

**PERILAKU STRIATION PADA PENAMPANG PATAHAN PELAT
ALUMINIUM DI SEKITAR DAERAH STOP DRILLED HOLE**

**SKRIPSI
KONSENTRASI MATERIAL**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**FANNI ADI MULYA
NIM. 0910623042-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2013**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PERILAKU *STRIATION* PADA PENAMPANG PATAHAN PELAT
ALUMINIUM DI SEKITAR DAERAH *STOP DRILLED HOLE***

SKRIPSI KONSENTRASI MATERIAL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

Fanni Adi Mulya
NIM. 0910623042-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng.
NIP. 19710310 199802 1 001

Khairul Anam, ST.,M.Sc
NIK. 861127 06 3 1 0032

LEMBAR PENGESAHAN

PERILAKU STRIATION PADA PENAMPANG PATAHAN PELAT ALUMINIUM DI SEKITAR DAERAH STOP DRILLED HOLE

**SKRIPSI
KONSENTRASI MATERIAL**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

**FANNI ADI MULYA
NIM. 0910623043-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada Tanggal 03 Desember 2013

Majelis Penguji

Skripsi I

Skripsi II

**Dr.Eng Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng
NIP. 19750710 199903 1 004**

**Ir. Endi Sutikno, MT
NIP. 19580411 198710 1 001**

Skripsi III

**Dr.Eng Widya Wijayanti, ST., MT
NIP. 19750802 199902 2 002**

Mengetahui,
An. PJS Sekretaris Jurusan Teknik Mesin

**Purnami, ST., MT.
NIP. 19770707 200812 1 005**

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil 'alamin adalah satu kata yang sangat pantas terucap dengan penuh keikhlasan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah dan inayah-Nya tanpa bisa kita hitung yang diberikan untuk hamba-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**PERILAKU STRIATION PADA PENAMPANG PATAH PELAT ALUMINIUM DI SEKITAR DAERAH STOP DRILLED HOLE**”. Dan tidak lupa *allohumma sholli wasallim 'alaa sayyidina muhammad* selalu kita hanturkan kepada baginda Rasullulloh SAW satu-satunya pemberi syafa'at di akhirat kelak.

Saya sadari bahwa dalam karya ini jauh dari kata sempurna berkat bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak dalam proses penyelesaian skripsi ini dengan baik, oleh karenanya saya tidak lupa mengucapkan terimakasih kepada semua pihak dan individu yang telah membantu saya dalam menghadapi semua tantangan untuk kelancaran pegerjaan skripsi ini

1. Kedua orang tua saya tercinta Ayah dan Ibu, serta adikku yang tak hentinya mendo'akan dan memberi semangat, motivasi, dukungan moral dan materil serta harapan mereka kepada saya.
2. Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing I yang telah banyak memberi masukan, koreksi, bimbingan, pengetahuan dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
3. Khairul Anam, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan banyak masukan, motivasi, bimbingan, training dan arahan untuk kesempurnaan skripsi ini.
4. Dr., Ir. Wahyono Suprpto, M.Met selaku Ketua Kelompok Dasar Konsentrasi Teknik Material yang selalu mengontrol, mengevaluasi, memotivasi dan mengarahkan saya.
5. Keluarga Besar dari ayah dan ibu saya, terima kasih atas kasih sayang, do'a serta dukungan material dan spiritual yang diberikan selama ini.
6. Dr. Roehan, M.Pd yang membantu memberi masukan serta koreksinya terhadap skripsi saya.
7. Adik-adikku Farlinda Nur Beauty dan Anestesia Nur Laily Noviasari yang selalu mendoakan, selalu memberikan semangat, memotivasi, sekaligus teman yang selalu menghibur saya selama ini.

8. Keluarga Besar Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem, Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST.,MT. selaku Kepala Laboratorium dan rekan – rekan asisten terima kasih atas fasilitas dan dukungannya.
9. Sahabat seperjuangan di konsentrasi material, Reza “wapo” Tri Anggara dan Christopher “Kipo” Pramono, serta saudara saudariku “BLACK MAMBA M’09” sebuah keluarga baru yang selalu selama studi ini penuh suka, sedih, canda, tawa dan semua yang sangat penuh kenangan, serta untuk yang sudah maupun yang sedang berjuang menyelesaikan skripsi tetap semangat, semoga selalu diberi kemudahan dan kelancaran. Kebersamaan ini tidak akan pernah berahir. SALAM SOLIDARITY FOREVER !!!
10. Seseorang yang senantiasa berada dalam palung hatiku.
11. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin, Keluarga Besar Mahasiswa Teknik Universitas Brawijaya dan kawan-kawan Lembaga BEM Teknik “BEM TEN” 2012/2013 dan Sahabat FDH 2012/2013.
12. Semua pihak dan individu yang tidak dapat saya sebutkan satu demi satu yang telah membantu saya demi kelancaran penyelesaian skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, saya telah berusaha sebaik mungkin untuk menyelesaikan skripsi dengan sebaik-baiknya dan berharap isi dari skripsi ini bebas dari kesalahan dan kekurangan, namun apa daya selalu terdapat kekurangan dan saya juga menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karenanya, saya mengharapkan kritik dan saran yang lebih bergairah untuk membangun kemajuan ilmu pengetahuan.

Akhirnya saya berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi saya dan bagi para pembaca umumnya sekaligus dapat menjadi bahan acuan untuk penelitian lebih lanjut. Amiin.

Malang, Desember 2013

Penulis
fanni.adimulya@gmail.com

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	1
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	x
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan masalah	3
1.3 Batasan masalah.....	3
1.4 Tujuan penelitian	4
1.5 Manfaat penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Aluminium	6
2.2.1 Sifat-Sifat	6
2.2.2 Sifat Fisik Aluminium.....	7
2.2.3 Sifat Mekanik Aluminium.....	7
2.2.3.1 Kekuatan Tarik	7
2.2.3.2 Kekerasan.....	8
2.2.3.3 <i>Ductility</i>	8
2.2.3.4 Modulus Elastisitas	8
2.3 Kegagalan Lelah/ <i>Fatigue Fracture</i>	8
2.4 Kelelahan Logam	10
2.5 Pertumbuhan Retak <i>Fatigue</i> (<i>Fatigue Crack Growth</i>)	11
2.6 Beban siklus	13
2.6.1 Komponen beban siklus	13
2.6.2 Pengaruh Rasio Tegangan (<i>Stress Ratio</i>)	15
2.7 Tegangan sisa.....	16



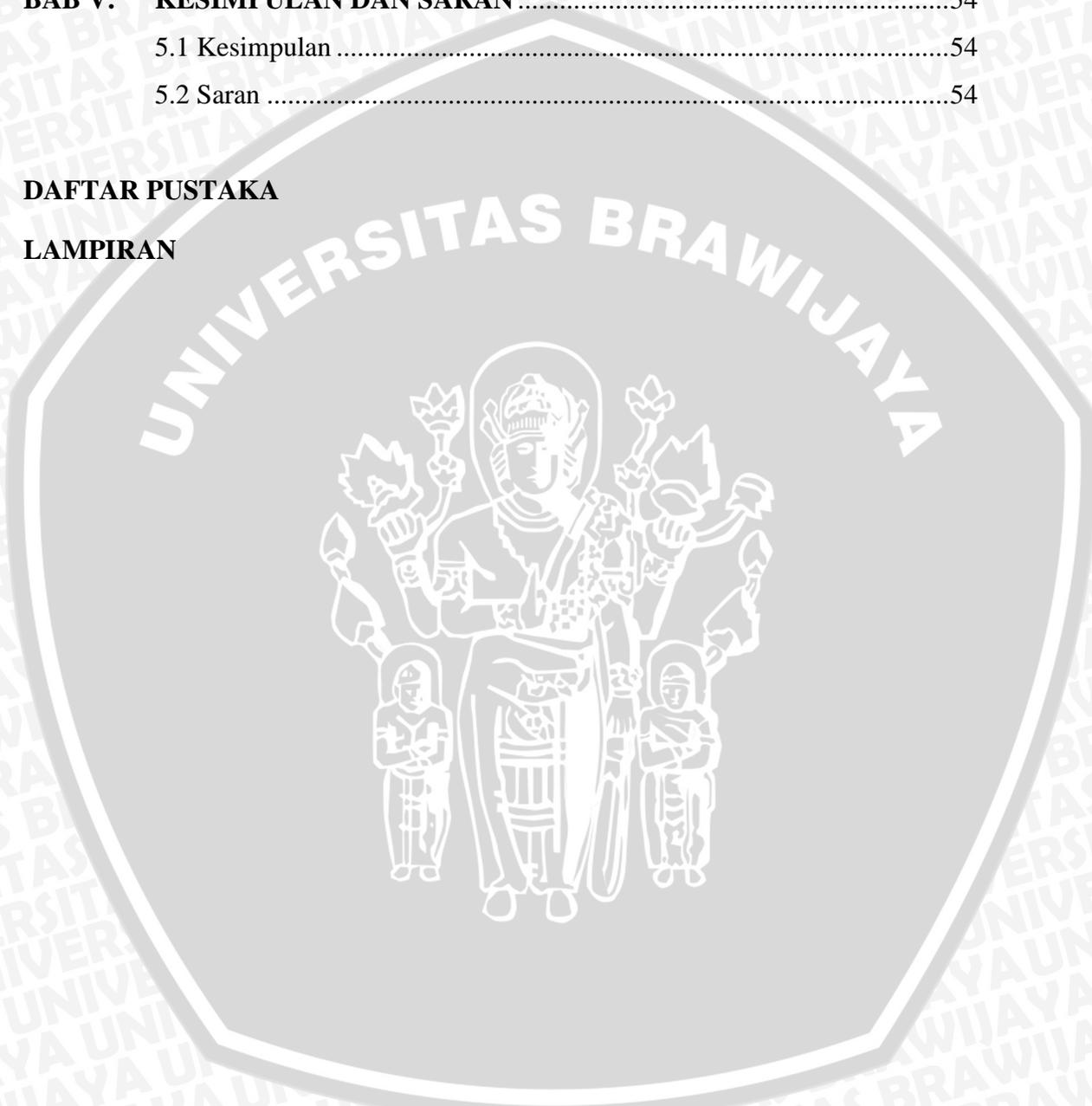
2.8 <i>Fatigue Striations</i>	17
2.9 Teknik Stop Drilled Hole.....	20
2.10 Sifat-sifat Logam pada Pembebanan Dinamis.....	21
2.11 Metode Elemen Hingga.....	21
2.12 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	25
2.12 <i>Software ABAQUS CAE 6.11</i>	28
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Metode Penelitian.....	25
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	25
3.3 Variabel Penelitian.....	25
3.3.1 Variabel Bebas.....	25
3.3.2 Variabel Terikat.....	25
3.3.3 Variabel Terkontrol.....	31
3.4 Alat Yang Digunakan.....	31
3.5 Bahan Dan Komponen.....	33
3.6 Pemodelan Spesimen.....	35
3.6.1 Model pelat menggunakan tanpa <i>Stop drilled hole</i>	35
3.6.2 Model pelat dengan <i>Stop drilled hole</i>	35
3.6.3 Pemodelan Material.....	36
3.7 Simulasi.....	36
3.7.1 Pelat tanpa Stop Drilled Hole.....	36
3.7.2 Pelat dengan Penambahan <i>Stop drilled hole</i>	37
3.8 Metode Analisis.....	38
3.8.1 Metode <i>Fractography</i> Mikro.....	38
3.8.2. Simulasi.....	38
3.9 Diagram Alir Penelitian.....	40
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Hasil.....	41
4.1.2 Penampang Patah Pelat Aluminium tanpa <i>Stop drilled hole</i>	41
4.1.2 Penampang Patah Pelat Aluminium dengan <i>Stop drilled hole</i>	43



4.2 Pembahasan.....	44
4.2.1 Distribusi tegangan dengan $R = -1$	44
4.2.2 Distribusi tegangan dengan $R = -1,5$	46
4.2.3 Evaluasi tegangan pada siklus ke-3.....	49
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	54

DAFTAR PUSTAKA

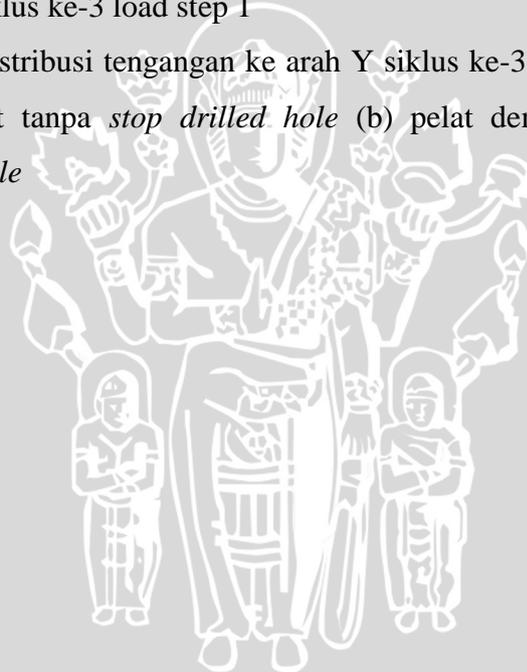
LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Diagram S-N	10
Gambar 2.2	Kurva laju perambatan retak	12
Gambar 2.3	Model Pembebanan Berulang	14
Gambar 2.4	Variasi tegangan terhadap umur <i>fatigue</i>	15
Gambar 2.5	Tegangan Sisa	16
Gambar 2.6	Ujung Retak Yang Mengalami Mekanisme Slip Plastik	17
Gambar 2.7	Skema Terjadinya <i>Striations</i>	18
Gambar 2.8	Skema permukaan kegagalan <i>fatigue</i>	19
Gambar 2.9	Posisi Lubang Tambahan	21
Gambar 2.10	Konsep Metode Elemen Hingga	25
Gambar 2.11	Perbandingan Hasil Gambar Mikroskop Cahaya dan Elektron	26
Gambar 2.12	Skema <i>Scanning Electron Microscope</i>	27
Gambar 3.1	Dimensi Pelat tanpa <i>stop drilled hole</i>	31
Gambar 3.2	Dimensi Pelat dengan tambahan <i>stop drilled hole</i>	31
Gambar 3.3	Mesin Uji <i>Fatigue</i>	32
Gambar 3.4	<i>Scanning Electron Microscope</i>	33
Gambar 3.5	Model Pelat tanpa <i>Stop drilled hole</i>	35
Gambar 3.6	Model Pelat dengan <i>Stop drilled hole</i>	35
Gambar 3.7	<i>Meshing</i> pelat tanpa <i>Stop drilled hole</i>	37
Gambar 3.8	<i>Meshing</i> pelat dengan penambahan <i>Stop drilled hole</i>	38
Gambar 3.9	Jarak dari lubang	39
Gambar 3.10	Kurva bilinier tegangan dan regangan	39
Gambar 3.11	Flowchart rancangan penelitian	40
Gambar 4.1	Penampang patah pelat tanpa <i>stop drilled hole</i>	42
Gambar 4.2	Penampang patah pelat dengan <i>stop drilled hole</i>	43
Gambar 4.3	Grafik perbandingan tegangan antara pelat tanpa <i>stop drilled hole</i> dan pelat dengan <i>stop drilled hole</i> dengan $R=-1$ pada ujung <i>notch</i>	44

Gambar 4.4	Kontur Distribusi tegangan kearah Y pada ujung <i>notch</i> (a) pelat tanpa <i>stop drilled hole</i> (b) pelat dengan <i>stop drilled hole</i>	34
Gambar 4.5	Grafik perbandingan tegangan antara pelat tanpa <i>stop drilled hole</i> dan pelat dengan <i>stop drilled hole</i> dengan $R=-1,5$	46
Gambar 4.6	Kontur distribusi tegangan ke arah Y pada ujung <i>notch</i> (a) pelat tanpa <i>stop drilled hole</i> (b) pelat dengan <i>stop drilled hole</i>	48
Gambar 4.7	Grafik siklus ke-3 load step 1	49
Gambar 4.8	Kontur distribusi tegangan ke arah Y siklus ke-3 <i>load step</i> 1(a) pelat tanpa <i>stop drilled hole</i> (b) pelat dengan <i>stop drilled hole</i>	50
Gambar 4.9	Grafik siklus ke-3 load step 1	51
Gambar 4.10	Kontur distribusi tegangan ke arah Y siklus ke-3 <i>load step</i> 1(a) pelat tanpa <i>stop drilled hole</i> (b) pelat dengan <i>stop drilled hole</i>	52



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Material <i>Properties</i> Aluminium	7
Tabel 3.1	Sifat Mekanik Aluminium	34



DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul
Lampiran 1	Kontur pelat tanpa <i>stop drilled hole</i> dengan $R=-1$
Lampiran 2	Kontur pelat dengan <i>stop drilled hole</i> dengan $R=-1$
Lampiran 3	Kontur pelat tanpa <i>stop drilled hole</i> dengan $R=-1,5$
Lampiran 4	Kontur pelat dengan <i>stop drilled hole</i> dengan $R=-1$



RINGKASAN

Fanni Adi Mulya, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, November 2013, Perilaku *Striation* Pada Penampang Patah Pelat Aluminium di Sekitar Daerah *Stop drilled hole*, Dosen Pembimbing : Anindito Purnowidodo dan Khairul Anam.

Pemeriksaan terhadap kontruksi pesawat terbang harus sering dilakukan khususnya mengetahui retak yang terjadi pada bagian body pesawat, jika sudah terjadi retak terdapat metode dalam menghambat perambatan retak yaitu dengan melakukan pengeboran ujung retak dan dilanjutkan dengan tiga perlakuan, yaitu lubang diperluas (*reamed*), lubang dimandrel, dan memasukkan pin ke lubang hasil pemandrelan. Pada penampang retak terdapat *fatigue striations* yang merupakan tanda awal terjadi retak dan retak merambat akibat dari beban siklus. Penelitian tentang *striations* pada penampang setelah diberikan lubang penghambat retak atau *stop drilled hole* dilakukan untuk mendapatkan bahwa metode tersebut adalah dapat menghambat penalaran retak. Dengan melihat distribusi tegangan yang terdapat pada daerah sekitar *stop drilled hole* dapat diketahui dan disimpulkan faktor terjadinya *striations*.

Pada penelitian menggunakan dua metode yaitu metode eksperimental dengan menggunakan 2 buah pelat aluminium murni pada $R=-1$ dan $R=-1,5$ dan menggunakan metode simulasi dengan pemodelan 4 buah pelat (tanpa *stop drilled hole* dan dengan *stop drilled hole*) dengan menggunakan rasio perbandingan tegangan $R=-1$ dan $R=-1,5$ menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga yaitu Abaqus CAE 6.11. Variable bebas yang dimasukkan adalah $R=-1$ $S_{max}=25$ MPa dan $S_{min}=-25$ MPa sedangkan $R=-1,5$ $S_{max}=37,5$ MPa dan $S_{min}=-25$ MPa. Variabel terikatnya adalah striasi yang terjadi pada penampang patah pelat. Sedangkan variabel terkontrolnya adalah material berupa aluminium murni dan dimensi dari pelat.

Hasil yang didapat adalah ukuran *striations* pada pelat dengan penambahan *stop drilled hole* ukurannya 383 nm lebih kecil daripada pelat tanpa penambahan *stop drilled hole* yaitu 1,36 μm . Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pengaruh penambahan *stop drilled hole* baru akan terlihat pada siklus ke-3.

Kata Kunci: *Striations*, beban siklus, distribusi tegangan, *stop drilled hole*, simulasi komputer

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan material di dunia permesinan yang sangat pesat dan kebutuhan akan material yang sempurna sangat dibutuhkan untuk menunjang komponen mesin untuk bekerja secara maksimal dalam sebuah sistem. Untuk mengetahui perkembangan ilmu pengetahuan & teknologi yang semakin canggih pada pihak yang mempunyai kualitas dalam meningkatkan mutu produksi, tingkat kestabilan & kekakuan bahan produksi dari segi penggunaan bahan adalah akibat perpatahan dan kelelahan pada konstruksinya, bila beban tersebut menerima beban.

Saat ini, sebagian besar komponen rekayasa dan struktur dirancang dengan kecenderungan untuk terus meningkatkan kinerja keseluruhan komponen dan struktur. Sebagai hasil dari kemajuan ini cepat dan terus-menerus para desainer dan peneliti harus menghadapi banyak tantangan baru dalam hal kehandalan dan umur kelelahan lebih baik dari komponen rekayasa dan struktur. Dengan demikian, perlu untuk analisis kekuatan kelelahan khusus untuk komponen rekayasa tersebut dan struktur telah pergi dari non-isu untuk menjadi perhatian serius selama beberapa tahun terakhir.

Dalam lingkup kehidupan sehari-hari manusia sering bersinggungan dengan mesin, sehingga manusia diharapkan sadar akan perawatan mesin terutama pada 11tern transmisi, *gearbox*, dan komponen yang rentan terhadap kerusakan sehingga menyebabkan terjadinya kegagalan (*failure*) pada suatu 11tern, sehingga sering terjadi kecelakaan transportasi. Kegagalan suatu material selama ini kebanyakan disebabkan oleh beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah). Pembebanan dinamis adalah suatu pembebanan dengan melibatkan tegangan aksial (tarik-tekan), fleksural (*bending*) dan *torsional* (puntiran) yang berfluktuasi. Meskipun tegangan yang diterima oleh material lebih rendah dari harga tegangan luluhnya, kegagalan dapat saja terjadi pada suatu saat. Kegagalan yang disebabkan oleh beban dinamis ini disebut dengan *fatigue failures*. Kebanyakan komponen rekayasa dan struktur mengalami siklus berulang beban berfluktuasi mengandung beberapa bentuk tegangan yang dihasilkan dari geometri atau diskontinuitas metalurgi (Murakami and

Miller 2007:27). Dalam sebagian besar kasus komponen tersebut gagal karena fenomena yang dikenal sebagai kelelahan.

Fenomena kegagalan akibat beban dinamis mulai timbul pada pertengahan abad ke-19 yaitu dengan seringnya terjadi patah pada komponen kereta api dimasa itu:

- ✓ Di Versailles (Paris), 1944, menewaskan 40-80 penumpang, akibat patah poros roda.
- ✓ 20 April 1887, 3 orang tewas dan 2 terluka, akibat patah *draw bar*.
- ✓ 27 Mei 1887, 6 orang tewas, akibat patah roda.
- ✓ 23 Juni 1887, 1 orang tewas, akibat patah rel.
- ✓ 2 Juli 1887, Kecelakaan paling serius, akibat patah poros roda.

Faktor kegagalan yang diakibatkan dari beban dinamis diperkirakan 50-90% (Hoeppner, 1996:19). Oleh karena itu diperlukan material yang sangat tahan terhadap beban dinamis yang tinggi.

Selama beberapa tahun terakhir, upaya ekstensif telah dikhususkan untuk mengembangkan metodologi yang memungkinkan prediksi kegagalan *fatigue*. Sebagai pengetahuan terkait dengan kelelahan diperluas, menjadi jelas bahwa dalam kasus-kasus tertentu kelelahan dapat diperlakukan dengan melihat dari titik retak awal (Ajmal 2008:752). Pemahaman inisiasi retak dan perilaku perambatan retak telah menyebabkan peningkatan dalam struktur terhadap beban siklus (*cyclic loading*). Untuk mendayagunakan salah satu komponen mekanis dan struktur dalam menghindari perambatan retak *fatigue* (FCP) yang menghasilkan kegagalan lelah. Namun, karena kondisi operasi dan persyaratan kinerja itu tidak selalu memungkinkan. Dengan demikian, prediksi yang diharapkan lokasi retak dan perilaku perambatan retak adalah tujuan utama bagi para peneliti di bidang ini.

Berbagai metode untuk menghambat perambatan retak (*crack retardation*) telah banyak dikembangkan. Salah satunya adalah pemanfaatan lubang, yaitu dengan cara pembuatan lubang disekitar ujung retak dan pengeboran sepasang lubang di sisi ujung retak (*crack flank holes*) (Song, 2004:26).

Vulic (1997:19), menganalisis metode alternatif dalam menghambat perambatan retak dengan melakukan pengeboran ujung retak pada spesimen dan dilanjutkan dengan tiga perlakuan, yaitu lubang diperluas (*reamed*), lubang dimandrel, dan memasukkan pin ke lubang hasil pemandrelan. Perlakuan dengan memasukkan pin ke lubang hasil

pemandrelan memiliki umur bahan yang lebih baik dibandingkan dengan dua metode lain.

Pada teknik menghambat perambatan retak dengan pengeboran *in-situ* (langsung di tempat asal) sulit untuk dilakukan dan seringkali lokasi retak sulit dijangkau. Jika hasil pengeboran berada sedikit di belakang ujung retak, retak dapat berperilaku seperti *mechanically short crack* yang muncul pada takik dengan laju retak yang sangat cepat dan tidak beraturan sehingga menambah elemen yang mengalami retakan. Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang dapat mampu mengamati perilaku penghambatan retak (*crack retardation*). Salah satu metode tersebut adalah pengeboran sepasang lubang pada sisi ujung retak (Shin, 1996:18). Shin melakukan analisis efek pengeboran sepasang lubang di sisi dan depan ujung retak terhadap laju retak. Pengujian dilakukan dengan dua variasi diameter lubang serta dua variasi jarak lubang di sisi ujung retak dan di depan ujung retak. Pertumbuhan laju retak sangat tergantung pada posisi dan susunan lubang. Hal ini juga akan mempengaruhi *fatigue life* (umur bahan terhadap kelelahan).

Sedangkan pengamatan pada penelitian ini adalah pada tahap striasi. Striasi adalah garis halus yang ada pada permukaan yang akan merambat pada siklus beban. Garis striasi terjadi akibat pertumbuhan retakan yang disusul penumpulan retakan secara plastis dilanjutkan dengan penutupan retakan akibat penurunan tegangan. Oleh karena itu, perlu sebuah penelitian untuk menghambat rambat retak pada suatu material, penelitian ini diusulkan sebagai metode baru untuk menghambat rambat retak *fatigue* pada material yang mengalami defect dengan menggunakan stoping hole. Serta kurangnya penelitian tentang *fatigue striations*.

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan dapat dirumuskan permasalahan yang akan diteliti, yaitu bagaimana perilaku striasi yang terjadi pada daerah yang mengalami konsentrasi tegangan paling tinggi dengan menggunakan specimen tanpa *stop drilled hole* dan dengan penambahan *stop drilled hole*.

1.3 Batasan masalah

Tujuan pembatasan masalah pada penelitian ini adalah agar tidak bisa dalam memecahkan persoalan, serta dapat fokus menuju sasaran yang ingin dicapai, maka batasan perumusan masalah adalah sebagai berikut: Material yang digunakan adalah

aluminium berbentuk pelat persegi panjang dengan dimensi 160 x 40 x 3.5 mm dan terdapat *stop drilled hole* dengan diameter 0,75 mm, *notch* yang digunakan berdiameter 0,75 mm dan material dianggap homogen dan bilinier isotropik hardening dan kuasi static, tidak memperhatikan faktor lingkungan. *Software* yang digunakan adalah Abaqus CAE 6.11.

1.4 Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku jarak striasi yang terjadi pada penampang patahan pelat aluminium dengan tanpa menggunakan *stop drilled hole* dan dengan penambahan *stop drilled hole*.

1.5 Manfaat penelitian

Diharapkan setelah penelitian ini selesai dapat memberikan manfaat bagi:

- Manfaat praktis, dari hasil penelitian ini dapat menghasilkan rekomendasi pencegahan dan pengendalian terhadap kegagalan material dan membantu memecahkan permasalahan-permasalahan yang sering dihadapi dalam kegagalan material akibat beban yang melebihi dari yang diijinkan
- Manfaat secara teoritis, dari hasil penelitian ini dapat menjadi masukan yang berguna bagi pengembangan ilmu pengetahuan khususnya bidang studi teknik mesin dan mampu menerapkan teori – teori yang didapatkan selama perkuliahan terutama berkenaan dengan analisis tegangan dan mekanika patahan.
- Manfaat bagi peneliti lain, penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan referensi untuk penelitian lebih lanjut terutama bagi pihak yang berkepentingan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Bretz, *et al.* (1984) melakukan penelitian perambatan retak fatik (*Fatigue Crack Growth/FCG*), yaitu *Simple Over-load FCG Tests* pada paduan (Al 7075 dan Al 7050). Dia menyatakan bahwa terjadi plastisitas akibat beban lebih (*overload*) dengan disertai gaya penutupan retak dan gaya jepit (*clamping forces*) dari daerah elastis yang besar mengelilingi daerah plastis, sehingga terjadi proses perlambatan FCG.

Tsukuda, *et al.* (1996) melakukan penelitian tentang perambatan retak lelah pelat aluminium (Al 2117-T3) dengan amplitudo konstan dan beban lebih tunggal dengan menggunakan rasio tegangan antara 0–0,7. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa perilaku perambatan retak berdasarkan beban lebih pada rasio tegangan tinggi mempunyai perbedaan berarti dengan rasio tegangan rendah yaitu terjadi percepatan retardasi pergerakan laju perambatan retak dan cepat kembali ke level keadaan tetap pada beban dasar. Pada rasio tegangan dengan rasio beban lebih menunjukkan perubahan selang rasio tegangan efektif dengan besarnya retak sebelum beban lebih.

Ling dan Schijve (1990) memeriksa *fatigue striation* pada paduan Al 2024-T3 dengan berbagai amplitudo beban siklus. Mereka secara berkala mengganti beban siklus dengan amplitudo yang lebih kecil dengan batch lima siklus amplitudo beban yang lebih besar konstan. Akibatnya, mengungkapkan batch masing-masing diatur dari lima siklus *overloading*, yaitu lima *fatigue striations* yang lebih besar, jarak striasi pertama adalah ternyata lebih besar daripada semua.

Franz (1980) menggambarkan keberadaan *fatigue striations* sebagai ciri morfologi fraktur pada bahan yang diperkuat oleh serat di bawah mode I (*tension*). menganggap bahwa pembentukan *striations* terjadi dalam tahap - tahap dan mengusulkan penjelasan untuk penampilan di SEM. Sejak itu, badan besar penelitian morfologi fraktur akibat kelelahan yang telah dilaksanakan oleh kelompok kerja Analisis Kegagalan Fisik di EADS Innovation Works dan oleh penulis lain. Meskipun demikian, relatif sedikit karya yang diterbitkan dan ditemukan pada morfologi fraktur kelelahan dan ini menyisakan banyak pertanyaan belum terjawab. Munculnya *fatigue striations* terbentuk oleh properties dari bahan dan di bawah kondisi pembebanan yang berbeda.

W. von Bestenbostel, *et al* (2010) meneliti tampilan yang bervariasi dan formasi *fatigue striation*. *Fatigue striation* umumnya dapat ditemukan dalam serat. *Striations* hanya bisa ditemukan di bawah kondisi tertentu. Secara keseluruhan, *fatigue striation* adalah struktur steplike yang memproyeksikan keluar dari patahan bagian dari pesawat. Inversi *striations* dijelaskan oleh penjelasan di SEM. Oleh karena itu, pembentukan striasi dapat dilihat. Korelasi antara kelengkungan striasi dan arah pertumbuhan retak diidentifikasi. Itu juga menunjukkan bahwa sudut kemiringan dan arah kemiringan spesimen perlu diidentifikasi untuk menginterpretasikan permukaan fraktur dengan benar. Kondisi pembebanan lokal yang diperlukan dan mekanisme pembentukan *fatigue striation* sengaja belum dibahas. Ini akan menjadi subyek dari kertas lebih lanjut.

A.A. Shanyavskiy dan L.M. Burchenkova (2011) meneliti tentang Pengaruh dari berbagai R-rasio negatif pada pola *fatigue striations* yang diperiksa pada Al V95-T4 (analog 7057T6) dan D16T (analog 2024T3). Tiga urutan yang berbeda dari beban siklus dan dari berbagai tingkat maksimum dan minimum tegangan yang diterapkan di atmosfer udara ke panel paduan dengan ukuran 10x160x460 mm. Pengujian dilakukan pada suhu kamar dengan frekuensi pemuatan kisaran 0,5-1,5 Hz. Besaran jarak striasi ditemukan semakin meningkat untuk R-rasio negatif. Untuk memperkirakan efek R-rasio negatif pada tingkat pertumbuhan permukaan koreksi-fungsi retak dibangun untuk faktor intensitas tegangan KI. Analisis *fractography* menunjukkan bahwa bagian-bagian lintasan siklus unloading hanya bertanggung jawab untuk efek striasi.

2.2 Aluminium

Pertama kali ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809 sebagai suatu unsur dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted pada tahun 1825. Secara Industri tahun 1886, Paul Heroul di Prancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah memperoleh logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garam yang terfusi. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah pada urutan yang kedua setelah baja dan besi, yang tertinggi diantara logam *non ferro*.

2.2.1 Sifat-Sifat

Sifat teknik bahan murni dan aluminium paduan dipengaruhi oleh konsentrasi bahan dan perlakuan yang diberikan terhadap bahan tersebut. Aluminium terkenal sebagai bahan yang tahan terhadap korosi. Hal ini disebabkan oleh fenomena pasivasi,

yaitu proses pembentukan lapisan aluminium oksida di permukaan logam aluminium segera setelah logam terpapar oleh udara bebas. Lapisan aluminium oksida ini mencegah terjadinya oksidasi lebih jauh. Namun, pasivasi dapat terjadi lebih lambat jika dipadukan dengan logam yang bersifat lebih katodik, karena dapat mencegah oksidasi aluminium.

2.2.2 Sifat Fisik Aluminium

Aluminium memiliki beberapa sifat fisik. Hal ini berpengaruh kepada keunggulan aluminium untuk dapat dipakai pada berbagai kegunaan. Sifat fisik dari aluminium dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 *Material Properties* Aluminium murni

Properties	Besar
Density (x1000 kg/m ³)	2,785
Poisson's ratio	0,35
Young Modulus (GPa)	70
Maximum Tensile Strength (MPa)	145
Initial Yield Strength (Mpa)	100
Hardening Constanta	310
Hardening Exponent	0,185
Derivatif DG/DT (Pa/C)	3,50e7
Derivatif DY/DP	0,0079
Gruneisen Coefisien	2
Specific Heat (J/kg-K)	863

Sumber: Hatch, 1984

2.2.3 Sifat Mekanik Aluminium

Adapun sifat-sifat mekanik dari aluminium adalah sebagai berikut:

2.2.3.1 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik adalah besar tegangan yang didapatkan ketika dilakukan pengujian tarik. Kekuatan tarik ditunjukkan oleh nilai tertinggi dari tegangan pada kurva

tegangan-regangan hasil pengujian, dan biasanya terjadi ketika terjadinya *necking*. Kekuatan tarik bukanlah ukuran kekuatan yang sebenarnya dapat terjadi di lapangan, namun dapat dijadikan sebagai suatu acuan terhadap kekuatan bahan.

2.2.3.2 Kekerasan

Yaitu kemampuan material logam menerima gaya berupa penetrasi, indentasi, pengikisan, ataupun penggoresan. Sifat kekerasan mempunyai korelasi, dengan sifat kekuatan dan juga dengan sifat daya tahan aus (*wear resistance*). Kekerasan gabungan dari berbagai sifat yang terdapat dalam suatu bahan yang mencegah terjadinya suatu deformasi terhadap bahan tersebut ketika diaplikasikan suatu gaya. Kekerasan suatu bahan dipengaruhi oleh elastisitas, plastisitas, viskoelastisitas, kekuatan tarik, *ductility*, dan sebagainya. Kekerasan dapat diuji dan diukur dengan berbagai metode. Yang paling umum adalah metode *Brinell*, *Vickers* dan *Rockwell*.

2.2.3.3 Ductility

Ductility didefinisikan sebagai sifat mekanis dari suatu bahan untuk menerangkan seberapa jauh bahan dapat diubah bentuknya secara plastis tanpa terjadinya retakan. Dalam suatu pengujian tarik, *ductility* ditunjukkan dengan bentuk *necking*nya. Material dengan *ductility* yang tinggi akan mengalami *necking* yang sangat sempit, sedangkan bahan yang memiliki *ductility* rendah, samper tidak mengalami *necking*.

2.2.3.4 Modulus Elastisitas

Aluminium memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah bila dibandingkan dengan baja maupun besi, tetapi dari sisi *strength to weight ratio*, aluminium lebih baik. Aluminium yang elastis memiliki titik lebur yang lebih rendah.

2.3 Kegagalan Lelah/*Fatigue Fracture*

Kegagalan lelah merupakan suatu kegagalan lelah terjadi ketika sebuah bahan telah mengalami silus tegangan & regangan yang menghasilkan kerusakan yang permanen, juga dapat terjadi dibawah atau diatas tegangan luluh. Kegagalan lelah pada umumnya meliputi pertumbuhan inti dan penebaran dari sebuah retak.

Penyebab Kelelahan:

- Kelelahan yang dikontrol oleh tegangan.

1. *Rotating bending*
2. Getaran
3. Penekanan
4. *Rolling Contact*

- Kelelahan yang dikontrol oleh regangan.

1. Siklus
2. Tarikan besar
3. Terbuka / Tertutup

Umur lelah/*fatigue life* biasanya 107 siklus, ini dari perkiraan jumlah siklus yang dialami oleh suatu piston mobil dari 100.000 mil (~ 330.000).Pengukuran Kelelahan diperoleh dari :

1. Struktur presisi dan bertekuk

- a. Kelelahan meliputi pertumbuhan inti & penyebaran retakan (*propagation of crack*).
- b. Karakteristik dengan umur lelah $T - S$ (Tegangan– Siklus, $S-N$) atau $R - S$ (Regangan Siklus, $\epsilon - N$).
- c. Takikan yang mengkonsentrasikan tegangan & regangan.

2. Struktur Retak.

- a. Kelelahan meliputi penyebarab retak
- b. Karakteristik dengan laju pertumbuhan retak lelah (*fatigue crack growth rate*)

Tujuan untuk memprediksi umur lelah atau siklus pembebanan maksimum untuk menentukan umur yang tidak terbatas (*infinite life*).

3. Penyebab utama kegagalan / kesalahan

- a. Kesalahan dalam perencanaan / design.
 - Operasi yang sebenarnya, antara lain: beban, lingkungan, suhu operasi, dsb.
 - Adanya tarikan.
- b. Kesalahan dalam pemilihan material / bahan
 - Data material yang tidak mencukupi, misalnya hanya data uji tarik, padahal bebannya dinamis akan terjadi fatigue dst.
 - Kriteria pemilihan material.
 - Kaitan antara beban, tegangan & suhu
 - Operasi dengan mekanisme kegagalan serta kriteria pemilihan material.

c. Cacat Material

- Cacat dipermukaan dan di dalam material akan menurunkan kekuatannya.
- Cacat pengecoran: inklusi, porositas, rongga, retak penyusutan.
- Cacat pengerolan / tempa: segregasi, laminasi, oksida didekat permukaan.

d. Kesalahan dalam proses pengerjaan

e. Kesalahan dalam pemasangan/perekatan

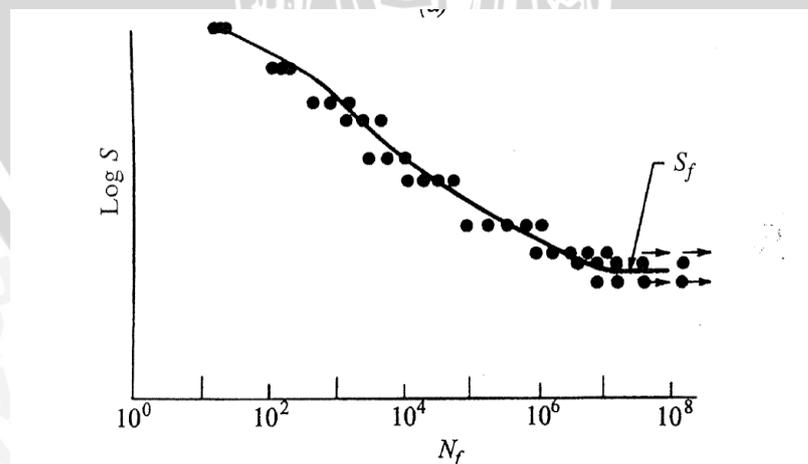
- Kesalahan dalam pemasangan, seperti halnya kelurusan akan menimbulkan beban yang berlebihan.
- Begitu pula dengan pemaksaan dalam perakitan.

f. Kesalahan operasi

- Kondisi operasi yang tidak normal/berlebihan, misalnya: beban, kecepatan, suhu, akan merusak peralatan.
- Bila lingkungan lebih korosif yang diduga sebelumnya.
- Perawatan yang kurang
- Prosedur *startup* dan *shutdown* yang salah.

2.4 Kelelahan Logam

Dalam memperhitungkan beban siklus tentunya juga berpengaruh terhadap umur komponen tersebut. Umur komponen akibat beban siklus disini disebut dengan *fatigue life*. *Fatigue life* diukur dengan menggunakan diagram S-N. Diagram ini merupakan hubungan antara kekuatan lelah (*fatigue strength*) dengan jumlah siklus (*cycles*) yang dijelaskan pada gambar 2.1 dibawah.



Gambar 2.1: Diagram S-N

Sumber : Stephens, 2001:248

Koordinat dari diagram S-N ini disebut kekuatan lelah (S_f) yang harus selalu diikuti dengan jumlah siklus N yang berkaitan. Berdasarkan besar siklus biasanya digolongkan menjadi dua golongan yaitu kelelahan siklus rendah (*low cycle fatigue*) dan kelelahan siklus tinggi (*high cycle fatigue*). Batas kelelahan siklus rendah adalah antara $N = 1/2$ dan $N = 1000$

Kelelahan logam diawali dengan pembentukan awal retak dan dilanjutkan dengan penjarangan retakan hingga komponen mengalami patah. Lokasi awal retak pada komponen atau logam yang mengalami pembebanan dinamis atau siklus adalah pada titik daerah dimana memiliki kekuatan yang paling minimum dan atau pada titik daerah dimana mengalami tegangan yang paling maksimum. Oleh karena itu untuk memperkirakan umur lelah suatu komponen merupakan suatu hal yang cukup sulit, hal ini disebabkan oleh banyaknya faktor-faktor yang mempengaruhi umur lelahnya.

2.5 Pertumbuhan Retak *Fatigue* (*Fatigue Crack Growth*)

Prediksi perambatan retak dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan menganalisis pada setiap siklus beban atau pada setiap sejumlah siklus beban tertentu. Analisis perambatan retak pada setiap siklus beban mempunyai satu kelebihan dibanding dengan yang lain, yaitu akan didapat hasil prediksi yang lebih teliti, karena setiap pertambahan panjang 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 di ujung retak yang dipengaruhi oleh distribusi tegangan pada daerah ujung retak tersebut, maka laju perambatan retak dapat dihubungkan sebagai fungsi dari faktor intensitas tegangan yaitu $dN = f(\Delta K)$. Paris menunjukkan hubungan tersebut dalam bentuk fungsi eksponen.

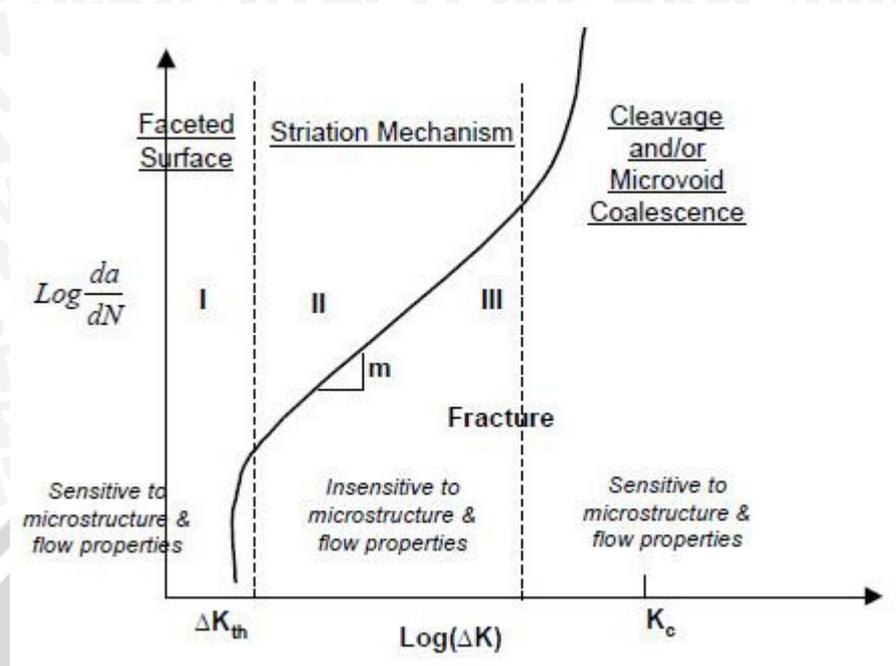
$$da/dN = C(\Delta K)^m \text{ [mm/siklus]} \quad (2-1)$$

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

C dan m adalah parameter material

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \text{ (MPa/mm)} \quad (2-2)$$

Secara umum, pertumbuhan retak pada rasio tegangan R konstan dapat digambarkan pada skematik dalam gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2: Kurva laju perambatan retak

Sumber : Bannantine,1990:256

Berdasarkan gambar 2.2 di atas diketahui bahwa 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}), di sini 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 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} .

b. Perambatan retak pada daerah II

Sebagian besar aplikasi dari konsep LEFM (*Linear Elastic Fracture Mechanics*) adalah menggambarkan perilaku pertumbuhan retak pada daerah II. Pada daerah ini kemiringan kurva dari grafik hubungan antar log (da/dN) dengan log (ΔK) diasumsikan linier dan berkisar antara 10⁻⁶ sampai dengan 10⁻³ in/cycle. Perambatan retak pada daerah ini dapat dijelaskan dengan persamaan Paris (Bannantine,1990)

$$da/dN = C(\Delta K)^m \text{ [mm/siklus]} \quad (2-3)$$

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

C dan m adalah parameter material

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \text{ (MPa/mm)} \quad (2-4)$$

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

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \text{ [mm/siklus]} \quad (2-5)$$

Persamaan Forman ini sering digunakan untuk memprediksi efek rasio tegangan (R) dan dari hasil uji observasi membuktikan bahwa peningkatan rasio tegangan (R) akan meningkatkan laju perambatan retak (da/dN). Persamaan Forman memiliki hasil yang valid hanya jika besarnya rasio tegangan (R) > 0.

2.6 Beban siklus

Beban dibagi menjadi dua jenis, yaitu beban statis dan beban dinamis, Beban siklus merupakan beban dinamis. Beban siklus adalah beban yang berubah terhadap waktu. Beban-beban ini dan jenis beban lainnya yang terjadi dalam anggota-anggota mesin menghasilkan tegangan yang disebut tegangan berulang (*repeated stresses*), tegangan bolak-balik (*alternating stresses*), atau tegangan berfluktuasi (*fluctuating stresses*) (E. Shigley, 1986).

2.6.1 Komponen beban siklus

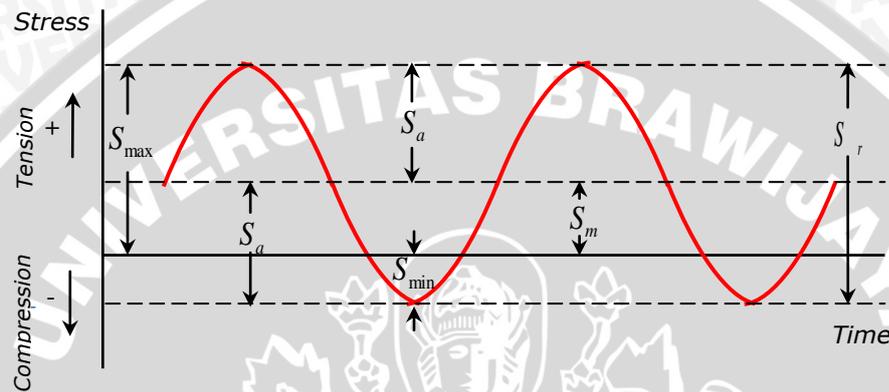
Pembebanan berulang yang diberikan pada suatu komponen tentunya memiliki tegangan maksimum dan tegangan minimum. Tegangan maksimum yang diberikan pada material sebenarnya masih di bawah kekuatan dari bahan tersebut dan bahkan cukup sering berada di bawah tegangan *yield* (E. Shigley, 1986). Tegangan ini diberikan pada benda dalam waktu yang lama hingga mengalami kegagalan. Kegagalan akibat beban siklus ini disebut suatu *fatigue failure*.

Faktor yang paling menentukan terjadinya kegagalan *fatigue* adalah adanya siklus tegangan atau pembebanan yang berulang (*cyclic*). Rasio tegangan yang

diberikan, mempunyai pengaruh yang berarti pada laju pertumbuhan retak. Seperti dijelaskan sebelumnya, rasio tegangan didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum.

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (2-6)$$

Komponen-komponen dari siklus tegangan berfluktuasi ditunjukkan oleh Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3: Model Pembebanan Berulang

Sumber : Dieter, 1988:124

Pembagian komponen siklus pembebanan berulang pada gambar 2.4 adalah sebagai berikut :

1. Tegangan rata-rata (S_m), yaitu nilai rata-rata dari tegangan maksimum dan tegangan minimum pada siklus.

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad (2-7)$$

2. Daerah tegangan atau jangkauan tegangan (S_r), yaitu perbedaan antara tegangan maksimum dengan tegangan minimum pada suatu siklus.

$$S_r = S_{\max} - S_{\min} \quad (2-8)$$

3. Tegangan bolak balik atau amplitudo tegangan (S_a), yaitu setengah dari jangkauan tegangan.

$$S_a = \frac{S_r}{2} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad (2-9)$$

Rasio tegangan berpengaruh terhadap kondisi beban yang dialami oleh suatu komponen. Dalam hubungannya membentuk kondisi beban, rasio tegangan memiliki hubungan dengan amplitudo tegangan. Hubungan antara rasio tegangan, amplitudo tegangan terhadap kondisi beban adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Fully Reserved} & : R = -1 \\ \text{Zero to max} & : R = 0 \\ \text{Zero to min} & : R = \infty \end{aligned}$$

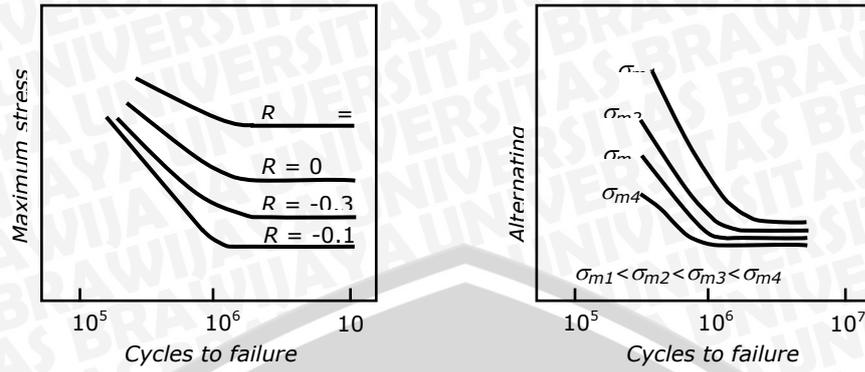
Pengaruh rasio tegangan terhadap umur lelah dinyatakan pada Gambar 2.6. Pada Gambar 2.6 (a) dilukiskan hubungan tegangan maksimum S_{\max} terhadap $\log N$ pada nilai rasio tegangan $R = S_{\min} / S_{\max}$ yang konstan. Kasus tegangan pembalikan penuh (*complete reverse stress*) terjadi pada $R = -1$. Ketika R menjadi semakin positif dimana sebanding dengan penambahan tegangan rata-rata, maka batas umur *fatigue* menjadi lebih besar. (George E. Dieter, 1988).

2.6.2 Pengaruh Rasio Tegangan (*Stress Ratio*)

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

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (2-10)$$

Bannantine (1990) menjelaskan bahwa untuk nilai ΔK yang konstan dengan semakin besar nilai R, maka laju pertumbuhan retak juga semakin besar. Faktor yang menentukan terjadinya kegagalan lelah (*fatigue*) adalah siklus tegangan atau pembebanan yang berulang. Seperti pada gambar 2.4

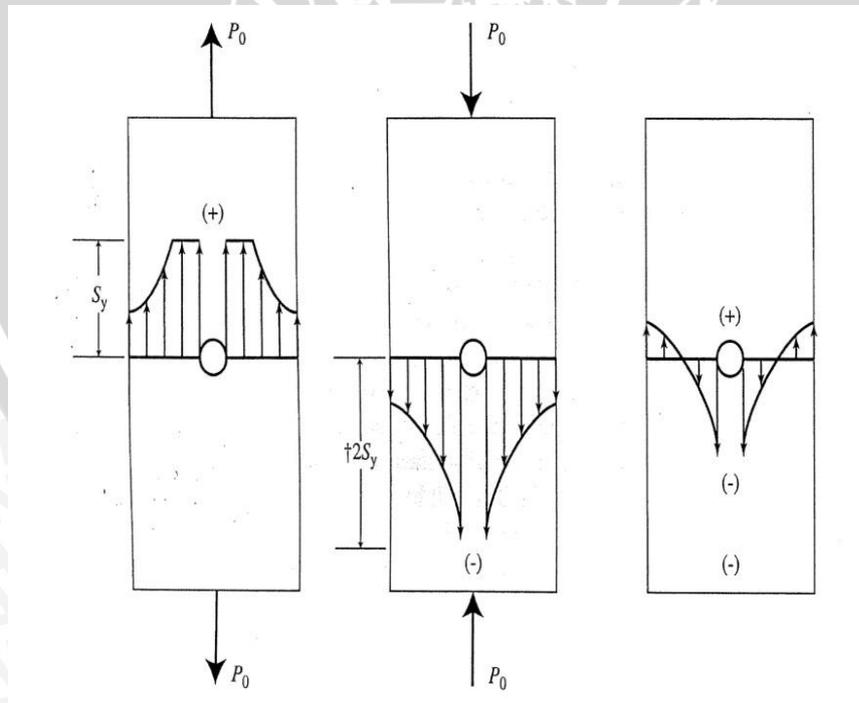


Gambar 2.4: Variasi tegangan terhadap umur *fatigue*

Sumber: Dieter, 1988:126

2.7 Tegangan sisa

Tegangan sisa ini dapat merugikan tetapi juga dapat menguntungkan. Jika terdapat tegangan sisa tarik pada material yang mengalami beban tarik maka akan memberikan resultan positif dan jika melewati tegangan luluhnya akan menjadi awal mula terjadinya patahan, sebaliknya jika beban berupa tegangan tarik dan terdapat tegangan sisa tekan pada material maka tegangan sisa ini akan memberi resultan negative dan mengurangi efek beban ke material.



Gambar 2.5 Tegangan sisa

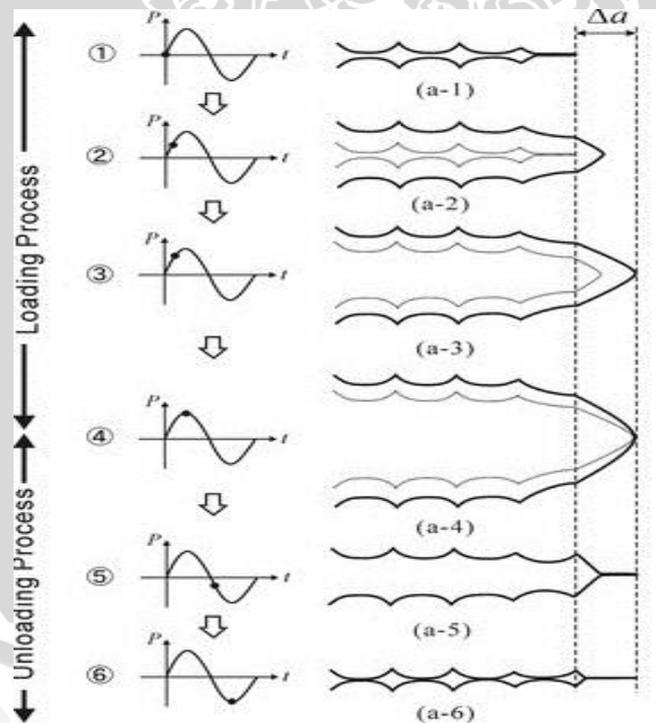
Sumber : Stephens, 2001:248

Pada gambar 2.5 tersebut adalah *stretching* dari sebuah pelat berlubang. Dengan mengasumsikan material pelat *elastic-perfectly plastic* pada gambar (a) dapat dilihat distribusi tegangan yang terjadi pada saat pembebanan tarik dilakukan, karena ada perubahan penampang maka pada daerah sekitar lubang akan terjadi konsentrasi tegangan sehingga tegangan pada daerah sekitar lubang menjadi besar dan terjadi deformasi plastis.

Pada gambar (b) beban pada pelat diganti tegangan tekan sehingga apabila dilakukan superposisi akan tampak seperti pada gambar (c)

2.8 Fatigue Striations

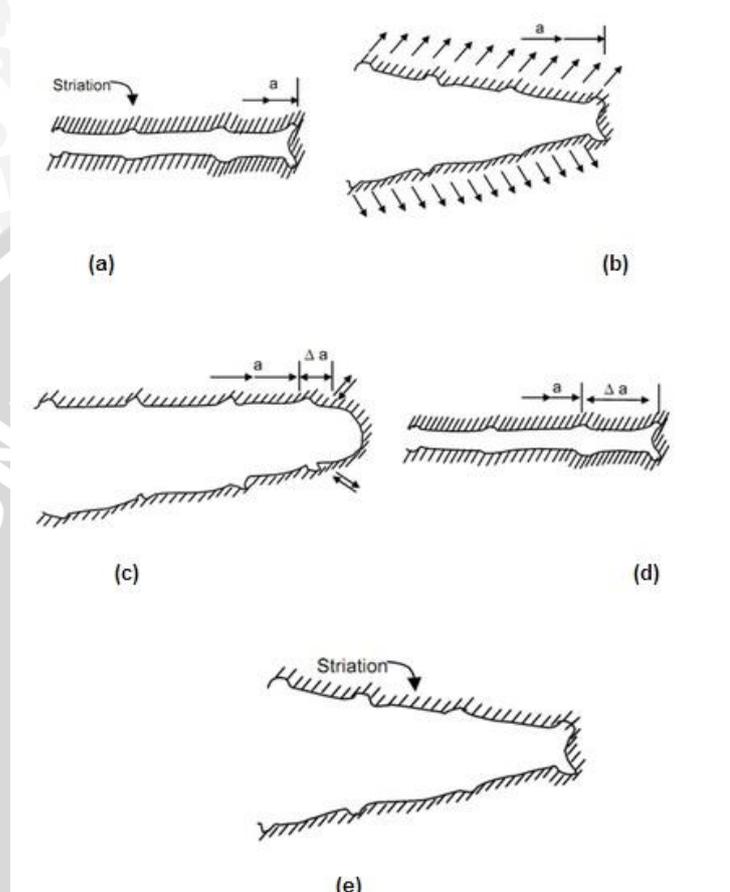
Striasi adalah garis halus yang ada pada permukaan yang akan merambat pada siklus beban. Garis striasi terjadi akibat pertumbuhan retakan yang disusul penumpukan retakan secara plastis dilanjutkan dengan penutupan retakan akibat penurunan tegangan. *Striations* pada permukaan retak adalah pertanda terjadi fraktur, yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.6 Ujung Retak Yang Mengalami Mekanisme Slip Plastik

Sumber: Suresh, 1988:87

Model referensi dasar dalam *striations* adalah bahwa ujung retak akan mengalami slip plastik, skema terjadinya *striations* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



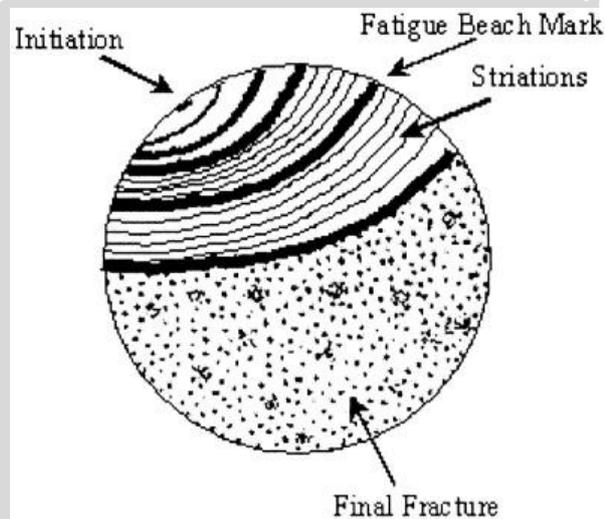
Gambar 2.7 Skema Terjadinya *Striations*

Sumber : Bestenbostel, 2010:32

Selama fase awal retakan diawali dengan tegangan normal yang mengaktifasi daerah slip plastik pada ujung. Mekanika perpatahan memprediksi bahwa aliran ini terjadi sepanjang daerah simetris. Pada fase ini ujung retak akan menumpul dan tumbuh karena dekohesi bahan terkait dengan dislokasi yang dihasilkan oleh konsentrasi tegangan. Ini adalah jenis deformasi plastik yang tidak dapat diperbaiki secara sempurna. Oleh karena itu, setelah *unloading* penumpulan tersebut mengalami *squished*, namun permukaan bebas yang baru tetap pada ujung retak dengan ujung baru yang tajam. Rata-rata pertumbuhan retak adalah urutan beberapa milimeter per juta siklus kelelahan yang terjadi pada siklus tinggi dan jarak antara rentan frekwensi dalam

beach mark bukan ukuran dari tingkat retak per siklus beban. Namun, pemeriksaan oleh mikroskop elektron pada perbesaran antara 1.000 sampai 30.000 x dapat mengungkapkan karakteristik dari permukaan disebut *fatigue striations*. Meskipun agak mirip dalam penampilan, *beach mark* ini tidak menandai dijelaskan di atas sebagai salah satu *beach mark* yang mungkin berisi ribuan *striations*.

Fatigue striation akan hilang juga dalam siklus tinggi selama fase awal perambatan retak makroskopik pada amplitudo sangat rendah dekat dengan ambang faktor intensitas tegangan K . Meskipun *striations* merupakan karakteristik kelelahan pada siklus tinggi pengamatan pada permukaan kegagalan *fatigue* mungkin tidak begitu sederhana. Ini adalah kasus bahan dengan kekuatan tinggi yang memiliki deformasi rendah.



Gambar: 2.8 Skema permukaan kegagalan *fatigue*

Sumber: David Broek, 2010:346

Persamaan striasi dan *beach marks* yang skemanya terdapat pada gambar 2.9 adalah sebagai berikut:

1. Ke-2 nya menunjukkan posisi ujung retak yang terjadi setiap saat sebagai fungsi dari waktu siklus.
2. Ke-2 nya berasal dari lokasi awal retak yang sama.
3. Ke-2 nya memiliki arah yang sama (*parallel ridges*).
4. Ke-2 nya tidak hadir pada logam-logam yang terlalu keras atau terlalu lunak.

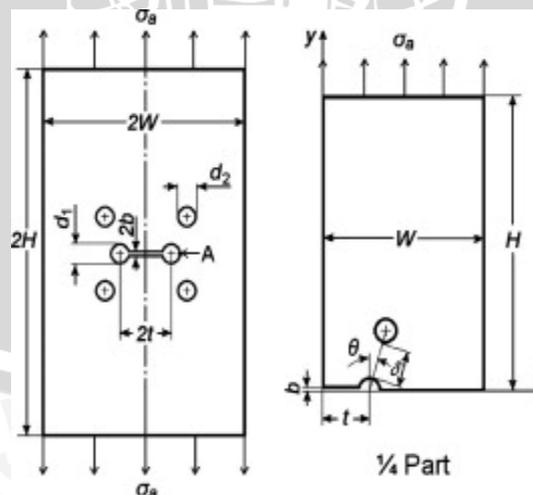
Perbedaan striasi dan *beach marks* adalah sebagai berikut:

1. Ukuran striasi adalah mikroskopis ($1 \div 100 \mu$) dan hanya dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop elektron.
2. Ukuran *beach marks* adalah makroskopis ($> 1000 \mu$ atau 1mm) dan dapat dilihat dengan mata telanjang.
3. Striasi mewakili majunya ujung retakan yang bergerak setiap satu siklus pembebanan, sedangkan *beach marks* mewakili posisi dari ujung retakan ketika beban siklus berhenti untuk satu periode tertentu. (satu beach mark dapat terdiri atas ratusan bahkan ribuan buah striasi).

2.9 Teknik Stop Drilled Hole

Teknik *stop drilled hole*, melibatkan pengeboran lubang dengan lingkaran kecil dekat ujung retak, merupakan salah satu metode untuk menahan pertumbuhan retak dari retakan. Ide utama dari metode ini adalah untuk mengurangi konsentrasi tegangan pada tepi lubang *stop-drilled*. Jumlah *life extension* yang dihasilkan oleh stop drill sangat tergantung pada konsentrasi tegangan yang terkait dengan *stop drill hole*. Dengan *stop hole* melewati ujung retak, semakin besar *stop hole*, maka semakin efektif teknik *stop drilled hole*.

Sebuah metode untuk memperpanjang umur kelelahan pelat yang retak setelah proses permesinan, diusulkanlah metode *stop drilled hole*. Dalam metode ini, bertujuan untuk mengurangi faktor konsentrasi tegangan pada tepi *stop drilled hole*. Lubang tambahan setelah proses permesinan ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.9: Posisi Lubang Tambahan

Sumber: Dyskin, A.V, Xiaozhi Hu, and Emad Sahouryeh, 2002

2.10 Sifat-sifat Logam pada Pembebanan Dinamis

Beban dinamis adalah beban yang berubah-ubah arah dan besarnya menurut waktu. Kelelahan adalah gejala patah dari bahan yang disebabkan beban yang berubah-ubah. Sedangkan batas ketahanan lelah ialah tegangan bolak-balik (*stress cyclic*) tertinggi yang dapat ditahan oleh material sampai banyak balikan tak terhingga. Adapun beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan kelelahan yaitu :

- a. Jenis siklus dari pembebanan
- b. Besarnya beban amplitudo
- c. Frekuensi kerja/vibrasi jumlah balikan sampai patah
- d. Kondisi material dari benda kerja
- e. Keadaan dari pengolahan permukaan benda kerja
- f. Suhu
- g. Kondisi lingkungan.

Dari uraian di atas maka setiap komponen mesin dibatasi oleh umur pemakaian (*life time*) dari komponen yang bersangkutan, yang mana berkaitan dengan :

- a. Frekuensi kerja komponen
- b. Beban atau gaya yang bekerja terhadap komponen
- c. Material dan proses manufaktur dari komponen (Sutantra, 2001)

2.11 Metode Elemen Hingga

FEM adalah singkatan dari *Finite Element Method*, dalam bahasa Indonesia disebut Metode Elemen Hingga. Konsep paling dasar FEM adalah, menyelesaikan suatu problem dengan cara membagi obyek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan daerah. Sebaliknya, pendekatan dengan metode elemen hingga (*finite element methode*) merupakan suatu analisis pendekatan yang berdasarkan asumsi peralihan atau asumsi tegangan, bahkan dapat juga berdasarkan kombinasi dari kedua asumsi tadi dalam setiap elemennya (Cook, 2002).

Membagi bagian analisa menjadi bagian-bagian kecil disebut “*discretizing* atau diskritisasi”. Bagian-bagian kecil ini disebut elemen, yang terdiri dari titik-titik sudut (disebut *nodal*, atau *node*) dan daerah elemen yang terbentuk dari titik-titik tersebut.

Membagi sebuah object menjadi bagian-bagian kecil secara fisika sebenarnya menuntun kita kepada pembuatan persamaan diferensial. Jadi secara lebih matematis, FEM didefinisikan sebagai teknik numerik untuk menyelesaikan problem yang dinyatakan dalam persamaan diferensial.

Secara umum langkah-langkah dalam FEM bisa diringkas sebagai berikut:

1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Proses ini adalah proses pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana yang dihubungkan pada titik simpul (*node*), kemudian dilakukan pemilihan elemen seperti model awal dari struktur. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisa.

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} \quad (2-11)$$

2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang paling umum digunakan adalah polinomial. Pendekatan dengan fungsi interpolasi ini disebabkan karena sulitnya mencari jawaban tertutup sehingga dipilih suatu bentuk jawaban, yaitu distribusi perpindahan yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi yang harus memenuhi hukum, prinsip dan syarat batas yang menjadi sifat persoalan yang ada.

$$= \begin{Bmatrix} a_1 + a_2x + a_3y \\ a_4 + a_5x + a_6y \end{Bmatrix} \{\Psi_i\} = \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{Bmatrix} \quad (2-12)$$

Untuk problem *plane stress*, governing equation yang digunakan adalah

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu\sigma_{xx}] \quad (2-13)$$

Dengan E adalah modulus young dan ν adalah poisson ratio.

Dalam kondisi plane stress digunakan rumus equilibrium yaitu pada sumbu Y

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + b_y = 0 \quad (2-14)$$

3. Mendefinisikan regangan-displacemen, dan tegangan-regangan

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial x} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2-15)$$

untuk *plane stress*, tegangan σ_z , τ_{xz} , dan τ_{yz} diasumsikan nol, sehingga hubungan tegangan-regangannya adalah

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5(1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-16)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad [D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

Dari kondisi plane stress yang didefinisikan pada pemodelan material didapatkan matrik regangan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & 0 & \beta_j & 0 & \beta_m & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & \gamma_j & 0 & \gamma_m \\ \gamma_i & \beta_i & \gamma_j & \beta_j & \gamma_m & \beta_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} \\ \{\varepsilon\} &= [B]\{d\} \quad \{\varepsilon\} = [B_i \quad B_j \quad B_m] \begin{Bmatrix} d_i \\ d_j \\ d_m \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2-18)$$

4. Mendefinisikan Matrix kekakuan dan equation

$$\{f\} = [K]\{d\} \quad (2-19)$$

Dari hasil penurunan rumus dengan parameter shape function, energy potensial, dan gaya yang bekerja pada material, sehingga didapatkan matrik [K]

$$[k] = \begin{bmatrix} [k_{ii}] & [k_{ij}] & [k_{im}] \\ [k_{ji}] & [k_{jj}] & [k_{jm}] \\ [k_{mi}] & [k_{mj}] & [k_{mm}] \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

Dimana masing-masing matrix $[k_{ii}]$ adalah matrik 2x2 yang didefinisikan

$$[k_{ii}] = [B_i]^T [D][B_i] tA \quad [k_{ij}] = [B_i]^T [D][B_j] tA \quad [k_{im}] = [B_i]^T [D][B_m] tA \quad (2-21)$$

Kemudian diperoleh matrik kekakuan dan persamaan

$$[B_i] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & 0 \\ 0 & \gamma_i \\ \gamma_i & \beta_i \end{bmatrix} \quad [B_j] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_j & 0 \\ 0 & \gamma_j \\ \gamma_j & \beta_j \end{bmatrix} \quad [B_m] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_m & 0 \\ 0 & \gamma_m \\ \gamma_m & \beta_m \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

5. Menggabungkan Persamaan Elemen dan Boundary Condition

Penggabungan akhir atau persamaan global dapat ditulis dalam persamaan matrix sebagai berikut

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (2-23)$$

imana $\{F\}$ adalah beban ekuifalen global nodal diperlohen dengan distribusi beban lumping dan elemen body force pada nodes dan $[K]$ adalah matrik kekakuan global. Sedangkan $\{d\}$ adalah total displacemen vector.

6. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

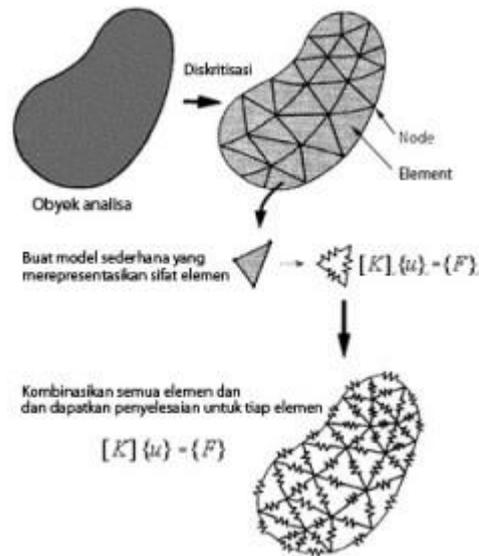
Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang dapat berupa tegangan maupun regangan, dengan menggunakan hubungan antara keduanya. Hubungan tegangan-regangan dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-24)$$

Hubungan tersebut dapat ditulis dalam bentuk :

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (2-25)$$

Langkah-langkah di atas secara singkat digambarkan pada ilustrasi berikut.



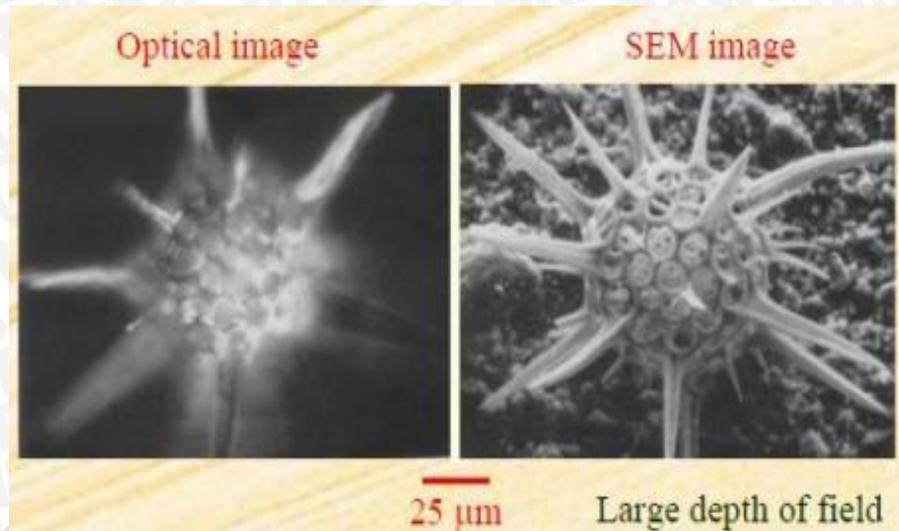
Gambar 2.10 Konsep Metode Elemen Hingga

Sumber: Cook, 2002

2.12 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah pemindaian menggunakan mikroskop elektron yang digunakan untuk studi detail obyek secara tiga dimensi. Mikroskop elektron adalah sebuah mikroskop yang mampu untuk melakukan pembesaran objek sampai 2 juta kali, yang menggunakan elektro statik dan elektro magnetik untuk mengontrol pencahayaan dan tampilan gambar serta memiliki kemampuan pembesaran objek serta resolusi yang jauh lebih bagus daripada mikroskop cahaya. Mikroskop elektron menggunakan jauh lebih banyak energi dan radiasi elektromagnetik yang lebih pendek dibandingkan mikroskop cahaya.

Elektron memiliki resolusi yang lebih tinggi daripada cahaya. Cahaya hanya mampu mencapai 200nm sedangkan elektron bisa mencapai resolusi sampai 0,1 – 0,2 nm. Pada gambar 2.8 menunjukkan perbandingan hasil gambar mikroskop cahaya dengan elektron.

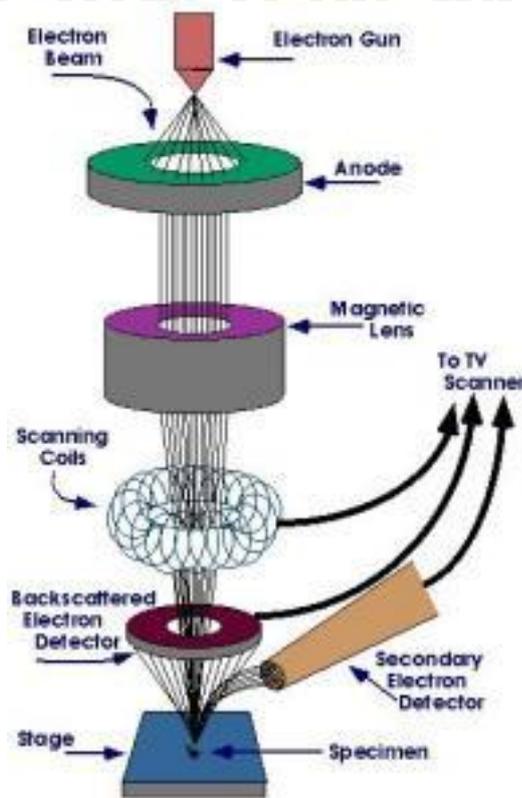


Gambar 2.11: Perbandingan Hasil Gambar Mikroskop Cahaya dan Elektron

Sumber : <http://materialcerdas.wordpress.com/teori-dasar/scanning-electron-microscopy/>

Pada sebuah mikroskop elektron terdapat berbagai macam komponen dan beberapa peralatan utama, antara lain:

1. Pistol elektron, biasanya berupa filamen yang terbuat dari unsur yang mudah melepas elektron misal tungsten.
2. Lensa untuk elektron, berupa lensa magnetis karena elektron yang bermuatan negatif dapat dibelokkan oleh medan magnet.
3. Sistem vakum, karena elektron sangat kecil dan ringan maka jika ada molekul udara yang lain elektron yang berjalan menuju sasaran akan terpecah oleh tumbukan sebelum mengenai sasaran sehingga menghilangkan molekul udara menjadi sangat penting.



Gambar 2.12: Skema *Scanning Electron Microscope*

Sumber : <http://materialcerdas.wordpress.com/teori-dasar/scanning-electron-microscopy>

Skema dari SEM di tunjukkan pada gambar 2.12 dimana prinsip kerja dari SEM adalah sebagai berikut:

1. Sebuah pistol elektron memproduksi sinar elektron dan dipercepat dengan anoda.
2. Lensa magnetik memfokuskan elektron menuju ke sampel.
3. Sinar elektron yang terfokus memindai (*scan*) keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai.
4. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor (CRT).

Cara terbentuknya gambar pada SEM berbeda dengan apa yang terjadi pada mikroskop optic dan TEM. Pada SEM, gambar dibuat berdasarkan deteksi elektron baru (elektron sekunder) atau elektron pantul yang muncul dari permukaan sampel ketika permukaan sampel tersebut dipindai dengan sinar elektron. Elektron sekunder atau elektron pantul yang terdeteksi selanjutnya diperkuat sinyalnya, kemudian besar

amplitudonya ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (*cathode ray tube*). Di layar CRT inilah gambar struktur obyek yang sudah diperbesar bisa dilihat. Pada proses operasinya, SEM tidak memerlukan sampel yang ditipiskan, sehingga bisa digunakan untuk melihat obyek dari sudut pandang 3 dimensi.

2.12 Software ABAQUS CAE 6.11

ABAQUS merupakan suatu *software* berbasis *finite element* dengan penyelesaian numerik yang dapat digunakan pada berbagai persoalan *engineering*.

Beberapa persoalan yang mampu diselesaikan meliputi:

1. Analisis struktur statis/dinamis baik linier atau bukan.
2. Fenomena elektromagnetik
3. Perpindahan panas dan mekanika fluida

Secara umum solusi metode elemen hingga dapat dibagi menjadi 3 bagian utama, yaitu:

1. *Preprocessing*

Adalah tahap pembuatan model fisik dari masalah yang akan diselesaikan dan membuat *input file* yang akan digunakan dalam simulasi nantinya. Dalam tahap ini ditentukan beberapa hal seperti:

- Menentukan tipe elemen dan material yang digunakan beserta *properties*-nya
- Menentukan *keypoint*, *lines*, *area* atau *volume*
- Menentukan beban yang bekerja pada material
- Menentukan kondisi batas (*boundary condition*)
- Melakukan *meshing* pada *lines*, *area* atau *volume* sesuai kebutuhan
- Menentukan jenis analisis yang digunakan
- Pembuatan *input file*

Pada tahap ini tingkat ketelitiannya disesuaikan dengan analisis dimensi yang digunakan. Semisal 1 dimensi, 2 dimensi, *axi-symmetric*, atau 3 dimensi.

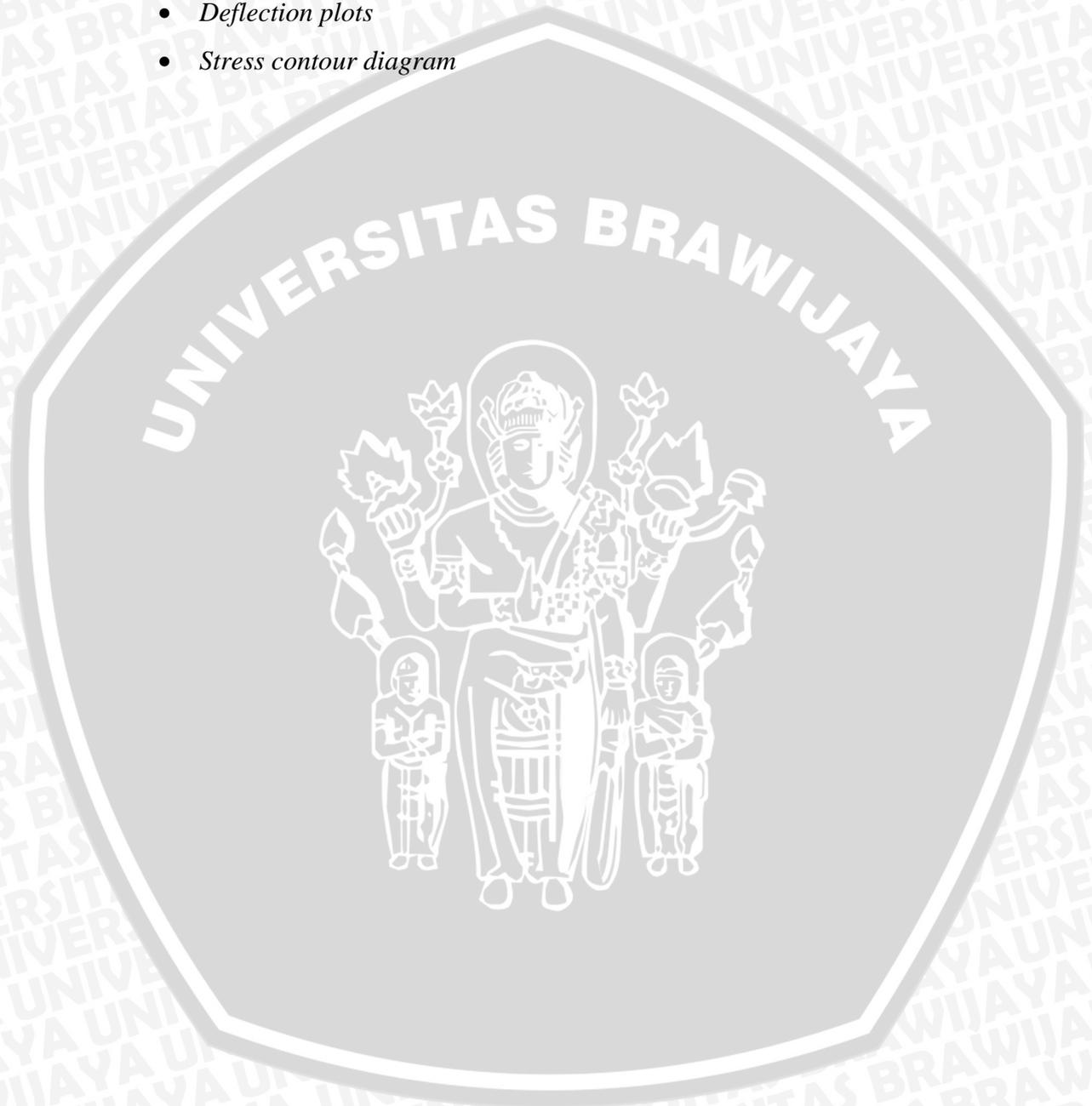
2. *Simulation*

Tahap dilakukannya perhitungan masalah numeris yang sudah didefinisikan dalam tahap *preprocessing*. Hasil perhitungan akan disimpan di dalam file biner yang siap diolah dalam tahap *postprocessing*.

3. *Postprocessing*

Tahap akhir dimana hasil *solving* (*running program*) bias dilihat. Pada tahap ini adabeberapa hal yang dapat kita amati, yaitu:

- Daftar dari perpindahan nodal
- Elemen gaya dan momen
- *Deflection plots*
- *Stress contour diagram*



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian menggunakan metode eksperimental nyata yaitu dengan melakukan pengujian terhadap pelat dengan menggunakan alat sampai pelat patah dan hasilnya akan diverifikasi dengan menggunakan metode simulasi dengan *software* berbasis *finite element* yaitu Abaqus CAE 6.11 untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada pelat.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian mengenai Perilaku *striation* pada penampang patahan pelat aluminium di sekitar daerah *stop drilled hole*, dilaksanakan pada rentang waktu Mei-Oktober mulai dari tahap konsultasi judul dan penelitian di laboratorium. Tempat penelitian dilakukan di Laboratorium Dinamik dan Studio Perancangan Rekayasa Sistem Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

3.3 Variabel Penelitian

Terdapat tiga variable dalam penelitian ini yaitu variable bebas, variable terikat, dan variable terkontrol. Adapun penjelasan lebih lanjut tentang ketiga variable akan di jelaskan di bawah.

3.3.1 Variabel Bebas

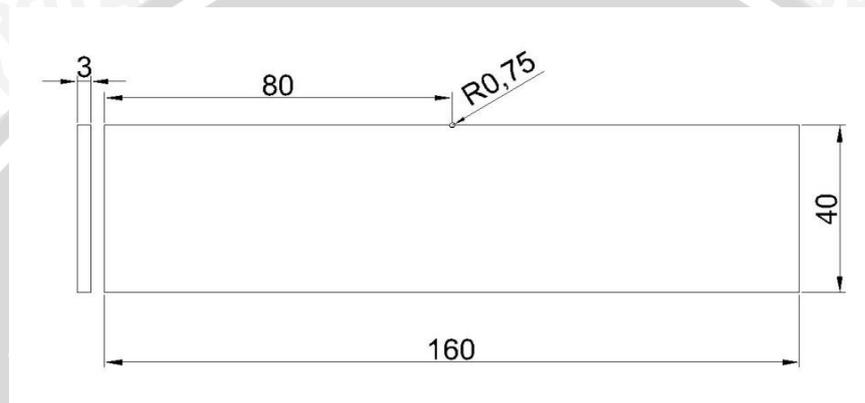
Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi nilai variabel yang terikat, yang besarnya di tentukan oleh peneliti dan harganya divariasikan yang mana ditujukan untuk mendapatkan hubungan antara variable bebas dan variable terikat dari objek penelitian. Variabel bebas dari penelitian ini adalah pembebanan yang digunakan adalah Max 25 MPa dan Min -25 MPa, R=-1 dan Max 37,5 MPa dan Min -25 MPa, R= -1,5.

3.3.2 Variabel Terikat

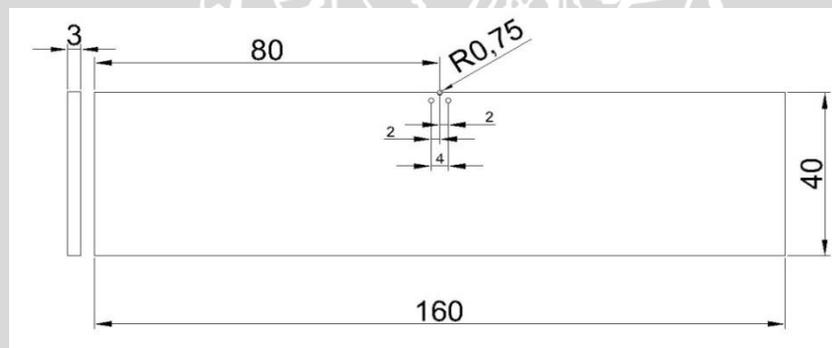
Variabel terikat merupakan variabel yang besarnya tergantung pada variable bebas yang diberikan. Adapun variable terikat dalam penelitian ini adalah adalah striasi yang terjadi pada penampang patah pelat aluminium.

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian. Variabel kontrol dalam penelitian ini. Variable terkontrol dari penelitian ini adalah pelat dengan material aluminium berukuran 160 x 40 mm dengan ketebalan 3 mm dengan inisiasi berupa *notch* dengan diameter 0,75 mm seperti pada gambar 3.1 dan menggunakan inisiasi retak berupa *notch* berdiameter 0,75 mm dengan *stop drilled hole* berdiameter 0,75 mm yang ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.1 Dimensi Pelat tanpa *stop drilled hole*



Gambar 3.2 Dimensi Pelat dengan tambahan *stop drilled hole*

3.4 Alat Yang Digunakan

Dalam penelitian ini terdapat beberapa alat yang akan digunakan:

1. PC

Processor : Intel(R) Core(TM) i7-3370 CPU @ 3.40GHz 3.39GHz

RAM : 16.0 GB (15.4 GB Usable)

Sytem type : 64-bit Operating System

2. Mesin uji *fatigue*



Gambar 3.3 Mesin Uji *Fatigue*

Spesifikasi

Merk : Servo Hydraulic Dynamic Testing Machine

Pembebanan maksimum $\pm 100\text{kN}$. Actuator dan bingkai beban dengan kepala silang untuk variabel ketinggian dasar antara 1260mm dan 61mm.

Actuator memiliki jangkauan $\pm 75\text{mm}$ dan load cell memiliki accelerometers terpisahkan untuk kompensasi efek massa inersia. A 40 l / min katup servo memberikan kinerja yang baik: di $\pm 0.005\text{mm}$ perpindahan $> 100\text{Hz}$ tergantung pada beban, untuk perpindahan $\pm 75\text{mm}$ sekitar 0.1Hz.

Perangkat lunak Matrix Gelombang memberikan pengumpulan data sinkron sampai 5kHz dan menawarkan sistem kontrol serbaguna melalui penggunaan program blok.

3. *Scanning Electron Microscope*

Spesifikasi:

- Merk Phenom Pro Dekstom SEM
- Range Perbesaran 20 - 100,000x

- Long-lifetime high-brightness source (CeB6)
- 5 kV and 10 kV acceleration voltages for outstanding high-resolution SEM images
- Pemuatan sampel waktu kurang dari 30 detik
- Full color navigation camera 20 – 120x magnification
- Ready to run all Pro Suite *software* applications



Gambar 3.4 *Scanning Electron Microscope*

3.5 Bahan Dan Komponen

Dalam studi ini material yang digunakan adalah Aluminium dengan sifat-sifat mekanik yang tercantum pada tabel 3.1 dibawah ini sebagai berikut :

Tabel 3.1 Sifat Mekanik Aluminium Murni

Properties	Besar
Density (x1000 kg/m ³)	2,785
Poisson's ratio	0,35
Young Modulus (GPa)	70
Maximum Tensile Strength (MPa)	145
Initial Yield Strength (MPa)	100
Hardening Constanta	310
Hardening Exponent	0,185
Derivatif DG/DT (Pa/C)	3,50e7
Derivatif DY/DP	0,0079
GruneisenCoefisien	2
Specific Heat (J/kg-K)	863

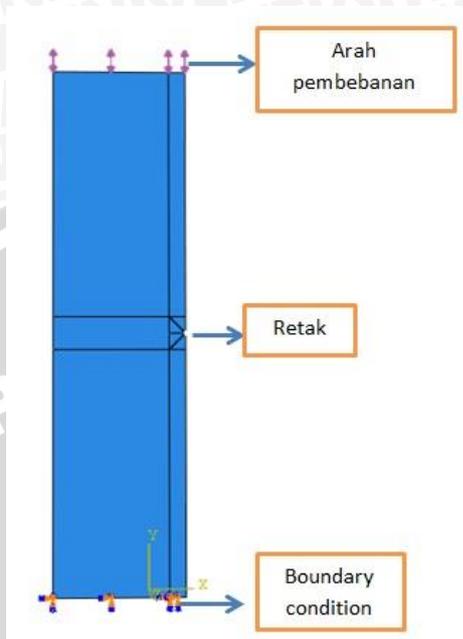
Sumber: Hatch, 1984

Pelat yang digunakan adalah jenis retak sisi (*edge cracked spesimen*). Karena dalam simulasi ini kondisi tegangannya diasumsikan *plain stress*, maka ketebalan dapat diabaikan atau konstan. Selanjutnya pelat diberi beban atau tegangan nominal tarik (σ).

Pemodelan pelat dilakukan dengan menggunakan pemodelan dengan *software* Abaqus CAE 6.11. Pemodelan pada simulasi ini menggunakan *meshing* otomatis. Variasi konfigurasi lubang yang digunakan untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada daerah disekitar ujung retak.

3.6 Pemodelan Spesimen

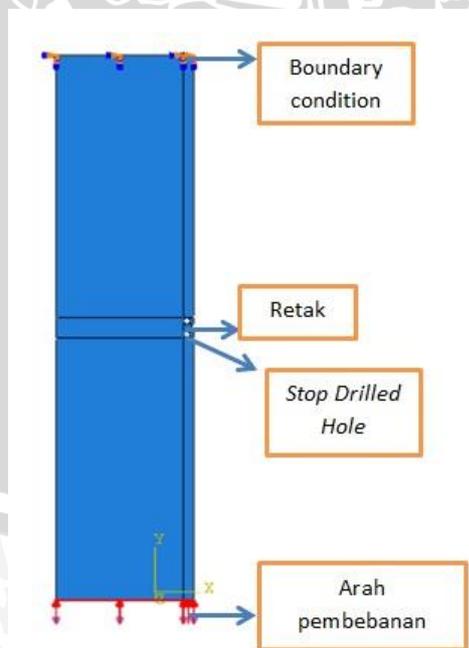
3.6.1 Model pelat menggunakan tanpa *Stop drilled hole*



Gambar 3.5 Model Pelat tanpa *Stop drilled hole*

Sumber: *Abaqus* CAE 6.11

3.6.2 Model pelat dengan *Stop drilled hole*



Gambar 3.6 Pelat dengan Penambahan *Stop drilled hole*

Sumber: *Abaqus* CAE 6.11

3.6.3 Pemodelan Material

Tahapan pemodelan material yang dilakukan:

1. Membuat geometri ukuran benda yang diinginkan.
2. Mendefinisikan material yang akan digunakan dan memasukkan parameter material.
 - Material modelkan secara bilinier isotropik hardening
 - Modulus Elastisitas bahan (E) = 73.100 MPa
 - Poisson ratio = 0,33
 - Tegangan Yield = 145 MPa
 - Tegangan Ultimate = 250 Mpa
3. Melakukan meshing manual dengan memberikan partisi pada elemen yang akan diambil datanya.
4. Menentukan kondisi batas (*boundary condition*).
5. Memberikan pembebanan secara quasi statik.
6. Melakukan analisa terhadap elemen yang dimasukkan.

3.7 Simulasi

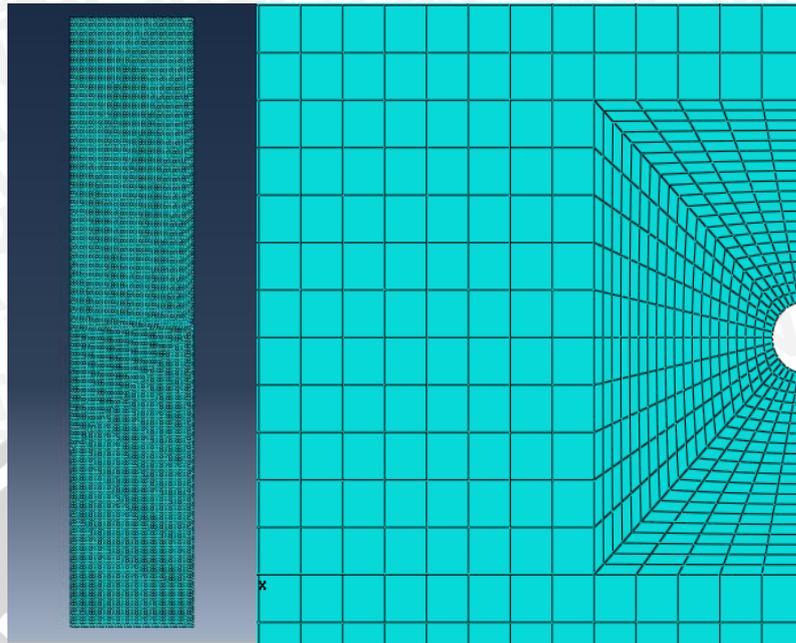
3.7.1 Pelat tanpa Stop Drilled Hole

a. Pembebanan

Pada pelat tanpa *Stop drilled hole* yang telah dimodelkan langsung dilakukan pembebanan berulang pada sisi samping pelat dan pemberian *fixed support* pada bagian bawah pelat dan pembebanan dilakukan pada bagian atas pelat dengan $R=-1$ ($S_{max}= 25$ MPa dan $S_{min}= -25$ MPa) dan $R=-1,5$ ($S_{max}= 37,5$ MPa dan $S_{min}= -25$ MPa).

b. Meshing

Meshing adalah proses membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil. Semakin kecil elemen yang dibentuk semakin besar pula persamaan yang harus diselesaikan oleh *software* sehingga beban komputer akan semakin besar namun nantinya hasil yang akan diperoleh juga semakin akurat.



Gambar 3.7 Meshing pelat tanpa Stop drilled hole

Sumber: Abaqus CAE 6.11

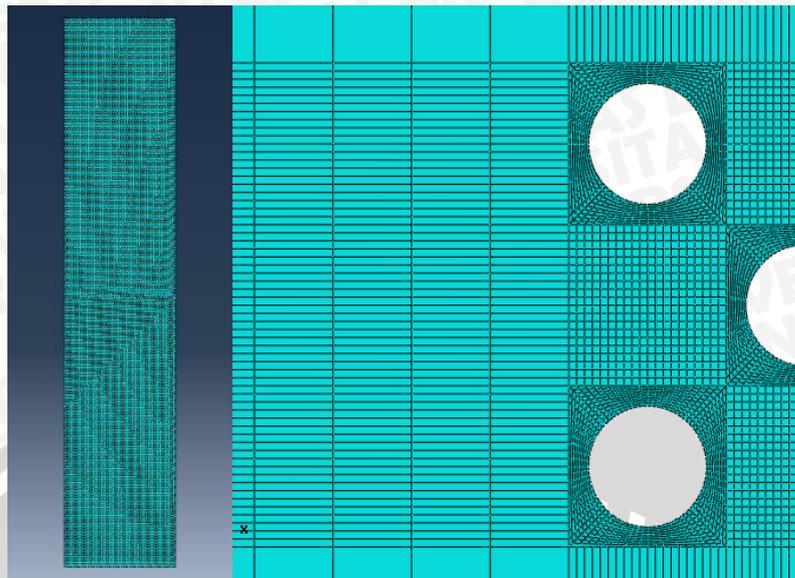
3.7.2 Pelat dengan Penambahan *Stop drilled hole*

a. Pembebanan

Pada tahap kedua dilakukan pembebanan setelah proses simulasi selesai. Pembebanan disini dilakukan dengan pemberian beban berulang pada sisi bawah pelat dan juga mengganti *fixed support* menjadi pada sisi atas pelat dengan $R=-1$ ($S_{max}= 25$ MPa dan $S_{min}= -25$ MPa) dan $R=-1,5$ ($S_{max}= 37,5$ MPa dan $S_{min}= -25$ MPa).

b. Meshing

Meshing adalah proses membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil. Semakin kecil elemen yang dibentuk semakin besar pula persamaan yang harus diselesaikan oleh *software* sehingga beban computer akan semakin besar namun nantinya hasil yang akan diperoleh juga semakin akurat.



Gambar 3.8 Meshing Pelat dengan Penambahan Stop drilled hole

Sumber: Abaqus CAE 6.11

3.8 Metode Analisis

3.8.1 Metode *Fractography* Mikro

Proses sebelum SEM, pelat dilapisi dengan ion sputtering yang digunakan untuk melapisi sampel pada pengujian menggunakan SEM agar menjadi konduktif dengan menggunakan emas (Au). Baru kemudian dilakukan pengamatan secara mikro menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang bertempat di Laboratorium Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya dengan posisi pengamatan seperti pada gambar 3.

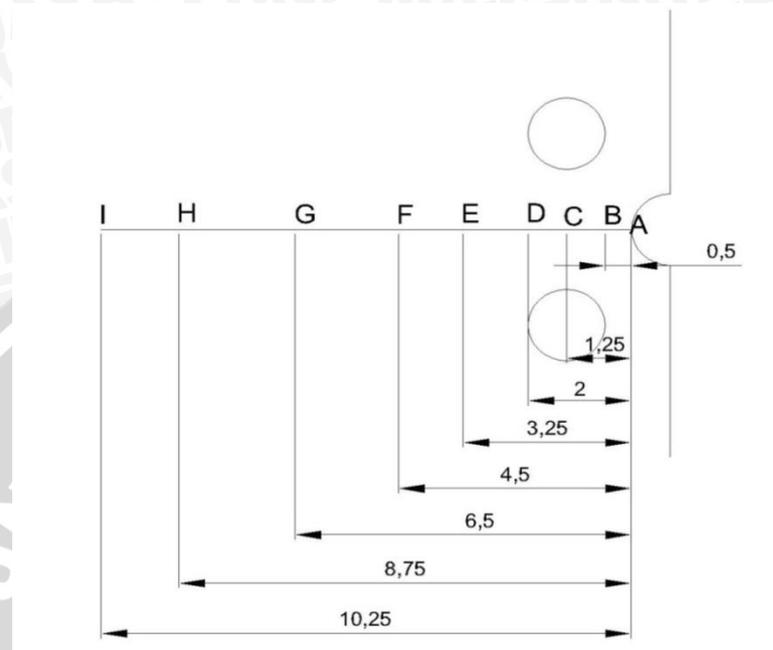
Pengambilan gambar secara mikro menggunakan SEM langkah-langkahnya sebagai berikut

- Pengambilan gambar patahan secara keseluruhan dibagi menjadi 2 bagian, bagian atas dan bagian bawah, karena keterbatasan kemampuan alat SEM untuk mencekam.
- Pengambilan gambar permukaan akibat retak
- Pengambilan gambar permukaan akibat beban siklus.

3.8.2. Simulasi

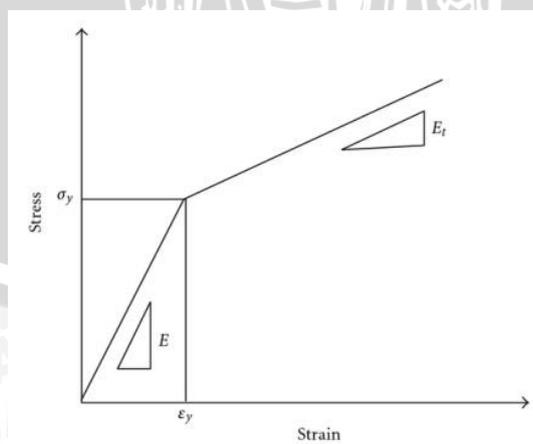
Penghitungan nilai distribusi tegangan dilakukan pada elemen yang dekat dengan lubang yang retakannya diasumsikan searah sumbu X dengan konfigurasi dan

jarak yang bervariasi. Kemudian diberikan pembebanan pada specimen dengan rasio perbandingan tegangan $R=-1$ dan $R=-1,5$. Pembagian elemen pada kedua pelat ditunjukkan pada gambar 3.9.



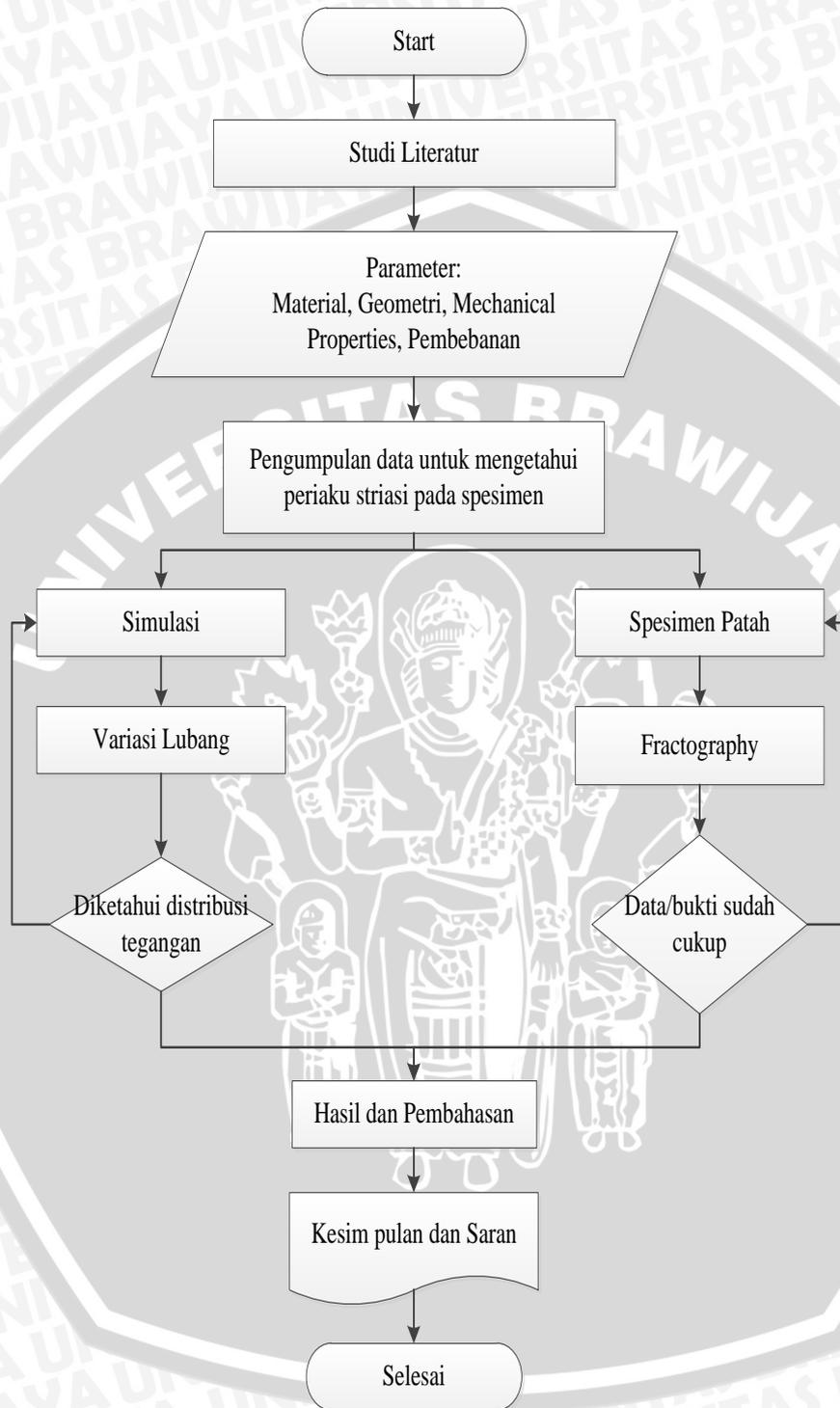
Gambar 3.9 Jarak dari lubang

Pengambilan data atau pengamatan dilakukan pada daerah elastis, akan tetapi pada pemodelannya secara bilinear isotropik hardening yang dilakukan sampai pada daerah plastis, karena untuk mengantisipasi siklus yang terjadi masuk kedalam daerah plastis. Pemodelan pelat aluminium pada daerah plastis dan elastis ditunjukkan pada gambar 3.10



Gambar 3.10 Kurva bilinear tegangan dan regangan

3.9 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.11 Flowchart rancangan penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

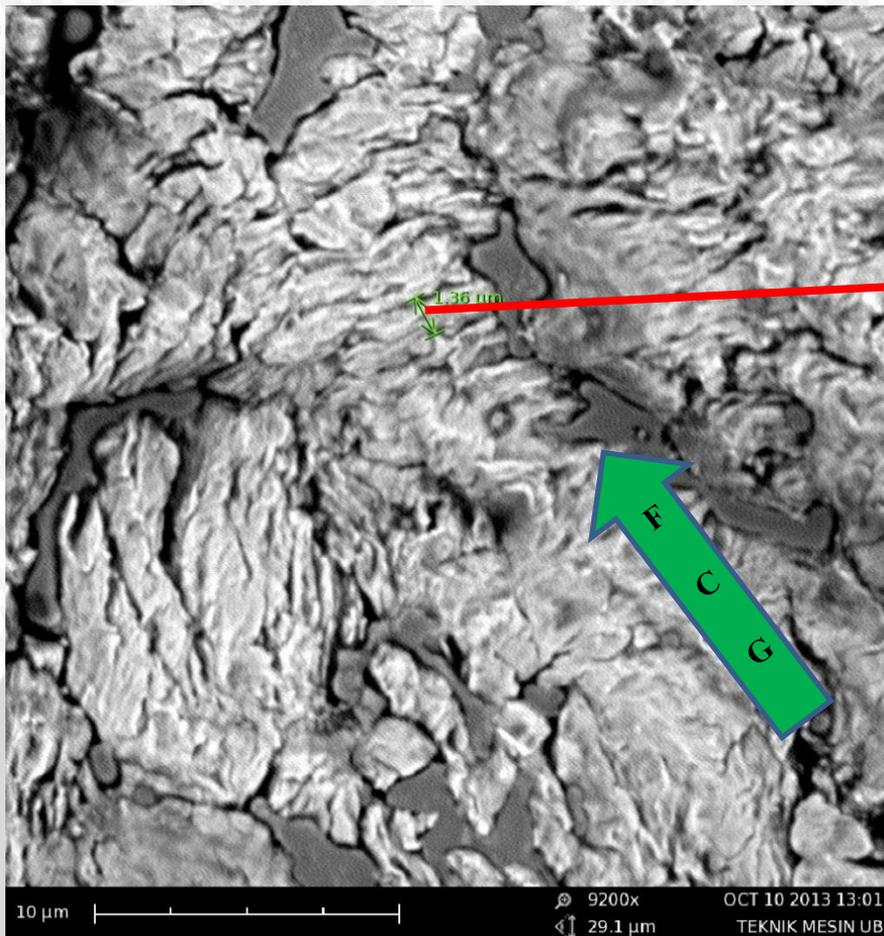
Hasil dalam kegiatan penelitian ini adalah pengumpulan bukti, data atau petunjuk yang dapat mengarahkan pada suatu analisa untuk mengetahui penyebab atau suatu perilaku yang menunjukkan suatu bentuk perubahan yang terjadi pada material. Data tersebut berupa gambar hasil simulasi, foto maupun informasi lain yang dapat memberikan keterangan yang lebih jelas, yang mana data atau informasi tersebut berkaitan dengan pelat yang diteliti.

Dari hasil didapatkan nilai-nilai parameter mengenai kondisi yang terjadi ketika pelat mendapatkan pembebanan dinamik, siklus yang tervisualisasikan sebagai dasar untuk pengolahan data pada penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan adalah pengamatan terhadap striasi yang terjadi pada daerah awal retak pada penampang patah, striasi ini dilihat dengan metode fraktrografi mikro dikarenakan ukuran striasi yang terbentuk akibat beban dinamis sangat kecil yakni sampai ukuran nano meter dengan bantuan SEM (*Scanning Elektron Microscop*).

4.1.2 Penampang Patah Pelat Aluminium tanpa *Stop drilled hole*

Pada pengamatan dengan menggunakan metode *fractography* mikro yang pertama ini diambil gambar pada pelat tanpa *stop drill hole*, titik pengambilan gambar adalah pada awal terjadinya retakan yang menunjukkan arah rambatan retak. Berbeda dengan *beach mark* yang dapat dilihat di mata telanjang, jejak satu siklus dapat dilihat hanya pada pembesaran tinggi, seperti pada optik atau lebih baik SEM. Jejak ini awalnya disebut pita slip oleh Thompson E Wadsworth dan kemudian *striations* oleh Nine E Kuhlmann-Wilsdorf. Model referensi dasar dalam *striations* adalah bahwa ujung retak terdeformasi plastis selama fase pemuatan retak dibuka oleh tegangan normal yang mengaktifkan slip plastis di ujung. Terlihat bahwa striasi pada pelat ini baru akan terlihat ketika perbesaran diatas 9000x. Pada titik pengambilan gambar ukuran striasi yang terjadi adalah 1.38 μm dihitung dari puncak ke puncak striasi.

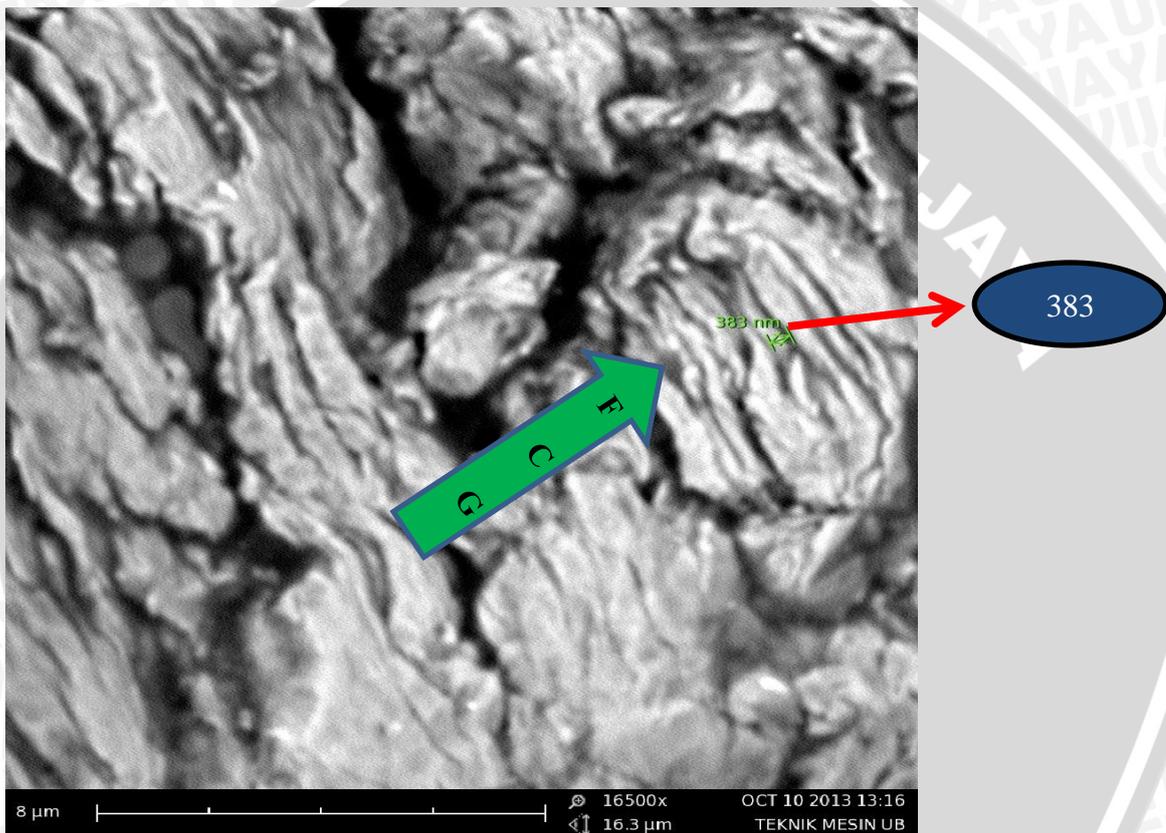


Gambar 4.1 Penampang Patah Pelat Tanpa *Stop drilled hole*

Pada gambar 4.1 menunjukkan plot penampang patahan yang terjadi pada pelat tanpa stop drill hole dengan $R=-1$, gambar tersebut diambil pada titik yang sudah ditetapkan pada metode penelitian. Gambar struktur mikro tersebut muncul tidak teratur seperti bentuk *streamline*, hal ini menunjukkan bahwa perambatan retak menurun pada transisi dari amplitudo tegangan yang tinggi ke yang lebih rendah. Dari gambar tersebut terlihat bahwa *failure* terjadi karena adanya perambatan retak (FCG/*Fatigue Grain Growth*) yang dimulai dari ujung daerah yang mengalami konsentrasi tegangan paling tinggi hingga pelat patah. Pada penampang patah ini ukuran striasi yang nampak adalah 1,38 mikro meter yang sudah diberikan ukuran pada foto hasil SEM. Pada analisis mikro yang pertama ini diambil gambar pada pelat tanpa *stop drilled hole*, titik pengambilan gambar adalah pada awal terjadinya retakan yang menunjukkan arah rambatan retak.

4.1.2 Penampang Patah Pelat Aluminium dengan *Stop drilled hole*

Pada titik pengambilan gambar pelat dengan diberikan *stop drilled hole* ukuran striasi sangat berbeda jauh dari pelat tanpa menggunakan *stop drilled hole*. Ukuran striasi yang terbentuk dari siklus pembebanan dengan nilai $R=-1,5$. Dapat terlihat dari SEM bahwa jarak antar puncak striasi pada pelat ini adalah 383 nano meter. Pengambilan gambar dengan SEM ini pada titik yang sama dengan pelat yang tidak menggunakan *stop drill hole*.



Gambar 4.2 Penampang Patah Pelat dengan *Stop drilled hole*

Pada penampang patahan dengan *stop drilled hole* yang ditunjukkan oleh gambar 4.2. Pengambilan gambar pada pelat ini titik yang diambil gambarnya sama tetapi perbesaran pada SEM berbeda, pada pelat ini perbesaran yang diberikan adalah 16500x. Perbesaran itu dilakukan karena pengamatan terhadap striasi yang baru terlihat pada perbesaran 16500x. Hal ini terjadi karena pengaruh dari pemberian *stop drilled hole* yang berfungsi memperlambat rambat retak. Striasi yang terlihat pada foto SEM adalah berukuran 383 nano meter yang sudah ditandai dengan ukuran pada gambar. Kita dapat melihat bahwa perbedaan nilai R dalam jarak striasi antara positif dan negatif

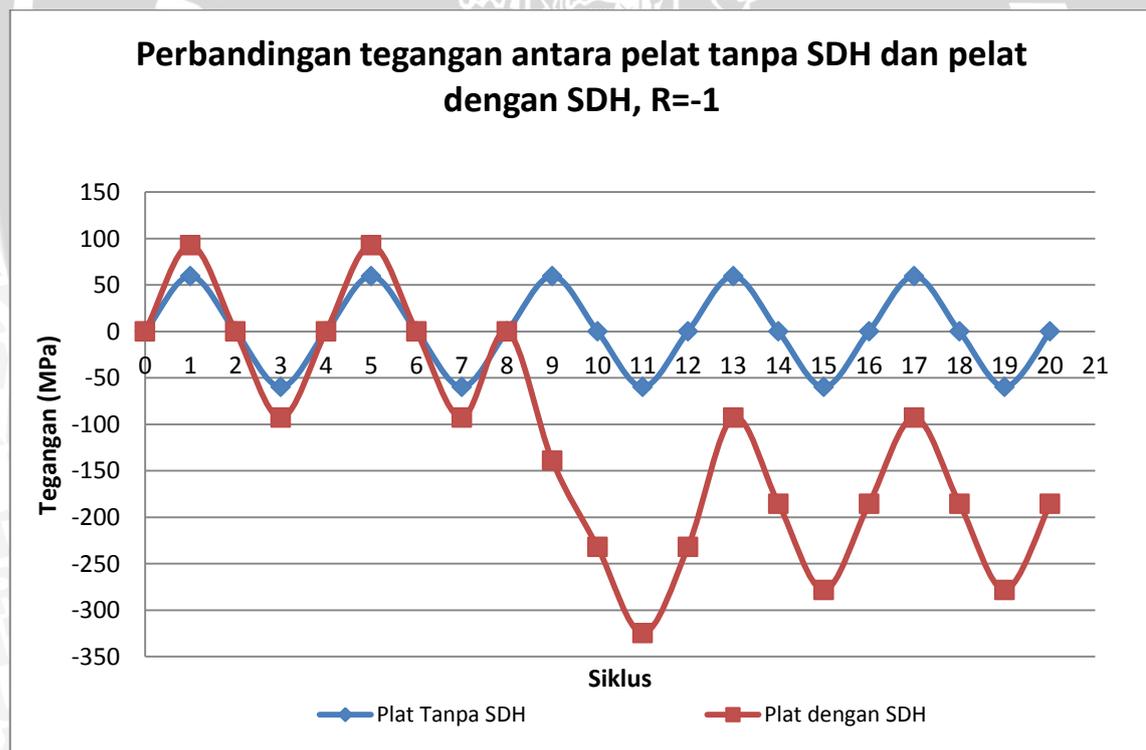
berkurang dengan semakin panjangnya retak. Pada kenyataannya, itu berkurang dengan semakin kecilnya jarak striasi. Hal ini membenarkan bahwa *stop drilled hole* adalah salah satu cara yang efektif untuk menghambat retak dengan mengurangi konsentrasi tegangan yang ditandai dengan semakin kecilnya jarak striasi yang terjadi.

Dari gambar 4.1 dan gambar 4.2 tersebut dapat diamati bahwa terjadi perbedaan striasi yang terjadi antara pelat tanpa *stop drilled hole* dan pelat dengan tambahan *stop drilled hole*. Striasi yang terdapat pada pelat tanpa *stop drilled hole* lebih besar dari pada ukuran striasi yang ada pada pelat dengan tambahan *stop drilled hole*.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Distribusi tegangan dengan $R = -1$

Bila distribusi tegangan di setiap siklus diplot dalam grafik perbandingan tegangan terhadap jumlah siklus, maka akan didapatkan hasil seperti pada gambar 4.1



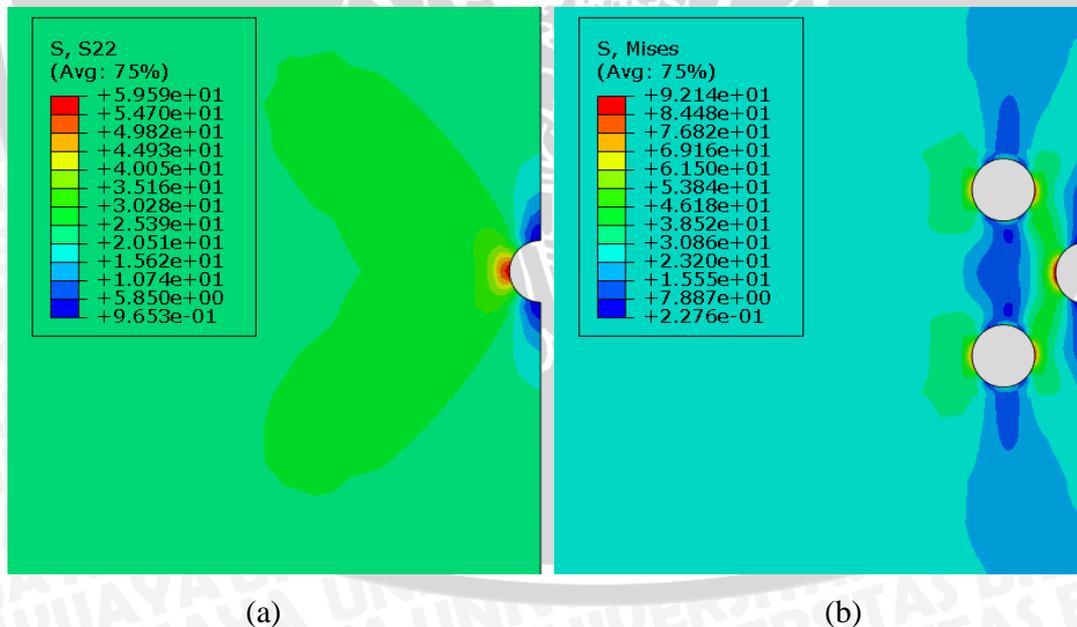
Gambar 4.3 Grafik perbandingan tegangan antara pelat tanpa *stop drilled hole* dan pelat dengan *stop drilled hole* dengan $R=-1$ pada ujung *notch*

Dapat dilihat bahwa pada siklus pembebanan awal dengan nilai $R=-1$ pada pelat tanpa pemberian *stop drilled hole* besar tegangan kecenderungannya tetap di setiap

siklusnya, dengan tegangan tertinggi 59.58 MPa. Sedangkan setelah pemberian *stop drilled hole* tegangan maksimumnya bertambah menjadi 92.14 MPa pada 2 siklus pertama, setelah itu pada siklus ke 3 sampai siklus berikutnya tegangan yang terjadi cenderung negatif.

Pada pelat tanpa *stop drilled hole* kecenderungannya sama pada tiap siklus. Dengan intensitas tegangan tarik dan tegangan tekan yang besar yang menyebabkan rambat retak semakin cepat sehingga menyebabkan jarak striasi yang terjadi akan semakin lebar. Tegangan akan semakin tinggi karena tidak adanya lubang penghambat retak juga menjadi salah satu penyebab rambatan retak semakin cepat. Sedangkan pada pelat dengan *stop drilled hole* pada awal siklus tegangan yang terjadi cukup besar kemudian akan cenderung turun pada siklus ke-3 hal ini karena pemberian *stop drilled hole* berpengaruh terhadap distribusi tegangan yang terjadi yang dapat mengurangi tegangan tertinggi pada siklus yang terjadi sesuai dengan konsep tujuan pemberian lubang penghambat retak yang bertujuan mengurangi konsentrasi tegangan pada ujung daerah yang fraktur sehingga memperlambat rambat retak.

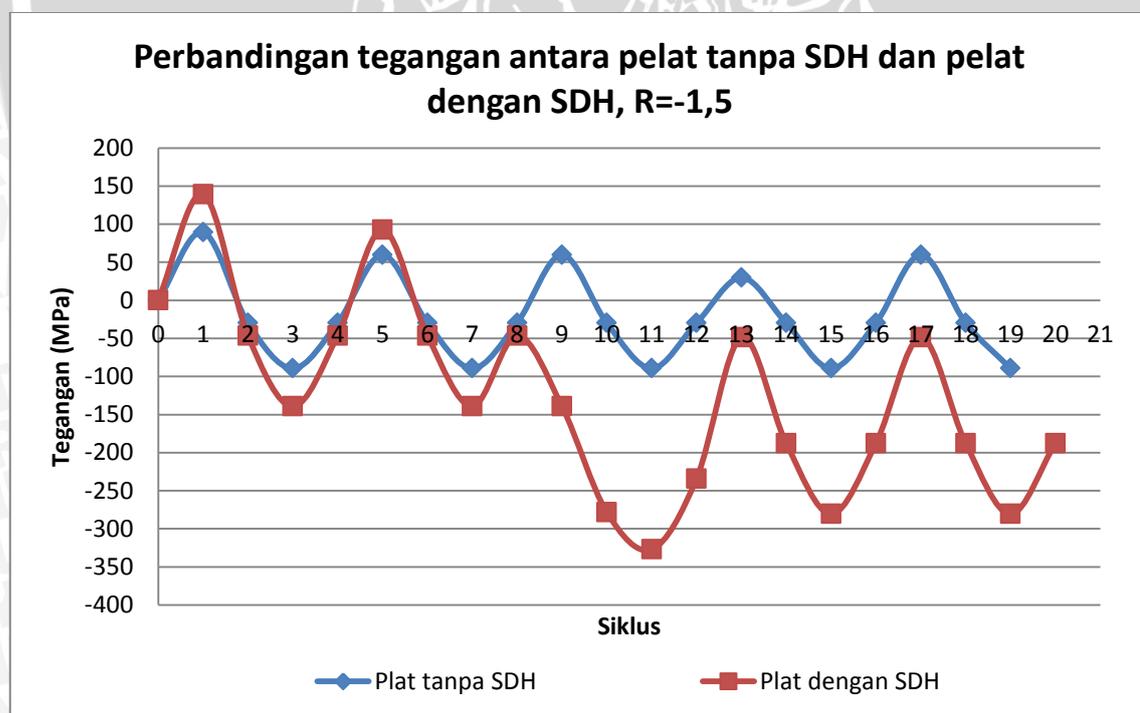
Dapat dilihat pada gambar 4.3 yang menunjukkan *contour* distribusi tegangan pada pelat tanpa *stop drilled hole* dan pelat dengan *stop drilled hole*.



Gambar 4.4 Kontur Distribusi tegangan ke arah Y pada ujung *notch* (a) pelat tanpa *stop drilled hole* (b) pelat dengan *stop drilled hole*

Setelah dilakukan pembebanan berulang dengan $S_{max} = 25$ dan $S_{min} = -25$ dan $R = -1$. Tegangan yang terjadi bervariasi mulai dari tegangan tertinggi dan terendah, dapat dilihat dari gambar tersebut terjadi konsentrasi tegangan pada daerah sekitar lubang. Warna merah pada gambar menunjukkan tegangan pada pelat tanpa *stop drilled hole* dengan nilai 59,58 MPa dan pada pelat dengan *stop drilled hole* 92,14 MPa pada sisi lubang. Setelah terjadi pemusatan tegangan disisi lubang pada kedua pelat, maka warna merah pada pelat tanpa *stop drilled hole* akan memudar menjadi warna hijau bila semakin menjauh dari lubang. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi semakin menurun, kemudian warna hijau akan berubah menjadi warna biru yang menunjukkan terjadi tegangan sisa tekan pada pelat. Dapat dilihat pada gambar 4.3 bahwa pemusatan tegangan sisa tekan berada pada daerah antara 2 *stop drilled hole* dan bagian atas dan bawah takik, yang pada saat sebelum pelat ditambah *stop drilled hole* mengalami tegangan sisa tarik dan akan menjauh dari lubang nilai tegangan sisa tekan menjadi semakin rendah.

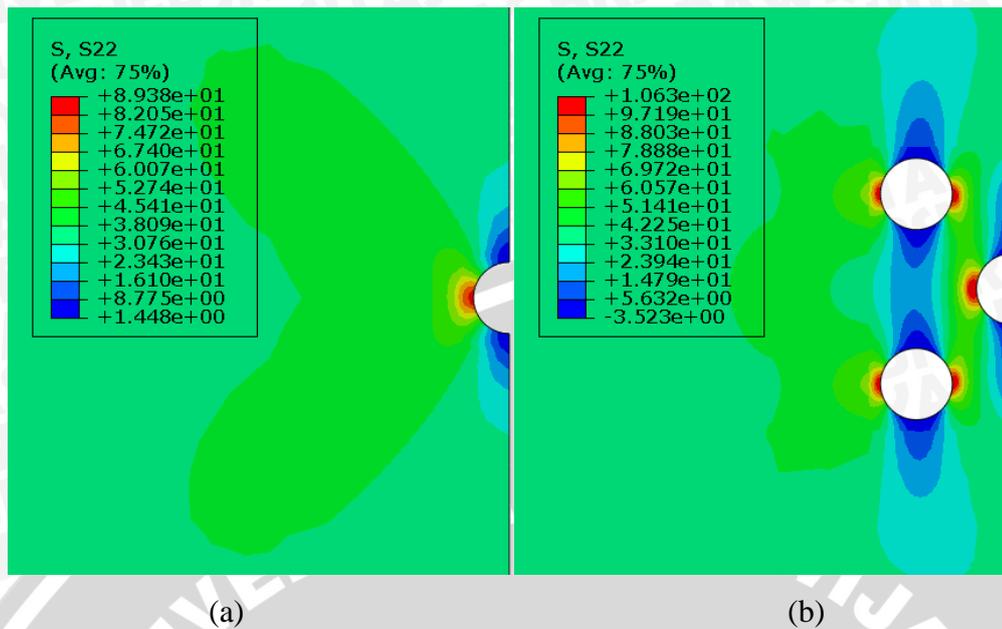
4.2.2 Distribusi tegangan dengan $R = -1,5$



Gambar 4.5 Grafik perbandingan tegangan antara pelat tanpa *stop drilled hole* dan pelat dengan *stop drilled hole* dengan $R = -1,5$ pada ujung *notch*

Pada gambar 4.3 grafik dengan rasio perbandingan tegangan $R=-1,5$ Menunjukkan kecenderungan yang hampir sama dengan distribusi tegangan pada plot grafik 4.1. pada pelat tanpa *stop drilled hole* tegangan tertinggi adalah 89.38 MPa, sedangkan pada pelat dengan penambahan *stop drilled hole* tegangan maksimumnya yaitu 139.11 MPa pada siklus ke-1 dan 2, kemudian tegangan pada siklus ke-3 sampai siklus berikutnya nilai tegangan yang dihasilkan cenderung negatif pula.

Pada pelat tanpa *stop drilled hole* kecenderungannya hampir sama pada tiap siklus. Dengan intensitas tegangan tarik dan tegangan tekan yang besar yang menyebabkan rambat retak semakin cepat sehingga menyebabkan jarak striasi yang terjadi juga semakin lebar. Tegangan yang semakin tinggi disebabkan karena tidak adanya lubang penghambat retak yang juga menjadi salah satu penyebab rambatan retak semakin cepat. Sedangkan pada pelat dengan *stop drilled hole* pada awal siklus tegangan yang terjadi lebih tinggi daripada pelat tanpa penambahan *stop drilled hole* kemudian akan cenderung turun pada siklus ke-3. Terlihat pada siklus pada pelat dengan *stop drilled hole* pada grafik terlihat pada step pertama nilai tegangan tarik dan tekan cenderung besar kemudian pada step selanjutnya tegangan tarik akan menurun dan tegangan tekan akan semakin besar yang menyebabkan terjadi penurunan kecepatan rambat retak karena intensitas tegangan tekan yang semakin besar, penurunan tegangan ini karenan terdapat *stop drilled hole* yang berfungsi mengurangi intensitas tegangan yang terjadi sehingga tegangan dapat terdistribusi ke bagian *hole*. Hal ini juga mendukung terhadap jarak striasi yang terjadi akan semakin kecil dan cenderung *closure*. Hal ini dapat dilihat pada kontur distribusi tegangan hasil simulasi pada gambar 4.6.



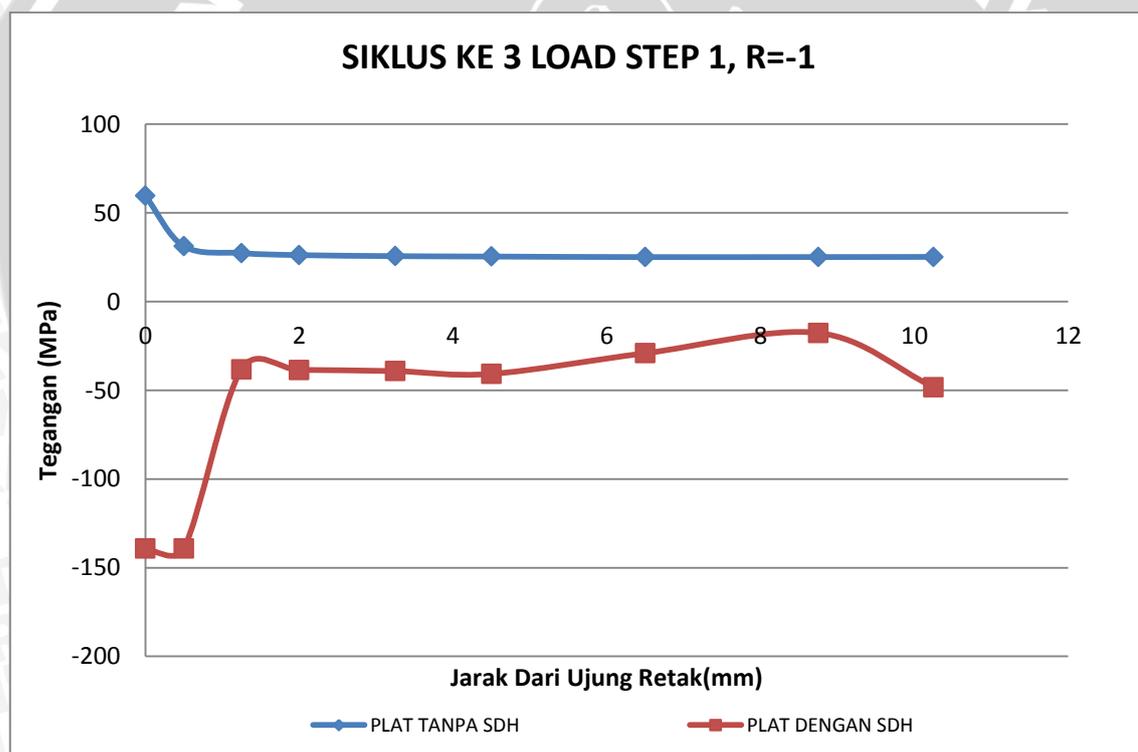
Gambar 4.6 Kontur distribusi tegangan ke arah Y pada ujung *notch* (a) pelat tanpa *stop drilled hole* (b) pelat dengan *stop drilled hole*

Setelah dilakukan pembebanan berulang dengan $S_{max} = 37,5$ dan $S_{min} = -25$ dan $R = -1,5$. Tegangan yang terjadi bervariasi mulai dari tegangan tertinggi dan terendah, dapat dilihat dari gambar tersebut terjadi konsentrasi tegangan pada daerah sekitar lubang. Warna merah pada gambar menunjukkan tegangan pada pelat tanpa *stop drilled hole* dengan nilai 89,38 MPa dan pada pelat dengan *stop drilled hole* 139,11 MPa pada sisi lubang, tegangan yang dihasilkan pada kedua pelat ini lebih tinggi dari kedua pelat dengan $R=-1$, perbedaan perbandingan rasio tegangan membuat tegangan yang dihasilkan lebih tinggi. Setelah terjadi pemusatan tegangan disisi lubang pada kedua pelat, maka warna merah pada pelat tanpa *stop drilled hole* akan memudar menjadi warna hijau bila semakin menjauh dari lubang. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi semakin menurun, kemudian warna hijau akan berubah menjadi warna biru yang menunjukkan terjadi tegangan sisa tekan pada pelat. Dapat dilihat pada gambar 4.3 bahwa pemusatan tegangan sisa tekan berada pada daerah antara 2 *stop drilled hole* dan bagian atas dan bawah takik, yang pada saat sebelum pelat ditambah *stop drilled hole* mengalami tegangan sisa tarik dan akan menjauh dari lubang nilai tegangan sisa tekan menjadi semakin rendah.

4.2.3 Evaluasi tegangan pada siklus ke-3

Perbedaan yang paling dasar dan mencolok pada grafik distribusi tegangan pada pelat tanpa penambahan *stop drilled hole* dan pelat dengan penambahan *stop drilled hole* dengan rasio perbandingan tegangan yang berbeda terletak pada siklus ke-3 terutama pada pelat dengan *stop drilled hole*, nilai yang pada awalnya positif pada puncak amplitudo berubah menjadi negatif pada nilai puncak. Oleh karena itu perlu analisis lebih lanjut pada tiap elemen pada pelat untuk mengetahui perilaku tersebut. Sebelum dilakukan pengambilan data terlebih dahulu ditetapkan beberapa elemen untuk dianalisis yang di tunjukkan pada metodologi penelitian gambar 3.9.

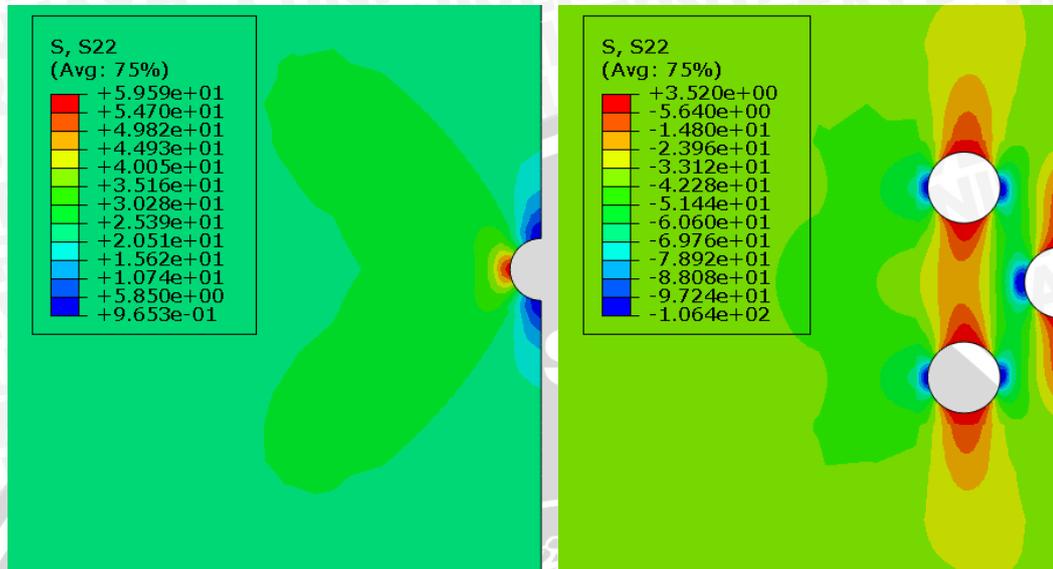
Dari hasil plot grafik pada siklus ke-3 pada kedua pelat dengan perbedaan nilai rasio tegangan, yang ditunjukkan oleh grafik pada load step-1 pada gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Grafik siklus ke-3 load step 1

Tegangan pada load step 1 pada pelat tanpa *stop drilled hole* yaitu 59.58 MPa kemudian akan turun kemudian cenderung konstan, kemudian pada pelat dengan tambahan *stop drilled hole* didapat tegangan pada load step 1 yaitu -139.11 MPa

kemudian akan naik dan kecenderungannya bervariasi namun tetap pada nilai negatif. Dengan perbandingan rasio tegangan yang sama terjadi perbedaan pada load step 1.

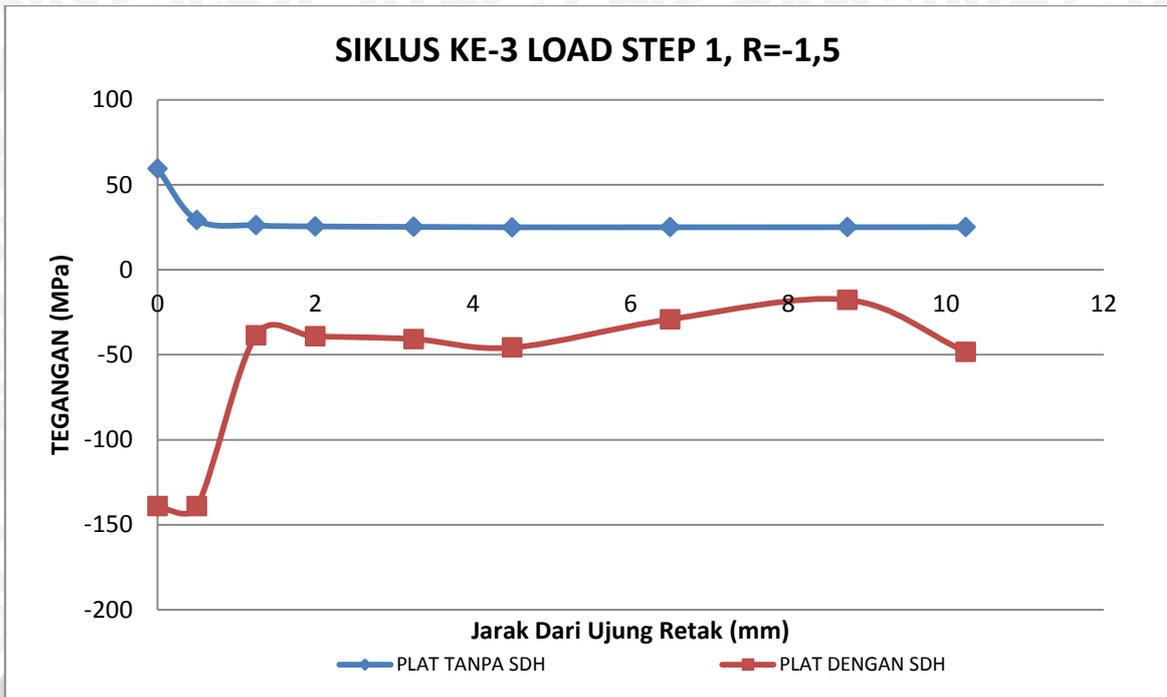


(a)

(b)

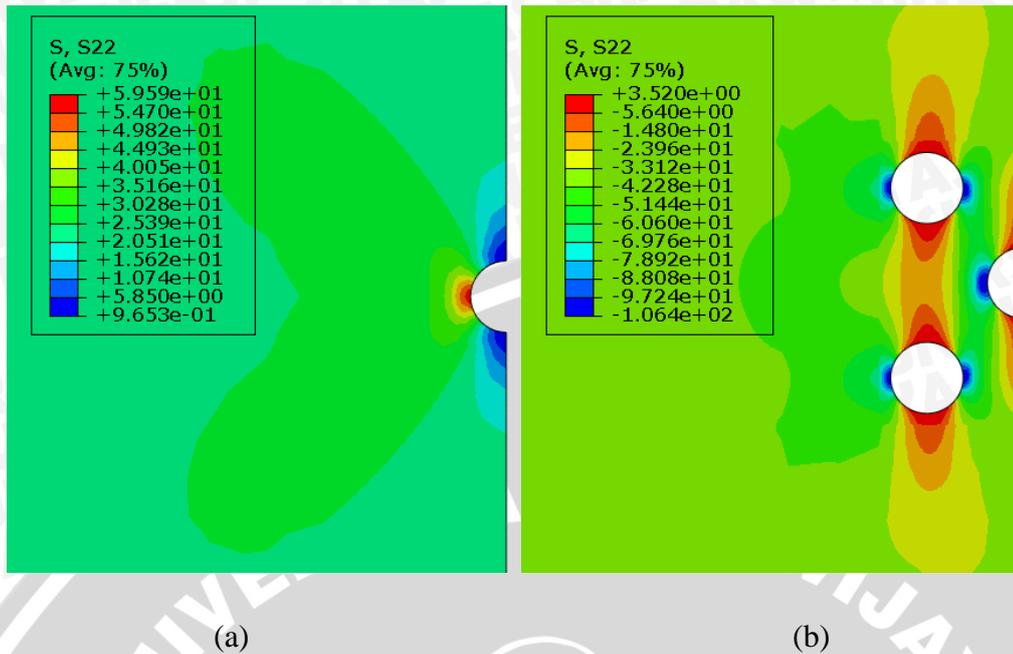
Gambar 4.8 Kontur distribusi tegangan ke arah Y siklus ke-3 *load step* 1(a) pelat tanpa *stop drilled hole* (b) pelat dengan *stop drilled hole*

Dapat dilihat bahwa pada kontur distribusi tegangan pada kedua pelat. Pada pelat tanpa *stop drilled hole* terjadi konsentrasi tegangan yang tinggi pada daerah yang dekat dengan lubang berupa tegangan tarik, kemudian pada pelat dengan *stop drilled hole* daerah dekat lubang tegangan yang dihasilkan berupa tegangan tarik yang ditandai dengan warna biru dan nilai yang negatif.



Gambar 4.9 Grafik siklus ke-3 load step 1

Hal yang sama dengan gambar 4.7, pada gambar 4.8 dengan nilai perbandingan rasio tegangan di siklus ke-3 pada load step 1 pada pelat tanpa *stop drilled hole* yaitu 59.58 MPa akan turun kemudian cenderung konstan, kemudian pada pelat dengan tambahan *stop drilled hole* didapat tegangan pada load step 1 yaitu -139.11 MPa kemudian akan naik dan kecenderungannya bervariasi namun tetap pada nilai negatif. Dengan perbandingan rasio tegangan yang sama terjadi perbedaan pada load step 1. Sedangkan pada siklus 1 dan 2 nilai distribusi tegangan sangat tinggi dan pada bukit amplitudo siklus ke-3 terjadi perubahan tegangan. Hal ini disebabkan karena terdapat penambahan *stop drilled hole* yang menyebabkan terjadi perbedaan distribusi tegangan yang terjadi disekitar lubang. Ini menunjukkan bahwa pengaruh penambahan *stop drilled hole* baru akan terlihat pada siklus ke-3 sampai siklus dinama pelat tersebut patah.



Gambar 4.10 Kontur distribusi tegangan ke arah Y siklus ke-3 *load step* 1(a) pelat tanpa *stop drilled hole* (b) pelat dengan *stop drilled hole*

Dapat dilihat bahwa pada kontur distribusi tegangan pada kedua pelat dengan rasio tegangan -1,5. Pada pelat tanpa *stop drilled hole* terjadi konsentrasi tegangan yang tinggi pada daerah yang dekat dengan lubang berupa tegangan tarik, kemudian pada pelat dengan *stop drilled hole* daerah dekat lubang tegangan yang dihasilkan berupa tegangan tarik yang ditandai dengan warna biru dan nilai yang negatif. Nilai tegangan yang bernilai negatif mengakibatkan pelat cenderung *closure* yang menyebabkan terjadinya penurunan rambat retak dan ukuran striasi yang lebih kecil.

Penyebab meningkatnya nilai ini adalah pembebanan yang diberikan dengan rasio tegangan -1,5. Perbedaan tegangan maksimum menyebabkan distribusi tegangan menjadi berbeda. Perbedaan distribusi tegangan yang terlihat dari grafik diketahui pada step load pertama tegangan yang dihasilkan oleh rasio tegangan -1,5 lebih tinggi daripada nilai rasio tegangan -1 dan akan cenderung turun kemudian konstan. Nilai $R=-1,5$ menyebabkan retak lebih cepat merambat dan ukuran striasi akan cenderung lebih lebar. Pada hasil eksperimen dengan menggunakan $R=-1$ fraktur yang terjadi menunjukkan striasi dengan ukuran $1,36 \mu\text{m}$ dan pada pembebanan dengan menggunakan $R=-1,5$ maka retak akan lebih cepat merambat dan ukuran striasi akan lebih lebar.

Konsentrasi tegangan dan deformasi pada daerah tersebut menimbulkan potensi untuk terjadinya retak. Hal ini sesuai dengan permukaan patahan yang terjadi pada daerah alur tersebut. Meskipun tegangan maksimum pada daerah konsentrasi tegangan lebih rendah daripada kekuatan material yaitu 260 MPa pada daerah konsentrasi tegangan dibanding 59.58 MPa pada pelat tanpa menggunakan *stop drilled hole* sedangkan pada pelat dengan *stop drilled hole* -139,11 MPa dengan rasio tegangan sama dengan -1. Sedangkan pada pelat tanpa *stop drilled hole* 89.38 MPa, kemudian pada pelat dengan menggunakan *stop drilled hole* tegangan juga lebih rendah yakni -139.11 MPa dengan $R=-1,5$.

Diketahui bahwa retak *fatigue* terjadi dengan diawali pada daerah yang mudah mengalami slip atau terjadi deformasi plastis. Daerah yang mudah terjadi deformasi plastis adalah daerah yang menerima intensitas tegangan yang tinggi sehingga menyebabkan terjadinya deformasi plastis atau pada daerah yang mempunyai kekuatan lebih rendah daripada daerah lain sehingga daerah tersebut akan relatif mudah slip dan selanjutnya akan memicu retak mikro sebelum menjadi retak yang merambat. Hal ini karena setiap pertambahan panjang 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. Secara umum, konfigurasi lubang di sekitar ujung retak akan mengakibatkan interaksi tegangan yang melibatkan tegangan di ujung retak dan sisi lubang tersebut.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil yang didapat pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa Perilaku ukuran jarak antar puncak striasi yang terjadi pada pelat aluminium tanpa *stop drilled hole* lebih besar daripada pelat dengan tambahan *stop drilled hole*. *Stop drilled hole* dapat mengurangi intensitas tegangan siklus yang dapat mengurangi cepat rambat retak sehingga striasi yang merupakan tanda terjadinya fraktur yang berakibat retak merambat pada pelat dengan tambahan *stop drilled hole* ukurannya lebih kecil daripada pelat yang tidak diberi *stop drilled hole*. Dengan adanya *stop drilled hole*, tegangan yang berada di ujung takik memiliki nilai negatif (tegangan tekan) setelah siklus ke-3.

5.2 Saran

1. Metode *stop drilled hole* sangat disarankan untuk metode menghambat retak pada pelat atau konstruksi yang mengalami fraktur sebelum dilakukan perbaikan secara total.
2. Pada penelitian ini hanya terfokus pada Rasio tegangan -1 dan -1,5. Peneliti selanjutnya dapat mengamati striasi yang terjadi dengan rasio tegangan selain pada penelitian ini.
3. Striasi yang diamati pada penelitian ini terbatas pada fraktur dari pemberian lubang tambahan (*stop drilled hole*). Pada penelitian selanjutnya dapat pula diamati striasi yang terjadi pada metode penghambat retak selain menggunakan *stop drilled hole*.

DAFTAR PUSTAKA

Bannantine, Julie A; Jess J. Comer; James L. Handrock. 1990, "Fundamental of Metal *Fatigue Analysis*", New Jersey: Prentice—Hall, Inc.

Broek, David, 1982, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", USA:Kluwer Boston.Inc

Bretz, P.E. *et al.* 1984. "Fatigue Crack Growth Behaviour of 7XXX Aluminum Alloys under Simple Variable Amplitude Loading." J. Stanford (Ed). *Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium*. ASTM STP 833. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Cook. Robert, Malkus. David, Plesha. Michael, Witt. Robert. 2002. "Concept and Applications of finite Element Analysis". Denver : John Wiley & Sons.

Dieter, G.E., 1988, "Mechanical metallurgy", SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.

E.Hatch, 1984 "Aluminium - Properties and Physical Metallurgy", American Society for Metals, Ohio: Metals Park. ISBN 0-87179-176-6

Hoeppner, D.W., 1996, "Industrial Significance of *Fatigue Problems*", ASM Handbook, *Fatigue and Fracture*, vol. 19, p 1, 1996

Ling MR, Schijve J. Fractographic analysis of crack growth and shear lip development under simple variable-amplitude loading. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 1990;13(5):443–56.

P, Anindito, 2010, "Evaluasi Faktor Intensitas Tegangan Pada Ujung Retak dengan Lubang Penghambat Rambat Retak" *Jurnal Rekayasa Mesin* Vol.1, No. 1 Tahun 2010 : 1-7

Ralph I, Stephen, *et al.* 2000, "Metal *Fatigue In Engineering*" Canada: Jhon Willey & Sons. Inc

Sarchamy, *et al.* 1998. *Effect of Periodic Tensile Overload on Fatigue Crack Behaviour in 2024 – T351 Alloy in an Aggressive Enviroment.*

Shanyavskiy, A.A ; Burchenkova, L.M. 2011. *Mechanism for fatigue striations as formed under variable negative R-ratio in Al-based structural alloys*. International Journal of Fatigue 50 (2013) 47–56

Suresh, S., 1988, “*Fatigue of materials*, 2nd edition”, Cambridge university press, ISBN 0-521-57847-7.

Tsukuda, H. *et al.* 1996. ”Transient *Fatigue* Crack Growth Behaviour Following Single Overloads at High Stress Ratios.” *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 19 (7): 879 – 891.

W, Bestenbostel 2010 “The Appearance Of *Fatigue Striations* In The SEM”, Munich, Germany EADS Innovation Works 81663

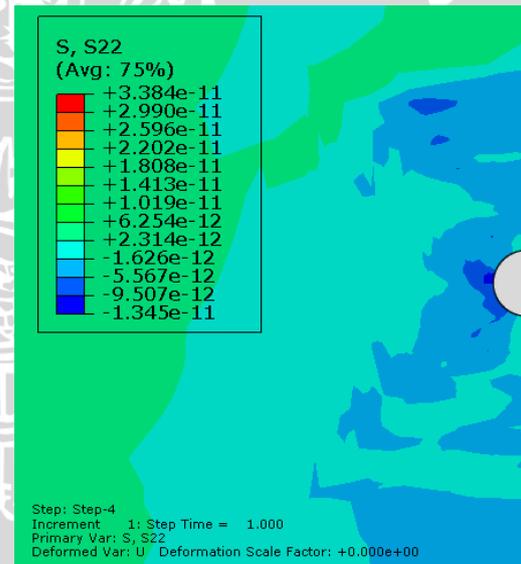
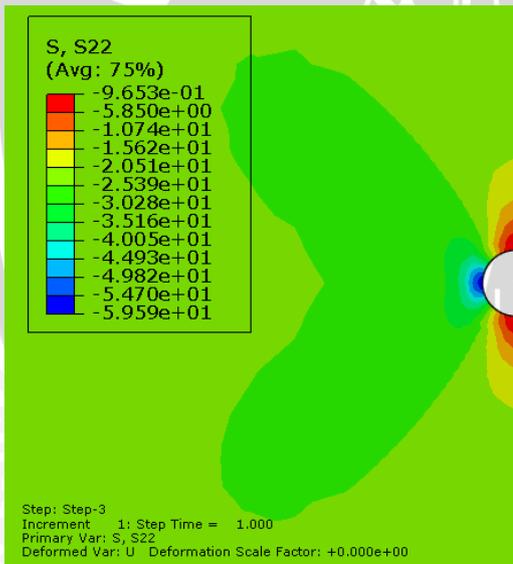
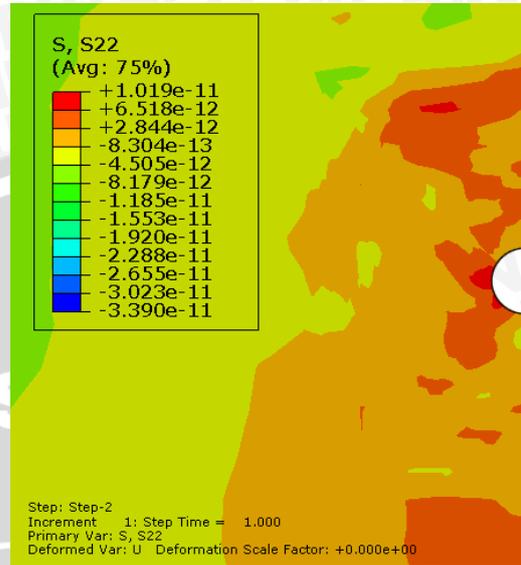
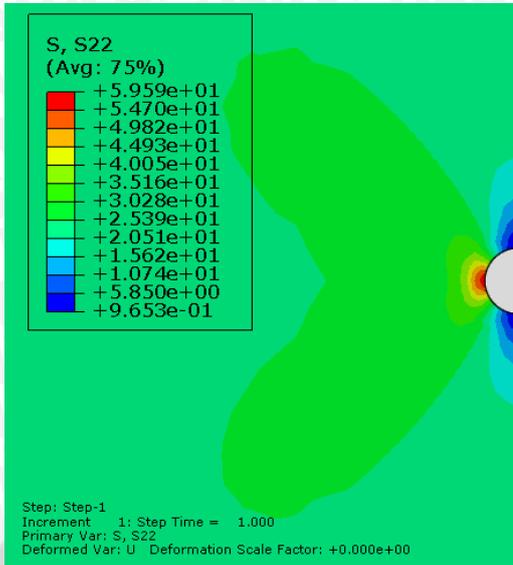
Y. Murakami and K.J. Miller., 2007, “What is *fatigue* damage? A view point from the observation of low cycle *fatigue*”, *International journal of fatigue*, 27 (2007) pp. 991-1005

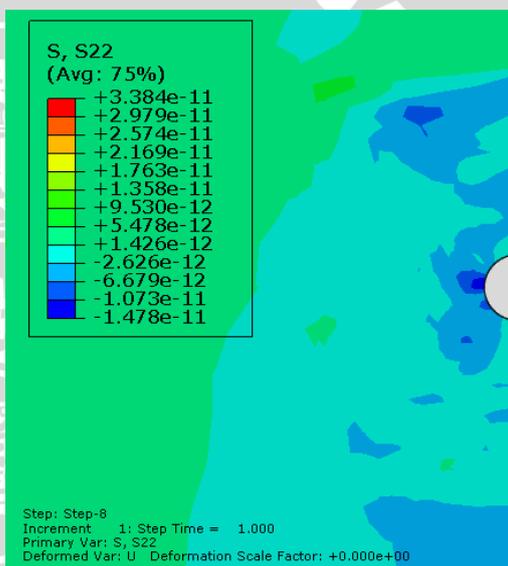
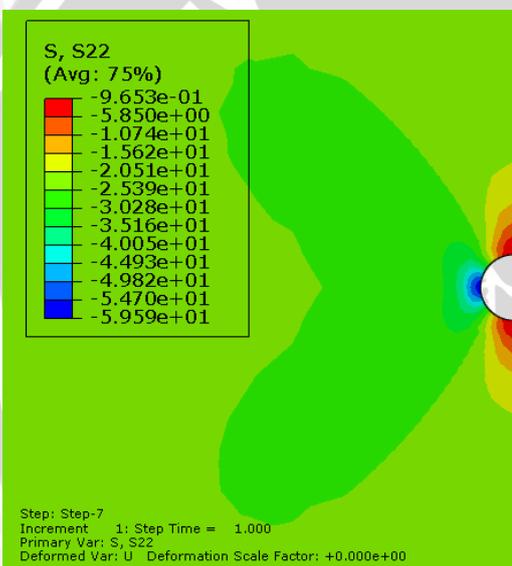
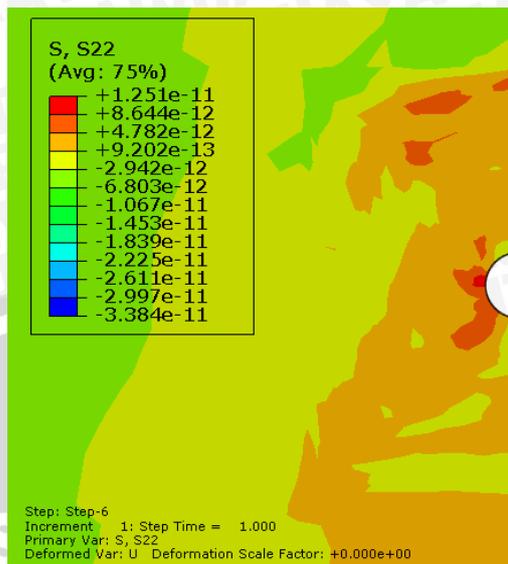
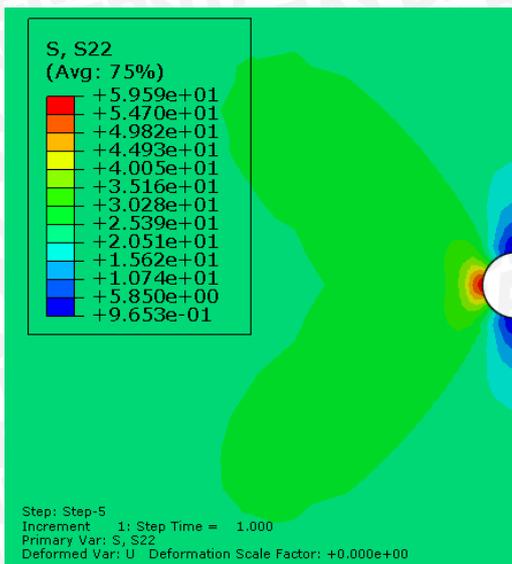
<http://materialcerdas.wordpress.com/teori-dasar/scanning-electron-microscopy/> (diakses pada tanggal 21 Mei 2013)

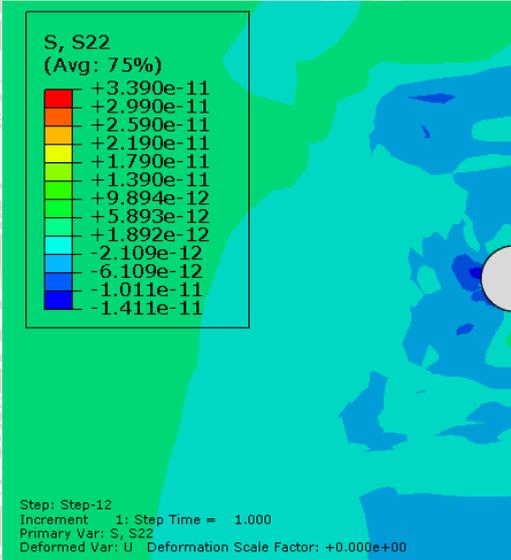
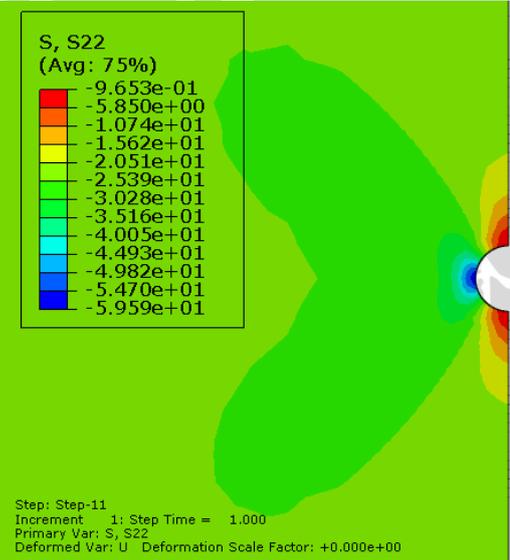
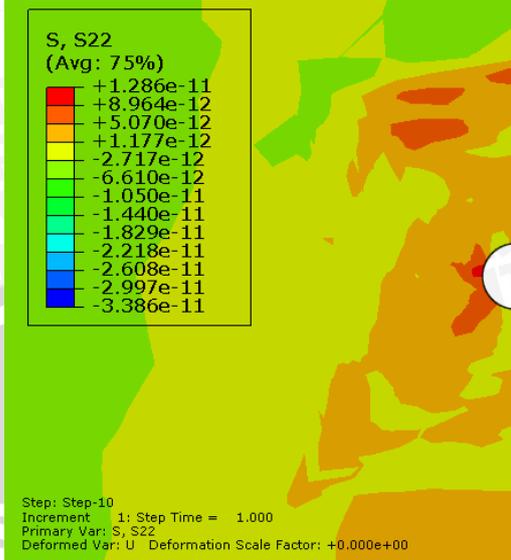
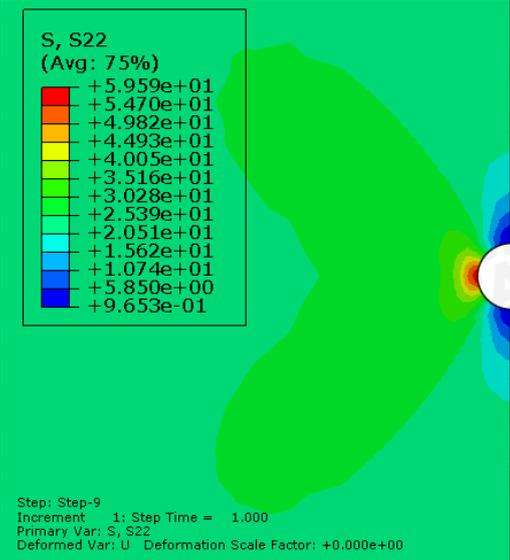


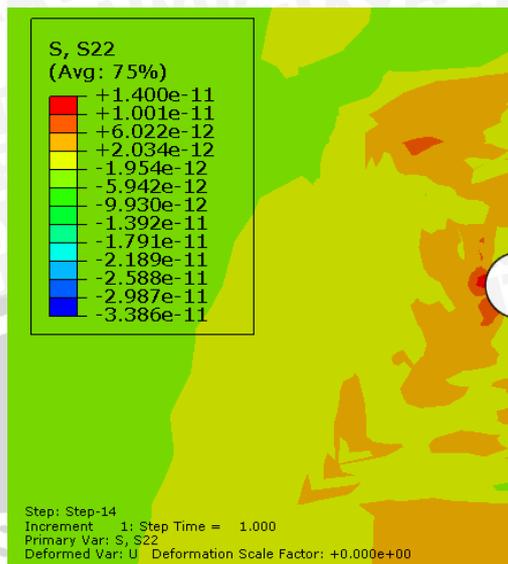
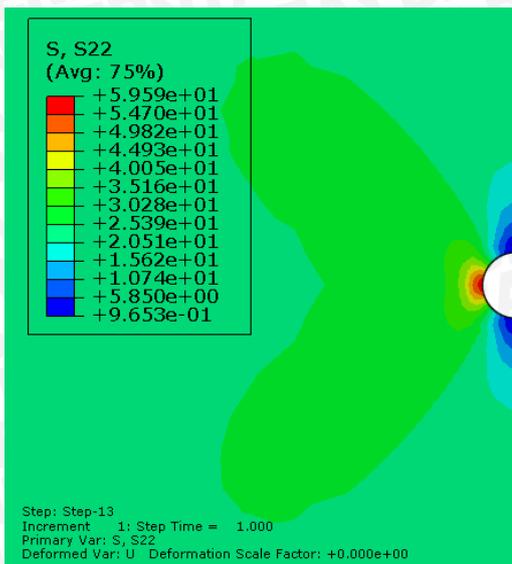
LAMPIRAN

Kontur pelat tanpa stop drilled hole dengan R=-1

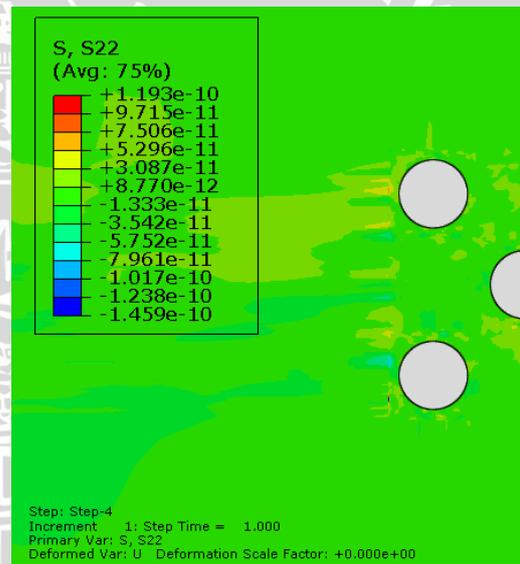
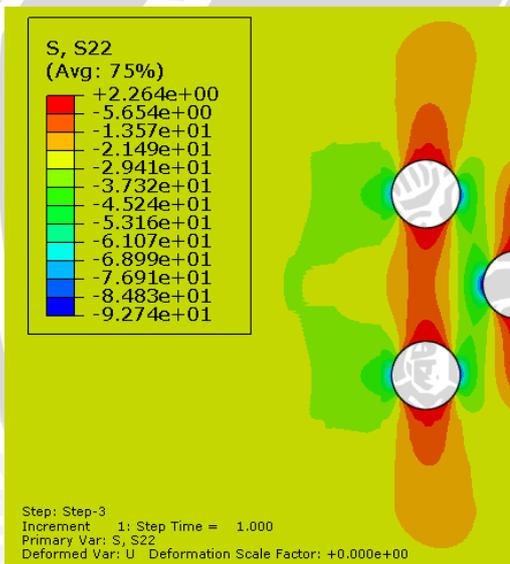
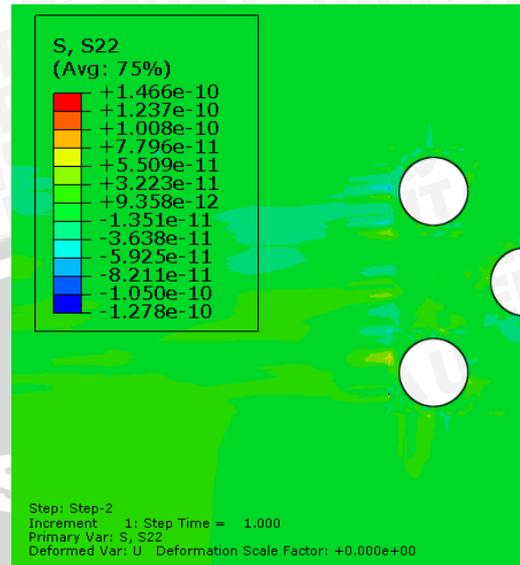
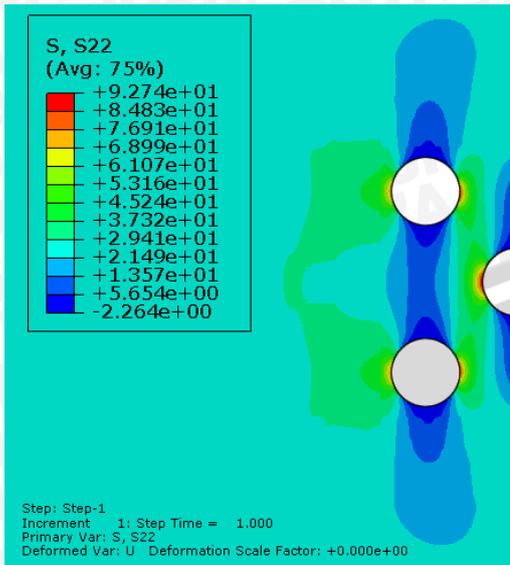


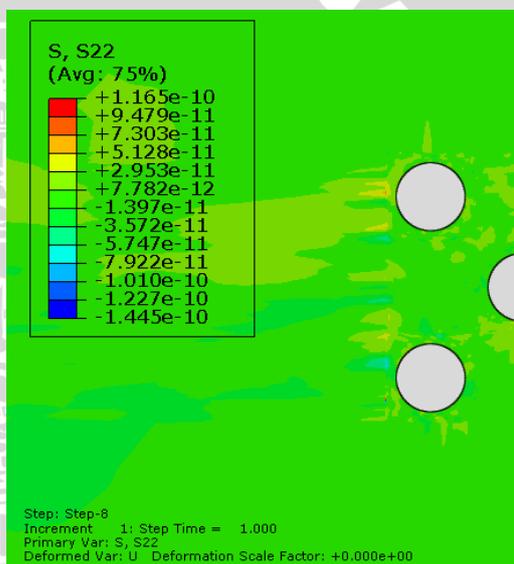
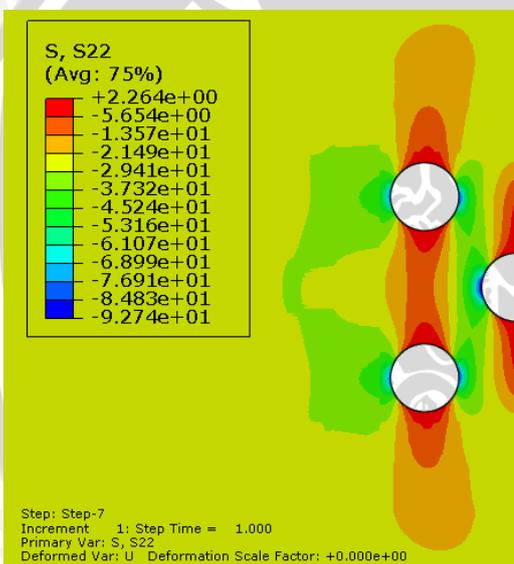
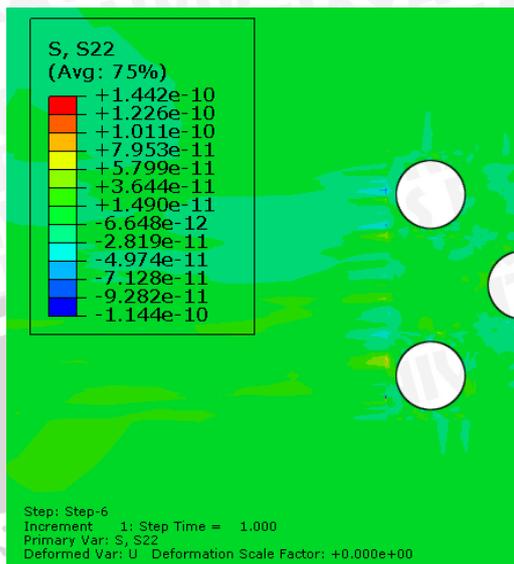
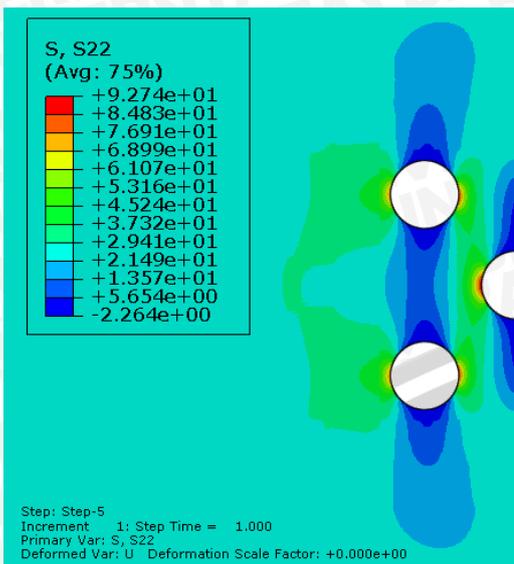


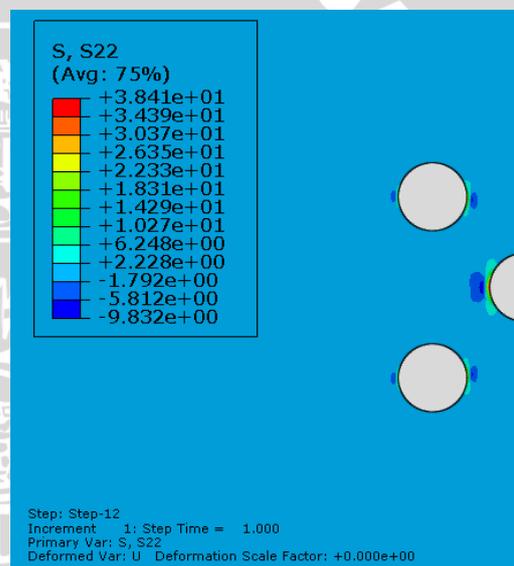
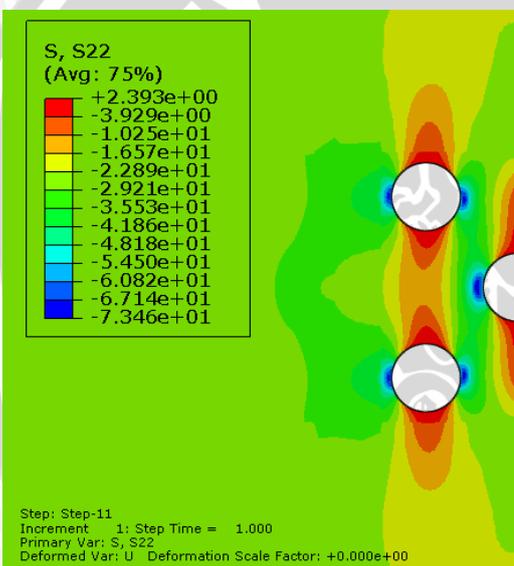
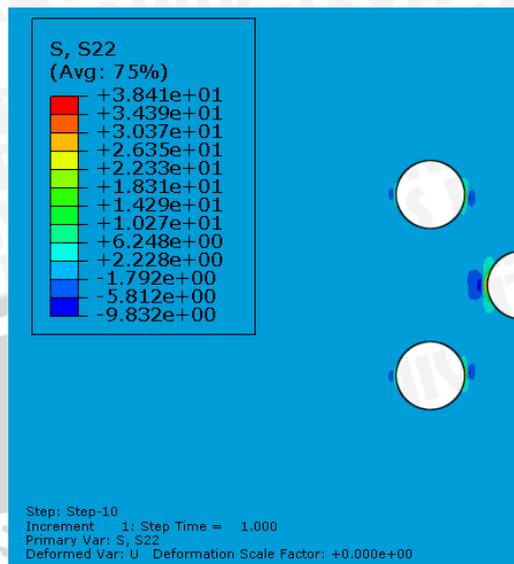
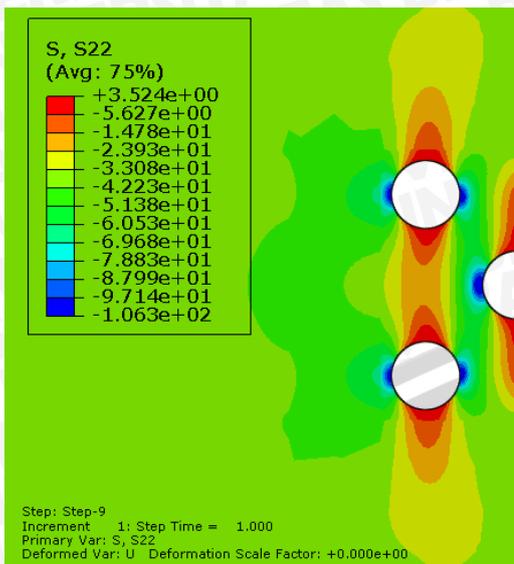


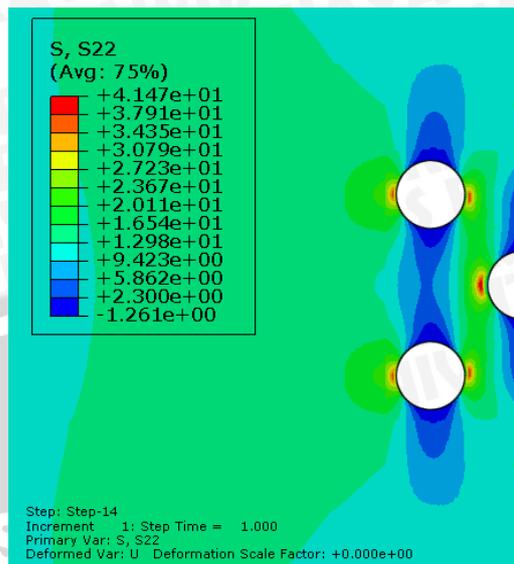
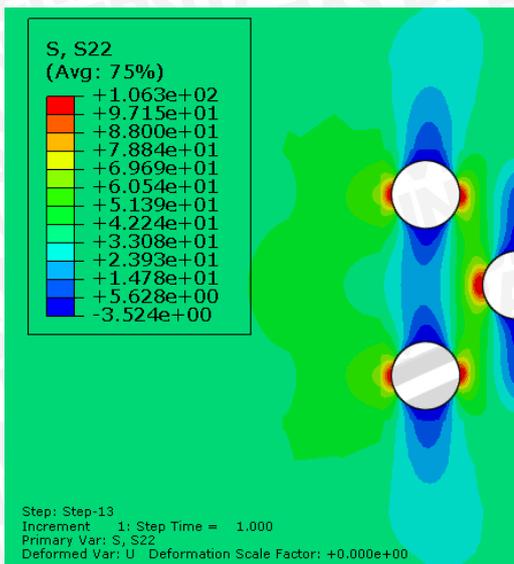


Kontur pelat dengan stop drilled hole dengan $R=-1$

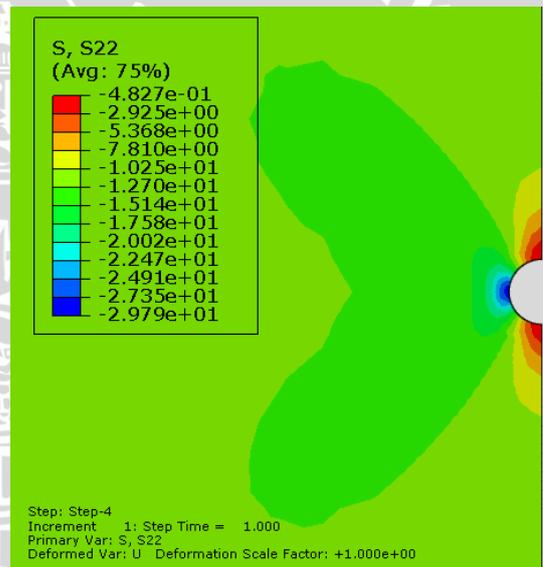
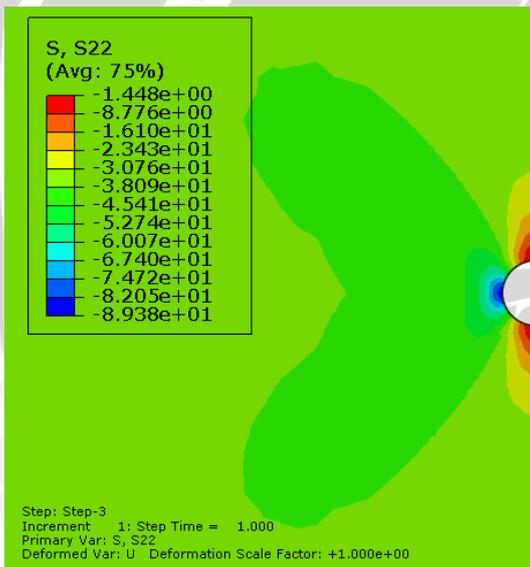
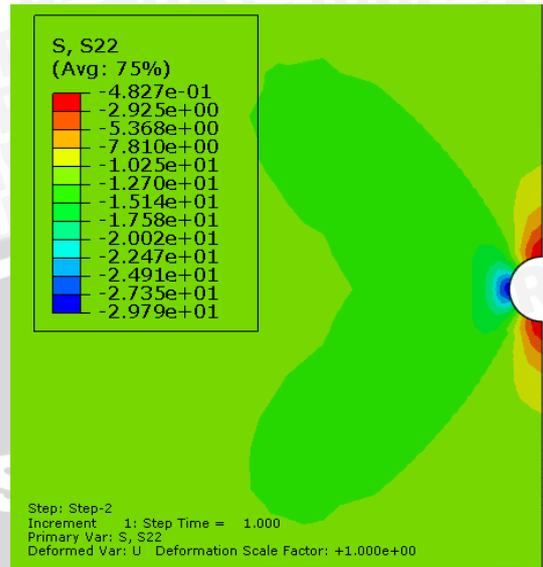
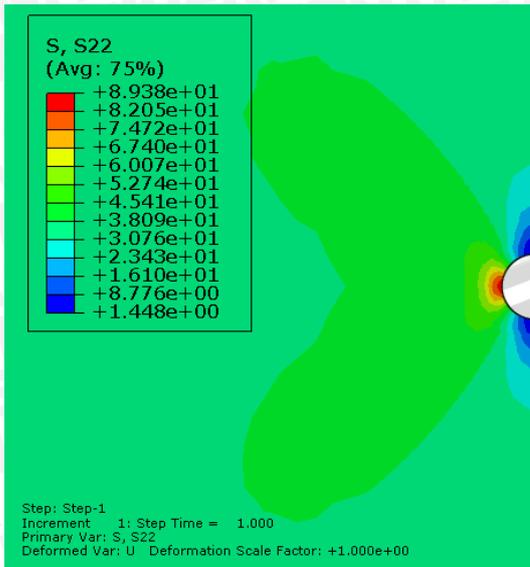


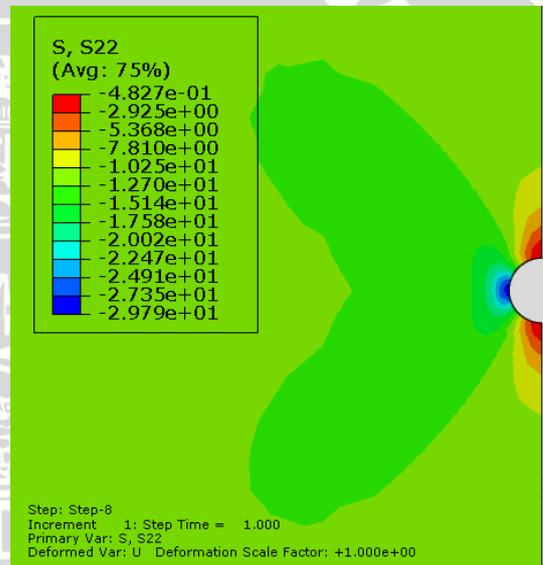
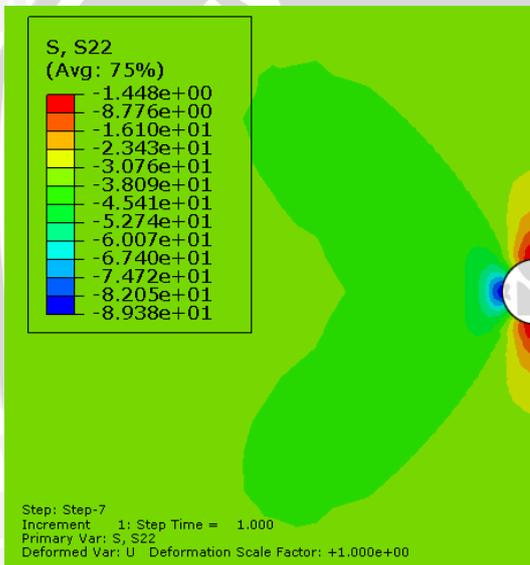
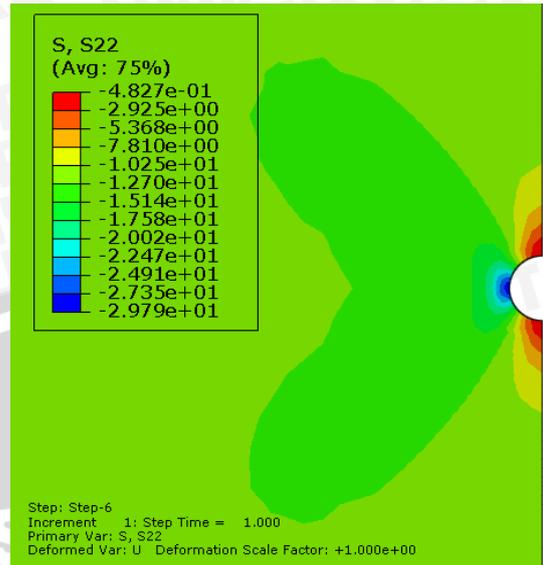
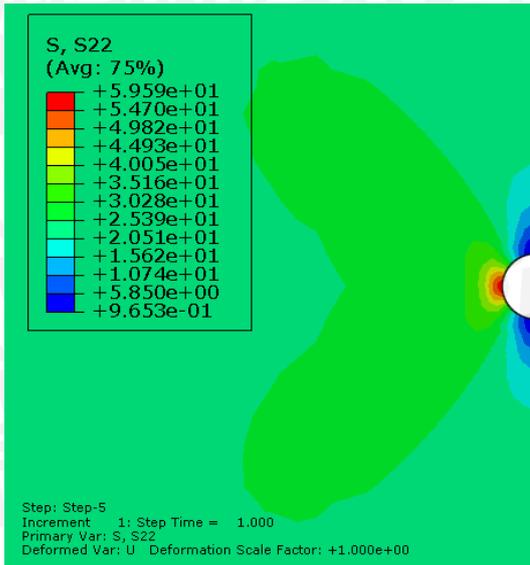


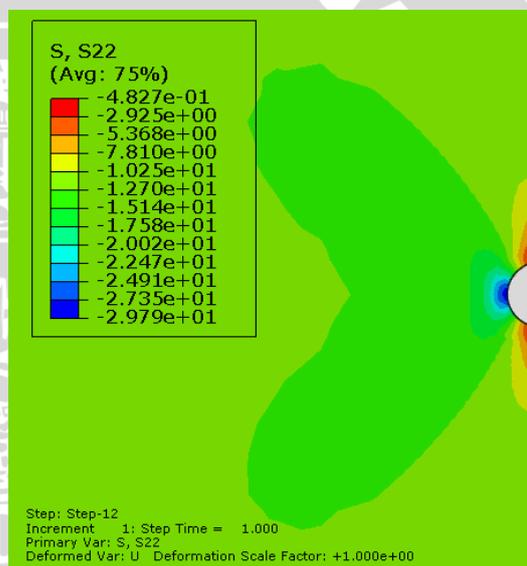
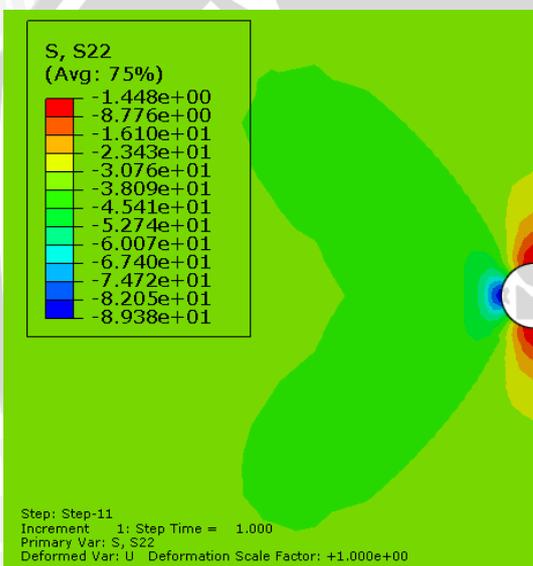
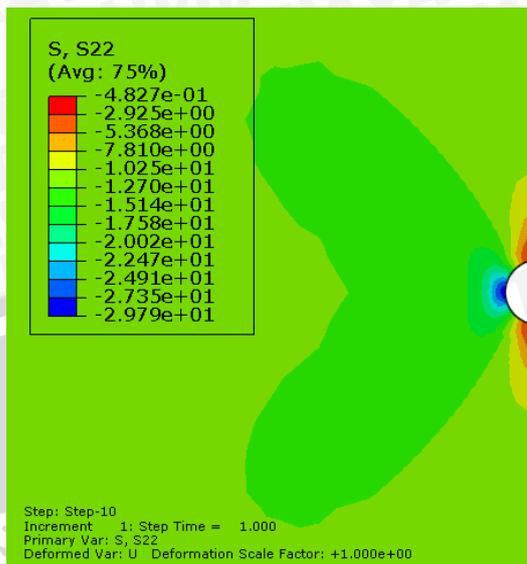
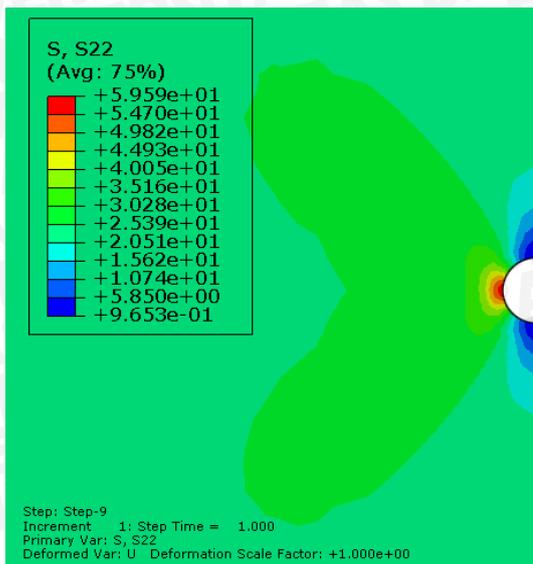


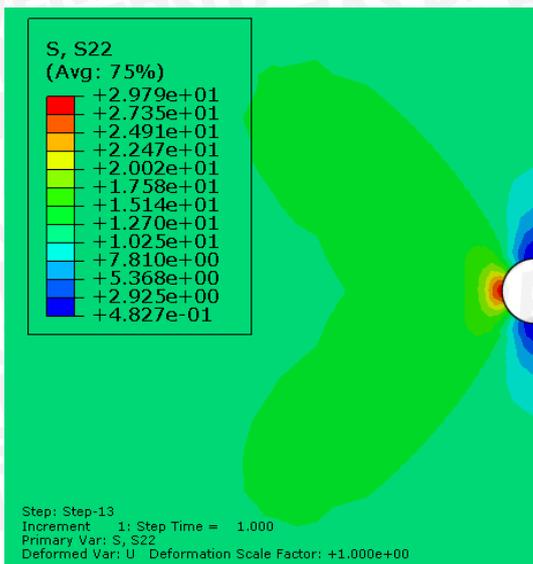


Kontur pelat tanpa stop drilled hole dengan R=-1,5









Kontur pelat dengan stop drilled hole dengan R=-1,5

