

**ANALISIS *STRESS CORROSION CRACKING*
DENGAN VARIASI ORIENTASI BUTIR
PADA PLAT ASTM A36**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



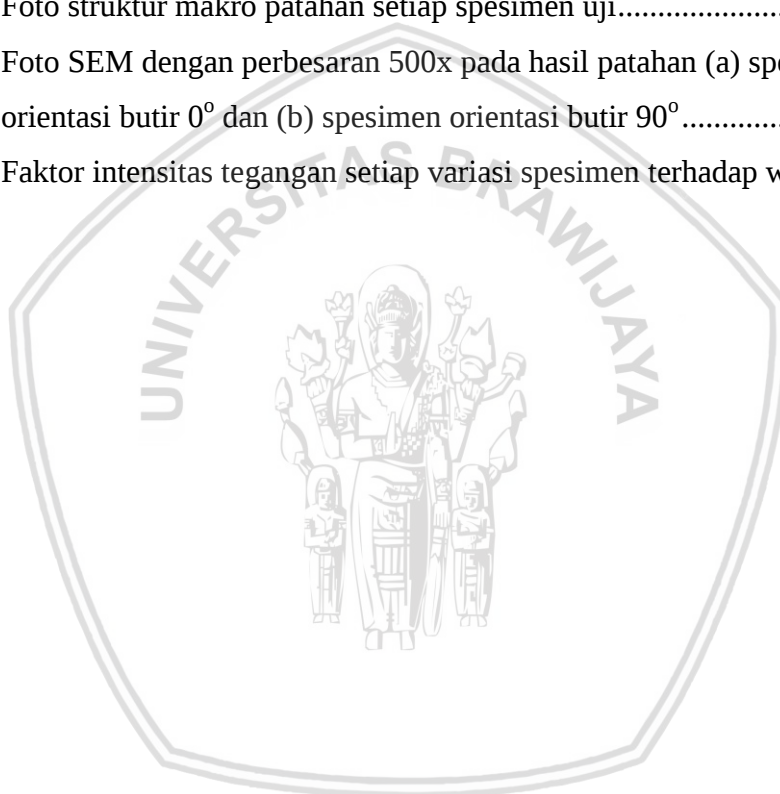
NATANAEL ARDI SUGIARTO
NIM. 145060200111036

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Diagram venn hubungan mendasar ketiga unsur utama penyebab SCC	8
Gambar 2.2	(a) Retak intergranular dan (b) Retak transgranular	9
Gambar 2.3	Kurva tegangan-regangan	10
Gambar 2.4	(a) Efek pemberian tegangan, σ_{app} , terhadap ikatan-ikatan atom dalam sebuah kisi kristal yang mengandung retakan, (b) Permukaan tegangan di ujung retakan, (c) Variasi tegangan efektif dalam arah-x, σ_x , terhadap jarak r didepan ujung retakan.....	11
Gambar 2.5	Skema efek konsentrasi tegangan pada fenomena SCC	12
Gambar 2.6	Peran undakan sesar (slip step) pada fenomena SCC. (a) Pembentukan undakan sesar (slip step) pada permukaan logam, dan (b) Penyingkapan daerah pasif yang menginisiasi awal terjadinya korosi.....	16
Gambar 2.7	Mekanisme penjalaran retak dibagi menjadi dua jenis, yakni (a) Absorpsi oleh unsur-unsur agresif dan (b) Absorpsi oleh atom hidrogen.....	19
Gambar 2.8	Proses pengerolan dingin	21
Gambar 2.9	Foto struktur mikro perbesaran 500x pada plat baja karbon rendah dengan (a) sebelum melalui proses <i>cold rolling</i> dan (b) plat baja karbon rendah hasil <i>cold rolling</i> dengan reduksi 60%.....	22
Gambar 2.10	Hasil simulasi ANSYS 19.1 untuk spesimen.....	23
Gambar 2.11	(a) Skema K_{IC} dan K_{ISCC} terhadap mekanisme SCC (b) Visualisasi K_{IC} dan K_{ISCC} pada fenomena SCC	25
Gambar 2.12	Sebuah plat dengan retak pada kedua ujung sisinya yang mengalami pembebanan dua arah.....	26
Gambar 3.1	Orientasi butir spesimen pada plat ASTM A36.....	32
Gambar 3.2	Dimensi spesimen uji.....	32
Gambar 3.3	Instalasi alat uji SCC.....	33
Gambar 3.4	Ilustrasi sisi pengambilan foto struktur mikro spesimen	36
Gambar 3.5	Diagram alir penelitian	37
Gambar 4.1	Butiran utuh (n_1) dan butiran yang terpotong (n_2) pada hasil foto struktur mikro	40
Gambar 4.2	Panjang retak dari spesimen Uji SCC (a)	41
Gambar 4.3	Lebar dari spesimen Uji SCC (2w).....	42

Gambar 4.4	Tebal dari spesimen Uji SCC (B)	43
Gambar 4.5	Hasil foto struktur mikro perbesaran 400x spesimen uji variasi orientasi butir 45°	45
Gambar 4.6	Gambar DBB sistem pengungkit beban yang terdapat pada alat uji SCC...	46
Gambar 4.7	Grafik pengaruh orientasi butir plat terhadap waktu patah.....	50
Gambar 4.8	Foto struktur mikro daerah hasil patah spesimen uji SCC perbesaran 400x.....	52
Gambar 4.9	Grafik pengaruh variasi orientasi butir plat terhadap diameter butir	53
Gambar 4.10	Grafik pengaruh orientasi butir plat terhadap nilai UTS	55
Gambar 4.11	Foto struktur makro patahan setiap spesimen uji.....	56
Gambar 4.12	Foto SEM dengan perbesaran 500x pada hasil patahan (a) spesimen orientasi butir 0° dan (b) spesimen orientasi butir 90°	57
Gambar 4.13	Faktor intensitas tegangan setiap variasi spesimen terhadap waktu	58



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN.....	x
SUMMARY	xi
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 5
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Korosi	5
2.3 Lingkungan Korosif H_2SO_4 (Aqueous).....	6
2.4 <i>Stress Corrosion Cracking</i> (SCC)	6
2.4.1 Faktor Terjadi SCC	8
2.4.1.1 Pengaruh Tegangan Terhadap Fenomena SCC.....	9
2.4.1.2 Pengaruh Lingkungan Korosi Terhadap Lingkungan SCC.....	12
2.4.1.3 Pengaruh Kerentanan Material Terhadap Fenomena SCC.....	15
2.4.2 Mekanisme Terjadi SCC	15
2.4.2.1 Tahap Pemicuan	16
2.4.2.2 Tahap Penjalaran	17
2.4.2.3 Tahap Terjadinya Kegagalan.....	20
2.5 <i>American Standard Testing and Material A36</i> (ASTM A36).....	20
2.6 <i>Cold Rolling</i>	21
2.7 Orientasi Butir	22

2.8	Standar Uji Alat SCC	22
2.9	Uji Tarik SCC	24
2.10	Faktor Intensitas Tegangan.....	25
2.11	Hipotesis	27

BAB III METODE PENELITIAN..... 29

3.1	Metode Penelitian	29
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian.....	29
3.3	Variabel Penelitian.....	29
3.3.1	Variabel Terkontrol	29
3.3.2	Variabel Bebas.....	30
3.3.3	Variabel Terikat.....	30
3.4	Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian	30
3.4.1	Alat	30
3.4.2	Bahan	31
3.5	Instalasi Penelitian	33
3.6	Skema Penelitian.....	33
3.7	Diagram Alir Penelitian	38

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... 39

4.1	Data Hasil Penelitian.....	39
4.2	Pengolahan Data	44
4.3	Data Hasil Pengolahan Data	48
4.4	Pembahasan.....	49
4.4.1	Perbandingan Perlakuan Dengan Lingkungan SCC dan Tanpa Lingkungan SCC Terhadap Waktu Patah	50
4.4.2	Pengaruh Orientasi Butir Plat Logam Terhadap Waktu Patah.....	50
4.4.3	Pengaruh Orientasi Butir Plat Logam Terhadap Sifat Mekanik.....	51
4.4.4	Pengaruh Sifat Mekanik Akibat Perbedaan Orientasi Butir Plat Logam Terhadap Kekuatan Tarik (UTS)	54
4.4.5	Analisis Hasil Foto Struktur Makro Patahan Setiap Variasi Spesimen.....	56
4.4.6	Analisis Hasil Foto SEM Patahan Setiap Variasi Spesimen	57
4.4.7	Perbandingan Faktor Intensitas Tegangan setiap Variasi Spesimen Terhadap Waktu.....	58

BAB V PENUTUP	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Hasil Data Uji Tarik
Lampiran 2	Hasil Foto Struktur Mikro
Lampiran 3	Hasil Foto Struktur Makro
Lampiran 4	Hasil foto SEM pada patahan spesimen uji
Lampiran 5	Perhitungan Diameter Butiran pada Hasil Foto Struktur Mikro
Lampiran 6	Perhitungan Faktor Intensitas Tegangan Setiap Variasi Orientasi Butir
Lampiran 7	Komposisi dan Spesifikasi Material ASTM A36



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Hubungan jenis logam dan lingkungan korosifnya dalam SCC	15
Tabel 2.2	Komposisi ASTM A36	21
Tabel 2.3	Sifat Mekanis Baja Karbon	21
Tabel 3.1	Komposisi ASTM A36	31
Tabel 3.2	Sifat Mekanis Baja Karbon	31
Tabel 4.1	Data waktu patah setiap spesimen uji	39
Tabel 4.2	Data banyak butir setiap spesimen uji pada hasil foto struktur mikro	40
Tabel 4.3	Data tegangan maksimum setiap variasi spesimen uji saat uji tarik	41
Tabel 4.4	Data panjang retak setiap spesimen per satuan waktu	41
Tabel 4.5	Data lebar setiap spesimen per satuan waktu	42
Tabel 4.6	Data tebal setiap spesimen per satuan waktu	43
Tabel 4.7	Data hasil diameter butiran setiap variasi spesimen uji	48
Tabel 4.8	Data hasil KiC setiap variasi spesimen per satuan waktu	49

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Stresscorrosion Cracking Dengan Variasi Orientasi Butir Pada Plat Astm A36**”. Skripsi ini dibuat untuk memenuhi syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, akan tetapi diharapkan segala usaha yang telah dilakukan dapat menjadi ilmu yang bermanfaat.

Selama proses penulisan dan penyelesaian skripsi ini, penulis banyak memperoleh bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tanpa bantuan dan dukungan yang didapat tidak mungkin skripsi ini dapat terselesaikan. Untuk itu penulis dengan tulus hati ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT.,Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya sekaligus Dosen Pembimbing I yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Ibu Dr. Femiana Gapsari, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan banyak bimbingan, bantuan, serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini.
4. Staf dari Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah melancarkan proses dari skripsi ini.
5. Kedua orang tua dan kakak dari penulis yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta doa yang tak terhingga sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
6. Teman-teman M'14 yang namanya tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan dan bantuannya selama penyelesaian skripsi ini.
7. Seluruh Asisten Laboratorium Metrologi Industri yang telah banyak memberikan bantuan dalam menyusun skripsi ini.
8. Berbagai pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, semoga bantuan, bimbingan dan doa yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang bersifat

membangun sangat di harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua.

Malang, 20 Juli 2018

Penulis



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 20 Juli 2018
Mahasiswa,



Natanael Ardi Sugiarto
NIM. 145060200111036

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS *STRESS CORROSION CRACKING*
DENGAN VARIASI ORIENTASI BUTIR
PADA PLAT ASTM A36

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



NATANAEL ARDI SUGIARTO
NIM. 145060200111036

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 18 Juli 2018

DOSEN PEMBIMBING I

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D.
NIP 19670518 199412 1 001

DOSEN PEMBIMBING II

Dr. Femiana Gapsari, ST., MT.
NIP 19820704 200812 2 002

Mengetahui,
KETUA PROGRAM STUDI S1



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001

RINGKASAN

Natanael Ardi Sugiarto, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2018, Analisis *Stresscorrosion Cracking* Dengan Variasi Orientasi Butir Pada Plat Astm A36, Dosen Pembimbing: Djarot B. Darmadi, Femiana Gapsari.

Stress corrosion cracking (SCC) telah menjadi salah satu alasan utama dalam mendesain teknologi modern. SCC memicu suatu kegagalan pada material berupa perambatan retak yang disebabkan oleh kondisi lingkungan secara perlahan. SCC terjadi dikarenakan oleh tiga faktor utama, yaitu adanya tegangan, lingkungan korosif dan karakteristik material yang rentan terhadap SCC.

Proses *cold working* adalah salah satu proses manufaktur di mana logam dibentuk dalam suhu kamar. Butiran yang dihasilkan dari proses *cold rolling* cenderung memipih, hal ini disebabkan oleh pemberian gaya tekan pada material tersebut. Dalam *cold rolling* terdapat istilah arah pengerolan. Arah pengerolan dapat berdampak pada orientasi butir yang arahnya selalu sejajar dengan arah pengerolan.

Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh variasi orientasi butir plat ASTM A36 terhadap lama waktu untuk terjadinya patah pada lingkungan SCC. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui pengaruh orientasi butir plat terhadap struktur mikro, kekuatan tarik maksimum spesimen tersebut dan faktor intensitas tegangan potongan plat tersebut di lingkungan SCC.

Dari hasil penelitian ini menunjukkan plat logam berorientasi butir sejajar dengan arah pengerolan (0°) memiliki sifat mekanik lebih kuat. Sedangkan plat logam berorientasi butir tegak lurus dengan arah pengerolan (90°) memiliki sifat mekanik lebih ulet. Sifat mekanik yang berbeda akibat beda arah orientasi plat logam akan berpengaruh pada kekuatan tarik maksimum dimana kekuatan tarik maksimum terletak pada material yang lebih kuat. Hal ini dikarenakan oleh diameter butir yang berbeda antar variasi orientasi butir plat. Dengan penghitungan ukuran diameter butir, dapat terlihat perbedaan diameter pada setiap variasi orientasi butir dimana plat berorientasi butir sejajar dengan arah pengerolan memiliki ukuran diameter paling kecil.

Dengan adanya sifat mekanik dan kekuatan tarik yang berbeda, tentu juga akan mempengaruhi ketahanan plat terhadap lingkungan SCC. Plat dengan arah orientasi butir sejajar arah pengerolan akan memiliki ketahanan terhadap SCC paling kuat dibanding variasi orientasi butir plat lain. Hal ini juga dikuatkan dengan adanya pengamatan foto struktur mikro dan dari foto SEM.

Kata Kunci: *Stress Corrosion Cracking*, Struktur Mikro, Orientasi Butiran, Kekuatan Tarik Maksimum, Faktor Intensitas Tegangan

SUMMARY

Natanael Ardi Sugiarto, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, May 2018, Analysis Of Stress Corrosion Cracking With Variation Of Grain Orientation On Astm A36 Plate, Academic Supervisor: Djarot B. Darmadi, Femiana Gapsari.

Stress corrosion cracking (SCC) has been one of the main reasons for designing modern technology. SCC triggers a failure in the form of crack propagation caused by environmental conditions slowly. SCC occurs due to three main factors, namely the presence of stress, corrosive environment and material characteristics susceptible to SCC.

The cold working process is one of the manufacturing processes in which the metal is formed at room temperature. The granules produced from the cold rolling process tend to flatten, this is due to the compressive force of the material. In cold rolling there is a term rolling direction. The rolling direction can affect the orientation of the grains whose direction is always parallel to the rolling direction.

The purpose of this research is to know the influence of grain orientation variation of ASTM A36 plate to the time period for fracture in SCC environment. In addition, this study aims to determine the effect of grain orientation variation on the microstructure, ultimate tensile strength of the specimen and the stress intensity factor in the SCC environment.

The results of this study show that the grain-oriented metal plate parallel to the rolling direction (0°) has a stronger mechanical properties. While the metal plate oriented grains perpendicular to the rolling direction (90°) have mechanical properties more ductile. The different mechanical properties due to the different orientation of the metal plate will affect the maximum tensile strength at which the ultimate tensile strength lies in the stronger material. This happens because of the difference of the grain diameters between the variations of the grain orientation. By calculating the size of the diameter of the grains, it can be seen the difference in diameter each variation of the grain orientation where plate which grain orientation is parallel to the rolling direction will having the smallest diameter size.

With the difference of mechanical properties and tensile strength, it will also affect the resistance of the plate to the SCC environment. Plates with orientation direction parallel to rolling direction will have the strongest resistance to SCC compared to other grain orientation variations. This is also confirmed by the observation of microstructural photos and from SEM photographs.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, Micro Structure, Grain Orientation, Ultimate Tensile Strength, Stress Intensity Factor



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 124/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

NATANAEL ARDI SUGIARTO

Dengan Judul Skripsi :

**ANALISIS STRESS CORROSION CRACKING DENGAN VARIASI ORIENTASI BUTIR
PADA PLAT ASTM A36**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **18 JUL 2018**



Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D

NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.

NIP. 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

ANALISIS *STRESS CORROSION CRACKING* DENGAN VARIASI ORIENTASI
BUTIR PADA PLAT ASTM A36

Nama Mahasiswa : Natanael Ardi Sugiarto
NIM : 145060200111036
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konstruksi

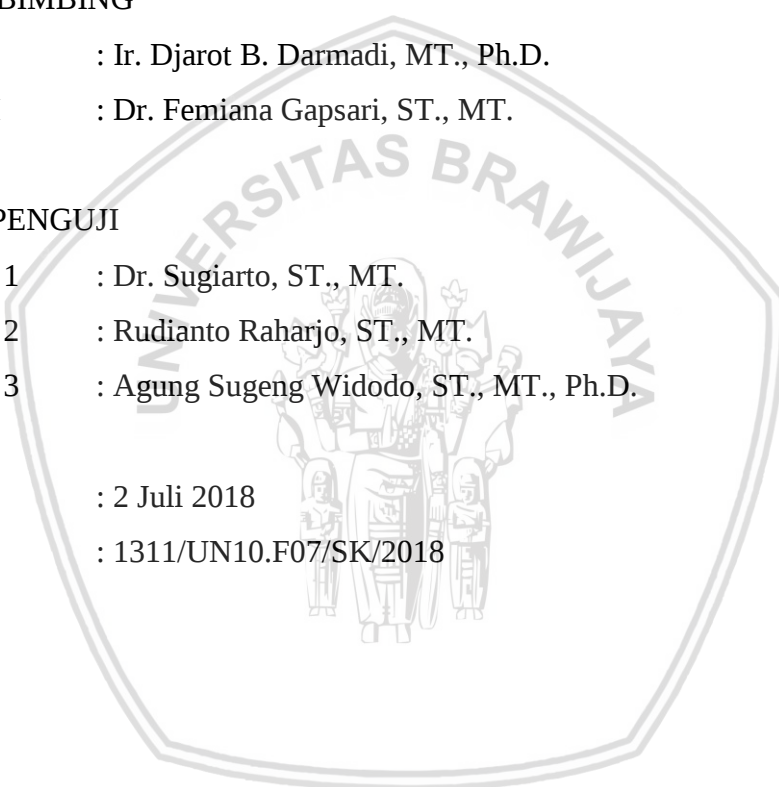
KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D.
Pembimbing II : Dr. Femiana Gapsari, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Sugiarto, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Rudianto Raharjo, ST., MT.
Dosen Penguji 3 : Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D.

Tanggal Ujian : 2 Juli 2018
SK Penguji : 1311/UN10.F07/SK/2018



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era perkembangan teknologi masa kini, *stress corrosion cracking* (SCC) telah menjadi salah satu alasan utama dalam mendesain teknologi lebih lanjut, seperti kapal selam, bagian-bagian penting pada pesawat F-111, pengeboran sumur yang dalam (Bernstein, 1975). Pada ketiga kasus tersebut memiliki kesamaan yaitu material dari benda-benda tersebut menerima tegangan di lingkungan korosif sehingga dapat terjadi SCC. SCC adalah retakan akibat gabungan dari korosi dan regangan logam oleh tegangan sisa atau *applied stress* (Cottis, 2000). SCC memicu suatu kegagalan pada material berupa perambatan retak yang disebabkan oleh kondisi lingkungan secara perlahan. SCC dapat terjadi karena proses korosi dan regangan pada logam akibat tegangan sisa atau *applied stress* yang terjadi secara bersamaan. SCC dapat terinisiasi dan tersebar luas meskipun korosi yang tampak pada permukaan hanya sedikit dan tanpa adanya tanda bahwa akan terjadi kegagalan yang besar (Jones, 1992). SCC terjadi dikarenakan oleh tiga faktor utama, yaitu adanya tegangan, lingkungan korosif dan karakteristik material yang rentan terhadap SCC. Ketiga hal tersebut akan saling berhubungan dan secara bersamaan mengurangi umur pakai suatu material secara signifikan. Tegangan tidak hanya berasal dari pembebanan dan tegangan aplikasi namun juga tegangan termal serta tegangan sisa atau tegangan tersimpan pada suatu komponen yang dihasilkan pada proses permesinan atau fabrikasi. Sedangkan lingkungan berperan dalam memperbesar kerusakan akibat retakan yang terjadi sebagai efek korosi ataupun sebaliknya (Adiyanti, 2011). Lingkungan korosif akan sangat menentukan proses terbentuknya SCC, hal-hal yang mempengaruhi lingkungan ini ialah komposisi lingkungan, temperatur, perbedaan potensial sel, dan laju aliran fluida. Selain tegangan dan lingkungan, unsur lain yang mendasar juga berpengaruh terhadap fenomena SCC ialah kerentanan material dari komponen tersebut. Kerentanan suatu material ditentukan oleh komposisi kimia material tersebut, perlakuan panas, struktur mikro, dan kondisi permukaan seperti adanya cacat dan retak awal (Contreras, 2011).

Proses *cold working* adalah salah satu proses manufaktur di mana logam dibentuk dalam suhu kamar. Umumnya menggunakan suhu lebih tinggi dari suhu kamar atau dibawah suhu rekristalisasi. Efek dari *cold working* adalah meningkatkan kekuatan tarik

material disertai dengan penurunan keuletan dari material (Dieter, 1988). *Cold rolling* merupakan salah satu jenis pengerjaan *cold working* untuk membuat plat logam. Butiran yang dihasilkan dari proses *cold rolling* cenderung memipih, hal ini disebabkan oleh pemberian gaya tekan pada material tersebut. Dalam *cold rolling* terdapat istilah arah pengerolan. Arah ini dapat berdampak pada arah butiran yang arahnya selalu sejajar dengan arah pengerolan (Voort, 2014).

Mengingat dampak dari SCC yang berbahaya, fenomena SCC menjadi sangat penting dalam setiap proses perancangan benda, komponen, ataupun struktur. Faktor lain penyebab terjadinya SCC adalah kerentanan material. Kerentanan material ini dapat berupa perbedaan sifat mekanik akibat proses *cold working*. Adanya perbedaan orientasi butir dari suatu lembaran rol proses manufaktur akan mengubah ukuran butir (Rathmayr dkk, 2012). Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian dengan variasi orientasi butir pada plat ASTM A36 untuk menganalisa SCC yang terjadi pada lingkungan korosif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diutarakan sebelumnya, maka rumusan masalah yang dapat ditarik adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi orientasi butir pada plat ASTM A36 terhadap lama waktu yang dibutuhkan untuk terjadi patah pada lingkungan SCC?
2. Bagaimana pengaruh orientasi butir pada plat ASTM A36 terhadap struktur mikro setiap spesimen uji?
3. Bagaimana pengaruh orientasi butir pada plat ASTM A36 terhadap kekuatan tarik maksimum spesimen uji?
4. Bagaimana pengaruh orientasi butir pada plat ASTM A36 terhadap faktor intensitas tegangan setiap spesimen uji pada lingkungan SCC?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah ditujukan sebagai fungsi kontrol agar pembahasan masalah dalam penelitian tidak meluas dan menjauhi pokok bahasan. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini ialah:

1. Tegangan tarik yang diberikan dianggap linear untuk seluruh bentuk pembebanan.
2. Tegangan geser pada konstruksi alat uji SCC dianggap tidak ada, sehingga nilai gaya pada tegangan aplikasinya dianggap sama dengan gaya berat yang dihasilkan oleh beban pemberat.

3. Lingkungan SCC yang dimaksud adalah lingkungan dengan larutan korosif H_2SO_4 1M.
4. Temperatur lingkungan pada saat penelitian merupakan temperatur kamar dan nilainya dianggap konstan.
5. Tekanan lingkungan pada saat penelitian merupakan tekanan atmosfer dan nilainya dianggap konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi orientasi butir pada plat ASTM A36 terhadap lama waktu yang dibutuhkan untuk terjadi patah pada lingkungan SCC.
2. Mengetahui pengaruh orientasi butir pada plat ASTM A36 terhadap struktur mikro setiap spesimen uji.
3. Mengetahui pengaruh orientasi butir pada plat ASTM A36 terhadap kekuatan tarik maksimum spesimen uji.
4. Mengetahui pengaruh orientasi butir pada plat ASTM A36 terhadap faktor intensitas tegangan setiap spesimen uji pada lingkungan SCC.

1.5 Manfaat Penelitian

Untuk penulis sendiri, melalui penelitian ini penulis dapat lebih memahami fenomena SSC, pengaruh dan pentingnya SSC dalam aplikasi pengembangan teknologi. Untuk masyarakat, diharapkan melalui penelitian ini dapat meningkatkan pengetahuan bahwa SCC telah menjadi salah satu alasan utama dalam mendesain teknologi yang berhubungan dengan lingkungan berkorosi.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Azam (2015) melakukan penelitian mengenai laju korosi pada pipa gas baja karbon yang dilakukan dengan ekstrapolasi Tafel, dan morfologi permukaan dianalisis lebih lanjut dengan menggunakan OM dan SEM. Empat sampel telah diuji dalam konsentrasi H_2SO_4 yang berbeda pada 1; 0,5; 0,1; dan 0,01 M. Mengurangi konsentrasi larutan H_2SO_4 mengakibatkan penurunan laju korosi. Semakin tinggi konsentrasi ion SO_4^{2-} menyebabkan permukaan baja pipa berkarat lebih cepat. Berdasarkan hasil pengamatan, mekanisme korosi baja karbon rendah dalam larutan H_2SO_4 dapat terlihat dari terbentuknya lubang akibat korosi yang terjadi di daerah ferrit karena reaksi mikrogalvanik antara ferit dan sementit. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa perilaku laju korosi dari pipa gas alam sangat dipengaruhi oleh tingkat konsentrasi ion SO_4^{2-} yang berbeda.

Aoda (2012) melakukan penelitian tentang pengaruh arah pengerolan terhadap *tensile stress* pada plat *medium carbon steel* dengan membuat variasi sudut pemotongan spesimen 0, 30, 60, dan 90° terhadap arah pengerolan plat. Plat yang digunakan adalah DIN CK45 dengan ketebalan 4 mm dan reduksi *cold rolling* yang diaplikasikan sebesar 15%. Dengan variasi sudut pemotongan pada plat 0, 30, 60, dan 90°, didapatkan data *tensile stress* secara berurutan sebesar 50, 63, 75, dan 90GPa. Dari penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa semakin besar sudut pemotongan terhadap arah pengerolan maka semakin besar pula *tensile stress* pada potongan plat logam *medium carbon steel* tersebut.

2.2 Korosi

Korosi merupakan penurunan mutu logam akibat adanya reaksi elektrokimia dengan lingkungannya. Logam yang mengalami penurunan mutu tidak hanya melibatkan reaksi kimia namun juga reaksi elektrokimia, yakni antara bahan-bahan yang bersangkutan dengan terjadinya perpindahan elektron (Trethwey, 1996). Salah satu proses perusakan material khususnya logam karena adanya suatu reaksi antara logam tersebut dengan lingkungan. Proses perusakan material yang terjadi menyebabkan turunnya kualitas material logam tersebut (Pattireuw, 2013).

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi laju korosi dalam sistem elektrolit larutan (*aqueous*) diantaranya adalah:

1. Komponen ion larutan dan konsentrasinya

Konsentrasi larutan menyatakan jumlah zat terlarut dalam setiap satuan larutan atau pelarut. Dalam sebuah larutan dengan konsentrasi tertentu, zat penyusun larutan tersebut akan terurai menjadi ion-ion (baik berupa kation maupun anion) pembentuknya (Hakim, 2011).

2. Kadar Oksigen

Oksigen terlarut akan meningkatkan reaksi katoda sehingga logam akan semakin teroksidasi (terkorosi) (Hakim, 2011).

3. Kecepatan (pergerakan fluida)

Kecepatan aliran fluida yang tinggi di atas kecepatan kritisnya di dalam pipa berpotensi menimbulkan korosi. Dengan rusaknya permukaan logam, rusak pula lapisan film pelindung sehingga memudahkan terjadinya korosi (Hakim, 2011).

2.3 Lingkungan Korosif H_2SO_4 (*Aqueous*)

Asam sulfat, H_2SO_4 , merupakan asam mineral (anorganik) yang kuat. Zat ini larut dalam air pada semua perbandingan. Asam sulfat mempunyai banyak kegunaan dan merupakan salah satu produk utama industri kimia. Asam sulfat murni yang tidak diencerkan tidak dapat ditemukan secara alami di bumi oleh karena sifatnya yang higroskopis.

Asam sulfat merupakan komponen utama hujan asam, yang terjadi karena oksidasi sulfur dioksida di atmosfer dengan keberadaan air (oksidasi asam sulfat). Asam sulfat terbentuk secara alami melalui oksidasi mineral sulfida, misalnya besi sulfida. Air yang dihasilkan dari oksidasi ini sangat asam dan disebut sebagai air asam tambang. Air asam ini mampu melarutkan logam-logam yang ada dalam bijih sulfida, yang akan menghasilkan uap berwarna cerah yang beracun.

2.4 *Stress Corrosion Cracking* (SCC)

Stress Corrosion Cracking (SCC) adalah retakan akibat gabungan dari korosi dan regangan logam oleh tegangan sisa atau applied stress (Cottis, 2000). SCC dikenal juga sebagai proses kegagalan yang tertunda, karena retak yang terjadi dapat menjalar dengan lambat sampai tegangan yang bekerja pada komponen logam akan naik dan mencapai tegangan patahnya. Oleh sebab itu SCC dapat juga dideskripsikan sebagai suatu kegagalan

operasional pada material yang terjadi secara perlahan, yang disebabkan oleh adanya perambatan retak (Jones, 1992). Dimana perambatan ini terjadi di lingkungan korosif yang kemudian diperburuk oleh adanya konsentrasi tegangan sehingga akan menghasilkan tingkat korosi yang lebih parah dibandingkan dengan tanpa melibatkan tegangan (Priyotomo, 2008). Ada tiga mekanisme umum penyebab terjadinya SCC, yaitu:

a. *Active Path Dissolution*

Proses ini melibatkan percepatan korosi di sepanjang jalur lintasan yang lebih tinggi dari pada kerentanan korosi normal. Umumnya jalur lintasan yang aktif berada pada batas butir. Misalnya, bila ASS telah tersensitasi oleh presipitasi karbida kromium sepanjang batas butir, maka konsentrasi kromium pada batas butir akan berkurang. Akibatnya, korosi dapat terjadi pada batas butir, dengan permukaan spesimen dan dinding retak belum terkorosi. Proses ini dapat terjadi tanpa adanya tegangan, sehingga menimbulkan korosi intergranular yang terdistribusi secara merata pada spesimen. Efek dari tegangan terapan menjadi penyebab utama munculnya retakan, sehingga memudahkan korosi berdifusi lebih cepat dan ujung retakan berkorosi lebih cepat.

b. *Hydrogen Embrittlement*

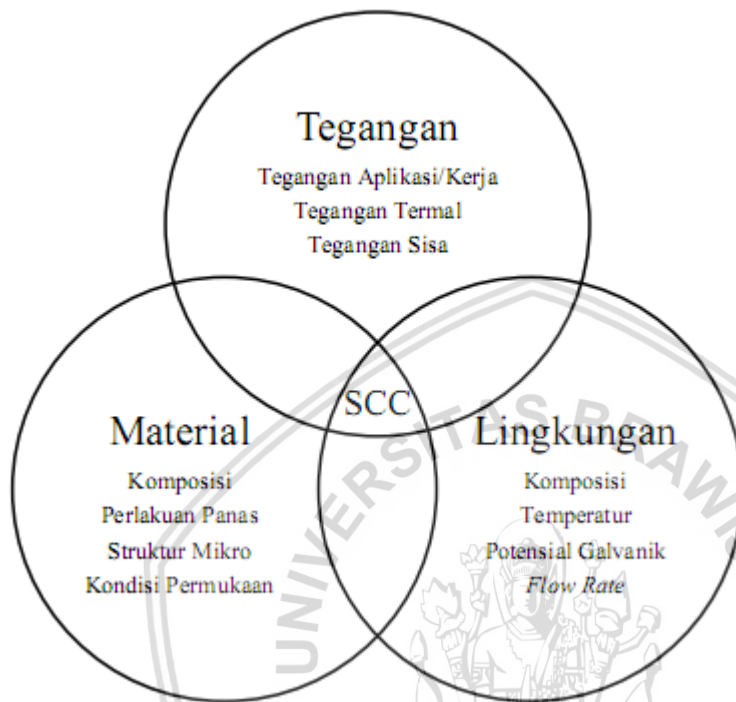
Hidrogen mampu larut pada semua jenis logam dengan mudah. Hidrogen memiliki atom yang sangat kecil dan dapat terselip di antara atom logam pada kristal logam. Akibatnya, atom hidrogen dapat menyebar jauh lebih cepat daripada atom yang lebih besar. Hidrogen mudah terpicu di daerah yang memiliki *triaxial tensile stress* tinggi dimana struktur logam meregang. Dengan demikian, hidrogen dapat terbawa ke daerah retakan bertegangan. Kemudian hidrogen yang terlarut akan membantu terjadinya patah pada logam, yaitu dengan mempermudah rambat retak atau mempercepat deformasi plastis pada suatu titik tertentu. Hal-hal inilah yang menyebabkan terjadinya retak atau patah pada logam.

c. *Film-Induced Cleavage*

Pada umumnya material ulet dilapisi film getas. Bila retakan terinisiasi pada film tersebut, maka retakan dapat menjalar ke dalam material dengan lingkup yang masih kecil (sekitar 1mm). Film yang berada pada lingkungan korosi akan semakin mempercepat rambat retak. Akibat dari *Film-Induced Cleavage* adalah *transgranular fracture*.

2.4.1 Faktor Terjadi SCC

SCC dapat terjadi dikarenakan oleh tiga faktor utama, yaitu adanya tegangan, lingkungan korosif dan karakteristik material yang rentan terhadap SCC. Hubungan tersebut dapat digambarkan sebagai berikut:

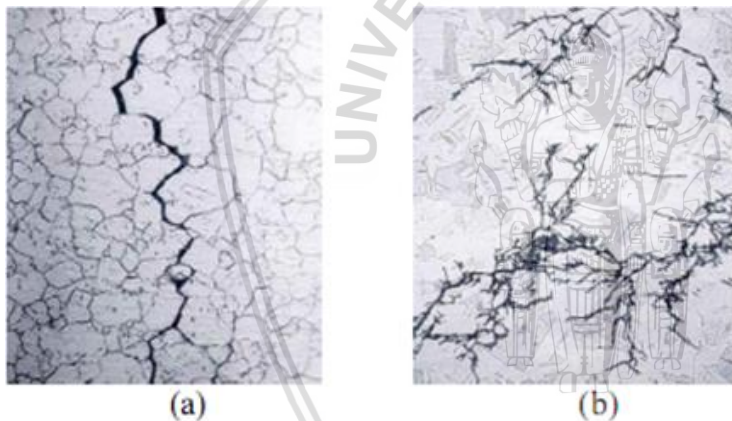


Gambar 2.1 Diagram venn hubungan mendasar ketiga unsur utama penyebab SCC
Sumber: Cottis, R.A (2000)

Ketiga hal pada diagram venn di Gambar 2.1 akan saling berhubungan dan secara bersamaan mengurangi umur pakai suatu material secara signifikan. Seperti telah dijabarkan Brown (1977), tegangan memiliki peranan penting dalam menginisiasi suatu kegagalan SCC. Seperti terlihat pada Gambar 2.1, tegangan tidak hanya berasal pada pembebanan oleh tegangan aplikasinya namun juga tegangan termal dan tegangan sisa atau tegangan tersimpan pada suatu komponen yang dihasilkan pada saat proses permesinan atau fabrikasi. Sedangkan lingkungan berperan dalam memperburuk kerusakan akibat peretakan yang terjadi dengan efek korosi ataupun sebaliknya. Lingkungan korosif akan sangat menentukan proses terbentuknya SCC, hal-hal yang mempengaruhi lingkungan ini ialah komposisi lingkungan tersebut, temperatur lingkungan tersebut, nilai dari perbedaan potensial sel, dan laju aliran fluida. Selain tegangan dan lingkungan, unsur lain yang paling mendasar, yang juga berpengaruh terhadap fenomena SCC ialah kerentanan material dari komponen itu sendiri. Kerentanan suatu material ditentukan oleh komposisi atau unsur-

unsur kimia pembentuk material tersebut, perlakuan panas, struktur mikro, dan kondisi permukaan komponen tersebut seperti keberadaannya cacat atau retak awal.

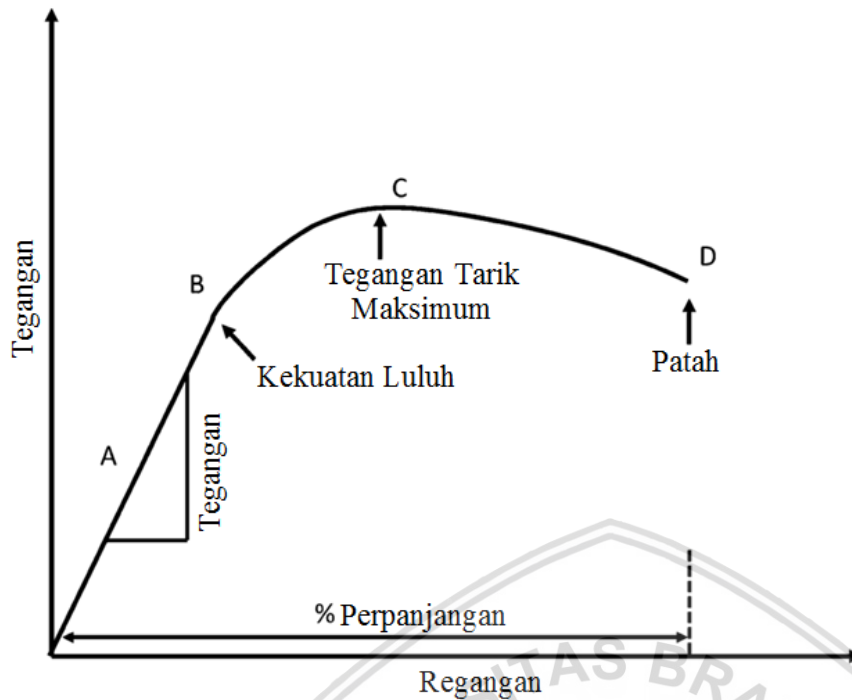
Terdapat dua jenis perambatan retak pada fenomena SCC, yakni perambatan retak intergranular dan perambatan retak transgranular. Untuk retak intergranular, jalur perambatan retak adalah mengikuti jalur daripada batas-batas butirnya. Sedangkan pada retak transgranular, jalur perambatan retak adalah melintasi batas-batas butirnya. Retak intergranular dan retak transgranular dapat terjadi pada satu benda atau komponen yang sama, tergantung dari lingkungan dan struktur logamnya. Arah perambatan retak pada umumnya adalah tegak lurus terhadap arah tegangan yang diberikan. Morfologi perambatan retak pada fenomena SCC dapat beranekaragam, dari retak tunggal hingga merata seperti retak akar (*branching*). Nilai laju perambatan retak pada lingkungan SCC akan lebih tinggi daripada laju perambatan retak pada lingkungan korosi dan lebih rendah daripada laju perambatan retak pada lingkungan normal atau udara (Mondal, 2014).



Gambar 2.2 (a) Retak intergranular dan (b) Retak transgranular
Sumber: NACE International

2.4.1.1 Pengaruh Tegangan Terhadap Fenomena SCC

Tegangan merupakan ekspresi dari suatu kalkulasi dimensi yang timbul karena efek deformasi struktur molekul suatu benda atau biasa disebut dengan regangan (Darmadi, 2011). Regangan didefinisikan sebagai perubahan bentuk dari benda akibat gaya yang diaplikasikan pada benda tersebut. Nilai regangan diformulasikan dengan perbandingan deformasi dan ukuran benda awal. Pada dasarnya regangan merupakan nilai tak berdimensi, tetapi secara umum sering diekspresikan dengan persentase. Hubungan antara tegangan dan regangan biasa disajikan dalam bentuk kurva dan berguna dalam memahami sifat mekanik suatu bahan. Pada sebagian besar kurva tegangan-regangan, nilai tegangan akan sebanding dengan nilai regangan hingga titik ultimate-nya.

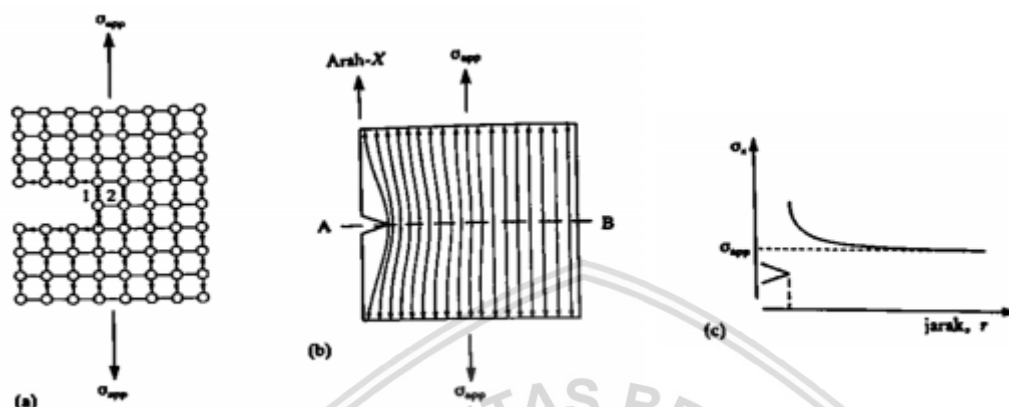


Gambar 2.3 Kurva tegangan-regangan

Sumber: Lim (2013)

Tinggi rendahnya tegangan yang diberikan akan berbanding terbalik dengan waktu perambatan retak, artinya jika tegangan ditingkatkan maka waktu perambatan retak akan menurun (Roylance, 2001). Beberapa literatur mencatat pendapat yang menyangkut tegangan minimum yang dibutuhkan untuk memulai propagasi retak, dimana hal ini bergantung pada jenis material, geometri dan ukuran material, temperatur, serta komposisi lingkungan korosif. Selain itu terdapat pula tegangan minimum atau yang lebih dikenal dengan tegangan ambang, yang mana pada nilai tegangan ini suatu konstruksi dapat dikatakan aman atau tidak akan mengalami patah dalam jangka waktu yang sangat lama. SCC terjadi apabila pengaruh intensitas tegangan mendukung terjadinya inisiasi keretakan, yang selanjutnya akan menyebabkan perambatan retak (Trethwey, 1996). Retak ini akan menjalar sejalan dengan intensitas tegangan, semakin besar tegangan diberikan kemungkinan laju kerusakan semakin tinggi dan kegagalan akibat SCC akan semakin cepat terjadi. Macam-macam tegangan yang berpengaruh pada fenomena SCC antara lain tegangan aplikasi, tegangan panas, tegangan sisa, dan lain sebagainya (Priyotomo, 2008). Pada ilmu mekanika klasik telah dikemukakan pula pengetahuan mengenai pemusatan tegangan atau konsentrasi tegangan, dimana hal ini tetap akan sangat berpengaruh pada fenomena SCC.

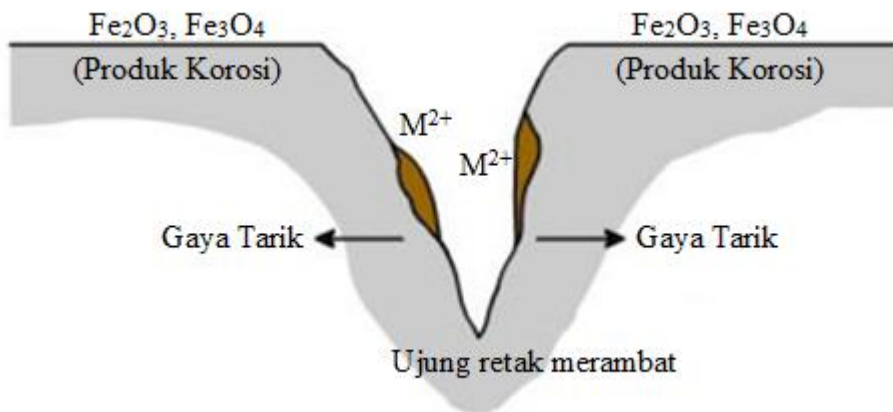
Dalam struktur kristal yang sempurna, tegangan diserap secara merata oleh semua ikatan yang bersangkutan, tetapi bila ada cacat dalam struktur itu, maka distribusi tegangan tidak bisa merata (Trethwey, 1996). Sebagian ikatan akan mengalami tekanan lebih besar dibanding yang lain.



Gambar 2.4 (a) Efek pemberian tegangan, σ_{app} , terhadap ikatan-ikatan atom dalam sebuah kisi kristal yang mengandung retakan, (b) Permukaan tegangan di ujung retakan, (c) Variasi tegangan efektif dalam arah-x, σ_x , terhadap jarak r di depan ujung retakan

Sumber: Trethwey (1996)

Pada Gambar 2.4 (a), struktur atom digambarkan berupa suatu tatanan kubus sederhana dan anak panah besar menunjukkan tegangan tarik, σ_{app} , yang diaplikasikan pada tatanan tersebut. Tegangan terpusat pada ikatan-ikatan yang bersebelahan dengan cacat. Pada ikatan 1 dan 2 mengalami tegangan lebih besar dibanding dengan yang dikenakan di luar. Semakin jauh dari cacat, tegangan akan semakin kecil sampai akhirnya sama dengan tegangan di luar. Untuk nilai σ_{app} yang kecil ikatan-ikatan hanya akan teregang, akan tetapi untuk untuk σ_{app} besar tegangan yang dialami ikatan 1 mungkin lebih kuat dibanding kekuatan ikatan sehingga ikatan tersebut putus. Maka selanjutnya tidak saja pemusatan tegangan itu sepenuhnya dipindahkan ke ikatan 2, namun tegangan yang terpusatkan menjadi lebih besar serta tatanan tersebut akan lebih rentan terhadap kehancuran total akibat efek domino putusnya ikatan di sepanjang cacat awal tatanan tersebut. Gambar 2.4 (a) dapat disajikan juga sebagai Gambar 2.4 (b), untuk memperlihatkan bagaimana kerapatan garis-garis tegangan terbesar di bagian yang merupakan ujung daripada retakan. Dengan garis A-B menunjukkan batas tengah dan σ_{app} searah sumbu x sehingga didapat hubungan tegangan efektif dan jarak dari ujung tatanan sepanjang garis A-B, seperti ditunjukkan Gambar 2.4 (c).



Gambar 2.5 Skema efek konsentrasi tegangan pada fenomena SCC

Sumber: www.faculty.kfupm.edu.sa

Pada lingkungan korosif, sejatinya efek dari adanya konsentrasi tegangan akan lebih buruk dibanding pada lingkungan normal. Nilai tegangan jauh dibawah batas *yield*-nya sudah dapat merusak keseluruhan material. Pada fase ini, adanya sebuah lubang atau celah berupa goresan sekecil apapun, tegangan terkonsentrasi akan berasosiasi dengan lingkungan SCC sehingga korosi dapat melakukan penetrasi ke celah yang lebih dalam dan lebih sempit lagi (Gambar 2.5). Pada akhirnya sebuah kegagalan katastropik akan terjadi dengan tanpa disertai adanya deformasi dan potensi-potensi kegagalan yang nyata (Kulsange, 2016).

2.4.1.2 Pengaruh Lingkungan Korosi Terhadap Lingkungan SCC

Korosi memegang peranan penting dalam proses awal terjadinya retak. Adanya sebuah lubang kecil berupa goresan pada material akan memicu terjadinya retak. Mekanisme perambatan retak awal pada ujung lubang dianggap sebagai pusat tegangan awal. SCC diamati pada material yang berlubang dimana retak awal perambatannya terjadi pada bagian dasar dari lubang tersebut. Aksi gabungan antara tegangan dan lingkungan korosif dibutuhkan sebagai pemicu retakan, dimana retak yang sedang bergerak akan terus berulang hingga material mengalami perpatahan (Fontana, 1987).

Korosi merupakan proses pelapukan secara kimiawi dimana terjadi kerusakan atau degradasi kualitas suatu unsur logam yang disebabkan reaksi redoks (reduksi-oksidasi) antara unsur tersebut dan lingkungannya, serta akan menghasilkan senyawa-senyawa yang tidak seharusnya dihasilkan. Pada reaksi reduksi proses korosi terjadi penambahan muatan negatif (reaksi katodik), sedangkan pada reaksi oksidasi terjadi pengurangan muatan negatif (reaksi anodik). Secara umum proses yang terjadi adalah sebagai berikut:

Reaksi anodik,



dengan M adalah jenis logam, n adalah jumlah elektron yang diambil dari masing-masing atom dan nilainya berdasarkan pada valensi logam, dan e adalah simbol daripada elektron.

Reaksi katodik,

1. Pelepasan hidrogen,



2. Reduksi oksigen dalam larutan asam,



3. Reduksi oksigen dalam larutan netral dan alkali,



4. Reduksi ion logam,



dengan m adalah jumlah elektron yang diberikan oleh masing-masing atom. Reaksi pelepasan hidrogen merupakan suatu reaksi katodik yang umum dalam larutan asam dan pada setiap reaksi akan terjadi peristiwa penangkapan elektron (Rusianto, 2009).

Hingga saat ini, ilmuwan telah mengelompokkan korosi menjadi berbagai jenis, dimana pengelompokkan ini digunakan sebagai dasar untuk mengklarifikasi suatu permasalahan korosi sehingga dapat dilakukan penanggulangan atau antisipasi terhadap serangan korosi tersebut. Beberapa jenis korosi diantaranya ialah; Korosi merata (*uniform attack*), korosi logam tak sejenis (*galvanic corrosion*), korosi erosi (*erosion corrosion*), korosi sumuran (*pitting corrosion*), korosi batas butir (*intergranular corrosion*), korosi selektif (*selective leaching*), korosi celah (*crevice corrosion*), dan korosi tegangan (*stress corrosion*). Dari sekian jenis korosi yang telah dikenal saat ini, diketahui bahwa tidak ada satupun jenis logam yang tahan terhadap seluruh jenis korosi sekaligus. Pada dasarnya seluruh jenis logam akan mengalami korosi, bahkan logam yang disebut nirkarat atau anti-korosi sekalipun.

Potensial elektrokimia memiliki pengaruh terhadap terjadinya SCC pada setiap unsur logam. Karakterisasi logam atau paduan secara umum terbagi menjadi tiga daerah yakni

daerah aktif, pasif, dan transpasif. Daerah pasif merupakan daerah dimana variasi nilai potensial logam tidak mempengaruhi nilai rapat arus sehingga lapisan oksida pasif akan terbentuk. Dalam kondisi pasivasi, logam tidak akan memperlihatkan tanda-tanda terjadinya korosi. Selanjutnya pada daerah transisi, yakni daerah diantara daerah aktif dan pasif, laju korosi logam akan mulai menurun. Setelah melewati daerah transisi proses korosi akan terjadi dengan sangat cepat.

Ketahanan korosi pada berbagai jenis logam dan atau paduannya dapat berbeda antara satu dan yang lainnya. Banyak faktor yang mempengaruhi hal tersebut, seperti:

1. Zat pengotor di permukaan logam yang dapat menyebabkan terjadinya reaksi reduksi tambahan sehingga lebih banyak atom logam yang teroksidasi.
2. Keberadaan elektrolit, seperti garam dalam air laut dapat mempercepat laju korosi dengan menambah terjadinya reaksi tambahan. Sedangkan konsentrasi elektrolit yang besar dapat melakukan laju aliran elektron sehingga korosi meningkat.
3. Temperatur, yang mempengaruhi kecepatan reaksi redoks pada peristiwa korosi, secara umum, semakin tinggi temperatur maka semakin cepat terjadinya korosi, hal ini disebabkan dengan meningkatnya temperatur maka meningkat pula energi kinetik partikel sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan efektif pada reaksi redoks semakin besar dengan demikian laju korosi pada logam semakin meningkat.
4. Peristiwa korosi pada kondisi asam, yakni pada kondisi $\text{pH} < 7$, akan semakin besar karena adanya reaksi reduksi tambahan yang berlangsung pada katode.
5. Adanya koloni mikroba pada permukaan logam juga dapat menyebabkan peningkatan korosi pada logam, hal ini disebabkan karena mikroba tersebut mampu mendegradasi logam melalui reaksi redoks untuk memperoleh energi bagi keberlangsungan hidupnya.
6. Permukaan logam yang lebih kasar, yang akan menimbulkan beda potensial dan memiliki kecenderungan untuk menjadi anoda yang terkorosi.

Lingkungan SCC pada umumnya berwujud cair, namun tidak menutup kemungkinan untuk fenomena SCC terjadi pada lingkungan dengan wujud lingkungan korosif lainnya seperti lapisan kental dan lingkungan lembab. Lingkungan SCC sesungguhnya adalah spesifik, berdasarkan jenis logam dan senyawa pada lingkungan korosifnya (Jones, 1992). Beberapa contoh pasangan jenis logam dan lingkungan korosif SCC-nya disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 2.1
Hubungan jenis logam dan lingkungan korosifnya dalam SCC

Paduan	Lingkungan
Baja Karbon	Larutan nitrat panas, hidroksida, dan karbonat/bikarbonat
Baja Kekuatan Tinggi	Elektrolit encer, terutama yang mengandung H_2S
Baja Tahan Karat Austenitic	Panas, larutan pekat klorida; Uap yang terkontaminasi klorida
Paduan Nikel Tinggi	Uap dengan kemurnian tinggi
Kuningan α	Larutan amoniak
Paduan Aluminium	Larutan Cl^- , Br^- , dan I^- encer
Paduan Titanium	Larutan Cl^- , Br^- , dan I^- encer; cairan organik; N_2O_4
Paduan Magnesium	Larutan Cl^- encer
Paduan Zirkonium	Larutan Cl^- encer; cairan organik; I_2 pada $350^\circ C$ ($660^\circ F$)

Sumber: Jones (1992)

2.4.1.3 Pengaruh Kerentanan Material Terhadap Fenomena SCC

Setiap material memiliki kekuatan dan ketangguhan berbeda antar yang satu dengan yang lainnya, dimana hal-hal ini bergantung pada komposisi material itu sendiri. Setiap material memiliki karakteristik masing-masing dan apabila dipadukan maka akan memiliki sifat kombinasi yang baik (Marcus dan Cudar, 1995). Namun ternyata sifat-sifat paduan tidak selalu lebih baik daripada unsur murninya. Seperti pada fenomena SCC, dimana logam-logam paduan akan lebih rentan terhadap SCC dibandingkan logam murninya (Brown, 1977). Selain daripada itu karakteristik suatu material, seperti komposisi kimia, orientasi butir, komposisi dan distribusi endapan, interaksi dislokasi, dan tingkat transformasi fasa, akan saling berinteraksi dengan lingkungan dan tegangan-tegangan yang ada untuk menginisiasi terjadinya fenomena kegagalan SCC. Di sisi lain, kondisi permukaan suatu material sesungguhnya merupakan hal yang sangat sensitif terhadap fenomena SCC, salah satu kondisi permukaan material yang dapat menjadikan material tersebut rentan terhadap SCC adalah adanya cacat seperti retak atau goresan baik dalam skala makro maupun mikro.

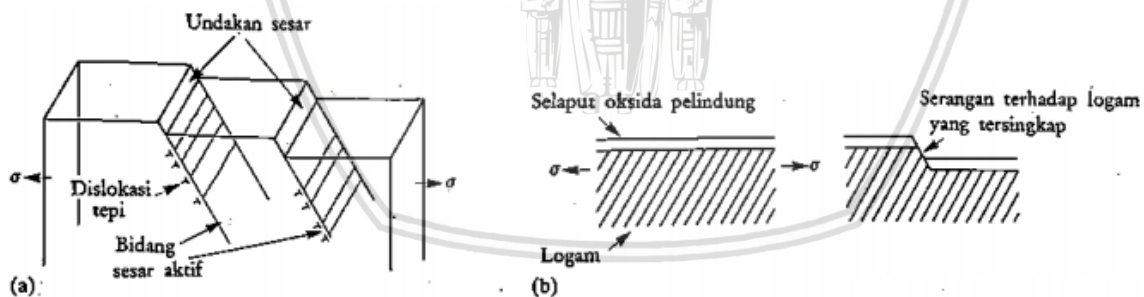
2.4.2 Mekanisme Terjadi SCC

Pada setiap kegagalan, umumnya akan mengalami tiga fase secara berurutan yakni tahap pemicuan, tahap perambatan retak, dan tahap terjadinya kegagalan. Begitupun dengan kegagalan yang disebabkan oleh fenomena SCC.

2.4.2.1 Tahap Pemicuan

Tahap pemicuan merupakan tahap awal mula fenomena SCC terbentuk. Pada umumnya perambatan retak akan terinisiasi dari cacat di permukaan, baik cacat yang telah ada ataupun terbentuk pada saat masa pakainya. Pada tahap pemicuan ini, telah terjadi kerusakan terhadap bagian-bagian sangat lokal pada permukaan logam yang bersifat anoda. Adanya kerusakan tersebut akan berakibat pada timbulnya celah atau lubang. Terdapat beberapa mekanisme timbulnya pemicu SCC, beberapa diantaranya adalah adanya retak-retak lokal pada batas butir dan adanya tegangan tarik, tekan, geser, ataupun tegangan lainnya pada permukaan logam yang menyebabkan struktur atom dari suatu benda atau komponen berubah dan saling berpindah. Fenomena ini dapat dianggap sebagai mekanisme pembentukan gerak cacat yang paling sederhana pada struktur kristal dan dikenal sebagai dislokasi.

Adanya penumpukan dislokasi pada batas-batas butir akan menyebabkan polarisasi anodik pada daerah-daerah ini karena adanya peningkatan ketidakteraturan dalam struktur kristal. Hal ini yang memicu pembentukan cacat-cacat lokal pada permukaan, yang pada awalnya halus, yang disebut undakan sesar (*slip step*) dan merupakan bagian pada permukaan suatu benda atau komponen yang paling rentan terhadap serangan korosi (Trethwey, 1996).



Gambar 2.6 Peran undakan sesar (*slip step*) pada fenomena SCC. (a) Pembentukan undakan sesar (*slip step*) pada permukaan logam, dan (b) Penyingkapan daerah pasif yang menginisiasi awal terjadinya korosi

Sumber: Trethwey (1996)

Logam serta paduan yang bergantung pada lapisan oksida, khususnya sebagai pelindung terhadap serangan korosi, pada umumnya akan rentan karena undakan sesar. Tidak saja dalam skala makro, namun juga mikro. Undakan sesar akan menyingkapkan suatu permukaan logam sehingga bagian tersebut sangat bersifat anodik dibanding permukaan sekelilingnya. Saat sifat pasivasi logam memiliki laju yang lebih cepat

dibandingkan laju korosi maka hal tersebut tidak berbahaya, pada kasus SCC. Namun jika laju pasivasi lebih rendah dibanding laju korosi, maka hal tersebut akan memungkinkan korosi untuk terjadi. Dengan dimulainya serangan dari korosi maka persyaratan untuk pemicuan fenomena SCC telah terpenuhi.

2.4.2.2 Tahap Penjalaran

Tahap penjalaran merupakan tahap dimana perambatan retak terjadi hingga akhirnya menyebabkan tahap selanjutnya terjadi, yakni kegagalan. Pada tahap ini terdapat beberapa macam mekanisme penjalaran retak, namun hanya akan dibahas tiga macam mekanisme penjalaran retak yang paling umum terjadi, yakni:

1. Mekanisme melalui lintasan aktif yang sudah ada sejak semula.

Pada dasarnya mekanisme penjalaran melalui lintasan aktif yang sudah ada sejak semula adalah sama seperti korosi batas butir, penjalaran pada mekanisme ini akan cenderung terjadi di sepanjang batas butir yang aktif. Dimana batas butir tersebut pada awalnya terpolarisasi secara anodik akibat beberapa sebab yang berhubungan dengan aspek metalurgi, seperti segregasi dan denudasi pada unsur-unsur pembentuk logam dan paduannya. Dislokasi yang terjadi pada tahap awal, yakni tahap pemicuan, akan mengalami penumpukan untuk selanjutnya, ketika dikenakan tegangan tarik, akan tetap terbuka dan memberi celah bagi elektrolit untuk dapat masuk ke bagian ujung dalam cacat tersebut.

2. Mekanisme melalui lintasan aktif akibat regangan.

Mekanisme ini bekerja dengan cara memperburuk cacat, yang terbentuk daripada fenomena dislokasi pada tahap pemicuan, dengan regangan sebagai unsur pengendali. Salah satu ciri SCC, seperti yang telah dikemukakan oleh Brown, adalah bahwa paduan biasanya tidak reaktif terhadap lingkungan SCC jika tidak terdapat tegangan atau tegangan bernilai sangat kecil sehingga tidak mampu merusak lapisan pasif suatu permukaan logam, pendapat tersebut adalah dasar dari mekanisme ini, dimana tegangan-regangan akan sangat berperan dalam mekanisme ini. Ketika tegangan mampu menguraikan ikatan lapisan pasif pada permukaan logam maka regangan akan timbul, selanjutnya, dalam lingkungan SCC, regangan tersebut akan menginisiasi SCC untuk terjadi. Apabila penjalaran retak akibat penguraian terjadi, maka laju pertumbuhan retak di ujung retakan tempat penguraian anodik berlangsung akan bernilai paling besar dibanding bagian sisi retakan yang telah terpasifkan oleh karena telah berhubungan dengan lingkungan lebih lama (Trethewey, 1996). Secara

keseluruhan, mekanisme ini akan sangat erat hubungannya dengan perilaku aktif-pasif dimana perilaku tersebut juga memiliki hubungan yang kuat dengan sifat elektrokimia.

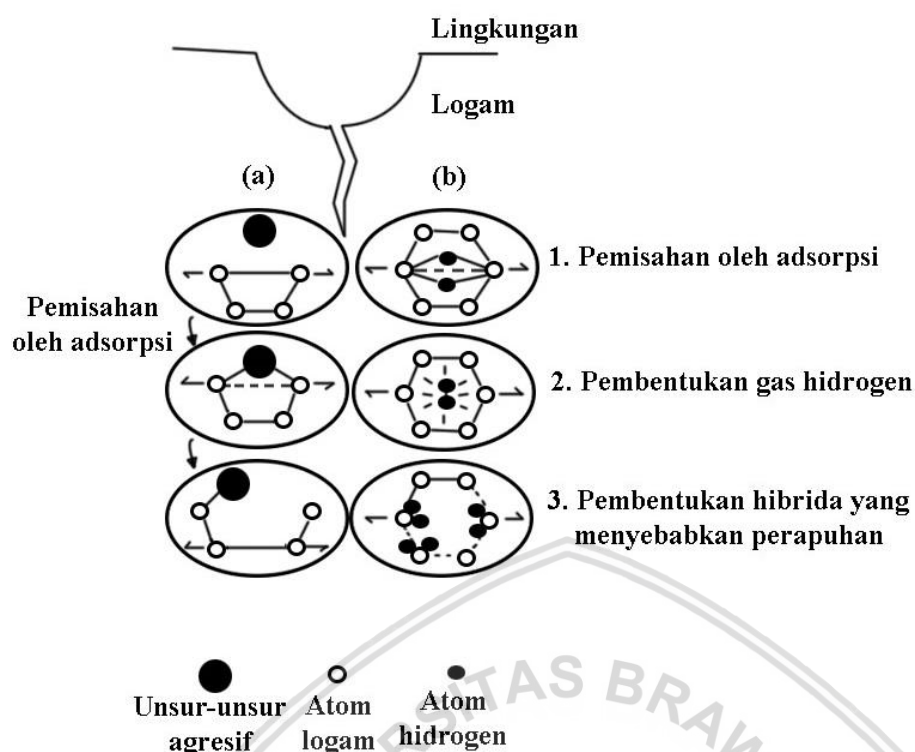
Pecahnya lapisan pasif pada suatu permukaan yang diperburuk oleh regangan akan diikuti oleh penguraian logam pada bagian yang pecah tersebut. Hal tersebut yang pada akhirnya akan memicu penjalaran retak, dimana laju penjalaran retak ditentukan oleh tiga hal, yakni:

- a. Laju pecahnya lapisan pasif, merupakan laju peregangan yang terjadi pada proses peretakan lapisan pasif suatu unsur logam.
- b. Laju sirkulasi larutan, merupakan laju penggantian dan pembuangan larutan pada ujung retak dimana hal ini ditentukan oleh seberapa mudah masuknya unsur-unsur agresif ke bagian ujung retak.
- c. Laju pasivasi, merupakan laju logam dalam membentuk lapisan pasif baik sebelum dan sesudah lapisan tersebut mengalami kerusakan (pecah).

Ketiga hal tersebut akan saling berhubungan antara satu dengan yang lainnya. Semakin tinggi laju pecahnya lapisan pasif akan mengakibatkan celah terbuka lebih lama, hal ini memberi kesempatan bagi larutan korosif untuk masuk serta menyerang ujung retakan dan melakukan penjalaran secara berkesinambungan. Laju sirkulasi yang tinggi akan membuat korosi terjadi secara lebih cepat. Sementara laju pasivasi akan semakin baik jika berjalan tidak terlalu cepat dan tidak terlalu lambat. Dimana jika laju pasivasi berjalan terlalu cepat maka akan menyebabkan laju penjalaran lambat karena akan berpengaruh dengan laju sirkulasi, dan jika laju pasivasi berjalan terlalu lambat maka fenomena yang akan didapat adalah, hanya, korosi yang disebabkan penguraian logam secara berlebihan di sisi-sisi retakan.

3. Mekanisme yang menyangkut absorpsi.

Mekanisme menyangkut absorpsi ini merupakan kebalikan daripada mekanisme akibat regangan, dimana korosi menjadi unsur pengendali. Unsur-unsur agresif dan atom hydrogen akan memiliki peran penting dalam memperlemah ikatan-ikatan antar atom logam sehingga kegagalan akan lebih mudah untuk terjadi. Mekanisme yang menyangkut absorpsi dapat digambarkan secara skematik dengan gambar sebagai berikut:



Gambar 2.7 Mekanisme penjalaran retak dibagi menjadi dua jenis, yakni (a) Absorpsi oleh unsur-unsur agresif dan (b) Absorpsi oleh atom hidrogen
Sumber: Trethwey (1996)

Gambar 2.7 (a) menunjukkan peristiwa dimana atom-atom logam pada ujung retakan diabsorpsi dan menyebabkan berkurangnya kekuatan ikatan antaratom logam tersebut. Penjalaran akan memiliki mekanisme sebagai berikut; Unsur-unsur aktif dalam larutan elektrolit akan menurunkan integritas mekanik pada bagian ujung retakan, sehingga kemudian hal tersebut akan memudahkan proses terputusnya ikatan antaratom pada rentang energi yang jauh lebih rendah dari seharusnya. Ion-ion agresif, yang spesifik pada setiap fenomena SCC, akan mengurangi kekuatan ikatan antaratom logam di ujung retakan akibat proses absorpsi dan selanjutnya hal ini menyebabkan terbentuknya ikatan-ikatan antara atom logam dan unsur-unsur agresif. Energi yang digunakan untuk mengikat unsur-unsur agresif oleh atom-atom logam akan mengurangi energi ikatan antarlogam sehingga selanjutnya pemisahan secara mekanik lebih mudah terjadi.

Sedangkan Gambar 2.7 (b) menunjukkan mekanisme mengenai absorpsi yang kedua yang didasarkan pada pembentukan atom-atom hidrogen, akibat reduksi ion-ion hidrogen, pada permukaan retakan. Absorpsi oleh hidrogen akan memisahkan atom-atom logam tepat diujung retakan, dimana hal ini akan menyebabkan pelemahan atau perapuhan ikatan antarlogam dan akan memicu pembentukan gas hidrogen pada

daerah yang melebar atau di sepanjang bidang sesar. Selanjutnya atom-atom hidrogen akan membentuk gas hidrogen dalam rongga-rongga permukaan logam. Dalam bentuk molekul, hidrogen tidak dapat terdifusi melalui kisi-kisi logam sehingga tekanan di dalam rongga-rongga akan meningkat. Dan pada akhirnya, pembentukan hibrida logam akan memperparah perapuhan sehingga pemutusan ikatan-ikatan atom secara mekanik akan lebih mudah untuk terjadi.

2.4.2.3 Tahap Terjadinya Kegagalan

Tahap ini merupakan tahap dimana suatu kegagalan pada benda atau komponen akibat fenomena SCC terjadi. Pada tahap ini, struktur material suatu benda atau komponen logam sudah mencapai titik dimana seluruh ikatan antaratom nya telah hilang.

2.5 American Standard Testing and Material A36 (ASTM A36)

Baja karbon adalah paduan antara unsur besi dan karbon (paling dominan) dengan sedikit paduan Si, Mn, P, S, dan Cu. Sifat baja karbon sangat bergantung pada kadar karbonnya, oleh karena itu baja karbon ini dikelompokkan jenisnya berdasarkan persentase kadar karbonnya. Bila kadar karbon naik, kekuatan dan kekerasannya juga bertambah tinggi, akan tetapi perpanjangannya menurun (Wiryosumarto, 2008).

Berdasarkan kandungan unsur karbon, baja karbon dibedakan menjadi:

- Baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,30%
- Baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,30 – 0,45%
- Baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,45 – 1,70%

Baja ASTM A36 termasuk kedalam *Low Carbon Steels*. *Low Carbon Steels* memiliki kandungan karbon hingga 0,25% C dengan 0,4 sampai 0,7% Mn, 0,1 sampai 0,5% Si, dan sedikit sulfur, fosfor, dan unsur lain yang tersisa (Callister, 2004). Baja jenis ini mengandung sedikit mangan untuk stabilisasi sulfur dan silikon untuk deoksidasi.

Tabel 2.2
Komposisi ASTM A36

Komposisi	Metrik
Besi, Fe	98,34 %
Karbon, C	0,17 %
Mangan, Mn	1,4 %
Fosforus, P	0,045 %
Sulfur, S	0,045 %

Sumber: Sutindo Raya Mulya

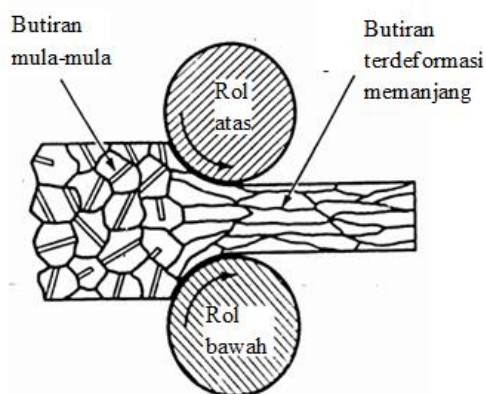
Tabel 2.3
Sifat Mekanis Baja Karbon

<i>Yield Strength</i>	235 – 245 MPa
<i>Tensile Strength</i>	400 – 5100 MPa
<i>Elongation</i>	17 – 21%

Sumber: ASTM Internasional (2005)

2.6 Cold Rolling

Proses *cold rolling* merupakan proses deformasi plastik dan temperatur kerjanya berlangsung di bawah temperatur rekristalisasi. Pada proses ini terjadi mekanisme *strain hardening*, yaitu mekanisme penguatan yang disebabkan karena perbanyakan densitas dislokasi. Dislokasi merupakan cacat garis dan akan bergerak selama gaya bekerja pada logam tersebut. Jika pergerakan dislokasi terhambat dan tidak memungkinkan untuk bergerak maka dislokasi akan memperbanyak diri, sehingga dibutuhkan gaya dari luar yang lebih besar untuk menggerakkan dislokasi tersebut. Terjadinya *strain hardening* pada logam menyebabkan naiknya kekerasan dan kekuatan material tetapi akan menurunkan keuletan material.



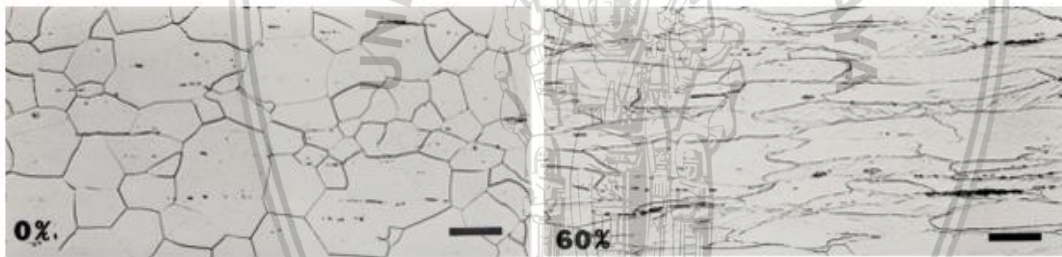
Gambar 2.8 Proses pengerolan dingin
Sumber: C.R. Brooks (1982)

Cold rolling dikenal untuk mengubah sifat-sifat logam dan paduan. Deformasi meningkatkan kekuatan logam tetapi biasanya mengurangi ketangguhan. Semakin tinggi presentasi reduksi dingin yang dilakukan pada plat maka semakin besar pembentukan sudut orientasi pada hasil plat.

2.7 Orientasi Butir

Proses deformasi seperti *cold rolling* akan menyebabkan butir - butir logam secara serempak mengarah pada orientasi tertentu. Pada saat proses *cold rolling*, butir pada logam akan mengalami deformasi plastis. Ketika butir mengalami mulur maka panjang butir akan bertambah panjang searah dengan arah pengerolan. Selain itu bentuk butir juga akan mengalami perubahan menyesuaikan dengan berubahnya panjang butir.

Mulur dan perubahan dari butir akan mengubah permukaan dari logam. Berubahnya permukaan pada logam akan mempengaruhi sifat mekanis dari logam tersebut. Perbedaan orientasi butir akan mempunyai sifat mekanis yang berbeda (Voort, 2014).



Gambar 2.9 Foto struktur mikro perbesaran 500x pada plat baja karbon rendah dengan (a) sebelum melalui proses *cold rolling* dan (b) plat baja karbon rendah hasil *cold rolling* dengan reduksi 60%

Sumber: Voort (2014)

2.8 Standar Uji Alat SCC

Sebagai persyaratan untuk dapat terjadinya SCC adalah adanya 3 hal yaitu tegangan, lingkungan korosif, dan kerentanan material. Seperti sudah dijelaskan pada sub bab 2.2, tegangan dapat berupa tegangan aplikasi atau *residual stress*. Lingkungan yang bersifat korosif dapat terjadi pada lingkungan cair maupun pada udara dan dipengaruhi oleh tingkat konsentrasi. Kerentanan material dapat berupa adanya retakan atau cacat pada material, serta tingkat sensitifitas material terhadap konsentrasi korosi dari lingkungan.

Pada penelitian ini, alat yang dipakai menggunakan besi pembeban sebagai pemberi tegangan. Untuk lingkungan korosif, plat direndam di dalam wadah yang berisi H_2SO_4 dengan konsentrasi 1M. Sedangkan kerentanan material diperoleh dengan membuat

precrack berupa *notch* pada kedua sisi vertikal agar SCC dapat lebih difokuskan dan diamati pada bagian tersebut.

Pemberian *double edge notch* pada spesimen penelitian ini memiliki panjang 4 mm pada setiap *notch*. Dengan melalui pengujian simulasi ANSYS 19.1, didapat perbandingan besar tegangan antara di ujung retak dan pada posisi terjauh dari ujung retak sebagai berikut:

Tegangan minimum di posisi terjauh dari ujung retak = 78,019 MPa

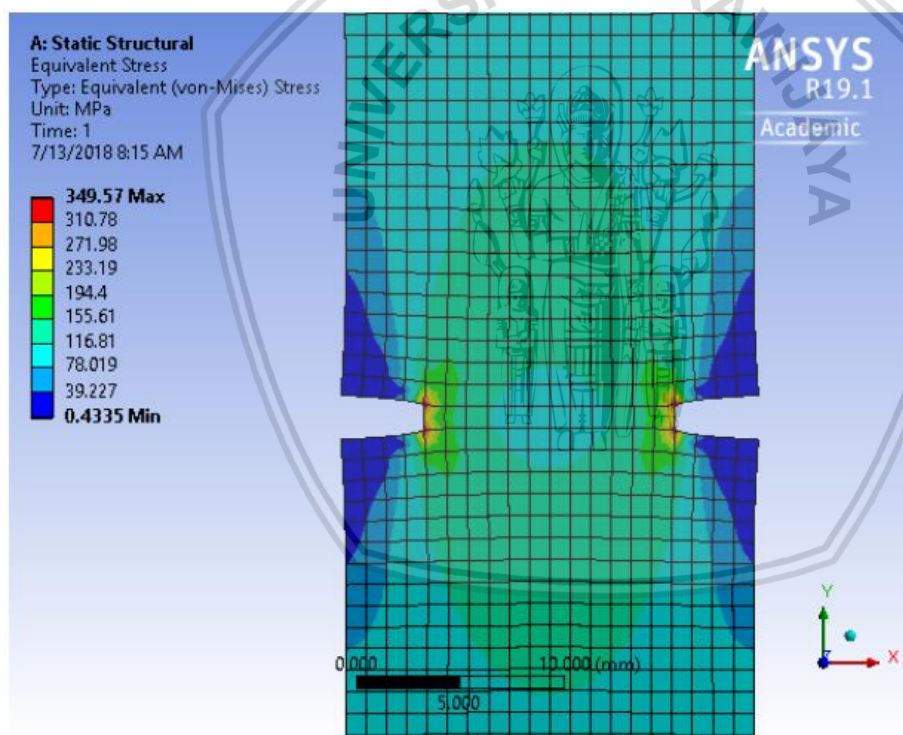
Tegangan maximum di ujung retak = 349,57 MPa

Spesifikasi material yang digunakan pada simulasi ini adalah:

Jenis material = *Structural Steel*

Tensile Yield Strength = 250MPa

Tensile Ultimate Strength = 460 MPa



Gambar 2.10 Hasil simulasi ANSYS 19.1 untuk spesimen

Syarat untuk mendesain *precrack* pada suatu spesimen pengujian adalah jika tegangan pada ujung retak yang terdesain bernilai minimal lebih besar nilai 0,6x batas *yield*-nya (Shigley, 2011). Dari hasil simulasi tersebut terlihat bahwa nilai dari tegangan pada ujung retak memenuhi persyaratan tersebut. Selain itu, nilai dari tegangan pada ujung retak memiliki nilai lebih dari 3x nilai tegangan pada posisi terjauh dari ujung retak. Ukuran

notch yang diperbolehkan adalah jika tegangan pada ujung retak bernilai minimal 3x besarnya dari nilai minimum tegangan pada posisi terjauh dari ujung retak (Tada, 2000). Dari sini diperoleh ukuran *notch* yang memenuhi syarat dan akan dipakai untuk spesimen pada penelitian ini.

2.9 Uji Tarik SCC

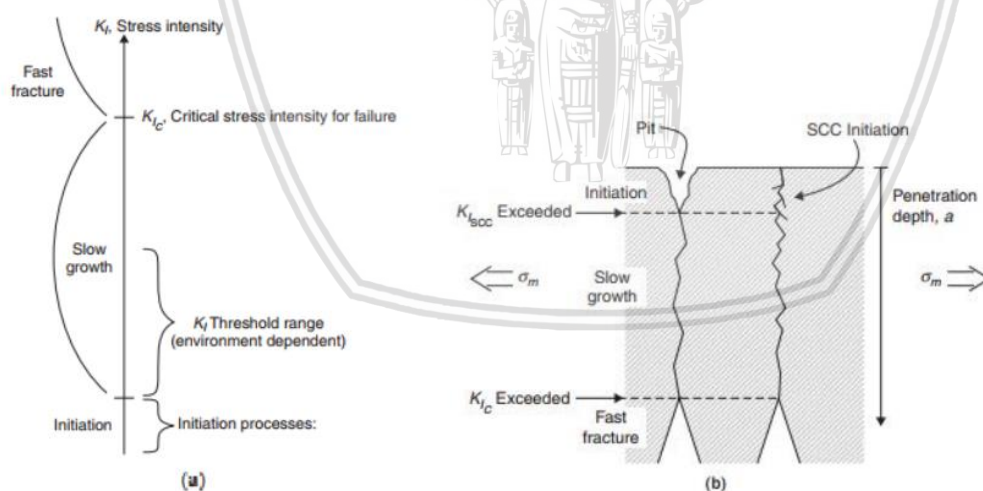
Sifat mekanik suatu material merupakan data yang wajib diketahui dalam tahap perancangan suatu benda atau komponen rekayasa. Kerentanan suatu material sangat berpengaruh dalam fenomena SCC, dimana salah satu hal yang berpengaruh pada kerentanan tersebut adalah sifat-sifat material tersebut. Salah satu pengujian yang paling umum digunakan untuk mengetahui sifat mekanik suatu material logam adalah pengujian tarik (Salindeho, 2013). Secara umum uji tarik didefinisikan sebagai pemberian beban atau tegangan tarik kepada material dengan tujuan mengetahui atau mendeteksi kekuatan daripada material tersebut. Prinsip dari pengujian ini, secara garis besar, dapat dijelaskan sebagai berikut; Spesimen yang telah dibentuk sedemikian rupa akan diregangkan secara merata dengan laju dan tingkat pembebanan yang telah ditentukan terlebih dahulu. Selanjutnya akan dilakukan pencatatan waktu peregangan daripada spesimen tersebut hingga mengalami kegagalan atau patah (Trethewey, 1996). Dalam kasus SCC, pada dasarnya, pengujian tarik juga memiliki prinsip yang sama namun dengan data keluaran yang berbeda.

Pengujian tarik dengan SCC dapat dijelaskan sebagai berikut; Sebuah spesimen dengan retak awal, yang telah ada atau direkayasa sebelumnya, akan diberikan tegangan konstan dengan kondisi terlarut dalam lingkungan korosi. Selanjutnya retak awal pada spesimen tersebut akan mengalami penjararan hingga kemudian mengalami perpatahan (Staehle, 1977). Sifat-sifat spesimen, terhadap fenomena SCC, tersebut kemudian dinilai berdasarkan waktu yang dibutuhkan hingga mencapai kegagalan atau patah. Waktu patah akan memberikan pengetahuan mengenai sifat benda melalui grafik pengaruh arah orientasi butir terhadap ketahanan material pada lingkungan SCC. Perubahan berat spesimen sebelum dan sesudah patah akan menginformasikan laju korosi material terhadap lingkungan korosi yang diujikan.

2.10 Faktor Intensitas Tegangan

Ilmu kekuatan material klasik mengandalkan prinsip karakteristik material yang berasaskan pada diagram tegangan-regangan dan batas elastisitas suatu material. Namun pada praktik di kemudian hari ditemukan bahwa adanya pengaruh yang lebih dari sekedar sifat material itu sendiri, dan pengukuran kekuatan material dengan asas diagram tegangan-regangan menjadi kurang efektif. Pada perkembangannya, ilmuwan menemukan bahwa suatu nilai dapat menggantikan fungsi daripada diagram ini. Nilai tersebut didefinisikan sebagai faktor intensitas tegangan. Sebagian literatur mungkin mendefinisikan nilai ini sebagai energi pelepasan regangan, namun kedua nilai ini sebenarnya memiliki fungsi yang sama dan saling berhubungan.

Dalam aplikasinya, terdapat dua nilai acuan terpenting daripada faktor intensitas tegangan, yakni K_{ISCC} dan K_{IC} (Roberge, 1976). Dimana K_{ISCC} akan mendefinisikan suatu nilai faktor intensitas tegangan material pada kondisi material tersebut akan memulai reaksinya dengan lingkungan SCC secara spesifik, dengan adanya retak awal serta penjaran retak, dan K_{IC} mendefinisikan nilai ketegaran perpatahan material, yakni suatu nilai faktor intensitas tegangan material pada kondisi material tersebut mengalami penjaran retak dengan sangat cepat sehingga menyebabkan kegagalan katastropik.

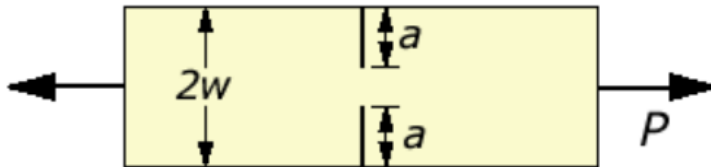


Gambar 2.11 (a) Skema K_{IC} dan K_{ISCC} terhadap mekanisme SCC (b) Visualisasi K_{IC} dan K_{ISCC} pada fenomena SCC

Sumber: Roberge (1976)

Pengukuran akan nilai ini didapat dari perilaku retak awal hingga terjadinya kegagalan. Seperti yang telah diketahui, pada keadaan aktual tidak akan ada satupun material yang dapat tercipta tanpa adanya cacat sama sekali, hal ini yang akan menjadi pemicu yang kemudian akan berkembang menjadi penjaran dengan adanya faktor-faktor

lain. Setiap bentuk cacat atau retak memiliki nilai faktor intensitas tegangannya masing-masing. Terdapat beberapa rumusan dasar berdasarkan letak retak dan jumlah retak. Salah satu fungsi yang umum digunakan adalah peretakan awal dengan posisi di ujung kedua sisi dari satu spesimen.



Gambar 2.12 Sebuah plat dengan retak pada kedua ujung sisinya yang mengalami pembebanan dua arah
Sumber: Tada (2000)

Perumusan faktor intensitas tegangan untuk kasus ini adalah sebagai berikut:

$$K = \frac{P}{B\sqrt{w}} \left[\frac{\sqrt{\frac{\pi a}{2w}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{w}}} \left\{ 1,122 - 0,561 \left(\frac{a}{w} \right) - 0,205 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 0,471 \left(\frac{a}{w} \right)^3 + 0,19 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right\} \right] \dots\dots\dots (2-6)$$

Dengan:

K = Faktor intensitas tegangan (MPa $\sqrt{m}$)

P = Gaya yang diberikan (N)

B = Tebal benda (m)

w = Lebar benda (m)

a = Panjang benda (m)

Ketika retak mencapai ukuran kritis yang selanjutnya menyebabkan kegagalan terjadi secara langsung, maka faktor intensitas tegangan tersebut menjadi suatu sifat material yang dikenal dengan istilah ketegaran perpatahan, dan memiliki simbol K_{IC} . Penentuan suatu nilai ketegaran perpatahan pada sebuah material dapat dibuat sedemikian rupa sehingga dapat dijadikan parameter yang konservatif dan mampu menggambarkan kondisi terburuk yang mungkin dialami suatu material.

2.11 Hipotesis

Berdasarkan dasar teori dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, hipotesis yang dapat diambil adalah semakin sejajar orientasi butir plat terhadap arah pengerolan akan meningkatkan waktu plat untuk patah di lingkungan korosif. Hal ini dipengaruhi oleh semakin sejajar orientasi butir plat terhadap arah pengerolan akan berdampak pada ukuran butir yang semakin kecil. Ketika ukuran butir semakin kecil, nilai kekuatan tarik maksimum menjadi semakin tinggi. Dengan adanya perbedaan ukuran butir, dan nilai kekuatan tarik maksimum dari setiap orientasi butir plat maka akan berdampak pada ketahanan potongan plat untuk terjadi rambat retak di lingkungan SCC. Sehingga setiap variasi orientasi butir memiliki nilai Faktor Intensitas Tegangan (K) yang berbeda. Semakin sejajar orientasi butir plat terhadap arah pengerolan maka nilai K_{IC} akan lebih tinggi dibandingkan dengan orientasi butir plat yang semakin tegak lurus terhadap arah pengerolan.





BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental nyata. Metode ini digunakan untuk menguji suatu perlakuan dengan cara membandingkan satu atau lebih kelompok pengujian dengan perlakuan dan tanpa perlakuan.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada 19 Maret sampai dengan 20 April 2018, dan bertempat di Laboratorium Metrologi Industri, dan Laboratorium Metalurgi Fisik, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur, Indonesia.

3.3 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini terdapat tiga macam variabel, dimana berfungsi mempermudah struktur pengambilan data. Ketiga variabel tersebut adalah variabel terkontrol, variabel bebas, dan variabel terikat.

3.3.1 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang besarnya telah ditentukan sebelum penelitian berlangsung dan bersifat konstan selama penelitian berlangsung. Dalam penelitian ini yang merupakan variabel terkontrol adalah sebagai berikut:

1. Jenis logam spesimen uji menggunakan ASTM A36
2. Temperatur lingkungan bernilai konstan pada temperatur kamar (25°C)
3. Tekanan lingkungan bernilai konstan pada tekanan atmosfer (760 mmHg)
4. Larutan korosif yaitu H_2SO_4 1M.
5. Massa pemberat 40 kg (71,38% dari tegangan luluh).

3.3.2 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya telah ditentukan, tidak di pengaruhi variabel lain, dan merupakan bentuk variasi dari sebuah penelitian. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel bebas adalah variasi orientasi butir 0, 15, 30, 45, 60, 75, dan 90° yang diberikan pada plat ASTM A36.

3.3.3 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas, dimana hasilnya dapat diketahui setelah penelitian berlangsung. Variabel terikat merupakan besaran-besaran yang nantinya menjadi tolak ukur atau data acuan serta dasar daripada pembahasan pada sebuah penelitian. Dalam penelitian ini yang merupakan variabel terikat adalah waktu patah, diameter butir, kekuatan tarik maksimum, dan faktor intensitas tegangan setiap variasi spesimen di lingkungan SCC.

3.4 Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian

Berikut merupakan rincian alat dan bahan, dengan gambar terlampir pada bagian akhir laporan ini, selama penelitian berlangsung. Dijelaskan berdasarkan kegunaannya.

3.4.1 Alat

1. Gergaji
Digunakan untuk memberikan takikan pada spesimen uji.
2. Alat Uji *Stress Corrosion Cracking* (SCC)
Digunakan untuk memberikan efek lingkungan SCC pada spesimen uji.
3. Sarung Tangan Laboratorium
Digunakan untuk melindungi tangan daripada larutan korosif.
4. Gelas Ukur
Digunakan untuk mengukur volume larutan korosi pada pengujian.
5. Sarung Tangan Lapangan
Digunakan untuk melindungi tangan selama pengoperasian alat uji SCC.
6. Lem
Digunakan untuk melekatkan spesimen uji dengan bak penampung larutan korosif.

7. Kunci Pas

Digunakan untuk melakukan pengencangan penjepit bagian atas dan bawah alat uji SCC.

8. Jam Weker

Digunakan untuk mengetahui waktu patah daripada spesimen uji.

9. Alat Suntik Tinta

Untuk memasukkan larutan korosi ke dalam bak penampung.

10. Laptop

Digunakan untuk mengolah data dan menyusun laporan.

11. Kamera DSLR

Untuk mendokumentasikan hasil patah spesimen.

3.4.2 Bahan

1. Spesimen Uji Dasar: ASTM A36

Digunakan sebagai jenis material pengujian dalam penelitian ini dengan komposisi dari ASTM A36 adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1

Komposisi ASTM A36

Komposisi	Metrik
Besi, Fe	98,34 %
Karbon, C	0,17 %
Mangan, Mn	1,4 %
Fosforus, P	0,045 %
Sulfur, S	0,045 %

Sumber: Sutindo Raya Mulya

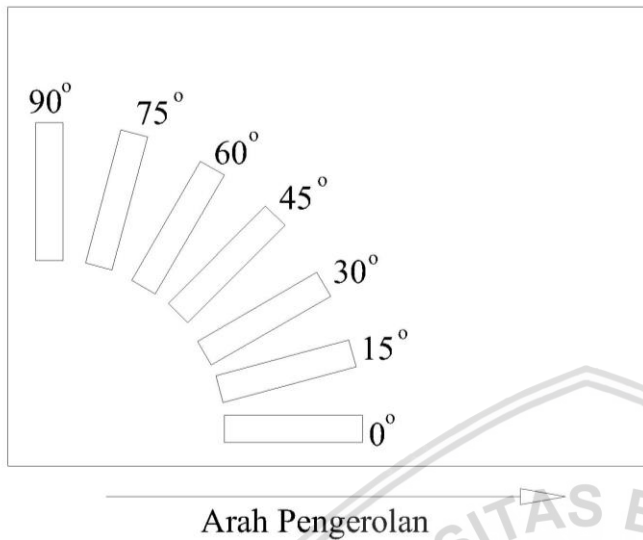
Tabel 3.2

Sifat Mekanis Baja Karbon

Yield Strength	235 – 245 MPa
Tensile Strength	400 – 5100 MPa
Elongation	17 – 21%

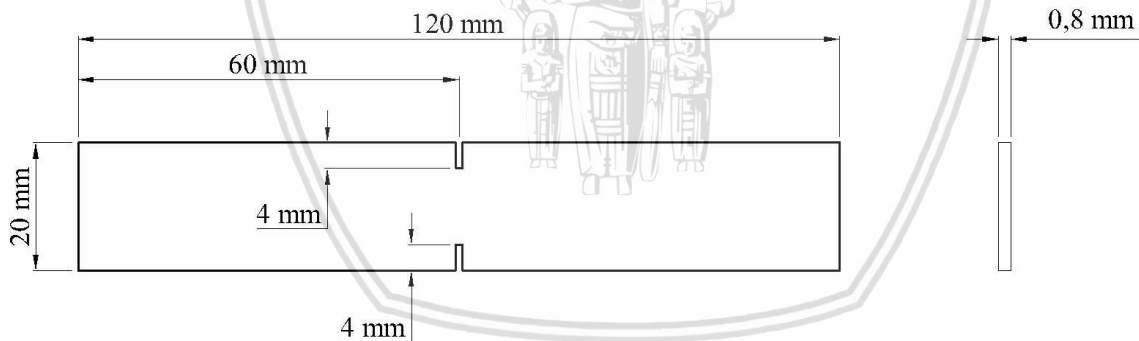
Sumber: ASTM Internasional (2005)

Spesimen kemudian dibedakan menjadi tujuh variasi orientasi butir plat yaitu 0, 15, 30, 45, 60, 75, dan 90°.



Gambar 3.1 Orientasi butir specimen pada plat ASTM A36

Dimensi dari setiap specimen uji pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



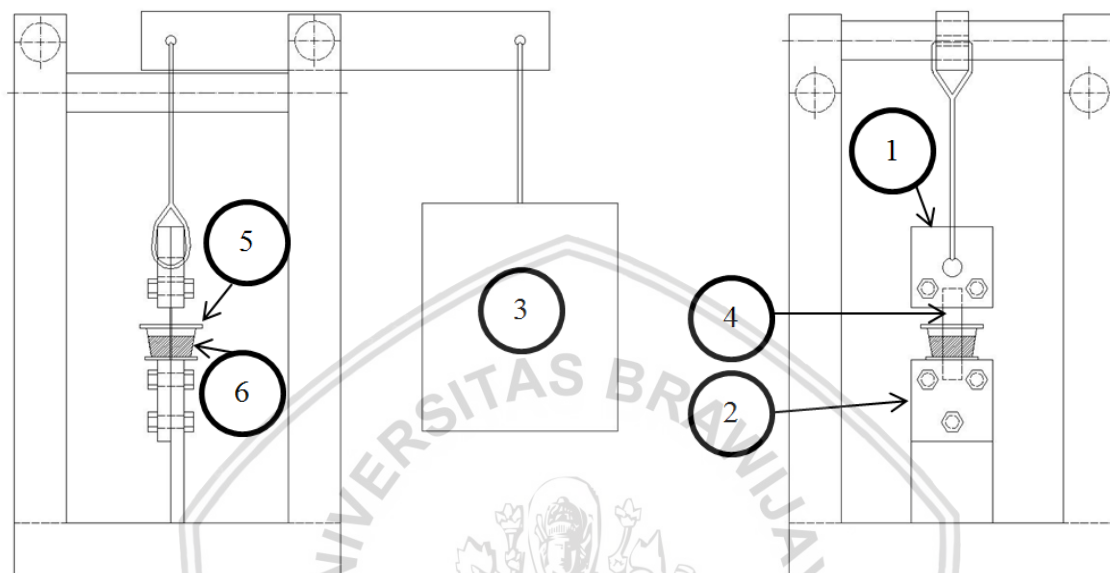
Gambar 3.2 Dimensi specimen uji

2. Larutan Korosif

Berperan sebagai larutan korosif pada penelitian ini. Digunakan untuk memberikan efek korosi pada specimen ASTM A36. Larutan korosif yang digunakan adalah H_2SO_4 1M.

3.5 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian ini hanya berfokus pada alat uji SCC sebagai alat pengujian utama pada penelitian ini. Konstruksi umum daripada instalasi alat uji SCC adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3 Instalasi alat uji SCC

Keterangan:

- | | |
|--------------------------|----------------------------------|
| 1. Penjepit bagian atas | 4. Spesimen uji |
| 2. Penjepit bagian bawah | 5. Bak penampung larutan korosif |
| 3. Beban | 6. Larutan korosif |

Adapun spesifikasi alat uji SCC ini ialah sebagai berikut:

- Panjang : 41,5 cm
- Lebar : 41,5 cm
- Tinggi : 70 cm
- Berat : 102 kg

3.6 Skema Penelitian

Skema penelitian ini dibuat guna memberikan gambaran akan rangkaian kegiatan penelitian secara garis besar, mulai dari studi literatur hingga penyusunan laporan penelitian. Dengan rincian sebagai berikut:

a. Merumuskan Masalah

Rumusan masalah digunakan untuk menjelaskan masalah atau isu yang akan dibahas pada penelitian ini. Secara umum, suatu rumusan masalah akan menggarisbawahi fakta-fakta dasar dari masalahnya, dan menjelaskan alasan masalah itu penting. Dengan adanya perumusan masalah penelitian, maka penulis menjadi lebih mudah dalam menentukan arah atau fokus dari suatu penelitian.

b. Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahap dalam penelitian dimana rasa ingin tahu penulis akan fenomena SCC membawa penulis untuk memperluas wawasan mengenai ilmu tegangan, mekanika perpatahan, dan korosi secara umum, untuk selanjutnya menjurus pada SCC pada logam ASTM A36.

Proses pendalaman materi ini penulis lakukan dengan pencarian serta pembelajaran daripada bahan-bahan penelitian dengan topik yang sama yang pernah dilakukan sebelumnya. Selain itu, penulis juga melakukan konsultasi dengan dosen pembimbing serta dosen-dosen lain di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

c. Penentuan Parameter Pengujian dan Perancangan Skema Penelitian

Dari studi literatur telah didapatkan arah pokok penelitian, sehingga selanjutnya diperlukan penentuan parameter uji. Parameter uji pada penelitian ini dibedakan menjadi tiga bagian mendasar yang dipercaya sebagai pemicu terjadinya fenomena SCC, yakni jenis material spesimen uji, tegangan yang diaplikasikan pada spesimen uji, dan larutan pemicu korosi.

Berdasarkan studi literatur, parameter yang didapat adalah ASTM A36 sebagai jenis material dengan geometri dua retak buatan, dan tegangan yang teraplikasikan dengan memberi pemberat sebesar 40kg, serta larutan pengkorosi H_2SO_4 1 M.

d. Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan alat dan bahan dilakukan di tempat yang berbeda-beda bergantung pada langkah penelitian yang akan dilakukan. Persiapan ini meliputi pembuatan surat izin peminjaman alat, perancangan alat uji SCC, pembuatan larutan korosif dan pemotongan spesimen. Pembuatan larutan korosif dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Perhitungan menemukan komposisi campuran yang sesuai untuk larutan dengan konsentrasi yang diinginkan.

- a. Menghitung molaritas dari larutan H_2SO_4

$$M = \frac{\rho \cdot 10 \cdot \% \text{massa}}{Mr} \dots\dots\dots (3-1)$$

Keterangan :

M = Molaritas

ρ = Massa jenis

Mr = Massa relatif zat terlarut

$$M = \frac{1,48 \cdot 10 \cdot 98}{98}$$

$$M = 14,8 \text{ M}$$

- b. Menghitung pengenceran larutan

$$\text{Molaritas}_1 \cdot \text{Volume}_1 = \text{Molaritas}_2 \cdot \text{Volume}_2 \dots\dots\dots (3-2)$$

$$(14,8) \cdot V_1 = (1) \cdot (1000 \text{ mL})$$

$$V_1 = 67,57 \text{ mL}$$

Maka perbandingan volume *aquadest* dan H_2SO_4

$$\frac{V_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{67,57 \text{ mL}}{(1000-67,57) \text{ mL}} = \frac{67,57 \text{ mL}}{932,43 \text{ mL}}$$

2. Melakukan pencampuran dengan labu ukur antara larutan H_2SO_4 dan *aquadest* dengan perbandingan sesuai dengan perhitungan.
3. Memindahkan hasil pengenceran larutan H_2SO_4 1M ke dalam tabung penyimpanan larutan korosif penelitian.
- e. Pengambilan Data dengan Alat Uji SCC

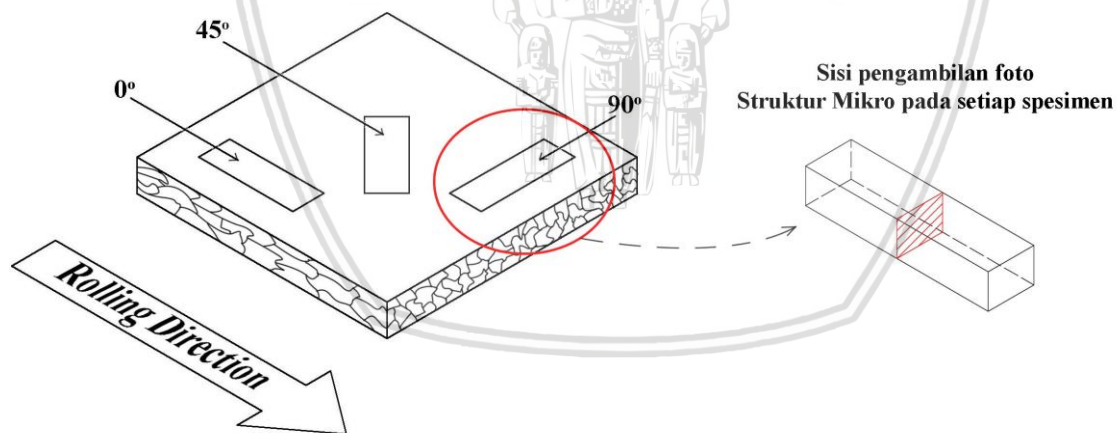
Pengambilan data pada pengujian SCC dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Pasangkan spesimen pada lubang yang ada pada bak penampung larutan korosi.
2. Lem bagian celah antara spesimen dan bak dengan lem (Aibon). Hal ini untuk mencegah kebocoran larutan korosi pada bak penampung saat pengujian.
3. Tunggu lem mengering setelah 12 jam untuk mendapatkan hasil yang optimal.

4. Pasang spesimen (beserta bak yang dilem) ke penjepit alat uji SCC.
5. Eratkan setiap penjepit dengan kunci pas.
6. Menyetel setiap jarum jam weker pada jam ke 0 dan menit ke 0.
7. Masukkan larutan korosi H_2SO_4 1M sebanyak 100 mL ke dalam bak dengan bantuan alat suntik tinta.
8. Pasang pemberat (40kg) pada alat uji SCC.
9. Catat waktu (hari, tanggal, dan pukul) pengujian dimulai.
10. Catat waktu (hari, tanggal, dan pukul) saat spesimen patah.
11. Hitung berapa lama waktu patah spesimen tersebut.
12. Ambil hasil patah spesimen dari alat uji SCC.
13. Foto hasil patah spesimen.

f. Pengambilan Foto Struktur Mikro setiap Spesimen Uji

Pengambilan foto struktur mikro spesimen yaitu dengan memotong spesimen menjadi 2 dan mengambil daerah hasil potongan spesimen sebagai sisi yang akan difoto struktur mikro, berikut ilustrasi daerah spesimen yang akan difoto:



Gambar 3.4 Ilustrasi sisi pengambilan foto struktur mikro spesimen

g. Analisis dan Pembahasan Data

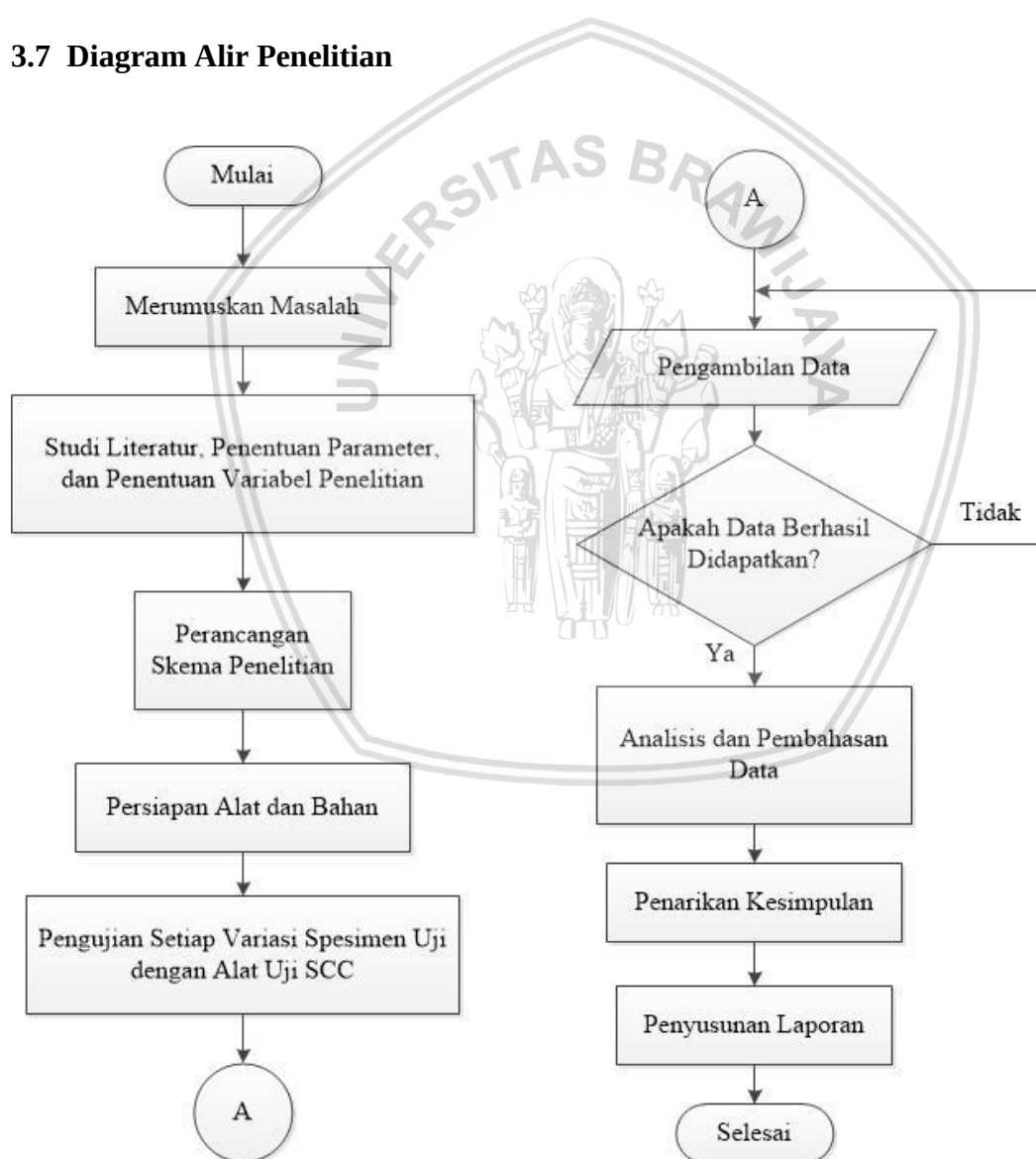
Analisis data pada penelitian ini dilakukan dengan acuan dasar teori pada tinjauan pustaka yang telah penulis pelajari sebelumnya dari berbagai macam sumber. Dari analisis tersebut akan didapatkan grafik guna memenuhi tujuan penelitian ini. Penarikan Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini merupakan jawaban daripada rumusan masalah dan juga hasil penelitian berupa hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian. Atas dasar pencapaian tujuan tersebut maka diharapkan dengan kesimpulan yang ada tercapai manfaat seperti dijelaskan pada sub bab 1.5.

h. Pembuatan Laporan

Pada tahap akhir penelitian, pembuatan laporan penulis lakukan sebagai fungsi dokumentasi, sebagai referensi penelitian sejenisnya di kemudian hari ataupun tinjauan pembelajaran khalayak umum, serta sebagai syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik.

3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5 Diagram alir penelitian



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

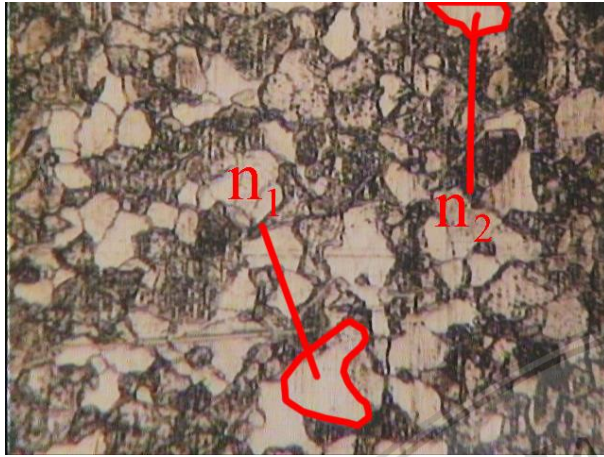
Data dari hasil penelitian yang sudah dilakukan akan dibagi menjadi 5, yaitu waktu patah dengan perlakuan lingkungan korosif H_2SO_4 1M dan tanpa larutan korosif H_2SO_4 , banyak butir pada hasil foto struktur mikro, panjang retak spesimen setiap satuan waktu, lebar spesimen setiap satuan waktu, dan tebal spesimen setiap satuan waktu. Hasil pengolahan data dari kelima data ini akan diolah menjadi dasar pokok dari pembahasan penelitian ini. Berikut tabel-tabel data dari penelitian.

Tabel 4.1
Data waktu patah setiap spesimen uji

Derajat (°)	Waktu Patah (jam)	
	Tanpa larutan H_2SO_4 1M	Dengan larutan H_2SO_4 1M
0	>336 jam	60j 45m
15	>336 jam	54j 50m
30	>336 jam	48j 30m
45	>336 jam	44j 25m
60	>336 jam	38j 20m
75	>336 jam	33j 10m
90	>336 jam	26j 20m

Pada tabel 4.1, dapat dilihat bahwa waktu patah untuk setiap variasi spesimen uji tanpa perlakuan lingkungan SCC tidak mengalami patah lebih dari 14 hari. Pada spesimen dengan perlakuan lingkungan SCC, spesimen dengan variasi orientasi butir 0° mengalami patah setelah pengujian SCC berlangsung selama 60 jam 45 menit, spesimen dengan orientasi butir 15° patah setelah 54 jam 50 menit, spesimen dengan orientasi butir 30° patah setelah 48 jam 30 menit, spesimen dengan orientasi butir 45° patah setelah 44 jam 25 menit, spesimen dengan orientasi butir 60° patah setelah 38 jam 20 menit, spesimen dengan orientasi butir 75° patah setelah 33 jam 10 menit, dan untuk spesimen dengan orientasi butir 90° patah setelah 26 jam 20 menit.

Dari data tabel ini, kemudian akan digunakan untuk melihat pengaruh orientasi butir plat terhadap waktu patah pada lingkungan SCC yang akan dianalisa lebih mendalam pada sub bab 4.4.1 dan 4.4.2.



Gambar 4.1 Butiran utuh (n_1) dan butiran yang terpotong (n_2) pada hasil foto struktur mikro

Tabel 4.2

Data banyak butir setiap spesimen uji pada hasil foto struktur mikro

Sudut Kemiringan ($^{\circ}$)	n_1	n_2
0	355	77
15	334	62
30	312	65
45	291	68
60	268	56
75	243	49
90	221	53

Tabel 4.2 merupakan data jumlah butir setiap spesimen uji yang didapat dari hasil foto struktur mikro. Nilai n_1 didapat dari menghitung jumlah butiran yang utuh dan n_2 adalah jumlah butiran yang terpotong. Data dari tabel ini kemudian akan diolah untuk mendapatkan diameter butir pada setiap variasi spesimen uji. Untuk pembahasan dari hasil pengolahan data diameter butir akan dibahas lebih mendalam pada sub bab 4.4.3.

Tabel 4.3

Data gaya tarik maksimum setiap variasi spesimen uji saat uji tarik

Sudut ($^{\circ}$)	F (kN)
0	5,19
15	5,1
30	5,04
45	4,97
60	4,93
75	4,87
90	4,82

Tabel 4.3 merupakan data gaya tarik maksimum yang terjadi pada setiap variasi spesimen uji saat dilakukan pengujian uji tarik. Data ini kemudian dapat digunakan untuk membandingkan kekuatan tarik maksimum dari setiap spesimen uji yang akan dibahas lebih dalam pada sub bab 4.4.4.



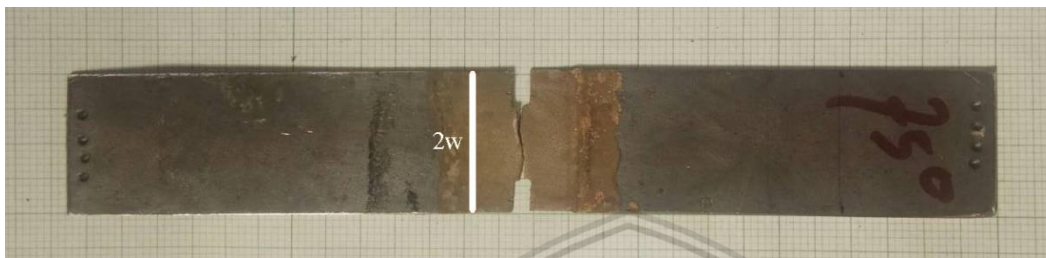
Gambar 4.2 Panjang retak dari spesimen Uji SCC (a)

Tabel 4.4

Data panjang retak setiap spesimen per satuan waktu

Waktu (jam)	a (meter)						
	0 $^{\circ}$	15 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	45 $^{\circ}$	60 $^{\circ}$	75 $^{\circ}$	90 $^{\circ}$
0	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$
6	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,040 \times 10^{-3}$	$4,100 \times 10^{-3}$
12	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,050 \times 10^{-3}$	$4,120 \times 10^{-3}$	$4,150 \times 10^{-3}$	$4,200 \times 10^{-3}$
18	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,100 \times 10^{-3}$	$4,200 \times 10^{-3}$	$4,230 \times 10^{-3}$	$4,340 \times 10^{-3}$
24	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,000 \times 10^{-3}$	$4,170 \times 10^{-3}$	$4,200 \times 10^{-3}$	$4,240 \times 10^{-3}$	$4,890 \times 10^{-3}$
K _{IC} 90 $^{\circ}$	-	-	-	-	-	-	$7,304 \times 10^{-3}$
30	$4,100 \times 10^{-3}$	$4,130 \times 10^{-3}$	$4,150 \times 10^{-3}$	$4,200 \times 10^{-3}$	$4,280 \times 10^{-3}$	$5,047 \times 10^{-3}$	
K _{IC} 75 $^{\circ}$	-	-	-	-	-	$7,451 \times 10^{-3}$	
36	$4,120 \times 10^{-3}$	$4,260 \times 10^{-3}$	$4,400 \times 10^{-3}$	$4,490 \times 10^{-3}$	$5,315 \times 10^{-3}$		
K _{IC} 60 $^{\circ}$	-	-	-	-	$7,597 \times 10^{-3}$		
42	$4,200 \times 10^{-3}$	$4,380 \times 10^{-3}$	$4,520 \times 10^{-3}$	$5,400 \times 10^{-3}$			
K _{IC} 45 $^{\circ}$	-	-	-	$7,743 \times 10^{-3}$			
48	$4,300 \times 10^{-3}$	$4,550 \times 10^{-3}$	$5,500 \times 10^{-3}$				
K _{IC} 30 $^{\circ}$	-	-	$7,889 \times 10^{-3}$				
54	$4,600 \times 10^{-3}$	$5,700 \times 10^{-3}$					
K _{IC} 15 $^{\circ}$	-	$8,035 \times 10^{-3}$					
60	$5,800 \times 10^{-3}$						
K _{IC} 0 $^{\circ}$	$8,181 \times 10^{-3}$						

Tabel 4.4 merupakan data penambahan panjang retak setiap variasi spesimen yang selalu dicermati dan dicatat secara berkala setiap 6 jam. Data dari tabel ini kelak akan digunakan sebagai salah satu variabel penentu besar K_{IC} dari setiap variasi spesimen pada waktu tertentu. Untuk pembahasan dari hasil pengolahan data K_{IC} akan dibahas lebih mendalam pada sub bab 4.4.7.



Gambar 4.3 Lebar dari spesimen Uji SCC (2w)

Tabel 4.5
Data lebar setiap spesimen per satuan waktu

Waktu (jam)	2w (meter)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$
6	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$
12	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$1,996 \times 10^{-2}$	$1,990 \times 10^{-2}$
18	$2,000 \times 10^{-2}$	$2,000 \times 10^{-2}$	$1,994 \times 10^{-2}$	$1,992 \times 10^{-2}$	$1,990 \times 10^{-2}$	$1,988 \times 10^{-2}$	$1,986 \times 10^{-2}$
24	$1,996 \times 10^{-2}$	$1,990 \times 10^{-2}$	$1,988 \times 10^{-2}$	$1,986 \times 10^{-2}$	$1,984 \times 10^{-2}$	$1,983 \times 10^{-2}$	$1,982 \times 10^{-2}$
K_{IC90°	-	-	-	-	-	-	$1,980 \times 10^{-2}$
30	$1,994 \times 10^{-2}$	$1,986 \times 10^{-2}$	$1,978 \times 10^{-2}$	$1,975 \times 10^{-2}$	$1,974 \times 10^{-2}$	$1,973 \times 10^{-2}$	
K_{IC75°	-	-	-	-	-	$1,972 \times 10^{-2}$	
36	$1,984 \times 10^{-2}$	$1,976 \times 10^{-2}$	$1,970 \times 10^{-2}$	$1,968 \times 10^{-2}$	$1,966 \times 10^{-2}$		
K_{IC60°	-	-	-	-	$1,964 \times 10^{-2}$		
42	$1,978 \times 10^{-2}$	$1,974 \times 10^{-2}$	$1,964 \times 10^{-2}$	$1,960 \times 10^{-2}$			
K_{IC45°	-	-	-	$1,957 \times 10^{-2}$			
48	$1,972 \times 10^{-2}$	$1,972 \times 10^{-2}$	$1,954 \times 10^{-2}$				
K_{IC30°	-	-	$1,949 \times 10^{-2}$				
54	$1,968 \times 10^{-2}$	$1,966 \times 10^{-2}$					
K_{IC15°	-	$1,941 \times 10^{-2}$					
60	$1,953 \times 10^{-2}$						
K_{IC0°	$1,934 \times 10^{-2}$						

Tabel 4.5 merupakan data perubahan lebar setiap variasi spesimen yang selalu dicermati dan dicatat secara berkala setiap 6 jam. Data dari tabel ini kelak akan digunakan sebagai salah satu variabel penentu besar K_{IC} dari setiap variasi spesimen pada waktu tertentu. Untuk pembahasan dari hasil pengolahan data K_{IC} akan dibahas lebih mendalam pada sub bab 4.4.7.



Gambar 4.4 Tebal dari spesimen Uji SCC (B)

Tabel 4.6

Data tebal setiap spesimen per satuan waktu

Waktu (jam)	B (meter)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	$8,000 \times 10^{-4}$	$8,000 \times 10^{-4}$	$8,000 \times 10^{-4}$	$8,000 \times 10^{-4}$	$8,000 \times 10^{-4}$	$8,000 \times 10^{-4}$	$8,000 \times 10^{-4}$
6	$7,640 \times 10^{-4}$	$7,610 \times 10^{-4}$	$7,570 \times 10^{-4}$	$7,520 \times 10^{-4}$	$7,480 \times 10^{-4}$	$7,430 \times 10^{-4}$	$7,357 \times 10^{-4}$
12	$7,140 \times 10^{-4}$	$7,050 \times 10^{-4}$	$7,040 \times 10^{-4}$	$6,980 \times 10^{-4}$	$6,910 \times 10^{-4}$	$6,830 \times 10^{-4}$	$6,714 \times 10^{-4}$
18	$6,670 \times 10^{-4}$	$6,510 \times 10^{-4}$	$6,480 \times 10^{-4}$	$6,410 \times 10^{-4}$	$6,320 \times 10^{-4}$	$6,230 \times 10^{-4}$	$6,070 \times 10^{-4}$
24	$6,360 \times 10^{-4}$	$6,170 \times 10^{-4}$	$6,030 \times 10^{-4}$	$5,840 \times 10^{-4}$	$5,680 \times 10^{-4}$	$5,600 \times 10^{-4}$	$5,427 \times 10^{-4}$
K_{IC90°	-	-	-	-	-	-	$4,784 \times 10^{-4}$
30	$5,870 \times 10^{-4}$	$5,720 \times 10^{-4}$	$5,580 \times 10^{-4}$	$5,360 \times 10^{-4}$	$5,240 \times 10^{-4}$	$5,100 \times 10^{-4}$	
K_{IC75°	-	-	-	-	-	$4,549 \times 10^{-4}$	
36	$5,360 \times 10^{-4}$	$5,120 \times 10^{-4}$	$4,970 \times 10^{-4}$	$4,840 \times 10^{-4}$	$4,700 \times 10^{-4}$		
K_{IC60°	-	-	-	-	$4,314 \times 10^{-4}$		
42	$4,870 \times 10^{-4}$	$4,630 \times 10^{-4}$	$4,510 \times 10^{-4}$	$4,280 \times 10^{-4}$			
K_{IC45°	-	-	-	$4,080 \times 10^{-4}$			
48	$4,470 \times 10^{-4}$	$4,220 \times 10^{-4}$	$3,867 \times 10^{-4}$				
K_{IC30°	-	-	$3,845 \times 10^{-4}$				
54	$4,150 \times 10^{-4}$	$3,760 \times 10^{-4}$					
K_{IC15°	-	$3,610 \times 10^{-4}$					
60	$3,507 \times 10^{-4}$						
K_{IC0°	$3,375 \times 10^{-4}$						

Tabel 4.6 merupakan data perubahan tebal setiap variasi spesimen yang selalu dicermati dan dicatat secara berkala setiap 6 jam. Data dari tabel ini kelak akan digunakan sebagai salah satu variabel penentu besar K_{IC} dari setiap variasi spesimen pada waktu tertentu. Untuk pembahasan dari hasil pengolahan data K_{IC} akan dibahas lebih mendalam pada sub bab 4.4.7.

4.2 Pengolahan Data

1. Diameter Butiran dengan Metode Planimetric

a. Menghitung bilangan Jeffries (f).

$$f = \frac{M^2}{A} \dots\dots\dots(4-1)$$

Dimana:

f = Bilangan Jeffries

M = Perbesaran

A = Luas penampang

b. Menghitung jumlah butiran utuh (n_1) pada hasil foto struktur mikro.

c. Menghitung jumlah butiran yang terpotong (n_2) pada hasil foto struktur mikro.

d. Menghitung jumlah butiran per satuan luas (N_A).

$$N_A = f \left(n_1 + \frac{n_2}{2} \right) \dots\dots\dots(4-2)$$

Dimana:

N_A = Jumlah butir per satuan luas

f = Bilangan Jeffries

n_1 = Jumlah butir utuh

n_2 = Jumlah butir yang terpotong

e. Menghitung diameter butir (d)

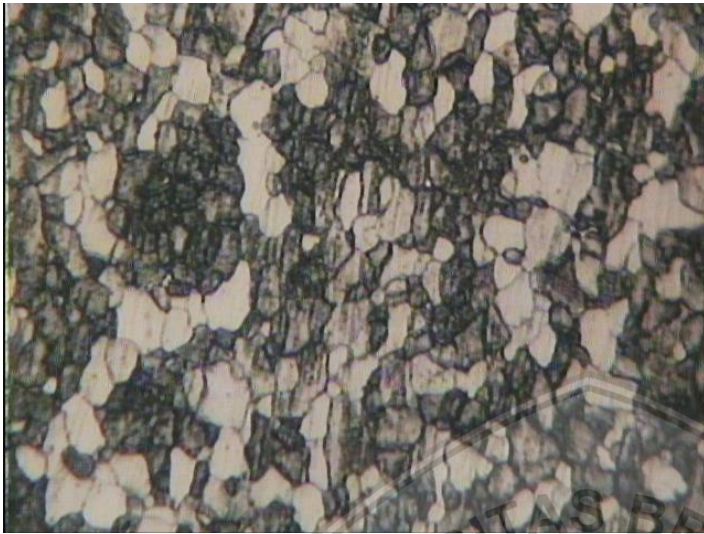
$$d = \sqrt{\frac{1}{N_A}} \dots\dots\dots(4-3)$$

Dimana:

d = Diameter butir

N_A = Jumlah butir per satuan luas

Dengan menggunakan rumus-rumus tersebut maka dapat dicontoh dengan data pada hasil foto struktur mikro spesimen uji variasi orientasi butir 45° sebagai berikut:



Gambar 4.5 Hasil foto struktur mikro perbesaran 400x pada spesimen uji variasi orientasi butir 45°

$$M = 400$$

$$A = 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} = 50 \text{ mm}^2$$

$$n_1 = 291$$

$$n_2 = 68$$

$$f = \frac{400^2}{50 \text{ mm}^2} = 3200 \text{ mm}^{-2}$$

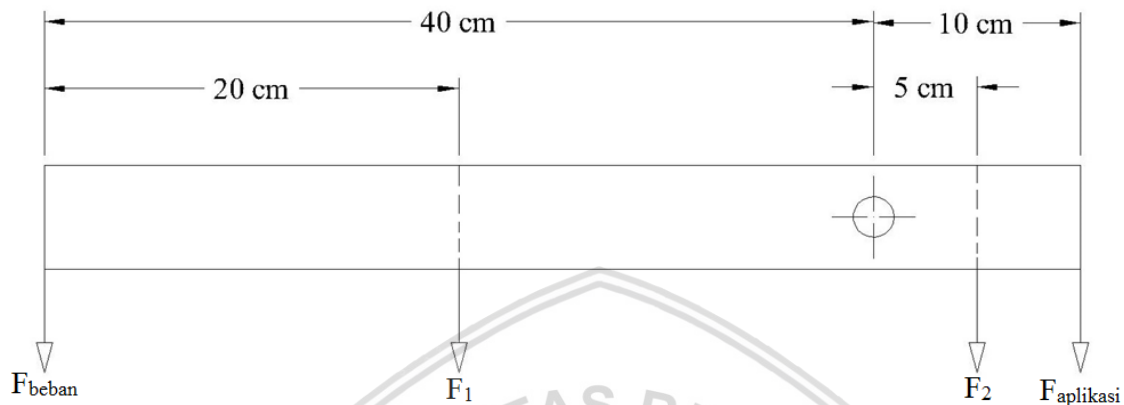
$$N_A = 3200 \text{ mm}^{-2} \left(291 + \frac{68}{2} \right) = 1040000 \text{ mm}^{-2}$$

$$d = \sqrt{\frac{1}{355200 \text{ mm}^{-2}}} = 0,981 \text{ } \mu\text{m}$$

Untuk detail penghitungan diameter butir spesimen lain dituliskan pada bagian lampiran.

2. Gaya Aktual Pembebanan (40 kg)

Diagram benda bebas (DBB) sistem pengungkit beban yang terdapat pada alat uji SCC adalah sebagai berikut:



Gambar 4.6 Gambar DBB sistem pengungkit beban yang terdapat pada alat uji SCC

Rumus yang digunakan berdasar pada diagram benda bebas tersebut adalah:

$$\sum M_0 = 0 \dots\dots\dots(4-4)$$

$$(F_{beban} \cdot 0,4 \text{ m}) + (F_1 \cdot 0,2 \text{ m}) - (F_2 \cdot 0,05 \text{ m}) - (F_{aplikasi} \cdot 0,1 \text{ m}) = 0$$

Dengan:

F_{beban} = Gaya dari beban statik (40 kg $\approx$ 392,266 N)

F_1 = Gaya dari 4/5 beban lengan pengungkit (2,25 kg $\approx$ 22,06496 N)

F_2 = Gaya dari 1/5 beban lengan pengungkit (0,5625 kg $\approx$ 5,51624 N)

$F_{aplikasi}$ = Gaya aplikasi atau gaya aktual yang terjadi pada spesimen

Dengan menggunakan rumus tersebut, gaya aktual yang terjadi akibat beban 40kg adalah:

$$(392,266\text{N} \cdot 0,4 \text{ m}) + (22,06496\text{N} \cdot 0,2 \text{ m}) - (5,51624\text{N} \cdot 0,05 \text{ m}) - (F_{aplikasi} \cdot 0,1 \text{ m}) = 0$$

$$(392,266 \text{ N} \cdot 0,4 \text{ m}) + (22,06496 \text{ N} \cdot 0,2 \text{ m}) - (5,51624 \text{ N} \cdot 0,05 \text{ m}) = F_{aplikasi} \cdot 0,1 \text{ m}$$

$$F_{aplikasi} = (161,0436 \text{ N}) / 0,1$$

$$F_{aplikasi} = 1610,436 \text{ N}$$

3. Kekuatan Tarik Maksimum (UTS)

Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk mendapatkan nilai UTS.

$$\sigma_{max} = F_{max}/A_0 \dots \dots \dots (4-5)$$

Dengan:

σ_{max} = Kekuatan tarik maksimum

F_{max} = Gaya tarik maksimum

A_0 = Luas penampang mula-mula

Dengan menggunakan rumus tersebut, dapat dicontohkan penghitungannya untuk spesimen orientasi butir 45° sebagai berikut:

$$F_{max} = 4,97 \text{ kN}$$

$$A_0 = 0,8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} = 9,6 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{max} = \frac{4,97 \times 1000 \text{ N}}{9,6 \text{ mm}^2} = 517,708 \text{ MPa}$$

4. Faktor Intesitas Tegangan pada Setiap Variasi Orientasi butir

Seperti yang sudah diketahui pada sub bab 2.8, maka perumusan untuk faktor intensitas tegangan (K) adalah:

$$K = \frac{P}{B\sqrt{w}} \left[\frac{\sqrt{\frac{\pi a}{2w}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{w}}} \left\{ 1,122 - 0,561 \left(\frac{a}{w} \right) - 0,205 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 0,471 \left(\frac{a}{w} \right)^3 + 0,19 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right\} \right] \dots (4-6)$$

Dengan:

K = Faktor intensitas tegangan (MPa $\sqrt{\text{m}}$)

P = Gaya yang diberikan (N)

B = Tebal benda (m)

w = Lebar benda (m)

a = Panjang benda (m)

Dengan menggunakan rumus tersebut, maka contoh penghitungannya dengan menggunakan data spesimen variasi orientasi butir 0° di waktu 54 jam adalah sebagai berikut:

$$P = 1610,436 \text{ N}$$

$$B = 4,700 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$2w = 1,962 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$a = 5,400 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$K = \frac{1610,436 \text{ N}}{4,700 \times 10^{-4} \text{ m} \sqrt{0,981 \times 10^{-2} \text{ m}}} \left[\sqrt{\frac{\pi \cdot (5,400 \times 10^{-3} \text{ m})}{1,962 \times 10^{-2} \text{ m}}} \left(1,122 - 0,561 \left(\frac{5,400 \times 10^{-3} \text{ m}}{1,962 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) - 0,205 \left(\frac{5,400 \times 10^{-3} \text{ m}}{1,962 \times 10^{-2} \text{ m}} \right)^2 \right) \right. \\ \left. + 4,471 \left(\frac{5,400 \times 10^{-3} \text{ m}}{1,962 \times 10^{-2} \text{ m}} \right)^3 + 0,19 \left(\frac{5,400 \times 10^{-3} \text{ m}}{1,962 \times 10^{-2} \text{ m}} \right)^4 \right]$$

$$K = 40,630 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Untuk detail penghitungan K_{IC} spesimen lain dituliskan pada bagian lampiran.

4.3 Data Hasil Pengolahan Data

Salah satu hasil pengolahan data pada penelitian ini adalah menentukan diameter butir setiap variasi spesimen uji yang didapat dari hasil foto struktur mikro. Berikut tabel hasil pengolahan data foto struktur mikro setiap spesimen uji.

Tabel 4.7
Data hasil diameter butiran setiap variasi spesimen uji

Sudut Kemiringan ($^\circ$)	d (μm)
0	0,891
15	0,925
30	0,952
45	0,981
60	1,027
75	1,081
90	1,124

Nilai K_{IC} pada penelitian ini didasari dengan adanya variabel terikat berupa lebar spesimen (w), panjang retak pada spesimen (a) dan tebal spesimen (B). Data lebar, panjang retak serta tebal dari setiap spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.4, Tabel 4.5, dan Tabel 4.6. Dengan perbedaan nilai lebar, panjang retak dan tebal dari setiap spesimen terhadap waktu, maka diperoleh hasil pengolahan data K_{IC} sebagai berikut:

Tabel 4.8
Data hasil K_{IC} setiap variasi spesimen per satuan waktu

Waktu (jam)	K_{IC} (MPa $\sqrt{m}$)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	18,536	18,536	18,536	18,536	18,536	18,536	18,536
6	19,409	19,486	19,589	19,719	19,825	20,085	20,478
12	20,769	21,034	21,064	21,413	21,870	22,288	22,929
18	22,232	22,779	22,962	23,611	24,357	24,861	25,987
24	23,369	24,171	24,760	26,295	27,196	27,783	31,825
K_{IC90°	-	-	-	-	-	-	59,900
30	25,750	26,677	27,562	28,967	30,038	34,958	
K_{IC75°	-	-	-	-	-	66,485	
36	28,457	30,604	32,356	33,750	39,919		
K_{IC60°	-	-	-	-	74,258		
42	31,828	34,538	36,485	44,697			
K_{IC45°	-	-	-	83,558			
48	35,355	38,986	50,596				
K_{IC30°	-	-	94,823				
54	40,054	53,498					
K_{IC15°	-	108,667					
60	59,070						
K_{IC0°	125,975						

4.4 Pembahasan

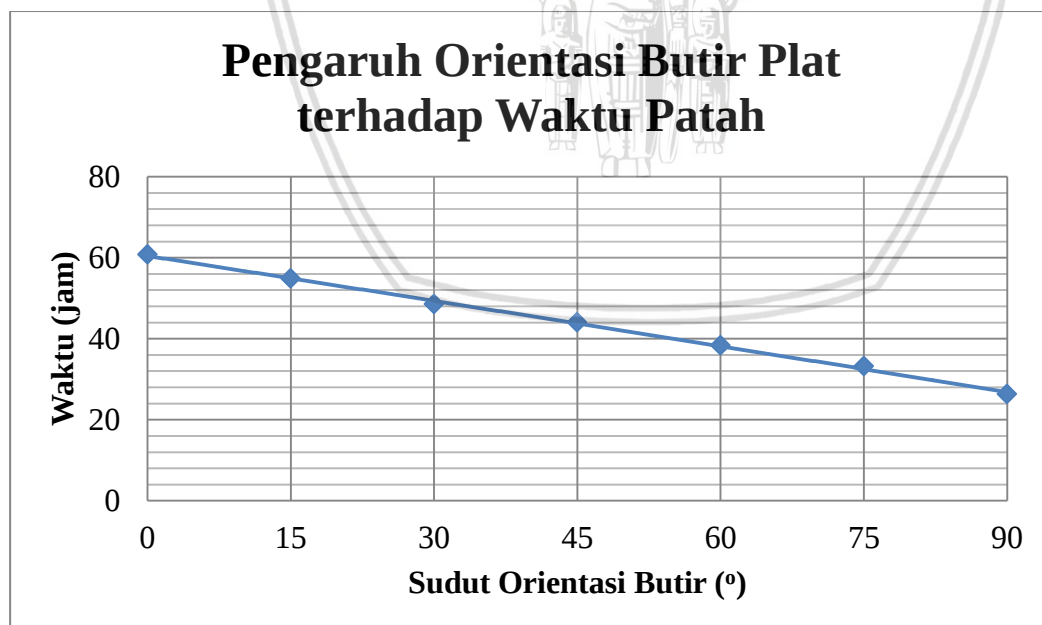
Analisis pengaruh orientasi butir plat terhadap waktu patah pada setiap variasi spesimen akan dibahas pada sub bab 4.4.1. Pada sub bab 4.4.2 akan membahas tentang pengaruh orientasi butiran pada plat logam terhadap sifat mekanik. Analisis pengaruh orientasi butir pada plat logam terhadap kekuatan tarik (UTS) akan dibahas pada sub bab 4.4.3. Pada sub bab 4.4.4 akan membahas tentang perbandingan faktor intensitas tegangan pada setiap variasi spesimen terhadap waktu.

4.4.1 Perbandingan Perlakuan Dengan Lingkungan SCC dan Tanpa Lingkungan SCC Terhadap Waktu Patah

Dapat dilihat pada tabel 4.1 untuk semua spesimen tanpa perlakuan tidak mengalami patah lebih dari 14 hari. Seperti yang dapat dilihat juga pada tabel tersebut, setiap variasi spesimen yang diberikan perlakuan lingkungan SCC memiliki waktu patah lebih kecil dibandingkan tanpa perlakuan. Perlakuan lingkungan SCC yang dimaksud yaitu dengan memberikan perlakuan material terendam pada lingkungan korosi. Dari perbandingan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa lingkungan SCC mempengaruhi waktu patah.

Pada saat tanpa perlakuan lingkungan SCC, tegangan statis yang diberikan tidak melewati batas tegangan luluh spesimen tersebut, sehingga spesimen tidak mengalami patah atau sulit untuk mengalami patah. Tetapi ketika spesimen diberi perlakuan lingkungan SCC, tegangan statis dapat membuat spesimen patah pada waktu tertentu. Hal ini disebabkan karena lingkungan SCC membuat spesimen uji mengalami korosi. Ketika spesimen mengalami korosi, kekuatan tarik (UTS) dari spesimen tersebut mengalami penurunan karena adanya perubahan fisik yaitu lebar dan ketebalan dari spesimen tersebut.

4.4.2 Pengaruh Orientasi Butir Plat Logam Terhadap Waktu Patah



Gambar 4.7 Grafik pengaruh orientasi butir plat terhadap waktu patah

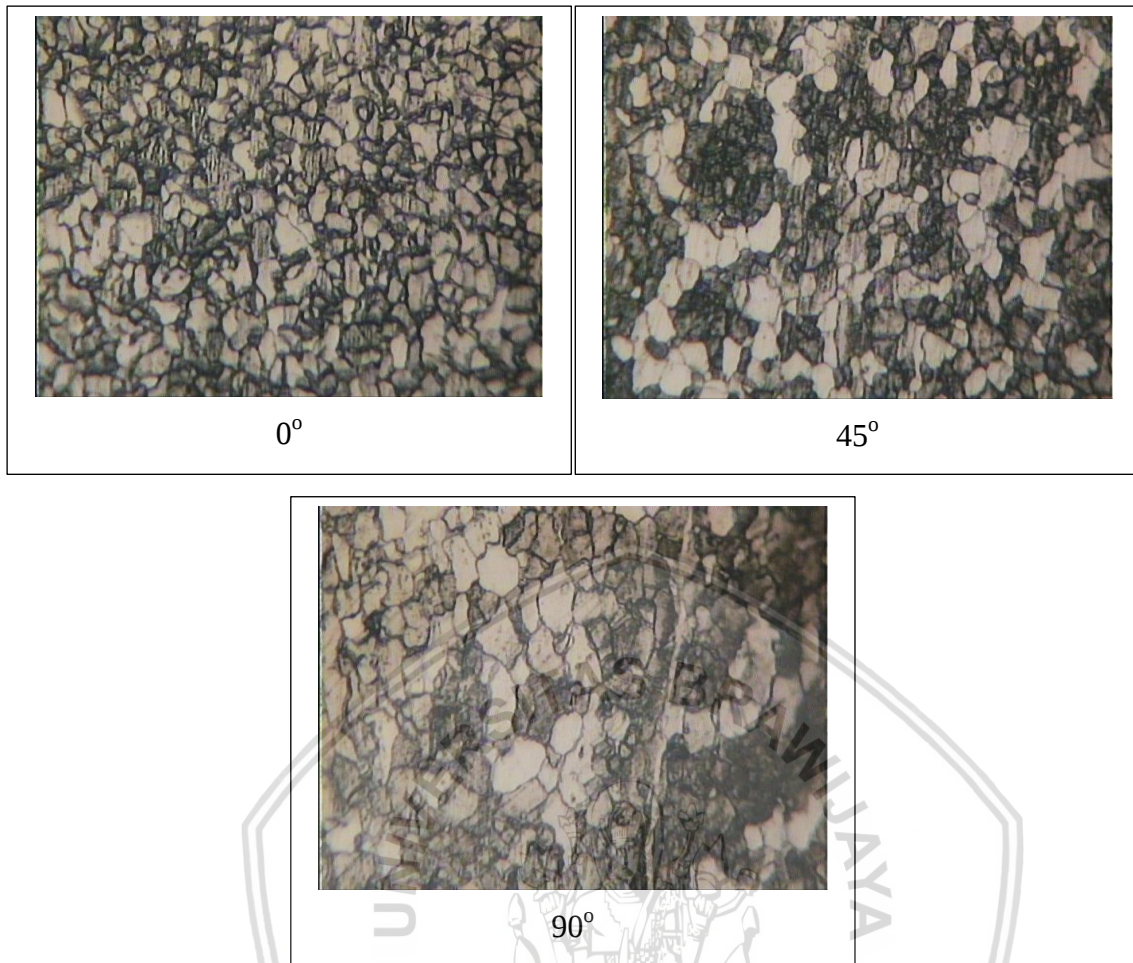
Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.7, waktu patah dari setiap variasi spesimen yaitu mulai dari sudut 0° memiliki waktu patah 60 jam 45 menit, 15° memiliki waktu patah 54 jam 50 menit, 30° memiliki waktu patah 48 jam 30 menit, 45° memiliki waktu patah 44

jam 25 menit, 60° memiliki waktu patah 38 jam 20 menit, 75° memiliki waktu patah 33 jam 10 menit, dan 90° memiliki waktu patah 26 jam 20 menit.

Seperti yang telah ditulis pada sub bab 3.4.2, 0° adalah spesimen dengan arah pemotongan plat sejajar terhadap arah pengerolan plat dan penambahan sudut 15° hingga 90° sebagai variasi spesimen pada penelitian ini, dimana 90° adalah spesimen dengan arah pemotongan plat tegak lurus terhadap arah pengerolan plat. Pada Gambar 4.7 dapat disimpulkan bahwa semakin besar orientasi butir plat terhadap arah rol, maka semakin menurun waktu patah dari spesimen di lingkungan SCC. Hal yang mempengaruhi waktu patah dari setiap spesimen adalah adanya perbedaan orientasi butiran pada setiap variasi orientasi butir. Perbedaan orientasi butiran berpengaruh pada sifat mekanik yang terdapat di setiap variasi orientasi butir. Karena sifat mekanik dari setiap spesimen yang berbeda, maka hal ini akan berdampak pada struktur mikro spesimen tersebut. Pembahasan mengenai pengaruh orientasi butiran pada plat logam terhadap sifat mekanik akan dibahas lebih dalam pada sub bab 4.4.2.

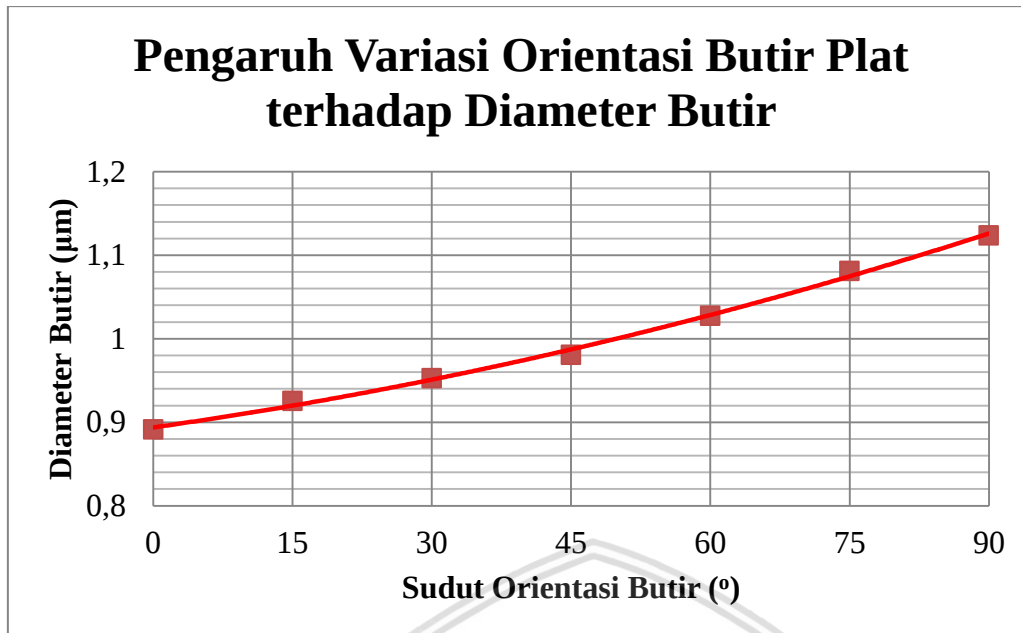
4.4.3 Pengaruh Orientasi Butir Plat Logam Terhadap Sifat Mekanik

Untuk mengetahui pengaruh orientasi butir akibat variasi orientasi butir plat terhadap struktur mikro, maka dilakukan pengujian metalografi. Pengujian ini dilakukan sebagai data pendukung dari penelitian ini. Material yang digunakan adalah ASTM A36 yang merupakan baja karbon rendah. Baja karbon terdiri atas fase perlit dan ferit. Plat logam merupakan hasil dari proses manufaktur dimana hal ini menyebabkan diameter butir berubah (Rathmayr dkk, 2012). Tidak hanya diameter butir saja yang berubah melainkan dapat menghasilkan struktur butiran yang memiliki orientasi (Voort, 2014). Berikut merupakan hasil foto struktur mikro dari variasi orientasi butir plat di dekat daerah patah spesimen.



Gambar 4.8 Foto struktur mikro daerah hasil patah spesimen uji SCC dengan perbesaran 400x

Pada Gambar 4.8 dapat terlihat secara kasat mata bahwa spesimen dengan orientasi butir 0° memiliki rata-rata diameter butir paling kecil dibanding spesimen dengan variasi orientasi butir lain, serta dapat terlihat bahwa semakin besar orientasi butir pada plat maka semakin besar juga rata-rata diameter butirnya. Hal ini didukung dengan melakukan perhitungan diameter butir dimana hasil pengolahan datanya dapat dilihat pada tabel 4.6. Berikut merupakan grafik hasil pengolahan data diameter butir dari setiap variasi spesimen uji.



Gambar 4.9 Grafik pengaruh variasi orientasi butir plat terhadap diameter butir

Pada Gambar 4.9, orientasi butir 0° merupakan spesimen dengan arah pemotongan plat sejajar terhadap arah pengerolan plat dan penambahan sudut 15° hingga 90° sebagai variasi spesimen pada penelitian ini, dimana 90° adalah spesimen dengan arah pemotongan plat tegak lurus terhadap arah pengerolan plat. Dapat terlihat pada Gambar 4.9 bahwa semakin besar orientasi butir plat maka semakin besar diameter butirannya.

Pada Gambar 4.9 dapat terlihat bahwa spesimen dengan orientasi butir 0° memiliki diameter butir paling kecil dimana potongan plat ini sejajar dengan arah pengerolan, sehingga orientasi butirnya juga sejajar dengan arah pengerolan. Berkebalikan dengan spesimen dengan orientasi butir 0° , diameter butir pada spesimen orientasi butir 90° memiliki diameter butir paling besar, dimana potongan plat ini tegak lurus dengan arah pengerolan sehingga arah orientasi butirnya juga tegak lurus dengan arah pengerolan.

Perbedaan diameter butir dapat berpengaruh pada sifat mekanik material tersebut. Semakin kecil diameter butir pada suatu struktur material, maka semakin kuat material. Hal ini disebabkan karena seiring bertambah kecilnya diameter butir pada suatu struktur material maka semakin banyak batas butir yang terdapat pada material tersebut (Fan dkk, 2018).

Spesimen berorientasi butir 0° memiliki banyak batas butir akibat kecilnya rata-rata diameter butirnya, maka dari itu spesimen ini memiliki sifat mekanik lebih kuat dibanding spesimen berorientasi butir lain. Sedangkan diameter butir pada spesimen dengan orientasi

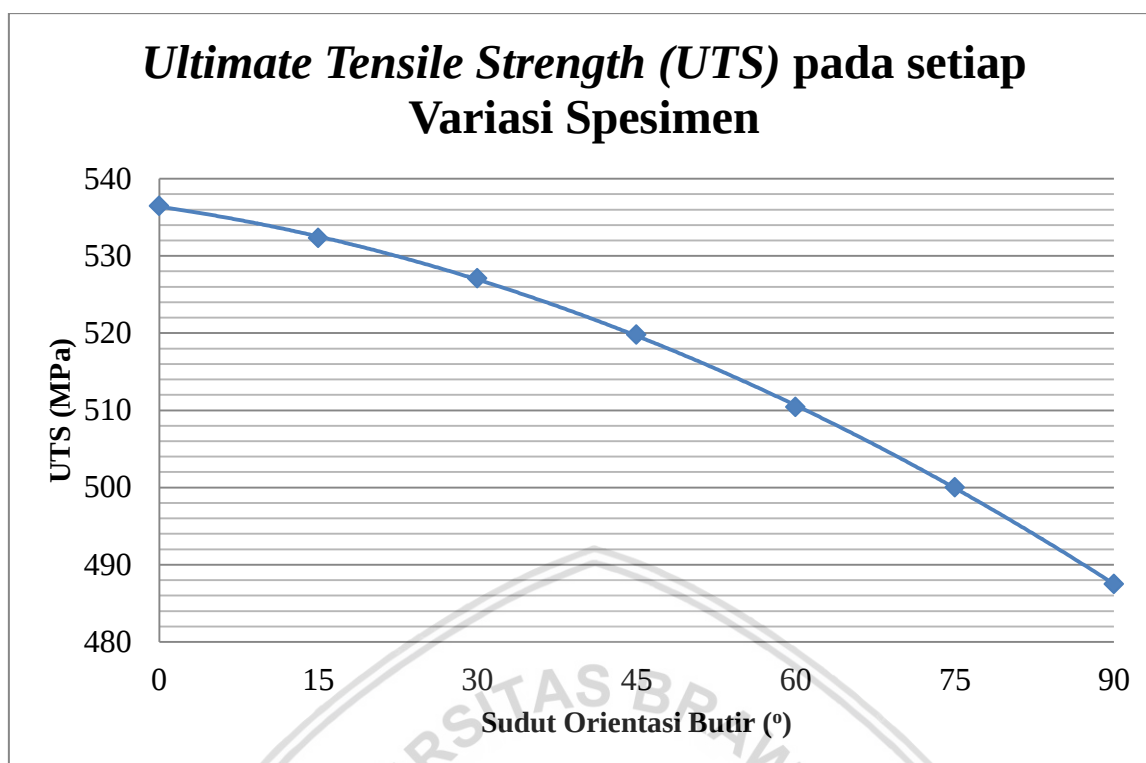
butir 90° memiliki ukuran paling besar sehingga memiliki batas yang lebih sedikit. Hal ini menyebabkan kekuatannya lebih rendah dibanding spesimen berorientasi butir lain.

Dengan ini dapat disimpulkan bahwa arah orientasi pada suatu plat dapat mempengaruhi sifat mekaniknya. Perbedaan sifat mekanik pada setiap spesimen uji, maka kekuatan tarik maksimum (UTS) antar variasi spesimen uji akan berbeda. Pengaruh sifat mekanik akibat orientasi butir pada plat logam terhadap kekuatan tariknya akan dibahas lebih dalam pada sub bab 4.4.3.

4.4.4 Pengaruh Sifat Mekanik Akibat Perbedaan Orientasi Butir Plat Logam Terhadap Kekuatan Tarik (UTS)

Seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 4.4.2, orientasi butir akibat orientasi butir dapat berpengaruh pada sifat mekanik potongan plat tersebut. Semakin orientasi butir mendekati sejajar atau sejajar dengan arah pengerolan (orientasi butir 0°) maka semakin kuat pula sifat mekanik dari hasil potongan plat tersebut. Berlaku juga kebalikannya, bila orientasi butir semakin tegak lurus atau tegak lurus dengan arah pengerolan (orientasi butir 90°) maka semakin rendah pula sifat mekanik dari hasil potongan plat. Adanya pengaruh orientasi butir terhadap sifat mekanik potongan plat tentu akan berdampak pada nilai kekuatan tarik (UTS) dari setiap variasi orientasi butir plat.

Salah satu faktor ketahanan suatu plat logam pada lingkungan SCC adalah tegangan. UTS adalah batas tegangan maksimum suatu material sebelum terjadi patah atau *necking*. Sehingga semakin besar UTS dari suatu potongan plat maka semakin sulit potongan plat tersebut untuk terjadi patah. Berikut merupakan grafik dari uji tarik yang dilakukan pada setiap variasi orientasi butir plat.



Gambar 4.10 Grafik pengaruh orientasi butir plat terhadap nilai UTS

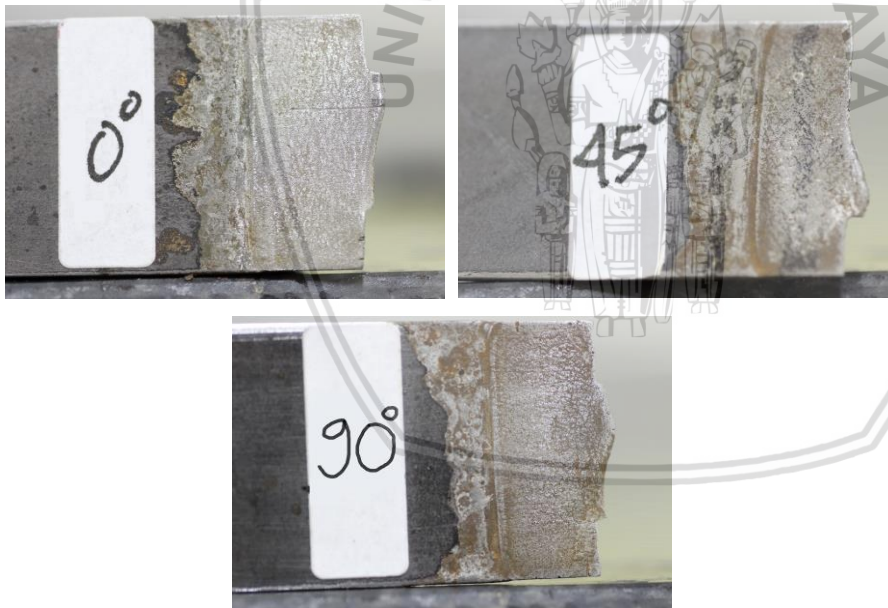
Gambar 4.10 merupakan hasil data pendukung dengan melakukan uji tarik dari setiap variasi orientasi butir plat, dimana terdiri dari 7 spesimen dengan orientasi butir plat 0° hingga 90° dengan interval 15° pada setiap masing-masing spesimen. Spesimen dengan sudut 0° adalah spesimen yang sejajar dengan arah pengerolan plat dan spesimen dengan sudut 90° adalah spesimen yang tegak lurus dengan arah pengerolan plat.

Dapat terlihat pada Gambar 4.10, nilai UTS dari spesimen dengan orientasi butir plat 0° hingga 90° cenderung semakin menurun. Hal ini dikarenakan sifat mekanik suatu material dapat berpengaruh pada kekuatan tarik maksimum material. Material dengan sifat mekanik yang bertambah kuat akan memiliki lebih banyak batas butir sehingga semakin tinggi juga kekuatan tarik maksimum material tersebut (Dieter 1988). Orientasi butir 0° memiliki orientasi butir yang sejajar dengan arah pengerolan sehingga sifat mekanik pada potongan plat ini lebih kuat dibanding semua variasi orientasi butir. Begitu pula dengan spesimen berorientasi butir 90° , dimana arah orientasinya tegak lurus dengan arah pengerolannya, sehingga sifat mekaniknya cenderung paling rendah dibanding variasi orientasi butir yang lain.

Dengan demikian maka grafik pada Gambar 4.10 dapat disimpulkan bahwa orientasi butir plat yang semakin sejajar dengan arah pengerolan akan memiliki kekuatan tarik maksimum paling tinggi. Hal ini didasari dengan kecilnya rata-rata diameter butiran pada plat berorientasi butir sejajar dengan arah pengerolan plat, sehingga berdampak pada tingkat kekuatan pada potongan plat ini, seperti yang telah dibahas pada sub bab 4.4.2.

Dengan mengetahui bahwa kekuatan tarik maksimum paling tinggi terdapat pada potongan plat berorientasi butir sejajar dengan arah pengerolan plat, maka hasil potongan plat ini akan semakin sulit untuk mengalami patah dibanding dengan hasil potongan plat berorientasi butir lain, yang memiliki orientasi butir tidak sejajar dengan arah pengerolan. Sehingga menentukan arah orientasi butir pada suatu plat sangat penting, karena akan berpengaruh pada kekuatan potongan plat untuk mencegah terjadinya patah di lingkungan SCC.

4.4.5 Analisis Hasil Foto Struktur Makro Patahan Setiap Variasi Spesimen

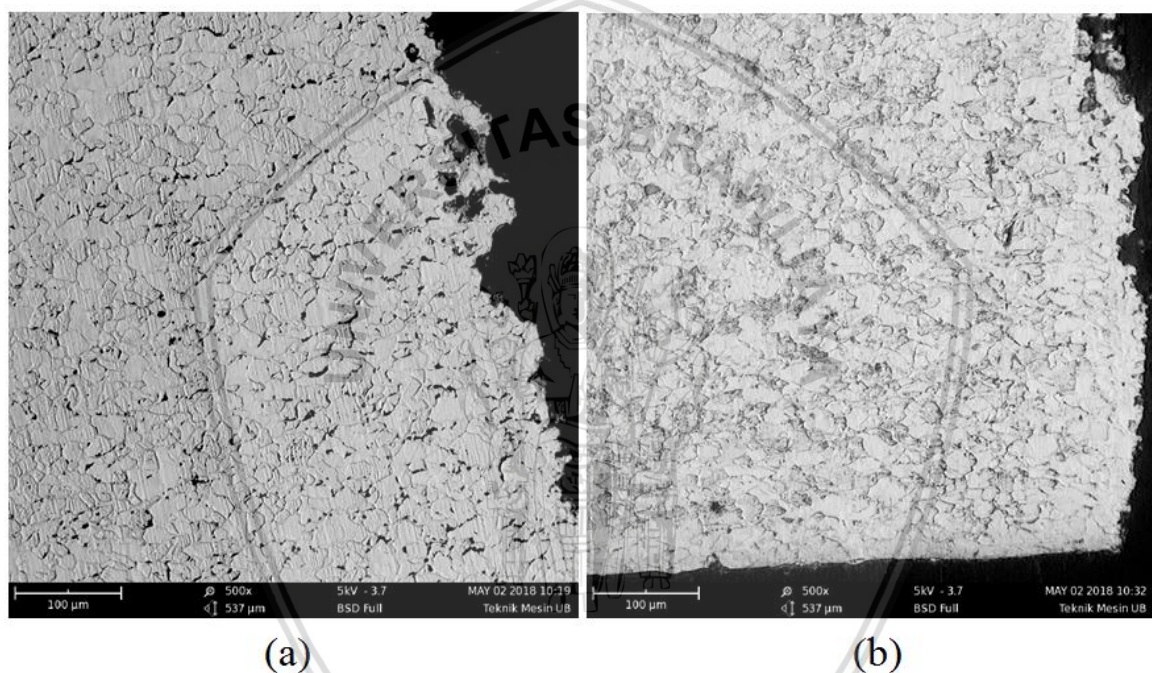


Gambar 4.11 Foto struktur makro patahan setiap spesimen uji

Pada Gambar 4.11 merupakan hasil foto struktur makro dari orientasi butir 0° – 90° . Dapat dilihat pada Gambar 4.11, hasil patahan dengan orientasi butir 90° terlihat lebih halus dibandingkan hasil patahan dengan orientasi butir 45° . Begitu juga dapat dilihat pada Gambar 4.11, hasil patahan spesimen berorientasi butir 0° menunjukkan lebih kasar dibandingkan hasil patahan spesimen berorientasi butir 45° .

Semakin besar derajat orientasi butir plat, maka permukaan patahannya terlihat lebih halus dan lebih berkilat atau memantulkan cahaya. Bila suatu spesimen terlihat lebih berkilat atau memantulkan cahaya, maka spesimen tersebut akan lebih getas. Begitu sebaliknya, bila suatu spesimen terlihat lebih kasar, maka spesimen tersebut akan lebih ulet. Dari sini dapat disimpulkan bahwa semakin sejajar orientasi butir dengan arah rol, maka spesimen tersebut bersifat lebih ulet. Jika spesimen bersifat lebih ulet maka spesimen tersebut membutuhkan waktu yang lebih lama untuk patah.

4.4.6 Analisis Hasil Foto SEM Patahan Setiap Variasi Spesimen



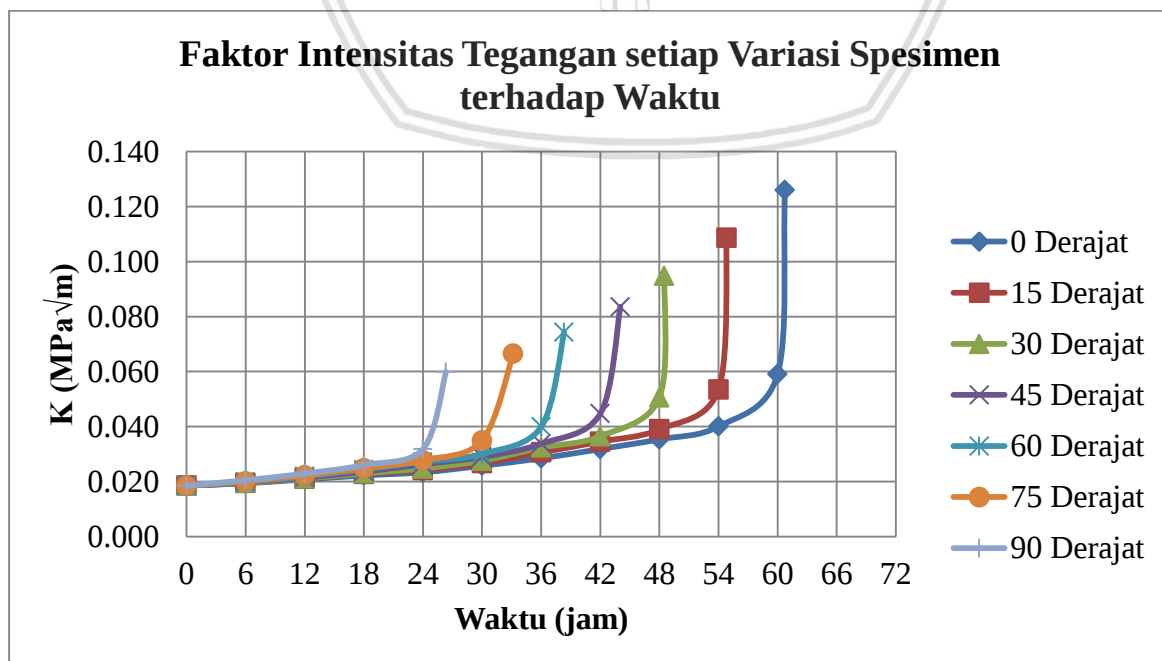
Gambar 4.12 Foto SEM dengan perbesaran 500x pada hasil patahan (a) spesimen orientasi butir 0° dan (b) spesimen orientasi butir 90°

Gambar 4.12 (a) menunjukkan hasil foto SEM dari spesimen dengan variasi orientasi butir 0° dan Gambar 4.12 (b) menunjukkan hasil foto SEM dari spesimen dengan variasi orientasi butir 90° . Pada Gambar 4.12 (a) dimana plat ini memiliki orientasi butir sejajar dengan arah pengerolan, terlihat pada bagian batas retakan yang cenderung berliku karena mengikuti alur dari batas butir. Hal ini menunjukkan rambat retak yang lebih bersifat intergranular. Sedangkan pada Gambar 4.12 (b) dimana plat ini memiliki arah orientasi butir tegak lurus dengan arah pengerolan dapat dilihat pada bagian batas retakan yang cenderung lurus dan terdapat butiran – butiran yang pecah. Hal ini menunjukkan rambat retak yang lebih bersifat transgranular.

Rambat retak pada intergranular bergerak lebih lambat dibanding dengan rambat retak pada kejadian transgranular (Schemel, 2009). Dengan membandingkan Gambar 4.12 dapat terlihat bahwa plat berorientasi butir sejajar terhadap arah pengerolan memiliki sifat rambat retak lebih intergranular dibanding pada plat berorientasi butir tegak lurus dengan arah pengerolan. Hal ini membuktikan bahwa plat berorientasi butir sejajar dengan arah pengerolan memiliki ketahanan SCC yang paling baik karena memiliki sifat perambatan retak yang semakin intergranular dibanding variasi orientasi butir pada plat lain.

4.4.7 Perbandingan Faktor Intensitas Tegangan Setiap Variasi Spesimen Terhadap Waktu

Faktor Intensitas Tegangan (K) menggambarkan keadaan tegangan di ujung retak yang berhubungan dengan laju pertumbuhan retak dan digunakan untuk menetapkan kriteria kegagalan karena patah. Adanya perbedaan waktu patah, diameter butir, dan nilai kekuatan tarik maksimum dari setiap orientasi butir plat yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, maka hal ini akan berpengaruh pada ketahanan potongan plat untuk terjadi rambat retak di lingkungan SCC. Oleh karena itu, pada setiap variasi orientasi butir tentu memiliki nilai Faktor Intensitas Tegangan (K) yang berbeda. Selanjutnya nilai Faktor Intensitas Tegangan (K) dari setiap variasi orientasi butir tersebut akan dibandingkan. Berikut adalah grafik nilai Faktor Intensitas Tegangan pada setiap variasi orientasi butir terhadap satuan waktu yang dilakukan pada lingkungan korosif H_2SO_4 1M.



Gambar 4.13 Faktor intensitas tegangan setiap variasi spesimen terhadap waktu

Pada Gambar 4.13 dapat dilihat perbandingan nilai K terhadap satuan waktu dari setiap spesimen dengan variasi orientasi butir yang berbeda. Berdasarkan Tabel 4.8, nilai K_{IC} pada spesimen dengan orientasi butir 0° sebesar 125,975 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, nilai K_{IC} pada spesimen dengan orientasi butir 15° sebesar 108,667 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, nilai K_{IC} pada spesimen dengan orientasi butir 30° sebesar 94,328 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, nilai K_{IC} pada spesimen dengan orientasi butir 45° sebesar 83,558 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, nilai K_{IC} pada spesimen dengan orientasi butir 60° sebesar 74,258 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, nilai K_{IC} pada spesimen dengan orientasi butir 75° sebesar 66,485 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ dan nilai K_{IC} pada spesimen dengan variasi orientasi butir 90° sebesar 59,900 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Dari Gambar 4.13 dapat terlihat bahwa spesimen dengan orientasi butir 0° memiliki nilai K_{IC} terbesar dan waktu patah terlama dimana potongan plat ini memiliki arah orientasi butir sejajar dengan arah pengerolan plat. Dan sebaliknya pada spesimen dengan orientasi butir 90° , potongan plat ini tegak lurus dengan arah orientasi butir dengan nilai K_{IC} terkecil serta waktu patah yang paling cepat.

Nilai K_{IC} suatu material dipengaruhi oleh lebar, ketebalan dan panjang retak pada material tersebut. Semakin lebar dan tebal suatu material maka semakin kecil nilai K_{IC} , serta semakin besar nilai panjang retak suatu material maka semakin besar nilai K_{IC} (Stephens dkk, 2001). Dari tabel 4.4, 4.5, dan 4.6 dapat terlihat bahwa spesimen berorientasi butir 0° memiliki ketebalan, lebar, dan panjang retak nilai paling kecil dibanding dengan spesimen bervariasi orientasi butir lain. Meskipun panjang retak memiliki nilai paling kecil, spesimen orientasi butir 0° tetap memiliki nilai K_{IC} paling tinggi.

Dari sini terlihat bahwa nilai K_{IC} lebih dipengaruhi oleh ketebalan dan lebar spesimen dibandingkan nilai panjang retak. Hal ini disebabkan karena adanya pengikisan luas penampang dari setiap spesimen uji akibat adanya larutan korosi sehingga ukuran luas penampang berkurang. Dengan berkurangnya luas penampang yang berbanding lurus dengan waktu pemaparan, maka tegangan tarik juga semakin meningkat meskipun pembebanan bersifat statik. Karena spesimen dengan orientasi butir 0° memiliki nilai kekuatan tarik maksimum tertinggi, maka potongan plat ini membutuhkan pengikisan luas penampang lebih lama dibanding spesimen berorientasi butir lain, agar tegangan tarik plat dapat meningkat dan mencapai kekuatan tarik maksimumnya. Dengan ini dapat disimpulkan bahwa semakin besar orientasi butir terhadap arah pengerolan pada plat akan memiliki waktu patah yang lebih cepat.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin sejajar orientasi butir pada plat logam terhadap arah pengerolan maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk patah. Semakin tegak lurus, maka semakin cepat untuk patah. Plat berorientasi butir 0° patah setelah 60 jam 45 menit sedangkan pada plat berorientasi butir 90° patah setelah 26 jam 20 menit.
2. Semakin sejajar orientasi butir plat terhadap arah pengerolan, maka semakin kecil diameter butirannya. Diameter butiran pada plat berorientasi butir 0° adalah $0,891 \mu\text{m}$ sedangkan diameter butiran pada plat berorientasi butir 90° adalah $1,124 \mu\text{m}$.
3. Semakin sejajar orientasi butir plat logam dengan arah pengerolan plat (0°), maka semakin meningkat juga kekuatan tarik maksimum. Plat berorientasi butir 0° memiliki kekuatan tarik maksimum sebesar 536,458 MPa sedangkan pada plat berorientasi butir 90° memiliki kekuatan tarik maksimum sebesar 487,5 MPa.
4. Semakin tegak lurus orientasi butir plat terhadap arah pengerolan, semakin kecil nilai faktor intensitas tegangan. Plat berorientasi butir 0° memiliki nilai K_{IC} sebesar 125,975 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ sedangkan pada plat berorientasi butir 90° memiliki nilai K_{IC} sebesar 59,900 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

5.2 Saran

1. Diharapkan mengatur alat uji SCC menjadi lebih presisi sehingga data yang didapatkan akan lebih baik.
2. Perhitungan akan waktu penelitian yang matang agar penelitian dapat berjalan dan selesai sesuai dengan waktu yang telah ditetapkan.
3. Diperlukan penelitian lebih lanjut dengan variasi material dan lingkungan korosif yang berbeda.
4. Pada setiap kegiatan penelitian terutama dalam proses pengujian, wajib mengutamakan unsur keamanan dan keselamatan.



DAFTAR PUSTAKA

- Adiyanti, Yuningtyas R. 2011. Pengaruh Temperatur dan pH Terhadap Karakterisasi Korosi Baja BS 970 di Lingkungan CO₂. *Journal of Corrosion Rate*, Hlm. 1-7.
- ASTM Internasional. 2005. ASTM A36/A36M: *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. United States.
- Azam, M.A., Mohd Fuad Ibrahim, Muhammad Zaimi. 2015. Corrosion Analysis of Carbon Steel Pipeline: Effect of Different Sulfuric Acid Concentrations. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 699: 215 - 220
- Bernstein, I.M., H.W. Paxton, R.W. Staehle. 1975. Stress-Corrosion Cracking. ASME. *J. Eng. Mater. Technol.*: 97
- Brooks, C.R. 1982. *Heat Treatment, Structure, and Properties of Nonferrous Alloys*. Ohio: American Society for Metals.
- Brown, B. F. 1977. Stress Corrosion Cracking Control Measures. *NBS Monograph* 156. Hlm. 35-41.
- Callister, William D.J. 2004. *Material Science and Engineering an Introduction*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Contreras, A., M. Salazar, A. Albiter. 2011. *Assessment of Stress Corrosion Cracking on Pipeling Steels Weldments Used in the Petroleum Industry by Slow Strain Rate Tests*. Mexico: Instituto Mexicano del Petroleo.
- Cottis, R.A. 2000. *Stress Corrosion Cracking*. United Kingdom: NPL
- Darmadi, Djarot B. 2011. Study of Residual Stress Mechanism Using Three Elasto-Plastic Bars Model. *Asian Transactions on Engineering* (ATE ISSN: 2221-4267) Volume 01 Issue 05. Hlm. 76-80.
- Dieter, G.E. 1988. *Mechanical Metallurgy SI Metric Edition*. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Fan, Haidong. 2018. *Precipitation hardening effects on extension twinning in magnesium alloys*. China: Sichuan University.
- Fontana, M.G. 1987. *Corrosion Engineering 3rd Edition*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

- Hakim, Alfin Al. 2011. Pengaruh Inhibitor Korosi Berbasis Sunyawa Fenolik untuk Proteksi Pipa Baja Karbon pada Lingkungan 0.5, 1.5, 2.5, 3.5% NaCl yang Mengandung Gas CO₂. *Skripsi*. Depok: Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Jones, R.H. & R.E. Ricker. 1992. *Mechanisms of Stress-Corrosion Cracking*. Ohio: ASM International.
- Kulsange, Raj. 2016. *Failure analysis of Shell and tube Heat Exchangers* [PowerPoint slides]. Diakses dari: <https://www.slideshare.net/rajkulsange/ppt-on-failure-analysis-of-shell-and-tube-heat-exchangers>.
- Lim, Hanpin & Hoag, Stephen. 2013. Plasticizer Effects on Physical–Mechanical Properties of Solvent Cast Soluplus® Films. *AAPS PharmSciTech*. Vol 14.
- Marcus, P & Jacques Oudar. 1995. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. United States: M. Dekker.
- Mondal, S.K. & S.R. Taylor. 2014. The Identification and Characterization of Organic Corrosion Inhibitors: Correlation of a Computational Model with Experimental Results. *Journal of The Electrochemical Society*. Vol. 161, Issue 10: C476 - C485.
- NACE International. Tanpa Tahun. *Intergranular & Transgranular Crack*. Diakses dari: [https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Stress-Corrosion-Cracking-\(SCC\)/](https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Stress-Corrosion-Cracking-(SCC)/)
- Pattireuw, Kevin Jones, Fentje Abdul Rauf, dan Romels Cresano. 2013. *Analisis Laju Korosi pada Baja Karbon dengan Menggunakan Air Laut dan H₂SO₄*. Teknik Mesin. Manado: Universitas Sam Ratulangi.
- Pilkey, W.D. 1994. *Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices*. New York: Wiley.
- Premono, Agung. 2013. *Efek Hidrogen Pada Void Coalescence*. Jakarta: Universitas Negeri Jakarta
- Priyotomo, Gadang. 2008. *Kamus Saku Korosi Material*: Vol 1. Jakarta
- Rathmayr, Georg B., Anton Hohenwarter, Reinhard Pippan. 2012. Influence of grain shape and orientation on the mechanical properties of high pressure torsion deformed nickel. *Materials Science & Engineering*: A560, pp. 224–231.
- Roylance, D. 2001. *Introduction to Fracture Mechanics*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.

- Rusianto, Toto. 2009. *Perubahan Laju Korosi Akibat Tegangan Dalam Dengan Metode C-Ring*. Yogyakarta: Institut Sains & Teknologi AKPRIND.
- Salindeho, Robert Denti & Soukota, J. 2013. *Pemodelan Pengujian Tarik Untuk Menganalisis Sifat Mekanik Material*. Manado: Universitas Sam Ratulangi
- Staehle, R.W. 1977. *Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys*. Houston: NACE.
- Trethwey, K.R. & J. Chamberlain. 1996. *Corrosion for Science and Engineering*. England: Pub. Longman Scientific & Technical.
- Voort, G. F. V. 2014. Measurement of Grain Shape Uniformity. *Practical Metallography*: Vol. 51, No. 5, pp. 367-374.
- Wirjosumarto, Harsono dan Toshie Okumura. 2008. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: PT.Pradnya Paramita.

