

**ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN EFEKTIF DI DAERAH
UJUNG RETAK AKIBAT *BENDING OVERLOAD* DENGAN VARIASI
PANJANG RETAK PADA SILINDER PEJAL**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

ADIWIRA AL FATAH
NIM. 0510622001-62

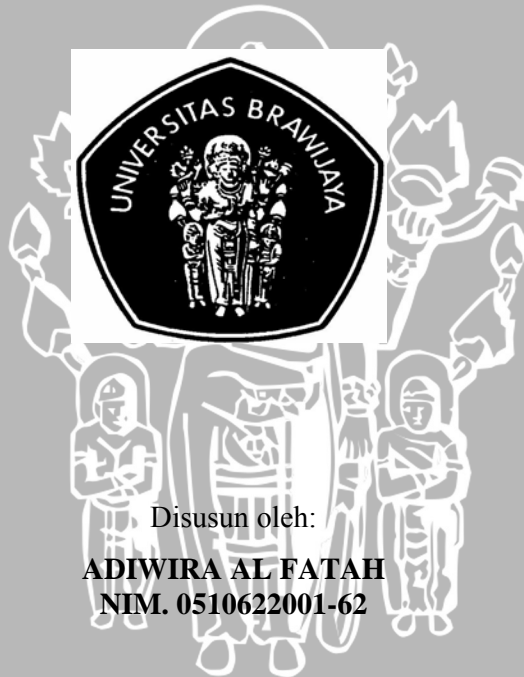
**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN MESIN
MALANG
2009**

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN EFEKTIF DI DAERAH
UJUNG RETAK AKIBAT *BENDING OVERLOAD* DENGAN VARIASI
PANJANG RETAK PADA SILINDER PEJAL**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

ADIWIRA AL FATAH
NIM. 0510622001-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Anindito Purnowidodo, ST, M. Eng., Dr. Eng.
NIP. 132 206 466

Ir. Endi Sutikno, MT.
NIP. 131 752 002



**ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN EFEKTIF DI
DAERAH UJUNG RETAK AKIBAT *BENDING OVERLOAD* PADA
SILINDER PEJAL**

Disusun oleh:

ADIWIRA AL FATAH
NIM. 0510622001-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan **lulus** pada
tanggal 2 Juli 2009

DOSEN PENGUJI

Skripsi I

Ir. Masduki, MM
NIP. 130 350 754

Skripsi II

Ir. Marsoedi Wirohardjo, MMT
NIP. 130 531 861

Komprehensif

Ir. Ari Wahyudi, MT
NIP. 132 125 697

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 132 159 708

KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat, rahmat serta hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul "*ANALISA FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN EFEKTIF DI DAERAH UJUNG RETAK AKIBAT BENDING OVERLOAD DENGAN VARIASI PANJANG RETAK PADA SILINDER PEJAL*" dapat terselesaikan.

Dalam rangka penyusunan skripsi ini, penulis tidak dapat terlepas dari bantuan berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Anindito Purnowidodo, ST, M. Eng., Dr. Eng. atas judul skripsi yang diberikan, bimbingan, dan ajaran filosofi hidup yang menginspirasi.
2. Bapak Ir. Endi Sutikno, MT. atas uraian ilmiah yang harus penulis penuhi demi kesempurnaan skripsi.
3. Bapak Joko selaku laboran yang memberikan akses penuh bagi penulis untuk berkembang dalam penelitian ini.
4. *Free Style Team* dari lab FDM (Fenomena Dasar Mesin): Ipung ST., Deni ST., Ari CST., Panji, Ubay, Doni, Ray, Febri, Mamad atas spirit dan pertemanan yang membantu penulis selama ini.
5. Papa yang siap untuk menegur anaknya agar bisa menjadi ORANG, Mama atas perhatian dan kesabarannya menghadapi anakmu yang ruwet ini, Adek yang menjadi pengingat penulis sebagai yang tertua dan cepat lulus.
6. Rekan-rekan Teknik Mesin Universitas Brawijaya 2005 (Alan, Ranga, Rahmad, Erwin, Yudhi, Arif, David, Lukman, Misbakh, Rudi, Rika).
7. Rekan-rekan Politeknik Negeri Malang 2002 (Nasir, Ges, Adi, Farid, Kurniawan, Hamid, Trihandoyo, Binta, Andis, Ainul, Fandi, Yudiono, Ryan, Sugeng, Rizal, Agung, Ari, Imam, Arif).
8. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari walaupun telah berusaha dengan sebaik-baiknya dalam penyusunan skripsi ini pasti skripsi ini jauh dari sempurna. Maka dengan ini penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna menuju kesempurnaan.

Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan berbagai pihak yang akan mengembangkan skripsi ini.

Malang, 11 Juni 2009

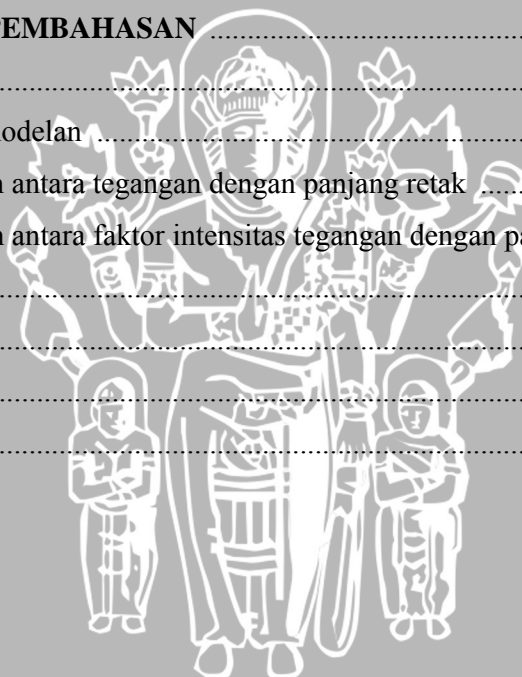
Penulis

DAFTAR ISI

	halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Analisa Tegangan Bending	4
2.2 Proses Pembebanan Siklus	7
2.2.1 Pembebanan siklus bervariasi	7
2.2.2 Komponen dari siklus tegangan	8
2.2.3 Pengaruh <i>overload</i>	10
2.2.4 Pengaruh <i>residual stress</i>	11
2.2.5 Pengaruh rasio tegangan (<i>stress ratio</i>)	12
2.3 Proses Perambatan Retak	12
2.3.1 Mode bukaan retak	12
2.3.2 Analisis <i>fracture</i> menurut Irwin	11
2.3.3 Laju perambatan retak	15
2.3.4 Penutupan retak (<i>crack closure</i>)	17
2.3.5 Perilaku rambat retak	19
2.4 Analisis dalam <i>Software</i>	20
2.5 Hipotesis	21
BAB III METODE PENELITIAN	22
3.1 Metode Penelitian	22



3.2 Material dan Geometri Spesimen	22
3.2.1 <i>Material properties</i>	22
3.2.2 Geometri spesimen	22
3.3 Variabel Penelitian	25
3.4 Pemodelan Pembebanan Siklus Bervariasi	25
3.4.1 Pemodelan geometri dengan ANSYS	25
3.4.2 Plastisitas material	29
3.4.3 Pemodelan pembebanan	30
3.4.4 Kontrol Konvergen	32
3.5 Hasil Pemodelan	33
3.6 Rancangan Penelitian	33
3.7 Diagram Alir Penelitian	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Hasil	36
4.1.1 Hasil pemodelan	36
4.1.2 Hubungan antara tegangan dengan panjang retak	46
4.1.3 Hubungan antara faktor intensitas tegangan dengan panjang retak	47
4.2 Pembahasan	48
BAB V PENUTUP	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Data tegangan dan regangan daerah plastis	27
Tabel 3.2	Pembebanan siklus	27
Tabel 3.3	Denah rancangan penelitian	30



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil data pada panjang retak 3 mm

Lampiran 2. Hasil data pada panjang retak 4 mm

Lampiran 3. Hasil data pada panjang retak 5 mm



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil data pada panjang retak 3 mm

Lampiran 2. Hasil data pada panjang retak 4 mm

Lampiran 3. Hasil data pada panjang retak 5 mm



RINGKASAN

Adiwira Al Fatah, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2009, *Analisa Faktor Intensitas Tegangan Efektif di Daerah Ujung Retak Akibat Bending Overload dengan Variasi Panjang Retak pada Silinder Pejal*, Dosen Pembimbing : Anindito Purnowidodo, ST, M. Eng., Dr. Eng. dan Ir. Endi Sutikno, MT.

Komponen silinder pejal dengan beban *bending*, mengandung cacat atau retak ketika mengalami siklus pembebanan bervariasi. Tegangan *overload* pada siklus menjadi penyebab dengan menghasilkan tegangan sisa tarik atau tekan yang mempengaruhi perilaku rambat retak, baik dipercepat ataupun diperlambat laju rambat retaknya. Untuk mengetahui besar percepatan dan perlambatan retak yang terjadi, diamati berdasarkan nilai faktor intensitas tegangan efektif yang terjadi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengamati besar faktor intensitas tegangan efektif akibat beban *bending overload* untuk mengamati perlambatan atau percepatan rambat retak yang terjadi.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian *bending* pada silinder pejal dengan material ST70. Pengujian diamati melalui simulasi dengan bantuan *software* berbasis metode elemen hingga ANSYS, simulasi dengan *software* dimaksudkan untuk mengatasi kesulitan pengujian akibat geometri spesimen dan memberikan analisa visual sesuai uji *fractography*. Pembebanan siklus bervariasi dimodelkan dalam bentuk siklus *sinusoidal* dengan tegangan konstan 100 Mpa dan tegangan *overload* 230 MPa sebanyak 13 tahap pembebanan dengan variasi panjang retak 3, 4, dan 5 mm pada spesimen dengan diameter 8 mm. Pengamatan difokuskan pada perbedaan antara nilai tegangan dan faktor intensitas tegangan maksimum sebelum *overload*, dengan sesudah *overload* yang selanjutnya disebut sebagai tegangan dan faktor intensitas tegangan efektif.

Hasil penelitian menunjukkan adanya nilai tegangan efektif yang lebih rendah dari tegangan maksimum sebelum *overload*. Implikasi dari hasil menjelaskan bahwa rambat retak pada ujung retak mengalami perlambatan. Pada panjang retak yang lebih besar, perlambatan yang terjadi lebih besar. Tetapi pada kondisi yang sama, nilai faktor intensitas tegangan efektif relatif mendekati nilai faktor intensitas tegangan maksimum sebelum *overload*. Kesimpulan yang didapat adalah perlambatan retak yang terjadi berlangsung singkat dan memiliki kecenderungan untuk kembali ke nilai tegangan awal ketika siklus dikembalikan ke kondisi konstan. Hasil penelitian akan makin jelas, jika diberikan penambahan siklus hingga umur *fatigue* silinder pejal untuk melihat kemungkinan yang sebaliknya (percepatan). Dan juga dengan adanya eksperimen sesungguhnya sebagai bahan perbandingan.

Kata kunci : *bending*, *overload*, retak, tegangan sisa, faktor intensitas tegangan efektif, silinder pejal

SUMMARY

Adiwira Al fatah, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, June 2009, *Analysis of Effective Stress-Intensity Factor in Vicinity of Crack Tip as Result of Overload Bending with Variation of Crack Length for Solid Round Bar*, Academic Supervisor : Anindito Purnowidodo, ST, M. Eng., Dr. Eng. and Ir. Endi Sutikno, MT.

Solid round bar component with bending force, contain defect or crack during variable cyclic loading. It is because overload stress at cyclic load produce tensile or compressive residual stress that gives impact to crack growth behaviour, whether it is accelerated or retarded. To observe acceleration and retardation of crack growth, seen based on magnitude of effective stress-intensity factor that being occurred. The purpose of research is to observe value of effective stress-intensity factor because of overload bending to determine retardation or acceleration event.

In this study, solid round bar of ST70 being observed with bending test. Research determined in simulation with finite element method-based software aid ANSYS, simulation is taken for dealing with testing difficulties caused by specimen geometry and to give visual analysis based on fractography test. Variable cyclic loading modeled in sinusoid cycle with constant stress 100 MPa and overload stress 230 MPa along 13 load step, observed in 3, 4, 5 mm of crack length for 8 mm of specimen. Observation focused in difference between value of maximum stress and stress-intensity factor before overload, and after which is effective stress and stress-intensity factor.

Result shows that effective stress is lower than pre-overload maximum stress. The implication is retardation of crack growth is occurred. In longer crack length, retardation is more often. But in the same condition, effective stress-intensity factor relatively coincide to pre-overload maximum stress-intensity factor. Conclusion is crack retardation is occurred temporarily and have tendency of return to its original stress when constant cycle being restored. The output of research will be more clear, if cyclic loading is added till fatigue life of solid round bar to see the possibility of acceleration. And also with true experiment as comparative study.

Key words : bending, overload, crack, residual stress, effective stress-intensity factor, solid round bar

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada kasus praktis *engineering*, hampir semua komponen yang mengandung cacat atau retak pada materialnya mengalami sejarah siklus pembebanan yang bervariasi atau *variable amplitude loading* (Stephen et al., 2001; Barson, 1999). Hal ini terjadi karena siklus pembebanan bervariasi mempengaruhi perilaku rambat retak. Pada *variable amplitude loading (VAL)* sering terjadi puncak tegangan yang tinggi, yang dinamakan *overload*. *Overload* dapat mempengaruhi perilaku rambat retak akibat dari bentuk tegangan sisa yang dihasilkan pada pembebanan siklus selanjutnya, baik itu *tensile* maupun *compressive residual stress* (Purnowidodo, 2009). Perkembangan dari *residual stress* tersebut mengakibatkan terjadinya rambat retak yang diperlambat (*retardation*) atau dipercepat (*acceleration*) (Mc. Evilly et al., 1990). Hal ini didukung oleh Matsuoka yang menambahkan bahwa *Residual stress* yang dihasilkan *overload* mengurangi *range* faktor intensitas tegangan efektif di daerah ujung retak. Dan menyebabkan perlambatan pada laju rambat retak *fatigue* berikutnya terhadap *overload*. Untuk nilai faktor intensitas tegangan efektif ditentukan dengan nilai tegangan minimum saat ujung retak mulai membuka, dan *amplitude stress* maksimum. Tegangan minimum tersebut dikenal dengan *crack opening stress*. Jika perbedaan antara nilai *crack opening* dan tegangan maksimum makin tinggi, nilai intensitas tegangan makin meningkat, dan konsekuensinya, laju rambat retak akan meningkat (Elber, 1971).

Umumnya perilaku rambat retak karena *fatigue* (retak *fatigue*) dengan siklus *overload* diteliti pada benda uji yang mempunyai bagian datar (*plain*), hal ini dimaksudkan agar kontrol terhadap kondisi pembebanan, yaitu tegangan bidang (*plain stress*) atau regangan bidang (*plain strain*) lebih mudah. Disamping itu pengamatan terhadap perilaku perambatan retak relatif lebih mudah (Mc.Evily et al., 1990, 2004; Bao et al., 1995; Makabe et al., 2003, 2005; Purnowidodo et al., 2004). Perilaku rambat retak *fatigue* pada benda uji yang berbentuk silindris, misalkan poros pejal, belum banyak dikaji sehingga hal ini penting untuk diteliti karena komponen berbentuk silindris, misalnya poros (*shaft*) banyak digunakan, misalnya poros roda pada kendaraan bermotor, rotor turbin pesawat dan pada industri gula, misalnya poros *mollen roll* untuk penggilingan gula. Di samping itu hampir semua poros berbentuk silindris pejal.

Salah satu metode yang digunakan untuk mendeteksi adanya residual stress untuk mengamati faktor intensitas tegangan efektif adalah *subtracted displacement method* yang dikombinasikan dengan pemasangan *strain gauge* pada bagian datar specimen di dekat ujung retak (Makabe, et. al. 2005). Hal ini mustahil dilakukan mengingat geometri spesimen yang berbentuk silinder. Oleh karena itu, untuk mengetahui peran *residual stress* yang berpengaruh terhadap faktor intensitas tegangan efektif di ujung retak, digunakan metode simulasi komputer dengan bantuan *software* berbasis *finite element method*, ANSYS.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan diatas, maka dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut:

”Sejauh mana pengamatan faktor intensitas tegangan efektif di daerah ujung retak akibat bending overload dengan variasi panjang retak pada silinder pejal?”

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian menjadi lebih terarah, maka perlu digunakan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Pembebanan siklus yang diamati akibat beban bending (*constant-overload-constant*)
2. Analisa dilakukan pada daerah II (*crack propagation*) dan ujung retak berbentuk lancip dan tajam
3. Tidak memperhitungkan struktur mikro material, hanya analisa *residual stress* yang terjadi akibat *overload* untuk melihat besar ΔK_{eff}
4. Tidak memperhitungkan adanya pengaruh lingkungan seperti korosi dan temperatur diasumsikan merupakan temperatur kamar

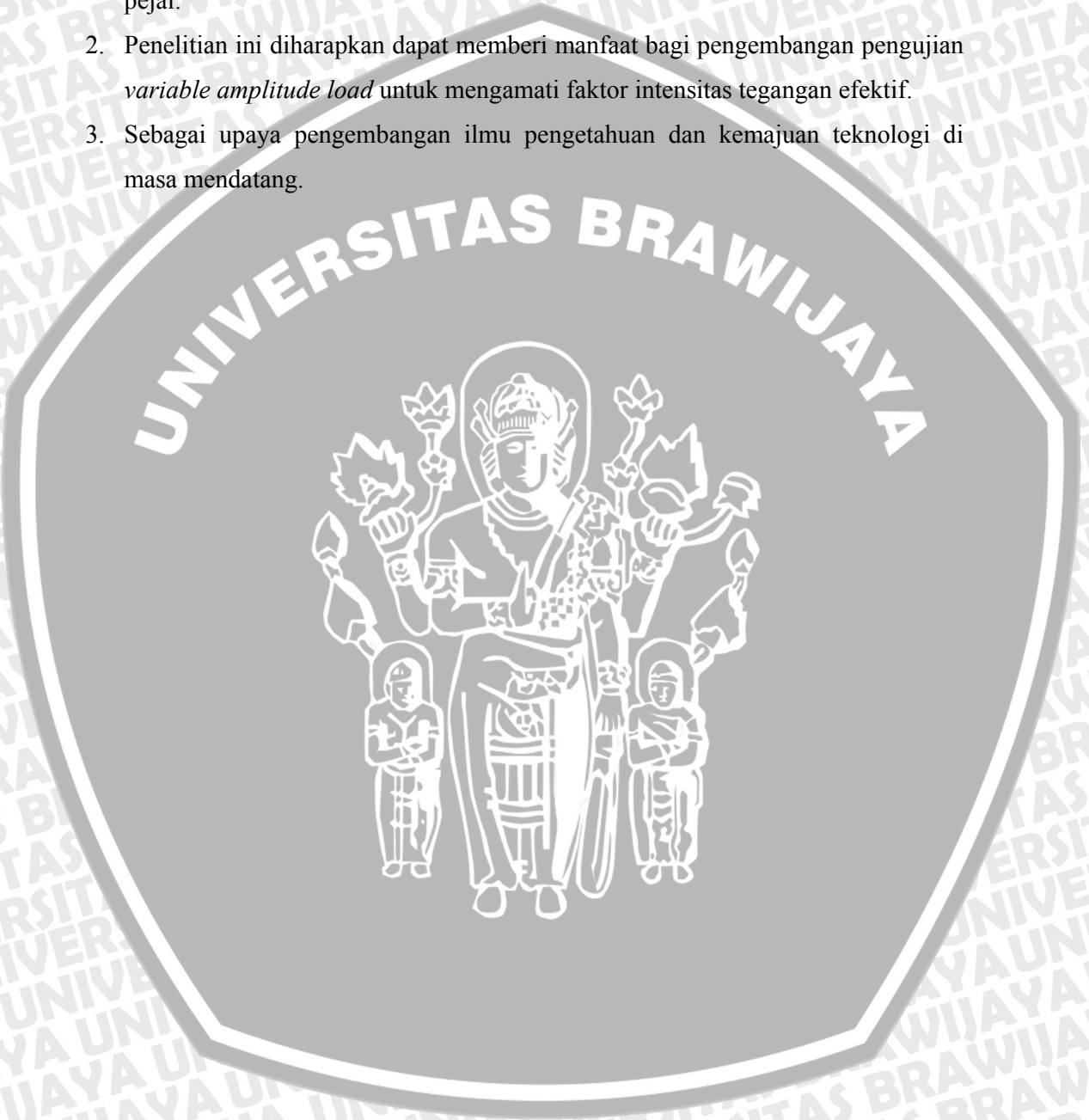
1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui faktor intensitas tegangan efektif di depan ujung retak akibat *bending overload* dengan variasi panjang retak pada silinder pejal.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

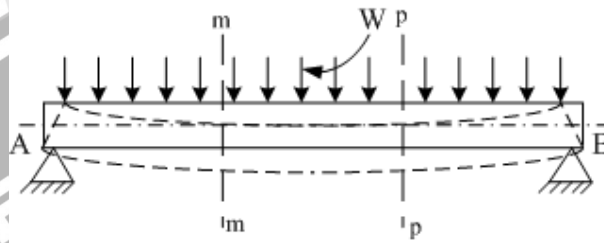
1. Mengetahui sejauh mana faktor intensitas tegangan efektif yang terjadi di daerah ujung retak akibat bending overload dengan variasi panjang retak pada silinder pejal.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat bagi pengembangan pengujian *variable amplitude load* untuk mengamati faktor intensitas tegangan efektif.
3. Sebagai upaya pengembangan ilmu pengetahuan dan kemajuan teknologi di masa mendatang.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

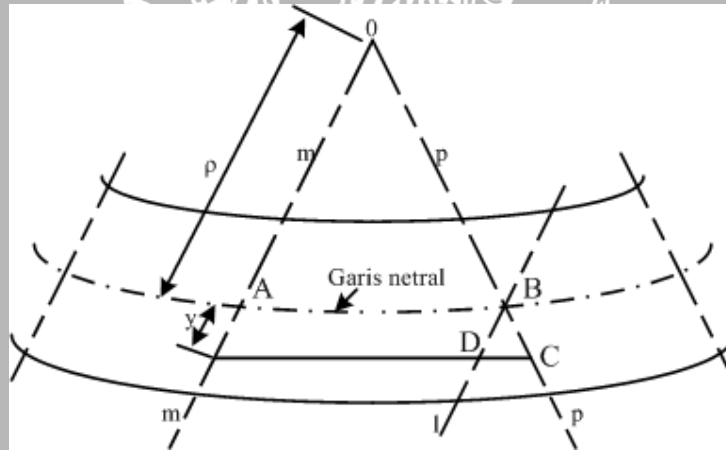
2.1 Analisa Tegangan Bending

Tegangan bending atau lentur terdiri dari lentur murni dan lentur dengan gaya normal (tarik atau tekan). Pada batang AB dibawah ini, dibebani beban W yang terbagi rata seperti pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Batang AB dengan beban bending merata
Sumber: Gunawan, 1985:158

Kita tinjau elemen yang dibatasi oleh m-m dan p-p. O adalah titik pusat kelengkungan. Jari-jari kelengkungan adalah ρ . Akan dicari besarnya tegangan pada lokasi sejarak y dari garis netral. Tarik garis sejajar m-m melalui titik B. ΔOAB sebangun dengan ΔBCD .



Gambar 2.2 Diagram lenturan
Sumber: Gunawan, 1985: 159

Pada gambar 2.2 diatas, nilai $y : \rho$ sebanding dengan $CD : AB$, sehingga

$$\frac{CD}{AB} = \frac{y}{\rho}. \text{ CD adalah perpanjangan dari AB akibat batang melengkung. } \frac{CD}{AB} \text{ disebut}$$

ϵ_x (strain), sehingga persamaan menjadi

$$\epsilon_x = \frac{y}{\rho} \tag{2-1}$$

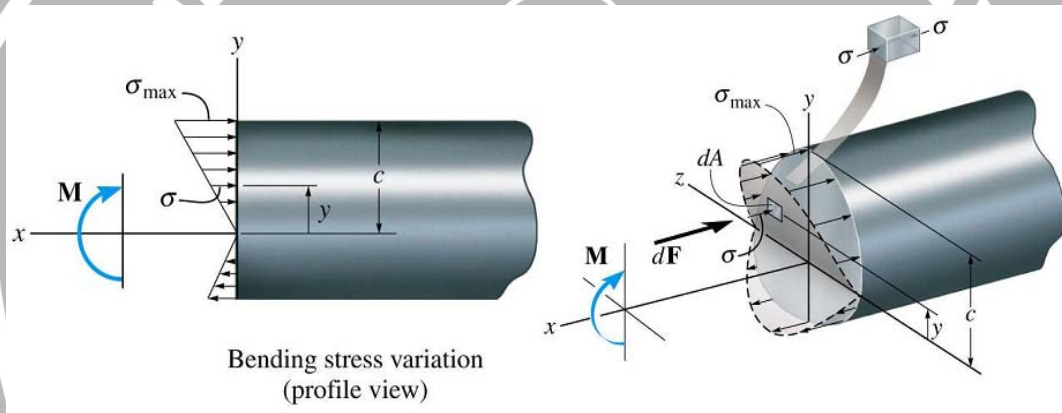
Menurut hukum Hooke:

$$\begin{aligned} \Delta l &= \frac{F.l}{A.E} \\ &= \frac{\sigma_x.l}{E} \\ \frac{\Delta l}{l} &= \frac{\sigma_x}{E} \\ \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} \end{aligned} \tag{2-2}$$

Persamaan (2-1) disubstitusikan ke persamaan (2-2), diperoleh

$$\sigma_x = \frac{y}{\rho}.E \tag{2-3}$$

Sekarang kita tinjau diagram tegangan yang terjadi:



Bending stress variation (profile view)

Gambar 2.3 Konfigurasi tegangan *bending*

Sumber: <http://www.its.ac.id/personal/material.php?id=fahmi>

Sumbu x merupakan garis netral, yang memotong penampang dimana tegangan bending pada garis tersebut = 0

Elemen yang kita tinjau adalah sejarak y dari garis netral, seluas dA. Gaya yang bekerja pada elemen tersebut = dF

$$dF = \sigma_x \cdot dA = \frac{E}{\rho} \cdot y \cdot dA$$

$$F = \int \frac{E}{\rho} \cdot y \cdot dA$$

Gaya F ini bekerja tegak lurus penampang dan karena yang kita tinjau adalah lentur murni (tanpa normal) maka F = 0

$$\frac{E}{\rho} \int_A y \cdot dA = 0$$

Dari persamaan diatas: $\frac{E}{\rho} \neq 0$ dan $\int_A y \cdot dA = 0$

Momen terhadap garis netral = dM

$$dM = y(\sigma_x \cdot dA)$$

$$M = \int_A y \cdot \sigma_x \cdot dA$$

$$= \int_A y \cdot \frac{E}{\rho} \cdot y \cdot dA$$

$$= \frac{E}{\rho} \int_A y^2 \cdot dA$$

$$M = \frac{E \cdot I}{\rho} \quad (2-4)$$

Persamaan (2-4) disubstitusikan ke persamaan (2-3) diperoleh

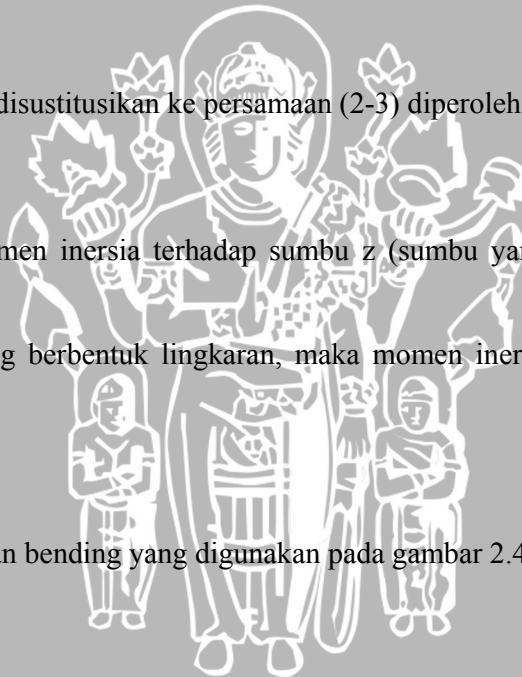
$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I} \quad (2-5)$$

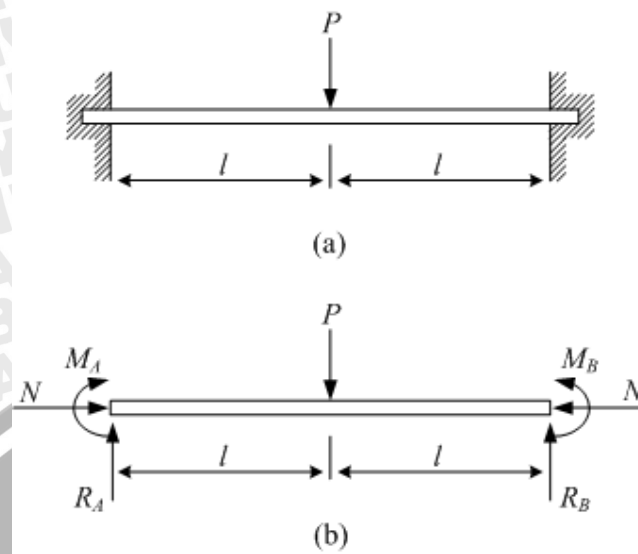
Dimana: I = momen inersia terhadap sumbu z (sumbu yang tegak lurus arah beban yang bekerja)

Untuk penampang berbentuk lingkaran, maka momen inersia yang digunakan adalah

$$I = \frac{\pi}{64} D^4 \quad (2-6)$$

Sehingga tegangan bending yang digunakan pada gambar 2.4 adalah





Gambar 2.4 *Free body diagram* untuk spesimen (a) beban bending pada struktur batang statis tak tentu; (b) detil *free body diagram*

$$\sigma_B = \frac{P/2 \cdot l \cdot D/2}{\pi \cdot D^4 / 64} = \frac{P \cdot l \cdot 16}{\pi \cdot D^3} \quad (2-7)$$

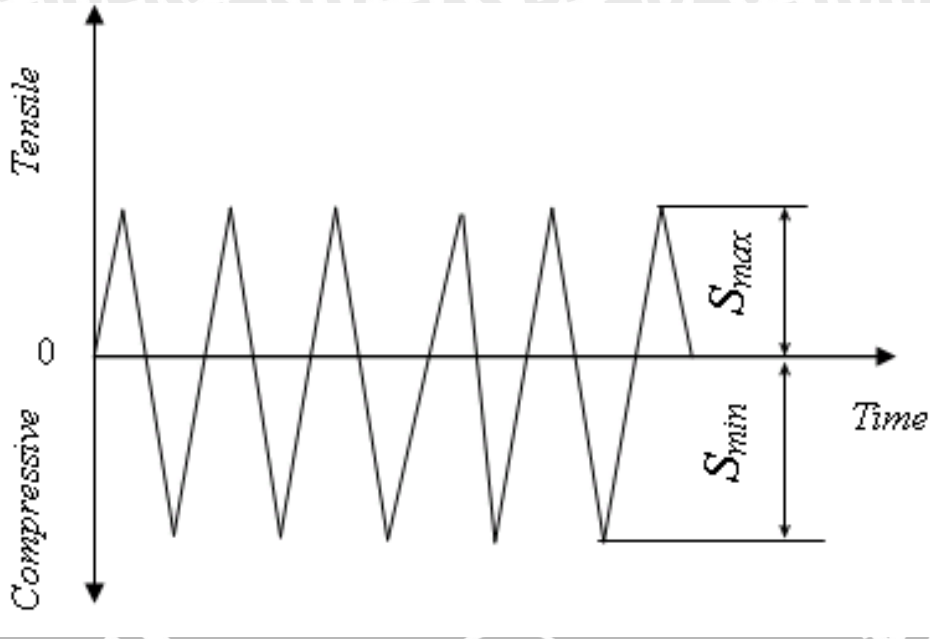
- Dengan:
- σ_B = Tegangan bending ($MPa = N/mm^2$)
 - P = Gaya bending (N)
 - l = Panjang spesimen setengah bagian (mm)
 - D = Diameter spesimen (mm)

Karena ada kondisi simetris pada geometri dan pembebanan, maka pengamatan dapat dilakukan dengan setengah bagian. Gaya *bending* yang dihitung merupakan beban siklus yang dimasukkan, baik untuk tegangan *constant* maupun *overload*

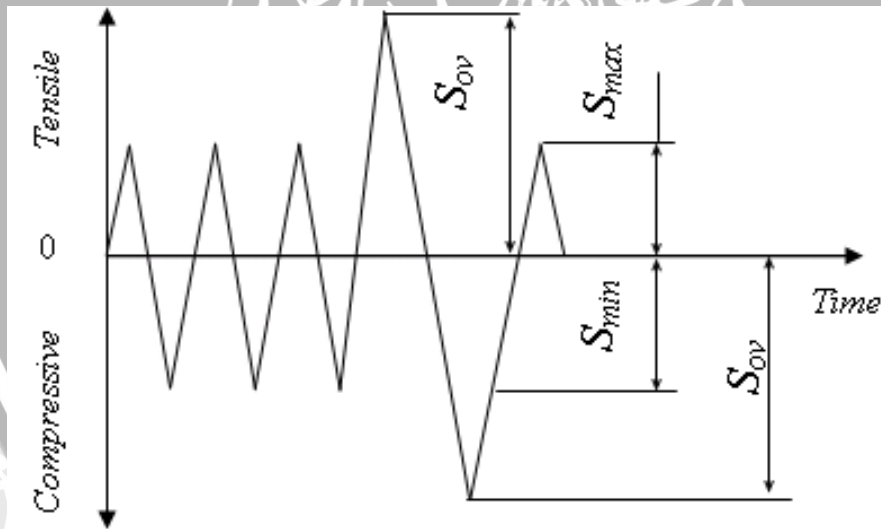
2.2 Proses Pembebanan Siklus

2.2.1 Pembebanan siklus bervariasi

Komponen dari bagian struktur seringkali mengalami beban dinamis yang bervariasi. Beban dinamis yang paling sederhana adalah berupa siklus beban berulang dengan fluktuasi konstan seperti ditunjukkan pada gambar 2.5. Akan tetapi, kebanyakan dalam aplikasi siklus beban yang dialami oleh suatu komponen adalah siklus dengan fluktuasi acak (*random*), seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. Siklus beban dengan fluktuasi yang lebih tinggi dari fluktuasi rata-rata sering terjadi pada siklus beban dengan fluktuasi acak, dan siklus yang lebih tinggi ini sering disebut sebagai siklus *overload* (*overload cyclic*). Dimana S_{max} , S_{min} dan S_{ov} , masing-masing adalah tegangan siklus maksimum, minimum dan *overload* (Purnowidodo, 2008) M_A



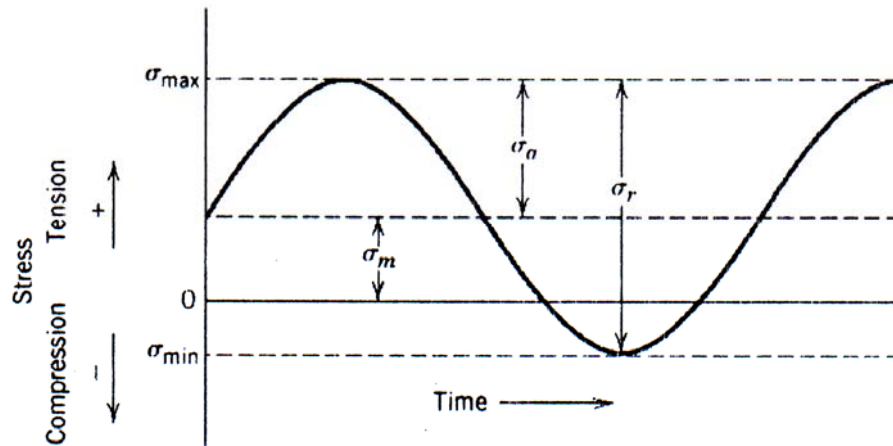
Gambar 2.5. Siklus beban berulang konstan
 Sumber: Makabe *et al.*, *Effects of Surface Deformation and Crack Closure on Fatigue Crack Propagation after Overloading and Underloading*. 2004



Gambar 2.6. Siklus beban berulang acak
 Sumber: Makabe *et al.*, *Effects of Surface Deformation and Crack Closure on Fatigue Crack Propagation after Overloading and Underloading*. 2004

2.2.2 Komponen dari siklus tegangan

Pembebanan siklus bervariasi merupakan siklus tegangan yang memiliki komponen seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Siklus Tegangan
Sumber : Dieter, G.E, 1988:377

Komponen – komponen tersebut diantaranya: (Bannantine, J.A, 1990)

1. Tegangan rata-rata (σ_m)

Yaitu, nilai rata-rata dari tegangan maksimum dan tegangan minimum pada siklus.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2-8)$$

2. Daerah tegangan atau jangkauan tegangan (σ_r)

Yaitu, perbedaan antara tegangan maksimum dengan tegangan minimum pada suatu siklus.

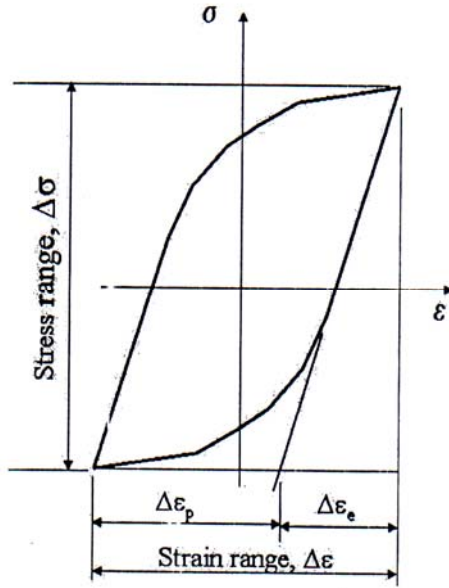
$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2-9)$$

3. Tegangan bolak balik atau amplitudo tegangan (σ_a)

Besarnya tegangan bolak-balik adalah setengah dari jangkauan tegangan

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2-10)$$

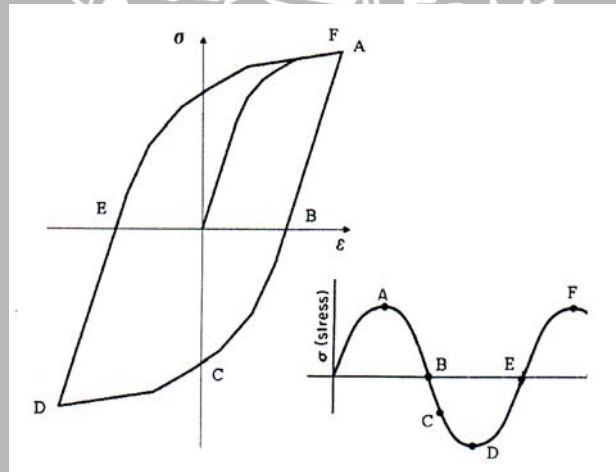
Respon material yang dialami siklus dinyatakan dalam *hysteresis loop* seperti pada Gambar 2.6.



Range
 $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p$
 $\Delta\epsilon_e = \Delta\sigma / E$

Gambar 2.8 Hysteresis Loop
 Sumber : Bannantine, J.A, 1990:47

Total lebar dari loop dinyatakan dengan $\Delta\epsilon$ atau range regangan total (*total strain range*), dan total tinggi dari loop dinyatakan dengan $\Delta\sigma$ atau range tegangan total (*total stress range*). Range regangan total adalah jumlah dari range regangan elastis dan plastis

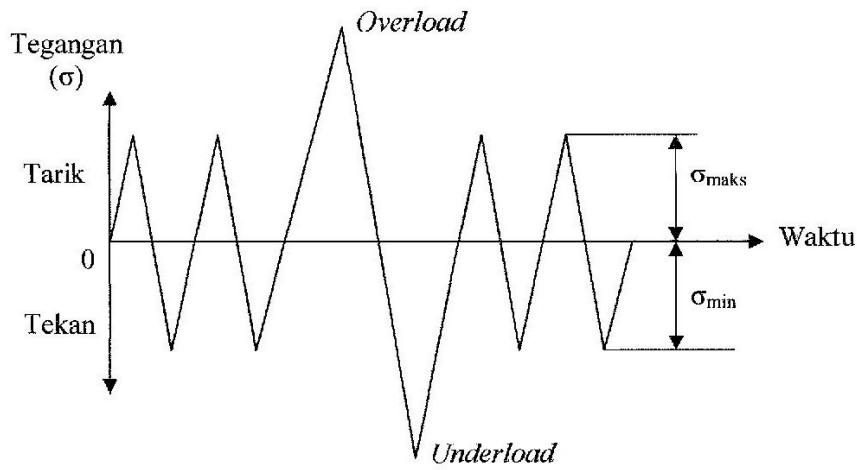


Gambar 2.9 Cyclic Hysteresis Behaviour
 Sumber : De Quesnay, 2001, Lecture 16.ppt

2.2.3 Pengaruh Overload

Pemberian satu *overload* atau *underload* pada siklus pembebanan dengan amplitudo konstan dapat mengakibatkan percepatan atau perlambatan pertumbuhan

retak. *Overload* dan *underload* menyebabkan konsentrasi tegangan yang tinggi di ujung retak sehingga dapat menghasilkan tegangan sisa tarik maupun tekan yang dapat mempengaruhi laju pertumbuhan retak.



Gambar 2.10 Siklus pembebanan dengan *overload* dan *underload*

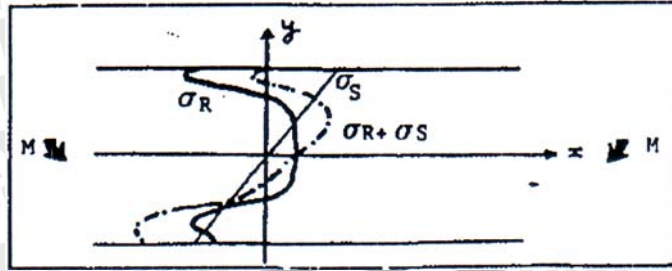
Sumber: Bannantine, J. A. *Fundamental of Metal Fatigue Analysis*. 1990

Penambahan satu *overload* pada pembebanan siklus dapat menyebabkan berkurangnya pertumbuhan retak atau *crack retardation*, sedangkan satu *underload* dapat menyebabkan percepatan pertumbuhan retak. Pada penambahan siklus *overload* (*overload* dilanjutkan *underload*) menyebabkan *crack retardation* berkurang (Bannantine, J. A. 1990).

2.2.4 Pengaruh *residual stress*

Tegangan sisa (*residual stress*) didefinisikan sebagai tegangan dalam atau tegangan yang terkunci di dalam suatu elemen walaupun tidak terkena gaya dari luar. Tegangan sisa secara makroskopis dihasilkan dari berbagai proses yang menyebabkan deformasi, kontraksi termal maupun perubahan fase akibat proses permesinan (Himami, 2008).

Ketika sebuah material terpengaruh oleh tegangan sisa (σ_R) pada saat beban tegangan bekerja pada material tersebut (σ_S) maka tegangan sebenarnya yang bekerja pada material adalah penjumlahan dari kedua tegangan tersebut, yaitu $\sigma_R + \sigma_S$. jika tegangan sisa ditambahkan ke tegangan yang bekerja maka material mengalami *local overload* akibat tegangan sisa.



Gambar 2.11 Sifat material akibat pengaruh tegangan sisa

Sumber: Physique and Industry-Research under contract, *Residual Stress Theory*, 2004

Pada umumnya, tegangan sisa tekan (*compressive*) mempunyai pengaruh yang baik terhadap *fatigue life* dan *stress corrosion crack* karena dapat menunda pembentukan dan perkembangan retak. Sedangkan tegangan sisa tarik (*tensile*) mengurangi tegangan yang bekerja pada permukaan material yang bernilai tinggi sehingga meningkatkan *fatigue limit* material. Pada kasus beban siklus, retak dapat tumbuh dan berkembang pada tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan tegangan *yield*, hal ini menyebabkan terjadi redistribusi tegangan sisa. Terdapatnya tegangan sisa dapat membantu proses penutupan retak sehingga menunda perkembangan retak (Himami, 2008).

2.2.5 Pengaruh Rasio Tegangan (Stress Ratio)

Rasio tegangan yang diberikan R , mempunyai pengaruh yang berarti pada laju pertumbuhan retak. Rasio tegangan didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (2-11)$$

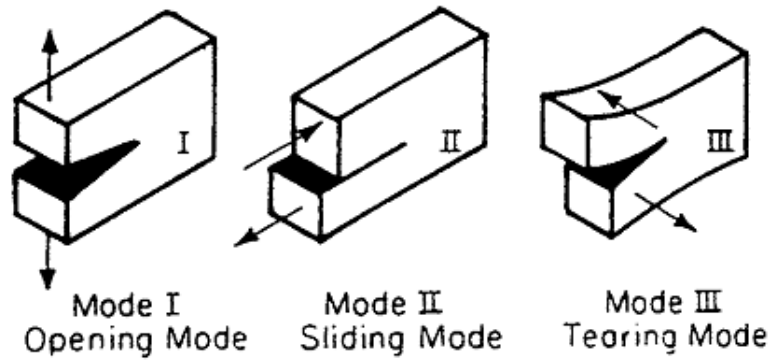
Penggunaan stress ratio akan memberikan dampak yang signifikan terhadap laju pertumbuhan retak, dimana untuk nilai ΔK yang konstan dengan semakin besar nilai R , maka laju pertumbuhan retak juga semakin besar. (Bannantine, 1990)

2.3 Proses Perambatan Retak

2.3.1 Mode bukaan retak

Fenomena perkembangan dan pembukaan retak dapat terjadi dalam berbagai bentuk. Berdasarkan beban yang bekerja pada material, bukaan retak ini dapat digolongkan ke dalam tiga mode bukaan, yaitu mode I, mode II dan mode III sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 2.12. Retak mode I (*opening mode*) merupakan retak akibat beban normal atau beban bekerja tegak lurus pada bidang retak. Retak

mode II (*sliding mode*) merupakan retak akibat beban geser yang bekerja pada material. Pada mode ini retak berkembang sejajar dengan gaya-gaya utama yang menyebabkan keretakan. Retak mode III (*tearing mode*) merupakan retak yang diakibatkan oleh gaya puntir yang mengarah keluar bidang retak. Kombinasi dari ketiga mode retak tersebut juga dapat terjadi.



Gambar 2.12 Mode bukaan retak

Sumber: David Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 1978

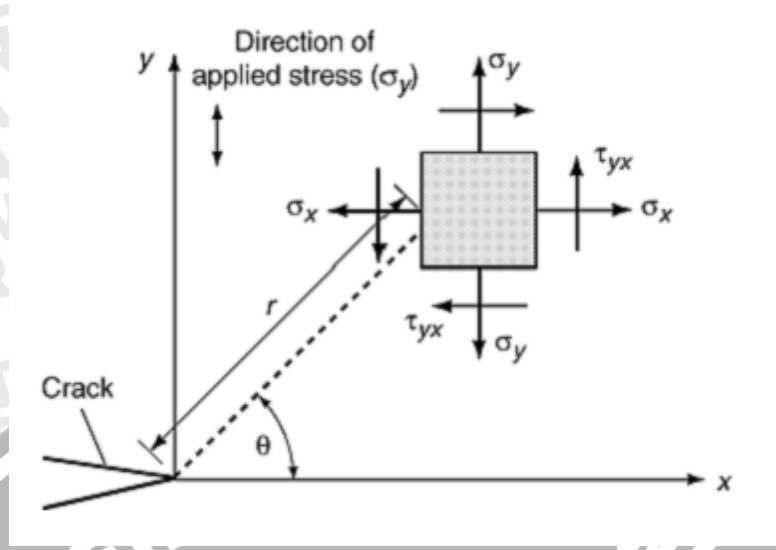
2.3.2 Analisis *fracture* menurut Irwin

Irwin menunjukkan bahwa pada *body* dibawah tegangan tarik (*tension*), kondisi tegangan disekitar retak tajam tak hingga pada *semi-infinite elastic solid* dijabarkan secara keseluruhan dengan persamaan *Westergaard*

$$\begin{aligned} \sigma_x &= K_I / (2\pi r)^{1/2} \cos(\theta/2) [1 - \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)] \\ \sigma_y &= K_I / (2\pi r)^{1/2} \cos(\theta/2) [1 + \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)] \\ \tau_{xy} &= K_I / (2\pi r)^{1/2} \cos(\theta/2) \sin(\theta/2) \cos(3\theta/2) \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \text{ untuk } \textit{plane strain} (\epsilon_z = 0), \text{ dan } \sigma_z = 0 \text{ untuk } \textit{plane stress}, \\ \tau_{yz} &= \tau_{zx} = 0 \end{aligned}$$

r dan θ adalah titik koordinat silindris terhadap ujung retak, dan K_I adalah faktor intensitas tegangan. Lokasi tegangan lokal dekat ujung retak ditunjukkan pada gambar 2.13 dibawah ini.



Gambar 2.13 Lokasi tegangan lokal dekat ujung retak dalam koordinat silindris
 Sumber: ASM Handbook, Volume 19, *fatigue and Fracture*. 1996: 918

Seperti pada persamaan 2.12 diatas, faktor intensitas tegangan, K_I , menunjukkan nilai tegangan lokal disekitar ujung retak. Faktor ini tergantung dari pembebanan, ukuran retak, dan batasan geometris, dengan bentuk umum seperti dibawah ini.

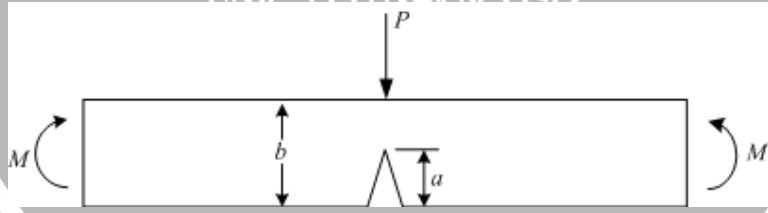
$$K_I = f(g)\sigma\sqrt{\pi a} \quad [\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}] \quad (2-13)$$

Dimana, $\sigma = \text{remote stress}$ pada komponen (bukan tegangan lokal, σ_{ij} pada persamaan 2-6)

$a = \text{panjang retak (mm)}$

$f(g) = \text{faktor koreksi yang tergantung pada geometri retak dan spesimen}$

Faktor koreksi, $f(g)$, untuk kondisi pembebanan untuk beban bending pada silinder pejal sebagai berikut.



Gambar 2.14 Cracked beam dengan bending
 Sumber: Bannantine. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. 1990:92

$$f(g) = 1,122 - 1,40(a/b) + 7,33(a/b)^2 - 13,08(a/b)^3 + 140(a/b)^4 \quad (2-14)$$

Menurut Irwin, patahan terjadi saat K_I mencapai nilai kritis, K_{IC} , yang merupakan *material property*, perkiraan ini menghasilkan tegangan patahan, σ_f sebesar

$$\sigma_f = K_{IC} / [f(g)\sqrt{\pi a}] \quad (2-15)$$

Faktor intensitas tegangan kritis (K_{IC}) sendiri terjadi saat tegangan beban maksimum (σ_{max}) terjadi. Dengan demikian faktor intensitas tegangan kritis ini dapat disebut pula sebagai nilai *fracture toughness* material (Lee, 2005).

2.3.3 Laju perambatan retak

Prediksi perambatan retak dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan menganalisis pada setiap siklus beban dan pada setiap sejumlah siklus beban tertentu. Analisis perambatan retak pada tiap siklus beban mempunyai satu kelebihan dibanding dengan yang lain, yaitu akan didapat hasil prediksi yang lebih teliti, karena setiap pertambahan retak (Δa) akan berpengaruh pada besarnya faktor intensitas tegangan (K). Semakin besar panjang retak maka semakin besar nilai K sehingga mengakibatkan perambatan retak yang lebih cepat.

Perambatan retak merupakan fenomena lokal yang terjadi diujung retak yang dipengaruhi oleh distribusi tegangan pada daerah ujung retak tersebut, maka laju perambatan retak dapat dihubungkan sebagai fungsi dari faktor intensitas tegangan yaitu $da/dN = f(\Delta K)$. Paris menunjukkan hubungan tersebut dalam bentuk fungsi eksponen (Bannantine, 1990):

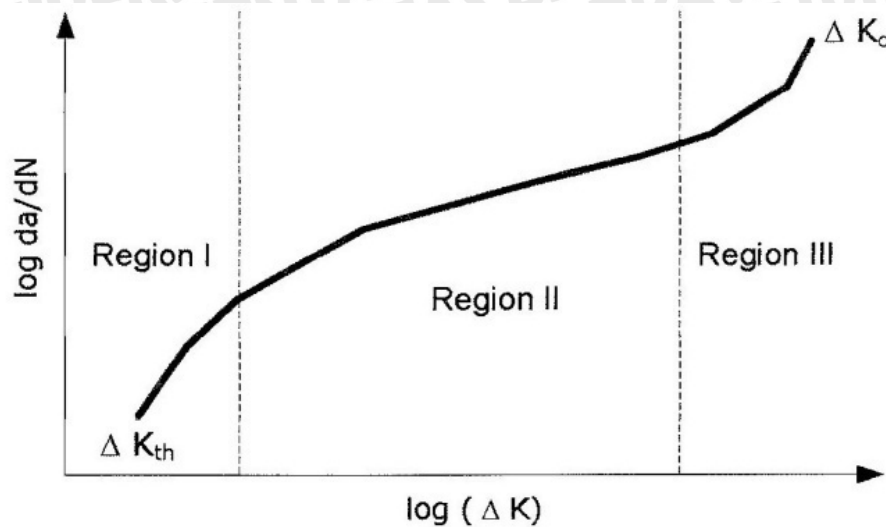
$$Da/dN = C (\Delta K)^m \quad [\text{mm/siklus}] \quad (2-16)$$

dengan da/dN = laju perambatan retak (mm/siklus)

C dan m adalah parameter material.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})$$

Secara umum, pertumbuhan retak pada rasio tegangan (R) konstan dapat digambarkan secara skematik dalam grafik berikut.



Gambar 2.15 Kurva pertumbuhan retak
 Sumber: Julie A. Bannantine. *Fundamentals of Metal fatigue Analysis*. 1990

Berdasarkan gambar 2.15 diatas diketahui bahwa pertumbuhan retak terjadi dalam tiga tahap dengan perilaku pertumbuhan retak terjadi dalam tiga tahap dengan perilaku pertumbuhan yang berbeda satu dengan yang lain.

a. Perambatan retak pada daerah I

Pada daerah ini perkembangan retak dipengaruhi oleh nilai intensitas tegangan *threshold* (ΔK_{th}), disini pertumbuhan retak *fatigue* tidak terjadi atau terlalu kecil untuk dapat diukur. Nilai ΔK_{th} biasanya berkisar antara 5-15 ksi-in^{1/2} untuk baja dan antara 3-6 ksi-in^{1/2} untuk paduan aluminium. Nilai ΔK_{th} dipengaruhi oleh rasio tegangan, ($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$). peningkatan R menyebabkan menurunnya nilai ΔK_{th} (Bannantine, 1990)

b. Perambatan retak pada daerah II

Sebagian besar aplikasi dari konsep LEFM adalah menggambarkan perilaku pertumbuhan retak pada daerah II. Pada daerah ini kemiringan kurva dari grafik hubungan antar $\log \left(\frac{da}{dN} \right)$ dengan $\log (\Delta K)$ diasumsikan linier dan berkisar antara 10⁻⁶ sampai 10⁻³ in/siklus. Perambatan retak pada daerah ini dapat dijelaskan dengan persamaan Paris (Bannantine, 1990):

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad [\text{mm/siklus}] \quad (2-17)$$

dengan $\frac{da}{dN}$ = laju perambatan retak (mm/siklus)

C, m = konstanta material

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$ = faktor intensitas tegangan (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)

c. Perambatan retak pada daerah III

Daerah III adalah daerah dengan pertumbuhan retak yang cepat dan faktor intensitas tegangan yang tinggi menyebabkan perambatan retak tidak stabil. Perilaku retak pada titik transisi dari daerah II ke daerah III sangat dipengaruhi oleh kekuatan *yield*, faktor intensitas tegangan dan rasio tegangan. Persamaan Forman digunakan untuk menjelaskan perambatan retak pada daerah III (Bannantine, 1990)

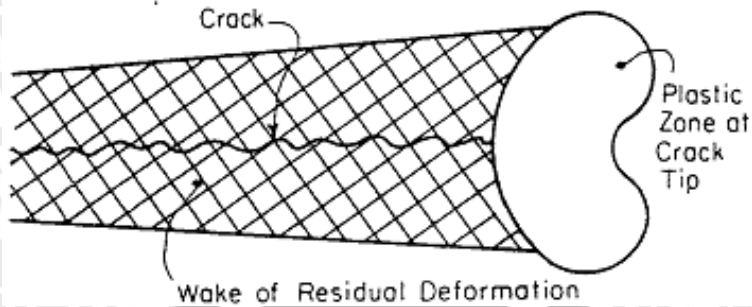
$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad [\text{mm/siklus}] \quad (2-18)$$

Persamaan Forman memiliki hasil yang valid hanya jika besarnya rasio tegangan (R) > 0 (Bannantine, 1990).

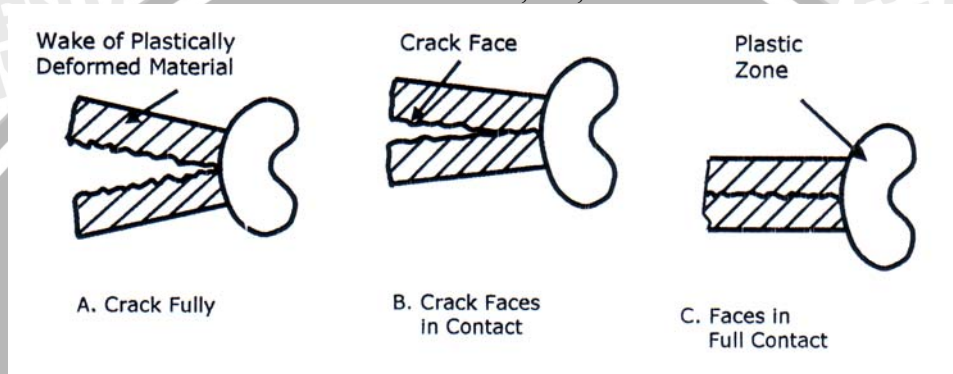
2.3.4 Penutupan Retak (*Crack Closure*)

Teori *crack closure* sangat penting dalam memprediksi rambat retak pada pembebanan siklus bervariasi. Pada awal tahun 1970, Wolf Elber mengamati adanya permukaan retak *fatigue* yang menutup (saling kontak) saat beban terapkan yang cukup jauh masih dalam bentuk *tensile* dan tidak terbuka lagi hingga beban *tensile* yang cukup tinggi didapatkan pada pembebanan siklus berikutnya. Elber mengembangkan teori *crack closure* untuk menjelaskan fenomena ini.

Elber menunjukkan bahwa *crack closure* terjadi sebagai hasil dari plastisitas ujung retak. Daerah plastis berkembang di sekitar ujung retak saat tegangan luluh material terlampaui. Seperti pada Gambar 2.16, saat retak merambat, jalur (*wake*) dari material yang terdeformasi plastis berkembang saat *body* sekitarnya tetap dalam kondisi elastis.

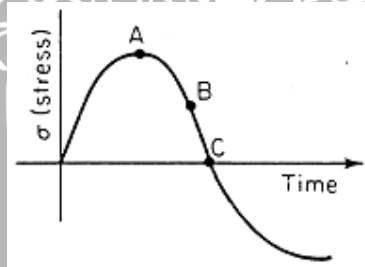


Gambar 2.16 *Wake* dari material yang terdeformasi plastis
 Sumber : Bannantine, J.A, 1990:111



Gambar 2.17 Mekanisme *crack closure*
 Sumber : Bannantine, J.A, 1990:112

Retak akan terbuka ketika beban mencapai maksimum, selanjutnya ketika beban mulai berkurang (dihilangkan) maka retak mulai menutup dan permukaan retak saling bersentuhan sebelum mencapai titik nol seperti terlihat pada Gambar 2.18 berikut.



Gambar 2.18 Mekanisme *crack closure* pada pembebanan siklus
 Sumber : Bannantine, J.A, 1990:112

Lebih lanjut Elber mengenalkan konsep *crack opening stress*. *Crack opening stress* adalah *stress* yang terjadi ketika retak baru mulai terbuka secara penuh, σ_{op} . Ia menunjukkan bahwa agar rambat retak *fatigue* dapat terjadi, retak harus terbuka penuh.

(Bannantine, J.A, 1990)

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{open} \quad (2-19)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

Ketika

$$K_{open} > K_{min} \quad (2-20)$$

Maka,

$$\Delta K > \Delta K_{eff} \quad (2-21)$$

Oleh karena itu, range faktor intensitas efektif, ΔK_{eff} , yang lebih kecil dari ΔK , dapat digunakan untuk prediksi rambat retak *fatigue*.

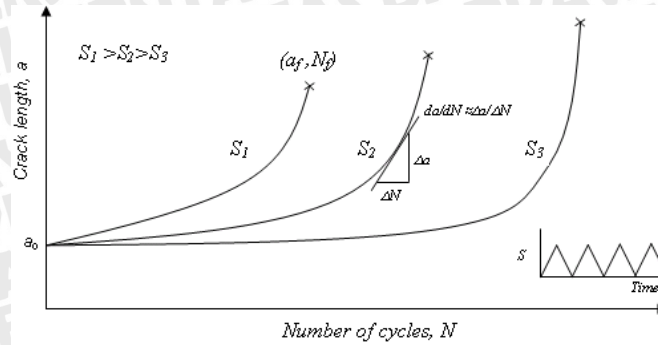
$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_{eff}) \quad (2-22)$$

Konsep faktor intensitas tegangan efektif akibat *crack opening stress* dalam teori *crack closure* juga dapat terjadi pada daerah II (*crack propagation*). Hal ini terjadi ketika beban mulai berangsur dihilangkan (*unloading*) setelah overload, yang menimbulkan tegangan sisa (*residual stress*). Seperti pada penjelasan di Gambar 2.18, saat beban berangsur dihilangkan, retak mulai menutup, hal ini diakibatkan oleh *compressive residual stress* yang mempengaruhi *crack closure*. Jika *compressive residual stress* yang terjadi lebih dominan daripada *tensile compressive stress*, maka penutupan retak lebih banyak terjadi yang berakibat pada perlambatan retak (*crack retardation*).

2.3.5 Perilaku rambat retak

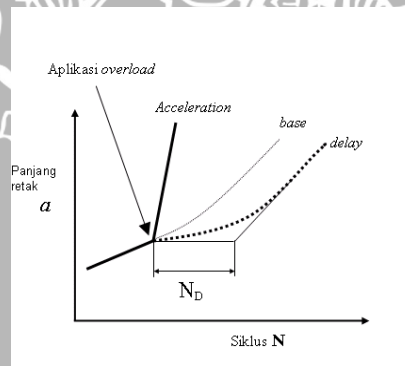
Umumnya retak yang terjadi adalah retak subkritis yang tumbuh dari suatu retak atau cacat sampai mencapai retak kritis. Sering ditemukan bahwa retak subkritis yang berkembang karena pembebanan *fatigue* terhadap retak awal atau cacat pada material (Stephens *et al.*, 2001; Barsom & Rofle, 1999).

Gambar 2.20 menunjukkan secara skematik hubungan panjang retak dan siklus pembebanan konstan dengan tingkat pembebanan yang berbeda, dengan $S_1 > S_2 > S_3$ adalah tegangan siklus beban berulang maksimum dengan siklus beban minimumnya nol dan mempunyai panjang retak mula yang sama a_0 . Bisa dilihat bahwa dengan siklus tegangan maksimum yang lebih besar, kecepatan rambat retak yang ditunjukkan dengan *slope* pada kurve lebih besar pada suatu panjang retak tertentu dan umur perambatan retak *fatigue*-nya lebih pendek (N_f menyatakan jumlah siklus total sampai patah). Di samping itu dengan siklus tegangan yang lebih tinggi, panjang retak pada saat patah a_f lebih pendek (Stephens *et al.*, 2001)



Gambar 2.19 Hubungan panjang retak dan siklus pembebanan konstan (S)
 Sumber: Stephens *et al.*, 2001

Gambar 2.20 menunjukkan secara skematik perilaku rambat retak akibat beban lebih (*overload*), yang mana perambatan retak dapat mengalami penundaan atau *delay*. N_D menerangkan jumlah siklus beban berulang yang mengalami perlambatan atau tertahan, artinya umur retak akan semakin panjang, sehingga terjadinya patah menjadi tertunda (*delay*) (Makabe *et al.*, 2005). Di samping itu juga perambatan retak akan mengalami akselerasi sehingga umur retak akan semakin pendek dibanding dengan yang tanpa *overload*



Gambar 2.20. Perilaku rambat retak setelah *overload*
 Sumber: Makabe, 2005

2.4 Analisis dalam Software

Secara umum solusi yang digunakan dalam *software* dapat dibagi menjadi tiga bagian utama yang meliputi tahapan-tahapan penyelesaian yaitu sebagai berikut:

1. Preprocessing

Merupakan tahap awal yang fungsinya adalah membuat model yang meliputi:

- Pembuatan geometri model
- Penentuan jenis elemen dan *properties* material yang digunakan
- Pembuatan *meshing* pada *line*, *area* atau volume sesuai kebutuhan.

2. Solution

Pada tahap ini berfungsi sebagai proses pemberian beban (*load* dan *constraint*) dan proses perintah untuk memulai solusi (*solving*). Pada tahap ini tipe dan besar *constraint* ditentukan, diikuti dengan beban yang digunakan. Dan yang terakhir adalah tahap *solving* (*running program*).

3. Postprocessing

Tahap ini merupakan tahap untuk mengevaluasi hasil dari *solving* (*running program*) yang telah dijalankan. Pada tahap ini ada beberapa hal yang bisa diamati atau ditampilkan, yaitu :

- List perpindahan (*displacement*) nodal, elemen, dan tegangan
- Plot kontur diagram

Data-data yang diperoleh dari tahap *postprocessing* inilah yang kemudian digunakan sebagai bahan untuk menganalisa sebuah kasus yang diselesaikan dengan bantuan *software*.

2.5 Hipotesis

Berdasarkan pendekatan teori diatas, maka dapat diambil hipotesa:

Saat panjang retak bertambah akibat pembebanan siklus, beban *overload* menentukan bentuk *residual stress* yang terjadi. Nilai residual stress yang terjadi (*tensile* atau *compressive*) akan meningkatkan atau menurunkan ΔK_{eff} . Peningkatan atau penurunan ΔK_{eff} mempengaruhi perilaku rambat retak yang terjadi, baik dipercepat (*acceleration*) maupun diperlambat (*retardation*).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan bantuan *software* ANSYS 11.0 untuk mengevaluasi besarnya faktor intensitas tegangan di daerah ujung retak yang diamati setelah pembebanan siklus menerima tegangan *overload*. Hasil simulasi digunakan untuk menemukan besar faktor intensitas tegangan efektif yang terjadi pada ujung retak.

3.2 Material dan Geometri Spesimen

3.2.1 Material properties

Material yang digunakan adalah Baja Karbon tipe ST70 dengan sifat fisik material sebagai berikut:

- Tegangan *yield* (σ_y) = 550 MPa
- Tegangan ultimate (σ_{ult}) = 700 MPa
- Tegangan *break* (σ_{break}) = 625 MPa
- Modulus Elastisitas (E) = 207 GPa
- Angka *poisson* (ν) = 0.3

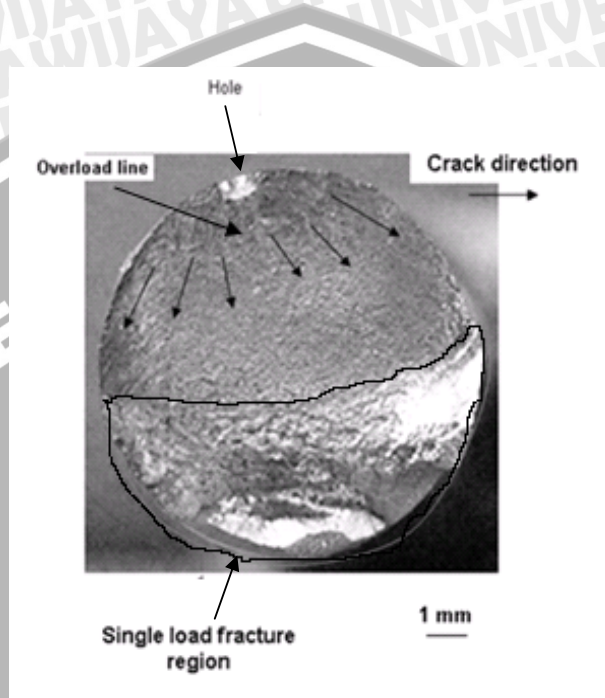
3.2.2 Geometri spesimen

Jenis spesimen yang digunakan adalah silinder pejal. Ukuran dari geometri spesimen secara keseluruhan adalah sebagai berikut:

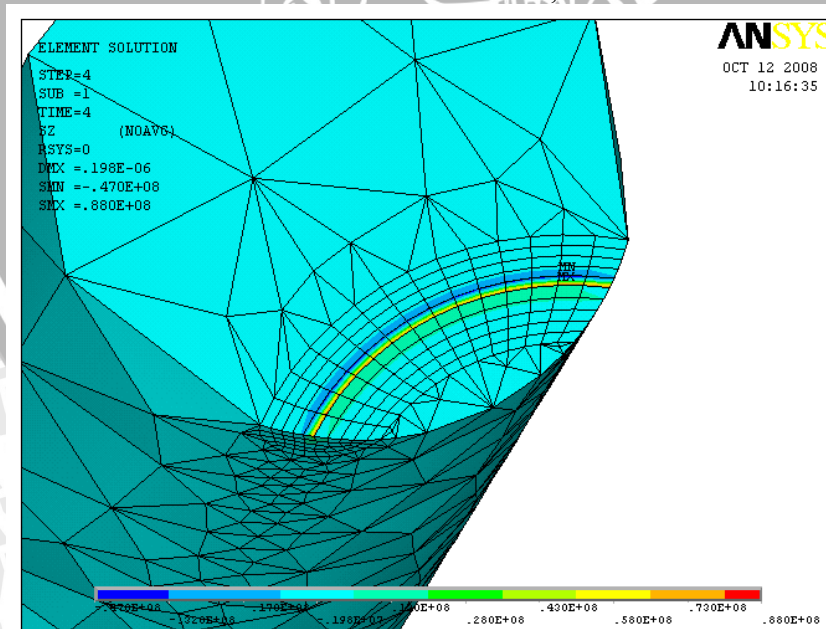
- Diameter spesimen (\emptyset) = 8 mm
- Panjang spesimen (l) = 220 mm

Pola perambatan retak dan daerah retak setelah *overload* dilakukan dapat terlihat di permukaan patahan pada skala makro ditunjukkan pada Gambar 3.1. sehingga untuk simulasi, spesimen dapat dimodelkan seperti Gambar 3.3, yang mana ujung retak dimodelkan sedemikian rupa berdasarkan hasil uji *fractography* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Pada penelitian sebelumnya didapatkan hasil pada \emptyset 8mm pada panjang retak 4 mm pada Gambar 3.2, yang belum diperjelas mengenai perkembangan retaknya, untuk itu dalam penelitian ini penulis mengamati pada panjang retak 3, 4, dan 5 mm untuk pengamatan visual yang lebih detail. Pemodelan spesimen dilakukan dengan

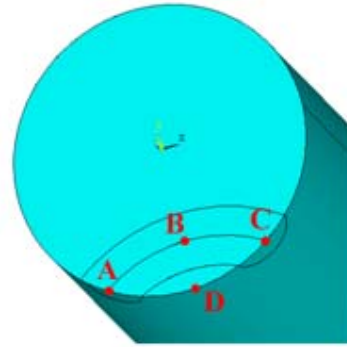
setengan bagian dikarenakan adanya kesimetrisan model, baik dari geometri maupun pembebanan. dalam bentuk elemen.



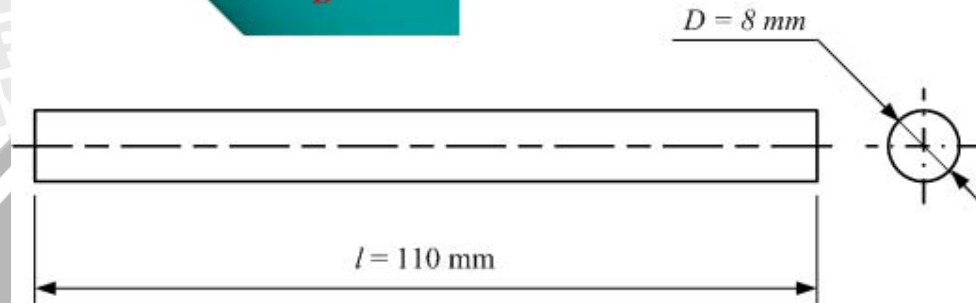
Gambar 3.1 *Fractography* dengan skala makro
 Sumber: Anindito P., 2009



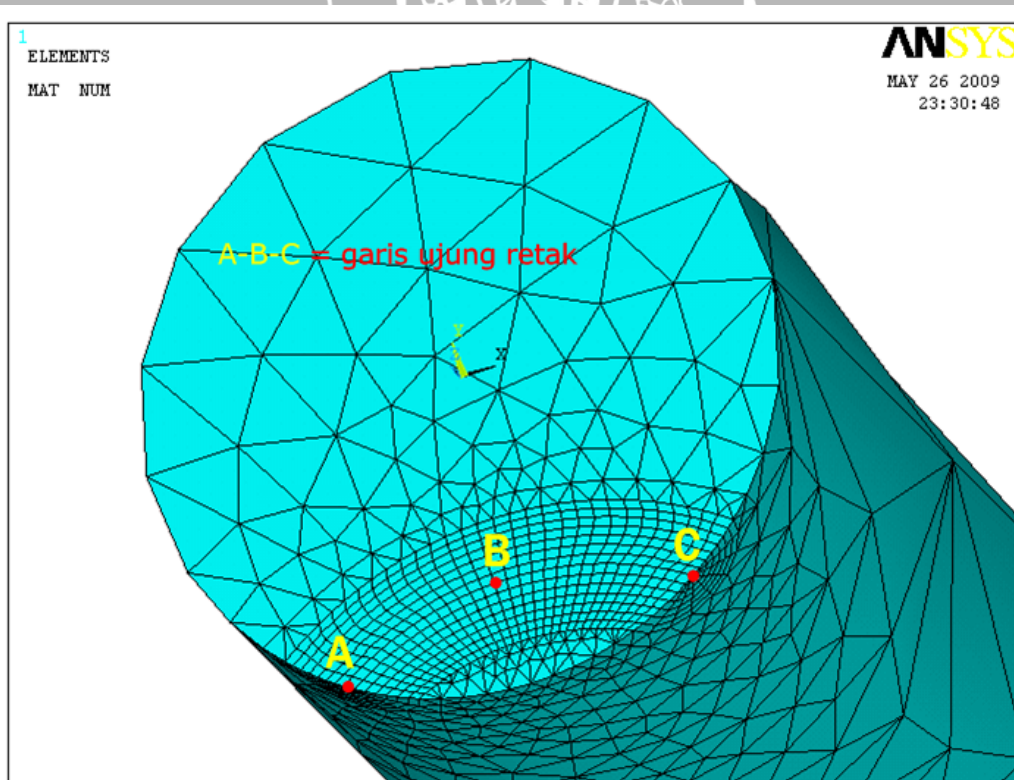
Gambar 3.2 Hasil penelitian spesimen \varnothing 8 mm dengan panjang retak 4 mm
 Sumber: Anindito P., 2009



A-B-C = garis ujung retak
A-D-C = garis panjang retak



Gambar 3.3 Ukuran spesimen setengah bagian



Gambar 3.4 Model simulasi dalam bentuk elemen

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang diukur terdiri dari:

1. Variabel Bebas (*Independent Variable*) :
 - a. Panjang retak = 3 mm; 4 mm; 5 mm
2. Variabel Terikat (*Dependent Variable*) :
 - a. Tegangan maksimum konstan (σ_c) = 100 Mpa
 - b. Tegangan maksimum *overload* (σ_{or}) = 230 MPa
3. Parameter yang dikonstantakan adalah :
 - a. Geometri spesimen dengan \varnothing 8 mm, $l = 220$ mm
 - b. Tipe elemen Solid186
 - c. *Material properties* dari material ST70

3.4 Pemodelan Pembebanan Siklus Bervariasi

3.4.1 Pemodelan geometri dengan ANSYS

Pemodelan dilakukan dengan membuat macro program 2 dimensi. Untuk memodelkan spesimen silinder pejal dibuat dengan setengah bagian dikarenakan adanya kesimetrian model, baik dari geometri maupun pembebanan. Model dibuat dengan cara membuat volume *solid cylinder* dengan radius 4 mm, sepanjang 110 mm ke arah sumbu Z negatif. Pada permukaan ujung silinder di koordinat 0, dibuat volume cincin dengan fitur *torus* yang memiliki ukuran radius minor 0,3 mm untuk panjang retak 3 mm; 0.5 mm untuk panjang retak 4 mm; 0.8 mm untuk panjang retak 5 mm. Dan radius mayor 4 mm, pada titik sumbu yang sama di koordinat 0. *Volume* cincin tersebut di turunkan dengan fasilitas *move*, sepanjang 7,75 mm untuk panjang retak 3 mm; 7.02 mm untuk panjang retak 4 mm; 6.65 mm untuk panjang retak 5 mm ke arah sumbu Y negatif. Kemudian di potong dengan fasilitas *subtract* untuk *volume*, dengan menambahkan *volume* tertentu sebagai pemotong sampai terbentuk *volume* cincin seperti Gambar 3.3. Lalu volume silinder dan cincin dipartisi dengan fitur *partition* menjadi volume 1 dan 2, agar dapat di *meshing* secara *independent*.

Dasar geometri volume 1 ditentukan dari besar radius plastis di depan ujung retak. Untuk radius plastis yang digunakan, menggunakan rumusan

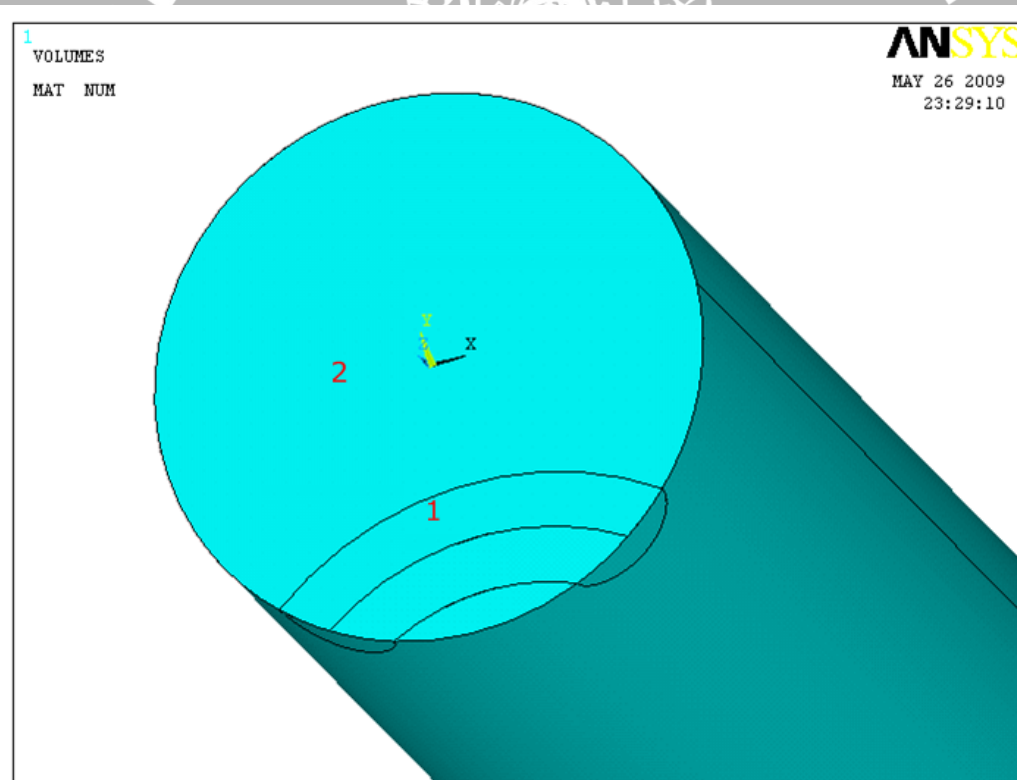
$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad \text{untuk kondisi } \textit{plane strain} \quad (3-1)$$

Dimana: r_y = radius plastis (mm); K = faktor intensitas tegangan, untuk desain volume 1 menggunakan K_{IC} (MPa $\sqrt{\text{mm}}$); σ_{ys} = kekuatan luluh material (Mpa).

Sehingga besar radius plastis yang digunakan

$$\begin{aligned} r_y &= \frac{1}{6\pi} \left(\frac{46}{550} \right)^2 \\ &= \frac{1}{6\pi} (0,083)^2 \\ &= 0,053 \cdot 6,889 \cdot 10^{-3} \\ &= 3,651 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \end{aligned}$$

Radius plastis diatas merupakan radius minimum yang dapat digunakan, untuk keperluan pengujian digunakan radius volume 1 seperti keterangan diatas (0,3; 0,5; 0,8) untuk memberikan hasil yang lebih konvergen saat dilakukan pembagian *element* (*meshing*)

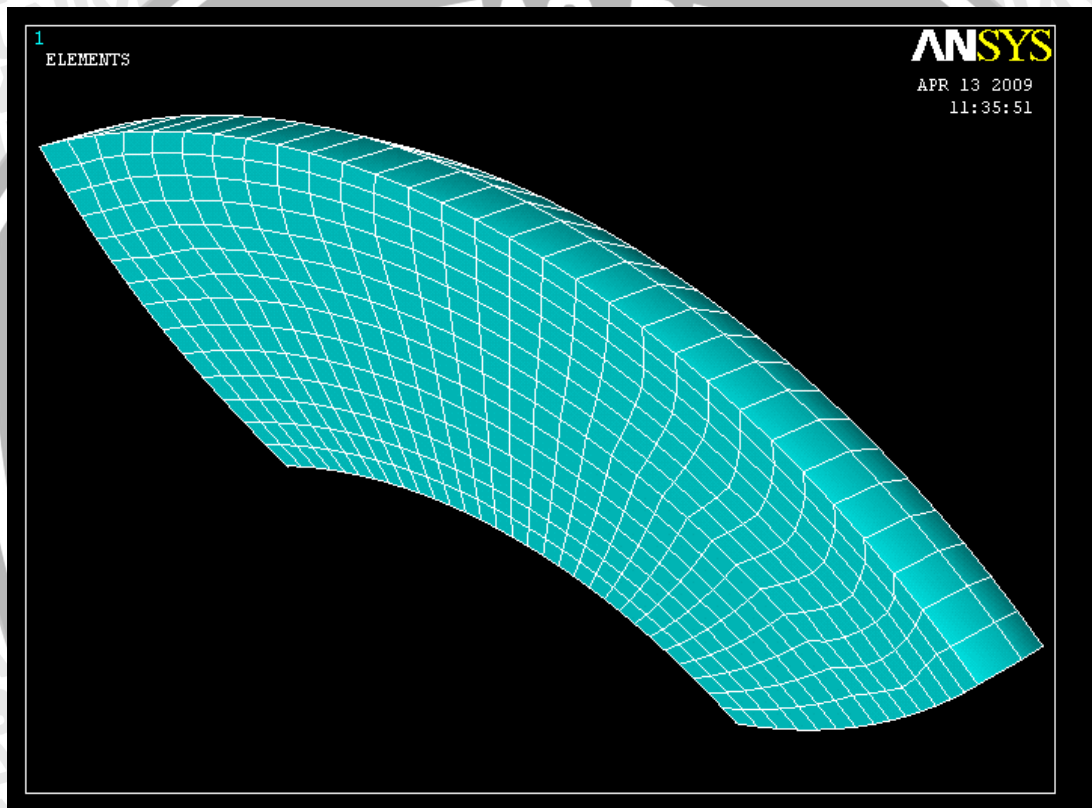


Gambar 3.5 Plot volume 1 dan 2

Pembagian elemen (*meshing*) pada *software* ANSYS dapat dilakukan dengan dua cara yaitu cara otomatis dan cara manual. Pada cara otomatis, pengguna cukup memberikan model saja, dimana ANSYS secara otomatis akan menentukan sendiri jumlah dan ukuran elemen yang digunakan. Sedangkan dengan cara manual, pengguna

menentukan sendiri jumlah dan ukuran elemen yang digunakan. Pada pemodelan spesimen ini, kedua cara diatas dilakukan. Untuk volume 1 (cincin) dilakukan secara manual, *meshing* dibuat dalam elemen *hexahedral* yang disweep dengan menentukan volume yang *dimeshing*, lalu dilanjutkan dengan menentukan *source area* dan *target area* seperti pada Gambar dibawah ini.

Agar *meshing* yang dihasilkan konvergen, maka pada *line* yang membatasi *source area* dan *target area* dibagi berdasarkan divisi elemen sampai terbentuk model *meshing* seperti Gambar 3.7. Untuk volume 2 (silinder pejal) dilakukan secara otomatis, dengan cara *meshing* biasa dalam bentuk elemen *tetrahedral*

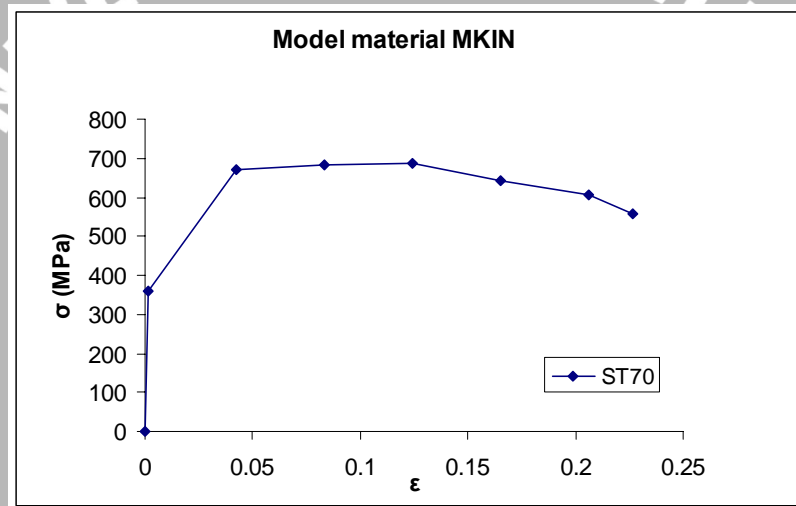


Gambar 3.6 *Meshing* volume 1

Elemen ini terdiri dari 20 node yang memiliki 3 derajat kebebasan tiap nodenya, dalam bentuk translasi pada arah nodal x, y, dan z. Elemen ini digunakan untuk mendukung plastisitas, hiperelastisitas, retak, kekakuan tegangan, defleksi yang besar, dan kapasitas regangan yang besar (*ANSYS Release 11.0 Documentation*).

3.4.2 Plastisitas Material

Untuk memodelkan material pada kondisi elastis-plastis, digunakan pendekatan matematis yang dapat menampilkan kurva tegangan dan regangan pada kondisi elastis (*linear*) dan kondisi plastis (*nonlinear*). ANSYS memberikan model material tertentu untuk memodelkan material pada kondisi elastis plastis, untuk material ini digunakan model material *Multilinear Kinematic Hardening* (MKIN).



Gambar 3.9 Model material *Multilinear Kinematic Hardening*

Pada model material MKIN ini kurva daerah plastis didekati dengan garis multilinear dan data tegangan dan regangan diperoleh dengan menggunakan metode Ramberg-Osgood. Beberapa parameter yang dibutuhkan sebagai input material properties MKIN dalam pemrograman, diantaranya:

- Modulus elastisitas (E) = 207 Gpa
- Angka poisson (ν) = 0.3
- Data tegangan dan regangan pada daerah plastis, yang ditampilkan pada

Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Data tegangan dan regangan daerah plastis

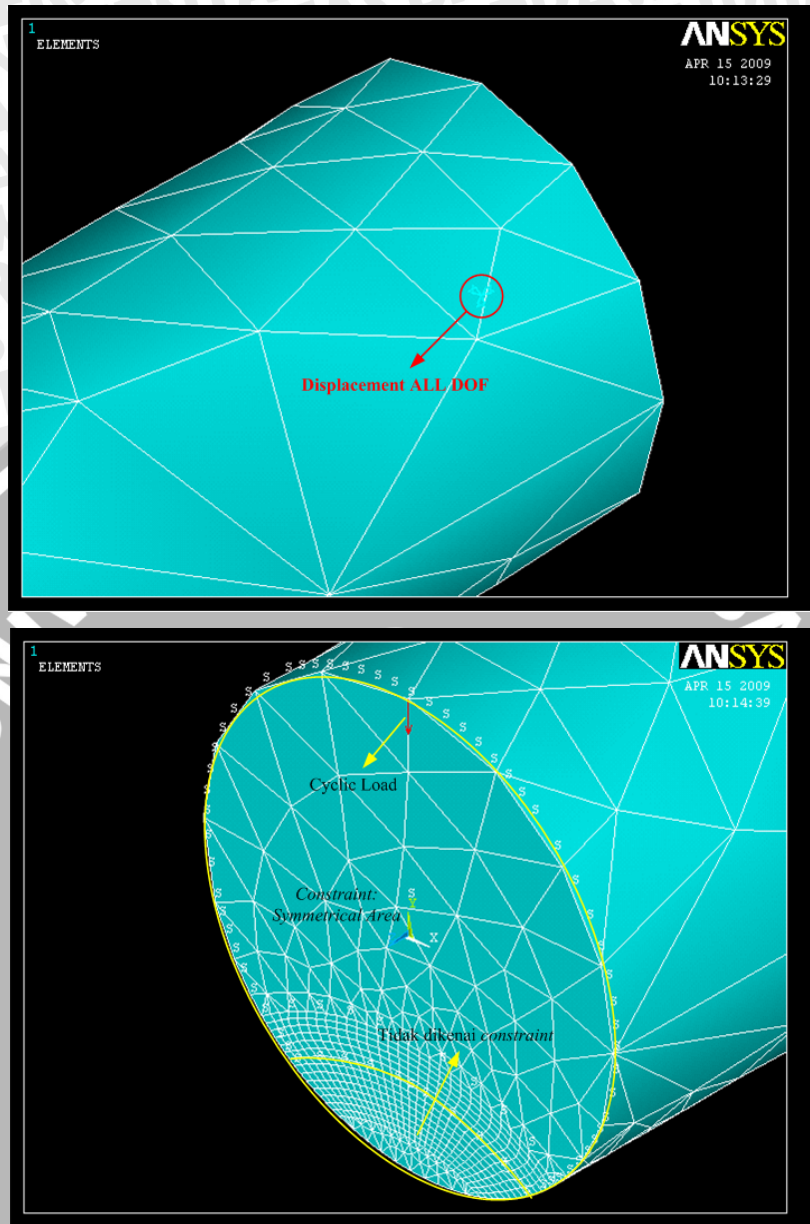
Tegangan σ (Mpa)	Regangan ϵ
360	0.0017385
671	0.042638
684	0.083538
687	0.12444
641	0.16534
605	0.20624
556	0.22669

3.4.3 Pemodelan pembebanan

Pembebanan siklus sebagai fungsi sinusoidal dianggap berupa beban yang terletak pada bagian atas dari spesimen (Gambar 3.3) dengan frekuensi konstan sebesar 10 Hz, dan besarnya beban maksimum dan amplitudo pembebanan dimulai dari pembebanan konstan, overload, lalu kembali ke kondisi konstan pada setiap variasi panjang retak dengan stress ratio -1, dapat dilihat pada Tabel 3.2.

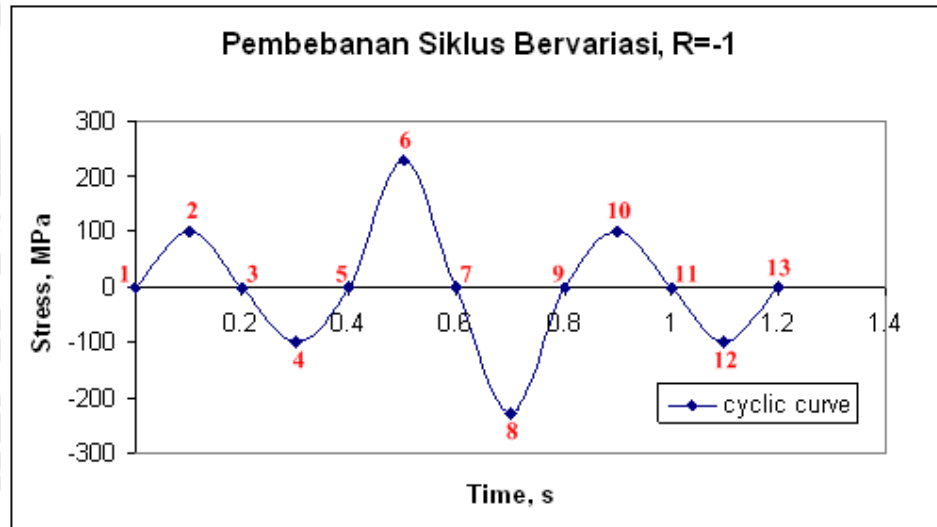
Tabel 3.2 Pembebanan siklus

Panjang Retak mm	Beban Maksimum $(S_{maks}) N/mm^2$	Beban Minimum $(S_{min}) N/mm^2$	Urutan Load Step
3	100	-100	1 - 5
	230	-230	6 - 9
	100	-100	10 - 13
4	100	-100	1 - 5
	230	-230	6 - 9
	100	-100	10 - 13
5	100	-100	1 - 5
	230	-230	6 - 9
	100	-100	10 - 13



Gambar 3.10 Bentuk *constraint* dan pembebanan

Dalam satu siklus pembebanan terdiri dari 13 *load step* yang terdapat di posisi maksimum, unloading, dan minimum. *Automatic time stepping* digunakan untuk mengatur jumlah *time step* yang digunakan dengan *time step size* sebesar 0.1 sesuai dengan besar frekuensi yang digunakan. Pemodelan beban siklus untuk setiap variasi panjang retak dapat dilihat pada Gambar 3.10 di bawah ini.

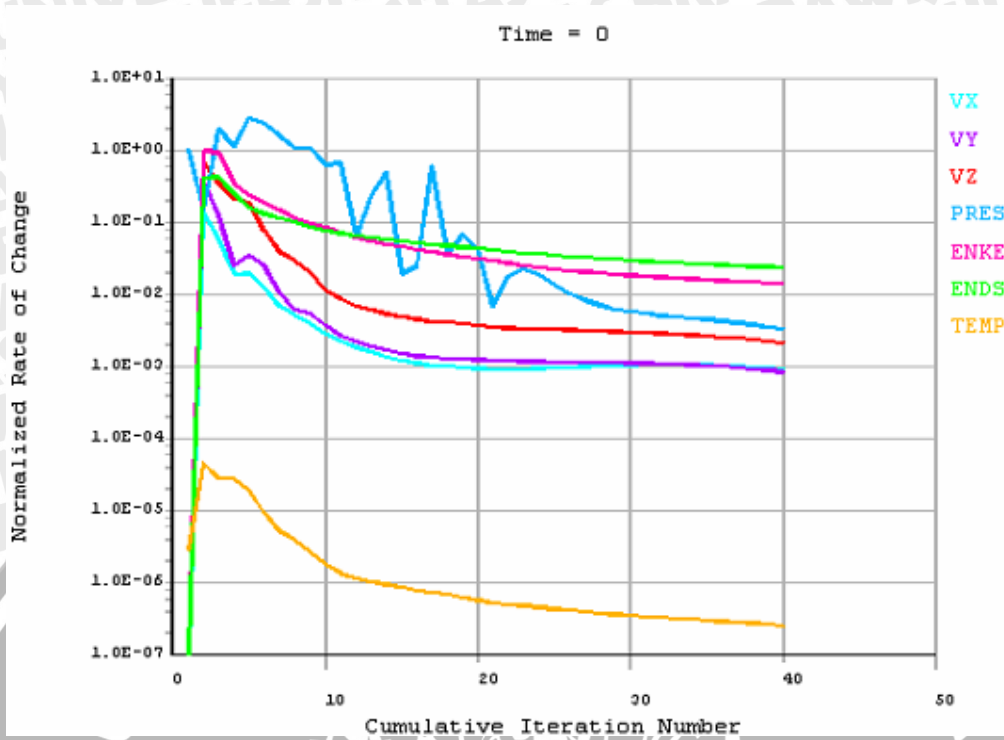


Gambar 3.11 Pembebanan siklus bervariasi untuk $R = -1$

Pada gambar diatas, beban maksimum terjadi pada load step 2 dan 10 untuk beban konstan dan 6 untuk beban *overload*. Sedangkan beban minimum terjadi pada *load step* 4 dan 12 untuk beban konstan dan 8 untuk beban *overload (underload)*. Pemodelan retak dilakukan dengan cara memberikan kondisi batas simetris pada *area* elemen setengah bagian atas pada penampang ujung spesimen yang menerima beban *bending*, dan kondisi batas dengan derajat kebebasan penuh (*All Degree Of Freedom*) pada penampang ujung yang sebaliknya, seperti pada Gambar 3.10

3.4.4 Kontrol Konvergen

Setelah diberi perlakuan beban, maka dilakukan proses running simulasi untuk melihat hasilnya. Running dikatakan berhasil jika proses *meshing* bisa konvergen. Untuk ANSYS, hal ini dapat diketahui melalui grafik konvergen setelah dilakukan running seperti pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Grafik konvergen
 Sumber: Tresna, 2003: 5

Pada perhitungan ANSYS jumlah iterasi ditentukan menggunakan program untuk mencapai konvergensi perhitungan. Jika tidak terjadi kesalahan atau pesan peringatan, maka perhitungan simulasi dikatakan konvergen sehingga dapat didapatkan hasil running.

3.5 Hasil Pemodelan

Hasil pemodelan metode elemen hingga dengan ANSYS dapat dilakukan dengan menampilkan:

1. Kontur plot tegangan plastis pada komponen sumbu Z dan intensitas tegangan di sekitar ujung retak
2. Grafik tegangan plastis dan intensitas tegangan pada pembebanan siklus

3.6 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian yang digunakan adalah 3 variasi panjang retak dan 2 variasi pembebanan secara bergantian (konstan-overload-konstan) pada pembebanan siklus bervariasi dengan 13 *load step*. Sedangkan parameter yang diamati adalah faktor intensitas tegangan efektif di ujung retak pada penampang silinder pejal dengan

software ANSYS 11.0. faktor intensitas tegangan efektif diamati melalui perbedaan intensitas tegangan antara sebelum dan sesudah terjadinya *overload* (load step 2 dan 10) untuk melihat besarnya intensitas tegangan *residual stress* akibat *overload*, setelah itu dapat ditentukan besar faktor intensitas tegangan efektifnya.

Denah rancangan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut ini:

Tabel 3.3 Denah Rancangan Penelitian

Panjang retak (mm)	Tegangan pembebanan siklus (MPa)	Model pengamatan
3	$S_{constant} = 100$	Load step 2 & 10
	$S_{overload} = 230$	
4	$S_{constant} = 100$	Load step 2 & 10
	$S_{overload} = 230$	
5	$S_{constant} = 100$	Load step 2 & 10
	$S_{overload} = 230$	

Pada pembebanan siklus ini, input beban yang dimasukkan dalam bentuk *force* (gaya bending; N). Maka beban siklus *constant* dan *overload* yang digunakan sebagai berikut:

Diketahui = σ_B (*constant*) : $100 \text{ MPa} \approx 100 \text{ N/mm}^2$

σ_B (*overload*) : $230 \text{ MPa} \approx 230 \text{ N/mm}^2$

l : 110 mm

D : 8 mm

Ditanya = P_B (*constant*) : ? N

P_B (*overload*) : ? N

Penyelesaian = $\sigma_B = \frac{P_B \cdot l \cdot 16}{\pi \cdot D^3}$

$P_B = \frac{\sigma_B \cdot \pi \cdot D^3}{l \cdot 16}$

P_B (*constant*) = $\frac{100 \cdot \pi \cdot 8^3}{110 \cdot 16}$

= $\frac{160768}{1760} = 91,34 \text{ N}$

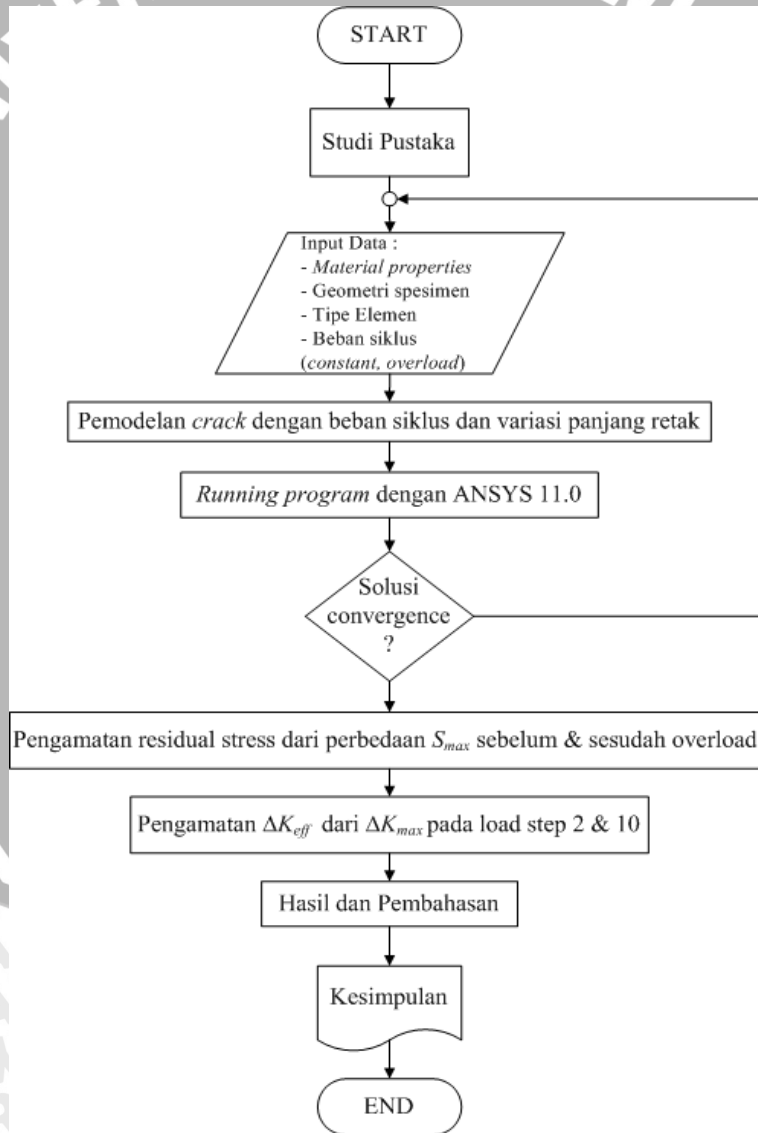
$$P_B (\text{overload}) = \frac{230 \cdot \pi \cdot 8^3}{110 \cdot 16}$$

$$= \frac{369766,4}{1760} = 210,09 \approx 210 \text{ N}$$

Maka input beban siklus (*bending force*) yang digunakan untuk tegangan *constant* dan *overload* sebesar 91,34 N dan 210 N.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan deskripsi diatas, maka langkah-langkah penyelesaian kasus pengamatan faktor intensitas tegangan efektif yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Diagram alir penelitian

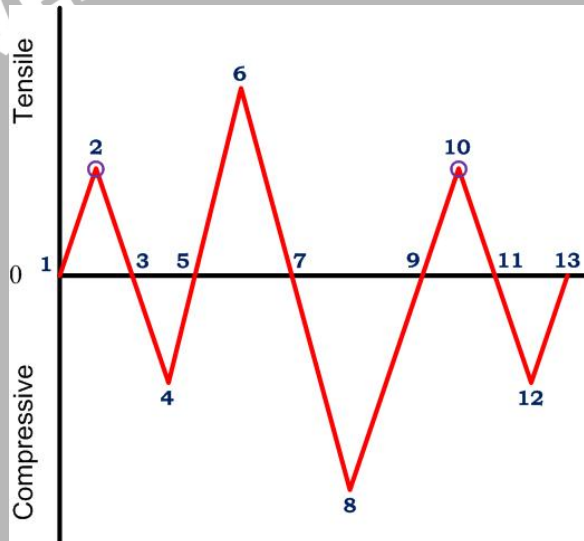
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

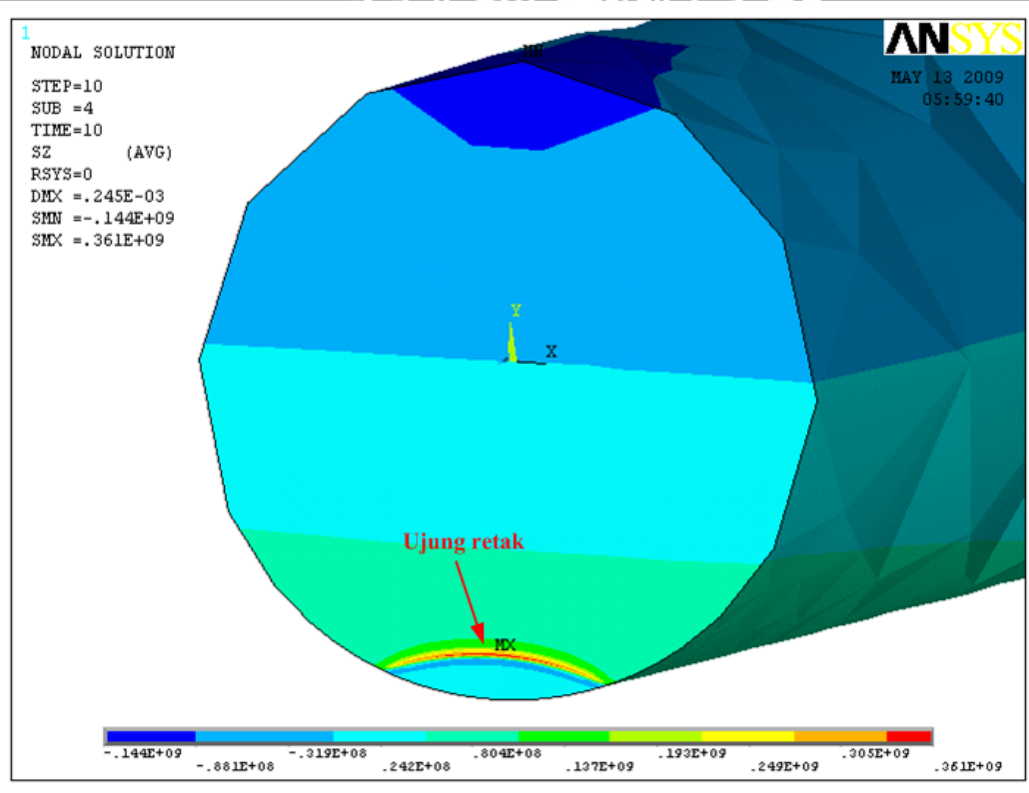
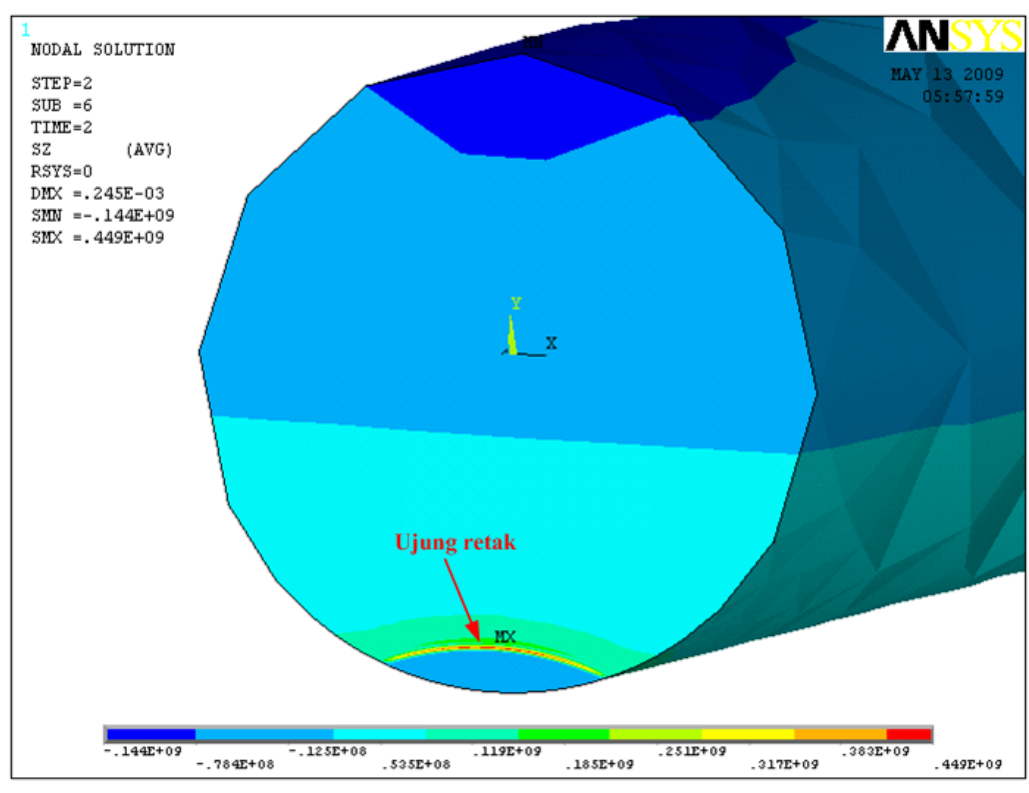
4.1.1 Hasil pemodelan

Gambar 4.1 dibawah ini menunjukkan posisi beban atau *load step*, yang mana kondisi tegangan di depan ujung retak diamati. Pengamatan difokuskan pada *load step* 2, saat tegangan maksimum sebelum beban *overload* pada *load step* 6. lalu dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum setelah *overload* pada *load step* 10, untuk mengamati besar tegangan efektif yang terjadi pada *load step* 10 akibat tegangan sisa setelah *overload*.



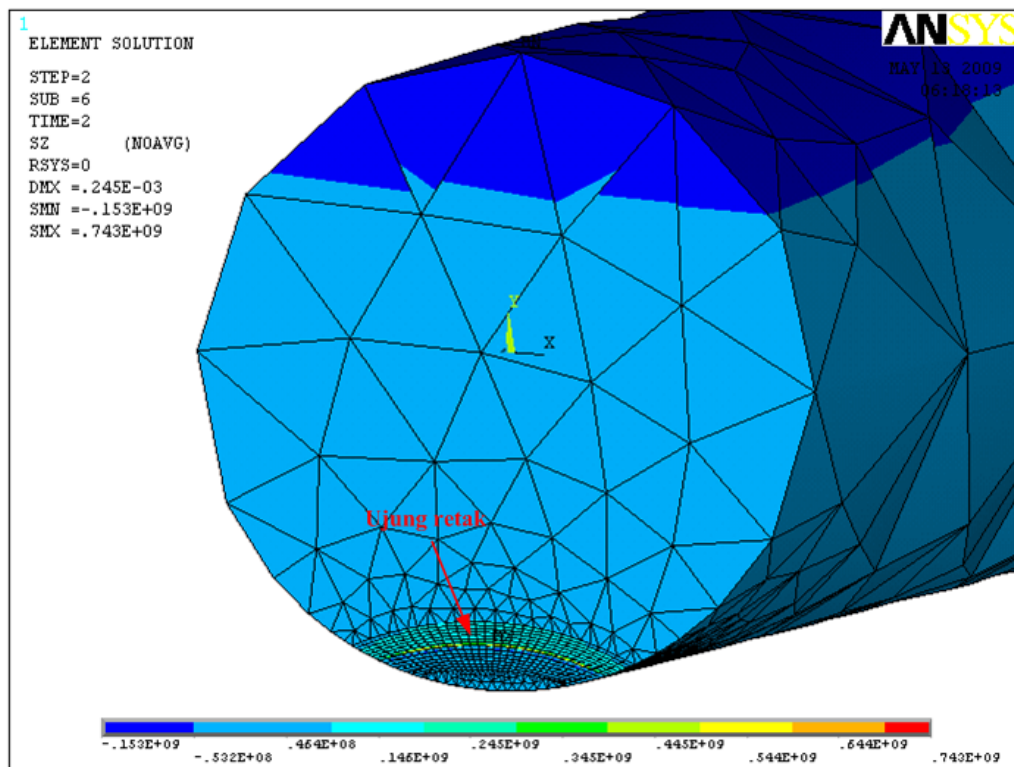
Gambar 4.1 Posisi *load step* 2 dan 10 pada pembebanan siklus

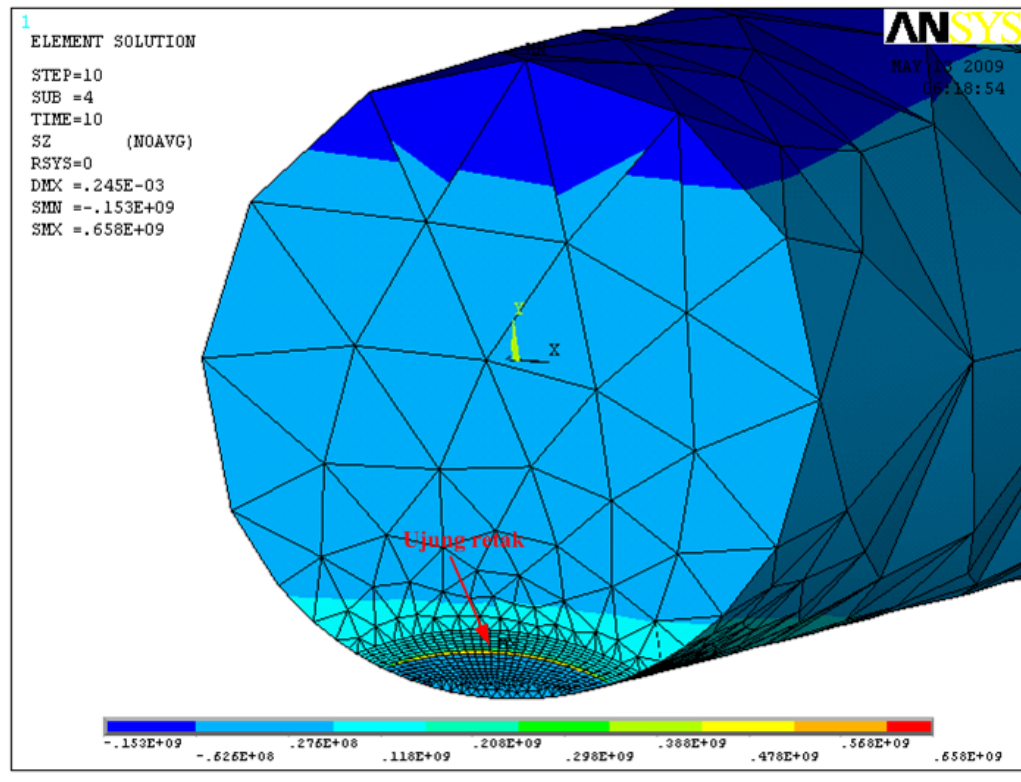
Contoh *stress contour* yang diamati seperti pada Gambar 4.2 dalam bentuk *nodal solution* pada *load step* 2 dan 10 untuk panjang retak 3 mm. Pada daerah ujung retak yang ditunjukkan oleh anak panah mengindikasikan bahwa terjadi perbedaan tegangan siklus maksimum pada pemberian beban siklus yang sama (100 MPa), sebelum dan sesudah *overload*. Berdasarkan gambar diatas, daerah ujung retak yang memiliki cakupan tegangan maksimum yang lebih luas pada pembebanan siklus setelah *overload*. Hal ini ditunjukkan dengan dominasi warna merah yang lebih besar pada *load step* 10, dibandingkan dengan *load step* 2.



Gambar 4.2 Nodal solution pada load step 2 dan 10 untuk panjang retak 3 mm

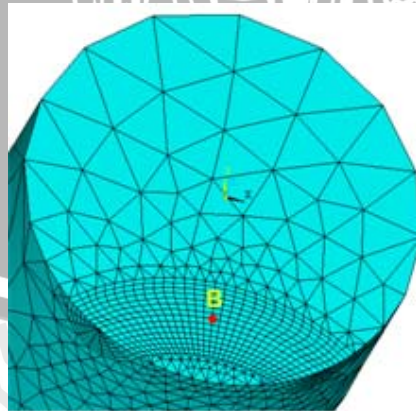
Untuk mengetahui besar dan kondisi tegangan di ujung retak, maka tegangan pada node harus diamati dalam bentuk *element solution*. Gambar 4.3 menunjukkan besar dan kondisi tegangan maksimum yang terjadi pada tiap titik node dengan keterangan dalam bentuk warna pada gambar spesimen. Seperti halnya pada Gambar 4.2, tegangan maksimum terbesar lebih banyak terbentuk di *load step* 10 sebatas garis ujung retak. Pada *load step* 2, konsentrasi tegangan lebih banyak terjadi di daerah ujung retak, yang di dominasi warna hijau. Sedangkan pada *load step* 10, sudah berkembang hingga di luar daerah ujung retak.

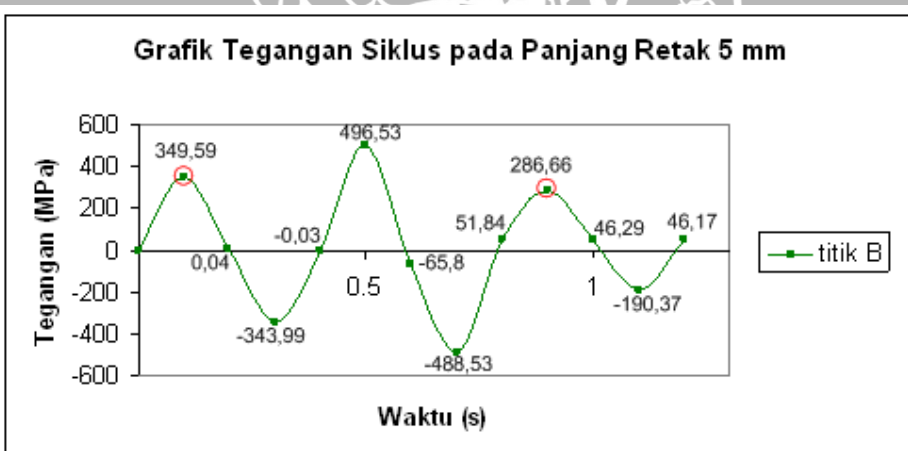
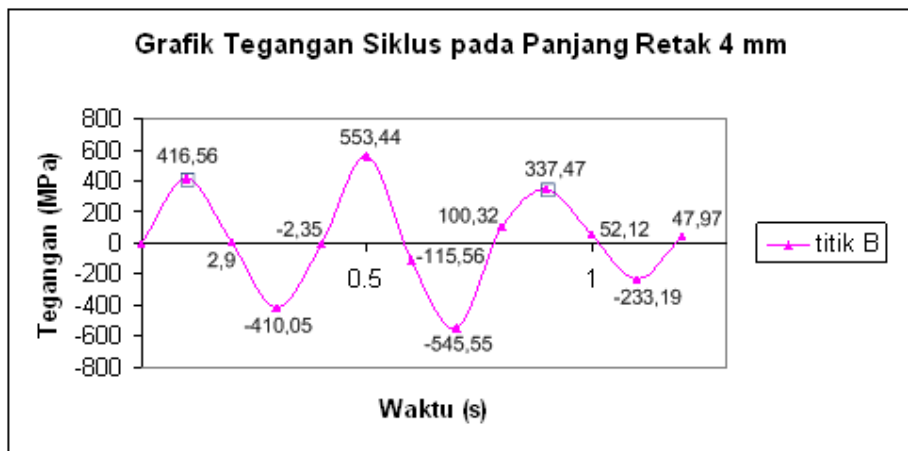
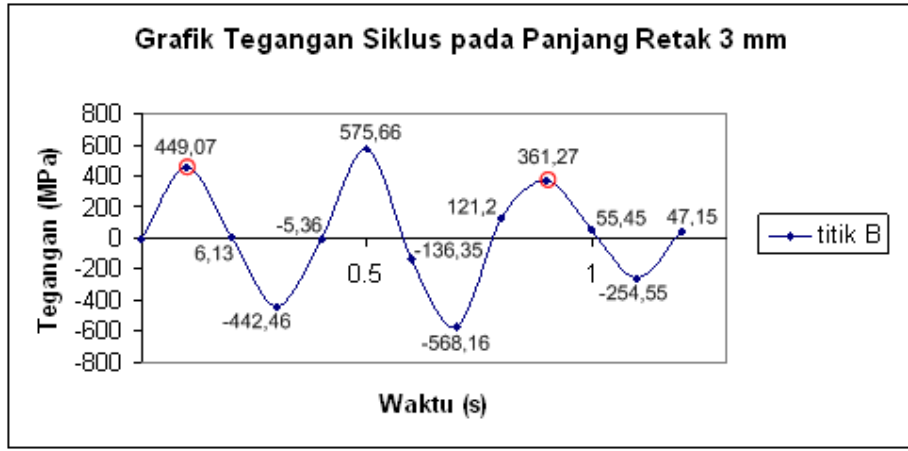




Gambar 4.3 *Element solution* pada *load step* 2 dan 10 untuk panjang retak 3 mm

Penjelasan di atas tidak langsung menyimpulkan bahwa perubahan tegangan maksimum yang terjadi dalam bentuk peningkatan. Hal ini ditandai dengan nilai tegangan maksimum setelah *overload* yang justru cenderung menurun atau lebih kecil daripada tegangan maksimum sebelumnya (*load step* 2). Pada Gambar 4.4 di bawah ini menunjukkan perbedaan dalam bentuk nilai yang lebih kecil pada tiap variasi panjang retak yang lebih besar di titik B.

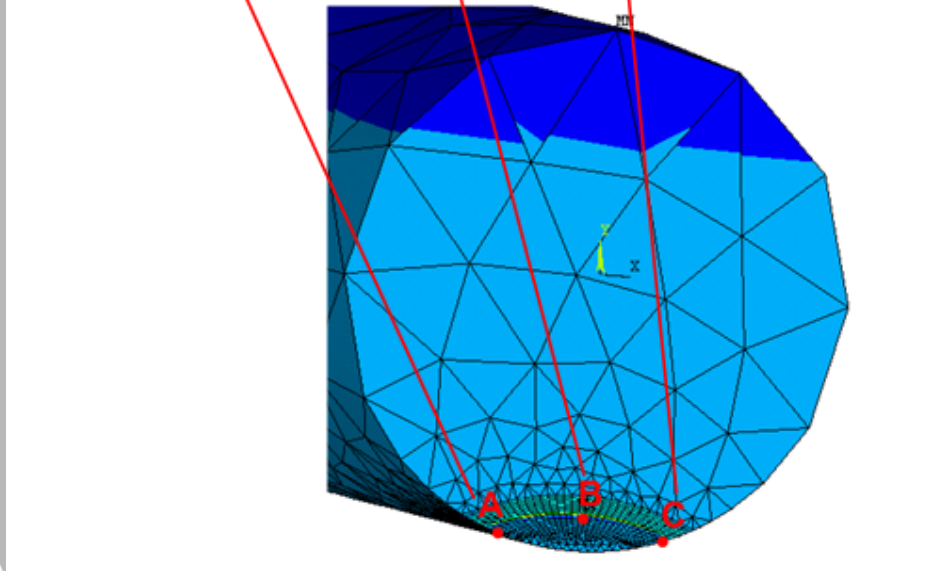
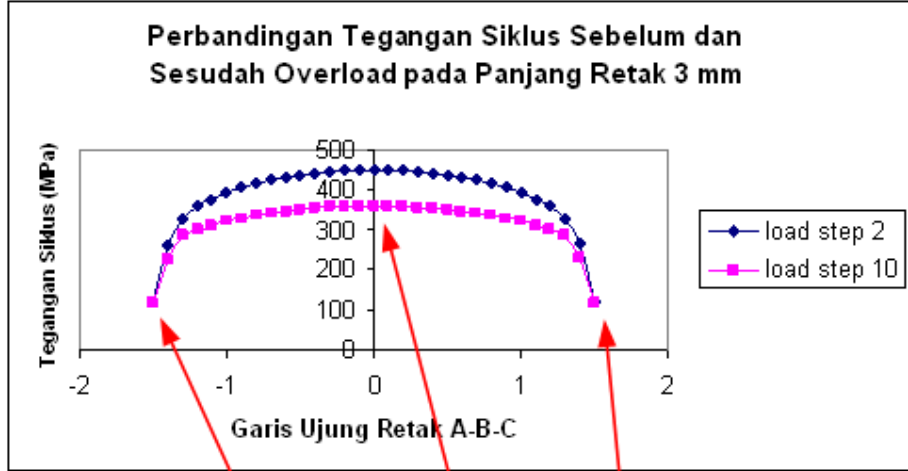


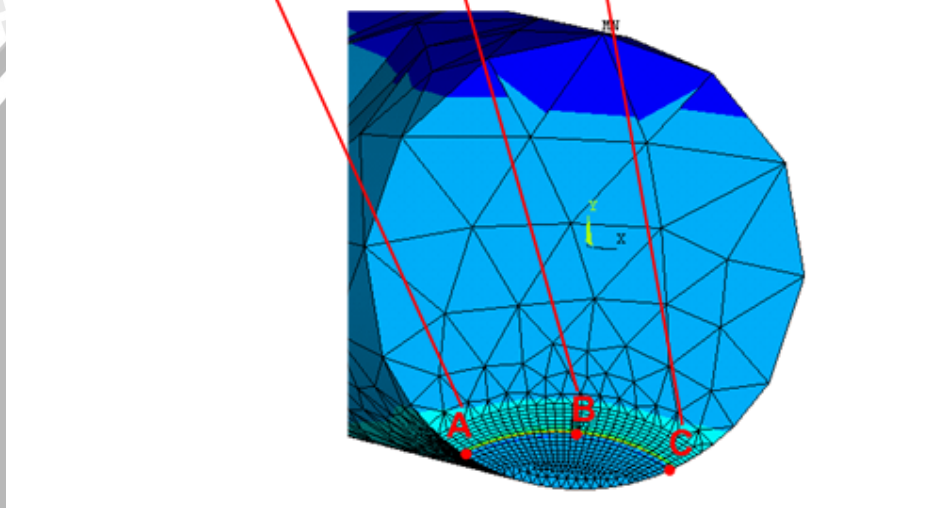
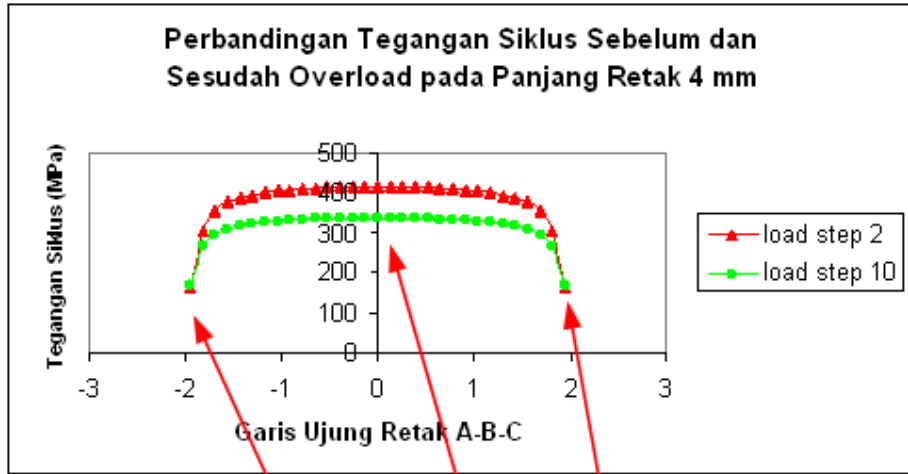


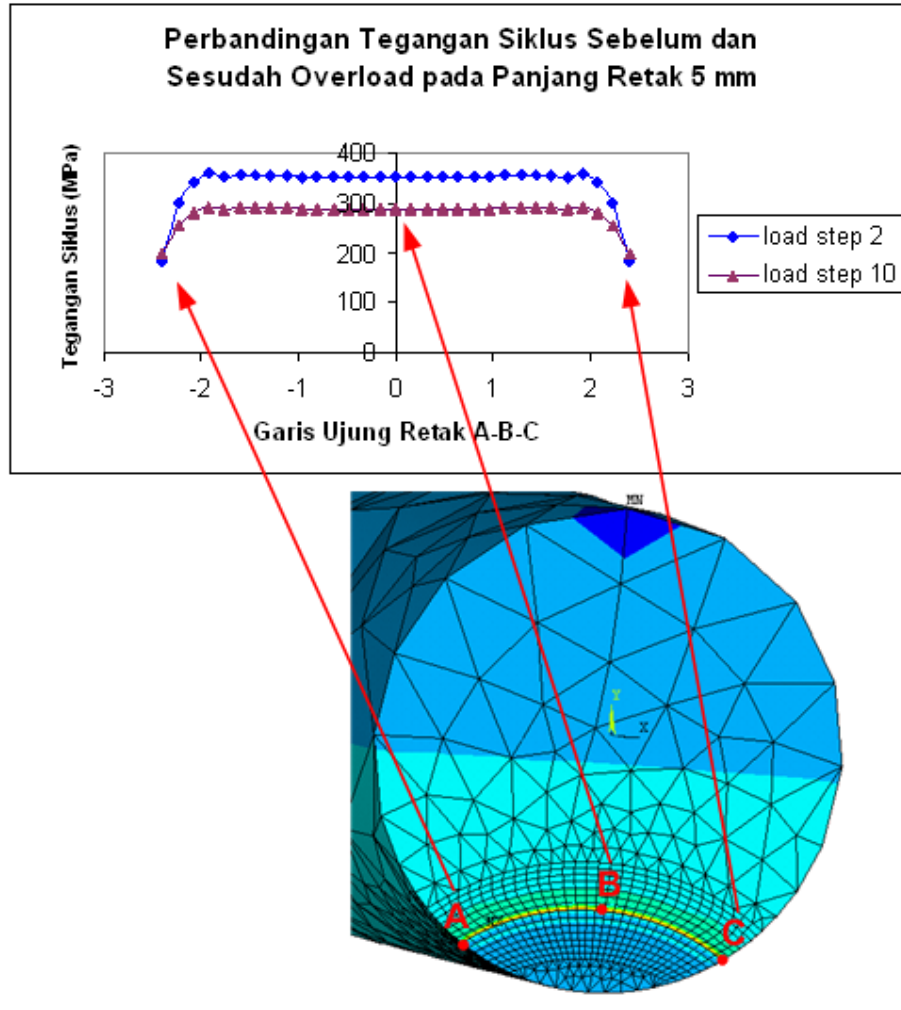
Gambar 4.4 Kurva tegangan siklus pada panjang retak 3, 4, dan 5 mm

Titik B dipilih karena memiliki konsentrasi tegangan terbesar di garis ujung retak. Hal ini dapat terjadi akibat posisi titik B yang tepat berada di bawah titik beban *bending*. Pada Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa tegangan maksimum sebelum dan sesudah *overload* berbeda, yang mana setelah *overload* (*load step* 10) relatif lebih kecil dari sebelumnya (*load step* 2). Artinya tegangan yang mempengaruhi pertumbuhan

retak setelah overload secara *effective* dan selanjutnya disebut tegangan *effective* lebih kecil dari tegangan maksimum.



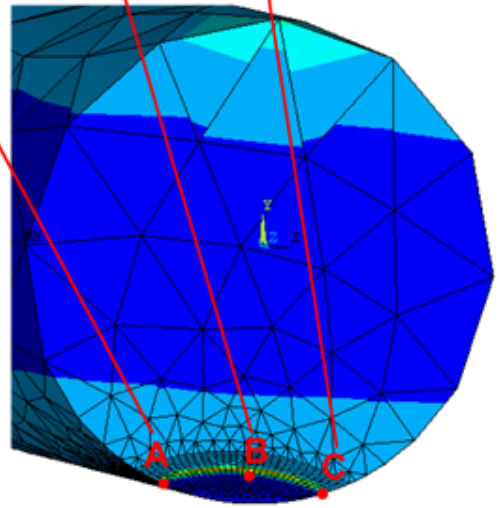
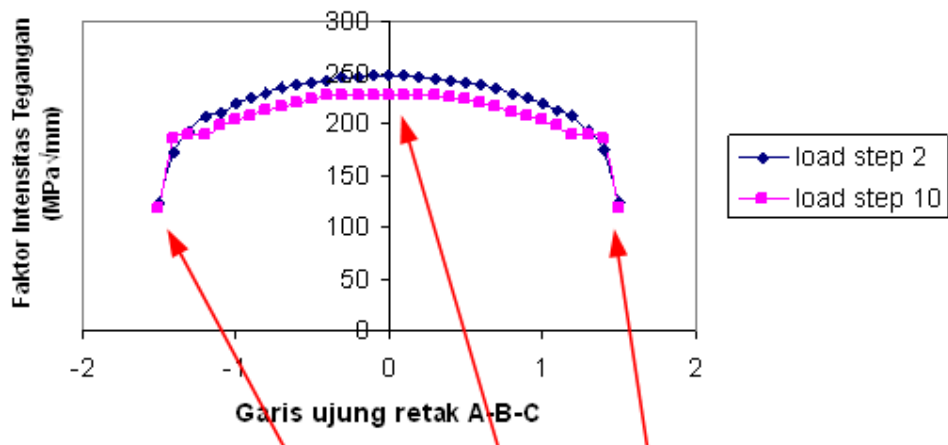




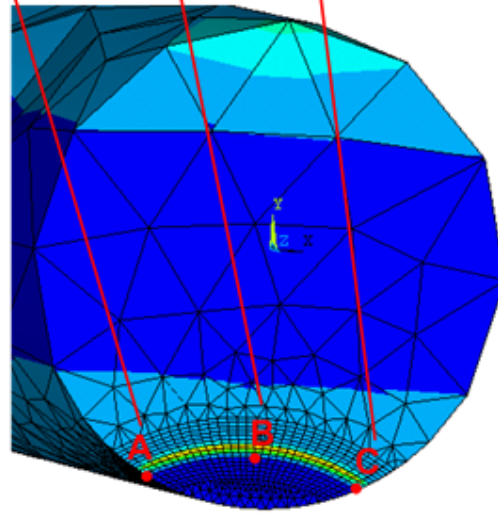
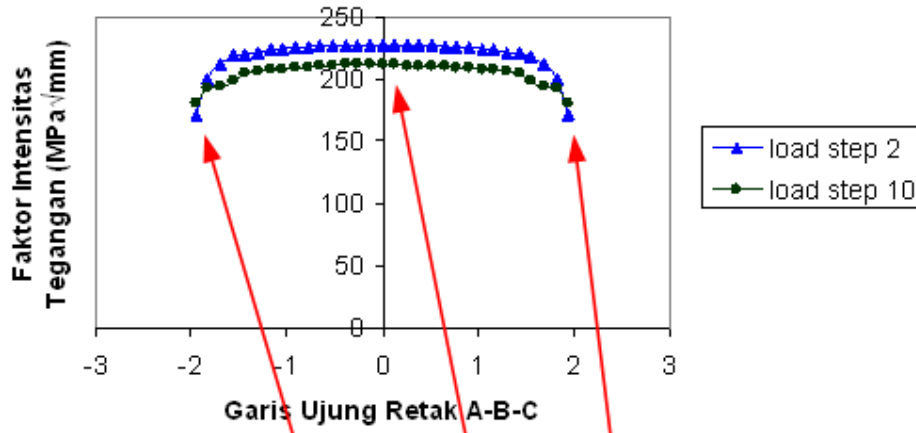
Gambar 4.5 Perbandingan tegangan siklus

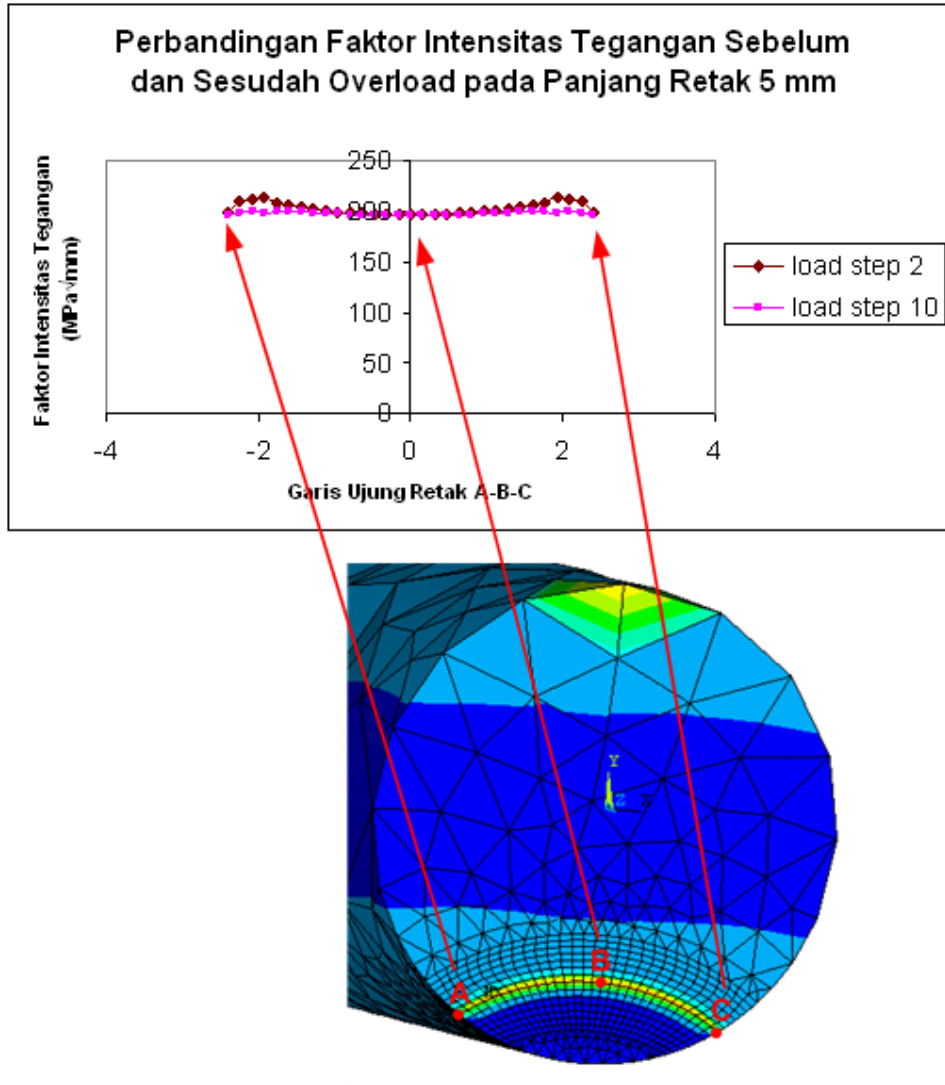
Untuk besar faktor intensitas tegangan efektif yang terjadi akibat *bending overload* pada panjang retak yang berbeda memiliki trend kurva yang sama dengan dengan Gambar 4.5. Gambar 4.6 menunjukkan, pada panjang retak yang lebih besar, nilai faktor intensitas tegangan sebelum *overload* relatif lebih kecil daripada sesudahnya di titik B. Selain itu pada panjang retak 5 mm, faktor intensitas tegangan sebelum dan sesudah *overload* berimpit pada titik B. Artinya pembebanan siklus konstan sebelum dan sesudah *overload* relatif sama pada konsentrasi tegangan terbesar.

Perbandingan Faktor Intensitas Tegangan Sebelum dan Sesudah Overload pada Panjang Retak 3 mm



Perbandingan Faktor Intensitas Tegangan Sebelum dan Sesudah Overload pada Panjang Retak 4 mm

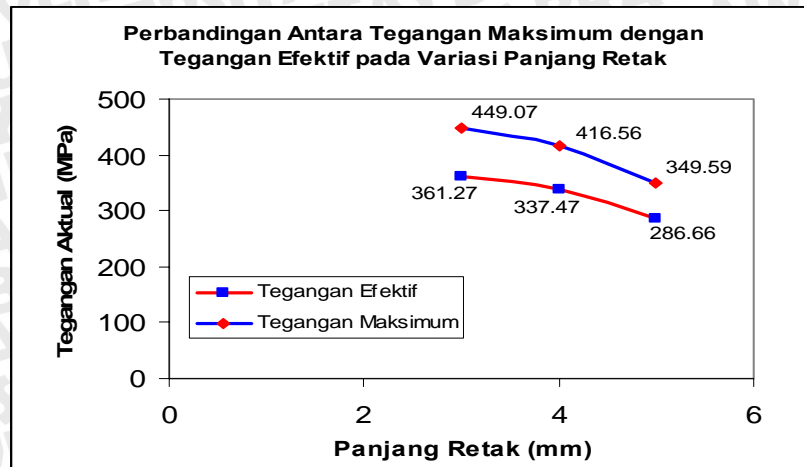




Gambar 4.6 Perbandingan faktor intensitas tegangan sebelum dan sesudah *overload*

4.1.2 Hubungan antara tegangan dengan panjang retak

Deskripsi diatas menunjukkan bahwa selain terjadi penurunan tegangan siklus maksimum setelah *overload* pada tiap panjang retaknya, juga terjadi penurunan dari perubahan tegangan siklus maksimum yang terjadi.

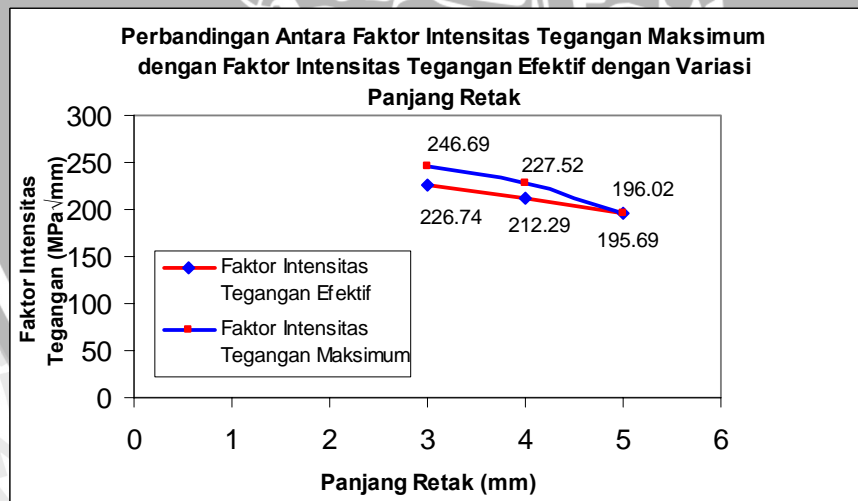


Gambar 4.7 Hubungan antara tegangan dengan panjang retak

Tegangan siklus maksimum yang terjadi setelah *overload* merupakan tegangan efektif yang terjadi akibat pengaruh tegangan sisa. Pada grafik diatas, menjelaskan bahwa pada panjang retak yang lebih besar, tegangan efektif yang terjadi lebih kecil pada siklus pembebanan yang sama (*constant-overload-constant*).

4.1.3 Hubungan Antara Faktor Intensitas Tegangan dengan Panjang Retak

Perubahan tegangan siklus maksimum juga berpengaruh terhadap nilai K_{eff} yang terjadi di tiap panjang retaknya.

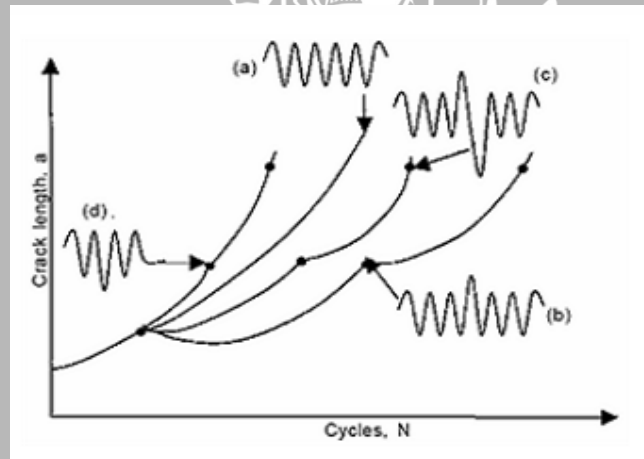


Gambar 4.8 Hubungan antara faktor intensitas tegangan dengan panjang retak

Pada siklus pembebanan yang sama, besar faktor intensitas tegangan efektif yang terjadi lebih kecil daripada faktor intensitas tegangan maksimum sebelum *overload*. Tetapi besarnya makin berimpit pada panjang retak yang lebih besar.

4.2 Pembahasan

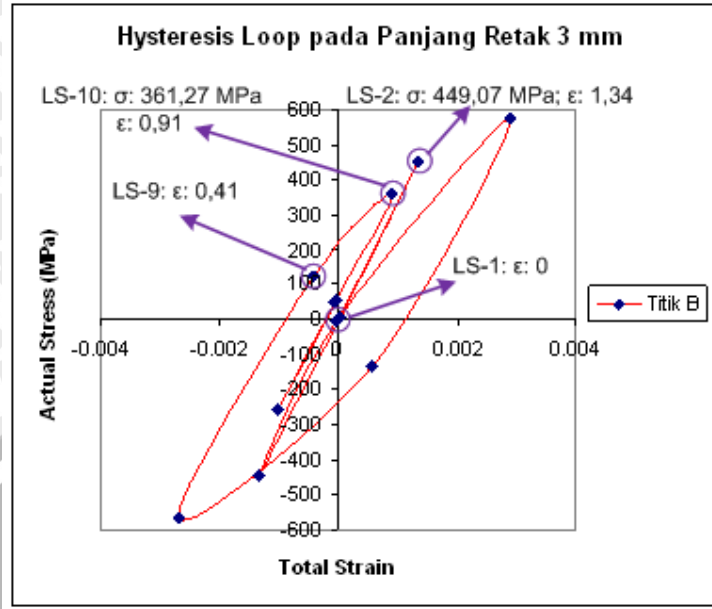
Pengamatan difokuskan pada kontur tegangan di *load step* 7 – 10 pada panjang retak 3 mm sebagai contoh. Arti fisik dari kontur tegangan aktual yang terjadi adalah, *tensile overload* menghasilkan daerah tegangan sisa tekan yang lebih besar di sekitar ujung retak jika dibandingkan dengan sebelum *overload*. Hal ini memperlambat rambat retak, dengan menjaga ujung retak tertutup selama beban siklus berlanjut pada nilai yang lebih kecil. Ketika *compressive underload* terjadi, laju rambat retak yang mengikuti *underload* menjadi lebih besar daripada saat beban konstan. Percepatan rambat retak terjadi dalam waktu singkat, menyisakan tegangan aktual tarik saat beban kembali dihilangkan. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian S. M. Beden yang menyatakan kondisi interaksi beban pada VAL yang berbeda pada jenis siklus yang digunakan dan CAL. Selain itu S.M. Beden juga menyatakan bahwa jika *compressive underload* mengikuti *tensile overload*, maka perlambatan retak yang terjadi akan berkurang tapi tidak sampai ditiadakan.



Gambar 4.9 Efek transien pada rambat retak akibat (a) CAL; (b) single overload; (c) tensile compression overload sequence; (d) single underload

Sumber: S.M. Beden; S. Abdullah; A.K. Ariffin. *Review of Fatigue Crack Propagation Models for Metallic Components*. 2009

Perbedaan tegangan aktual pada titik maksimum konstan sebelum dan sesudah *overload* terjadi, dikarenakan pada *load step* 10 sudah terjadi penurunan regangan ke arah negatif (mengerut) sebesar 0,4 mm, sedangkan pada *load step* 2 ujung retak belum mengalami regangan karena belum ada beban siklus. Sehingga untuk mencapai regangan sebesar 1,3 mm akibat beban maksimum yang sama (100 MPa), ujung retak meregang secara penuh dari titik nol sebesar 0,9 mm. Sehingga tegangan aktual yang terjadi menjadi lebih rendah.



Gambar 4.10 *Hysteresis loop* pada panjang retak 3 mm

Seperti pada hasil data pada Gambar 4.10 nilai faktor intensitas tegangan efektif sebanding dengan nilai tegangan efektif yang terjadi setelah overload. Nilai faktor intensitas tegangan efektif yang lebih rendah daripada faktor intensitas tegangan maksimum sebelum *overload* menunjukkan bahwa laju rambat retak mengalami perlambatan (*retardation*) dan nilainya lebih besar pada panjang retak yang lebih besar pula. Kondisi ini tidak berlangsung lama, karena nilai faktor intensitas tegangan efektif cenderung mendekati faktor intensitas tegangan maksimum. Hal ini menjelaskan bahwa perlambatan rambat retak hanya terjadi dalam kurun waktu tertentu, dan adanya kecenderungan kembali ke tegangan semula ketika beban kembali ke kondisi konstan.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Faktor intensitas tegangan efektif memiliki nilai yang berbeda dengan faktor intensitas tegangan maksimum konstan setelah diberi beban *bending overload*. Tegangan sisa tekan akibat *overload* menurunkan nilai tegangan efektif yang *equivalent* dengan faktor intensitas tegangan efektif, hal ini menimbulkan perlambatan pada laju rambat retak. Perlambatan maupun percepatan rambat retak dapat meningkat atau berkurang tergantung dari jenis dan susunan siklus *overload* dan *underload* yang terjadi, baik *tensile* maupun *compressive*. Untuk kasus silinder pejal, nilai faktor intensitas tegangan efektif makin mendekati faktor intensitas tegangan maksimum konstan pada panjang retak yang lebih besar, hal ini menunjukkan bahwa perlambatan retak terjadi dalam waktu singkat dan adanya kecenderungan kembali ke tegangan semula setelah beban dikembalikan konstan.

5.2 Saran

Berdasarkan analisa yang telah dilaksanakan, terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan untuk pengembangan pada tahap selanjutnya, antara lain:

- a. Analisa lebih lanjut, sejauh mana *range* regangan akan mengecil pada panjang retak yang lebih besar untuk melihat kemungkinan adanya peningkatan tegangan efektif dan menambah jumlah siklus pembebanan.
- b. Studi komparasi dengan eksperimen untuk melihat besar K_{eff} dan mengamati perkembangan rambat retak hingga mencapai *fatigue life* silinder pejal

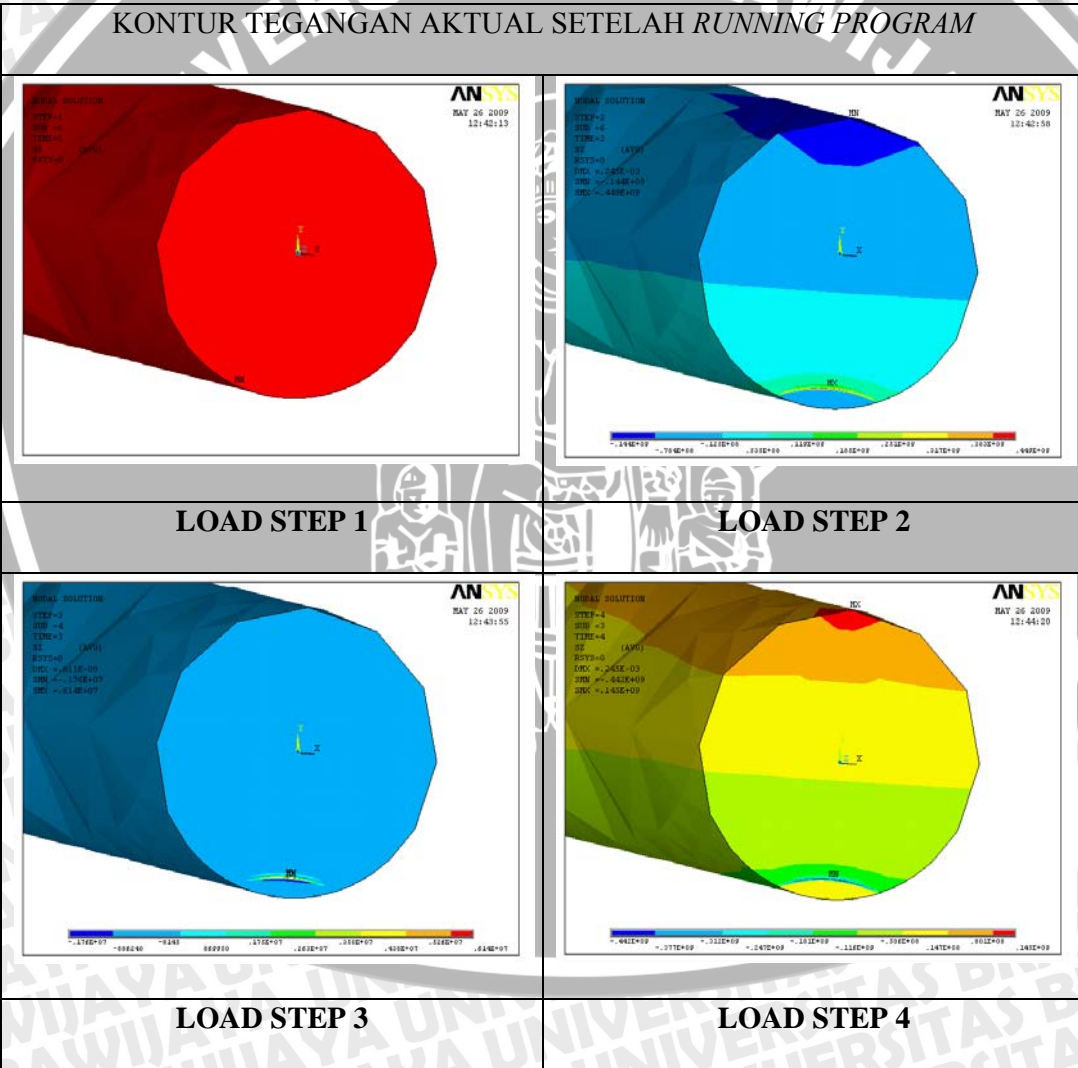
DAFTAR PUSTAKA

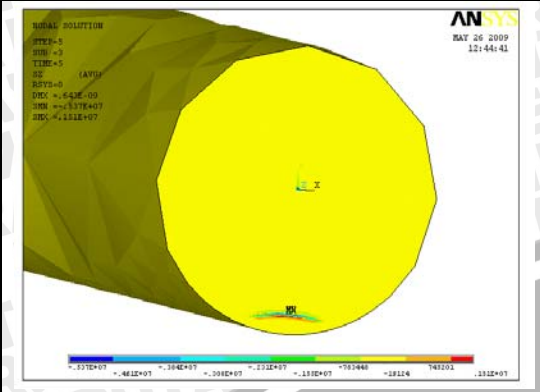
- ANSYS Release 11.0 Documentation
- ASM Handbook, Volume 19, *Fatigue and Fracture*. 1996
- Bannantine, J. A. 1990. *Fundamental of metal Fatigue Analysis*. New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs.
- Beden S.M., Abdullah S., Ariffin A.K. 2009. Review of Fatigue Crack Propagation Models for Metallic Components. European Lournals Publishing, Inc.
- Broek, David. 1982. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Boston: Martinus Nijhoff Publishers.
- Budynas, R. G. 1999. *Advanced Strength and applied Stress Analysis*, second edition. Singapore: Mc. Graw Hill.
- Dieter, G. E. 1988. *Mechanical Metallurgy*. Japan: McGraw-Hill Book Company.
- Du Quesnay, D. L. 2001, *Mechanical Behaviour of Advanced Material*. Canada: Mechanical and Material Engineering, Queen's University. <http://me.queensu.ca/course/mech412>
- Himami H. P., M. Robith. 2008. *Pengaruh Stress Ratio dan Tegangan Maksimum Beban Siklus Terhadap Kondisi Residual Stress di Daerah Ujung Retak pada Model Center Crack Specimen 3-Dimensi*, Skripsi Tidak Diterbitkan. Malang: Jurusan Teknik Mesin, Universitas Brawijaya.
- Makabe, C., Purnowidodo, A. and McEvily, A. J. *Effects of Surface Deformation and Crack Closure on Fatigue Crack Propagation after Overloading and Underloading*, Volume 26. 2004.
- Newman, J. C., I. S. Raju. 1986. Stress-Intensity Factor Equations for Crack in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads. New York: Elsevier Science Publishers.
- Physique and Industry-Research under contract, *Residual Stress Theory*, 2004
- Purnowidodo, Anindito. *The Relation of Residual Stress State and Transient Crack Growth in The Vicinity of Crack Tip after Overloading on Solid Cilinder*. 2008.
- PurnowidodoA,MakabeC.*The crack growth behavior after overloading on rotating bending fatigue*. EngFailAnal(2009), doi:10.1016/j.engfailanal.2009.03.015

Lampiran 1 Hasil data pada panjang retak 3 mm

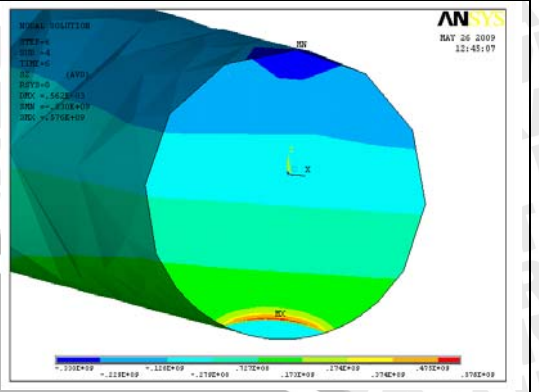


KONTUR TEGANGAN AKTUAL SETELAH RUNNING PROGRAM

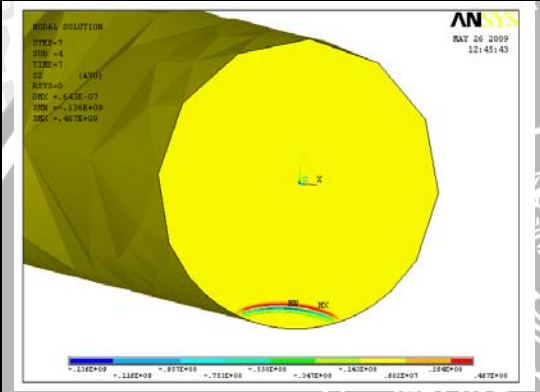




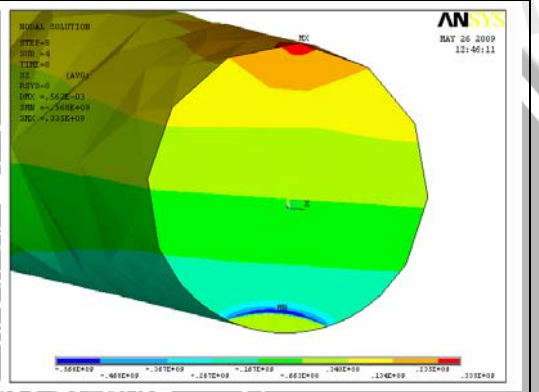
LOAD STEP 5



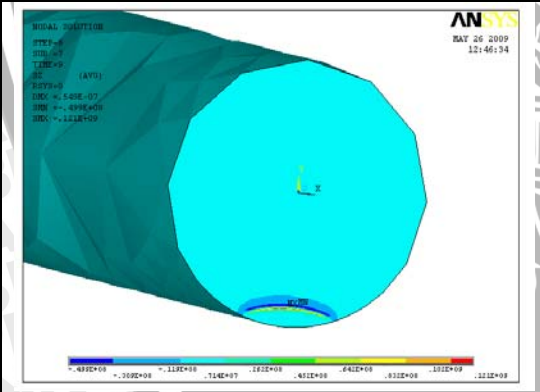
LOAD STEP 6



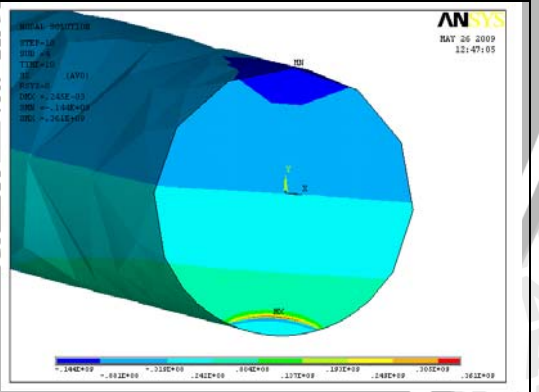
LOAD STEP 7



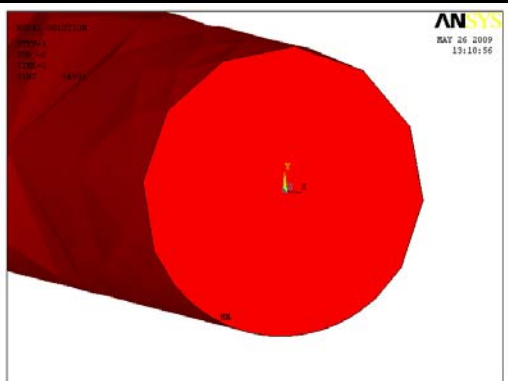
LOAD STEP 8



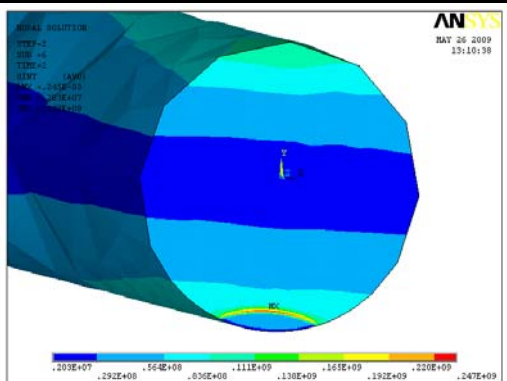
LOAD STEP 9



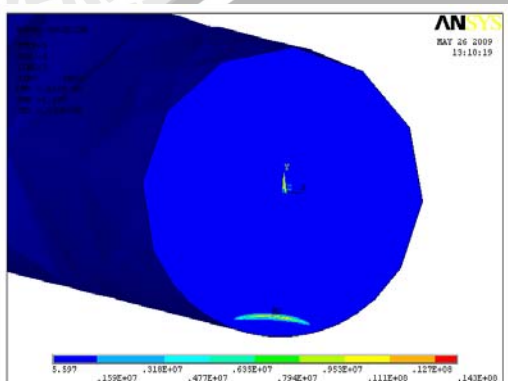
LOAD STEP 10



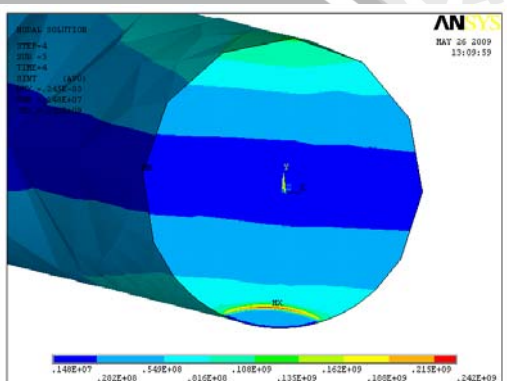
LOAD STEP 1



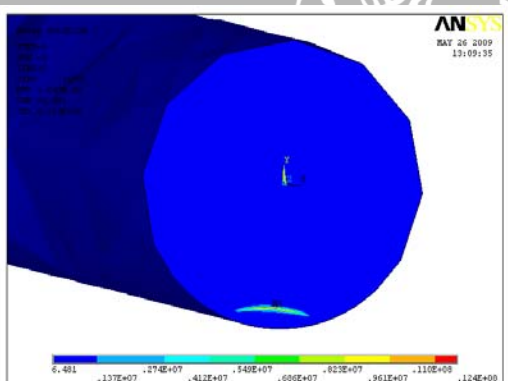
LOAD STEP 2



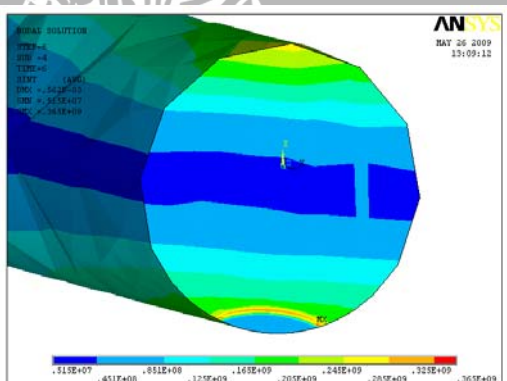
LOAD STEP 3



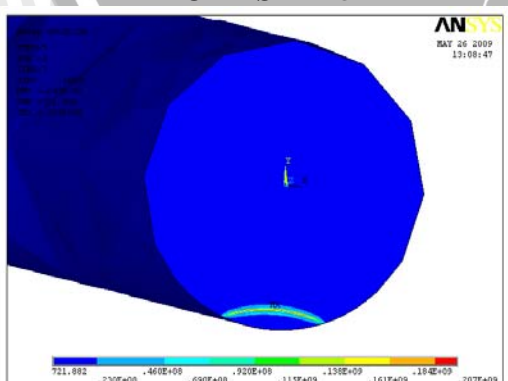
LOAD STEP 4



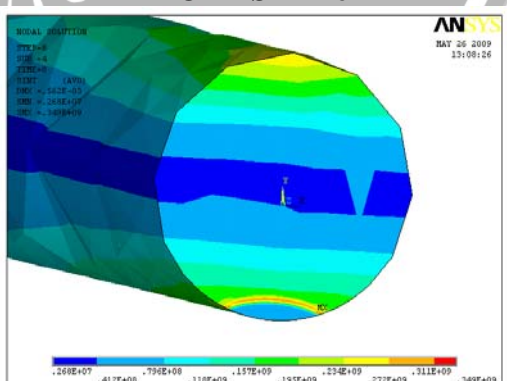
LOAD STEP 5



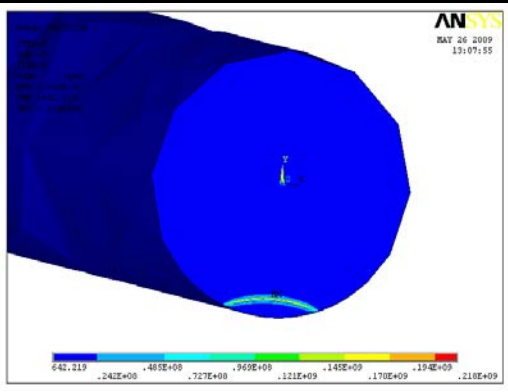
LOAD STEP 6



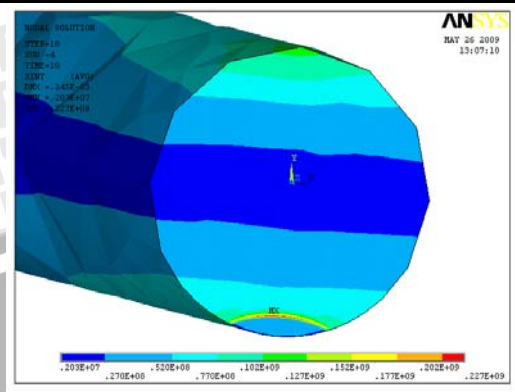
LOAD STEP 7



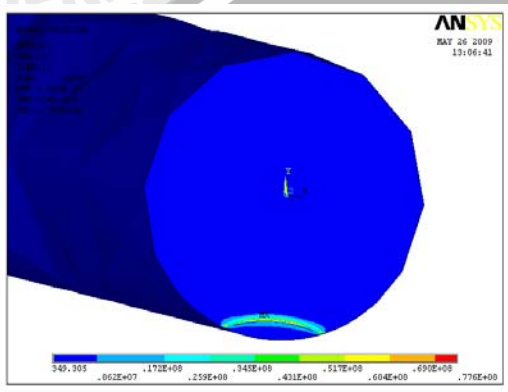
LOAD STEP 8



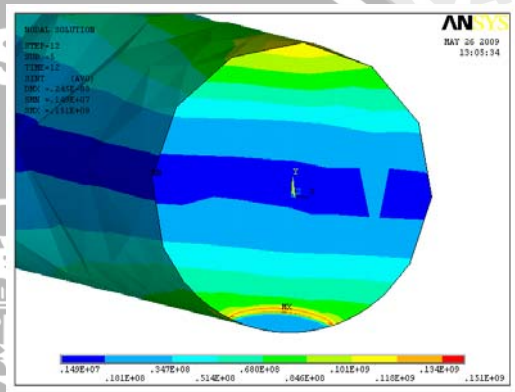
LOAD STEP 9



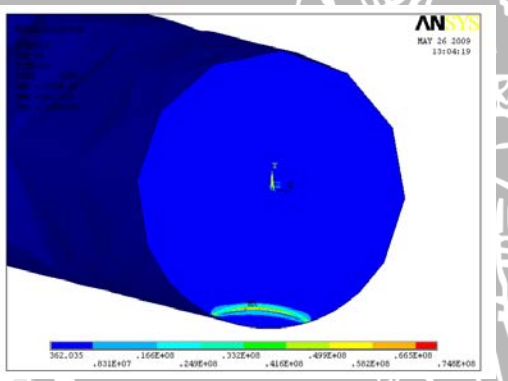
LOAD STEP 10



LOAD STEP 11

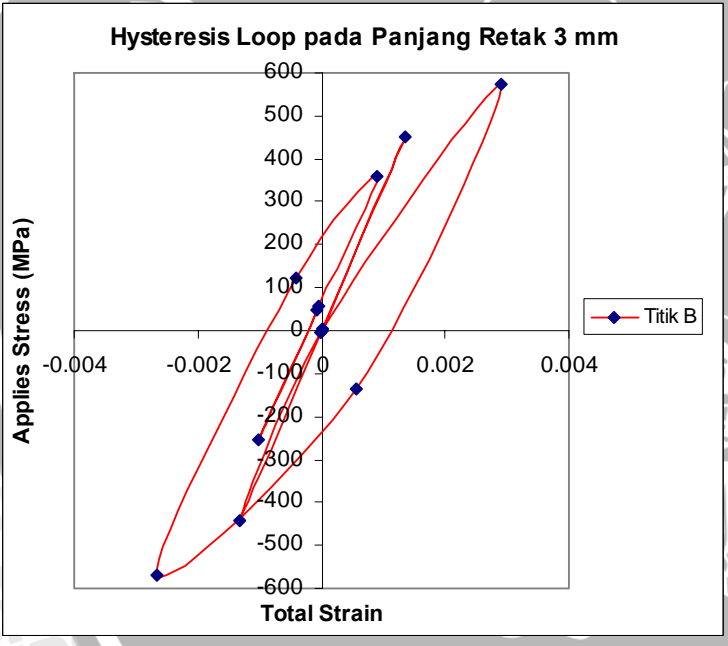
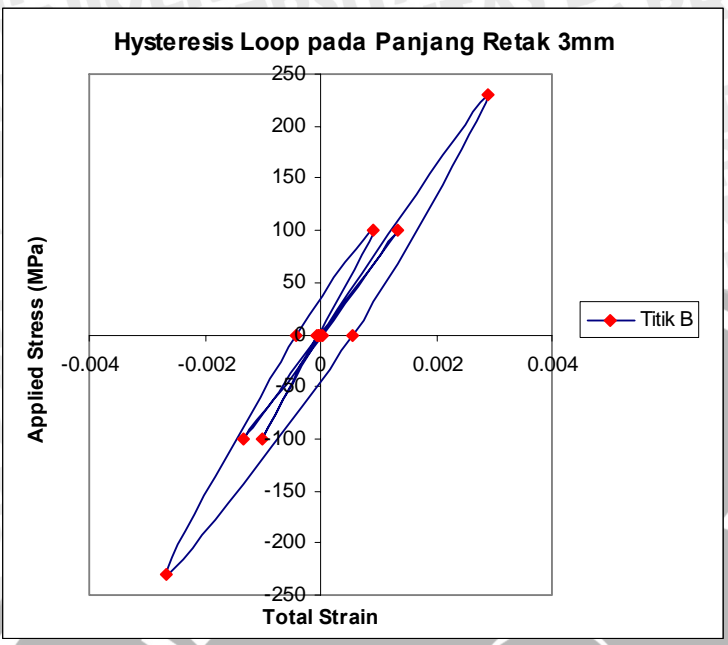


LOAD STEP 12



LOAD STEP 13



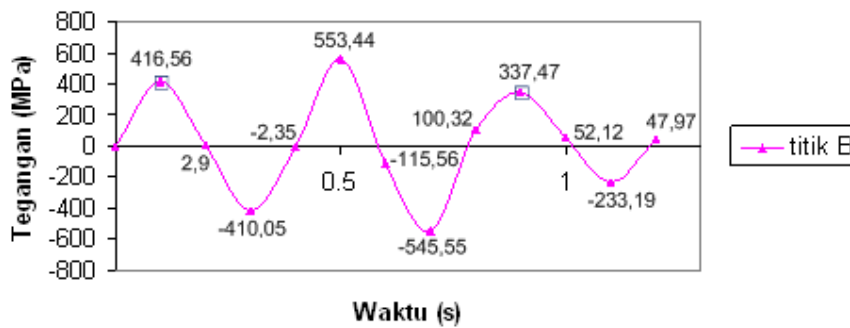


BRAWIJAYA

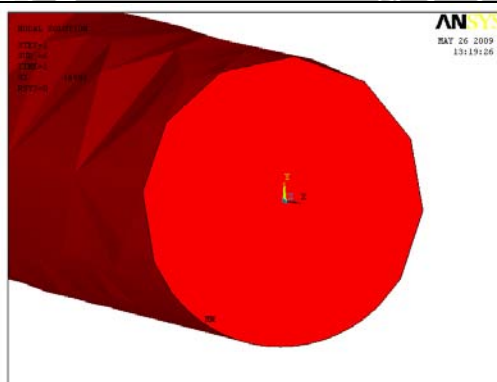


Lampiran 2 Hasil data pada panjang retak 4 mm

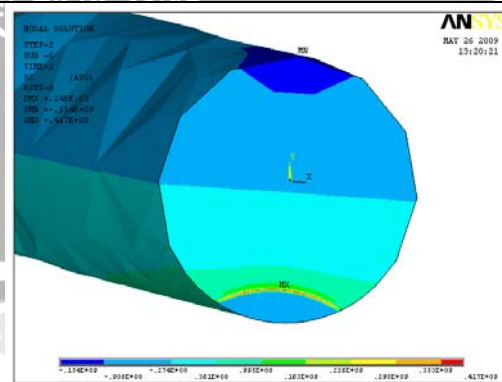
Grafik Tegangan Siklus pada Panjang Retak 4 mm



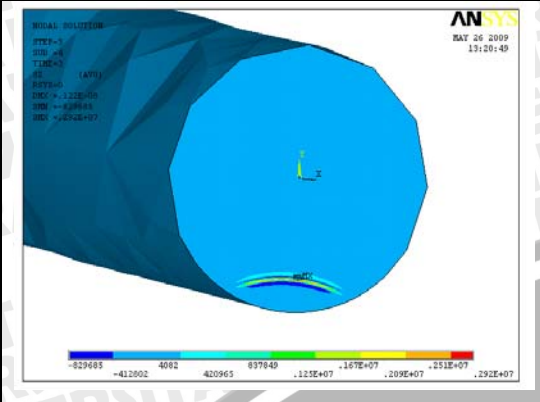
KONTUR TEGANGAN AKTUAL SETELAH *RUNNING PROGRAM*



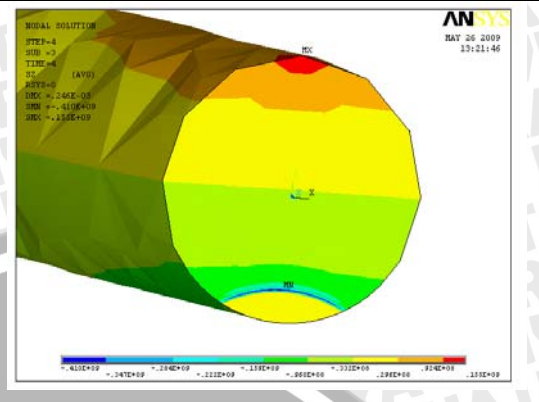
LOAD STEP 1



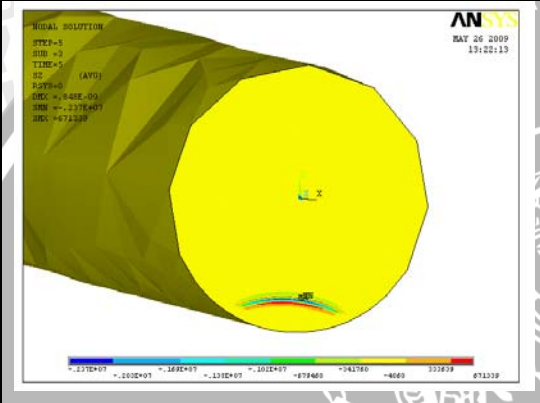
LOAD STEP 2



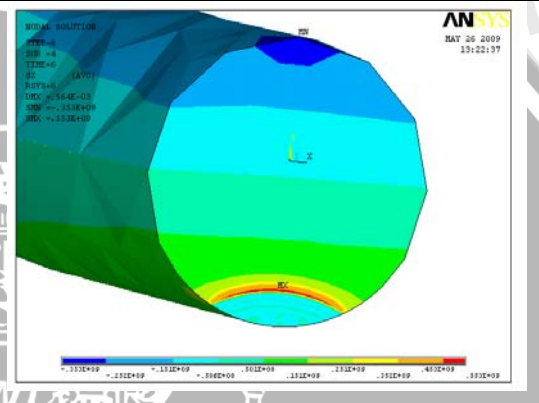
LOAD STEP 3



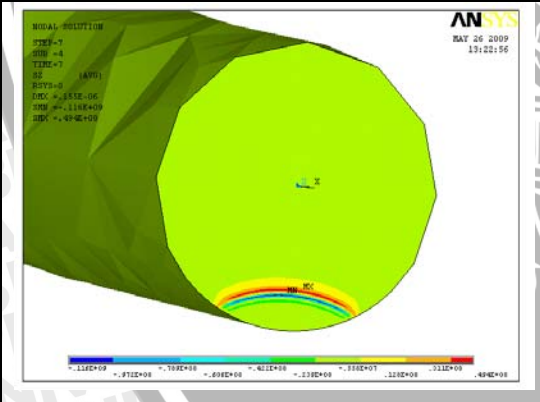
LOAD STEP 4



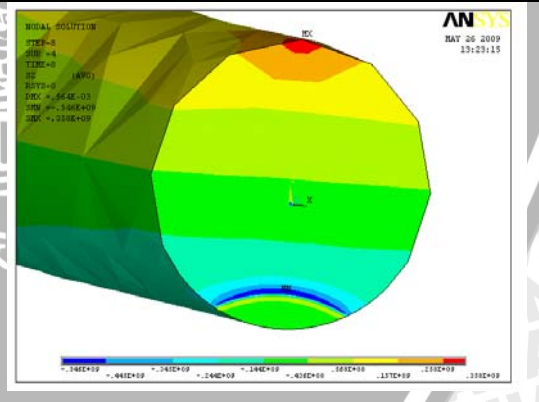
LOAD STEP 5



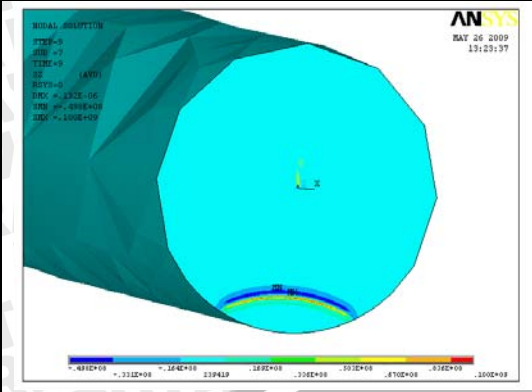
LOAD STEP 6



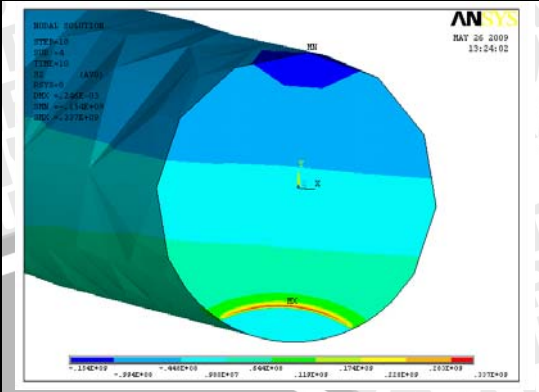
LOAD STEP 7



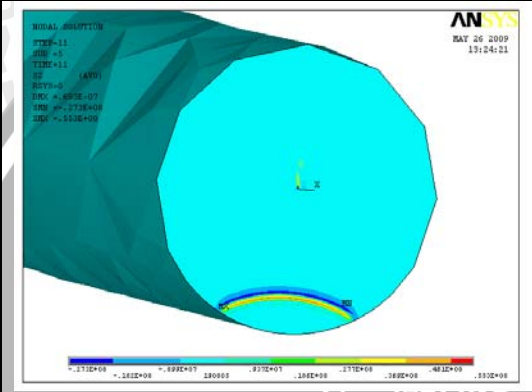
LOAD STEP 8



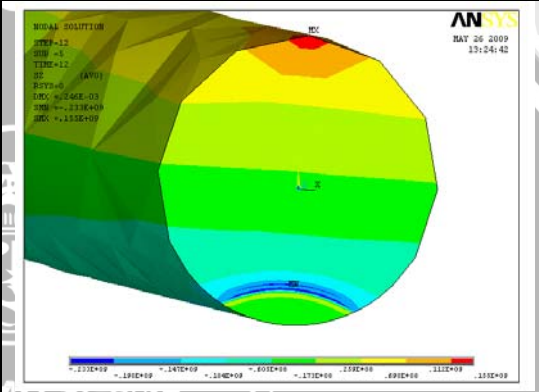
LOAD STEP 9



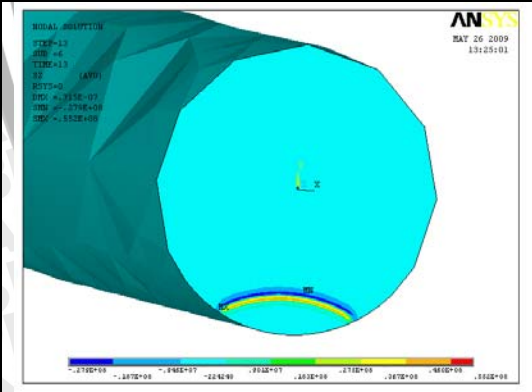
LOAD STEP 10



LOAD STEP 11

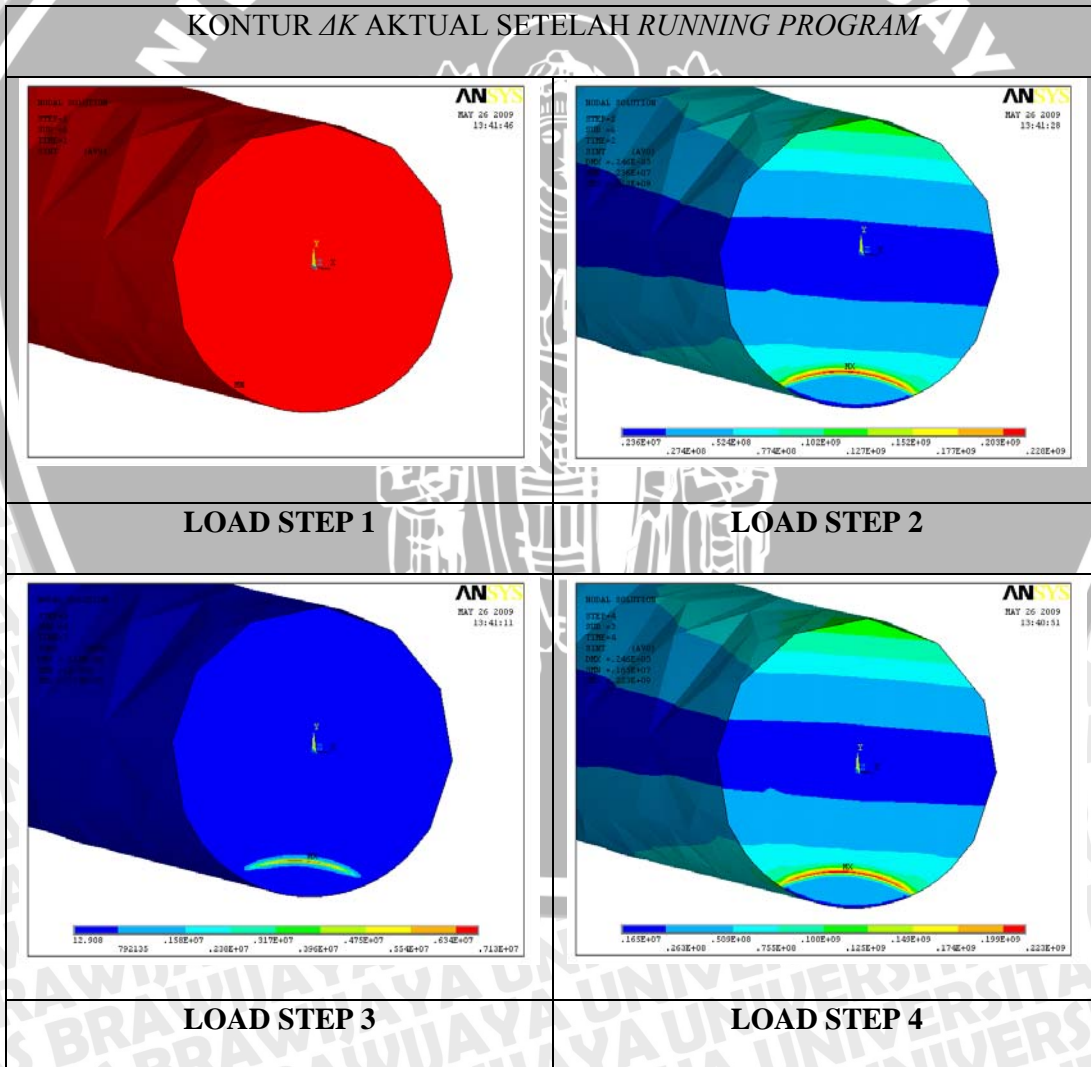
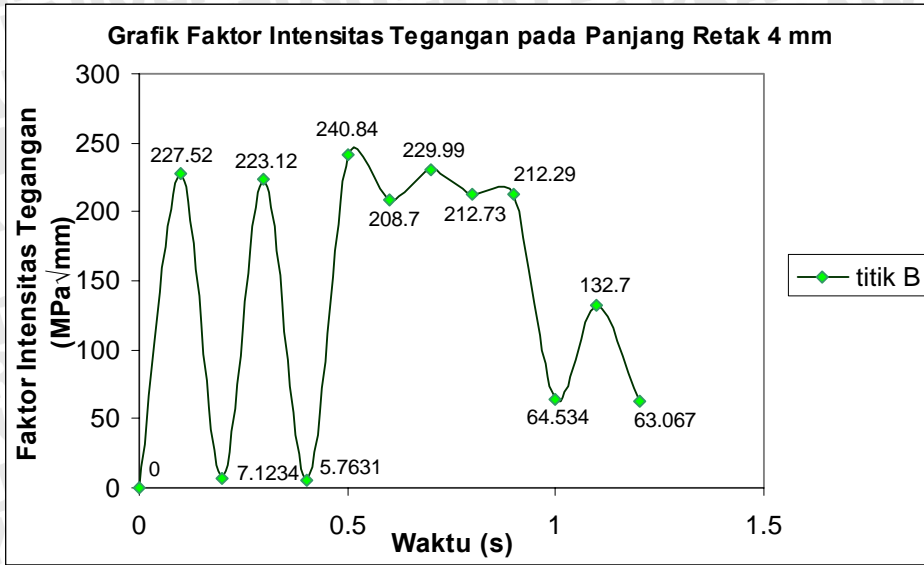


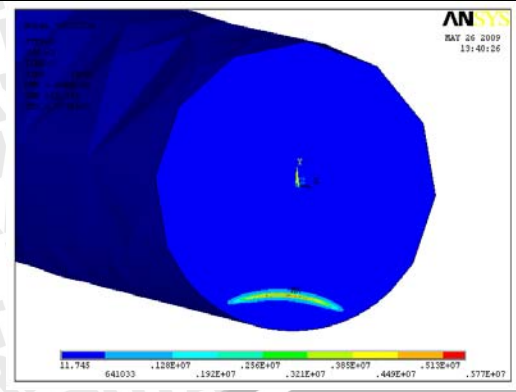
LOAD STEP 12



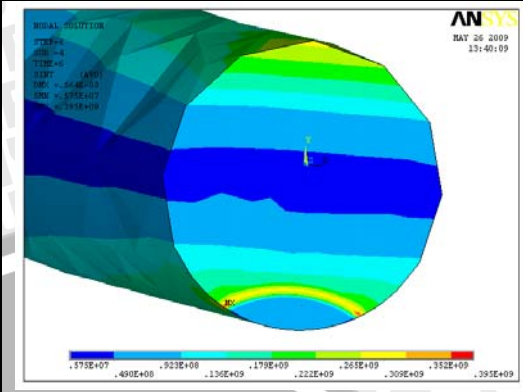
LOAD STEP 13



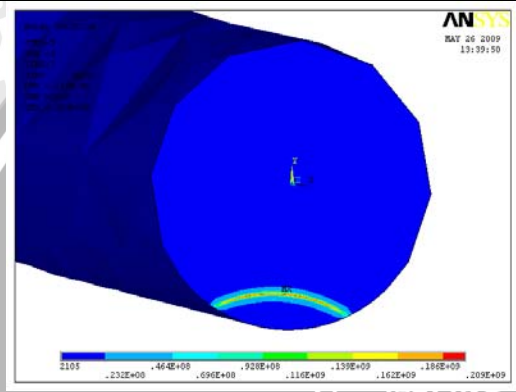




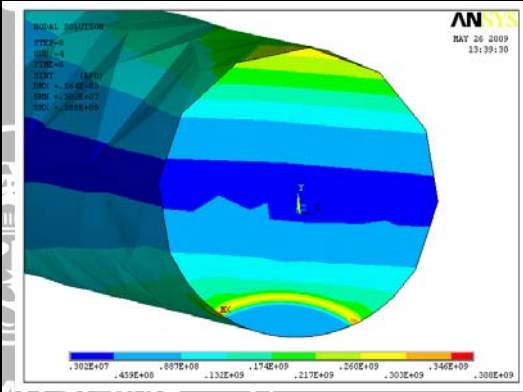
LOAD STEP 5



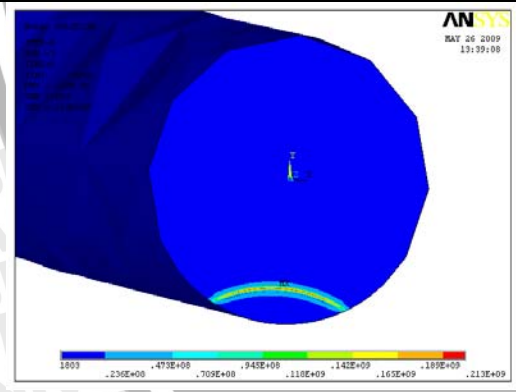
LOAD STEP 6



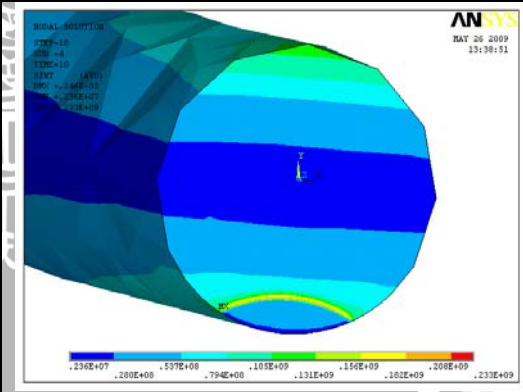
LOAD STEP 7



LOAD STEP 8

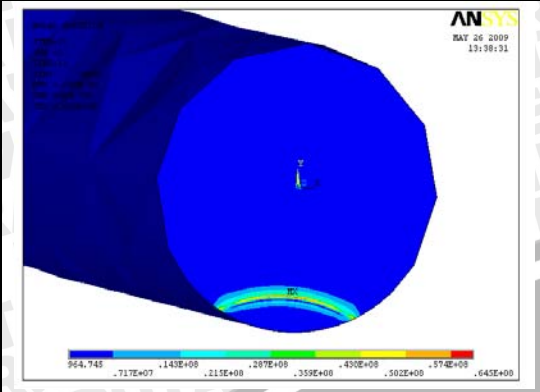


LOAD STEP 9

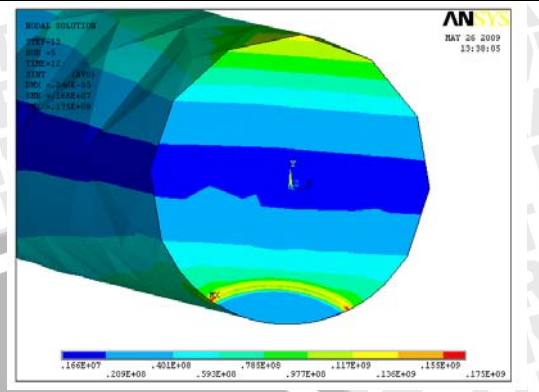


LOAD STEP 10

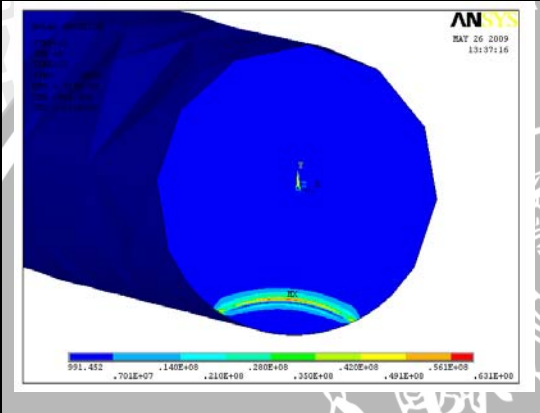




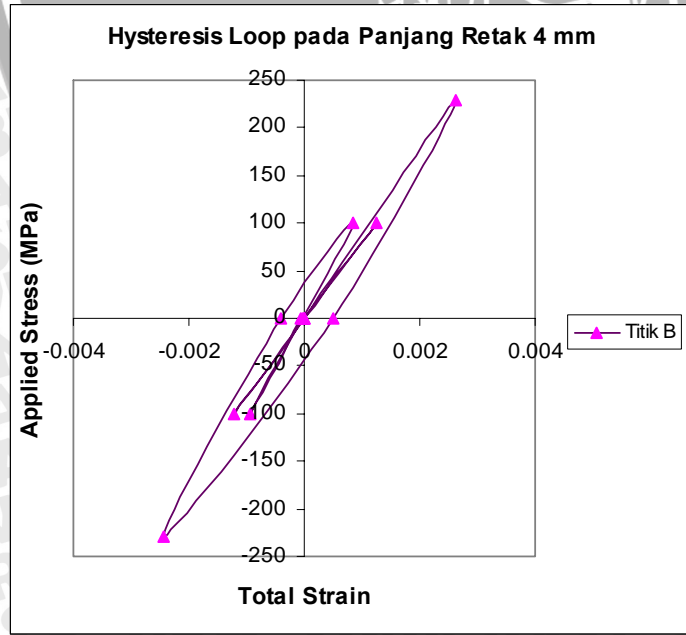
LOAD STEP 11



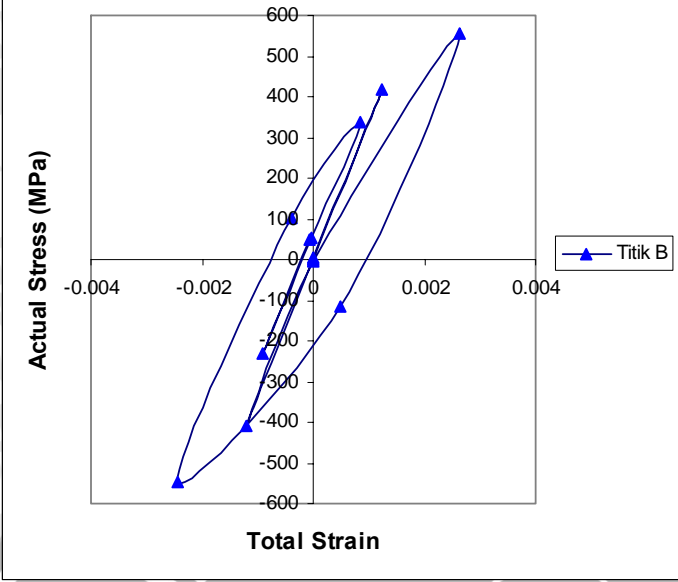
LOAD STEP 12



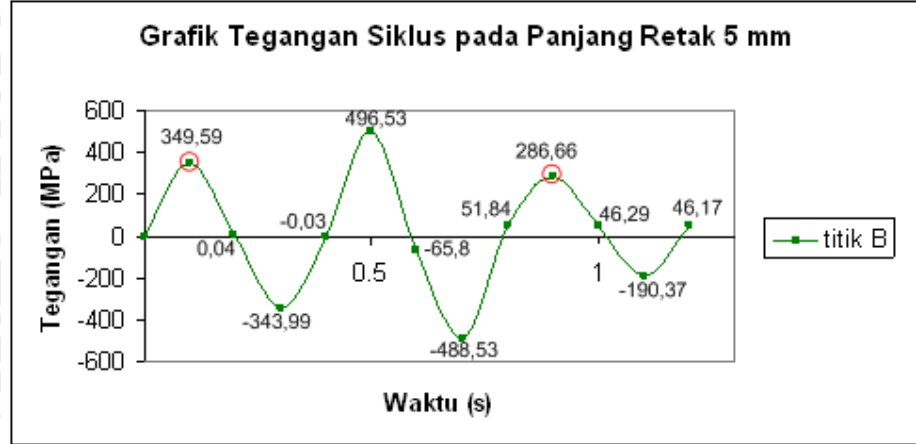
LOAD STEP 13



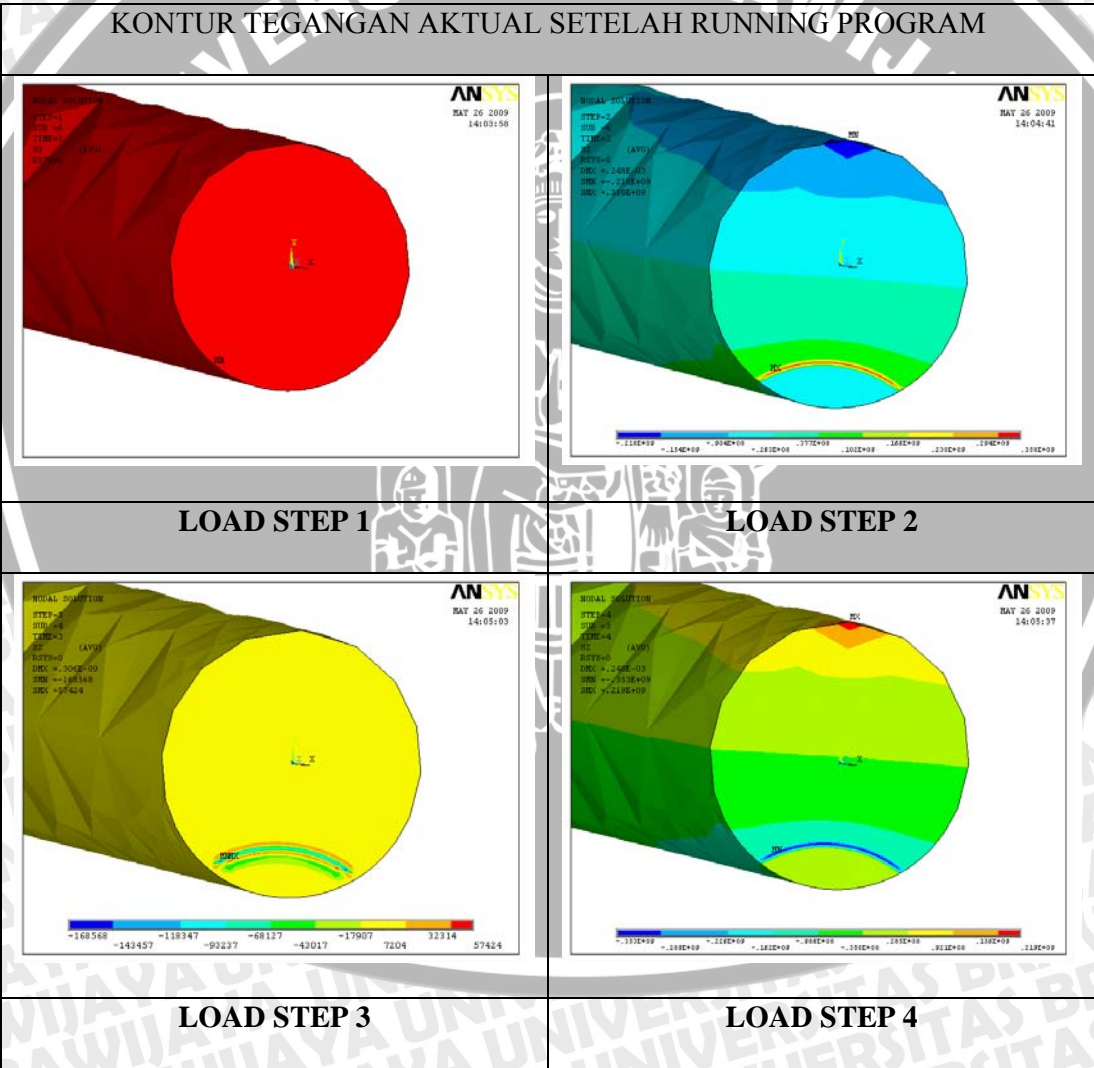
Hysteresis Loop pada Panjang Retak 4 mm

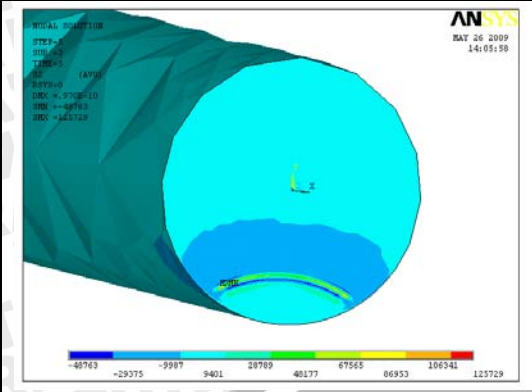


Lampiran 3 Hasil data pada panjang retak 5 mm

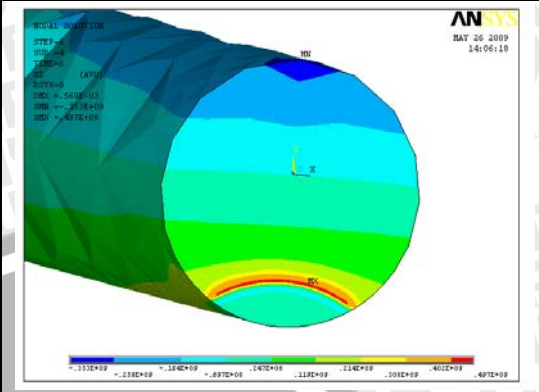


KONTUR TEGANGAN AKTUAL SETELAH RUNNING PROGRAM

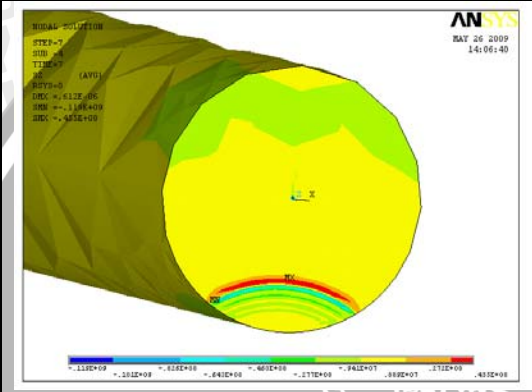




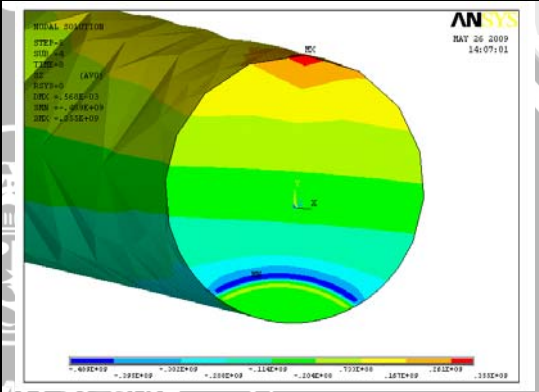
LOAD STEP 5



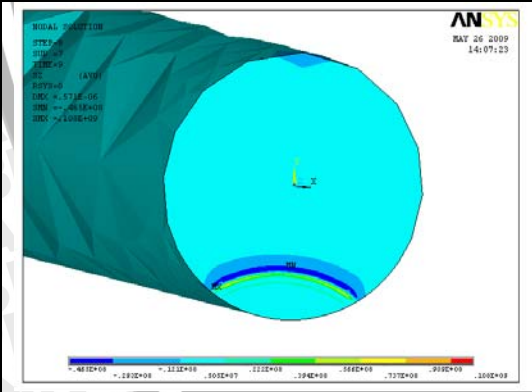
LOAD STEP 6



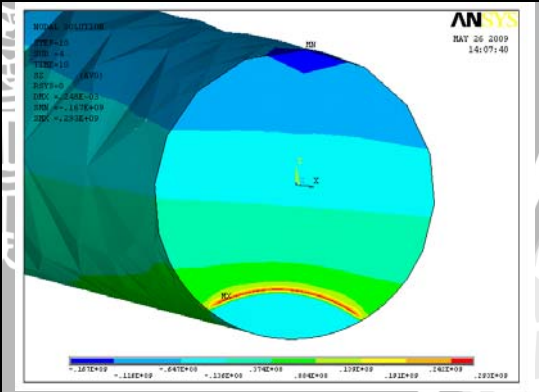
LOAD STEP 7



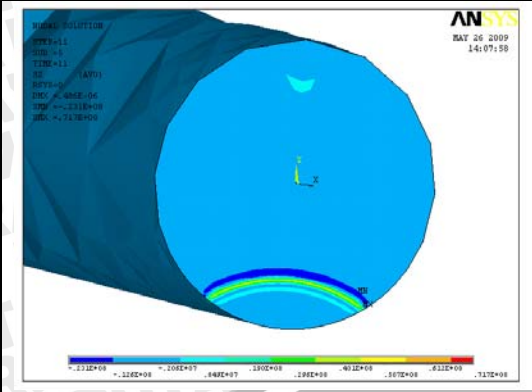
LOAD STEP 8



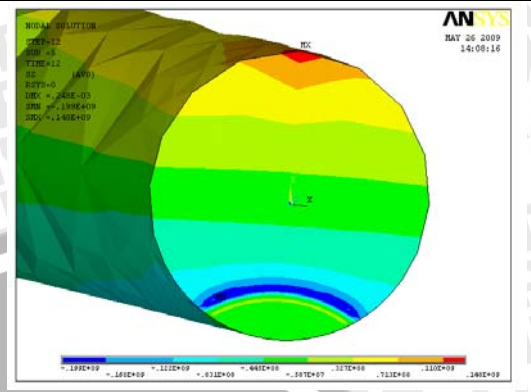
LOAD STEP 9



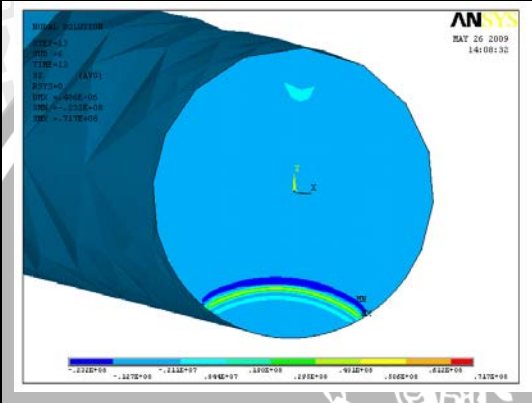
LOAD STEP 10



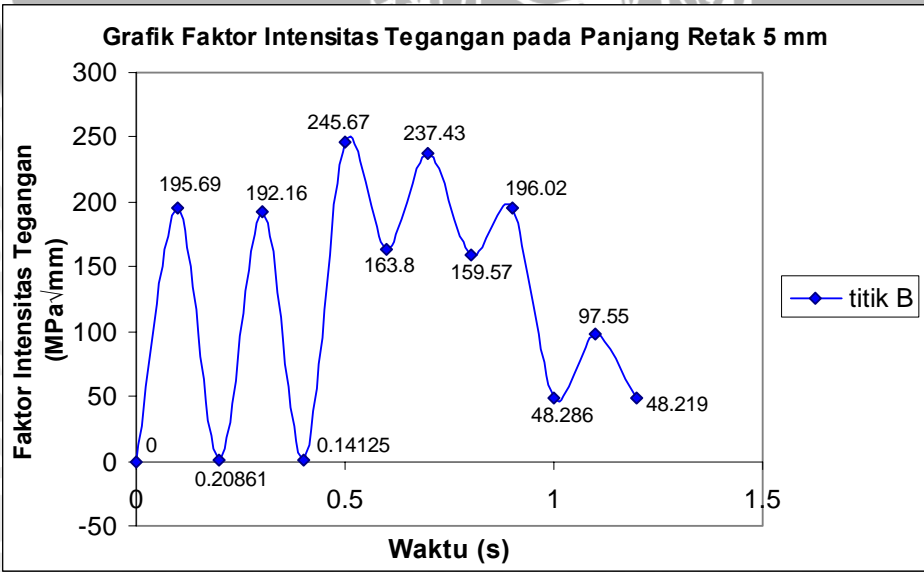
LOAD STEP 11



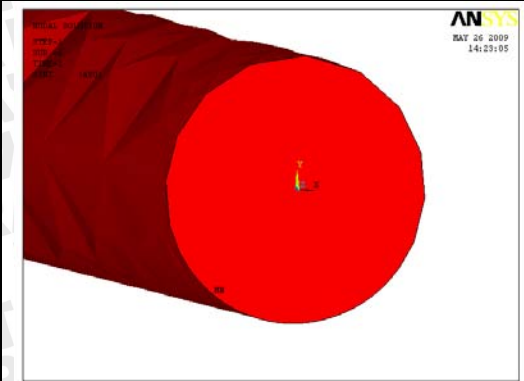
LOAD STEP 12



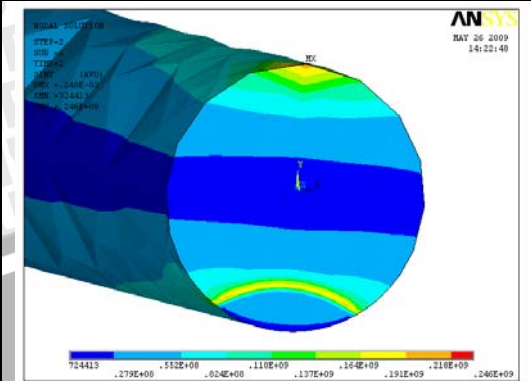
LOAD STEP 13



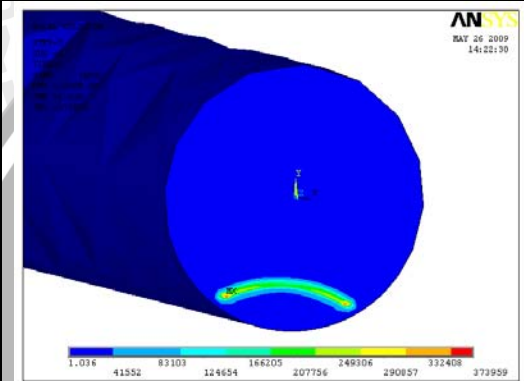
KONTUR ΔK AKTUAL SETELAH RUNNING PROGRAM



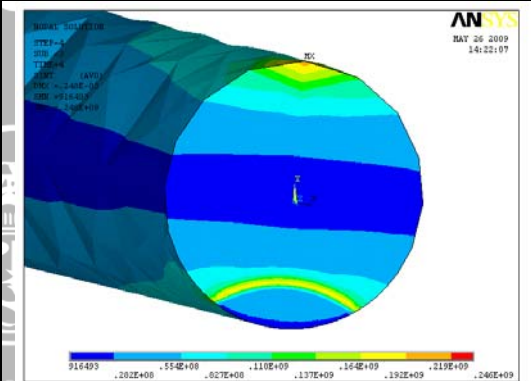
LOAD STEP 1



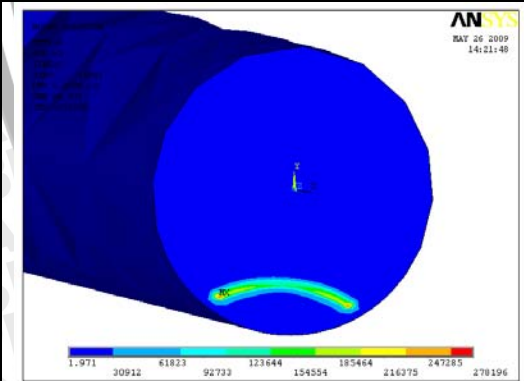
LOAD STEP 2



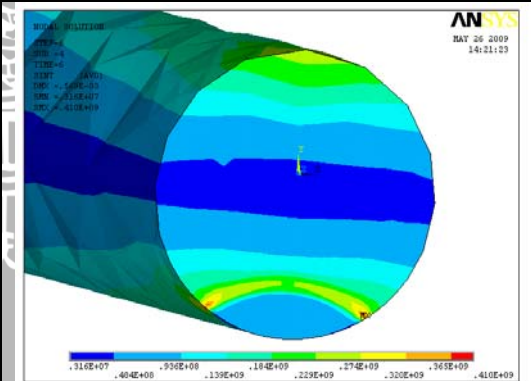
LOAD STEP 3



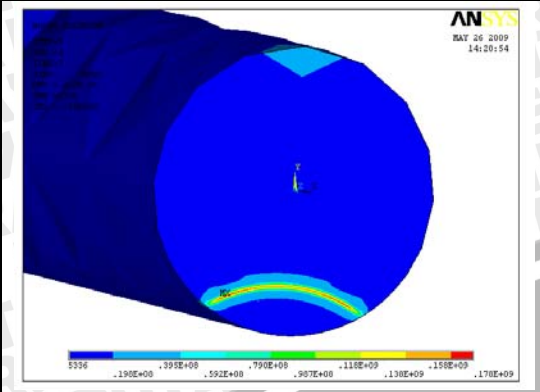
LOAD STEP 4



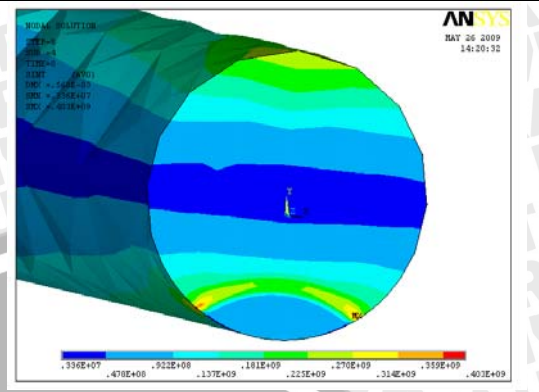
LOAD STEP 5



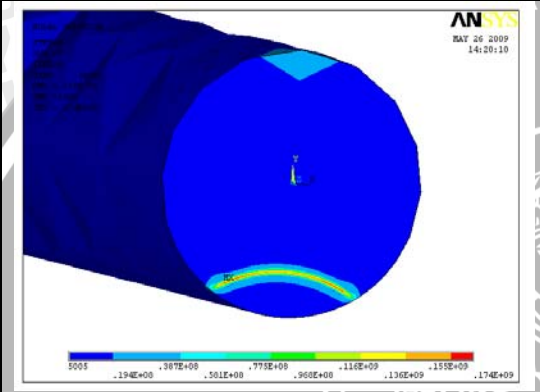
LOAD STEP 6



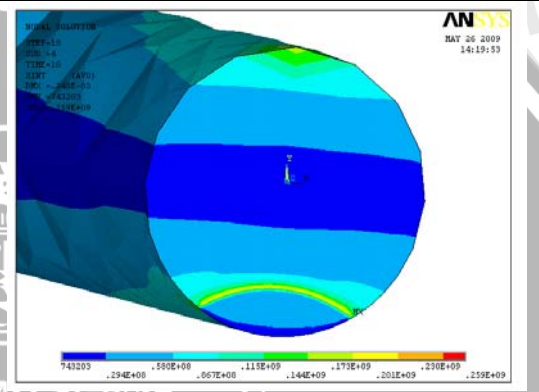
LOAD STEP 7



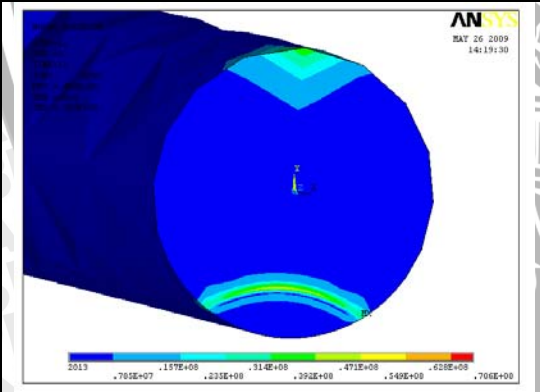
LOAD STEP 8



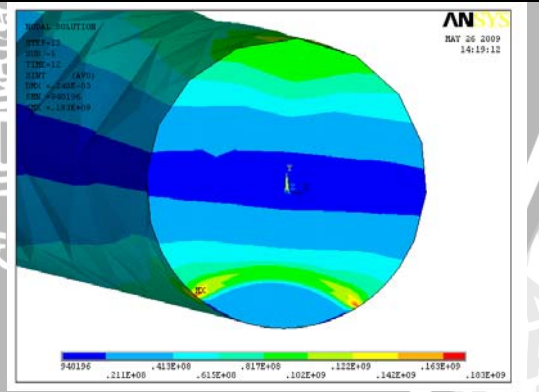
LOAD STEP 9



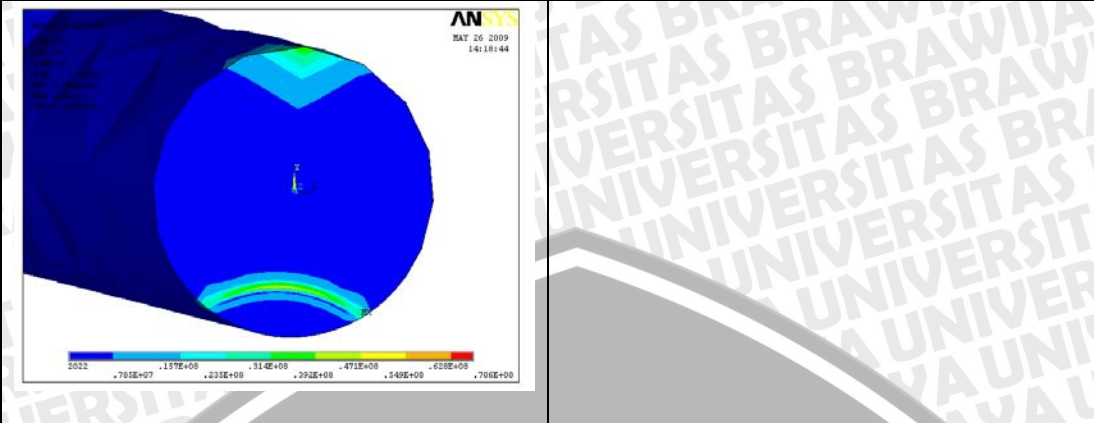
LOAD STEP 10



LOAD STEP 11



LOAD STEP 12



LOAD STEP 13

