

**PENGARUH PERLAKUAN PERMUKAAN DAN PARAMETER
PANGELASAN DISSIMILAR *CAPACITIVE DISCHARGE WELDING*
PADA BAJA DAN KUNINGAN TERHADAP *STRESS CORROSION*
*CRACKING***

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK MESIN
KONSENTRASI MANUFAKTUR**

Disusun untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



**OSMAR BUNTU LOBO
NIM. 176060200111003**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**

**PENGARUH PERLAKUAN PERMUKAAN DAN PARAMETER
PANGELASAN DISSIMILAR *CAPACITIVE DISCHARGE WELDING*
PADA BAJA DAN KUNINGAN TERHADAP *STRESS CORROSION*
*CRACKING***

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK MESIN
KONSENTRASI MANUFAKTUR**

Disusun untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



**OSMAR BUNTU LOBO
NIM. 176060200111003**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**

TESIS

**PENGARUH PERLAKUAN PERMUKAAN DAN PARAMETER PENGELASAN
DISSIMILAR CAPACITIVE DISCHARGE WELDING PADA BAJA DAN
KUNINGAN TERHADAP STRESS CORROSION CRACKING**

Oleh:


**OSMAR BUNTU LOBO
NIM. 176060200111003**

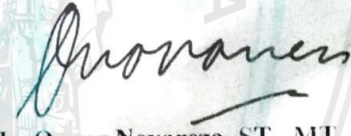
Telah dipertahankan didepan penguji
Pada tanggal 29 November 2019
Dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik Mesin

Komisi Pembimbing,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


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


Ir. Oyong Novareza, ST., MT., Ph.D.

Malang, 26 DEC 2019

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin
Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



Dr. Eng. Lilis Yuliati, S.T., M.T.
NIP. 197507022000032001

JUDUL TESIS:

PENGARUH PERLAKUAN PERMUKAAN DAN PARAMETER PENGELASAN
DISSIMILAR CAPACITIVE DISCHARGE WELDING PADA BAJA DAN
KUNINGAN TERHADAP STRESS CORROSION CRACKING

Nama : Osmar Buntu Lobo
NIM : 176060200111003
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Minat : Teknik Industri Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
Pembimbing II : Ir. Oyong Novareza, ST., MT., Ph.D

TIM PENGUJI

Penguji I : Dr. Femiana Gapsari M.F., ST., MT
Penguji II : Dr. Ir. Achmad As'Ad Sonief, MT

Tanggal Ujian : 29 November 2019

SK Penguji : -

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

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

Malang, 29 November 2019

Mahasiswa,



Nama : Osmar Buntu Lobo

NIM : 176060200111003



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM MAGISTER**

SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 1466/UN10.F07.12.21/PP/2019

Sertifikat ini diberikan kepada :

OSMAR BUNTU LOBO

Dengan Judul Tesis :

**PENGARUH PERLAKUAN PERMUKAAN DAN PARAMETER PANGELASAN DISSIMILAR
CAPACITIVE DISCHARGE WELDING PADA BAJA DAN KUNINGAN TERHADAP STRESS
CORROSION CRACKING**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 5\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal

23 Desember 2019



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

Ketua Program Studi S2 Teknik Mesin



Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT
NIP. 19750702 200003 2 001

*Karya ini kupersembahkan untuk
Ayah, Ibu, Kakak dan Adik tercinta.*



RIWAYAT HIDUP

Osmar Buntu Lobo, lahir di Rantepao, 22 Januari 1993 anak dari Alm. D.H.B Sampetoding dan Agustina R. Pasalli', SD sampai SLTP di Kabupaten Luwu dan SLTA di Kota Palopo, lulus program sarjana terapan Politeknik Negeri Ujung Pandang tahun 2014. Berkerja sebagai Dosen Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Fakfak tahun 2015 sampai sekarang.

Malang, November 2019

Penulis



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga tesis yang berjudul “*Pengaruh Perlakuan Permukaan dan Parameter Pengelasan Dissimilar Capacitive Discharge Welding Baja dan Kuningan terhadap Stress Corrosion Cracking*” dapat terselesaikan dengan baik.

Tesis ini dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Magister Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Dalam hal ini penulis menyadari bahwa penelitian yang dilakukan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu segala kritik dan saran yang sifatnya membangun sangat diharapkan oleh penulis.

Dalam proses penyelesaian tesis ini, banyak pihak yang telah membantu, baik secara langsung atau tidak langsung, secara materi, moril, maupun spiritual. Untuk itu pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih dan hormat yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya penelitian ini, khususnya kepada:

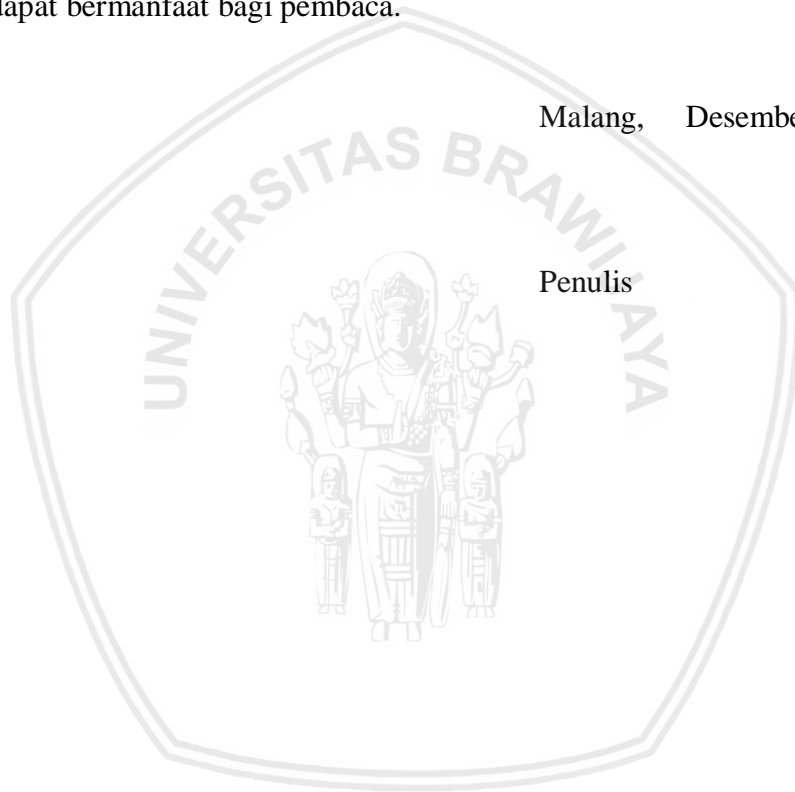
1. Alm. D.H.B. Sampetoding dan A.R. Pasalli¹, selaku orang tua yang telah membesarkan, mendidik, dan mendoakan penulis. Kakak tercinta Olaf Plato Buntulobo dan Orvin Constantinus Buntulobo, serta adik terkasih Omega Rini Sampetoding yang telah memberikan dukungan serta semangat.
2. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D dan Ir. Oyong Novareza, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing I dan pembimbing II yang telah memberikan petunjuk, bimbingan, dan arahan selama proses penelitian.
3. Sivitas Akademika Politeknik Negeri Fakfak (Polinef) tempat penulis mengabdikan sebagai tenaga pendidik.
4. Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi (Kemristek Dikti) yang telah memberikan beasiswa kepada penulis untuk melanjutkan pendidikan ke jenjang S2 ini.
5. Rekan-rekan Persekutuan Pemuda Gereja Toraja (PPGT) cabang kebaktian Malang dan Ikatan Pemuda Tongkonan Toraja Malang (IPTTM) tempat penulis bergaul dan belajar bersama.
6. Teman-teman Mahasiswa Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya yang selalu memberikan solusi untuk setiap kesulitan yang penulis hadapi selama penelitian.

7. Kekasih tercinta Marchelyn Pongsapan sebagai teman dalam suka-duka selama penelitian berlangsung.
8. Sahabat-sahabat seperjuangan alumni Politeknik Negeri Ujung Pandang khususnya angkatan 2010 Program Studi DIV Teknik Manufaktur, yang selalu memberikan saran serta motivasi dikala penulis membutuhkan.
9. Semua pihak yang telah membantu dalam melakukan penelitian sehingga tesis ini dapat selesai dengan baik.

Akhir kata penulis panjatkan doa semoga Tuhan Yang Maha Esa berkenan melimpahkan berkat dan rahmat-Nya serta membalas budi baik Bapak dan Ibu sekalian. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Malang, Desember 2019

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
RINGKASAN	xiii
SUMMARY	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Stress Corrosion Cracking.....	6
2.2.1 Pengaruh Tegangan Terhadap Fenomena SCC.....	9
2.2.2 Pengaruh Lingkungan Korosi Terhadap Fenomena SCC.....	13
2.2.3 Pengaruh Kerentanan Material Terhadap Fenomena SCC	16
2.3 Mekanisme Terjadinya SCC	17
2.3.1 Tahap Pemicuan	17
2.3.2 Tahap Penjalaran	18
2.3.2.1 Mekanisme Melalui Lintasan Aktif yang Sudah Ada Sejak Semula..	18
2.3.2.2 Mekanisme Melalui Lintasan Aktif Akibat Regangan	19
2.3.2.3 Mekanisme yang Menyangkut Absorpsi.....	20
2.3.3 Tahap Terjadinya Kegagalan	23
2.4 Mekanika Fraktur	23
2.5 Constant Load Test	26
2.6 Tegangan Ambang (<i>Threshold Stress</i>)	27
2.7 Hot Spot Capacitive Discharge Welder	29
2.8 Parameter Pengelasan	31

2.9	Baja Karbon	31
2.10	Kuningan.....	33
BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN.....		37
3.1	Deskripsi Penelitian.....	37
3.2	Kerangka Konsep Penelitian.....	37
3.3	Hipotesis	38
3.4	Skema Kerangka Konsep.....	38
BAB IV METODE PENELITIAN.....		39
4.1	Metode Penelitian.....	39
4.2	Tempat dan Waktu Penelitian.....	39
4.3	Variabel Penelitian	39
4.3.1	Variabel Terkontrol.....	39
4.3.2	Variabel Bebas	40
4.3.3	Variabel Terikat	40
4.4	Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian.....	40
4.4.1	Alat	40
4.4.2	Bahan.....	42
4.4.2.1	Spesimen Uji Baja dan Kuningan	42
4.4.2.2	Larutan Korosif: HNO ₃ 1M.....	43
4.5	Instalasi Alat Uji SCC	43
4.6	Skema Penelitian.....	44
4.7	Diagram Alir Penelitian.....	48
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		49
5.1	Hasil.....	49
5.1.1	Data Hasil Penelitian	49
5.1.2	Pengolahan data	50
5.1.3	Hasil pengolahan data	51
5.2	Pembahasan	51
5.2.1	Diagram Parameter Pengelasan CDW	52
5.2.2	Diagram Tegangan Ambang	53
5.2.3	Pengamatan Visual.....	54
BAB VI PENUTUP.....		57
6.1	Kesimpulan	57
6.2	Saran.....	57

DAFTAR PUSTAKA59
LAMPIRAN65





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	15
Tabel 2.2	32
Tabel 2.3	36
Tabel 4.1	43
Tabel 4.2	43
Tabel 4.3	45
Tabel 5.1	49
Tabel 5.2	51





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram ven hubungan mendasar ketiga unsur penyebab SCC.	7
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, 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.	11
Gambar 2.5	(a) Model dengan tipe jala, (b) Model ideal finite-elemen retakan pada batang.	12
Gambar 2.6	Skema efek konsentrasi tegangan pada fenomena SCC.....	12
Gambar 2.7	Hubungan laju korosi dan pembebanan.	16
Gambar 2.8	Urutan umum terjadinya SCC.....	17
Gambar 2.9	Mekanisme penjalaran retak dibagi menjadi dua jenis, yakni (a) Absorpsi oleh unsur-unsur agresif dan (b) Absorpsi oleh atom hidrogen.	20
Gambar 2.10	(a) Tipe bukaan, (b) tipe geser, dan (c) tipe sobek.....	22
Gambar 2.11	(a) Skema ductile dan fracture, (b) photo makro ductile dan fracture.	23
Gambar 2.12	Tegangan di sekitar daerah lubang.....	24
Gambar 2.13	Tegangan pada bentuk elips.....	24
Gambar 2.14	(a) Retak tidak terkendali (b) Retak tumpul.	25
Gambar 2.15	Diagram tegangan ambang (threshold stress).....	28
Gambar 2.16	Skema fungsi sirkuit.....	29
Gambar 2.17	Skema proses CDW.	31
Gambar 3.1	Skema kerangka konsep penelitian.	38
Gambar 4.1	Skema proses CDW.	40
Gambar 4.2	Spesimen α_0 , baja (kiri) dan kuningan (kanan).	42
Gambar 4.3	Spesimen α_1 , baja (kiri) dan kuningan (kanan).	42
Gambar 4.4	Spesimen α_1 , baja (kiri) dan kuningan (kanan).	43
Gambar 4.5	Instalasi alat uji SCC.	43
Gambar 4.6	Diagram Alir Penelitian.....	48
Gambar 5.1	Sistem pengungkit beban yang terdapat pada alat uji SCC	50
Gambar 5.2	Grafik diagram parameter pengelasan CDW.....	52
Gambar 5.3	Grafik tegangan ambang spesimen α_0 , α_1 , dan α_2	53

Gambar 5.4 Foto makro α_0 (a) Baja karbon, (b) Kuningan..... 54

Gambar 5.5 Foto makro α_1 (a) Baja karbon, (b) Kuningan..... 55

Gambar 5.6 Foto makro α_2 (a) Baja karbon, (b) Kuningan..... 55



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Uji Material Baja dan Kuningan	66
Lampiran 2	Hasil Foto Makro	74
Lampiran 3	Perhitungan Nilai Gaya Setiap Variasi Pembebanan	76
Lampiran 4	Perhitungan Nilai Tegangan Setiap Variasi Pembebanan	78
Lampiran 5	Dokumentasi Kegiatan	80





Halaman ini sengaja dikosongkan

RINGKASAN

Osmar Buntu Lobo, Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Desember 2019. Pengaruh Perlakuan Permukaan dan Parameter Pengelasan *Dissimilar Capacitive Discharge Welding* pada Baja dan Kuningan terhadap *Stress Corrosion Cracking*. Dosen Pembimbing, Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D dan Ir. Oyong Novareza, ST., MT., Ph.D.

Retak Tegangan-Korosi (*Stress Corrosion Cracking-SCC*) merupakan kegagalan pada logam yang disebabkan oleh tiga faktor yaitu tegangan (*stress*), lingkungan korosif (*corrosion environment*), dan retak (*crack initiation*) yang disebabkan kerentanan material. Fenomena kegagalan ini terjadi pada logam atau sambungan logam, kegagalan tersebut sangat berbahaya bagi industri pengguna logam misalnya pada industri penerbangan, konstruksi jembatan/gedung, kelistrikan, bahkan pada bidang kesehatan sekalipun.

Spesimen yang diteliti adalah hasil sambungan las *dissimilar* antara baja dan kuningan yang memiliki diameter 1.6mm dengan panjang 40mm. Proses pengelasan *dissimilar* berlangsung menggunakan mesin CDW dengan berbagai parameter dimulai dari *weld energy* 80, 90, 100, 110, dan 120J. Sebelum material di las, sebelumnya dilakukan variasi *surface preparation* untuk mendapatkan geometri permukaan yang paling optimal. Sambungan tersebut kemudian diuji menggunakan mesin uji SCC dengan metode CLT.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Bentuk perlakuan permukaan yang memiliki ketahanan paling tinggi adalah α_1 kemudian diikuti oleh α_2 dan yang terakhir adalah α_0 . Nilai tegangan ambang atau tegangan aman pada masing-masing spesimen adalah: α_0 sebesar 176,715 MPa, α_1 sebesar 332,846 MPa, dan α_2 sebesar 254,78 MPa. Diantara lima parameter pengelasan dissimilar CDW yaitu 80J, 90J, 100J, 110J dan 120J, didapatkan energi pengelasan yang paling tahan terhadap kondisi SCC adalah 120J.

Kata Kunci: *Stress Corrosion Cracking*, Tegangan Ambang, *Constant Load Test*, *Capacitive Discharge Welding*.



Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

Osmar Buntu Lobo, Master of Mechanical Engineering Study Program, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, December 2019. Effect of Surface Treatment and Dissimilar Capacitive Discharge Welding Parameters for Steel and Brass on Stress Corrosion Cracking. Supervisor, Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D and Ir. Oyong Novareza, ST., MT., Ph.D.

Stress Corrosion Cracking (SCC) is a failure of a metal caused by three factors namely stress, corrosive environment, and crack (crack initiation) due to material vulnerability. This failure phenomenon occurs in metal joint, the failure is very dangerous for the metal user industry, for example in the aviation industry, bridge / building construction, electricity, even in the health sector.

The specimens studied were dissimilar welded joints between steel and brass which had a diameter of 1.6mm and a length of 40mm. The dissimilar welding process takes place using a CDW machine with various parameters starting from 80, 90, 100, 110 and 120J weld energy. Before the material is welded, a prior surface variation is carried out to get the most optimal surface geometry. The connection is then tested using the SCC test machine with the CLT method.

The results showed that the form of surface treatment which had the highest resistance was α_1 then followed by α_2 and finally α_0 . The threshold or safe stress values for each specimen are: α_0 of 176.715 MPa, α_1 of 332.846 MPa, and α_2 of 254.78 MPa. Among the five dissimilar CDW welding parameters, 80J, 90J, 100J, 110J and 120J, the welding energy that is most resistant to SCC conditions is 120J.

Key Word: *Stress Corrosion Cracking, Tegangan Ambang, Constant Load Test, Capacitive Discharge Welding*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Material logam sangat diperlukan pada berbagai sektor industri terutama di zaman sekarang ini. Secara garis besar, terdapat dua jenis logam yaitu ferrous dan nonferrous. Kita dapat lihat dalam kehidupan sehari-hari begitu banyak penggunaan logam, oleh karena itu kebutuhan logam dari tahun ke tahun semakin meningkat. Seiring meningkatnya permintaan pasar, jenis dan kekuatan logam yang dibutuhkan juga akan semakin beragam. Logam dipilih sebagai bahan dasar material karena memiliki sifat yang kuat, dapat dibentuk, dan kaku. Logam juga memiliki kelebihan sebagai penghantar listrik dan panas yang baik (Groover 2010).

Logam Ferrous telah mengalami perkembangan secara cepat, dapat kita saksikan sendiri bahwa banyak jenis baja/besi yang dihasilkan saat ini dengan kualitas yang semakin tinggi dari produk-produk sebelumnya (Suherman 1987). Logam Ferrous dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu besi tuang dan baja. Besi tuang dan baja ini membentuk sekitar 85% dari persediaan logam di Amerika Serikat (Flinn dan Trojan 1995). Sedangkan industri yang membutuhkan material logam nonferrous diantaranya adalah: industri kelistrikan, jam dinding, arloji, ornament, otomotif, penerbangan, rumah tangga, dan lain sebagainya (Scotchmer 2015) (Kannan dan Shukla 2011).

Baja karbon dan kuningan adalah jenis logam yang banyak digunakan dalam industri, khususnya untuk industri otomotif dan elektrik. Meskipun baja dan kuningan merupakan material yang kuat, kedua material tersebut juga mempunyai kelemahan dan tentunya mempunyai batas umur pemakaian. Di samping setiap kelebihan yang dimiliki oleh unsur-unsur logam tersebut, logam juga memiliki kekurangan yang perlu diperhatikan, yaitu kerentanannya terhadap korosi. Salah satu masalah yang sering timbul pada penggunaan logam secara umum adalah *Stress Corrosion Cracking*.

Retak Tegangan-Korosi (*Stress Corrosion Cracking-SCC*) merupakan kegagalan pada logam yang disebabkan oleh tiga faktor yaitu tegangan (*stress*), lingkungan korosif (*corrosion environment*), dan retak (*crack initiation*) yang disebabkan kerentanan material (Dietzel et al. 2017; He et al. 2018). Fenomena kegagalan ini terjadi pada logam atau sambungan logam, kegagalan tersebut sangat berbahaya bagi industri pengguna logam misalnya pada industri penerbangan, konstruksi jembatan/gedung, kelistrikan, bahkan pada bidang kesehatan sekalipun. SCC juga merupakan kegagalan yang sulit untuk diprediksi

karena awalnya hanya menimbulkan pergerakan retak antar butir logam (*intergranular*) dan/atau melewati butir logam (*transgranular*) yang pada penglihatan visual tidak terlihat tanpa menggunakan alat khusus untuk mengamati butiran logam. Kegagalan SCC terjadi melalui beberapa tahap, dimulai dari retak awal (*crack initiation*), perambatan retak (*crack propagation*), dan akhirnya patah (*final crack*) (Roesler, Harders, dan Baeker 2007). Proses terjadinya retak awal biasanya dimulai dari oksidasi yang terjadi pada permukaan batas butir, kemudian terjadi siklus pecahnya film oksida dan menipisnya lapisan kromium atau inkubasi dan terakhir adalah nukleasi dimana udara mengekspos batas butiran (Moss, Kuang, dan Was 2018). Perambatan retak terjadi karena adanya gaya mekanis dan reaksi kimia (korosi) terhadap material itu sendiri. Dengan demikian, SCC dapat dikelompokkan kedalam salah satu masalah utama pada industri modern (Ryakhovskikh, Bogdanov, dan Ignatenko 2018).

Logam yang telah mengalami proses pengerjaan dingin maupun pengerjaan panas kemungkinan besar memiliki tegangan dan *void* (*crack initiation*), tidak terkecuali untuk logam yang telah disambung menggunakan metode las *dissimilar*. Pengelasan *dissimilar* adalah sambungan logam yang berbeda jenis, sambungan ini lebih rentan dibandingkan sambungan yang *similar*. Alasannya karena material pada sambungan *dissimilar* tidak homogen. Jika sambungan las ini masih mempunyai tegangan sisa kemudian ditempatkan pada lingkungan yang korosif, maka dapat dipastikan sambungan tersebut akan mengalami kegagalan SCC karena faktor penyebab SCC sudah terpenuhi yaitu tegangan, lingkungan korosi, dan *void* (Brown 1977).

Penelitian ini menggunakan mesin las jenis *Hotspot Capacitive Discharge Welder* (CDW) sebagai alat untuk menyambung bahan utama penelitian. Mesin las CDW adalah variasi dari *resistance projection welding* (RPW) dimana pengelasan jenis ini, menyimpan daya listrik di dalam kapasitor dan dikeluarkan melalui transformator ke dalam benda kerja (Gould dan Lewis n.d.). Industri otomotif di sekitaran Amerika Utara juga sudah mulai bergerak dan memopulerkan pengelasan CDW ini karena kelebihan yang dimilikinya (Scotchmer 2015). Saat ini terdapat banyak geometri material untuk pengelasan CDW ini, khususnya pada penerapan *stud* atau *pins welding* (DCC Corporation 2013; IMAGE n.d.; Sunbelt n.d.). Penelitian yang memvariasikan bentuk geometri permukaan sebelumnya pernah dilakukan oleh beberapa peneliti (Casalino dan Panella 2006, 2007; Dattoma, Palano, dan Panella 2010; Palano et al. 2012; Panella et al. 2019). Penelitian tersebut juga menggunakan CDW sebagai alat penyambung material, permukaan pada penelitian tersebut berbentuk *wave* (bergelombang). Perlakuan permukaan terhadap material aluminium juga

pernah diteliti oleh Hou, namun pada penelitian ini tidak menggunakan metode CLT untuk penyambungan melainkan *friction welding* (las gesek) (Hou et al. 2018).

Penelitian dengan judul “Pengaruh Perlakuan Permukaan dan Parameter Pengelasan *Dissimilar Capacitive Discharge Welder* pada Baja dan Kuningan terhadap *Stress Corrosion Cracking*” diharapkan dapat menjadi penelitian yang menghantarkan peneliti dalam memperoleh nilai tegangan ambang atau tegangan aman (σ_{Th}) pada sambungan las dissimilar serta mengetahui parameter yang tepat pada pengelasan CDW untuk ketahanan pengelasan *dissimilar* terhadap SCC. Karena penulis menyadari bahwa tegangan sisa kemungkinan besar terdapat dalam sambungan las. Begitupun dengan *Void* yang diproduksi dalam proses pengelasan memicu terjadinya retakan. Karena pentingnya mempertimbangkan ketahanan SCC pada sambungan las, maka sambungan las CDW dengan bentuk geometri yang berbeda dari penelitian sebelumnya akan dievaluasi dari sudut pandang SCC.

1.2 Rumusan Masalah

Atas dasar latar belakang diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini dapat ditentukan sebagai berikut:

1. Berapakah nilai tegangan ambang (*Threshold stress*- σ_{Th}) pada masing-masing spesimen yang ada di lingkungan SCC?
2. Bagaimanakah perbandingan dari setiap perlakuan permukaan antara spesimen yang satu dengan spesimen yang lainnya?
3. Bagaimana menentukan parameter optimal pengelasan dissimilar CDW?

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan masalah dalam penelitian ini tetap pada alur pembahasan maka peneliti membuat batasan masalah. Berikut diuraikan batasan masalah yang dimaksud:

1. Seluruh beban tegangan tarik yang diaplikasikan dianggap linear
2. HNO₃ 1M digunakan agar spesimen berada pada lingkungan korosif dan menyerupai lingkungan SCC
3. Bagian dari spesimen yang ditinjau adalah bagian yang hanya terendam di dalam larutan HNO₃.

Tegangan tarik yang menghasilkan fenomena SCC hanya diperoleh dari alat uji SCC yang digunakan, karakteristik setiap spesimen dan dari larutan HNO₃ dengan mengabaikan faktor-faktor lainnya.

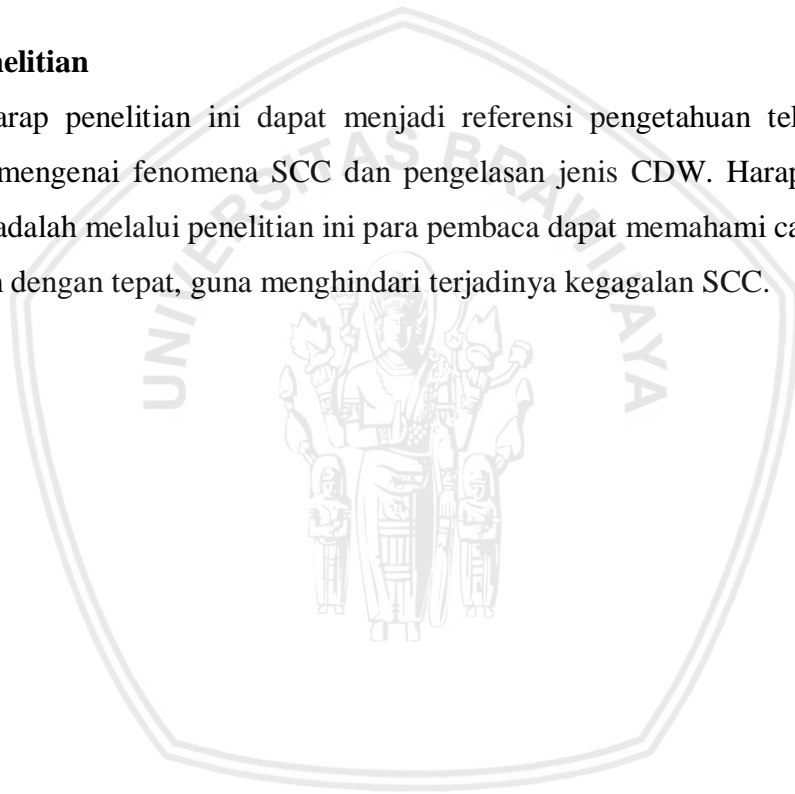
4. Pada saat melakukan pengujian, temperatur dan tekanan udara dianggap konstan dan dalam kondisi normal (suhu kamar 30°C dan tekanan atmosfer 760 mmHg).

1.4 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui setiap nilai dari tegangan ambang atau tegangan aman pada masing-masing spesimen yang ada di lingkungan SCC
2. Untuk mengetahui dan menganalisis perbandingan diagram dari tegangan ambang (σ_{Th}), yaitu antara spesimen satu dengan spesimen yang lainnya
3. Mengetahui parameter optimal pengelasan dissimilar CDW.

1.5 Manfaat Penelitian

Penulis berharap penelitian ini dapat menjadi referensi pengetahuan teknik mesin khususnya topik mengenai fenomena SCC dan pengelasan jenis CDW. Harapan penulis yang selanjutnya adalah melalui penelitian ini para pembaca dapat memahami cara menguji sambungan logam dengan tepat, guna menghindari terjadinya kegagalan SCC.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Dalam penelitiannya, Bayuseno melakukan uji SCC pada SS AISI430. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemberian tegangan dan instrumen korosi bagi lamanya waktu patah, jenis retak, pertambahan panjang yang terjadi pada spesimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan yang diberikan dalam lingkungan korosi semakin meningkat seiring pertambahan panjang yang terjadi pada spesimen. Semakin kecil tegangan yang diberikan maka waktu putus spesimen akan semakin lama tetapi justru akan membuat bagian yang terkena korosi pada spesimen semakin banyak (Bayuseno dan To'in 2012). Lebih lanjut Nugraha melakukan penelitian terhadap logam kuningan dengan menggunakan metode *U-Bend*, penggabungan antara variasi antara Mattson pH=7,2 dan media sodium nitrat 1M dilakukan pada penelitian ini. Parameter dari penelitian ini merupakan hasil pengurangan dari berat spesimen, nilai kekerasan dan struktur yang menghasilkan adanya peristiwa SCC pada logam kuningan lebih cenderung terjadi pada lingkungan amonia (*Mattson*) dibandingkan dengan lingkungan nitrat (Nugraha dan Bayuseno 2014).

Penelitian yang selanjutnya oleh Sudarsono mengenai *stress relieving* untuk menghilangkan *residual stress* yang terdapat pada baja yang telah mengalami proses pengelasan. Penyambungan dilakukan pada material aluminium dengan metode penyambungan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), dengan jenis larutan korosif HCl 1M. Terdapat tiga variabel bebas, yakni spesimen aluminium yang tanpa mengalami pengelasan (A), spesimen pada bahan aluminium yang mengalami pengelasan (WA) serta perlakuan *stress relieving* (SR). Penelitian dilakukan dengan pemberian beban konstan sebesar 25kg, 30kg, 35kg, 40kg, 45kg dan 50kg. Hasil analisis perbandingan nilai tegangan ambang antara ketiga spesimen uji jika diurutkan adalah sebagai berikut; Spesimen A, SR, dan WA (Sudarsono, Darmadi, dan Gapsari 2018). Lebih lanjut lagi Darmadi melakukan penelitian yang mengamati pengaruh orientasi butir terhadap kegagalan SCC pada ASTM A36. Penelitian ini menunjukkan orientasi butir yang lebih rendah pada pelat pra retak (*precrack*) ternyata dapat bertahan lebih lama pada lingkungan korosif dan beban tegangan. Dari pengamatan mikro struktur, butiran yang lebih halus dalam orientasi yang lebih rendah dapat meningkatkan ketahanan terhadap SCC. Struktur mikro pada daerah fraktur menunjukkan bahwa orientasi yang lebih rendah cenderung akan menyebabkan pertumbuhan retak

intergranular sedangkan pada orientasi yang lebih tinggi menunjukkan pertumbuhan *transgranular* (Darmadi, Sugiarto, dan Gapsari 2018).

Widodo melakukan pengujian mekanik dari hasil sambungan *stud welding* terhadap SS AISI 304 dan Baja XW42. Kedua material tersebut disambung kemudian diuji tarik dan kekerasan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa SSAISI 304 mempunyai nilai kekerasan tertinggi sebesar 233Mpa dan kekerasan tertinggi terdapat pada logam las AISI 304 sebesar 377,34HVN (Widodo, Subardi, dan Yasa 2016).

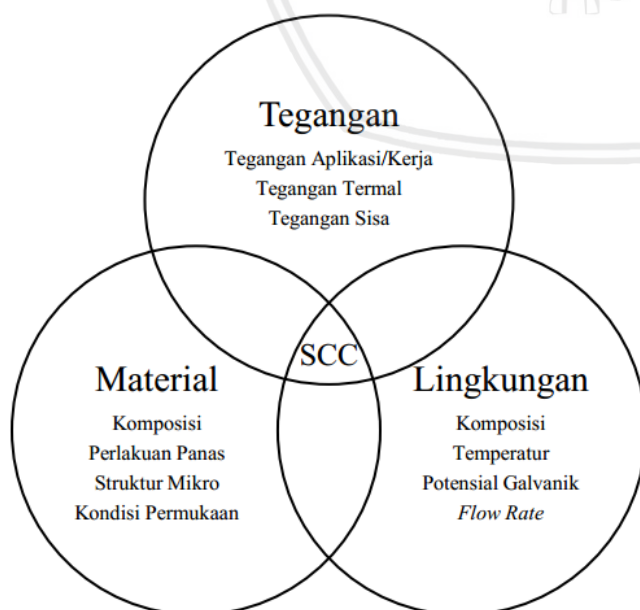
Guo menginvestigasi kerentanan *stanless steel* 316L yang direndam air panas dari 550°C-600°C terhadap korosi dan *stress corrosion cracking*. Penelitian ini menggunakan analisis XRD, SEM, EDS dan EBSD untuk memilah karakterisasi dari mikro struktur pengujian spesimen. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa penambahan suhu air mengurangi perlawanan SS 316L terhadap korosi dan SCC (Guo et al. 2017).

2.2 Stress Corrosion Cracking

Stress corrosion cracking (SCC) adalah kegagalan yang menggambarkan permulaan dan pertumbuhan retakan material logam yang disebabkan oleh kombinasi sinergis dari tegangan tarik statis yang nominal, ataupun secara perlahan meningkat, dan lingkungan yang biasanya korosif (Dietzel et al. 2017). *Stress Corrosion Cracking* menggambarkan kegagalan material akibat pertumbuhan retak sebagai akibat sinergi dari beban mekanik eksternal dan lingkungan korosif (Jones 1992a; Raja dan Shoji 2011). SCC menyebabkan kegagalan katastropik pada konstruksi, pesawat udara dan pipa (Cottis 2000; Darmadi et al. 2018; Sudarsono et al. 2018). SCC dianggap sebagai fenomena utama dalam kebocoran pipa dan meledak dengan konsekuensi bencana (National Energy Board 1996). Untuk material tertentu, SCC bergantung pada lingkungan korosi yang agresif dan tegangan sisa (Cheng 2013). Penjelasan lain SCC yaitu kegagalan logam yang disebabkan oleh kombinasi mekanis dan kimiawi seperti tegangan, tekanan operasi, temperatur, lingkungan korosi dan pembentukan hidrogen molekuler di dalam liang celah (Nugraha dan Bayuseno 2014). 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. Dengan kata lain SCC dapat diartikan fenomena kegagalan karena adanya tiga kondisi yang saling berkaitan, yaitu adanya tegangan tarik, lingkungan yang korosif, serta karakteristik material yang rentan terhadap SCC itu sendiri (Koch 2001). Berikut adalah ciri-ciri SCC menurut (Brown 1977):

1. Dalam menginisiasi SCC, unsur tegangan wajib ada. Tegangan mungkin saja terjadi pada masa operasional suatu komponen, namun sebenarnya tegangan mungkin juga telah dimiliki komponen tersebut sejak tahap fabrikasi atau instalasi.
2. Pada umumnya, unsur-unsur paduan ternyata lebih rentan terhadap SCC dibandingkan unsur murninya meskipun terdapat beberapa jenis logam yang memiliki sifat sebaliknya, seperti tembaga.
3. Peretakan pada fenomena SCC yang teramati pada umumnya hanya disebabkan oleh sedikit unsur kimia di lingkungannya, dan unsur tersebut tidak memerlukan konsentrasi yang besar.
4. Apabila tegangan bernilai sangat kecil, unsur paduan pada umumnya akan bersifat lebih lemah terhadap lingkungan dibandingkan unsur murninya, dan kemungkinan akan menginisiasi retak.
5. Meskipun bersifat mulur, perpatahan SCC akan memiliki penampakan seperti perpatahan rapuh.
6. Dapat ditentukan suatu nilai tegangan ambang, dimana dibawah nilai tegangan tersebut SCC dapat dikatakan tidak akan terjadi.

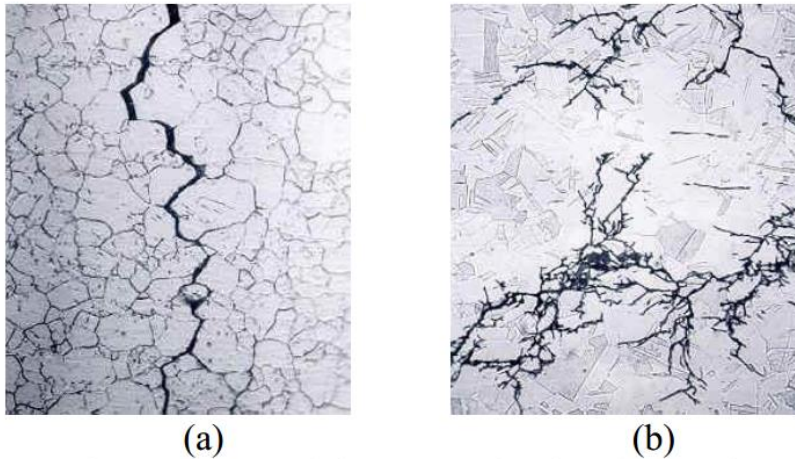
Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa pada prinsipnya SCC terjadi disebabkan adanya kombinasi yang berkesinambungan antara korosi pada material, tegangan yang diterimanya, serta kerentanan material itu sendiri. Berikut adalah diagram fenomena terjadinya SCC.



Gambar 2.1 Diagram ven hubungan mendasar ketiga unsur penyebab SCC
Sumber: Speidel (1984)

Tegangan memiliki peranan penting dalam menginisiasi suatu kegagalan SCC (Brown 1977). 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. Penelitian He juga mengungkapkan bahwa lingkungan korosif dapat menjadi penyebab terjadinya SCC pada logam (He et al. 2018). Lebih lanjut Du mengungkapkan bahwa SCC juga dapat terjadi apabila beban yang bekerja pada logam diatas 35% dari batas deformasi plastis logam tersebut (Du et al. 2015).

Terdapat dua jenis perambatan retak pada fenomena SCC, yakni perambatan retak *intergranular* dan perambatan retak *transgranular*. Perambatan retak SCC terjadi di lingkungan korosif yang kemudian diperburuk oleh adanya konsentrasi tegangan sehingga akan menghasilkan tingkat korosi yang lebih parah dibandingkan dengan tanpa melibatkan tegangan (Gadang 2008). Untuk retak *intergranular*, jalur perambatan retaknya mengikuti jalur batas-batas butirnya. Sedangkan pada retak *transgranular*, jalur perambatan retak melintasi batas-batas butirnya seperti terlihat pada gambar 2.2. 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 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 dan Taylor 2014).

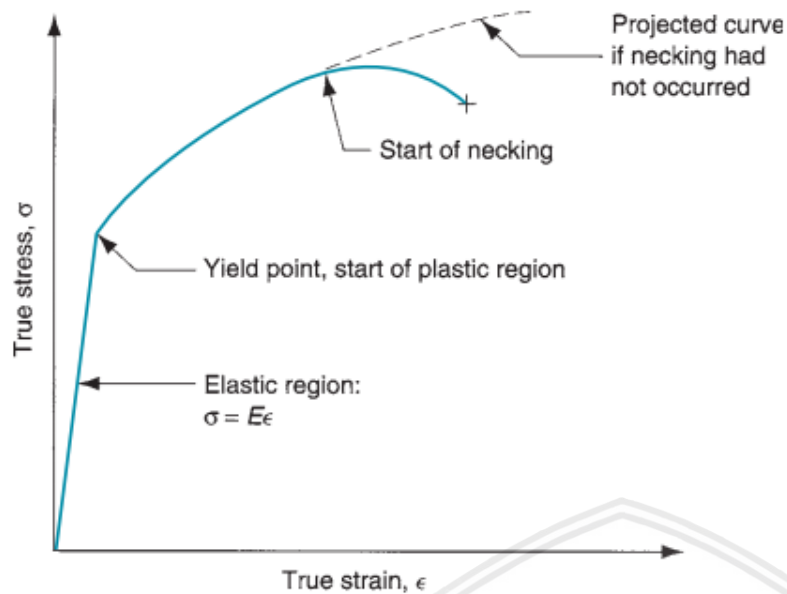


Gambar 2.2 a) Retak intergranular dan b) Retak transgranular
 Sumber: NACE International n.d.

2.2.1 Pengaruh Tegangan Terhadap Fenomena SCC

Untuk menghindari terjadinya SCC, Darmadi telah melakukan penelitian mengenai prediksi tegangan yang terjadi pada sebuah material yang telah mengalami proses pengelasan. Penelitian tersebut menginvestigasi tegangan sisa yang terjadi di sekitar hasil las menggunakan metode *Finite Elemen Machine* dengan software ANSYS (APDL) untuk menunjukkan kedalaman *residual stress*. Penelitian tersebut menggabungkan analisis panas-metalurgi-mekanik, dengan menggabungkan tiga analisis tersebut maka dapat diperoleh hasil yang lebih maksimal dibandingkan jika hanya menganalisis secara metalurgi saja. Tegangan sisa diprediksi menggunakan ANSYS dan diversifikasi oleh hasil eksperimen tes selanjutnya divalidasi dari model FEM (Darmadi 2014).

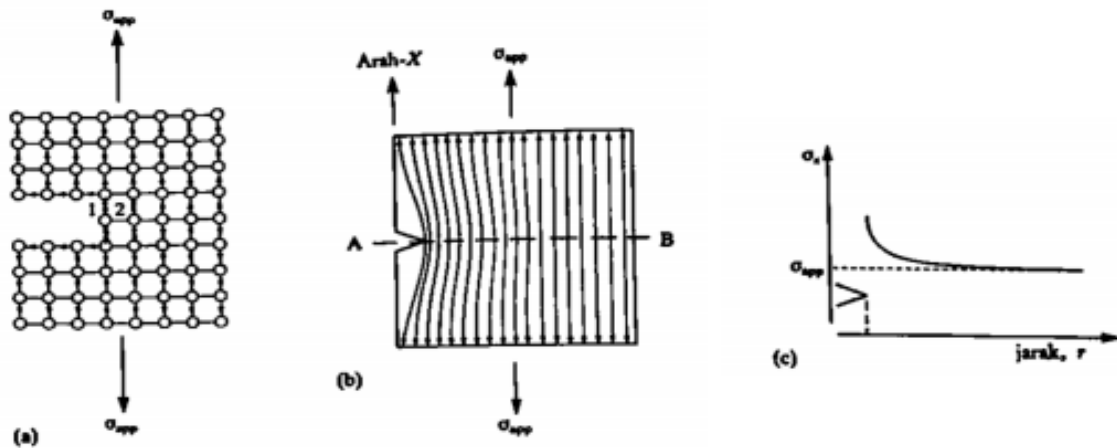
Tegangan adalah ekspresi daripada suatu kalkulasi dimensi yang timbul karena efek deformasi struktur molekul suatu benda atau biasa disebut dengan regangan. Regangan didefinisikan sebagai perubahan bentuk daripada benda akibat gaya yang diaplikasikan pada benda tersebut. Nilai regangan diformulasikan 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: Groover (2010)

Tinggi rendahnya tegangan yang diberikan akan berbanding terbalik dengan waktu perambatan retak, artinya jika tegangan ditingkatkan maka waktu perambatan retak akan menurun atau semakin cepat (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, penjelasan mengenai tegangan ambang secara lebih detail akan dijelaskan pada Poin 2.5. SCC terjadi apabila pengaruh intensitas tegangan mendukung terjadinya inisiasi keretakan, yang selanjutnya akan menyebabkan perambatan retak (Trethewey dan Chamberlain 1988). Retak ini akan menjalar sejalan dengan intensitas tegangan, semakin besar tegangan yang diberikan kemungkinan laju kerusakan semakin tinggi dan kegagalan akibat SCC akan semakin cepat terjadi.

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 (Trethewey dan Chamberlain 1988). Sebagian ikatan akan mengalami tekanan lebih besar dibanding yang lain.

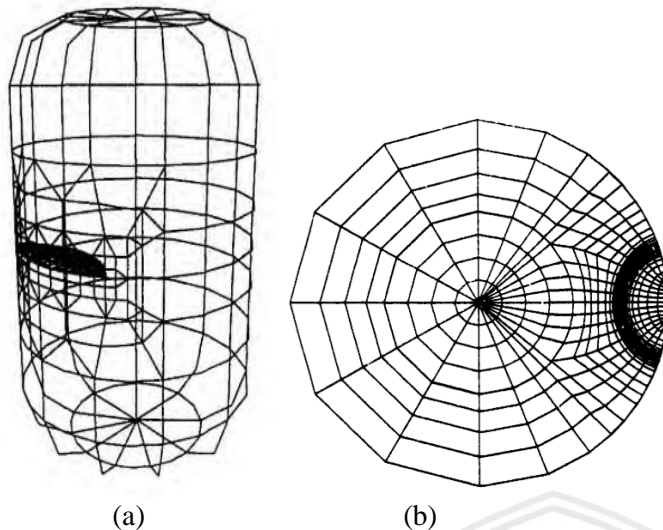


Gambar 2.4 a) Efek pemberian tegangan, terhadap ikatan-ikatan atom dalam sebuah kisi kristal yang mengandung retakan, b) Permukaan tegangan di ujung retakan, c) Variasi tegangan efektif dalam arah-x, σ_x , terhadap jarak r di depan ujung retakan.

Sumber: Trethwey dan Chamberlain (1996)

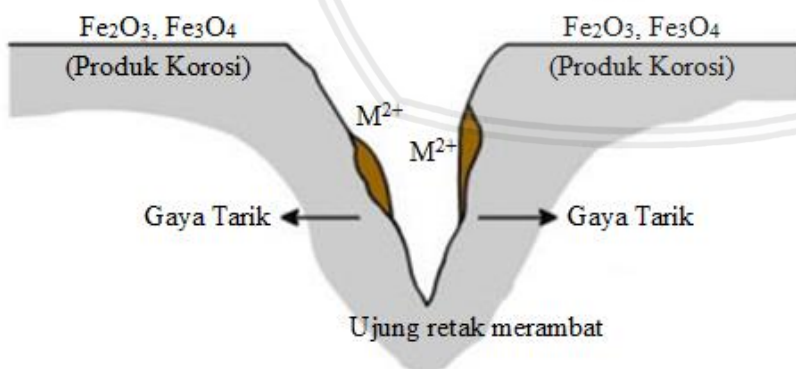
Pada Gambar 2.4a), struktur atom digambarkan berupa suatu tatanan kubus sederhana dan anak panah besar menunjukkan tegangan tarik, σ_{app} , yang diaplikasikan pada tatanan tersebut. Tegangan terpusat pada ikatan-ikatan yang bersebelahan dengan cacat. Pada ikatan 1 dan 2 mengalami tegangan lebih besar 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 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 2.4a) dapat disajikan juga sebagai Gambar 2.4b), 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 2.4c).

Gambar 2.5 menunjukkan model pada batang berbentuk pejal yang diberi beban aplikasi berupa tegangan tarik. Adanya retak pada permukaan logam tersebut akan menghasilkan model finite-elemen yang pusat konsentrasi tegangan berada pada sekitaran retakan tersebut.



Gambar 2.5 a) Model dengan tipe jala, b) Model ideal finite-elemen retakan pada batang
 Sumber: Van dan Royer (1993) (Raju dan Newman, Jr (1985))

Menghilangkan atau mengurangi tegangan yang terdapat pada logam/sambungan logam dapat memperkecil terjadinya risiko SCC. Tegangan yang dimaksud berupa tegangan tarik (*tensile*), tegangan tekan (*compressive*), dan tegangan geser (Groover 2010). Seperti pernyataan Du yaitu, tegangan terdapat pada material yang telah mengalami pengerjaan (*residual stress*) (Du et al. 2015). Tegangan sisa dalam pengelasan dihasilkan dalam struktur sebagai akibat dari kontraksi yang tidak seragam yang terjadi selama pemadatan logam las dan pendinginan ke suhu lingkungan, (Moein dan Sattari-Far 2014). Pendapat tersebut diperkuat oleh (Liu dan Chung 2018) bahwa Sulit menghindari tegangan sisa pada sambungan las.



Gambar 2.6 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.

2.2.2 Pengaruh Lingkungan Korosi Terhadap Fenomena 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,



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,

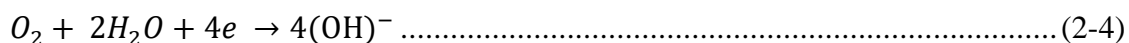
1. Pelepasan hidrogen,



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

pengelompokan ini digunakan sebagai dasar untuk mengklarifikasi suatu permasalahan korosi sehingga dapat dilakukan penanggulangan atauantisipasi 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 satu pun jenis logam yang tahan terhadap seluruh jenis korosi sekaligus. Tidak menutup untuk kemungkinan sambungan *dissimilar* seperti pada penelitian ini dapat terjadi korosi logam tidak sejenis dan korosi kimiawi. Pada dasarnya seluruh jenis logam akan mengalami korosi, bahkan logam yang disebut nirkarat atau anti-korosi sekalipun. Seperti telah dijelaskan pada Poin 2.2, 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 trans pasif. 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 lembap. Lingkungan SCC sesungguhnya adalah spesifik, berdasarkan jenis logam dan senyawa pada lingkungan korosifnya (Jones dan Ricker 1992).

Beberapa contoh pasangan jenis logam dan lingkungan korosif SCC-nya disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1

Hubungan Jenis Logam dan Lingkungan Korosifnya Dalam SCC

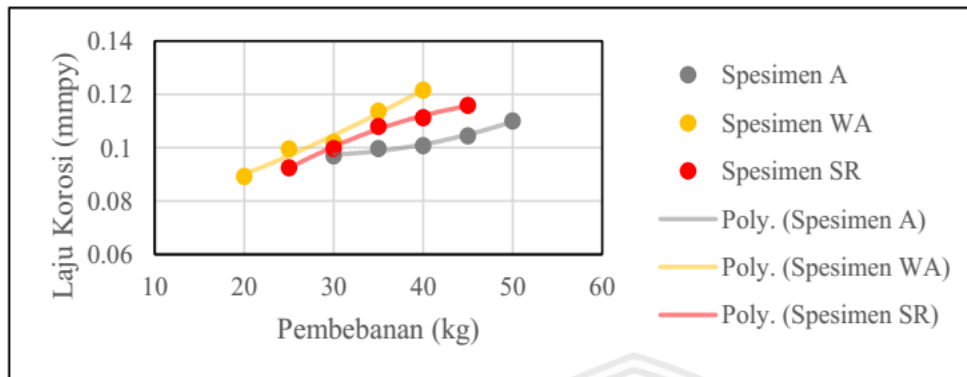
Paduan	Lingkungan
Baja Karbon	Larutan nitrat panas, hidroksida, dan karbonat/bikarbonat
Baja Kekuatan Tinggi	Elektrolit encer, terutama yang mengandung H ₂ S
Baja Tahan Karat Austenitic	Panas, larutan pekat klorida; Uap yang terkontaminasi klorida
Paduan Nikel Tinggi	Uap dengan kemurnian tinggi
Kuningan α	Larutan amoniak
Paduan Aluminium	Larutan Cl ⁻ , Br ⁻ , dan I ⁻ encer
Paduan Titanium	Larutan Cl ⁻ , Br ⁻ , dan I ⁻ encer; cairan organik; N ₂ O ₄
Paduan Magnesium	Larutan Cl ⁻ encer
Paduan Zirconium	Larutan Cl ⁻ encer; cairan organik; I ₂ pada 350°C (660 °F)

Sumber: (Jones dan Ricker 1992)

Ketahanan suatu material akan korosi secara umum mengacu pada kecepatan korosi material tersebut. Kecepatan korosi suatu material logam didefinisikan sebagai laju korosi, dan nilai laju korosi suatu material akan terus berubah terhadap fungsi waktu. Pengukuran laju korosi dapat dilakukan dengan beberapa metode, salah satunya adalah dengan metode kehilangan berat. Metode kehilangan berat adalah perhitungan laju korosi dengan mengukur kekurangan berat akibat korosi yang terjadi. Metode ini menggunakan jangka waktu penelitian hingga mendapatkan jumlah kehilangan akibat korosi yang terjadi.

Seperti telah dijelaskan pada Poin 2.2.1, hubungan besarnya tegangan dan laju korosi akan saling berhubungan. (Mamlu 2001) melakukan penelitian mengenai pengaruh nilai pembebanan terhadap laju korosi pada besi beton dan didapatkan kesimpulan bahwa besarnya pembebanan pada besi beton sebelum mengalami korosi akan sangat berpengaruh terhadap laju korosi yang terjadi pada besi beton tersebut. Semakin besar nilai pembebanan yang diberikan pada spesimen uji, maka laju korosi yang terjadi juga akan semakin cepat. Pada penelitian Sudarsono juga memaparkan grafik perbandingan laju korosi terhadap

pembebanan, pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin meningkat beban yang diberikan pada ketiga spesimen maka akan semakin meningkat pula nilai laju korosi yang terjadi.



Gambar 2.7 Hubungan laju korosi dan pembebanan.

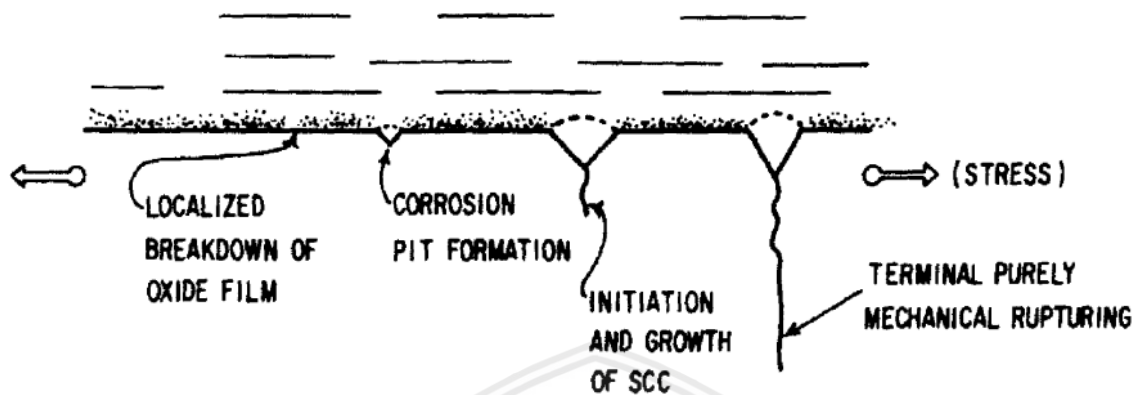
Sumber: Sudarsono et al. (2018)

Pengaruh lingkungan korosif terhadap SCC merupakan bentuk suatu hubungan timbal-balik (Gadang 2008). Mekanisme kerusakan oleh korosi pada fenomena SCC dapat dijelaskan sebagai berikut; Saat tegangan berperan dalam merusak lapisan pasif suatu logam maka hal tersebut akan menjadi pemicu awal suatu korosi terjadi, yang selanjutnya akan diikuti bagian-bagian lainnya pada logam tersebut. Seiring dengan terus bertambahnya nilai tegangan, karena terjadinya pemusatan tegangan, maka regangan yang terjadi juga akan semakin besar sehingga energi ikatan antar atom akan terus berkurang yang selanjutnya akan menyebabkan perambatan korosi. Lapisan pasif sesungguhnya akan terus timbul namun pembentukannya akan terganggu dengan adanya tegangan-regangan, sehingga sifat pasivasi suatu logam tidak dapat mengimbangi serangan korosi yang terjadi.

2.2.3 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 Oudar 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 menginisiasikan 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.



Gambar 2.8 Urutan umum terjadinya SCC

Sumber: (Brown 1977)

Gambar 2.8 diatas menggambarkan urutan terjadinya kegagalan SCC dengan asumsi bahwa tegangan pada material tidak mengalami pengurangan. Beberapa material mungkin tidak menunjukkan urutan SCC seperti diatas contohnya terutama (titanium/air) tidak menunjukkan pitting, tetapi SCC mudah memulai dari celah kelelahan.

Sebagian besar logam ditutupi dengan film tipis misalnya *oxides*, yang dapat melindungi terhadap korosi selama lapisan tersebut tetap utuh. Proses SCC dimulai dari pemecahan film ini, yang dapat terjadi karena kerusakan mekanis atau karena arus listrik. Penyebab utama kerusakan lapisan ini bisa disebabkan oleh aksi unsur kimia tertentu yang ada di lingkungan, khususnya klorida. Setelah lapisan terpecah maka akan terbentuk lubang korosi/void/*crack initiation*. Dalam beberapa kombinasi lingkungan dan paduan, retak dapat dimulai tanpa pit ting yang terlihat, tetapi dalam sebagian besar kegagalan, lubang korosi mendahului SCC. (Brown 1977)

2.3 Mekanisme Terjadinya SCC

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

2.3.1 Tahap Pemicuan

Tahap pemicuan merupakan tahap dimana suatu pembangkit fenomena SCC terbentuk. Pada umumnya perambatan retak akan terinisiasi dari cacat di permukaan, baik cacat yang telah ada ataupun terbentuk pada saat masa pakai nya. 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 daripada 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 (Trethewey dan Chamberlain 1988).

2.3.2 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.
2. Mekanisme melalui lintasan aktif akibat regangan.
3. Mekanisme yang menyangkut absorpsi.

2.3.2.1 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 dikenakannya tegangan tarik, akan tetap terbuka dan memberi celah bagi elektrolit untuk dapat masuk ke bagian ujung dalam cacat tersebut.

2.3.2.2 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 pasif oleh karena telah berhubungan dengan lingkungan lebih lama (Trethwey dan Chamberlain 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:

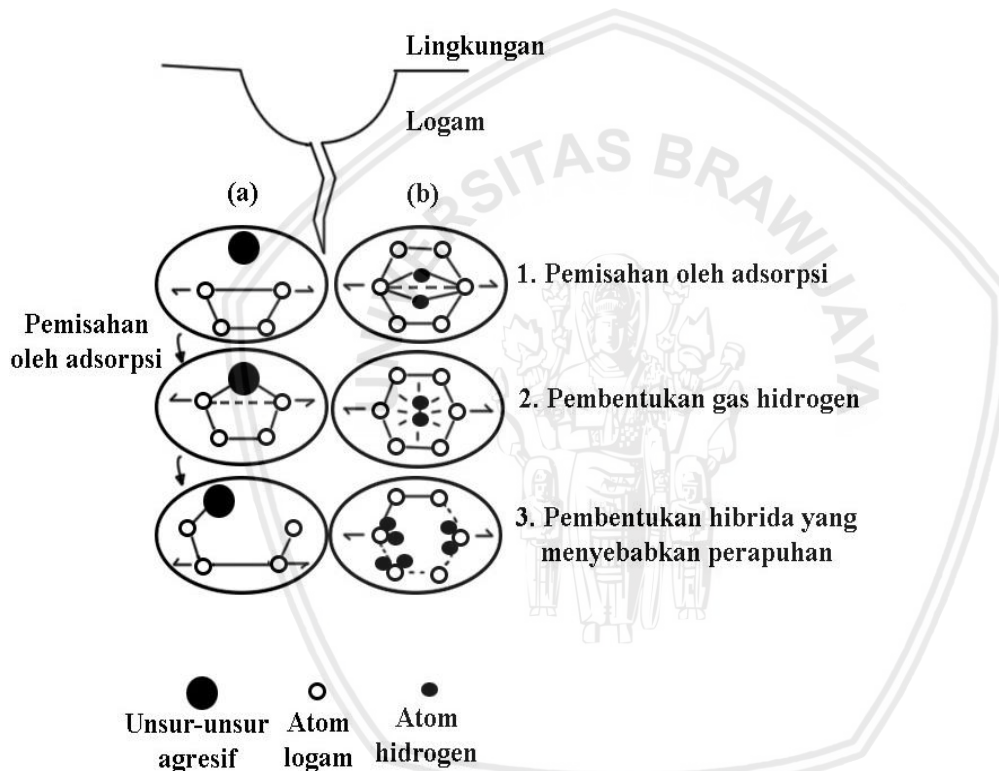
1. Laju pecahnya lapisan pasif, merupakan laju peregangan yang terjadi pada proses peretakan lapisan pasif suatu unsur logam.
2. Laju sirkulasi larutan, merupakan laju penggantian dan pembuangan larutan pada ujung retak dimana hal ini ditentukan oleh seberapa mudah masuknya unsur-unsur agresif ke bagian ujung retak.
3. 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.

2.3.2.3 Mekanisme yang Menyangkut Absorpsi

Mekanisme menyangkut absorpsi ini merupakan kebalikan daripada mekanisme akibat regangan, dimana korosi menjadi unsur pengendali. Unsur-unsur agresif dan atom hidrogen 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 2.9.



Gambar 2.9 Mekanisme penjalaran retak dibagi menjadi dua jenis, yakni a) Absorpsi oleh unsur-unsur agresif dan b) Absorpsi oleh atom hidrogen.

Sumber: Trethwey dan Chamberlain (1996)

Gambar 2.9a) 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 antar logam sehingga selanjutnya pemisahan secara mekanik lebih mudah terjadi.

Sedangkan Gambar 2.9b) 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 antar logam 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.

2.3.3 Tahap Terjadinya Kegagalan

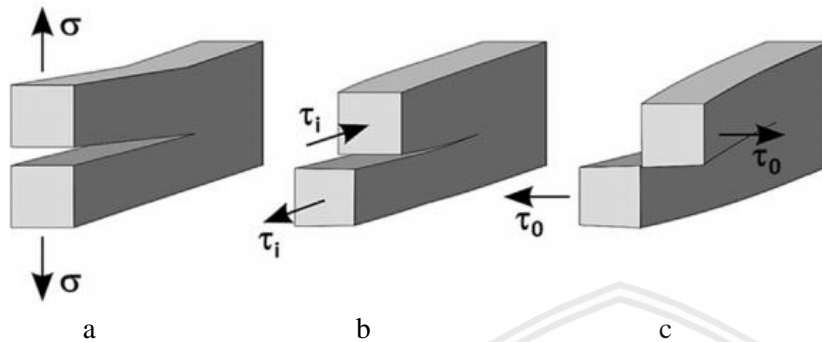
Tahap ini merupakan tahap dimana suatu kegagalan pada benda atau komponen akibat fenomena SCC terjadi. Pada tahap ini, struktur material suatu benda atau komponen logam sudah mencapai titik dimana seluruh ikatan antaratom telah hilang. Suatu titik sebelum terjadinya kegagalan pada umumnya didefinisikan sebagai ketegaran perpatahan, yang akan dijelaskan secara lebih mendalam pada Poin 2.5.

2.4 Mekanika Fraktur

Fraktur adalah pemisahan suatu benda atau bahan menjadi dua atau lebih bagian yang disebabkan oleh aksi tegangan. Mekanika fraktur (*fracture mechanics*) adalah teori yang membahas mengenai retak; tegangan di sekitar retakan, faktor intensitas tegangan saat retakan, kegagalan akibat retakan, laju pertumbuhan retakan dan *stress concentration* atau konsentrasi tegangan. Pernyataan tersebut sejalan dengan Darvell yang menyatakan bahwa mekanika fraktur adalah studi tentang kegagalan dalam hal kekuatan dan penyebaran retak dengan tujuan untuk menghindari kegagalan suatu struktur dan meningkatkan ketahanan material (Darvell 2018). Analisa konsentrasi tegangan pada lubang mulai diteliti pada tahun 1898 oleh Ernst Gustav Kirsch's (Kirsch 1898). Kemudian pada tahun 1913 dilakukan analisa tegangan terhadap lubang berbentuk elips (Inglis 1913). Teori Kirsch dan Inglis ini berlaku untuk pelat isotropik tak terbatas dalam tegangan *uniaxial*. Selanjutnya pada tahun

1920, penelitian tentang mekanika fraktur telah dimulai secara resmi, karena pada tahun ini analisis retak berdasarkan energi Griffith mengenai celah telah dimulai (McGinty 2014).

Dalam ilmu pengetahuan tentang mekanika fraktur terdapat tiga tipe pembebanan seperti terlihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 a) Tipe bukaan, b) tipe geser, dan c) tipe sobek.
Sumber: Zhang (2019)

Konfigurasi pembebanan yang berbeda pada ujung retakan mengarah pada berbagai mode perpindahan permukaan ujung retakan. Tiga konfigurasi pembebanan tunggal membentuk tiga tipe patahan, yaitu tipe bukaan (*opening mode*), tipe geser (*shearing mode*), dan tipe sobek (*tearing mode*) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.10.

1. Tipe bukaan (*opening mode*)

Ujung retak mengalami tegangan normal, dan permukaan retak terpisah secara simetris sedangkan bagian depan retak tegak lurus terhadap bidang retak.

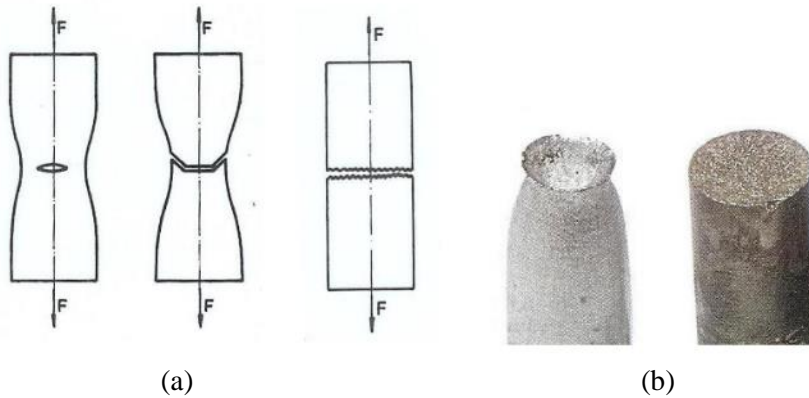
2. Tipe geser (*shearing mode*)

Ujung retak mengalami tegangan geser bidang datar, dan permukaan retak saling bergeser sehingga perpindahan permukaan retak berada pada bidang retak tetapi tegak lurus terhadap bagian depan retak.

3. Tipe sobek (*tearing mode*)

Ujung retak mengalami tegangan geser keluar-bidang- s_0 , dan permukaan retak bergerak relatif satu sama lain sehingga perpindahan permukaan retak berada di bidang retak tetapi sejajar dengan bagian depan retak.

Kombinasi dari dua atau tiga tipe fraktur diatas dapat saja diterima oleh suatu konstruksi dan dikenal dengan istilah *mixed mode* atau tipe campuran (Zhang 2019).



Gambar 2.11 a) Skema *ductile* dan *fracture*, b) photo makro *ductile* dan *fracture*
 Sumber: Lasek (2015)

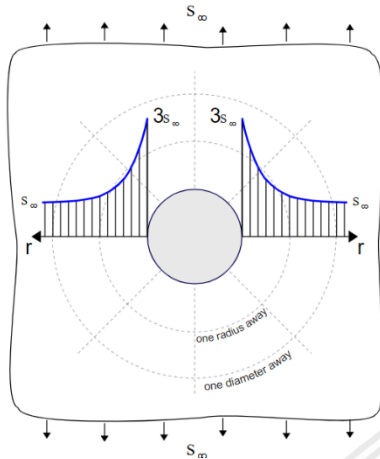
Ketika material baja ditarik sampai putus, bentuk patahan yang akan terjadi secara umum ada dua yaitu patahan ulet (*ductile*) atau patahan rapuh (*brittle*). Tahapan untuk patahan ulet adalah dimulai dari terbentuknya *neck*, kemudian pembentukan rongga kecil (*micro voids*), pertumbuhan void (*elipsoid*) menjadi celah, pertumbuhan retak secara cepat di sekitaran leher dan terjadi regangan geser 45° , fraktur akhir (*cup and cone*). Permukaan interior berserat, tidak beraturan, yang menandakan deformasi plastis. Sedangkan untuk patahan material yang rapuh, tidak ada deformasi yang berarti, dan perambatan retak sangat cepat. Pada sebagian besar material getas, perambatan retak (*by bond breaking*) terjadi pada bidang kristalografi tertentu (*cleavage planes*). Jenis fraktur ini adalah transgranular yang menghasilkan tekstur kasar ketika arah pembelahan berubah dari biji ke biji. Dalam beberapa bahan, fraktur bersifat intergranular (Virginia Education n.d.).

Konsentrasi tegangan adalah akumulasi tegangan dalam material karena perubahan geometri yang tiba-tiba. Ketika ada perubahan geometri secara tiba-tiba pada karena retak sudut yang tajam, lubang dan penurunan area penampang, maka akan ada peningkatan tekanan lokal di dekat retakan sudut tajam, lubang, dan penurunan luas penampang. Material akan cenderung gagal pada dimana konsentrasi tegangan lebih banyak. Jadi untuk mencegah kegagalan, konsentrasi tegangan harus dihindari atau dikurangi (Mishra 2017). Karena itulah pentingnya tahapan dalam mendesain suatu sambungan, dimana tahapan desain dapat memperkirakan besarnya tegangan maksimum yang terjadi dan memperkirakan besarnya faktor konsentrasi tegangan (K_t). Besarnya K_t ini dipengaruhi oleh dimensi dan geometri elemen serta modulus pembebanannya (Wibowo, Sugiyanto, dan Suprihanto 2007).

Faktor konsentrasi tegangan (*Stress concentration factor-SCF*) dan faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor-SIF*) dapat digunakan dalam menganalisa retakan. Faktor konsentrasi tegangan (K_t) adalah rasio tegangan maksimum pada lubang, *fillet*, atau *notch*, perlu diperhatikan bahwa yang dimaksud bukan retak (Noble 1997; Virginia Education n.d.;

Wikipedia contributor 2019). Sedangkan faktor intensitas tegangan untuk adalah suatu nilai untuk menyatakan intensitas tegangan (*stress intensity*) pada ujung retakan yang disebabkan oleh beban atau tegangan itu sendiri.

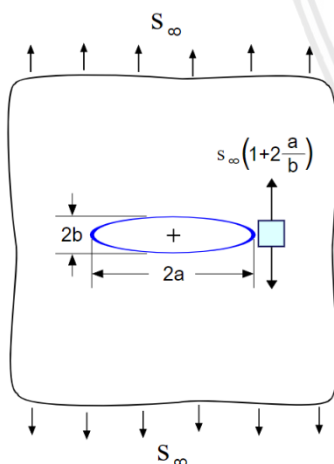
Gambar 2.12 adalah salah satu contoh kasus lubang yang terdapat pada pelat, $K_t=3$.



Gambar 2.12 Tegangan di sekitar daerah lubang
Sumber: McGinty (2014)

Pada Gambar 2.12 diatas menjelaskan bahwa tegangan pada lubang berbentuk lingkaran sempurna memiliki tegangan tiga kali lipat berada pada daerah tengah dimana daerah tersebutlah yang akan menjadi pemicu terjadinya pemicu retak

Tidak seperti tegangan pada lubang biasa, solusi tegangan untuk bentuk elips tak terbatas dari skenario berbeda memiliki rasio aspek yang berbeda. Dan dalam batasnya, ini berlaku untuk elips pipih dalam membentuk celah.



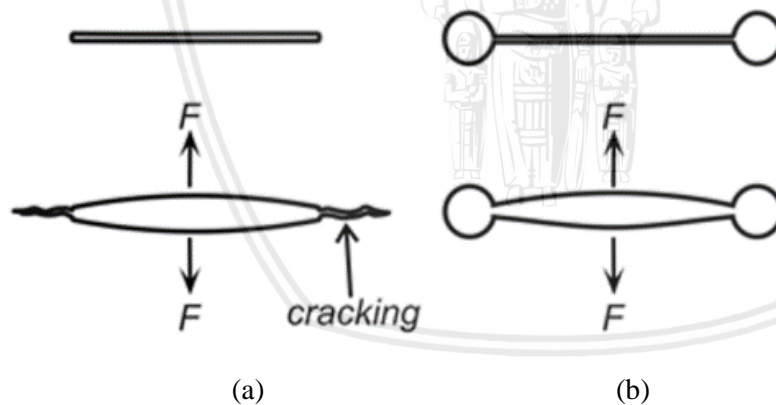
Gambar 2.13 Tegangan pada bentuk elips
Sumber: McGinty (2014)

Konsentrasi tegangan (sering disebut *stress raisers* atau *stress risers*) adalah lokasi pada objek yang memiliki tegangan tertinggi. Suatu objek atau baja dapat lebih kuat ketika tegangan didistribusikan secara merata di atas area objek tersebut, sebaliknya kekuatannya akan menurun jika tegangan terkonsentrasi pada satu titik. Pengurangan area objek misalnya

yang disebabkan oleh retakan, menghasilkan peningkatan tekanan yang terlokalisir. Berikut adalah penjelasan penyebab terjadinya konsentrasi tegangan:

1. Bentuk geometri menyebabkan suatu objek mengalami peningkatan intensitas medan tegangan. Contoh bentuk yang menyebabkan konsentrasi ini adalah retakan, sudut tajam, lubang, dan perubahan luas penampang objek. Tegangan lokal yang tinggi dapat menyebabkan objek gagal lebih cepat, sehingga seorang pekerja teknik harus bisa merancang geometri untuk meminimalkan konsentrasi tegangan.
2. Beban yang diterapkan, misalnya beban terpusat bukan beban merata.
3. Bentuk material yang mungkin terjadi saat proses manufaktur.

Metode *kontra-intuitif* dapat dilakukan untuk mengurangi salah satu jenis konsentrasi tegangan, seperti membuat lubang besar di ujung retakan. Lubang yang dibor, dengan diameter yang relatif besar, menyebabkan konsentrasi tegangan yang lebih kecil daripada ujung yang tajam seperti retakan. Hal ini harus dilakukan pada waktu yang tepat agar tegangan tinggi pada retak dapat diminimalisir. Metode lain yang digunakan untuk mengurangi konsentrasi tegangan adalah dengan menambahkan membuat fillet pada tepi yang tajam. Ini menghasilkan aliran arus stres yang lebih lancar (Wikipedia contributor 2019).



Gambar 2.14 a) Retak tidak terkendali, b) Retak tumpul
Sumber: Darvell (2018)

Gambar 2.14 di atas menjelaskan bahwa retak dapat terjadi secara tidak terkendali. Penting untuk secara sistematis memeriksa kemungkinan konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh retakan. Ketika nilai retakan kritis (2a) terlampaui, retakan akan berlanjut ke kegagalan katastrofik. Kegagalan ini terjadi karena retakan akan merambat dengan sendirinya sampai material putus. Fenomena ini akan berlangsung tanpa memerlukan energi tambahan.

2.5 Constant Load Test

Constant load test (CLT) merupakan jenis pengujian SCC untuk bentuk yang halus atau tanpa diberi perlakuan retak awal (*precrack*). Metode CLT atau pengujian dengan beban konstan tidak memerlukan perlengkapan rumit dan dapat diterapkan pada spesimen langsung tanpa harus memberikan perlakuan khusus terhadap spesimen yang akan diuji. Spesimen SCC dengan model tersebut memungkinkan untuk mengevaluasi umur SCC, yang meliputi nukleasi dan perambatan retak. Pemilihan metode pengujian SCC sangat tergantung pada aplikasi material tersebut tanpa mengesampingkan pertimbangan waktu yang diperlukan untuk melakukan pengujian. Ada beberapa jenis metode pengujian CLT, tergantung pada konfigurasi spesifik pengujian. Jenis-jenis yang dimaksud adalah *tensile type specimens* (Uji Tarik), *bent-beam*, *U-bend*, dan *C-ring*. Untuk tujuan spesifik seperti pengembangan paduan atau kemampuan material, maka perlu dilakukan evaluasi tegangan-korosi pada material atau sambungan yang dimaksud. Ada dua pendekatan yang mungkin yang dapat kombinasikan: uji dengan kondisi pembebanan atau menyerupai kondisi operasi, misalnya tekanan statis, dan pengujian di pada pembebanan dinamis biasanya diuji dengan metode *slow strain rate tensile* (SSRT) (Wolski et al. 2019).

Uji Tarik SCC merupakan pilihan yang tepat untuk tujuan seperti ini karena kekuatan tarik spesimen dapat diukur di lingkungan normal maupun kondisi SCC (Koch 2001). Pendekatan lain untuk penentuan K_{Isc} telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir menggunakan spesimen tarik (*circumferential-notched tensile-CNT*) berdiameter kecil, melingkar (Stark dan Ibrahim 1986). Spesimen CNT diklaim sebagai jenis spesimen terkecil yang dapat menghasilkan kondisi pemuatan retak regangan bidang yang valid dan dengan demikian memungkinkan pengujian komponen bagian tipis, serta pengujian dengan biaya yang lebih rendah karena persyaratan bahan yang lebih rendah untuk spesimen dan rig pengujian (Dietzel dan Srinivasan 2011).

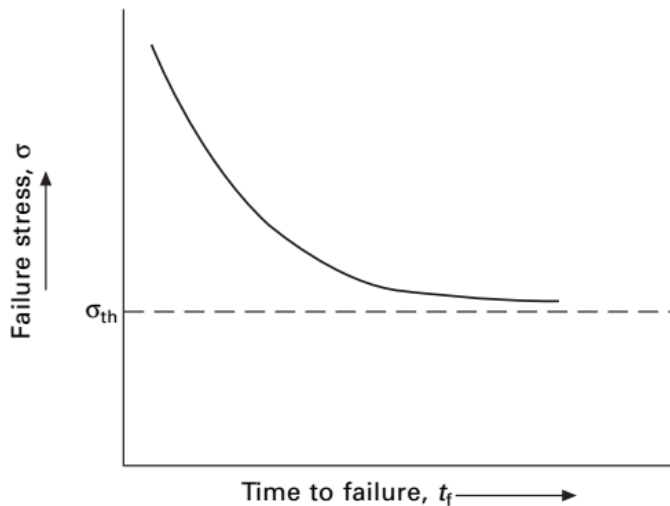
SCC Secara umum uji tarik didefinisikan sebagai pemberian beban atau tegangan tarik kepada material dengan tujuan mengetahui atau mendeteksi kekuatan daripada material tersebut. Prinsip dari pengujian ini, secara garis besar, dapat dijelaskan sebagai berikut; Spesimen yang telah dibentuk sedemikian rupa 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 (Trethwey dan Chamberlain 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 (Staeble 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 diagram ambang, sedangkan perubahan panjang retak dan perubahan geometri spesimen uji akan menginformasikan nilai ketegaran perpatahan, yang selanjutnya akan berperan sebagai fungsi faktor intensitas tegangan. Dengan pengaturan tegangan serta geometri spesimen yang ideal, nilai faktor intensitas, saat terjadi peretakan, yang semakin turun akan dimungkinkan, dimana hal ini akan memberikan estimasi K_{ISCC} yang sangat berguna dalam memahami perilaku spesimen ditinjau.

2.6 Tegangan Ambang (*Threshold Stress*)

Suatu material akan aman dengan syarat bahwa pengaplikasian tegangannya berada pada nilai dibawah tegangan luluhnya. Hal ini juga berlaku dalam kondisi SCC, namun dikarenakan nilai kekuatan material pada lingkungan SCC bersifat empiris maka nilai tersebut didefinisikan dengan bentuk lain, yakni tegangan ambang (*threshold stress*). Nilai tegangan ambang suatu material pada kondisi tertentu didapatkan dari pengujian secara langsung dengan pembebanan statis yang konstan, kemudian dilakukan pengambilan data berupa waktu patah. Nilai-nilai waktu patah pada setiap variasi pembebanan akan membentuk suatu diagram ambang (*threshold diagram*) yang disebut diagram tegangan ambang (*threshold stress diagram*).



Gambar 2.15 Diagram tegangan ambang (*threshold stress*)
Sumber: Dietzel dan Srinivasan (2011)

Besarnya nilai tegangan ambang ini ditentukan tidak hanya oleh unsur paduan suatu material logam, tetapi juga oleh lingkungan, kondisi metalurgi paduan tersebut, dan kesesuaian dengan tingkat tegangan terendah yang diperlukan untuk berinteraksi secara sinergis dengan lingkungan (Jones dan Ricker 1992). Gambar 2.15 menunjukkan diagram tegangan ambang yang akan memperlihatkan nilai tegangan suatu material pada lingkungan SCC. Nilai σ_{th} adalah nilai yang memiliki ketahanan hingga mendekati tidak akan mengalami patah atau kegagalan dalam jangka waktu yang sangat lama.

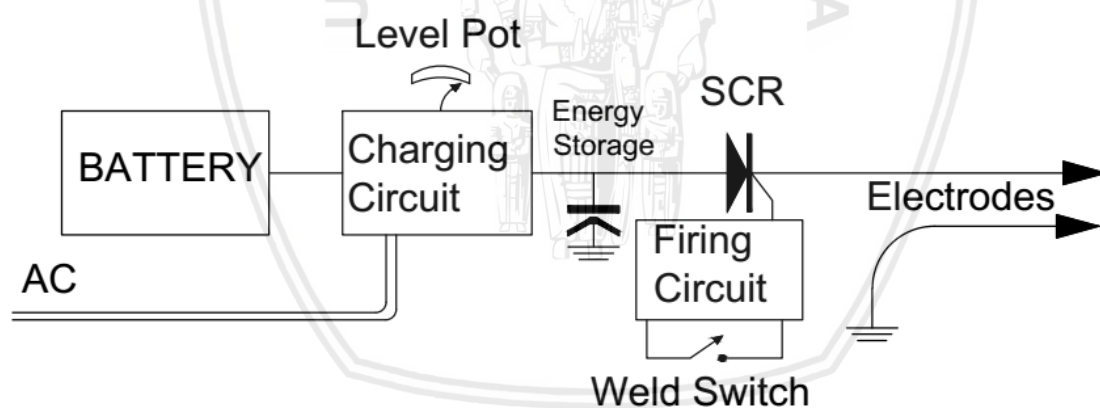
Selain daripada faktor-faktor yang telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya, seperti telah dijelaskan pada Poin 2.2, terdapat 3 elemen yang berperan dalam mempengaruhi fenomena SCC. Maka dapat disimpulkan bahwa suatu nilai tegangan ambang, dalam lingkungan SCC, akan terpengaruhi oleh ketiga elemen tersebut (Cottis 2000). Tingkat kekuatan material mempengaruhi nilai tegangan ambang SCC dalam bentuk tegangan yang mampu diterima oleh bahan tersebut, semakin besar kekuatan material maka nilai tegangan ambang dari material tersebut juga akan semakin besar. Sebaliknya, jika kekuatan material semakin kecil maka nilai tegangan ambang material tersebut juga akan semakin kecil. Selanjutnya, geometri atau bentuk material juga akan mempengaruhi besarnya tegangan ambang SCC. Sebagai contoh, material yang memiliki bentuk lancip, bentuk bersudut, atau bagian sambungan las akan memiliki konsentrasi tegangan yang besar, dimana hal tersebut akan menjadikan material tersebut memiliki nilai tegangan ambang yang kecil. Sedangkan material yang memiliki geometri atau bentuk material yang mengakibatkan konsentrasi tegangan berkurang, seperti bentuk bulatan atau *elips*, akan memiliki nilai tegangan ambang yang besar (Cottis 2000). Selain kedua hal tersebut, faktor lingkungan juga akan berpengaruh pada nilai tegangan ambang SCC. Nilai tegangan ambang suatu material pada

lingkungan dengan daya korosif tinggi, seperti pada larutan asam kuat atau basa kuat, akan bernilai lebih besar dibandingkan nilai tegangan ambang material tersebut pada lingkungan dengan daya korosif rendah, seperti pada udara pegunungan.

Keuntungan menggunakan parameter ambang seperti σ_{th} atau K_{ISCC} terletak pada kemampuan untuk memprediksi kombinasi tingkat stres, ukuran cacat, dan bentuk yang mengarah ke SCC. K_{ISCC} dapat digunakan sebagai kriteria dalam mendesain produk logam untuk memastikan tidak akan terjadi pertumbuhan SCC dalam penggunaannya (Dietzel dan Srinivasan 2011).

2.7 Hot Spot Capacitive Discharge Welder

Hot Spot Capacitive Discharge Welder atau *Capasitor Discharge Welding* disingkat (CDW) adalah mesin las yang didesain untuk penyambungan logam yang meliputi *insul pins, studs, thermocouple* dll. Mesin las CDW menghasilkan api elektrik untuk meleburkan atau menggabungkan dua buah logam yang sama maupun yang berbeda material dan menyambungkan ke berbagai logam lainnya. Kemampuan ini dikendalikan oleh interaksi berbagai fungsi circuit yang dijelaskan dalam diagram berikut :



Gambar 2.16 Skema fungsi sirkuit.
Sumber: DCC Corporation (2013)

System tenaga yang digunakan langsung dari arus AC melalui *stepdown transformer* atau dirubah menjadi arus DC yang disimpan dalam bentuk baterai seperti ditunjukkan oleh gambar 2.16. Penyimpanan baterai terisi secara otomatis ketika unit tersambung ke sumber AC. Ketika mesin las dinyalakan, *capasitor charging circuit* menyimpan energy yang besar yang kemudian dikontrol oleh operator melalui swich pada mesin.

Energi yang disimpan sebanding dengan kuadrat tegangan kapasitor. Meningkatkan pengaturan tombol kontrol akan menyebabkan kapasitor dibebankan ke level yang lebih tinggi. Namun, mengurangi pengaturan tidak akan langsung mengurangi nilai yang sudah

disimpan, sehingga siklus pengelasan akan selalu melepaskan pulsa energi yang sama dengan pengaturan daya tertinggi sejak pelepasan terakhir. Pemutus sirkuit yang dapat disetel ulang pada saluran AC primer dapat diakses pada panel belakang unit dan melindungi terhadap kerusakan dari hubungan pendek sirkuit dan kondisi gangguan serupa. *Capacitor Discharge (CD Welding)* memiliki karakteristik yang dapat digunakan pada kehidupan sehari-hari, karena beroperasi dari sumber tegangan 220V seperti pada tegangan rumahan. CD Welding termasuk dalam mesin las yang bekerja secara cepat dan digunakan pada thermocouple, stud welding, pengelasan plat tipis, yang Portabel, memiliki equipmen yang banyak dipasarkan, mudah dioperasikan, beroperasi pada temperature rendah dan pengelasan dapat dilakukan berulang ulang dan dapat menyambungkan dengan sangat baik dan pola penyambungan yang bervariasi. Kelebihan lain yang dimiliki adalah mempunyai *heat effect zone* yang rendah, zona pengelasan tipis, pemantauan kualitas secara langsung, waktu pengelasan yang singkat, dan laju pendinginan yang tinggi yang memungkinkan penyatuan logam yang berbeda (Patnaik 1996).

Energi yang dilepaskan dapat dihitung (Harada, Sada, dan Kumai 2016) dengan rumus:

$$W = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \dots\dots\dots (2-6)$$

Dimana

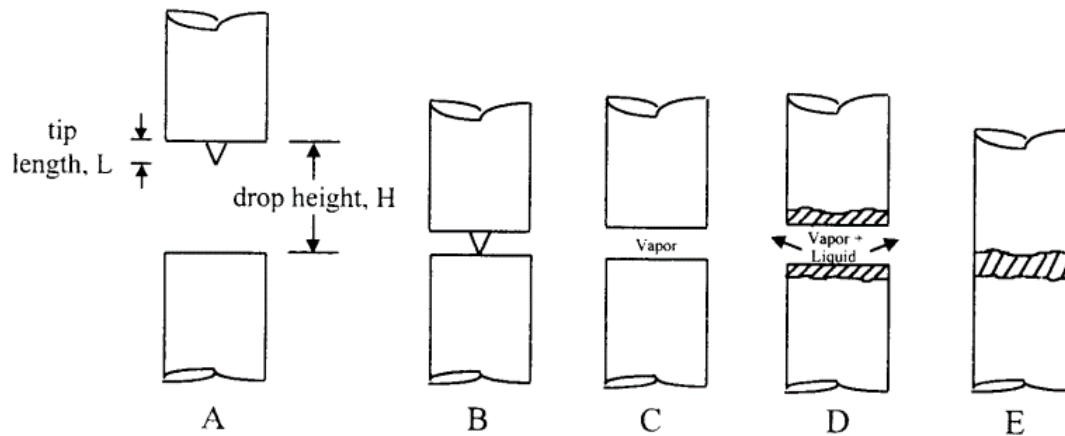
W : energi yang dilepaskan (J)

C : kapasitas energi pada capasitor (F)

V : sumber pengisian daya (V)

Berikut hasil penelitian yang mengamati tentang proses pengelasan CDW (Wilson, Woodyard, dan Devletian 1993):

1. Pada saat pengelasan berlangsung, *Spatter* tidak disebabkan oleh ekstrusi pada kontak antar elektroda, tetapi karena ledakan oleh pancaran plasma selama pencetusan api berlangsung.
2. Rasio pemanasan anoda/katoda tidak merata disebabkan oleh perpindahan panas dari anoda kepartikel logam oleh disemprotkan oleh pancaran plasma.
3. Penyebaran busur pada pengapian cukup cepat mendefinisikan proses CDW pada dasarnya satu dimensi.



Gambar 2.17 Skema proses CDW
Sumber: Patnaik (1996)

2.8 Parameter Pengelasan

Parameter yang harus diperhatikan pada setiap mesin las adalah energi yang digunakan, seperti pada mesin las CDW ini terdapat kontrol energi yang dilepaskan oleh kapasitor. Dimana energi yang digunakan akan menentukan besar diameter benda kerja yang dilas, namun bisa juga di asumsikan bahwa semakin tinggi energi yang digunakan dalam pengelasan akan membuat material yang dilas semakin melebur. Proses pengelasan CDW berlangsung 1 sampai dengan 3ms, hal ini membuat proses pengelasan efektif untuk produksi massal (Patnaik 1996). Proses *charging* atau waktu tunggu sampai mesin siap digunakan kembali jika penyimpanan penuh energi dapat berlangsung hanya sekitar 10 detik. Penyimpanan energi las dapat menyimpan energi 5 sampai 525Watt Second. Dengan energi sebanyak itu maka pengelasan dapat dilakukan pada berbagai bentuk peruntukan. Peruntukan yang dimaksud adalah *stud welding* sampai $\phi 2.6\text{mm}$, *pins welding* sampai $\phi 2.6\text{mm}$, *wire pairs* sampai $\phi 2.3\text{mm}$ dan *lighter studs* sampai $\phi 3.2\text{mm}$. Power maksimum yang dapat dikeluarkan oleh mesin ini adalah 500J.

2.9 Baja Karbon

Besi (Fe) tidak digunakan dalam keadaan murni tetapi sebagai paduan terutama dengan karbon (C). perpaduan baja dan karbon dikenal sebagai baja dan besi tuang tergantung kadar karbonnya. Baja adalah paduan besi yang mengandung karbon mulai dari berat antara 0.02% sampai 2.11% (sebagian besar baja berkisar antara 0.05% dan 1.1% C). Paduan yang dimaksud disini termasuk bahan campuran lainnya, seperti mangan (Mg), silika (Si), kromium (Cr), nikel (Ni), dan/atau molibdenum (Mo). Dari semua unsur paduan tersebut, karbonlah yang mengubah besi menjadi baja. Ada berbagai macam komposisi baja yang

tersedia secara komersial. Baja dapat dikelompokkan kedalam beberapa kategori seperti baja karbon biasa, baja paduan rendah, baja tahan karat, baja perkakas, dan baja khusus (Groover 2010).

Groover mengklasifikasikan baja karbon ke dalam tiga kelompok sesuai dengan kandungan karbonnya:

1. Baja karbon rendah mengandung kurang dari 0,20% C dan sejauh ini merupakan baja yang paling banyak digunakan. Aplikasi yang umum adalah bagian lembaran-logam mobil, baja pelat untuk fabrikasi, dan rel kereta api. Baja ini relatif mudah dibentuk, sehingga sangat populer dimana kekuatan tinggi tidak diperlukan.
2. Kisaran baja karbon sedang antara 0.20% dan 0.50% dan ditentukan untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan lebih tinggi dari baja karbon rendah. Contoh pengaplikasiannya pada komponen mesin dan bagian-bagian mesin seperti poros engkol dan batang penghubung.
3. Baja karbon tinggi mengandung karbon dalam jumlah lebih besar dari 0.50%. Kandungan tersebut ditentukan untuk aplikasi kekuatan yang lebih tinggi dan di mana kekakuan dan kekerasan diperlukan. Pegas, alat pemotong dan bilah, dan suku cadang yang tahan aus.

Ashby mengelompokkan baja karbon seperti Tabel 2.2.

Tabel 2.2
Klasifikasi Besi-Baja

Logam	Komposisi wt%	Penggunaan
Baja karbon rendah	Fe + 0.04 sd 0.3 C (+ ~0.8 Mn)	Penggunaan pada tegangan rendah. Umum Baja konstruksi, cocok untuk pengelasan
Baja karbon sedang	Fe + 0.3 sd 0.7 C (+ ~0.8 Mn)	Penggunaan pada tegangan sedang: permesinan Komponen, baut, mur, shaft, dan gear
Baja karbon tinggi	Fe + 0.7 sd 1.7 C (+ ~0.8 Mn)	Penggunaan pada tegangan tinggi: Pegas, cutting tool, dies
Paduan rendah	Fe + 0.2 C + 0.8 Mn 1 Cr 2Ni	Penggunaan pada tegangan tinggi: Kapal selam, komponen pesawat
Paduan tinggi (stainless steel)	Fe + 0.1 C + 0.5 Mn 18 Cr 8 Ni	Temperatur tinggi atau tahan karat: Kimia atau tenaga uap
Besi tuang	Fe + 1.8 C sd 4 C (+ ~0.8 Mn 2 Si)	Penggunaan pada tegangan rendah: Cylinder blocks, drain pipes

Sumber: Ashby dan Jones (2006)

Secara garis besar sistem paduan besi-karbon dapat dibedakan menjadi dua yaitu baja dan besi tuang (*cast iron*). Baja dan besi tuang tidak hanya berbeda kadar karbonnya tetapi juga berbeda struktur mikro dan tentu juga beberapa sifatnya (Suherman 1987). Dalam besi cair karbon dapat larut, tetapi dalam keadaan padat kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Kemampuan melarutkan karbon akan berubah dengan berubahnya temperatur. Keadaan ini merupakan hal penting, pada besi/baja, terutama dalam hal proses laku

panasnya. Diagram keseimbangan sistem paduan besi – karbon cukup kompleks, tetapi hanya sebagian saja yang penting bagi dunia teknik, yaitu bagian antara besi murni sampai senyawa interstisialnya, karbida besi Fe_3C , yang mengandung 6,67% C dan diagram fase yang banyak digunakan adalah *diagram fase besi – karbida besi*, seringkali disebut diagram fase Fe – Fe_3C .

2.10 Kuningan

Kuningan adalah material non ferrous yang terdiri dari unsur utama Tembaga (Cu) dan Seng (Zn). Tembaga murni jarang dipergunakan kecuali untuk keperluan alat-alat listrik atau *heat exchanger* (penukar panas). Ini disebabkan antara lain karena harganya yang cukup mahal dan kekuatannya tidak begitu tinggi. Walaupun jumlah produksi logam non ferrous tidak sebanyak baja dan seringkali harganya juga lebih mahal tetapi ia memberikan suatu sifat atau kombinasi sifat-sifat yang tidak dimiliki oleh logam ferrous. Tembaga biasanya digunakan dalam bentuk paduan. Oleh karena itu tembaga berwarna kemerahan dengan berat jenis 8,65 (sedikit lebih tinggi daripada baja yang sekitar 7,8). Titik leburnya $1083^{\circ}C$. Orang sering memilih tembaga karena sifat penghantaran listrik dan panas yang tinggi, keuletan yang tinggi (mudah dibentuk) atau karena sifat tahan korosinya yang sangat baik. Paduan tembaga (cooper base alloy) pada umumnya juga memiliki ketiga sifat di atas walaupun dengan tingkat yang berbeda. Sifat penghantaran listrik/panas dan sifat tahan korosi agak menurun dengan pepaduan, demikian juga dengan keuletan. Tetapi sifat yang lain seringkali menjadi lebih baik.

Paduan tembaga dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok utama yaitu:

1. *Kuningan (brass)*, paduan tembaga dengan unsur paduan utama seng
 - a. Alpha brass, dengan kandungan seng tidak lebih dari 36%
 - b. Alpha + beta brass, dengan kandungan seng lebih dari 36%.
2. *Perunggu (bronze)*, paduan tembaga dengan unsur paduan utama selain seng
 - a. Tin bronze, dengan unsur paduan utama limbah putih
 - b. Silicon bronze, dengan unsur paduan utama silikon
 - c. Aluminium bronze, dengan unsur paduan utama aluminium
 - d. Beryllium bronze, dengan unsur paduan utama beryllium.

Paduan tembaga dengan seng sebagai unsur paduan utamanya disebut sebagai kuningan (CuZn). Kuningan lebih kuat dari tembaga, jauh lebih mudah untuk dikerjakan, dan cukup tahan terhadap korosi. Contoh yang baik dari penggunaannya dalam mesin adalah untuk katup uap dan alat kelengkapan ketel lainnya (Ashby dan Jones 2006). Larutan pada Alpha

(α , FCC) dapat melarutkan seng hampir 39% pada temperatur 450°C dan sedikit menurun pada temperatur yang lebih rendah. Pada larutan padat α , dengan kenaikan kadar seng kekuatan akan naik juga keuletannya. Larutan padat α ini mencapai kombinasi kekuatan keuletan paling baik pada komposisi 70Cu-30Zn. Dengan kadar seng, lebih tinggi (>38%) akan tampak adanya struktur baru yaitu fase β yang mengalami ordering menjadi β^1 . Fase β^1 ini lebih keras dan getas, sehingga sulit dideformasi dingin. Menurut strukturnya kuningan dapat dikelompokkan menjadi alpha brass dan alpha+beta brass.

Alpha brass, kuningan dengan fase tunggal larutan padat α dengan kadar Zn maksimum 36%. Dikenal memiliki sifat tahan korosi yang cukup baik dan mudah dideformasi dingin (*cold worked*). Warnanya bervariasi mulai dari kemerahan (pada kadar Zn rendah) sampai kekuningan (pada kadar Zn yang lebih tinggi) karena itu alpha brass dapat dibagi menjadi yellow α brass dan red brass.

Yellow alpha brass mengandung 20-36%Zn, memiliki kombinasi kekuatan dan keuletan yang bagus. Sangat baik untuk barang-barang yang harus mengalami tingkat cold-work yang tinggi pada saat pembuatannya. Sifat tahan korosinya agak kurang baik bila dibandingkan dengan red brass yang mengandung lebih sedikit seng. Yellow α brass cenderung akan mengalami *season cracking* (stress corrosion cracking) yaitu retak yang terjadi akibat korosi yang terjadi karena adanya tegangan sisa (residual stress). Tegangan sisa ini terjadi setelah mengalami deformasi dingin pada proses pengerjaan. Karena itu untuk mencegah timbulnya season cracking, setelah dideformasi dingin harus diikuti dengan dipanaskan kembali sekitar 260°C untuk menghilangkan tegangan sisa (stress relief annealing). Selain itu yellow α brass juga mempunyai kecenderungan mengalami sejenis korosi yang dinamakan *dezincification* yaitu hilangnya sebagian seng yang tadinya berada dalam larutan padat α , larut ke dalam air/air laut. Dezincification mengakibatkan kuningan ini menjadi porous dan lama-kelamaan akan bocor/pecah. Dengan penambahan sedikit timah putih atau antimon pada kuningan ini akan menghilangkan/mengurangi kemungkinan dezincification. yang paling banyak dipakai dari yellow α brass adalah *Cartridge brass* dan *yellow brass*, masing-masing mengandung 30 dan 35% seng. Keduanya memiliki keuletan yang sangat tinggi, cocok untuk dikerjakan dengan tingkat deformasi dingin yang tinggi. Banyak digunakan untuk tanki kendaraan, tabung flashlight, fitting lampu, peluru/amunisi, dsb. Penambahan sedikit Pb akan menaikkan machinability dari kuningan ini. dengan penambahan sedikit Sn diperoleh *Admiralty metal* (71Cu-28Zn-1Sn) yang mempunyai kekuatan dan sifat tahan korosi yang lebih baik banyak digunakan untuk pipa condenser dan heat exchanger pada ketel uap. Sifat

tahan korosi yang lebih baik lagi akan diperoleh dengan penambahan aluminium, *aluminium brass* (76Cu-22Zn-2Al).

Red brass mengandung seng lebih sedikit (5 – 20%), keuletan cukup tinggi sifat tahan korosinya lebih baik, tidak ada kecenderungan terjadinya season cracking dan dezincification. Hanya saja agak sulit dimachining dan harganya lebih mahal dari alpha brass.

Gilding metal (5% Zn) dapat digunakan untuk coin, medalion, emblem, plaket, dll. Terutama yang akan dipoles halus dan dilapisi emas. *Commercial bronze* (10%Zn) berwarna mirip perunggu, mudah dicold-work maupun dihot-work, digunakan untuk sekrup, keling, benda lempaan, dll. *Red Brass* (15% Zn) mempunyai sifat tahan korosi yang terbaik di antara semua kuningan dan sangat baik untuk alat-alat yang berhubungan dengan air sadah karenanya banyak dipakai untuk pipa-pipa radiator, kondensor, dll.

Low brass (20%Zn) banyak digunakan untuk benda-benda hiasan, alat musik, pipa fleksibel dan berbagai benda yang dibuat dengan deep drawing.

Alpha plus beta brass mengandung 38-46% Zn, terdiri dari dua fase α dan β . B ini lebih keras dan getas sehingga kuningan ini sulit dicoldwork, tetapi pada temperatur yang agak tinggi β^1 berubah menjadi β yang sangat plastik sehingga mudah dihotwork, terutama bila dipanaskan mencapai daerah fase tunggal β . Yang banyak digunakan adalah *Munts metal* (60Cu-40Zn) yang mempunyai kekuatan tinggi dan sangat baik untuk dihotwork. Bila didinginkan cepat dari daerah β maka α tidak sempat terbentuk, sehingga struktur pada temperatur kamar tetap β . Dengan pemanasan kembali pada temperatur yang lebih rendah akan ada sedikit α yang keluar. Dengan demikian dimungkinkan untuk melakukan heat treatment terhadap kuningan ini. Kuningan ini banyak digunakan untuk condensor head and tube, valve dll. Sifat machinabilitynya dapat dioerbaiki dengan menambahkan sedikit timah hitam. *Free cutting brass* (61,5Cu-35,5Zn-3Pb) mempunyai sifat machinability yang paling baik.

Penambahan timah putih akan menaikkan sifat tahan korosi terhadap air laut, *Naval brass* (60Cu-39,25Zn-0,75Sn) banyak digunakan untuk pelat kondensor, poros propeller, batang katup, dll. Penambahan sedikit timah hitam juga akan memperbaiki machinability. *Manganese brass* (58,5Cu-39Zn-1,4Fe-1Sn-0,1Mn) memiliki kekuatan yang tinggi dikombinasikan dengan sifat tahan aus yang sangat baik, banyak digunakan untuk pelat kopleng, poros, batang katup, pompa, kawat las dll (Suherman 1987).

Tabel 2.3

Formula umum kuningan.

Formula	Nama
85Cu:15Zn	Red brass
67-72Cu:28-32Zn:xPb:Xfe	Cartridge atau spring brass
67Cu:33Zn	Yellow brass ordinary
61Cu:39Zn	Wire Brass

Sumber: Walker dan Tarn (1991)



BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode eksperimental dan berskala laboratorium. Spesimen yang diteliti adalah hasil sambungan las *dissimilar* antara baja dan kuningan yang memiliki diameter 1.6mm dengan panjang 40mm. Proses pengelasan *dissimilar* berlangsung menggunakan mesin CDW dengan berbagai parameter tertentu. Selanjutnya hasil sambungan tersebut diuji menggunakan mesin uji SCC dengan metode CLT untuk mendapatkan data pengujian yang pada akhirnya akan dibandingkan dan dianalisis hubungannya dengan teori-teori yang ada.

3.2 Kerangka Konsep Penelitian

Setiap sambungan las kemungkinan besar memiliki void (*crack initiation*) karena sambungan las dikerjakan dalam suhu yang melebihi titik lebur material dasar sambungan tersebut dan menyebabkan struktur butiran pada material dasar dan daerah las (*haz*) tidak sama bentuknya sehingga akan rentan terjadi void. Jika void pada sambungan las tersebut dibiarkan begitu saja maka akan menjadi pemicu terjadinya retak (*crack initiation*).

Salah satu dari tiga faktor penyebab SCC sudah terindikasi yaitu kerentanan material atau adanya (*crack initiation*) pada permukaan hasil sambungan las. Selanjutnya peneliti berpikir untuk melengkapi faktor terjadinya SCC, yaitu menambahkan tegangan pada sambungan dan menempatkan sambungan tersebut pada lingkungan korosi untuk mengetahui sampai dimana ketahanan sambungan CDW terhadap SCC. Hal ini merujuk pada uji SCC dengan metode CLT dimana material diuji tanpa diberi retak awal (*precrack*) kemudian diberi tegangan dan perlakuan korosif.

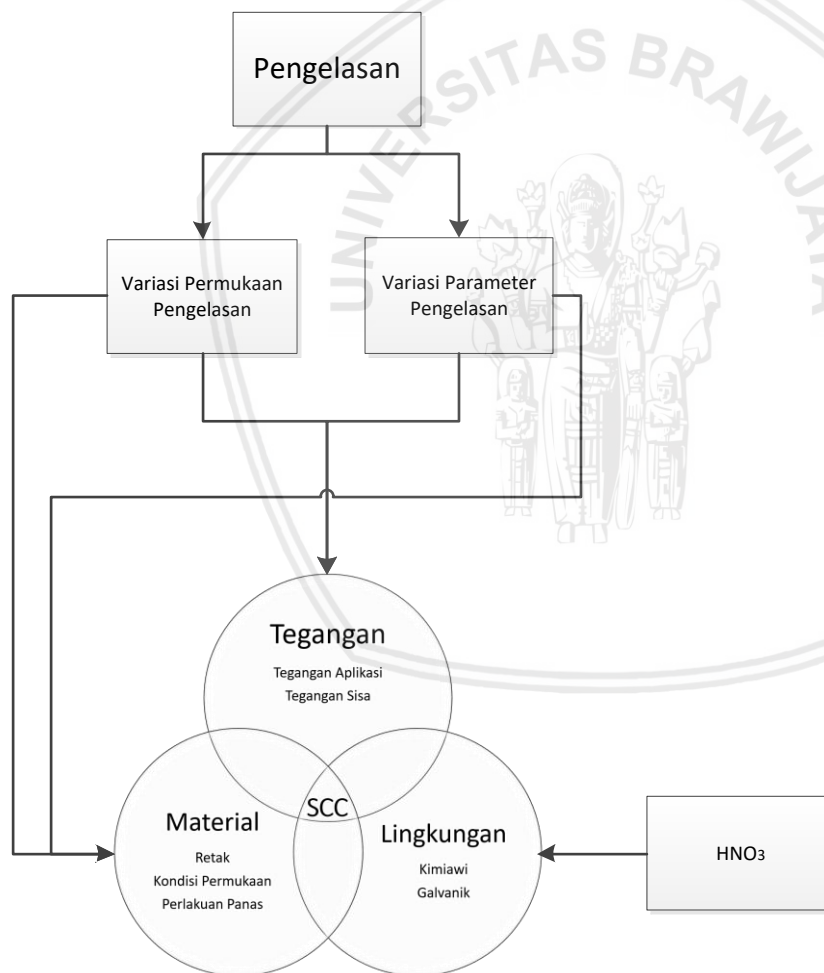
Bentuk tip pada permukaan CDW khususnya untuk stud welding dan pins welding belum memiliki standar yang paten dari produsen elektroda maupun produsen CDW. Oleh karena itu peneliti memvariasikan perlakuan permukaan (*surface preparation*) guna mendapatkan hasil penelitian yang maksimal. Perlakuan tersebut diterapkan pada material agar peneliti dapat dibandingkan perlakuan mana yang memiliki void paling sedikit atau dengan kata lain perlakuan mana yang tahan terhadap SCC.

3.3 Hipotesis

Jika baja dan kuningan dapat melebur secara seimbang maka akan diperoleh hasil las yang lebih tahan terhadap lingkungan SCC. Diperkirakan bentuk permukaan α_1 akan lebih baik dibandingkan berbentuk permukaan α_0 dan α_2 . Hal ini disebabkan karena bentuk α_1 melebur dengan baik diantara kedua material. Selanjutnya mengenai parameter pengelasan yang digunakan, pada dasarnya semakin tinggi energi yang digunakan saat proses pengelasan berlangsung, maka akan semakin tinggi pula ketahanan spesimen terhadap SCC karena panas dan yang dihasilkan pada sambungan semakin meningkat.

3.4 Skema Kerangka Konsep

Berikut adalah skema kerangka konsep penelitian yang akan dilakukan :



Gambar 3.18 Skema kerangka konsep penelitian

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental yang berskala laboratorium. Percobaan dilakukan dengan cara menguji spesimen menggunakan mesin uji SCC untuk memperoleh waktu putus spesimen kemudian data tersebut diolah dan disajikan dalam bentuk grafik. Metode pengujian yang dimaksud adalah CLT.

4.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fenomena Dasar Jurusan Teknik Mesin, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur, Indonesia dan dilaksanakan mulai bulan Agustus sampai dengan November 2019.

4.3 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini terdapat tiga macam variabel, dimana variabel tersebut digunakan untuk mempermudah proses pengambilan data. Adapun variabel yang digunakan adalah variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol.

4.3.1 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol merupakan variabel yang besarnya telah ditetapkan sebelum penelitian berlangsung serta bersifat teratur selama penelitian berlangsung. Dalam penelitian ini variabel terkontrol dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Spesimen hasil las baja dan kuningan
2. Kuat tekan las yang diterapkan sebesar 39,2N
3. Temperatur Lingkungan saat pengambilan data adalah 25°C/suhu kamar
4. Tekanan Lingkungan saat pengambilan data dilakukan pada tekanan atmosfer (760mmHg)
5. Konsentrasi larutan Asam Nitrat (HNO_3) adalah 1M
6. Massa pemberat mesin uji SCC adalah 16kg.

4.3.2 Variabel Bebas

Variabel yang besarnya ditentukan sebelumnya disebut variabel bebas, yang tidak tergantung pada variabel lain dan suatu bentuk variasi dalam sebuah penelitian. Sedangkan variabel bebas yaitu perlakuan pada permukaan raw material dan energi pada proses pengelasan. Variasi benda kerja terdiri dari; permukaan tanpa perlakuan atau kedua material berbentuk pejal (α_0), berikutnya adalah permukaan baja dibuat lancip 37° dan kuningan tanpa perlakuan (α_1), kemudian yang terakhir adalah permukaan baja tanpa perlakuan dan yang dibuat lancip 37° adalah kuningan (α_2). Sedangkan untuk variasi energi yang digunakan adalah 80J, 90J, 100J, 110J dan 120J.

4.3.3 Variabel Terikat

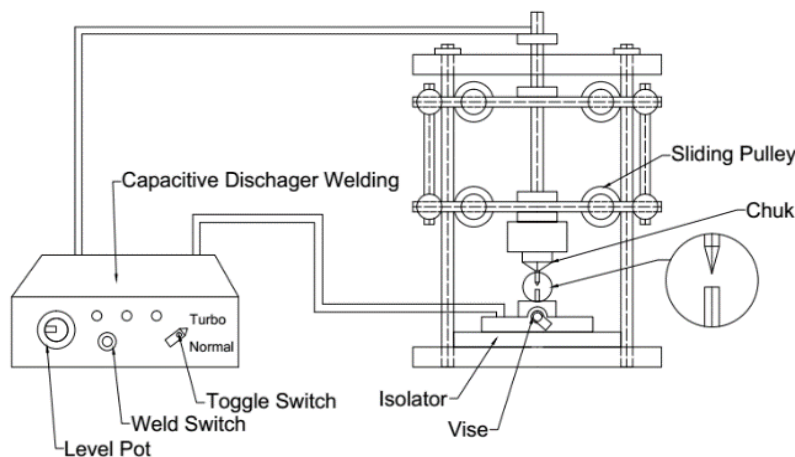
Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas, dimana hasilnya dapat diketahui setelah penelitian berlangsung. Variabel terikat merupakan besaran yang akan menjadi tolak ukur atau data acuan dan dasar dari pembahasan sebuah penelitian. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah waktu patah pada setiap variasi spesimen uji. Setelah diperoleh data pengujian maka akan didapatkan diagram tegangan ambang.

4.4 Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian

Adapun rincian alat dan bahan yang digunakan selama proses penelitian berlangsung dapat diuraikan sebagai berikut.

4.4.1 Alat

1. Capacitive Discharge Welder



Gambar 4.19 Skema proses CDW

Mesin las CDW digunakan untuk menyambungkan spesimen. Pada unit mesin terdapat sakelar rentang daya dan kontrol tingkat energi yang mengatur voltase untuk mengisi kapasitor penyimpanan energi. Tegangan puncak pada kisaran daya rendah adalah sekitar 35VDC (normal) dan pada kisaran daya tinggi adalah 75VDC (turbo).

Berikut spesifikasi dari mesin las yang digunakan:

- a. Ukuran
 - Panjang : 292.1 cm
 - Lebar : 215.9 cm
 - Tinggi : 88.9 cm
- b. Berat : 6.36 kg
- c. Energi las yang tersimpan : 5-250 Watt seconds
- d. Kemampuan Las
 - Weld wire pair (finer)* : 1.62mm
 - Lighter studs* : 3.26mm
- e. Waktu siklus : Waktu pengisian daya pada pengaturan energi maksimum kurang dari 10 detik.
- f. Kontrol yang disediakan: Kontrol penyesuaian energi, sakelar energi ganda dan tampilan led untuk mengindikasikan pengisian.
- g. Sumber daya listrik: 220VAC 50HZ, *Protected 1.5Amp line breaker*.

2. Alat bantu las (penepat)

Digunakan untuk mengukur parameter kuat tekan las dan sebagai penepat pada proses pengelasan agar diperoleh sambungan las yang memiliki sumbu yang sama.

3. Alat Uji Stress Corrosion Cracking (SCC)

Alat uji SCC digunakan sebagai sumber efek lingkungan SCC terhadap spesimen uji.

Berikut merupakan spesifikasi dari alat uji SCC yang digunakan:

- a. Panjang : 41.5 cm
- b. Lebar : 41.5 cm
- c. Tinggi : 70 cm
- d. Berat : 102 kg

4. Gelas ukur dan pipet

Digunakan untuk mengukur volume larutan korosi yang akan digunakan pada pengujian

5. Jam

Digunakan untuk menghitung waktu patah spesimen pada saat pengujian kita dapat mengetahui laju korosi

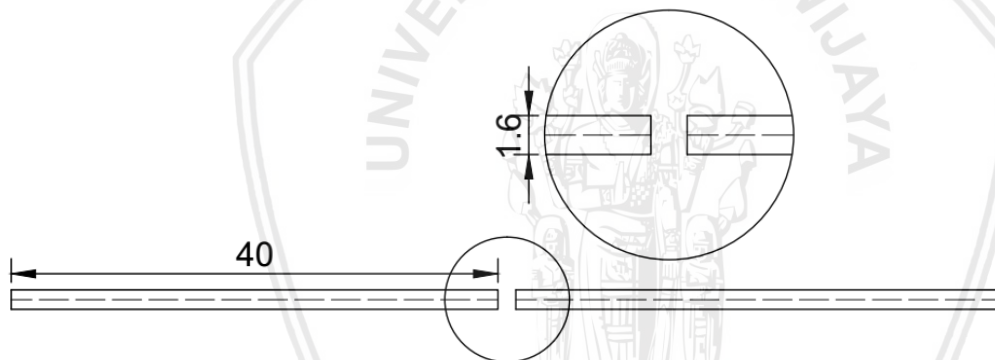
6. Vernier Caliper

Digunakan untuk menghitung geometri akhir spesimen.

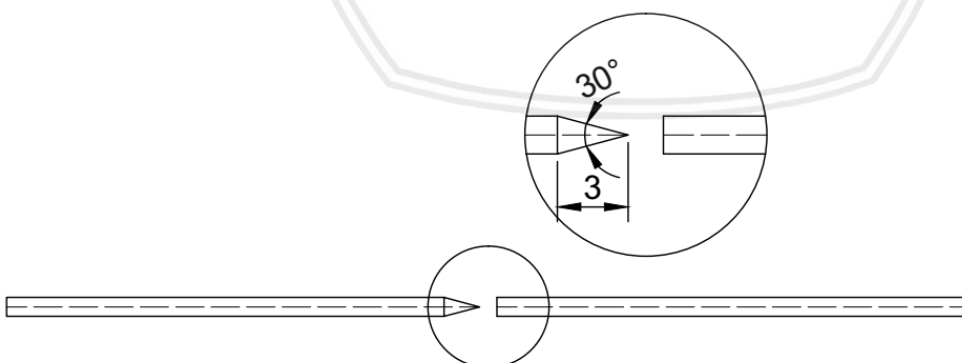
4.4.2 Bahan

4.4.2.1 Spesimen Uji Baja dan Kuningan

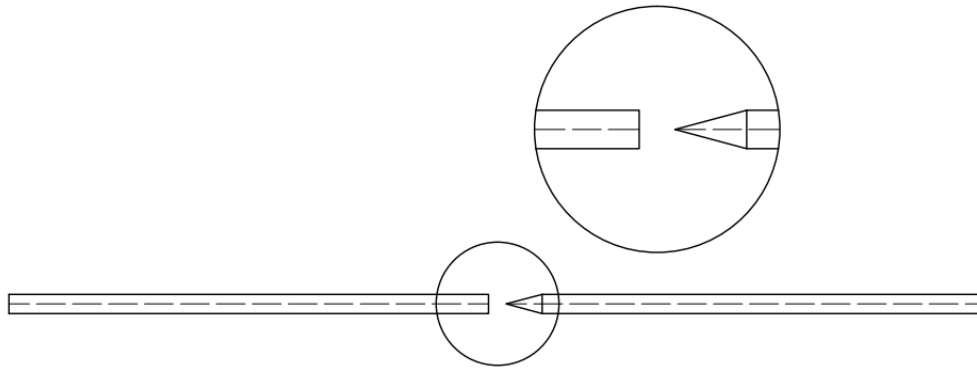
Raw material yang digunakan adalah tembaga dan kuningan dimana *raw material* tersebut disambung menggunakan mesin las CDW. Hasil sambungan las inilah yang digunakan sebagai spesimen pengujian selama proses penelitian ini. Spesimen tersebut Akan dibedakan kedalam tiga bentuk yaitu spesimen yaitu; Spesimen α_0 , α_1 dan α_2 . Berikut adalah dimensi dari spesimen yang dimaksud sebelum dilakukan pengelasan:



Gambar 4.20 Spesimen α_0 , baja (kiri) dan kuningan (kanan)



Gambar 4.21 Spesimen α_1 , baja (kiri) dan kuningan (kanan)



Gambar 4.22 Spesimen $\alpha 1$, baja (kiri) dan kuningan (kanan)

Tabel 4.4
Komposisi Material

Material	Komposisi Kimia Weight %						
	Fe	C	Si	Mn	Cu	Zn	Sn
Baja Karbon	Balance	0,1	1	1,40	-	-	-
Kuningan	-	-	0.3	-	Balance	5.9	0.8

Tabel 4.5
Sifat Mekanik Material

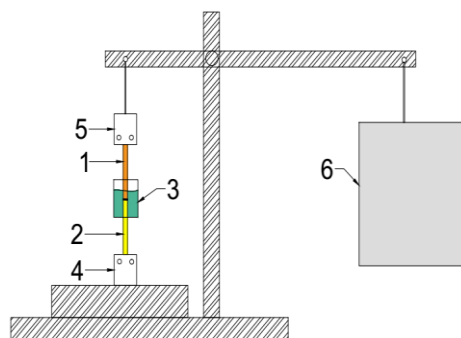
Material	Sifat Mekanik			
	Melting Point °C	UTS N/mm ²	Hardness BHN	Density(g/cm ³)
Baja Karbon	1450	1036	120	-
Kuningan	899	888	-	8.4

4.4.2.2 Larutan Korosif: HNO₃ 1M

Asam nitrat atau HNO₃ yang berkonsentrasi 1M digunakan sebagai larutan yang bersifat korosif pada spesimen.

4.5 Instalasi Alat Uji SCC

Berikut digambarkan instalasi CLT yang merupakan alat untuk melakukan pengujian utama dari penelitian ini. Rujukan untuk uji tarik SCC ini adalah standar ASTM-G49-85 (American Society for Testing Materials 2000).



Gambar 4.23 Instalasi alat uji SCC

Keterangan:

1. Spesimen Uji (Baja)
2. Spesimen Uji (Kuningan)
3. Larutan Korosif
4. Penjepit bagian bawah
5. Penjepit bagian atas
6. Beban

Alat uji SCC diatas adalah alat uji yang dibuat sendiri di lingkungan Universitas Brawijaya. Meskipun demikian, alat uji dibuat sedemikian rupa dengan alat uji SCC menurut ASTM G45-85 yang menyatakan bahwa spesimen diberi tegangan secara aksial dan merupakan salah satu metode yang paling serbaguna dalam melakukan uji tegangan-korosi karena fleksibilitas yang diizinkan dalam pemilihan jenis dan ukuran spesimen uji dan kisaran tingkat tegangan. Spesimen diberi beban (tegangan) konstan sampai spesimen tidak mengalami patah atau patah dalam waktu yang lama. *Time to failure* pada pengujian ini merupakan data utama.

4.6 Skema Penelitian

Kegiatan-kegiatan yang terdapat di dalam penelitian ini digambarkan dalam skema penelitian, tentunya dimulai dari studi literatur sampai pada penyusunan laporan penelitian. Uraian kegiatan tersebut dijabarkan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Hampir setiap penelitian dimulai dari studi literatur dimana peneliti mencari referensi untuk memperdalam pengetahuan tentang penelitian yang akan dilakukan. Literatur tentang fenomena SCC membawa peneliti untuk mengumpulkan literatur mengenai *hot-spot welding* secara khusus mesin las jenis *Capacitor Discharge Welding* (CDW) namun ada juga yang menyebut dengan istilah *Capacitive Discharge Welder* (CDW). Selanjutnya penulis digiring untuk mengetahui tentang mekanika per patahan, korosi dan ambang batas suatu material. Baja karbon dan kuningan dipilih sebagai bahan utama dalam penelitian ini. Banyaknya penggunaan material tersebut pada kehidupan sehari-hari dan sesuai dengan referensi yang penulis sendiri kumpulkan. Raw material kemudian disambung menggunakan metode pengelasan hot-spot CDW untuk kemudian dilakukan pengujian SCC pada daerah sambungan las dissimilar.

Dalam melakukan studi literatur, tentu saja penulis tidak terlepas dari jurnal-jurnal yang membahas tentang topik yang sama, bahkan terdapat beberapa “*textbooks*” dan “*manual book*” yang menjadi referensi dalam merampungkan penelitian ini. Selain melakukan pencarian referensi dari berbagai sumber, peneliti juga melakukan konsultasi kepada dosen-dosen pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya dan melakukan bimbingan guna memperkaya kemampuan peneliti.

2. Perancangan Skema Penelitian dan Parameter Pengelasan

Dalam proses studi literature, konsultasi dan bimbingan, parameter uji kemudian ditentukan. Terdapat lima parameter pada proses pengelasan, parameter-parameter yang dimaksud mencakup lima arus yang digunakan pada proses penyambungan dua material yang ingin diteliti. Parameter yang pertama dan kedua diatas ditentukan berdasarkan *manual book*, mesin las dan dari berbagai sumber yang telah ditelaah sebelumnya. Berikut adalah parameter-parameter yang ditentukan berdasarkan referensi yang ada.

Parameter mesin las jenis *Hotspot Capacitive Discharge Welder* (CDW) yang digunakan dalam proses pengelasan specimen.

Tabel 4.6

Parameter Pengelasan Hot-Spot CDW

Parameter	Nilai
Energi yang digunakan	80, 90, 100, 110, 120 J
Kuat Tekan Las	39.2N
<i>Drop Height</i> (tinggi pengelasan)	5mm
Tegangan Listrik	75VDC

Parameter konsentrasi larutan korosif juga harus ditentukan guna mendapatkan hasil penelitian yang akurat dan terukur. Konsentrasi larutan korosif dapat ditentukan berdasarkan referensi tentang larutan kimia. Larutan yang diinginkan adalah asam nitrat (HNO_3) dengan konsentrasi 1Molar. Dalam menentukan parameter konsentrasi larutan yang dimaksud, maka harus dilakukan perhitungan rumus kimia terlebih dahulu. Berikut perhitungan untuk memperoleh larutan HNO_3 1M sebanyak 1liter.

$$\text{Normalitas}_{\text{HNO}_3} \cdot \text{Volume}_{\text{HNO}_3} = \text{Volume}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{Volume}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

Normalitas HNO_3 dengan persentase 65%

$$14,4 \cdot V_{\text{HNO}_3} = (1) \cdot (500\text{mL})$$

$$V_{\text{HNO}_3} = 34,7\text{mL}$$

Maka,

$$\frac{V_{\text{HNO}_3}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{69,4\text{mL}}{(500-69,4)\text{mL}} = \frac{69,4\text{mL}}{430,6\text{mL}}$$

Langkah selanjutnya adalah mencampurkan larutan HNO_3 dengan akuades sesuai dengan perhitungan yang telah didapatkan. Dalam teknik kimia, wadah untuk mencampurkan larutan agar larutan tersebut homogen adalah tabung labu.

3. Persiapan Alat dan Bahan

Terdapat banyak tahap persiapan yang dilakukan pada penelitian ini, tahapan yang dimaksud meliputi: Persiapan alat uji SCC, pembuatan alat bantu penepat Hotspot CDW, pemotongan dan pengelasan spesimen dan yang terakhir adalah pembuatan larutan korosif. Tahapan-tahapan diatas dilakukan di berbagai tempat berbeda tergantung langkah dan fasilitas yang dibutuhkan.

4. Prosedur pengambilan data

Berikut adalah prosedur pengambilan data menggunakan mesin SCC.

- a. Ujung bagian bawah spesimen dipasang pada penjepit bagian bawah kemudian kencangkan penjepit tersebut.
- b. Ujung spesimen lainnya kemudian dijepit dengan penjepit atas, yang terhubung pada tali sling dan *hook*.
- c. Selanjutnya, lubang antara spesimen uji dengan bak penampung ditutup dengan menggunakan lem, sehingga tidak terjadi kebocoran saat proses pengujian dilakukan.
- d. Larutan korosif kemudian dituang ke dalam bak larutan korosif hingga tingginya melewati batas sambungan melewati garis sambungan las atau daerah kontak las.
- e. Variasi pembebanan mulai diberikan dengan massa yang telah ditetapkan, dengan menghubungkan pemberat dan hook pemberat
- f. Kemudian proses pembebanan mulai berlangsung, dan tunggu sampai spesimen uji mengalami patah.
- g. Tahapan terakhir dari proses penelitian ini saat spesimen uji telah mengalami pematahan di setiap variasi pembebanan, setelah itu lepaskan patahan spesimen

uji dari penjepit bagian atas dan bawah, kemudian catat waktu patah yang dibutuhkan, geometri akhir dan berat akhir dari setiap variasi pembebanan spesimen uji yang digunakan

5. Pengolahan dan Analisis Data serta Pembahasan

Penelitian ini menggunakan acuan dasar teori pada tinjauan pustaka dari berbagai banyak sumber sebagai pedoman dalam proses pengolahan data yang telah penulis pelajari sebelumnya hasil pengujian, dipaparkan dalam bentuk tabel dan grafik hasil pengujian. Begitu juga hasil daripada pengolahan data akan ditampilkan berbentuk table dan grafik, sehingga mempermudah peneliti untuk menganalisa dan menyimpulkan hasil penelitian ini. Table dan grafik diharapkan dapat menjawab tujuan dari penelitian ini.

Pada tabel disajikan data hasil pengujian yang akan menampilkan waktu patah dari semua pengujian yang dilakukan. Spesimen dari hasil variasi energi dalam melakukan pengelasan dilakukan sebanyak tiga kali percobaan terhadap tiga variasi perlakuan permukaan yaitu α_0 , α_1 dan α_2 . Beban untuk pengambilan data ini konstan yaitu 16kg, kemudian waktu patah dicatat dalam satuan menit.

Berdasarkan data hasil pengujian pada beban 16kg, maka didapatkanlah tiga nilai maksimum (waktu patah terlama) dari masing-masing variasi perlakuan permukaan yaitu pada α_0 , α_1 dan α_2 dengan parameter 120J.

Waktu patah maksimum dari masing-masing perlakuan permukaan berada pada energi pengelasan 120J. Untuk mendapatkan nilai tegangan ambang pada masing-masing spesimen diperlukan variasi beban pada spesimen nilai tertinggi tersebut. Variasi beban yang dimaksud meningkat secara konstan dimulai dari 8kg, 10kg, 12kg, sampai dengan 24kg. Beban yang berikan pada spesimen dapat dikonversi kedalam nilai tegangan (MPa) dengan menggunakan rumus. Dari hasil pengujian ini waktu patah pada masing-masing spesimen dicatat kembali kedalam tabel yang disebut pengolahan data kemudian ditampilkan dalam grafik hasil pengolahan data.

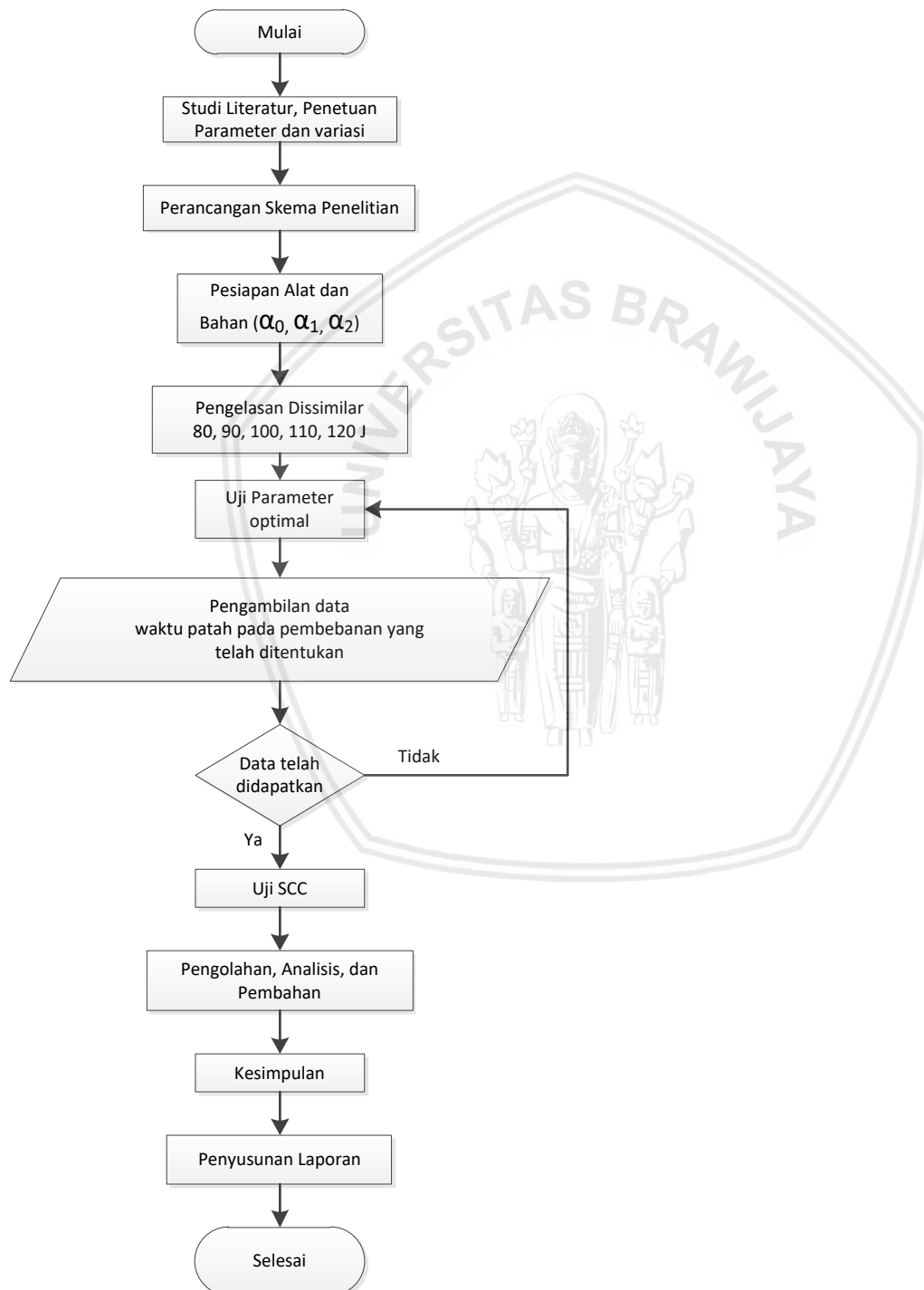
6. Kesimpulan

Kesimpulan dalam penelitian ini merupakan hasil daripada rumusan masalah serta hasil yang sesuai dengan tujuan dari penelitian yang telah dipaparkan pada Poin 1.2 dan Poin 1.4. Pencapaian tujuan dari penelitian ini diharapkan akan menjadi hasil atas manfaat yang dijelaskan pada poin 1.5.

7. Pembuatan Laporan

Pada tahap akhir penelitian, laporan penulis dibuat sebagai fungsi dokumentasi, referensi pada penelitian selanjutnya ataupun tinjauan pembelajaran bagi khalayak umum dan syarat dalam memperoleh gelar Magister Teknik.

4.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 4.24 Diagram alir penelitian

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil

5.1.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian “Pengaruh Perlakuan Permukaan dan Parameter Pangelasan *Dissimilar Capacitive Discharge Welder* pada Baja dan Kuningan terhadap *Stress Corrosion Cracking*” ini diperoleh berdasarkan waktu patah (*time to failure*) spesimen.

Tabel 5.7
Waktu Patah

Energi pengelasan (joule)	Percobaan ke-	α_0 (menit)	α_1 (menit)	α_2 (menit)
80	1	-	68,350	-
	2	-	67,567	-
	3	-	70,267	-
90	1	-	91,433	1,983
	2	-	89,750	2,767
	3	-	90,017	2,517
100	1	1,017	128,983	4,083
	2	1,317	129,717	4,017
	3	1,150	130,617	3,917
110	1	2,900	162,033	6,533
	2	1,983	161,717	5,767
	3	1,967	160,917	6,867
120	1	2,567	186,283	7,950
	2	1,967	185,383	7,583
	3	2,217	185,317	8,800

Data diatas diperoleh dengan cara memberi beban pada spesimen dari massa beban 16kg. Beban tersebut berperan sebagai tegangan yang bekerja pada sambungan. Unsur korosi kimiawi dan korosi galvanic pada sambungan ini dapat terjadi secara bersamaan karena sambungan yang berbeda material dapat juga menyebabkan *galvanic corrosion*.

Untuk memastikan bahwa yang terjadi pada spesimen uji adalah fenomena SCC yang sebenarnya maka harus dilakukan juga pengujian dengan cara menghilangkan salah satu dari tiga faktor penyebab terjadinya SCC. Pengujian dengan menghilangkan salah satu penyebab SCC tersebut hanya dilakukan pada spesimen α_1 dengan parameter 120J karena spesimen tersebutlah yang mendapatkan nilai tertinggi dalam pengujian SCC. Pengujian yang pertama yaitu tanpa memberi tegangan atau dengan kata lain hanya dilakukan perendaman terhadap spesimen uji saja. Hasil dari perendaman tersebut dapat bertahan selama 4-6 jam (360menit). Selanjutnya dilakukan juga pemberian tegangan/beban seberat 16kg tanpa merendam

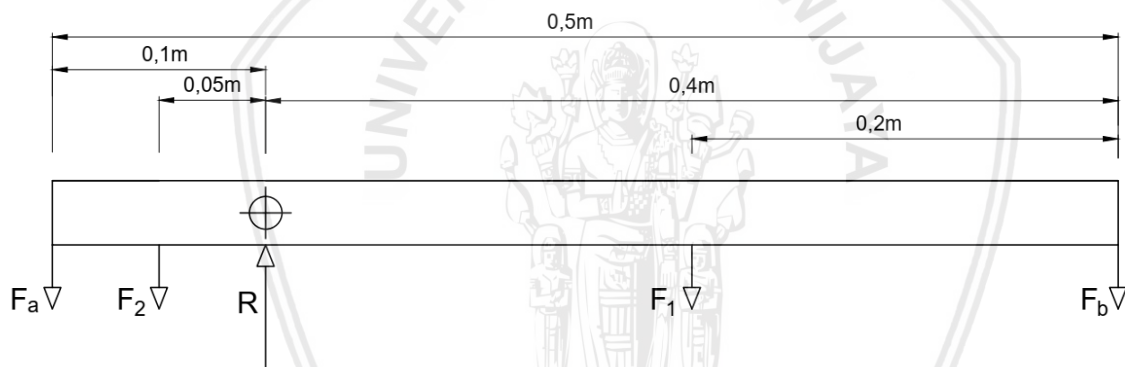
spesimen uji hasil pengujian ini dapat bertahan selama 30-48jam (2.880menit). Sedangkan untuk faktor penyebab SCC yang ketiga yaitu material itu sendiri (*void*) sudah didapatkan dari hasil pengelasan yang memiliki *crack initiation* dimana setiap hasil las akan sangat sulit untuk menghindari hal tersebut.

5.1.2 Pengolahan data

Pada sub bab pengolahan data ini akan dipaparkan mengenai perhitungan untuk mendapatkan gaya aplikasi dari variasi pembebanan dan nilai tegangan yang diterima oleh spesimen. Berikut adalah perhitungan nilai tegangan dari beban yang diberikan melalui alat uji SCC:

a. Gaya aplikasi pada spesimen

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



Gambar 5.25 Sistem pengungkit beban yang terdapat pada alat uji SCC

Rumus yang digunakan berdasar pada diagram benda bebas tersebut adalah:

$$\sum M_R = 0 \dots\dots\dots (5-1)$$

$$(F_b * 0,4m) + (F_1 * 0,2m) - (F_2 * 0,05m) - (F_{aplikasi} * 0,1m) = 0$$

Keterangan:

F_b = Gaya akibat beban (16kg ≈ 156,96N)

F₁ = Gaya dari 4/5 beban lengan pengungkit (2,25kg ≈ 22,0725N)

F₂ = Gaya dari 1/5 beban lengan pengungkit (0,5625kg ≈ 5,51813N)

Gaya aplikasi (F_a) yang terjadi akibat beban 16kg dapat hitung berdasarkan rumus 4-4 seperti berikut ini.

$$(156,96N * 0,4m) + (22,0725N * 0,2m) - (5,51813N * 0,05m) - (F_{aplikasi} * 0,1m) = 0$$

$$(156,96N * 0,4m) + (22,0725 N * 0,2m) - (5,51813 N * 0,05m) = F_{aplikasi} * 0,1m$$

$$F_a = 669,226 N$$

b. Nilai tegangan akibat pembebanan

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (5-2)$$

Berdasarkan perhitungan diagram benda bebas pada pengolahan data, maka diperoleh F pada pembebanan 16kg adalah 670,17N

$$F = 669,226 \text{ N}$$

A = Luas penampang spesimen (poros), dapat diperoleh berdasarkan rumus

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = 3.14 \times (0,8 \text{ mm})^2$$

$$A = 2,011 \text{ mm}^2$$

Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan tegangan akibat pembebanan

$$\sigma = \frac{669,226 \text{ N}}{2,011 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 332,846 \text{ MPa}$$

5.1.3 Hasil pengolahan data

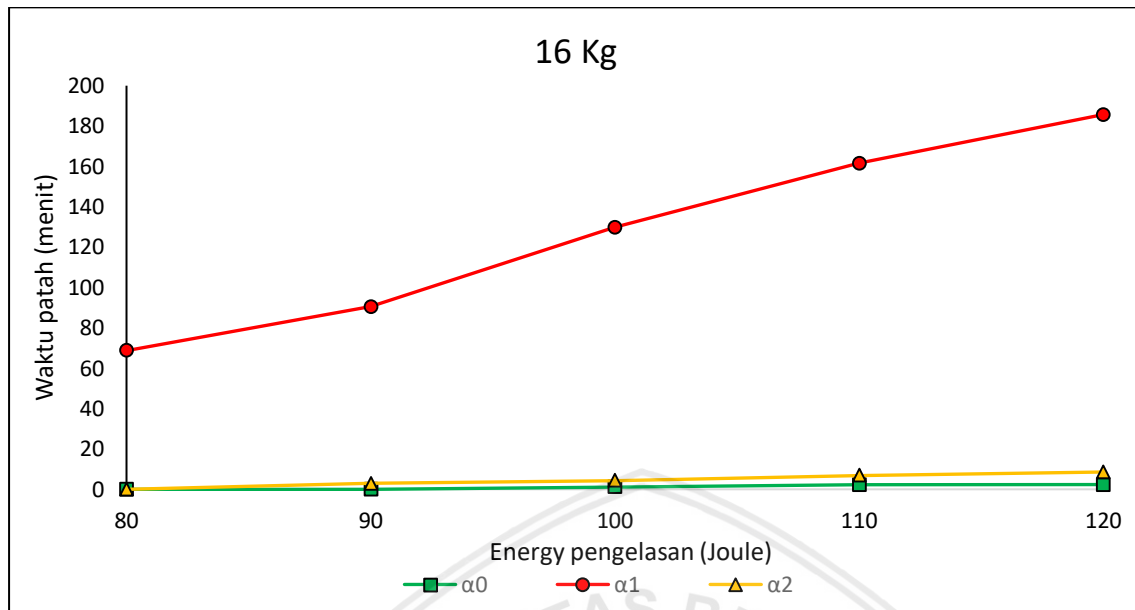
Tabel 5.8
Tegangan Akibat Beban

Beban (Kg)	Tegangan (MPa)	120J		
		α_0 (menit)	α_1 (menit)	α_2 (menit)
8	176,715	184,017	-	-
10	215,747	36,156	-	-
12	254,780	17,006	-	180,410
14	293,813	7,467	-	31,303
16	332,846	2,250	185,661	8,578
18	371,878	-	42,083	2,502
20	410,911	-	14,600	0
22	449,944	-	5,3111	-
24	488,977	-	0	-

5.2 Pembahasan

Subbab 5.2.1 akan membahas mengenai parameter pengelasan yang digunakan untuk pengelasan CDW. Selanjutnya pada subbab 5.2.2 akan membahas terkait nilai tegangan ambang untuk material yang digunakan dalam pengujian.

5.2.1 Diagram Parameter Pengelasan CDW



Gambar 5.26 Grafik diagram parameter pengelasan CDW

Gambar 5.2 di atas menunjukkan waktu patah spesimen pada masing-masing parameter pengelasan. 80J, 90J, 100J, 110J, dan 120J, menghasilkan waktu patah yang berbeda-beda. Waktu patah yang tercepat adalah 80J pada spesimen α_0 dan α_2 . Kedua spesimen tersebut akan langsung patah apabila di beri beban 16kg. Untuk waktu patah yang paling lama pada 120J spesimen α_1 , dimana terlihat spesimen patah dalam waktu 184,017 menit.

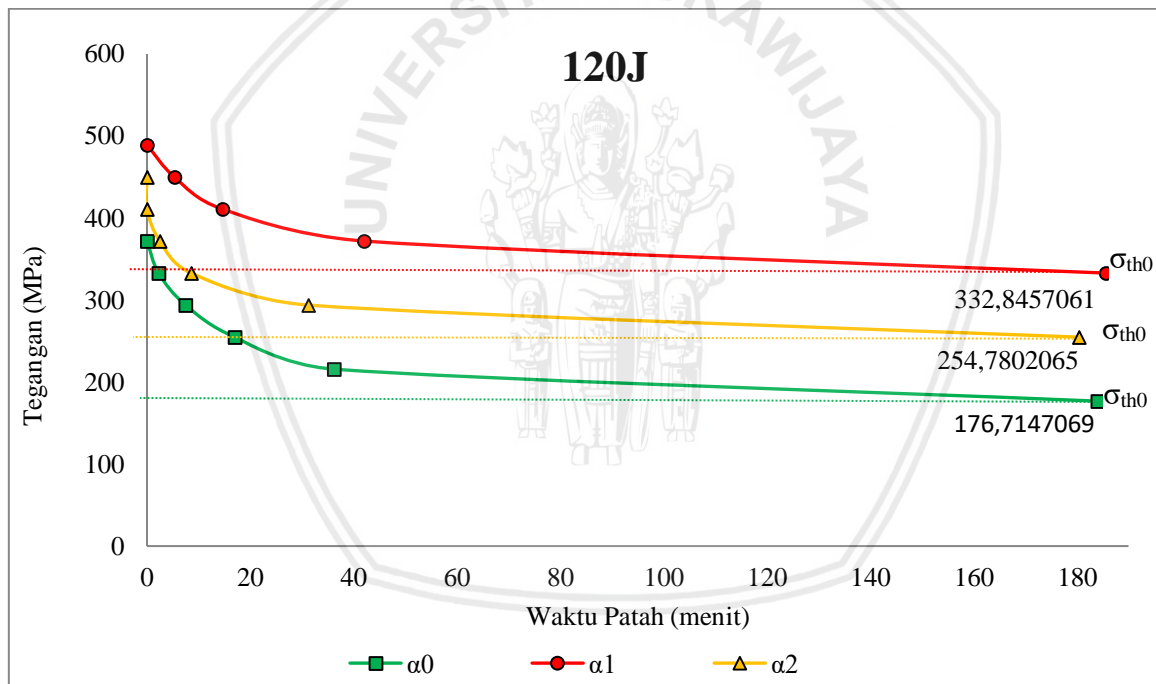
Semakin besar energi yang digunakan dalam proses pengelasan, maka waktu patah akan semakin meningkat atau dengan kata lain lamanya sambungan las tersebut untuk menahan beban yang diberikan. Hal tersebut dapat terjadi karena panas yang terjadi pada saat proses pengelasan akan meningkat seiring meningkatnya energi sehingga membuat titik kontak pada material tersebut melebur semakin banyak dan akhirnya akan saling mengikat.

Pada penelitian ini juga menggunakan tiga variasi geometri permukaan atau *surface preparation* untuk membandingkan geometri yang paling sesuai dengan proses pengelasan yang digunakan. Perlakuan permukaan yang dimaksud adalah α_0 , α_1 dan α_2 . Grafik 5.2 di atas menunjukkan bentuk spesimen yang paling optimal dalam *surface preparation* pengelasan *dissimilar* antara tembaga dan kuningan berdiameter 1.6mm. Bentuk yang dimaksud adalah α_1 dimana terlihat hasil pengujian bentuk ini berada pada nilai tertinggi diikuti oleh spesimen α_2 dan yang terendah adalah α_0 . Spesimen α_1 yang berada pada nilai tertinggi dalam grafik berarti bahwa spesimen tersebut lebih tahan terhadap kondisi SCC. Waktu patah untuk sambungan α_1 berada pada 185,66 menit. Sedangkan α_2 dan α_0 berada pada 8,577 menit dan 2,250 menit.

5.2.2 Diagram Tegangan Ambang

Berdasarkan grafik hasil pengujian pada gambar 5.1, maka terpilih tiga nilai waktu patah yang tertinggi pada masing-masing spesimen. Parameter yang tertinggi pada setiap variasi *surface preparation* adalah 120J, oleh karena itu 120J ini akan digunakan sebagai parameter untuk mencari nilai *threshold stress*.

Dibutuhkan diagram *threshold stress* untuk menentukan kemampuan material pada lingkungan SCC. *Threshold stress* adalah tolak ukur ketahanan suatu konstruksi atau material terhadap SCC. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi tegangan ambang, yaitu lingkungan, komposisi logam, dan metalurgi paduan (Jones 1992b). Diagram tegangan ambang ditentukan oleh tiga unsur utama yang menyebabkan SCC. Berikut adalah hubungan tegangan dan waktu patah yang diperlihatkan dalam bentuk diagram.



Gambar 5.27 Grafik tegangan ambang spesimen α_0 , α_1 , dan α_2

Pada Gambar 5.3 terlihat pemaparan mengenai perbandingan diagram tegangan ambang antara spesimen α_0 , α_1 , dan α_2 . Grafik tersebut memperlihatkan adanya nilai tegangan antara spesimen α_1 yang memiliki nilai lebih tinggi dibanding dengan nilai spesimen α_0 . Spesimen α_0 menjadi spesimen yang paling rendah nilai tegangan ambangnya karena kurangnya ikatan logam yang terjadi pada saat proses pengelasan. Kuningan dan baja tidak tersambung dengan baik dikarenakan permukaan keduanya rata sehingga peleburan logam yang terjadi kurang maksimal. Baja memiliki sifat weld ability yang baik sedangkan kuningan lebih rendah sifat

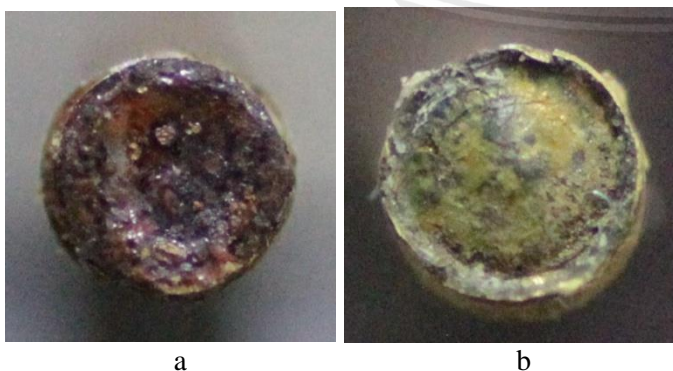
mampu lasnya, karena bentuk permukaan baja yang rata kemudian di las ke permukaan kuningan yang rata pula maka baja yang melebur dan mengikat hanya sedikit.

Tegangan ambang pada spesimen α_0 adalah 176,7147 MPa atau setara dengan beban pada lengan mpengungkit sebesar 8kg. Jika spesimen α_0 diberi beban dibawah 8kg maka spesimen tersebut tidak akan patah dalam waktu lama atau bahkan selamanya. Begitu juga dengan spesimen α_1 dan α_2 jika spesimen α_1 atau α_2 diberikan tegangan dibawah tegangan ambangnya maka spesimen tersebut dapat bertahan pada kondisi SCC dalam waktu lama bahkan mungkin sampai selamanya jika kondisi SCC tersebut konstan.

5.2.3 Pengamatan Visual

Hasil foto pada spesimen yang telah patah dapat juga digunakan sebagai dasar untuk membandingkan kekuatan sambungan. Seperti penelitian Ozlati pada hasil sambungan las CDW baja karbon dan stainless steel (*dissimilar welding*), mendapatkan hasil yang sangat baik karena uji tarik menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi di daerah pengelasan. *Flash* yang dihasilkan juga sangat rapi sehingga mengurangi proses tambahan setelah sambungan las diperoleh (Ozlati, Movahedi, dan Mohammadkamal 2016).

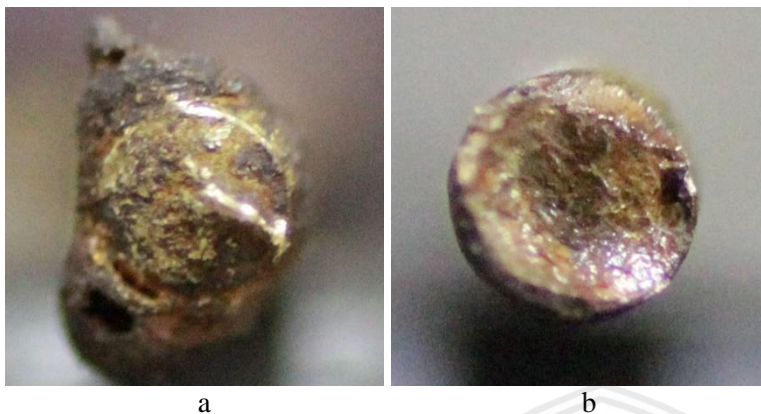
Pengamatan visual dilakukan menggunakan kamera jenis *Digital Single Lens Reflex* (DSLR) CMOS APS-C, 18.0 megapixels, ISO 100-6400, 9 AF *points focus* yang dikombinasikan lensa makro 70-300mm f/4-5.6 DG Macro. Karena ukuran objek yang kecil membuat hasil pemotretan dalam kondisi pencahayaan yang berubah-ubah apalagi pada saat pengambilan foto hanya memanfaatkan (*bleach/flash*) bawaan kamera saja. Meskipun demikian pengamatan visual masih tetap bisa dilakukan dengan baik guna mengamati hasil sambungan CDW.



Gambar 5.28 Foto makro α_0 a) Baja karbon, b) Kuningan

Foto makro pada hasil spesimen yang telah patah ditampilkan seperti Gambar 5.4 diatas. Pada gambar menunjukkan bercak atau patahan kuningan yang terdapat di permukaan tembaga jumlahnya sedikit, dan bercak atau patahan tembaga pada permukaan kuningan

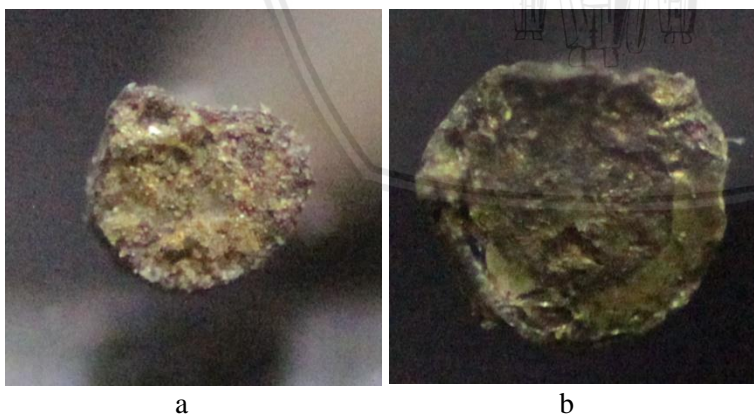
juga berjumlah sedikit. *Flash* pada hasil patahan juga tidak terlihat serta hampir tidak terdapat jejak adanya pembakaran atau peleburan logam.



Gambar 5.29 Foto makro α_1 a) Baja karbon, b) Kuningan

Pada Gambar 5.5 menunjukkan bercak atau patahan kuningan yang terdapat di permukaan tembaga jumlahnya paling banyak diantara tiga spesimen, begitu juga sebaliknya yang terjadi pada bercak atau patahan tembaga pada permukaan kuningan berjumlah paling banyak jika dibandingkan hasil foto makro α_0 dan α_2 . Fenomena tersebut menunjukkan bahwa sambungan α_1 adalah sambungan yang paling kuat diantara lainnya.

Hasil foto makro juga memperlihatkan *flush* pada hasil patahan, *flash* ini dapat terbentuk dari hasil peleburan logam las yang lebih banyak sehingga *flash* ini dapat dijadikan sebagai parameter kuat atau tidaknya sambungan las.



Gambar 5.30 Foto makro α_2 a) Baja karbon, b) Kuningan

Foto makro pada hasil spesimen yang telah patah diperlihatkan seperti gambar 5.6. Gambar tersebut menunjukkan bercak atau patahan kuningan yang terdapat di permukaan tembaga jumlahnya lebih banyak dibanding spesimen α_0 dan lebih sedikit dibanding spesimen α_1 , begitu pun pada tembaga di permukaan kuningan terlihat hampir sama. *Flash*

pada hasil patahan juga terlihat meskipun tidak sebanyak α_1 , tetapi jumlah *flash*-nya juga tidak terlalu sedikit atau tidak ada sama sekali.

Hasil pengamatan secara visual yang dilakukan pada gambar 5.4, 5.5 dan 5.6 memperlihatkan bahwa hasil pengelasan yang paling baik adalah α_1 dimana peleburan α_1 terjadi secara maksimal, terbukti pada gambar 5.5 peleburan tembaga dan kuningan terdapat *flash*, dan terlihat pula bekas patahan yang kuat dimana kedua permukaan spesimen terdapat bercak patahan seperti pada kuningan banyak terdapat potongan tembaga dan begitu juga sebaliknya. Berbeda pada gambar 5.4 dan 5.6 memperlihatkan peleburan yang tidak merata serta patahan yang kurang kuat dalam mengikat.



BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

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

1. Bentuk perlakuan permukaan yang memiliki ketahanan paling tinggi adalah α_1 kemudian diikuti oleh α_2 dan yang terakhir adalah α_0 .
2. Nilai tegangan ambang atau tegangan aman pada masing-masing spesimen adalah: α_0 sebesar 176,715 MPa, α_1 sebesar 332,846 MPa, dan α_2 sebesar 254,78 MPa.
3. Diantara lima parameter pengelasan dissimilar CDW yaitu 80J, 90J, 100J, 110J dan 120J, didapatkan energi pengelasan yang paling tahan terhadap kondisi SCC adalah 120J.

6.2 Saran

1. Diharapkan alat bantu mesin las CDW terutama pada komponen kuat tekan las ditingkatkan dari segi alat agar lebih presisi.
2. Diharapkan alat uji SCC pada penelitian selanjutnya diperbaharui untuk mendapatkan data yang lebih baik.
3. Perhitungan dan penentuan waktu patah diharapkan dapat dilakukan secara saksama.



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing Materials. 2000. *ASTM G49 - 85(2000), Standard Practice for Preparation and Use of Direct Tension Stress-Corrosion Test Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Ashby, Michael F. dan David R. H. Jones. 2006. *Engineering Materials 2 - An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. 3 ed. UK: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.
- Bayuseno, A. P. dan To'in. 2012. "Analisis Stress Corrosion Cracking Aisi 430 Dengan Variasi Pembebanan Pada Media Korosi Hcl 0 , 8 M." *ROTASI* 14:13–23.
- Brown, Benjamin Floyd. 1977. *Stress Corrosion Cracking Control Measures*. Washington, D. C.: Nation Bureau of Standars Monograph 156.
- Casalino, G. dan F. W. Panella. 2006. "Numerical simulation of multi-point capacitor discharge welding of AISI 304 bars." *Journal Engineering Manufacture* 220:647–55.
- Casalino, G. dan F. W. Panella. 2007. "Microstructural analysis of AISI 304 bars welded with high speed pulsed discharges." *Journal of Materials Processing Technology* 191:149–52.
- Cheng, Y. Frank. 2013. *Stress Corrosion Cracking of Pipelines*. 1 ed. diedit oleh R. W. Revie. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Cottis, R. A. 2000. "Guides to Good Practice in Corrosion Control-Stress Corrosion Cracking." in *Corrosion and Protection Centre*. United Kingdng: National Physical Laboratory.
- Darmadi, Djarot B. 2014. "Residual stress analysis of pipeline girth weld joints." University of Wollongong.
- Darmadi, Djarot B., Natanael Ardi Sugiarto, dan Femiana Gapsari. 2018. "Stress Corrosion Cracking at ASTM A36 Plate with Varied Grain Orientation." *International Review of Mechanical Engineering (IREME)* 12:987.
- Darvell, B. W. 2018. "More Mechanical Testing." Hal. 745–70 in *More Mechanical Testing*. Woodhead Publishing.
- Dattoma, V., F. Palano, dan F. W. Panella. 2010. "Mechanical and technological analysis of AISI 304 butt joints welded with capacitor discharge process." *Materials and Design* 31(1):176–84.
- DCC Corporation. 2013. "Stud Welding Equipment, Stud Welders, Weld Stud Fasteners, Parts, Stud Welder Rentals & Repairs." *DCC Corporation*. Diambil 12 September 2019

(<http://catalog.dccccorporation.com/viewitems/thermocouple-wire/thermocouple-wire-2>).

- Dietzel, W. dan P. Bala Srinivasan. 2011. "Testing and evaluation methods for stress corrosion cracking (SCC) in metals." Hal. 133–66 in *Stress corrosion cracking: Theory and practice*.
- Dietzel, W., A. Turnbull, SM Shanmuga Ramanan, dan S. Arun. 2017. *Stress Corrosion Cracking*. Elsevier Inc.
- Du, Donghai, Kai Chen, Lun Yu, Hui Lu, Lefu Zhang, Xiuqiang Shi, dan Xuelian Xu. 2015. "SCC crack growth rate of cold worked 316L stainless steel in PWR environment." *Journal of Nuclear Materials* 456:228–34.
- Flinn, R. A. dan P. K. Trojan. 1995. *Engineering Materials and Their Aplikastion*. 5 ed. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Fontana, M. G. 1987. *Corrosion Engineering*. 3 ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Gadang, Priyotomo. 2008. *Kamus Saku Korosi Material*. 1 ed. Jakarta.
- Gould, Jerry E. dan Sam Lewis. n.d. *Development of an Open Architecture Capacitive Discharge Welding System*.
- Groover, Mikell P. 2010. *Fundamentals of modern manufacturing, Material processing and Systems*. 4th ed. diedit oleh M. McDonald. Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Guo, Xianglong, Kai Chen, Wenhua Gao, Zhao Shen, Ping Lai, dan Lefu Zhang. 2017. "A research on the corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of 316L stainless steel exposed to supercritical water." *Corrosion Science* 127(December 2016):157–67.
- Harada, Yohei, Yutaro Sada, dan Shinji Kumai. 2016. "Joining steel studs and steel plates by solid-state stud welding and estimation of temperature near the joint interface." *Journal of Manufacturing Processes* 23:75–82.
- He, Xue, Cui Yinghao, Li Gangbo, dan Wang Shuai. 2018. "Crack Growth Driving Force at Tip of Stress Corrosion Cracking in Nuclear Structural Materials at Initial Stage." *Rare Metal Materials and Engineering* 47(8):2365–70.
- Hou, Wentao, Yifu Shen, Guoqiang Huang, Yinfei Yan, Chao Guo, dan Junping Li. 2018. "Dissimilar friction stir welding of aluminum alloys adopting a novel dual-pin tool: Microstructure evolution and mechanical properties." *Journal of Manufacturing Processes* 36(June):613–20.
- IMAGE. n.d. "The Stud Welding Process." *IMAGE INDUSTRI INC*. Diambil 12 September 2019 (<https://www.imageindustries.com/what-is-stud-welding/>).
- Inglis, C. E. 1913. "Stresses in Plates Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners."

- Transactions of the Institute of Naval Architects* 55:219–41.
- Jones, R. H. dan R. .. Ricker. 1992. “Mechanisms of Stress-Corrosion Cracking.” Ohio: ASM International.
- Jones, Russell H. 1992a. “Materials Performance and Evaluation.” in *Stress Corrosion Cracking*. Ohio: ASM, Materials Park.
- Jones, Russell H. 1992b. *Stress-Corrosion Cracking*. 1 ed. Ohio: ASM International.
- Kannan, Mathan Bobby dan Pavan K. Shukla. 2011. “Stress corrosion cracking (SCC) of copper and copper-based alloys.” *Stress Corrosion Cracking* (1998):409–26.
- Kirsch, E. G. 1898. “Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre.” *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* 42:797–807.
- Koch, G. H. 2001. “Tests for stress-corrosion cracking.” *Advanced Materials and Processes* 159(8):36–38.
- Lasek, Stanislav. 2015. “Fracture Mechanics.” Technical University of Ostrava.
- Liu, Xiao dan Kwok Fai Chung. 2018. “Experimental and numerical investigation into temperature histories and residual stress distributions of high strength steel S690 welded H-sections.” *Engineering Structures* 165(December 2017):396–411.
- Mamlu, M. .. 2001. “Sifat Fisis dan Mekanis pada Besi Beton yang Mendapat Beban Tekan dan Dikorosi.”
- Marcus, P. dan Jaquest Oudar. 1995. “Corrosion Mechanisms in Theory and Practice.” diedit oleh M. Dekker. United States.
- McGinty, Bob. 2014. “Fracture Mechanics.” Diambil 11 Juni 2019 (<https://www.fracturemechanics.org/index.html#TOC>).
- Mishra, Pankaj. 2017. “What is Stress Concentration - Definition, Causes, effects and Prevention ?” *Mechanical Bosster*. Diambil 4 September 2019 (<https://www.mechanicalbooster.com/2017/04/what-is-stress-concentration.html>).
- Moein, Hadi dan Iradj Sattari-Far. 2014. “Different finite element techniques to predict welding residual stresses in aluminum alloy plates.” *Journal of Mechanical Science and Technology* 28(2):679–89.
- Mondal, Sujit Kumar dan Stuart R. Taylor. 2014. “The Identification and Characterization of Organic Corrosion Inhibitors: Correlation of a Computational Model with Experimental Results.”
- Moss, Tyler, Wenjun Kuang, dan Gary S. Was. 2018. “Stress corrosion crack initiation in Alloy 690 in high temperature water.” *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 22(1):16–25.

- NACE International. n.d. "Stress Corrosion Cracking (SCC)." *NACE International*. Diambil 24 Maret 2019 (<https://www.nace.org/resources/general-resources/corrosion-basics/group-3/stress-corrosion-cracking>).
- National Energy Board. 1996. "Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines."
- Noble, Anita. 1997. "STRESS CONCENTRATION." *Virginia Tech Materials Science and Engineering*. Diambil 3 September 2019 (http://www.sv.rkriz.net/classes/MSE2094_NoteBook/97ClassProj/anal/noble/stress_conc.html).
- Nugraha, Pratama Yudha dan A. P. Bayuseno. 2014. "Analisis Stress Corrosion Cracking Logam Kuningan dengan Metode U-Bend pada media Korosi Sodium Nitrat dan Mattsson PH=7,2." *Jurnal Teknik Mesin* 2(1):67–76.
- Ozlati, Ashkaan, Mojtaba Movahedi, dan Helia Mohammadkamal. 2016. "Upset Resistance Welding of Carbon Steel to Austenitic Stainless Steel Narrow Rods." *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- Palano, F., S. Chiozzi, F. W. Panella, dan V. Dattoma. 2012. "Characterization of Steel Welded Joints with Hybrid Projection and Processes." *Materials and Manufacturing Processes*.
- Panella, Francesco W., Vito Dattoma, Marta De Giorgi, Fania Palano, dan Alessio Carofalo. 2019. "CDW aluminium joints welding and optimisation with NDT/mechanical testing." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (102):3689–98.
- Patnaik, Srinivas. M. 1996. "Development of an Automated Capacitor Discharge Welding System." Oregon State University.
- Raja, V. S. dan Tetsuo Shoji. 2011. *Stress corrosion cracking-Theory and practice*. New Delhi: Woodhead Publishing Limited.
- Raju, I. S. dan J. C. Newman, Jr. 1985. *Stress-Intensity Factor for Circumferential Surface Cracks in Pipes and Rods under Tension and Bending Loads*. Langley Research Center, Hampton, Virginia: National Aeronautics and Space Administration.
- Roesler, Joachim, Harald Harders, dan Martin Baeker. 2007. *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Roylance, David. 2001. "Introduction to Fracture Mechanics." Hal. 1–17 in. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Rusianto, Toto. 2009. "Perubahan Laju Korosi Akibat Tegangan Dalam dengan Metode C-

- Ring.” Yogyakarta: Institut Sains & Teknologi AKPRIND.
- Ryakhovskikh, I. V., R. I. Bogdanov, dan V. E. Ignatenko. 2018. “Intergranular stress corrosion cracking of steel gas pipelines in weak alkaline soil electrolytes.” *Engineering Failure Analysis* 94(July):87–95.
- Scotchmer, Nigel. 2015. “The Current Rise in the Use of Capacitor Discharge Welding.” *Welding Journal* 94(2):32–36.
- Speidel, M. O. 1984. “Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue-Fracture Mechanics.” Hal. 331–57 in *Corrosion in Power Generating Equipment*, diedit oleh M. O. Speidel dan A. Atrens. New York: Plenum Press.
- Staehele, R. W. 1977. *Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys*. diedit oleh Houtson. NACE.
- Stark, H. L. dan R. N. Ibrahim. 1986. “Estimating fracture toughness from small specimens.” *Engng Fract Mechan* 25(4):395–401.
- Sudarsono, Djarot B. Darmadi, dan Femiana Gapsari. 2018. “Analisis Stress Corrosion Cracking Sambungan Las Gas Tungsten Arc Welding Spesimen Aluminium sebelum dan sesudah Stress Relieving.” Universitas Brawijaya.
- Suherman, Wahid. 1987. *Pengetahuan Bahan (TM 1461)*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sunbelt. n.d. *SUNBELT Master Catalog-Product Specification and Application Guide*. Texas: Sunbelt Stud Welding, Inc.
- Trethewey, K. R. dan J. Chamberlain. 1988. *Corrosion: For Students of Science and Engineering*. Longman.
- Trethewey, K. R. dan J. Chamberlain. 1996. *Corrosion for Science and Engineering*. England: Pub. Longman Scientific & Technical.
- Van, Anh Le dan Jean Royer. 1993. “Part-circular surface cracks in round bars under tension , bending and twisting To cite this version : Part-circular surface cracks in round bars under tension , bending and twisting.” *International Journal of Fracture* 61(1):71–99.
- Virginia Education. n.d. “Failure.” Diambil 3 September 2019 (<https://www2.virginia.edu/bohr/mse209/chapter8.htm>).
- Walker, Perrin dan William H. Tarn. 1991. *Handbook of Metal Etchants*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press LLC.
- Wibowo, Dwi Basuki, Sugiyanto, dan Agus Suprihanto. 2007. “Perhitungan faktor konsentrasi tegangan pada pipa konstruksi percabangan 60o akibat gaya aksial menggunakan metode elemen hingga.” *Traksi* 5(1):1–7.

- Widodo, Basuki, Anang Subardi, dan Gede Sesrawan Yasa. 2016. "Baja AISI 304 dan Baja XW 42 Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan." Hal. 50–55 in *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri (SENIATI)*. Malang: Institut Teknologi Nasional Malang.
- Wikipedia contributor. 2019. "Stress concentration." *Wikipedia*.
- Wilson, R. D., J. R. SR Woodyard, dan J. H. Devletian. 1993. "Capacitor Discharge Welding: Analysis through Ultrahigh-Speed Photography." *Welding Reserch Supplement* 101–6.
- Wolski, Krzysztof, Pierre Combrade, Francois Dupoirion, Claude Duret-Thual, dan Fiona Ruel. 2019. "Stress Corrosion Cracking: From In-service Cracking to Laboratory Studies." Hal. 359–81 in *Mechanics - Microstructure - Corrosion Coupling*, diedit oleh C. Blanc dan I. B. T.-M.-M.-C. C. Aubert. Elsevier.
- Zhang, Jon Jincai. 2019. "Basic rock fracture mechanics." Hal. 133–61 in *Aplied Petroleum Geomechaninics*. Gulf Professional Publishing.

