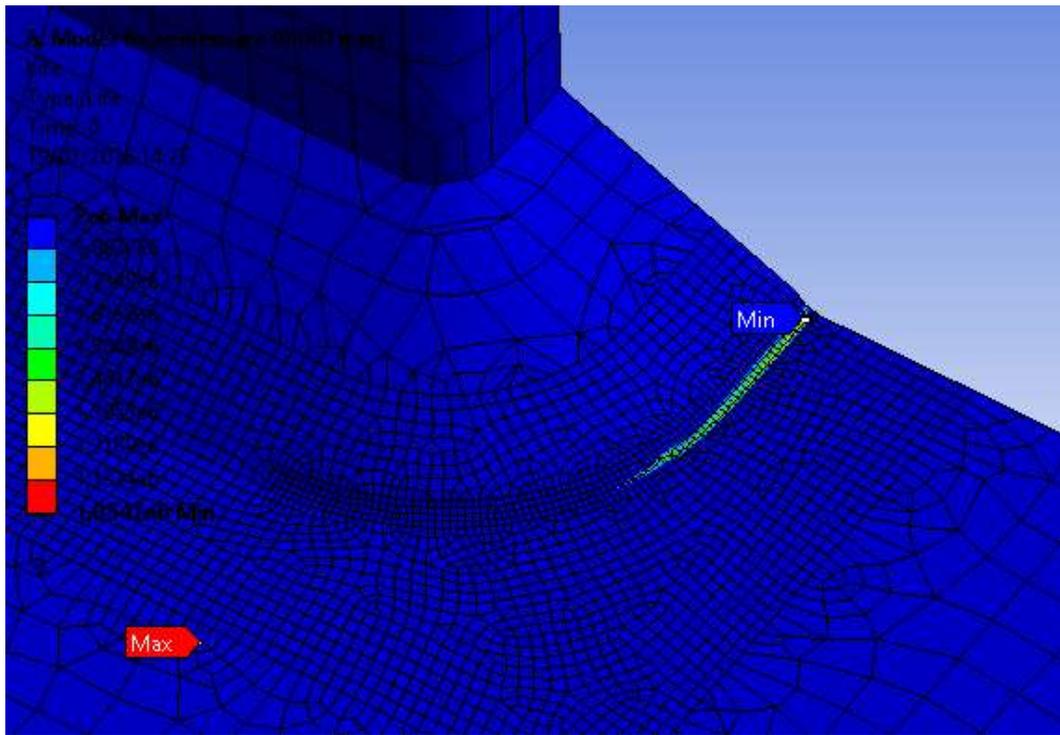
Tabel 4-3 Validasi umur kelelahan dengan nilai N

No.	Metode	N (cycle)	% error
1	Eksperimen	1.135.825	7,14 %
2	Numerik (<i>FEM</i>)	1.054.700	

Validasi perolehan umur kelelahan dengan menggunakan metode eksperimen dan metode pemodelan numerik FEM diperoleh kriteria error sebesar 7,14%. Sehingga dari hasil ini disimpulkan bahwa pemodelan numerik pada spesimen sambungan las berpenegar memanjang dengan menggunakan metode notch stress dapat dikatakan berhasil dikarenakan kriteria error dari hasil validasi masih terbilang kecil.



(a)



(b)

Gambar 4-12a. Hasil nilai umur kelelahan (fatigue) pada spesimen dengan pemodelan numerik FEM

b. Lokasi koordinat minimum life pada spesimen

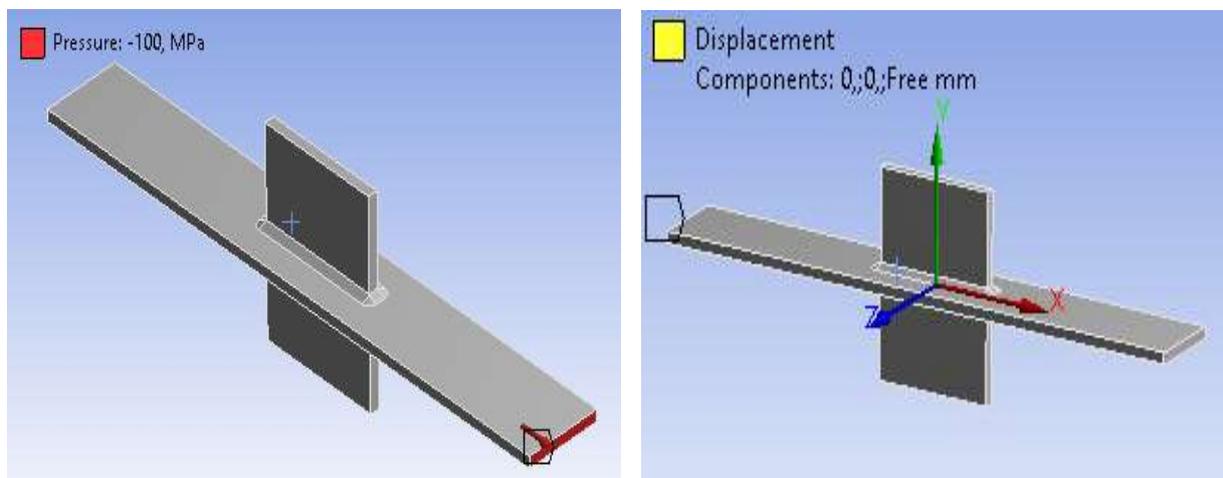
4.1.2 Hasil Pemodelan dengan metode *Fracture mechanics*

Berikut ini akan dijelaskan cara perolehan dan hasil *Stress Intensity Factor* (SIF) melalui metode *fracture mechanics* melalui pemodelan numerik FEM dan dilanjutkan memprediksi umur kelelahan dengan perhitungan analitis.

4.1.2.1 Pemodelan awal, pembebanan (*load*) dan kondisi batas (*boundary condition*)

Pada pemodelan spesimen dengan metode *fracture mechanics*, pemodelan awal spesimen yang digunakan berupa spesimen utuh (*full specimen*) tanpa dibagi perbagian seperti metode *notch stress*. Alasan digunakan *full specimen* dikarenakan pada proses pembuatan retak/crack serta perambatan retak sesuai dengan kondisi real saat eksperimen (Gambar 3.10). Namun hal ini akan menyebabkan waktu komputasi yang lebih lama.

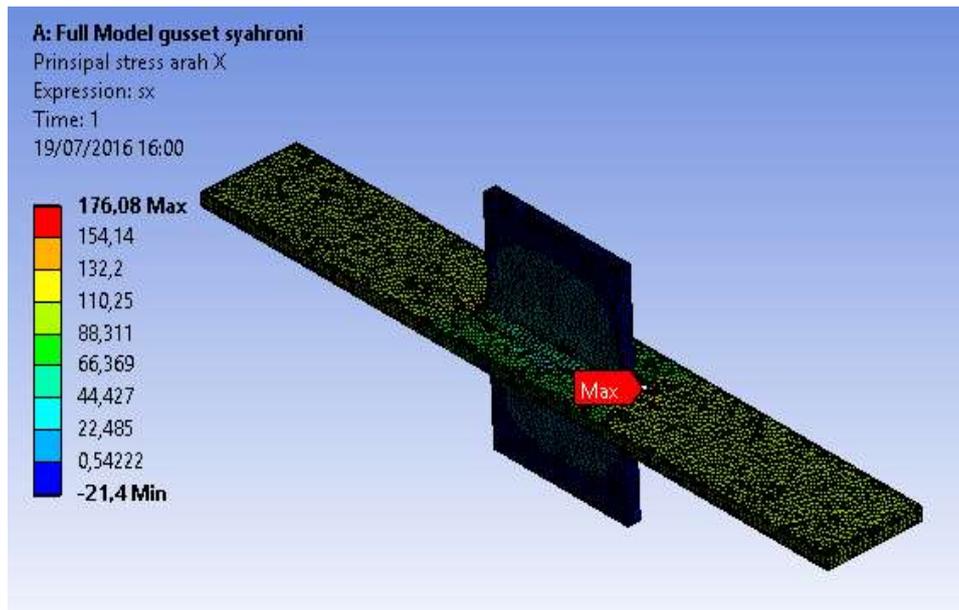
Setelah dilakukan pemodelan spesimen maka tahap selanjutnya adalah proses *meshing* dengan menggunakan type mesh yaitu jenis *quadratic tetrahedral* yang bisa memfasilitasi dari bentuk *crack* yang akan dibuat nanti (Gambar 3.11). Selanjutnya adalah pembebanan yang diberikan dan penentuan kondisi batas (*boundary condition*) dari full spesimen mengikuti keadaan real saat eksperimen.



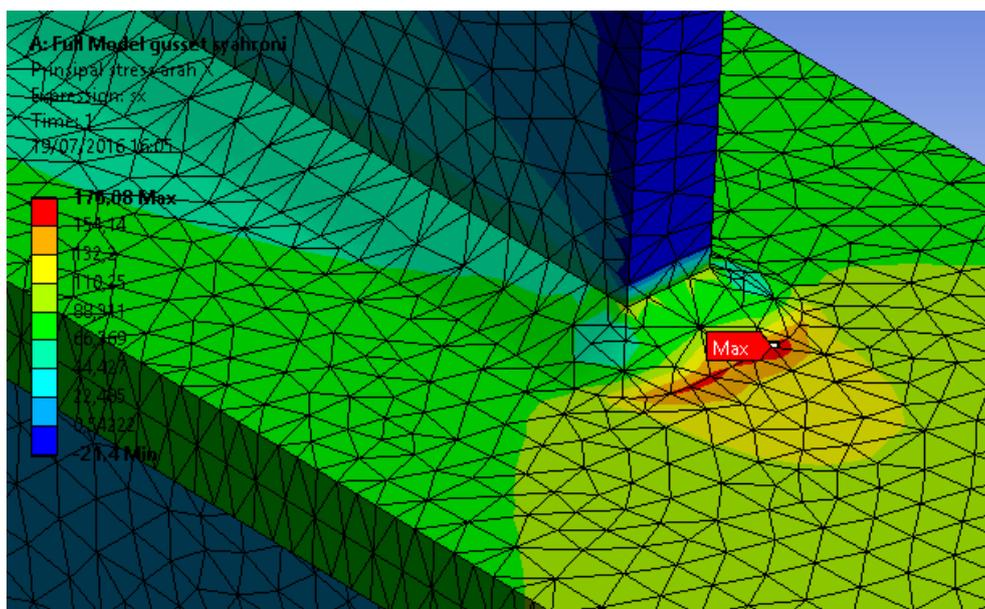
Gambar 4-13 Pembebanan dan syarat batas yang dilakukan melalui metode numerik FE

Gambar 4.13 diatas menjelaskan tentang besar dan jenis pembebanan serta syarat batas yang diberikan pada spesimen.

Pada tahap ini akan diperoleh hasil dari analisa statis berupa tegangan maksimum *prinsipal stress* serta letak dari tegangan maksimum untuk spesimen sebelum adanya retakan/crack. Berikut ini hasil maksimum *prinsipal stress* yang diperoleh melalui pemodelan FE yang dapat dilihat pada Gambar 4.14.



(a)



(b)

Gambar 4-14 Nilai dan letak maksimum prinsipal stress pada spesimen

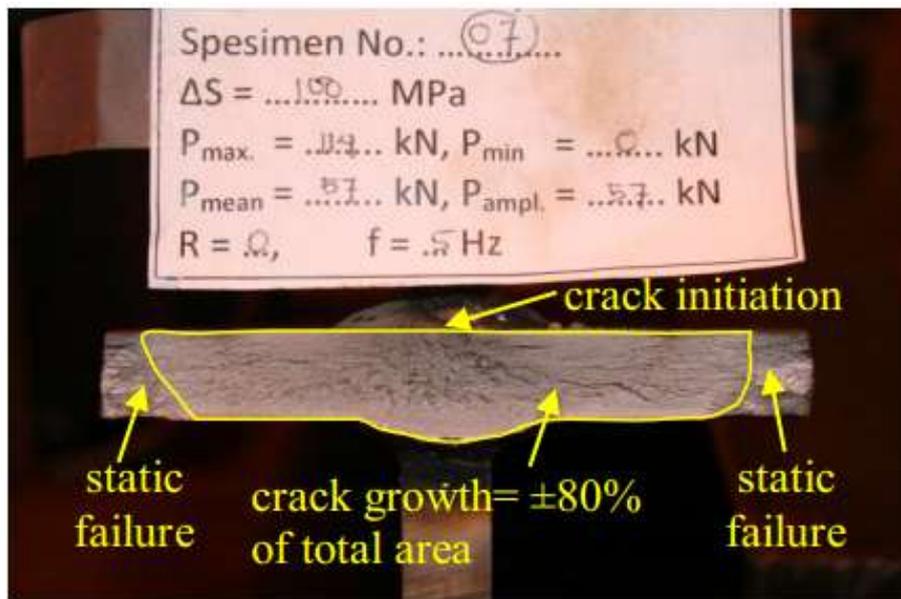
Pada Gambar 4.14 diatas menunjukkan nilai *prinsipal stress* pada spesimen sebesar 176,08 MPa dan letak yang berada tepat didepan *weldtoe* dari spesimen. Inilah hal yang paling penting dalam analisa selanjutnya dimana :

1. Nilai maksimum *prinsipal stress* sebesar 176 MPa inilah yang akan dijadikan patokan dalam analisa SIF melalui persamaan analitis.
2. Letak maksimum *prinsipal stress* yang berada didepan weld toe akan menjadi kordinat retak awal (*crack initiation*), akan akhirnya menjalar hingga patah.

Pemodelan awal akan memberikan hasil yang sangat signifikan terhadap model baik

melalui analisa metode numerik FEM maupun analitis, sehingga perlunya validasi awal dalam model ini agar dalam tahap selanjutnya sudah bisa mendapatkan hasil yang baik dan maksimal.

Berikut Gambar 4.15 menjelaskan kondisi retak awal (*crack initiation*) yang diperoleh saat eksperimen yang bisa menjadi salah satu validasi awal.



Gambar 4-15 Kondisi real spesimen pada saat eksperimen (Syahroni,2014)

Pada Gambar 4.15 di atas disebutkan bahwa letak dari *crack initiation* terletak di depan dari weld toe sehingga pemodelan awal yang diperoleh melalui metode numerik FEM telah sesuai dengan kondisi real spesimen pada saat eksperimen, maka pemodelan numerik FEM ini dapat dilanjutkan hingga mendapatkan nilai SIF serta perolehan umur kelelahan dari spesimen.

4.1.2.2 Stress Intensity Factor /SIF (K_I)

Salah satu hasil keluaran (output) dari pemodelan metode numerik FEM yang akan dilakukan analisa lanjut diantaranya *Stress Intensity Factor*/ SIF atau (K_I). Nilai SIF ini diperoleh dari pemodelan pada spesimen dengan retakan (*crack*), sehingga tinjauan utama pada spesimen yang dimodelkan terletak pada bagian retakan.

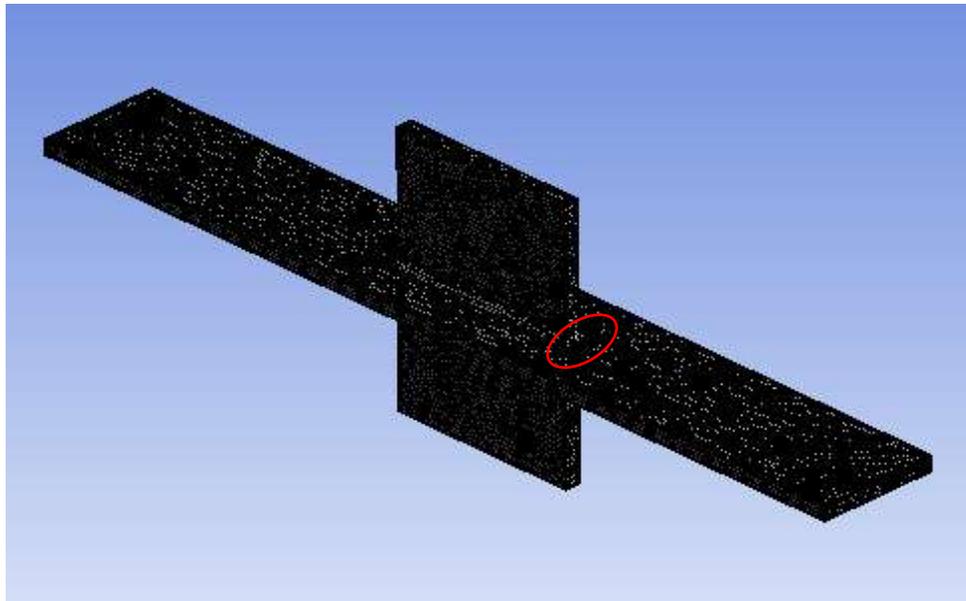
Pemodelan ini kelanjutan dari pemodelan awal sebelumnya yang telah memperoleh parameter penting yakni nilai dan koordinat maksimum *prinsipal stress*. Koordinat yang diperoleh tadi selanjutnya dilakukan pemodelan dimulai dengan retak, dengan nilai retak awal (a_0) sebesar $a_0 = 0,5$ mm atau 0,0005m (DNV-RP-C203-2010), dilanjutkan mencari nilai lebar retak (c) yang diperoleh dari perbandingan $\frac{a}{2c} = 0,15$ hingga mencapai nilai retak kritis (a_{cr}) yakni sampai batas ketebalan dari spesimen.

Berikut Gambar 4.16 akan memberikan gambaran tentang langkah dan hasil

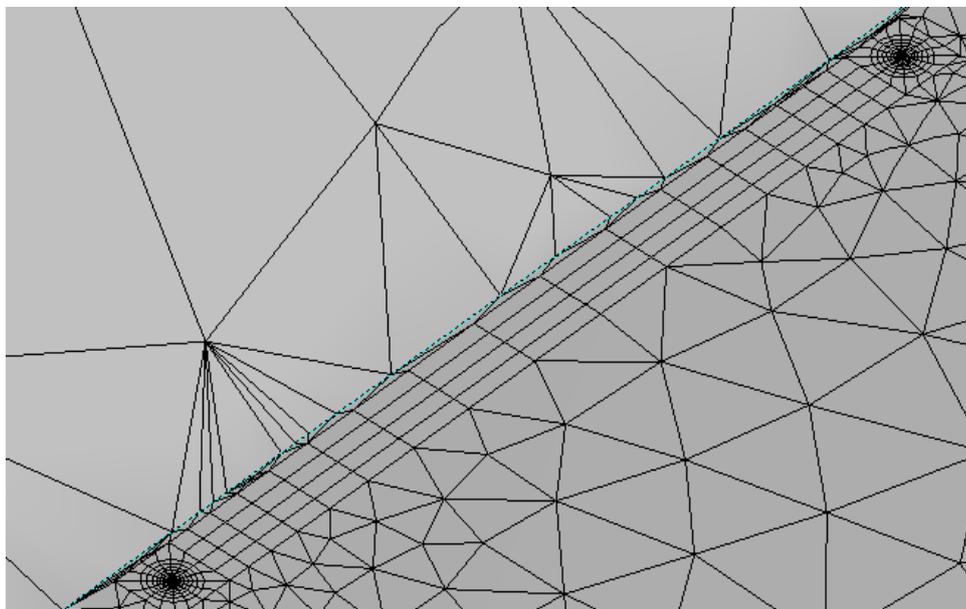
pemodelan dengan bantuan metode numerik FEM untuk perolehan SIF pada spesimen yang mengalami retak dengan nilai input beberapa parameter nilai.

Berikut salah satu contoh pemodelan untuk input nilai (a dan c) yang telah dilakukan :

$a = 0,0005$ meter dan $c = 0,001667$ meter



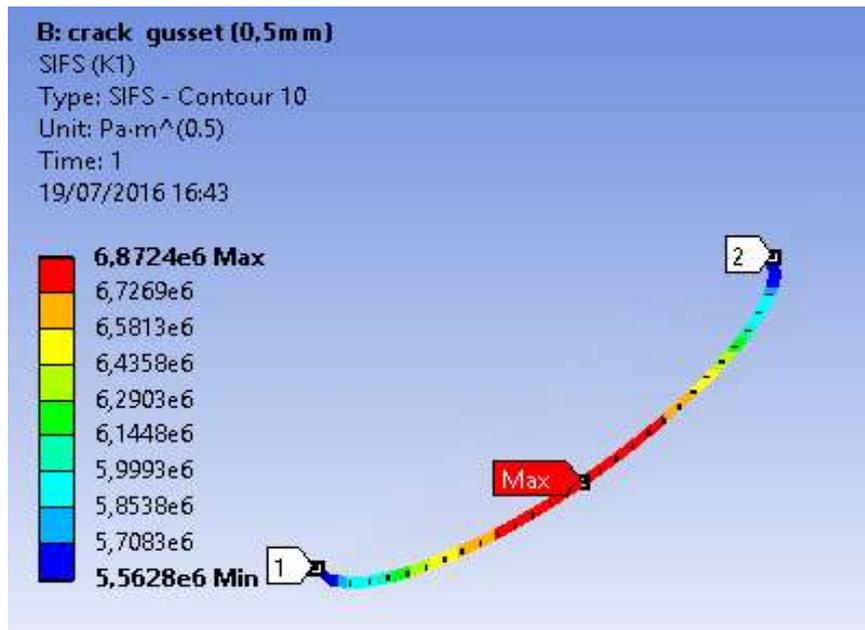
(a)



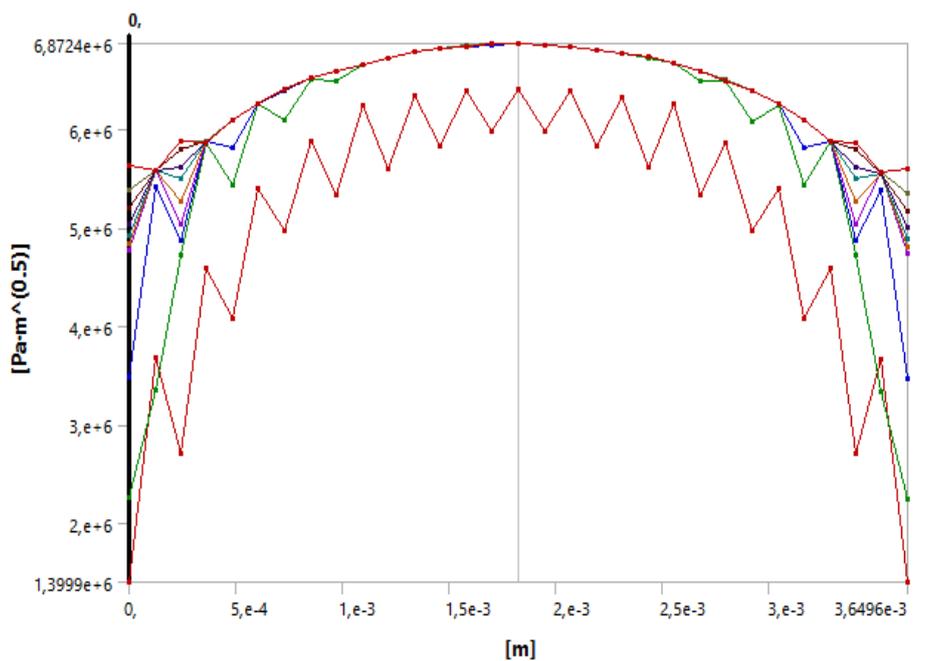
(b)

Gambar 4-16 Pembuatan model dengan retakan (*crack*)

Setelah dilakukan pemodelan dengan retakan, langkah selanjutnya yakni dengan analisa fracture mechanics dengan memanfaatkan fracture tools pada software sehingga diperoleh hasil *Stress Intensity Factor* (SIF) yang dapat dilihat pada Gambar 4.17 berikut.



(a)



(b)

Gambar 4-17Perolehan nilai SIF dengan pemodelan FEM

Dari Gambar 4.17 diatas, menunjukkan nilai SIF maksimum yang diperoleh untuk contoh nilai ($a = 0,0005$ meter dan $c = 0,001667$ meter) sebesar $6,872 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ yang terletak pada *deepest point* dari crack spesimen.

Langkah selanjutnya sama dengan langkah diatas, hanya mengubah nilai panjang dan lebar dari retak (a dan c) dengan nilai *increment crack* konstan, pada kasus ini sebesar $1,1 \text{ mm}$ atau $0,0011$ meter hingga kondisi batas ketebalan dari spesimen. Sehingga jika variasi nilai a

dan c diubah maka nilai SIF yang diperoleh dapat dirangkum dalam Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4-4 Hasil perolehan nilai SIF yang diperoleh dari pemodelan numerik FEM

No.	a (m)	c (m)	a/2c	SIF (MPa√m)
1	0,0005	0,001667	0,15	6,872
2	0,0016	0,005333		10,135
3	0,0027	0,009		12,521
4	0,0038	0,012667		15,096
5	0,0049	0,016333		17,787
6	0,0060	0,02		20,728
7	0,0071	0,023667		24,057
8	0,0082	0,027333		27,531
9	0,0093	0,031		30,659
10	0,0104	0,034667		33,730
11	0,0115	0,038333		44,610

Dari Tabel 4.4 diatas, dapat disimpulkan bahwa nilai SIF terbesar pada saat nilai a= 0,0115m dan c =0,038333 m.

4.1.2.3 Validasi Nilai SIF

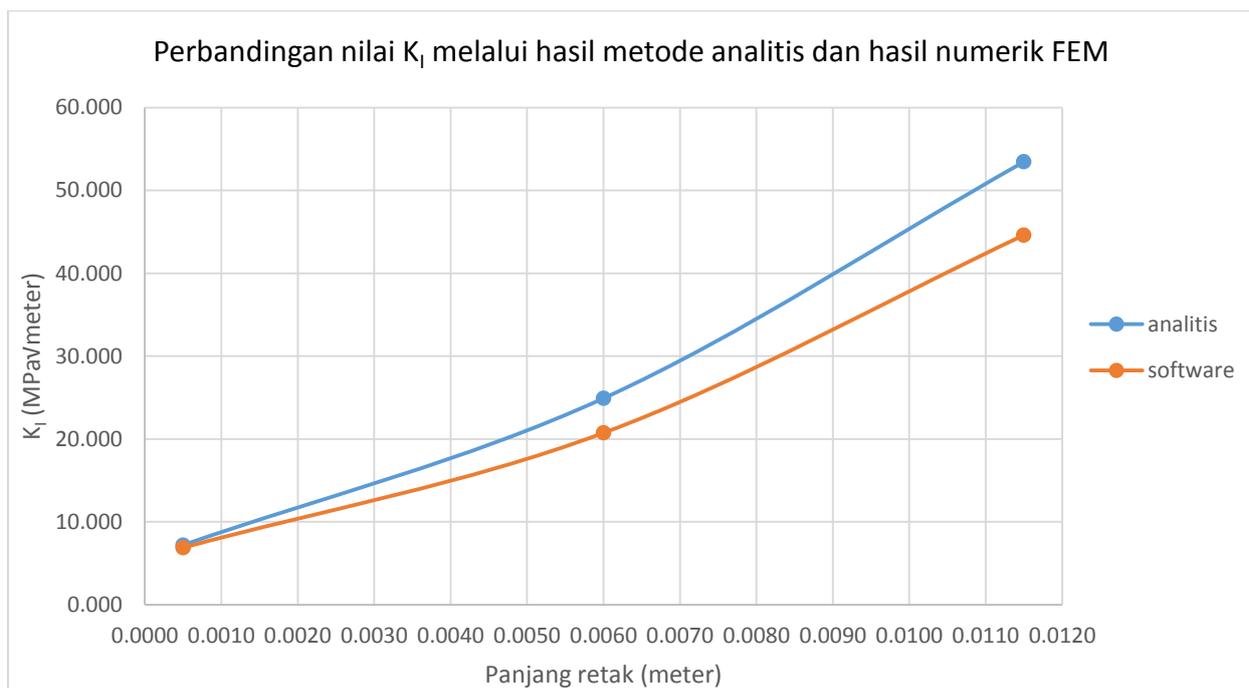
Untuk memastikan apakah nilai yang diperoleh dari hasil pemodelan dengan menggunakan software telah sesuai, maka perlu adanya kontrol berupa validasi nilai yang diperoleh melalui perhitungan analitis sehingga nilai ini juga dapat memberikan Gambaran tentang tingkat kesalahan atau *error* yang terjadi. Perhitungan analitis yang dilakukan menggunakan persamaan retak pada pelat dengan bentuk retak semi elips (*semi elliptical crack*) yang bisa dilihat pada persamaan 2.25 sebelumnya, yakni :

$$K_I = 1,12\sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \cdot M_k \quad (3.2)$$

Sehingga jika hasil ditulis dalam Tabel, maka perbandingan nilai antara hasil perhitungan analitis dengan hasil pemodelan numerik FEM dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.18 sebagai berikut.

Tabel 4-5 Validasi nilai KI melalui perhitungan (analitis) vs pemodelan numerik FEM

No.	a (m)	c (m)	a/2c	K_I (analitis)	$K_I(FEM)$
1	0,0005	0,001667	0,15	7,190	6,872
2	0,0060	0,02		24,907	20,728
3	0,0115	0,038333		53,448	44,610



Gambar 4-18 Grafik perbandingan nilai K_I melalui hasil metode analitis dan pemodelan numerik FEM

Dari Tabel dan Gambar grafik diatas menunjukkan bahwa nilai kesalahan (error) yang diperoleh masih dalam kategori baik, dimana range untuk nilai kesalahan yang masih bisa diterima dalam rentangan 5% - 20%, sehingga K_I dari nilai pemodelan dapat dianalisis lebih lanjut.

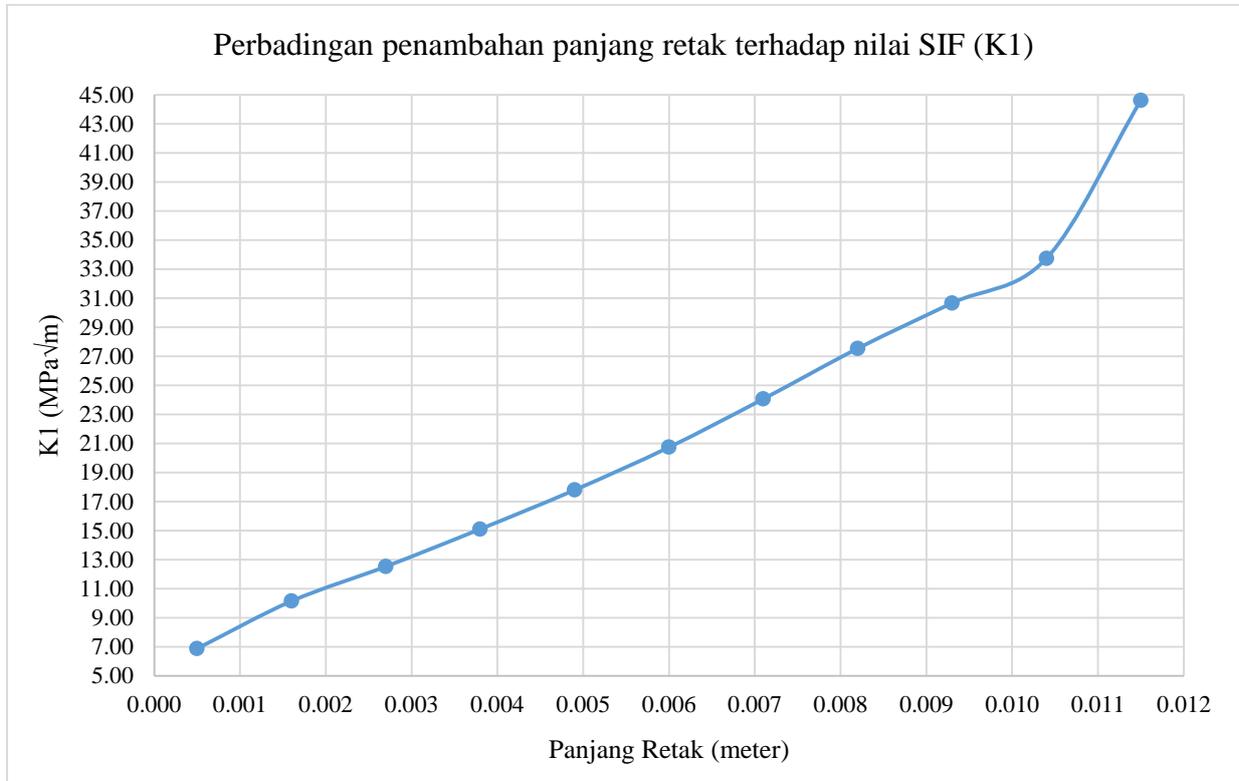
4.1.2.4 Perbandingan nilai SIF (ΔK)

Setelah diperoleh nilai SIF untuk setiap pemodelan (a dan 2c) yang bervariasi serta telah dilakukan validasi nilai SIF, maka langkah selanjutnya adalah menghitung nilai perbandingan nilai SIF (ΔK) dengan menghitung selisih dari setiap nilai SIF maksimum dengan beberapa variasi nilai a dan 2c, yang dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4-6 Hasil perolehan nilai perbandingan nilai SIF (ΔK_I)

No.	a_0 (m)	a_f (m)	$a/2c$	K_{Imin}	K_{Imax}	ΔK_I
1	0,0005	0,0016	0,15	6,872	10,135	3,264
2	0,0016	0,0027		10,135	12,521	2,386
3	0,0027	0,0038		12,521	15,096	2,575
4	0,0038	0,0049		15,096	17,787	2,691
5	0,0049	0,006		17,787	20,728	2,941
6	0,006	0,0071		20,728	24,057	3,329
7	0,0071	0,0082		24,057	27,531	3,474
8	0,0082	0,0093		27,531	30,659	3,128
9	0,0093	0,0104		30,659	33,730	3,071
10	0,0104	0,0115		33,730	44,610	10,880

Jika Tabel perjalanan retak mulai dari retak awal (a_0) hingga retak akhir (a_f) diatas dibandingkan dengan perolehan nilai SIF (K_I) maka hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar grafik 4.19 sebagai berikut.



Gambar 4-19 Grafik Perbandingan penambahan panjang retak terhadap nilai SIF (K_I)

4.1.2.5 Laju Perambatan Retak (*Crack Propagation*) dan Umur kelelahan (*Fatigue Life*)

Pada tahap analisa laju perambatan retak dari spesimen yang digunakan, metode penyelesaian yang dipakai adalah dengan cara analitis dengan memasukkan beberapa nilai/parameter hasil yang telah diperoleh sebelumnya pada persamaan laju perambatan retak yaitu :

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m$$

Dengan jenis material spesimen yang digunakan adalah *ferrite-perlite* maka nilai konstanta (c) untuk material ini sebesar $3,6 \times 10^{-10}$, sehingga persamaan diatas menjadi :

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{3,6 \times 10^{-10} \cdot \Delta K^3}$$

Sehingga jika beberapa nilai/parameter sebelumnya disubsitusikan dalam persamaan diatas maka laju perambatan retak dan umur kelelahan (*Fatigue Life*) pada spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4-7Perhitungan laju perambatan retak dan umur kelelahan (*Fatigue Life*) pada spesimen

No.	a ₀ (m)	a _f (m)	a/2c	ΔK _I (MPa√m)	ΔN (analitis)	ΔN (eksperimen)
1	0,0005	0,0016	0,15	3,264	87.870	
2	0,0016	0,0027		2,386	224.946	
3	0,0027	0,0038		2,575	178.961	
4	0,0038	0,0049		2,691	156.801	
5	0,0049	0,006		2,941	120.117	
6	0,006	0,0071		3,329	82.823	
7	0,0071	0,0082		3,474	72.879	
8	0,0082	0,0093		3,128	99.837	
9	0,0093	0,0104		3,071	105.500	
10	0,0104	0,0115		10,880	2.372	
Total umur kelelahan (<i>Fatigue Life</i>)					1.132.186	1.135.825

Berdasarkan hasil pada Tabel diatas, maka dapat disimpulkan nilai kesalahan (*error*) antara perhitungan analitis dan hasil eksperimen sebesar 0,32% yang berarti analisa *fatigue assesment* dengan nilai (SIF) pada sambungan las berpenegar memanjang melalui metode *fracture mechanics* berhasil dilakukan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Lampiran 1

Data Hasil Eksperimen (Data Validasi)

Berikut data hasil eksperimen sebagai validasi dari pemodelan yang dilakukan $\sigma = 100$ MPa

R = 0

No	Specimen No.	R	σ_{nom}	N	Failure	Failure location
1	A-17	0	100	1,139,055	yes	left
2	A-01	0	100	1,199,370	yes	left
3	A-07	0	100	1,069,049	yes	right

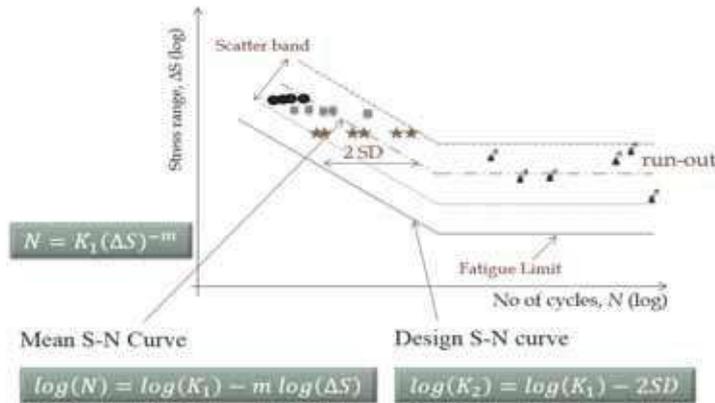
Lampiran 2
Design SN Curve

Data Awal (hasil eksperimen)

R=0

No	Specimen No.	R	σ_{nom}	N	Failure	Failure location
1	A-17	0	100	1,139,055	yes	left
2	A-01	0	100	1,199,370	yes	left
3	A-07	0	100	1,069,049	yes	right

Langkah pembuatan dan bagian SN Curve



Dari gambar diatas diperoleh :

$$\text{Log}(N) = \text{Log}(K_1) - m \text{Log}(\Delta S)$$

Atau

$$\text{Log}(N) = \text{Log}(a) - m \text{Log}(\Delta S)$$

Sehingga

$$\text{Log}(\Delta S) = \frac{\text{Log}(a) - m \text{Log}(N)}{m}$$

Dengan nilai masing- masing dari tiap variabel mengikuti dari hasil eksperimen diatas serta dari referensi buku almernaise dan IIW,2009 berikut

Table 11.1 Details of basic SN-curves – Air.

Class	$N \leq 10^7$				$N > 10^7$	
	log a	log s	log \bar{a}	m	log \bar{a}	m
B	15.3697	0.1821	15.01	4.0	17.01	5.0
C	14.0342	0.2041	13.63	3.5	16.47	5.0
D	12.6007	0.2095	12.18	3.0	15.63	5.0
E	12.5169	0.2509	12.02	3.0	15.37	5.0
F	12.2370	0.2183	11.80	3.0	15.00	5.0
F2	12.0900	0.2279	11.63	3.0	14.72	5.0
G	11.7525	0.1793	11.39	3.0	14.32	5.0
W	11.5662	0.1846	11.20	3.0	14.00	5.0
T	12.6606	0.2484	12.16	3.0	15.62	5.0

dengan menyesuaikan hasil pada tabel penelitian, diperoleh ;
 m 4
 log (a) 15.01
 sehingga

$$\text{Log}(\Delta S) = \text{Log}(a) - m \text{Log}(N)/m$$

N	Log(N)	Log (S)	(ΔS)	
10	1.00	3.503	3,162.280	
100	2.00	3.253	1,778.280	
1,000	3.00	3.003	1,000.000	
10,000	4.00	2.753	562.340	
20,000	4.30	2.677	478.630	
30,000	4.48	2.633	426.570	
35,000	4.54	2.616	416.870	
35,050	4.54	2.616	413.360	
35,100	4.55	2.616	413.209	
				Batas
				yield
35,145	4.55	2.616	413.070	strength
35,200	4.55	2.616	412.952	
35,400	4.55	2.615	412.280	
35,600	4.55	2.615	412.090	
35,700	4.55	2.614	411.150	
36,000	4.56	2.613	410.000	
37,000	4.57	2.610	407.000	
38,000	4.58	2.608	405.000	
39,000	4.59	2.605	402.000	
40,000	4.60	2.602	398.110	
50,000	4.70	2.578	380.120	
100,000	5.00	2.503	316.230	
250,000	5.40	2.403	251.190	
500,000	5.70	2.328	213.790	
1,000,000	6.00	2.253	177.830	
1,500,000	6.18	2.208	162.180	
2,000,000	6.30	2.177	151.360	

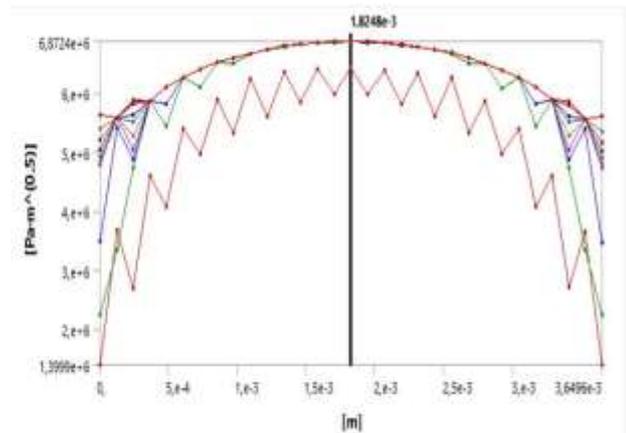
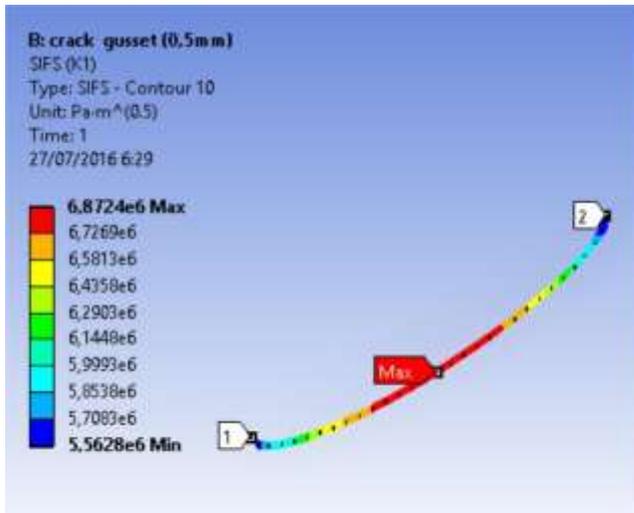
Lampiran 3

Perolehan nilai SIF untuk beberapa nilai (a dan c) yang berbeda melalui FEM

1. Untuk nilai

a = 0,0005 meter

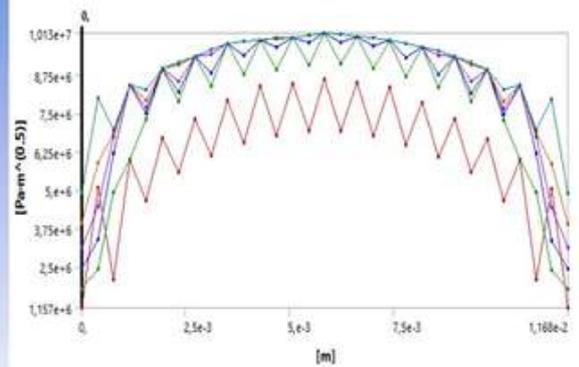
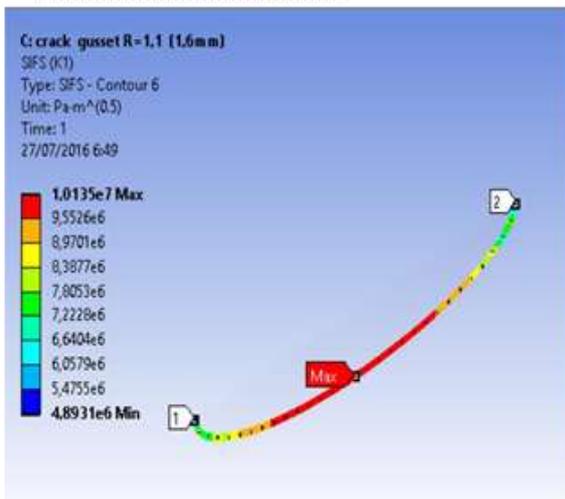
c = 0,001667 meter



2. Untuk nilai

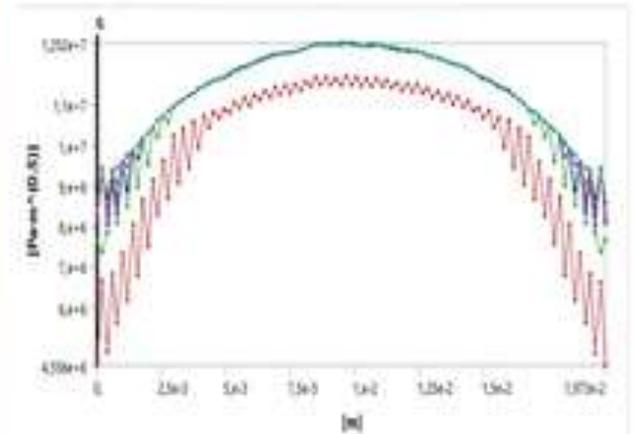
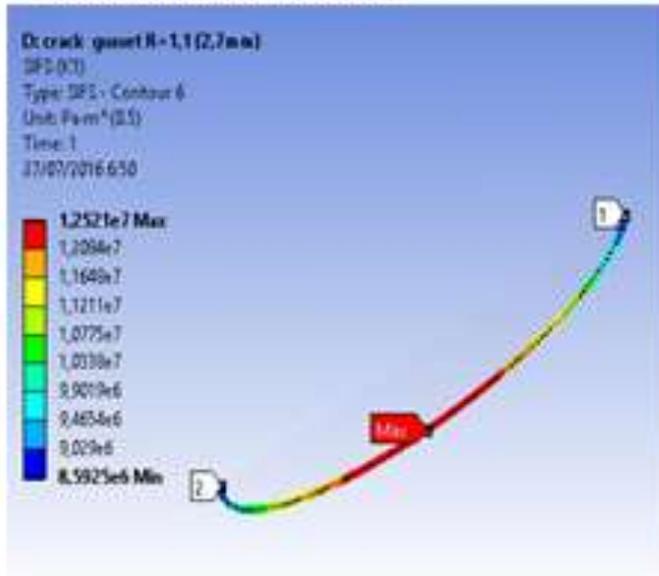
a = 0,0016 meter

c = 0,005333 meter



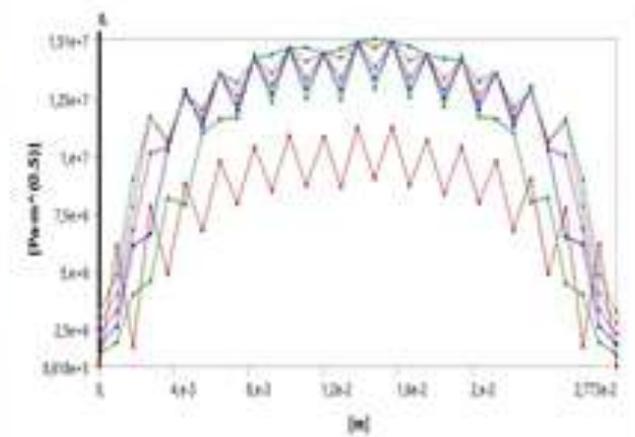
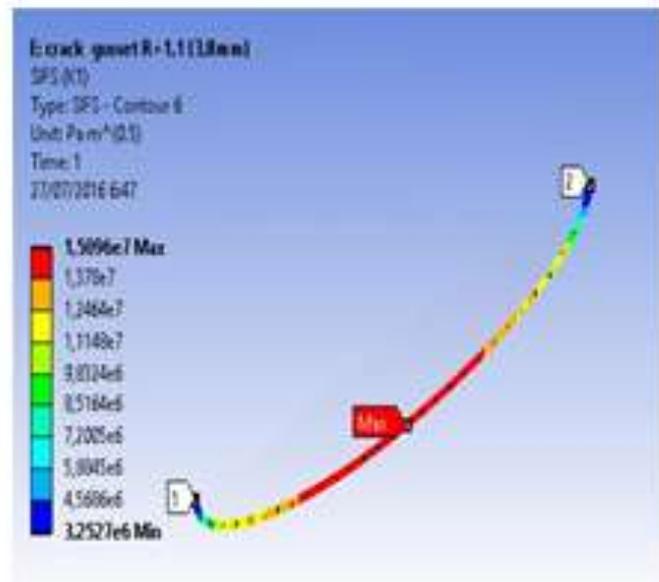
3. Untuk nilai

a	= 0,0027	meter
c	= 0,009	meter



4. Untuk nilai

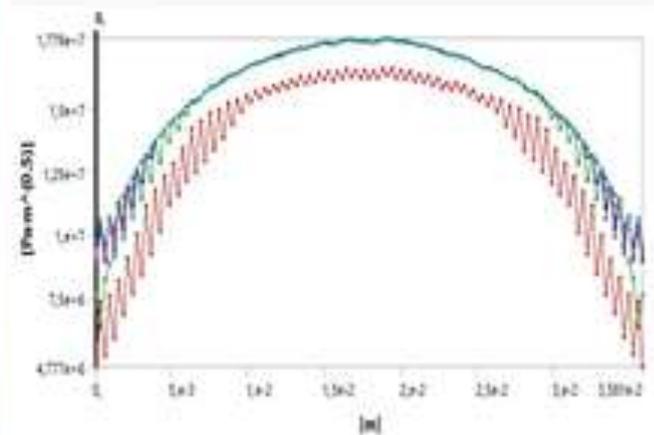
a	= 0,0038	meter
c	= 0,012667	meter



5. Untuk nilai

$$a = 0,0049 \text{ meter}$$

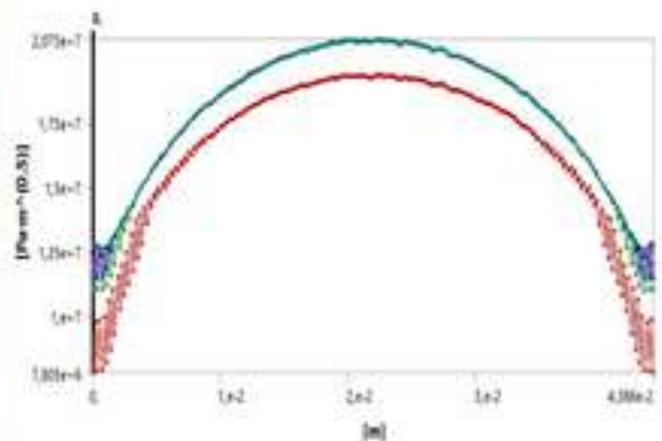
$$c = 0,016333 \text{ meter}$$



6. Untuk nilai

$$a = 0,006 \text{ meter}$$

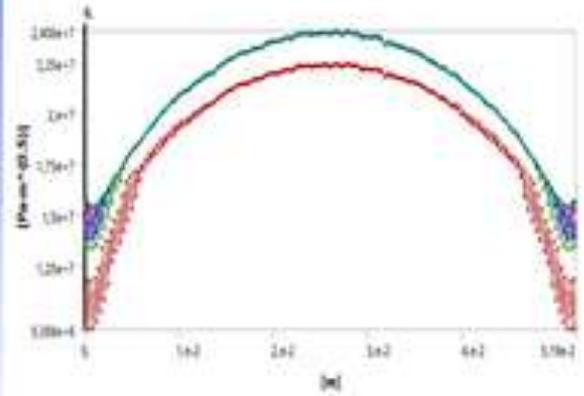
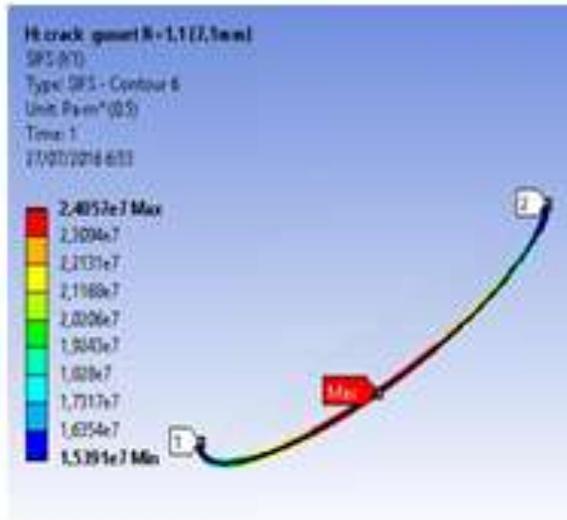
$$c = 0,02 \text{ meter}$$



7. Untuk nilai

a = 0,0071 meter

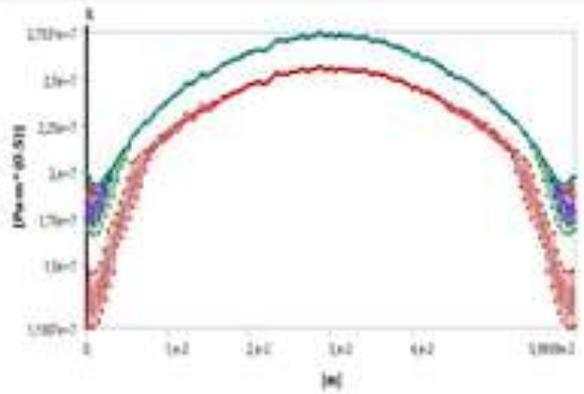
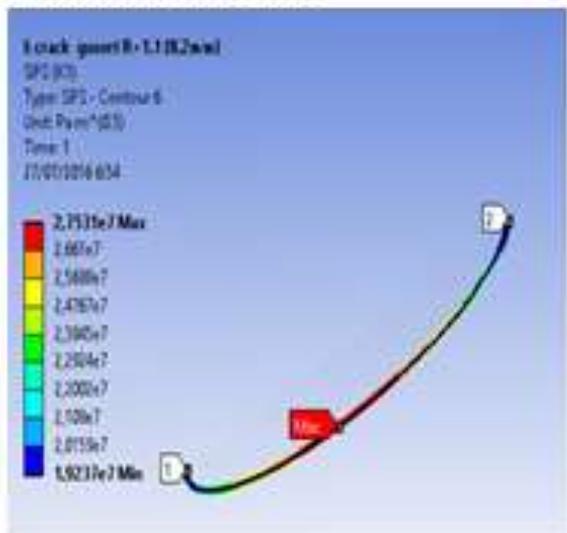
c = 0,023667 meter



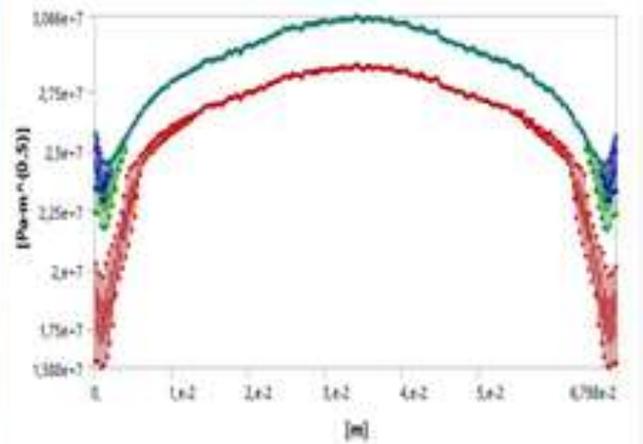
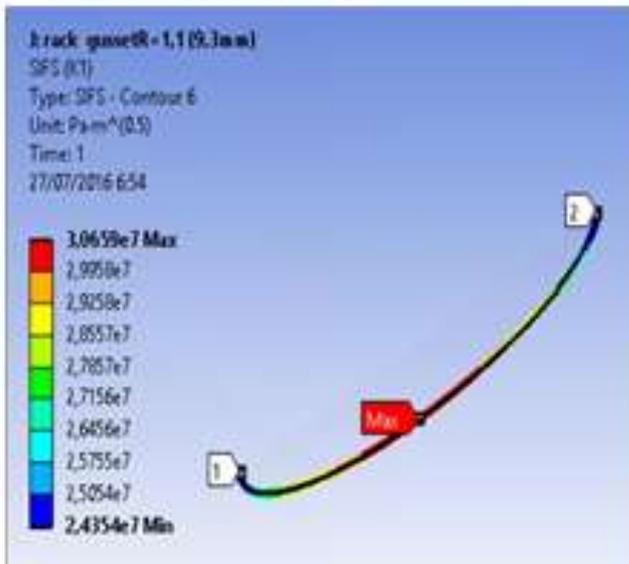
8. Untuk nilai

a = 0,0082 meter

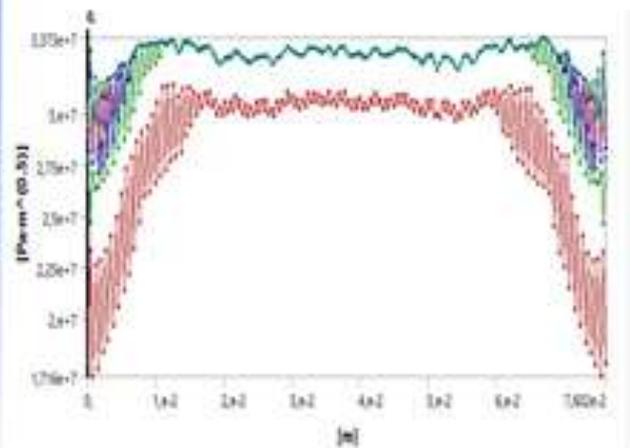
c = 0,027333 meter



9. Untuk nilai		
a	= 0,0093	meter
c	= 0,031	meter



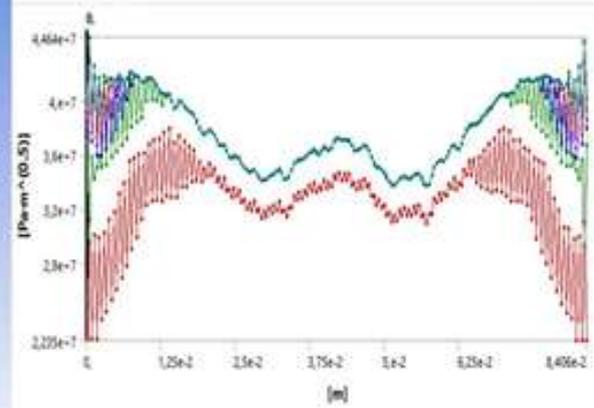
10. Untuk nilai
 a = 0,0104 meter c =
 0,034667 meter



11. Untuk nilai

$a = 0,0115$ meter $c =$

$0,038333$ meter



Lampiran 4

Proses perolehan nilai SIF melalui metode analitis

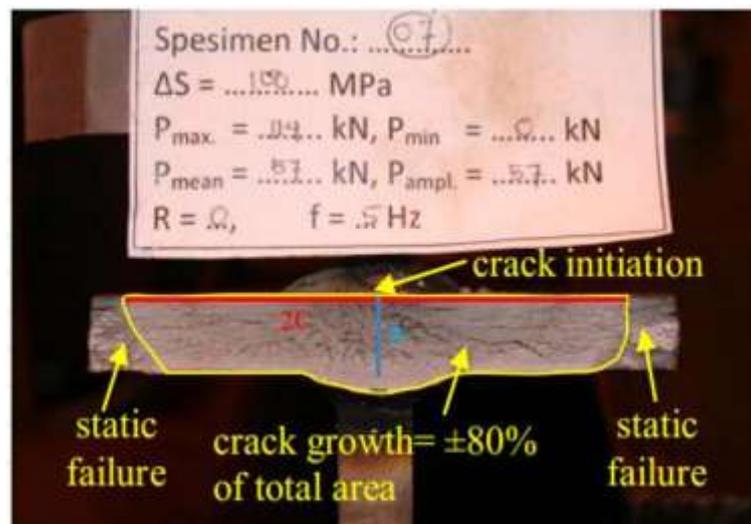
Berikut langkah perolehan nilai SIF melalui metode analitis 1.

Beberapa parameter yang diketahui

σ_{ys}	= 413	MPa
σ_{app}	= 176	MPa
tebal spesimen	= 0,012	meter

2. Nilai yang diperoleh dari hasil FEM dan Esperimen

- Nilai **acritical** diasumsikan hingga ketebalan spesimen (**12mm atau 0,012m**)
- $\sigma_{Apply} = 176$ MPa (nilai tegangan dari FEM awal, tanpa adanya retak)
- Nilai $a/2c = 0,15$ (nilai ini dari foto eksperimen dengan perbandingan skala nilai panjang a dan 2c)



3. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai SIF

Persamaan SIF untuk surface crack

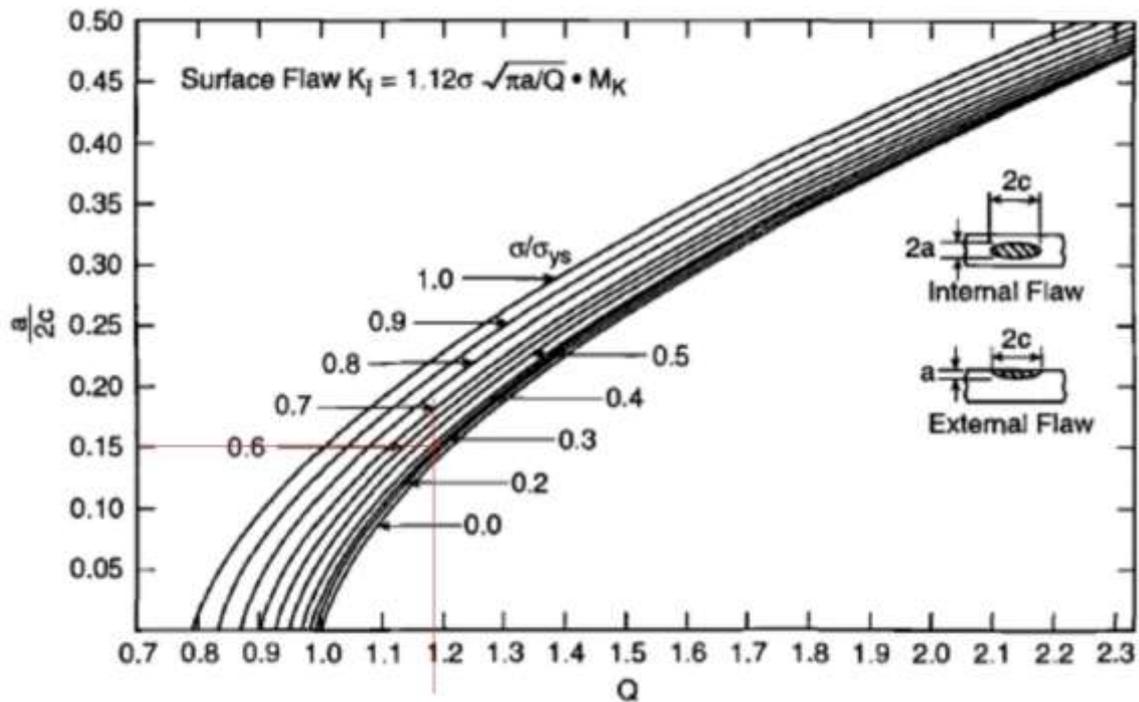
$$\text{Surface Flaw } K_I = 1.12\sigma \sqrt{\pi a/Q} \cdot M_K$$

dengan :

Q = *flaw shape parameter*

M_k = faktor koreksi *back surface*

Tabel untuk memperoleh nilai Q



Persamaan untuk nilai Mk

$$M_k = 1.0 + 1.2(a/t - 0.5)$$

Jika nilai $a/t \leq 0.5$ maka nilai $M_k = 1$

Dari beberapa nilai dan parameter diatas, maka dengan mensubsitusikan ke dalam persamaan untuk mendapatkan nilai SIF dapat dilihat pada tabel berikut :

a(m)	σ / σ_{ys}	Q	$\frac{a}{t}$	Mk	SIF (K_I)
		a/2c			Analitis
0,0005	0,426	1,18	0,042	1	7,190
0,0060	0,426	1,18	0,500	1	24,907
0,0115	0,426	1,18	0,958	1,55	53,448

BAB 5 PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan tentang Analisa *Notch-Stress* dan *Stress Intensity Factor* untuk *Fatigue Assesment* pada sambungan las berpenegar memanjang, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Tegangan *notch* (*notch stress*) dan nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) pada sambungan las berpenegar memanjang.

Perolehan tegangan *notch* didapatkan dengan memodelkan bentuk dan ukuran *notch*/takikan pada specimen las mengikuti guidelines dan penelitian sebelumnya. Dari hasil pemodelan numerik dengan *finite element method* diperoleh tegangan *notch*, yaitu tegangan *maximum prinsipal stress* dengan nilai sebesar 326,22 MPa.

Setelah diperoleh beberapa nilai tegangan pada specimen, maka langkah selanjutnya adalah dengan mensubsitusikan nilai tersebut pada persamaan analitis SCF sehingga akan diperoleh parameter nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) untuk tegangan *maximum prinsipal stress* sebesar 3,26. Dari hasil SCF ini diperoleh informasi bahwa terjadi konsentrasi tegangan maksimum pada specimen khususnya didaerah *notch* mendapat tegangan sebesar 3,26 kali yang lebih besar dari tegangan nominal yang diberikan, sehingga hal ini menjadi indikasi awal letak/posisi umur kelelahan (*fatigue*) pada specimen terjadi.

2. *Stress Intensity Factor* (SIF) pada sambungan las berpenegar memanjang

Perolehan nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) pada specimen uji dengan metode *fracture mechanics* diperoleh melalui beberapa tahapan diantaranya :

- Penentuan nilai perbandingan kedalaman retak (a_0) dan lebar retak (2C)
Dalam tahap ini variabel nilai yang digunakan mengikuti hasil akhir dari metode eksperimen yang dilakukan sebelumnya dengan melihat Gambar dari kondisi real dari specimen, sehingga diperoleh perbandingan kedalaman retak (a_0) dan lebar retak (2C) yaitu ($\frac{a}{2c} = 0,15$)
- Pemodelan numerik dengan *finite element method*
Perolehan nilai SIF pada specimen dapat diperoleh melalui tahap ini, dengan menjalankan increment retak/*crack* baik nilai kedalaman retak (a_0) dan lebar retak

(2C) namun perbandingan ($\frac{a}{2c} = 0,15$) tetap konstant. Pada kasus ini khusus sambungan las berpenegar memanjang diperoleh nilai *increment crack* sebesar 1,1 mm atau 0,0011 meter.

Hasil akhir perolehan SIF dapat disimpulkan bahwa nilai SIF akan membesar seiring dengan membesarnya ukuran kedalaman retak.

3. Prediksi umur kelelahan dengan menggunakan jenis tegangan *notch (notch stress)* pada sambungan las berpenegar memanjang

Prediksi umur kelelahan (*fatigue*) pada spesimen diperoleh dengan melanjutkan pemodelan numerik dimulai dari pembuatan S-N *curve* yang didesign sesuai dengan kriteria material, proses pengelasan dan pembebanan yang dilakukan. Setelah S-N *curve* terselesaikan langkah selanjutnya adalah mengubah ukuran dari *mesh* yang digunakan atau bisa disebut dengan langkah *mesh sensitivity* hingga memperoleh nilai siklus (N) yang konstan dan sesuai dengan hasil jumlah siklus (N) dari eksperimen.

Hasil akhir dari analisa umur kelelahan diperoleh umur kelelahan (*fatigue life*) sebesar 1.054.700 siklus.

Dengan membandingkan dengan hasil eksperimen yakni umur kelelahan sebesar 1.135.825 siklus, maka kriteria *error* dari hasil pemodelan numerik yang dilaksanakan sebesar 7,14%.

4. Prediksi umur kelelahan menggunakan metode *fracture mechanics* dengan pendekatan *Stress Intensity Factor (SIF)* pada sambungan las berpenegar memanjang

Prediksi umur kelelahan (*fatigue*) untuk metode *fracture mechanics* diperoleh melalui laju perambatan retak (*crack propagation*) dengan output berupa nilai SIF untuk setiap increment retak, dilanjutkan dengan mensubstitusikan nilai SIF kedalam persamaan analitis *paris-law* hingga mendapat jumlah siklus umur kelelahan dari spesimen.

Hasil pemodelan umur kelelahan dengan menggunakan pemodelan numerik dan persamaan analitis sebesar 1.132.186 cycle serta hasil eksperimen yang telah dilakukan sebesar 1.135.825 cycle. Sehingga dapat disimpulkan kriteria *error* dari hasil pemodelan numerik terhadap hasil eksperimen yang telah dilaksanakan diperoleh sebesar 0,32%.

5.2 SARAN

Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mengembangkan dan mempertimbangkan beberapa hal, yaitu :

1. Ukuran atau besar pembebanan dan jenis pembebanan yang diberikan
2. Bentuk dan jenis dari *meshing* yang digunakan dalam pemodelan dengan metode *fracture mechanics*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- American Welding Society (AWS), (1989), Miami
- Almar-Naess, A. (1985), *Fatigue Handbook*. Tapir.,Trondheim.
- Anderson, T.L., (1994), *Fracture Mechanics ; Fundamental and applications*, Departement of Mechanical Engineering, Texas A & University Collage Station, Texas
- ANSYS., (2013), *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*, ANSYS, Inc. Southpointe.
- Bai, Y. (2003), *Marine structural design*, Elsevier.
- Barsom, J.M & Rolfe, S.T., (1987), *Fracture and fatigue control in structures; Applications of Fracture Mechanics; Third Edition*, ASTM., USA.
- Broek, D., (1987), *Elementary Engineering fracture Mechanics*. Kuluwer Academic Publiser. USA.
- Brostow W. & Corneliussen, R.D. (1986), *Failure of Plastics*, Munich;Vienna;New york, Hanser.
- Cahyono, G.W. (2004), *Analisa faktor intensitas tegangan dengan metode J-Integral pada spesimen center crack tension untuk rasio tegangan berbeda*. Tugas Akhir., Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Carpinteri, at all. (2015), *Fracture mechanics based approach to fatigue analysis of welded joints*. Engineering Failure Analysis 49 hal. 67–78
- DNV-RP-C203. (2010), *Fatigue Design of Offshore Stell Structures*.
- Fricke, W. (2009), *International Institute of Welding Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures. IIW-Doc. XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08*.
- Ghidini, T. & Donne C.Dalle. (2009), *Fatigue life predictions using fracture mechanics methods*. Engineering Fracture Mechanics 76 hal. 134–148
- Logan, D.L., (2000), *A First Course in the Finite Element Method*, Brooks/Cole, United States
- Martinsson, J. (2005), *Fatigue Assessment of Complex Welded Steel Structures*. Stockholm.
- Neimi, E., Fricke W., & Maddox S.J., (2006), *Fatigue Analysis of Welded Components Designer's Guide to the Structural Hot-Spot Stress Approach IIW-1430-00*, Woodhead Publ.Ltd., Cambridge, England.
- Radaj, D. (1996), *Review of fatigue strength assessment of non-welded and welded structures based on local parameter*, Int.J.Fatigue Vol.18, No.3, pp.153-170, Elsevier
- Radaj, D., Sonsino C M, Fricke., (2006), *Fatigue Assessment of Welded Joints By Local*

- Approaches*; Second Edition. Woodhead Publ.Ltd., Cambridge, England.
- Rosyid, D. M., dan Setyawan, D., (2000), *Kekuatan Struktur Kapal*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Syahroni, Nur., (2014), *Fatigue Assesment of Welded Joints Taking into Account Effect of Residual Stress*. Doctoral theses at NTNU, NTNU – Trondheim.
- Syahroni, Nur. (2015), *Slide-1 Basic of Fatigue Mechanisms*. Lecture handout: Faculty of Marine Technology – ITS, Surabaya.
- Schijve, Jaap. (2012), *Fatigue predictions of welded joints and the effective notch stress concept*. Int J Fatigue 2012;45:2-16:31-38
- Shenoi, R. A., dan J. F. Wellicome. (1993), *Composite Materials In Maritime Structures*. New York: Cambridge University Press.
- Sonsino C M, Fricke W, de Bruyne F, Hoppe A, Ahmid A, Zhang G. (2012), *Notch Stress concepts for the fatigue assessment of welded joints – background and applications*. Int J Fatigue. hal.34:2-16
- Tawekal, R.L., (2005), *Perhitungan SCF Untuk Analisa Fatigue Pada Sambungan Struktur Anjungan Lepas Pantai*. Media Komunika Teknik Sipil.
- Wang Erke, Thomas Nelson, Rauch Rainer., (2004), *Back to Elements – Tetrahedra vs. Hexahedra*. CAD-FEM GmbH, Munich, Germany.

BIODATA PENULIS



Agung Prasetyo Utomo, S.Pd., dilahirkan di Situbondo pada 14 Oktober 1988. Anak kedua dari 3 bersaudara ini telah menempuh sejumlah pendidikan formal antaranya pada SDN II Wringin Anom, SMPN 4 Situbondo, SMAN 1 Situbondo dan Universitas Negeri Jember. Setelah lulus Sarjana S1 Tahun 2011 di Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Jurusan MIPA, Program Studi Pendidikan

Fisika, Universitas Negeri Jember, penulis memulai karier dengan menjadi seorang Guru, Dosen dan Pengajar (lembaga bimbingan belajar) diantaranya SMKN 1 Situbondo, MTS Walisongo - Situbondo, Universitas Abdurachman Saleh Situbondo serta lembaga bimbingan belajar Air-langga cabang Situbondo. Di Tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan Pasca Sarjana (S2) pada Teknologi Kelautan dengan Prodi Teknik Perancangan Bangunan Laut (TPBL) dengan bantuan beasiswa pendidikan dari program Pra S2_S2 Dikti.

Selama masa kuliah Pasca Sarjana, penulis juga aktif mengikuti beberapa kegiatan yang menunjang proses kuliah dan pengabdian masyarakat diantaranya sebagai instruktur pelatihan simulasi numerik pemodelan sambungan tubular joint dan tegangan sisa pengelasan, serta workshp “Pembekalan Soft skill bagi calon Dosen MIPA di daerah 3T”.

Setelah lulus kuliah Pasca Sarjana (S2) penulis melanjutkan profesi dan tugas sebagai seorang Dosen dan Tenaga Pendidikan pada Universitas Abdurachman Saleh, Situbondo.