



TEKNIK PENGELASAN

Cara Menghindari Cacat Las

Suherman, S.T., M.T

Prof. Dr. Ir. Ilmi Abdullah, M.Sc

Kata Pengantar

TEKNIK PENGELASAN (Cara Menghindari Cacat Las)

Penulis

Suherman, S.T., M.T

Prof. Dr. Ir. Ilmi Abdullah, M.Sc

Editor :

Muhammad Arifin

Desain Sampul

Rizki Yunida Br Panggabean

Cetakan Pertama ; November 2020

xii; 383 hlm; 17.5 x 25 cm

ISBN: 978-623-6888-04-9 (softcover)

E-ISBN : 978-623-6888-05-6 (PDF)

Penerbit



Redaksi

Jalan Kapten Muktar Basri No 3 Medan, 20238

Telepon, 061-6626296, Fax. 061-6638296

Email; umsupress@umsu.ac.id

Website; <http://umsupress.umsu.ac.id/>

Anggota IKAPI Sumut, No : 38/ Anggota Luar Biasa/SUT/2020

Anggota APPTI (Afiliasi Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia)

Anggota APPTIMA (Afiliasi Penerbit Perguruan Tinggi Muhammadiyah Aisyiyah)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian dari sebagian isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam dan dengan sistem penyimpanan lainnya tanpa izin tertulis dari penul

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kesehatan yang baik kepada penulis, waktu luang dan ilmu yang bermanfaat sehingga penulis bisa menulis dan menyelesaikan buku ini. Banyak tantangan yang ditemui penulis dalam menyelesaikan buku ini dari mulai konsistensi dan kekurangan refensi terkait pengelasan. Akhirnya pada suatu waktu penulis mendengar ucapan seorang ulama yaitu “*Menulislah karena dimasa depan orang akan tau bahwa kamu pernah hidup dimasa lalu*” sehingga ini menjadi inspirasi buat penulis untuk menyelesaikan buku yang berjudul **Teknik Pengelasan dan Metalurgi Las**.

Buku ini terdiri dari 14 Bab dimana membahas tentang dasar-dasar teknik pengelasan yang dimulai dari bab 1 pengertian dasar pengelasan, Bab2 Defenisi dan Simbol Las, Bab 3 Pemeriksaan Material dan Jenis Material, Bab 4 Metode Pengelasan SMAW, Bab 5 Proses Pengelasan MIG dan MAG, Bab 6 Proses Pengelasan SAW, Bab 7 Proses Pengelasan GTAW, Bab 8 Bahan Habis Pakai, Bab 9 Kemampuan Las, Bab 10 Perlakuan Panas, Bab 11 Pengujian Destructive Test, Bab 12 Cacat Las, Bab 13 Tegangan Sisa dan Distorsi dan Bab 14 Metalurgi Las.

Buku ini sengaja disusun penulis karena masih kurangnya referensi terkait buku pengelasan dalam bahasa Indonesia yang cocok digunakan untuk semua kalanga. Buku referensi ini sangat sesuai digunakan untuk Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Teknik Pengelasan, Prodi Perawatan dan Perbaikan dan Program studi Metalurgi dan Material, yang sedang menempuh pendidikan di perguruan tinggi vokasi (Politeknik) maupun perguruan tinggi dengan jenjang Strata-1. Pembahasan yang sedikit mendalam pada isi buku ini sangat sesuai digunakan sebagai refensi terutama para peneliti pemula di bidang pengelasan dan metalurgi las. Materi yang disusun bertahap sangat mungkin digunakan rekan-rekan dosen yang

mengampu mata kuliah teknik pengelasan. Buku ini juga sangat bagus sebagai buku pegangan, yaitu sebagai referensi untuk dibaca oleh para praktisi di Industri pengelasan yang ingin mengambil spesialisasi welding Inspector (WI) dan Welding Engineer (WE).

Dalam banyak buku refensi lain selalu sering ditemui istilah dan banyak contoh kasus seperti pada simbol las, elektroda las dan metalurgi las yang sering ditemui perbedaan antara standar pengelasan AWS standard (US) dan EN/ISO standar (Eropa), hal ini sangat membingungkan khususnya para mahasiswa yang baru mempelajari teknik pengelasan dan metalurgi las. Oleh karena itu, dengan terbitnya buku ini diharapkan para pembaca bisa memudahkan dan memahami serta membedakan dengan mudah kedua standar tersebut.

Dalam proses pengelasan sering ditemui kendala seperti terjadinya ketidaksempurnaan hasil pengelasan berupa cacat las seperti kurangnya fusi, retak dingin, distorsi, tegangan sisa dan jenis cacat lainnya. Hal ini dipengaruhi banyak faktor seperti kekurangan sesuaian elektroda dengan material yang akan dilas, perlunya proses perlakuan panas sebelum dan sesudah pengelasan, besarnya masukan panas, kecepatan pengelasan dan lain sebagainya. Dalam buku ini dibahas secara panjang lebar mengapa cacat las bisa terjadi dan bagaimana cara mengatasinya dari refensi terkini yang mengacu pada 2 standar (Amerika dan Eropa). Pengetahuan tentang sifat dan karakteristik dari baja karbon, High-Strength Low-Alloy Steels, Quenched and Tempered Steels, Heat-Treatable Low-Alloy Steels dan Chromium-Molybdenum Steels juga dibahas secara mendalam.

Untuk mendapatkan kualitas sebuah sambungan membutuhkan proses yang cukup panjang sehingga memenuhi standar yang diacu. Proses persiapan pengelasan berupa persiapan peralatan dan pemeriksaan bahan, proses pengelasan dan pemeriksaan akhir hasil pengelasan baik dengan visual maupun pengujian merusak dan tidak merusak. Dalam proses pengelasan

khususnya untuk sebuah kontruksi yang membutuhkan keamanan yang tinggi seperti pada pengelasan bejana bertekanan, fasilitas pada reactor nuklir dan jaringan pipa. Prosedur pengelasan harus mengacu kepada suatu standar yang baku misalnya ASME, ASTM, AWS dan lainnya sehingga didapatkan kualitas sambungan yang baik. Oleh karena itu dengan hadirnya buku ini diharapkan dapat merubah perspektif para pembaca yang ingin menggeluti bidang pengelasan bahwa dalam proses pengelasan dibutuhkan suatu persiapan khusus.

Akhir kata penulis mengucapkan ribuan terimakasih kepada kedua orang tuaku, Istriku (Mutia Dalila) dan anak-anakku Muhammad Azzam Syafiq, Afiqoh Attiyah, Raisya Aqila Mumtaz yang selama ini memberikan Doa, motivasi dan semangat agar bisa menyelesaikan buku ini. Selain itu penulis juga tidak lupa mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang turut membantu dalam menyelesaikan buku referensi ini atas masukan demi kesempurnaan buku ini. Salam hormat buat Dr. Agussani sebagai Rektor UMSU buat kata sambutan didalam buku ini dan terimakasih yang sama penulis haturkan kepada Direktur PT. Atmindu.

Medan Agustus 2020

Penulis

Daftar Isi

Kata Pengantar.....	iii
Daftar Isi.....	vii
Bab 1 Proses Pengelasan	1
1.1. Pendahuluan.....	1
1.2. Jenis-Jenis Pengelasan	1
1.3. Karakteristik dari Pengelasan Fusi	3
1.4. Pengertian Pengelasan	4
1.5. Proses Pengelasan dan Material.....	4
1.6. Keunggulan dan Kerugian Proses Pengelasan.....	6
1.7. Cacat Terkait Fabrikasi.....	9
1.8. Cacat Terkait Layanan	10
1.9. Pencegahan dan Kontrol Cacat.....	11
1.10. Pengantar Proses Pengelasan	12
1.11. Produktifitas.....	13
1.12. Masukan panas (Heat Input).....	13
1.13. Parameter pengelasan.....	15
Bab 2 Istilah Dan Symbol Las.....	21
2.1. Istilah-Istilah Dalam Pengelasan	21
2.1.1 Sambungan (Joint).....	21
2.1.2 Pengelasan (Welding)	21
2.1.3 Jenis-jenis sambungan.....	21
2.1.4 Fitur Hasil Sambungan Las	23
2.1.5 Jenis-jenis Sambungan Las	25
2.1.6 Penetrasi	26
2.1.7 Jenis-jenis sambungan (Types of joints)	26
2.2. Persiapan las	27
2.3. Simbol las (Welding Symbol).....	28

2.3.1 Keuntungan menggunakan symbol Las:	29	4.7. Pengaruh Tegangan (Voltase).....	114
2.3.2. Kekurangan representasi simbolis:.....	29	4.8. Elektroda Las	115
2.3.3. Kombinasi simbol-simbol dasar.....	31	4.8.1. Elektroda Rutile.....	115
2.3.4. Simbol tambahan (Supplementary symbols).....	32	4.8.2. Jenis Elektroda Basic	116
2.3.5 Kebutuhan untuk menentukan spesifikasi Las	34	4.8.3. Elektroda jenis Selulosa	116
2.3.6 Posisi simbol pada gambar	35	4.8.4. Diameter Elektroda	117
Bab 3 Pemeriksaan Material dan Jenis Material	61	4.8.5. Fungsi Penutup Elektroda	120
3.1. Pemeriksaan Material	61	4.9. Logam yang Bisa dilas dengan metode SMAW	122
3.1.1. Pemeriksaan dimensi.....	62	4.10. Ketebalan Logam yang bisa dilas	122
3.1.2. Pemeriksaan dengan Visual	63	4.11. Jenis Cacat dan ketidaksempurnaan Lasan Pada Metode MMA/SMAW	123
3.2. Baja Karbon (Carbon Steels) dan Baja Paduan Rendah (Low Alloys Steels).....	64	4.12. Desain Sambungan Dan Persiapan	124
3.2.1. BAJA KARBON (<i>CARBON STEELS</i>)	69	4.12.1 Jenis Lasan	124
3.2.2. Baja Pemesinan (Free Machining Steels).....	73	4.12.2 Alur Las (<i>Groove Welds</i>)	125
3.2.3. Baja Karbon Rendah (Low Carbon Steels).....	74	4.12.3. Orientasi Elektroda Las	125
3.2.4 Baja Ringan (Mild Steels).....	75	4.13. Keuntungan dan kerugian metode MMA/SMAW	128
3.3. Baja Kekuatan Tinggi Paduan Rendah (High-Strength Low-Alloy Steels).....	86	Bab 5 Pengelasan MIG/ MAG.....	133
3.3.1. Baja Diproduksi Oleh Termomekanikal Proses Terkendali.....	88	5.1. Proses Pengelasan MIG / MAG	133
Bab 4 Pengelasan Metode MMA/SMAW	105	5.2 Variabel Utama Pengelasan MIG	138
4.1. Pendahuluan.....	105	5.2.1 Kecepatan Pengumpan Kawat.....	139
4.2. Peralatan Utama Pengelasan SMAW	108	5.2.2. Tegangan	139
4.2.1. Pemegang Elektroda.....	109	5.2.3. Gas Pelindung	140
4.3. Polaritas	110	5.2.4 Kecepatan pengelasan dan orientasi elektroda.....	151
4.3.1. Arus searah / elektroda positif (DCEP / DC + ve)	110	5.2.5 Efek Ujung Kontak Terhadap Jarak Benda Kerja.....	151
4.3.2. Arus searah / negatif elektroda (DCEN / DC-ve)	110	5.2.6 Efek nozzle pada jarak kerja	153
4.3.3. Arus bolak-balik (AC).....	111	5.2.7 Nozzle Gas Pelindung	154
4.4. Pengaruh kecepatan Pengelasan (<i>Travel Speed</i>)	111	5.2.8 Jenis Transfer Logam	155
4.5. Posisi Pengelasan.....	113	5.2.9 Induktansi	161
4.6. Lokasi Pengelasan.....	114	Bab 6 Pengelasan Submerged Arc Welding (SAW)	163

6.1. Proses Pengelasan SAW	163
6.2 Fluks.....	166
6.3 Variabel proses Pengelasan SAW.....	170
6.3.1 Arus pengelasan	171
6.3.2 Tegangan busur	171
6.3.3 Kecepatan pengelasan	172
6.3.4 Pengaruh Ukuran elektroda.....	173
6.3.5 Ekstensi elektroda	173
6.3.6 Jenis elektroda	174
6.3.7 Lebar dan kedalaman fluks	174
6.4 Penyimpanan dan Pemeliharaan bahan habis pakai	174
6.5 Sumber daya	175
Bab 7 Proses Pengelasan TIG/GTAW.....	177
7.1. Karakteristik Proses Pengelasan TIG	177
7.2. Penggunaan Metode Las TIG	180
7.3. Variabel Proses	181
7.3.1 Arus Pengelasan	182
7.3.2. Jenis Arus dan Polaritas Yang Digunakan	183
7.3.3 Kecepatan Pengelasan	187
7.3.4 Jenis-jenis Elektroda Tungsten	189
7.3.5 Bentuk Ujung Elektroda Tungsten.....	191
7.3.6 Gas Pelindung	192
7.3.7 Laju Aliran Gas Pelindung.....	195
7.3.8 Pengaruh Campuran Gas Pelindung.....	195
7.4 Pembersihan Kembali	198
7.5 Penambahan Panjang elektroda	198
7.6 Kawat pengisi (Filler wires)	199
7.7 Inklusi Tungsten	200
7.8 Retak kawah (<i>Crater Cracking</i>) pada pengelasan TIG.....	200

7.9 Aplikasi Umum.....	200
7.10 Keuntungan dan Kelemahan Pengelasan TIG	201
Bab 8 Bahan Habis Pakai Pengelasan	203
8.1. Bahan Habis Pakai(<i>Consumable</i>)	203
8.2 Bahan Habis untuk pengelasan MMA	203
8.3 Poin Inspeksi untuk Bahan Habis Pakai Metode MMA	210
8.4 Bahan Habis Pakai untuk TIG / GTAW	211
8.5 Bahan Habis Pakai untuk MIG/ MAG.....	212
8.6 Bahan Habis pakai untuk SAW	213
Bab 9 Mampu Las Baja (Weldability of Steels).....	217
9.1. Pendahuluan.....	217
9.2. Faktor-faktor yang mempengaruhi kemampuan las	217
9.3. Retak Hidrogen (Hydrogen Cracking).....	218
9.4. Faktor-faktor yang mempengaruhi kerentanan Retak Hidrogen	220
9.4.1. Menghindari retak Hidrogen pada daerah HAZ.....	221
9.5 Retak Hidrogen pada logam las	226
9.6 Retak Saat Pembekuan (<i>Solidification Cracking</i>).....	228
9.7 Sobekan lamellar (<i>Lamellar Tearing</i>).....	234
9.8 Mekanisme retak.....	235
9.9 Menghindari robekan lamelar	236
9.10 Kerusakan Logam Las (Weld Decay).....	239
Bab 10 Perlakuan Panas (Heat Treatment).....	245
10.1 Pendahuluan.....	245
10.1.1 Perlakuan Panas dengan Gas (<i>Gas furnace heat treatment</i>)	245
10.1.2 Perlakuan Panas menggunakan Selimut Elektrik (<i>electric heating blankets</i>)	246
10.1.3 Perlakuan Panas HF	246
10.2 Perlakuan Panas Preheat	248
10.2.1 Proses Preheat:	249

10.2.2 Aplikasi dan Kontrol Preheat	250	12.4. Retak Lamelar (<i>Lamellar tearing</i>)	291
10.2.3 Suhu Preheat.....	251	12.5. Cacat lubang (cavities).....	292
10.2.4 Penerapan dari Proses Preheat.....	252	12.5.1. Porositas gas (<i>gas porosity</i>).....	293
10.2.5 Bahan sensitif suhu.....	255	12.5.2. Lubang Cacing (Worm Hole).....	294
10.2.6 Termometer kontak	256	12.5.3. Porositas permukaan (<i>surface porosity</i>)	295
10.2.7 Termokopel	256	12.5.4. Cacat <i>Crater Pipe</i>	296
10.2.8 Perangkat optik atau listrik untuk pengukuran tanpa kontak	257	12.6. Cacat Solid Inclusions	297
10.3 Ringkasan.....	258	12.6.1. Cacat Slag inklusi.....	298
10.4 Perlakuan panas pasca Pengelasan/ Post Weld Heat Treatment (PWHT)	258	12.6.2. Inklusi Fluks (<i>Flux inclusions</i>).....	299
10.4.1 PWHT thermal cycle.....	259	12.6.3. Inklusi Oksida (Oxide Inclusions)	299
Bab 11 Pengujian Merusak (Destructive Test).....	261	12.6.4. Masuknya Tungsten ke Kolam Las (Tungsten inclusions)	299
11. 1 Pendahuluan.....	261	12.7 Kurangnya Fusi dan Penetrasi (Lack of Fusion and Penetrations) ..	301
11.2. Jenis Pengujian, Jumlah dan Tujuan.....	262	12.7.1 Kurangnya Fusi Logam Las (Lack of Fusion)	301
11.3. Jenis Pengujian	262	12.7.2 Lack of Penetrasi (kurang Penetrasi)	304
11.3.1 Uji tarik melintang (Transverse tensile tests).....	262	12.8 Ketidaktepatan Bentuk dan Dimensi (<i>Imperfect shape and dimensions</i>)	307
11.3.2. Uji Kekuatan Tarik Logam Las.....	265	12.8.1 Undercut.....	308
11.3.3 Pengujian Ketangguhan (Impact Test).....	267	12.8.2 Logam Las yang Berlebih (Excess Weld Metal)	309
11.3.4 Pengujian kekerasan.....	271	12.8.3 Penetrasi Berlebih (Excess Penetrations).....	311
11.3.5 Pengujian Cracks Tip Opening Displacement (CTOD).....	273	12.8.4 Overlap.....	312
11.3.6 Pengujian Lengkung (Bend Testing).....	275	12.8.5 Linier Misalignment.....	314
11.3.7 Tes fraktur pada Las Fillet	280	12.8.6 Distorsi Sudut (Angular Distortion).....	315
11.3.8 Pengujian Patah Pada Lasan Tumpul (Tes Nick-Break).....	282	12.8.7 Incomplete Filled Groove.....	315
Bab 12 Cacat Las dan Inspeksi Material	285	12.8.8 Lebar Logam Las tidak beraturan (Irregular Width).....	316
12.1. Defenisi Cacat Las	285	12.8.9 Akar Las Cembung (Root Concavity).....	317
11.2 Cacat Retak (Crack).....	285	12.8.10 Burn Through.....	318
12.2.1 Retak panas (<i>Hot Cracks</i>)	286	12.9 Ketidaktepatan Lainnya (Miscellaneous imperfections).....	319
12.2.2 Retak saat pembekuan (Solidification Cracks)	287	12.9.1. Stray Arc.....	319
12.3. Retak yang disebabkan Hidrogen	289	12.9.2 Percikan ke Logam Induk (Spatter).....	320

12.9.3 Permukaan Robek (Torn Surface).....	321
12.9.4 Additonal Imperfection	322
2.10. Standar penerimaan (Acceptance Criteria)	323
Bab 13 Tegangan Sisa dan Distorsi.....	325
13.1. Perkembangan tegangan sisa	325
13.2 Distribusi Tegangan Sisa	326
13.3 Efek dari tegangan sisa	328
13.4 Faktor-faktor yang mempengaruhi tegangan sisa.....	329
13.5 Penyebab Distorsi	330
13.6 Faktor-faktor yang mempengaruhi distorsi.....	332
13.6.1 Sifat Logam Induk.....	332
13.6.2 Pengendalian Distorsi.....	333
13.6.3 Desain sambungan.....	333
13.6.4. Perlengkapan	333
13.6.5 Prosedur pengelasan.....	333
13.7 Pencegahan dengan pengaturan awal, bending atau penggunaan pengendali.....	334
13.7.1 Pengaturan Awal	334
13.7.2 Penekukan Awal.....	335
13.8 Pencegahan distorsi dengan desain yang baik	338
13.8.1 Menghilangkan Proses Pengelasan	338
13.8.2 Penempatan lasan	339
13.8.3 Mengurangi Volume Logam Las	340
13.8.4. Mengurangi Jumlah Run Pengelasan	341
13.8.5 Penggunaan Pengelasan Seimbang	342
Bab 14 Prinsip Metalurgi Lasan	355
14.1. Pendahuluan.....	355
14.2. Daerah dari Las Fusi (Fusion weld).....	356
Glosarium	365

Indeks	367
Daftar Pustaka	370
Biodata Penulis.....	372

Bab 1

Proses Pengelasan

1.1. Pendahuluan

Di seluruh industri, pengelasan adalah cara yang paling banyak digunakan, karena pengelasan adalah suatu cara untuk menghemat biaya dalam menyambung bagian-bagian dari logam untuk merakit sebuah struktur (Linnert, 1994).

Kebanyakan orang setuju bahwa dalam pembuatan konstruksi jembatan, pembangkit listrik tenaga nuklir, pesawat ruang angkasa, dan kapal selam memanfaatkan proses pengelasan, sebagian orang mungkin tidak menyadari bahwa banyak komponen penting, seperti sistem perpipaan tekanan tinggi, transduser, tabung vakum, dan banyak lainnya harus menggunakan pengelasan dalam assemblingnya. Tanpa pengelasan, kita akan kesulitan membangun pesawat jet, kapal, dan banyak perangkat yang mendukung gaya hidup kita saat ini (Linnert, 1994).

Dalam konteksnya yang luas, pengelasan adalah proses di mana logam yang tipenya atau kelas sama disatukan dan menyebabkan bergabung (dan menjadi satu) melalui pembentukan bahan kimia primer (kadang-kadang, sekunder) dengan kombinasi panas dan tekanan (Messler, 1993).

1.2. Jenis-Jenis Pengelasan

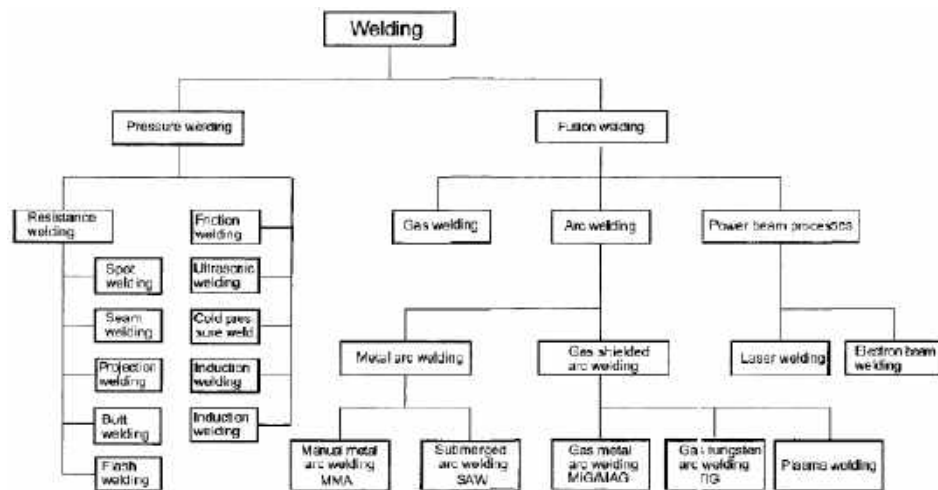
Secara umum proses pengelasan dapat dibagi menjadi 2 (dua) jenis yaitu proses pengelasan dengan tekanan (*pressure welding*) dan proses pengelasan fusi (*Fussion welding*). Adapun jenis-jenis pengelasan tersebut adalah sebagaimana pada gambar (1.1) dibawah.

Tabel 1.1 Nomor referensi beberapa metode pengelasan fusi (ISO 4063). (TWI, 2018)

Metode Pengelasan	Nomor Referensi
Metal Arc Welding dengan lapisan pada elektroda	111

Flux cored wire metal arc welding (FCAW) tanpa gas pelindung	114
Submerged Arc welding (SAW)	12
MIG	131
MAG	135
MAG dengan Flux cored wire	136
TIG	141
Plasma arc Welding	15
Oxy fuel gas welding	31

Definisi proses pengelasan diberikan menurut standar ISO (857). Nomor referensi untuk proses tersebut didefinisikan dalam (ISO 4063). Angka-angka ini kemudian digunakan pada gambar (ISO 2553) atau dalam spesifikasi prosedur pengelasan (EN 288) sebagai referensi.

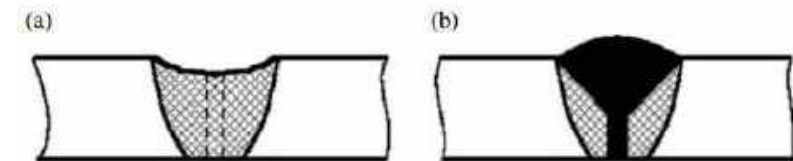


Gambar 1.1. Jenis proses penyambungan logam (Weman, 2003)

1.3. Karakteristik dari Pengelasan Fusi

pengelasan fusi adalah peleburan logam dasar dan logam pengisi dan menghasilkan sambungan las tanpa pemberian tekanan eksternal. Hal ini melibatkan pemanasan pada suhu tinggi dari sebagian kecil dari logam yang dilas, yang dikelilingi oleh logam dasar yang volumenya jauh lebih besar daripada logam yang mencair. Oleh karena itu membutuhkan penggunaan sumber panas yang besar untuk proses pengelasan, pada dasarnya sangat dipengaruhi proses fisikokimia (Deyev, 2006)

Dalam pengelasan fusi, peleburan logam dasar dan logam tambahan (pengisi atau elektroda) dapat terjadi secara bersamaan. Dalam kasus pertama, pembentukan lasan hanya pada logam dasar (Gambar 1.2a), dan pada kasus yang kedua lasan dibentuk oleh logam dasar dan logam tambahan (Gambar 1.2b). Dalam kedua kasus, kolam cair terbentuk dari logam yang mencair, di mana batas-batasnya adalah bagian yang sebagian meleleh dari logam dasar dan lasan yang diproduksi sebelumnya.



Gambar 1.2 Las yang terbentuk karena peleburan: (a) logam dasar; (B) logam dasar dan elektroda pengisi (Deyev, 2006).

Volume kolam las dalam berbagai proses pengelasan fusi dapat bervariasi dari 0,1 hingga 10 cm³, tergantung pada jenis dan jenis proses pengelasan; dalam pengelasan electroslag, mungkin menghasilkan manik las hingga 80 cm³ dan mungkin lebih banyak. Waktu logam kolam-lasan yang tinggal di kondisi cair akan berbeda untuk zona kolam yang berbeda.

1.4. Pengertian Pengelasan

a. Pengelasan Tekanan(Pressure Welding)

Suatu proses pengelasan yang menggunakan kekuatan luar yang cukup besar sehingga menyebabkan deformasi plastis pada kedua permukaan yang akan disambung, umumnya tanpa penambahan logam pengisi. Biasanya, tetapi tidak mesti harus, permukaan yang akan disambung dipanaskan untuk memungkinkan atau untuk menyebabkan suatu ikatan.

b. Pengelasan Fusi (Fusion Welding)

Pengelasan tanpa memberikan kekuatan dari luar di mana permukaan yang akan disambung harus dicairkan. Biasanya, tetapi tidak harus, logam pengisi cair ditambahkan.

1.5. Proses Pengelasan dan Material

Tabel (1.2) dibawah merupakan rangkuman proses pengelasan fusi yang direkomendasikan untuk baja karbon, baja paduan rendah, baja tahan karat, besi tuang, paduan berbasis nikel, dan paduan aluminium. Sebagai contoh pengelasan GMAW dapat digunakan untuk semua bahan dari hampir semua rentang ketebalan tertentu, sementara proses GTAW sebagian besar untuk benda kerja yang lebih tipis. Sebagai contoh lain, setiap proses pengelasan busur yang membutuhkan penggunaan fluks, seperti SMAW, SAW, FCAW, dan ESW, tidak berlaku untuk paduan aluminium (Kou, 2003).

Material	Thickness ¹	SMAW	SAW	GMAW	FCAW	GTAW	PAW	ESW	OFW	EBW	LBW
Carbon steels	S I M T	X X X X	X X X X	X X X X	X X X X	X X			X X X X	X X X X	X X X
Low-alloy steels	S I M T	X X X X	X X X X	X X X X	X X X X	X X		X	X	X X X X	X X X
Stainless steels	S I M T	X X X X	X X X X	X X X X	X X X X	X X	X X X	X	X	X X X X	X X X
Cast iron	I M T	X X X	X X		X X				X X X		
Nickel and alloys	S I M T	X X X X	X X	X X X X	X X X X	X X	X X X	X	X	X X X X	X X
Aluminum and alloys	S I M T					X X X	X			X X X X	X X

* Process code: SMAW, shielded metal arc welding; SAW, submerged arc welding; GMAW, gas-metal arc welding; FCAW, flux-cored arc welding; GTAW, gas-tungsten arc welding; PAW, plasma arc welding; ESW, electron beam welding; EBW, electron beam welding; OFW, oxyfuel gas welding; LBW, laser beam welding.

¹ Abbreviations: S, sheet, up to 3 mm (1/8 in.); I, intermediate, 3-6 mm (1/4-1/2 in.); M, medium, 6-19 mm (1/4-3/4 in.); T, thick, 19 mm (3/4 in.) and up; X, recommended.

Source: *Welding Handbook* (3).

Tabel 1.2.jenis-jenis teknik pengelasan dan kemampuan las

1.6. Keunggulan dan Kerugian Proses Pengelasan

Seperti pada semua proses penyambungan logam, pengelasan menawarkan beberapa keuntungan tetapi juga memiliki beberapa kelemahan. Keuntungan paling signifikan dari pengelasan yang tidak diragukan lagi bahwa proses pengelasan memberikan integritas struktural yang luar biasa, menghasilkan sambungan dengan efisiensi sangat tinggi. Kekuatan sambungan yang dilas secara terus menerus dapat dengan mudah hampir atau melampaui kekuatan logam dasar yang dilas. Situasi yang terakhir dimungkinkan dengan memilih desain yang lebih besar dengan luas penampang dari elemen sambungan dan/ atau filler yang memiliki kekuatan lebih tinggi dari bahan dasar (Mesler, 2004).

Keuntungan lain dari pengelasan adalah berbagai proses dan pendekatan yang dapat dipilih dan beragam material yang dapat dilas. Hampir semua logam dan paduan, pada banyak polimer (termoplastik), tidak semua gelas, dan beberapa keramik dapat dilas, dengan atau tanpa logam pengisi tambahan (Mesler, 2004). Keunggulan proses pengelasan lainnya adalah

1. Suatu proses yang dapat dilakukan secara manual, semi otomatis, atau sepenuhnya otomatis;
2. Beberapa proses pengelasan dapat dipindahkan (*portable*) untuk diterapkan di lapangan pada pemasangan struktur yang besar di suatu lokasi atau untuk proses pemeliharaan dan perbaikan sebuah struktur dan peralatan tersebut;
3. Lasan kontinu pada logam untuk menahan tekanan dari fluida (proses pengelasan jadi pilihan untuk membuat bejana tekan);
4. Pengelasan (lebih baik daripada kebanyakan proses penyambungan lainnya) dapat dilakukan dari jarak jauh di lingkungan berbahaya (misalnya, di bawah air, di area radiasi, di luar angkasa) menggunakan robot; dan
5. Untuk sebagian besar aplikasi, biaya yang dikeluarkan cukup rasional. Pengecualian pada pernyataan terakhir tadi yaitu ketika dilakukan pada pengelasan sangat kritis, dengan persyaratan kualitas lasan yang sangat ketat

atau melibatkan aplikasi khusus (misalnya pada pengelasan bagian yang sangat tebal) (Mesler, 2004).

Kerugian terbesar dari proses pengelasan adalah sulit dilakukan pembongkaran. Meskipun sering dipilih hanya karena menghasilkan sambungan permanen, pertimbangan pembuangan akhir suatu produk (atau struktur) pada akhir masa pakainya menyebabkan para perancang modern memikirkan kembali bagaimana mereka akan melakukan penyambungan. Contoh utama adalah perlunya otoritas pengatur di bekas Negara Jerman Barat untuk membongkar reaktor nuklir di bekas Jerman Timur yang memiliki desain mirip dengan reaktor yang terjadi kegagalan seperti di Chernobyl di bekas Negara Uni Soviet (Mesler, 2004).

Kerugian utama yang kedua dari banyak proses pengelasan adalah bahwa kebutuhan akan panas dalam menghasilkan banyak lasan dapat mengganggu struktur dasar material pada skala mikro dan menurunkan sifat mekanisnya. Masukan panas yang tidak seimbang juga dapat menyebabkan distorsi atau masuknya tegangan sisa yang dapat menimbulkan masalah dari beberapa sudut pandang. Pertimbangan serius ketiga, tetapi tidak selalu merugikan adalah bahwa pengelasan membutuhkan keterampilan operator yang cukup besar, atau, sebagai pengganti operator yang terampil, dibutuhkan sistem pengelasan otomatis canggih. Keduanya, bersama dengan aplikasi khusus yang disebutkan di atas, dapat menyebabkan biaya tinggi (Mesler, 2004).

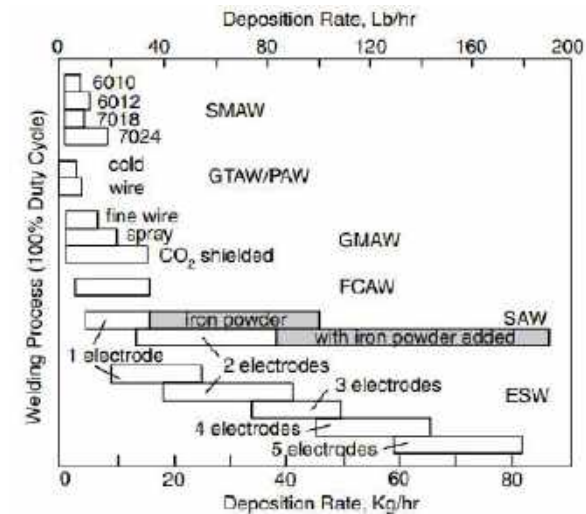
Tabel (1.3) dibawah merupakan rangkuman kelebihan dan kekurangan utama atau keterbatasan pengelasan sebagai cara penyambungan bahan atau part menjadi sebuah struktur.

Tabel 1.3 Keuntungan dan kerugian pengelasan sebagai Proses penyambungan (Mesler, 2004)

	Keuntungan	Kerugian
1	Bisa untuk penyambungan struktur baja yang luar biasa dengan integritas dan efisiensi yang tinggi, dimana	Tidak mungkin membongkar sambungan tanpa menghancurkannya

	tidak akan longgar atau lepas secara tidak sengaja	
2	Penggunaannya luas dengan berbagai macam perwujudan	Panas pada pengelasan menurunkan sifat-sifat dasar material
3	Bisa diaplikasikan untuk banyak bahan di dalamnya	Masukan panas yang tidak seimbang mengarah terjadinya kedistorsi atau tegangan sisa
4	Bisa dioperasikan dengan cara manual atau otomatis	Membutuhkan keterampilan operator yang memadai
5	Dapat digunakan untuk pengelasan diluar dan dalam ruangan	Biayanya bisa lebih mahal untuk penyambungan material tebal
6	Sambungan anti bocor dengan pengelasan kontinyu	Investasi untuk pembelian peralatan bisa mahal (missal pada metode elektrone beam dan ruang hampa udara)
7	Biaya proses pengelasan masih rasional	

Gambar 1.3 merangkum tingkat doposit dari proses pengelasan busur (arc welding), laju deposit las meningkat dalam urutan GTAW, SMAW, GMAW dan FCAW, SAW, dan ESW. Laju pengendapan dapat jauh meningkat dengan menambahkan serbuk besi pada pengelasan SAW atau menggunakan lebih dari satu kawat pada SAW, ESW, dan GMAW (tidak diperlihatkan).



Gambar 1.3 Tingkat deposisi las dalam proses pengelasan busur

1.7. Cacat Terkait Fabrikasi

Cacat terkait fabrikasi termasuk fenomena retak yang terkait dengan sifat metalurgi dari lasan dan cacat terkait proses dan/ atau prosedur. Daftar cacat fabrikasi umum disediakan pada Tabel (1.4). Cacat yang terkait dengan perilaku metalurgi bahan dapat dikelompokkan secara luas pada kisaran suhu di mana terjadi. Retak panas (*Hot cracking*) termasuk fenomena retak yang terkait dengan keberadaan cairan dalam struktur mikro dan terjadi di zona fusi dan daerah Partial Melting Zone (PMZ) dari daerah *Heat Affected Zone (HAZ)*. Lapisan film cair sepanjang batas butir biasanya dikaitkan dengan bentuk retak ini.

Retak hangat terjadi pada suhu tinggi dalam keadaan padat, yaitu, tidak ada cairan hadir dalam struktur mikro. Cacat ini dapat terjadi di zona fusi dan HAZ. Semua fenomena retak hangat dikaitkan dengan batas butir. Retakan dingin terjadi pada atau di dekat suhu kamar dan biasanya identik dengan retakan yang diinduksi hidrogen. Bentuk retak ini bisa berupa mengikuti batas butir (*intergranular*) atau melewati batas butir (*transgranular*).

Sejumlah cacat non-metalurgi yang dapat terjadi selama fabrikasi juga tercantum pada Tabel 1.4. Ini umumnya terkait dengan kontrol proses/ prosedur

yang buruk dan termasuk kurangnya fusi, *undercut*, penetrasi yang tidak lengkap, dan cacat geometrik. Cacat seperti itu biasanya dapat diperbaiki dengan memperhatikan kondisi proses, desain sambungan, persiapan bahan (pembersihan), dan lain-lain. Pada bab ini tidak akan dibahas sifat atau perbaikan jenis cacat ini.

Tabel 1.4 cacat terkait fabrikasi

- | | |
|---|---|
| 1 | Retak Panas (<i>Hot Cracking</i>) seperti pada pembekuan lasan (<i>weld solidification</i>), HAZ <i>liquation</i> dan <i>weld metal liquation</i> |
| 2 | Retak Hangat (<i>Warm Cracking</i>) seperti <i>Ductility Dip</i> , pemanasan kembali logam (<i>Reheat/PWHT</i> , <i>Strain age</i> dan <i>Liquid metal embrittlement</i> (LME) |
| 3 | Retak Dingin (<i>Cold Cracking</i>) seperti hydrogen induced (atau hydrogen assisted) cracking dan <i>Delayed cracking</i> |
| 4 | Kontrol Proses seperti Lack of Fusion, weld undercut, Excessive overbead dan slag inclusions |
| 5 | Cacat Lain seperti cacat geometri (disain atau fit up), anomaly metalurgi (antara lain pelunakan local atau kerapuhan) dan porositas |

Sumber: J.C. Lippold, (2015)

1.8. Cacat Terkait Layanan

Pengelasan bersifat metalurgi yang berbeda dari logam dasar dan mungkin juga mengandung tegangan sisa, mereka sering rentan terhadap kegagalan jauh sebelum logam dasar rusak. Cacat ini biasanya dimanifestasikan sebagai retakan yang terbentuk di bawah kondisi lingkungan dan/ atau karena kondisi mekanik tertentu. Jenis cacat terkait layanan disediakan pada Tabel 1.5.

Korosi pada lasan sering menjadi masalah karena kondisi struktur mikro dan mekanik lokal dari struktur yang dilas. Kehadiran cacat yang terkait dengan fabrikasi seringkali dapat mempercepat kegagalan, terutama karena kelelahan. Lasan pada banyak bahan rekayasa mungkin mengandung daerah lunak yang dapat meningkatkan kegagalan mekanis. Sebaliknya, zona keras lokal dapat mengurangi keuletan dan kemungkinan kegagalan getas.

Tabel 1.5 cacat pengelasan

- | |
|----------------------------|
| Penyebabnya hydrogen |
| Factor lingkungan (korosi) |
| Relaksasi retak |
| Kelelahan |
| Tegangan patah |
| Mulur dan kelelahan mulur |
| Korosi lelah |
| Beban berlebih |

Sumber: J.C. Lippold, (2015)

1.9. Pencegahan dan Kontrol Cacat

Meskipun pemahaman tentang mekanisme yang mengarah ke berbagai bentuk retak adalah penting, mengembangkan metodologi untuk mencegah retak adalah tujuan akhir dari insinyur pengelasan. Langkah-langkah pencegahan biasanya tidak dapat dikembangkan sampai sifat kegagalan dipahami. Dalam beberapa kasus, perubahan dalam teknik pengelasan, atau prosedur, yang mungkin lebih efektif. Misalnya, perubahan sederhana pada besar masukan panas dan bentuk manik las kadang-kadang dapat mencegah retak pembekuan las. Contoh lain adalah penggunaan pemanasan sebelum pengelasan (*preheat*) dan kontrol suhu interpass untuk mencegah retak yang disebabkan oleh hidrogen.

Proses pengelasan pada dasarnya adalah proses yang sederhana dimana hanya menyebabkan sejumlah besar atom dari bahan dasar yang terdiri dari elemen-elemen sambungan untuk menyatu bersama-sama dengan jarak yang setimbang. Hasilnya akan menjadi satu bagian dari banyak part yang disambung, dengan kontinuitas struktur dan sifat pada tingkat mikroskopis dan makroskopis. Pada kenyataannya, situasinya agak diperumit dengan kehadiran kekasaran pada permukaan bagian nyata yang membatasi titik kontak, serta oleh adanya lapisan

kontaminan dalam bentuk lapisan oksida atau noda, gas atau uap yang teradsorpsi, atau cat, lemak, minyak, atau kotoran. Dua cara utama untuk mengatasi hambatan ini adalah dengan menggunakan panas dan tekanan dalam beberapa kombinasi. Ketika dilakukan dengan baik, pengelasan menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan metode penyambungan lain.

Sebelum langkah-langkah pencegahan tersebut dapat diterapkan, sifat kegagalan harus ditentukan agar tidak mengarah pada masalah kemampuan las lainnya. Banyak logam lasan paduan Nikel rentan terhadap retak saat pembekuan dan *dip cracking*, tetapi perbaikan untuk masing-masing jenis cacat berbeda. Buku ini memberikan latar belakang yang diperlukan untuk memahami dan menafsirkan kegagalan pengelasan dan merekomendasikan kemungkinan perbaikan untuk kegagalan tersebut. Perlu dicatat, bahwa solusi pada banyaknyapermasalahanpada proses pengelasan kadang membutuhkan perubahan material daripada “penyesuaian” parameter komposisi atau proses. Sekali lagi, pengetahuan tentang mekanisme kegagalan yang tepat diperlukan sebelum tindakan perbaikan dapat diimplementasikan.

1.10. Pengantar Proses Pengelasan

Karakteristik umum dari empat proses pengelasan busur utama, MMA, TIG, MIG/MAG dan SAW adalah:

- Busur timbul ketika terjadi pelepasan aliran listrik di celah antara elektroda dan logam induk.
- Pelepasan aliran listrik menyebabkan percikan terbentuk yang menyebabkan gas sekitarnya terionisasi.
- Gas terionisasi memungkinkan arus mengalir melintasi celah antara elektroda dan logam dasar sehingga menciptakan busur.
- Busur menghasilkan panas untuk peleburan logam dasar.
- Dengan pengecualian, proses pengelasan TIG, panas yang dihasilkan oleh busur juga menyebabkan permukaan elektroda mencair dan tetesan cairan logam jatuh menetes ke kolam las (*weld pool*) untuk membentuk manik las.

- Masukan panas ke zona fusi tergantung pada tegangan, arus busur dan kecepatan pengelasan (*travel speed*).

1.11. Produktifitas

Sebagian besar pada proses pengelasan, pengelasan pada posisi PA (datar atau 1G) menghasilkan tingkat deposisi logam las tertinggi produktivitas. Untuk pengelasan elektroda yang habis proses laju transfer logam cair ke kolam lasan secara langsung berkaitan dengan densitas arus pengelasan (rasio arus ke diameter elektroda). Untuk pengelasan TIG, semakin tinggi arus, semakin banyak energi yang ada untuk fusi semakin tinggi tingkat di mana logam pengisi dapat ditambahkan ke kolam lasan (*weld pool*).

1.12. Masukan panas (Heat Input)

Energi busur (*arc energy*) adalah jumlah panas yang dihasilkan dalam busur pengelasan per satuan panjang las dan biasanya dinyatakan dalam kilo joule per mili meter lasan (kJ/mm) Masukan panas (HI) untuk pengelasan busur dihitung dari rumus berikut ini :

$$\text{Arc energy (kJ/mm)} = \frac{\text{Volt} \times \text{Ampere}}{\text{Travel Speed (mm/sec)} \times 1000} \quad (1.1)$$

Masukan panas adalah energi yang disediakan oleh busur las ke benda kerja dan dinyatakan dalam energi busur x faktor efisiensi termal. Faktor efisiensi termal adalah rasio energi panas ke busur pengelasan energi listrik yang dikonsumsi oleh busur. Nilai masukan panas ke las untuk berbagai proses dapat dihitung dari energi busur dengan mengalikan dengan faktor efisiensi termal berikut:

SAW (wire electrode)	1.0
MMA (covered electrode)	0.8
MIG/MAG	0.8
FCAW (with or without gas shield)	0.8
TIG	0.6
Plasma	0.6

Contoh

Lasan dibuat menggunakan proses pengelasan MAG dan kondisi pengelasan sebagai berikut :

Volts : 24

Amps : 240

Kecepatan pengelasan : 300 mm per menit

$$\begin{aligned} \text{Arc energy (kJ/mm)} &= \frac{\text{Volt} \times \text{Ampere}}{\text{Travel Speed (mm/sec)} \times 1000} \\ &= \frac{24 \times 240}{300/60 \times 1000} \\ &= \frac{5760}{5000} \end{aligned}$$

Arc energy = 1.152 or 1.2 kJ/mm

Heat input = 1.2 x 0.8 = 0.96 kJ/mm

Heat input terutama dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan

Posisi pengelasan dan proses memiliki pengaruh besar pada kecepatan pengelasan yang dapat digunakan. Untuk pengelasan manual dan semi-otomatis, berikut ini adalah prinsip umum:

- **Vertikal-up progression** cenderung memberikan input panas tertinggi karena ada kebutuhan untuk mendapatkan profil las yang sesuai dan kecepatan pengelasan relatif lambat.
- **Vertikal Down** Pengelasan vertikal ke bawah cenderung memberikan input panas terendah karena kecepatan pengelasan cepat .
- Pengelasan horizontal-vertikal adalah posisi pengelasan masukan panas yang relatif rendah karena tukang las tidak bisa membuat manik las di posisi ini.
- Pengelasan diatas kepala (**Overhead welding**) cenderung memberi masukan panas rendah karena harus digunakan untuk arus rendah dan pengelasan relatif cepat.
- Pengelasan dalam posisi datar (bagian bawah) dapat menjadikan input panas rendah atau tinggi, posisi tukang las memiliki keuntungan lebih banyak untuk fleksibilitas kecepatan pengelasan

- Dari proses pengelasan busur, SAW memiliki potensi untuk memberikan input panas paling tertinggi dan deposisi dan TIG dan MIG/ MAG dapat menghasilkan input panas yang sangat rendah
- Nilai input panas yang khas untuk pengelasan masukan panas terkontrol akan cenderung ~ 1.0- 3.5kJ / mm.

1.13. Parameter pengelasan

1. Tegangan busur

Tegangan busur berhubungan dengan panjang busur. Untuk proses di mana tegangan busurnya dikontrol oleh operator las (SAW, MIG/ MAG dan FCAW) dan dapat bervariasi dari arus, pengaturan tegangan akan mempengaruhi profil las. Saat arus pengelasan dinaikkan, tegangan juga perlu dinaikkan untuk menghasilkan endapan yang lebih lebar dan datar. Untuk pengelasan MIG/ MAG, tegangan busur memiliki pengaruh besar pada transfer droplet melintasi busur.

2. Arus Pengelasan

Arus Pengelasan memiliki pengaruh besar pada kedalaman fusi / penetrasi ke dalam logam dasar dan jalannya pengelasan. Sebagai aturan, semakin tinggi arus semakin besar kedalaman penetrasi. Kedalaman penetrasi mempengaruhi pengenceran (*dilution*) deposit las oleh logam induk dan itu sangat penting untuk mengontrol ini ketika logam yang berbeda bergabung.

3. Polaritas

Polaritas merupakan penentu apakah sebagian besar energi busur (panas) terkonsentrasi pada permukaan elektroda atau di permukaan logam induk. Lokasi panas sehubungan dengan polaritas tidak sama untuk semua proses dan efek/ opsi/ manfaat untuk masing-masing pengelasan busur utama, proses dirangkum di bawah ini.

Tabel 1.5 Polaritas pada pengelasan

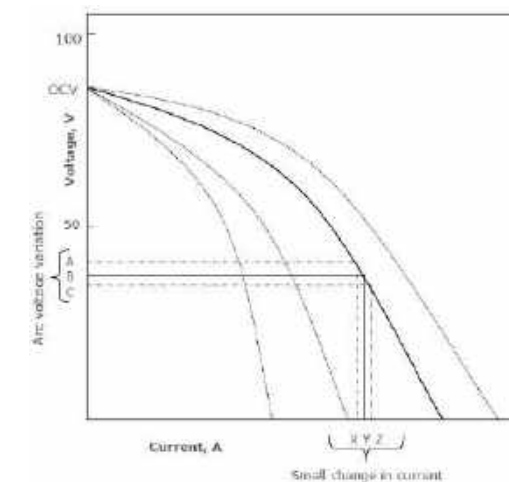
Proses	Polaritas		
	DC+Ve	DC-Ve	AC
MMA	Penetrasinya yang baik	Penetrasinya kurang akan tetapi lebih tinggi tingkat deposisinya (digunakan untuk pengelasan root pass dan weld overlay)	Tidak cocok untuk beberapa elektroda. Meminimalkan tiupan busur
TIG	Jarang digunakan karena tungsten terlalu panas	Digunakan untuk semua logam kecuali Paduan Al/ Al dan Mg/ Mg paduan	Diperlukan untuk logam Aluminium/ Al paduan untuk memutus refraktori oksida film
GMAW solid wires (MIG/MAG)	Digunakan untuk semua logam dan hampir pada semua situasi	Jarang digunakan	Tidak digunakan
FCAW/MCAW gas-shielded and self shielded cored wires	Paling umum digunakan	Beberapa posisi dasar kawat fluks dirancang untuk menjalankan polaritas negatif; beberapa logam mungkin juga kawat las digunakan pada polaritas negatif khususnya untuk posisi pengelasan	Tidak digunakan
SAW	Penetrasi yang baik	Penetrasi kurang tetapi lebih tinggi tingkat deposisi (digunakan untuk root pass dan overlay)	Digunakan untuk menghindari tiupan busur listrik, khususnya untuk multi-elektroda sistem

Karakteristik sumber Arus

Untuk menimbulkan busur listrik, dibutuhkan tegangan yang relatif tinggi untuk menghasilkan percikan antara elektroda dan logam induk. Ini dikenal sebagai tegangan rangkaian terbuka (*Open Circuit Voltage*) dan biasanya kira-kira 50-90V. Setelah busur terbentuk dan distabilkan ada hubungan antara tegangan busur dan arus yang mengalir melalui rangkaian pengelasan yang tergantung pada karakteristik listrik dari sumber arus. Hubungan ini dikenal sebagai karakteristik statis sumber daya dan sumber daya dibuat untuk memberikan karakteristik arus atau tegangan konstan.

Sumber tenaga dengan arus konstan

Ini adalah jenis sumber tenaga yang disukai untuk pengelasan manual (MMA dan TIG manual). Hubungan voltase-tegangan untuk sumber arus yang konstan ditunjukkan pada Gambar 1.4 dan menunjukkan posisi tidak ada arus (OCV) dan dari titik ini ada kurva tegangan busur/ arus yang bergantung pada sumber daya untuk berbagai pengaturan arus.



Gambar 1.4 jenis Kurva voltase-ampere untuk sumber tenaga arus konstan.

Pada pengelasan manual (MMA dan TIG manual), tukang las menetapkan arus yang diperlukan pada sumber arus tetapi tegangan busur dikontrol oleh panjang busur yang digunakan operator las. Operator las harus bekerja dalam kisaran panjang busur yang cukup sempit untuk pengaturan arus tertentu, jika

terlalu panjang busur akan padam, tetapi jika terlalu pendek dan elektroda dapat mati ke dalam kolam las dan busur akan padam. Untuk prinsip pengoperasian jenis sumber tenaga ini, lihat Gambar 1.4.

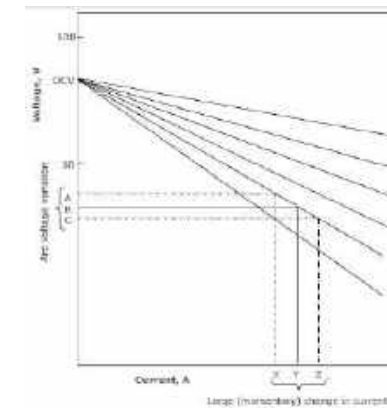
Operator las tetap harus mencoba menahan panjang busur yang cukup konstan (B pada Gambar 1.5) untuk arus (Y) yang telah ditetapkan. Namun, ia tidak dapat menjaga panjang busur konstan dan itu akan bervariasi pada rentang kerja kecil (A-C) karena gerakan tangan normal selama pengelasan. Sumber arus dirancang untuk memastikan bahwa perubahan kecil pada tegangan busur selama pengelasan normal hanya akan memberikan perubahan kecil pada arus (X ke Z). Dengan demikian arus dapat dianggap pada dasarnya konstan dan ini memastikan bahwa tukang las mampu mempertahankan kontrol fusi. Bentuk drooping dari kurva volt-amp telah menyebabkan sumber arus konstan kadang-kadang dikatakan memiliki karakteristik drooping.

Sumber Arus tegangan konstan

Ini adalah jenis sumber daya yang disukai untuk proses pengelasan yang memiliki pengumpan kawat (MIG / MAG, FCAW dan SAW). Kecepatan dan arus umpan kawat berhubungan langsung sehingga arus meningkat, demikian juga kecepatan umpan dan peningkatan yang sesuai dalam tingkat burn-off untuk mempertahankan panjang/ tegangan busur. Prinsip operasi dari jenis sumber daya ini ditunjukkan pada Gambar 3.6.

Tukang las menetapkan tegangan B dan arus Y pada catu daya. Jika panjang busur dikurangi menjadi C (karena variasi dalam profil pengelasan atau ketika tangan tukang las bergerak ke atas dan ke bawah selama pengelasan semi-otomatis) akan ada peningkatan sesaat dalam arus pengelasan ke Z. Semakin tinggi arus Z memberikan semakin tinggi tingkat burn-off yang membawa panjang busur (dan tegangan busur) kembali ke nilai yang telah ditentukan. Demikian pula, jika panjang busur meningkat, arus dengan cepat turun ke X dan laju burn off berkurang sehingga panjang busur dikembalikan ke tingkat sebelum pengaturan B.

Dengan demikian, meskipun tegangan busur sedikit bervariasi selama pengelasan, perubahan arus yang mengembalikan tegangan ke nilai yang ditentukan sebelumnya terjadi dengan sangat cepat sehingga tegangan dapat dianggap konstan. Hubungan garis lurus antara tegangan dan arus dan gradien yang relatif kecil adalah mengapa sumber daya jenis ini sering disebut memiliki karakteristik datar.



Gambar 1.5 Kurva jenis voltase-ampere untuk sumber tenaga dengan tegangan konstan.

Bab 2

Istilah Dan Symbol Las

2.1. Istilah-Istilah Dalam Pengelasan

Dalam pengelasan banyak istilah-istilah yang sering digunakan dilapangan yang tentunya harus dipahami dengan baik. Oleh karena itu sebelum mempelajari tentang teknik pengelasan dan metalurgi las ada baiknya terlebih dahulu kita pelajari istilah-istilah yang sering digunakan dalam pengelasan logam.

2.1.1 Sambungan (Joint)

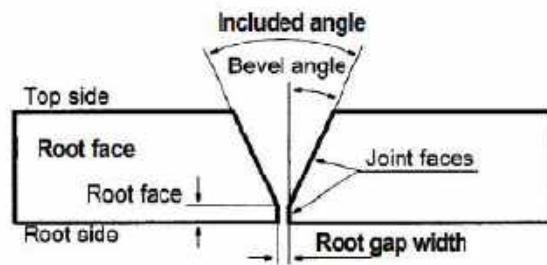
Penyambungan (Joint) adalah proses penyambungan di mana komponen atau suatu bagian yang terpisah, dipersiapkan dan dirakit, disambung dengan cara pengelasan atau bisa juga dengan brazing.

2.1.2 Pengelasan (Welding)

Suatu operasi di mana dua atau lebih bagian disatukan oleh panas, tekanan atau dengan keduanya, dengan sedemikian rupa sehingga ada kontinuitas dalam sifat logam antara bagian-bagian ini.

2.1.3 Jenis-jenis sambungan

Jenis sambungan dipilih sehubungan dengan metode pengelasan dan ketebalan pelat. Sambungan ideal memberikan kekuatan dan kualitas struktural yang diperlukan tanpa volume sambungan besar yang tidak perlu. Biaya las meningkat dengan ukuran sambungan, dan input panas yang lebih tinggi akan menyebabkan masalah dengan kekuatan dampak dan distorsi. Persiapan sambungan juga bisa mahal; oleh karena itu lebih disukai untuk menggunakan jenis sambungan di mana permukaan sambungan adalah bagian dari benda kerja. Ini berarti bahwa lasan fillet mungkin merupakan sambungan yang paling umum digunakan (Klas Weman, 2003)



Gambar 2.1 terminologi sambungan las (Klas Weman, 2003)

Tabel 2.1 jenis sambungan, sketsa dan defenisi (TWI, 2018)

No	Jenis sambungan	Sketsa	Defenisi
1	Tumpul (Butt)		Menghubungkan antara ujung atau tepian dari dua bagian yang membentuk sudut 135-180°
2	Tee		Menyambung antara ujung atau ujung satu bagian dan permukaan bagian lainnya, bagian-bagian yang membentuk sudut yang satu dengan sudut lainnya lebih dari 5 hingga 90°.
3	Sudut (corner)		penyambungan antara ujung atau tepian dari dua bagian yang membuat suatu sudut lebih dari 30° tetapi kurang dari 135°.
4	Ujung (edge)		penyambungan antara dua sisi bagian-bagian yang membentuk sudut satu sama lain 0-30°

5	Silang (Cruciform)		penyambungan di mana dua pelat datar atau dua batang yang dilas ke plat lain di sudut kanan dan pada sumbu yang sama.
6	Tindih (Laps)		sambungan antara dua bagian yang tumpang tindih yang membentuk sudut satu sama lain 0-5°

2.1.4 Fitur Hasil Sambungan Las

1. logam Induk (Parent Metal)

Logam dasar yang akan digabungkan/sambung dengan proses pengelasan, bras weld atau brazing.

2. Filler metal adalah logam penambah selama proses pengelasan, atau mematri

3. Daerah Las (Weld Metal) adalah semua logam meleleh selama proses pengelasan dan menjadi daerah lasan.

4. Zona terpengaruh panas (Heat Affected Zone) merupakan bagian logam induk yang dipengaruhi oleh panas saat proses pengelasan atau pemotongan termal tetapi tidak meleleh/cair.

5. Fusion line adalah sebuah batas antara logam las dan daerah HAZ dalam lasan fusi.

6. Zona pengelasan (Weld Zone) adalah Zona yang mengandung logam las dan daerah HAZ.

7. Permukaan Las (Face Weld) merupakan permukaan dari daerah las fusi akhir dari sebuah proses pengelasan yang dilakukan.

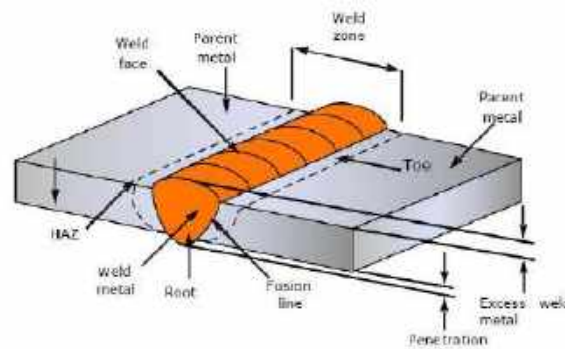
8. Akar Las (Root) ialah Zona di sisi pengelasan pertama terjauh dari tukang las.

9. **Toe** adalah Batas antara permukaan lasan dan logam induk atau antara lintasan awal. Hal ini adalah fitur yang sangat penting dari lasan karena jari-jari kaki adalah titik konsentrasi tegangan tertinggi dan sering merupakan titik inisiasi terjadinya berbagai jenis retakan (mis kelelahan dan retakan dingin). Untuk mengurangi konsentrasi tegangan, jari-jari kaki harus halus (smoot).

10. Kelebihan logam las (Ecess Weld)

Kelebihan logam Las pada daerah logam las baik tinggi maupun lebarnya dari hasil pengukuran sesuai dengan suatu standar.

Penamaan bagian-bagian pada sambungan tumpul seperti ditunjukkan gambar (2.2), sedangkan bagian-bagian untuk sambungan fillet ditunjukkan pada gambar (2.3)



Gambar 2.2. Penamaan bagian-bagian pada sambungan tumpul (butt weld) (TWI, 2018)

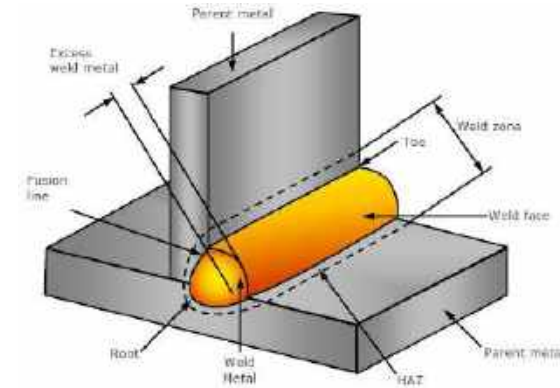
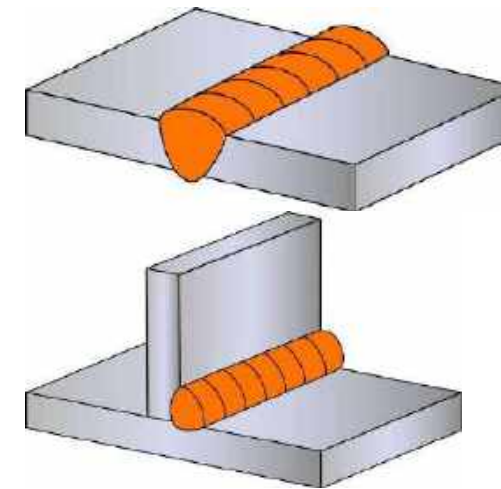
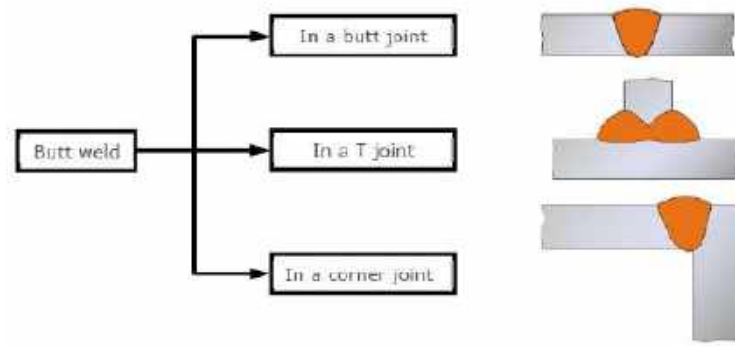


Figure 2.3. Penamaan bagian-bagian dari Sambungan Fillet (Fillet weld) (TWI, 2018)

2.1.5 Jenis-jenis Sambungan Las



Gambar 2.4 Sambungan Tumpul (Butt Weld) dan Sambungan Fillet (Fillet Weld)
Pengelasan tumpul dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu sambungan tumpul, sambungan T dan sambungan tepi (gambar 2.5)



Gambar 2.5. Konfigurasi Sambungan tumpul (butt weld) (TWI, 2018)

2.1.6 Penetrasi

a. Pengelasan penetrasi Penuh (Full Penetration Weld)

Suatu sambungan las di mana logam las sepenuhnya menembus sambungan dengan penuh sampai ke akar (root). Menurut AWS standar (Amerika Serikat) istilah ini disebut dengan penetrasi sambungan lengkap (Complete Joint Penetration) (lihat AWS D1.1.).



Figure 2.6 Penetrasi Penuh (full penetration weld). (TWI, 2018)

b. Pengelasan penetrasi Sebagian (Partial Joint Penetration)

Sambungan las tanpa penetrasi penuh menurut standar AWS diistilahkan dengan sambungan penetrasi parsial.



Gambar 2.7 Pengelasan Penetrasi sebagian (partial penetration weld)

2.1.7 Jenis-jenis sambungan (Types of joints)

a. Homogen

Proses penyambungan dengan pengelasan di mana logam las (weld metal) dan logam induk tidak memiliki perbedaan signifikan dalam sifat

mekanik dan/ atau komposisi kimia. Contoh: Dua pelat baja karbon dilas dengan elektroda baja karbon yang cocok.

b. Heterogen

Proses penyambungan logam dengan pengelasan di mana logam las dan material induk memiliki perbedaan signifikan dalam sifat mekanik dan/ atau komposisi kimia. Contoh: perbaikan lasan dari barang besi cor dilakukan dengan elektroda berbasis nikel.

c. Dissimilar/ Transition

Proses penyambungan logam dengan pengelasan di mana logam induk memiliki perbedaan yang signifikan pada sifat mekanik dan/ atau komposisi kimia. Contoh: Baja karbon dilas dengan baja anti karat austenitik pada untuk Bejana tekan (pressure vessel).

2.2 Persiapan las

Persiapan dilakukan untuk membuat sambungan pada suatu komponen dipersiapkan sesuai dengan standar, penggabungan dengan pengelasan atau brazing dimana dimensi dapat bervariasi tergantung pada Welding Procedure Specification (WPS).

A. Persiapan lasan

1) Sudut bevel

Sudut di mana tepi komponen disiapkan untuk membuat lasan. Untuk las SMAW/MMA pada pelat baja karbon, sudutnya adalah:

- 25-30° untuk kampuh V
- 8-12° untuk kampuh U
- 40-50° untuk kampuh single bevel
- 10-20° untuk kampuh J

Sudut antara bidang fusi bagian yang akan dilas. Untuk kampuh (groove) V tunggal dan ganda atau kampuh U sudut ini adalah dua kali sudut bevel. Dalam kasus bevel tunggal atau ganda, bevel J tunggal atau ganda, sudut yang disertakan sama dengan sudut kemiringan.

2) Celah (Gap)

Jarak minimum pada setiap penampang antara tepi, ujung, atau permukaan bergabung. Nilainya tergantung pada proses pengelasan yang digunakan dan aplikasi; untuk sebuah las dengan penetrasi penuh pada pelat baja karbon, memiliki nilai kira-kira 1-4 mm.

3) Radius akar

Jari-jari bagian melengkung dari permukaan fusi dalam komponen disiapkan untuk pengelasan dengan kampuh J atau U tunggal atau ganda.

4) Land

Bagian lurus dari permukaan fusi antara permukaan akar dan jari-jari dari kampuh J atau U bisa 0. Biasanya pada proses pengelasan MIG dari paduan aluminium.

2.3 Simbol las (Welding Symbol)

Sambungan las dapat direpresentasikan pada gambar teknik dengan sketsa rinci yang menunjukkan setiap detail dan dimensi dari sambungan, seperti yang ditunjukkan di bawah ini.

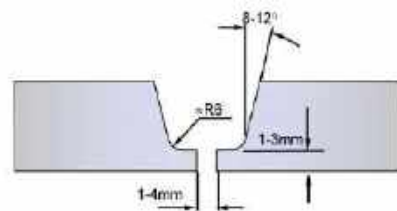
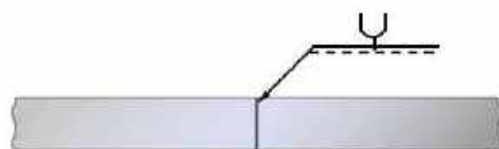


Figure 2.8 Kampuh U tunggal

ketika metode ini yang digunakan untuk memberikan merepresentasi informasi yang komprehensif, itu bisa memakan waktu dan gambar yang berlebihan. Maka alternatifnya adalah menggunakan representasi dengan simbolis untuk memberikan informasi yang diperlukan, seperti yang ditunjukkan di bawah ini.



Gambar 2.9 simbol dari kampuh U tunggal (standar Eropa)

2.3.1 Keuntungan menggunakan symbol Las:

- Sederhana dan cepat untuk ditambahkan ke gambar.
- Tidak terlalu membutuhkan banyak gambar.
- Tidak perlu ditambahkan pandangan tambahan, semua simbol pengelasan dapat diletakkan di bagian utama gambar assembling.

2.3.2. Kekurangan representasi simbolis:

- Hanya dapat digunakan untuk disain sambungan suatu standar (misalnya BS EN ISO 9692).
- Tidak memberikan dimensi yang tepat untuk detail sambungan (joint).
- diperlukan beberapa pelatihan untuk menginterpretasikan simbol dengan benar.

Standar untuk merepresentasikan simbol dari sambungan las pada gambar menggunakan 2 (dua) standar utama yaitu standar Eropa (EN/ISO) dan standar Amerika Serikat (AWS).

Standar Eropa

Pada standar Eropa/ISO (EN standar) EN 22553 menjelaskan tentang sambungan las, brazing & solder, yang direpresentasi simbolis pada gambar.

Standar Amerika

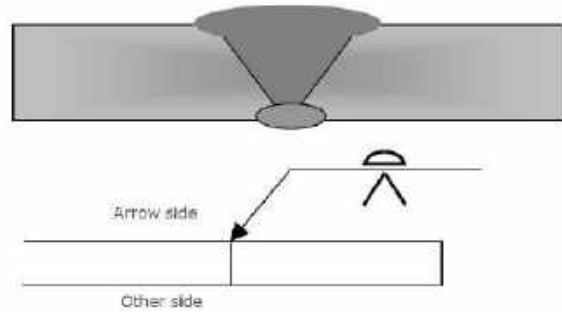
Pada standar amerika American Welding Standar (AWS A2.4), simbol standar untuk pengelasan, brazing dan pemeriksaan non-destruktif. Standar-standar ini sangat mirip dalam banyak hal, tetapi ada juga beberapa perbedaan utama yang perlu dipahami untuk menghindari salah tafsir. Rincian Standar Eropa diberikan dalam sub-bagian berikut yang hanya memberikan informasi singkat tentang perbedaan dengan Standar American.

Simbol las sesuai dengan AWS 2.4

Banyak simbol dan aturan yang ditentukan oleh standar eropa seperti EN22553 sama dengan standar AWS. Perbedaan utama adalah:

- Hanya satu baris referensi yang digunakan (garis kontinyu).
- Simbol untuk detail las di sisi panah berada di bawah garis referensi.

- Simbol untuk detail las di sisi lain berada di atas garis referensi. Perbedaan-perbedaan ini diilustrasikan seperti contoh berikut.



Gambar 2.10 Simbol las sesuai dengan standar AWS 2.4.

Simbol las dasar

Berbagai jenis sambungan las diwakili oleh simbol yang dimaksudkan untuk membantu interpretasi menjadi serupa dengan bentuk lasan yang dibuat. Contoh simbol yang digunakan oleh EN 22553 ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel 2.2 symbol Las dasar (TWI, 2018)

No	Penyebutan	Ilustrasi	Simbol
1	Las tumpul persegi (Square butt weld)		
2	Single V butt weld		∇
3	Single bevel butt weld		∇
4	Single V butt weld with broad root face		Y
5	Single bevel butt weld with broad root face		Y

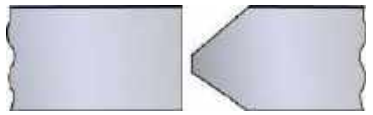



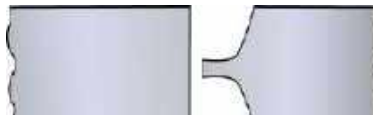

6	Single U butt weld		U
7	Single J butt weld		J
8	Fillet weld		△
9	Surfacing (cladding)		3
10	Backing run (back or backing weld)		⌒
11	Backing bar		▭

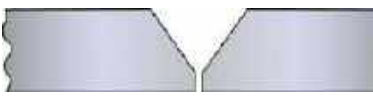



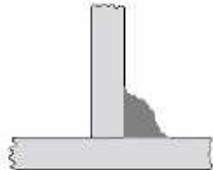

2.3.3. Kombinasi simbol-simbol dasar

Untuk lasan simetris yang dibuat dari kedua sisi, dasar yang berlaku simbol gabungan, seperti yang ditunjukkan di bawah ini.

Tabel 2.3 kombinasi symbol dasar las (TWI, 2018)

No	Penyebutan	Ilustrasi	Simbol
1	Double V butt weld (X weld)		X

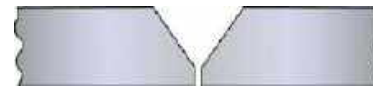

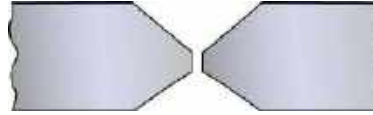

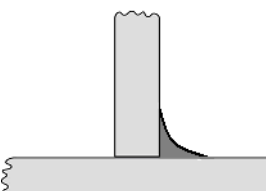

2	Double bevel butt weld (K weld)		
3	Double U butt weld		
4	Double J butt weld		

4	Flat (flush) single V butt weld with flat (flush) backing run		
5	Single V butt weld with broad root face and backing run		
6	Fillet weld with both toes blended smoothly		

2.3.4. Simbol tambahan (Supplementary symbols)

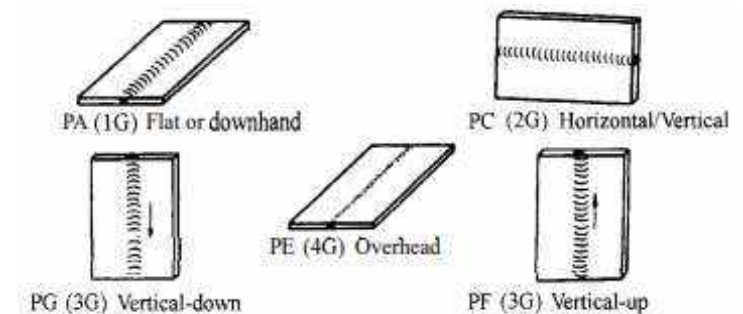
Simbol las dapat dilengkapi dengan simbol untuk menunjukkan yang diperlukan dari bentuk lasan. Contoh simbol pelengkap dan bagaimana diterapkan diberikan di bawah ini.

Tabel 2.4 Simbol tambahan (TWI, 2018)

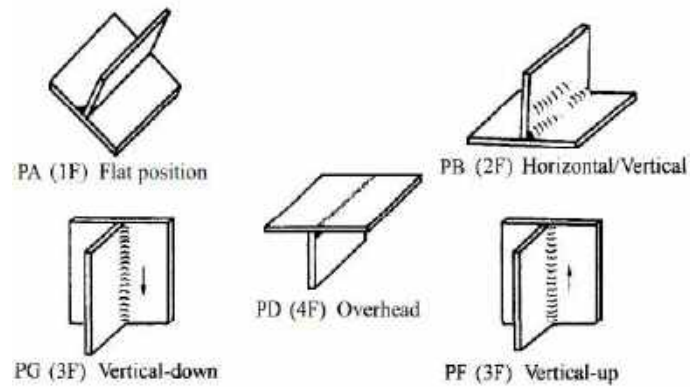
No	Penyebutan	Ilustrasi	Simbol
1	Flat (flush) single V butt weld		
2	Convex double V butt weld		
3	Concave fillet weld		

Posisi pengelasan

Pada dasarnya ada empat posisi pengelasan yang berbeda, yaitu posisi datar, horizontal-vertikal, overhead dan vertikal. Pengelasan posisi vertikal dapat dilakukan sebagai pengelasan vertikal ke atas atau vertikal ke bawah. Selain itu, lasan fillet dapat dibuat pada posisi horizontal-vertikal atau pada posisi rata, posisi pengelasan menurut standar EN dan AWS terlihat pada Gambar (2.11) (Klas Weman, 2003)

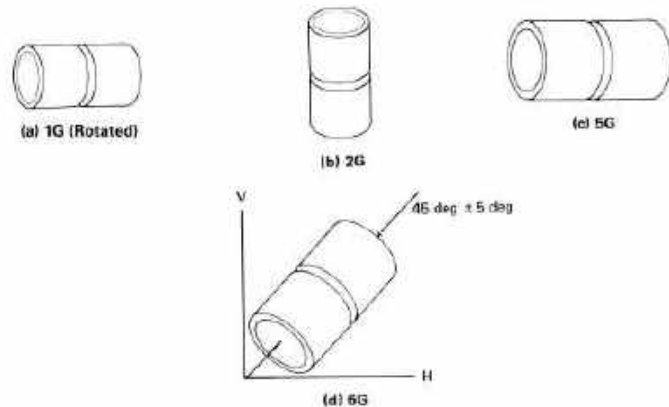


Gambar 2.11 Definisi posisi pengelasan untuk lasan butt, seperti yang diberikan pada EN 287-1. A WS sebutan dalam tanda kurung.



Gambar 2.12 Definisi posisi pengelasan las fillet , seperti yang diberikan pada EN 287-1. Penunjukan AWS dalam tanda kurung (Klas Weman, 2003)

Untuk standar Amerika serikat (AWS) pada pengelasan pipa dibagi menjadi 4 posisi pengelasan yaitu 1G, 2G, 5G dan 6G (gambar 2.13)

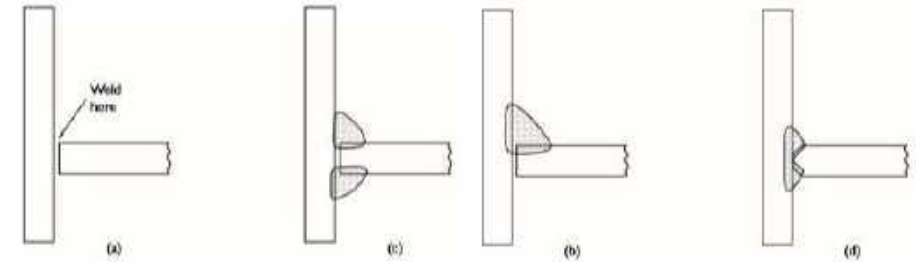


Gambar 2.13 posisi pengelasan pada pipa

2.3.5 Kebutuhan untuk menentukan spesifikasi Las

Terkadang selalu diperdebatkan bahwa tidak perlu menentukan lasan pada gambar dan bahwa tukang las harus diandalkan untuk melakukan pengelasan yang sesuai. Praktik ini bisa sangat berisiko karena jenis dan ukuran lasan harus sesuai untuk logam dasar dan kondisi layanan fabrikasi, dan informasi serta data yang diperlukan biasanya hanya tersedia didalam dokumen. Gambar (2.14) dibawah mengilustrasikan (a) instruksi ‘weld here (las di sini)’ dan (b-d) tiga cara untuk mengikuti instruksi ini. Instruksi las di sini (weld here), diilustrasikan pada Gambar

(2.14 a), jarang terlihat pada gambar karena terbuka untuk sejumlah interpretasi yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 (b), (c) dan (d).

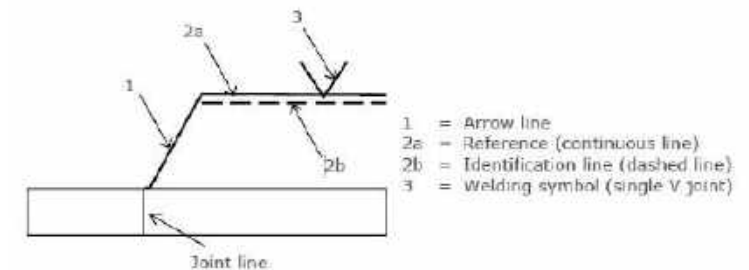


Gambar 2.14 (a) Instruksi ‘las di sini’ dan (b-d) tiga cara untuk mengikuti instruksi ini.

2.3.6 Posisi simbol pada gambar

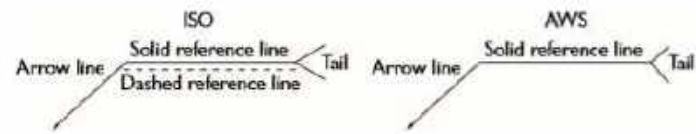
Untuk dapat memberikan rincian yang komprehensif untuk sambungan las, perlu membedakan kedua sisi sambungan las. Ini dilakukan, menurut standar Eropa EN 22553:

- Garis panah.
- Garis referensi ganda terdiri dari garis kontinu dan garis putus-putus (dashed line). Gambar di bawah mengilustrasikan symbol pada gambar.



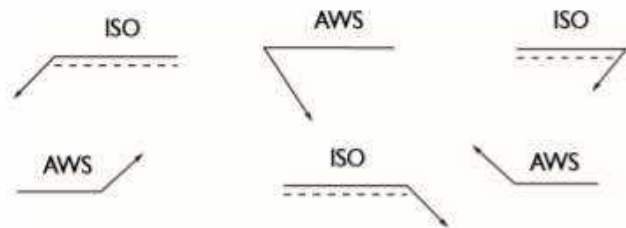
Gambar 2.15 cara menggambarkan symbol las (EN/ISO) (TWI, 2018)

Simbol-simbol ini ditempatkan pada garis referensi horisontal. Garis ini melekat pada garis panah yang menunjuk ke lokasi lasan (lihat Gambar 2.16). Dalam sistem ISO ada dua garis referensi paralel, satu solid dan satu putus-putus. Dalam sistem AWS garis referensi yang solid digunakan.



2.16 standar ISO and AWS reference lines and arrow lines.

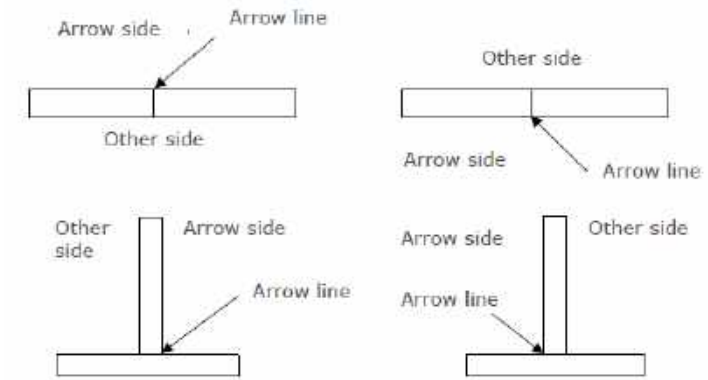
Terlepas dari simbol las yang ditempatkan pada garis referensi, informasi tambahan dapat diberikan berdekatan dengan ekor yang umumnya dihilangkan ketika tidak diperlukan. Garis panah dapat menunjuk ke segala arah seperti yang ditunjukkan pada Gambar (2.17). Hal ini agar dapat menemukan lasan pada posisi pengelasan apa pun, misalnya rata atau overhead. Garis panah tidak pernah ditarik secara horizontal karena ini akan membuatnya tampak sebagai kelanjutan dari garis referensi, yang selalu horisontal.



Gambar 2.17 Kemungkinan arah di mana garis panah dapat menunjuk lasan.

Hubungan antara panah dan garis sambungan

Salah satu ujung garis sambungan disebut sisi panah dan ujung yang berlawanan disebut sisi lain (*other side*). Sisi panah selalu merupakan ujung dari garis sambungan yang ditunjukkan oleh garis panah (dan menyentuh). Bisa di ujung garis sambungan dan juru gambar yang memutuskan untuk membuat sisi panah. Gambar di bawah ini menggambarkan prinsip-prinsip ini.



Gambar 2.18 hubungan antara arrow side dan garis sambungan (TWI, 2018)

Ada beberapa aturan tentang garis panah yang harus dipahami yaitu:

- Harus menyentuh salah satu ujung sambungan.
- Harus bergabung dengan salah satu ujung garis referensi.
- Dalam kasus tertentu seperti pada sambungan non-simetris, seperti sambungan bevel tunggal, garis panah harus menunjuk ke arah sambungan yang dilas (seperti yang ditunjukkan di bawah).

Sebuah contoh tentang bagaimana menggambarkan sambungan las jenis sambungan tumpul bevel tunggal (single bevel butt joint) menurut EN standar.



Gambar 2.19 sambungan tumpul single bevel (TWI, 2018)

Posisi garis referensi dan simbol las

Garis referensi harus sedapat mungkin, ditarik sejajar dengan bagian bawah tepi gambar (atau tegak lurus). Untuk lasan non-simetris penting bahwa sisi panah dan sisi lainnya lasannya dibedakan. aturan untuk melakukan ini adalah:

Simbol untuk detail las yang diperlukan pada sisi panah harus diletakkan garis kontinyu.

Simbol untuk detail las di sisi lain harus ditempatkan pada garis putus-putus.

Posisi garis kontinyu dan putus-putus

menurut standar Eropa (EN22553) memungkinkan garis putus-putus berada di atas atau di bawah garis kontinyu seperti yang ditunjukkan di bawah ini.

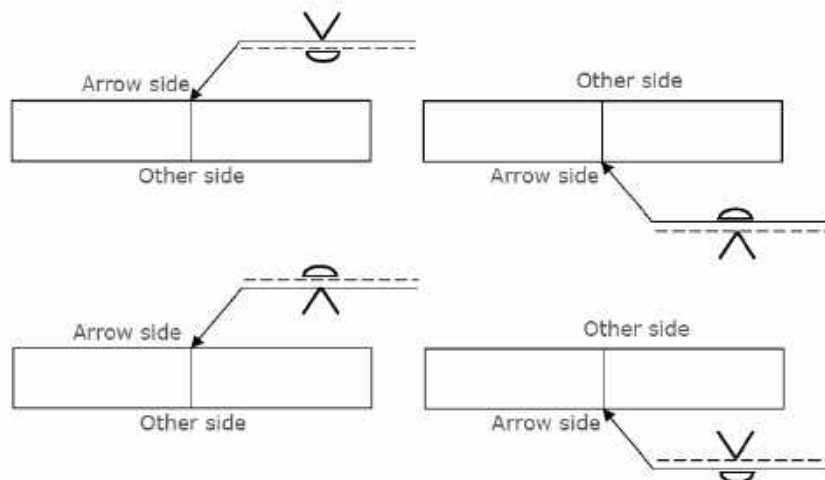


Jika lasan dengan bentuk simetris, tidak perlu membedakan kedua sisinya dan menurut standar Eropa (EN22553) menyatakan bahwa garis putus-putus harus dihilangkan. Jadi, pada kampuh single V butt weld dengan backing run dapat ditunjukkan oleh salah satu dari empat simbol representasi yang ditunjukkan di bawah ini.



Gambar 2.20 Las Single V dengan backing run.

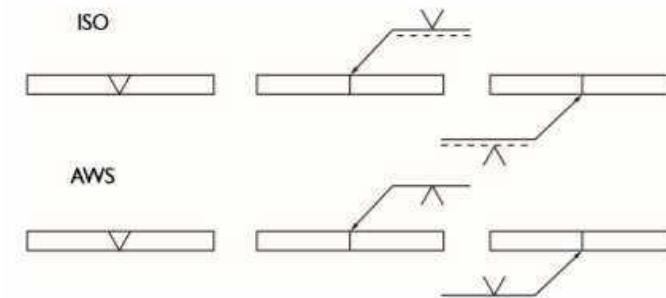
Contoh Penunjukan symbol las menurut standar EN/ISO pada lasan tumpul dengan alur V tunggal dengan backing run bisa dilakukan dengan beberapa cara seperti ditunjukkan pada gambar 2.21 dibawah



Gambar 2.21 Simbol Las single V dengan backing run

Dalam sistem ISO standar, lasan pada sisi panah ditunjukkan dengan menempatkan simbol lasan pada garis referensi dan lasan di sisi lain memiliki simbol pada garis

putus-putus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar (2.22). Dalam sistem AWS simbol lasan untuk lasan di sisi panah ditempatkan di bawah garis dan untuk lasan di sisi lain simbol ditempatkan di atas garis.

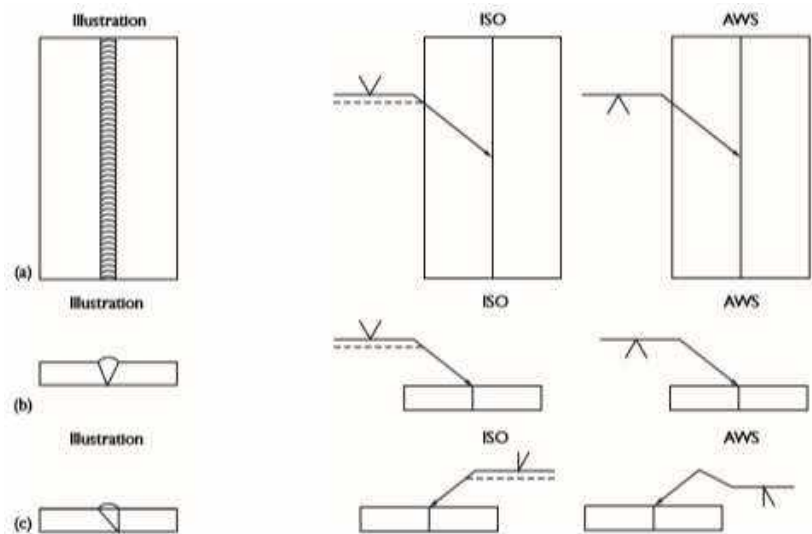


Gambar 2.22 Simbolisasi lasan pada sisi panah dan lasan pada sisi lain (ISO dan AWS).

a. Simbol Pada Lasan Tumpul (Butt Weld)

Lasan tumpul dengan alur (groove) yang ditunjukkan pada Gambar 2.23 (a–c) menunjukkan lokasi simbol pengelasan diletakkan. Untuk lasan tumpul butt-V yang ditunjukkan pada Gambar (2.23 a), simbol-simbol pengelasan terletak pada garis referensi yang terhubung ke panah yang menunjuk ke satu sisi sambungan. Panah menunjukkan tampilan rencana lasan yang akan dibuat seperti yang ditunjukkan pada Gambar. (2.23 a), atau bentuk penampang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar (2.23 b). Gambar (2.23 c) menunjukkan lasan tumpul dengan groove *single-bevel* di mana garis panah menunjuk ke tepi sambungan yang harus disiapkan dengan alur miring (bevel).

Dalam Standar AWS, bahwa ketika hanya satu tepi sambungan yang harus disiapkan, seperti pada las bevel-tunggal atau alur-J, garis panah harus digambar dengan patahan (lebih akurat digambarkan sebagai tikungan tajam) seperti ditunjukkan dalam Gbr (2.18 c), dengan panah mengarah ke tepi yang disiapkan.



Gambar 2.23 (a – c) Lokasi simbol pengelasan butt/ groove.

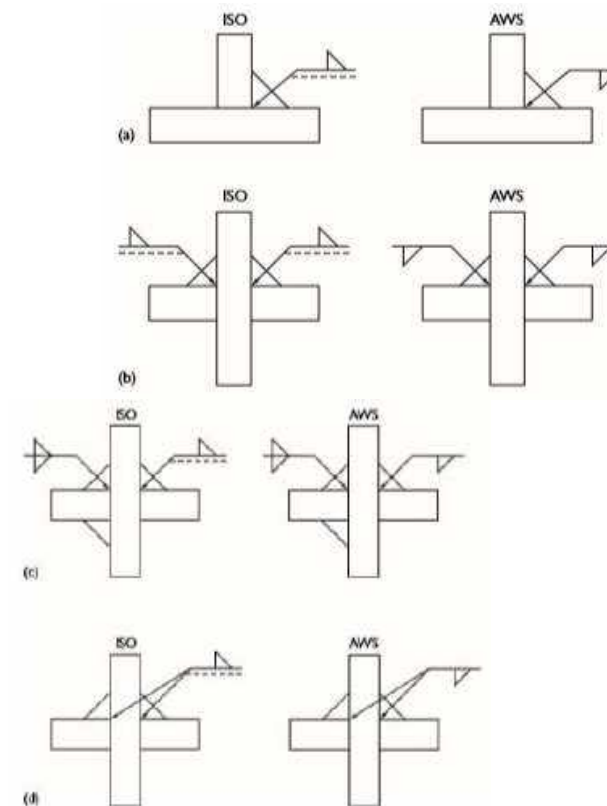
b. Simbol Pada Lasan Fillet (Fillet Weld)

Seperti halnya lasan tumpul, simbol lasan untuk lasan fillet terletak pada garis referensi yang terhubung ke panah yang mengarah ke satu sisi sambungan. Dalam standar ISO simbol untuk lasan di sisi panah ditempatkan pada garis kontinu dan simbol untuk lasan di sisi lain ditempatkan pada garis putus-putus. Dalam sistem AWS simbol untuk lasan di sisi panah ditempatkan di bawah garis kontinu tunggal dan simbol untuk lasan di sisi lain ditempatkan di atas garis. hal Ini diilustrasikan pada Gambar 2.24 (a-d) untuk sambungan-T (sambungan antara dua bagian, diletakkan kira-kira pada sudut yang tepat satu sama lain untuk membentuk 'T') dan sambungan silang (sambungan di mana dua pelat rata dilas ke pelat rata lainnya pada sudut kanan dan pada sumbu yang sama).

Gambar 2.24 (a) menunjukkan pandangan ujung sambungan-T dengan satu lasan fillet tunggal. Bentuk lasan biasanya tidak ditampilkan pada gambar teknik. Gambar 2.24 (b) menunjukkan pandangan akhir dari sambungan silang. Kedua lasan berada pada sambungan yang berbeda, mis. Mereka tidak membentuk lasan fillet ganda. Oleh karena itu, dua panah terpisah diperlukan untuk menunjukkan dua lasan fillet tunggal. Pada Gambar. 2.24 (c) ada lasan fillet ganda di sebelah kiri

bagian dan lasan fillet tunggal di sisi kanan. Simbol las fillet selalu digambar dengan kaki tegak di sebelah kiri.

Untuk sambungan pada Gambar 2.24 (d), kebutuhan untuk menunjukkan dua simbol, satu di setiap sisi bagian vertikal, dapat dihindari dengan menggunakan lebih dari satu garis panah. Praktek ini tidak secara khusus diizinkan dalam standar ISO 2553 tetapi dalam standar AWS A2.4-98 dinyatakan bahwa dua atau lebih panah dapat digunakan dengan garis referensi tunggal untuk menunjukkan lokasi di mana lasan yang identik ditentukan. Praktik ini harus digunakan dengan hati-hati untuk menghindari gambar dengan simbol las minimum dan banyak garis panah menyilang pada gambar.



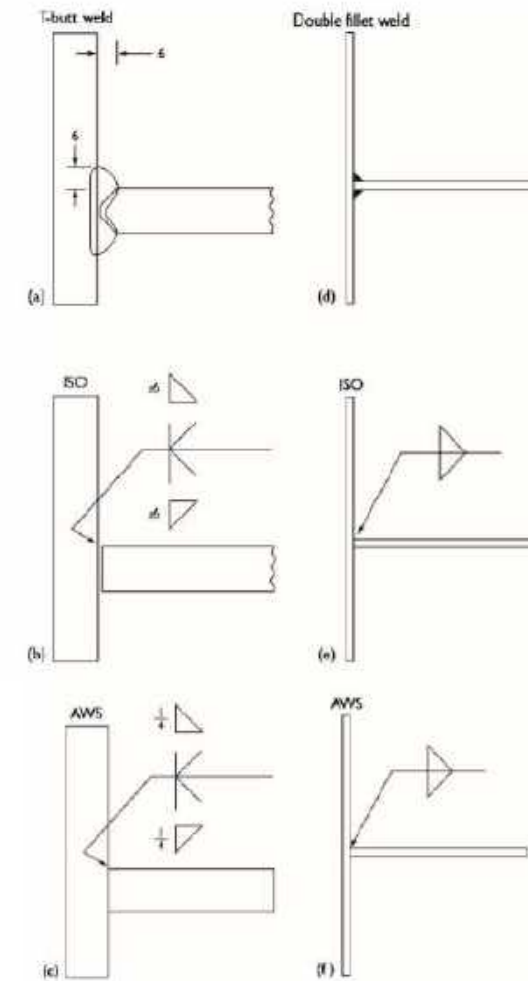
Gambar 2.24 lokasi simbol pada lasan fillet

Dalam sistem ISO standar garis putus-putus dapat ditarik di atas atau di bawah garis padat tetapi simbol pada garis, yang selalu mengacu pada sisi panah

dari sambungan. Simbol pada garis putus-putus menunjukkan lasan di sisi lain. Disarankan bahwa garis solid selalu digambarkan di atas garis putus-putus sebagai standarnya. Jika lasan dibuat pada kedua sisi, seperti pada lasan fillet ganda, simbol lasan ditempatkan di kedua sisi garis referensi atau garis, dalam hal ini, dalam sistem ISO, garis putus-putus dapat dihilangkan.

Gambar 2.25 (a-f) menunjukkan penggunaan simbol untuk menunjukkan jenis dan ukuran lasan tumpul (T-butt weld) dan lasan fillet ganda (double fillet weld). Tanpa menggunakan simbol las, Gambar 2.25 (a) menunjukkan gambar las tumpul T dengan lasan fillet dengan panjang kaki las 6 mm dan dengan persiapan ujung ditunjukkan. Gambar 2.25 (b) menunjukkan lasan tumpul T yang diwakili oleh simbol yang menyampaikan semua informasi sesuai dengan standar ISO. Gambar 2.25 (c) menunjukkan lasan tumpul T yang ditunjukkan oleh simbol las untuk standar AWS.

Jika ketebalan bagian dari bagian kecil dibandingkan dengan ukuran keseluruhannya, seperti pada balok kotak, lasan seringkali terlalu kecil untuk ditarik ke skala dan untuk direproduksi secara akurat, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.25 (d) untuk lasan fillet ganda. Gambar 2.25 (e) dan (f) menunjukkan lasan fillet ganda yang ditunjukkan oleh simbol ISO dan AWS. Untuk menyederhanakan gambar sebanyak mungkin, standar ISO merekomendasikan bahwa, jika perlu, perincian lengkap persiapan tepi harus diperlihatkan secara terpisah. Ini juga sesuai dengan rekomendasi AWS.



Gambar 2.25 (a-f) Lokasi simbol dalam lasan tumpul T dan lasan fillet ganda (Dimensi standar ISO dalam millimeter dan dimensi AWS dalam inci).

Simbol Tambahan (Supplementary Symbol)

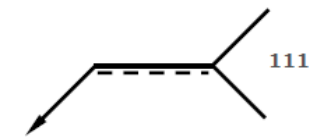
Informasi tambahan tentang lasan dapat diberikan oleh simbol tambahan yang digunakan bersama dengan lasan yang sudah dijelaskan sebelumnya. Dalam kebanyakan kasus, simbol yang sama digunakan dalam standar ISO dan AWS. Dalam kasus lain, hanya satu dari standar yang menggunakan simbol untuk persyaratan tertentu. Perbandingan simbol yang digunakan dalam standar ISO dan AWS ditunjukkan pada Gambar 2.26.

ISO	AWS	ISO	AWS
 Flat (usually finished flush)	 Flush or flat	No symbol	 Melt through
 Convex	 Convex	No symbol	 Consumable Insert
 Concave	 Concave	 Peripheral weld	 Weld all round
 Toes shall be blended smoothly	No symbol	 Field or site weld	 Field weld
No symbol	 Spacer	 Permanent backing strip used	 Backing
No symbol	 Back or backing weld	 Removable backing strip used	 Removable backing

Gambar 2.26 simbol tambahan

Simbol Proses pengelasan

Jika diperlukan, proses pengelasan disimbolkan dengan angka yang ditulis antara dua cabang garpu di ujung garis referensi. Beberapa sebutan proses pengelasan seperti berikut:



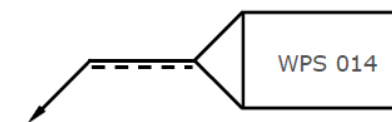
Gambar 2.27 simbol proses pengelasan

Kode angka beberapa proses pengelasan

- 111 = MMA/SMAW
- 121 = SAW
- 131 = MIG
- 135 = MAG

Informasi lain di bagian ekor garis referensi

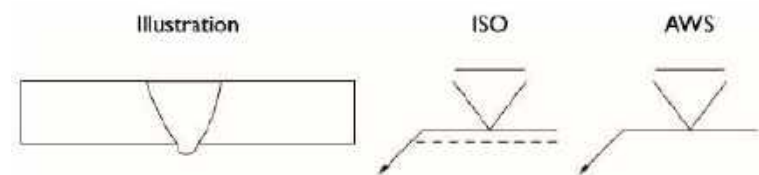
Informasi selain proses pengelasan bisa ditambahkan pada ekor terbuka tersebut seperti tingkat penerimaan NDT, posisi kerja dan jenis logam pengisi dan standar Eropa (EN22553) menentukan urutan yang harus digunakan untuk informasi ini. Sebuah ekor tertutup juga dapat digunakan di mana referensi ke instruksi tertentu bisa ditambahkan.



Gambar 2.28 simbol informasi tambahan

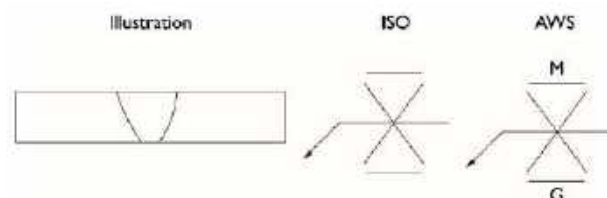
Kontur Permukaan Lasan

Gambar 2.29 adalah simbol yang digunakan untuk menunjukkan bentuk yang diperlukan dari suatu lasan. dalam Standar AWS menyatakan bahwa lasan harus dibuat dengan kontur kemiringan, rata, cembung (konvex) atau cekung (concave), tanpa menggunakan penyelesaian mekanis, harus ditentukan dengan menambahkan simbol flush atau flat, cembung atau cekung pada simbol pengelasan. Dalam praktiknya hal ini tampaknya sedikit rumit dan dipertanyakan sejauh mana itu dilakukan. Gambar 2.30 menunjukkan penampang lasan tumpul dengan groove V tunggal pada permukaan las rata dan rata dengan permukaan pelat.



Gambar 2.30 pengelasan dengan kontur rata cara 1

Dalam sistem standar ISO, ada kemungkinan bahwa Spesifikasi Prosedur Pengelasan (Welding Procedure Specification) akan berisi instruksi tentang pengerjaan perlakuan panas pasca-pengelasan yang diperlukan, seperti proses grinding atau permesinan. Berbeda dengan hal ini, dalam sistem standar AWS simbol untuk menunjukkan permukaan yang harus dicapai dalam pengelasan. Gambar 2.31 menunjukkan lasan dengan alur V tunggal dengan permukaan las dan manik las rata pada permukaan pelat.



Gambar 2.31 pengelasan dengan kontur rata cara 2

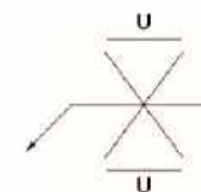
Dalam sistem AWS standar simbol untuk menunjukkan pengerjaan pasca-pengelasan ditunjukkan oleh huruf kapital M dan G, yang menunjukkan Machining (pemesinan) dan grinding (penggerindaan). Huruf lain yang digunakan dalam standar AWS adalah:

C : Chipping

H : Hammering

R : Rolling

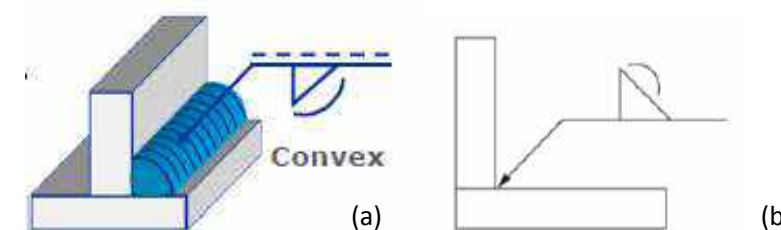
Jika lasan harus diselesaikan dengan cara mekanis yang tidak ditentukan, huruf U digunakan dalam sistem AWS, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.32



Gambar 2.32 Simbol penyelesaian akhir yang tidak spesifik (AWS)

Kontur Dengan Bentuk Cembung (Convex)

Simbol untuk lasan cembung agak misterius karena sulit membayangkan kasus di mana profil cembung ditentukan baik untuk lasan tumpul atau lasan fillet. Semua lasan biasanya dibuat dengan profil yang sedikit cembung untuk memberikan ketebalan throat minimum yang diperlukan tanpa logam las berlebihan. Simbol ini, tanpa instruksi lebih lanjut, dapat menyebabkan kebingungan karena akan mendorong seorang tukang las untuk membuat lasan dengan deposit berlebihan pada logam las, yang akan menciptakan masalah potensial dan biaya tambahan. Lokasi peletakan simbol las cembung untuk EN standar ditunjukkan pada Gambar 2.33 (a) sedangkan untuk AWS standar gambar 2.33 (b).



Gambar 2.34 simbol las cembung.

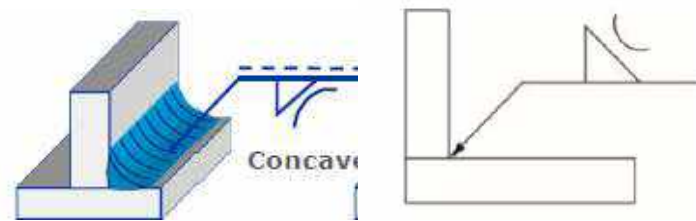
Perlu dicatat bahwa menurut standar AWS D1.1-2000 Kode untuk pengelasan struktur menetapkan batas tertentu untuk konveksitas lasan tergantung pada lebar permukaan lasan sebagai berikut:

<u>Lebar permukaan las</u>	<u>Maksimum konveksitas</u>
$W \leq 8\text{mm}$	2mm
$W > 8 \text{ to } < 25\text{mm}$	3mm
$W \geq 25\text{mm}$	5mm

Kelebihan logam lasan (Excess weld) adalah logam yang terletak di luar permukaan rata dari filet atau di luar garis lurus antara jari-jari lasan tumpul. Logam berlebih ini kadang-kadang salah disebut reinforcement. Hal ini tidak benar karena hanya dalam beberapa kasus itu sangat jarang akan meningkatkan kekuatan statis sambungan dan dalam banyak kasus itu akan mengurangi kekuatan lelah (fatigue strength).

Kontur Las dengan bentuk cekung

Simbol untuk las cekung hanya digunakan dalam kasus-kasus khusus, misalnya, jika kapal yang dilas membutuhkan permukaan yang halus untuk memudahkan pembersihan atau untuk perawatan permukaan seperti pengecatan. Lokasinya ditunjukkan pada Gambar 2.35, dimana pada gambar 2.35 (a) penunjukan simbol las cekung untuk standar EN sedangkan pada gambar 2.35 (b) untuk standar AWS.

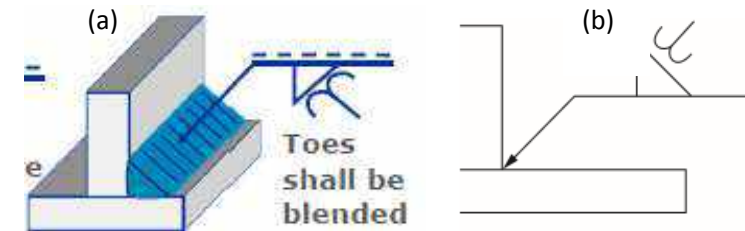


Gambar 2.35 simbol las cekung.

Profil lasan dengan bentuk cekung akan mengurangi konsentrasi tegangan pada jari-jari lasan fillet dan dengan demikian memberikan sedikit peningkatan pada kekuatan kelelahan. Kemampuan untuk memperoleh profil lasan dengan bentuk cekung tergantung pada kondisi logam induk dan proses pengelasan dan bahan habis pakai serta keahlian dari tukang las. Dalam proses pengelasan kadang-kadang memungkinkan untuk menghasilkan profil las cekung dengan menggunakan pengaturan parameter pengelasan yang sesuai.

Toes Blended Smoothly

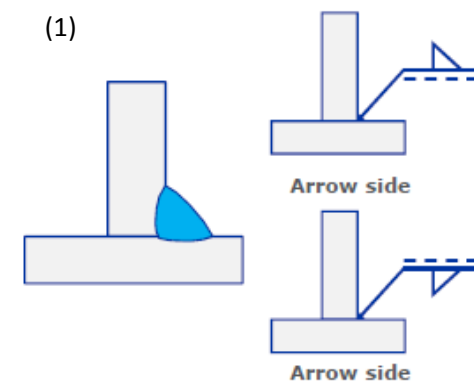
Jari kaki las yang halus pada Standar ISO ditunjukkan pada Gambar 2.36. Hal ini dapat digunakan untuk memberi informasi tukang las bahwa jari-jari las harus digerinda untuk menghilangkan terak kecil yang ada pada jari-jari las yang dibuat oleh pengelasan busur logam manual (MMA) atau pengelasan busur logam terlindung (SMAW). Kedalaman intrusi maksimum biasanya 0,4 mm (1/ 64in) dan kedalaman gerinda harus 1-2mm (1/ 32-5/ 64in).

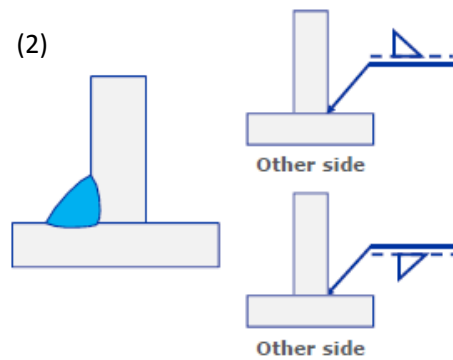


Gambar 2.36 simbol kaki las diperhalus.

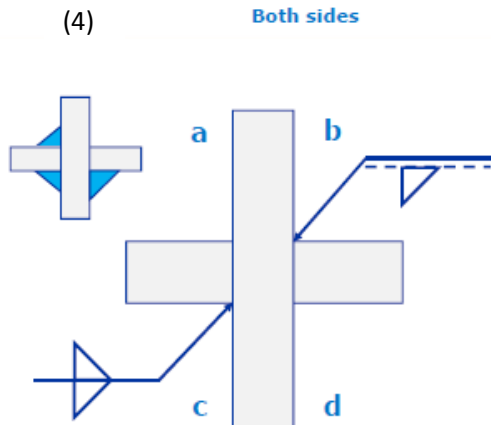
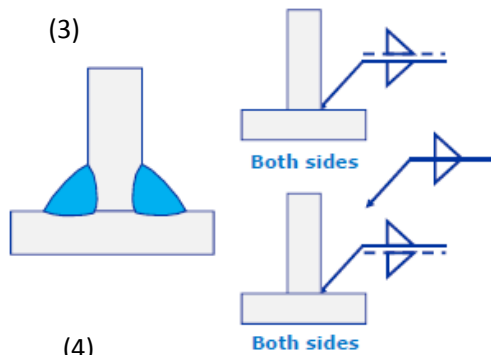
Contoh soal

Beberapa symbol las pada Fillet weld dari standar Eropa (EN)

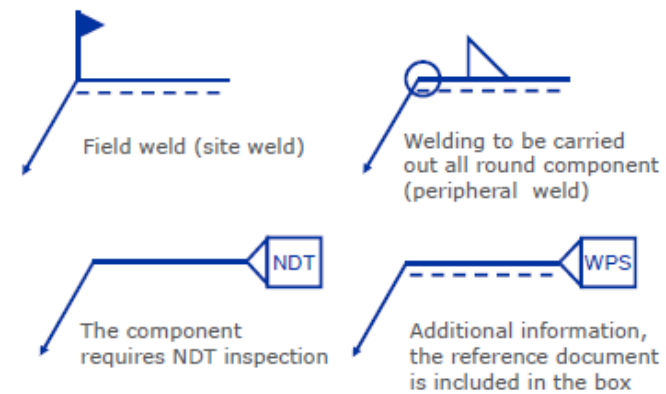




Beberapa symbol las pada double Fillet weld dari standar Eropa (EN)



Contoh symbol las pengelasan ditempat, pengerjaan NDT dan beberapa symbol lain



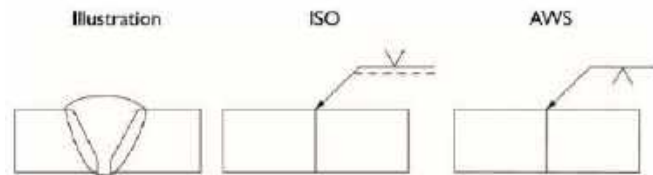
Dimensi dari lasan

Lasan (Butt Weld)

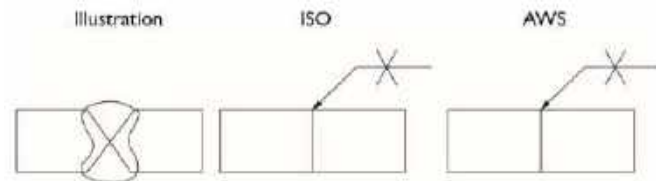
Dalam sistem ISO dan AWS, ukuran lasan tumpul dapat ditentukan. Khusus dalam Standar AWS juga ditentukan persiapan las pada bagian tepi. Uraian tentang sambungan yang ditentukan oleh simbol pengelasan dalam standar AWS harus digunakan dengan hati-hati kecuali jika itu merupakan bagian dari prosedur pengelasan. Kalau tidak, prosedurnya mungkin tidak sesuai dengan praktik saat proses fabrikasi. Persiapan bagian tepi akan tergantung pada proses pengelasan, bahan habis pakai, parameter dan lainnya. Dalam standar ISO dinyatakan bahwa, jika tidak ada indikasi yang bertentangan, lasan tumpul dengan penetrasi penuh sebagaimana terlihat Gambar 9.1.

Pada Standar AWS menyatakan bahwa menghilangkan kedalaman dimensi bevel dan simbol pengelasan untuk las yang membutuhkan penetrasi penuh, hal ini sesuai dengan standar ISO. Dalam Standar AWS menyatakan bahwa aturan tersebut berlaku untuk lasan alur tunggal dan juga untuk lasan alur ganda yang memiliki geometri sambungan simetris (lasan alur tunggal dan ganda termasuk lasan V, U, bevel dan J). Persyaratan untuk standar ISO dan AWS, pada kenyataannya, sama karena di kedua sistem, lasan sambungan tumpul asimetris perlu memiliki kedalaman lasan yang ditentukan, setidaknya di sisi pertama.

Gambar 2.37 dan 2.38 menunjukkan pengelasan penetrasi penuh alur V tunggal dan sambungan tumpul double-V. Untuk lasan pada dua sisi, garis referensi putus-putus dapat dihilangkan dari simbol ISO, yang membuatnya identik dengan simbol AWS. Ini hanya berlaku untuk persiapan sambungan simetris di mana kedalaman lasan tidak termasuk dalam simbol pengelasan.



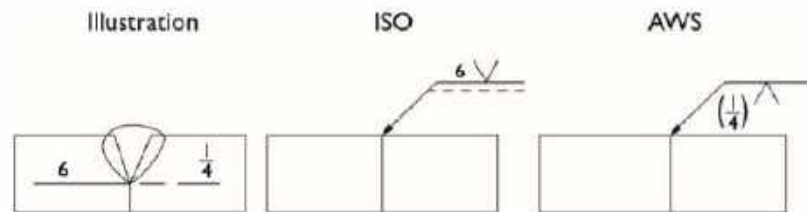
Gambar 2.37 sambungan tumpul dengan alur V tunggal dengan penetrasi penuh



Gambar 2.38 sambungan tumpul dengan alur V ganda dengan penetrasi penuh

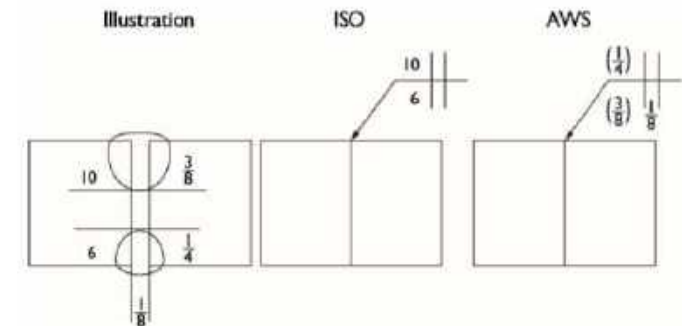
Lasan penetrasi parsial/sebagian

Dalam sistem ISO dan AWS ukuran lasan tumpul dapat ditentukan dengan angka yang ditempatkan di sebelah kiri simbol lasan. Dalam simbol las standar AWS, besarnya ditempatkan dalam tanda kurung, seperti pada Gambar 2.39.



Gambar 2.39 pengelasan sambungan tumpul V tunggal dengan penetrasi sebagian. Standar ISO dimensi (millimeter) dan AWS dimensi (inches).

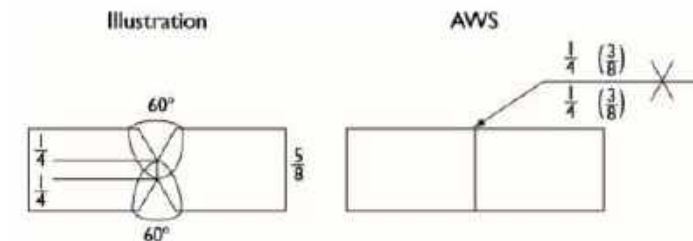
Penerapan sistem ini untuk lasan sambungan tumpul dengan groove persegi pada penetrasi parsial ditunjukkan pada Gambar (2.40). Dalam sistem AWS standar, di mana persiapan tepi dapat ditunjukkan, ukuran celah antara pelat ditentukan oleh angka antara sisi-sisi simbol lasan. Dimensi celah hanya perlu dimasukkan di satu sisi garis referensi.



Gambar 2.40 Pengelasan dengan penetrasi parsial dengan alur persegi (Dimensi ISO dalam milimeter, dimensi AWS dalam inci).

Dimensi alur (groove)

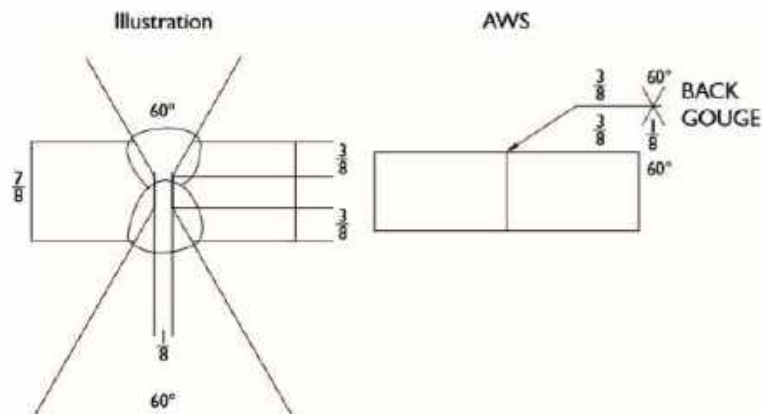
Dalam sistem AWS, detail dari dimensi alur dapat ditentukan, misalnya, sudut bevel, permukaan akar, celah akar, serta ukuran lasan di setiap sisi sambungan. Gambar 2.41 menunjukkan pelat tebal 5/8 inci, disiapkan dengan sudut bevel 60°, kedalaman bevel 1/4 in dan ukuran las 3/8 inci, memberikan tumpang tindih di tengah 1/8 in.



Gambar 2.41 Kedalaman kemiringan (bevel) dan ukuran pengelasan (AWS) (dimensi dalam inci).

Pada Lasan tumpul alur ganda dapat digambarkan oleh simbol pengelasan menurut standar AWS. Suatu sambungan yang membutuhkan gouging belakang (back gouging) dapat ditentukan dengan menempatkan instruksi BACK GOUGE di

bagian belakang garis referensi. Gambar 9.6 menunjukkan lasan alur ganda-V dengan detail persiapan tepi dan gouging belakang. Persiapan dimana ujung logam dengan alur V ganda dengan sudut 60° , masing-masing sisi sambungan disiapkan untuk kedalaman $3/8$ in. Permukaan akar biasanya $1/16$ in sampai $1/8$ in (tidak ditentukan oleh simbol pengelasan) dengan menggerinda untuk menghasilkan celah akar $1/8$ in.



Gambar 2.42 Lasan alur ganda-V dengan persiapan tepi dan back gouging (AWS) (dimensi dalam inci).

Aturan umum untuk standar EN

Dimensi dari sebuah lasan mungkin perlu ditentukan untuk beberapa jenis lasan, dalam standar Eropa (EN 22553) menetapkan sebuah aturan untuk hal ini yaitu:

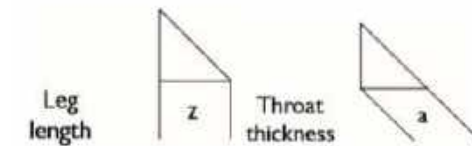
- Dimensi untuk penampang melintang ditulis pada sisi kiri simbol las.
- Dimensi panjang untuk lasan ditulis di sisi kanan simbol.
- Dengan tidak adanya indikasi yang bertentangan, semua pengelasan sambungan tumpul dengan penetrasi penuh.

Simbol untuk Dimensi penampang Las

Lasan filet

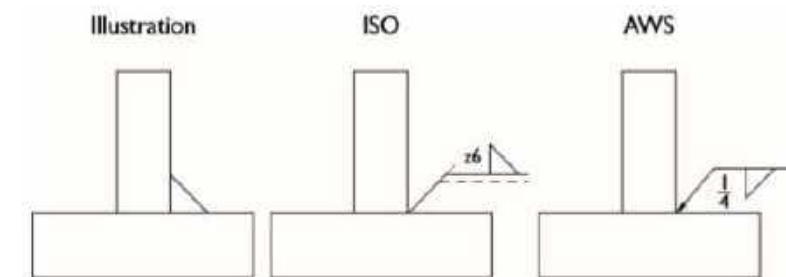
pada Standar ISO gambar (2.43) mencakup dua metode untuk menunjukkan ukuran lasan filet yaitu:

- a : ketebalan leher las (throat thickness) pada Fillet weld
- z : panjang kaki (leg length) pada Fillet weld.



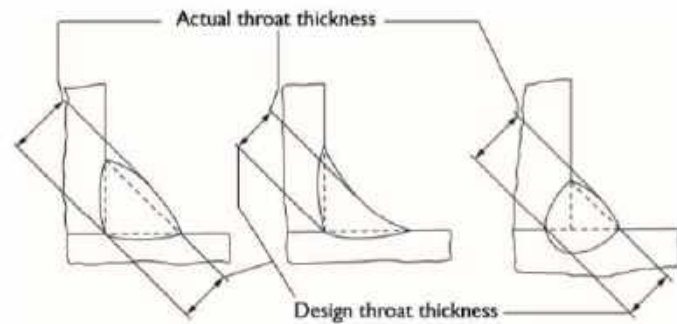
Gambar 2.43 ukuran lasan fillet

Dalam standar AWS standar ukuran lasan fillet selalu mengacu pada panjang kaki, dimensi yang ditempatkan di sebelah kiri simbol lasan. Berbeda dengan simbol untuk lasan alur, ukuran lasan fillet tidak ditempatkan dalam tanda kurung. Dalam sistem ISO, untuk menunjukkan ukuran lasan fillet, dimensi ditempatkan di sebelah kiri simbol, didahului dengan huruf z atau a, tergantung pada apakah panjang kaki atau ketebalan tenggorokan harus ditentukan (lihat Gambar. 2.44). Umumnya ukuran panjang kaki ditentukan.



Gambar 2.44 lasan Fillet weld dengan leg length 6mm (1/4in).

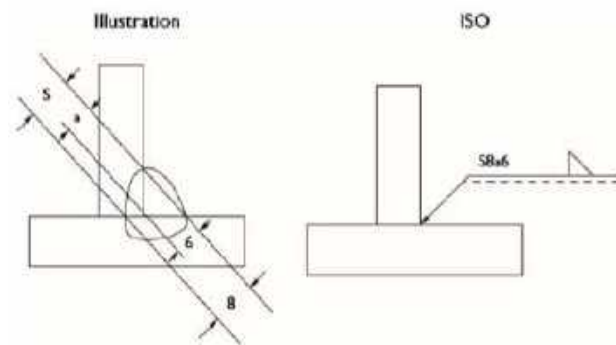
Istilah-istilah yang menggambarkan dimensi pengelasan fillet, ketebalan tenggorokan actual (Actual Throat thickness), dan ketebalan desain tenggorokan (design throat thickness), diperlihatkan dalam Gambar (2.45) dan didefinisikan dalam bagian Ketentuan dan definisi.



Gambar 2.45 Actual throat thickness and design throat thickness of fillet welds.

Lasan penetrasi dalam (Deep Penetration Weld)

Pada Standar ISO untuk menentukan lasan penetrasi dalam, weld throat efektif ditunjukkan oleh huruf yang ditempatkan di depan dimensi throat thickness, seperti yang ditunjukkan pada Gambar (2.46). Ini diikuti oleh throat thickness nominal yang didahului dengan huruf 'a'. Alasan untuk memasukkan dimensi throat nominal tidak jelas karena setiap perhitungan kekuatan las akan didasarkan pada dimensi 's' yang merupakan throat thickness aktual.

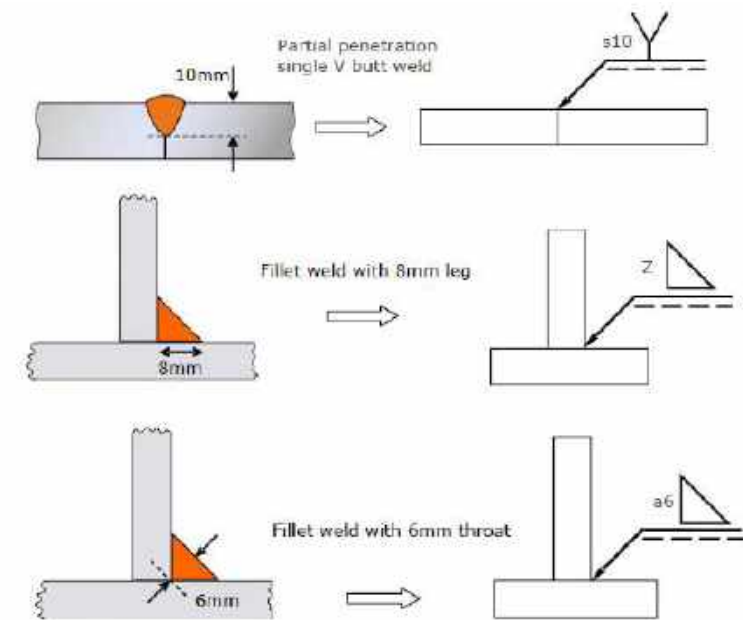


Gambar (2.46) simbol las *Deep penetration weld* dengan standar ISO (dimensi dalam millimeter).

Penetrasi mendalam dari pengelasan dapat dicapai dengan pengelasan busur terendam arus tinggi (SAW) atau pengelasan busur logam berpelindung gas (GMAW) dan oleh jenis elektroda tertentu. Kedalaman penetrasi harus ditentukan oleh pengujian prosedur pengelasan sebelum dimensi digunakan untuk tujuan desain dan termasuk dalam simbol pengelasan.

Dalam standar AWS, lasan fillet dengan penetrasi dalam tidak disebutkan seperti itu dan tidak jelas bagaimana lasan seperti itu akan disimbolkan. Dimensi lasan harus ditentukan pada catatan gambar dan, seperti disebutkan di atas, pengujian prosedur akan diperlukan sebelum ukuran lasan digunakan dalam perhitungan desain.

Beberapa contoh bagaimana symbol las menurut standar ISO digunakan sebagaimana ditunjukkan gambar di bawah ini.



Gambar 2.47 contoh dari symbol las untuk dimensi

Simbol untuk dimensi panjang

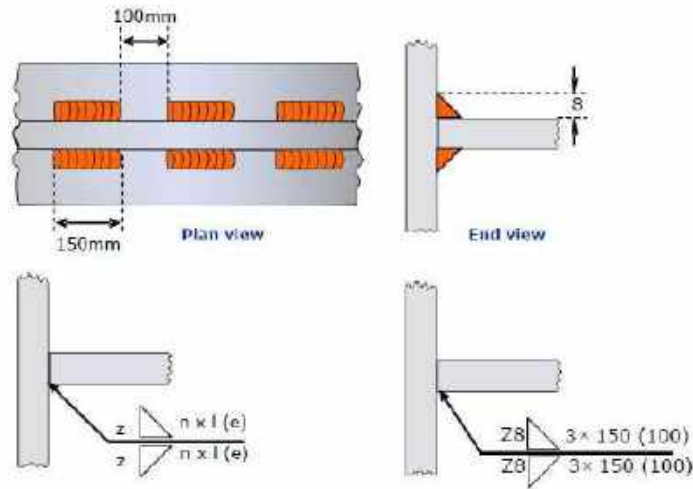
Untuk menentukan dimensi panjang las dan untuk lasan berkelang-kelang (intermiten) jumlah panjang las individual (elemen las), huruf-huruf berikut digunakan sebagai simbol:

I : Panjang las.

(e) : Jarak antara elemen las yang berdekatan.

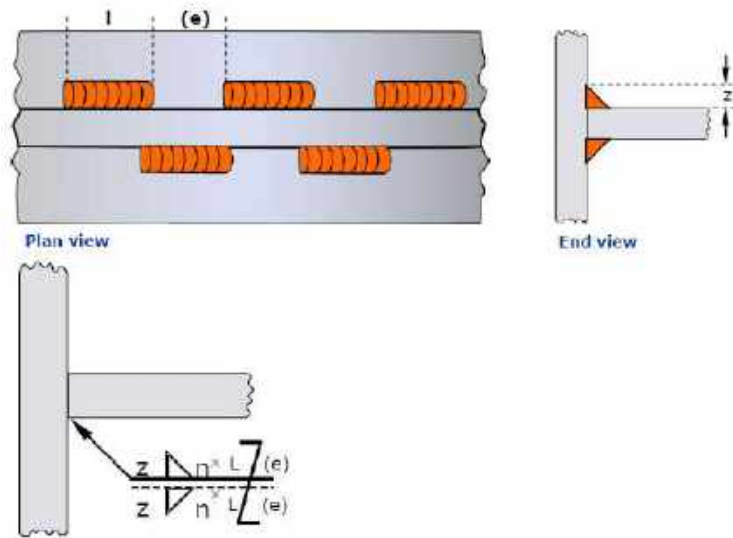
N : Jumlah elemen las.

Penggunaan huruf-huruf ini ditunjukkan untuk pengelasan fillet dua sisi intermiten seperti ditunjukkan di bawah ini.



Gambar 2.48 symbol untuk ukuran panjang lasan

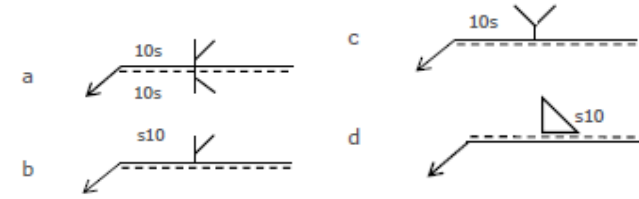
Catatan: Garis putus-putus tidak diperlukan karena itu adalah lasan simetris. Aturan untuk pengelasan fillet dua sisi yang intermiten ditampilkan seperti di bawah.



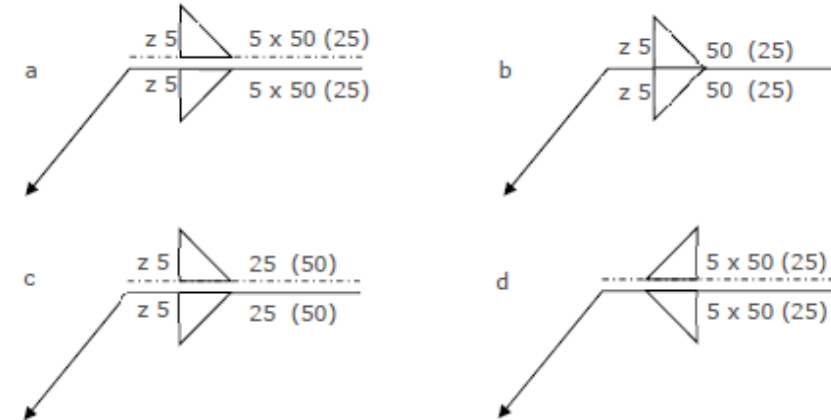
Gambar 2.49 lasan fillet ganda dua sisi yang selang seling (intermiten).

Soal Latihan

1. Symbol yang manakah yang menunjukkan kedalaman penetrasi



2. Pada proses pengelasan pada sambungan T joint pada support bracket pada kedua sisi dengan panjang leg length fillet weld 5mm, dengan panjang lasan yang dibuat *intermittent* dengan 50mm, jarak antar lasan adalah 25mm. yang mana symbol dibawah ini yang paling benar?



Bab 3

Pemeriksaan Material dan Jenis Material

3.1. Pemeriksaan Material

Sebelum melakukan proses pengelasan sebaiknya baja yang digunakan harus memenuhi beberapa standar seperti spesifikasi, bentuk dan ukuran serta tidak adanya cacat pada material yang akan dilas. Biasanya tugas ini dilakukan oleh seorang *Welding Inspector (WI)* dimana salah satu tugasnya adalah melakukan pemeriksaan material seperti pada plat atau pipa. Berbagai macam bahan dapat digunakan dalam fabrikasi pada pengelasan, bahan yang digunakan tidak terbatas hanya pada Baja akan tetapi juga bahan lainnya seperti Baja tahan karat, Aluminium dan paduannya, Nikel dan paduannya, Tembaga dan paduannya, Titanium dan paduannya serta Besi cor.

Bahan-bahan ini semua banyak digunakan dalam proses fabrikasi, pengelasan dan konstruksi untuk memenuhi persyaratan beragam aplikasi dan sektor industri. Ada tiga aspek penting untuk melakukan suatu inspeksi material yaitu harus mempertimbangkan jenis bahan dan kemampuan las, Keterlacakan material dan kondisi dan dimensi material.

Kondisi material dapat memiliki efek buruk pada umur pakai suatu komponen sehingga merupakan poin inspeksi yang penting. Poin untuk diperiksa harus mencakup:

- Pemeriksaan umum.
- Ketidaksempurnaan yang terlihat.
- Dimensi.
- Kondisi permukaan.

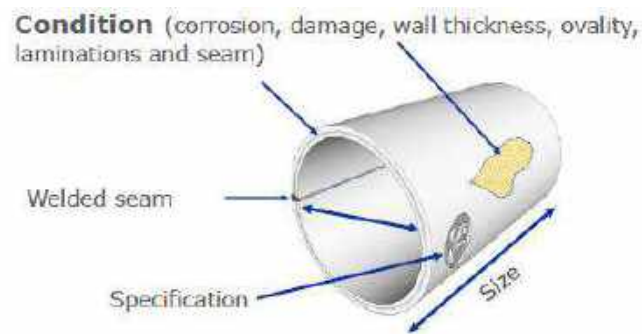
Pemeriksaan umum ini memperhitungkan kondisi penyimpanan, metode penanganan, jumlah pelat atau pipa dan toleransi distorsi.

Semua bahan yang tiba di lokasi seharusnya diperiksa seperti, ukuran/dimensi, kondisi dan jenis/ spesifikasi. Selain itu elemen lain mungkin

perlu dipertimbangkan tergantung pada bentuk bahan. Hal memungkinkan dilakukan pemeriksaan adalah pada material pipa dimana yang harus diperiksa adalah kondisi material apakah adanya terjadi korosi, ketebalan, distorsi, keovalan (*ovality*) dan laminasi. Gambaran pemeriksaan pada pipa sebagaimana ditunjukkan pada (gambar 3.1).

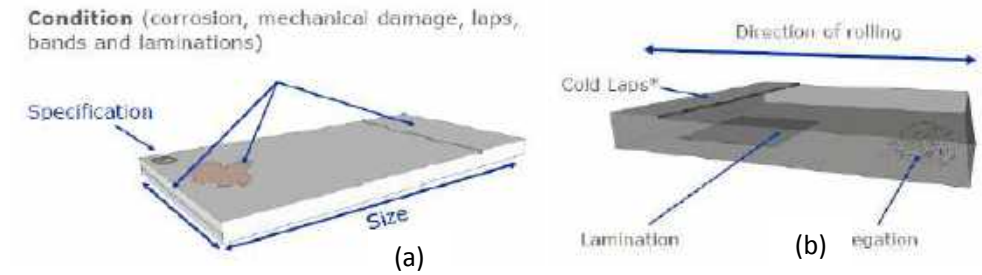
3.1.1. Pemeriksaan dimensi

Pemeriksaan dimensi untuk baja dengan bentuk pelat termasuk panjang, lebar dan tebal. Sedangkan untuk pipa ini termasuk panjang dan tebal dinding dan juga inspeksi diameter dan ovalitas. Pada tahap inspeksi ini, cetakan bahan atau nomor dapat dicatat untuk validasi terhadap sertifikat bahan.



Gambar 3.1 pemeriksaan pipa baja (TWI, 2018)

Pemeriksaan pada pelat baja bisa dilakukan dengan cara melihat kondisi material berupa spesifikasi, kerusakan fisik berupa adanya cacat laminasi, *laps* dan *bands* serta pengukuran dimensi dan mengukur distorsi (gambar 3.2 (a)). Selain itu sebagian besar baja lembaran harus dilakukan pemeriksaan secara visual pada arah pengerolan kadang-kadang sering ditemukan cacat berupa laminasi dan segregasi sehingga baja ini tidak bisa dilakukan pengelasan.



Gambar 3.2 pemeriksaan pada pelat baja (TWI, 2018)

Laminasi adalah cacat yang terjadi saat proses pembuatan baja, yang berasal dari cacat ingot casting. Cacat ini terjadi akibat segregasi bidang (*segregation bands*) di tengah plat dan dibagian bawah titik leleh baja dimana unsur pengotor seperti belerang dan posfor. **Cacat berlapisan (Laps)** disebabkan karena setelah pengerolan baja yang dalam kondisi panas baja yang saling tumpang tindih sebagian lengket ke yang lainnya.

3.1.2. Pemeriksaan dengan Visual

Pemeriksaan Ketidaktepatan material dengan cara visual bertujuan untuk melihat ketidaktepatan yang terlihat pada pelat atau pipa baja dengan mata telanjang. cacat ini biasanya disebabkan oleh proses pembuatan dan biasanya berupa retak permukaan (*cold laps*) atau laminasi jika muncul di tepi pelat (gambar 3.3). Pengujian ultrasonik menggunakan probe kompresi mungkin diperlukan untuk laminasi yang mungkin ada di bagian dalam bahan.



Gambar 3.3 a) cacat cold laps pada pelat baja dan b) cacat laminasi (TWI, 2018)

3.2. Baja Karbon (Carbon Steels) dan Baja Paduan Rendah (Low Alloys Steels)

Baja karbon dan paduan rendah mewakili lebih dari 95% logam yang digunakan untuk konstruksi dan fabrikasi di seluruh dunia. Sifat mekanik yang baik pada berbagai kekuatan dikombinasikan dengan harga relatif rendah dan kemudahan dalam fabrikasi sehingga baja ini penggunaannya sangat luas. Dengan berbagai sifat yang menguntungkan tersebut baja karbon dan paduan rendah menjadi pilihan yang sangat baik untuk digunakan pada peralatan, kendaraan, jembatan, bangunan, mesin, bejana tekan, struktur untuk lepas pantai, peralatan kereta api, kapal, dan berbagai produk lainnya.

Pada bab ini berisi informasi tentang komposisi dan sifat baja sebagai pertimbangan kemampuan las, pemakaian dan prosedur yang disarankan untuk proses pengelasan, proses mematri, dan pemotongan termal pada baja karbon dan baja paduan rendah; dan juga memberikan panduan tentang cara menghindari masalah saat pengelasan pada baja ini. Bagian ini juga berisi tentang penggunaan khusus yang menggambarkan ruang lingkup dan pentingnya integritas tinggi pada pengelasan baja karbon dan baja paduan rendah.

Dari sudut pandang kemampuan las, baja karbon dan baja paduan rendah dapat dibagi menjadi lima kelompok sesuai dengan komposisi, kekuatan, persyaratan perlakuan panas, atau sifat suhu tinggi. Karena penggunaan beberapa baja ini lebih dari satu kondisi pemanasan. Kelompok-kelompok tersebut, masing-masing dibahas di sub bab ini yaitu:

1. Carbon steels,
2. High-strength low-alloy (HSLA) steels
3. Quenched and tempered (Q&T) low-alloy steels,
4. Heat-treatable low-alloy (HTLA) steels, and
5. Chromium-molybdenum (Cr-Mo) steels.

Lima jenis kelompok Baja ini tersedia dalam berbagai bentuk produk, termasuk lembaran, strip, pelat, pipa, tabung, baja tempa, baja cor dan bentuk struktural. Bagaimanapun juga dari berbagai bentuk produk tersebut, untuk mendapatkan prosedur pengelasan sesuai, komposisi, sifat mekanik, dan perlakuan panas harus diketahui, karena itu kemampuan las pada dasarnya adalah fungsi dari ketiga faktor ini. Meskipun sebagian besar baja digunakan dalam bentuk baja rol, namun pertimbangan yang sama untuk proses pengelasan, mematri dan proses pemotongan dengan cara termal berlaku juga untuk baja tempa dan baja cor. Namun, dengan proses tempa dan coran besar, pertimbangan harus diberikan untuk efek ukuran atau ketebalan sehubungan dengan input panas, laju pendinginan, dan pengekangan. Faktor lain untuk dipertimbangkan pada baja coran adalah efek elemen sisa dan variasi komposisi yang terlokalisasi, yang mungkin tidak terjadi pada baja tempa.

Komposisi baja karbon biasanya meliputi persentase berat (% berat) hingga 1,00% karbon, kandungan mangan hingga 1,65% , dan silikon hingga 0,60%. Baja diidentifikasi sebagai baja karbon rendah jika mengandung kurang dari sekitar 0,15% karbon; baja ringan mengandung 0,15% hingga 0,30% karbon; baja karbon sedang mengandung 0,30% hingga 0,50% karbon; dan baja karbon tinggi mengandung 0,50% hingga 1,00% karbon. Meskipun baja karbon tempa paling

sering digunakan dalam kondisi as-rolled, mereka kadang-kadang digunakan dalam kondisi normal atau anil.

Baja paduan rendah berkekuatan tinggi dirancang untuk memberikan sifat mekanik yang lebih baik dari pada baja karbon. Secara umum, mereka diklasifikasikan menurut sifat mekanik daripada komposisi kimia. Kekuatan yield minimum mereka biasanya dalam kisaran 290 mega pascal (MPa) hingga 550 MPa (40.000 pound per inci persegi [40 kips per persegiinci {ksi} hingga 80 ksi]). Baja ini biasanya dilas dalam kondisi baja dirol, dinormalisasi, atau pengerasan presipitat.

Baja yang dicelup dan ditempa adalah kelompok baja karbon dan baja paduan rendah yang umumnya dipanaskan oleh produsen untuk memberikan kekuatan yield dalam kisaran 340 MPa hingga 1030 MPa (50 ksi hingga 150 ksi). Sebagai tambahan, baja ini dirancang untuk dilas dalam kondisi perlakuan panas. Biasanya, lasan tidak menerima perlakuan panas setelah pengelasan (PWHT), kecuali jika diperlukan untuk mencapai stabilitas dimensi atau untuk menyesuaikan dengan kode konstruksi.

Banyak baja paduan rendah yang dilakukan perlakuan panas menunjukkan kemampuan las yang buruk. Baja ini umumnya memiliki kandungan karbon lebih tinggi dari baja kekuatan tinggi dengan paduan rendah atau baja yang ditemper dan diquench. Akibatnya, meskipun mereka memiliki kekuatan yang lebih tinggi, mereka mungkin memiliki kekurangan ketangguhan pada bagian las dan mungkin rentan terhadap retak di bagian zona yang terpengaruh panas (HAZ). Perlakuan panas pasca-las dapat mengurangi risiko retak dan meningkatkan ketangguhan yang dapat ditingkatkan dengan perlakuan panas pada lasan baja paduan rendah.

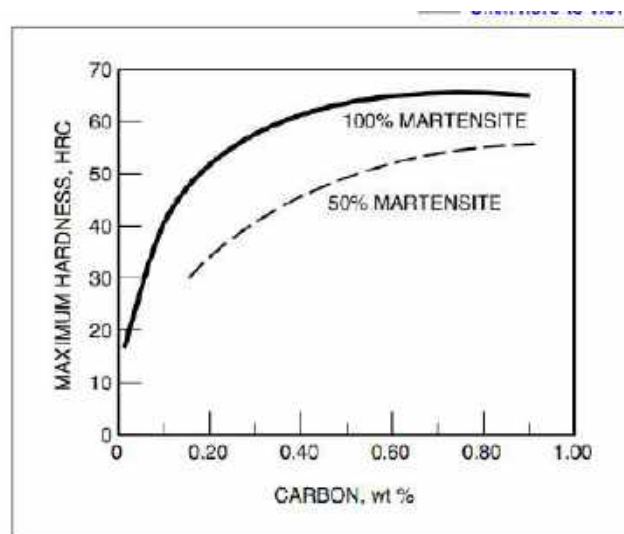
Baja Kromium-Molibdenum (Cr-Mo) digunakan terutama untuk penggunaan pada suhu tinggi hingga sekitar 700 °C (1300 °F) untuk menahan mulur (creep) dan korosi untuk aplikasi dipembangkit listrik, pabrik kimia, atau kilang minyak bumi. Baja kromium-molibdenum dapat dilas dengan melakukan perlakuan panas (mis., anil, dinormalisasi dan ditemper, atau diquench dan

ditemper). Perlakuan panas pasca-las sering dibutuhkan oleh fabrikasi untuk meningkatkan keuletan, ketangguhan, dan ketahanan korosi, dan untuk mengurangi tegangan yang disebabkan oleh proses pengelasan.

Ekuivalen Karbon (Carbon Equivalent)

Panas dari pengelasan, pemotongan dengan termal, dan brazing menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik di wilayah baja yang terpengaruh panas yang disebut sebagai zona yang terkena panas (HAZ). Lebar wilayah ini dan struktur mikro yang dikandungnya bergantung pada komposisi dan struktur mikro sebelumnya dari baja, suhu puncak tercapai, dan tingkat pemanasan dan pendinginan. Siklus termal pemanasan-pendinginan ini mungkin menghasilkan pembentukan martensit dalam logam las atau HAZ, atau keduanya. Jumlah martensit yang terbentuk dan kekerasan yang dihasilkan dari area ini bergantung pada kandungan karbon dan paduan, lamanya waktu kenaikan suhu, dan laju pendinginan berikutnya dalam kisaran suhu kritis. Kisaran suhu ini biasanya 800 °C hingga 500 °C (1470 °F hingga 930 °F), dan laju pendinginan melalui HAZ sering dinyatakan dalam ketentuan dalam rentang jangka waktu, yang ditentukan Δt_{8-5} (AWS Vol 4).

Besaran kandungan dari unsur paduan yang ada didalam baja menentukan kekerasannya (laju pendinginan minimum yang diperlukan untuk menghasilkan martensit). Namun, kandungan karbonnya sendiri sangat menentukan kekerasan maksimum yang dapat dicapai martensit. Gambar 3.4 menunjukkan hubungan baja yang memiliki 50% dan 100% martensit setelah proses pendinginan. Tingkat kekerasan yang tinggi meningkatkan kerentanan terhadap keretakan hidrogen pada lasan atau HAZ, dengan demikian tingkat pengerasan merupakan pertimbangan penting dalam menilai kemampuan las dari baja karbon atau baja paduan rendah. Kemampuan las baja, khususnya ketahanan terhadap retak hidrogen, umumnya menurun dengan meningkatnya karbon atau martensit dalam logam las atau HAZ, atau keduanya (AWS Vol 4).

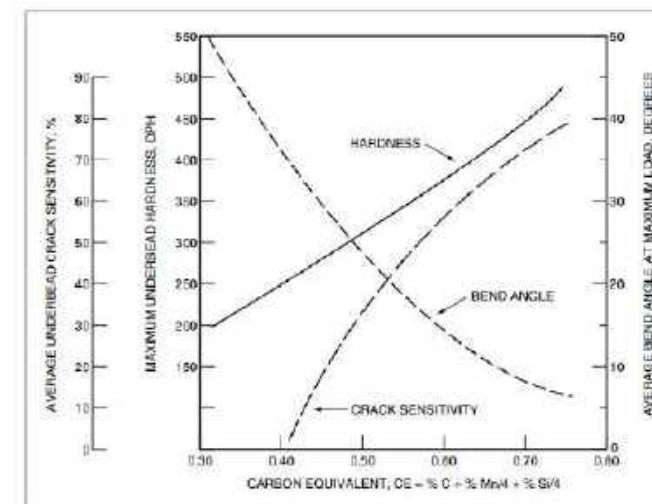


Gambar 3.4 Hubungan antara kandungan Karbon dan kekerasan dari Baja dengan jumlah mikrostruktur Martensit (50% dan 100%) (AWS Vol 4)

Meskipun karbon adalah elemen paduan paling signifikan yang mempengaruhi kemampuan las baja, efek elemen lainnya dapat diperkirakan dengan menyamakannya dengan jumlah karbon yang setara. Jadi, efek konten total paduan dapat dinyatakan dalam bentuk karbon setara (CE). Formula empiris yang dapat digunakan untuk menilai risiko retak di bawah bead (undebead) dalam baja karbon adalah sebagai berikut:

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (3.1)$$

Gambar 3.5 menunjukkan hubungan umum antara komposisi baja karbon (setara karbon) dan kekerasan, sensitivitas retak underbead, atau kemampuan las berdasarkan kapasitas beban lengkung dari manik las. Secara umum, baja dengan nilai CE rendah (misal 0,2 ke 0,3) memiliki kemampuan las yang sangat baik; Namun, kerentanan terhadap retak underbead dari hidrogen meningkat ketika CE melebihi 0,40. Baja dengan hanya 0,20% C dan 1,60% Mn akan memiliki CE sebesar 0,60, menunjukkan sensitivitas yang relatif tinggi terhadap keretakan.



Gambar 3.5 Hubungan Antara Komposisi dan Kekerasan underbead, Sensitivitas Retak, dan Sudut Berlekuk untuk Pelat Baja C-Mn Tebal 25 mm (1 in.) Dilas dengan Elektroda Tertutup E6010

3.2.1. BAJA KARBON (*CARBON STEELS*)

Baja karbon adalah paduan besi dan karbon, karbon biasanya tidak melebihi 1,0%, penambahan unsur mangan tidak melebihi 1,65%, dan tembaga dan silikon masing-masing tidak melebihi 0,60%. Unsur-unsur paduan lainnya biasanya tidak hadir lebih dari jumlah residu. Baja Karbon umumnya dikategorikan menurut kandungan karbonnya, sebagaimana tercantum dalam Tabel 3.1. Propertis dan kemampuan las baja ini tergantung terutama pada kandungan karbon; unsur-unsur lain hanya memiliki efek terbatas (AWS Vol 4).

Praktik deoksidasi dalam proses pembuatan baja mempengaruhi karakteristik dan sifat baja. Jadi, baja karbon dapat diklasifikasikan secara luas sesuai dengan berbagai deoksidasi: rimmed, capped, semi killed, atau baja yang killed (terdeoksidasi). Sebagian besar baja modern dibuat dengan proses pengecoran continius casting, sepenuhnya killed dan aluminium-treated untuk mengontrol ukuran butir.

The Society of Automotive Engineers (SAE) mengklasifikasikan baja karbon dengan kodefikasi yaitu 10XX, 11XX, 12XX, dan 15XX groups. Grup

10XX memiliki maksimum 1,0% mangan; mangan dalam rentang kelompok 15XX dari 1,00% menjadi 1,65%. baja 11XX yang diregulasi ulang dan baja 12XX yang disulfurisasi dan difosforilasi dirancang untuk meningkatkan kemampuan mesin. Namun, pengelasan fusi sulit dilakukan dengan bahan-bahan ini terutama rentan terhadap retak pembekuan (AWS Vol 4).

Tabel 3.1 klasifikasi dan kemampuan las baja karbon (AWS Vol 4)

Common name	Carbon %	Typical Hardness	Typical use	Weldability
Low carbon steel	0,15 max	60 HRB	Special plate and shape, sheet, strip, welding electrodes	Excellent
Mild steel	0,15-0,30	90 HRB	Structural shapes, plate, and bar	Good
Medium-carbon steel	0,30-0,50	25 HRC	Machine parts and tools	Fair (preheat and postheat normally required: low hydrogen welding process recommended)
High carbon steel	0,50-1,00	40 HRC	Springs, dies, railroad rail	Poor (low hydrogen welding process, preheat, and postheat required)

Standar yang diterbitkan oleh ASTM menunjuk baja karbon didasarkan pada sifat kimia atau mekanis, atau keduanya, dalam hubungannya dengan bentuk produk dan aplikasi yang dimaksud. Standar ASTM A 830 mencakup pelat baja karbon SAE; ASTM A 576 mencakup batang baja karbon SAE. Baja karbon

ASTM yang umum digunakan dalam konstruksi, bejana tekan, dan perpipaan tercantum dalam Tabel 3.2

Kemampuan Las (Weldability) Baja Karbon

Kemampuan las jenis baja karbon ditentukan terutama oleh sensitivitas baja terhadap keretakan hidrogen; meskipun kerentanan terhadap retak pembekuan dan praktik deoksidasi juga dapat mempengaruhi kemampuan las beberapa grade baja, seperti yang dijelaskan sebelumnya.

Tabel 3.2 komposisi and kekuatan dari standar ASTM untuk baja karbon

Application	ASTM Standard	Type or Grade	Typical Composition Limits, % ^a			Tensile Strength		Min. Yield Strength	
			C	Mn	Si	MPa	ksi	MPa	ksi
Structural Steels									
Welded buildings, bridges, and general structural purposes	A 36	—	0.29	0.80-1.20	0.15-0.40	440-550	58-80	250	36
Welded buildings and general purposes	A 529	50	0.27	1.35	0.40	485-690	70-100	345	50
		55	0.27	1.35	0.40	485-690	70-100	380	55
General purpose plate (improved toughness)	A 573	58	0.23	0.60-0.90	0.10-0.35	400-490	58-71	220	32
		65	0.26	0.85-1.20	0.15-0.40	450-530	65-77	240	35
		70	0.28	0.85-1.20	0.15-0.40	485-620	70-90	290	42
Pressure Vessel Steels									
Plate, low and intermediate tensile strength	A 285	A	0.17	0.90	—	310-450	45-65	165	24
		K	0.22	0.90	—	345-485	50-70	185	27
		C	0.28	0.90	—	380-515	55-75	205	30
Plate, manganese-silicon	A 299	—	0.30	0.90-1.40	0.15-0.40	515-655	75-95	275	40
Plate, intermediate and high-temperature service	A 515	60	0.31	0.90	0.15-0.40	415-550	60-80	220	32
		65	0.33	0.90	0.15-0.40	450-585	65-85	240	35
		70	0.35	1.20	0.15-0.40	485-620	70-90	260	38
Plate, moderate and low-temperature service	A 516	55	0.26	0.60-1.20	0.15-0.40	380-515	55-75	205	30
		60	0.27	0.85-1.20	0.15-0.40	415-550	60-80	220	32
		65	0.29	0.85-1.20	0.15-0.40	450-585	65-85	240	35
		70	0.31	0.85-1.20	0.15-0.40	485-620	70-90	260	38
Plate, carbon-manganese-silicon heat-treated	A 537	1 ^b	0.24	0.70-1.60	0.15-0.50	450-585	65-85	310	45
		2 ^c	0.24	0.70-1.60	0.15-0.50	515-655	75-95	380	55
		3 ^c	0.24	0.70-1.60	0.15-0.50	515-655	75-95	345	50

Piping and Tubing									
Welded and seamless pipe, black and galvanized	A 53	A	0.25	0.95-1.20	—	330	48 min.	205	30
		B	0.30	0.95-1.20	—	415	60 min.	240	35
Seamless pipe for high-temperature service	A 106	A	0.25	0.27-0.93	0.10 min.	330	48 min.	205	30
		B	0.30	0.29-1.06	0.10 min.	415	60 min.	240	35
		C	0.35	0.29-1.06	0.10 min.	485	70 min.	275	40
Structural tubing	A 501	—	0.26	—	—	400	58 min.	250	36

Cast Steels									
General use	A 27	60-30	0.30	0.60	0.60	415	60 min.	205	30
Valves and fittings for high-temperature service	A 216	WCA	0.25	0.70	0.60	415-585	60-85	205	30
		WCB	0.30	1.00	0.60	485-655	70-95	250	36
		WCC	0.25	1.20	0.60	485-655	70-95	275	40
Valves and fittings for low-temperature service	A 352	LCA ^a	0.25	0.70	0.60	415-585	60-85	205	30
		LCB ^b	0.30	1.00	0.60	450-620	65-90	240	35
		LCC ^c	0.25	1.20	0.60	485-655	70-95	275	40

a. Single values are maximum unless otherwise noted.
b. Normalized condition.
c. Quenched and tempered (Q&T) condition.

Kandungan Karbon

adapun pengaruh kandungan karbon adalah sebagai berikut:

1. Sensitivitas terhadap retak hidrogen meningkat sebanding dengan peningkatan setara karbon, kandungan hidrogen dari logam las, dan ketebalan benda kerja;
2. Karbon adalah unsur paduan yang memiliki efek terbesar pada sensitivitas terhadap retak hidrogen;
3. Efek karbon dan elemen lain pada kerentanan terhadap retak hidrogen dapat diperkirakan menggunakan rumus setara karbon; dan
4. Baja karbon menunjukkan peningkatan kerentanan untuk terjadinya retak hidrogen ketika kandungan karbon melebihi sekitar 0,15%, meskipun baja dengan lebih sedikit dari 0,15% karbon tidak kebal terhadap retak hidrogen, terutama ketika bagian tebal dilas atau tegangan sisa tinggi hadir, atau keduanya.

Laju Pendinginan Las (Weld Cooling Rate)

Saat mengelas benda kerja berukuran tebal dengan proses pengelasan busur, logam las dan zona yang terpengaruh panas bisa mengeras secara signifikan karena mereka diquench oleh massa yang besar dari logam induk. Laju pendinginan dan karbon ekuivalen baja adalah faktor pengontrol yang sangat menentukan tingkat pengerasan. Tingkat pendinginan terutama tergantung pada faktor-faktor berikut:

ketebalan dan geometri sambungan benda kerja, logam-dasar suhu sebelum pengelasan dimulai, dan masukan panas. Akibatnya, penggunaan arus pengelasan lebih tinggi, lebih lambat kecepatan pengelasan (menghasilkan input panas tinggi), atau pemanasan awal dari logam tidak mulia akan mengurangi tingkat pendinginan zona las. Panaskan terlebih dahulu harus dipertahankan sementara manik-manik berturut-turut disimpan.

Dengan kandungan karbon yang lebih tinggi atau peningkatan benda kerja yang tebal, pemanasan awal yang lebih tinggi dan suhu interpass harus digunakan untuk mengurangi laju pendinginan lasan dan dengan demikian mengontrol kekerasan las dan meminimalkan kemungkinan retak

Di tempat las pengelasan lembaran baja karbon, *nugget* dapat mengeras akibat pendinginan yang cepat oleh elektroda paduan tembaga berpendingin air bersentuhan dengan permukaan lembaran. Kontrol panas elektronik khusus dapat memberikan siklus pemanasan awal atau pasca-las dalam jadwal pengelasan untuk mengontrol laju pendinginan dan kekerasan *nugget*.

3.2.2. Baja Pemesinan (Free Machining Steels)

Kandungan sulfur dan fosfor dalam baja karbon tidak menyebabkan retak pembekuan las. Namun, ketika sejumlah besar elemen yang ditambahkan, seperti halnya pada beberapa baja pemesinan, baja akan memiliki kemampuan las yang relatif buruk karena retak pembekuan dalam logam las.

Retak hasil pembekuan dari konstituen leleh rendah diperkaya dengan fosfor dan belerang pada batas butir-butir mungkin terkoyak oleh tekanan panas selama solidifikasi. Konten sulfur tinggi juga mempromosikan porositas pada logam las.

Timbal (Pb) adalah elemen lain yang ditambahkan ke beberapa baja untuk meningkatkan kemampuan mesin. Hampir tidak larut dalam baja dan butiran yang berbeda. unsur Lead bisa meleleh selama pengelasan dan menguap menjadi asap las. Kadang-kadang, timbal dapat menyebabkan porositas dan embrittlement baja. Kekhawatiran lain dari unsur timbal adalah kehadiran racunnya di dalam asap las. Ini membutuhkan tindakan pencegahan khusus untuk memastikan ventilasi yang

baik selama proses pengelasan. Biasanya, baja mesin bebas tidak boleh dilas. Jika baja jenis ini harus dilas, maka elektroda rendah hidrogen dan arus las rendah harus digunakan untuk membatasi pengenceran (*dilution*), porositas, dan retak.

3.2.3. Baja Karbon Rendah (Low Carbon Steels)

Baja dengan karbon kurang dari 0,15 % dikenal sebagai baja karbon rendah. Secara umum, baja ini memiliki kemampuan keraskan sangat rendah dan mudah disambung dengan pengelasan. Seperti disebutkan sebelumnya, baja karbon mengandung 0,15% karbon hanya mampu dikeraskan menjadi 30 Rockwell Hardness Skala C (HRC) hingga 40 HRC bila didinginkan pada kecepatan yang sangat tinggi. (Lihat Gambar 3.4) Namun, ini akan membutuhkan proses pengelasan dengan densitas energi tinggi (misal EBW, BBLR). Untuk sebagian besar proses pengelasan, laju pendinginan terlalu rendah memungkinkan zona yang terkena dampak panas dari lasan mencapai tingkat kekerasan ini.

Sambungan las yang cepat dingin pada baja yang mengandung karbon sekitar 0,10% dan lebih tinggi dapat memperkembang retakan selama pembentukan dingin karena area lasan lebih sulit daripada logam induk. Ketika sambungan las akan mengalami pembentukan dingin yang parah (misalnya, ketika menggunakan proses pengelasan titik), kandungan karbon baja harus rendah; 0,08% karbon cukup untuk mengembangkan kekerasan, untuk lasan spot welding pada baja lembaran tipis. Kekerasan pada lasan spot bukan masalah serius pada baja rendah karbon, kecuali untuk beberapa aplikasi kritis.

Praktek deoksidasi yang digunakan dalam pembuatan baja adalah faktor lain yang dapat mempengaruhi kekuatan logam las pada baja karbon rendah, terutama dengan pengelasan autogenous. Baja karbon rendah tanpa rimmed dan tertutup tidak terdeoksidasi. Ketika baja ini dilelehkan kembali selama pengelasan tanpa penambahan deoxidizers, karbon dan oksigen dalam baja bereaksi membentuk karbon monoksida, yang dapat terperangkap sebagai porositas dalam logam las. Hal ini terutama pada kecepatan pengelasan yang tinggi, karena gas memiliki waktu lebih sedikit untuk keluar dari kolam las. Porositas logam las pada baja ini dapat

diminimalkan dengan menambahkan logam pengisi yang mengandung deoksidator yang cukup (misalnya, Aluminium, mangan, atau silikon) untuk mengumpulkan oksigen dari kolam las.

Dengan pengelasan busur tungsten gas, busur plasma, atau pengelasan busur logam gas, logam pengisi E70S-2 harus digunakan karena itu mengandung sejumlah besar deoxidizers. Selimut pada elektroda las busur logam terlindung biasanya mengandung deoxidizers yang cukup untuk pengelasan baja rimmed atau baja capped. Cat yang mengandung aluminium khusus dapat diterapkan pada permukaan sambungan untuk mendeoksidasi logam las selama pengelasan autogenous. Diperlukan las busur terendam dari baja berbingkai atau tertutup, pemilihan kombinasi elektroda dan fluks yang mengandung deoxidizers yang cukup (misal silikon atau mangan) untuk menghasilkan lasan sound, terutama ketika kecepatan pengelasan tinggi digunakan. Kekuatan logam las biasanya tidak menjadi masalah dengan baja karbon rendah pada killed ketika proses pengelasan yang baik digunakan.

3.2.4 Baja Ringan (Mild Steels)

Baja karbon mengandung sekitar 0,15 % hingga Karbon 0,30 % biasa disebut baja ringan. Retak underbead atau kurangnya ketangguhan pada bagian Zona yang terkena panas (HAZ) biasanya tidak ditemui saat pengelasan baja ringan yang mengandung karbon tidak lebih dari 0,20% dan 1,0% mangan. Baja ini bisa dilas tanpa *preheat*, *postheat*, atau prosedur pengelasan khusus saat ketebalan sambungan kurang dari 25 mm (1 in.) dan ketika penahanan sambungan tidak parah.

Ketika kandungan karbon meningkat menjadi sekitar 0,30% dan kandungan mangan meningkat menjadi sekitar 1,40%, kemampuan las tetap baik; Namun, lasan ini menjadi lebih rentan terhadap peretakan hidrogen karena peningkatan kemampuan keraskan dan kekuatan luluhnya. Dengan kondisi ini pengelasan direkomendasikan harus memenuhi prosedur pengelasan yang menghasilkan rendah hidrogen. Pemanasan awal dan kontrol suhu interpass juga mungkin

diperlukan, terutama ketika ketebalan sambungan lebih besar dari 25 mm (1 in.) atau ketika sambungan ekstrinsik dengan pengekangan tinggi. Jika retak hidrogen masih merupakan masalah walaupun prosedurnya sudah dilakukan, hidrogen dapat terdifusi dari sambungan baik dengan mempertahankan suhu pemanasan sebelumnya atau dengan pemanasan setelah pengelasan selesai. Suhu yang digunakan setidaknya 150 °C (300 °F) biasanya efektif untuk menghilangkan hidrogen dalam pengelasan baja ringan. Memegang waktu pemanasan akan meningkat secara proporsional dengan ketebalan las, biasanya 2 hingga 3 jam per 25 mm (1 in.).

Beberapa baja ringan dipasok setelah di normalisasi atau dengan kondisi setelah quench dan temper untuk memberikan sifat ketangguhan yang baik atau kekuatan tinggi. Kekuatan tarik dapat berkisar dari 450 MPa hingga 690 MPa (65 ksi hingga 100 ksi), tergantung pada kandungan karbon dan mangan dan perlakuan panas yang diberikan.

Prosedur pengelasan digunakan sebagai petunjuk untuk perlakuan panas yang diberikan pada baja ringan sebagian besar sebagai kebutuhan untuk mendapatkan ketangguhan minimum pada logam las, HAZ, dan logam dasar. Tindakan pencegahan harus diambil untuk memastikan pengelasan dilakukan dengan menggunakan kondisi rendah hidrogen. Prosedur standar pengelasan digunakan pada pengelasan SMAW, busur terendam, dan GMAW karena laju pendinginan pada HAZ cukup cepat sehingga mereproduksi struktur mikro yang mirip dengan baja yang dinormalisasi atau baja yang diquench. Ketika kandungan karbonnya terbatas pada sekitar 0,20%, retak di bawah underbead atau kurangnya ketangguhan dalam HAZ biasanya tidak menjadi masalah. Bahkan ketika pendinginan yang sangat cepat terjadi karena input panas pengelasan rendah. Bahkan, memungkinkan HAZ mendinginkan dengan cepat mungkin lebih disukai. Masukan Panas pada pengelasan lebih tinggi atau perlakuan *preheat* lebih tinggi dan suhu interpass normal, yang menghasilkan laju pendinginan yang lebih lambat, cenderung meningkatkan ukuran butir dan menghasilkan perlit kasar di HAZ.

Kondisi mikrostruktur ini menyebabkan rendah kekuatan dan ketangguhan yang buruk.

Jika proses atau prosedur pengelasan untuk pemanasan jangka panjang pada HAZ, suhu tinggi dan lambatnya pendinginan (mis., dalam pengelasan electroslog), pengelasan mungkin memerlukan perlakuan panas (misal normalisasi dan tempering) untuk mengembalikan kekuatan dan ketangguhan yang baik pada HAZ. Ketika perlakuan panas pada lasan tidak ekonomis atau tidak praktis, laju pendinginan dalam zona lasan must be/harus cukup cepat untuk menghasilkan mikro dengan kekuatan dan ketangguhan yang memadai.

Secara umum, baja ringan yang diberi perlakuan panas dapat dilas dengan busur tanpa pemanasan. Namun, pemanasan awal harus digunakan ketika suhu logam di bawah sekitar 10 °C (50 °F), dan pemanasan awal dengan suhu sekitar 40 °C (100 °F) atau lebih tinggi digunakan jika ketebalan pelat lebih dari 25 mm (1 in.) atau jika sambungan sangat terkendali.

Dilusi harus dipertimbangkan saat memilih logam pengisi (filler) untuk memberikan sifat mekanik tertentu dalam penyambungan baja. Sifat mekanik dari logam las dalam standar AWS A5 berlaku untuk logam las yang tidak larut. Sifat-sifat logam las dalam fabrikasi yang sebenarnya mungkin berbeda dari nilai yang dilaporkan karena efek dilusi. Logam pengisi yang digunakan baja paduan rendah mungkin diperlukan untuk memenuhi persyaratan sifat mekanik untuk perlakuan panas ringan baja. Namun, kekuatan logam las seharusnya tidak jauh melebihi kekuatan logam dasar. Logam las dengan kekuatan tinggi dapat memaksa HAZ yang lebih lunak untuk menjalani regangan terlokalisasi berlebihan ketika sambungan mengalami deformasi dekat suhu kamar. Dalam kondisi seperti itu, kerusakan dapat terjadi sebelum waktunya di daerah HAZ.

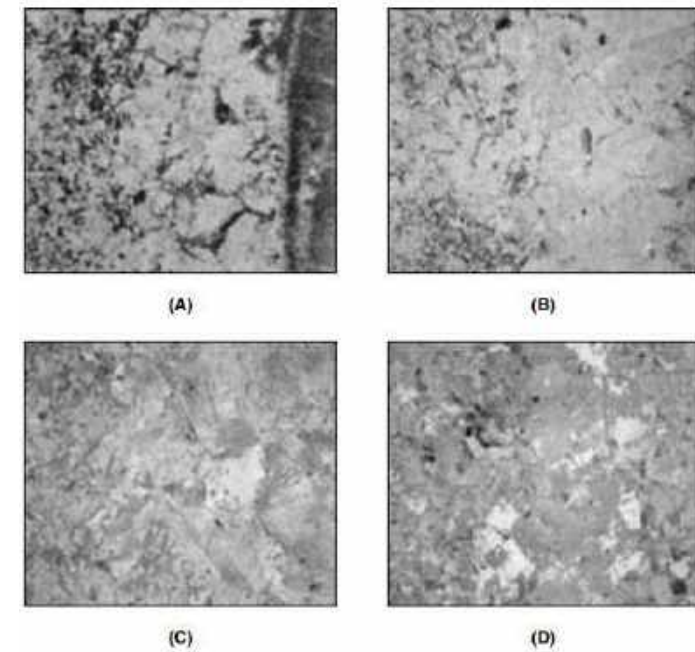
Untuk sambungan butt joint, logam pengisi harus dipilih agar logam las sama kekuatannya dengan logam dasar. Untuk lasan fillet, logam pengisi dengan kekuatan yang lebih rendah kadang-kadang digunakan untuk memberikan keuletan yang cukup untuk mengakomodasi konsentrasi tegangan, meskipun ukuran lasan

mungkin perlu diperbesar. Namun, logam pengisi dengan kekuatan rendah tidak boleh digunakan untuk tujuan agar kesulitan terjadinya retak.

Baja karbon sedang (Medium-Carbon Steels)

Perubahan nyata dalam kemampuan las baja karbon terjadi pada rentang kadar karbon dari 0,30% hingga 0,50%, yang diidentifikasi baja karbon sedang. Baja mengandung sekitar 0,30% karbon dan lebih sedikit dari sekitar 1,5% kandungan mangan relatif baik kemampuan lasnya. Namun, karena kandungan karbonnya meningkat, prosedur pengelasan harus dirancang untuk menghindari pembentukan sejumlah besar martensit keras di zona yang terkena panas (HAZ). Jika baja yang mengandung sekitar 0,50% karbon dilas dengan prosedur biasa seperti yang digunakan untuk baja ringan, kemungkinan HAZ cukup keras, ketangguhannya rendah, dan rentan terhadap retak hidrogen.

Untuk sebagian besar aplikasi, baja karbon menengah seharusnya dipanaskan sebelum pengelasan untuk mengontrol laju pendinginan dalam logam las dan HAZ, sehingga mengontrol pembentukan martensit. Suhu pemanasan awal yang tepat tergantung pada kesetaraan karbon dari sambungan baja yang tebal, dan prosedur pengelasan yang sesuai. Secara umum, persyaratan suhu pemanasan awal meningkat dengan nilai karbon ekuivalen lebih tinggi, ketebalan sambungan lebih besar, atau peningkatan hidrogen dalam busur. Dengan karbon ekuivalen dalam kisaran 0,45 hingga 0,60, suhu pemanasan awal dikisaran 95 °C hingga 200 °C (200 °F hingga 400 °F) direkomendasikan, tergantung pada proses pengelasan dan ketebalan sambungan. Gambar 3.6 menunjukkan bagaimana peningkatan suhu pemanasan awal untuk mengurangi jumlah martensit terbentuk pada butiran kasar HAZ dari pelat baja SAE 1045 yang dilas GMAW dengan Tebal 13 mm (1/2 in.).



Gambar 3.6 Pengaruh Temperatur Preheat pada Mikrostruktur didaerah HAZ pada baja SAE 1045 Steel, dengan ketebalan Plat 3 mm (1/2 in.)

Perlakuan panas untuk melepaskan tegangan subkritis (misal temperature 600 °C untuk 1 jam/ 25 mm [1100 ° F untuk 1 jam/ in.]) disarankan perlakuan panas dilakukan segera setelah pengelasan, terutama pada benda kerja yang tebal, pengekangan sambungan yang tinggi, atau baja untuk kondisi penggunaan yang menerima benturan atau beban dinamis. Ketika proses menghilangkan tegangan tidak efektif, maka proses pengelasan harus dipertahankan pada atau sedikit di atas suhu pemanasan awal yang ditentukan selama 5 menit/mm hingga 7 menit/mm (2 jam/ hingga 3 jam/in) dari ketebalan sambungan. Prosedur ini mendorong difusi hidrogen dari zona lasan dan mengurangi kemungkinan retak selama proses. Namun, itu tidak boleh dianggap sebagai pengganti perlakuan panas yang tepat untuk menghilangkan stres. Pendinginan lambat pada suhu ruangan setelah menghilangkan tegangan dianjurkan untuk menghindari tegangan termal baru.

Prosedur pengelasan rendah hidrogen wajib dilakukan untuk baja ini. Pemilihan logam pengisi untuk busur pengelasan menjadi lebih penting karena kandungan karbonnya meningkat. Pengambilan karbon dengan Dilusi dari baja

yang mengandung 0,5% karbon biasanya akan menghasilkan kekerasan tinggi dalam logam las, kerentanan terhadap retak, dan kecenderungan patah getas. Dilusi dapat diminimalkan dengan deposit manik las kecil, atau dengan menggunakan prosedur pengelasan yang memberikan penetrasi dangkal, atau dengan buttering dengan permukaan alur sebelum pemasangan.

Untuk membatasi Dilusi dalam lasan multi pass, input panas rendah umumnya direkomendasikan untuk beberapa lapisan pertama. Input panas yang lebih tinggi dapat digunakan untuk melengkapi sambungan. hal Itu merupakan cara yang baik untuk mendepositkan manik las akhir, atau manik-manik, seluruhnya pada logam las yang sebelumnya disimpan tanpa melelehkan logam induk. Praktek ini memiliki efek temper dari zona yang terkena panas sebelumnya manik-manik las diendapkan, terutama yang di logam dasar. Temperatur optimal dicapai saat input panas dari lapisan kedua adalah sekitar 50% lebih besar dari yang digunakan untuk lapisan pertama melawan logam dasar. Namun, perlakuan panas pasca pengelasan masih merupakan persyaratan teknik.

Baja karbon sedang digunakan secara luas dalam pembuatan mesin dan peralatan. Seringkali baja ini dipilih karena ketahanan ausnya daripada kekuatannya yang tinggi, dan benda kerja sering kali harus diperlakukan panas untuk memenuhi persyaratan kekuatan dalam penggunaannya. Pengelasan dapat dilakukan sebelum atau setelah perlakuan panas akhir; Namun, pemilihan logam pengisi dan prosedur pengelasan harus dipertimbangkan dalam konteks ini. Jika pengelasan dilakukan sebelum perlakuan panas, perawatan khusus harus dilakukan ketika memilih logam pengisi di Untuk mencapai kesesuaian yang baik antara logam dan sifat logam dasar setelah perlakuan panas. Paduan rendah logam pengisi mungkin diperlukan untuk tujuan ini. Jika pengelasan harus dilakukan pada komponen yang sebelum dipanaskan, tindakan pencegahan tambahan mungkin diperlukan. Mengeraskan komponen dapat memaksakan pengeangan tambahan yang kemungkinan meningkatkan potensi retak jika prosedur pemanasan awal yang sesuai tidak digunakan. Juga, karena panas pengelasan kemungkinan besar

akan melunakkan bagian terluar dari HAZ, (butiran halus atau temper, atau keduanya) perlakuan pemanasan ulang dari lasan mungkin diperlukan untuk mengembalikan sifat yang diinginkan.

Baja Karbon Tinggi (*HIGH-CARBON STEEL*)

Kemampuan las baja karbon tinggi sangat buruk karena kemampuan lasnya dan sensitivitas yang tinggi terhadap keretakan logam las dan zona yang terpengaruh panas dalam las baja ini. Prosedur pengelasan dengan rendah hidrogen harus digunakan untuk pengelasan busur. Memanaskan lebih dulu dan melewati suhu 204 ° C (400 ° F) dan lebih tinggi diperlukan untuk memperlambat pembentukan martensit karbon tinggi yang rapuh di lasan logam dan HAZ. Dianjurkan menghilangkan tegangan pasca pengelasan khususnya untuk sambungan las dalam benda kerja tebal. prosedur menghilangkan tegangan yang dijelaskan sebelumnya untuk baja karbon menengah harus digunakan.

Pemilihan logam pengisi yang tepat tergantung pada kandungan karbon baja, desain lasan, dan persyaratan penggunaan. Biasanya, logam pengisi tidak diproduksi dengan kandungan karbon tinggi. Namun, logam pengisi baja paduan rendah mungkin cocok untuk banyak aplikasi. Baja tahan karat Austenitik atau logam pengisi berbasis nikel seperti E309, E312, atau ENiCrFe-3 juga dapat digunakan. Efek dilusi logam las pada respons terhadap perlakuan panas pasca-las harus dievaluasi. Pengambilan karbon dalam logam pengisi baja paduan dapat secara signifikan meningkatkan pengerasan logam las. Akibatnya, prosedur pengelasan harus dirancang untuk meminimalkan dilusi.

Baja karbon tinggi biasanya digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan kekerasan tinggi atau ketahanan abrasi, yang hanya diperoleh dengan perlakuan panas. Seharusnya baja dilas dalam kondisi anil dan kemudian dilakukan perlakuan panas. proses Annealing direkomendasikan sebelum perbaikan bagian yang rusak. Pengelasan yang sukses membutuhkan pengembangan dan pengujian prosedur pengelasan khusus untuk setiap aplikasi. Persyaratan layanan lasan harus dipertimbangkan ketika mengembangkan prosedur pengelasan dan pengujian ini.

Pengelasan Baja Karbon (Welding Carbon Steels)

Proses dan jenis logam pengisi digunakan untuk mengelas baja karbon dibahas dalam bagian ini. Proses termasuk las busur logam terlindung (SMAW) dan proses las busur gas: las gas metal arc welding (GMAW), pengelasan busur tungsten gas (GTAW), dan plasma arc welding (PAW). Flux cored arc welding (FCAW), las busur terendam (SAW), pengelasan electro slag (ESW), pengelasan electrogas (EGW), gas oxyfuel pengelasan (OFW), pengelasan resistansi (RW), pengelasan Elektron balok (EBW), pengelasan sinar laser (BBLR), dan pengelasan gesekan (FW) juga dibahas.

Logam pengisi yang digunakan proses pengelasan ini, diklasifikasikan oleh American Welding Society (AWS) Committee on Filler Metals and Allied Materials, dan spesifikasi diterbitkan oleh AWS. Baja karbon juga dapat disambung oleh beberapa pengelasan resistansi dan proses pengelasan kondisi padat (solid state) . Semua proses ini dibahas secara rinci dalam Buku Pegangan Pengelasan Volume 2 dan 3 dari, Pengelasan Proses edisi ke-9. Untuk informasi tambahan tentang proses pengelasan, lihat Lampiran B, yang menyediakan panduan sumber energi untuk berbagai bab Volume Buku Pegangan Pengelasan

Las Busur Logam Terlindung (Shielded Metal Arc Welding)

Sebagian besar baja karbon dapat dilas dengan proses SMAW dan elektroda tertutup, asalkan prosedur pengelasan yang sesuai (termasuk pemanasan awal) jika diperlukan. Elektroda tertutup diklasifikasikan menurut jenis penutup dan juga bahan komposisi kimianya dan sifat mekanik dari logam las. Elektroda tertutup untuk baja karbon yang menghasilkan logam las dengan kekuatan tarik minimum 410 MPa (60 ksi) diklasifikasikan sebagai E60XX; mereka itu menghasilkan 480 MPa (70 ksi) diklasifikasikan sebagai E70XX

Aturan umum saat menggunakan metode pengelasan SMAW untuk mengelas baja karbon adalah bahwa logam las harus sedikit melebihi kekuatan bahan dasar. Atas dasar ini, maka Klasifikasi elektroda E60XX cocok untuk mengelas baja karbon rendah dan baja ringan, asalkan logam las kekuatannya

memadai. Elektroda tertutup E60XX umumnya tidak diproduksi dengan penutup hidrogen rendah, dan mereka tidak boleh digunakan untuk baja las yang sensitif terhadap retak hydrogen.

Jenis elektroda tertutup E70XX diproduksi dengan selulosa, titania, dan penutup rendah hidrogen. Elektroda rendah hidrogen harus digunakan ketika lasan dengan kekuatan tinggi atau kondisi pengelasan rendah hidrogen, atau keduanya dibutuhkan. Jenis elektroda rendah hidrogen (E7015, E7016, E7018, E7028, dan E7048) harus ditangani dan disimpan dalam kondisi yang mencegah menaikkan kelembaban di lapisan elektroda.

Elektroda untuk baja paduan rendah, Tipe E70XX-X sampai E130XX-X, yang diproduksi dengan hidrogen rendah dan pelapis lainnya, dirancang untuk menghasilkan logam las dengan kekuatan tarik minimum 480 MPa hingga 830 MPa (70 ksi hingga 120 ksi). Kandungan karbon yang diendapkan menjadi logam las akan bertambah 0,15% atau kurang, tergantung pada jenis elektroda. Elektroda hidrogen rendah dapat dipilih dari grup ini untuk mencocokkan kekuatan tarik baja karbon menengah atau tinggi. Sekali lagi, kondisi kerja dan desain struktur akan menentukan apakah lasan harus sesuai dengan kekuatan atau kekerasan baja. Elektroda harus disimpan dan digunakan dalam kondisi yang mencegah pengambilan kelembaban oleh pelapisan, seperti yang dibahas sebelumnya.

Las Busur Gas Terlindung (Gas-Shielded Arc Welding)

Proses pengelasan busur terlindung gas termasuk gas metal arc welding, pengelasan busur tungsten gas (GTAW), dan pengelasan busur plasma. baja karbon dan baja paduan rendah elektroda telanjang dan batang las tersedia untuk digunakan bersama proses-proses ini. Elektroda diklasifikasikan pada komposisi kimia dan sifat-sifat mekanis logam las yang tidak dilarutkan. Kekuatan tarik minimum berkisar dari 480 MPa hingga 830 MPa (70 ksi hingga 120 ksi). Pertimbangan yang sama berlaku untuk pemilihan elektroda telanjang seperti yang untuk elektroda tertutup.

Gas pelindung biasanya digunakan untuk pengelasan busur logam gas pada baja karbon adalah jenis gas karbon dioksida (CO₂), argon dengan karbon dioksida, dan argon dengan oksigen. Pemilihan campuran gas terutama tergantung pada komposisi elektroda dan jenis transfer logam yang diinginkan (mis., semprot, globular, atau Short circuiting). Umumnya, gas pelindung CO₂ cocok untuk baja karbon rendah dan baja ringan. Campuran argon-oksigen atau argon-karbon dioksida cocok untuk semua baja karbon dan direkomendasikan untuk digunakan dengan elektroda baja paduan rendah. Ketangguhan Las logam sering meningkat, tetapi tidak selalu, ketika salah satu campuran gas ini digunakan.

Argon adalah gas pelindung yang biasanya digunakan pada pengelasan jenis GTAW dan PAW. Namun, campuran helium-argon mungkin digunakan untuk memberikan penetrasi sambungan yang lebih dalam atau untuk mengizinkan kecepatan pengelasan lebih cepat dengan pengelasan jenis otomatis. Karakteristik rendah hidrogen dari proses pengelasan busur berpelindung gas akan terganggu jika logam pengisi atau gas pelindung terkontaminasi. Logam pengisi dapat terkontaminasi dengan karat, kelembaban, minyak, gemuk, atau bahan yang mengandung hidrogen lainnya. Oleh karena itu, pembersihan, pengemasan, pencegahan karat, dan penyimpanan yang tepat adalah penting untuk menghindari retak yang disebabkan oleh hidrogen.

Sistem pengiriman gas harus anti bocor untuk mencegah terkontaminasinya gas pelindung oleh kelembaban atau hidrokarbon, dan untuk mencegah masuknya udara yang lembab ke dalam sistem. Hanya pengelasan dengan gas pelindung digunakan dengan tingkat tertentu (misal rendah titik pengembunan). Semua jenis elektroda GMAW yang memenuhi batas difusi hidrogen yang sama yang diindikasikan untuk elektroda SMAW diidentifikasi oleh penunjuk yang sama, apakah logam berinti padat atau tubular. Petunjuk berlaku untuk elektroda ini didasarkan pada pengujian pada gas pelindung elektroda yang diklasifikasikan.

Las Busur Terendam (Submerged Arc Welding)

Pengelasan busur selam (SAW) dilakukan dengan elektroda, baik padat atau berinti logam, dan aliran butiran. Fluks melindungi busur dan kolam las dari atmosfer dan memodifikasi komposisi dan sifat mekanik lasan. Elektroda kawat berbentuk padat dibuat baja karbon dan baja paduan rendah diklasifikasikan menurut komposisi kimianya. Klasifikasi elektroda berinti logam terbuat dari baja paduan rendah pada komposisi kimia logam las yang didepositkan menggunakan fluks yang sesuai. Demikian juga, fluks diklasifikasikan berdasarkan komposisi kimia dan sifat mekanik dari logam las diendapkan dengan jenis elektroda tertentu.

Jadwal pengelasan dan perlakuan panas diperlukan untuk aplikasi tertentu dapat menghasilkan logam las dengan sifat mekanik yang berbeda dari yang dibutuhkan dengan spesifikasi logam pengisi. Dalam kasus seperti itu, sifat mekanik dari logam las harus ditentukan dengan pengujian yang sesuai. Sifat logam las dapat ditentukan baik dalam kondisi seperti dilas atau setelah perlakuan panas pascas las yang ditentukan.

Elektroda baja karbon dan kombinasi fluks dirancang untuk mencapai kekuatan tarik pada logam las minimum 410 MPa atau 480 MPa (60 ksi atau 70 ksi). Kombinasi ini direkomendasikan untuk pengelasan baja karbon rendah dan baja ringan dan juga untuk baja karbon sedang, baja karbon tinggi, dan paduan rendah ketika kekuatan tinggi tidak diperlukan dalam sambungan las. Direkomendasikan untuk kombinasi elektroda baja paduan rendah dan fluks pada pengelasan baja paduan dari komposisi yang sama, atau untuk pengelasan baja menengah dan baja karbon tinggi ketika diperlukan sambungan dengan kekuatan tinggi untuk memenuhi persyaratan layanan.

Respon terhadap perlakuan panas pasca-las harus dipertimbangkan. Seperti dijelaskan, fluks harus dijaga agar tetap bersih dan kering untuk mempertahankan kondisi pengelasan rendah hidrogen, dan itu harus diterapkan pada kedalaman yang cukup untuk memberikan perlindungan yang memadai. Selain itu, elektroda harus bersih dan bebas kontaminan, seperti yang dibahas untuk proses pengelasan busur

terlindung gas. Kombinasi fluks dan kawat las busur terendam yang memenuhi batas difusi hidrogen yang sama seperti yang ditunjukkan untuk elektroda SMAW diidentifikasi oleh perancang hidrogen yang sama. Kawat las dan fluks harus dipertimbangkan bersama.

3.3. Baja Kekuatan Tinggi Paduan Rendah (High-Strength Low-Alloy Steels)

Dari sudut pandang metalurgi, kelompok baja ini dikenal sebagai baja paduan rendah berkekuatan tinggi (HSLA) atau microalloyed sebenarnya adalah baja paduan rendah, meskipun faktanya bahwa secara historis, mereka telah dipasarkan ke industri sebagai baja karbon kelas atas. Baja paduan rendah berkekuatan tinggi diformulasikan dengan sejumlah kecil paduan elemen tertentu untuk memberikan kekuatan yang lebih tinggi, ketangguhan yang lebih baik dan kemampuan las, dan dalam beberapa kasus, resistensi yang lebih besar terhadap korosi di lingkungan tertentu, dari baja karbon biasa. Salah satu baja HSLA pertama adalah COR-TEN. Diperkenalkan pada 1930-an, COR-TEN memiliki ketahanan korosi atmosfer sekitar lima kali lebih baik dari baja karbon. Baja HSLA modern dirancang untuk menghasilkan propertis yang spesifik. Misalnya, beberapa baja HSLA digunakan dalam pipa dan bejana tekan dirancang untuk tahan degradasi H₂S, seperti retak bertahap diinduksi hidrogen. Baja HSLA konvensional digunakan terutama dalam kondisi dirol atau dinormalisasi. Proses pengerolan merupakan bagian integral dari pengembangan akhir peralatan mekanis; Namun, normalisasi atau pendinginan dan temper dapat meningkatkan ketangguhan pada bagian tebal atau memperpanjang rentang kekuatan beberapa tingkatan. Juga, praktik pengerolan khusus yang dikenal sebagai pemrosesan terkontrol termomekanis (TMCP) telah dirancang 25 tahun terakhir. Baja yang diproduksi dengan metode ini masih termasuk penggunaan yang luas, terutama di industri minyak dan gas.

Secara umum, baja HSLA diperkuat oleh kombinasi penyempurnaan butiran ferit, pengerasan presipitasi, dan penguatan substruktural. Penguatan

substruktural terjadi sebagai susunan dislokasi dan butiran ferit yang berinteraksi untuk meningkatkan kekuatan luluh. Karena mekanisme penguatan alternatif ini, baja HSLA tidak bergantung pada hasil transformasi seperti perlit, bainit atau martensit karena kekuatannya yang tinggi. Kandungan karbon dan paduannya yang rendah, pada gilirannya, berkontribusi untuk kemampuan las yang sangat baik dari kebanyakan baja HSLA.

Penambahan paduan utama niobium dan vanadium skala kecil pada baja HSLA, ditambahkan secara tunggal atau dalam kombinasi dalam jumlah hingga sekitar 0,10%. Untuk beberapa aplikasi, ketika bagian yang lebih tebal atau kekuatan yang lebih tinggi meliputi nikel atau molibdenum dapat digunakan untuk melengkapi formulasi paduan. Baja HSLA awal sering kali mengandung nitrogen yang ditambahkan dalam kombinasi dengan vanadium; Namun, dalam praktik sebagian besar telah hilang karena efek nitrogen yang merugikan pada ketangguhan, khususnya di zona yang terkena panas. Padahal, baja modern sering dimasukkan titanium dalam jumlah hingga 0,025% untuk digabungkan dengan sisa nitrogen, sehingga menekan pengerasan butir di zona yang terkena dampak panas dan meningkatkan ketangguhan keseluruhan.

Baja HSLA awalnya sering kali dibuat dengan bentuk cor ingot dan baik sepenuhnya cor atau setengah jadi. Sebagian besar baja modern dibuat dengan *continius casting*, yang mengharuskan penggunaan baja yang *full killed*. Beberapa pabrik, terutama di negara industri baru-baru ini, masih memproduksi coran ingot setengah jadi untuk aplikasi kekuatan rendah.

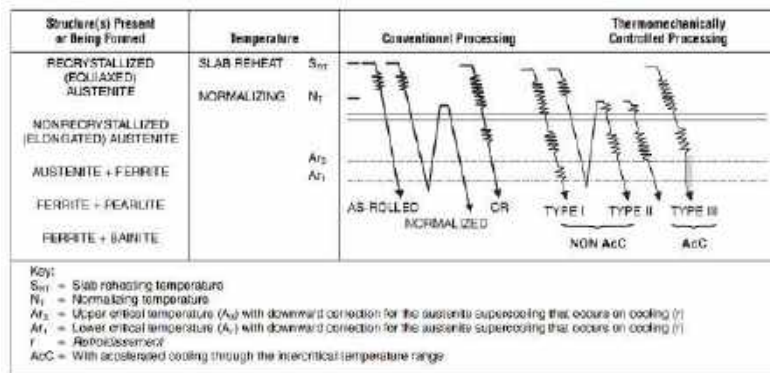
Kekuatan luluh baja HSLA berkisar dari 290 MPa hingga 760 MPa (42 ksi hingga 110 ksi). Kekuatan Tarik berada di kisaran 410 MPa hingga 830 MPa (60 ksi hingga 120 ksi). Terlepas dari kekuatan yang lebih tinggi dan ketangguhan yang lebih baik, baja HSLA sering diproduksi dengan kontrol yang ketat terhadap pengotor (mis., sulfur, fosfor, dan oksigen) untuk meningkatkan sifat-sifat lain seperti kelenturan, ketahanan terhadap sobekan lamelar, dan ketangguhan takik.

3.3.1. Baja Diproduksi Oleh Termomekanikal Proses Terkendali

Sejak akhir 1960-an, pembuatan baja struktural telah didorong oleh permintaan akan ketangguhan dan kekuatan yang lebih baik, dikombinasikan dengan kandungan paduan lebih sedikit untuk meningkatkan kemampuan las. Pentingnya struktur berbutir halus untuk meningkatkan kekuatan dan ketangguhan mengakibatkan pengembangan dari proses pengerolan terkendali, di mana suhu pengerolan akhir dalam rentang suhu normalisasi. Pada akhirnya, proses ini berkembang menjadi pemrosesan termomekanis terkontrol canggih yang digunakan dalam pembuatan baja modern. Kemajuan besar dalam kemampuan las, kekuatan, dan ketangguhan suhu rendah telah dihasilkan.

Klasifikasi

Baja yang diproduksi dengan pemrosesan yang dikendalikan secara termomekanis dibagi lagi menjadi tiga kategori: Tipe I, II, dan III. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7, Tipe I dan Tipe II tidak melibatkan pendinginan yang dipercepat dan berbeda dari satu sama lain, kisaran suhu akhir dimana deformasi mekanis (pengurangan ketebalan) dengan proses pengerolan. Untuk baja Tipe I TMCP, pengerolan dilakukan pada suhu yang relatif rendah sesuai ke wilayah fasa austenit-ferit dari diagram transformasi pendinginan kontinyu (CCT). Sebagai perbandingan, baja Tipe III menggabungkan pendinginan yang dipercepat pada kisaran suhu terbatas setelah pengerolan, tergantung pada target propertis dan variabel pabrik.



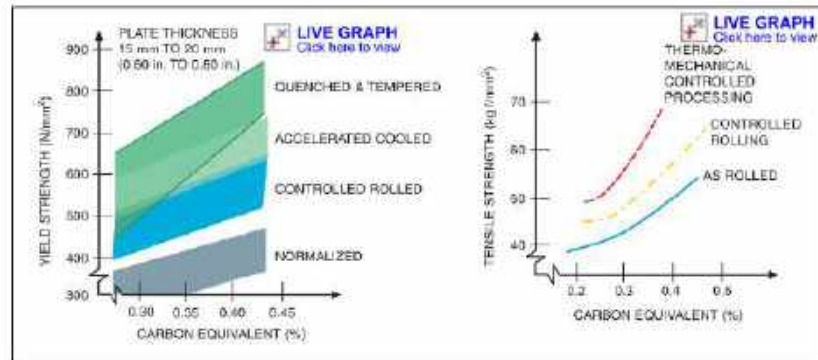
Gambar 3.7 — Definisi Pemrosesan Baja yang Dikontrol secara Termomekanis

Dibandingkan dengan Tipe I dan Tipe II yang dirol kontrol Baja TMCP, pendinginan dari Tipe III TMCP baja meningkatkan keseragaman through-thickness dalam ukuran butir dan sifat mekanik, terutama pelat yang lebih tebal (> 25 mm [> 1.0]), sambil mempertahankan komposisi yang lebih sedikit. Gambar 3.8 menggambarkan properti ini. komposisi kimia yang dioptimalkan, terutama karbon level rendah, membatasi degradasi ketangguhan di zona yang terpengaruh relatif terhadap logam dasar. hal Ini membuatnya lebih mudah untuk memenuhi persyaratan ketangguhan patah daerah HAZ seperti yang ditentukan untuk pelat baja lepas pantai dalam publikasi American Petroleum Institute (API) Rekomendasi Praktek untuk Kualifikasi Pra-Produksi untuk Pelat Baja untuk Struktur Lepas Pantai, API RP2Z.65 Kemampuan las, dalam hal ketahanan terhadap retak hidrogen di HAZ, juga ditingkatkan. Menurut indeks International Institute of Welding (IIW), karbon ekuivalen (CE) dan Pcm dari baja Tipe III TMCP umumnya cukup rendah sehingga pemanasan awal tidak diperlukan.

Parameter komposisi Pcm diperkenalkan mengakomodasi evolusi baja HSLA sebagaimana adanya diperkenalkan pada awal 1970-an. Itu ditunjukkan rumus CE konvensional yang dikembangkan oleh IIW (Persamaan 1.2 tanpa Si) tidak secara akurat memprediksi kecenderungan retak dengan kadar karbon yang dikurangi di antara baja HSLA yang lebih baru, terutama yang sedang digunakan dalam industri minyak dan gas untuk pipa saluran dan pelat struktural. Karena itu, rumus berikut adalah dikembangkan dan diterapkan pada baja ini:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3.2)$$

Kinerja optimal dalam produksi dari Baja TMCP Tipe III yang membutuhkan peningkatan kebersihan, inklusi kontrol bentuk, penurunan segregasi pada garis tengah, komposisi yang dioptimalkan, dan jadwal pengerolan yang optimal.



Gambar 3.8 Peningkatan Kekuatan terhadap Karbon ekuivalen

Penurunan Segregasi bagian tengah

Pemisahan garis tengah sering dihasilkan dari proses pengecoran kontinyu yang banyak digunakan dalam produksi baja. Pembekuan coran terus menerus cenderung menghasilkan bidang kaya dengan unsur paduan dan pengotor seperti C, Mn, Nb, P dan S, terutama di sepanjang garis tengah. Segregasi paduan ini merugikan pada sifat keuletan dan ketangguhan searah ketebalan dan mengurangi ketahanan terhadap retak hidrogen. Pengadukan magnet dikembangkan untuk meminimalkan segregasi garis tengah.

Komposisi Dan Sifat-Sifat

Spesifikasi material untuk sebagian besar baja HSLA digunakan dalam kondisi rol atau dinormalisasi diatur oleh ASTM International (American Society Testing and Materials). Spesifikasi untuk baja HSLA lainnya muncul di SAE Recommended Practice J1392 dan di MIL-S-24645A (HSLA-80/100). Baja ini dirancang untuk memberikan peningkatan kekuatan, ketahanan korosi, atau ketangguhan takik dibandingkan dengan baja ringan dengan tetap mempertahankan kemampuan las yang baik. Niobium, tembaga, molibdenum, nikel, titanium, dan vanadium digunakan dalam berbagai kombinasi.

Tabel 3.3 mencantumkan sejumlah spesifikasi baja menurut standar ASTM meliputi baja HSLA berkualitas untuk struktur dengan elemen paduan dan rentang kekuatan tarik. Tabel 3.4 mencantumkan beberapa baja HSLA yang diklasifikasi

oleh ASTM untuk aplikasi bejana tekan. Tubing dan coran dengan sifat mekanik dan komposisi kimia yang serupa dicakup oleh spesifikasi ASTM lainnya.

Tabel 3.5 menyajikan spesifikasi material HSLA untuk pipa saluran disediakan oleh American Petroleum Institute. Spesifikasi pelat penutup API lainnya yang digunakan dalam pembuatan struktur lepas pantai. Komposisi kimia yang representatif dari jaringan pipa dan plat diproduksi sesuai dengan Spesifikasi API ditunjukkan pada Tabel 3.5. Pada Tabel 3.6 menunjukkan spesifikasi mekanik API untuk seamless dan pipa dilas.

Baja paduan rendah berkekuatan tinggi digunakan untuk pipa, bangunan, jembatan, struktur lepas pantai, peralatan dan konstruksi mesin, peralatan kereta api, kerangka mobil dan truk, dan kapal. Spesifikasi yang diterbitkan oleh ASTM, API, SAE, dan yang digunakan oleh Militer Amerika Serikat (MIL) mencakup komposisi kimia dan pengujian tambahan dan prosedur yang relevan dengan setiap aplikasi. Pengujian tambahan dapat dipesan oleh pengguna untuk aplikasi khusus atau kritis. Misalnya, pengujian ketangguhan takik dapat dilakukan pada komponen yang akan digunakan dalam layanan suhu rendah. Juga, prakualifikasi kemampuan las (API RP2Z) digunakan untuk memverifikasi sifat-sifat HAZ dalam pelat berat yang dimaksudkan untuk komponen penting dalam struktur lepas pantai.

Tabel 3.3 spesifikasi ASTM untuk baja HSLA

ASTM Specification	Type or Grade	Composition, % ^a										Tensile Strength		Minimum Yield Strength	
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Other	MPa	ksi	MPa	ksi
A 242	1	0.15	1.00	0.15	0.05	—	—	—	—	—	0.20 min. Cu	435	63	290	42
A 572	42 ^b	0.21	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40	—	—	—	—	—	415	60	290	42
	50 ^b	0.23	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40	—	—	—	—	—	450	65	345	50
	55 ^b	0.25	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40	—	—	—	—	—	380	55	485	70
	60 ^b	0.26	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40	—	—	—	—	—	515	75	415	60
	65 ^b	0.26	1.65	0.04	0.05	0.15-0.40	—	—	—	—	—	550	80	450	65
A 588 100 mm (4 in.) and under	A	0.19	0.80-1.25	0.04	0.05	0.30-0.65	0.40-0.65	—	—	0.02-0.10	0.25-0.40 Cu	485	70	345	50
	B	0.20	0.75-1.35	0.04	0.05	0.15-0.50	0.40-0.70	0.50	—	0.01-0.10	0.20-0.40 Cu	—	—	—	—
	C	0.15	0.80-1.35	0.04	0.05	0.15-0.50	0.30-0.50	0.25-0.50	—	0.01-0.10	0.20-0.50 Cu	—	—	—	—
	K	0.17	0.50-1.20	0.04	0.05	0.25-0.50	0.40-0.70	0.10	—	—	0.30-0.50 Cu; 0.025-0.05 Nb	—	—	—	—
A 633	A	0.18	1.00-1.35	0.04	0.05	0.15-0.50	—	—	—	—	0.05 Nb	435-570	63-83	290	42
	C 65 mm (2.5 in.) and under	0.20	1.15-1.50	0.04	0.05	0.15-0.50	—	—	—	—	0.01-0.05 Nb	485-620	70-90	345	50
	D 65 mm (2.5 in.) and under	0.20	0.70-1.60	0.04	0.05	0.15-0.50	0.25	0.25	0.08	—	0.35 Cu	485-620	70-90	345	50
	E 65 mm (2.5 in.) and under	0.22	1.15-1.50	0.04	0.05	0.15-0.50	—	—	—	0.04-0.11	0.01-0.03 N	550-690	80-100	415	60
	A Class 1, 20 mm (0.75 in.) and under	0.07	0.40-0.70	0.025	0.025	0.35	0.60-0.90	0.70-1.00	0.15-0.25	—	1.00-1.30 Cu; 0.02 min. Nb	620	90	550	80
B Class 1	0.06	0.40-0.65	0.025	0.025	0.20-0.35	—	1.20-1.50	—	—	1.00-1.30 Cu; 0.02 min. Nb	550	80	485	70	

a. Single values are maximum unless otherwise noted.
b. These grades may contain niobium, vanadium, or nitrogen.

Tabel 3.4 spesifikasi ASTM untuk baja HSLA pada pelat bejana tekan

ASTM Specification	Type or Grade	Composition, % ^a										Tensile Strength		Minimum Yield Strength						
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Other	MPa	ksi	MPa	ksi					
A 202	A	0.17	1.05-1.40	0.035	0.035	0.60-0.90	0.35-0.60	—	—	—	—	—	—	—	—	515-655	75-95	310	45	
	B	0.25	1.05-1.40	0.035	0.035	0.60-0.90	0.35-0.60	—	—	—	—	—	—	—	—	585-760	85-110	325	47	
A 203	A	0.23	0.80	0.035	0.035	0.15-0.30	—	2.10-2.50	—	—	—	—	—	—	—	450-585	65-85	255	37	
	B	0.25	0.80	0.035	0.035	0.15-0.30	—	2.10-2.50	—	—	—	—	—	—	—	485-620	70-90	275	40	
	D	0.20	0.80	0.035	0.035	0.15-0.30	—	3.25-3.75	—	—	—	—	—	—	—	450-585	65-85	255	37	
	E	0.23	0.80	0.035	0.035	0.15-0.30	—	3.25-3.75	—	—	—	—	—	—	—	480-620	70-90	275	40	
A 204	A	0.25	0.90	0.035	0.040	0.15-0.30	—	—	0.45-0.60	—	—	—	—	—	—	450-585	65-85	255	37	
	B	0.27	0.90	0.035	0.040	0.15-0.30	—	—	0.45-0.60	—	—	—	—	—	—	485-620	70-90	275	40	
A 225	C	0.25	1.60	0.035	0.040	0.15-0.40	—	0.40-0.70	—	0.13-0.18	—	—	—	—	—	725-930	105-135	485	70	
	D 75 mm (3 in.) and under	0.20	1.70	0.035	0.040	0.10-0.50	—	0.40-0.70	—	0.10-0.18	—	—	—	—	—	550-725	80-105	415	60	
	A	0.25	0.95-1.30	0.035	0.040	0.15-0.30	—	—	0.45-0.60	—	—	—	—	—	—	515-655	75-95	310	45	
A 302	B	0.25	1.15-1.50	0.035	0.040	0.15-0.30	—	—	0.45-0.60	—	—	—	—	—	—	550-690	80-100	345	50	
	C	0.25	1.15-1.50	0.035	0.040	0.15-0.30	—	0.40-0.70	0.45-0.60	—	—	—	—	—	—	550-690	80-100	345	50	
	D	0.25	1.15-1.50	0.035	0.040	0.15-0.30	—	0.70-1.00	0.45-0.60	—	—	—	—	—	—	550-689	80-100	345	50	
	—	0.13	0.90	0.035	0.040	0.15-0.30	—	8.50-9.50	—	—	—	—	—	—	—	690-825	100-120	515	75	
A 735	Class 3	0.06	1.20-2.20	0.04	0.025	0.40	—	—	0.23-0.47	—	—	—	—	—	—	0.20-0.35 Cu; 0.03-0.09 Nb	620-760	90-110	515	75
A 737	B	0.20	1.15-1.50	0.035	0.030	0.15-0.50	—	—	—	—	—	—	—	0.05 Nb	—	485-620	70-90	345	50	
	C	0.22	1.15-1.50	0.035	0.030	0.15-0.50	—	—	—	—	—	—	0.04-0.11	0.03 Nb	—	550-690	80-100	415	60	

^aSingle values are maximum unless otherwise noted.

Tabel 3.5 spesifikasi material API pada baja HSLA untuk jaringan pipa

**Table 1.12
API Material Specifications for HSLA Line Pipe**

Steel Grade	Composition, Based Upon Heat and Product Analyses % Maximum									Carbon Equivalent ^a % Maximum	
	C ^b	Si	Mn ^b	P	S	V	Nb	Ti	Other	CE _{min}	P _{min}
X52M	0.22	0.45	1.40	0.025	0.015	d	d	d	e	0.43	0.25
X56M	0.22	0.45	1.40	0.025	0.015	d	d	d	e	0.43	0.25
X60M	0.12 ^f	0.45 ^f	1.60 ^f	0.025	0.015	g	g	g	h	0.43	0.25
X65M	0.12 ^f	0.45 ^f	1.60 ^f	0.025	0.015	g	g	g	h	0.43	0.25
X70M	0.12 ^f	0.45 ^f	1.70 ^f	0.025	0.015	g	g	g	h	0.43	0.25
X80M	0.12 ^f	0.45 ^f	1.85 ^f	0.025	0.015	g	g	g	i	0.43 ^j	0.25
X90M	0.10	0.55 ^f	2.10 ^f	0.020	0.010	g	g	g	i	—	0.25
X100M	0.10	0.55 ^f	2.10 ^f	0.020	0.010	g	g	g	l, j	—	0.25
X120M	0.10	0.55 ^f	2.10 ^f	0.020	0.010	g	g	g	l, j	—	0.25

a. Based on product analysis. For seamless pipe with >20.0 mm (0.787 in.), the carbon equivalent limits shall be as agreed. The CE_{min} limits apply if the carbon composition is greater than 0.12% and the CE_{min} limits apply if the carbon composition is less or equal to 0.12%.

b. For each reduction of 0.01% below the specified maximum for carbon, an increase of 0.05% above the specified maximum for manganese is permissible, up to a maximum of 1.65% for grades >L245 or B, but <L360 or X52; up to a maximum of 1.75% for grades >L360 or X52, but <L485 or X70; up to a maximum of 2.00% for grades >L485 or X70, but <L655 or X80; and up to a maximum of 2.2% for grades >L655 or X80.

c. Unless otherwise agreed, the sum of the niobium and vanadium concentrations shall be <0.06%.

d. The sum of the niobium, vanadium, and titanium concentrations shall be <0.15%.

e. Unless otherwise agreed, 0.50% maximum for copper, 0.30% maximum for nickel, 0.30% maximum for chromium, and 0.15% maximum for molybdenum.

f. Unless otherwise agreed.

g. Unless otherwise agreed, the sum of the niobium, vanadium, and titanium concentrations shall be <0.15%.

h. Unless otherwise agreed, 0.50% maximum for copper, 0.50% maximum for nickel, 0.50% maximum for chromium, and 0.50% maximum for molybdenum.

i. Unless otherwise agreed, 0.50% maximum for copper, 1.00% maximum for nickel, 0.50% maximum for chromium, and 0.50% maximum for molybdenum.

j. 0.004% for boron.

Tabel 3.6 spesifikasi mekanis API untuk pipa seamless dan pipa las

Pipe Grade	Pipe Body of Seamless and Welded Pipe					Ratio ^{a, b, c} R _{1.1} /R _m	Elongation A ₁ %	Tensile Strength ^d R _m MPa (psi)	Weld Seam of HFW, SAW, and COW Pipes ^e
	Yield Strength ^a R _{eH} ^b MPa (psi)		Tensile Strength ^a R _m MPa (psi)		Minimum				
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum					
X52M	360 (52 200)	530 (76 900)	460 (66 700)	760 (110 200)	0.93	f	460 (66 700)		
X56M	390 (56 600)	545 (79 000)	490 (71 100)	760 (110 200)	0.93	f	490 (71 100)		
X60M	416 (60 200)	566 (81 000)	520 (75 400)	760 (110 200)	0.93	f	520 (75 400)		
X65M	450 (65 300)	600 (87 000)	535 (77 600)	760 (110 200)	0.93	f	535 (77 600)		
X70M	485 (70 300)	636 (92 100)	570 (82 700)	760 (110 200)	0.93	f	570 (82 700)		
X80M	555 (80 500)	705 (102 300)	625 (90 600)	825 (119 700)	0.93	f	625 (90 600)		
X90M	625 (90 600)	775 (112 400)	695 (100 800)	915 (132 700)	0.95	f	695 (100 800)		
X100M	690 (100 100)	840 (121 800)	760 (110 200)	990 (143 600)	0.97 ^g	f	760 (110 200)		
X120M	830 (120 400)	1050 (152 300)	915 (132 700)	1145 (166 100)	0.99 ^h	f	915 (132 700)		

^aHFW = High-frequency welding
^bSAW = Submerged arc welding
^cCOW = Combination CMAW and SAW, usually the first pass or the first several passes are made with CMAW, then filled and capped with SAW.

a. Based on product analysis. For seamless pipe with >20.0 mm (0.787 in.), the carbon equivalent limits shall be as agreed. The CE_{min} limits apply if the carbon composition is greater than 0.12% and the CE_{min} limits apply if the carbon composition is less or equal to 0.12%.

b. For each reduction of 0.01% below the specified maximum for carbon, an increase of 0.05% above the specified maximum for manganese is permissible, up to a maximum of 1.65% for grades >L245 or B, but <L360 or X52; up to a maximum of 1.75% for grades >L360 or X52, but <L485 or X70; up to a maximum of 2.00% for grades >L485 or X70, but <L655 or X80; and up to a maximum of 2.2% for grades >L655 or X80.

c. Unless otherwise agreed, the sum of the niobium and vanadium concentrations shall be <0.06%.

d. The sum of the niobium, vanadium, and titanium concentrations shall be <0.15%.

e. Unless otherwise agreed, 0.50% maximum for copper, 0.30% maximum for nickel, 0.30% maximum for chromium, and 0.15% maximum for molybdenum.

f. Unless otherwise agreed.

g. Unless otherwise agreed, the sum of the niobium, vanadium, and titanium concentrations shall be <0.15%.

h. Unless otherwise agreed, 0.50% maximum for copper, 0.50% maximum for nickel, 0.50% maximum for chromium, and 0.50% maximum for molybdenum.

i. Unless otherwise agreed, 0.50% maximum for copper, 1.00% maximum for nickel, 0.50% maximum for chromium, and 0.50% maximum for molybdenum.

j. 0.004% for boron.

Source: Adapted from American Petroleum Institute, 2007, API Specification 5L ISO 3183, 44th edition.

Baja HSLA yang dirol mungkin memiliki nilai yang buruk atau variabel ketangguhan kecuali baja ini diproses dengan benar. Selama pengerolan, suhu akhir dan suhu jumlah deformasi dikontrol secara ketat (mis., pengerolan terkontrol) untuk mencapai penyempurnaan butir yang diperlukan. Kekuatan tambahan dapat diperoleh dengan menggunakan air untuk mempercepat pendinginan pelat (misal Tipe III TMCP). Selain dari pemrosesan, ketangguhan takik yang ditingkatkan membutuhkan langkah-langkah tambahan seperti menurunkan isi karbon dan sulfur. Misalnya, kandungan karbon sebenarnya dari baja pipa modern biasanya jauh di bawah batas yang diijinkan API, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9

Pengelasan Baja HSLA

Meskipun banyak dari baja HSLA tipe baru menunjukkan kemampuan las yang sangat baik, pengelasan pada HSLA Baja secara umum masih membutuhkan pertimbangan pemanasan awal dan kontrol hidrogen yang cermat dalam proses pengelasan. Panduan yang berkaitan dengan kontrol pemanasan awal dan hidrogen dan variabel yang mempengaruhinya dibahas dalam bagian ini.

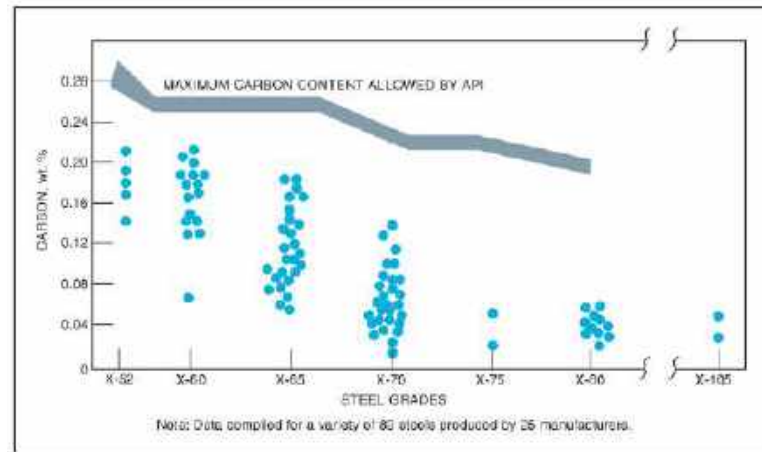
Pemanasan sebelum pengelasan (Preheat) Baja HSLA

Persyaratan pemanasan awal, jika berlaku, tergantung pada jenis dan ketebalan baja HSLA dan juga logam pengisi dan proses pengelasan yang akan digunakan. menurut standar AWS, Kode Las untuk Struktural pada Baja (AWS D1.1) baja HSLA membutuhkan pemanasan awal, tergantung pada ketebalan, setara karbon (carbon equivalent), dan proses pengelasan yang digunakan. Tujuan utama pemanasan adalah untuk meminimalkan risiko retak hidrogen, seperti yang dijelaskan dalam lebih detail di bagian menghindari Keretakan Hidrogen di bab ini.

Masukan panas minimum yang disarankan atau preheat dan suhu interpass untuk pengelasan busur baja struktural HSLA tertentu harus didasarkan pada spesifik ekuivalen karbon (CE) dan parameter komposisi (Pcm) dari baja. Nilai-nilai ini dapat dihitung dengan mudah dari data komposisi baja menggunakan Persamaan 1.2 dan 1.3, dan diterapkan sesuai dengan pedoman yang diberikan dalam Lampiran I AWS D1.1 / D1.1M: 2010.70 Ini berisi, untuk contoh, indeks

kerentanan yang dirancang sebagai pedoman untuk mencegah retak di zona yang terkena panas (HAZ) baja struktural. Indeks juga telah diadopsi sebagai panduan untuk pengelasan baja pipa:

$$\text{indeks kerentanan} = 12_{pcm} + \log 10. H \quad (3.3)$$



Gambar 3.9 Pengurangan Kandungan Karbon dengan meningkatnya kekuatan jaringan Pipa

Proses pengelasan

Baja paduan rendah berkekuatan tinggi dapat dilas oleh semua proses pengelasan busur yang umum digunakan. pengelasan busur logam Terlindung, busur logam gas, busur fluks, dan pengelasan busur terendam digunakan sebagian besar aplikasi. Praktik rendah hidrogen harus digunakan dengan semua proses ketika nilai ekuivalen karbon atau Pcm menunjukkan kerentanan terhadap keretakan

Proses pengelasan dengan input panas tinggi seperti electroslag, electrogas, dan multi-wire arc submerged dapat digunakan untuk mengelas baja ini. Namun, keunggulannya penggunaan proses ini menjamin evaluasi yang cermat ketika ketangguhan dalam logam las dan zona terpengaruh panas adalah persyaratan yang wajib.

Secara umum, proses pengelasan digunakan untuk menyambung baja HSLA harus dipilih dengan pertimbangan berikut:

1. Persyaratan kekuatan logam las;
2. Perilaku logam las selama pengelasan multi-pass (misal Efek temper dari masing-masing pass);
3. Persyaratan ketangguhan; dan
4. Kecenderungan untuk retak pada logam las dan zona yang terpengaruh panas.

Logam Pengisi (Filler Metals)

Pertimbangan yang mengatur pilihan logam pengisi untuk pengelasan baja HSLA seringkali sangat mirip dengan pengelasan baja karbon struktural, terkecuali diperlukan untuk digunakan praktik pengelasan rendah hidrogen pada Baja HSLA. Jumlah hidrogen yang diterbawa pada logam pengisi ke kolam las harus dievaluasi dengan referensi ke setaraan karbon (CE) dan parameter komposisi (Pcm), seperti yang telah dibahas sebelumnya. Umumnya, potensi hidrogen yang lebih tinggi menunjukkan bahwa nilai pemanasan awal yang lebih tinggi diperlukan.

Untuk baja HSLA yang dinormalisasi yang memiliki ketangguhan takik yang baik, pertimbangan tambahan harus diberikan dalam memilih elektroda las busur dan prosedur akan memberikan tingkat ketangguhan takik yang memadai dikeduaanya logam las dan zona yang terpengaruh panas. logam pengisi yang dapat menghasilkan logam las dengan berbagai macam tingkat ketangguhan takik untuk salah satu yang biasa digunakan proses pengelasan busur. Dalam beberapa kasus, Komposisi logam las dapat mirip dengan baja. Parameter pengelasan spesifik yang digunakan, seperti pemanasan awal, input panas, urutan manik, dan ukuran manik dapat memiliki efek pada ketangguhan takik logam las dan zona terpengaruh panas. Jika ketangguhan takik di bidang ini diperlukan, prosedur pengelasan harus dikembangkan, diuji, dan kemudian diikuti selama pembuatan untuk memastikan bahwa sifat mekanik yang memuaskan dicapai dalam sambungan yang dilas.

Elektroda yang disarankan untuk pengelasan busur beberapa baja HSLA untuk aplikasi struktural dan bejana tekan ditunjukkan pada Tabel 3.7 (A), (B), dan (C). Elektroda yang ditampilkan dalam tabel tertentu (A, B, atau C) umumnya

cocok dengan baja yang ditunjukkan dalam tabel itu dengan memperhatikan komposisi dan kekuatan. Bahan habis pakai yang serupa tersedia untuk proses pengelasan lainnya. Untuk baja ASTM A242 dan A588 yang digunakan dalam kondisi telanjang, tidak dicat, elektroda pengelasan harus ditentukan yang akan menyediakan logam las dengan ketahanan korosi yang sama dan pencocokan warna dalam kondisi kerusakan yang sama. Logam pengisi untuk pengelasan tersedia dalam berbagai komposisi logam las untuk memenuhi persyaratan tersebut. Tabel 3.8 memberikan saran untuk bahan habis pakai untuk pengelasan tertentu yang akan menyediakan logam las yang cocok untuk baja ini. Baja ASTM A 353 dapat dilas dengan elektroda nikel atau stainless steel ketika logam las membutuhkan ketangguhan yang baik pada suhu kriogenik. Namun, Pertimbangan harus diberikan pada perbedaan antara logam dasar dan las stainless steel austenitic logam berkenaan dengan karakteristik ekspansi termal. Juga, kekuatan luluh logam las kemungkinan besar undermatch dari logam dasar. Sambungan yang dilas harus mampu menahan tekanan yang terjadi pada antarmuka lasan jika kondisi kerjanya menerima siklus termal

Tabel 3.7 (a) material dasar-logam penambah untuk menyesuaikan elektroda dengan kekuatan tarik minimum 480 Mpa

Steels						Matching Filler Metals				
Steel Specification ^a		Yield Strength (Minimum or Range)		Tensile Strength (Minimum or Range)		Electrode Specification ^b	Yield Strength (Minimum or Range)		Tensile Strength (Minimum or Range)	
		MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi
ASTM A 203	Grade A	255	37	450-585	65-85	Shielded Metal Arc Welding (See AWS A5.1 or A5.5) ^c				
	Grade B	275	40	485-620	70-90					
	Grade D	255	37	450-585	65-85	E7015, E7016, E7018, E7028	400	58	490	70
	Grade E	275	40	480-620	70-90					
	Grade F	345	50	515-655	75-95					
ASTM A 204	Grade A	255	37	450-585	65-85	E7015-X, E7016-X, E7018-X				
	Grade B	275	40	485-620	70-90					
ASTM A 242	—	290	42	435	63	E7010-X ^d 390 57 490 70				
ASTM A 572	Grade 42	290	42	415	60	Submerged Arc Welding (See AWS A5.17 or A5.23) ^e				
	Grade 50	345	50	450	65					
	Grade 55	380	55	485	70					
ASTM A 588	100 mm (4 in.) and under	345	50	485	70	Gas Metal Arc Welding (See AWS A5.18)				
ASTM A 633	Grade A	290	42	430-570	63-83	ER70S-X 400 58 480 70				
	Grades C and D 65 mm (2.5 in.) and under	345	50	485-620	70-90					
ASTM A 710	Grade A, Class 2, under 50 mm (2 in.)	380	55	450	65	Flux Cored Arc Welding (See AWS A5.20)				
API 5L	Grade X52M	360-530	52.2-76.9	460-760	66.7-110.2	E7XT-X (except -2, -3, -10, -GS) 400 58 480 70				
				490-760	71.1-110.2					
				520-760	75.4-110.2					

a. In joints involving base metals of different groups, low-hydrogen filler metal requirements applicable to lower strength group may be used. The low-hydrogen processes shall be subject to the technique requirements applicable to the higher strength group.
 b. Match API Standard 2B (Fabrication of tubular connections to steel pipe)

Tabel 3.7 (b) material dasar-logam penambah untuk menyesuaikan elektroda dengan kekuatan tarik minimum 550-620 Mpa

Steels					Matching Filler Metals					
Steel Specification ^{a, b}		Yield Strength (Minimum or Range)		Tensile Strength (Minimum or Range)		Electrode Specification ^c	Yield Strength (Minimum or Range)		Tensile Strength (Minimum or Range)	
		MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi
ASTM A 202	Grade A	310	45	515-655	75-95	Shielded Metal Arc Welding (See AWS A5.5) ^d				
	Grade B	325	47	585-760	85-110					
ASTM A 204	Grade C	295	43	515-655	75-95	E8015-X, E8016-X, 460 67 550 80 E8018-X				
	Grade D	345	50	550-690	80-100					
ASTM A 302	Grade A	310	45	515-655	75-95	E8010-S ^d 460 67 550 80 E9010-G ^d 530 77 620 90				
	Grade B	345	50	550-690	80-100					
	Grade C	345	50	550-690	80-100					
	Grade D	345	50	550-690	80-100					
ASTM A 572	Grade 60	415	60	520	75	Submerged Arc Welding (See AWS A5.23) ^e F8XX-EXX-XX 470 68 550-700 80-100				
	Grade 65	450	65	550	80					
ASTM A 633	Grade E 65 mm (2.5 in.) and under	415	60	550-690	80-100	Gas Metal Arc Welding (See AWS A5.28) ^f				
ASTM A 710	Grade A, Class 2, 50 mm (2 in.) and under	415	60	495	72	ER80S-X 470 68 550 80 Flux Cored Arc Welding (See AWS A5.29) ^g E80TX-X 470 68 550-690 80-100				
	Grade A, Class 3, 50 mm (2 in.) and under	515	75	585	85					
ASTM A 736	Grade A, Class 3, 50 mm (2 in.) and under	515	75	585-725	85-105					
ASTM A 737	Grade B	345	50	485-620	70-90					
	Grade C	415	60	550-690	80-100					
API 5L	Grade X85M	450-600	65.3- 87.0	535-760	77.6- 110.2					
	Grade X70M	485-635	70.3- 92.1	570-760	82.7- 110.2					

a. In joints involving base metals of different groups, low-hydrogen filler metal requirements applicable to lower strength group may be used. The low-

Tabel 3.7 (c) material dasar-logam penambah untuk menyesuaikan elektroda dengan kekuatan tarik minimum 690 Mpa

Steels					Matching Filler Metals					
Steel Specification ^{a, b}		Yield Strength (Minimum or Range)		Tensile Strength (Minimum or Range)		Electrode Specification ^c	Yield Strength (Minimum or Range)		Tensile Strength (Minimum or Range)	
		MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi
ASTM A 225	Grade C	485	70	725-930	105-135	Shielded Metal Arc Welding (See AWS A5.5) ^d				
	Grade D 75 mm (3 in.) and under	415	60	550-725	80-105					
ASTM A 710	Grade A, Class 1, 20 mm (0.75 in.) and under	550	80	620	90	E10015-X, E10016-X, 600 87 690 100 E10018-X Submerged Arc Welding (See AWS A5.23) ^d F10XX-EXX-XX 610 88 690-830 100-120 Gas Metal Arc Welding (See AWS A5.28) ^f ER100S-X 610 88 690 100 Flux Cored Arc Welding (See AWS A5.29) ^g E100TX-X 610 88 690-830 100-120				
	Grade A, Class 3, 50 mm (2 in.) and under	515	75	585	85					
ASTM A 735	Class 3	515	75	620-760	90-110					
API 5L ^a	X80M	550- 705	80.5- 102.3	625- 825	90.6- 119.7					
ASTM A 353 ^f	—	515	75	690-825	100-120	Shielded Metal Arc Welding (See AWS A5.4 and A5.11) E310 XX — — 690 80 ENiCrFe-2 — — 550 80 ENiCrMo-3 — — 760 110 Gas Metal Arc Welding (See AWS A5.14) ERNiCr-3 — — 550 80 ERNiCrFe-6 — — 550 80				

a. In joints involving base metals of different groups, low-hydrogen filler metal requirements applicable to lower strength group may be used. The low-

Tabel 3.8 logam penambah menurut standar ASTM baja tipe A 242 dan A 588

Shielded Metal Arc Welding (AWS A5.5)	Submerged Arc Welding (AWS A5.23)	Gas Metal Arc Welding (AWS A5.28)	Flux Cored Arc Welding (AWS A5.29) ^a
E8016 or 18-G ^{b,c}	F7XX-EXXX-W ^{b,c}	ER80S-G ^b	E80T1-W
E8016 or 18-B1 ^b	—	ER80S-B2 ^{b,d}	E81T1-B1
E8016 or 18-B2 ^b	F7XX-EXXX-B2 ^{b,d}	ER70S-B2L ^{b,d}	E8XTX-B2
E7015 or 18-B2L ^c	—	—	E80T5-B2L
E8016 or 18-C1	F7XX-EXXX-N1 ^b	ER80S-N1 ^b	EXTX-N1
E8016 or 18-C2	F7XX-EXXX-N2 ^b	ER80S-N2 ^b	EXTX-N2
E8016 or 18-C3	F7XX-EXXX-N3 ^b	ER80S-N3 ^b	E80T5-N3
E7018-W2	F7XX-EXXX-Ni4 ^b	—	—
E8018-W2	—	—	—

- a. See Figure 3.3, pp 78–93, *Structural Welding Code—Steel*, AWS D1.1/D1.1M:2010, Miami: American Welding Society.
 b. Deposited weld metal shall have the following chemical composition percent: 0.12 C max., 0.50–1.30 Mn, 0.03 P max., 0.04 S max., 0.35–0.80 Si, 0.30–0.75 Cu, 0.40–0.80 Ni, 0.45–0.70 Cr.
 c. Deposited weld metal shall have a minimum Charpy V-notch impact strength of 27.1 J (20 ft lb) at –18°C (0°F) for bridges.
 d. The use of the same type of filler metal having next higher mechanical properties as listed in the AWS specifications is permitted.

Perlakuan Panas Pasca Pengelasan

Pengelasan baja struktur HSLA jarang membutuhkan pelepas tegangan pasca pengelasan atau perlakuan panas temper (PWHT). Namun, perlakuan panas mungkin diperlukan jika lasan harus mempertahankan dimensi selama pemesinan, jika terkena lingkungan yang bisa menyebabkan stress-corrosion cracking, atau jika perlu pelunakan untuk meningkatkan keuletan. Untuk baja yang dipatenkan, rekomendasi dari produsen harus dipatuhi. Beberapa kode fabrikasi mengharuskan sambungan yang dilas atau seluruh lasan diperlakukan panas untuk aplikasi tertentu. Perhatian harus dilakukan ketika ada perlakuan panas direncanakan untuk dipadamkan dan ditempa atau dipadamkan dan baja tua. Suhu perlakuan panas setelah pengelasan tidak boleh melebihi suhu yang digunakan dalam proses pengerasan tempering atau presipitasi (penuaan).

Evolusi baja rendah karbon HSLA dengan kekerasan yang relatif rendah di daerah HAZ telah berkurang secara dramatis terjadinya peretakan hidrogen pada HAZ dari baja ini. Namun, logam las yang dihasilkan saat penyambungan baja HSLA berkekuatan lebih tinggi ini masih harus dianggap rentan terhadap retak hidrogen. perlakuan panas Postweld untuk pelepasan hidrogen (pada suhu antara 95 °C hingga 320 °C [200 °F hingga 600 °F]) biasanya digunakan untuk mencegah penumpukan hidrogen dan selanjutnya logam las berkekuatan lebih tinggi.

Tabel 3.9 jenis filler metal untuk berbagai jenis metode pengelasan

Steel	SMAW ^a	GTAW, ^b GMAW	FCAW ^c	SAW
1/2Cr-1/2Mo	E801X-B1	Note f	E7XT5-A1 E8XT1-A1	F8XX-EXXX-B1
1Cr-1/2Mo, 1 1/4Cr-1/2Mo	E801X-B2 or E701X-B2L	ER80X-B2 or ER70X-B2L	E8XTX-B2 or E8KTX-B2L or E8KTX-B2H	F8XX-EXXX-B2 or F8XX-EXXX-B2H
2-1/4Cr-1Mo	E901X-B3 or E801X-B3L	ER90X-B3 or ER80X-B3L	E9XTX-B3 or E9KTX-B3L or E9KTX-B3H	F9XX-EXXX-B3
3Cr-1Mo	Note b	Note b	Note b	Note b
5Cr-1/2Mo	E502-1X ^d or E801X-B6 or E801X-B6L	ER502 ^e or ER80X-B6	E502T-1 or 2 or E6K75-B6	F9XX-EXXX-B6 or F9XX-EXXX-B6H
7Cr-1/2Mo	E7Cr-1X ^d or E801X-B7 or E801X-B7L	Note c	Note c	Note c
9Cr-1Mo	E505-1X ^d or E801X-B8 or E801X-B8L	ER505 ^e or ER80X-B8	E505T-1 or 2 or EX15-B8 or E6K75-B8L	F8XX-EXXX-B8
9Cr-1Mo and V+Ni+N	E901X-B9	ER90X-B9	—	F9XX-EXXX-B9

- a. Per AWS A5.5/A5.5M:2006, *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*, unless otherwise indicated.
 b. No matching filler metal; select between 2-1/4Cr-1Mo and 5Cr-1/2Mo.
 c. No matching filler metal; select between 5Cr-1Mo and 9Cr-1/2Mo.
 d. Originally classified per AWS A5.4/A5.4M:2006, *Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*.
 e. Per AWS A5.28/A5.28M:2005, *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*, unless otherwise indicated.
 f. No matching filler metal; consider higher alloy.
 g. Originally classified per AWS A5.9/A5.9M:2006, *Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods*.
 h. Per AWS A5.29/A5.29M:2010, *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding (use with CO₂ or Ar-CO₂ mixture)*.
 i. Weld metal designation per AWS A5.23/A5.23M:2007, *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding*.

Bab 4

Pengelasan Metode MMA/SMAW

4.1. Pendahuluan

Pengelasan busur pada awalnya dilakukan menggunakan elektroda karbon, yang dikembangkan oleh Bemado, dan tak lama kemudian diikuti dengan penggunaan batang baja. Seorang warga negara Swedia yaitu Oskar Kjellberg membuat kemajuan penting ketika dia mengembangkan dan mematenkan elektroda yang dilapisi. Hasil pengelasan sangat luar biasa dan sebagai dasar dari pendirian perusahaan pengelasan ESAB (Weman, 2003).

Pengelasan busur logam manual (Manual Metal Arc) atau istilah lain Shield Metal Arc Welding (SMAW) pertama kali ditemukan di Rusia pada tahun 1888 dan menggunakan batang logam tanpa lapisan fluks untuk memberikan pelindung gas pelindung. Elektroda yang dilapisi belum dikembangkan sampai awal 1900-an ketika proses Kjellberg ditemukan di Swedia dan metode kuasi-busur yang diperkenalkan di Inggris (Weman, 2003).

Pengelasan busur logam berpelindung (SMAW) adalah proses dasar dan serbaguna yang digunakan untuk mengelas logam ferro dan beberapa logam non ferro. Yang paling dikenal luas dari proses pengelasan busur, pengelasan busur logam terlindung kadang-kadang disebut bahasa sehari-hari sebagai pengelasan batang logam atau hanya pengelasan busur (AWS vol 1).

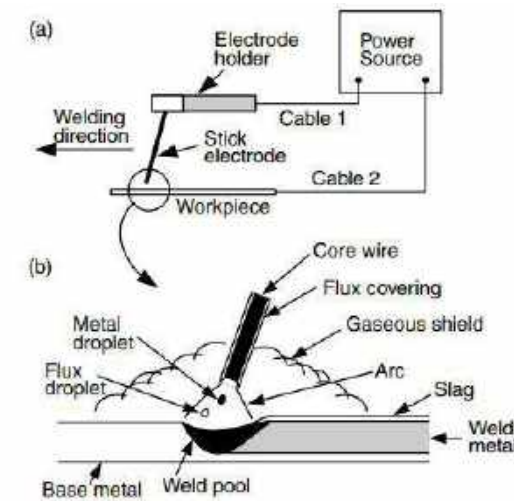
Proses pengelasan ini adalah yang paling fleksibel, metode Manual Metal Arc/Shield Metal Arc Welding cocok untuk sebagian besar logam ferro dan nonferrous, dengan berbagai ketebalan. Metode ini dapat digunakan di semua posisi, dengan kemudahan penggunaan dan relatif ekonomis. Kualitas lasan ini tergantung terutama pada keterampilan tukang las.

Las busur logam terlindung (SMAW) adalah proses yang melelehkan dan menggabungkan logam dengan memanaskannya dengan busur yang dibentuk antara elektroda tertutup seperti tongkat dan logam, seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 4.1. Ini sering disebut batang las (stick welding). Dudukan elektroda terhubung melalui kabel las ke satu terminal dari sumber listrik dan benda kerja terhubung melalui kabel kedua ke terminal lain dari sumber listrik (Gambar 4.1) (Sindokou, 2003)

Proses pengelasan ini dilakukan tanpa tekanan, menggabungkan penggunaan busur logam (busur yang mentransfer logam) yang terbentuk antara elektroda tertutup dan kolam las. Elektroda terdiri dari inti kawat di mana campuran konsentris dari pengikat silikat dan serbuk bahan seperti fluorida, karbonat, oksida, logam paduan, dan selulosa diekstrusi. Penutup elektroda las ini berfungsi sebagai sumber penstabil busur dan uap untuk menggantikan udara sebagai logam dan terak untuk melindungi, mendukung, dan melindungi logam las yang panas (AWS Vol 1)

Ketika busur diletakkan antara elektroda dan benda kerja yang dilapisi, kedua permukaan meleleh untuk membentuk kolam las (*weld pool*). Suhu rata-rata busur adalah sekitar 6000 °C, cukup untuk secara bersamaan mencairkan logam induk, kawat las yang dapat dikonsumsi dan lapisan fluks. Fluks membentuk gas dan terak melindungi kolam las dari oksigen dan nitrogen di atmosfer sekitarnya. Terak meleleh kemudian membeku, mendingin dan harus terkelupas dari manik las dalam sekali proses pengelasan (atau sebelum pengelasan berikutnya dimasukkan). Proses ini hanya memungkinkan untuk pengelasan dengan jarak yang pendek sebelum elektroda baru harus dimasukkan ke dalam dudukannya. Adapun skema pengelasan metode MMA/SMAW sebagaimana pada gambar (4.1).



Gambar 4.1 Pengelasan busur logam terlindung: (a) keseluruhan proses; (b) area pengelasan diperbesar. (Sindokou, 2003)

Panas busur menyebabkan kawat inti dan penutup fluks pada ujung elektroda mencair sebagai tetesan (Gambar 4.1 b). Logam cair berkumpul menjadi kolam las dan membeku menjadi logam las. Fluks cair yang lebih ringan mengapung di permukaan kolam dan membeku menjadi lapisan terak di bagian atas logam las (Sindokou).

Pengelasan MMA dapat dilakukan dengan menggunakan arus DC atau AC. Dengan arus pengelasan DC baik dengan polaritas positif (+ ve) atau negatif (-ve) dapat digunakan, sehingga arus mengalir dalam satu arah. Pengelasan dengan Arus AC mengalir dari negatif ke positif dan bersifat dua arah. Sumber catu daya untuk pengelasan MMA adalah transformator (yang mengubah AC utama yang cocok untuk pengelasan), transformator-rectifier (yang memperbaiki AC-DC), generator yang digerakkan oleh diesel atau bensin (lebih disukai untuk pekerjaan lapangan) atau inverter (yang lebih baru selain sumber arus pengelasan). Sumber catu daya dengan output arus konstan harus digunakan. Adapun contoh penggunaan metode pengelasan MMA/SMAW sebagaimana pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 contoh proses pengelasan metode MMA/SMAW (TWI, 2018)

4.2. Peralatan Utama Pengelasan SMAW

Peralatan las busur logam terlindung dapat dibagi menjadi empat kategori: (1) peralatan yang penting untuk menghasilkan sirkuit listrik yang menopang busur pengelasan- sumber arus, kabel las, konektor benda kerja dan pemegang elektroda; (2) perangkat dan perlengkapan yang diperlukan untuk memastikan keamanan tukang las dan lainnya di area pengelasan; (3) aksesoris yang digunakan untuk menyelesaikan lasan sesuai dengan prosedur pengelasan yang ditentukan; dan (4) kelayakan tempat, seperti yang diperlukan untuk mengisolasi dengan benar kamar pengelasan dalam pekerjaan lingkungan atau perlengkapan untuk memposisikan benda kerja yang akan dilas. Beberapa peralatan yang lebih umum digunakan dalam tiga kategori pertama dipertimbangkan dalam hal bab ini. Adapun peralatan utamanya adalah:

1. Sumber arus
2. Pemegang elektroda
3. Klem penjepit benda kerja
4. Helm Las
5. Kabel Listrik
6. Palu las
7. Sarung tangan

4.2.1. Pemegang Elektroda

Pemegang elektroda adalah pemegang dalam proses yang memungkinkan tukang las untuk mengambil kendali Elektroda las SMAW. Biasanya, pemegang elektroda memiliki pegangan yang diisolasi dan perangkat penjepit yang secara mekanis memegang dan menghantarkan arus ke elektroda. Pemegang elektroda seharusnya dirancang untuk kenyamanan dan keamanan tukang las yang optimal.

Dudukan elektroda harus dirancang untuk memegang elektroda dengan aman dan pegang pada posisinya dengan terhubung baik dengan listrik. Pemegang harus berbobot ringan dan mudah digerakkan, namun demikian harus cukup kokoh (AWS, Vol 2).

4.2.2. Kabel Las

Kabel las digunakan untuk menghubungkan sumber listrik ke dudukan elektroda dan terhubung juga ke benda kerja. Kabel adalah bagian dari rangkaian pengelasan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar (4.1). Kabel las harus memiliki fleksibilitas untuk memungkinkan akses mudah ke benda kerja tanpa terlalu membatasi manipulasi elektroda pemegang. Kabel pengelasan harus memiliki penutup isolasi yang tahan terhadap aus dan abrasi (AWS vol 2).

Kabel las yang sesuai terdiri dari banyak tembaga halus atau untai aluminium dalam isolasi penutup. Penutup kabel terbuat dari karet sintesis atau jenis plastik yang memiliki ketangguhan bagus, tahanan listrik tinggi, dan daya tahan panas yang sangat baik. Fleksibilitas, fitur yang diinginkan dari kabel las, dicapai dengan bungkus pelindung yang ditempatkan antara kabel dan penutup isolasi; pembungkus memungkinkan untuk selip antara kabel dan plastic (AWS vol 2)

Kabel las diproduksi dalam berbagai ukuran yang distandarisasi oleh nomor American Wire Gauge (AWG) dan tersedia dalam ukuran mulai dari sekitar AWG 6 hingga 4/0. Ukuran dari kabel yang dibutuhkan untuk rangkaian pengelasan tertentu tergantung pada arus pengelasan maksimum, total panjang kabel las yang dibutuhkan (kira-kira dua kali jarak antara sumber daya dan benda kerja), dan

siklus kerja mesin las. Tabel 4.1 menunjukkan ukuran yang disarankan dari kabel las tembaga untuk berbagai sumber daya dan panjang sirkuit (AWS vol 2).

Tabel 4.1 Ukuran kabel yang digunakan untuk pengelasan SMAW (AWS vol 2)

Power Source		AWG Cable Size for Combined Length of Electrode and Ground Cables				
Size in Amperes	Duty Cycle, %	0 to 15 m (0 to 50 ft)	15 to 30 m (50 to 100 ft)	30 to 46 m (100 to 150 ft)	46 to 61 m (150 to 200 ft)	61 to 76 m (200 to 250 ft)
100	20	6	4	3	2	1
180	20-30	4	4	3	2	1
200	50	2	2	2	1	1/0
200	50	3	3	2	1	1/0
250	30	3	3	2	1	1/0
300	60	1/0	1/0	1/0	2/0	3/0
400	60	2/0	2/0	2/0	3/0	4/0
500	60	2/0	2/0	3/0	3/0	4/0
600	60	2/0	2/0	3/0	4/0	-

*Use two 3/0 cables in parallel.

4.3. Polaritas

Polaritas akan menentukan distribusi energi panas pada busur pengelasan, polaritas yang lebih baik dari jenis pengelasan MMA tergantung terutama pada elektroda yang digunakan dan sifat yang diinginkan dari las. Arus searah (DC) adalah aliran arus dalam satu arah dan untuk pengelasan MMA itu mengacu pada polaritas elektroda.

4.3.1. Arus searah / elektroda positif (DCEP / DC + ve)

Ketika elektroda berada di kutub positif dari rangkaian pengelasan, dan benda kerja menjadi kutub negatif. Arah aliran elektron adalah dari benda kerja ke elektroda. Ketika elektroda bermuatan positif (DC + ve) dan benda kerja bermuatan negatif dua pertiga dari energi panas yang tersedia ada di ujung elektroda, dengan sepertiga sisanya dihasilkan dalam logam induk, menghasilkan peningkatan penetrasi las.

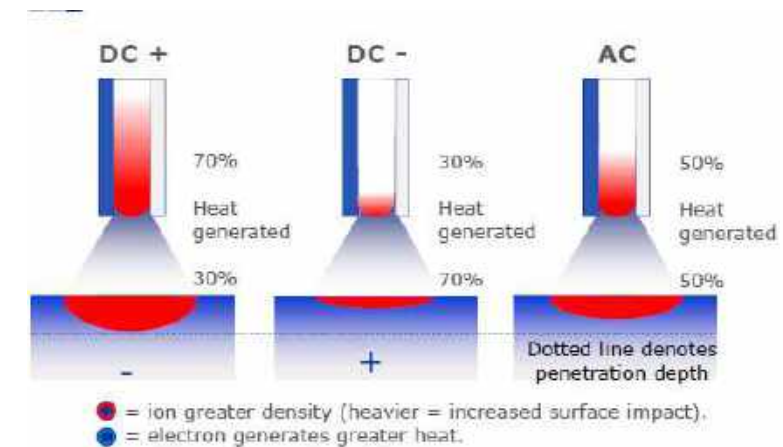
4.3.2. Arus searah / negatif elektroda (DCEN / DC-ve)

Ketika elektroda berada di kutub negatif dari rangkaian pengelasan, benda kerja menjadi kutub positif, arah aliran elektron dari elektroda ke benda kerja. Distribusi energi sekarang dibalik. Sepertiga dari energi panas yang tersedia dihasilkan di ujung elektroda, sisa dua pertiganya dari logam induk. Arus searah dengan elektroda bermuatan negatif (DC-ve) menyebabkan panas terbentuk pada

elektroda, meningkatkan laju leleh elektroda dan mengurangi kedalaman penetrasi las. Saat menggunakan arus DC, busur pengelasan dapat dipengaruhi oleh arc blow, defleksi dari busur dari jalur normalnya karena gaya magnet.

4.3.3. Arus bolak-balik (AC)

Arus bergantian di sirkuit pengelasan, mengalir pertama dalam satu arah kemudian yang lain. Dengan arus AC, arah aliran berubah 100-120 kali per detik, 50-60 siklus per detik (cps). Arus bolak-balik AC adalah aliran arus dalam dua arah. Oleh karena itu, distribusi energi panas pada busur adalah sama, 50% pada elektroda, 50% di benda kerja. Adapun pengaruh polaritas terhadap penetrasi digambarkan sebagai berikut (gambar 4.3).



Gambar 4.3 Pengaruh jenis polaritas terhadap kedalaman penetrasi metode SMAW (TWI, 2018)

4.4. Pengaruh kecepatan Pengelasan (Travel Speed)

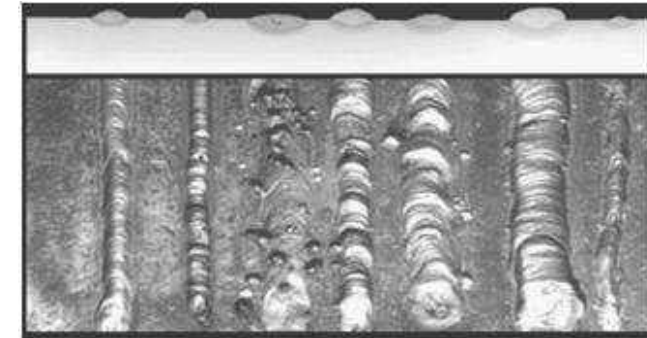
Kecepatan pengelasan adalah tingkat dimana elektroda bergerak disepanjang sambungan las. Kecepatan pengelasan yang benar adalah salah satunya menghasilkan manik las dengan kontur dan penampilan yang tepat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar (4.4). Kecepatan pengelasan dipengaruhi oleh beberapa faktor:

1. Jenis arus pengelasan, arus listrik, dan polaritas;
2. Posisi pengelasan;
3. laju leleh elektroda;
4. Ketebalan logam dasar;
5. Kondisi permukaan logam dasar;
6. Jenis sambungan;
7. Fit-up sambungan; dan
8. Manipulasi elektroda.

Kecepatan pengelasan harus disesuaikan sehingga busur sedikit di depan kolam las. Sampai titik tertentu, meningkatkan kecepatan pengelasan akan mempersempit manik las dan meningkatkan penetrasi. Di luar titik ini, lebih tinggi kecepatan jalannya pengelasan dapat menurunkan penetrasi, menyebabkan permukaan manik memburuk dan menyebabkan pelemahan pada tepi lasan. Hal ini juga akan membuat penghilangan terak sulit dan terperangkapnya gas (menyebabkan porositas) dalam logam las. Efek kecepatan jalannya pengelasan yang tinggi pada penampilan manik seperti ditunjukkan pada Gambar (4.4). Dengan kecepatan perjalanan pengelasan rendah, manik las akan lebar dan cenderung cembung dengan penetrasi dangkal, seperti yang diilustrasikan pada Gambar (4.4). Penetrasi dangkal disebabkan oleh memungkinkan busur tinggal di kolam las bukannya memimpinya. Jika busur memimpin kolam las, lebih banyak panas diarahkan ke pangkalan logam. Kedalaman penetrasi, pada gilirannya, mempengaruhi pengenceran dari logam las. Ketika pengenceran harus dijaga tetap rendah, seperti dalam operasi cladding, kecepatan jalannya pengelasan juga harus dijaga tetap rendah (AWS, Vol 2)

Kecepatan pengelasan pada metode MMA/SMAW seluruhnya dikendalikan oleh tukang las (*welder*). Kecepatan pengelasan yang terlalu lambat akan berakibat terhadap manik yang terlalu lebar, penetrasi berlebih, burn through. Akan tetapi jika kecepatan pengelasan terlalu tinggi/cepat akan berakibat - manik-manik las terlalu sempit, kurangnya penetrasi, kurangnya fusi, proses penghilangan kerak

yang sulit. Adapun factor kecepatan pengelasan terhadap hasil pengelasan ditunjukkan pada gambar (4.4) dimana dari sebelah kiri ke kanan (Kondisi bagus, Arus terlalu rendah, Arus terlalu tinggi, Panjang busur terlalu pendek, Panjang busur terlalu panjang, kecepatan terlalu lambat dan yang paling kanan adalah hasil pengelasan pada kecepatan terlalu cepat). (TWI, 2018)



Gambar 4.4 factor kecepatan pengelasan terhadap hasil pengelasan (TWI, 2018)

Pertimbangan lainnya dalam penggunaan metode pengelasan MMA/SMAW adalah sebagai berikut:

- Operator las perlu jeda waktu untuk mengganti elektroda las.
- Harus melepas manik las dan menggerindanya dengan gerinda tangan.
- Mungkin juga harus mengamati suhu interpass.
- Diperlukan inspeksi/pemeriksaan hasil pengelasan.
- Pada jangka waktu yang lama tukang las harus memposisikan ulang (TWI, 2018)

4.5. Posisi Pengelasan

Salah satu keunggulan utama pengelasan busur logam terlindung adalah kemampuan untuk mengelas dalam posisi apa pun. Fleksibilitas ini membuat sangat berguna untuk sambungan yang tidak bisa ditempatkan di posisi datar. Terlepas dari keuntungan ini, pengelasan harus dilakukan dalam posisi datar bila memungkinkan karena elektroda yang lebih besar dengan tingkat pengendapan yang lebih tinggi dapat digunakan dan hanya dibutuhkan sedikit keterampilan tukang las. Posisi sambungan las Vertikal dan overhead dengan elektroda

berdiameter lebih kecil dengan tingkat deposisi yang lebih rendah dan membutuhkan lebih banyak keterampilan di bagian tukang las. Posisi pengelasan ditentukan oleh orientasi dari sambungan, logam dasar, elektroda SMAW dan kolam las. Posisi pengelasan diidentifikasi sebagai pengelasan datar, horizontal, vertikal, dan diatas kepala. Posisi pengelasan adalah variabel penting yang dapat mempengaruhi kualitas logam las. Akibatnya, posisi pengelasan secara ketat didefinisikan dalam kode pengelasan, seperti American Society of Mechanical Engineer' (ASME) Boiler dan Pressure Vessel Code dan Kode Pengelasan Struktur Baja, AWS D1.1.42 (AWS Vol 2).

4.6. Lokasi Pengelasan

Peralatan yang sederhana dan portabilitas dari SMAW membuat prosesnya mudah beradaptasi dengan beragam lokasi dan lingkungan. Pengelasan dapat dilakukan di dalam atau di luar ruangan, pada jalur produksi, kapal, jembatan, kerangka bangunan, kilang minyak, jaringan pipa gas alam, atau hampir semua lokasi lain yang mungkin. Tidak ada selang gas atau air yang dibutuhkan dan hanya membutuhkan kabel las dapat diperpanjang agak jauh dari sumber listrik. Di daerah terpencil, unit bertenaga bensin atau diesel dapat digunakan. Terlepas dari keserbagunaan ini, untuk aplikasi diluar ruangan prosesnya harus selalu digunakan dalam lingkungan yang menaungi dari angin.

4.7. Pengaruh Tegangan (Voltase)

Potensi atau tegangan pengelasan yang diperlukan agar arus mengalir melalui rangkaian adalah tegangan (U). Untuk pengelasan MMA, tegangan yang diperlukan untuk memulai busur adalah OCV, tegangan diukur antara terminal output dari sumber arus ketika tidak ada arus yang mengalir melalui rangkaian pengelasan. Untuk alasan keamanan, OCV tidak boleh melebihi 90 V dan biasanya 50-90 V. Tegangan busur yang diperlukan untuk mempertahankan busur selama pengelasan dan biasanya 20-40 V dan merupakan fungsi dari panjang busur. Dengan pengelasan MMA, tukang las mengontrol panjang busur dan oleh karena itu tegangan busur yang pada gilirannya mengontrol fluiditas kolam las.

Ada beberapa efek jika tegangan busur terlalu rendah yaitu akan menyebabkan penetrasi yang buruk, kekeliruan elektroda (electrode stubbing), cacat las yaitu kurangnya fusi, potensial terjadinya arc strike, masuknya terak kedalam kolam las (slag inclusion), kondisi busur tidak stabil, bentuk manik las tidak teratur. Tegangan busur terlalu tinggi juga akan memberikan pengaruh yaitu percikan api las (*spatter*) terlalu besar, porositas, arc wander, bentuk manik las tidak beraturan, inklusi terak (TWI, 2018).

4.8. Elektroda Las

Elektroda las tersedia dalam beberapa ukuran diameter mulai dari 1/16 inci hingga 5/16 inci (2 mm hingga 8 mm). Diameter yang lebih kecil digunakan dengan arus rendah untuk menyatukan bagian tipis, pekerjaan akses terbatas, dan pengelasan pada posisi pengelasan vertikal dan overhead. Elektroda berdiameter lebih besar membutuhkan arus yang lebih tinggi, yang menghasilkan tingkat deposit lasan yang lebih tinggi. Sehubungan dengan pertimbangan ekonomi, tujuan digunakan untuk elektroda dengan tingkat laju deposisi dan arus tertinggi (AWS Vol 1).

Ada beberapa jenis elektroda yang dipakai untuk pengelasan MMA yaitu jenis basic, rutile dan dan cellulose. Perbedaan jenis elektroda ini memiliki perbedaan pada jenis cover flux yang digunakan serta tujuan perbedaan penggunaan.

4.8.1. Elektroda Rutile

Jenis elektroda ini mengandung sebagian besar titanium oksida (rutile) dalam lapisan yang memudahkan pengapian busur listrik, operasi busur halus dan percikan api las yang sedikit. Penggunaan elektroda ini adalah untuk tujuan umum dengan karakteristik pengelasan yang baik dan dapat digunakan dengan sumber arus listrik AC dan DC pada semua posisi pengelasan. Elektroda ini sangat cocok untuk pengelasan sambungan fillet dengan posisi pengelasan secara horizontal/vertikal (HV). Jenis elektroda ini memiliki keunggulan antara lain:

- Sifat mekanik logam las yang dihasilkan menengah.
- Menghasilkan profil manik las yang baik.

- Posisi Pengelasan dimungkinkan dengan slag fluida (mengandung fluoride).
- Terak yang mudah dilepas (pada metode pengelasan MMA/SMAW)

Ada beberapa jenis elektroda yang digunakan untuk pengelasan baja karbon dan baja karbon C-Mn

4.8.2. Jenis Elektroda Basic

Jenis elektroda ini mengandung lapisan kalsium karbonat tinggi (batu kapur) dan kalsium fluoride (Fluorspar), membuat lapisan terak lebih banyak cairan daripada pelapis rutile. Hal ini juga akan membuat pembekuan cepat yang membantu pengelasan diposisi vertikal dan *overhead*. Elektroda ini digunakan untuk pengelasan bagian-bagian fabrikasi menengah dan berat dimana kualitas las lebih tinggi, sifat mekanik yang baik dan resistensi terhadap retak karena diperlukan regangan tinggi. Adapun cirinya adalah sebagai berikut:

- Pada Logam las dengan kandungan hidrogen rendah.
- Memerlukan arus/ kecepatan pengelasan yang tinggi.
- Profil manik las buruk (profil permukaan cembung dan kasar).
- Penghilangan terak sulit dilakukan.

4.8.3. Elektroda jenis Selulosa

Jenis elektroda ini mengandung sebagian besar selulosa dalam lapisan dan dicirikan oleh busur yang menembus tajam dan laju pembakaran yang cepat menghasilkan kecepatan pengelasan yang tinggi. Endapan las bisa kasar dan dengan terak cair. Elektroda ini mudah digunakan dalam posisi apa pun dan perlu dicatat penggunaannya untuk teknik pengelasan cerobong asap (Stovepipe). Jenis elektroda ini mempunyai kelebihan antara lain:

- Penetrasi mendalam di semua posisi.
- Cocok untuk pengelasan vertikal-turun.
- Sifat mekanik yang cukup baik.
- Kandungan hidrogen yang tinggi dihasilkan, risiko retak pada daerah HAZ.

Dari ketiga kelompok ini, sub kelompok pelindung (cover) elektroda menyediakan berbagai pilihan elektroda. Elektroda las jenis MMA dirancang untuk

beroperasi dengan sumber tenaga arus AC dan DC. Meskipun elektroda AC dapat digunakan pada DC, tidak semua elektroda DC dapat digunakan dengan sumber daya AC. Faktor Operasi: (O/ F) Persentase busur tepat waktu dalam waktu tertentu.

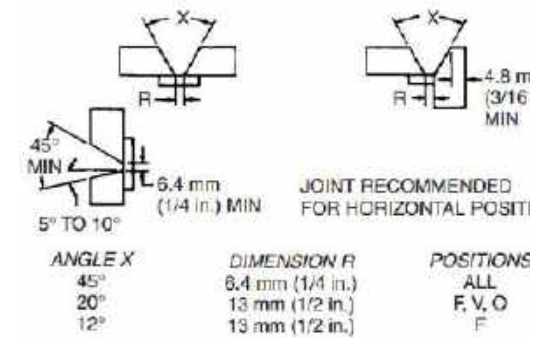
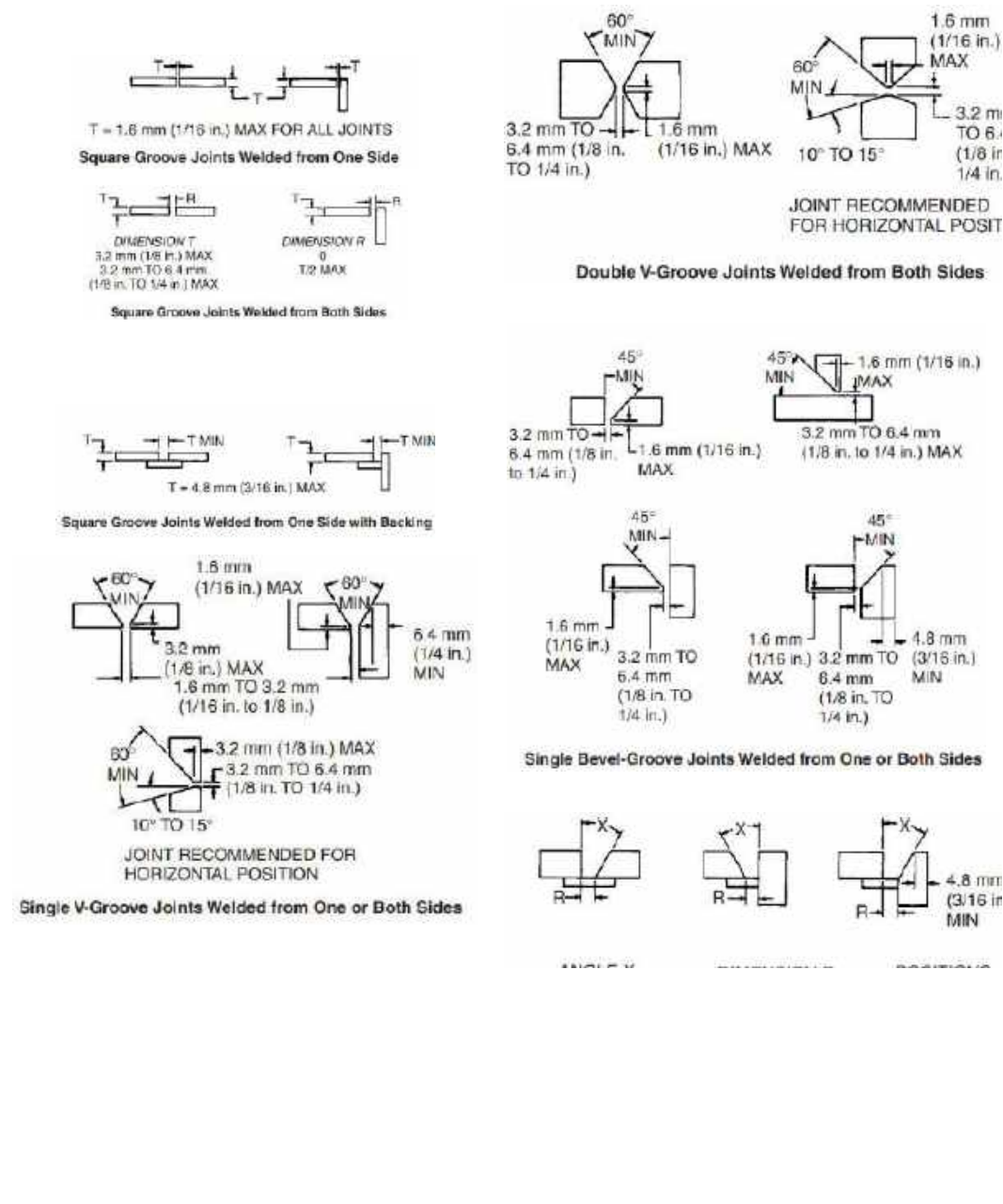
4.8.4. Diameter Elektroda

Diameter inti kawat digunakan untuk pembuatan elektroda SMAW dengan menentukan ukuran nominal atau diameter elektroda. Dalam berbagai aplikasi, diameter elektroda yang tepat bila digunakan dengan benar arus listrik dan kecepatan jalannya pengelasan akan menghasilkan ukuran lasan yang dibutuhkan dalam waktu paling cepat. Diameter elektroda yang dipilih sangat tergantung pada ketebalan material yang akan dilas, posisi di mana pengelasan harus dilakukan, dan jenis sambungan yang akan dilas. Secara umum, elektroda yang lebih besar dipilih untuk digunakan pada bahan yang lebih tebal dan untuk pengelasan pada posisi datar sebagai keuntungan dari deposisi tingkat yang lebih tinggi (AWS Vol 2).

Untuk pengelasan secara horizontal, menanjak (*uphill*), dan posisi *overhead*, bentuk manik las merupakan pertimbangan penting. Dalam posisi ini, kolam las cenderung mengalir keluar sambungan karena gaya gravitasi. Karena itu, ketika proses pembekuan menjadi logam las, akan terbentuk profil cembung. Profil cembung dari bentuk manik las dapat dikontrol dengan pemilihan diameter elektroda, biasanya 4,8 mm (1/8 in.) dan lebih kecil. Diameter elektroda berukuran kecil memiliki input panas yang lebih rendah dan membuat kolam las yang lebih kecil. Manipulasi elektroda dan peningkatan kecepatan pengelasan di sepanjang sambungan juga membantu mengurangi ukuran kolam las (AWS Vol 2).

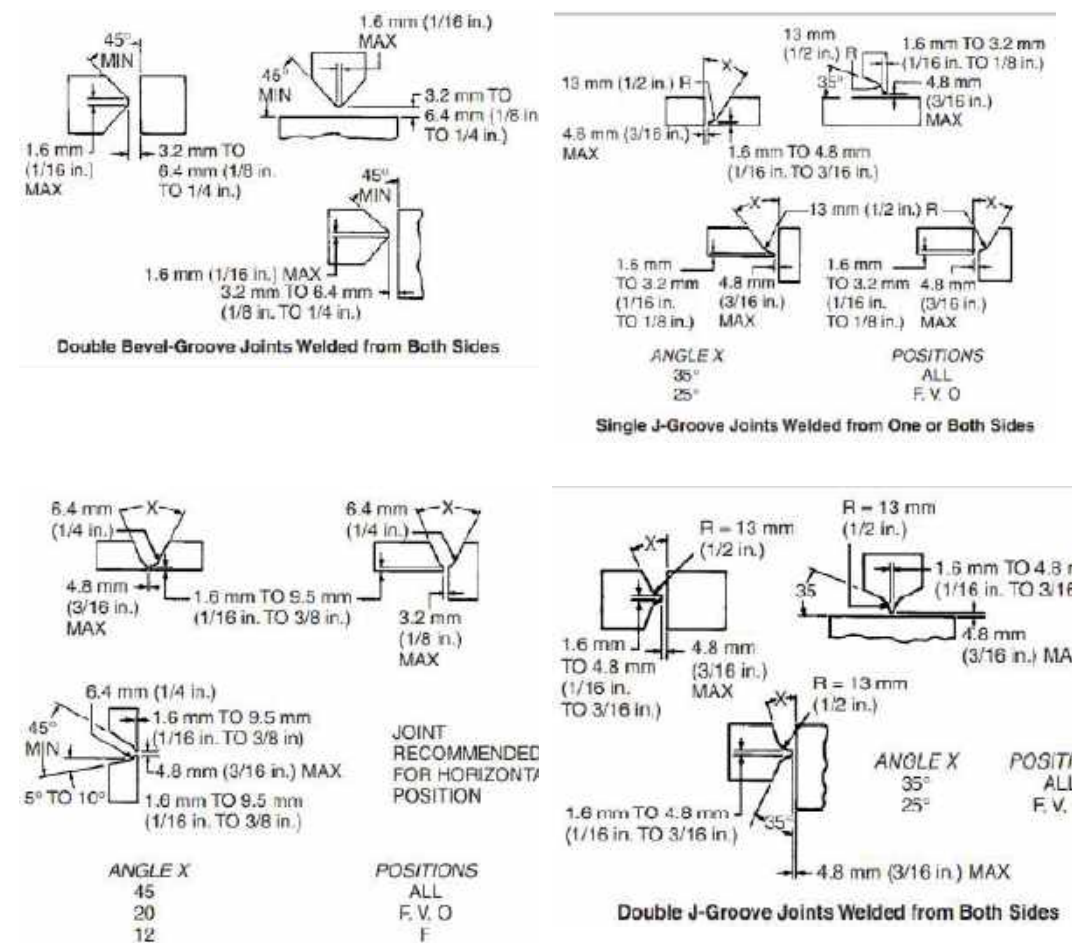
Desain alur las juga harus dipertimbangkan ketika memilih ukuran elektroda. Elektroda yang digunakan dalam beberapa pass harus cukup kecil agar mudah memanipulasi akar sendi. Dalam alur-V, elektroda berdiameter kecil sering digunakan untuk pengelasan awal/ bagian akar las untuk mengontrol bentuk peleburan dan manik las. Elektroda yang lebih besar bisa digunakan untuk

melengkapi lasan sebagai keuntungan dari penetrasi yang lebih dalam dan dengan tingkat deposisi yang lebih tinggi (AWS Vol 2).

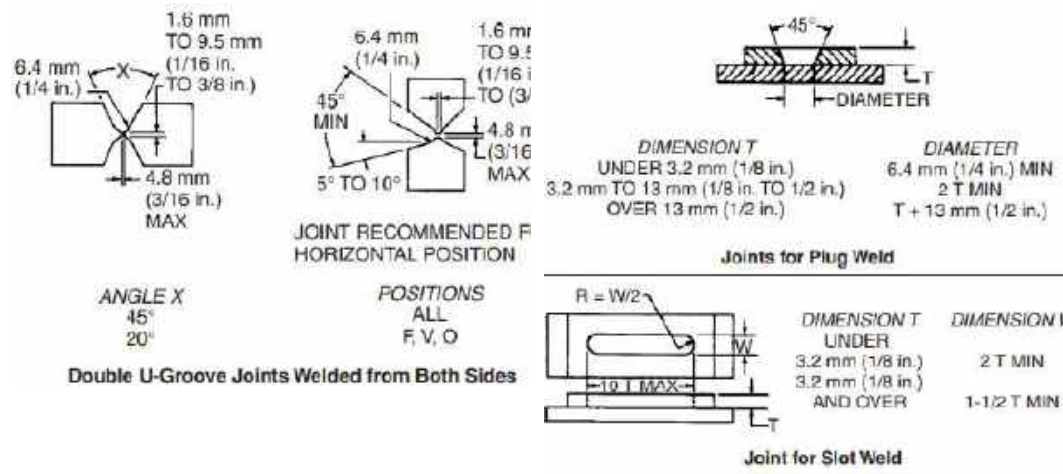


Single V-Groove Joints Welded from One Side with Back

Gambar 4.5 Geometri Sambungan untuk Las Busur Logam Terlindung dari Baja



Single U-Groove Joints Welded from One or Both Sides



Gambar 4.5 sambungan-Geometri Sambungan untuk Las Busur Logam Terlindung dari Baja

4.8.5. Fungsi Penutup Elektroda

Penutup elektroda (*covered*) mengandung berbagai bahan kimia dan bahkan bubuk logam untuk melakukan satu atau lebih fungsi yang dijelaskan di bawah ini.

a. Perlindungan

Salah satu fungsi penutup (*covering*) adalah menyediakan perisai gas untuk melindungi logam cair dari udara. Untuk elektroda tipe selulosa, penutupnya mengandung selulosa, $(C_6H_{10}O_5)_x$. Volume besar campuran gas H_2 , CO , H_2O , dan CO_2 diproduksi ketika selulosa dalam penutup elektroda dipanaskan dan terurai. Untuk jenis elektroda batu kapur ($CaCO_3$), di sisi lain, gas CO_2 dan terak CaO terbentuk ketika batu kapur terurai. Elektroda tipe kapur adalah elektroda rendah hidrogen karena menghasilkan pelindung gas rendah hidrogen. Ini sering digunakan untuk pengelasan logam yang rentan terhadap retak hidrogen, seperti baja berkekuatan tinggi (Sindokou, 2003)

b. Deoksidasi (Deoxidation)

Menyediakan deoxidizers dan agen fluks untuk mendeoksidasi dan membersihkan logam las. Slag padat yang terbentuk juga akan melindungi logam las yang sudah membeku tetapi masih panas dari oksidasi (Sindokou, 2003).

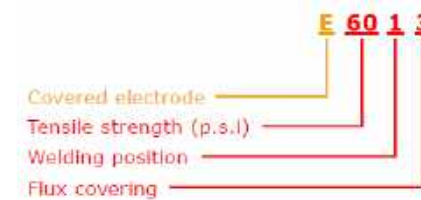
c. Penstabil Busur (Arc Stabilization)

Fungsi lain dari pelindung elektroda adalah menyediakan stabilisator busur untuk membantu menjaga stabilitas busur. Busur adalah gas ionik (plasma) yang menghantarkan arus listrik. Stabilisator busur adalah senyawa yang mudah terurai menjadi ion dalam busur, seperti kalium oksalat dan lithium karbonat. Mereka meningkatkan konduktivitas listrik busur dan membantu menghubungkan busur dengan arus listrik lebih lancar (Sindokou, 2003).

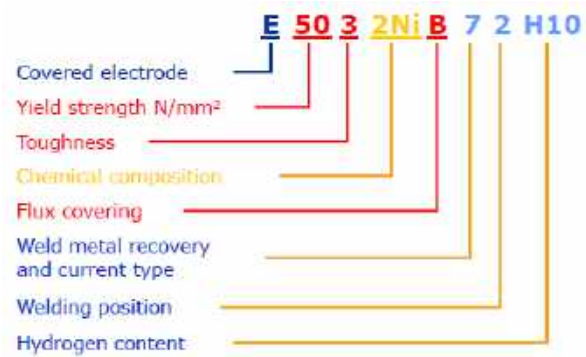
d. Logam Penambah (Metal Addition)

Pelindung elektroda juga mempunyai fungsi untuk menyediakan elemen paduan dan/ atau bubuk logam ke kolam las. Yang pertama membantu mengontrol komposisi logam lasan sedangkan yang kedua membantu meningkatkan laju pengendapan. (Sindokou)

Untuk memudahkan pengguna dalam mengenali jenis elektroda yang digunakan dalam pengelasan metode MMA/SMAW. American Welding Standard membuat kode khusus yang terdiri dari 4 digit. Adapun contoh jenis elektroda sebagaimana berikut:



Gambar 4.6 kode jenis elektroda las metode SMAW standar US (TWI, 2018) Sedangkan menurut standar Eropa (EN) dan ISO BS EN 2560 penamaan jenis selubung/cover elektroda sedikit lebih rumit, dimana terdiri dari beberapa angka dan kode huruf. Adapun contoh sebagai berikut:



Gambar 4.7 contoh jenis elektroda las metode MMA menurut standar EN (TWI, 2018)

4.9. Logam yang Bisa dilas dengan metode SMAW

Pengelasan busur logam terlindung digunakan dalam menyambung pada berbagai jenis logam. Logam yang bisa disambung dengan pengelasan SMAW adalah sebagai berikut:

1. Carbon steels,
2. Low-alloy steels,
3. High-alloy steels,
4. High-strength low-alloy steels,
5. Coated steels,
6. Tool and die steel,
7. Stainless dan heat-resisting steels,
8. Precipitation-hardening steels,
9. Cast irons (ductile and gray),
10. Nickel dan cobalt alloys.

4.10. Ketebalan Logam yang bisa dilas

Proses pengelasan SMAW bisa digunakan menyesuaikan ketebalan material dalam penggunaan tertentu dibatasi pada kepraktisan dan ekonomis. Untuk bahan tipis kurang dari sekitar 1,6 mm (1/16 in.), logam dasar akan meleleh dan logam cair akan jatuh sebelum kolam las bisa terbentuk, kecuali sambungan dilakukan

secara layak dengan perlengkapan dan prosedur pengelasan khusus. Tidak ada batas atas pada ukuran ketebalan material yang akan dilas, tetapi proses lain seperti pengelasan busur terendam (SAW) atau FCAW mampu memberikan tingkat deposisi yang lebih tinggi dan ekonomis yang lebih baik untuk sebagian besar aplikasi yang melibatkan ketebalan material melebihi 38 mm (1-1/2 in.). Karena itu, sebagian besar aplikasi dari proses pengelasan SMAW berada pada ketebalan antara 3 mm dan 38 mm (1/8 dan 1-1/2 in.). Namun, bila tidak teratur bentuk konfigurasi yang akan dilas atau ketika pengelasan dilakukan satu kali proses, maka proses pengelasan dengan cara otomatis mungkin kurang ekonomis. Dalam hal demikian, pengelasan metode SMAW dapat digunakan untuk mengelas bahan setebal 250 mm (10 in.)(AWS Vol 2).

4.11. Jenis Cacat dan ketidaksempurnaan Lasan Pada Metode MMA/SMAW

Sebagian besar cacat pada hasil lasan metode MMA/SMAW disebabkan oleh kurangnya keterampilan tukang las, pengaturan peralatan yang salah, penggunaan atau penyimpanan elektroda yang salah. Sedangkan jenis cacat yang terjadi yaitu adanya inklusi terak (*slag inclusions*), busur listrik (*arc strikes*) pada baja, porositas, logam induk ikut mencair (*Undercut*), Cacat bentuk (tumpang tindih, penetrasi pada akar las berlebihan (*excessive root penetration*) dan lain-lain. Ketidak sempurnaan pengelasan umumnya berbagai hal antara lain:

- Inklusi terak (*slag inclusions*) disebabkan oleh teknik pengelasan yang buruk atau pembersihan inter-run yang tidak memadai.
- Porositas disebabkan karena menggunakan elektroda yang lembab atau rusak, atau saat pengelasan bahan yang digunakan terkontaminasi atau tidak bersih.
- Kurangnya fusi atau penetrasi akar yang disebabkan oleh pengaturan ampere yang salah, celah akar (*root gap*) atau *face width*.

- *Undercut* yang disebabkan oleh arus listrik terlalu tinggi atau karena teknik pengelasan yang buruk. Misal kecepatan pengelasan terlalu cepat atau lambat, panjang busur (tegangan)
- *Arc strikes* disebabkan oleh prosedur *arc strikes* yang salah atau kurangnya keterampilan tukang las.
- Retakan hidrogen yang disebabkan oleh penggunaan jenis elektroda atau pemanasan (*baking*) dengan yang prosedur salah dan/ atau kontrol elektroda dasar yang dilapisi.

4.12. Desain Sambungan Dan Persiapan

Konfigurasi volume lasan ditentukan oleh persiapan tepi dan orientasi pelat logam dasar. Lasan akan mencapai sifat mekanik yang diinginkan dan hanya berfungsi jika sambungan dirancang dengan benar.

4.12.1 Jenis Lasan

Jenis lasan dirancang terutama berdasarkan kekuatan dan keamanan yang dibutuhkan di bawah kondisi kerja yang dikenakan padanya. Dimana tekanan dan suhu lasan di lingkungan kerja harus selalu dipertimbangkan. Jenis sambungan las pada suatu struktur untuk menopang beban dinamis yang mungkin terjadi sangat berbeda bila dibanding ketika suatu jenis lasan beroperasi dibawah kondisi beban statis. Jenis sambungan yang menerima beban dinamis membutuhkan pertimbangan kekuatan kelelahan dan ketahanan terhadap patah rapuh. Sifat ini antara lain mengharuskan sambungan dirancang untuk mengurangi atau menghilangkan titik konsentrasi tegangan dalam las. Desain sambungan dan prosedur pengelasan, juga harus menyeimbangkan tegangan sisa yang dihasilkan dari proses pengelasan tersebut sehingga hanya menghasilkan tegangan sisa sekecil mungkin. Lasan harus memiliki kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang dibutuhkan (AWS Vol 2).

Selain persyaratan layanan, sambungan las harus dirancang dengan biaya serendah mungkin dan memberikan aksesibilitas bagi tukang las selama pembuatan sambungan. Aksesibilitas yang baik terhadap sambungan las meningkatkan

kemampuan tukang las untuk memenuhi pengerjaannya dan kualitas yang baik dari sebuah sambungan yang dipersyaratkan dapat terpenuhi, dan dapat membantu mengendalikan distorsi dan pengurangan biaya pengelasan (AWS Vol 2).

4.12.2 Alur Las (*Groove Welds*)

Alur Lasan adalah desain sambungan di mana bagian dari lasan yang dihasilkan pada ketebalan pelat dasar yang lebih tipis. Konfigurasi alur yang paling banyak sesuai untuk aplikasi tertentu dipengaruhi oleh:

1. Kesesuaian untuk struktur yang dipertimbangkan,
2. Aksesibilitas ke sambungan untuk pengelasan,
3. Posisi di mana pengelasan harus dilakukan, dan
4. Biaya pengelasan.

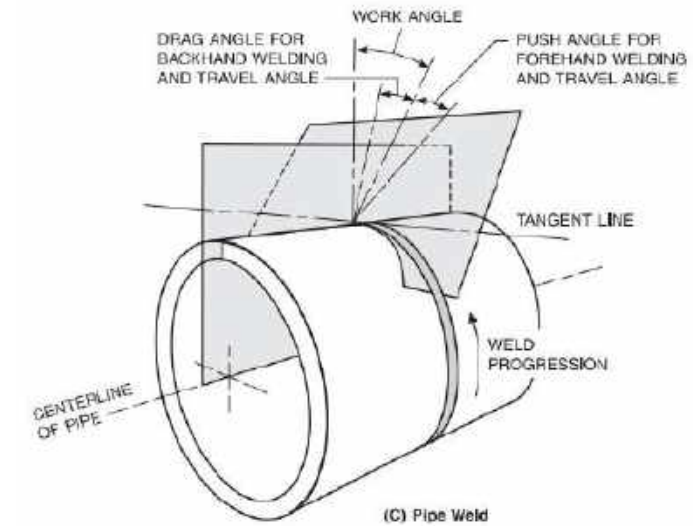
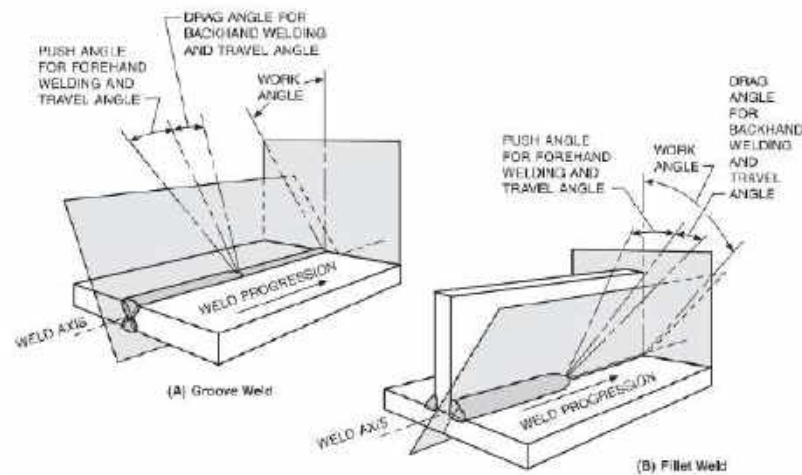
Untuk pertimbangan ekonomis serta mengurangi distorsi dan tegangan sisa, desain sambungan harus memiliki akar pembukaan dan sudut alur yang cukup memadai terhadap kekuatan dengan jumlah pengendapan yang paling sedikit jumlah logam pengisinya. Sambungan V-groove adalah tipikal, tetapi mungkin harus digantikan oleh J-groove atau U-groove joint pada bagian yang tebal. Pada bagian yang sangat tebal, penghematan logam pengisi dan waktu pengelasan saja sudah cukup untuk mengimbangi biaya yang ditambahkan menyiapkan bahan dasar untuk mencapai salah satunya konfigurasi bersama ini. Untuk setiap lapisan lasan yang diendapkan, sudut permukaan alur harus cukup besar untuk mencegah terjebaknya terak.

4.12.3. Orientasi Elektroda Las

Orientasi elektroda dalam kaitannya dengan benda kerja dan alur las mengontrol arah dan lokasi busur dan merupakan faktor penting dalam kualitas las. Posisi elektroda yang tidak tepat dapat menyebabkan terjebaknya terak, porositas, dan lasan undercut. Orientasi yang tepat dalam sambungan tergantung pada jenis dan ukuran elektroda, posisi pengelasan, dan geometri sambungan. Tukang las yang terampil secara otomatis mengevaluasi faktor-faktor ini ketika memutuskan orientasi untuk digunakan pada sambungan tertentu. Penempatan elektroda relatif

terhadap sambungan dan benda kerja dijelaskan oleh sudut pengelasan dan sudut kerja (AWS Vol 2).

Sudut pengelasan adalah suatu istilah untuk menunjukkan sudut (kurang dari 90°) antara sumbu elektroda dan garis tegak lurus ke sumbu las, dalam bidang yang ditentukan oleh elektroda sumbu dan sumbu las. Istilah sudut kerja menunjukkan sudut (kurang dari 90°) antara garis tegak lurus terhadap permukaan benda kerja utama dan bidang yang ditentukan oleh sumbu elektroda dan sumbu las. Ketika elektroda menunjuk ke arah pengelasan, teknik ini disebut pengelasan forehand. sudut perjalanan, kemudian dikenal sebagai sudut dorong. saat elektroda menunjuk ke arah yang berlawanan dengan arah pengelasan, teknik ini disebut pengelasan backhand. Sudut jalannya pengelasan backhand disebut drag sudut. Sudut-sudut ini ditunjukkan pada Gambar (4.8) (AWS Vol 2)



Gambar 4.8 orientasi pengelasan (AWS Vol 2)

Penempatan elektroda yang benar membantu mencapai kontrol kolom las, mencapai penetrasi yang diinginkan, dan memastikan fusi lengkap ke pelat dasar. orientasi elektroda dan teknik pengelasan untuk alur dan lasan fillet untuk digunakan pada baja karbon dengan baja karbon elektroda tercantum dalam Tabel (4.2). Nilai-nilai ini mungkin berbeda untuk elektroda dan bahan lainnya. Sudut jalannya pengelasan yang besar dapat menyebabkan cembung, dengan manik berbentuk buruk dengan penetrasi tidak memadai, sedangkan sudut pengelasan yang kecil dapat menyebabkan terjebaknya terak. Besar sudut kerja bisa menyebabkan undercutting, sementara dengan mengelas dengan sudut kecil dapat menghasilkan fusi yang tidak lengkap (AWS Vol 2).

Tabel 4.2 posisi elektroda dan teknik pengelasan dari baja karbon

Joint Type	Welding Position	Work Angle (Degree)	Travel Angle (Degree)	Welding Technique
Groove	Flat	90	5-10*	Backhand
Groove	Horizontal	80-100	5-10	Backhand
Groove	Uphill	90	5-10	Forehand
Groove	Overhead	90	5-10	Backhand
Fillet	Horizontal	45	5-10*	Backhand
Fillet	Uphill	35-55	5-10	Forehand
Fillet	Overhead	30-45	5-10	Backhand

*Travel angle may be 10° to 30° for electrodes with heavy iron powder coverings.

4.13. Keuntungan dan kerugian metode MMA/SMAW

Adapun keuntungan dan kerugian penggunaan metode las MMA/SMAW. Keuntungan yaitu bisa digunakan dilapangan atau pabrik (gambar 4.9), bisa digunakan pada semua posisi, mudah dipindahkan (*Portable*), peralatannya sederhana dan murah dibandingkan dengan proses pengelasan busur lainnya. Selain itu metode pengelasan ini memiliki kekurangan yaitu butuh keterampilan tukang las yang tinggi, asap yang ditimbulkan terlalu banyak, kontrol kandungan hydrogen dalam electrode yang sulit, masalah cacat pada hasil lasan yaitu terjadi pada saat berhenti/ mulai pengelasan dan produktivitasnya yang rendah.



Gambar 4.9 pengelasan struktur baja dengan SMAW

Metode pengelasan SMAW sering digunakan untuk pemeliharaan peralatan, perbaikan konstruksi (gambar 4.10), dan konstruksi lapangan. Namun, pelindung gas di SMAW tidak cukup bersih untuk logam reaktif seperti aluminium dan titanium. Penutup elektroda cenderung terlalu panas dan jatuh ketika digunakan arus pengelasan yang sangat tinggi. Panjang elektroda yang terbatas (sekitar 35 cm) memerlukan penggantian elektroda, dan hal ini akan mengurangi laju produksi keseluruhan (Sindokou)



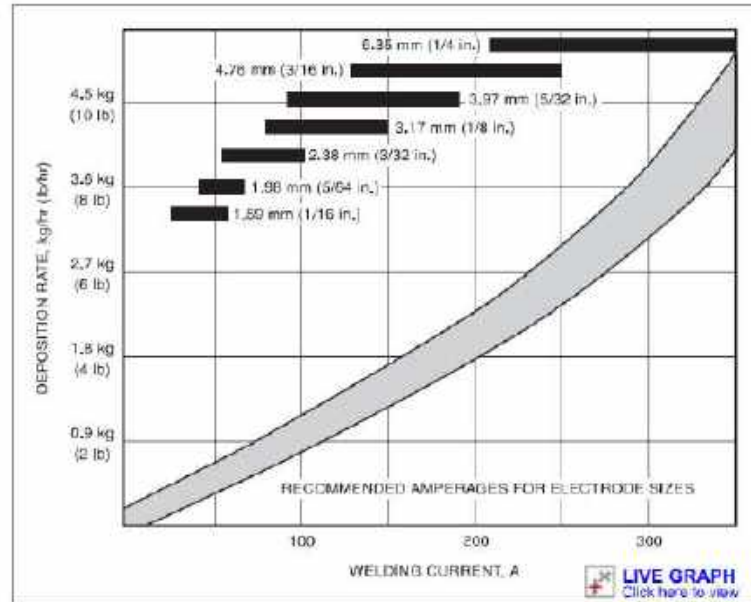
Figure 4.10 Reparasi dengan proses pengelasan SMAW

Las busur logam terlindung sering menjadi pilihan pertama untuk berbagai macam aplikasi pengelasan karena peralatan tidak mahal, portabel, dan serbaguna. Proses pengelasan ini menyediakan berbagai macam elektroda, parameter, dan teknik yang dapat memiliki pengaruh positif pada biaya pengelasan. Dalam beberapa kasus, memilih proses pengelasan lainnya daripada pengelasan SMAW adalah keputusan yang terbaik secara ekonomi (AWS Vol 2).

Salah satu cara untuk meninjau dari segi ekonomisnya pada proses penyambungan logam dengan cara pengelasan adalah dengan menghitung untuk menentukan biaya per satuan panjang lasan. Perhitungan membutuhkan perkiraan biaya bahan pengisi logam, peralatan dan tenaga kerja. Selain itu, pertimbangan harus diberikan pada keadaan khusus, misalnya, jika tanggal penyelesaian yang harus dipercepat berdampak pada biaya lebih (AWS Vol 2).

Untuk menghitung biaya tenaga kerja, faktor operasi (didefinisikan sebagai waktu busur dibagi dengan total waktu kerja; untuk SMAW biasanya 30%) dan laju deposisi las (jumlah logam las yang ditambahkan ke sambungan persatuan waktu busur) harus diketahui atau diperkirakan. Untuk menghitung biaya bahan elektroda dari harga yang seharusnya diketahui, jumlah (total berat) elektroda yang diperkirakan dari volume sambungan, dan efisiensi pengendapan (rasio berat logam yang diendapkan dengan berat elektroda yang digunakan, biasanya 0,60 untuk

SMAW).Tingkat pengendapan untuk elektroda tertentu, jika tidak tertera pada kemasan, sudah tersedia dari pabrikan. Gambar 4.11 menunjukkan beberapa nilai



Gambar 4.11 Tingkat Deposisi las untuk Elektroda SMAW (AWS vol 2)

Setelah nilai-nilai ini diketahui, biaya tenaga kerja dan biaya material dapat dihitung sebagai berikut (AWS vol 2):

Biaya tenaga kerja, Rp/ft =

$$\frac{\text{lb dari lasan/ft}}{\text{laju deposisi las } \left(\frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 0,30\right)} \times \text{tenaga kerja } \left(\frac{\text{Rp}}{\text{jam}}\right) \quad (4.1)$$

Biaya material (Rp/ft)

$$\text{biaya elektroda las, } \frac{\text{Rp}}{\text{lb}} \times \frac{\text{lbs dari logam las/ft}}{0,60} \quad (4.2)$$

Pada proses pengelasan SMAW, efisiensi pengendapan tanpa penyesuaian untuk kerugian pada sisa elektroda (puntung) yang tidak terpakai, yaitu dinyatakan jumlah logam yang diendapkan (menjadi logam las) dibagi dengan jumlah elektroda yang dikonsumsi. Perhitungan untuk menyesuaikan efisiensi deposisi untuk kerugian sisa elektroda didasarkan pada panjang elektroda; efisiensi meningkat dengan bertambahnya panjang. Tabel 4.3 menunjukkan perkiraan

efisiensi pengendapan untuk berbagai panjang elektroda standar disesuaikan untuk kerugian sisa elektroda yang tak terpakai.

Tabel 4.3 Perkiraan Efisiensi Deposisi las, dengan panjang sisa elektroda (AWS vol 2)

Electrode Length	Zero Stub Loss	Stub Loss		
		50 mm (2 in.)	75 mm (3 in.)	125 mm (5 in.)
300 mm (12 in.)	60	50	45	35
	70	58	52	40
	80	67	60	47
350 mm (14 in.)	60	51	47	38
	70	60	55	45
	80	68	62	51
450 mm (18 in.)	60	53	50	43
	70	62	56	50
	80	71	66	57

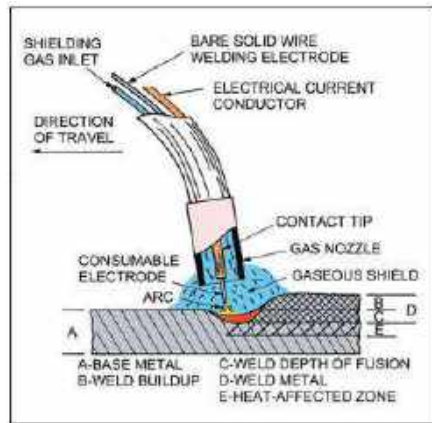
Bab 5

Pengelasan MIG/ MAG

5.1. Proses Pengelasan MIG / MAG

Proses pengelasan ini di amerika serikat lebih dikenal sebagai Gas Metal Arc Welding (GMAW), proses pengelasan Metal Inert Gas/ Metal Active Gas (Gambar 5.1) adalah teknik serbaguna yang cocok untuk pengelasan lembaran tipis dan *part* yang tebal di sebagian besar bahan logam. Busur listrik muncul antara ujung elektroda kawat dan benda kerja, keduanya melebur untuk membentuk kolam las. Kawat las berfungsi sebagai sumber panas (melalui busur di ujung kawat) dan logam pengisi untuk sambungan dan dimasukkan melalui tabung kontak tembaga (juga disebut sebagai ujung kontak) yang dihubungkan dengan arus pengelasan ke dalam kawat. Kolam las yang dilindungi dari atmosfer di sekitarnya oleh gas pelindung yang diumpankan melalui nosel yang mengelilingi kawat las (TWI, 2018).

Gas Metal Arc Gas Welding (GMAW), sering disebut bahasa sehari-hari sebagai pengelasan MIG atau pengelasan kawat terumpan, melibatkan penggunaan busur logam dan elektroda sekali pakai dengan gas pelindung yang ditambahkan secara eksternal. Dengan berbagai pilihan mode busur dijelaskan di bawah ini, berbagai ukuran elektroda tersedia, dan berbagai campuran gas pelindung, proses GMAW dapat digunakan untuk mengelas banyak logam besi dan material *nonferrous*. Dengan prosedur yang tepat, pengelasan bisa dilakukan di semua posisi. Jika variabel keseimbangan benar, dengan keterampilan yang sedikit diperlukan untuk melakukan pengelasan busur logam gas daripada menggunakan proses pengelasan SMAW atau GTAW (AWS vol 1).

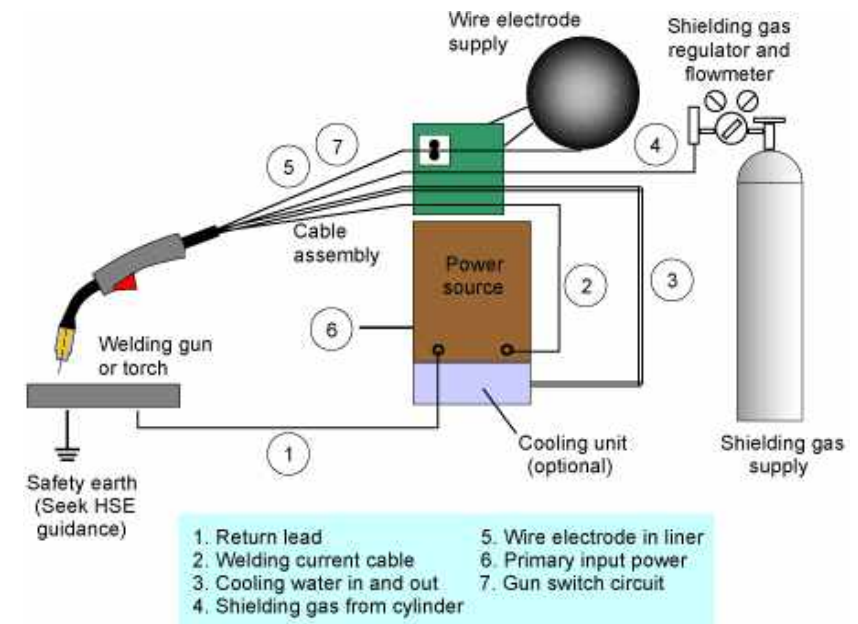


Gambar 5.1 proses pengelasan MIG/MAG (AWS vol 1)

Pemilihan gas pelindung tergantung pada material yang dilas dan aplikasinya.

Kawat diumpankan dari gulungan yang digerakkan dengan *drive motor* dan tukang las atau mesin menggerakkan gun las atau torch di sepanjang garis lintasan sambungan las. Proses pengelasan ini menawarkan produktivitas tinggi dan sangat ekonomis karena dapat pengumpanan kawat secara terus menerus (TWI, 2018).

Proses pengelasan MIG/ MAG menggunakan peralatan semi-otomatis, mekanis atau otomatis. Dalam pengelasan semi-otomatis, laju umpan kawat dan panjang busur dikontrol secara otomatis, tetapi kecepatan pengelasan dan posisi kawat berada di bawah kendali manual. Dalam pengelasan mekanis, semua parameter berada di bawah kontrol otomatis tetapi dapat divariasikan secara manual selama proses pengelasan, misalnya pengendalian dari pengelasan dan penyesuaian kecepatan umpan kawat dan tegangan busur. Dengan peralatan otomatis tidak dilakukan manual selama pengelasan. Gambar 5.2 menunjukkan skema peralatan utama yang diperlukan untuk proses MIG/ MAG.



Gambar 5.2 peralatan utama proses pengelasan MIG/MAG (TWI, 2018)

Keuntungan Metode MIG/MAG

- pengumpanan kawat las bisa dilakukan secara terus menerus.
- Pengaturan secara otomatis pada panjang busur las.
- Laju deposit las yang tinggi dan jumlah minimal lokasi berhentinya pengelasan atau mulainya pengelasan.
- Efisiensi yang tinggi dari penggunaan bahan habis pakai.
- Masukan panas pada pengelasan dalam kisaran 0.1-2 kJ/ mm.
- Proses pengelasan dengan potensial hidrogen rendah.
- Tukang las memiliki visibilitas pada kolam las dan sambungan yang baik.
- Sedikit atau tidak sama sekali dilakukan pembersihan setelah pengelasan.
- Dapat digunakan di semua posisi (*transfer dip*).
- Kemungkinan kontrol proses yang cukup baik.
- Bisa digunakan untuk berbagai aplikasi pengelasan.

Kekurangan

- Tidak ada kontrol independen terhadap penambahan logam pengisi.
- Sulit untuk mengatur parameter optimal untuk meminimalkan tingkat *spatter*.

- Risiko kurangnya fusi saat menggunakan transfer celup pada pengelasan baja yang lebih tebal.
- Pemeliharaan peralatan dengan biaya yang tinggi.
- Input panas yang lebih rendah dapat menyebabkan nilai kekerasan tinggi.
- Biaya pembelian peralatan lebih tinggi daripada pengelasan MMA/SMAW.
- Pengelasan dilapangan membutuhkan tindakan pencegahan khusus untuk mengecualikan draf yang mungkin mengganggu pelindung gas.
- Akses sambungan dan bagian tidak sebagus pengelasan MMA atau TIG.
- Kebersihan dari logam induk, proses slag terhadap kontaminasi yang lebih besar.

Berdasarkan pengalaman yang ada menunjukkan bahwa pemeliharaan yang cermat diperlukan untuk menghindari gangguan yang mungkin terjadi karena operasi panas yang konstan dan berat

- Pada pengelasan yang lebih tinggi panasnya dari busur meningkat. Penting untuk memilih ukuran gun las yang tepat untuk menghindari suhu berlebih.
- Jauhkan gun las dari percikan. percikan akan menangkap lebih mudah ke permukaan yang panas.
- Gunakan gun las berpendingin air bila perlu, pilih ekstensi kawat yang tepat. Jarak yang terlalu pendek akan meningkatkan risiko pembakaran balik ke busur las. Hal ini juga akan meningkatkan pengambilan panas dari busur.
- Pilih dengan hati-hati jarak antara kawat dan diameter saluran. Celah yang kecil meningkatkan risiko penghentian dan terlalu besar akan menyebabkan pemakanan tidak teratur.
- Ketika masalah pemakanan terjadi, alasannya mungkin terjadi adalah partikel logam dari kawat telah meningkatkan gesekan di dalam saluran. Hanya untuk meregangkan tekanan di antara gulungan pengumpan tidak selalu merupakan tindakan terbaik. Untuk menghindari masalah di masa depan, disarankan untuk membersihkannya sesekali.

(Klas Weman, 2003).

Peralatan utama yang digunakan dalam proses pengelasan MIG/MAG seperti ditunjukkan pada gambar 5.3 dibawah



Gambar 5.3 komponen utama pengelasan MIG

1. Power source-transformer/rectifier (constant voltage type).
2. Inverter power source.
3. Power hose assembly (liner, power cable, water hose, gas hose).
4. Liner.
5. Spare contact tips.
6. Torch head assembly.
7. Power-return cable and clamp.
8. 15kg wire spool (copper coated and uncoated wires).
9. Power control panel.
10. External wire feed unit.

Torch las pada pengelasan GMAW terdiri dari 7 komponen utama yang menjadi satu kesatuan torch las seperti ditunjukkan pada gambar 5.4



Gambar 5.4 komponen utama Torch; 1) Torch body, 2) On/off or latching switch, 3) Spot welding spacer attachment, 4) Contact tips, 5) Gas diffuser, 6) Gas shrouds dan 7) Torch head assembly (minus the shroud)

5.2 Variabel Utama Pengelasan MIG

Pada proses pengelasan ini mempunyai beberapa parameter utama untuk mendapatkan kualitas hasil lasan yang baik yaitu:

- Arus pengelasan/ kecepatan pengumpanan kawat.
- Tegangan.
- Gas pelindung
- Kecepatan pengelasan dan orientasi elektroda.
- Induktansi.
- Tip kontak ke jarak kerja (CTWD).
- Nozzle ke jarak benda kerja.
- Nozzle gas melindungi
- Jenis transfer logam.

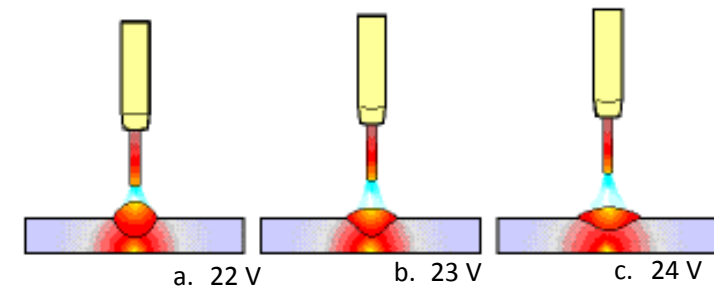
Sebagian besar parameter ini harus dicocokkan satu sama lain untuk memperoleh kinerja pengelasan yang optimal. Proses pengelasan harus berada dalam rentang atau masih dalam batas toleransi untuk situasi pengelasan tertentu (Weman, 2003)

5.2.1 Kecepatan Pengumpan Kawat

Dengan meningkatkan kecepatan umpan kawat secara otomatis akan meningkatkan arus di kawat. Kawat yang umumnya diproduksi mempunyai diameter 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4 dan 1.6 mm.

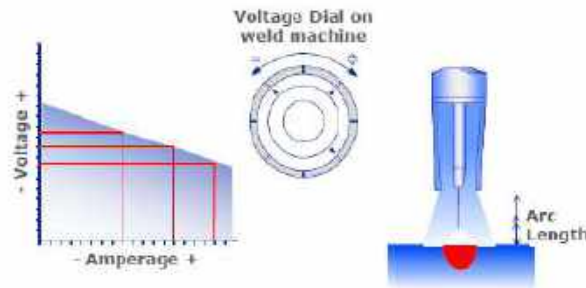
5.2.2. Tegangan

Pengaturan yang paling penting dalam pengelasan *transfer spray* adalah dengan mengontrol panjang busur. Dalam transfer celup, hal ini juga memengaruhi kenaikan arus dan keseluruhan masukan panas ke dalam proses pengelasan. Menambah kecepatan/ arus dan arus umpan kawat akan menambah input panas. Sambungan las perlu diperiksa *soundness* karena jika longgar nantinya akan menghasilkan resistansi dan menyebabkan penurunan tegangan di sirkuit dan akan mempengaruhi karakteristik busur las. Tegangan akan mempengaruhi jenis transfer yang dapat dicapai tetapi ini juga sangat tergantung pada jenis gas yang digunakan (TWI, 2018).



Gambar 5.5 Pengaruh tegangan busur: a Menambah tegangan busur; b Mengurangi penetrasi, meningkatkan lebar logam las; c Tegangan berlebihan dapat menyebabkan porositas, spatter, dan undercut (TWI, 2018).

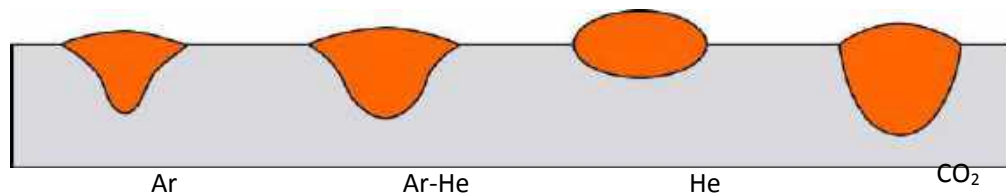
Hubungan antara jarak busur dengan tegangan dan kuat arus yang dihasilkan pada proses pengelasan MIG seperti ditunjukkan pada gambar 5.6



Gambar 5.6 Hubungan antara tegangan dan kuat arus pada pengelasan MIG (TWI, 2018)

5.2.3. Gas Pelindung

Gas pelindung atau campuran gas yang digunakan dalam busur logam gas pengelasan sering tidak sepenuhnya inert. Gas pelindung yang digunakan mungkin seringkali terdiri dari karbon dioksida saja, karbon dioksida yang dicampur dengan argon, atau karbon dioksida dicampur dengan beberapa gas. Sejumlah kecil oksigen (hingga 5%) kadang-kadang dicampur dengan argon. Jika dicampur dengan benar, campuran ini menghasilkan busur halus, lebih sedikit percikan, dan peningkatan pembasahan dari las ke logam dasar. Beberapa campuran telah terstandarisasi dan tersedia secara komersial di dalam silinder (AWS vol 1).



Gambar 5.7 Efek komposisi gas pada profil manik las (TWI, 2018)

Gas pelindung yang digunakan mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap kedalaman penetrasi dan lebar lasan, efek komposisi gas terhadap profil manik las ditunjukkan pada gambar 5.7 (TWI, 2018). Penggunaan argon memberikan kedalaman yang cukup baik dan lebar las sedang, penambahan Helium pada gas argon memberikan kedalaman las yang baik akan tetapi menambah lebar las. Penggunaan helium dalam pengelasan ini memberikan manik las yang dangkal dan

lebar, sedangkan penggunaan CO₂ memberikan kedalaman penetrasi dan lebar las sedang

Untuk pengelasan logam non-ferro dan paduannya (seperti Al, Ni dan Cu) gas pelindung harus digunakan, biasanya digunakan argon murni atau gas kaya Argon dengan penambahan Helium. Penggunaan gas inert sepenuhnya pada proses ini juga disebut pengelasan **Metal inert gas (MIG)** dan untuk penggunaan terminologi yang tepat ini hanya boleh digunakan ketika merujuk pada pengelasan logam non-ferrous (TWI, 2018).

Penambahan beberapa kandungan Helium kedalam Argon memberikan konsentrasi panas yang lebih seragam dalam plasma busur yang mempengaruhi bentuk profil manik las. Campuran Argon Helium memberikan busur yang lebih panas sehingga bermanfaat untuk mengelas bahan dasar yang lebih tebal, yang memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi, misalnya tembaga atau aluminium.

Untuk mengelas semua jenis baja, termasuk baja tahan karat, penambahan oksigen atau karbon dioksida (CO₂) yang terkontrol untuk menghasilkan busur stabil dan memberikan pembasahan tetesan yang baik. Karena penambahan ini bereaksi dengan logam cair yang disebut sebagai gas aktif, maka pengelasan **Metal Active Gas (MAG)** adalah istilah teknis ketika mengacu pengelasan pada baja.

Gas 100% CO₂

Gas CO₂ memiliki kekurangan yaitu tidak dapat menahan transfer pengkabutan karena potensi ionisasi gas terlalu tinggi memberikan penetrasi yang sangat baik tetapi mendorong transfer tetesan (*droplet*) dengan bentuk bulat (*globular*) juga busur yang sangat tidak stabil dan banyak percikan (*spatter*).

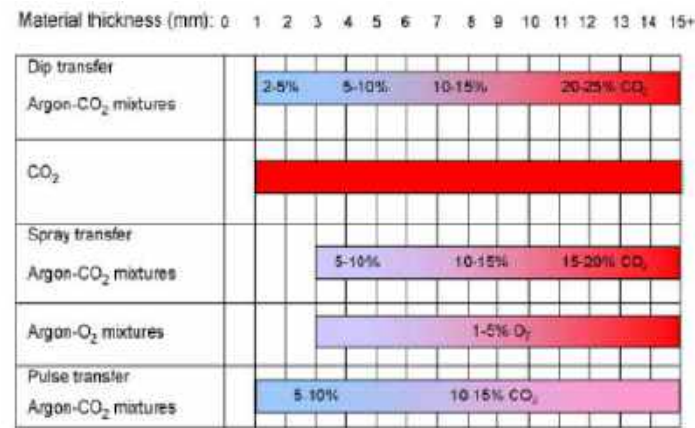
Argon + 15-20% CO₂

Persentase gas CO₂ atau oksigen tergantung pada jenis baja yang dilas dan mode transfer logam yang digunakan. Argon memiliki potensi ionisasi yang jauh lebih

rendah dan dapat mempertahankan transfer spray pengelasan di atas 24 volt. Gas Argon menghasilkan busur yang sangat stabil, *spatter* yang sedikit, tetapi penetrasi lebih rendah dari CO₂. Campuran gas Argon dan 5-20% CO₂ memberikan manfaat dari kedua gas yaitu penetrasi yang baik dengan busur yang stabil dan percikan sangat sedikit. Gas CO₂ jauh lebih murah daripada argon atau campurannya dan banyak digunakan untuk baja karbon dan beberapa baja paduan rendah.

Argon + 1-5% CO₂

Banyak digunakan untuk baja tahan karat dan beberapa baja paduan rendah.



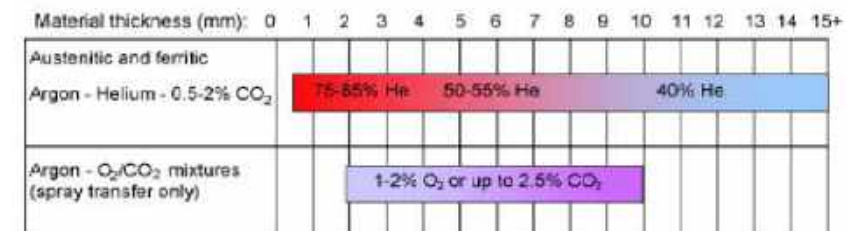
Gambar 5.8 Campuran gas pelindung aktif untuk pengelasan MAG dari karbon, C-Mn dan baja paduan rendah. warna biru adalah lebih dingin dan warna merah adalah campuran gas panas (TWI, 2018).

Campuran gas dengan helium bukan argon menghasilkan busur yang lebih panas, lebih banyak kumpulan fluida pada kolam las dan profil pengelasan yang lebih baik. Campuran empat gas ini memungkinkan kecepatan pengelasan yang lebih tinggi tetapi mungkin tidak cocok untuk bagian-bagian yang tipis.

Pengelasan Baja Tahan Karat

Baja tahan karat austenitik biasanya dilas dengan campuran argon-CO₂/ O₂ untuk transfer kabut gas atau campuran argon-helium-CO₂ untuk semua mode transfer. Potensi terjadinya pengoksidasian dari campuran dijaga agar tetap minimum

(kandungan CO₂ maksimum 2-2.5 %) untuk menstabilkan busur tetapi dengan efek minimum pada kinerja korosi. Karena baja austenitik memiliki konduktivitas termal yang rendah, penambahan Helium membantu untuk menghindari kurangnya cacat fusi dan mengatasi disipasi panas yang tinggi ke dalam material. Penambahan Helium mencapai 85%, dibandingkan dengan hingga 25% untuk campuran yang digunakan untuk baja karbon dan paduan rendah. Campuran yang mengandung CO₂ kadang-kadang dihindari untuk menghilangkan kemungkinan terangkatnya karbon. Untuk baja tahan karat martensit dan dupleks, disarankan harus dicari campuran yang sesuai. Beberapa campuran Ar-He yang mengandung hingga 2.5% N₂ tersedia untuk pengelasan baja tahan karat dupleks.



Gambar 5.9 Campuran gas pelindung aktif untuk pengelasan MAG baja tahan karat. Warna biru menunjukkan lebih dingin dan warna merah adalah campuran gas yang lebih panas (TWI, 2018).

Paduan ringan (aluminium magnesium, titanium, tembaga dan nikel dan paduannya)

Gas inert digunakan untuk paduan ringan dan yang peka terhadap oksidasi. Gas inert harus untuk memastikan kualitas las yang baik.

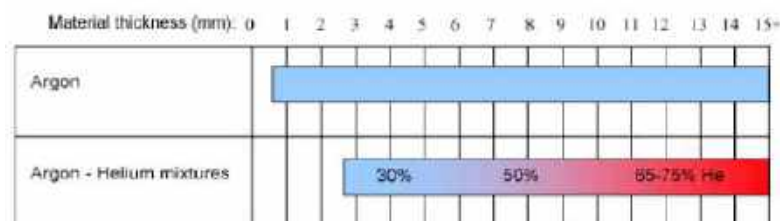
Gas Argon

Dapat digunakan untuk pengelasan aluminium karena adanya oksida pada permukaan untuk menstabilkan busur. Untuk bahan yang peka terhadap oksigen, seperti titanium dan paduan nikel, stabilitas busur mungkin sulit dicapai dengan gas inert di beberapa aplikasi. Densitas dari argon kira-kira 1,4 kali lipat dari udara sehingga posisi pengelasan *downhand*, argon yang relatif berat sangat efektif untuk

dipindahkan. Kerugiannya adalah ketika bekerja di ruang terbatas ada sedikit risiko dari argon hingga tingkat yang berbahaya dan membuat sesak napas tukang las.

Campuran Argon-Helium

Argon paling umum digunakan untuk pengelasan MIG dari paduan ringan tetapi keuntungan dapat diperoleh dengan menggunakan campuran helium dan argon/ helium. Helium memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada argon dan kolam las yang lebih panas menghasilkan penetrasi yang lebih baik dan/ atau peningkatan kecepatan pengelasan. Kandungan helium yang tinggi memberikan profil penetrasi yang luas tetapi menghasilkan tingkat *spatter* yang tinggi. Dengan argon kurang dari 80% transfer pengkabutan sejatinya tidak memungkinkan. Dengan transfer dengan jenis globular, tukang las harus menggunakan busur yang ditanam untuk meminimalkan *spatter*. Stabilitas busur dapat menjadi masalah dalam campuran Helium dan Argon-Helium, karena Helium meningkatkan tegangan busur sehingga ada perubahan yang lebih besar pada tegangan busur sehubungan dengan panjang busur. Campuran Helium membutuhkan laju aliran yang lebih tinggi daripada gas pelindung Argon untuk memberikan perlindungan gas yang sama. Ada pengurangan risiko kurangnya cacat fusi ketika menggunakan campuran Argon-Helium khususnya pada aluminium dengan bagian yang tebal. Campuran gas Ar-He akan mengimbangi pembuangan panas tinggi pada material dengan ketebalan sekitar 3 mm.



Gambar 5.10 Campuran gas pelindung campuran untuk pengelasan MIG pada aluminium, magnesium, titanium, nikel dan paduan tembaga. warna biru menunjukkan lebih dingin dan warna merah menunjukkan lebih panas campuran gas (TWI, 2018).

Tabel 5.1 Ringkasan jenis gas pelindung dan campurannya yang digunakan untuk bahan dasar berbeda untuk pengelasan MIG / MAG.

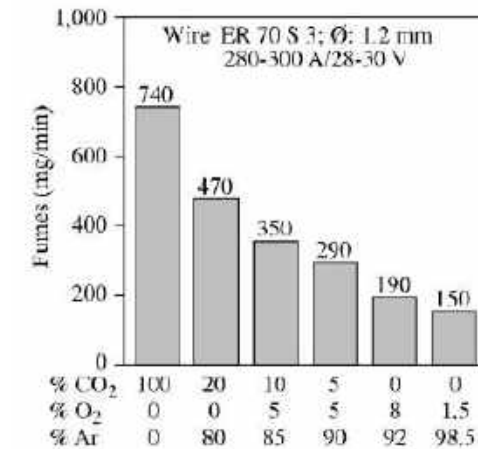
Logam	Gas Pelindung	Sifat Reaksi	Karakteristik
Baja Karbon	Argon-CO ₂	Sedikit oksidasi	Meningkatnya kandungan CO ₂ akan memberi efek busur lebih panas, stabilitas busur meningkat, penetrasi lebih dalam, transisi dari tipe jari ke bentuk mangkuk dari profil penetrasi, lebih banyak kolam las cairan memberikan manik las datar dengan pembasahan yang baik, peningkatan tingkat <i>spatter</i> , ketangguhan yang lebih baik dari pada CO ₂ . Minimum 80% gas argon untuk aksial transfer semprotan. tujuan umum Campuran: Argon-10-15% CO ₂ .
	Argon-O ₂	Sedikit oksidasi	Busur yang lebih kaku daripada campuran Ar-CO ₂ menyebabkan undercutting, cocok untuk mode transfer penyemprotan, penetrasi lebih rendah dari campuran Ar-CO ₂ , penetrasi manik las pada ketinggian arus. tujuan umum campuran :Argon-3% CO ₂ .
	Ar-He-CO ₂	Sedikit oksidasi	substitusi helium ke argon memberi lebih panas pada busur, tegangan busur lebih tinggi, lebih banyak kolam las, profil manik lebih rata, lebih berbentuk mangkuk dan profil penetrasi yang lebih dalam dan lebih tinggi kecepatan pengelasannya, dibandingkan dengan Ar-CO ₂ . Harganya cukup tinggi.
	CO ₂	Oksidasi	Tegangan busur 2-3 V lebih tinggi daripada campuran Ar-CO ₂ , penetrasi terbaik, pengelasan kecepatan lebih

tinggi, transfer celup atau teknik busur tertanam, rentang kerja sempit, spatter yang cukup tinggi, biaya rendah.

Stainless steels	He-Ar-CO ₂	Sedikit oksidasi	Stabilitas busur bagus dengan efek minimal pada ketahanan korosinya (carbon pick-up), lebih tinggi kandungan helium dirancang untuk transfer dip, kandungan helium yang lebih rendah dirancang untuk dorongan dan transfer semprotan. gas yang umum: He-Ar-2% CO ₂ .
	Argon-O ₂	Sedikit oksidasi	Hanya transfer semprotan, meminimalkan pengurangan pada bagian yang lebih berat, profil manik yang baik.
Aluminium, copper, nickel, titanium alloys	Argon	Inert	Stabilitas busur yang baik, spatter rendah dan tujuan umum gas. Paduan titanium membutuhkan dukungan gas inert dan trailing pelindung untuk mencegah kontaminasi dengan udara.
	Ar-He	Inert	Input panas lebih tinggi mengimbangi panas tinggi disipasi pada bagian benda yang tebal, risiko lebih rendah kurangnya cacat fusi, spatter lebih tinggi dan biaya lebih tinggi daripada argon.

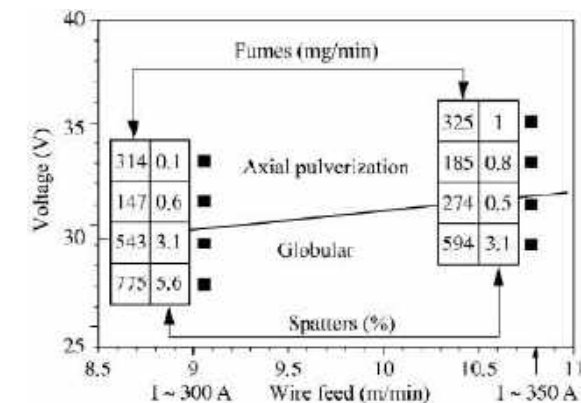
Efek Campuran Gas Pelindung

Terlepas dari radiasi Ultraviolet, emisi asap adalah efek berbahaya yang terkait dengan pengelasan GMAW. Sebagai perkiraan pertama, hal ini meningkat sejalan dengan kekuatan oksidasi gas pelindung (lihat Gambar 5.11) tetapi asap dan percikan juga terkait erat dengan mode transfer logam (Blondeou, 2001)



Gambar 5.11. Pengaruh gas pelindung pada tingkat emisi asap pengelasan MAG (Blondeou)

Ketika sebuah lasan dibuat dengan arus yang menghasilkan transfer panas secara aksial pulverization untuk kombinasi kawat/ gas yang digunakan, laju emisi asap dan projection/ proyeksi berkurang ketika kita meningkatkan tegangan sampai pemindahan yang stabil oleh penghancuran aksial tercapai. Di luar nilai ini, peningkatan tegangan tidak akan mengubah pemindahan logam tetapi memang menyebabkan pemanjangan busur yang sederhana, yang pada gilirannya menyebabkan peningkatan volatilisasi elemen logam dan, akibatnya, dalam tingkat emisi asap (lihat Gambar 5.12) (Blondeou)



Gambar 5.12. Hubungan antara tingkat emisi asap, percikan dan grafik transfer. Kawat: ER70S6 1.2 mm; campuran gas: Ar + 3% CO₂ + 1% O₂; jarak tabung kontak ke benda kerja: 20 mm (blondeau, 2001)

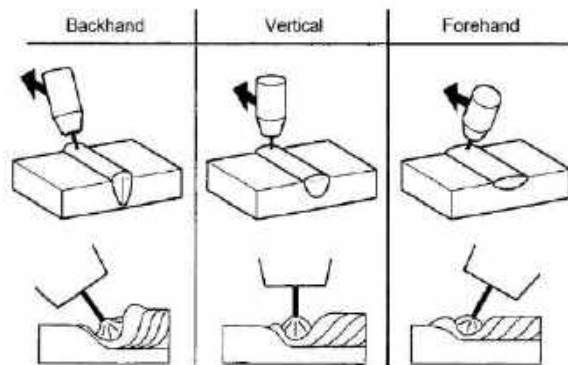
Ini adalah proses yang sangat umum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.26 di mana laju emisi asap relatif berbeda terhadap tiga campuran gas dalam berbagai kondisi pengelasan yang dibandingkan. Dalam gambar yang sama ini, kita juga dapat melihat bahwa nilai emisi minimal berkurang ketika kekuatan oksidasi gas pelindung berkurang. Terlihat juga bahwa perbandingan spesifik dengan parameter listrik konstan dapat menyebabkan klasifikasi terbalik dari gas pelindung, karena parameter listrik yang identik tidak sesuai dengan lokasi titik operasional yang sama dibandingkan dengan karakteristik kurva transfer masing-masing gas (Blondeou).

Laju aliran gas

Aliran gas harus disesuaikan dengan busur las. Pada arus yang rendah, itu bisa cukup dengan 10 liter per menit sementara pada data pengelasan yang lebih tinggi hingga 20 liter mungkin diperlukan. Pengelasan aluminium membutuhkan lebih banyak gas dari pada baja.

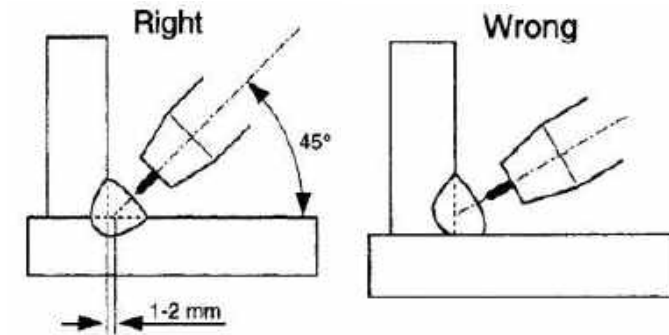
Posisi Torch dan sambungan serta

Sudut Torch terhadap sambungan merupakan parameter pengelasan yang sangat penting. Jika diarahkan jauh dari lasan dengan teknik mengelas *Forehand*, itu akan membuat profil penetrasi lebih dangkal dan lebar lasan lebih lebar, lihat Gambar 5.13. Di sisi lain, jika diarahkan ke bagian lasan (teknik *backhand*), penetrasi akan lebih dalam dan lebar lasan lebih sempit.



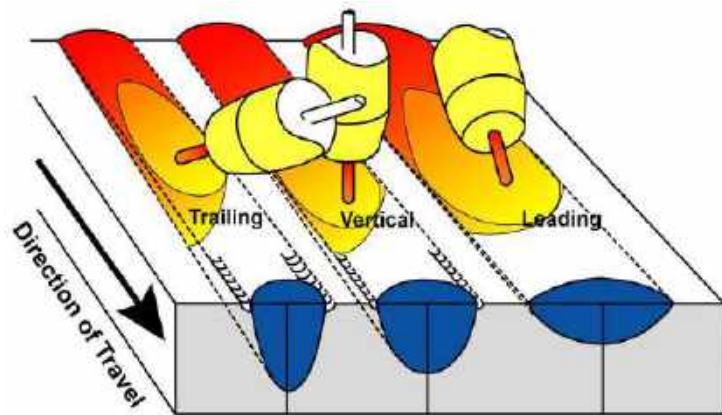
Gambar 5.13 Pengaruh posisi elektroda dan teknik pengelasan (Klas Weman, 2003)

Sudut torch pada bagian melintang yang melintasi arah pengelasan memiliki pengaruh langsung pada risiko kurangnya fusi. Lihat Gambar 5.14.



Gambar 5.14 Sudut dan posisi gun melintasi arah pengelasan pada fillet welding. Elektroda pada pengelasan pelat tebal seperti itu sering diposisikan 1-2 mm diimbangi pada pelat dasar. Hal itu akan mengimbangi pembuangan panas yang lebih tinggi di pelat logam dan memberikan profil penetrasi yang simetris (Klas Weman, 2003)

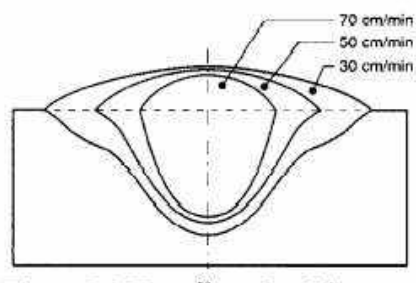
Jika pelat yang akan dilas tidak sepenuhnya horisontal tetapi memiliki sambungan miring, itu akan mempengaruhi kontur dan profil penetrasi las. Dengan pengelasan menurun (*downhill*), tulangan las bisa lebih rendah dan kecepatan pengelasan biasanya akan meningkat. Pada saat yang sama, penetrasi lebih rendah dan manik las lebih lebar. Ini bermanfaat untuk pengelasan lembaran logam. Pengelasan dari bawah ke atas (*Uphill welding*) menyebabkan kolam las mengalir kembali dan membentuk las yang tinggi dan sempit (Klas Weman, 2003).



Penetrasi	Dalam	sedang	Dangkal
Kelebihan logam las	Maksimum	sedang	Minimum
Undercut	Parah	sedang	Minimum

Gambar 5.15 Efek sudut torch las.

Kecepatan pengelasan mempengaruhi penetrasi dan lebar lasan (daerah penampang lasan). Kecepatan tinggi menghasilkan lasan sempit dengan sedikit penetrasi. Kecepatan yang sangat tinggi menghasilkan risiko undercutting, pori-pori, kerusakan akar, fusi yang buruk dan efek pukulan magnetis. Kecepatan yang terlalu rendah menghasilkan permukaan yang tidak rata, sementara kecepatan yang sangat rendah menghasilkan penetrasi berbentuk jamur, dan dapat menyebabkan retak termal. Selain itu, menghasilkan kolam las besar, yang mengalir di sekitar busur dan menghasilkan inklusi permukaan dan terak yang tidak rata (klas Weman, 2003)



Gambar 5.16 Pengaruh kecepatan pengelasan pada penampilan las, dengan nilai arus dan tegangan yang konstan. (klas Weman, 2003)

5.2.4 Kecepatan pengelasan dan orientasi elektroda

Kecepatan pengelasan mempengaruhi kedalaman penetrasi, ketahanan korosi dan sifat mekanis. Semakin tinggi kecepatan pengelasan, maka semakin sedikit kedalaman penetrasi, sehingga semakin sempit manik-manik las yang terbentuk dan semakin tinggi risiko *undercut* (TWI, 2018). Kinerja korosi pada sambungan las dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan pada sambungan beda material (AISI 304 dan baja karbon karbon). Kinerja korosi meningkat ketika kecepatan pengelasan menurun (Abioye dkk, 2019).



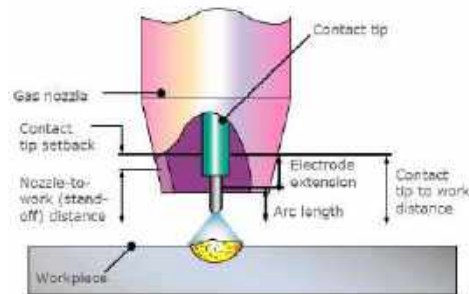
Gambar 5.17 Pengaruh kecepatan pengelasan. Saat kecepatan pengelasan meningkat, akan mengurangi kedalaman penetrasi dan lebar las, undercut (TWI, 2018)

5.2.5 Efek Ujung Kontak Terhadap Jarak Benda Kerja

Kontak terhadap jarak benda kerja (*Contact Tip to Work Distance/ CTWD*) memiliki pengaruh terhadap arus pengelasan karena tahanan pemanasan dalam penambahan panjang elektroda (Gambar 5.18). Arus pengelasan yang diperlukan untuk melelehkan elektroda pada laju yang dibutuhkan agar sesuai dengan kecepatan umpan kawat berkurang ketika CTWD meningkat. Ekstensi elektroda yang panjang dapat menyebabkan kurangnya penetrasi, sebagai contoh, pada sambungan celah sempit atau dengan manipulasi yang buruk dari gun las. Sebaliknya, arus pengelasan meningkat ketika CTWD berkurang. Hal ini membutuhkan tukang las berpengalaman dengan cara mengendalikan arus selama pengelasan tetapi dapat menghasilkan penetrasi variabel dalam pengelasan manual dengan sumber tenaga pada tegangan konstan.

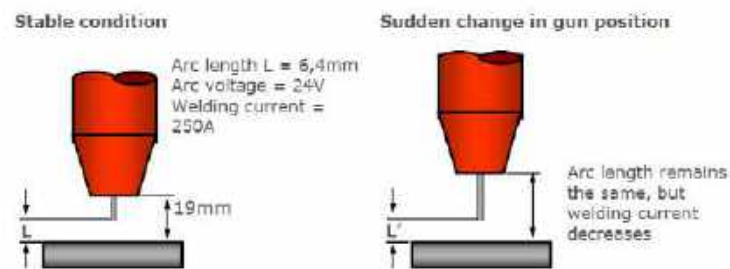
Ketika perpanjangan elektroda meningkat, laju pembakaran akan bertambah untuk arus pengelasan yang diberikan karena pemanasan resistif yang meningkat. Meningkatnya ekstensi elektroda, misalnya dalam aplikasi mekanis, karena itu

merupakan salah satu cara untuk meningkatkan laju deposit, karena kecepatan umpan kawat ditingkatkan untuk mempertahankan arus pengelasan yang diperlukan.

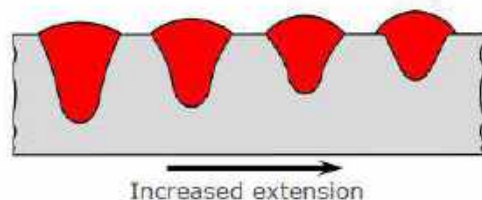


Gambar 5.18 CTWD; ekstensi elektroda dan nozzle untuk jarak benda kerja.

Pemanasan resistif tergantung pada resistivitas elektroda, panjang ekstensi elektroda dan diameter kawat sehingga lebih jelas untuk bahan pengelasan yang memiliki resistivitas tinggi, seperti baja. Ekstensi elektroda harus dijaga tetap kecil ketika kabel berdiameter kecil digunakan untuk mencegah pemanasan berlebihan pada kawat dan menghindari bentuk manik yang buruk.



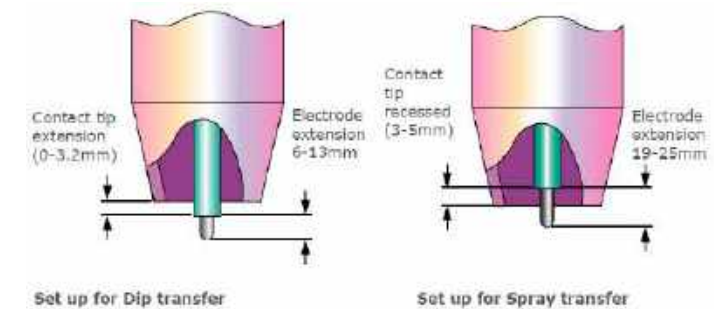
Gambar 5.19 Efek dari meningkatnya ujung kontak ke jarak benda kerja. Panjang busur tetap sama panjang.



Gambar 5.20 Efek peningkatan panjang elektroda terhadap penetrasi

Pada CTWD yang pendek, panas yang dipancarkan dari kolom pengelasan dapat menyebabkan overheating tabung kontak dan torch las yang dapat menyebabkan percikan dan peningkatan keausan tabung kontak. Penambahan panjang elektroda harus diperiksa ketika mengatur kondisi pengelasan atau pemasangan tabung kontak baru. Biasanya diukur dari tabung kontak ke benda kerja (Gambar 5.15) CTWD yang disarankan untuk mode transfer logam utama adalah:

Mode Transfer logam	CTWD (mm)
Dip	10-15
Spray	20-25
Pulse	15-20



Gambar 5.21 jarak CTWD yang disarankan

5.2.6 Efek nozzle pada jarak kerja

Jarak nozzle untuk proses pengelasan (Gambar 11.16) memiliki efek yang cukup besar pada efisiensi gas pelindung dengan penurunan pengerasan kolom. Jarak antara Nosel untuk pengelasan biasanya 12-15mm. Namun, jika CTWD berkurang secara bersamaan, laju pengendapan pada arus yang diberikan berkurang dan visibilitas dan aksesibilitas akan dipengaruhi; jadi dalam praktiknya diperlukan kompromi. Berikut ini pengaturan yang disarankan untuk mode transfer logam yang digunakan.

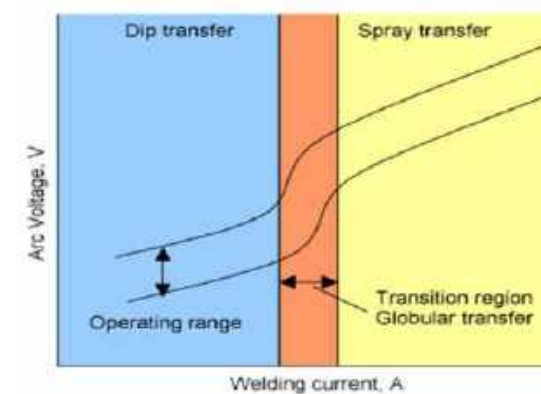
Mode transfer logam	Posisi ujung kontak relatif terhadap nozzle
Dip	2mm kedalam ke 2mm menonjol
Spray	4-8 mm kedalam
Spray (aluminium)	6-10 mm kedalam

5.2.7 Nozzle Gas Pelindung

Tujuan dari nosel gas pelindung adalah untuk menghasilkan aliran gas laminar agar melindungi kolam las dari kontaminasi atmosfer. Diameter nozzle berkisar antara 13-22 mm dan harus ditingkatkan sehubungan dengan ukuran kolam las. Oleh karena itu, nosel berdiameter lebih besar digunakan untuk arus tinggi, aplikasi transfer spray dan diameter lebih kecil untuk transfer celup. Laju aliran juga harus disesuaikan dengan diameter nosel dan jenis gas pelindung untuk memberikan cakupan kolam las yang memadai. Nosel gas untuk pengelasan transfer celup cenderung meruncing dibagian keluar nosel.

Akses dan jenis sambungan juga harus dipertimbangkan ketika memilih nozzle gas dan laju aliran yang dibutuhkan. Nosel yang terlalu kecil dapat menyebabkan terhalang oleh percikan lebih cepat dan jika kawat cenderung meninggalkan tabung kontak, envelope pelindung dan lokasi busur mungkin tidak bertepatan.

5.2.8 Jenis Transfer Logam



Gambar 5.22 Kurva karakteristik busur

Karakteristik utama kedalaman transfer

- Transfer logam dengan mencelupkan kawat atau hubungan arus pendek ke kolam las.
- Proses input panas yang relatif rendah.
- Fluiditas kolam las rendah.
- Digunakan untuk lembaran logam tipis di atas 0.8mm dan biasanya kurang dari 3.2mm, posisi pengelasan dari bagian yang lebih tebal dan root berjalan pada sambungan tumpul terbuka.
- Stabilitas proses dan percikan bisa menjadi masalah jika tidak diatur dengan benar.
- Kurangnya fusi dan penerapan yang buruk.
- Tidak digunakan untuk logam dan paduan non-ferro.



Gambar 5.23 Dip transfer

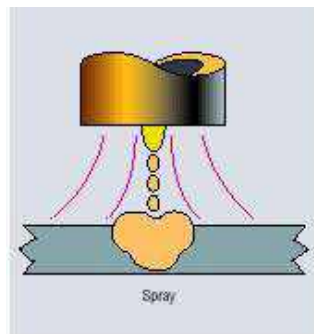
Dalam transfer celup, hubung-arus pendek kawat busur 50-200 kali/ detik dan jenis transfer ini biasanya dicapai dengan menggunakan gas CO₂ atau campuran CO₂ dan gas argon + tegangan rendah dan arus pengelasan <24V.



Gambar 5.24 dip transfer

Karakteristik utama transfer spray

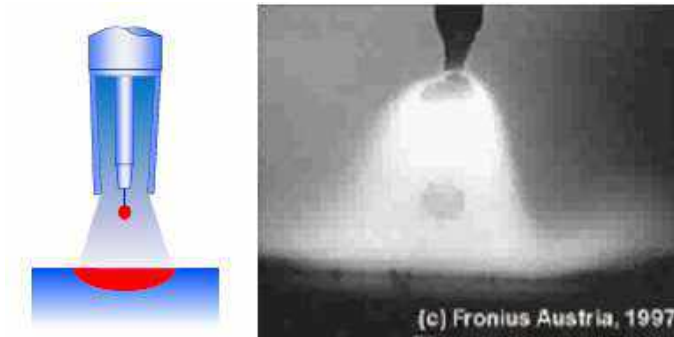
- Input panas tinggi.
- Tingkat deposisi yang tinggi.
- Busur stabil halus.
- Digunakan pada baja dengan ketebalan di atas 6 mm dan paduan aluminium di atas ketebalan 3mm.



Gambar 5.25 Transfer spay

Transfer spray (Semprot) terjadi pada arus dan tegangan yang tinggi. Di atas arus transisi, transfer logam adalah semburan dari tetesan (*droplet*) kecil yang diproyeksikan melintasi busur dengan tingkat percikan yang rendah. Arus pengelasan tinggi menghasilkan gaya elektro magnetik yang kuat (efek jepit) yang menyebabkan filamen cair yang mendukung tetesan ke leher ke bawah. Tetesan terlepas dari ujung kawat dan berakselerasi melintasi celah busur. Frekuensi yang

dilepaskan tetesan logam cair meningkat dengan meningkat arus. Ukuran tetesan sama dengan diameter kawat saat permulaan, akan tetapi menurun secara signifikan ketika arus pengelasan meningkat. Pada arus yang sangat tinggi (kecepatan umpan kawat), tetesan cair dapat mulai berputar (transfer berputar). Arus busur mengalir selama pelepasan drop menghasilkan penetrasi maksimum dan input panas tinggi. Jika tegangan busur untuk memberikan transfer semprotan digunakan, busur pendek dengan ujung kawat 1-3mm dari permukaan pelat.



Gambar 5.26 Spray transfer

Baja ini hanya dapat digunakan pada sambungan tumpul dan lasan fillet dengan perbandingan H/ V tetapi memberikan laju deposisi, penetrasi dan fusi yang lebih tinggi daripada transfer celup karena pemanasan busur terjadinya secara kontinu. Hal ini terutama digunakan untuk ketebalan pelat baja >3 mm tetapi penggunaan terbatas untuk pengelasan dengan potensi kolam las besar.

Karakteristik utama transfer Denyut

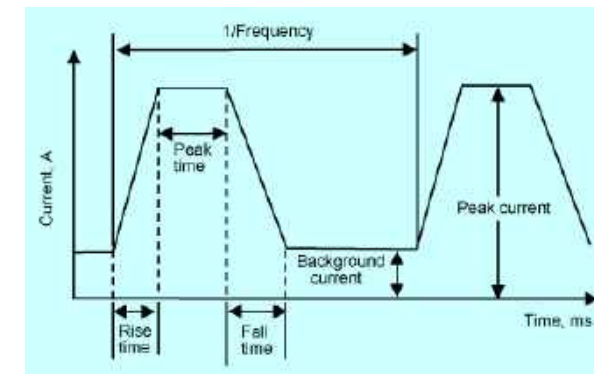
- Transfer tetesan tanpa terjadinya korsleting selama pekerjaan.
- Percikan yang terjadi sangat rendah.
- Input panas lebih rendah daripada transfer semprot.
- Mengurangi risiko kurangnya fusi dibandingkan dengan transfer dip.
- Kontrol profil manik las untuk komponen yang dimuat secara dinamis.
- Kontrol proses / fleksibilitas.

- Memungkinkan penggunaan diameter yang lebih besar, kabel yang lebih murah dengan pelat yang lebih tipis-lebih mudah pemakanan (keuntungan khusus untuk pengelasan aluminium).

Denyut arus pengelasan memperluas jangkauan operasi transfer semprotan di bawah transisi alami dari jenis dip ke transfer semprot. Hal ini memungkinkan transfer semprotan yang halus dan bebas percikan pada arus rata-rata di bawah batas transisi, misalnya pada arus 50-150 A dan pada input panas yang lebih rendah. Denyut awal untuk mengontrol transfer logam dengan memaksakan operasi siklus buatan pada sistem busur dengan menerapkan arus tinggi dan rendah secara bergantian.

Bentuk denyut gelombang yang khas dan variabel denyut pengelasan utama ditunjukkan pada Gambar 5.27. Arus dasar yang rendah (biasanya 20-80A) disuplai untuk mempertahankan busur, menjaga ujung kawat meleleh, memberikan anoda dan katoda yang stabil dan mempertahankan arus rata-rata selama siklus. Pelepasan tetesan terjadi selama denyut gelombang arus yang tinggi pada level arus di atas batasan arus. Denyut gelombang arus menghasilkan gaya elektromagnetik yang sangat tinggi yang menyebabkan efek jepitan yang kuat pada filamen logam yang mendukung tetesan terlepas dan diproyeksikan melintasi celah busur. Denyutan arus dan kerapatan arus harus cukup tinggi untuk memastikan bahwa transfer semprotan (bukan bentuk globular) selalu terjadi sehingga pengelasan dapat digunakan.

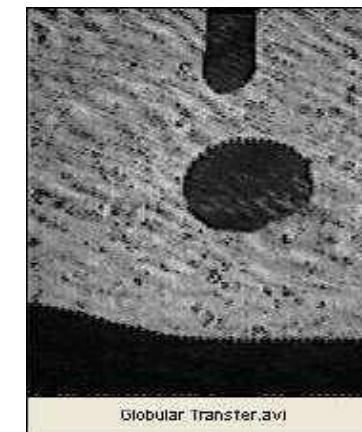
Transfer denyutan menggunakan denyutan arus untuk menembakkan satu gumpalan logam melintasi celah busur pada frekuensi 50-300 denyutan/ detik. hal ini adalah pengembangan transfer semprot yang memberikan kemampuan posisi pengelasan untuk baja, dikombinasikan dengan input panas yang terkontrol, fusi yang baik dan produktivitas tinggi dan dapat digunakan untuk semua ketebalan baja lembaran > 1mm, tetapi terutama digunakan untuk pengelasan baja > 6mm.



Gambar 5.27 Bentuk dan parameter denyut pengelasan.

Karakteristik utama transfer globular

- Transfer logam tidak teratur.
- Input panas sedang.
- Tingkat deposisi sedang.
- Risiko terjadi percikan.
- Tidak banyak digunakan di Inggris dapat digunakan untuk pengelasan mekanis menengah dengan ketebalan baja (biasanya 3-6mm) dengan pengelasan dengan posisi datar (PA).



Gambar 5.28 Globular transfer

Sinergis

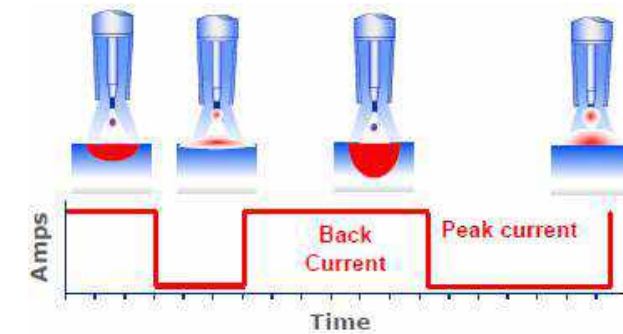
Adalah istilah yang berarti bekerja bersama dan pada awalnya dirancang untuk menetapkan parameter denyut yang benar dalam pengelasan MIG/ MAG

pada berbagai diameter kawat dan campuran gas. Menyesuaikan parameter denyut secara manual bermasalah dengan banyak variabel yang harus disesuaikan; puncak denyut, waktu pulsa, arus dan waktu yang digunakan. Akibatnya, untuk sampai pada kondisi busur yang benar dengan waktu pemakanan dan penuh dengan kesalahan.

Dengan kemajuan dalam sumber daya yang dikendalikan secara elektronik dan sistem yang dikendalikan oleh inverter CPU berikutnya, memungkinkan produsen untuk melakukannya menghasilkan sistem kontrol satu tombol. Oleh karena itu, semua parameter yang disebutkan sebelumnya dapat dikontrol melalui operasi kontrol satu tombol untuk menetapkan kondisi busur yang benar sebagaimana ditentukan oleh produsen sumber arus. Intinya, saat kenop diputar, pengumpanan kawat meningkat, mungkin voltase (dan semua parameter pulsa) berubah untuk menjaga kondisi busur seimbang.

Pabrikan, memiliki kurva sinergis yang telah ditentukan berdasarkan jenis bahan, diameter kawat, dan campuran gas. Untuk memfasilitasi pengaturan, informasi ini diprogram oleh pengguna dan kurva dihasilkan berdasarkan input. Pengguna kemudian dapat mengatur, melalui satu kontrol tombol, ke atas dan ke bawah kurva sinergis. Namun sebagian besar mesin memiliki opsi untuk mengatur tegangan kurva sinergis jika diperlukan. Selain itu, setelah kondisi pengelasan yang dapat diterima ditemukan, sebagian besar produsen memiliki kemampuan untuk menyimpan memori untuk diambil kembali di kemudian hari.

Rentang transfer globular menempati kisaran transisi tegangan busur antara free flight bebas dan transfer arus pendek sepenuhnya. Transfer tetesan tidak teratur dan ketidakstabilan busur melekat, terutama saat beroperasi di dekat ambang transisi. Dalam transfer globular tetesan cair beberapa kali diameter elektroda terbentuk di ujung kawat, gravitasi akhirnya melepaskannya ketika beratnya mengatasi tekanan permukaan dan transfer sering terjadi dengan percikan berlebihan. Sebelum mentransfer busur menyimpang dan kerucutnya mencakup area yang luas, membuang energi.



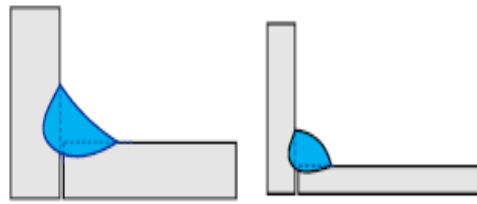
Gambar 5.29 pulsed transfer pada pengelasan MIG

Ada hubungan pendek durasi pendek ketika tetesan kontak dengan kolam cair tetapi sebaliknya menyebabkan transfer tetesan itu terjadi sebagai akibatnya. Meskipun hubungan singkat memiliki durasi yang sangat singkat, beberapa induktansi diperlukan untuk mengurangi percikan, meskipun bagi operator hubungan singkat tidak dapat dilihat dan busur memiliki tampilan tipe free flight.

Untuk meminimalkan tingkat percikan, umumnya untuk operasi dengan panjang busur yang sangat pendek dan dalam beberapa kasus teknik busur terkubur diadopsi. Transfer globular hanya dapat digunakan dalam posisi datar dan sering dikaitkan dengan kurangnya penetrasi, cacat fusi dan manik-manik las yang tidak rata karena transfer tidak teratur dan kecenderungan busur menyimpang.

5.2.9 Induktansi

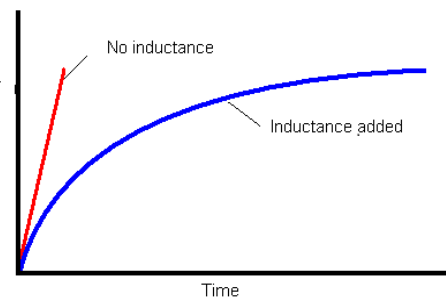
Sewaktu dilakukan pengelasan dengan metode MIG/ MAG dalam mode transfer dip, elektroda pengelasan menyentuh kolam pengelasan yang menyebabkan korsleting di mana tegangan busur hampir nol. Jika catu daya tegangan konstan merespons secara instan, arus yang sangat tinggi akan segera mulai mengalir melalui rangkaian pengelasan dan kenaikan arus yang cepat ke nilai yang tinggi akan melelehkan elektroda hubung singkat yang bebas dengan daya ledak, membuang logam las dan menyebabkan banyak berhamburan/percikan.



Gambar 5.30 efek induktansi pada penetrasi a) maksimum dan b) minimum induktansi

Induktansi adalah properti dalam rangkaian listrik yang memperlambat laju kenaikan arus. Arus yang berjalan melalui kumparan induktansi menciptakan medan magnet yang menciptakan arus dalam rangkaian pengelasan berlawanan dengan arus pengelasan. Meningkatkan induktansi juga akan meningkatkan waktu busur dan mengurangi frekuensi hubungan arus pendek.

Nilai induktansi optimal untuk setiap laju umpan elektroda, jika Terlalu sedikit menghasilkan percikan yang berlebihan, dan jika terlalu banyak dan arus tidak akan naik cukup cepat dan ujung lelehan elektroda tidak cukup dipanaskan menyebabkan elektroda menyobek logam dasar. Sumber tenaga elektronik modern saat ini secara otomatis mengatur induktansi untuk memberikan transfer busur dan logam yang halus.



Gambar 5.31 Hubungan antara induktansi dan kenaikan arus.

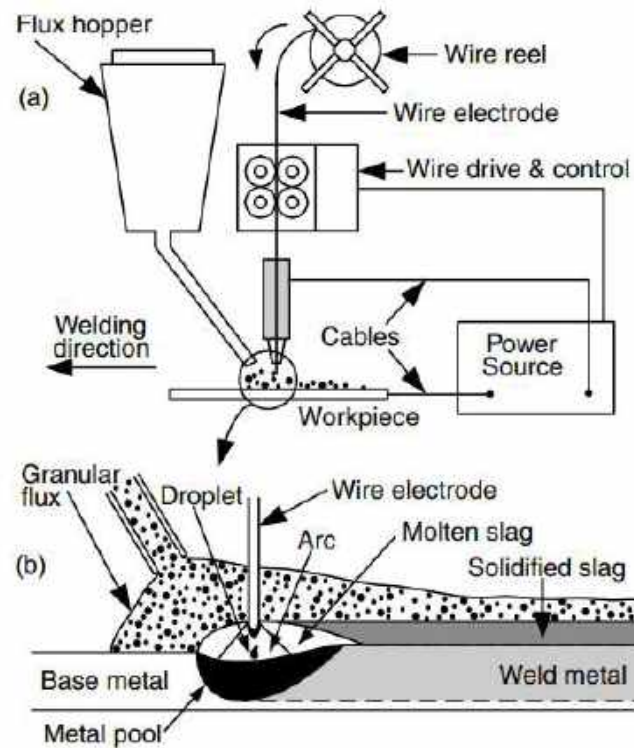
Bab 6 Pengelasan Submerged Arc Welding (SAW)

6.1. Proses Pengelasan SAW

Submerged arc welding (SAW) adalah proses yang melelehkan dan menggabungkan logam dengan memanaskannya dengan busur yang dibuat antara elektroda kawat habis pakai dan logam, dengan busur yang dilindungi oleh terak cair dan fluks granular, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1 (Kou, 2003).

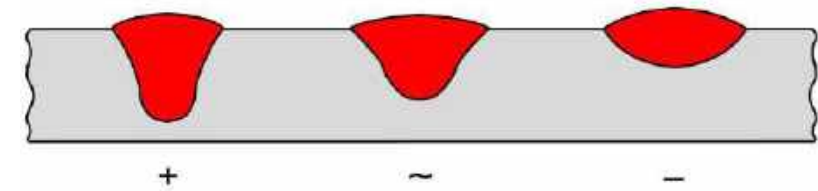
Kawat elektroda diumpankan secara terus menerus oleh unit pengumpan berbentuk rol yang digerakkan motor yang biasanya dikontrol tegangannya untuk memastikan busur dengan panjang konstan. Hopper yang dipasang pada kepala pengelasan memiliki tabung yang menyebarkan fluks dalam bentuk tumpukan kecil memanjang terus menerus yang dicurahkan di depan busur di sepanjang garis las yang akan dibuat dengan kedalaman yang cukup untuk merendam busur sepenuhnya sehingga tidak ada percikan las. Lasan terlindung dari atmosfer dan tidak ada efek radiasi ultraviolet atau inframerah (lihat di bawah). Fluks yang tidak dilelehkan didaur ulang untuk digunakan. Penggunaan fluks bubuk membatasi proses ke posisi pengelasan datar dan horizontal-vertikal (TWI, 2018)

Proses ini berbeda dari proses pengelasan busur dibahas sejauh ini bahwa busur terendam dan dengan demikian tidak terlihat. Fluks dipasok dari hopper (Gambar 6.1a), yang bergerak dengan torch las. Tidak diperlukan gas pelindung karena logam cair dipisahkan dari udara oleh terak cair dan fluks berbentuk butiran (Gambar 6.1b). Elektroda arus searah positif (DCEP) paling sering digunakan. Namun, pada arus pengelasan yang sangat tinggi (mis., Di atas 900 A) arus AC lebih disukai untuk meminimalkan arc blow. Arc blow disebabkan oleh gaya elektromagnetik (Lorentz) sebagai hasil dari interaksi antara arus listrik itu sendiri dan medan magnet yang diinduksi (Kou, 2003).



Gambar 6.1. Las busur terendam: (a) keseluruhan proses; (B) area pengelasan diperbesar (Kou, 2003).

Las busur terendam dapat digunakan di mana arus las tinggi (karena sifat dan fungsi fluks) yang memberikan penetrasi dalam dan tingkat deposisi tinggi. Umumnya polaritas DC + ve digunakan hingga sekitar 1000 A karena menghasilkan penetrasi yang dalam. Pada beberapa aplikasi (antara lain pengelasan cladding) menggunakan polaritas DC + ve diperlukan untuk mengurangi penetrasi dan pengenceran. Pada arus yang lebih tinggi atau dengan beberapa sistem elektroda, arus bolak-balik (AC) lebih sering digunakan untuk menghindari busur (ketika digunakan dengan beberapa sistem elektroda, DC + ve digunakan untuk busur timah dan arus AC untuk busur). Pengaruh perbedaan polaritas memberikan perbedaan kedalam penetrasi pada pengelasan ini (gambar 6.2)



Gambar 6.2 Pengaruh Polaritas Elektroda Polarity Pada Penetrasi (TWI, 2018)

Kesulitan terkadang muncul dalam memastikan kesesuaian lasan dengan garis yang telah ditentukan karena pengaruh fluks. Jika memungkinkan, roda pemandu untuk berjalan dalam persiapan sambungan diposisikan di depan kepala las dan hopper fluks.

Las busur terendam ini banyak digunakan dalam pembuatan kapal, bejana tekan, jaringan pipa, gerbong kereta api. metode SAW dapat digunakan untuk mengelas baja dengan ketebalan lebih dari 5mm ke atas. Adapun komponen utama pengelasan busur terendam sebagaimana terlihat pada gambar (6.3)



Gambar 6.3 komponen utama las SAW (TWI, 2018)

Keuntungan dan Kerugian Metode SAW

Perlindungan dan pemurnian terak membantu menghasilkan lasan yang bersih. Karena busur terendam, percikan dan kehilangan panas ke udara sekitarnya bisa dihilangkan bahkan pada arus pengelasan tinggi. Baik elemen paduan dan serbuk logam dapat ditambahkan ke fluks granular untuk mengontrol komposisi

logam las dan meningkatkan laju deposisi. Menggunakan dua atau lebih elektroda bersama-sama selanjutnya akan meningkatkan laju pengendapan (Kou, 2003).

Karena tingkat deposisi yang tinggi, benda kerja jauh lebih tebal daripada yang ada di pengelasan GTAW dan GMAW dapat dilas oleh SAW. Namun, volume yang relatif besar dari terak cair dan kolam logam cair sering membatasi SAW untuk pengelasan posisi datar dan pengelasan melingkar (pipa). Input panas yang relatif tinggi dapat mengurangi kualitas las dan meningkatkan distorsi (Kou, 2003).

Jenis Material yang bisa disambung

Tidak semua jenis material yang bisa digunakan dalam pengelasan busur terendam. Adapun jenis material yang digunakan dalam pengelasan jenis ini adalah:

- Pengelasan baja karbon.
- Pengelasan baja paduan rendah (misalnya baja dengan butiran halus dan ketahanan mulur).
- Pengelasan baja tahan karat.
- Pengelasan paduan nikel.
- Proses Cladding ke logam tidak mulia untuk meningkatkan ketahanan aus dan korosi.

6.2 Fluks

Fluks adalah senyawa mineral berbentuk tidak beraturan (*granular*) yang dicampur dengan berbagai formulasi. Fluks yang menyatu dihasilkan oleh konstituen yang dicampur dalam kondisi kering, dilebur dalam tungku listrik kemudian digranulasi dengan menuangkan campuran cair ke dalam air atau ke blok es. Selanjutnya partikel-partikel ini dihancurkan dan disaring untuk menghasilkan produk seperti kaca yang seragam (TWI, 2018)

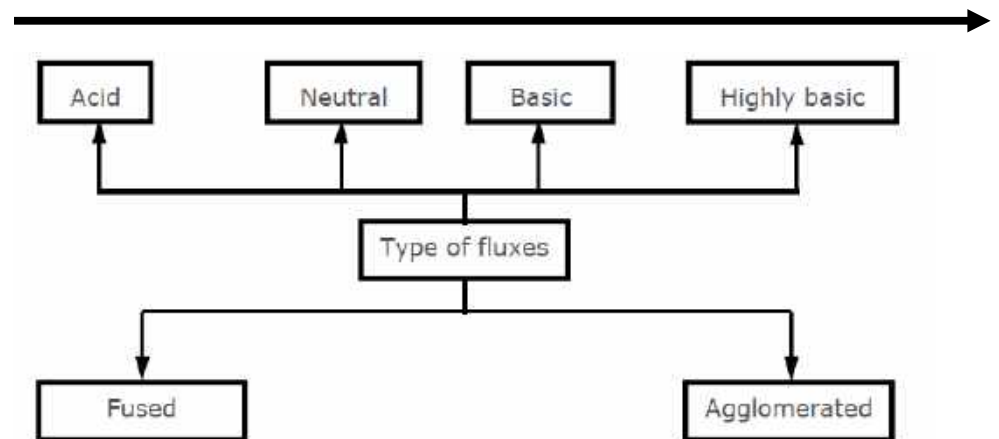
Fluks diproduksi dari bahan baku kasar yang dicampur sebelum dimasukkan ke dalam tungku listrik. fluxs kemudian dipanaskan pada suhu sekitar 1.600 °C yang memungkinkan untuk memperoleh produk cairan yang homogen secara kimia. Produk ini kemudian dituang di atas plat, sangat dingin untuk memberikan

struktur kaca setelah pemadatan dan pendinginan hingga suhu kamar, sehingga menjaga homogenitas kimia yang sempurna (Blondeau, 2001)

Flux bersifat keras ini kemudian dihancurkan dan disaring untuk mendapatkan distribusi granulometrik yang diinginkan. Dalam proses pembuatan flux lainnya, bahan flux cair diatomisasi dengan menggunakan cairan yang ditembakkan sehingga cairan terlempar ke atas plat yang berputar, dengan tujuan untuk menghindari proses penghancuran (Blondeau, 2001).

Karakteristik pengelasan: Busur lebih stabil, pengelasan dengan penampilan lebih baik, penghilangan terak lebih mudah, kecepatan pengelasan lebih tinggi

Sifat mekanik logam las (YS, UTS dan CEN) jumlah Mn dan Si



Keuntungan fluks yang menyatu

- Homogenitas kimia yang baik.
- Kurang higroskopik sehingga penanganan dan penyimpanan lebih mudah.
- Halus (serbuk halus) dapat dihilangkan tanpa perubahan komposisi.
- Mudah didaur ulang melalui sistem tanpa perubahan signifikan dalam ukuran atau komposisi partikel.

Kekurangan fluks yang menyatu

- Keterbatasan dalam komposisi karena beberapa komponen, seperti karbonat dasar tidak dapat menahan proses peleburan.

- Sulit menambahkan deoxidiser dan ferro-alloy (karena segregasi atau kehilangan yang sangat tinggi).

Dalam fluks yang diaglomerasi, konstituen dapat diikat dengan mencampur dalam kondisi kering konstituen dengan kalium atau natrium silikat dan campuran basah kemudian dijadikan pelet, dikeringkan, dihancurkan dan disaring sesuai ukuran.

Keuntungan fluks yang diaglomerasi

- Deoxidiser dan elemen paduan dapat dengan mudah ditambahkan ke fluks untuk menyesuaikan komposisi logam las.
- Diperoleh lapisan fluks yang lebih tebal saat pengelasan.
- Dapat diidentifikasi berdasarkan warna dan bentuk.

Kerugian dari fluks yang diaglomerasi

- Umumnya lebih higroskopis (memanaskan tidak praktis).
- Gas dapat berevolusi dari terak saat meleleh, menyebabkan porositas.
- Dapat terjadi perubahan komposisi kimia logam las dari pemisahan partikel halus dihasilkan oleh penanganan mekanis fluks.

Peran fluks pada aspek metalurgi

Pengelasan busur terendam melibatkan penggunaan kawat las padat atau berinti dan fluks, busur listrik yang masuk ke dalam fluks dari ujung kawat ke bagian yang akan disambung. Fluks harus melakukan dua fungsi mendasar: ia harus memberikan stabilitas busur yang baik dan itu harus melindungi kolam las dan logam cair jatuh dari atmosfer dan kontaminasi oksigen selama transfer mereka dalam busur (Blondeau, 2001).

Fluks juga memiliki efek penting pada bentuk manik las (pembasahan dan penetrasi).hal ini karena ia mengubah distribusi daya di busur serta karakteristik fisik dari terak, yang dihasilkan dari fusi dan reaksi reduksi oksida yang terjadi selama pengelasan. Inilah sebabnya, tergantung pada formulasinya, fluks dapat sedikit banyak diadaptasi dengan baik untuk pengelasan fillet, pengelasan kecepatan tinggi atau pengelasan multi elektroda.Namun, dari perspektif metalurgi, karakteristik mendasar dari fluks berasal dari fakta itu mengatur oksigen dan

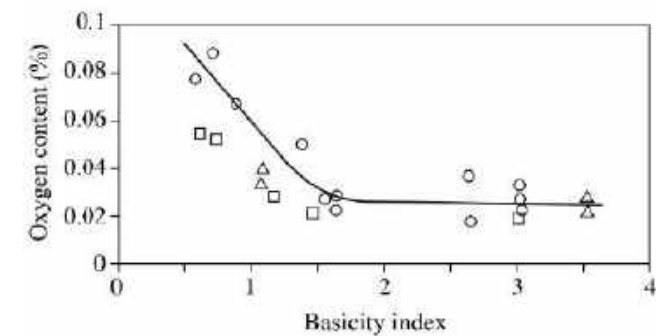
kandungan hidrogen difusi dari logam yang diendapkan untuk kawat tertentu (Blondeau, 2001).

Semua produsen produk pengelasan masih menggunakan rumus empiris yang awalnya diajukan oleh Tuliani untuk mengklasifikasikan fluks pengelasan busur terendam. Rumus ini memungkinkan untuk menghitung indeks kebasaaan dengan membedakan konstituen fluks sesuai dengan karakter dasarnya; asam, amfoter atau netral:

$$BI = \frac{[CaO] + [MgO] + [BaO] + [SrO] + [Li_2O] + [Na_2O] + [K_2O] + [CaF_2] + \frac{1}{2}([FeO] + [MnO])}{[SiO_2] + \frac{1}{2}([Al_2O_3] + [TiO_2] + [ZrO_2])} \quad (6.1)$$

dengan $[A \times By]$ = persentase berat fluks A x By.

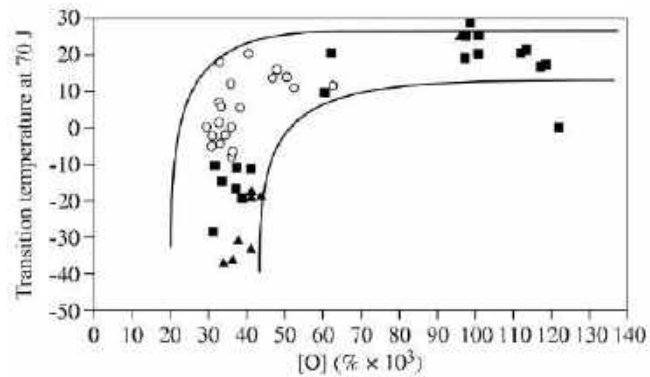
Tuliani, dan yang lain setelahnya menyebutkan bahwa kandungan oksigen dari deposit logam yang disimpan berkurang ketika indeks kebasaaan meningkat hingga 1,5, kemudian akan stabil sekitar 280 hingga 300 ppm (Gambar 6.4). Hasil akhirnya adalah tidak ada gunanya menggunakan fluks dengan indeks kebasaaan yang jauh lebih tinggi ketika upaya mengoptimalkan karakteristik logam yang diendapkan.



Gambar 6.4. Hubungan antara kandungan oksigen dari deposit logam dan fluks

Terlebih lagi, jika perubahan suhu yang berkaitan dengan nilai tertentu dari energi impact (70 J dalam Gambar 6.5) diukur selama uji impact pada sejumlah besar lasan sesuai dengan kandungan oksigennya, nampak bahwa oksigen di atas 400 hingga 450 ppm suhu selalu tinggi. Sebaliknya, pada nilai yang lebih rendah, kesenjangan yang sangat besar dalam hasil akan muncul. Ini menegaskan fakta

bahwa kandungan oksigen, indikator yang tidak sempurna dari tingkat inklusi, mengatur energi ulet dari patahan, untuk tingkat tinggi, mendekati nilai yang dipilih di sini untuk mengkarakterisasi transisi.



Gambar 6.5 Hubungan antara suhu transisi pada 70 J dan kandungan oksigen las busur terendam

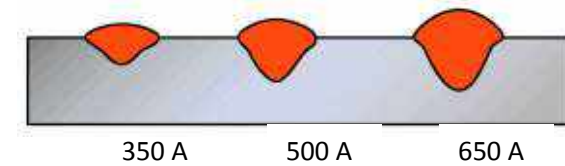
6.3 Variabel proses Pengelasan SAW

Beberapa variabel pengelasan ketika diubah dapat memiliki efek pada penampilan dan peralatan mekanis lasan yang digunakan yaitu:

- Arus pengelasan.
- Jenis distribusi fluks dan partikel.
- Tegangan busur.
- Kecepatan pengelasan.
- Ukuran elektroda.
- Ekstensi elektroda.
- Jenis elektroda.
- Lebar dan kedalaman lapisan fluks.
- Sudut elektroda (depan, belakang).
- Polaritas.
- Sistem tunggal, ganda atau multi-kawat.

6.3.1 Arus pengelasan

Meningkatnya arus pengelasan juga akan meningkatkan penetrasi dan laju lelehan kawat. Hal ini akan mempengaruhi kedalaman penetrasi pada hasil lasan seperti yang ditunjukkan pada gambar (6.6)



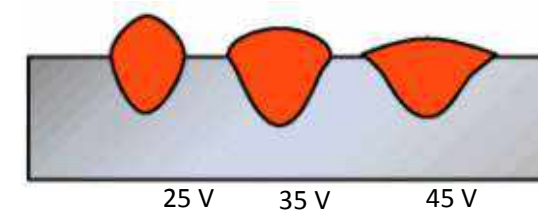
Gambar 6.6 Pengaruh peningkatan arus listrik las pada bentuk dan penetrasi las.

Efek arus pengelasan pada profil pengelasan (diameter elektroda 2,4 mm, tegangan busur 35V, dan kecepatan pengelasan 61cm/ menit).

- Arus yang sangat tinggi menghasilkan busur tembus yang sangat dalam dengan kecenderungan untuk terjadinya burn through, undercut, manik-manik sempit yang rentan terhadap retak pembekuan.
- Arus yang sangat rendah menghasilkan lengkungan yang tidak stabil, kurangnya penetrasi dan mungkin kurangnya fusi.

6.3.2 Tegangan busur

Penyesuaian tegangan busur memvariasikan panjang busur antara elektroda dan logam las cair. Saat meningkat, panjang busur meningkat dan sebaliknya. Tegangan pada prinsipnya menentukan bentuk penampang manik las dan bentuk penampilan eksternal.



Gambar 6.7 Pengaruh peningkatan tegangan busur pada bentuk dan penetrasi las. Efek tegangan busur pada profil las diameter elektroda 2,4 mm, arus pengelasan 500A dan kecepatan pengelasan 61cm/ menit. Meningkatnya tegangan busur dengan arus konstan dan kecepatan pengelasan akan:

- Menghasilkan manik yang lebih rata dan lebih luas.

- Meningkatnya konsumsi fluks.
- Cenderung mengurangi porositas yang disebabkan oleh karat atau kerak pada baja.
- Membantu menjembatani pembukaan akar yang berlebihan saat fit-up buruk.
- Meningkatkan pick-up elemen paduan dari fluks jika ada.

Tegangan busur yang terlalu tinggi akan:

- Menghasilkan bentuk butiran lebar yang tunduk pada retak pemadatan.
- Membuat pelepasan terak menjadi sulit pada lasan alur.
- Menghasilkan lasan fillet berbentuk cekung yang mungkin mengalami keretakan.
- Meningkatkan undercut di sepanjang tepi lasan filet.
- Paduan logam las yang berlebihan melalui fluks.

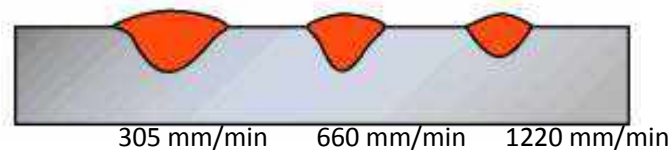
Mengurangi tegangan busur dengan arus yang konstan dan kecepatan pengelasan akan menghasilkan busur yang lebih kaku yang meningkatkan penetrasi dalam alur las yang dalam dan menahan tiupan busur. Tegangan busur yang sangat rendah akan:

- Menghasilkan manik yang tinggi dan sempit.
- Menyebabkan pelepasan terak yang sulit di sepanjang kaki las.

6.3.3 Kecepatan pengelasan

Jika kecepatan pengelasan ditingkatkan maka akan mempengaruhi:

- Input panas per unit lasan berkurang.
- Logam pengisi lebih sedikit per satuan panjang lasan sehingga lebih sedikit logam las berlebih.
- Penetrasi berkurang sehingga manik las menjadi lebih kecil.



Gambar 6.8 Pengaruh peningkatan kecepatan gerak pada bentuk dan penetrasi las.

Efek kecepatan pengelasan pada profil pengelasan (diameter elektroda 2,4 mm, arus pengelasan 500A, dan tegangan busur 35V).

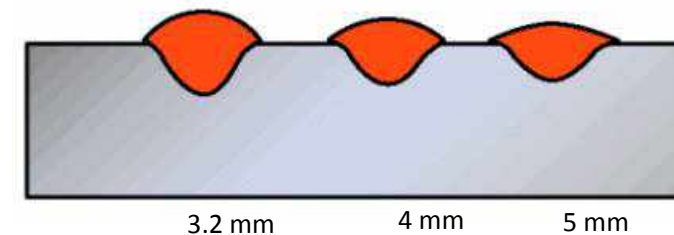
6.3.4 Pengaruh Ukuran elektroda

▪ Bentuk manik las dan kedalaman penetrasi pada arus yang diberikan

Kepadatan arus tinggi menghasilkan busur kaku yang menembus ke dalam logam induk. Sebaliknya, kerapatan arus yang lebih rendah dalam ukuran elektroda yang sama menghasilkan busur lunak yang kurang tembus.

▪ Tingkat deposisi

Pada setiap pengaturan arus listrik yang diberikan, elektroda berdiameter kecil akan memiliki densitas arus dan laju deposisi logam cair yang lebih tinggi daripada elektroda berdiameter lebih besar. Namun, elektroda berdiameter lebih besar dapat membawa lebih banyak arus daripada yang lebih kecil, sehingga pada akhirnya dapat menghasilkan tingkat deposisi yang lebih tinggi pada arus listrik yang lebih tinggi.

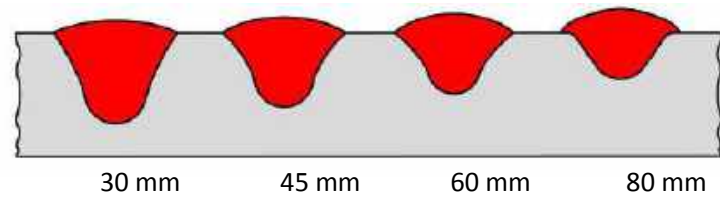


Gambar 6.9 Pengaruh peningkatan ukuran elektroda pada bentuk dan penetrasi las.

Efek ukuran elektroda pada profil las (arus las 600A, tegangan busur 30V dan 76 cm/ menit kecepatan pengelasan).

6.3.5 Ekstensi elektroda

Ekstensi elektroda adalah jarak yang dihasilkan oleh elektroda kontinu di luar ujung kontak. Pada resistansi kepadatan arus yang tinggi, pemanasan elektroda antara ujung kontak dan busur dapat meningkatkan laju peleburan elektroda (sebanyak 25-50%). Semakin panjang ekstensi, semakin besar jumlah pemanasan dan semakin tinggi tingkat lelehnya tetapi meningkatkan penetrasi dan lebar manik las (lihat di bawah).



Gambar 6.10 Pengaruh peningkatan ekstensi elektroda pada bentuk dan penetrasi las.

6.3.6 Jenis elektroda

Sebuah elektroda dengan konduktivitas listrik rendah, seperti stainless steel, dapat dengan ekstensi elektroda normal, mengalami pemanasan resistensi yang lebih besar. Jadi untuk ukuran dan elektroda yang sama, laju leleh elektroda stainless steel akan lebih tinggi daripada elektroda baja karbon.

6.3.7 Lebar dan kedalaman fluks

Lebar dan kedalaman lapisan fluks granular mempengaruhi penampilan dan kekuatan sama baiknya dari hasil akhir las. Jika lapisan granular terlalu dalam, busur terlalu terbatas dan pengelasan kasar dengan penampilan seperti tali mungkin terjadi dan mungkin menghasilkan daerah datar lokal pada permukaan yang sering disebut sebagai flat gas. Gas-gas yang dihasilkan selama pengelasan tidak dapat dengan mudah lepas dan permukaan logam lelehan terdistorsi secara tidak teratur. Jika lapisan granular terlalu dangkal, busur tidak akan sepenuhnya terendam dalam fluks, akan terjadi percikan dan percikan dan lasan akan memiliki tampilan yang buruk dan dapat menunjukkan porositas.

6.4 Penyimpanan dan Pemeliharaan bahan habis pakai

Pemeliharaan harus dilakukan pada fluks yang digunakan untuk proses SAW, meskipun mungkin dalam keadaan kering pada saat dikemas, dapat terkena kelembaban tinggi selama penyimpanan. Dalam kasus seperti itu mereka harus dikeringkan sesuai rekomendasi pabrik sebelum digunakan atau porositas atau retak dapat terjadi.

Gulungan kawat besi yang disediakan sebagai elektroda pengumpanan biasanya dilapisi tembaga yang memberikan ketahanan terhadap korosi,

memastikan kontak listrik yang baik dan membantu kelancaran pemakanan. Kerusakan berupa karat dan kerusakan mekanis harus dihindari pada produk-produk seperti itu karena akan mengganggu kelancaran elektroda. Karat akan merusak kualitas pengelasan umumnya karena bersifat higroskopis (dapat mengandung atau menyerap kelembaban) sehingga dapat menyebabkan keretakan yang disebabkan hidrogen.

Kontaminasi oleh bahan yang mengandung karbon seperti minyak, gemuk, cat dan pelumas, sangat berbahaya pada logam besi. Pengambilan karbon pada logam las dapat menyebabkan perubahan sifat yang ditandai dan biasanya tidak diinginkan. Kontaminan semacam itu juga dapat menyebabkan hidrogen terserap di kolam las. Tukang las harus selalu mengikuti rekomendasi pabrik untuk penyimpanan dan penanganan bahan habis pakai.

6.5 Sumber daya

Dalam pengelasan busur pada prinsipnya adalah arus yang menentukan jumlah panas yang dihasilkan dan ini mengontrol peleburan elektroda dan logam induk dan juga faktor-faktor seperti penetrasi dan bentuk serta ukuran manik-manik las. Tegangan dan panjang busur juga merupakan faktor penting, dengan meningkatnya tegangan yang menyebabkan bertambahnya panjang busur dan sebaliknya. Biasanya dalam pengelasan SAW, tegangan konstan atau karakteristik sumber arus digunakan.

Daya dapat disuplai dari generator pengelasan dengan karakteristik datar atau transformator/ penyearah diatur untuk memberikan tegangan keluaran sekitar 14-50V dan saat ini sesuai dengan output unit, bisa melebihi 1000 A.

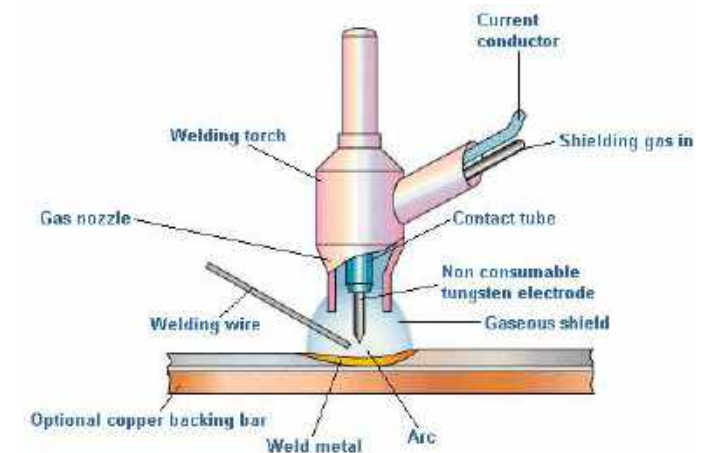
Bab 7

Proses Pengelasan TIG/GTAW

7.1. Karakteristik Proses Pengelasan TIG

Di negara Amerika Serikat proses pengelasan *Tungsten Inert Gas (TIG)* disebut juga dengan pengelasan busur tungsten gas (*Gas Tungsten Arc Welding*). Proses ini disebut pengelasan elektroda yang bukan dapat habis (*non consumable*) dan sangat sering disebut sebagai TIG (*tungsten inert gas*). Namun, karena campuran gas pelindung yang murni dapat digunakan untuk aplikasi tertentu, American Welding Society (AWS) mengadopsi pengelasan busur tungsten gas (GTAW) sebagai terminologi standar untuk proses tersebut (AWS vol 2, 2004).

Logam cair dihasilkan dengan memanaskan busur melengkung di antara elektroda tungsten yang tidak habis pakai dan benda kerja. Gas inert melindungi zona elektroda dan las untuk mencegah oksidasi elektroda tungsten dan kontaminasi atmosfer dari las dan kawat pengisi (seperti yang ditunjukkan gambar 7.1 di bawah).



Gambar 7.1 Metode pengelasan TIG (TWI, 2018)

Pada pengelasan metode TIG ini menggunakan Tungsten karena memiliki titik leleh hingga 3370°C , suhu ini umumnya jauh di atas temperature cair logam. Karena kualitas tinggi dari lasan dapat diproduksi oleh gas las busur

tungsten, proses pengelasan ini telah menjadi alat yang sangat diperlukan bagi banyak produsen, termasuk mereka di luar angkasa, nuklir, laut, petrokimia dan industri semikonduktor (AWS vol 2, 2004). Adapun peralatan utama yang digunakan pada pengelasan TIG/ GTAW seperti ditunjukkan pada gambar (7.2)



Gambar 7.2 peralatan utama pengelasan TIG (TWI, 2018)

Proses pengelasan ini sangat sesuai untuk logam yang sangat tipis, sehingga memungkinkan untuk mendapatkan lasan berkualitas tinggi. Kecepatan pengelasan umumnya sekitar 15-50 cm/ menit; dalam pengelasan otomatis, kecepatan yang lebih tinggi dimungkinkan. Untuk pengelasan baja, polaritas langsung (elektroda negatif) selalu digunakan dengan argon sebagai gas pelindung. Ketebalan sambungan yang disarankan ditunjukkan pada Tabel 7.1 (Regis Blouneau, 2001).

Tabel 7.1 jenis persiapan pengelasan TIG

Ketebalan logam	Persiapan pengelasan
0,5-2 mm	Tanpa persiapan dan tanpa celah dan tanpa filer
< 5 mm	Kampuh V Sudut 60° atau tanpa persiapan dengan jarak celah sama dengan setengah ketebalannya
>5 mm	Kampuh V Sudut 70° dengan jarak celah 2,5 mm

Kemungkinan menggunakan helium untuk melindungi busur pengelasan dan kolam las pertama kali diselidiki pada 1920-an. Namun, tidak ada insentif untuk pengembangan lebih lanjut atau penggunaan proses ini sampai awal Perang

Dunia II, ketika kebutuhan besar muncul di industri pesawat terbang sebagai pengganti proses *rivet* sebagai metode untuk bergabung dengan bahan reaktif, seperti aluminium dan magnesium. Pengelasan industri merespons dengan menghasilkan panas yang stabil dan efisien sumber dengan las yang sangat baik dapat dibuat menggunakan tungsten elektroda dan kekuatan busur arus searah dengan elektroda negatif. Helium dipilih untuk menyediakan diperlukan pelindung karena itu adalah satu-satunya gas inert yang tersedia pada saat itu (AWS vol 2, 2004).

Banyak perbaikan telah dilakukan untuk proses dan peralatan sejak awal penemuan. Sumber arus pengelasan dikembangkan secara khusus untuk proses ini, beberapa menyediakan pulsa langsung arus dan variabel-polaritas arus bolak-balik. Torch las berpendingin air dan berpendingin gas dikembangkan. Elektroda tungsten dicampur dengan kecil jumlah elemen aktif untuk meningkatkan emisivitas, dengan demikian meningkatkan mulai busur, stabilitas busur, dan umur elektroda. Campuran gas pelindung diidentifikasi untuk memperbaiki kinerja pengelasan. Peneliti terus mengejar perbaikan di bidang-bidang seperti kontrol otomatis, sensor penglihatan dan penetrasi, dan kontrol panjang busur (AWS vol 2, 2004).

Ujung tepi yang akan dilas harus bersih dan berjarak, penggunaan *backing* dari tembaga dapat digunakan untuk memfasilitasi penetrasi untuk ketebalan lebih dari 2 mm. Parameter pengelasan ditentukan oleh sifat dan komposisi logam dasar, ketebalan yang akan dilas dan metode sambungan yang digunakan. Parameter yang ditetapkan dalam (Tabel 7.2) dapat diadopsi sebagai nilai awal untuk penyesuaian pengelasan (Regis Blouneau, 2001).

Tabel 7.2 parameter pengelasan TIG (Regis Blouneau, 2001).

Ketebalan (mm)	Elektroda (mm)	Filer (mm)	Kecepatan las (cm/ menit)	Kuat Arus (A)
0,5	1,6	Tidak	15-25	15-30

1,0	1,6	0,8	30-50	45-60
1,5	1,6	1,2	50-60	70-100

Dalam pengelasan tanpa logam pengisi, sangat penting untuk memberikan pertimbangan yang cermat pada logam dasar. Gerakan konveksi, yang mempengaruhi logam cair, dipengaruhi oleh elemen residu dan menghilangkan unsur yang terkandung dalam baja khususnya belerang dan aluminium. Untuk memastikan redaman dan penetrasi yang benar pada logam cair, perlu untuk membatasi kandungan sulfur menjadi 0,015% dan aluminium antara 0,015 dan 0,035% (Regis Blouneau, 2001).

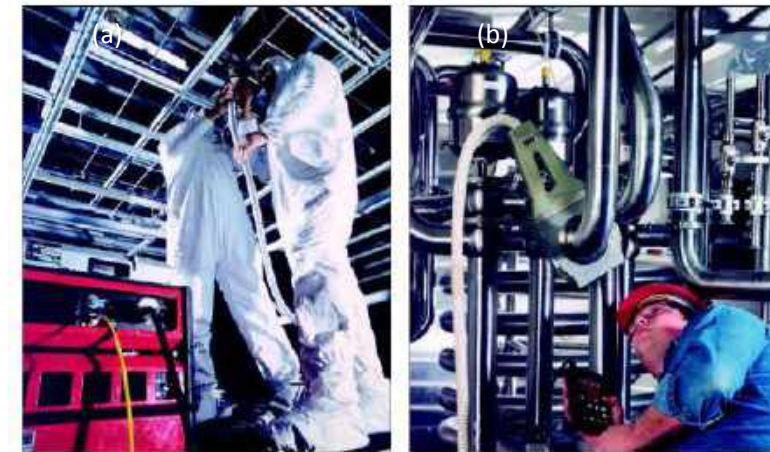
7.2. Penggunaan Metode Las TIG

Pengelasan TIG sering dipilih bila dibutuhkan spesifikasi pengelasan tinggi harus dipenuhi. Karena pengelasan busur tungsten gas memberikan kontrol input panas yang terbaik, ini adalah suatu proses pengelasan yang paling baik untuk menyambung logam dengan ukuran yang tipis, untuk pengelasan spot dalam aplikasi lembaran logam, dan untuk membuat lasan dekat dengan komponen yang peka terhadap panas. proses pengelasan mudah dikendalikan dan menawarkan opsi menambahkan logam pengisi sesuai kebutuhan untuk menghasilkan lasan berkualitas tinggi dengan bentuk atau deposit manik yang halus dan seragam pada permukaannya (AWS Vol 2, 2004)

Las busur gas tungsten dapat digunakan untuk mengelas hampir semua logam. Hal ini sangat berguna untuk menggabungkan aluminium dan magnesium, yang membentuk oksida tahan api, dan untuk logam reaktif seperti titanium dan zirkonium, yang bisa menjadi rapuh jika terkena udara saat meleleh (AWS Vol 2, 2004).

Las busur gas tungsten dapat digunakan untuk mengelas banyak geometri dan lapisan sambungan pada pelat, lembaran, pipa, tabung, dan bentuk struktural lainnya. Metode ini sangat sesuai untuk bagian-bagian dengan ketebalan ukuran

kurang dari 10 mm (3/8 in.). Pada pengelasan pipa sering dilakukan dengan menggunakan gas las busur tungsten untuk membuat *root pass* dan pass selanjutnya menggunakan las SMAW atau menggunakan las GMAW (AWS Vol 2, 2004).



Gambar 7.3 Pengelasan metode TIG pada pipa di pabrik Semikonduktor (a), dan sistem Perpipaan dengan Orbital Gas Tungsten Arc pengelasan di pabrik pengolahan susu (b) (AWS Vol 2, 2004)

Sudah jutaan kali las jenis TIG orbital telah digunakan di pabrik pembuatan semikonduktor di seluruh dunia untuk menyambung pipa berdiameter kecil, dan komponen lain yang digunakan dalam sistem distribusi gas, di mana kualitas las sangat penting. Gambar 7.3 (a) menunjukkan aplikasi GTAW pada pembuatan semikonduktor dipabrik. Dalam aplikasi serupa, ditunjukkan pada Gambar 7.3 (b), lasan fusi GTAW orbital digunakan untuk membuat sistem perpipaan di pabrik pengolahan susu (AWS Vol 2, 2004).

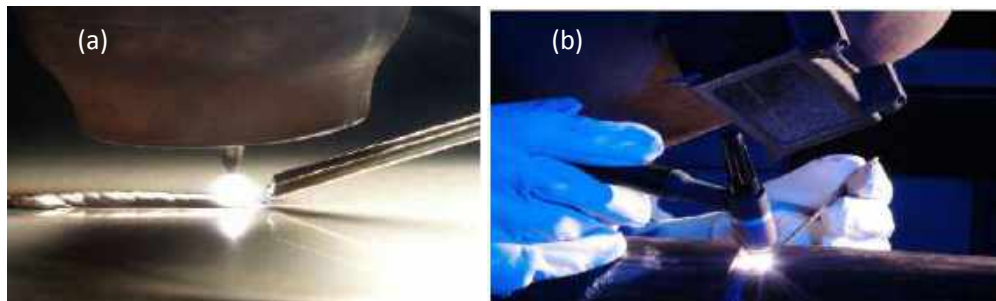
7.3. Variabel Proses

Variabel utama dalam GTAW adalah tegangan busur (panjang arc), arus pengelasan, kecepatan pengelasan, kecepatan umpan kawat dan gas pelindung. Variabel lain mungkin termasuk tipe gas pelindung, laju aliran gas, diameter nozzle, dan elektroda perpanjangan (AWS Vol 2, 2004); (TWI, 2018). Selain itu

jenis arus dan polaritas, bentuk ujung tungsten elektroda dan sudut sudutnya juga sangat menentukan kualitas hasil lasan (TWI, 2018).

Jumlah energi yang dihasilkan oleh busur sebanding dengan arus dan tegangan. Jumlah energi dipindahkan per unit panjang lasan berbanding terbalik dengan kecepatan pengelasan. Busur terlindung dengan helium umumnya lebih panas dan lebih menembus daripada busur argon. Namun, karena semua variabel tersebut sangat berinteraksi satu sama lain, tidak mungkin digunakan sebagai variabel yang benar-benar independen ketika membuat prosedur pengelasan untuk membuat sambungan khusus (AWS Vol 2, 2004).

Masing-masing dari variabel diatas akan dibahas lebih terperinci dalam sub-bagian berikut. Adapun proses pengelasan TIG manual pada pipa baja dan sangat cocok untuk pengelasan pada bagian akar las (root) seperti ditunjukkan pada gambar (7.4)



Gambar 7.4 pengelasan manual TIG (TWI, 2018)

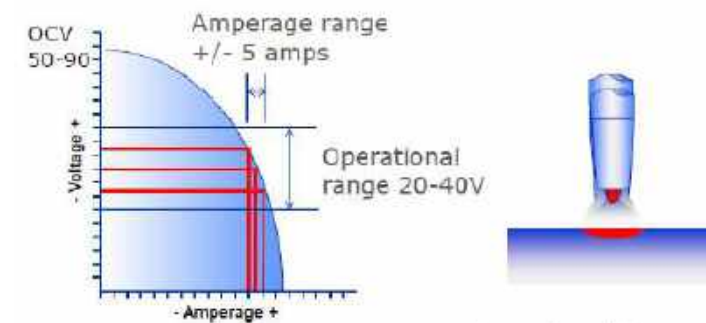
7.3.1 Arus Pengelasan

Kedalaman Penetrasi las berhubungan langsung dengan arus pengelasan yang digunakan. Jika arus pengelasan terlalu rendah, ujung elektroda tidak benar-benar panas dan busur yang tidak stabil dapat terjadi. Akan tetapi jika arus pengelasan terlalu tinggi, ujung elektroda mungkin terlalu panas dan ikut meleleh, berujung terjadinya cacat inklusi tungsten. Perbedaan jenis arus yang digunakan pada pengelasan TIG menghasilkan jenis busur listrik (gambar 7.5)



Gambar 7.5 Busur listrik a) Arus DC dan b) arus AC (TWI, 2018)

Seiring bertambahnya jarak panjang busur dengan benda kerja maka tegangan meningkat dan arus listrik berkurang



Gambar 7.6 hubungan panjang busur dengan arus listrik

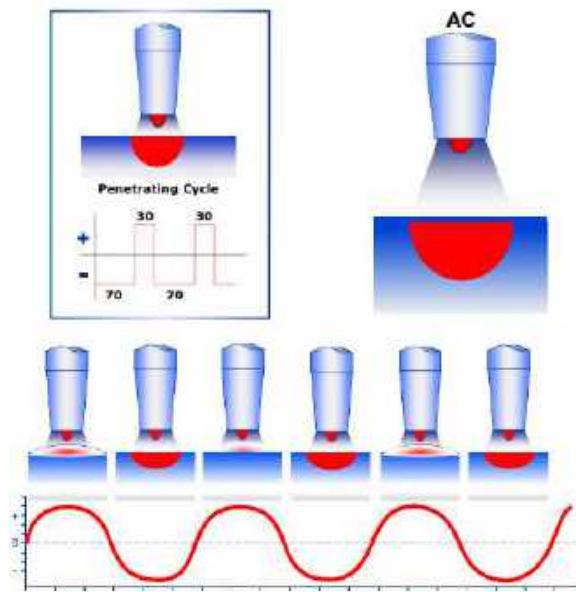
7.3.2. Jenis Arus dan Polaritas Yang Digunakan

A. Pengelasan TIG dengan polaritas AC

Busur listrik terbentuk antara elektroda tahan api tungsten dan bagian yang akan dilas. Selama fase negatif pada sambungan, ada gerusan lapisan alumina hadir pada permukaan aluminium dan penetrasi selama fase positif di elektroda. Untuk hal ini menjadi alasan kenapa ujung elektroda dibuat bulat. Diameter elektroda berhubungan langsung dengan arus pengelasan: ketebalan 35 hingga 50 A/ mm yang akan dilas. Umumnya, diameter batang tungsten yang sama dengan ketebalan material yang dilas sangat direkomendasikan. (Regis Blouneau, 2001).

Secara umum, proses pengelasan ini menggunakan proses manual yang sering digunakan untuk memproduksi part, dan menuntut keahlian yang hebat dari *welder*. Hal ini digunakan dalam semua kasus di mana kualitas tinggi diperlukan,

khususnya untuk membuat manik las kedap air. Kecepatan pengelasan dikendalikan oleh operator, yang dapat mengontrol energi dan kuantitas logam pengisi pada kolam las yang meleleh. Ketebalan produk yang akan dilas berkisar kira-kira persepuluh mm dan dalam praktiknya terbatas pada 5 atau 6 mm. Kesulitan dalam melelehkan logam, sedangkan distorsi terjadi pada logam yang dilas karena terlalu panas. Untuk pengelasan logam yang tebal, bisa menggunakan proses dengan arus DC tetapi biasanya pilihan lebih disukai Proses MIG (Regis Blouneau, 2001). Proses pengelasan ini (TIG) lebih sesuai digunakan untuk pengelasan Aluminium dan Magnesium karena menghasilkan daerah las yang lebih bersih (TWI, 2018).



Gambar 7.7 Penetrasi Maksimum Gelombang Persegi, b) gelombang bolak balik

B. Polaritas Arus DC pada proses TIG

Elektroda Negatif (DCEN)

Polaritas yang paling umum digunakan pada pengelasan TIG/ GTAW adalah menggunakan arus DCEP. Elektroda terhubung ke terminal negatif catu daya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.7, elektron dipancarkan dari elektroda tungsten dan dipercepat saat keluar melalui busur. Sejumlah besar energi,

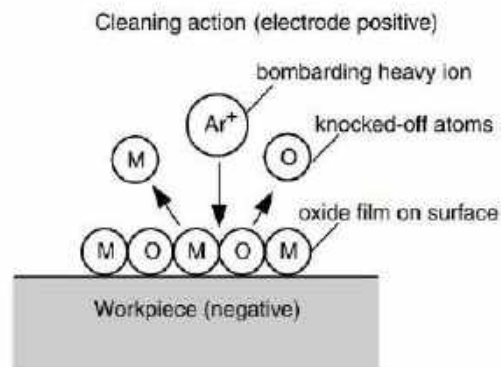
yang disebut fungsi kerja, diperlukan untuk elektron yang akan dipancarkan dari elektroda. Ketika elektron memasuki benda kerja, sejumlah energi yang setara dengan fungsi kerja dilepaskan. Inilah sebabnya mengapa dalam pengelasan GTAW dengan polaritas DCEN lebih banyak arus (sekitar dua pertiga) terletak di ujung busur dan kurang (sekitar sepertiga) di ujung elektroda. Akibatnya, las yang relatif sempit dan dalam dihasilkan dari polaritas jenis ini (Kou, 2003)

CURRENT TYPE	DCEN	DCEP	AC (BALANCED)
ELECTRODE POLARITY	NEGATIVE	POSITIVE	
ELECTRON AND ION FLOW			
PENETRATION CHARACTERISTICS			
OXIDE CLEANING ACTION	NO	YES	YES—ONCE EVERY HALF CYCLE
HEAT BALANCE IN THE ARC (APPROX.)	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END
PENETRATION	DEEP; NARROW	SHALLOW; WIDE	MEDIUM
ELECTRODE CAPACITY	EXCELLENT e.g., 3.2 mm (1/8 in.) 400 A	POOR e.g., 6.4 mm (1/4 in.) 120 A	GOOD e.g., 3.2 mm (1/8 in.) 225 A

Gambar 7.8 tiga perbedaan polaritas pada pengelasan TIG (AWS Vol 2)

Electrode Positive (DCEP)

Jenis pengelasan ini juga disebut polaritas terbalik, Elektroda terhubung ke terminal positif pada sumber daya. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.9, efek pemanasan elektron sekarang berada di elektroda tungsten daripada di benda kerja. Akibatnya, lasan dangkal yang dihasilkan. Selain itu, elektroda berdiameter besar dan berpendingin air harus digunakan untuk mencegah ujung elektroda mencair. Ion positif dari gas pelindung melindungi benda kerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.9, menjatuhkan film oksida dan menghasilkan permukaan las yang bersih. Oleh karena itu, DCEP dapat digunakan untuk mengelas lembaran tipis dari bahan pembentuk oksida yang kuat seperti aluminium dan magnesium paduannya, dimana tidak diperlukan penetrasi yang dalam (kou, 2003).



Gambar 7.9 pembersihan permukaan pada GTAW dengan elektroda DC positif (Kou, 2003)

Proses pengelasan TIG menggunakan arus DC yang halus atau berdenyut. Proses ini menggunakan helium sebagai gas pelindung, tetapi aktivasi busur dilakukan menggunakan argon, yang lebih mudah terionisasi. Misalnya transfer elektronik, dibuat dari katoda (elektroda) ke arah logam induk. Dalam hal ini, tidak ada fase gerusan yang terjadi pada lapisan oksida (atau erosi elektroda). Sebaliknya, arusnya mudah dikontrol, sehingga memungkinkan untuk mengelas produk dengan ketebalan mulai 0,01 mm hingga 10 mm. Elektroda dari bahan refraktori terbuat dari partikel oksida yang mengandung tungsten (umumnya 2% ThO₂, tetapi juga 2% CeO₂ atau 5% (ZrO₂) untuk mempertahankan sudut pengerindaan (Regis Blouneau, 2001).

Batang Tungsten ini diasah pada sudut antara 15° dan 120° sesuai dengan ketebalan bagian untuk menyalurkan emisi elektron. Karena tinggi busur rendah (sekitar sepersepuluh milimeter), proses ini hampir secara eksklusif digunakan untuk pengelasan otomatis. Namun, penggunaannya untuk perbaikan bagian yang tebal (coran, cetakan untuk industri plastik, dan lain-lain.) harus diperhatikan (Regis Blouneau, 2001).

Proses alternatif menggunakan arus berdenyut (frekuensi beberapa Hz) yang menawarkan keuntungan kontrol yang lebih baik dari perpindahan panas sehingga kontrol yang lebih baik dari kedalaman penetrasi dan lebar *bead*. Mode

berdenyut ini menghasilkan fase panas dan dingin, yang menghasilkan solidifikasi berlapis yang memurnikan struktur dan mengurangi segregasi.

- Hasil pengelasan terbaik pada pengelasan TIG biasanya diperoleh dengan menggunakan arus DC-ve.
- Oksida tahan api seperti aluminium atau magnesium dapat menghambat fusi tetapi dapat dihilangkan dengan menggunakan elektroda AC atau DC positif.
- Dengan arus DC, elektroda yang terhubung secara positif, panas terkonsentrasi di ujung elektroda sehingga elektroda harus berdiameter lebih besar daripada saat menggunakan arus DC-ve sehingga panas berlebihan dari tungsten harus dihindari. Torch berpendingin air disarankan digunakan untuk metode TIG dengan arus DC positif.
- Daya dukung elektroda arus DC positif saat ini sekitar sepersepuluh dibanding dengan yang negatif sehingga terbatas pada pengelasan logam tertentu.

Tabel 7.3 jenis arus dan polaritas (TWI, 2018)

Jenis arus/ polaritas	DC-	AC	DC+
Keseimbangan panas	70% kerja 30% elektroda	50% kerja 50% elektroda	30% kerja 70% elektroda
Profil las	Dalam, sempit	Sedang	Dangkal, lebar
Pembersihan	Tidak dilakukan	Baik setiap setengah siklus	Baik dilakukan
Kapasitas elektroda	Baik (3.2 mm/400 A)	Baik (3.2 mm/ 400 A)	Jelek (6.4 mm/ 120 A)

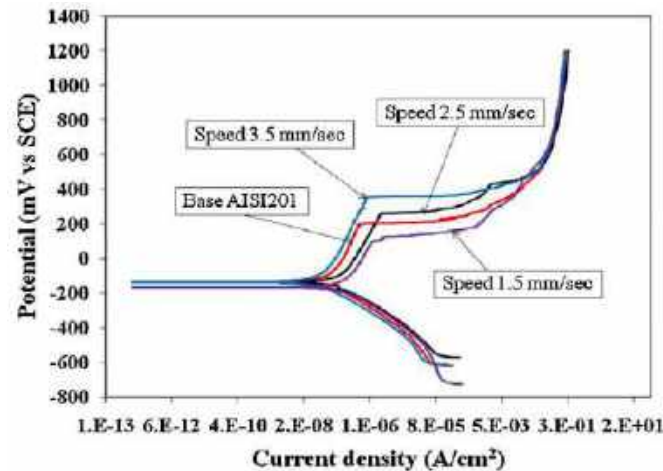
7.3.3 Kecepatan Pengelasan

Kecepatan pengelasan memengaruhi lebar dan penetrasi dari las busur tungsten gas. Namun, efek dari kecepatan pengelasan pada lebar las lebih jelas daripada efek penetrasinya. Dalam beberapa aplikasi, kecepatan pengelasan didefinisikan sebagai tujuan, dengan variabel-variabel lain dipilih untuk mencapai konfigurasi lasan yang diinginkan pada kecepatan itu. Dalam kasus lain, kecepatan pengelasan mungkin merupakan variabel tetap, dipilih untuk mendapatkan kualitas dan

keseragaman las diperlukan dalam kondisi terbaik dengan kombinasi variabel lainnya. Terlepas dari tujuannya, kecepatan pengelasan umumnya diperbaiki di sifat mekanik pengelasan sementara variabel lainnya, seperti arus atau tegangan, bervariasi untuk mempertahankan kontrol lasan (AWS vol 2, 2004).

Kecepatan pengelasan yang digunakan pada proses TIG akan mempengaruhi:

- Mempengaruhi lebar dan kedalaman penetrasi las tetapi efeknya lebih terasa terhadap lebar las (Chuaiphan dan Srijaroenpramong, 2014). Dengan meningkatkan kecepatan pengelasan akan mengurangi penetrasi dan lebar logam las (TWI, 2018).
- Mengurangi kecepatan pengelasan akan meningkatkan penetrasi dan lebar lasan (TWI, 2018).
- Kecepatan pengelasan menyebabkan menurunkan masukan panas sehingga meningkatnya kekuatan tarik dan kekerasan pada logam las (Chuaiphan dan Srijaroenpramong, 2014).
- Meningkatnya kecepatan pengelasan pada baja tahan karat austenitic AISI 201 menyebabkan peningkatan potensi terjadi korosi sumuran (*pitting corrosion*) pada logam las (Chuaiphan dan Srijaroenpramong, 2014). (gambar 7.10)



Gambar 7.10. Kurva polarisasi potensio dinamik dari AISI 201 dan logam las kecepatan pengelasan yang berbeda (Wichan, 2014)

7.3.4 Jenis-jenis Elektroda Tungsten

Elektroda tungsten dengan serium 2% atau thorium memiliki elektron yang lebih baik emisivitas, kapasitas pembawa arus, dan ketahanan terhadap kontaminasi dari elektroda tungsten murni (3). Hasilnya, busur awal lebih mudah dan busur lebih stabil. Emisivitas elektron mengacu pada kemampuan ujung elektroda untuk memancarkan elektron. Emisivitas elektron yang lebih rendah menyiratkan suhu diujung elektroda lebih tinggi yang diperlukan untuk memancarkan elektron dan karenanya risiko yang lebih besar dari pelelehan dari ujung elektroda (kou, 2003).

Elektroda mempunyai diameter (0,5-10 mm) dapat berupa tungsten murni atau tungsten dengan penambahan zirkonium oksida (0,3-0,5%) atau thorium (1-2%). Penambahan ini memungkinkan untuk meningkatkan kapasitas emisi elektroda dan dengan demikian untuk meningkatkan stabilitas busur dan membantu inisiasi busur. Selain itu juga meningkatkan kinerja dan elektroda dengan demikian arus maksimum yang dapat diterima (Regis Bloundow, 2003).

Penggunaan jenis elektroda tungsten yang digunakan sesuai dengan penggunaannya yang berbeda-beda:

- Penggunaan jenis Elektroda tungsten murni digunakan saat mengelas logam ringan dengan arus AC karena akan mempertahankan kebersihan ujung elektroda berbentuk bulat, tetapi memiliki inisiasi busur las yang buruk dan stabilitas arus AC dibandingkan dengan jenis lainnya.
- Jenis Elektroda *thoriated* yang dicampur dengan thorium oksida (thoria) untuk meningkatkan inisiasi busur dan meningkatkan arus yang lebih tinggi daripada elektroda tungsten murni dan mempertahankan ujung yang tajam lebih lama. Sayangnya, thoria sedikit radioaktif (memancarkan radiasi sinar α) dan debu yang dihasilkan selama pengasahan ujung elektroda tidak boleh terhirup.
- Elektroda berenergi dan bermuatan logam disatukan dengan serium dan lantanum oksida, untuk alasan yang sama seperti elektroda thoriated dan beroperasi dengan baik dengan jenis arus DC atau AC dan karena serium dan

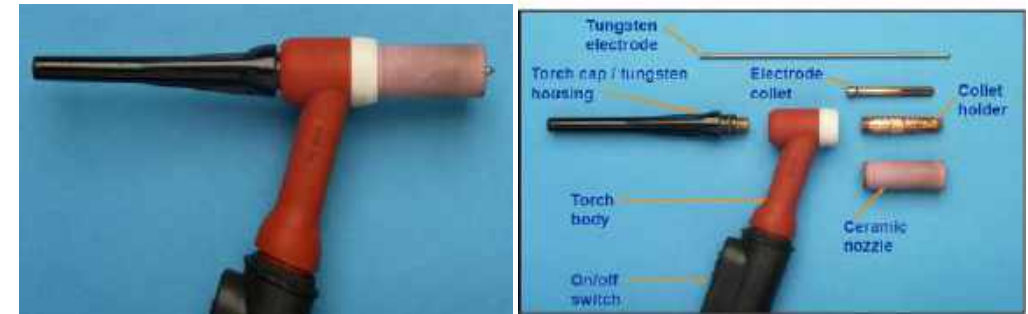
lantanium tidak memiliki kandungan radioaktif, jenis elektroda ini telah banyak digunakan sebagai pengganti elektroda thoriated.

- Elektroda zirkonia dipadukan dengan zirkonium oksida dengan karakteristik operasi antara jenis thoriated dan tungsten murni. Mereka mampu mempertahankan ujung elektroda berbentuk bola selama pengelasan, sehingga disarankan digunakan untuk pengelasan arus AC. Jenis elektroda ini memiliki ketahanan yang tinggi terhadap kontaminasi sehingga digunakan untuk pengelasan kekuatan tinggi di mana inklusi tungsten harus dihindari.

Elektroda tungsten murni digunakan saat mengelas logam ringan dengan arus AC: untuk aplikasi pengelasan yang lain, elektroda sering digabungkan campuran 2% thoriumoksida, yang meningkatkan stabilitas busur dan membuatnya lebih mudah untuk diumpankan. Thorium adalah radioaktif, tetapi tidak begitu berbahaya sehingga diperlukan tindakan pencegahan khusus berhati-hatilah saat menggerinda untuk menghindari menghirup debu gerinda. Aditif oksida non-radioaktif alternatif yang dapat digunakan adalah aditif zirkonium, serium atau lantanum, seperti ditunjukkan pada Tabel 7.4.

Tabel 7.4 contoh elektroda las TIG (ISO 6848)

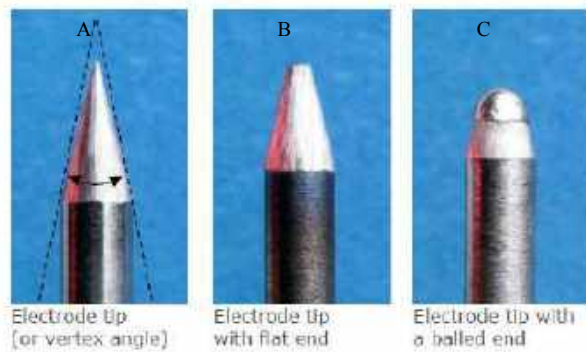
Additive	% proportional	Kode warna	Tipe	Arus
	0	hijau	WP	AC
Thorium	2	Merah	WT20	DC
Zirconium	0,8	Coklat	WZ8	AC
Lanthalum	1	Hitam	WL10	AC, DC
Cerium	2	kelabu	WC20	AC, DC



Gambar 7.11 a) torch terpasang b) bagian utama Torch las TIG (TWI, 2018)

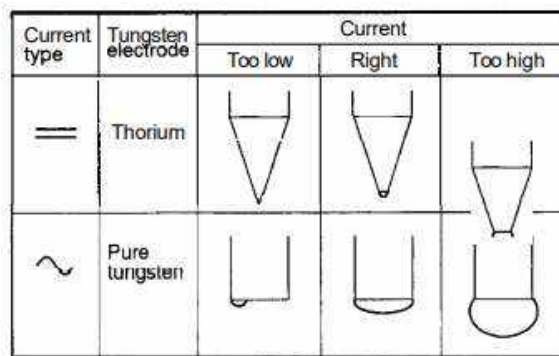
7.3.5 Bentuk Ujung Elektroda Tungsten

- Jenis elektroda tungsten dengan arus DC-ve, thoriated, ceriated, atau lanthanated digunakan dengan ground ujung ke sudut tertentu (ujung elektroda atau sudut puncak, ditunjukkan di bawah).
- Aturan umum untuk panjang dari ujung elektroda harus memiliki panjang yang sama dengan sekitar 2-2,5 kali diameter elektroda.
- Saat menggunakan arus AC, ujung elektroda yang rata (Gambar 7.12 b) untuk meminimalkan risiko putus saat ketika busur dimulai pengelasan atau selama pengelasan (ditunjukkan pada halaman berikutnya).
- Jika sudut puncak dari elektroda yang digunakan (Gambar 7.12 a) ditingkatkan, maka kedalaman penetrasi akan meningkat dan jika sudut puncak dikurangi, maka lebar manik las akan bertambah.
- Elektroda tungsten murni atau zirkoniasi digunakan untuk pengelasan untuk arus AC dengan ujung berbentuk hemispherical (*balled*) (seperti yang ditunjukkan gambar 7.12 c di bawah). Untuk menghasilkan ujung bulat, arus pada busur ditingkatkan hingga melelehkan ujung elektroda.



Gambar 7.12 bentuk ujung elektroda tungsten a) ujung bersudut b) berujung rata dan c) berujung bulat

Diameter elektroda adalah variabel penting. Stabilitas busur terbaik diperoleh dengan beban arus tinggi, yang berarti bahwa diameter harus dipilih sehingga ujung elektroda tidak terlalu panas atau terlalu dingin: lihat Gambar 7.13.



Gambar 7.13 ujung elektroda TIG, menunjukkan efek arus pengelasan yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dalam kaitannya dengan diameter elektroda.

7.3.6 Gas Pelindung

Gas inert yang dapat digunakan sebagai gas pelindung untuk proses pengelasan TIG yaitu **Argon, Helium dan Campuran Argon dan Helium**. Argon dan helium dapat digunakan pada pengelasan TIG. Tabel 7.5 mencantumkan sifat-sifat beberapa gas pelindung. Seperti yang ditunjukkan, potensi ionisasi untuk argon dan helium masing-masing adalah 15,7 dan 24,5 eV (volt elektron). Karena lebih mudah untuk mengionisasi argon daripada helium, inisiasi busur lebih mudah dan penurunan tegangan melintasi busur lebih rendah dengan argon. Selain itu, karena argon lebih berat dari helium, argon menawarkan perisai yang lebih efektif

dan resistensi yang lebih besar terhadap silang (Cross) dibandingkan helium. Dengan polaritas DCEP atau AC, argon juga memiliki aksi pembersihan oksida yang lebih besar daripada helium. Keunggulan ini ditambah dengan biaya argon yang lebih rendah membuatnya lebih menarik untuk digunakan pada pengelasan GTAW dari helium (kou, 2003).

Tabel 7.5 sifat gas pelindung yang digunakan pada pengelasan TIG (kou, 2003).

Gas	Chemical Symbol	Molecular Weight (g/mol)	Specific Gravity with Respect to Air at 1 atm and 0°C	Density (g/L)	Ionization Potential (eV)
Argon	Ar	39.95	1.38	1.784	15.7
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	1.53	1.978	14.4
Helium	He	4.00	0.1368	0.178	24.5
Hydrogen	H ₂	2.016	0.0695	0.090	13.5
Nitrogen	N ₂	28.01	0.967	1.25	14.5
Oxygen	O ₂	32.00	1.105	1.43	13.2

Karena penurunan tegangan yang lebih besar di busur dengan gas helium daripada busur argon, maka input daya yang lebih tinggi dan sensitivitas yang lebih besar terhadap variasi panjang busur dapat diperoleh dengan gas helium. Memungkinkan pengelasan logam yang lebih tebal dan penggunaan kecepatan pengelasan yang lebih tinggi. Yang terakhir, di sisi lain, memungkinkan kontrol yang lebih baik dari panjang busur selama pengelasan GTAW yang otomatis (kou, 2003).

Sebagai catatan untuk baja tahan karat austenitik dan beberapa paduan cupro-nikel, argon yang ditambah hidrogen hingga 5% akan meningkatkan kedalaman penetrasi dan mengurangi porositas.

Tabel 7.6 Karakteristik gas pelindung argon dan helium pada pengelasan TIG (TWI, 2018)

Argon	Kemampuan	Helium
Lebih rendah daripada helium yang bisa sangat membantu ketika pengelasan bagian-bagian yang tipis. Kurang merubah tegangan busur dengan variasi panjang busur	Tegangan busur	Lebih tinggi daripada dengan argon. Busur listrik lebih panas dimana sangat membantu dalam pengelasan bagian tebal dan paduan logam, (misalnya nikel).
Lebih rendah dari pada dengan helium yang memberi pengurangan penetrasi.	Daya pemanas dari busur listrik	Tinggi, hal ini menguntungkan bila untuk pengelasan logam dengan panas tinggi pada bahan dengan konduktivitas thermal yang besar dan untuk benda yang tebal.
Argon lebih berat dari udara membutuhkan lebih sedikit gas untuk melindungi pada posisi pengelasan datar dan horizontal.	Pelindungan logam las	Helium lebih ringan dari udara dan membutuhkan lebih banyak gas untuk benar-benar melindungi logam lasan. Pengecualian: untuk Pengelasan overhead.
Jenis gas ini diperoleh dari atmosfer dengan pemisahan udara cair (biaya lebih rendah dan lebih besar ketersediannya).	Ketersediaan dan biaya yang dikeluarkan	Jenis gas ini diperoleh dengan pemisahan dari gas alam - ketersediaan lebih rendah dan biaya yang lebih tinggi.

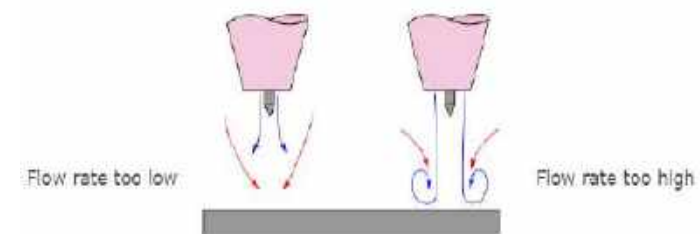
Dalam pengelasan baja tahan karat, saat proses pengelasan menggunakan gas pelindung Argon yang juga bisa ditambahkan Nitrogen dengan tujuan ketahanan korosi pada sambungan las baja tahan karata beda material (304 dan 201). Meningkatkan nitrogen dalam gas pelindung argon meningkatkan kandungan nitrogen

dalam lasan dimana optimumnya pada 1% Nitrogen. Peningkatan nitrogen dalam lasan mengurangi deltaferrite dalam matriks austenit karena perannya sebagai austenite stabilizer (meningkatkan ketahanan korosi) dan mengurangi potensi retak saat pembekuan Chuaiphan dan Srijaroenpramong, 2019).

7.3.7 Laju Aliran Gas Pelindung

Kecepatan laju aliran gas pelindung akan mempengaruhi pola aliran yang mengalir pada permukaan kolam las (gambar 7.14), aliran yang terlalu lambat dan terlalu cepat berpengaruh pada pembentukan cacat yaitu:

- Jika aliran terlalu rendah dan gas pelindung tidak dapat menghilangkan udara dari area lasan mengakibatkan porositas dan kontaminasi.
- Jika aliran terlalu tinggi dan polanya turbulen terjadi di dasar kolom gas pelindung, maka udara akan cenderung tersedot dari atmosfer di sekitarnya dan ini mungkin juga menyebabkan porositas dan kontaminasi.
- Kecepatan aliran gas pelindung biasanya dalam kisaran 10-12 liter/ mnt.

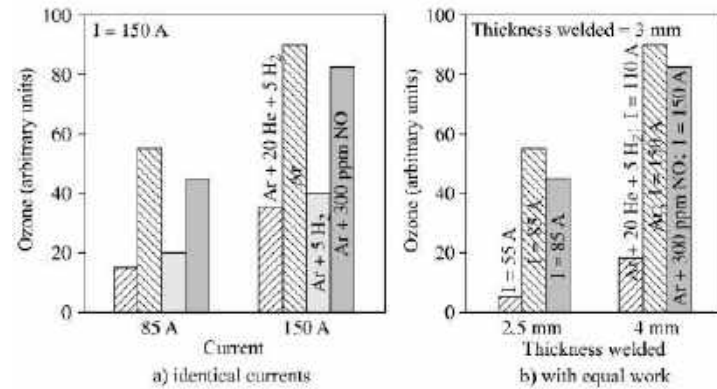


Gambar 7.14. Laju aliran gas pelindung (TWI, 2018)

7.3.8 Pengaruh Campuran Gas Pelindung

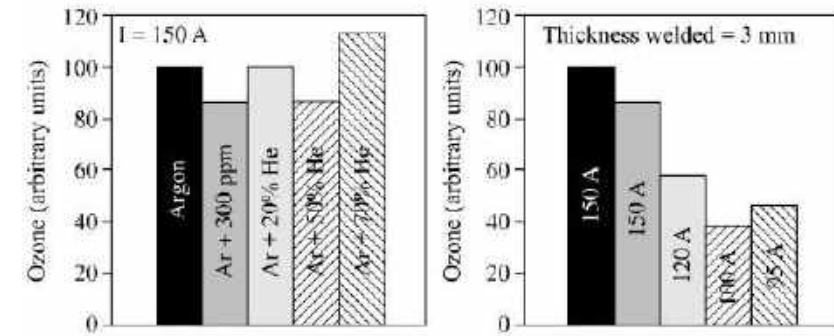
Dalam pengelasan TIG, asap dan *spatters* tidak ditemukan akan tetapi ada masalah terhadap pembentukan ozon selama pengelasan baja tahan karat dan masih banyak lagi dalam cahaya pengelasan logam paduan. Ozon yang dihasilkan dari aksi radiasi ultraviolet, yang “memecah” molekul oksigen di sekitarnya. Atom oksigen tunggal yang terbentuk (O) akan dapat bereaksi dengan molekul oksigen lain (O₂) dan membentuk molekul ozon (O₃) yang toksisitasnya dikenali. Faktanya,

dalam radiasi UV, emisi dalam bidang spektrum 130 hingga 180 nm sangat mungkin membentuk atom tunggal ini (Regis Bloudeau, 2001).



Gambar 7.15. Pengaruh tipe gas pelindung pada jumlah ozon yang terbentuk pada pengelasan TIG stainless steel austenitic (Regis Bloudeau, 2001).

Gambar 7.15 dan (7.16) menggambarkan keuntungan yang bisa diperoleh dari berbagai tindakan yang dilakukan. Menunjukkan bahwa sedapat mungkin untuk menggunakan campuran ternary (argon-helium-hidrogen) yang menggabungkan berbagai efek. Namun, campuran tersebut harus dirancang pada satu sisinya memperhitungkan aspek operasional (tingginya kandungan helium dan/ atau hidrogen dapat menimbulkan masalah karena pengelasan tidak pada posisinya) dan di sisi lain, dari aspek metalurgi yang membuat kita menolak, misalnya, penggunaan hidrogen untuk pengelasan paduan ringan untuk menjaga kekompakan las. Bahwa peralatan pengelasan jenis tertentu tidak memungkinkan stabilitas busur yang baik dengan kandungan helium yang sangat tinggi. Hal ini menjelaskan peningkatan kandungan ozon dengan campuran argon + 70% helium pada Gambar 7.16. (Regis Bloudeau, 2001)



Gambar 7.16. Pengaruh jenis gas pelindung pada jumlah ozon yang terbentuk pada paduan ringan (paduan 5086) dengan pengelasan TIG polaritas AC (Regis Bloudeau, 2001)

Spektrum radiasi yang dipancarkan oleh busur tergantung pada energi yang digunakan dan unsur-unsur kimia yang ada. Inilah sebabnya mengapa jumlah ozon yang terbentuk meningkat dengan kekuatan busur ($U \times I$) dan, dengan kekuatan dan gas pelindung yang sama, lebih banyak ozon terbentuk ketika kita mengelas paduan ringan daripada baja tahan karat.

Jika tujuannya adalah untuk mengurangi jumlah ozon yang akan berdifusi di sekitar tukang las, ada beberapa solusi yang bisa dilakukan:

- Meminimalkan radiasi dalam bidang spektral 130 hingga 180 nm. Ini dapat dicapai dengan mengganti argon dengan helium sejauh mungkin dalam gas pelindung;
- Meminimalkan energi yang digunakan untuk menghasilkan sambungan. Ini bisa dicapai dengan memodifikasi proses pengelasan dan: dengan pengelasan TIG fluks ganda atau plasma mengarah ke penetrasi yang lebih dalam daripada proses TIG dengan energi yang identik dan dengan demikian memungkinkan untuk mengurangi energi pengelasan yang dibutuhkan untuk menghasilkan sambungan yang baik. Hal ini juga dapat dicapai dengan menggunakan gas pelindung yang mengandung helium dan/ atau hidrogen yang mana dengan memodifikasi morfologi busur dan dengan meningkatkan tegangan dengan panjang busur, secara signifikan meningkatkan kinerja proses TIG;

- Memasukkan molekul gas ke dalam gas pelindung yang sangat reaktif terhadap ozon dan akan menyebabkan kehancurannya (hidrogen atau nitro oksida NO) (Regis Blouneau, 2001)

7.4 Pembersihan Kembali

Pembersihan kembali merupakan hal yang diperlukan untuk melindungi bagian belakang lasan dari oksidasi berlebihan selama pengelasan jenis TIG, hal ini bisa dicapai dengan menggunakan gas pembersih, biasanya digunakan argon murni. Untuk pengelasan pipa relatif lebih mudah membersihkan lubang pipa yang dirol, akan tetapi untuk pengelasan plat/ sheet perlu menggunakan saluran pembersihan atau kadang-kadang operator harus berpindah ke posisi lain dan menggerakkan nosel pembersih saat pengelasan berlangsung.

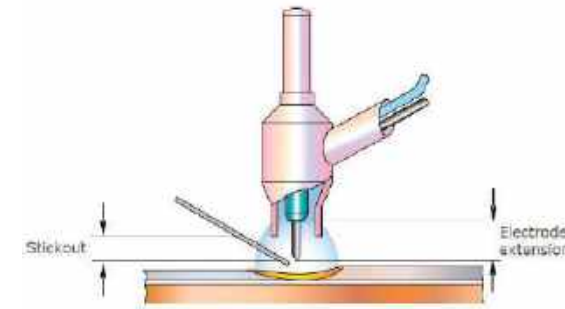
Untuk membersihkan peralatan berukuran yang besar, diperlukan bendungan atau bendungan yang dapat larut dan merupakan pekerjaan yang sangat rumit. Tahap awal pembersihan kembali adalah untuk mengecualikan semua udara di bagian belakang lasan dan setelah memberikan waktu yang cukup untuk ini laju aliran harus dikurangi sebelum mulai untuk dilas sehingga ada aliran positif (biasanya 4 liter/ menit).

Pembersihan kembali harus dilanjutkan sampai dua atau lebih lapisan lasan telah diendapkan. Untuk baja C dan C-Mn dimungkinkan untuk membuat lasan yang memuaskan tanpa pembersihan kembali.

7.5 Penambahan Panjang elektroda

- Jarak dari tabung kontak ke ujung tungsten.
- Karena tabung kontak tersembunyi di dalam nozzle gas, parameter ini dapat diperiksa secara tidak langsung dengan mengukur panjang *stickout*, seperti yang ditunjukkan gambar (7.17) di bawah ini.
- Jika ukuran elektroda terlalu pendek, ujung elektroda tidak akan cukup panas yang mengarah ke busur yang tidak stabil.
- Jika penambahan ukuran elektroda terlalu panjang, ujung elektroda mungkin terlalu panas, menyebabkan peleburan dan menyebabkan inklusi tungsten.

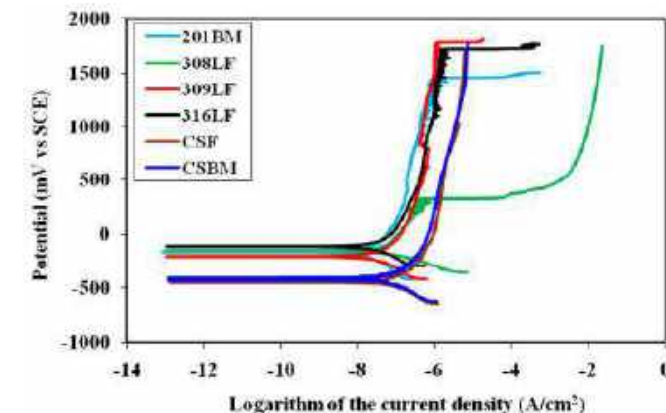
- Sebagai aturan umum, panjang *stickout* harus 2-3 kali dari diameter elektroda .



Gambar 7.17 ekstensi elektroda las (TWI, 2018)

7.6 Kawat pengisi (Filler wires)

Kabel pengisi yang digunakan biasanya memiliki komposisi yang mirip dengan logam induk tetapi mengandung tambahan kecil elemen yang akan bergabung dengan oksigen dan nitrogen. Jenis filler yang digunakan pada pengelasan dissimilar (beda material) sangat mempengaruhi ketahanan korosi pada daerah lasan. Untuk pengelasan beda material antara baja tahan karat ausetinitik (AISI 201) dan baja karbon rendah filler adalah tipe 309L dan tipe 316L adalah yang paling terhadap serangan korosi (Chuaiphan dan Srijaroenpramong, 2012)



Gambar. 7.18 Kurva polarisasi dari logam dasar dan logam las yang diproduksi oleh pengisi yang berbeda dalam larutan 0,35-wt% NaCl.

7.7 Inklusi Tungsten

Pecahan-pecahan yang kecil dari tungsten yang memasuki logam lasan akan selalu muncul ketika diuji radiografi karena kerapatan logam ini yang relatif tinggi dan untuk sebagian besar aplikasi tidak dapat diterima. Kejutan termal (thermal shock) pada tungsten menyebabkan terjadinya pecahan kecil dari tungsten memasuki kolam las merupakan penyebab umum inklusi tungsten dan hal itulah sebabnya sumber arus saat ini memiliki perangkat slope-up untuk meminimalkan risiko ini. Perangkat ini juga memungkinkan arus naik ke nilai yang telah ditetapkan dalam waktu singkat sehingga tungsten menjadi panas lebih lambat dan dengan lembut.

7.8 Retak kawah (*Crater Cracking*) pada pengelasan TIG

Retak kawah merupakan salah satu bentuk jenis retak pembekuan yang sensitif terhadap beberapa logam pengisi. Sumber arus yang digunakan saat ini memiliki perangkat slope-out sehingga pada akhir pengelasan ketika tukang las mematikan saklar, arus akan berkurang secara bertahap dan kolam las akan semakin kecil dan dangkal. Kolam las akan memiliki bentuk yang lebih menguntungkan ketika akhirnya mengeras dan retak kawah dapat dihindari (TWI, 2018).

7.9 Aplikasi Umum

Aplikasi dari jenis pengelasan TIG digunakan termasuk untuk pengelasan autogenous dari lapisan longitudinal dalam pipa dan tabung berdinding tipis pada stainless steel dan paduan lainnya pada pabrik pembentuk kontinu. Menggunakan kabel pengisi, TIG digunakan untuk membuat sambungan berkualitas tinggi dalam pipa dan tabung pengukur yang lebih berat untuk industri kimia, minyak bumi dan pembangkit listrik. Hal ini juga digunakan dalam industri dirgantara untuk barang-barang seperti badan pesawat dan penutup motor roket (TWI, 2018).

7.10 Keuntungan dan Kelemahan Pengelasan TIG

A. Keuntungan Pengelasan TIG

Ada banyak keuntungan menggunakan metode pengelasan TIG dalam penyambungan logam yaitu:

- Menghasilkan lasan berkualitas tinggi dengan tingkat difusi hidrogen yang sangat rendah sehingga tidak ada bahaya retak dingin.
- Tidak ada percikan (*spatter*) las atau inklusi terak yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan tingkat kebersihan yang tinggi, misalnya pada pipa untuk industri makanan dan minuman, pembuatan semikonduktor dan lain-lain.
- Dapat digunakan dengan logam pengisi dan pengelasan pada bagian tipis tanpa logam pengisi dan dapat menghasilkan lasan dengan kecepatan yang relatif tinggi (TWI, 2018) serta karena input panasnya yang terbatas (Kou, 2003).
- Memungkinkan variabel pengelasan dikontrol secara akurat dan khususnya baik untuk mengendalikan penetrasi akar las di semua pengelasan (TWI, 2018).
- Dapat mengelas hampir semua logam yang dapat dilas termasuk sambungan yang berbeda material tetapi pengelasan pada posisi umumnya tidak digunakan untuk mereka yang memiliki titik leleh rendah seperti Lead dan Tin. Terutama berguna dalam pengelasan logam reaktif dengan oksida stabil seperti aluminium, magnesium, titanium, dan zirconium (TWI, 2018).
- Laju pengisian logam pengisi tidak tergantung pada arus pengelasan, sehingga memungkinkan variasi dalam jumlah relatif fusi logam dasar dan fusi logam pengisi. Oleh karena itu, kontrol pengenceran dan input energi ke lasan dapat dicapai tanpa mengubah ukuran lasan. Hal ini juga dapat digunakan untuk mengelas sambungan tumpul pada pelat tipis, yaitu tanpa penambahan logam pengisi atau pengelasan autogenous (Kou, 2003).
- Karena proses GTAW adalah proses pengelasan yang sangat bersih, dapat digunakan untuk mengelas logam reaktif, seperti titanium dan zirconium, aluminium, dan magnesium (Kou, 2003).

B. Kekurangan Pengelasan TIG

Ada beberapa kekurangan dari proses pengelasan menggunakan metode TIG yaitu

- Memberikan deposit las rendah dibandingkan dengan proses pengelasan busur lainnya dan diperlukan ketangkasan tukang las yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengelasan MIG / MAG atau MMA (TWI, 2018).
- Lebih ekonomis daripada metode MMA atau MIG/ MAG untuk bagian yang lebih tebal hingga 10 mm, akan tetapi sulit untuk sepenuhnya melindungi zona lasan dalam kondisi cuaca berangin sehingga mungkin tidak cocok untuk pengelasan dilokasi/ lapangan (TWI, 2018).
- Inklusi tungsten dapat terjadi jika elektroda menyentuh kolam las dikarenakan arus pengelasan yang berlebihan dapat menyebabkan peleburan elektroda tungsten dan menghasilkan inklusi tungsten yang rapuh dalam logam las. Namun, dengan menggunakan logam pengisi yang dipanaskan, laju deposisi dapat ditingkatkan (kou, 2003).
- Dalam proses GTAW hot-wire, kawat diumpankan dan kontak dengan kolam las sehingga pemanasan bertahan dapat diperoleh dengan melewati arus listrik melalui kawat (kou, 2003).
- Tidak ada tindakan pembersihan sehingga toleransi terhadap kontaminan pada logam dasar atau logam rendah.

Gambar 4.16 orbital TIG (TWI, 2018)



Bab 8 Bahan Habis Pakai Pengelasan

8.1. Bahan Habis Pakai(Consumable)

Bahan habis pakai las didefinisikan sebagai semua bahan yang digunakan selama proses pengelasan. Daftar jenis bahan habis ini dapat mencakup semua hal yang digunakan dalam produksi lasan; Namun biasanya merujuk pada bahan habis pakai las sebagai barang-barang yang digunakan pada proses pengelasan tertentu.



Gambar 8.1 bahan habis pakai

Saat memeriksa bahan habis pakai pengelasan yang tiba di lokasi penyimpanan, penting untuk memeriksa beberapa item berikut ini yaitu:

- Ukuran
- Jenis atau spesifikasi.
- Kondisi.
- Penyimpanan.

Pemeriksaan kondisi penyimpanan yang sesuai untuk semua bahan habis pakai sangat penting dan merupakan bagian dari tugas pengawas pengelasan (welding inspector).

8.2 Bahan Habis untuk pengelasan MMA

Bahan habis pakai untuk pengelasan MMA terdiri dari kawat las yang biasanya panjangnya berukuran 350-450 mm dan diameter 2,5-6 mm tetapi tersedia

panjang dan diameter lainnya. Kawat las umumnya dari baja rimming berkualitas rendah karena lasan dapat dianggap sebagai pengecoran sehingga dapat disempurnakan dengan penambahan bahan pembersih atau pemurnian dalam lapisan fluks yang diekstrusi. Lapisan ini mengandung banyak elemen dan senyawa yang memiliki berbagai pekerjaan selama pengelasan. Silikon terutama ditambahkan sebagai zat pengoksidasi (dalam bentuk ferro-silikon), yang menghilangkan oksigen dari logam las dengan membentuk oksida silika. Penambahan Mangan hingga 1.6% akan meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja. Senyawa logam dan nonlogam lainnya ditambahkan yang memiliki banyak fungsi, termasuk:

- membantu pengapian busur.
- Meningkatkan stabilisasi busur.
- Menghasilkan gas pelindung untuk melindungi kolom busur.
- Perbaiki dan bersihkan pembekuan logam las.
- Bentuk terak yang melindungi logam las yang mengeras.
- menambahkan elemen paduan.
- Kontrol kandungan hidrogen dari logam las.
- Bentuk kerucut di ujung elektroda yang mengarahkan busur.

Elektroda untuk pengelasan MMA/ SMAW dikelompokkan berdasarkan unsur utama dalam lapisan fluksnya, yang pada gilirannya memiliki efek besar pada sifat las dan kemudahan penggunaan.

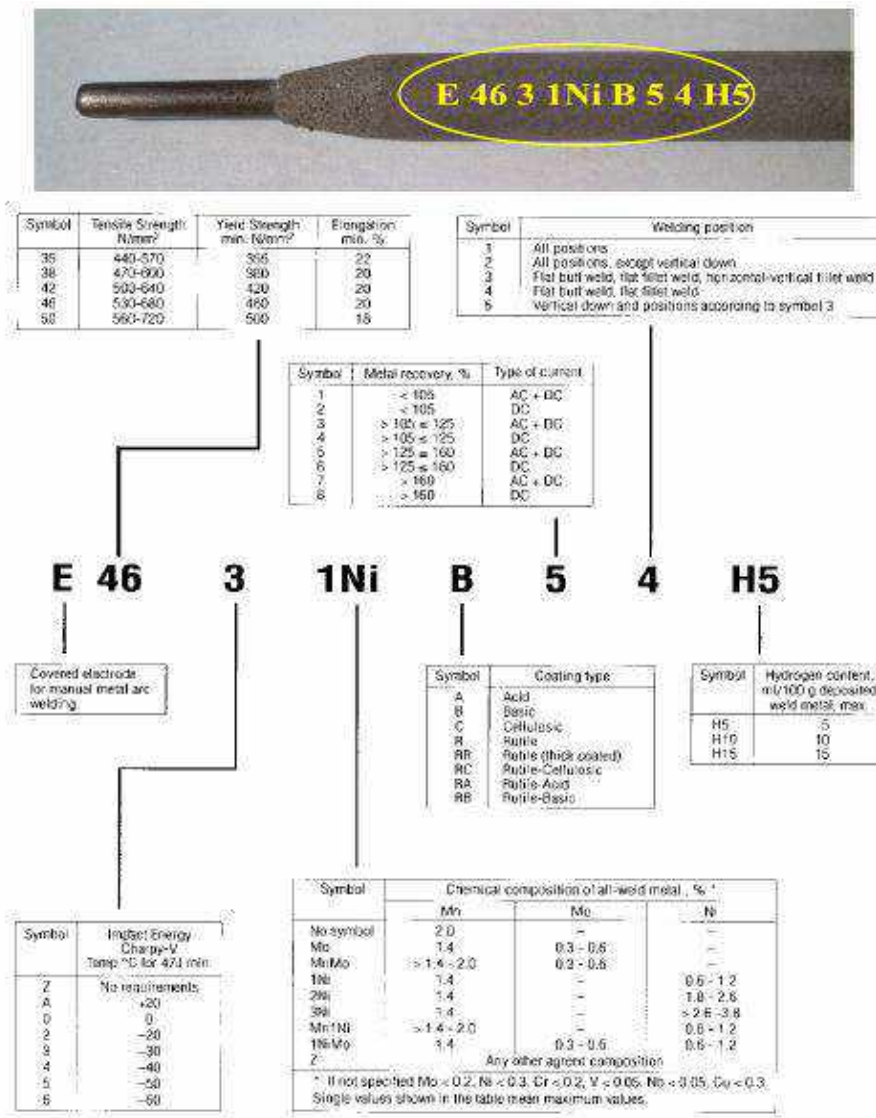
Tabel 8.1 Kelompok elektroda yang umum.

Group	Komponen	Gas pelindung	Penggunaan	AWS A 5.1
Rutile	Titania	CO ₂	Tujuan umum	E 6013
Basic	Kalsium	CO ₂	Kualitas tinggi	E 7018
Cellulosic	Cellulose	Hidrogen CO ₂	+ Untuk akar pipa	E 6010

Beberapa elektroda jenis basic ujungnya memiliki senyawa karbon yang memudahkan pengapian busur.



Gambar 8.2 Elektroda dengan ujung senyawa karbon

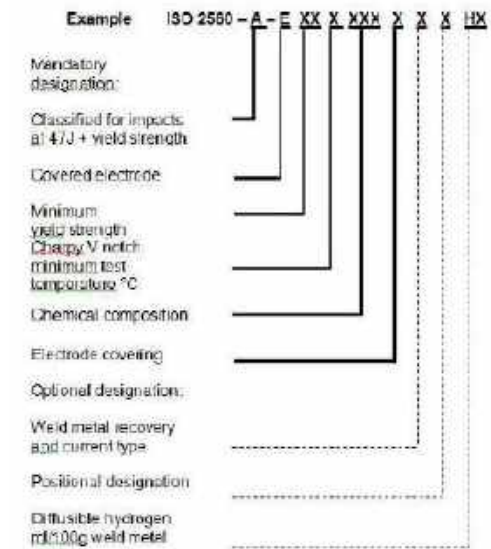


Gambar 8.3 Sistem klasifikasi elektroda EN ISO 2560.

Pada standar Eropa EN ISO 2560 (menggantikan BS EN 499 1994)

Klasifikasi Bahan Habis pakai untuk Elektroda Tertutup untuk Manual Metal Arc (111) Pengelasan Baja Non-paduan dan Baja butir Halus. Standar ini menerapkan pendekatan rangkap untuk klasifikasi elektroda menggunakan metode A dan B seperti yang ditunjukkan di bawah ini:

Klasifikasi sifat mekanik elektroda dari semua logam las contoh:



Gambar 8.4 Contoh umum: ISO 2560 - A-E 43 2 1 Ni RR 6 3 H15.

Klasifikasi karakteristik kekuatan tarik

Tabel 8.2 klasifikasi dari kekuatan tarik Metode A

Simbol	Minimum yield (N/mm ²)	Kekuatan tarik (N/mm ²)	Minimum E% (N/mm ²)
35	355	440-570	22
38	380	470-660	20
42	420	500-640	20
46	460	530-680	20
50	500	560-720	18

hasil yang lebih rendah harus digunakan. b Panjang pengukur = 5 x

Tabel 8.3 klasifikasi kekuatan tarik metode B

Simbol	Minimum kekuatan tarik (N/mm ²)
43	430
49	490

55 550

57 570

Karakteristik sifat kekuatan tarik lainnya yaitu kekuatan luluh dan persentase (%) perpanjangan disajikan dalam bentuk tabel dalam standar ini (Tabel 8B) dan ditentukan oleh klasifikasi kekuatan tarik, penutup elektroda dan elemen paduan, yaitu pada E 55 16-N7.

Klasifikasi Ketangguhan Impak

Tabel 8.4 klasifikasi dari sifat impak metode A

Simbol	Temperature minimum rata2 energi impak dari 40 J
Z	Tidak diperlukan
A	+20
0	0
2	-20
3	230
4	-40
5	-50
6	-60

Metode B

Temperatur impak atau suhu pengujian impak metode Charpy V pada suhu 27 J dalam metode B ditentukan melalui klasifikasi kekuatan tarik, penutup elektroda, dan elemen paduan (Tabel 8B) yaitu E 55 16-N7 yang harus mencapai 27 J pada suhu -75°C . Klasifikasi karakteristik elektroda dan kebutuhan listrik bervariasi antara metode klasifikasi A dan B sebagai berikut:

Metode A

8.5 penunjukan alfa/ numerik dengan metode A

Symbol	Jenis pelindung	Symbol	Efisiensi (%)	Jenis arus
A	Acid	1	<105	AC atau DC
C	Selulosa	2	<105	DC
R	Rutil	3	<105 - <125	AC atau DC
RR	Rutil pelindung tebal	4	<105 - <125	DC
RC	Rutil/selulosa	5	<125- <160	AC atau DC
RA	Rutil/acid	6	<125- <160	DC
RB	Rutil/basic	7	<160	AC atau DC
B	Basic	8	<160	DC

Metode B

8.6 penunjukan numerik dengan metode B

Imbol	Tipe cover	Posisi pengelasan	Jenis arus
03	Rutil/basic	Semua posisi	AC dan Dc+/-
10	Selulosa	Semua posisi	DC+
11	Selulosa	Semua posisi	AC dan Dc+
12	rutil	Semua posisi	AC dan Dc-
13	rutil	Semua posisi	AC dan Dc+/-
14	Rutil+ serbuk Fe	Semua posisi	AC dan Dc+/-
15	Basic	Semua posisi	DC+
16	Basic	Semua posisi	AC dan Dc+
18	Rutil+ serbuk Fe	Semua posisi	AC dan Dc+

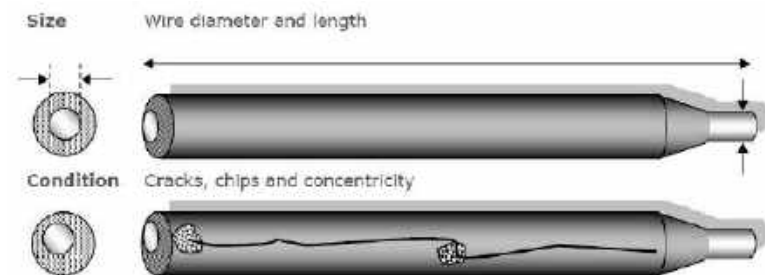
19	Rutil+ oksida Fe (Ilmenite)	Semua posisi	AC dan Dc+/-
20	Oksida Fe	PA/PB	AC dan Dc-
24	Rutil+ serbuk Fe	PA/PB	AC dan Dc+/-
27	Oksida Fe + serbuk Fe	Hanya PA/BB	AC dan Dc-
28	basic+ serbuk Fe	PA/PB/PC	AC dan Dc+
40	Tidak ada spesifikasi	Sesuai rekomendasi pabrikan	
48	basic	Semua posisi	AC dan Dc+

Semua posisi mungkin termasuk pengelasan vertikal-kebawah atau tidak

Kandungan Hidrogen

Hidrogen difusi ditunjukkan dengan cara yang sama di kedua metode, di mana setelah pembakaran jumlah hidrogen diberikan sebagai logam las ml/ 100 g yaitu H5 =5ml/ 100g logam las.

8.3 Poin Inspeksi untuk Bahan Habis Pakai Metode MMA



Gambar 8.5 Semua elektroda yang menunjukkan tanda-tanda korosi harus dibuang.



Penyimpanan pada kondisi kering dan hangat (lebih disukai dengan kelembaban 0%)

Gambar 8.6 Poin inspeksi untuk bahan habis pakai MMA.

Pemeriksaan juga harus dilakukan untuk memastikan bahwa elektroda telah melalui prosedur penggunaan yang benar. Setelah dipanaskan dengan suhu yang benar (biasanya 300-350°C) selama 1 jam kemudian ditahan dalam oven (150 °C maksimal) elektroda dasar dikeluarkan untuk tukang las dalam quiver yang dipanaskan. Kebanyakan pelapis fluks elektroda memburuk dengan cepat ketika lembab sehingga harus memeriksa fasilitas penyimpanan untuk memastikan semua elektroda cukup kering dan elektroda disimpan dalam kelembaban yang terkendali.

Elektroda yang disimpan dalam kemasan yang divakum dapat digunakan langsung dari karton hanya jika ruang hampa telah dipertahankan. Petunjuk untuk kontrol hidrogen selalu diberikan pada karton dan harus benar-benar dipatuhi. Biaya penyimpanan elektroda tidak signifikan dibandingkan dengan biaya perbaikan, sehingga elektroda jenis basic yang tersisa dalam quiver yang dipanaskan, tetapi biasanya akan dibuang untuk menghindari risiko masalah yang disebabkan H₂.

8.4 Bahan Habis Pakai untuk TIG / GTAW

Bahan Habis pakai untuk pengelasan TIG/ GTAW terdiri dari kawat las dan gas, meskipun elektroda tungsten juga dapat dikelompokkan dalam hal ini. Meskipun dianggap sebagai proses elektroda yang tidak habis, elektroda akan habis karena erosi pada busur dan dengan teknik pengasahan dengan grinding dan pengelasan yang salah. Kawat harus memiliki kualitas yang sangat tinggi karena biasanya tidak ada elemen pembersih tambahan yang dapat ditambahkan ke lasan. Kawat las disempurnakan pada tahap casting dengan kualitas yang sangat tinggi di mana kemudian dirol dan akhirnya dilakukan proses penarikan ke ukuran yang benar.

Kemudian dilapisi dengan tembaga dan dipotong menjadi 1 m panjang dan kode dicap pada kawat dengan nomor pabrikan atau yang diakui secara nasional untuk identifikasi komposisi kimia yang benar. Grade kawat dipilih dari tabel komposisi dan kabel sebagian besar dilapisi tembaga yang menghambat efek korosi. Gas untuk metode TIG/ GTA umumnya adalah gas mulia dan gas argon

atau helium murni umumnya digunakan untuk pengelasan TIG. Gas-gas ini diekstraksi dari udara dengan pencairan dan karena argon lebih banyak ditemukan di udara, umumnya lebih murah dari pada helium.

Di Amerika Serikat gas Helium terjadi secara alami sehingga merupakan gas yang lebih sering digunakan. Ini menghasilkan busur penembus yang lebih dalam daripada gas argon tetapi kurang padat (lebih ringan) dari udara dan membutuhkan 2-3 kali laju aliran argon untuk menghasilkan penutup yang cukup ke daerah lasan saat pengelasan di tangan. Gas Argon lebih padat (lebih berat) daripada udara sehingga lebih sedikit gas yang perlu digunakan dalam posisi *downhand*. Campuran argon dan helium sering digunakan untuk menyeimbangkan sifat busur dan kemampuan penutup pelindung gas. Gas untuk pengelasan metode TIG/GTAW harus memiliki kemurnian tertinggi (99,99%) sehingga perhatian dan inspeksi harus diberikan pada pembersihan dan kondisi selang gas karena kontaminasi gas pelindung dapat terjadi karena selang yang aus atau lemah.

Tungsten elektroda untuk pengelasan TIG umumnya diproduksi oleh teknologi penempaan serbuk dan mengandung oksida lain untuk meningkatkan konduktivitas dan emisi elektron dan juga mempengaruhi karakteristik busur. Mereka tersedia dengan diameter 1.6-10 mm. Pelindung keramik juga dapat dianggap sebagai bahan habis pakai karena mudah pecah, ukuran dan bentuknya tergantung terutama pada jenis desain sambungan dan diameter tungsten.

8.5 Bahan Habis Pakai untuk MIG/ MAG

Bahan Habis pakai untuk MIG/ MAG terdiri dari kawat dan gas. Spesifikasi kawat yang digunakan untuk metode TIG juga digunakan untuk MIG/ MAG karena tingkat kualitas yang sama diperlukan dalam kawat. Tujuan utama dari pelapisan tembaga dari kawat las MIG/ MAG baja adalah untuk memaksimalkan pick-up arus di ujung kontak dan mengurangi tingkat koefisien gesekan pada liner dengan perlindungan terhadap efek korosi yang menjadi sekunder.

Tersedia kabel yang belum dilapisi tembaga karena tembaga yang terkelupas di liner dapat menyebabkan banyak masalah pengumpanan kawat. Kabel ini dapat

dilapisi dalam senyawa grafit, yang lagi-lagi meningkatkan arus dan mengurangi gesekan pada liner. Beberapa kabel, termasuk banyak kabel, dilapisi nikel. Kabel tersedia dari diameter 0,6-1,6 mm dengan kabel yang lebih halus tersedia pada gulungan 1kg, meskipun sebagian besar dipasok dengan ukuran drum 15kg.

Tabel 8.7 Gas dan campuran yang umum digunakan untuk pengelasan MIG / MAG

Jenis gas	proses	penggunaan	Karakteristik
Argon murni	MIG	Spray atau las pulsa untuk paduan aluminium	Busur sangat stabil dengan penetrasi sedikit dan spatter dengan level rendah.
CO ₂ murni	MAG	Las dengan tipe dip transfer untuk baja	Penetrasi yang baik, busur yang tidak stabil dan tingkat spater yang tinggi
Argon + 5-20% CO ₂	MAG	semprotan Celup atau denyut pengelasan baja	Penetrasi yang baik dengan busur stabil dan tingkat percikan rendah.
Argon + 1-2% O ₂ atau CO ₂	MAG	Semprotan atau denyut las dari baja tahan karat austenitik atau feritik	Aditif aktif memberi fluiditas logam cair yang baik pada stainless dan memperbaiki toe blend.

8.6 Bahan Habis pakai untuk SAW

Bahan habis pakai untuk metode SAW terdiri dari kawat elektroda dan fluks. Kawat elektroda biasanya berkualitas tinggi dan untuk pengelasan baja C-Mn umumnya dinilai berdasarkan peningkatan kadar karbon dan kadar mangan dari de-oksidasi. Kawat elektroda untuk mengelas baja paduan lainnya umumnya dinilai dengan komposisi kimia dalam sebuah tabel dengan cara yang mirip dengan kabel elektroda MIG dan TIG. Fluks untuk SAW dinilai berdasarkan pembuatan dan komposisinya yang ada dua metode normal, menyatu dan diaglomerasi

Fluks yang menyatu

Fluks yang menyatu ini dicampur menjadi satu dan dipanggang pada suhu yang sangat tinggi ($> 1.000^{\circ}\text{C}$) sehingga semua komponen melebur. Ketika didinginkan, massa yang dihasilkan menyerupai selembar kaca berwarna, yang kemudian ditumbuk menjadi partikel-partikel kecil.

Partikel-partikel ini bersifat keras, reflektif, berbentuk tidak teratur dan tidak dapat dihancurkan dengan tangan. Tidak mungkin untuk menggabungkan senyawa paduan tertentu, seperti ferro-mangan, karena ini akan dihancurkan dalam suhu tinggi dalam proses manufakturnya. Fluks yang menyatu cenderung dari jenis asam dan cukup toleran terhadap kondisi permukaan yang buruk, tetapi menghasilkan logam las yang relatif berkualitas rendah dalam hal kekuatan tarik dan ketangguhan. Mereka mudah digunakan dan menghasilkan kontur las yang baik dengan terak yang mudah dilepas.



Gambar 8.7 Fluks yang menyatu.

Fluks yang diaglomerasi

Campuran senyawa yang dipanggang pada suhu yang jauh lebih rendah dan diikat bersama oleh alat pengikat menjadi partikel kecil. Mereka berwarna kusam, umumnya berupa butiran bundar yang rapuh (mudah dihancurkan) dan juga bisa diwarnai. Banyak alat dan senyawa dapat ditambahkan selama pembuatan tidak seperti fluks yang menyatu. Fluks yang teraglomerasi cenderung dari tipe dasar dan menghasilkan logam las dengan kualitas yang lebih baik dalam hal kekuatan dan

ketangguhan, dengan mengorbankan kegunaan, mereka jauh lebih toleran terhadap kondisi permukaan yang buruk dan umumnya menghasilkan terak yang jauh lebih sulit untuk dilepas dan dihilangkan.



Gambar 8.8 Flux menggumpal

Sifat-sifat logam las dihasilkan dari penggunaan kawat tertentu dengan fluks tertentu pada urutan las tertentu sehingga peringkasan bahan habis pakai metode SAW diberikan sebagai fungsi kombinasi kawat/ fluks dan urutan pengelasan.

Jenis yang akan memberikan nilai untuk:

- Kekuatan tarik.
- Perpanjangan %.
- Ketangguhan, Joules.
- Suhu pengujian ketangguhan.

Semua barang habis pakai untuk metode SAW (kabel dan fluks) harus disimpan dalam kondisi kering dan bebas lembab. Instruksi dan ketentuan penanganan/ penyimpanan pabrikan fluks harus benar-benar diikuti untuk meminimalkan pemicu uap air. Setiap penggunaan ulang fluks sepenuhnya bergantung pada klausa yang berlaku dalam standar aplikasi.

Bab 9

Mampu Las Baja (Weldability of Steels)

9.1. Pendahuluan

Kemampuan las (*weldability*) adalah kemampuan suatu logam untuk dilas dan tidak terjadinya retak/ cacat, saat ini telah banyak jenis baja mampu las dikembangkan untuk berbagai aplikasi. Kemudahan atau kesulitan membuat lasan dengan sifat yang sesuai dan bebas dari cacat menentukan apakah baja dianggap memiliki kemampuan las baik atau buruk. Baja biasanya dikatakan memiliki kemampuan las yang buruk jika perlu dilakukan tindakan pencegahan khusus untuk menghindari jenis ketidaksempurnaan pengelasan tertentu. Alasan lain disebut kemampuan las yang buruk mungkin membutuhkan pengelasan dengan parameter pada kisaran yang sangat sempit untuk mencapai propertis yang diperlukan.

9.2. Faktor-faktor yang mempengaruhi kemampuan las

Sejumlah faktor yang saling terkait yang menentukan apakah baja baik atau buruk kemampuan lasnya adalah dengan melakukan beberapa hal yaitu:

- Komposisi kimia dari logam dasar.
- Konfigurasi sambungan las.
- Proses pengelasan yang akan digunakan.
- Propertis/sifat yang diperlukan dari lasan.

Untuk baja dengan kemampuan las yang buruk, sangat penting untuk memastikan bahwa:

- Spesifikasi prosedur pengelasan (*Welding Procedure Specification*) memberikan kondisi pengelasan yang tidak menyebabkan keretakan tetapi mencapai propertis yang ditentukan.
- Tukang las bekerja secara cermat sesuai dengan kondisi pengelasan yang ditentukan.
- Pengawas pengelasan memantau tukang las secara teratur untuk memastikan mereka bekerja secara ketat sesuai dengan WPS.

Dengan memiliki pemahaman yang baik tentang karakteristik, penyebab dan cara menghindari ketidaksempurnaan dalam pengelasan baja memungkinkan pengawas pengelasan fokuskan perhatian pada parameter pengelasan yang paling berpengaruh saat baja dengan kemampuan las yang buruk digunakan.

Retak Pada Baja Karbon Dan Paduan Rendah

Berbagai jenis retak, termasuk retak hidrogen, retak pembekuan, retak likuidasi, retak lamelar, retak pemanasan, dan retak kelelahan akan dibahas di bagian ini. Metode pencegahan retak juga dijelaskan. Persiapan permukaan adalah praktik standar dalam semua aplikasi pengelasan, dan sangat penting dalam mencegah sebagian besar jenis retak las. Kehadiran dari Pengotor memiliki efek yang sangat signifikan terhadap berbagai mekanisme retak dan kualitas lasan. Minyak, grease, kotoran, karat, cat atau pelapis lainnya harus dibersihkan dari permukaan baja di wilayah tempat lasan akan dibuat. Sebagai contoh, residu tembaga dari alat-alat seperti blok pendingin dan fixturing harus dihilangkan dari permukaan baja benda kerja karena tembaga dapat menjadi sumber retak pembekuan (AWS Vol 4)

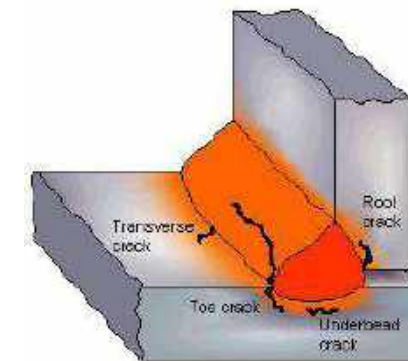
9.3. Retak Hidrogen (Hydrogen Cracking)

Retak Hidrogen (juga dikenal sebagai retak underbead, retak dingin, atau retak tertunda) dapat terjadi ketika pengelasan baja karbon dan baja paduan rendah. Potensi untuk retak hidrogen dalam logam las atau zona yang terkena dampak panas, atau keduanya, tergantung pada komposisi, Kandungan hidrogen, dan tingkat tegangan tarik. Keretakan hidrogen umumnya terjadi pada suhu di bawah 150 °C (300 °F), baik langsung pada pendinginan atau setelah masa inkubasi hingga 48 jam. Semakin meningkatnya jumlah hidrogen terdifusi, mikrostruktur yang lebih rentan (lebih keras) atau tekanan tarik yang lebih tinggi, atau semuanya tiga, tingkatkan kemungkinan retak dan perpendek masa inkubasi. Urutan berikut menjelaskankeseluruhan proses:

1. Molekul air (H₂O) atau hidrokarbon (H_xC_x) terdisosiasi menjadi atom hidrogen dalam pengelasan busur;

2. Atom hidrogen mudah larut ke dalam kolam las;
3. Ketika kolam las mengeras, hidrogen mulai berdifusi keluar ke sekitar HAZ;
4. Saat area yang dilas mendingin, difusi hidrogen melambat, terutama sekitar di bawah 200 °C (390 °F);
5. Seiring waktu, hidrogen terakumulasi di daerah tegangan tarik triaksial, seperti pada ujung las atau akar las pada inklusi terak, atau pada pemadatan kecil atau retakan likuidasi; dan
6. Ketika (atau jika) konsentrasi hidrogen di mana saja lokasi melebihi nilai ambang batas, sebagaimana ditentukan oleh tekanan dan struktur mikro, retak dimulai (AWS Vol 4)

Selama pengelasan, retakan dapat terjadi pada beberapa jenis baja karena adanya kandungan hidrogen, nama teknisnya disebut *Hydrogen Induced Cold Cracking* atau disebut retak dingin yang disebabkan oleh hidrogen (HICC) tetapi sering disebut dengan nama yang menggambarkan berbagai karakteristik retakan hidrogen.

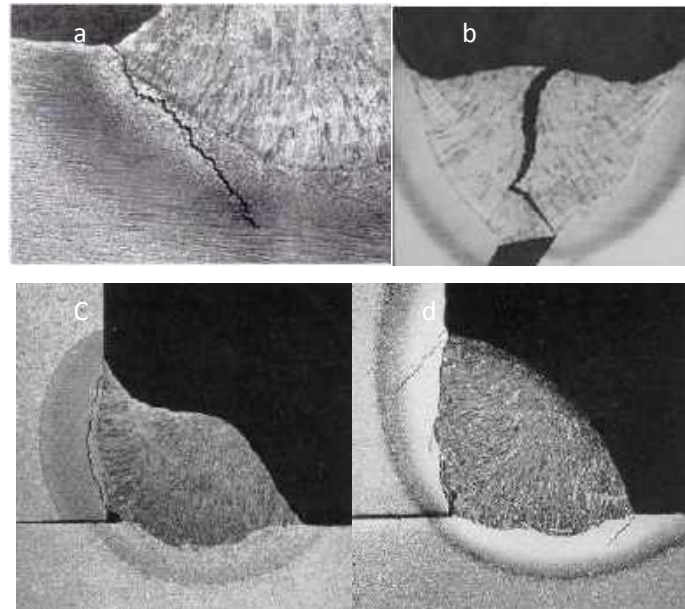


Gambar 9.1 Lokasi retak hidrogen yang menyebabkan retakan dingin (TWI, 2018)

Ada beberapa jenis retak yang diakibatkan karena kandungan hidrogen yang tinggi pada logam las yaitu:

- Retakan dingin (*cold cracking*): retak jenis ini terjadi ketika lasan telah dingin.
- Retak pada daerah HAZ (HAZ cracking) yaitu retak HAZ terjadi terutama di daerah HAZ.

- Retak yang tertunda (*Delayed cracking*) yaitu retak dapat terjadi beberapa saat setelah pengelasan selesai dilakukan (mungkin hingga ~ 72 jam).
- Retakan *underbead* yaitu retak terjadi pada HAZ di bawah manik las. Meskipun sebagian besar retakan hidrogen terjadi di HAZ, ada beberapa keadaan ketika mereka dapat terbentuk dalam logam las.



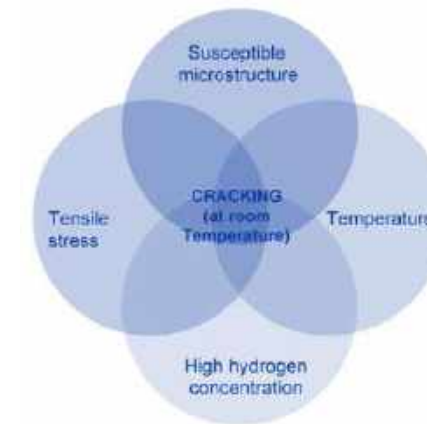
Gambar 9.2 Hidrogen menyebabkan retak dingin a) dimulai pada HAZ di ujung kaki lasan fillet, b) pada bagian logam las, c) pada under bead dan d) toe cracking (TWI, 2018)

9.4. Faktor-faktor yang mempengaruhi kerentanan Retak Hidrogen

Retak hydrogen pada daerah HAZ dari baja terjadi pada empat kondisi yang terjadi pada satu waktu yaitu:

- Kandungan Hidrogen > 15 ml/100 gram pada daerah las
- Tegangan yang terjadi > 0.5 dari tegangan yield logam yang dilas
- Terjadi pada temperature < 300 °C
- Kekerasan lebih besar dari 400 HV

Keempat faktor ini saling tergantung satu sama lain sehingga saling mempengaruhi satu kondisi (tingkatan aktifnya) tergantung pada seberapa aktif diantara ketiganya.



Gambar 9.3 faktor-faktor yang mempengaruhi retak hydrogen (TWI, 2018)

Mekanisme retak Hidrogen (H) dapat memasuki logam las bila mengandung hydrogen molekul dipecah menjadi atom H dalam busur pengelasan. Karena atom H sangat kecil, mereka dapat bergerak (berdifusi) dalam baja padat dan sementara saat logam las panas dapat berdifusi ke permukaan las dan terbang ke atmosfer. Namun, pada suhu yang lebih rendah H tidak dapat berdifusi dengan cepat dan jika pengelasan mendingin dengan cepat ke suhu sekitar H akan terjebak, biasanya di daerah HAZ. Jika daerah HAZ memiliki struktur mikro yang rentan, ditunjukkan dengan nilai kekerasan tinggi dan rapuh dan memiliki tegangan tarik yang relatif tinggi di daerah lasan, maka H *cracking* dapat terjadi.

Mekanisme yang paling tepat sebagai penyebab retakan terbentuk adalah cukup kompleks, akan tetapi H diyakini menyebabkan kerapuhan (*embrittlement*) pada daerah HAZ karena tegangan lokal yang tinggi daripada regangan plastic sehingga menyebabkan retak.

9.4.1. Menghindari retak Hidrogen pada daerah HAZ

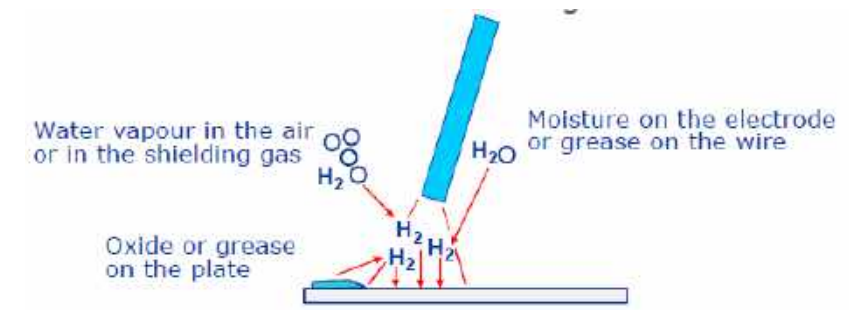
Karena faktor-faktor yang menyebabkan retak adalah saling bergantung satu dengan yang lain dan masing-masing harus pada tingkatan yang sama, keretakan dapat dihindari dengan memastikan bahwa setidaknya salah satu faktor diatas tidak aktif selama proses pengelasan. Metode untuk meminimalkan pengaruh masing-masing dari empat faktor dipertimbangkan dalam sub-bagian berikut.

A. Hidrogen

Sumber utama hidrogen adalah uap air (H_2O) dan sumber utamanya adalah fluks pengelasan. Beberapa fluks mengandung selulosa dan ini bisa menjadi sumber yang sangat tinggi kandungan hidrogen menjadi aktif. Proses pengelasan yang tidak membutuhkan fluks dapat dianggap sebagai hidrogen rendah. Sumber hidrogen lainnya adalah kelembaban yang ada dalam karat atau kerak dan minyak dan juga lemak (hidrokarbon).

Untuk mengurangi pengaruh hidrogen terhadap keretakan dapat dimungkinkan dengan cara:

- Memastikan bahwa fluks (elektroda berlapis, kabel berinti fluks dan fluks SAW) mempunyai kandungan H rendah saat pengelasan dimulai.
- Memanaskan (*baking*) elektroda agar kandungan H turun kemudian menyimpan elektroda dalam oven penahan panas atau menyimpan elektroda dalam kardus terbungkus plastik yang tertutup rapat.
- Fluks SAW yang sudah menggumpal/aglomerasi dipanaskan dalam silo sampai kondisi kelembaban rendah.
- Memeriksa kandungan hidrogen difusi logam las (terkadang terdapat pada sertifikat uji).
- Memastikan bahwa kondisi pengelasan dengan Hidrogen rendah dipertahankan selama pengelasan dengan tidak memungkinkan fluks untuk mengambil kelembaban dari atmosfer.
- Menutupi atau mengembalikan gulungan kawat tertutup fluks yang tidak mulus ke kondisi penyimpanan yang cocok saat tidak digunakan.
- Mengembalikan fluks untuk metode SAW yang sudah teraglomerasi (menggumpal) dasar ke silo pemanas saat pengelasan tidak berjalan.
- Memeriksa jumlah kelembaban yang ada dalam gas pelindung dengan memeriksa titik embun (harus di bawah $-60^{\circ}C$).
- Memastikan zona lasan kering dan bebas dari karat/ kerak dan oli/ lemak.



Gambar 9.4 proses masuknya hydrogen pada logam las (TWI, 2018)

B. Tegangan tarik

Selalu ada tegangan tarik yang bekerja pada lasan karena selalu ada tegangan sisa dari pengelasan. Besarnya tegangan tarik terutama tergantung pada ketebalan baja pada sambungan, masukan panas, jenis sambungan dan ukuran dan berat komponen yang dilas. Tegangan tarik pada sambungan yang sangat terkendali dapat setinggi kekuatan luluh baja dan ini biasanya terjadi pada komponen besar dengan sambungan tebal dan bukan merupakan faktor yang dapat dengan mudah dikontrol.

Satu-satunya cara praktis untuk mengurangi pengaruh tegangan sisa mungkin dilakukan adalah:

- Menghindari konsentrasi tegangan karena fit-up yang buruk.
- Menghindari profil pengelasan yang buruk (bentuk kaki pengelasan yang tajam).
- Menerapkan perlakuan panas untuk menghilangkan tegangan setelah pengelasan.
- Meningkatkan kecepatan pengelasan sepraktis mungkin untuk mengurangi input panas.
- Menjaga volume logam las serendah mungkin.

Langkah-langkah ini sangat penting ketika mengelas beberapa baja paduan rendah yang sangat sensitif terhadap retak hidrogen.

Mikrostruktur HAZ yang rentan

Daerah yang rentan skala mikro adalah pada daerah HAZ yang mana mengandung perbandingan fasa dari baja yang keras dan rapuh yang relatif tinggi, terutama pada fasa martensit. Kekerasan pada daerah terpengaruh panas/HAZ adalah indikator kerentanan yang baik dan ketika melebihi nilai tertentu baja dianggap rentan. Untuk baja C dan C-Mn nilai ini adalah ~ 350HV dan kerentanan terhadap retak akibat hidrogen (H₂) meningkat seiring nilai kekerasan meningkat di atas nilai 350HV.

Kekerasan maksimum pada daerah HAZ dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

Komposisi kimia dari baja.

Laju pendinginan HAZ setelah proses pengelasan dilakukan.

Rumus untuk baja C dan C-Mn telah dikembangkan untuk menilai bagaimana komposisi kimia akan mempengaruhi kecenderungan pengerasan daerah HAZ, rumus untuk menghitung nilai karbon karbon ekuivalen (CEV) yaitu:

Untuk menghitung Nilai CEV yang paling luas digunakan sebagaimana pada persamaan (6.1) dibawah:

$$CEV = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Nilai CEV pada baja dapat dihitung dengan memasukkan nilai hasil uji material yang ditunjukkan pada komposisi kimia ke dalam formula diatas. Semakin tinggi CEV yang didapat maka, semakin besar kerentanannya terhadap pengerasan pada daerah HAZ karena itu semakin besar kerentanan terhadap retak hidrogen/H₂. Unsur yang paling berpengaruh pada kekerasan HAZ adalah karbon. Semakin cepat laju pendinginan pada bagian HAZ setelah setiap proses pengelasan dijalankan, maka semakin besar kecenderungan pengerasan. Tingkat pendinginan cenderung meningkat disebabkan karena:

Input panas berkurang (input energi lebih rendah).

Ketebalan sambungan meningkat (heat sink lebih besar).

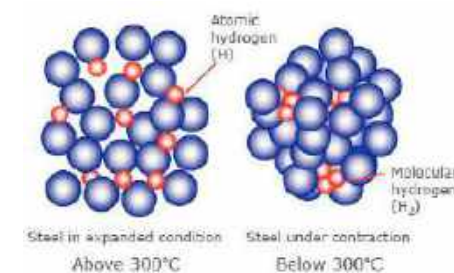
Untuk menghindari kerentanan retak pada bagian HAZ (untuk baja C dan C-Mn) dengan melakukan hal berikut:

- Pengadaan baja dengan nilai CEV rendah pada suatu grade baja tertentu (ruang lingkup efektivitas terbatas).
- Menggunakan input panas las sedang, sehingga lasan tidak cepat dingin dan untuk memberikan pengerasan pada bagian HAZ.
- Menerapkan pemanasan awal agar bagian HAZ mendingin lebih lambat dan tidak menyebabkan pengerasan HAZ yang signifikan; melakukan pengelasan multi-run demi mempertahankan suhu interpass tertentu.

Formula untuk menghitung nilai CEV (persamaan 6.1) tidak berlaku untuk baja paduan rendah, dengan penambahan unsur-unsur seperti Cr, Mo dan V. daerah HAZ dari baja akan selalu cenderung relatif keras terlepas dari penggunaan input panas dan pemanasan awal sebelum pengelasan sehingga ini merupakan faktor yang tidak dapat dikontrol secara efektif untuk mengurangi risiko retak Hidrogen. Hal inilah sebagai sebab mengapa beberapa baja paduan rendah memiliki kecenderungan lebih besar untuk menunjukkan terjadinya keretakan hidrogen daripada pada baja C dan C-Mn, yang memungkinkan kekerasan daerah HAZ bisa dikendalikan.

Lasan pada suhu rendah

Temperatur las memiliki pengaruh besar pada kerentanan terhadap retak terutama yang mempengaruhi laju perpindahan Hidrogen (difusi) melalui lasan dan HAZ. Ketika pengelasan relatif hangat (> 300 ° C) H akan berdifusi dengan cepat dan keluar ke atmosfer daripada terperangkap dan menyebabkan embrittlement.



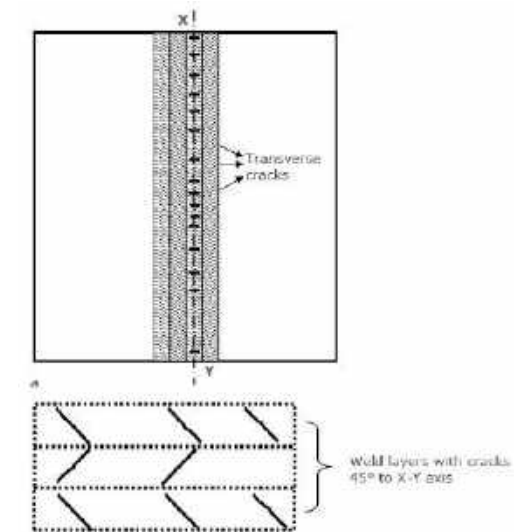
Gambar 9.5 proses terdifusinya atom hydrogen diantara susunan atom Fe ($t > 300$ C) (TWI, 2018)

Pengaruh suhu lasan rendah dan risiko terjebaknya H dalam lasan dapat dikurangi dengan:

- Menerapkan suhu pemanasan awal yang sesuai (biasanya 50 hingga ~ 250 °C).
- Mencegah lasan agar tidak dingin dengan cepat setelah setiap lintasan dengan mempertahankan panas awal dan suhu interpass tertentu selama pengelasan.
- Mempertahankan suhu pemanasan awal (atau menaikannya hingga 250 °C) ketika pengelasan telah selesai dan menahan sambungan pada suhu ini selama minimal dua jam untuk proses pelepasan Hidrogen (pasca-panas).
- Pemanasan setelah pengelasan sesuai dengan spesifikasi bahan, (jangan dikacaukan dengan PWHT) pada suhu ≥ 600 °C.

9.5 Retak Hidrogen pada logam las

Retakan hidrogen dapat terbentuk pada logam las baja dalam kondisi tertentu. Mekanisme retak dan identifikasi semua faktor yang mempengaruhi kurang dipahami dengan jelas dibandingkan dengan retak daerah HAZ tetapi dapat terjadi ketika kondisi pengelasan yang menyebabkan Hidrogen terjebak dalam logam las daripada di HAZ. Diakui bahwa pengelasan pada material berkekuatan lebih tinggi, dengan penampang yang lebih tebal dan menggunakan manik las besar adalah yang paling umum bermasalah. Retakan hidrogen pada logam las biasanya terletak pada 45° ke arah tegangan tarik utama dalam logam las, biasanya terjadi searah sumbu longitudinal dari logam las tersebut (Gambar 6.6).



Gambar 9.6. a) pengelasan plat sambungan tumpul yang menunjukkan retakan melintang di bawah permukaan;
b). Bagian longitudinal sumbu X-Y dari lasan di atas menunjukkan cara retakan melintang terletak pada 45° pada permukaan (TWI, 2018)

Penampilan retakan dengan orientasi bentuk seperti ini biasanya disebut retakan chevron (tanda panah retakan). Tidak ada aturan yang jelas untuk menghindari retak hidrogen logam las selain dengan cara berikut:

- ✓ Gunakan proses pengelasan hidrogen rendah.
- ✓ Lakukan pemanasan awal dan pertahankan suhu interpass tertentu.

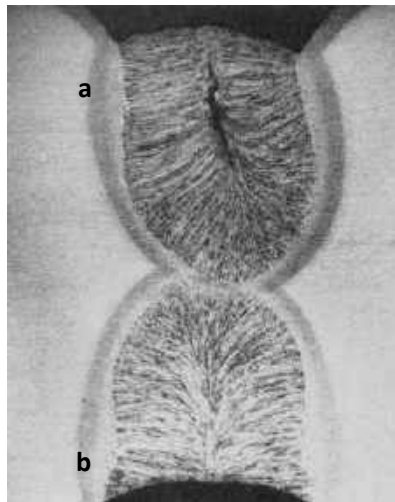
Pada standar pengelasan Eropa (BS EN 1011-2) memberi rekomendasi pengelasan untuk bahan logam. Pada Bagian 2: Pengelasan busur untuk baja feritik diberikan dalam Lampiran C pedoman praktis tentang bagaimana menghindari retak Hidrogen. Ini terutama didasarkan pada aplikasi pemanasan awal dan kontrol potensial kandungan H yang terkait dengan proses pengelasan.

9.6 Retak Saat Pembekuan (*Solidification Cracking*)

Nama teknis untuk menyebutkan jenis retakan yang terbentuk selama proses pembekuan/pemadatan logam cair pada logam las disebut retakan solidifikasi tetapi nama lain terkadang juga digunakan:

- Retak panas (*hot cracking*): Terjadi pada suhu tinggi saat logam lasan dalam kondisi panas.
- Retak bagian tengah (*centreline cracking*): pada bagian bawah pada garis tengah manik las.
- Retak kawah (*crater cracking*): Retak kecil pada kawah las adalah retakan solidifikasi.

Logam las yang khususnya rentan terhadap retak pembekuan dapat dikatakan demikian menunjukkan *hot shortness* karena keuletan sehingga cenderung retak. Gambar 9.5 menunjukkan bagian melintang dari logam las yang mengalami jenis retak pembekuan pada garis tengah logam las.

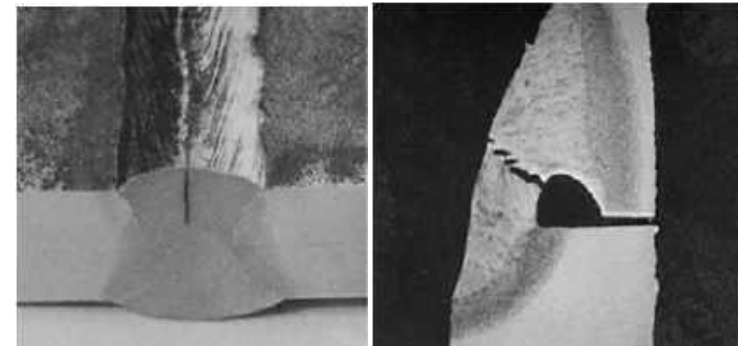


Gambar 9.7: a) retakan solidifikasi di pusat las tempat dendrit berbentuk kolom (*columnar*) terjebak dibawah titik leleh; b) Manik las tidak memiliki bentuk yang ideal tetapi telah memadat tanpa ujung dendrit yang rapat dan terjebak pada cairan titik leleh yang lebih rendah sehingga menahan proses pembekuan dan menimbulkan retak pembekuan (TWI, 2018)

Faktor-faktor yang mempengaruhi kerentanan terhadap retak Solidifikasi

Retak solidifikasi terjadi ketika tiga kondisi berada pada saat yang bersamaan yaitu:

- ❖ Logam las memiliki komposisi kimia yang rentan.
- ❖ Kondisi pengelasan yang digunakan menghasilkan bentuk manik yang tidak menguntungkan.
- ❖ Tingkat regangan atau tegangan tarik yang tinggi hadir di area lasan.

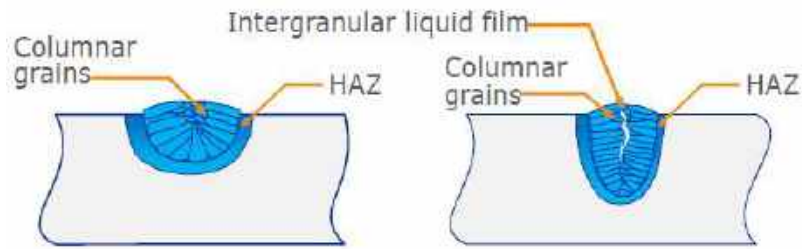


Gambar 9.8 retak solidifikasi biasanya terjadi ditengah logam las (TWI, 2018)

Mekanisme retak

Semua logam las akan memadat pada kisaran suhu tertentu dan proses pemadatan dimulai dari garis fusi menuju garis tengah kolom las, selama tahap terakhir pembekuan manik las mungkin ada cukup cairan untuk membentuk zona lemah di tengah manik. Cairan lapisan film ini adalah hasil dari titik leleh rendah konstituen yang didorong kearah depan dari proses solidifikasi.

Selama solidifikasi/pembekuan, tegangan tarik mulai menumpuk karena kontraksi bagian padat dari manik las dan tegangan ini dapat menyebabkan manik las pecah. Keadaan ini menghasilkan manik las yang menunjukkan retak garis tengah terbentuk. Retakan solidifikasi pada garis tengah lasan cenderung ada pada permukaan yang memanjang dan dapat dengan mudah dilihat selama pemeriksaan visual karena retak ini cenderung relatif lebar.

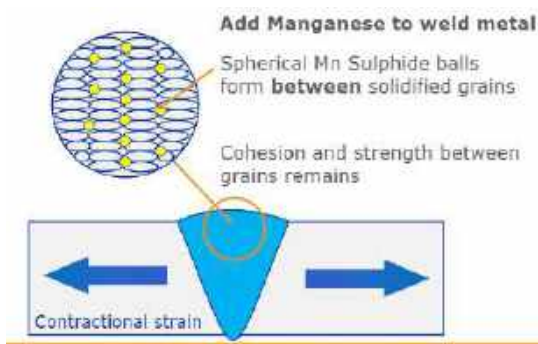


Gambar 9.9 proses solidifikasi pada logam las, a) pada manik las dangkal dan lebih lebar akan membentuk ikatan antara butir yang mungkin cukup untuk mempertahankan kohesi dan tidak mungkin terjadi retak.

b) Manik las yang lebih dalam dan sempit sehingga terjadi ikatan antara butir hal ini mungkin sangat buruk untuk dipertahankan kohesi dan retakan bisa terjadi (TWI, 2018)

Cara Menghindari retak saat Pembekuan

Untuk menghindari retak solidifikasi/ pembekuan maka mengurangi salah satu faktor dari 4 penyebab retak agar menjadi level tidak aktif. Komposisi logam las merupakan yang paling banyak penyumbang potensi retak, pada baja C dan C-Mn dibuat dengan metode pembuatan baja modern tetapi tidak memiliki komposisi kimia yang tahan terhadap retak pematatan. Namun, mereka bisa menjadi sensitif terhadap jenis retak ini jika mereka terkontaminasi dengan unsur atau senyawa yang menghasilkan lapisan film pada titik leleh yang relatif rendah pada logam las. Belerang (sulphur) dan tembaga (copper) dapat membuat logam las sensitif terhadap retak pembekuan jika kandungan dalam lasan pada tingkat yang relatif tinggi.



Gambar 9.10 penambahan Mn pada proses pengelasan (sulfide Mn terbentuk antara butir) (TWI, 2018)

Kontaminasi belerang dapat menyebabkan pembentukan sulfida besi yang tetap cair saat manik-manik las telah mendingin dibawah temperature 980°C , sedangkan pembekuan manik las dimulai diatas temperature 1400°C . Unsur belerang (sulfur) mungkin bersumber dari bahan yang terkontaminasi dengan minyak atau *grease* atau bisa juga dari logam induk yang ikut mencair dan masuk ke dalam logam las.

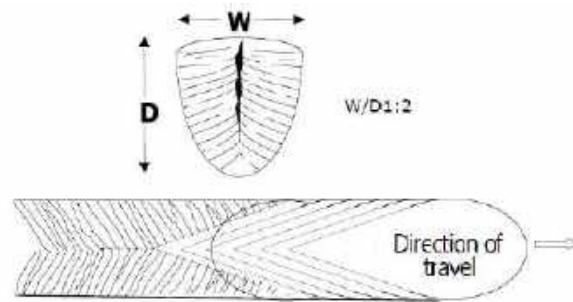
Kontaminasi tembaga pada logam las bisa juga berbahaya karena memiliki kadar logam dengan kelarutannya rendah dalam baja dan dapat membentuk lapisan film yang masih cair pada temperatur 1100°C .

Untuk menghindari retak pembekuan (dari logam las yang tidak sensitif) mensyaratkan untuk menghindarkan dari kontaminasi dengan bahan yang berpotensi berbahaya atau memastikan bahwa:

- ❖ Sambungan las dibersihkan secara menyeluruh segera sebelum pengelasan.
- ❖ Setiap tembaga yang mengandung aksesoris pengelasan cocok / dalam kondisi yang sesuai, seperti backing-bar dan tips kontak yang digunakan untuk GMAW, FCAW dan SAW.

Kondisi pengelasan yang tidak menguntungkan

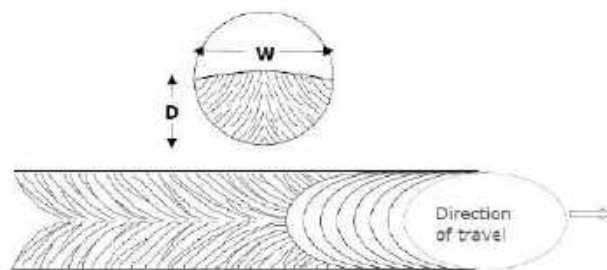
Manik-manik las mendorong untuk mengeras sehingga lapisan film menjadi terperangkap dibawah titik leleh rendah di tengah manik las yang mengeras dan menjadi zona yang paling lemah sehingga memudahkan pembentukan retak. Gambar 6.11 menunjukkan manik las yang telah memadat dalam kondisi pengelasan yang tidak menguntungkan terkait dengan retak pematatan pada garis tengah.



Gambar 9.11 Manik las dengan rasio antara lebar dan kedalaman yang tidak menguntungkan. Hal ini menjadi penyebab dari logam cair terdorong ke tengah manik las oleh dendrit kolomnar yang mengarah kedepan lasan dan menjadi zona lemah untuk retak (TWI, 2018)

Manik las memiliki penampang yang cukup dalam dan sempit - rasio lebar dan kedalaman lebih besar dari 1: 2 dan pembekuan dendrit mendorong cairan pada titik leleh yang lebih rendah ke bagian tengah manik las sehingga terperangkap. Karena bahan di sekitarnya menyusut akibat pendinginan, lapisan film akan mengalami tegangan tarik, yang berujung terjadinya retak.

Sebaliknya, Gambar 9.12 menunjukkan manik las dengan rasio perbandingan lebar dan kedalaman kurang dari 1: 2. Bentuk manik ini menunjukkan cairan dengan titik leleh yang lebih rendah didorong ke depan dendrit yang mengeras akan tetapi tidak terperangkap di bagian manik las, bahkan di bawah tekanan tarik yang dihasilkan dari proses pendinginan sehingga retak bisa dihindari.



Gambar 9.12 Manik las dengan rasio antara lebar dan kedalaman yang menguntungkan. Dendrit mendorong logam titik leleh terendah ke arah permukaan di pusat tengah bead sehingga tidak membentuk zona bagian tengah yang lemah (TWI, 2018)

Metode pengelasan SAW dan GMAW adalah proses pengelasan busur yang paling mungkin untuk memberikan manik-manik las dengan rasio lebar dan kedalaman yang tidak baik. Selain itu juga, proses pengelasan berkas electron (electron beam) dan pengelasan laser (*laser welding*) sangat peka terhadap jenis retak seperti ini (*solidification cracking*) hasil dari rasio antara kedalaman dan manik las yang sempit. Untuk menghindari kondisi pengelasan yang tidak menguntungkan yang menyebabkan retak solidifikasi pada garis tengah lasan (dari logam las dengan komposisi yang sensitif) mungkin memerlukan perubahan yang signifikan pada parameter pengelasan, seperti mengurangi:

- Arus pengelasan (memberi manik yang lebih dangkal).
- Kecepatan pengelasan (memberi manik las yang lebih luas).

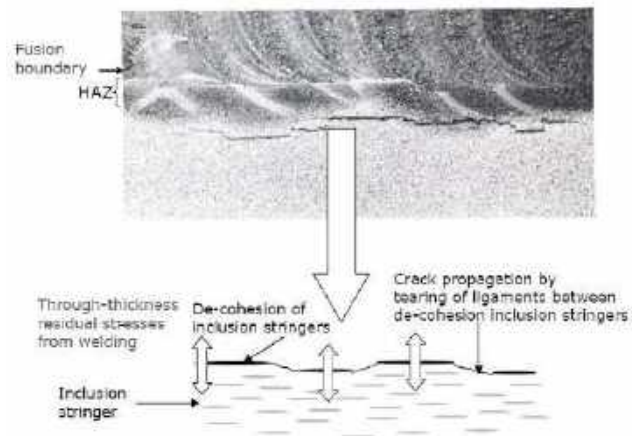
Untuk menghindari kondisi pengelasan yang tidak menguntungkan yang menyebabkan retak kawah (*crater cracking*) dari logam las yang sensitif membutuhkan perubahan pada teknik yang digunakan pada akhir pengelasan ketika busur las diberhentikan, seperti:

- a. Pada proses pengelasan TIG saat menggunakan perangkat slope-out arus dan kedalaman kolam las berkurang secara bertahap sebelum busur dipadamkan (memberikan lebih banyak rasio lebar-dan-kedalaman manik las yang menguntungkan). Hal ini juga merupakan cara umum melakukan mundur sedikit sebelum mematahkan busur atau memperpanjang busur secara bertahap untuk menghindari retak kawah.
- b. Memodifikasi mode pembekuan pada kolam las dengan memasukkan logam pengisi ke dalam kolam las sampai solidifikasi hampir selesai untuk menghindari kawah cekung (*concave crater*).
- c. Saat melakukan pengelasan metode MMA dengan memodifikasi mode pembekuan kolam las dengan berbalik arah pengelasan saat di ujung lasan, sehingga kawah terisi.

9.7 Sobekan lamellar (*Lamellar Tearing*)

Jenis dari retak ini hanya terjadi pada pelat baja atau produk rol lainnya pada bagian bawah lasan. Karakteristik dari sobekan lamelar adalah:

- Retakan hanya terjadi pada produk rol misalnya pelat dan bagiannya.
- Paling umum pada baja karbon C-Mn.
- retak ini biasanya terbentuk dekat tetapi di luar daerah HAZ.
- retak cenderung terletak sejajar dengan permukaan material dan pada batas fusi dari lasan.



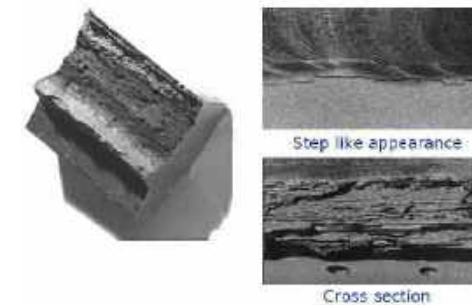
Gambar 9.13 jenis robekan lamellar yang terletak tepat di luar daerah HAZ (TWI, 2018)

Faktor-faktor yang mempengaruhi kerentanan terhadap robekan lamellar tearing

Robekan lamellar terjadi ketika dua kondisi ada pada saat yang sama yaitu:

- Rentan terjadi pada plat rol yang disambungkan dengan proses las.
- Tegangan tinggi terjadi dalam arah ketebalan material yang rentan (dikenal sebagai arah transversal). Pelat baja rol/canai yang rentan terhadap robekan lamellar memiliki keuletan yang sangat rendah dalam arah ketebalannya (*short transversal*) dan hanya mampu mengakomodasi tegangan sisa dari pengelasan dengan robekan daripada regangan plastik.

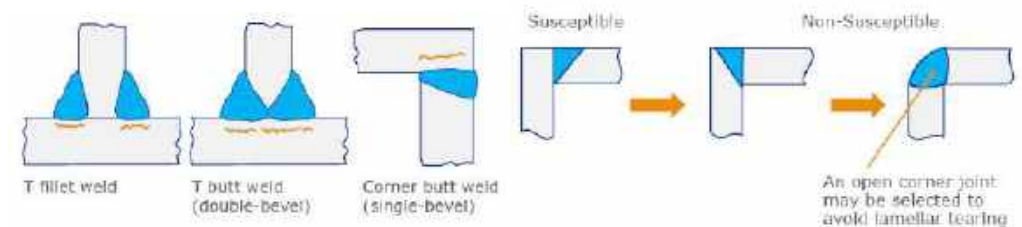
Keuletan yang rendah pada baja produk canai disebabkan oleh adanya banyak inklusi non-logam dalam bentuk balok memanjang. Inklusi yang terbentuk dalam ingot berbentuk plat dan memanjang karena proses pengerolan panas material. Inklusi non-logam yang terkait dengan robekan lamellar pada dasarnya adalah sulfida mangan dan silikat.



Gambar 9.14 bentuk patahan lamellar pada baja karbon (TWI, 2018)

Tegangan pada Baja dengan ketebalan besar

Sambungan las jenis T, K, dan Y pada komponen mengalami tegangan sisa tarik pada arah ketebalan. Besarnya tegangan pada arah ketebalan meningkat seiring dengan peregangan (*rigiditas*) sambungan meningkat. Ketebalan dan ukuran lasan adalah faktor yang mempengaruhi utama dan robekan lamellar lebih mungkin terjadi pada bagian yang tebal dengan penetrasi penuh pada sambungan T, K dan Y.



Gambar 9.15 sambungan yang rentan dan tidak rentan terhadap retak lamellar (TWI, 2018)

9.8 Mekanisme retak

Tegangan yang besar pada arah ketebalan hadir sebagai tegangan sisa pada proses pengelasan yang menyebabkan rangkaian inklusi terbuka (*de-cohese*) dan

ikatan tipis antara inklusi individu yang di-kohesikan kemudian terjadi robek dan menghasilkan tahapan retakan.

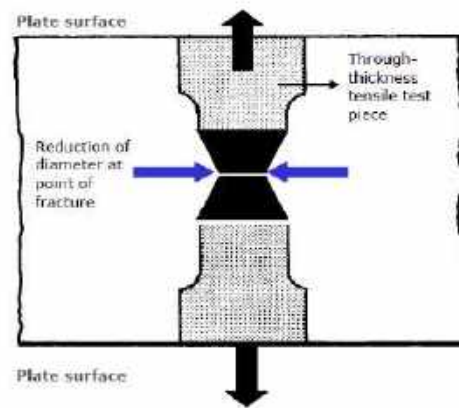
9.9 Menghindari robekan lamelar

Robekan lamelar dapat dihindari dengan mengurangi pengaruh salah satu atau kedua faktor tersebut.

Kerentanan Pada Plat Baja Rol

Pada standar Eropa EN 10164 (Pada produk baja dengan sifat deformasi yang ditingkatkan pada tegak lurus permukaan produk) memberikan panduan tentang pengadaan baja plat untuk menahan robekan lamelar.

Ketahanan terhadap robekan lamelar dapat dievaluasi dengan uji tarik yang diambil dengan tegak lurus sumbu terhadap permukaan pelat (arah ketebalan). Keuletan diukur sebagai % reduksi area (% R dari A) pada titik patah dari spesimen uji tarik (Gambar 6.16).



Gambar 9.16 Benda uji tarik bulat yang diambil dalam arah melintang garis sumbunya (ketebalan pelat) untuk mengukur % R dari A dan menguji ketahanan terhadap sobekan lamellar (TWI, 2018)

Semakin besar % R dari A yang diukur, maka semakin besar resistansi terhadap sobekan lamelar. Jika nilai lebih dari 20% maka menunjukkan resistensi yang baik bahkan bisa dikatakan sangat tinggi terhadap constrained joint. Untuk mengurangi kerentanan dari cacat sobekan lamelar pada baja rol dapat dicapai

dengan memastikan bahwa baja memiliki keuletan searah ketebalan yang baik dengan:

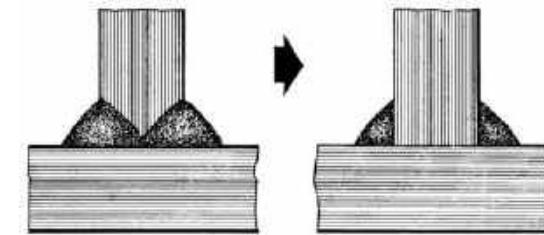
- Menggunakan baja yang mempunyai kandungan sulfur rendah ($<0,015\%$) dan mengakibatkan relatif sedikit adanya inklusi.
- Pengadaan pelat baja yang telah melalui pengujian tarik searah ketebalan yang menunjukkan keuletan searah ketebalan yang baik (seperti EN 10164).

Tegangan searah ketebalan

Tegangan searah ketebalan pada sambungan T, K dan Y pada dasarnya adalah tegangan sisa dari pengelasan, meskipun tegangan tambahan mungkin memiliki beberapa pengaruh. Untuk mengurangi besarnya tegangan kearah ketebalan pada sambungan las tertentu akan memerlukan modifikasi pada sambungan sehingga mungkin tidak praktis karena harus memenuhi persyaratan desain. Namun, metode itu bisa saja dipertimbangkan yaitu:

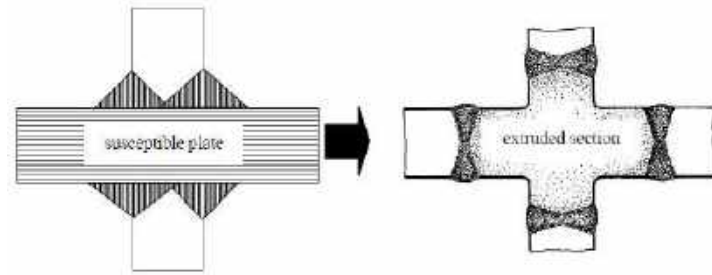
Dengan mengurangi ukuran lasan maka:

- Menggunakan sambungan tumpul parsial sebagai pengganti dari penetrasi penuh.
- Menggunakan lasan fillet sebagai pengganti lasan tumpul dengan penetrasi penuh atau parsial (Gambar 9.17).



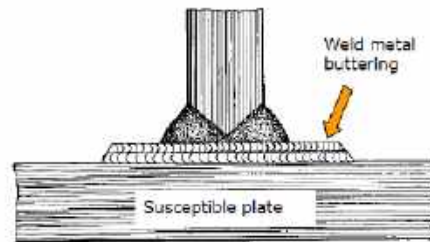
Gambar 9.17 Mengurangi ukuran efektif las akan mengurangi tegangan tembus pada pelat yang rentan dan mungkin cukup untuk mengurangi risiko robekan lamellar (TWI, 2018)

- Menerapkan lapisan *buttering* dari logam las ke permukaan pelat yang rentan sehingga tegangan tembus tertinggi terletak pada logam las dan bukan pelat yang rentan (Gambar 9.18).

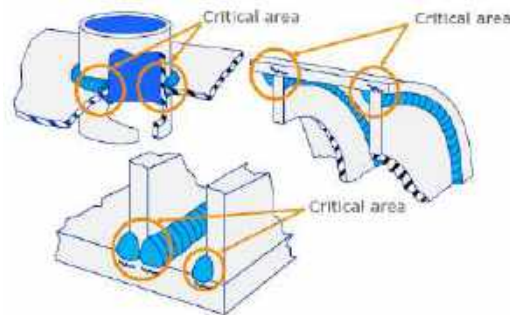


Gambar 9.18 Robekan lamelar dapat dihindari dengan mengubah desain sambungan (TWI, 2018)

- Mengubah desain sambungan, seperti menggunakan perantara yang dipalsukan atau diekstrusi potong sehingga pelat yang rentan tidak mengalami tegangan ketebalan (Gambar 9.19).



Gambar 9.19 Dua lapisan logam las yang biasanya diaplikasikan pada pengelasan MMA ke pelat yang rentan sebelum ujung sambungan T dibuat (TWI, 2018)



Gambar 9.20 daerah kritis yang rentan terhadap retak lamellar (TWI, 2018)

9.10 Kerusakan Logam Las (Weld Decay)

Proses Kejadian

Masalah kegagalan peralatan yang disebabkan oleh korosi, mungkin terjadi pada waktu yang lama (terkait dengan pengelasan tetapi bukan cacat fabrikasi, seperti retak Hidrogen, dll).

Munculnya weld decay

Disebut kerusakan las (weld decay) dikarenakan zona sempit pada daerah HAZ dapat sangat terkorosi tetapi pada area sekitarnya (logam las dan logam induk) mungkin tidak terpengaruh. Jenis kerusakan ini hanya memengaruhi beberapa jenis baja tahan karat austenitik. Jenis kerusakan pada logam las ini bisa terjadi jika ada dua faktor sekaligus yaitu:

- ❖ HAZ Sensitif.
- ❖ Cairan korosif yang kontak dengan HAZ sensitif.

Menghindari Jenis Kerusakan Las

Karakteristik dari daerah HAZ yang sensitif dan mekanisme kegagalan ini seperti:

- ❖ Biasanya terjadi pada baja tahan karat yang bukan memiliki kandungan karbon rendah (grade L) misalnya 304 dan 316.
- ❖ Daerah HAZ menjadi sensitif terhadap serangan korosi karena karbida kromium terbentuk pada batas butir di daerah HAZ sehingga secara lokal
- ❖ Lebih rentan terhadap degradasi HAZ, semakin banyak lasan yang dipasang pada sambungan, bagian yang lebih tebal (lebih banyak siklus termal dan HAZ menghabiskan lebih banyak waktu dalam kisaran suhu tempat terbentuknya karbida).

Mengurangi Ketahanan Korosi Pada Daerah HAZ.

- ❖ Gunakan baja tahan karat austenitic dengan nilai kandungan karbon rendah (304 dan 316L) karena tidak cukup karbon untuk membentuk sejumlah besar karbida Crom selama pengelasan, sehingga ketahanan korosi tidak terdegradasi.
- ❖ Gunakan baja tahan karat yang lebih stabil (tipe 321 dan 347) yang mana mengandung titanium 321 dan jenis 347 dengan kandungan Niobium yang

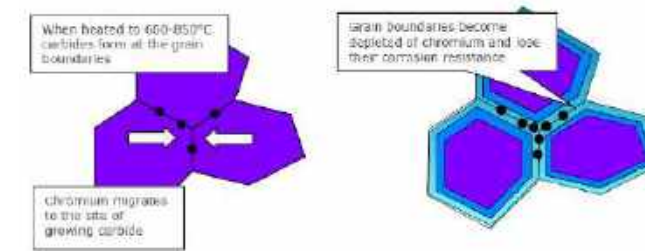
bergabung dengan karbon daripada efek Cr sehingga tidak mempengaruhi pengurangan terhadap ketahanan korosi lokal.

- ❖ Jika pengelasan pada baja tahan karat dengan kandungan karbon lebih tinggi, gunakan pengelasan dengan masukan panas rendah dan pengelasan berjalan sesingkat mungkin (dengan waktu yang lebih sedikit dalam kisaran suhu tertentu maka karbida Cr sulit terbentuk).
- ❖ Dimungkinkan untuk menghilangkan sensitivitas daerah HAZ dengan proses solution heat treatment pada logam yang dilas. Proses perlakuan panas ini memerlukan suhu 1050-1100°C (hal ini memiliki kesulitan secara teknis).

Kerusakan karena Efek Lingkungan

- Korosi pada daerah HAZ ditentukan oleh kondisi layanan, jenis bahan kimia, dan suhu.
- Masalah tidak diselesaikan dengan mencoba mengatasi kondisi layanan tetapi dengan pemilihan material, dengan mempertimbangkan efek dari proses pengelasan/ parameter pengelasan. *Weld decay* juga disebut juga dengan sensitisasi atau korosi antar kristal, biasanya rentan terjadi dalam kisaran suhu sekitar 600-850°C, yaitu di daerah HAZ atau selama pemakaian pada suhu tinggi. Pada suhu ini, karbon berdifusi kebatas butir dan bergabung dengan kromium untuk membentuk karbida, meninggalkan lapisan Cr yang rentan terhadap korosi di sepanjang batas butir, oleh karena itu keretakan korosi terjadi di sepanjang batas butir pada daerah HAZ.

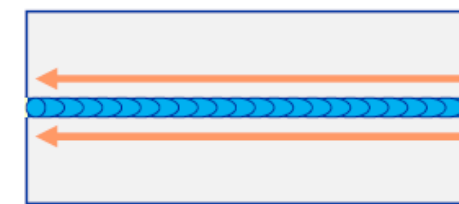
Weld decay dapat dihindari dengan menjaga karbon serendah mungkin, misalnya menggunakan kadar karbon rendah seperti 304L dan menggunakan input panas yang rendah dengan menghindari pemanasan awal (*preheat*) atau PWHT. Dimungkinkan juga untuk menggunakan jenis tipe baja tahan karat dengan elemen tambahan yang dikombinasikan dengan karbon misalnya 321 (yang mengandung Ti) atau 347 (yang mengandung Nb).



Gambar 9.21 proses sensitisasi pada baja tahan karat (TWI, 2018)

Intergranular Korosi

Jenis retak ini merupakan jenis korosi *intergranular* dimana biasanya menyerang pada daerah HAZ (Weld HAZ) searah horizontal pada Baja tahan karat dimana terjadi sensitisasi pada batas butir. Korosi intergranular ini terjadi ketika pada area di HAZ yang telah disensitisasi oleh pembentukan karbida kromium. Area ini berbentuk garis paralel sejajar pada kedua sisi lasan. Hal Ini dikarenakan menipisnya kromium yang akan membuat butir yang rendah kromium oksida ini akan menghasilkan korosi pada baja tahan karat. Jika hal ini tidak segera diatasi maka korosi dan kegagalan akan cepat berkembang.



Gambar 9.22 daerah terjadinya sensitisasi pada daerah HAZ (arah garis tanda panah) (TWI, 2018)

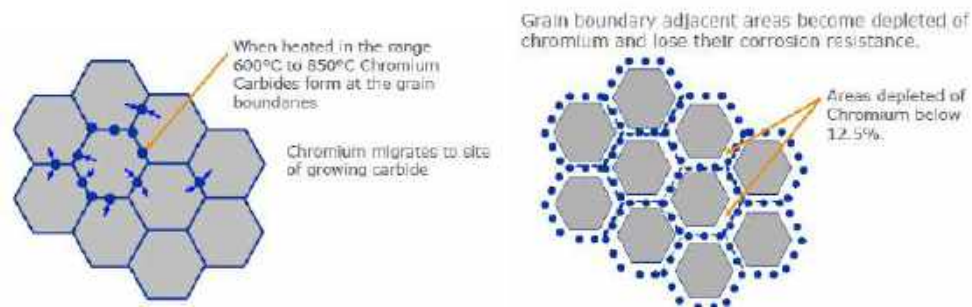
Selama pengelasan baja tahan karat, area butiran kecil di daerah HAZ, yang sejajar dengan lasan membentuk kromium karbida pada batas butir. Hal ini menyebabkan kekosongan krom oksida pada butir yang menyebabkan ketahanan korosi pada baja tahan karat. Bisa dikatakan bahwa baja telah menjadi peka atau telah menjadi sensitif terhadap korosi.

Untuk mencegah terjadinya jenis korosi ini maka dengan cara:

1. Gunakan baja tahan karat yang lebih stabil
2. Gunakan baja tahan karat rendah karbon (dibawah 0.04%)
3. Baja tahan karat yang peka bisa tidak sensitif dengan cara memanaskannya di atas 1100 °C di mana krom karbida akan larut. Baja ini biasanya diquench dari suhu ini untuk menghentikan penumpukan karbida crom pada batas butir.

Kerusakan las pada korosi intergranular atau serangan garis pisau (knife line), dapat terjadi pada baja stainless austenitik.

- Terjadi pada kisaran kritis 600-850 ° C presipitasi kromium karbida di batas butir terjadi.
- Pada kisaran suhu ini kromium diserap oleh karbon di batas butir, yang menyebabkan penipisan lokal kandungan kromium didaerah yang berdekatan.
- Menipisnya kandungan kromium pada daerah yang terkena dampak menghasilkan penurunan suatu material terhadap ketahanan serangan korosi, yang memungkinkan terjadi karat.

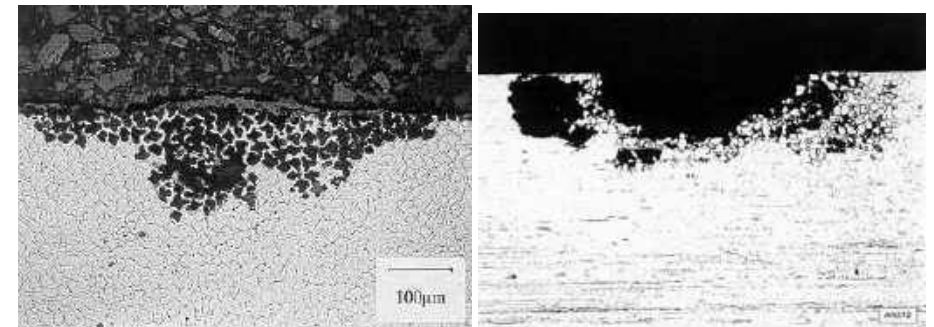


Gambar 9.23 proses terjadinya weld decay korosi intergranular (TWI, 2018)

Tindakan pencegahan yang harus dilakukan terhadap kerusakan las pada baja tahan karat adalah dengan:

- Menggunakan baja nirkarat dengan kandungan karbon rendah misalnya 304L, 316L, karena jumlah karbon bebas dalam paduan adalah cukup rendah untuk memastikan bahwa Cromium carbida terbentuk minimal dan karenanya kepekaan biasanya tidak signifikan selama pengelasan.

- Baja tahan karat yang distabilkan misalnya tipe AISI 321, 347, 348 yang direkomendasikan untuk kondisi korosif parah dan kondisi operasi suhu tinggi, paduan ini mengandung Ti atau Nb, untuk membentuk karbida istimewa untuk Cr.
- Jenis baja tahan karat tipe austenitic mungkin harus membutuhkan PWHT, ini dengan memanaskan material pada suhu lebih dari 1100 ° C dan diquench, hal ini untuk mengembalikan kandungan kromium dibatas butir, kelemahan utama perlakuan panas ini adalah tingginya jumlah distorsi.



Gambar 9.24 korosi intergranular pada baja tahan karat (TWI, 2018)

Bab 10

Perlakuan Panas (Heat Treatment)

10.1 Pendahuluan

Perlakuan panas yang diberikan pada baja yang dilakukan oleh produsen baja/ pemasok harus ditunjukkan pada sertifikat uji material dan dapat disebut sebagai kondisinya. Seorang *Welding Inspector (WI)* pengelasan mungkin perlu merujuk pada sertifikat uji material sehingga harus terbiasa dengan terminologi yang digunakan dan memiliki pemahaman tentang prinsip-prinsip beberapa perlakuan panas yang paling umum diterapkan. Sambungan yang dilas mungkin perlu dikenakan perlakuan panas setelah pengelasan (PWHT) dan tugas-tugas pemantauan siklus termal dan memeriksa catatan perlakuan panas sering didelegasikan ke inspektur pengelasan.

Ada beberapa alasan mengapa harus melakukan perlakuan panas pada baja yaitu

- Meningkatkan sifat mekanik.
- mengubah struktur mikro.
- Mengurangi tingkat tegangan sisa.
- merubah komposisi kimia

Ada beberapa teknik yang digunakan untuk melakukan perlakuan panas yaitu:

- Oven nyala api.
- Oven listrik/ selimut pemanas listrik.
- Elemen pemanas induksi / HF

10.1.1 Perlakuan Panas dengan Gas (*Gas furnace heat treatment*)

Keuntungan menggunakan teknik perlakuan panas dengan gas furnace:

- Mudah diatur.
- Mudah dipindah-pindahkan.
- Pengulangan dan suhu keseragaman.

Kekurangan:

- Terbatas pada ukuran logam yang akan dipanaskan.



Gambar 10.1 Gas furnace heat treatment(TWI, 2018)

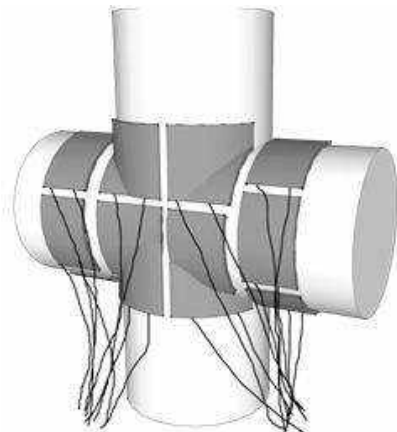
10.1.2 Perlakuan Panas menggunakan Selimut Elektrik (*electric heating blankets*)

Keuntungan:

- Kemampuan untuk memvariasikan panas.
- Kemampuan untuk terus menerus mempertahankan panas.

Kekurangan:

- Elemen dapat terbakar atau melengkung selama pemanasan.



Gambar 10.2 perlakuan panas dengan heating blankets (TWI, 2018)

10.1.3 Perlakuan Panas HF

Keuntungan:

- Tingkat pemanasan tinggi.
- Kemampuan memanaskan pada bidang sempit.

Kekurangan:

- Peralatan dengan biaya tinggi.
- Peralatan besar, kurang portabel.

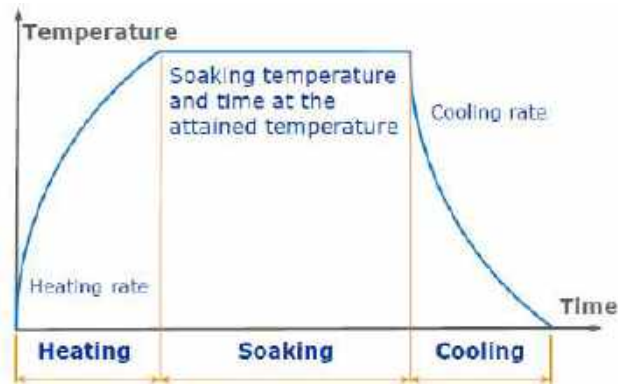


Gambar 10.3 HF local heat treatment(TWI, 2018)

Inspektur las, secara umum harus memastikan beberapa hal berikut sebelum melakukan perlakuan panas yaitu:

- Peralatan yang digunakan seperti yang ditentukan.
- Peralatan untuk mengontrol suhu dalam kondisi baik.
- Prosedur sebagaimana ditentukan, sedang digunakan misalnya.
- Metode yang digunakan.
- Tingkat pemanasan dan pendinginan.
- Suhu maksimum.
- waktu pencelupan.
- Pengukuran suhu (dan kalibrasi).
- Dokumentasi dan catatan.

Variabel untuk proses perlakuan panas harus dikontrol dengan hati-hati dimana tempertur pemanasan dan waktu tahan sangat menentukan proses perlakuan panas ini seperti pada gambar (10.4) dibawah.



Gambar 10.4 proses perlakuan panas (tempertur vs waktu) (TWI, 2018)

Ada beberapa hal yang harus dilakukan dalam proses perlakuan panas yaitu:

- Berikan dukungan yang memadai (YS rendah pada suhu tinggi).
- Kontrol laju pemanasan untuk menghindari ekspansipanas yang tidak merata.
- Kontrol waktu pencelupan untuk mendapatkan suhu yang diinginkan.
- Gradien control suhu - Tidak boleh ada nyala langsung.
- Mengontrol atmosfer didalam tungku untuk mengurangi scaling.
- Kontrol laju pendinginan untuk menghindari pembentukan struktur yang rapuh.

Banyak logam harus diberi perlakuan panas sebelumnyadan setelah pengelasan. Fungsi inspektur las adalah untuk memastikan bahwa perlakuan panas diberikan dengan benar sesuai dengan spesifikasi atau sesuai perincian yang diberikan. Jenis perlakuan panas yang sering dilakukan pada proses pengelasan yaitu:

1. Pemanasan awal (preheat).
2. Annealing.
3. Normalisasi.
4. Pencelupan untuk pengerasan (quench hardening).
5. Penempaan (Tempering).
6. Menghilangkan tegangan (stress relief).

10.2 Perlakuan Panas Preheat

Proses *preheat* digunakan untuk meningkatkan kemampuan las, dengan mengurangi penurunan suhu secara tiba-tiba, dan kontrol kekuatan ekspansi dan kontraksi selama pengelasan.

Perlakuan panas pasca pengelasan (Post Weld Heat Treatment)

Perlakuan panas jenis ini digunakan untuk mengubah sifat las logam, mengendalikan pembentukan struktur Kristal setelah pegelasan logam.

10.2.1 Proses Preheat:

- a. Kita dapat memanaskan logam dan paduan saat pengelasan untuk sejumlah alasan. Terutama dengan menggunakan sebagian besar pemanasan awal mencapai satu atau lebih hal berikut ini:
- b. Untuk mengontrol struktur logam las dan HAZ saat pendinginan.
- c. Untuk memperbaiki difusi molekul gas melalui struktur suatu atom.
- d. Mengontrol efek ekspansi dan kontraksi.
- e. Preheat untuk mengontrol pembentukan mikro struktur yang tidak diinginkan yang dihasilkan dari pendinginan cepat pada jenis baja tertentu. Struktur Martensit adalah bentuk butir yang tidak diinginkan dimana strukturnya sangat keras dan rapuh diproduksi dengan pendinginan cepat terbentuk pada daerah austenit.

Temperatur yang digunakan pada proses preheat dengan pertimbangan sebagai berikut:

- a. Input panas.
- b. karbon ekuivalen (CE).
- c. Ketebalan material sambungan.
- d. Skala kandungan hidrogen (A, B, C, D).

Adapun persyaratan penerapan perlakuan panas preheat pada proses pengelasan yaitu:

- Input panas pengelasan meningkat - Dikurangi.
- Karbon ekuivalen Meningkat - Meningkat.
- Kandungan Hidrogen Meningkat - Meningkat.
- Ketebalan material gabungan meningkat -Meningkat.

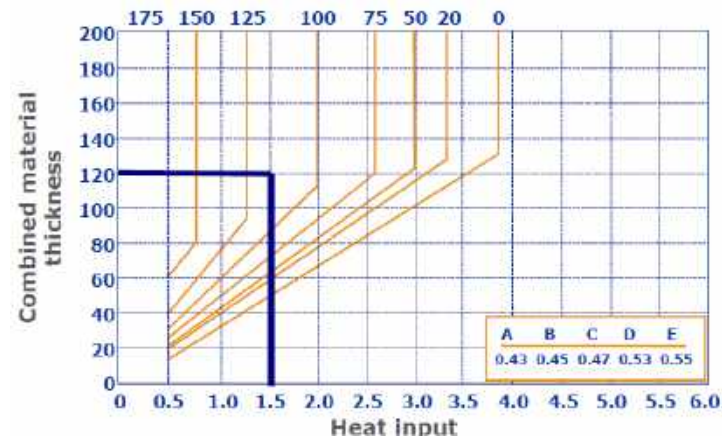
Suhu yang digunakan untuk baja adalah:

- Proses: Perlakuan panas preheat untuk pengelasan.

- Suhu: 50-250 °C lebih tinggi dengan pengecualian.
- Pendinginan: penahanan selama pengelasan.
- Hasil: Mencegah retak dan zona yang keras .

Keuntungan dari penerapan pemanasan awal (preheat):

- Memperlambat laju pendinginan, yang mengurangi risiko pengerasan.
- Memungkinkan terserapnya hidrogen yang berpeluang menyebar, sehingga mengurangi risiko retak.
- Menghilangkan kelembaban dari material yang ada pada lasan.
- Meningkatkan karakteristik fusi keseluruhan.
- Menurunkan tegangan antara logam las dan material induk dengan memastikan ekspansi dan kontraksi lebih seragam



Gambar 10.5 perbandingan preheat pada baja (TWI, 2018)

10.2.2 Aplikasi dan Kontrol Preheat

Preheat adalah penerapan panas dari sambungan seketika sebelum pengelasan dan biasanya diterapkan dengan *torch gas* atau sistem induksi, meskipun metode lain dapat digunakan. Preheat digunakan saat pengelasan baja untuk sejumlah alasan dan membantu proses pengelasan. Salah satu alasan utama adalah untuk membantu menghilangkan hidrogen dari lasan. Suhu preheat untuk struktur baja dan perpipaan dikalkulasikan dengan memperhitungkan kesetaraan karbon (CEV) dan ketebalan material serta energi busur atau input panas (kJ/ mm) dari proses pengelasan.

Pada Standar Eropa untuk proses preheat (BS EN 1011) memberi rekomendasi pada proses pengelasan bahan logam untuk panduan pemilihan rentang suhu preheat berdasarkan nilai CEV, ketebalan material, energi busur/ input panas dan level terendah dari hidrogen yang didifusi. Inspektur pengelasan biasanya akan menentukan suhu preheat yang sesuai untuk aplikasi tertentu dari WPS yang relevan. Secara umum, bahan yang lebih tebal membutuhkan suhu pemanasan awal yang lebih tinggi, tetapi untuk nilai CEV dan input energi/ panas busur yang diberikan, mereka cenderung tetap sama untuk ketebalan dinding hingga sekitar 20 mm.

10.2.3 Suhu Preheat

- Suhu benda kerja di zona lasan harus tercapai sebelum operasi pengelasan (termasuk pengelasan tack welding).
- Biasanya dinyatakan sebagai suhu minimum tetapi juga dapat ditentukan pada rentang suhu tertentu.

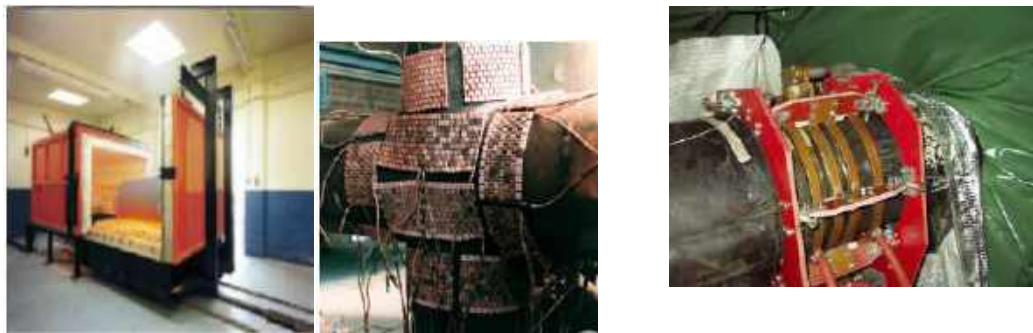
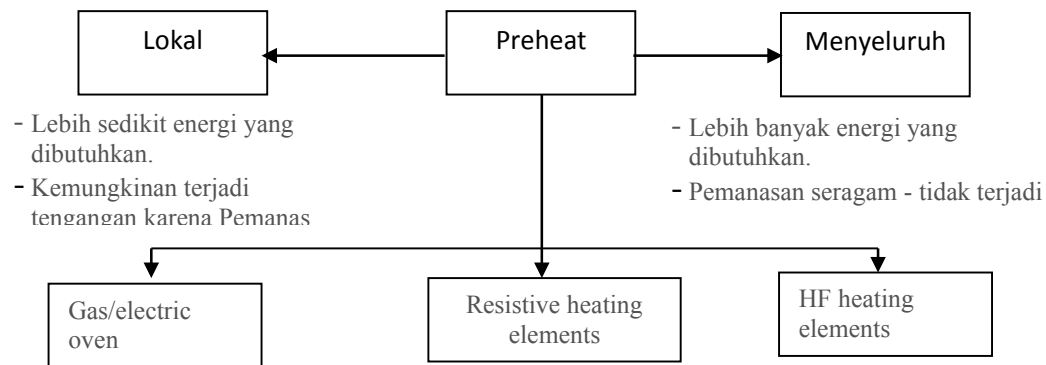
Temperatur interpass

- Temperatur lasan selama pengelasan dan di antara satu lintasan dalam lasan multi lintasan dan logam induk yang berdekatan segera sebelum penerapan lintasan berikutnya.
- Biasanya dinyatakan sebagai maksimum tetapi tidak boleh lebih rendah di bawah suhu pemanasan awal minimum.

Menjaga suhu Preheat

- Suhu minimum di zona lasan harus dipertahankan jika pengelasan terhenti.
- Suhu preheat harus tetap dipantau selama terhentinya pengelasan.

10.2.4 Penerapan dari Proses Preheat



Preheat dengan pemanasan dengan Flame



Gambar 10.6 jenis proses perlakuan panas (TWI, 2018)

Oven gas/ listrik umumnya digunakan untuk proses PWHT tetapi dapat digunakan untuk pemanasan bagian yang besar dari bahan untuk memberikan pemanasan awal yang terkontrol dan seragam. Sedangkan **Elemen pemanas** menggunakan arus listrik yang mengalir melalui koil resistansi.

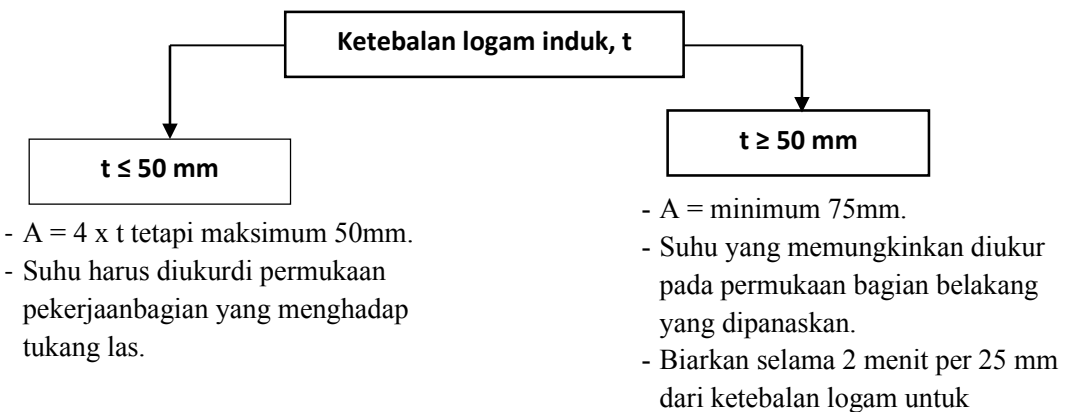
Elemen pemanas frekuensi tinggi memberikan efek pemanasan dihasilkan secara elektrostatis yang menghasilkan pemanasan seragam melalui massa material. Panas dihasilkan oleh agitasi molekul di dalam material saat mengalami bidang frekuensi tinggi.

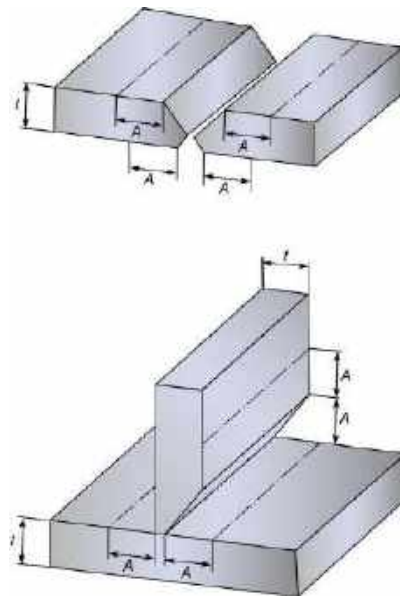
Pemanasan Preheat Dengan Flame

Metode ini mungkin paling umum diterapkan pada pemanasan awal (preheat) menggunakan torch las atau burner. Oksigen adalah merupakan bagian penting dari pemanasan awal dengan nyala api karena mendukung pembakaran tetapi bahan bakar berbentuk gas dapat berupa asetilena, propana atau metana (gas alam). Dengan nyala api yang diterapkan, pemanasan awal yang cukup harus diizinkan untuk suhu yang sama pada seluruh ketebalan komponen yang akan dilas, jika tidak hanya suhu permukaan yang akan diukur. Selang waktu preheat tergantung pada persyaratan spesifikasi bahan yang digunakan.

Kontrol pemanasan awal dan suhu interpass

Pengontrolan suhu preheat dilakukan tepat sebelum dilakukan pengelasan dan diukur dibagian dekat lasan.





Gambar 10.7 HAZ pada logam las dan logam induk (TWI, 2018)

Temperatur interpass diukur pada logam las atau logam induk yang berbatasan langsung. Menerapkan preheat memiliki keuntungan sebagai berikut:

- Memperlambat laju pendinginan las dan HAZ, mengurangi risiko pembentukan struktur mikro yang mengeras; memungkinkan hidrogen terserap lebih banyak kesempatan untuk menyebar, sehingga mengurangi potensi retak.
- Menghilangkan kelembaban dari wilayah persiapan lasan.
- Meningkatkan karakteristik fusi keseluruhan selama pengelasan.
- Memastikan ekspansi dan kontraksi yang lebih merata, menurunkan tekanan antara bahan las dan induk.

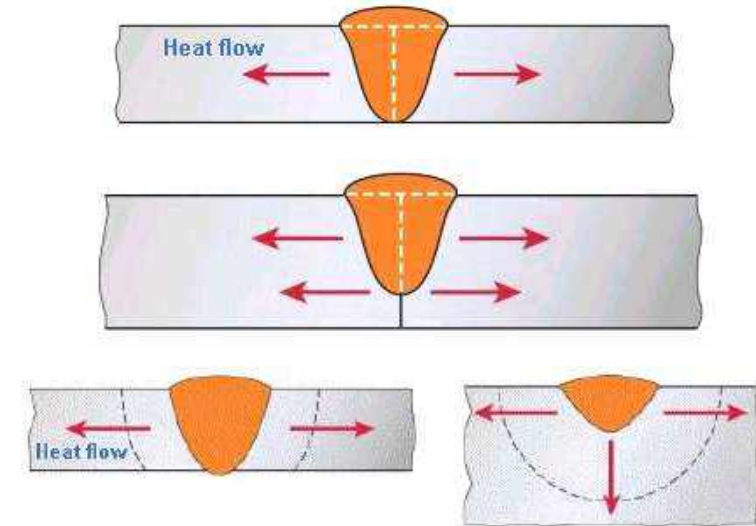
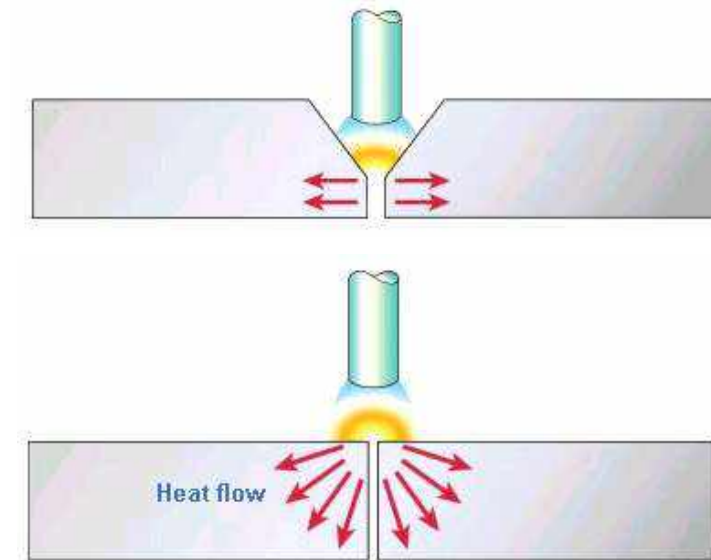


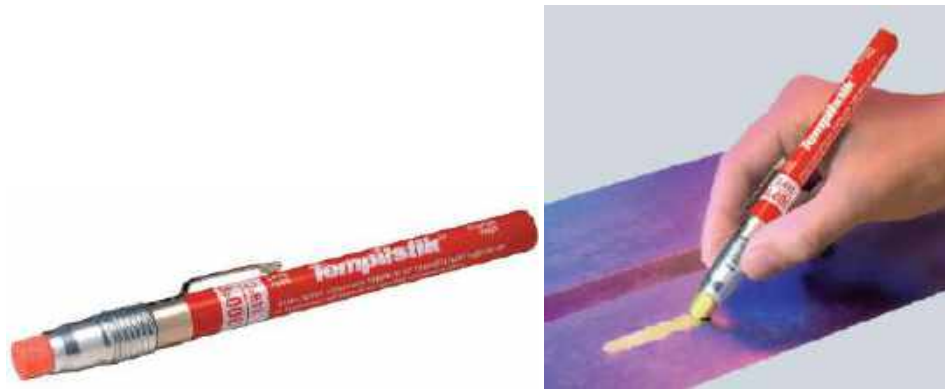
Figure 10.8 aliran panas dua dimensional. Figure (TWI, 2018)



Gambar 10.9 aliran panas pada proses pengelasan (TWI, 2018)

10.2.5 Bahan sensitif suhu

- Terbuat dari lilin khusus yang meleleh pada suhu tertentu (Tempilstik TM) atau perubahan warna ireversibel (Thermochrome TM).
- Murah, mudah digunakan.
- Tidak mengukur suhu aktual.



Gambar 10.10 Contoh mengukur suhu dengan tempilsik (TWI, 2018)

10.2.6 Termometer kontak

- Menggunakan strip bimetal atau termistor (yaitu peka terhadap suhu resistor yang resistansinya bervariasi berbanding terbalik dengan suhu baja).
- Akurat, memberikan suhu aktual.
- Perlu kalibrasi.
- Digunakan untuk suhu sedang (hingga 350 C).

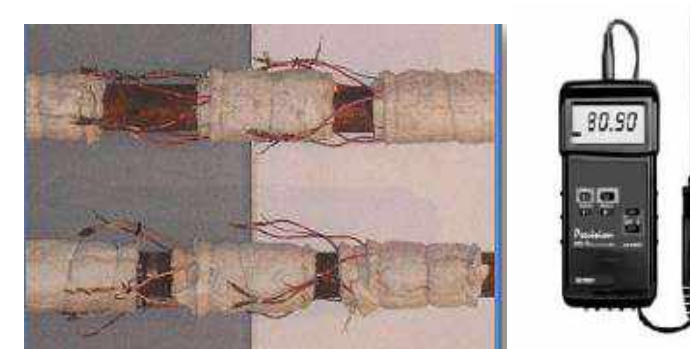


Gambar 10.11 Contoh termometer kontak (TWI, 2018)

10.2.7 Termokopel

- Berdasarkan pengukuran perbedaan potensial termoelektrik antara simpangan panas (ditempatkan pada lasan) dan sambungan yang dingin (persimpangan referensi).
- Mengukur berbagai suhu.
- Akurat, memberikan suhu aktual.

- Dapat digunakan untuk pemantauan berkelanjutan.
- Perlu kalibrasi.



Gambar 10.12 Contoh termokopel(TWI, 2018)

10.2.8 Perangkat optik atau listrik untuk pengukuran tanpa kontak

- Dapat berupa sinar inframerah atau pirometer optik.
- mengukur energi radiasi yang dipancarkan oleh tubuh panas.
- Dapat digunakan untuk pengukuran jarak jauh.
- Sangat kompleks dan mahal.
- Biasanya digunakan untuk mengukur suhu tinggi.



Gambar 10.13 Contoh peralatan pengukur suhu tanpa kontak (TWI, 2018)

10.3 Ringkasan

Inspektur visual/ pengelasan harus merujuk pada WPS untuk pemanasan awal dan persyaratan suhu interpass. Jika ada keraguan ke mana pengukuran suhu harus diambil, inspektur pengelasan senior atau insinyur pengelasan harus dikonsultasikan untuk memberi bimbingan. Temperatur preheat dan interpass diterapkan untuk memperlambat laju pendinginan selama pengelasan, menghindari pembentukan mikro rapuh (yaitu fase martensite) dan dengan demikian mencegah retak dingin. Temperatur pemanasan (preheat) dapat dihitung dengan menggunakan berbagai metode seperti dijelaskan dalam berbagai standar (misalnya BS EN 1011-2, AWS D1.1, dan lain-lain) dan divalidasi selama kualifikasi prosedur pengelasan. Menurut BS EN ISO 15614 dan ASME IX baik pemanasan awal dan suhu interpass dianggap variabel penting maka setiap perubahan di luar rentang kualifikasi memerlukan kualifikasi prosedur yang baru.

10.4 Perlakuan panas pasca Pengelasan/ Post Weld Heat Treatment (PWHT)

Perlakuan panas pasca pengelasan harus diterapkan pada beberapa baja yang dilas untuk memastikan bahwa sifat-sifat las cocok untuk aplikasi. Suhu di mana PWHT biasanya dilakukan jauh di bawah suhu di mana perubahan fasa dapat terjadi (lihat Catatan), tetapi cukup tinggi untuk memungkinkan tegangan sisa dapat dihilangkan dengan cepat dan untuk melunakkan (temper) setiap daerah keras di HAZ.

Catatan Ada keadaan ketika sambungan las mungkin perlu dinormalisasi untuk mengembalikan ketangguhan HAZ, ini relatif jarang dan perlu untuk memastikan bahwa bahan habis pakai las dipilih dengan hati-hati karena normalisasi secara signifikan akan mengurangi kekuatan logam las.

Manfaat utama mengurangi tegangan sisa dan memastikan bahwa kekerasan pada daerah HAZ tidak terlalu tinggi untuk baja untuk aplikasi layanan tertentu adalah dengan:

- Meningkatkan ketahanan sambungan terhadap patah tulang getas.

- Meningkatkan ketahanan sambungan terhadap korosi retak tegang (stress corrosion cracking).
- Memungkinkan sambungan las untuk dikerjakan dengan mesin untuk toleransi dimensi yang akurat.

Karena alasan utama dan manfaat PWHT adalah untuk mengurangi tegangan sisa, PWHT sering disebut stress relief/menghilangkan stres.

10.4.1 PWHT thermal cycle

Standar aplikasi/code akan spesifik ketika membutuhkan PWHT untuk memberikan suatu keuntungan diatas dan juga memberikan petunjuk langkah pemanasan yang musti digunakan.

- Maksimum laju pemanasan.
- Batasan temperature pencelupan
- Waktu minimum temperature pemanasan (soak temperature)
- Maksimum laju pendinginan (cooling rate).

Bab 11

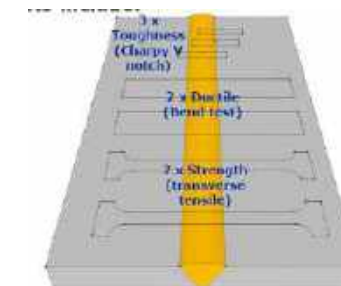
Pengujian Merusak (Destructive Test)

11.1 Pendahuluan

Standar pengelasan untuk negara-negara Eropa (standar EN) mengharuskan test kupon (*test coupons*) dibuat untuk kualifikasi prosedur pengelasan (welding procedure qualification) menurut standar EN (BS EN 15614) dan kualifikasi juru las (*welder*) mengikuti standar (EN ISO 9606). Pengujian yang dilakukan seperti pengujian non-destruktif dan kemudian pengujian merusak (*destruktive*). Pengujian disebut uji destruktif karena sambungan las rusak ketika berbagai jenis benda uji diambil darinya. Tes destruktif dapat dibagi menjadi dua kelompok, yang digunakan yaitu:

- Mengukur sifat mekanis - tes kuantitatif.
- Nilai kualitas sambungan - tes kualitatif.

Uji mekanis bersifat **kuantitatif** karena data hasil kuantitasnya diukur, sifat mekanisnya seperti kekuatan tarik, kekerasan atau ketangguhan benturan. Sedangkan uji **kualitatif** digunakan untuk memverifikasi bahwa sambungan bebas dari cacat, kualitas dan contoh-contoh ini adalah uji lengkung, pemeriksaan makroskopis, dan tes merusak (*fraktur fillet dan nick-break*). Contoh cara pengambilan dan banyaknya specimen pada pengelasan baja lembaran ditunjukkan pada gambar dibawah.

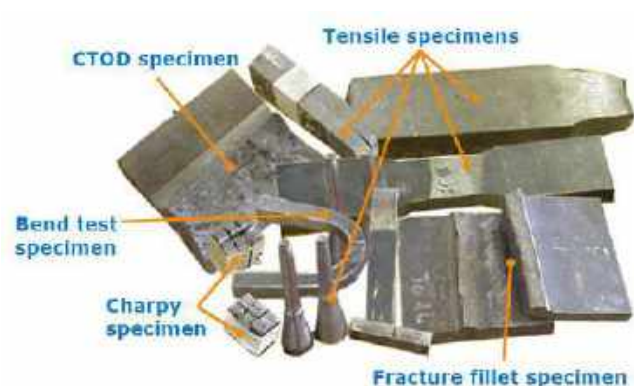


Gambar 11.1 cara pengambilan sampel uji merusak (destructive test) pada baja lembaran (TWI, 2018)

11.2. Jenis Pengujian, Jumlah dan Tujuan

Berbagai jenis uji mekanis digunakan oleh pabrik/ pemasok material untuk memverifikasi bahwa pelat, pipa, material tempa, dll memiliki nilai propertis minimum yang ditentukan untuk grade tertentu. Seorang engineer dalam mendesain biasanya menggunakan nilai propertis minimum yang tercantum untuk kelas material tertentu sebagai dasar untuk desain dan desain yang paling hemat biaya didasarkan pada asumsi bahwa sambungan las memiliki sifat yang tidak lebih buruk daripada logam dasar.

Tes kuantitatif (mekanis) yang dilakukan untuk kualifikasi prosedur pengelasan dimaksudkan untuk menunjukkan bahwa sifat sambungan memenuhi persyaratan desain. Penekanan pada sub-bagian berikut adalah pada pengujian destruktif dan metode pengujian yang banyak digunakan untuk sambungan las (gambar 11.2).



Gambar 11.2 berbagai jenis pengujian merusak hasil pengelasan baja (TWI, 2018)

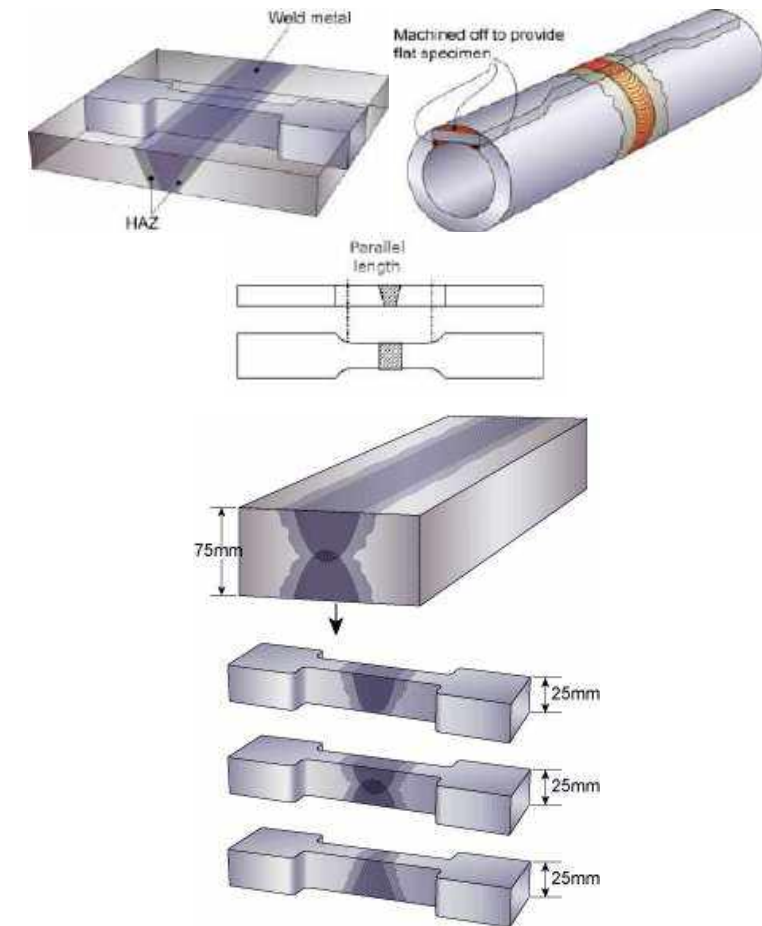
11.3. Jenis Pengujian

11.3.1 Uji tarik melintang (Transverse tensile tests)

Tujuan pengujian tarik bagi kualifikasi prosedur pengelasan selalu membutuhkan uji tarik melintang (*transversal*) untuk menunjukkan bahwa kekuatan sambungan memenuhi kriteria desain.

Spesimen uji tarik transversal secara spesifik diatur oleh suatu standar, untuk Standar Pengelasan Eropa pengujian ini diatur pada standar (EN 895), dimana ditentukan dimensi untuk uji tarik melintang (gambar 11-3), spesimen uji pada

permukaannya harus bebas dari goresan. Benda uji dapat dikerjakan untuk mewakili ketebalan penuh sambungan tetapi untuk sambungan sangat tebal mungkin perlu mengambil beberapa spesimen uji tarik melintang untuk dapat menguji ketebalan penuh.



Gambar 11.3. pengambilan spesimen pada hasil pengelasan a) pada baja dengan bentuk plat, b) pada pipa baja pengujian tarik transversal dan c) sambungan parallel dan d) pada sambungan silang (TWI, 2018)

Metode Pengujian

Spesimen uji diukur secara akurat sebelum pengujian, kemudian dipasang ke rahang mesin uji tarik dan mengalami gaya tarik yang terus meningkat hingga spesimen patah/fraktur. Kekuatan tarik (R_m) dihitung dengan membagi beban

maksimum dengan luas penampang benda uji, yang diukur sebelum pengujian. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengukur kekuatan tarik sambungan dan dengan demikian menunjukkan bahwa dasar untuk desain, sifat-sifat logam dasar, tetap menjadi kriteria yang valid.

Kriteria penerimaan (acceptance criteria)

Jika benda uji putus pada logam lasan, dapat diterima asalkan kekuatan yang dihitung tidak kurang dari kekuatan tarik minimum yang ditentukan, yang biasanya minimum yang ditentukan untuk tingkat bahan logam dasar. Dalam standar US code ASME IX, jika spesimen uji patah di luar zona lasan atau fusi pada tegangan di atas 95% dari kekuatan logam dasar minimum, hasil pengujian dapat diterima.

Untuk mengukur kekuatan tarik maksimum (UTS) dapat digunakan pers (11-1):

$$UTS = \frac{\text{beban } F (N)}{\text{luas area } A (mm^2)} \quad (11.1)$$

Sedangkan untuk menghitung persentase elongasi dapat dihitung dengan pers (11-2)

$$\text{elongasi} = \frac{\text{perubahan panjang}}{\text{panjang awal}} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (11.2)$$

Contoh

Hitunglah kekuatan tarik maksimum (UTS) baja yang telah dilas jika beban yang diberikan untuk mematahkan baja yang dilas sebesar 220 kN dimana spesimen berbentuk persegi berukuran 25 mm x 12 mm.

Jawab

$$UTS = \frac{\text{Beban}}{\text{Luas Penampang}} = \frac{220.000 \text{ N}}{25 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}} = 733,33 \text{ N/mm}^2$$

Contoh:

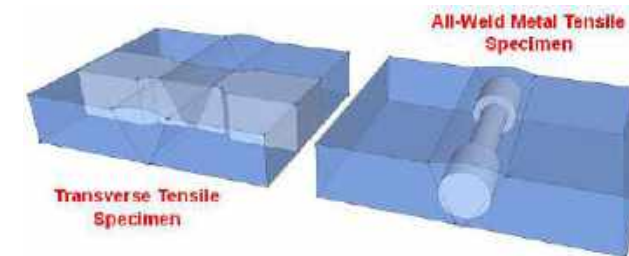
Hitunglah besarnya persentase elongasi pada baja yang dilas dimana panjang awal 50 mm dan panjang setelah patah yaitu 64 mm.

Jawab

$$\begin{aligned} \text{elongasi} &= \frac{64 - 50}{50} \times 100\% \\ &= \frac{14}{50} = 28\% \end{aligned}$$

11.3.2. Uji Kekuatan Tarik Logam Las

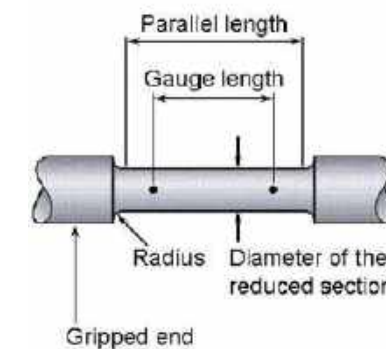
Kadang-kadang perlu untuk mengukur kekuatan logam las sebagai bagian dari kualifikasi prosedur pengelasan (welding procedure qualification), terutama untuk desain pada suhu tinggi. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kekuatan tarik dan juga kekuatan yield dan keuletan logam las. Semua spesimen uji kekuatan tarik logam las dilakukan secara berkala oleh produsen pembuat bahan habis pakai (welding consumable) untuk memverifikasi elektroda dan filer pengisi apakah memenuhi sifat tarik yang ditentukan oleh suatu standar yang disertifikasi.



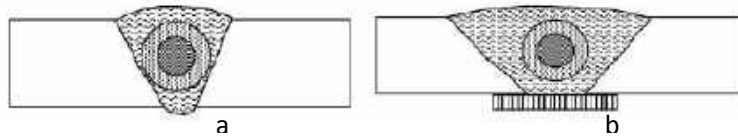
Gambar 11.4 Cara pengambilan spesimen uji tarik pada hasil pengelasan (TWI, 2018)

Spesimen Uji

Proses permesinan dari hasil lasan sejajar dengan sumbu longitudinal dan panjang pengukur spesimen harus 100% pada logam lasan sebagaimana terlihat pada gambar 11.5



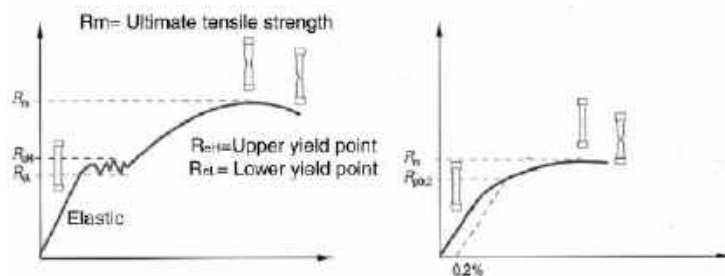
Gambar 11.5 spesimen uji tarik



Gambar 11.6 a) spesimen uji tarik penampang Bulat, b) specimen uji tarik penampang Bulat dari uji klasifikasi elektroda las (TWI, 2018)

Metode

Spesimen mengalami kenaikan gaya yang terus meningkat dengan cara yang sama seperti pengujian spesimen tarik melintang. Yield (R_e) atau tegangan sebenarnya proof stress (R_p) diukur dengan ekstensometer yang terpasang pada spesimen yang secara akurat mengukur pertambahan panjang ukur saat beban meningkat. Kurva perubahan beban dan karakteristik utamanya ditunjukkan (gambar 11.7) di bawah ini.

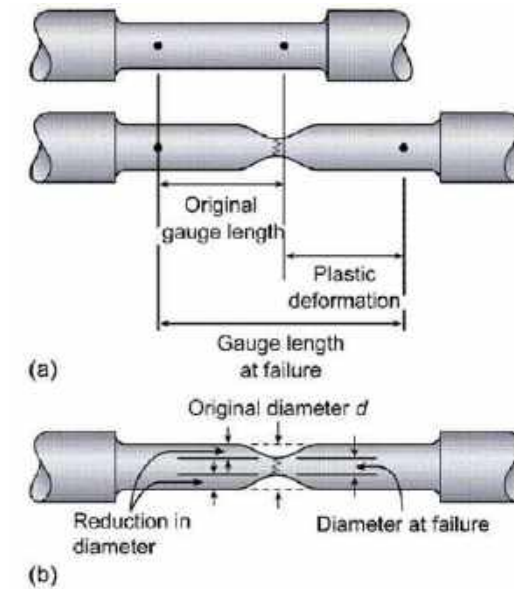


Gambar 11.7 jenis kurva pertambahan beban a) kurva pertambahan beban untuk baja yang menunjukkan titik yield pada batas elastis. b) Kurva pertambahan beban untuk baja (atau logam lainnya) yang tidak menunjukkan titik yield; tegangan sebenarnya adalah ukuran batas elastis bahan (TWI, 2018)

keuletan bahan hasil uji tarik diukur dengan dua cara yaitu:

- Persen pertambahan panjang dari panjang ukur.
- Persen pengurangan luas pada titik patah.

Gambar 9.8 di bawah ini menggambarkan dua jenis pengukuran keuletan bahan

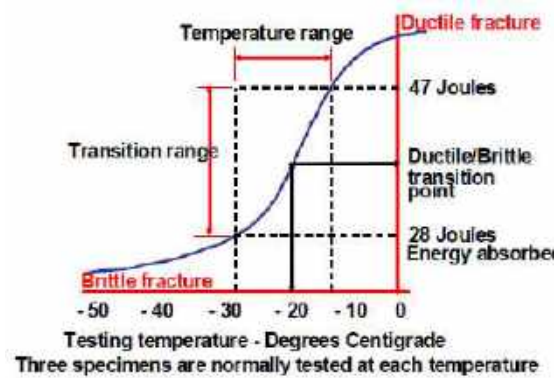


Gambar 11.8 dua jenis pengukuran keuletan bahan (TWI, 2018)

11.3.3 Pengujian Ketangguhan (Impact Test)

Tujuan pengujian spesimen uji Charpy dengan takikan bentuk V adalah metode yang diterima secara internasional untuk menilai ketahanan terhadap patah getas dengan mengukur besar energi untuk memulai dan menyebarkan retakan dari takikan tajam pada spesimen berukuran standar yang dikenakan beban kejut. Pada sebuah desain perlu dipastikan bahwa ketangguhan baja yang digunakan untuk item tertentu akan cukup untuk menghindari patah getas dan spesimen diuji bentur diuji pada suhu yang terkait dengan suhu desain untuk komponen fabrikasi.

Baja Carbon C-Mn dan baja paduan rendah mengalami perubahan yang sangat tajam dalam ketahanannya terhadap patah getas karena suhunya diturunkan sehingga baja yang mungkin memiliki ketangguhan yang sangat baik pada suhu kamar dapat menunjukkan kerapuhan yang ekstrem pada suhu dibawah 0 derajat selsius, seperti yang diilustrasikan pada gambar (11-9) di bawah ini.

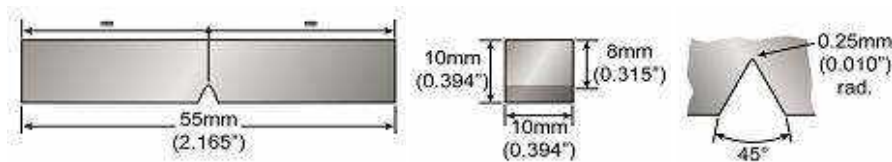


Gambar 11.9 pengujian ketangguhan impak (TWI, 2018)

Suhu transisi didefinisikan sebagai suhu di tengah antara bagian atas (ketangguhan maksimum) dan bagian lebih rendah (benar-benar rapuh). Di atas suhu transisi adalah -20 °C

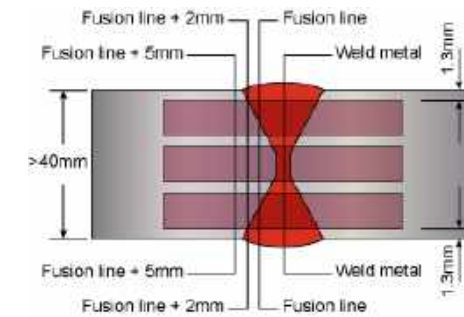
Spesimen uji

Dimensi spesimen uji bentur (impack) telah distandarisasi secara internasional dan ditunjukkan di bawah ini (gambar 11.10), untuk spesimen ukuran penuh. Ada juga dimensi standar untuk spesimen berukuran lebih kecil, misalnya 10 x 7.5mm dan 10 x 5mm. ukuran specimen uji impak menurut standar US (ASTM E-23) sebagaimana ditunjukkan pada gambar dibawah



Gambar 11.10. dimensi specimen uji bentur charpy dengan takikan V (TWI, 2018)

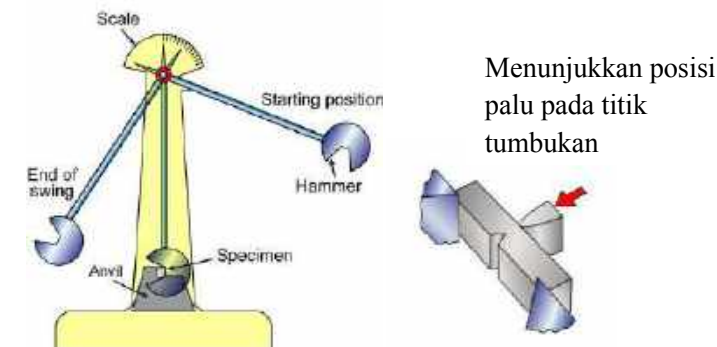
Spesimen uji dari pelat yang dilas dengan posisi takik yang terletak di posisi yang berbeda sesuai dengan persyaratan pengujian tetapi biasanya di tengah logam las dan pada posisi melintasi HAZ, seperti yang ditunjukkan (11.11) di bawah.



Gambar 11-11 posisi takikan V untuk specimen uji bentur Charpy pada pengelasan sambungan tumpul V ganda (TWI, 2018)

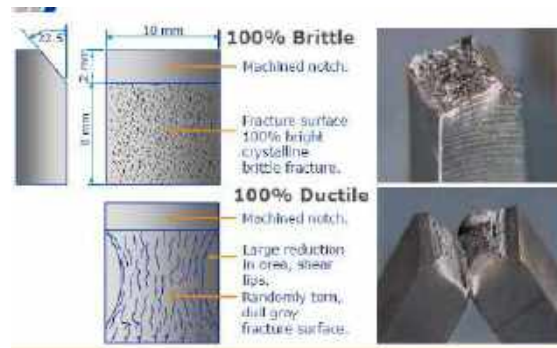
Metode Pengujian

Spesimen uji didinginkan sampai suhu uji yang ditentukan dengan cara perendaman dalam bak terisolasi yang berisi cairan Nitrogen yang ditahan pada suhu uji. Setelah suhu spesimen stabil selama beberapa menit, dengan cepat dipindahkan ke landasan mesin uji dan palu pendulum dengan cepat dilepaskan sehingga spesimen mengalami beban impak di belakang takikan. skema dari mesin uji bentur ditunjukkan gambar (11.12) di bawah ini.



Gambar 11.12 mesin uji bentur (TWI, 2018)

Energi yang diserap oleh palu ketika memukul setiap spesimen uji ditunjukkan oleh posisi pointer palu pada skala mesin. Nilai energi yang diserap diberikan dalam satuan Joule (atau ft-lbs dalam spesifikasi US). Tiga spesimen uji bentur diambil untuk setiap posisi takik karena selalu ada beberapa derajat sebaran dalam hasil, terutama untuk pengelasan.

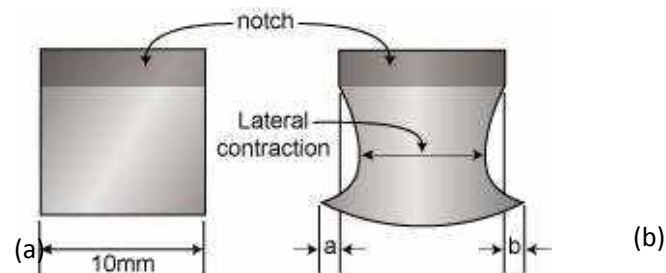


Gambar 11.13 spesimen uji impact charpy setelah di uji a) patah getas dan b) patah ulet (TWI, 2018)

Kriteria penerimaan (acceptance criteria)

Setiap hasil uji dicatat dan nilai rata-rata dihitung untuk setiap set dari tiga pengujian. Nilai-nilai ini dibandingkan dengan standar aplikasi yang ditentukan oleh atau klien untuk menetapkan apakah persyaratan yang ditentukan telah dipenuhi. Setelah pengujian bentur, pemeriksaan spesimen uji dilakukan memberikan informasi tambahan tentang karakteristik ketangguhannya dan dapat ditambahkan ke laporan pengujian:

- Persentase kristalinitas: persentase dari permukaan fraktur yang memiliki penampilan kristal yang menunjukkan patah rapuh; jika nilainya 100% menunjukkan fraktur yang benar-benar rapuh (gambar 11.14 a).
- Ekspansi lateral: Peningkatan lebar bagian belakang spesimen di belakang takik, seperti yang ditunjukkan gambar 11.14.b) di bawah ini; semakin besar nilainya semakin keras spesimennya.



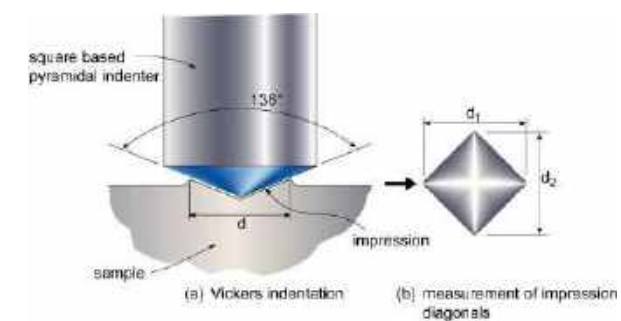
Gambar 11.14 spesimen uji setelah pengujian bentur a) Ekspansi non lateral patah rapuh, b) $a + b =$ ekspansi lateral patah ulet (TWI, 2018)

Spesimen yang menunjukkan kerapuhan yang ekstrem akan menunjukkan patah yang rata, kedua bagian spesimen memiliki permukaan fraktur yang sepenuhnya datar dengan sedikit atau tanpa ekspansi lateral. Spesimen yang menunjukkan ketangguhan yang sangat baik hanya akan menunjukkan sedikit ekstensi retak, tanpa fraktur dan nilai ekspansi lateral yang tinggi.

11.3.4 Pengujian kekerasan

Kekerasan adalah ketahanan suatu logam terhadap deformasi plastis, ditentukan dengan mengukur ketahanan terhadap indentasi oleh jenis indenter tertentu. Lasan baja dengan nilai kekerasan di atas maksimum tertentu mungkin sangat rentan terhadap keretakan, baik selama fabrikasi atau dalam pengujian kualifikasi layanan dan prosedur pengelasan untuk baja dan aplikasi tertentu membutuhkan uji kekerasan lasan untuk memeriksa guna memastikan tidak ada daerah yang melebihi nilai kekerasan maksimum yang ditentukan.

Spesimen yang disiapkan untuk pemeriksaan makroskopik juga dapat digunakan untuk melakukan pengukuran kekerasan di berbagai posisi lasan, disebut sebagai pengujian kekerasan.



Gambar 11.15 pengujian kekerasan metode Vickers (TWI, 2018)

Ada tiga metode pengujian kekerasan yang banyak digunakan:

- Vickers - menggunakan indenter berbentuk piramida intan berbasis persegi (gambar 11-15)
- Rockwell - menggunakan indenter berbentuk kerucut intan atau bola baja.
- Brinell - menggunakan indenter berbentuk bola.

Nilai kekerasan diberikan oleh ukuran lekukan yang dihasilkan di bawah beban standar, semakin kecil lekukan, semakin keras logam yang diuji.

Baik metode Vickers maupun Rockwell cocok untuk melakukan pemeriksaan kekerasan pada spesimen yang disiapkan untuk pemeriksaan makroskopik hasil pengelasan. pemeriksaan nilai kekerasan membutuhkan indenter untuk mengukur kekerasan pada logam dasar (di kedua sisi lasan), logam lasan dan melintasi HAZ (di kedua sisi lasan). Metode Brinell memberikan lekukan yang terlalu besar untuk secara akurat mengukur kekerasan di wilayah spesifik HAZ dan terutama digunakan untuk mengukur kekerasan logam dasar. Pemeriksaan nilai kekerasan (menggunakan metode kekerasan Vickers) ditunjukkan gambar (11.16) di bawah ini:

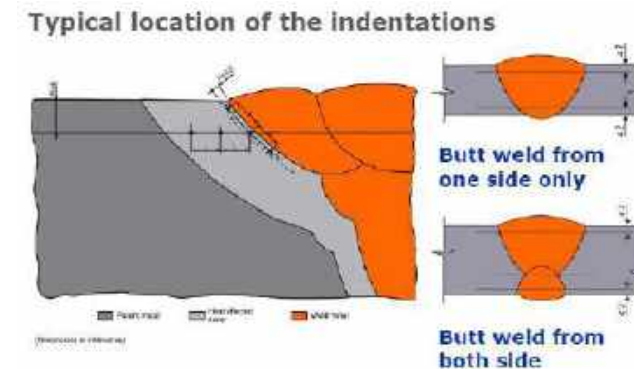


Gambar 11.16 pemeriksaan nilai kekerasan metode Vickers (TWI, 2018)

Nilai kekerasan ditampilkan pada laporan hasil pengujian, disajikan diawali dengan angka diikuti oleh huruf yang menunjukkan metode pengujiannya, misalnya:

- 240HV10 = nilai kekerasannya adalah 240, dengan metode Vickers, beban indenter sebesar 10kg.
- 22HRC = nilai kekerasannya adalah 22, dengan metode Rockwell, indenter kerucut intan (skala C).
- 238HBW = nilai kekerasannya adalah 238, dengan metode Brinell, indenter bola baja tungsten.

Dalam melakukan pengujian kekerasan pada hasil pengelasan untuk beberapa jenis kampuh las tidak boleh sembarangan. Lokasi pengujian (identasi) harus mewakili beberapa bagian yaitu pada daerah logam induk, HAZ dan logam las sebagaimana terlihat pada gambar 11-17



Gambar 11-17 lokasi pengujian kekerasan logam las (TWI, 2018)

11.3.5 Pengujian Cracks Tip Opening Displacement (CTOD).

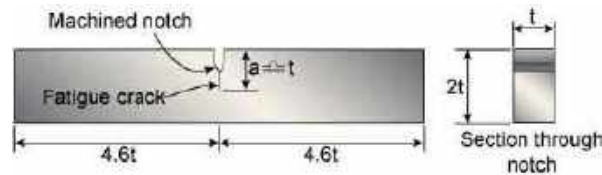
Pengujian takik Charpy V memungkinkan para engineer untuk membuat penilaian tentang risiko patah getas yang terjadi pada baja, tetapi pengujian CTOD bertujuan mengukur sifat material - ketangguhan retak. Data ketangguhan retak memungkinkan para engineer untuk melakukan analisis mekanisme perpatahan seperti:

- Menghitung ukuran retakan yang akan memicu patah getas pada kondisi tekanan tertentu pada suhu tertentu.
- Tegangan yang akan menyebabkan retakan ukuran tertentu memberikan patah getas pada suhu tertentu.

Data hasil uji ini sangat penting untuk membuat keputusan yang tepat ketika retakan ditemukan selama inspeksi pada peralatan yang sedang digunakan. Spesimen CTOD disiapkan dari potongan batang baja berbentuk persegi panjang atau persegi melintang sumbu lasan tumpul (butt weld). Takikan berbentuk V dikerjakan di tengah batang, yang tepat pada posisi uji, logam las atau HAZ. retak dengan ukuran dangkal dibuat di bagian bawah takik dan spesimen dimasukkan ke

dalam mesin yang menyebabkan beban lentur berulang hingga inisiasi retak yang telah dibuat mulai merambat dan berkembang.

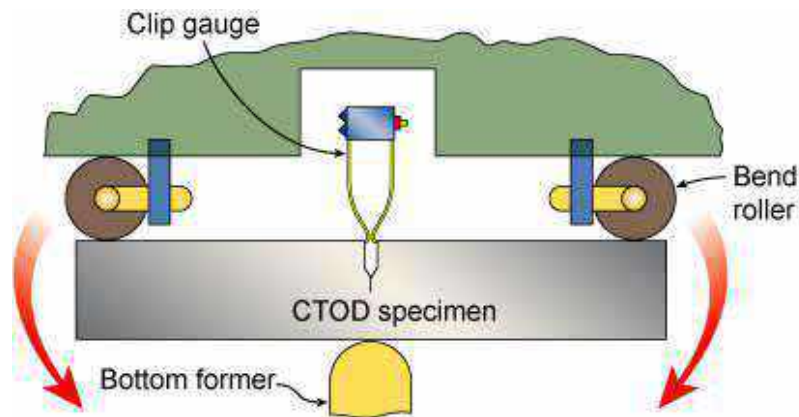
Ukuran spesimen uji CTOD berukuran relatif besar, biasanya memiliki penampang $B \times 2B$ dan panjang $\sim 10B$ (B = ketebalan penuh lasan). Detail benda uji ditampilkan pada gambar 11.18 di bawah.



Gambar 11.18 spesimen uji CTOD (TWI, 2018)

Metode Pengujian

Spesimen uji CTOD biasanya dilakukan pengujian pada suhu di bawah temperatur ambien dan suhu spesimen dikendalikan dengan perendaman dalam bak cairan yang didinginkan hingga tercapai suhu uji yang diperlukan. Suatu beban diterapkan pada spesimen untuk menyebabkan tekukan dan menyebabkan tegangan terkonsentrasi pada ujung retak dan klip pengukur, yang melekat pada spesimen melintasi mulut takikan mesin, memberikan pembacaan peningkatan lebar diujung retak. karena beban meningkat secara bertahap. Untuk setiap kondisi pengujian (posisi takik dan suhu pengujian) biasanya dilakukan tiga kali pengujian. Gambar (11.19) di bawah menggambarkan fitur utama dari uji CTOD.

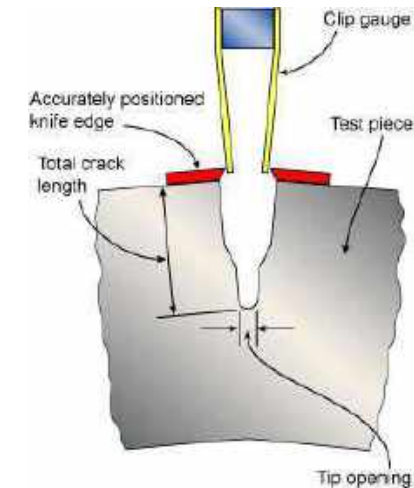


Gambar 11.19 pengujian spesimen uji CTOD (TWI, 2018)

Ketangguhan retak dinyatakan sebagai jarak ujung retak terbuka tanpa inisiasi retak getas. Klip pengukur akan mengukur peningkatan lebar mulut retak terhadap beban yang diterapkan sehingga menghasilkan grafik besarnya nilai CTOD dihasilkan.

Kriteria penerimaan

Standar aplikasi atau klien dapat menentukan nilai CTOD minimum yang menunjukkan sobekan ulet. Pengujian ini mungkin juga untuk memberikan informasi nilai yang dapat digunakan untuk penilaian kritis teknik (ECA). Lasan baja yang sangat tangguh memungkinkan akan menunjukkan mulut retakan terbuka lebar dengan robek ulet di ujung retakan sedangkan las yang sangat rapuh akan cenderung patah ketika beban yang diterapkan cukup rendah dan tanpa penambahan di ujung retak. Nilai CTOD dinyatakan dalam milimeter - nilai mungkin $\ll \sim 0,1\text{mm}$ = perilaku getas; $> \sim 1\text{mm}$ = perilaku yang sangat tangguh.



Gambar 11.20 Potongan melintang specimen uji CTOD (TWI, 2018)

11.3.6 Pengujian Lengkung (Bend Testing)

Pengujian lengkung (*bend test*) selalu digunakan sebagai kualifikasi prosedur pengelasan dan kadang-kadang digunakan untuk kualifikasi tukang las

(welder). pengujian *bending* adalah cara sederhana untuk memverifikasi apakah ada kelemahan yang signifikan pada suatu sambungan las. Beberapa tingkat keuletan juga diperlihatkan, tidak diukur tetapi bisa dibuktikan jika spesimen uji dapat bertahan terhadap beban tekuk tanpa terjadi patah atau retak dengan ukuran panjang tertentu.

Spesimen Uji

Ada empat jenis pengujian uji lengkung yang sering dilakukan pada hasil pengelasan yaitu:

a. Face Bend

Pengujian dilakukan pada sumbu melintang pada lasan tumpul (Butt weld) tebal hingga 12 mm dan spesimen uji menjadi bengkok sehingga muka lasan berada di luar lengkungan (face in tension).

b. Root Bend

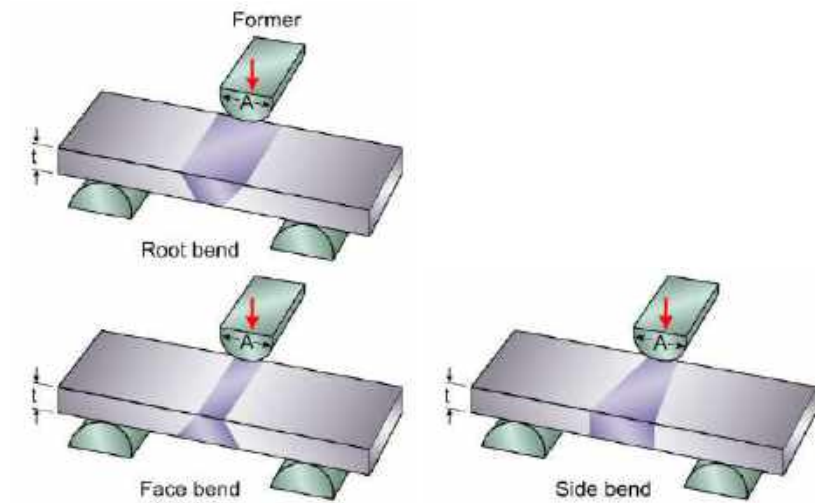
Pengujian dilakukan pada sumbu melintang pada lasan butt weld dengan tebal hingga 12mm dan spesimen uji menjadi bengkok sehingga akar lasan berada di luar dari lengkungan (root in tension).

c. Side Bend

Pengujian dilakukan pada irisan melintang dari spesimen uji (10 mm) dari ketebalan penuh lasan butt weld >12mm dan spesimen uji menjadi bengkok sehingga ketebalan sambungan penuh (sisi dalam tegangan).

d. Longitudinal Bend

Pengujian lengkungan memanjang dilakukan pada sumbu yang sejajar dengan sumbu longitudinal dari lasan butt weld; ketebalan spesimen hingga 12mm dan muka atau akar lasan dapat diuji tarik.



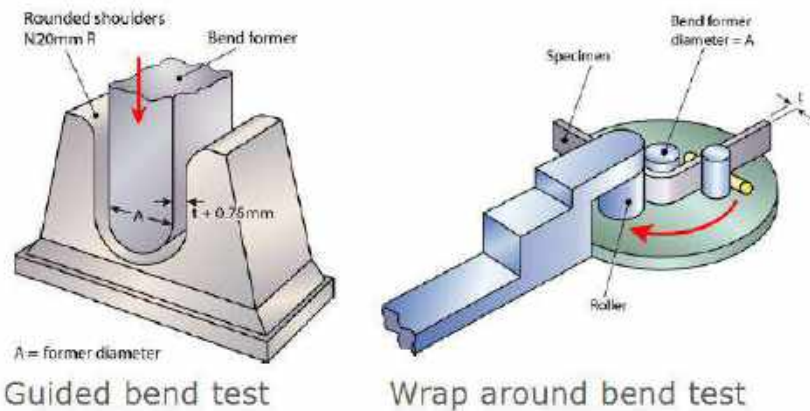
Gambar 11.21 tiga jenis pengujian lengkung (bend test) (TWI, 2018)

Metode Pengujian

Pengujian lengkung biasanya digunakan untuk prosedur pengelasan dan kualifikasi tukang las. Regangan yang dikenakan pada spesimen dikontrol secara seragam dengan beban tekuk dengan diameter tertentu.

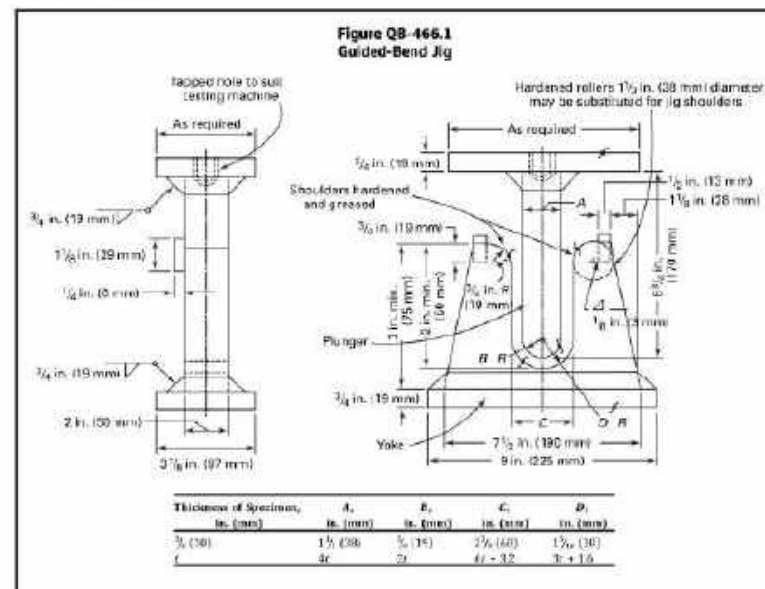
Diameter yang digunakan untuk pengujian ditentukan dalam code pada suatu standar tertentu, yang telah ditentukan oleh jenis bahan yang diuji dan keuletan yang dapat diharapkan setelah pengelasan dan proses PWHT yang dilakukan.

Diameter penekan biasanya dinyatakan sebagai kelipatan dari ketebalan spesimen (t) dan untuk baja C-Mn biasanya diameternya $4t$, tetapi untuk bahan yang memiliki keuletan yang lebih rendah, jari-jari yang sebelumnya mungkin lebih besar dari $10t$. Standar yang menentukan metode pengujian akan menentukan sudut lengkungan minimum yang harus dialami spesimen dan biasanya $120-180^\circ$.

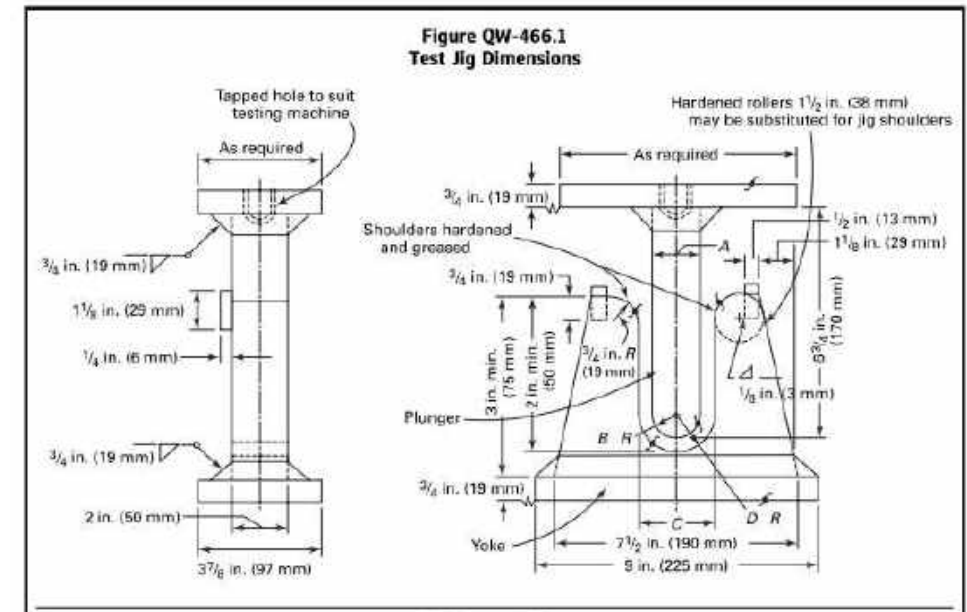


Gambar 11.22 bentuk penekan pada pengujian bending (TWI, 2018)

QB-465 TEST JIGS



Gambar 11.23 standar JIG pada uji lengkung (ASME, 2017)



Gambar 11.24 standar JIG pada uji lengkung (ASME, 2017)

Tabel 11.1 dimensi specimen uji lengkung (ASME, 2017)

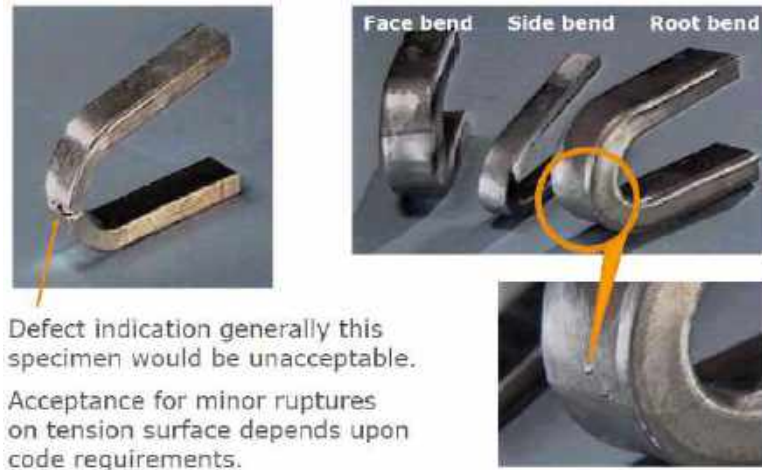
U.S. Customary Units					
Material	Thickness of Specimen, in.	A, in.	B, in.	C, in.	D, in.
P-No. 23 to P-No. 21 through P-No. 25; P-No. 21 through P-No. 25 with F-No. 23 or 26; P-No. 35; any P-No. metal with F-No. 33, 36, or 37	t = 1/8 or less	16 1/2 t = 2 1/2	8 1/2 t = 1 1/2	18 1/2 t + 1/8 = 2 3/8	9 1/2 t + 1/2 = 1 1/2
P-No. 11A, F-No. 11B; P-No. 25 to P-No. 21 or P-No. 22 or P-No. 25	t = 1/8 or less	6 3/4 t = 2 1/2	3 3/4 t = 1 1/2	8 3/4 t + 1/4 = 3 3/8	4 3/4 t + 1/16 = 1 1/16
P-No. 51; P-No. 49	t = 1/8 or less	8t = 3	4t = 1 1/2	10t + 1/8 = 3 3/8	5t + 1/16 = 1 1/16
P-No. 52; P-No. 53; P-No. 61; P-No. 62	t = 1/8 or less	10t = 3 3/4	5t = 1 3/4	12t + 1/8 = 4 1/8	6t + 1/16 = 2 1/16
All others with greater than or equal to 20% elongation	t = 1/8 or less	4t = 1 1/2	2t = 1 1/4	6t + 1/8 = 2 1/8	3t + 1/16 = 1 1/16
Materials with 3% to less than 20% elongation	t = (see Note (1))	32 1/2 t max.	16 1/4 t max.	A + 2t = 1/8 max.	1/2 t + 1/16 max.

SI Units					
Material	Thickness of Specimen, mm	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm
P-No. 23 to P-No. 21 through P-No. 25; P-No. 21 through P-No. 25 with F-No. 23 or 26; P-No. 35; any P-No. metal with F-No. 33, 36, or 37	t = 3 or less	16 1/2 t = 50	8 1/2 t = 25	18 1/2 t + 1.6 = 57	9 1/2 t + 6.8 = 29
P-No. 11A, P-No. 11B; P-No. 25 to P-No. 21 or P-No. 22 or P-No. 25	t = 10 or less	6 3/4 t = 67	3 3/4 t = 33	8 3/4 t + 3.2 = 90	4 3/4 t + 1.6 = 45
P-No. 51; P-No. 49	t = 10 or less	8t = 80	4t = 40	10t + 3.2 = 103	5t + 1.6 = 52
P-No. 52; P-No. 53; P-No. 61; P-No. 62	t = 10 or less	10t = 100	5t = 50	12t + 3.2 = 123	6t + 1.6 = 62
All others with greater than or equal to 20% elongation	t = 10 or less	4t = 40	2t = 20	6t + 3.2 = 63	3t + 1.6 = 32
Materials with 3% to less than 20% elongation	t = (see Note (1))	32 1/2 t max.	16 1/4 t max.	A + 2t = 1.6 max.	1/2 t + 0.8 max.

Kriteria penerimaan

Untuk memenuhi criteria penerimaan specimen uji lengkung setelah dilakukan penekanan pada specimen uji harus menunjukkan kondisi yang baik dengan tidak menunjukkan retakan atau tanda-tanda celah atau rongga signifikan

dibagian luar lengkungan. Indikasi retak kecil yang panjangnya kurang dari 3mm mungkin diizinkan oleh beberapa standar.



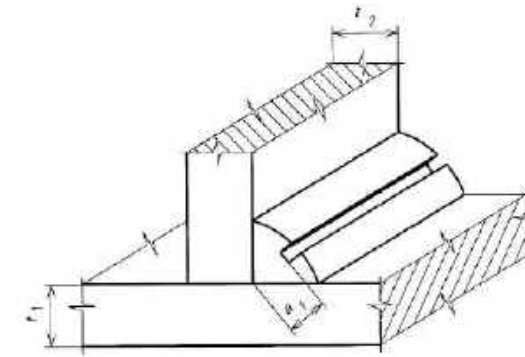
Gambar 11.25 cacat pada specimen uji bending berupa retak dan patah

11.3.7 Tes fraktur pada Las Fillet

Untuk mengetahui kualitas lasan fillet dapat dinilai dengan cara memukul specimen uji dan memeriksa permukaan patahanannya. Metode ini digunakan untuk menilai kualitas lasan fillet dapat ditentukan oleh standar aplikasi sebagai alternatif untuk pemeriksaan makroskopis. Metode pengujian ini adalah yang dapat digunakan untuk pengujian kualifikasi tukang las sesuai dengan Standar Eropa tetapi tidak digunakan untuk kualifikasi prosedur pengelasan.

Spesimen

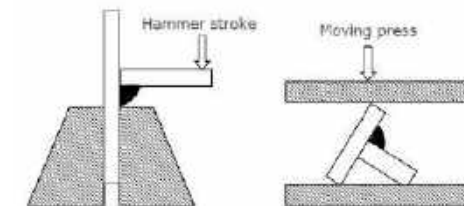
Untuk membuat specimen uji Lasan dipotong menjadi pendek (biasanya 50mm) panjang dan lekukan specimen seperti yang ditunjukkan di bawah ini. Profil takikan mungkin berbentuk persegi, bentuk V atau bentuk U.



Gambar 11.26 pengujian fraktur longitudinal pada sambungan fillet weld

Metode Pengujian

Spesimen dibuat patah pada bagian throat dengan memberikan beban dinamis (member pukulan dengan palu) atau dengan menekan, seperti yang ditunjukkan gambar (11-27) di bawah ini. Standar pengelasan atau standar aplikasi akan menentukan jumlah banyaknya pengujian (biasanya empat).



Gambar 11-27 pukulan dengan palu dan penekanan pada specimen uji

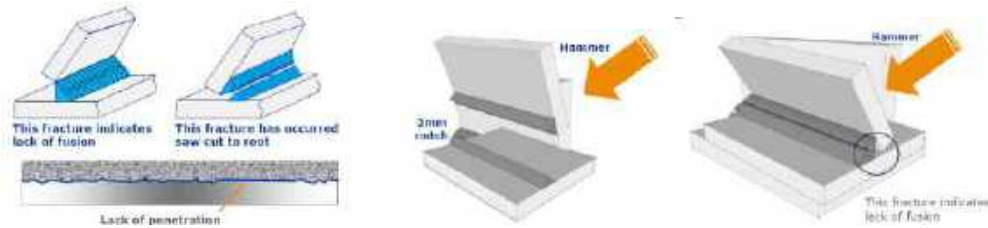
Kriteria penerimaan

Standar untuk kualifikasi tukang las, atau standar untuk aplikasi, akan menentukan kriteria penerimaan untuk ketidak sempurnaan hasil pengelasan seperti kurangnya penetrasi (lack of penetration) pada daerah akar (root) dari sambungan dan inklusi padat dan porositas yang terlihat pada permukaan patahan.

Laporan pengujian harus memberikan deskripsi tentang penampilan patahan dan lokasi ketidak sempurnaan pengelasan yang ada. Selain itu harus juga dilihat ketebalan material induk, ketebalan dan panjang throat (throat length), lokasi

patahan, penampilan sambungan setelah patah dan kedalam penetrasi las serta kehadiran cacat pada permukaan patah.

Ada beberapa kemungkinan kerusakan yang terjadi akibat beban yang diberikan pada daerah fillet weld.

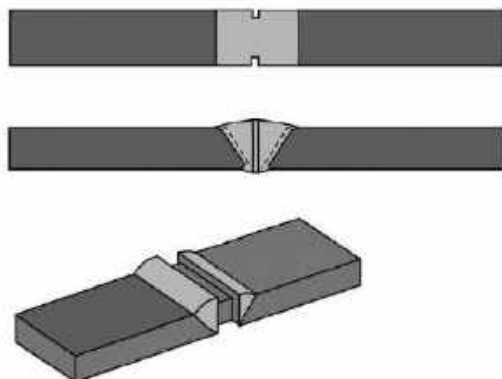


Gambar 11.28 jenis kerusakan pada sambungan fillet weld a) terjadinya patah karena kurangnya penetrasi, b) patah pada daerah potongan notched dan c) patah karena kurangnya fusi pada lasan

11.3.8 Pengujian Patah Pada Lasan Tumpul (Tes Nick-Break)

Sama seperti untuk uji fraktur *fillet*, pengujian ini ditentukan untuk pengujian kualifikasi tukang las dengan Standar Eropa sebagai alternatif untuk radiografi dan tidak digunakan untuk pengujian kualifikasi prosedur pengelasan.

Spesimen diambil dari lasan butt weld dan lekukan (notched) sehingga jalur patahan (fracture path) akan berada di wilayah tengah lasan. Jenis spesimen uji yang umum digunakan sebagaimana ditunjukkan pada gambar 11-29 di bawah ini.



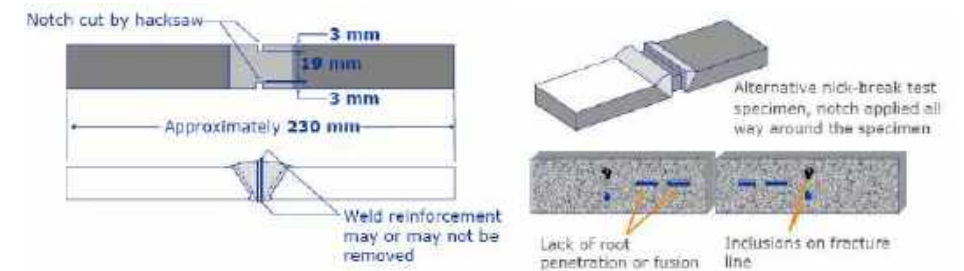
Gambar 11.29 pengujian notched pada sambungan tumpul

Metode

Spesimen uji dibuat patah dengan memukul dengan Palu atau dengan beban tiga titik (three point bending).

Kriteria penerimaan

Standar untuk kualifikasi tukang las atau standar aplikasi akan menentukan kriteria penerimaan untuk ketidak sempurnaan seperti kurangnya fusi, inklusi padat dan porositas yang terlihat pada permukaan patahan. Pada laporan pengujian harus memberikan deskripsi tentang penampilan patahan dan lokasi ketidak sempurnaan apapun.



Gambar 11.30 a) ukuran specimen uji nick break, b) cacat pada specimen uji

Bab 12

Cacat Las dan Inspeksi Material

12.1. Defenisi Cacat Las

Menurut standar Eropa EN menurut BS EN ISO 6520-1 cacat las didefinisikan adalah suatu cacat atau ketidak sempurnaan yang terjadi pada hasil pengelasan. Pada las fusi, cacat las secara geometris dapat diklasifikasikan menjadi 6 jenis yaitu:

1. Cacat Retak (*cracks*)
2. Cacat lubang (*cavities*)
3. Inklusi padatan (*solid inclusions*)
4. Kurangnya logam pengisi dan penetrasi (*Lack of fusion and penetration*)
5. Ketidak sempurnaan bentuk dan dimensi (*Imperfect shape and dimensions*)
6. Ketidaksempurnaan lainnya (*Miscellaneous imperfections*)

Adalah sangat penting melakukan diidentifikasi ketidaksempurnaan pada hasil pengelasan dengan benar sehingga dapat menentukan penyebabnya dan dapat menetapkan tindakan yang akan diambil untuk mencegah terjadinya cacat lebih lanjut.

11.2 Cacat Retak (Crack)

Ketidaksempurnaan dihasilkan karena kerusakan lokal dalam keadaan padat, yang mungkin timbul dari efek pendinginan atau tekanan. Retak lebih signifikan daripada jenis ketidaksempurnaan lainnya karena geometri las menghasilkan konsentrasi tegangan yang sangat besar di ujung retak sehingga lebih cenderung menyebabkan patah. Adapun jenis cacat dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis yaitu:

- retak longitudinal
- Retak transversal

- Retak menyebar (jenis retak ini bersumber dari satu titik)
- Retak berbentuk kawah (*crater*)
- Retak bercabang (sekelompok retakan terhubung yang berasal dari retakan umum)

Retak dapat terjadi pada beberapa daerah seperti daerah las (*weld metal*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone*) dan pada logam induk (*parent metal*), kecuali pada jenis retak celah kawah (*crater*) hanya ditemukan di logam las. Tergantung pada sifatnya, retakan ini dapat diakibatkan karena:

- Panas (yaitu retakan atau pembekuan retak).
- Presipitasi (yaitu retakan panas yang ada pada baja yang menahan mulur/creep).
- Retak dingin (yaitu retakan yang disebabkan hidrogen).
- Retak robekan lamellar (*lamellar tearing*).

12.2.1 Retak panas (*Hot Cracks*)

Retak "panas" las mengacu pada fenomena retak yang terjadi selama fabrikasi karena adanya cairan dalam struktur mikro. Retak panas paling sering dikaitkan dengan lapisan tipis film fasa cair yang ada di sepanjang batas butir di zona fusi dan zona sebagian meleleh (PMZ) dari zona yang dipengaruhi panas (HAZ). Cairan film ini dapat bertahan hingga suhu jauh di bawah suhu kesetimbangan padatan dari paduan, sehingga memperluas kisaran padatan paduan ke suhu solidus "efektif". Dalam banyak kasus, pembekuan efektif mungkin jauh di bawah kesetimbangan padatan karena efek pemisahan zat terlarut dan pengotor (Lippold, 2015).

Walaupun telah banyak digunakan dalam literatur untuk menggambarkan sejumlah fenomena retak pada suhu tinggi, penggunaan istilah "retak panas" di sini merujuk pada tiga jenis retak yang berbeda. Retak pembekuan las terjadi di zona fusi di akhir pembekuan. Bentuk retak ini biasanya dikaitkan dengan lapisan film cair yang membeku di sepanjang batas butir (SGB). Retak HAZ terjadi di wilayah

PMZ dari HAZ. retak ini juga terjadi pada batas butir (*intergranular*) dan merupakan hasil dari cairan film kontinyu yang terbentuk pada suhu tinggi.

Retak likuidasi logam las adalah jenis cacat karena pemanasan kembali logam las dan paling sering diamati pada lasan multipas atau setelah perbaikan lasan. Retak ini dapat terbentuk pada SGB atau batas butir yang bermigrasi (MGB) dan hasil dari peleburan kembali batas-batas butir selama pemanasan ulang pada suhu tinggi (Lippold, 2015).

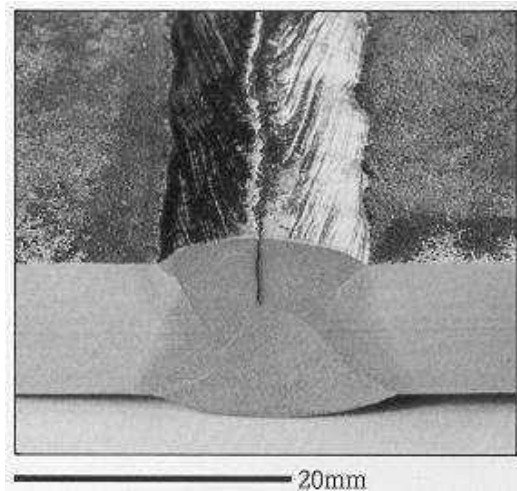
Jenis retak ini dapat didefinisikan tergantung pada lokasi dan mode kejadiannya, retakan panas dapat terjadi karena beberapa hal:

- Retak saat pemadatan/pembekuan (*solidification cracks*): terjadi pada logam las (biasanya di sepanjang garis tengah dari lasan) sebagai hasil dari proses pembekuan.
- Retakan saat kondisi cair (*liquation cracks*): terjadi pada daerah butir kasar HAZ, di dekat daerah sekitar garis fusi (*fusion line*) sebagai akibat dari pemanasan bahan pada suhu tinggi, cukup tinggi untuk menghasilkan likuidasi konstituen titik leleh rendah pada batas butir.

12.2.2 Retak saat pembekuan (*Solidification Cracks*)

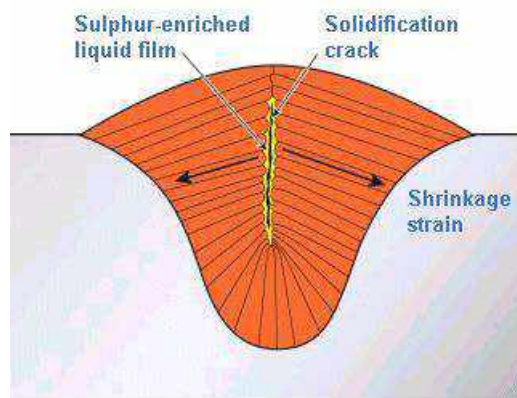
Secara umum, retak pembekuan ini dapat terjadi diakibatkan karena beberapa hal:

- Logam las memiliki kandungan karbon atau pengotor (sulfur, dll) yang tinggi.
- Ratio antara kedalaman-lebar dari manik las terlalu besar (dalam dan sempit).
- Terjadi gangguan pada kondisi aliran panas, misal saat kondisi berhenti/mulai pengelasan. Retakan bisa lebar dan terbuka ke permukaan seperti rongga susut atau dibawah permukaan dan mungkin juga sempit.



Gambar 12.1 cacat solidification cracks (TWI, 2018)

Retak pembekuan kemungkinan besar terjadi dalam komposisi dan menghasilkan pada kisaran suhu pembekuan yang luas. baja ini biasanya dibuat dari kandungan karbon yang lebih tinggi dan unsur-unsur pengotor seperti belerang dan fosfor. Elemen-elemen ini terpisah selama pembekuan, sehingga membentuk lapisan tipis Intergranular cair antar molekul setelah sebagian besar lasan telah memadat. Penyusutan termal dari manik las yang dingin dapat menyebabkan kerusakan dan membentuk retakan sebagaimana pada gambar (12.2).



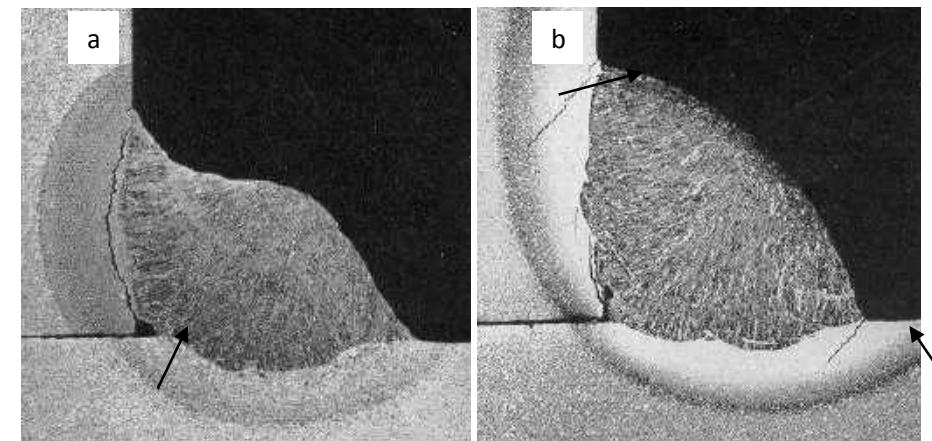
Gambar 12.2. Diagram skematis dari solidification crack (TWI, 2018)

Dalam proses pengelasan logam, juru las tidak boleh melakukan pengelasan di dekat logam yang permukaannya terkontaminasi dengan minyak atau grease karena memiliki kandungan sulfur yang tinggi dan minyak dan grease dapat menambah

karbon dan sulfur. Kontaminasi dengan logam lain dimana mempunyai titik leleh yang rendah seperti tembaga, timah, timah dan seng juga harus dihindari.

12.3. Retak yang disebabkan Hidrogen

Retakan yang disebabkan hidrogen terjadi terutama di daerah butiran kasar HAZ dan juga dikenal sebagai retak dingin, retak tertunda atau retak diatas bead (*underbead*)/ retak toe. retak ini terletak sejajar dengan batas fusi dan jalurnya biasanya merupakan kombinasi antara dan retak melawati batas butir (*transgranular*).

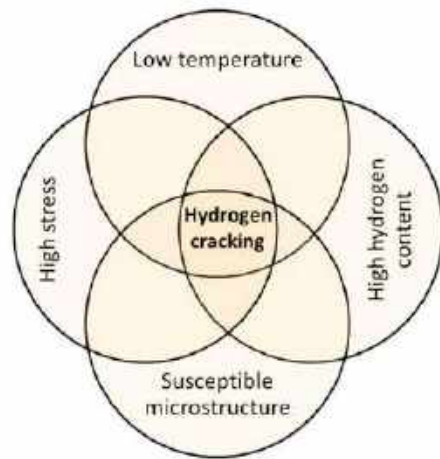


Gambar 12.3 a) retak pada bagian Root (*underbead*), b) retak pada Toe crack (TWI, 2018)

Tegangan sisa tarik menyebabkan retak pada bagian kaki las (*toes*) tumbuh secara progresif dari batas fusi menuju daerah dengan sensitivitas yang lebih rendah terhadap keretakan hidrogen. Ketika ini terjadi, retak akan tumbuh secara cepat dan akhirnya berhenti.

Empat faktor yang diperlukan untuk menyebabkan keretakan hidrogen pada daerah HAZ yaitu:

- kandungan hydrogen > 15ml/100g pada logam las.
- Tegangan (*Stres*) pada saat pengelasan > 0,5 tegangan luluh
- Terjadi pada temperatur < 300 ° C
- Nilai kekerasan logam las > kekerasan 400HV



Gambar 12.4 Faktor-faktor yang rentan terhadap retakan hydrogen (TWI, 2018)

Jika ada satu faktor yang tidak terpenuhi, retak dapat dicegah, sehingga dapat dihindari melalui kontrol satu atau lebih faktor seperti:

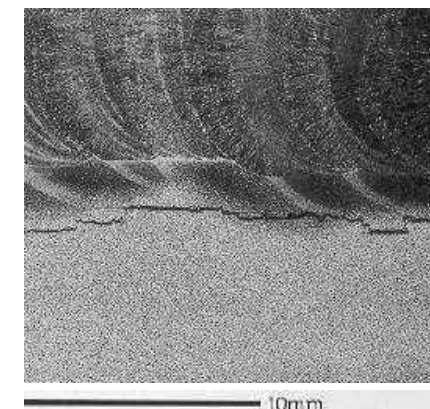
- Lakukan pemanasan awal (*preheat*) untuk memperlambat laju pendinginan untuk menghindari pembentukan struktur mikro yang rentan terjadinya retak.
- Pertahankan suhu interpass tertentu (efek yang sama seperti pemanasan awal).
- Lakukan proses pemanasan setelah pengelasan (*Postheat*) pada penyelesaian akhir pengelasan untuk mengurangi kandungan hidrogen dengan memungkinkan hidrogen berdifusi pada area pengelasan.
- Terapkan *post weld heat treatment* (PWHT) untuk mengurangi tegangan sisa dan menghilangkan struktur mikro yang rentan.
- Mengurangi kandungan hidrogen pada logam las dengan pemilihan pengelasan yang tepat penggunaan bahan habis (*consumable*) (mis. gunakan pengelasan TIG bukan MMA, menggunakan jenis elektroda basic dan bukan jenis selulosa).
- Gunakan teknik multi-run pada single run dan hilangkan struktur mikro yang rentan oleh efek pengerasan sendiri, untuk mengurangi kandungan hidrogen dengan membiarkan hidrogen berdifusi dari area pengelasan.

- Gunakan manik temper atau teknik *hott pass* (efek yang sama seperti di atas).
- Gunakan filler austenitik atau nikel untuk menghindari pembentukan struktur mikro yang rentan dan memungkinkan hidrogen berdifusi keluar dari area kritis).
- Gunakan gas pelindung kering untuk mengurangi kandungan hidrogen.
- Bersihkan karat dari sambungan untuk menghindari kontaminasi hidrogen dari kelembaban dari karat.
- Mengurangi tegangan sisa.
- Padukan profil lasan untuk mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah toes lasan.

12.4. Retak Lamelar (*Lamellar tearing*)

Retakan lamelar hanya terjadi pada produk baja canai/roll (terutama berbentuk pelat) dan fitur pembeda utama adalah bahwa retakan memiliki penampilan bertingkat. Retak terjadi pada sambungan di mana:

- kontraksi regangan termal terjadi pada arah ketebalan pelat baja.
- Inklusi non-logam hadir berbentuk *platelet* yang sangat tipis dengan bidang utama paralel dengan permukaan pelat.



Gambar 12.5 Lamellar tearing (TWI, 2018)

Regangan kontraksi yang dikenakan pada inklusi non-logam planar menghasilkan progresif dekohesi untuk membentuk lubang persegi panjang

berukuran kasar yang merupakan bagian horizontal dari retak, sejajar dengan permukaan pelat. Dengan regangan lebih lanjut bagian vertikal dari retakan dihasilkan, umumnya dengan retakan geser ulet. Dua tahap ini menciptakan tampilan retakan yang bertingkat.

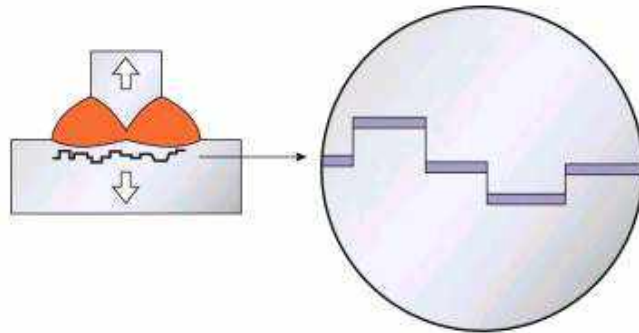


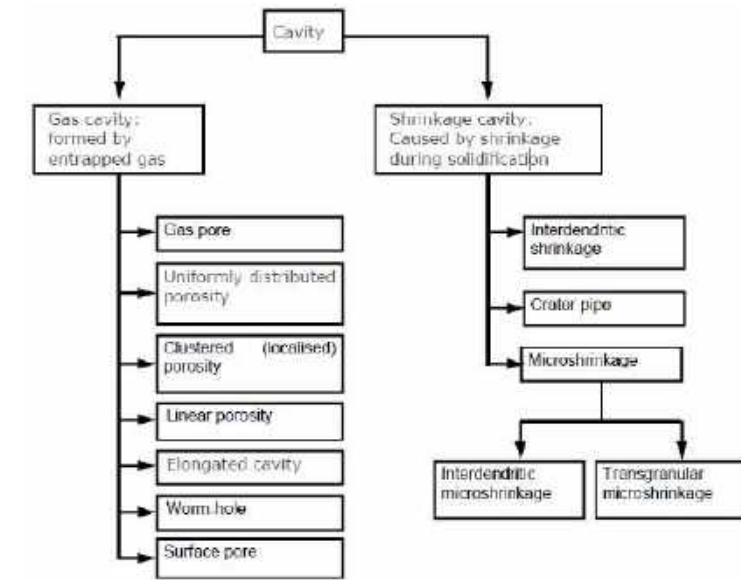
Figure 12.6 Diagram of lamellar tearing (TWI, 2018)

Dua opsi utama yang tersedia untuk mengendalikan masalah pada sambungan las yang terkena retak lamellar:

- Gunakan baja dengan sifat ketebalan-terjamin (grade Z).
- Kombinasi desain sambungan, mengontrol regangan, dan urutan pengelasan yang benar untuk meminimalkan risiko retak.

12.5. Cacat lubang (cavities)

Cacat lubang (*cavity*) secara umum dapat dibedakan menjadi 2 kelompok yaitu cacat lubang karena terjebak gas (*gas cavity*) dan disebabkan karena penyusutan selama pembekuan (*shrinkage cavity*). Pembagian jenis cacat lubang dijelaskan pada diagram dibawah.



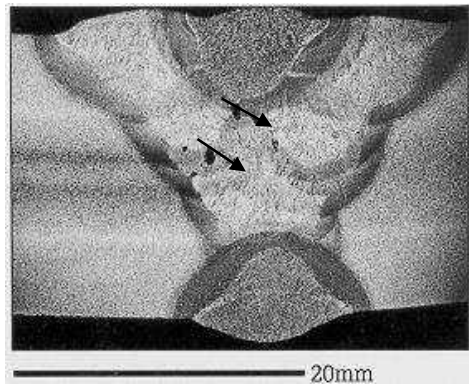
Gambar 12.7 diagram pembagian jenis cacat lubang (TWI, 2018)

12.5.1. Porositas gas (*gas porosity*)

Sebuah rongga gas yang berbentuk dasarnya bulat terperangkap di dalam logam las. Rongga gas dapat hadir dalam berbagai bentuk:

- Terisolasi.
- Porositas terdistribusi secara seragam.
- Porositas berkelompok (terlokalisasi).
- Porositas linier.
- Rongga memanjang.
- Pori permukaan.

Porositas dapat dicegah dengan melakukan beberapa hal serta mengetahui penyebabnya. Adapun penyebab dan pencegahan porositas dapat dilakukan sebagaimana pada tabel dibawah:



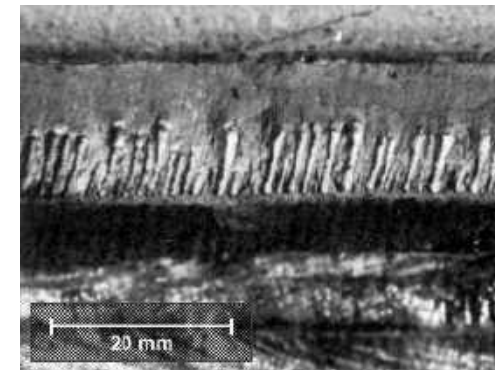
Gambar 12.8 porositas gas (TWI, 2018)

Tabel 12.1 penyebab dan pencegahan porositas gas

Penyebab	Pencegahan
Fluks lembab/elektroda terkorosi (MMA)	Gunakan elektroda kering dalam kondisi baik
kontaminasi grease/ hidrokarbon/ air pada permukaan baja	Bersihkan permukaan yang akan dilas
terjebaknya udara dalam gas pelindung (MIG / MAG, TIG)	Periksa koneksi pipa ke tabung gas
Deoxidant salah/ tidak memadai dielektroda, pengisi atau logam induk	Gunakan elektroda dengan deoksidasi yang cukup
Terlalu besar tegangan atau panjang busur	Kurangi tegangan dan panjang busur
Evolusi gas dari cat/ permukaan cat	Identifikasi risiko reaksi sebelum muncul ke permukaan
Laju aliran gas pelindung terlalu tinggi dalam turbulensi (MIG / MAG, TIG)	Optimalkan laju aliran gas

12.5.2. Lubang Cacing (Worm Hole)

Rongga memanjang atau berbentuk tabung yang dibentuk oleh gas yang terperangkap selama pembekuan logam las yang dapat terjadi sendiri atau dalam kelompok.



Gambar 12.9 cacat worm hole (TWI, 2018)

Ada beberapa penyebab cacat lubang cacing dan pencegahan sebagaimana tertera pada tabel dibawah:

Tabel 12.2 penyebab dan pencegahan cacat lubang cacing

Penyebab	Pencegahan
Permukaan yang terkontaminasi	Prosedur pembersihan permukaan benda kerja
Permukaan logam kerja dilaminasi	Ganti logam induk dengan yang sudah dilaminasi
Celah pada permukaan benda kerja karena geometri sambungan.	Hilangkan bentuk sambungan yang menghasilkan celah-celah

Lubang cacing disebabkan oleh terjebaknya gas yang sangat progresif di antara dendrit saat pembekuan kristal logam (dendrit) yang menghasilkan karakteristik pori memanjang dengan penampang bulat. Hal ini dapat muncul dan tersusun seperti tulang ikan (*herringbone*) pada hasil uji radiografi dan beberapa mungkin merusak permukaan lasan.

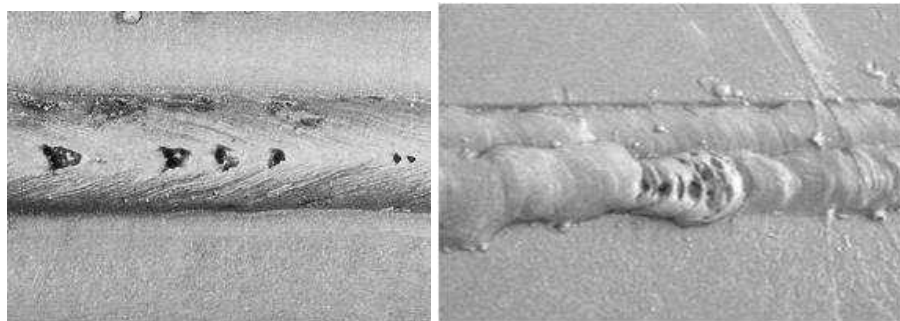
12.5.3. Porositas permukaan (*surface porosity*)

Porositas pada permukaan daerah las dapat terjadi karena beberapa sebab, dengan melakukan beberapa prosedur pengelasan dapat menghilangkan cacat porositas

pada permukaan las. Adapun penyebab dan pencegahan dijelaskan pada tabel 12.3 dibawah.

Tabel 12.3 penyebab dan pencegahan porosita permukaan

Penyebab	Pencegahan
Permukaan logam atau elektroda yang lembab atau terkontaminasi	Bersihkan permukaan dan keringkan elektroda
Aktivitas fluks rendah (MIG / MAG)	Gunakan fluks aktivitas tinggi
Kelebihan kandungan belerang (terutama saat proses pemotongan) menghasilkan sulfur dioksida	Gunakan elektroda dengan kandungan mangan tinggi untuk menghasilkan MnS. Perhatikan baja bebas-potong (sulfur tinggi) seharusnya tidak dilas
Hilangnya gas pelindung karena busur panjang atau karena hembusan angin tinggi (MIG / MAG)	Meningkatkan penyaringan untuk mengurangi panjang busur
Laju aliran gas pelindung yang terlalu tinggi menghasilkan turbulensi (MIG / MAG, TIG)	Optimalkan laju aliran gas

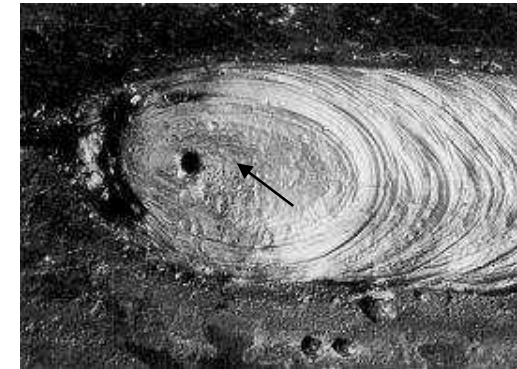


Gambar 12.10 porositas gas permukaan (TWI, 2018)

12.5.4. Cacat Crater Pipe

Jenis cacat ini memiliki ciri adanya rongga penyusutan di ujung lasan biasanya disebabkan oleh penyusutan selama pembekuan. Cacat ini bisa

disebabkan karena Kurangnya keterampilan tukang las karena menggunakan proses dengan arus terlalu tinggi. Untuk menghindari hal yang sama maka diperlukan pelatihan kembali bagi tukang las. Selain itu cacat jenis ini bisa terjadi pada jenis pengelasan metode TIG, hal ini disebabkan karena kesalahan dalam pengisian kampuh (miring keluar). Adapun bentuk cacat *crater pipe* seperti terlihat pada gambar dibawah

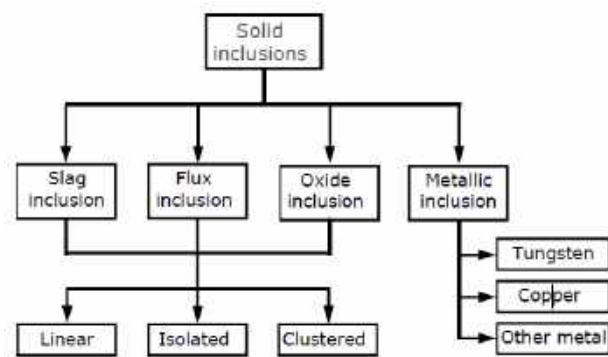


Gambar 12.11 cacat crater pipe (TWI, 2018)

Pengisian celah adalah masalah khusus dalam pengelasan TIG karena input panasnya rendah. Untuk mengisi kawah untuk proses ini perlu untuk mengurangi arus lasan (kemiringan keluar) dalam serangkaian langkah menurun sampai busur dimatikan.

12.6. Cacat Solid Inclusions

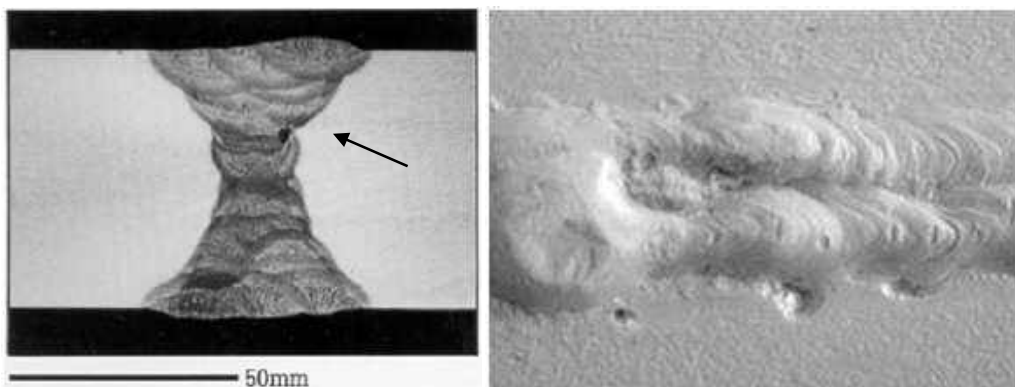
Pada proses pengelasan kadang ada logam asing berbentuk padat yang terperangkap dalam logam las sehingga menyebabkan cacat, cacat ini disebut *solid inclusions*. Jenis cacat ini bisa dibagi menjadi beberapa jenis yaitu slag, flux, oxide dan metallic inclusions. Diagram cacat ini dijelaskan pada gambar 12.12 dibawah.



Gambar 12.12 diagram jenis-jenis cacat solid inclusions (TWI, 2018)

12.6.1. Cacat Slag inklusi

Jenis cacat ini akibat terak yang terperangkap selama proses pengelasan dan ikut membeku pada daerah las. Cacat ini mempunyai bentuk tidak teratur sehingga berbeda dalam penampilan dari porositas akibat gas.



Gambar 12.13 cacat Slag inklusi (TWI, 2018)

Cacat ini bisa diakibatkan karena pembuangan terak yang tidak sempurna pada permukaan dasar daerah las pada pengelasan *multi-pass weld*. Cacat ini juga akibat banyaknya terak di depan busur sehingga posisi saat pengelasan perlu disesuaikan untuk mendapatkan kontrol terak sehingga tukang las perlu memperbaiki sudut elektroda. Jenis cacat ini juga dikarenakan terjebaknya terak di permukaan logam las.

Dispersi inklusi halus dapat hadir dalam logam lasan, terutama jika digunakan proses pengelasan SMAW/MMA. Slag inklusi ini menjadi masalah ketika inklusi mempunyai ukuran besar atau dengan ujung yang runcing.

Inklusi adalah diskontinuitas yang disebabkan oleh terperangkap padatan dalam logam lasan yang dapat dideteksi dengan mata tanpa bantuan atau dengan pembesaran rendah. Inklusi dapat terjadi jika padatan dengan titik lebur tinggi atau padat, atau keduanya, direndam dalam kolam las dan terperangkap di dalam lasan selama solidifikasi. Terak inklusi adalah oksida dan padatan bukan logam yang dimaksudkan untuk membentuk terak pelindung tetapi terkadang terperangkap dalam logam las. Ini bisa di bead itu sendiri, antara manik - manik yang berdekatan atau antara lasan dan logam dasar (AWS vol 2)

12.6.2. Inklusi Fluks (*Flux inclusions*)

Cacat ini dikarenakan oksida terjebak selama pengelasan yang merupakan bentuk tidak teratur sehingga berbeda dalam penampilan dari pori gas. Cacat ini disebabkan karena adanya banyaknya karat di permukaan kerja yang akan dilas. Pencegahan dari cacat ini adalah dengan melakukan menggerinda permukaan baja sebelum pengelasan.

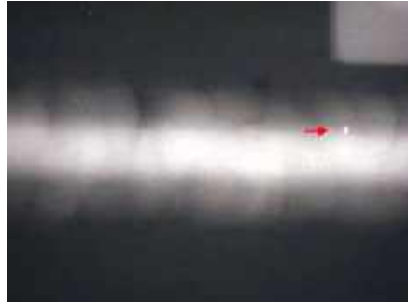
Jenis cacat inklusi oksida ini adalah karena adanya kerutan, yang terjadi terutama dalam kasus paduan aluminium. Lipatan oksida film dapat terjadi karena kombinasi perlindungan yang tidak baik dari kontaminasi atmosfer dan aliran turbulen di daerah kolam las.

12.6.3. Inklusi Oksida (*Oxide Inclusions*)

Oksida yang terjebak selama pengelasan yang mana berbentuk tidak beraturan terlihat sangat berbeda dari porositas gas. Penyebab cacat ini adalah karena karat pada permukaan baja yang tidak dihilangkan sebelum dilas. Pencegahan cacat ini dengan melakukan pengerindaan pada baja yang berkarat sebelum dilas.

12.6.4. Masuknya Tungsten ke Kolam Las (*Tungsten inclusions*)

Partikel-partikel tungsten dapat tertanam selama pengelasan metode TIG karena batang tungsten patah saat proses pengelasan dilakukan. Cacat ini bisa diidentifikasi dengan pengujian Radiografi. Partikel tungsten terlihat sebagai area cahaya pada radiografi karena tungsten lebih padat dari logam di sekitarnya dan menyerap jumlah radiasi X/ sinar gamma yang lebih besar (gambar 12.14)



Gambar 12.14 cacat tungsten inklusi (TWI, 2018)

Tabel 12.4 penyebab dan pencegahan cacat inklusi tungsten

Penyebab	Pencegahan
Kontak antara ujung elektroda dengan kolam las	Jauhkan tungsten dari kolam las; gunakan HF
adanya kontak antara logam pengisi dengan ujung panas elektroda	Hindari kontak antara elektroda dan logam pengisi
Adanya kontaminasi ujung elektroda dari loncatan api dari kolam las	Mengurangi arus pengelasan; sesuaikan laju aliran gas pelindung
Arus yang digunakan melebihi batas untuk ukuran atau jenis elektroda	Mengurangi arus pengelasan; ganti elektroda dengan diameter yang lebih besar
Perpanjangan elektroda di luar yang normal yaitu jarak dari collet, menghasilkan elektroda las terlalu panas	Mengurangi penambahan elektroda las dan/ atau arus pengelasan
Pemasangan collet yang tidak kuat	Kencangkan collet
Laju aliran gas pelindung yang tidak memadai atau berlebihan menghasilkan oksidasi dari ujung elektroda	Sesuaikan laju aliran gas pelindung; melindungi area lasan; Pastikan gas mengalir setelah menghentikan busur berlanjut setidaknya lima detik
Terpisahny atau adanya retak di elektroda las	Ganti elektroda las, pastikan dengan benar ukuran tungsten yang dipilih untuk pengelasan saat ini digunakan

Gas pelindung tidak memadai (misalnya penggunaan gas argon-oksigen atau argon-karbon dioksida yang campuran untuk digunakan pada pengelasan MAG) Ubah untuk memperbaiki komposisi gas

12.7 Kurangnya Fusi dan Penetrasi (Lack of Fusion and Penetrations)

12.7.1 Kurangnya Fusi Logam Las (Lack of Fusion)

Kurangnya penyatuan antara logam las dan logam induk atau antara lapisan logam las yang berurutan. Adapun jenis-jenis cacat *lack of fusion* seperti *Lack of sidewall fusion*, *lack of inter run fusion* dan *lack of root fusion*. Kurangnya penyatuan antara lasan dan logam induk pada satu atau kedua sisi lasan disebabkan beberapa hal yaitu:

Tabel 12.5 penyebab dan pencegahannya kekurangan fusi logam

Penyebab	Pencegahan
Input panas terlalu rendah saat proses las.	Menambah tegangan busur dan/ atau arus pengelasan; mengurangi kecepatan pengelasan
Logam cair di depan busur.	Memperbaiki sudut elektroda dan posisi kerja ; meningkatkan kecepatan pengelasan
Oksida atau skala persiapan lasan	memperbaiki prosedur persiapan ujung wire
Induktansi berlebihan dalam transfer kedalaman pengelasan MAG	mengurangi induktansi, meskipun ini meningkat berhamburan (spatter)

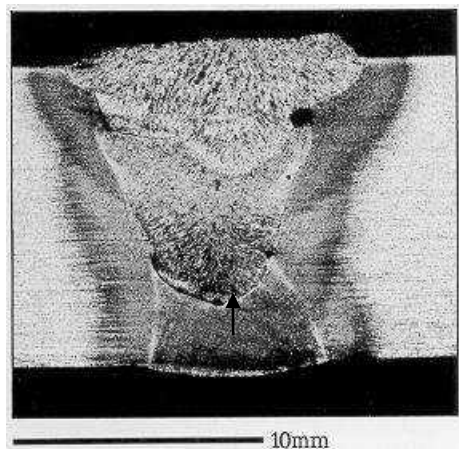


Gambar 12.15 lack of sidewall fusion (TWI, 2018)

Selama pengelasan panas yang digunakan harus cukup tersedia di tepi kolam las untuk menghasilkan fusi dengan logam induk.

Lack of Interun Fusion

Cacat ini dicirikan dengan kurangnya penyatuan di sepanjang garis fusi antara manik-manik las. Kurangnya fusi inter-run menghasilkan celah antara manik-manik las dan menyebabkan terjebaknya terak.



Gambar 12.16 jenis cacat kurangnya interun fusi (TWI, 2018)

Adapun penyebab cacat las jenis interun fusion adalah sebagaimana pada tabel berikut dibawah ini:

Tabel 12.6 penyebab dan pencegahan interan fusion

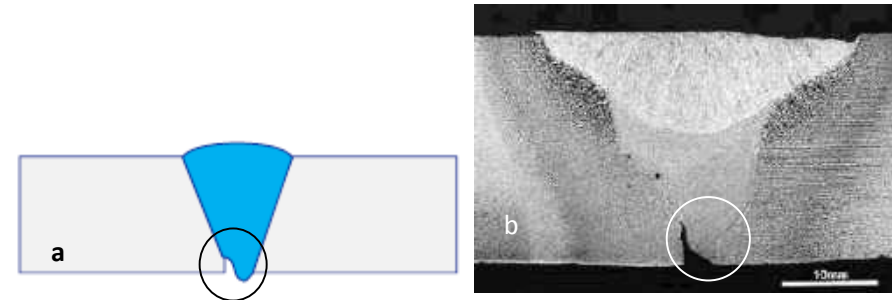
Penyebab	Pencegahan
Arus busur rendah menghasilkan fluiditas rendah pada kolam las	Meningkatkan arus pengelasan

Kecepatan pengelasan terlalu tinggi
Penempatan manik yang tidak akurat

Kurangi kecepatan pengelasan
Latih kembali tukang las

Cacat Kurang Fusi pada Akar las (*Lack of Root Fusion*)

Kurangnya perpaduan antara lasan dan logam induk pada akar lasan disebabkan karena beberapa hal. Adapun bentuk cacat ini seperti terlihat pada gambar dibawah:



Gambar 12.17 incomplete root fusion a) gambar skematik dan b) photo makro (TWI, 2018)

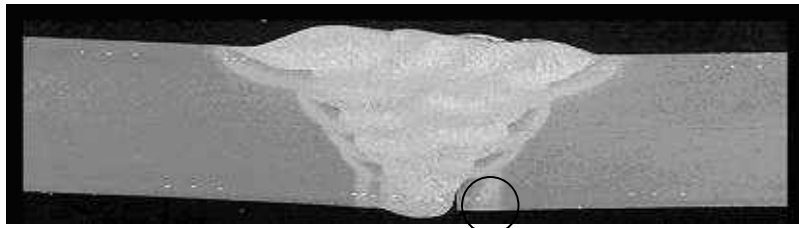
Tabel 12.7 penyebab dan pencegahan *lack of fusion*

Penyebab	Pencegahan
root face terlalu tebal, root gap tidak cukup atau kegagalan untuk memotong kembali logam saat back gouging Input panas rendah	Memperbaiki teknik back gouging dan Pastikan persiapan sesuai WPS Meningkatkan arus dan/ atau voltase busur las; mengurangi kecepatan pengelasan
Induktansi berlebihan dalam transfer pengelasan nikturun MAG, kolam las di depan busur ukuran elektroda pada proses MMA terlalu besar (kerapatan arus rendah)	Perbaiki pengaturan listrik dan mungkin beralih ke semprotan transfer busur Kurangi ukuran elektroda
Penggunaan proses pengelasan vertikal-down	Beralih ke prosedur vertikal-atas
Root face terlalu besar	Mengurangi ukuran root face

Root gap terlalu kecil Pastikan penggunaan ukuran root gape benar

Manipulasi sudut atau elektroda salah Pastikan tukang las sepenuhnya memenuhi syarat dan kompeten
Gunakan sudut elektroda yang benar.

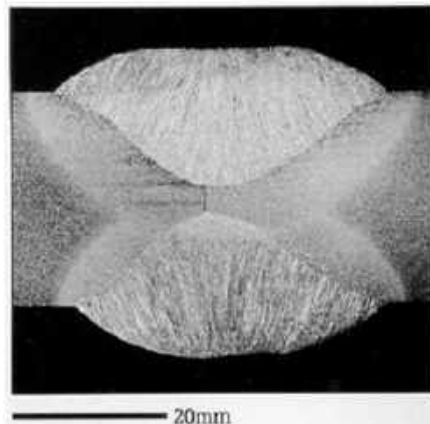
Misalignment berlebihan di daerah root Pastikan perataan yang benar



Gambar 12.18 cacat lack of root fusion (TWI, 2018)

12.7.2 Lack of Penetrasi (kurang Penetrasi)

Lack of penetrasi dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu penetrasi kurang (*incomplete penetration*) dan penetrasi yang kurang pada akar las (*incomplete root penetrasi*).



Gambar 12.19 cacat penetrasi yang tidak lengkap (TWI, 2018)

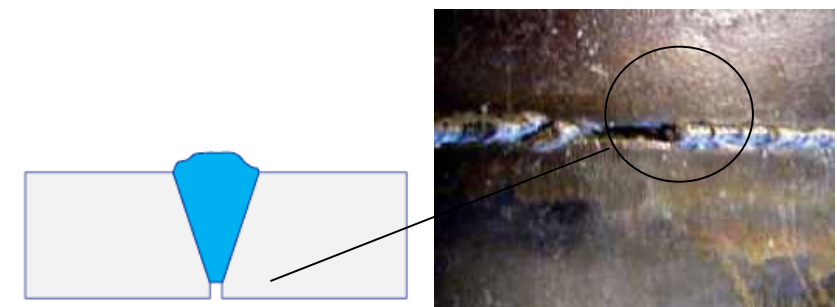
Jika sambungan las tidak bersifat kritis, yaitu kekuatan yang dibutuhkan rendah dan area tersebut tidak rentan terhadap retak fatik, dimungkinkan untuk menghasilkan las penetrasi parsial. Dalam hal ini penetrasi akar yang tidak lengkap

dianggap sebagai bagian dari struktur ini dan bukan ketidaksempurnaan. Hal ini biasanya ditentukan oleh persyaratan desain atau kode.

Tabel 12.8 penyebab dan pencegahan cacat penetrasi kurang

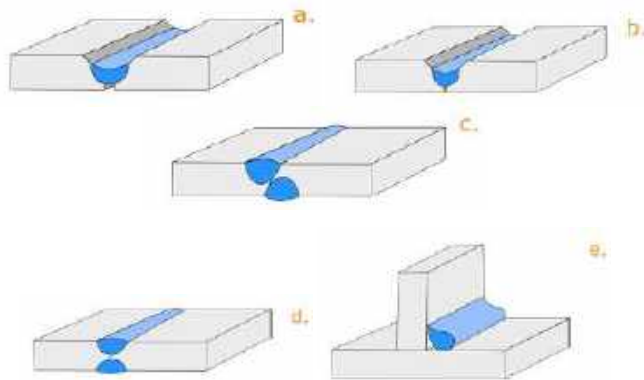
Penyebab	Pencegahan
root face terlalu tebal, tidak cukup root gap atau kegagalan pada pemotongan logam ketika proses back gouging	Memperbaiki teknik back gouging dan pastikan persiapan tepi sesuai WPS yang disetujui
Input panas terlalu rendah	Meningkatkan arus pengelasan dan/ atau voltase busur pengelasan; mengurangi kecepatan pengelasan
Induktansi berlebihan dalam transfer dip pengelasan MAG, kolam las di depan busur	Perbaiki pengaturan listrik dan mungkin beralih ke pengabutan transfer busur
ukuran Elektroda las MMA terlalu besar (arus rendah)	Kurangi ukuran elektroda
Penggunaan proses pengelasan vertikal-down	Beralih ke prosedur pengelasan vertikal-up

Penetrasi kurang pada bagian Akar (Incomplete Root Penetration)



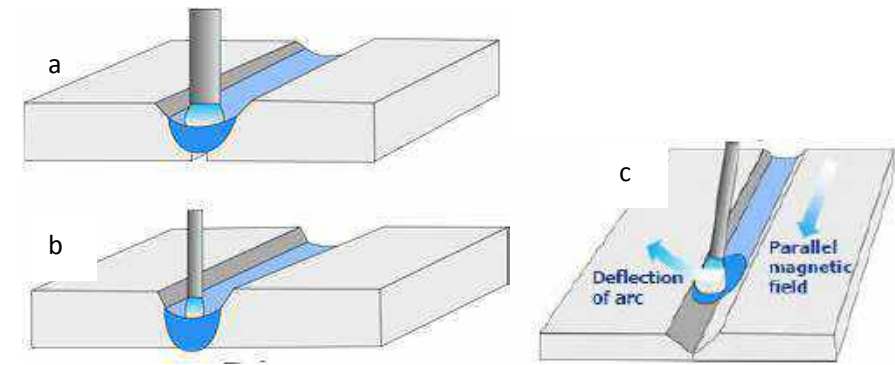
Gambar 12.20 incomplete root penetration pada lasan baja (TWI, 2018)

Cacat las penetrasi kurang pada bagian akar las disebabkan karena beberapa faktor seperti dijelaskan pada tabel 12.8. skematik dan contoh cacat pada pengelasan baja yang terjadi pada baja karbon seperti ditunjukkan pada gambar (12.20). cacat ini bisa terjadi hampir dikeseluruhan dari akar las atau pada sebagian daerah. Cacat ini bisa karena akar las yang terlalu lebar (gambar 12.21 a), celah akar terlalu kecil sehingga tidak tembus (gambar 12.21 b), cacat pada akar las juga dimungkinkan terjadi karena terjadi pergeseran sambungan dari posisinya (gambar 12.21 c), cacat las juga terjadi karena input las terlalu rendah (gambar 12.21 d), dan hal sama juga terjadi pada las fillet karena input panas terlalu kecil (gambar 12.21 e).



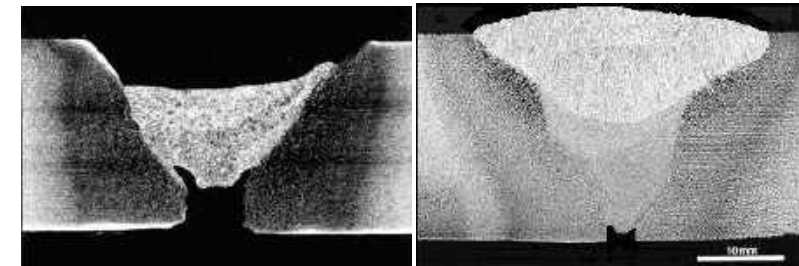
Gambar 12.21 a) permukaan akar terlalu lebar, b) Celah akar terlalu kecil, c) Lasan salah penempatan, d) Input las terlalu rendah dan f) Input busur (panas) terlalu rendah (TWI, 2018)

Penggunaan diameter elektroda yang kurang tepat menimbulkan cacat lasan berupa kurangnya fusi pada dinding samping dari lasan pada sambungan tumpul (gambar 12.22).



Gambar 12.22 a) diameter elektroda terlalu besar, b) diameter elektroda lebih kecil (benar), dan c) kurangnya fusi pada dinding samping akibat defleksi busur (TWI, 2018)

Cacat las ini terlihat kedua permukaan fusi dari bagian akar yang tidak meleleh. Saat dilakukan pemeriksaan pada sisi akar, anda dapat melihat dengan jelas kedua tepi akar tidak meleleh. Penyebab dan pencegahan sama seperti pada cacat kurangnya fusi root (*lack of root fusion*).



Gambar 12.23 jenis cacat incomplete root penetration (TWI, 2018)

12.8 Ketidakterampilan Bentuk dan Dimensi (*Imperfect shape and dimensions*)

Ketidakterampilan pada bentuk dan dimensi lasan dapat dibagi menjadi beberapa jenis yaitu:

- a. Undercut
- b. Excess weld metal
- c. Excess penetration
- d. Overlap

- e. Linier misalignment
- f. Angular distortion
- g. Incomplete fill groove
- h. Irregular width
- i. Root concavity
- j. Burn through

12.8.1 Undercut

Alur las (*groove*) yang tidak beraturan pada ujung *toes* dari logam induk atau logam las yang sebelumnya terdeposit karena pengelasan. Ditandai dengan kedalaman, panjang, dan ketajamannya. Jenis cacat ini dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu *continius undercut*, *intermittent undercut* dan *inter-run undercut*.



Gambar 12.24 cacat undercut (TWI, 2018)

Tabel 12.9 penyebab dan pencegahan cacat *undercut*

Penyebab	Pencegahan
Cairan di ujung atas karena pengelasan arus tinggi (terutama di bagian tepi bebas) atau karena kecepatan pengelasan tinggi.	Mengurangi input daya, khususnya saat mendekati tepi di mana overheating dapat terjadi
coba gunakan lasan filet secara horizontal posisi (PB) dengan panjang kaki (<i>leg length</i>) > 9mm	Dilas dalam posisi datar atau gunakan teknik multi-run

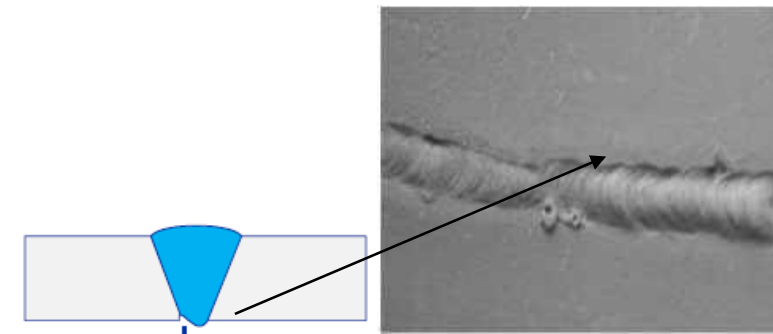
Sudut elektroda salah

Busur langsung ke bagian yang lebih tebal

Pemilihan gas pelindung yang salah pada proses (MAG)

Pastikan campuran gas yang tepat untuk jenis bahan dan ketebalan (MAG)

Cara yang harus diambil selama perbaikan lasan pada cacat undercut yaitu dengan mengontrol input panas. Jika manik lasan hasil perbaikan terlalu kecil, maka laju pendinginan setelah pengelasan akan berlebihan dan logam induk mungkin memiliki kekerasan yang meningkat dan lasan rentan terhadap retak hidrogen.



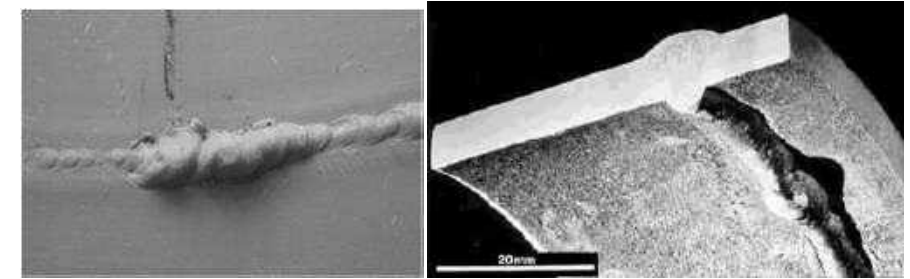
Gambar 12.25 cacat root undercut (TWI, 2018)

12.8.2 Logam Las yang Berlebih (Excess Weld Metal)

Kelebihan logam las (*excess weld metal*) adalah logam las ekstra yang menghasilkan konveksitas berlebih pada lasan filet dan ketebalan lasan lebih besar dari pelat logam induk pada lasan tumpul (butt weld). hal ini dianggap sebagai ketidaksempurnaan hanya ketika ketinggian logam las berlebih dari batas yang ditentukan.



Gambar 12.26 excess weld metal (TWI, 2018)

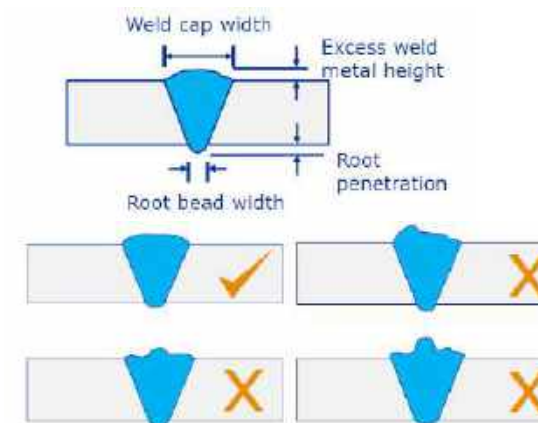


Gambar 12.27 excess root penetrations (TWI, 2018)

Tabel 12.10 penyebab dan pencegahan logam las berlebih

Penyebab	Pencegahan
Kelebihan penggunaan busur energi (MAG, SAW)	Pengurangan input panas
Persiapan tepi terlalu dangkal	Memperdalam persiapan tepi
Manipulasi atau penumpukan elektroda yang salah urutannya	Tingkatkan keterampilan tukang las
Ukuran elektroda salah	Kurangi ukuran elektroda
Kecepatan pengelasan terlalu lambat	Pastikan kecepatan pengelasan yang benar digunakan
Sudut elektroda salah	Pastikan sudut elektroda yang benar digunakan
Polaritas yang salah digunakan (polaritas elektroda DC-ve (MMA, SAW)	Pastikan polaritas yang benar yaitu DC +ve Catatan DC-ve harus digunakan untuk TIG

Istilah tulangan (reinforcement) yang digunakan untuk menunjuk fitur lasan ini menyesatkan karena kelebihan logam biasanya tidak menghasilkan lasan yang lebih kuat pada sambungan butt joint pada baja biasa. Ketidaktepatan ini bisa menjadi masalah, karena ujung las tajam bisa mengarah pada peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung las dan retak lelah.

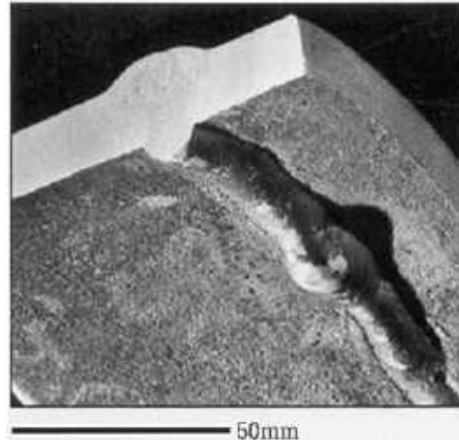


Gambar 12.26: a) ukuran las butt weld, dan b) bentuk permukaan logam las yang benar (TWI, 2018)

12.8.3 Penetrasi Berlebih (Excess Penetrations)

Proyeksi dari penetrasi akar las melampaui batas yang ditentukan, pada lokal atau kontinu. Penetrasi pada manik las dengan dimensi yang seragam membutuhkan banyak keterampilan, khususnya dalam pengelasan pipa. Ini dapat menjadi lebih sulit jika aksesnya terbatas ke lasan atau persiapan yang sempit.

Balok pendukung permanen atau balok sementara dapat membantu dalam mengontrol penetrasi.



Gambar 12.27 excess penetration (TWI, 2018)

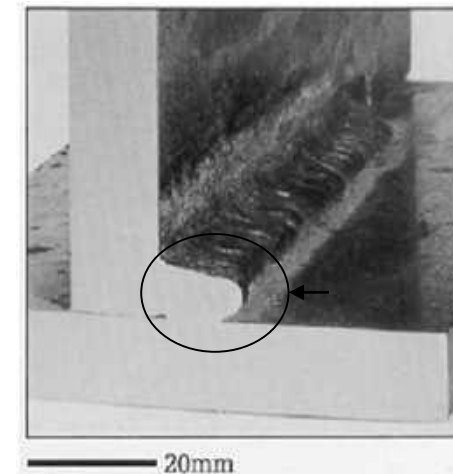
Tabel 12.11 penyebab dan pencegahan kelebihan penetrasi

Penyebab	Pencegahan
Input panas las terlalu tinggi	Mengurangi tegangan busur dan / atau arus pengelasan; meningkatkan kecepatan pengelasan
Persiapan lasan yang salah yaitu celah akar (root gap) berlebihan, persiapan tepi terlalu tipis, kekurangan pada backing	Memperbaiki persiapan proses pengelasan
Penggunaan elektroda tidak cocok untuk posisi pengelasan	Gunakan elektroda yang benar untuk posisi tertentu
Kurangnya keterampilan tukang las	Latih kembali tukang las

12.8.4 Overlap

Ketidaktepatan pada ujung las disebabkan oleh logam yang mengalir ke permukaan logam induk tanpa melebur ke dalamnya.

Untuk pengelasan fillet overlap sering dikaitkan dengan undercut, seolah-olah kolam las terlalu cair pada bagian atas lasan akan mengalir jauh untuk menghasilkan undercut di bagian atas dan overlap di dasar las. Jika volume kolam las terlalu besar pada las fillet dalam posisi horizontal-vertikal (PB), logam las akan runtuh karena gravitasi, menghasilkan kedua cacat (undercut di bagian atas dan overlap di dasar las), cacat ini disebut menurun (sagging).



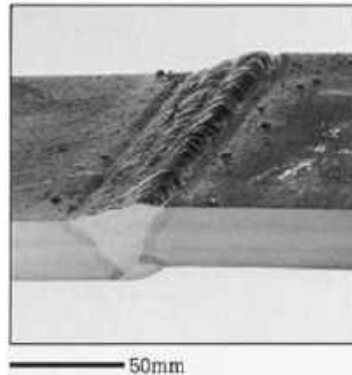
Gambar 12.28 cacat overlap (TWI, 2018)

Tabel 12.12 penyebab dan pencegahan cacat overlap

Penyebab	Pencegahan
Manipulasi elektroda yang buruk (MMA)	Latih kembali tukang las
Input panas terlalu tinggi/ kecepatan pengelasan terlalu rendah menyebabkan permukaan mengalir pada lasan filet	Kurangi masukan panas atau batasi ukuran kaki hingga 9 mm maksimum untuk lasan fillet satu pass (singel pass)
Posisi pengelasan yang salah	Ubah posisi pengelasan ke posisi datar
Penggunaan jenis bahan pelapis elektroda salah sehingga mengakibatkan fluiditas terlalu tinggi	Ubah jenis bahan pelapis elektroda menjadi lebih cepat membeku dengan jenis yang cocok (cairan sulit mengalir)

12.8.5 Linier Misalignment

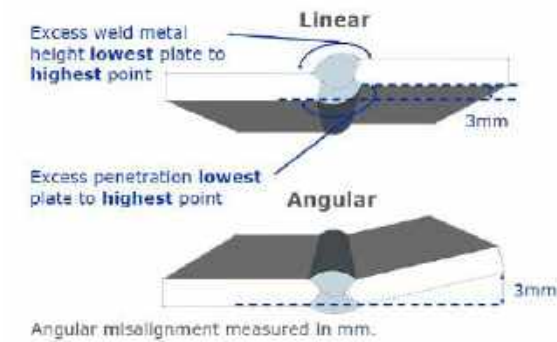
Ketidaksejajaran antara dua bagian yang dilas sedemikian rupa sementara bidang permukaannya paralel, mereka tidak berada dalam bidang yang sama. *Misalignment* bukan ketidaksempurnaan las tetapi masalah persiapan struktural. Bahkan dengan sejumlah kecil ketidaksejajaran dapat secara drastis meningkatkan tegangan geser lokal pada sambungan dan menyebabkan tegangan lentur.



Gambar 12.29 linier misalignment (TWI, 2018)

Tabel 12.13 penyebab dan pencegahan linier misalignment

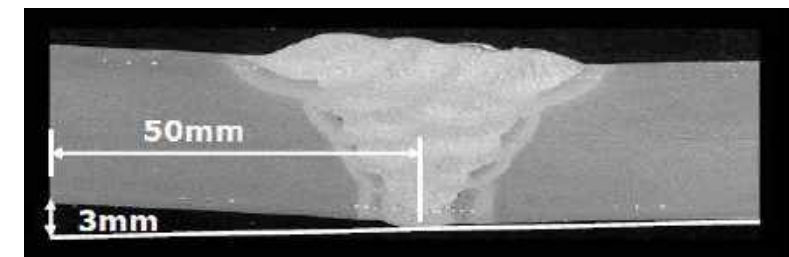
Penyebab	Pencegahan
Ketidakakuratan dalam prosedur perakitan (assembly) atau distorsi dengan lasan lain	Pemeriksaan keselarasan yang memadai sebelum pengelasan yang ditambah dengan penggunaan klem dan irisan (wedges)
Kelebihan ukuran dari kerataan plat rol/canai panas atau bagian-bagian	Periksa keakuratan bagian yang dirol sebelum pengelasan



Gambar 12.30 cacat distorsi misalignment dan liner misalignment (TWI, 2018)

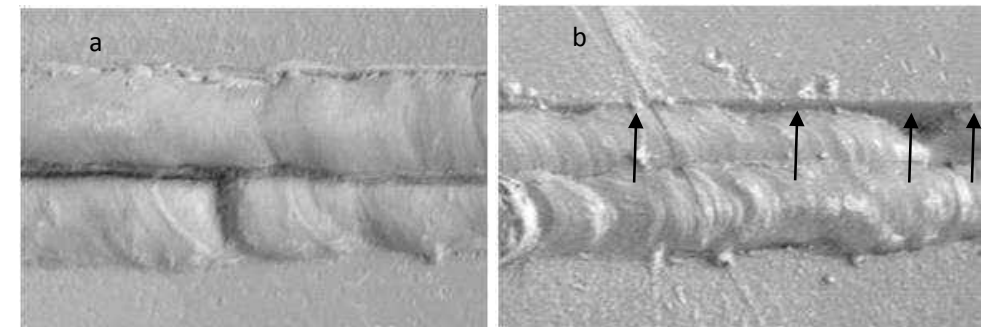
12.8.6 Distorsi Sudut (Angular Distortion)

Ketidaksejajaran (Misalignment) antara dua bagian yang dilas sedemikian rupa sehingga bidang permukaannya tidak sejajar atau pada sudut yang diinginkan. Penyebab dan pencegahannya sama dengan misalignment linier.



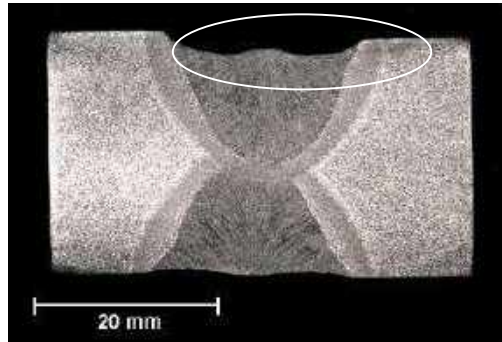
Gambar 12.31 distorsi sudut (TWI, 2018)

12.8.7 Incomplete Filled Groove



Gambar 12.32 cacat a) incompleted filled groove dan b) lack of sidewall fusion (TWI, 2018)

Saluran kontinu atau terputus-putus (intermittent) di permukaan lasan karena pengisian yang tidak memadai dari logam pengisi lasan. Ketidaksempurnaan ini berbeda dari undercut, karena cacat ini mengurangi kapasitas dukung beban pada suatu lasan, sedangkan undercut menghasilkan bentuk takik penambah tekanan yang tajam di tepi lasan.

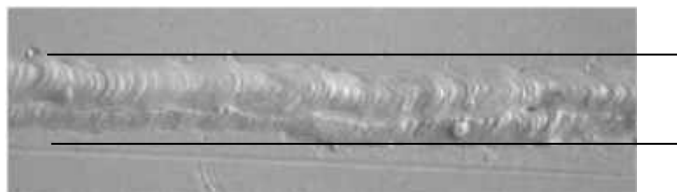


Gambar 12.33 incomplete filled groove (TWI, 2018)

Tabel 12.14 penyebab dan pencegahan incomplete filled groove

Penyebab	Pencegahan
Logam las tidak mencukupi	Meningkatkan jumlah run pengelasan
Permukaan manik las tidak teratur	Latih kembali tukang las

12.8.8 Lebar Logam Las tidak beraturan (Irregular Width)



Gambar 12.34 Irregular width (TWI, 2018)

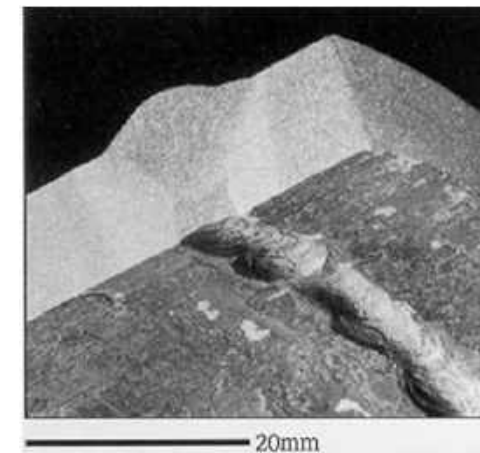
Meskipun ketidaksempurnaan ini mungkin tidak mempengaruhi integritas lasan yang sudah selesai, hal ini dapat mempengaruhi lebar HAZ dan mengurangi daya dukung beban sambungan (pada baja struktural berbutir halus) atau mengganggu

ketahanan korosi pada (baja tahan karat dupleks). Ada beberapa penyebab dan pencegahan las yaitu perubahan

1. Busur las dari arus DC ke AC pencegahannya adalah dengan mempertahankan panjang busur sependek mungkin.
2. Permukaan manik las tidak teratur. Pencegahannya adalah dengan melatih kembali tukang las

12.8.9 Akar Las Cembung (Root Concavity)

Strip pendukung (backing strip) dapat digunakan untuk mengontrol bertambahnya manik las pada root.



Gambar 12.35 root concavity (TWI, 2018)

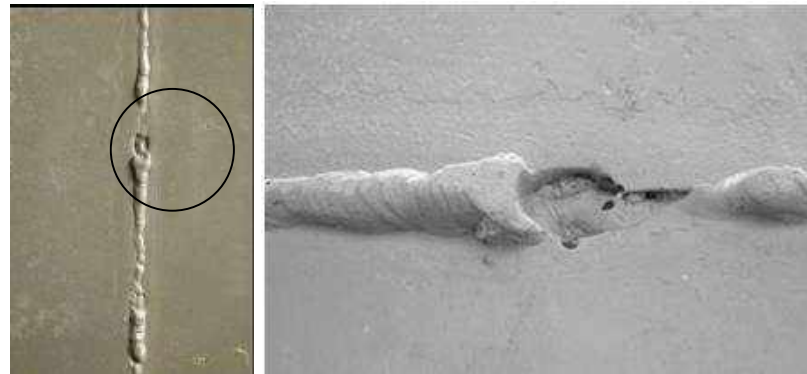
Tabel 12.15 tabel penyebab dan pencegahan root concavity

Penyebab	Pencegahan
Daya busur yang tidak memadai untuk menghasilkan positif titisan (positive bead)	dengan menaikkan energi busur
Persiapan/ fit-up salah	Bekerja harus mengikuti WPS
Tekanan gas pendukung berlebihan (TIG)	Kurangi tekanan gas

Kurangnya keterampilan tukang las Latih kembali tukang las
 Banjir terak di alur batang pendukung Tilt berfungsi untuk mencegah terak banjir

12.8.10 Burn Through

ketidaktelesmpurnaan jenis ini dikarenakan runtuhnya kolam las yang menyebabkan lubang di daerah las.



Gambar 12.36 cacat burn through (TWI, 2018)

Tabel 12.16 tabel penyebab dan pencegahan burn through

Penyebab	Pencegahan
Kecepatan pengelasan tidak mencukupi	Tingkatkan kecepatan pengelasan
Arus pengelasan yang digunakan berlebihan	Mengurangi arus pengelasan
Kurangnya keterampilan tukang las	Latih kembali tukang las
menggerinda dengan berlebihan pada permukaan akar	Lebih berhati-hati, melatih ulang tukang las
celah root gap yang berlebihan	Pastikan pemasangan yang benar

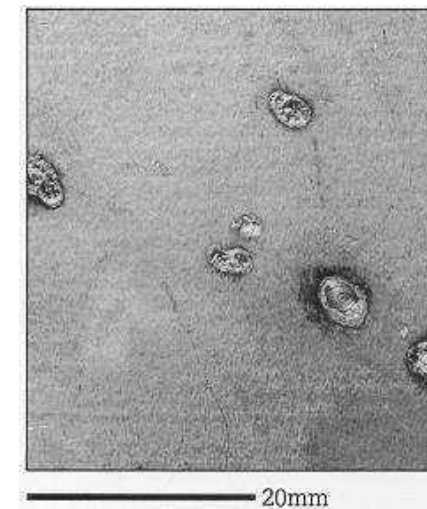
Ini adalah ketidaktelesmpurnaan besar yang terjadi karena kurangnya keterampilan tukang las, tetapi dapat diperbaiki dengan menjembatani kesenjangan

yang terbentuk dalam proses penyambungan logam, tetapi membutuhkan banyak perhatian.

12.9 Ketidaktelesmpurnaan Lainnya (Miscellaneous imperfections)

12.9.1. Stray Arc

Kerusakan lokal pada permukaan logam induk yang bersebelahan dengan logam lasan, yang diakibatkan oleh busur listrik diluar logam las. Hal ini menghasilkan area acak dari logam leburan di mana elektroda, pemegang atau penjepit tidak sengaja menyentuh pekerjaan itu.



Gambar 12.37 stray arc (TWI, 2018)

Tabel 12.17 penyebab dan pencegahan stray arc

Penyebab	Pencegahan
Buruknya akses ke pekerjaan pengelasan	memperbaiki akses (modifikasi urutan perakitan)
Insulasi pemegang elektroda atau torch tidak ada	Membuat standar inspeksi reguler untuk pemegang elektroda dan torch
Gagal memberikan tempat istirahat berisolasi untuk pemegang elektroda	Menyediakan tempat meletakkan torch las yang terisolasi

atau torch las saat tidak digunakan

penjepit arus Longgar

Secara teratur klem harus di rawat dengan baik

sesuaikan kawat umpan (pengelasan MAG) tanpa harus mengisolasi arus pengelasan

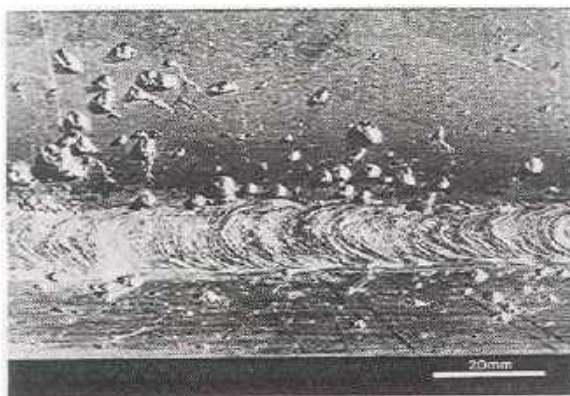
Latih kembali tukang las

busur listrik dapat menghasilkan HAZ keras yang mungkin mengandung retakan, kemungkinan mengarah pada keretakan yang serius. Lebih baik untuk menghilangkan arc stike dengan menggerinda daripada melakukan perbaikan las

12.9.2 Percikan ke Logam Induk (Spatter)

Percikan merupakan jenis ketidaksempurnaan pada baja yang menghilangkan keindahan dan tidak mempengaruhi integritas lasan. Namun karena biasanya disebabkan oleh arus pengelasan yang berlebihan, hal itu adalah tanda bahwa kondisi pengelasan tidak ideal sehingga biasanya ada yang terkait dengan masalah lainnya dalam struktur, yaitu karena input panas yang tinggi.

Beberapa percikan selalu diproduksi oleh proses pengelasan elektroda busur terbuka. Senyawa anti *spatter* dapat digunakan pada logam induk untuk mengurangi lengket dan spatter kemudian dapat dihilangkan.



Gambar 12.38 percikan logam las (spatter) (TWI, 2018)

Percikan dari logam las atau logam pengisi keluar dari kampuh las selama pengelasan mengikuti permukaan logam induk atau logam las yang dipadatkan.

Tabel 12.18 penyebab dan pencegahan percikan las/ spatter

Penyebab	Pencegahan
Arus busur listrik terlalu tinggi	Kurangi besar arus busur listrik
Panjang busur terlalu panjang	Kurangi panjang busur
Hembusan busur listrik magnetik	Kurangi panjang busur atau alihkan ke polaritas AC
Pengaturan yang salah untuk proses GMAW.	Memodifikasi pengaturan listrik (tetapi harus hati-hati untuk mempertahankan fusi penuh!)
Elektroda las basah	Gunakan elektroda yang kering
Pemilihan gas pelindung yang salah (100% CO ₂)	Tambah kandungan argon jika memungkinkan, Namun jika terlalu tinggi dapat menyebabkan kurangnya penetrasi

12.9.3 Permukaan Robek (Torn Surface)

Kerusakan permukaan karena penghilangan kerusakan dengan melakukan pengelasan sementara. Area tersebut harus di ground off, bagian yang rusak dilakukan pemeriksaan dengan penetran atau pemeriksaan partikel magnetik kemudian dikembalikan ke bentuk aslinya dengan pengelasan menggunakan prosedur yang memenuhi syarat. Beberapa aplikasi tidak memungkinkan dilakukan pengelasan lapisan pada permukaan material induk.

12.9.4 Additional Imperfection

A. Grinding Mark

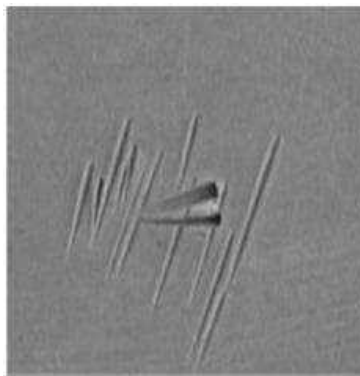
Kerusakan lokal karena penggerindaan



Gambar 12.39 grinding mark (TWI, 2018)

B. Chipping Mark

Kerusakan lokal akibat penggunaan pahat atau alat lain.



Gambar 8.40 cacat chisel mark (TWI, 2018)

C. Under Flushing

Kurangnya ketebalan benda kerja karena penggerindaan yang berlebihan.

D. Misalignment of Opposite Runs

Perbedaan antara garis tengah dua run dibuat dari sisi yang berlawanan.

E. Temper Colour (Visible Oxide Film)



Gambar 8.41 temper colour stainless steels (TWI, 2018)

Ketidakhempurnaan jenis ini ditandai permukaannya teroksidasi ringan di zona las, biasanya terjadi pada baja tahan karat

2.10. Standar penerimaan (Acceptance Criteria)

Ketidakhempurnaan hasil las dapat sangat serius mengurangi integritas struktur yang dilas. Sebelum menerima beban pada sambungan las, perlu untuk menemukan cacat dengan menggunakan pengujian dengan teknik NDE, asesment yang signifikansi dan segera mengambil tindakan untuk menghindari cacat ini terulang kembali.

Standar penerimaan suatu ukuran dan jenis cacat tertentu untuk aplikasi struktur tertentu biasanya dinyatakan sebagai standar penerimaan cacat (acceptance criteria), biasanya dimasukkan dalam standar atau spesifikasi aplikasi.

Pada semua standar penerimaan pada ketidakhempurnaan pengelasan umumnya benar-benar tidak mengizinkan adanya retakan pada struktur. Dalam keadaan luar biasa dan tunduk pada persetujuan semua pihak, celah dapat tetap ada jika dapat ditunjukkan tanpa keraguan bahwa retak yang ada tidak mengarah pada terjadinya kegagalan. Ini sangat sulit dilakukan dan biasanya melibatkan pengukuran dan perhitungan mekanika perpatahan.

Penting untuk dicatat bahwa tingkat penerimaan dapat bervariasi antara aplikasi yang berbeda dan dalam kebanyakan kasus berbeda antara standar yang

berbeda untuk aplikasi yang sama. Akibatnya, ketika memeriksa berbagai pekerjaan, penting untuk digunakan suatu standar atau spesifikasi yang berlaku yang dikutip dalam kontrak.

Setelah ditemukan ketidaksempurnaan pada lasan yang tidak dapat diterima, struktur harus dilas ulang. Jika ketidaksempurnaan lasan berada di permukaan, pertimbangan pertama adalah apakah jenisnya cukup dangkal untuk diperbaiki. Cacat yang tidak terlalu berarti bahwa dengan penghilangan cacat yang ada, ketebalan material yang tersisa cukup untuk tidak memerlukan penambahan logam las lebih lanjut.

Jika cacat terlalu dalam itu harus dihilangkan dan logam las baru ditambahkan untuk memastikan ketebalan desain throat minimum.

Dalam beberapa kasus mungkin akan dapat diterima untuk menggunakan prosedur yang memenuhi syarat untuk membuat sambungan baru atau apakah melakukan eskavasi atau membuat sambungan lengkap. Jika tingkat jaminan yang dibutuhkan lebih tinggi, kualifikasi harus dibuat menggunakan simulasi yang tepat dari sambungan las, yang mana dilakukan eskavasi kemudian diisi ulang menggunakan metode yang ditentukan. Dalam kedua kasus tersebut, inspeksi dan pengujian kualifikasi akan diperlukan sesuai dengan standar aplikasi.

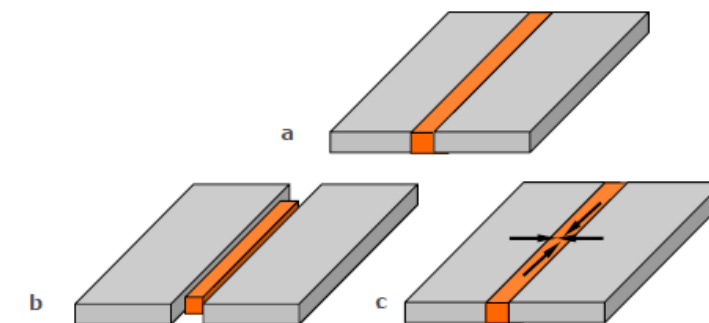
Bab 13

Tegangan Sisa dan Distorsi

13.1. Perkembangan tegangan sisa

Proses pengelasan melibatkan proses pemanasan pada bagian tepi sambungan secara lokal untuk melebur material, tegangan yang tidak seragam pada komponen yang disambung, yang menghasilkan ekspansi dan kontraksi pada material yang dipanaskan. Awalnya, tegangan tekan terjadi di sekitar logam dasar yang dingin ketika kolam las (weld pool) terbentuk karena ekspansi termal dari daerah HAZ yang berdekatan dengan kolam las. Tegangan tarik terjadi saat proses pendinginan ketika terjadi kontraksi dari logam las dan HAZ dilawan oleh sebagian besar logam induk yang dingin.

Tegangan ini terjadi di atas titik yield logam pada suhu yang berlaku, tarikan ini terus menghasilkan deformasi permanen, tetapi terus berkurang dan turun ke tingkat tegangan yield hingga berhenti dan menyebabkan distorsi lebih lanjut. Tetapi, jika pada titik ini kita bisa melepaskan lasan dari pelat yang dipotong sepanjang garis sambungan, hal itu akan menyusut lebih jauh, bahkan ketika distorsi telah berhenti, lasan masih mengandung regangan elastis yang setara dengan tegangan yield. Visualisasi dari sebuah sambungan logam las yang meregang secara elastis di antara dua pelat.



Gambar 13.1 Penyusutan elemen logam las selama pendinginan a) Sepanjang lasan yang panas dan mulai dingin; b) Jika tidak digunakan pada logam induk, lasan akan

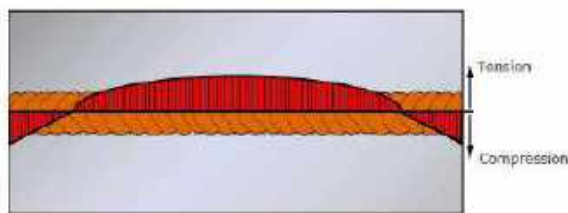
menyusut, mengurangi dimensinya arah tiga sumbu; dan c) karena lasan menyatu dengan logam induk di bawah sisakombinasi pendinginan dan tegangan akan terjadi.

Tegangan yang tersisa di sambungan las setelah proses pengelasan disebut tegangan sisa. Dari hal di atas dapat dilihat bahwa terjadi dua tegangan yaitu longitudinal dan transversal (dalam kasus pelat sangat tebal demikian juga pada komponen yang tebal akan terjadi tegangan sisa).

13.2 Distribusi Tegangan Sisa

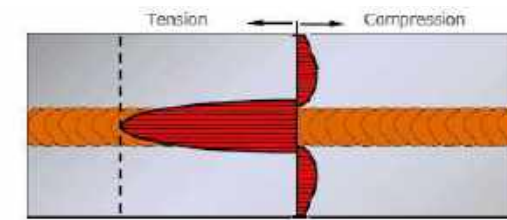
Besarnya tegangan termal sebagai penyebab pada material dapat dilihat dengan perubahan volume pada area pengelasan saat proses solidifikasi dan pendinginan berikutnya hingga suhu kamar. Sebagai contoh, ketika pengelasan pada baja C-Mn, volume logam las cair akan berkurang sekitar kira-kira 3% pada saat pembekuan dan volume logam las/ HAZ yang membeku akan berkurang hingga lebih 7% karena suhu turun dari titik leleh baja hingga ke suhu kamar.

Secara tegak lurus terhadap lasan, dalam arah melintang, tegangan pada lasan lebih tergantung pada kondisi penjepitan dari *part*. Tegangan sisa arah transversal biasanya relatif kecil walaupun distorsi transversal sangat kuat. Distribusi tegangan sisa transversal pada sambungan tumpul ditunjukkan di bawah ini (gambar 13.2). Tegangan tarik dengan ukuran yang rendah dihasilkan di bagian tengah sementara tegangan tekan dihasilkan di kedua ujung sambungan. Harus dicatat bahwa semakin lama proses pengelasan, semakin tinggi tegangan sisa tarik sampai tegangan luluh tercapai.



Gambar 13.2 Pola tegangan sisa pada arah transversal (TWI, 2018)

Pada tegangan longitudinal, lasan dan beberapa dari pelat yang telah dipanaskan berada pada atau mendekati level tegangan yield. Berpindah keluar ke plat dari daerah HAZ, tegangan pertama jatuh ke titik nol (wilayah tegangan tarik melampaui logam las dan HAZ ke dalam pelat logam induk dan melebihi daerah tegangan tekan. Lebar bidang di mana tegangan sisa tarik hadir tergantung pada masukan (input) panas selama pengelasan, semakin tinggi input panas maka semakin lebar bidang di mana tegangan sisa tarik terjadi.

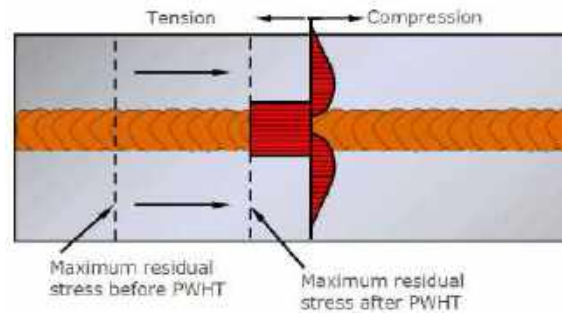


Gambar 13.3 Pola tegangan sisa dalam arah longitudinal dikondisi lasan (TWI, 2018)

Tegangan sisa tarik maksimum adalah sama dengan nilai kekuatan tarik yield logam las pada suhu kamar. Semua pengelasan fusi yang belum dilakukan proses perlakuan panas pascalas (Postweld treatment), sebagian besar dari sambungan las mengandung tegangan sisa. Prosedur yang dikembangkan untuk meminimalkan distorsi dapat mengubah distribusi tegangan sisa tetapi tidak menghilangkannya atau bahkan menguranginya.

Salah satu metode untuk mengurangi tegangan sisa pada sambungan las adalah dengan melakukan Post Weld Heat Treatment (PWHT). Jadi begitu suhu dinaikkan, tegangan luluh mulai turun. Sebagai hasil dari proses ini, tegangan sisa yang mencapai nilai tegangan luluh pada suhu kamar, tidak dapat terbawa lagi oleh bahan dan relaksasi pada deformasi plastis (biasanya, deformasi plastik ini terbatas pada tingkat butir tetapi dalam beberapa situasi dapat menyebabkan deformasi yang signifikan dari komponen yang dilas). Proses ini berakhir saat bahan telah mencapai suhu *soaking*. Jadi tingkat tegangan sisa akan berkurang dengan perbedaan antara nilai tegangan luluh pada suhu kamar (pada awal PWHT) pada suhu *soaking*. Seperti dapat dilihat dari gambar berikut, hal ini dapat mengurangi

tingkat tegangan sisa tarik hingga seperempat kali dari tingkat awalnya tetapi tegangan sisa tekan dibiarkan tidak berubah. Hal ini menunjukkan bahwa PWHT tidak sepenuhnya menghilangkan tegangan sisa ini.



Gambar 13.4 Pola tegangan sisa pada arah longitudinal setelah PWHT (TWI, 2018)

13.3 Efek dari tegangan sisa

Karena pembentukan tegangan sisa tidak dapat dihindari, maka tepat untuk bertanya apakah kehadiran mereka menjadi perhatian. Seperti pada banyak kondisi teknik, jawabannya tidak sederhana ya atau tidak. Ada banyak aplikasi di mana keberadaan tegangan sisa akan memiliki sedikit atau tidak ada pengaruh pada perilaku layanan sambungan, tangki penyimpanan, rangka bangunan, pipa bertekanan rendah dan peralatan rumah tangga sebagai contoh peralatan di mana sambungan dapat digunakan dalam kondisi dilas tanpa merugikan. Tegangan sisa pada logam yang telah dilas dianggap merugikan karena:

- Menyebabkan distorsi dan struktur yang dilas tidak sesuai dengan tujuan awal
- Mempengaruhi stabilitas dimensi assembling yang dilas. Saat pemrosesan komponen yang dilas, melepaskan lapisan logam di dekat sambungan dapat mengganggu keseimbangan antara tegangan sisa dan tegangan sisa dan deformasi lebih lanjut atau pembengkokan dapat terjadi. Hal ini dapat membuatnya sulit untuk menahan toleransi pemesinan kritis dan mungkin diinginkan untuk menghilangkan tegangan (stress relieve) untuk mencapai stabilitas dimensi.

- Meningkatkan risiko patah getas, ketika tegangan sisa hadir pada komponen yang dilas, tegangan ekstra kecil yang ditambahkan dapat sebagai inisiasi patah getas, asalkan kondisi lain terpenuhi (yaitu suhu rendah).
- Dapat menyebabkan jenis korosi tertentu. Beberapa logam pada lingkungan tertentu akan cepat terkorosi dengan adanya tegangan tarik, yaitu korosi retak tegang (stress corrosion cracking). Dalam kasus ini, sambungan dalam kondisi dilas yang mengandung tegangan sisa mengalami serangan korosi berlebihan.

Persyaratan dari sebuah struktur menunjukkan bahwa tegangan sisa tidak diizinkan, perancang harus memperhitungkan saat memilih bahan dan menentukan tegangan kerja yang aman. Hal ini dapat dilihat dalam desain kapal, di mana kombinasi suhu rendah dan tegangan sisa dapat menyebabkan patah getas. Seorang perancang harus bisa memilih bahan yang tidak rentan terhadap kegagalan bahkan pada suhu rendah yang mungkin dialami selama masa pakai kerja kapal; kehadiran tegangan sisa kemudian tidak penting.

Demikian pula, dalam banyak struktur yang mengalami beban berfluktuasi selama penggunaan, misalnya pada jembatan, peralatan pengangkat tanah dan crane, perancang harus memperhitungkan keberadaan tegangan sisa dengan memilih rentang tegangan kerja yang memperhitungkan peran tegangan dalam pembentukan dan perambatan retak lelah. Ada beberapa aplikasi spesifik yang penting untuk mengurangi tegangan sisa pada sambungan las: yaitu pada bejana tekan karena risiko kegagalan bencana akibat patah getas, menghilangkan tegangan sering kali merupakan persyaratan hukum atau asuransi.

13.4 Faktor-faktor yang mempengaruhi tegangan sisa

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan sisa, dimana dapat dikelompokkan ke dalam 5 (Lima) kategori yaitu:

1. Sifat material.
2. Jumlah pengendali.
3. Desain sambungan.

4. Perlengkapan kerja.
5. Urutan proses pengelasan.

13.5 Penyebab Distorsi

Pengelasan melibatkan pemanasan yang sangat lokal pada tepi sambungan untuk memadukan material dan tegangan yang tidak seragam diatur dalam komponen karena ekspansi dan kontraksi material yang dipanaskan. Awalnya, tegangan tekan dibuat di sekitar logam induk pada temperature kamar ketika kolam las terbentuk karena ekspansi termal dari logam panas (HAZ) yang berdampingan dengan kolam las. Tegangan tarik terjadi pada pendinginan ketika kontraksi dari logam las dan daerah HAZ segera tertahan oleh sebagian besar logam induk yang dingin.

Besarnya tegangan termal yang diinduksi ke dalam material dapat dilihat dengan perubahan volume pada area pengelasan pada saat solidifikasi dan pendinginan berikutnya hingga suhu kamar. Misalnya, ketika mengelas baja C-Mn, volume logam las cair akan berkurang sekitar 3% pada saat pepadatan dan volume logam las padat/ HAZ akan berkurang 7% lebih lanjut karena suhunya turun dari titik lebur dari baja ke suhu kamar.

Jika tegangan yang dihasilkan dari ekspansi/ kontraksi termal melebihi kekuatan luluh dari logam induk, terjadi deformasi plastis pada logam, menyebabkan pengurangan permanen pada dimensi komponen dan merusak struktur.

Jenis-jenis distorsi yang utama pada pelat yang dilas yaitu:

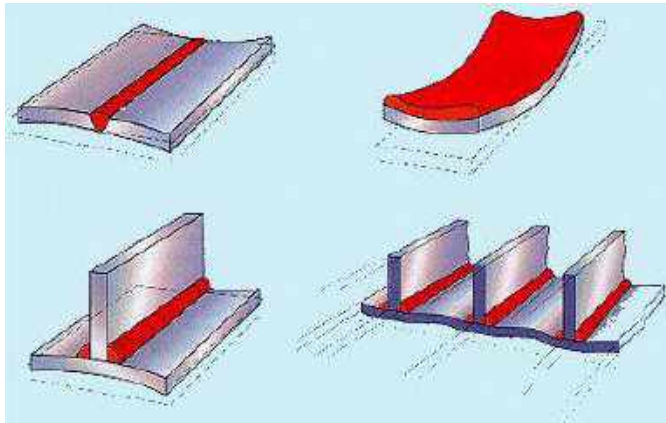
- a. Penyusutan longitudinal.
- b. Penyusutan melintang.
- c. Distorsi sudut (angular distortion).
- d. Bowing dan dishing.
- e. Tekukan (buckling).

Kontraksi dari area lasan karena hasil pendinginan menyebabkan dua jenis penyusutan yaitu penyusutan **melintang (transverse)** dan **memanjang (longitudinal)**. Kontraksi yang tidak seragam (searah ketebalan) menghasilkan distorsi sudut serta penyusutan searah memanjang dan melintang. Sebagai contoh, dalam pengelasan kampuh V tunggal, lasan pertama menghasilkan penyusutan longitudinal dan rotasi melintang. Pada pengelasan kedua menyebabkan pelat baja memutar menggunakan deposit las pertama sebagai titik tumpu sehingga pengelasan seimbang dalam kedua sisi *butt joint* dapat menghasilkan kontraksi yang seragam dan mencegah sudut distorsi.

Pada lasan fillet satu sisi, kontraksi yang tidak seragam akan menghasilkan distorsi angular yang menonjol sehingga lasan fillet dua sisi dapat digunakan untuk mengontrol distorsi pada lasan fillet tetapi karena lasan hanya didepositkan pada satu sisi pelat dasar, distorsi sudut akan dihasilkan pada plat baja.

Tekukan searah longitudinal pada pelat yang dilas terjadi ketika pusat las tidak tepat dengan sumbu netral dari bagian yang dilas sehingga penyusutan longitudinal pada lasan akan membengkokkan baja menjadi bentuk melengkung. Pelat yang ditimpa cenderung melengkung ke dua arah karena terjadi penyusutan memanjang dan melintang dari *cladding*, menghasilkan bentuk plat.

Dishing juga dihasilkan dalam pelapisan yang kaku. Pelat biasanya dimasukkan ke dalam di antara pembuat kaku, karena distorsi sudut pada pemasangan pengkaku lasan. Dalam pelapisan, tegangan tekan pada jarak tekanan kompresif yang jauh dapat menyebabkan tekukan elastis pada pelat tipis, yang menghasilkan *dishing, bowing atau rippling*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.5. Meningkatkan panjang *leg length* dari lasan fillet akan meningkatkan penyusutan pada baja yang dilas.



Gambar 13.5 contoh dari distorsi pada pelat baja yang dilas (TWI, 2018)

13.6 Faktor-faktor yang mempengaruhi distorsi

Jika logam dipanaskan dan didinginkan secara seragam maka hampir tidak ada distorsi tetapi karena material dipanaskan secara lokal dan dikendalikan oleh logam dingin di sekitarnya, maka tegangan dihasilkan lebih tinggi daripada tegangan luluh material sehingga menyebabkan distorsi permanen. Secara prinsip faktor utama yang mempengaruhi jenis dan tingkat distorsi adalah:

1. Sifat logam induk.
2. Jumlah pengendali distorsi.
3. Desain sambungan.
4. Perlengkapan yang digunakan.
5. Prosedur pengelasan.

13.6.1 Sifat Logam Induk

Sifat dari logam induk yang mempengaruhi distorsi adalah koefisien ekspansi termal, konduktivitas termal dan pada tingkat yang lebih rendah, tegangan luluh dan modulus Young. Karena distorsi ditentukan oleh ekspansi dan kontraksi dari material sehingga koefisien ekspansi termal material memainkan peran penting dalam Menentukan tegangan yang dihasilkan selama pengelasan dan tingkat distorsi yang terjadi. Sebagai contoh, karena stainless steel memiliki koefisien

ekspansi yang lebih tinggi dan konduktivitas termal yang lebih rendah daripada baja karbon biasa, umumnya baja ini memiliki distorsi yang jauh lebih besar.

13.6.2 Pengendalian Distorsi

Jika suatu komponen yang dilas tanpa pengendalian eksternal, maka akan terdistorsi akibat tegangan pengelasan. Metode pengendali yang digunakan seperti *strongback* pada lasan tumpul, dapat mencegah pergerakan dan mengurangi distorsi. Pengendali menghasilkan tegangan sisa yang lebih tinggi dalam material, sehingga ada risiko lebih besar untuk retak pada logam lasan dan daerah HAZ terutama pada bahan yang mempunyai sifat sensitif yang besar terhadap retak.

13.6.3 Desain sambungan

Sambungan tumpul dan sambungan fillet rentan terhadap terjadinya distorsi. Hal ini dapat diminimalkan dengan mengadopsi jenis sambungan yang menyeimbangkan tegangan termal melalui ketebalan pelat, misalnya pada kedua sisi lebih disukai daripengelasan satu sisi. Lasan fillet dua sisi harus menghilangkan distorsi sudut dari bagian yang menonjol terutama jika kedua deposit lasan pada waktu yang sama.

13.6 4. Perlengkapan

Perlengkapan harus seragam untuk menghasilkan penyusutan yang dapat diprediksi dan konsisten. Celah sambungan (gap) yang berlebihan dapat meningkatkan tingkat distorsi dengan meningkatkan jumlah logam las yang dibutuhkan untuk mengisi sambungan. Sambungan harus dipasang dengan baik untuk mencegah gerakan relatif antara bagian-bagian selama pengelasan.

13.6.5 Prosedur pengelasan

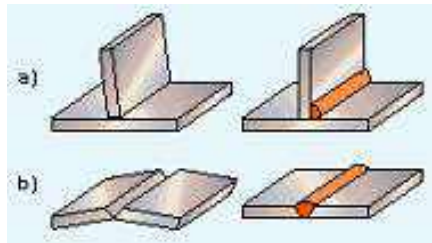
Prosedur pengelasan sangat mempengaruhi tingkat distorsi terutama melalui pengaruhnya terhadap input panas. Prosedur pengelasan biasanya dipilih karena alasan kualitas dan produktivitas, tukang las memiliki ruang lingkup terbatas untuk mengurangi distorsi. Sebagai aturan umum volume las harus dijaga agar tetap minimum. Selain itu, urutan dan teknik pengelasan harus menyeimbangkan tegangan yang disebabkan termal di sekitar sumbu netral komponen.

13.7 Pencegahan dengan pengaturan awal, bending atau penggunaan pengendali

Distorsi sering dapat dicegah pada saat tahapan desain, misalnya dengan menempatkan lasan pada sumbu netral, mengurangi jumlah pengelasan dan deposit logam las dengan menggunakan teknik pengelasan yang sesuai. Di mana distorsi ini tidak mungkin dapat dicegah dengan salah satu dari cara berikut yaitu:

- Pengaturan awal dari part.
- Pembengkokan awal dari part.
- Penggunaan pengendali.

Teknik yang dipilih akan mempengaruhi ukuran dan kompleksitas komponen atau perakitan, biaya peralatan penahan dan kebutuhan untuk membatasi tegangan sisa.



Gambar 13.6 Pengaturan awal part untuk menghasilkan kesejajaran yang benar setelah pengelasan, a) sambungan fillet untuk mencegah distorsi sudut; b) sambungan butt joint untuk mencegah distorsi sudut (TWI, 2018)

13.7.1 Pengaturan Awal

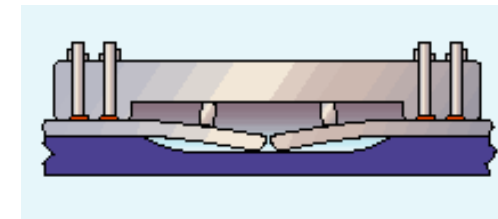
Bagian-bagian yang akan dilas diatur sebelumnya dan dibiarkan bebas untuk bergerak selama pengelasan, lihat Gambar 7.6. Bagian-bagian telah ditentukan sebelumnya dengan jumlah yang telah ditentukan sehingga distorsi yang terjadi selama pengelasan digunakan untuk mencapai kesejajaran dan kontrol dimensi. Keuntungan utama dibandingkan dengan teknik pengendalian distorsi adalah tidak ada peralatan mahal yang dibutuhkan dan memberikan tegangan sisa yang lebih rendah pada struktur yang dilas.

Karena sulit untuk memperkirakan jumlah pengaturan awal yang diperlukan untuk mengakomodasi penyusutan, sejumlah lasan uji coba diperlukan. Misalnya ketika penyambungan logam pada sambungan *butt joint* dengan metode MMA atau MIG/ MAG, celah sambungan biasanya akan menutup sebelum pengelasan; sedangkan dengan SAW sambungan bisa terbuka selama pengelasan. Ketika melakukan uji coba lasan, hal yang penting (essential) bahwa uji struktur harus mewakili struktur dengan ukuran yang sebenarnya untuk menghasilkan tingkat distorsi yang mungkin terjadi. Jadi pengaturan awal lebih cocok untuk komponen yang sederhana atau proses assembling.

13.7.2 Penekukan Awal

Tekukan awal atau *springing* dari part sebelum pengelasan dengan memberikan tegangan awal sebelum perakitan untuk mencegah penyusutan selama pengelasan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.7, pembengkokan awal dengan menggunakan penyangga dan *wedges* dapat melakukan pengaturan awal sebelum pengelasan untuk mengkompensasi distorsi sudut. Melepaskan irisan setelah pengelasan akan memungkinkan bagian-bagian untuk bergerak kembali ke posisi lurus.

Gambar di bawah ini menunjukkan bracing diagonal dan jack tengah yang digunakan untuk bengkokkan awal fixture, bukan komponen, untuk mencegah distorsi melalui proses pengelasan tidak seimbang.



Gambar 13.7 tekukan awal dengan menggunakan penyangga dan wedges untuk mengakomodasi distorsi sudut pada pelat tipis (TWI, 2018)

Penggunaan pengendali

Karena kesulitan dalam menerapkan pengaturan awal dan menahan lentur awal adalah teknik yang lebih banyak digunakan. Prinsip dasar adalah dimana part ditempatkan pada posisi tertentu dan ditahan di bawah untuk meminimalkan gerakan selama pengelasan. Saat melepas komponen dari peralatan penahan, sejumlah kecil gerakan akan terjadi karena tegangan yang terkunci yang mana dapat dihilangkan dengan menerapkan sedikit pengaturan atau penghilang tegangan sebelum melepaskan penahan.

Ketika melakukan assembling dengan pengelasan, semua bagian komponen harus ditempatkan pada posisi yang benar sampai selesai pengelasan dan urutan fabrikasi yang seimbang digunakan untuk meminimalkan distorsi. Pengelasan dengan pengendali akan menghasilkan tegangan sisa tambahan dalam pengelasan yang dapat menyebabkan retak. Ketika pengelasan material yang rentan melengkung urutan pengelasan yang cocok dan penggunaan pemanasan awal akan mengurangi risiko melengkung. Pengendali merupakan cara yang relatif sederhana untuk diterapkan dimana hanya menggunakan klem, jig, dan fixture.

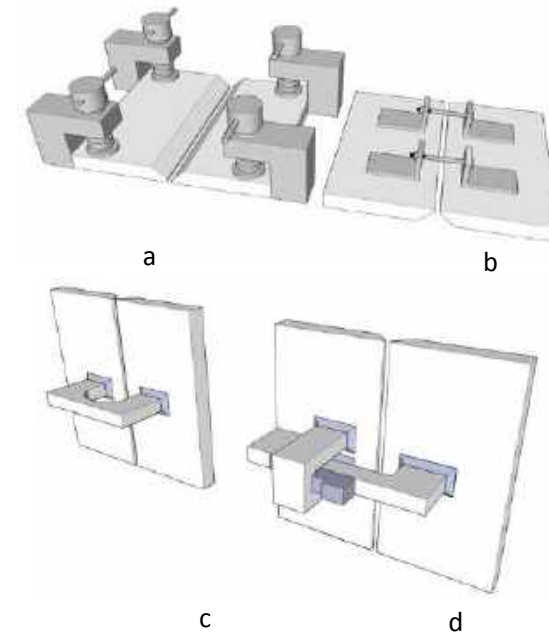
Jig dan Fixtures Las

Jig dan fixture digunakan untuk menemukan part dan memastikan bahwa akurasi dimensi dipertahankan saat pengelasan, dapat berupa konstruksi yang relatif sederhana seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.8a tetapi insinyur pengelasan perlu memastikan bahwa fabrikasi yang telah selesai dilakukan dapat dilepas dengan mudah setelah pengelasan.

Klem fleksibel

Dapat efektif dalam menerapkan pengekan tetapi juga dalam mengatur dan memelihara celah sambungan (juga dapat digunakan untuk menutup celah yang terlalu lebar), Gambar 7.8b. Kerugiannya adalah karena kekuatan pengendali dalam

klem akan ditransfer ke dalam sambungan ketika klem dilepas, tingkat tegangan sisa di sepanjang sambungan bisa sangat tinggi.



Gambar 13.8 Teknik menahan untuk mencegah distorsi dengan teknik, a) Jig pada pengelasan; b) penjepit fleksibel; c) Strongbacks dengan irisan; dan d) penahan yang sepenuhnya terjepit (TWI, 2018)

Strongbacks dan Wedges

Cara populer untuk menerapkan pengendalian distorsi terutama untuk pekerjaan di lapangan yaitu dengan *wedged strongbacks* (Gambar 7.8c), mencegah distorsi sudut pada pelat baja dan membantu pengelasan pada cangkang (shell) berbentuk silindris. Pada pengelasan bentuk silinder memungkinkan terjadinya penyusutan transversal, risiko terjadinya retak sangat menurun dibandingkan dengan menggunakan teknik *strongbacks* untuk pengelasan penuh.

Pada pengelasan penuh (dilas pada kedua sisi sambungan) (Gambar 7.8d) akan meminimalkan distorsi sudut dan penyusutan transversal. Akan tetapi, tegangan dapat dihasilkan pada lasan yang tentunya akan meningkatkan kecenderungan terjadinya retak, maka harus diperhatikan penggunaannya.

13.7.3 Cara yang terbaik

Pemakaian teknik assembling berikut ini akan sangat membantu dalam mengendalikan distorsi yang terjadi yaitu dengan:

- Pengaturan awal dari part sehingga distorsi pada pengelasan akan mencapai kesejajaran keseluruhan dan mengontrol dimensi dengan menghasilkan tegangan sisa minimum.
- Pembengkokan awal dari ujung sambungan untuk mengatasi distorsi dan mencapai kesetimbangan dan mengontrol dimensi dengan menghasilkan tegangan sisa minimal.
- Menerapkan pengendalian selama pengelasan menggunakan jig dan fixture, klem yang fleksibel, penyangga dan tack welding, tetapi pertimbangkan risiko retak yang bisa sangat besar, terutama untuk penyangga yang sepenuhnya dilas.
- Gunakan prosedur yang disetujui untuk pengelasan dan pelepasan logam lasan untuk teknik pengendalian yang mungkin membutuhkan pemanasan awal untuk menghindari ketidaksempurnaan pembentukan pada permukaan komponen.

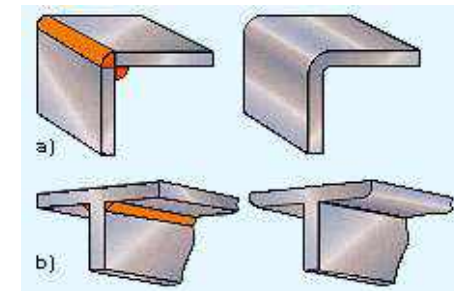
13.8 Pencegahan distorsi dengan desain yang baik

Pada tahap desain, distorsi pengelasan sering dapat dicegah atau dibatasi oleh:

- Meniadakan Proses pengelasan.
- Penempatan lasan (weld placement).
- Mengurangi volume logam las.
- Mengurangi jumlah perjalanan las.
- Penggunaan penyeimbang lasan.

13.8.1 Menghilangkan Proses Pengelasan

Distorsi dan penyusutan merupakan hasil proses pengelasan yang tidak terhindarkan, desain yang baik mensyaratkan pengelasan dijaga agar tetap kecil dan dengan jumlah kecil deposit logam las. Pengelasan seringkali dapat dihindari pada tahapan desain konstruksi dengan membentuk pelat atau menggunakan part dengan baja rol standar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.9.

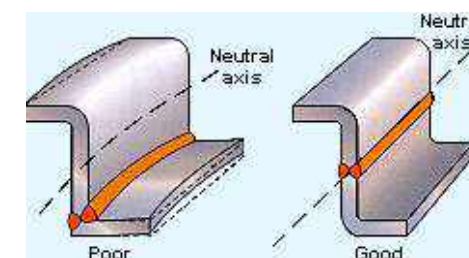


Gambar 13.9 Eliminasi proses las dengan a) Pembentukan plat; b) Penggunaan baja rol atau diekstrusi (TWI, 2018)

Jika memungkinkan, desain pengelasan bisa menggunakan lasan intermiten dan bukan dengan pengelasan kontinyu untuk mengurangi jumlah panjang pengelasan. Sebagai contoh dalam memasang pelat yang kaku, pengurangan secara substansial dalam jumlah pengelasan seringkali dapat dicapai dengan tetap mempertahankan kekuatan yang memadai.

13.8.2 Penempatan lasan

Menempatkan dan menyeimbangkan lasan penting dalam mendesain suatu struktur untuk meminimalkan terjadinya distorsi. Semakin dekat lasan dengan sumbu netral, maka akan semakin menurunkan efek peningkatan dari gaya susut dan distorsi. Contoh desain yang buruk dan yang baik ditunjukkan pada Gambar 13.10.



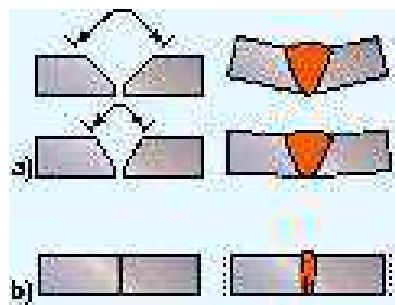
Gambar 13.10 Distorsi dapat dikurangi dengan menempatkan lasan di sekitar sumbu netral (TWI, 2018)

Karena sebagian besar deposit lasan jauh dari sumbu netral, distorsi dapat diminimalkan dengan merancang fabrikasi sehingga kekuatan penyusutan dari masing-masing lasan diseimbangkan dengan menempatkan lasan lain pada sisi berlawanan dari sumbu netral. Jika memungkinkan, pengelasan harus dilakukan

secara bergantian pada sisi yang berlawanan sebagai gantinya menyelesaikan satu sisi terlebih dahulu. Dalam struktur yang besar, jika distorsi terjadi secara istimewa di satu sisi dimungkinkan untuk mengambil tindakan korektif, misalnya, dengan meningkatkan pengelasan di sisi lain untuk mengendalikan distorsi keseluruhan.

13.8.3 Mengurangi Volume Logam Las

Untuk meminimalkan terjadinya distorsi dan juga karena alasan ekonomi, volume logam las harus dibatasi pada persyaratan desain. Untuk sambungan satu sisi, penampang las harus dijaga sekecil mungkin untuk mengurangi tingkat distorsi sudut, seperti diilustrasikan dalam Gambar 13.11.



Gambar 13.11 Cara untuk mengurangi jumlah distorsi sudut dan susut lateral (TWI, 2018)

Cara yang dilakukan untuk mengurangi distorsi sudut dan susut lateral dengan cara:

- Mengurangi volume logam las.
- Menggunakan las lintasan tunggal.
- Pastikan lasan fillet tidak terlalu besar.

Sudut kampuh sambungan dan celah akar harus diminimalkan jika ingin lasan yang dibuat mendapatkan hasil memuaskan. Untuk memudahkan, dimungkinkan untuk menentukan celah akar yang lebih besar dan sudut persiapan yang lebih kecil. Dengan mengurangi perbedaan jumlah logam lasan pada akar dan permukaan lasan, derajat distorsi sudut akan berkurang. Sambungan tumpul dibuat dalam satu lintasan dengan menggunakan penetrasi dalam memiliki sedikit distorsi sudut, terutama jika sambungan tumpul tertutup dapat dilas (Gambar 13.11).

Misalnya bahan potongan tipis dapat dilas menggunakan proses pengelasan plasma dan laser dan bagian tebal dapat dilas dalam posisi vertikal menggunakan proses electrogas dan electroslag. Meskipun distorsi sudut dapat dihilangkan, masih ada penyusutan memanjang dan melintang yang terjadi.

Pada material berpenampang tebal, karena luas penampang pada sambungan V ganda seringkali hanya setengah dari kampuh V tunggal, volume logam las yang akan didepositkan dapat dikurangi secara substansial. Persiapan dari kampuh V ganda juga memungkinkan pengelasan seimbang pada bagian tengah sambungan untuk menghilangkan distorsi sudut.

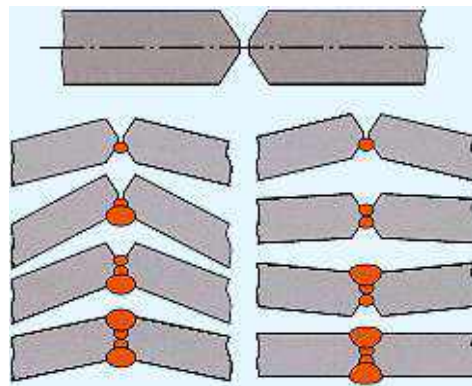
Karena susut las sebanding dengan jumlah logam las, sambungan yang buruk dan pengelasan yang buruk akan meningkatkan jumlah distorsi. Distorsi sudut pada lasan fillet terutama dipengaruhi oleh pengelasan berlebih. Hal ini karena kekuatan desain didasarkan pada ketebalan *throat*, pengelasan berlebih untuk menghasilkan manik las cembung tidak meningkatkan kekuatan desain yang diijinkan akan tetapi meningkatkan penyusutan dan distorsi.

13.8.4. Mengurangi Jumlah Run Pengelasan

Ada pendapat yang bertentangan tentang apakah lebih baik menggunakan deposit dari volume logam las yang diberikan menggunakan sejumlah kecil lasan besar atau dengan jumlah lintasan las sedikit. Pengalaman menunjukkan bahwa untuk sambungan tumpul satu sisi, atau lasan fillet, deposit lasan tunggal yang besar memberikan distorsi sudut yang lebih kecil daripada lasan yang dibuat dengan jumlah lintasan kecil. Umumnya pada sambungan yang tidak terkendali, derajat sudut distorsinya kira-kira sebanding dengan jumlah lintasan. Melengkapi sambungan dengan sejumlah kecil deposit lasan yang besar menghasilkan penyusutan lebih memanjang dan melintang daripada menggunakan lintasan kecil dalam jumlah yang lebih besar. Dalam lasan multi-lintasan, deposit logam lasan sebelumnya diberikan pengekanan, sehingga distorsi sudut per lintasan berkurang ketika lasan akan dilakukan. Deposit dengan jumlah yang besar juga meningkatkan risiko buckling elastis terutama pada pelat yang tipis.

13.8.5 Penggunaan Pengelasan Seimbang

Pengelasan seimbang adalah cara yang efektif untuk mengontrol distorsi sudut dalam pengelasan but weld dengan multi-pass dengan mengatur urutan pengelasan untuk memastikan bahwa distorsi sudut terus menerus diperbaiki dan tidak diperbolehkan menumpuk selama pengelasan. Jumlah distorsi sudut komparatif dari pengelasan seimbang dan pengelasan satu sisi sambungan pertama ditunjukkan pada Gambar 13.12. Pengelasan seimbang bisa juga diaplikasikan pada sambungan fillet.



Gambar 13.12 Pengelasan seimbang untuk mengurangi jumlah distorsi sudut (TWI, 2018)

Jika pengelasan dilakukan secara bergantian pada kedua sisi sambungan tidak memungkinkan atau jika satu sisi harus diselesaikan terlebih dahulu, persiapan sambungan asimetris dapat digunakan dengan lebih banyak logam las yang disimpan di sisi kedua. Kontraksi yang lebih besar yang dihasilkan dari mendepositkan logam lasan di sisi kedua akan membantu mengatasi distorsi di sisi pertama.

Cara terbaik Menghindari Distorsi

Prinsip-prinsip desain berikut dapat mengontrol terjadinya distorsi adalah dengan:

- Hilangkan pengelasan dengan membentuk pelat dan menggunakan baja roll atau diekstrusi.
- Minimalkan jumlah logam las.
- Jangan terlalu banyak logam lasan yang dihasilkan.

- Gunakan pengelasan berselang (intermittent) untuk preferensi sambungan lasan kontinu.
- Tempatkan lasan pada sumbu netral.
- Seimbangkan proses pengelasan di tengah sambungan dengan menggunakan sambungan ganda dan bukan sambungan V tunggal.

Dengan mengadopsi prinsip praktik terbaik dapat memberi manfaat terhadap biaya yang dikeluarkan. Misalnya, untuk panjang kaki fillet desain 6 mm, dengan panjang kaki 8 mm akan menghasilkan pengendapan 57% logam las tambahan. Selain biaya tambahan untuk mendepositkan logam las dan peningkatan risiko distorsi, untuk menghilangkan logam las tambahan ini juga mahal. Merancang untuk kontrol distorsi dapat menimbulkan biaya fabrikasi tambahan, misalnya, penggunaan persiapan sambungan V ganda adalah cara terbaik untuk mengurangi volume las dan mengontrol distorsi tetapi biaya tambahan mungkin akan terjadi dalam produksinya dengan memodifikasi benda kerja agar tukang las bisa mengakses sisi sebaliknya.

Pencegahan Distorsi dengan teknik fabrikasi

7.7.1 Teknik perakitan

Secara umum, tukang las memiliki sedikit pengaruh pada pemilihan prosedur pengelasan tetapi teknik perakitan sering menjadi penting dalam meminimalkan distorsi. hal Itu teknik perakitan utama adalah:

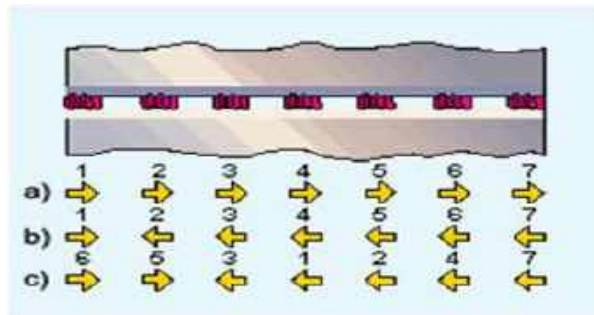
- Dengan teknik pengelasan Tack welding.
- Perakitan back-to-back.
- Menggunakan pengkaku.

Teknik Las Tack Welding

Idealnya untuk mengatur dan mempertahankan celah (gap) pada sebuah sambungan, akan tetapi metode ini juga dapat digunakan untuk menahan penyusutan transversal. Agar lebih efektif, harus diberikan dengan sejumlah beberapa lasan tack, panjang dan jaraknya di antara mereka. Terlalu sedikit risiko jika sambungan semakin tertutup saat pengelasan berlangsung. Dalam pengelasan

yang panjang menggunakan metode MMA atau MIG/ MAG, ujung sambungannya bahkan bisa tumpang tindih. Saat menggunakan proses busur terendam, sambungan bisa terbuka jika tidak cukup ditempel. Urutan pengelasan tack sangat penting untuk mempertahankan celah root yang seragam di sepanjang sambungan. Tiga alternatif urutan pengelasan tack yaitu:

- a. Pengelasan langsung ke ujung sambungan (Gambar 13.13a). Hal ini diperlukan untuk menjepit plat baja atau menggunakan irisan untuk menjaga celah sambungan selama pemasangan.
- b. Salah satu ujung kemudian menggunakan teknik pengelasan dengan langkah mundur untuk menempelkan sisa sambungan (Gambar 13.13b).
- a. Pusatkan dan selesaikan pengelasan tack dengan mengelas dengan langkah mundur (Gambar 13.13c).

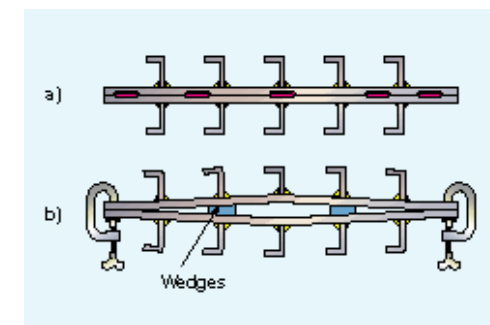


Gambar 13.13 Prosedur alternatif yang digunakan untuk mencegah penyusutan melintang dengan teknik pengelasan tack (TWI, 2018)

Penempatan terarah berguna untuk mengendalikan celah sambungan, misalnya menutupi celah sambungan yang terlalu lebar. Saat memasang pengelasan tack, penting agar tack menyatu ke dalam lasan utama dihasilkan dengan prosedur yang disetujui menggunakan tukang las yang berkualitas. Prosedur ini mungkin memerlukan pemanasan awal dan bahan yang disetujui seperti yang ditentukan untuk lasan utama. Penghapusan tack juga membutuhkan kontrol yang cermat untuk menghindari kerusakan pada permukaan komponen.

Perakitan back-to-back

Dengan tack welding atau menjepit dua komponen yang identik secara berurutan, pengelasan kedua komponen dapat diseimbangkan di sekitar sumbu netral dari kombinasi rakitan gabungan (lihat Gambar 13.14a). Direkomendasikan bahwa perakitan dibebaskan dari tegangan sebelum memisahkan komponen atau mungkin perlu memasukkan wedge di antara komponen (Gambar 13.14b) sehingga ketika wedges dilepas, bagian-bagian akan bergerak kembali ke bentuk atau perataan yang benar.

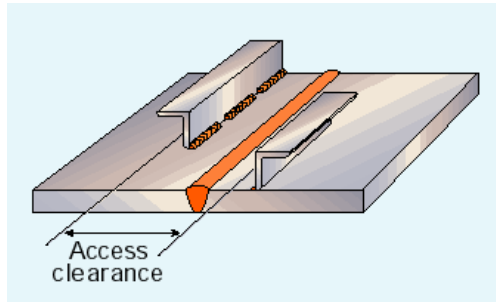


Gambar 13.14 perakitan dengan teknik back-to-back untuk mengontrol distorsi saat mengelas dua komponen yang identik:

- a. dipasang bersama sebelum pengelasan;
- b. Penggunaan wedge untuk komponen yang merusak saat pemisahan setelah pengelasan.

Pengkaku (Stiffening)

Penyusutan longitudinal pada pengelasan butt weld sering mengakibatkan plat jadi berbentuk busur (bowing), terutama ketika membuat struktur dengan pelat tipis. Pengkaku longitudinal dalam bentuk flat atau sudut, dilas di setiap sisi yang sama (Gambar 13.15) efektif dalam mencegah longitudinal bowing. Lokasi pengkaku penting diletakkan kecuali terletak di sisi belakang sambungan yang dilas dari satu sisi, pengkaku harus ditempatkan pada jarak yang cukup dari sambungan sehingga tidak mengganggu pengelasan.



Gambar 13.15 Pengkaku longitudinal untuk mencegah plat membungkuk (bowing) pada sambungan butt weld dengan ketebalan tipis (TWI, 2018)

Prosedur pengelasan

Prosedur yang cocok biasanya ditentukan oleh produktivitas dan kualitas lasan sebagai persyaratan daripada kebutuhan untuk mengendalikan distorsi. Proses pengelasan, teknik dan urutan memang mempengaruhi tingkat distorsi. Proses pengelasan umumnya memiliki aturan untuk memilih proses pengelasan guna mencegah distorsi sudut yaitu dengan cara:

- Mendepositkan logam las dengan secepat mungkin.
- Gunakan dengan jumlah run sedikit yang mungkin untuk mengisi sambungan.

Sayangnya, memilih proses pengelasan yang cocok berdasarkan aturan-aturan ini dapat meningkatkan penyusutan longitudinal yang mengakibatkan bowing dan tekuk.

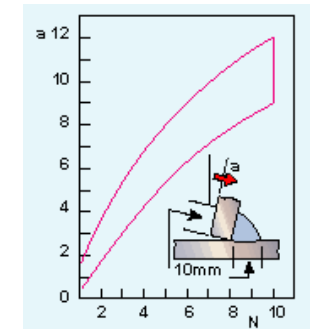
Dalam pengelasan metode manual seperti MIG/ MAG, proses laju deposisi tinggi lebih disukai daripada proses MMA. Logam las harus didepositkan menggunakan elektroda berdiameter terbesar (MMA), atau dengan menggunakan arus tertinggi (MIG/ MAG) tanpa menyebabkan ketidaksempurnaan fusi yang kurang. Karena pemanasan jauh lebih lambat dan lebih difus, pengelasan gas biasanya menghasilkan lebih banyak distorsi sudut daripada proses busur. dengan cara teknik mekanis yang dikombinasikan dengan laju pengendapan tinggi dan kecepatan pengelasan memiliki potensi terbesar untuk mencegah distorsi. Karena

distorsi lebih konsisten, dengan teknik yang sederhana seperti sebelum pengaturan lebih efektif dalam mengendalikan distorsi sudut.

Teknik pengelasan

Aturan umum untuk mencegah distorsi adalah:

- gunakan las (fillet) ke ukuran minimum yang ditentukan.
- Gunakan pengelasan seimbang dekat sumbu netral.
- Jaga agar waktu antar run seminimum mungkin.

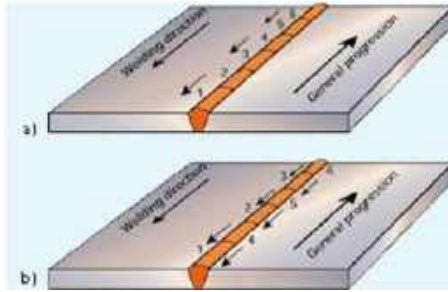


Gambar 13.16 Distorsi sudut sambungan seperti yang ditentukan oleh jumlah run pada lasan fillet (TWI, 2018)

Tanpa menahan distorsi sudut pada sambungan fillet dan butt disebabkan oleh geometri sambungan, ukuran las dan jumlah run untuk penampang yang diberikan. Distorsi sudut, diukur dalam derajat sebagai fungsi dari jumlah lintasan untuk lasan fillet dengan panjang 10mm ditampilkan. Jika memungkinkan, pengelasan yang seimbang di sekitar sumbu netral harus dilakukan, misalnya pada sambungan fillet dua sisi, oleh dengan pengelasan dua orang secara bersamaan. Pada sambungan butt, run mungkin sangat penting karena pengelasan yang seimbang dapat digunakan untuk memperbaiki distorsi sudut saat itu berkembang.

Urutan pengelasan

Urutan atau arah pengelasan cukup penting dan harus menuju ujung bebas sambungan. Untuk lasan yang panjang, seluruh lasan tidak selesai dalam satu arah. Short run, misalnya menggunakan teknik back-step atau skip welding, sangat efektif dalam pengendalian distorsi (Gambar 13.17).



Gambar 13.17 Penggunaan arah pengelasan untuk mengontrol distorsi: a) pengelasan Back-step; b. Lewati pengelasan (TWI, 2018)

Pengelasan langkah mundur (back-step) meliputi deposisi panjang lasan pendek yang berdekatan - arah yang sesuai dengan perkembangan umum, seperti terlihat pada Gambar 13.17a. pengelasan ini adalah dengan meletakkan panjang lasan pendek dalam urutan yang telah ditentukan sebelumnya, merata sepanjang lapisan (Gambar 13.17b). Panjang lasan dan ruang di antara mereka umumnya sama dengan panjang run-out dari satu elektroda. Arah deposit untuk setiap elektroda adalah sama, tetapi tidak perlu untuk arah pengelasan yang berlawanan dengan arah perkembangan.

Cara terbaik

Teknik-teknik fabrikasi berikut digunakan untuk mengontrol distorsi yang terjadi pada proses pengelasan yaitu:

- Tack welding untuk mengatur dan menjaga celah sambungan.
- Komponen dengan bentuk yang samabisa dilas dengan teknik back-to-back sehingga pengelasan dapat seimbang dengan mengelas pada sumbu netral.
- Alat tambahan pengkaku longitudinal digunakan untuk mencegah bowing longitudinal pada sambungan tumpul dari struktur dengan pelat tipis.
- Jika ada pilihan prosedur pengelasan, proses dan teknik yang digunakan harus bertujuan untuk mendepositkan logam las secepat mungkin; seperti pada proses pengelasan MIG/ MAG lebih menyukai pengelasan MMA atau gas dan mekanis daripada pengelasan manual.

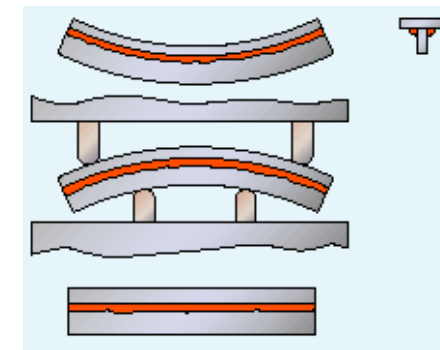
- Dalam pengelasan yang panjang, seluruh lasan tidak harus diselesaikan dalam satu arah; teknik langkah mundur atau skip welding bisa digunakan.

Teknik korektif

Distorsi harus dihindari pada tahap desain dan dengan menggunakan prosedur fabrikasi yang sesuai. Karena tidak mungkin selalu untuk menghindari distorsi selama pembuatan, beberapa teknik korektif yang baik dapat digunakan. Pengerjaan ulang untuk memperbaiki distorsi tidak boleh dilakukan karena mahal dan membutuhkan keterampilan yang cukup untuk menghindari kerusakan komponen. Pedoman umum diberikan pada praktik terbaik untuk memperbaiki distorsi menggunakan teknik mekanis atau termal.

Cara Mekanis

prinsip utama untuk menghilangkan distorsi dengan cara mekanis adalah dengan memukul dengan palu yang dapat menyebabkan kerusakan pada permukaannya dan work hardening. Dengan adanya cacat bowing (membungkuk) atau distorsi sudut, komponen sering kali dapat diluruskan tanpa kerugian akibat dipukul dengan palu. Potongan baja dimasukkan di antara komponen dan pelat pres. hal ini adalah penting untuk memaksakan deformasi yang cukup untuk memberikan koreksi yang lebih besar sehingga memungkinkan komponen untuk kembali bentuk yang benar.



Gambar 13.18 Penggunaan tekanan untuk memperbaiki bengkokan pada sambungan T (TWI, 2018)

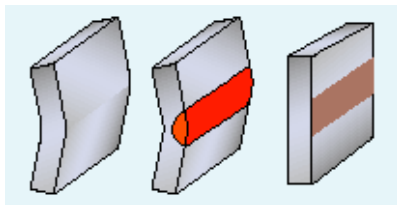
cara terbaik untuk pelurusan dengan cara mekanis

Berikut ini adalah cara yang harus digunakan ketika menggunakan teknik pengepresan untuk menghilangkan distorsi pada baja yaitu:

- Gunakan pembungkus yang akan memperbaiki distorsi secara berlebihan sehingga tekanan balik akan mengembalikan komponen ke bentuk yang benar.
- Periksa apakah komponen didukung secara memadai selama ditekan untuk mencegah tekukan.
- Gunakan pembentuk atau pengerol untuk mendapatkan komponen lurus atau menghasilkan kelengkungan.
- Karena baja yang dipres dapat terbang keluar dari mesin pres, cara yang aman berikut ini harus dipakai yaitu dengan mengikat dengan baut potongan baja ke pelat tekan.

Teknik termal

Prinsip dasarnya adalah menciptakan tekanan lokal yang cukup tinggi sehingga pada saat pendinginan, komponen tertarik kembali ke bentuk semula. Proses ini dapat dicapai dengan memanaskan material secara lokal pada suhu di mana deformasi plastis akan terjadi karena panas dibawah titik yield material. Pada proses pendinginan ke suhu kamar, area yang dipanaskan akan berusaha menyusut ke ukuran yang lebih kecil daripada sebelum dipanaskan. Tegangan yang dihasilkan akan menarik komponen ke dalam bentuk yang diinginkan (Gambar 13.19).

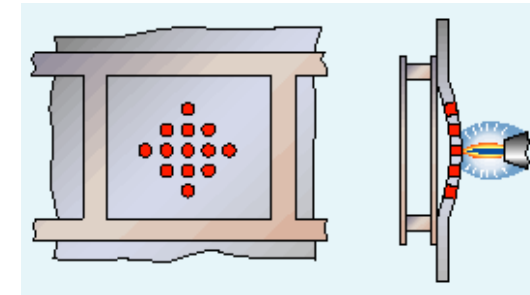


Gambar 13.19 Pemanasan lokal untuk memperbaiki distorsi (TWI, 2018)

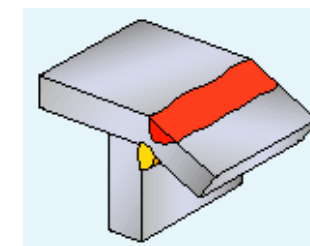
Pemanasan lokal adalah cara yang relatif sederhana tetapi efektif untuk memperbaiki distorsi pengelasan. Tingkat penyusutan ditentukan oleh ukuran, jumlah, lokasi, dan suhu zona yang dipanaskan. Ketebalan dan ukuran pelat menentukan area zona panas, jumlah dan penempatan zona pemanasan sebagian

besar merupakan masalah pengalaman dan untuk pekerjaan baru, percobaan-percobaan yang sering diperlukan untuk mengukur tingkat penyusutan. Teknik pemanasan lokal, garis, atau bentuk baji dapat digunakan dalam perbaikan dengan cara termal dari distorsi.

Tempat pemanasan



Gambar 13.20 Pemanasan lokal untuk memperbaiki tekuk (buckling) (TWI, 2018) Pemanasan pada titik tertentu digunakan untuk menghilangkan tekuk, misalnya ketika baja lembaran yang relatif tipis telah dilas ke rangka yang kaku. Distorsi diperbaiki dengan pemanasan spot di sisi yang cembung. Jika tekukan teratur, pemanasan titik bisa diatur simetris, mulai dari tengah tekukan dan selanjutnya ke bagian luar.

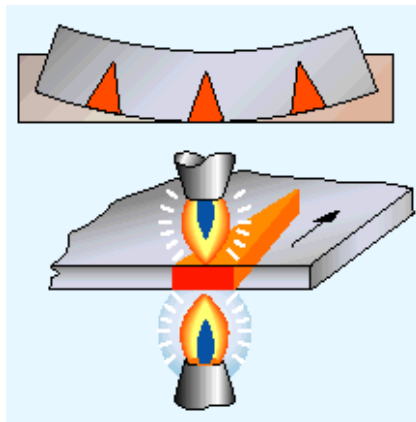


Gambar 13.21 Pemanasan untuk memperbaiki distorsi sudut pada lasan filet (TWI, 2018)

Pemanasan sepanjang garis lurus lasan sering digunakan untuk memperbaiki distorsi sudut, misalnya pada lasan filet, Gambar 13.21. Komponen dipanaskan di sepanjang sambungan yang dilas tetapi pada sisi yang berlawanan dengan lasan sehingga tegangan yang diinduksi akan menarik flange rata.

Pemanasan berbentuk baji

Untuk memperbaiki distorsi pada fabrikasi kompleks dengan struktur yang lebih besar, mungkin perlu memanaskan seluruh area selain menggunakan pemanasan garis. Pola ini bertujuan untuk mengecilkan satu bagian fabrikasi untuk menarik material kembali ke bentuk semula. Terlepas dari pemanasan spot pada pelat tipis, zona pemanasan berbentuk baji harus digunakan; Gambar 13.22 pemanasan dari dasar ke puncak dan suhu profil harus seragam sepanjang ketebalan pelat. Untuk bahan yang lebih tebal mungkin perlu menggunakan dua torch las, satu buah untuk di setiap sisi pelat.

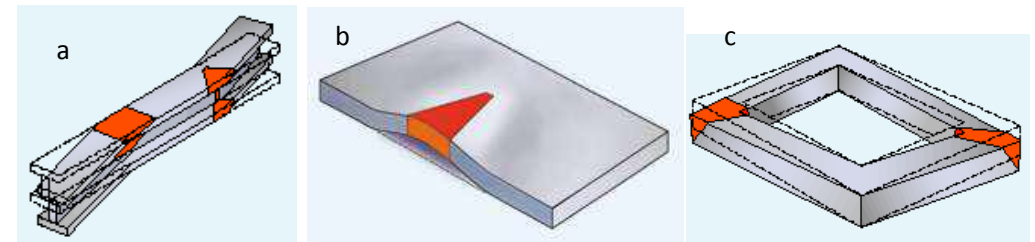


Gambar 13.22 Penggunaan pemanas untuk meluruskan pelat berbentuk baji (TWI, 2018)

Sebagai pedoman umum untuk meluruskan dimensi pelat baji melengkung harus dilakukan dengan cara:

- Sepanjang baji yaitu kira-kira dua pertiga dari lebar pelat.
- Lebar baji (alas), kira-kira seperenam panjangnya (alas ke puncak).

Tingkat pelurusan biasanya 5mm dalam panjang dari pelat 3m. Pemanasan berbentuk baji dapat digunakan untuk memperbaiki distorsi dalam berbagai situasi, Gambar 13.23.



Gambar 13.23 Proses pemanasan baja berbentuk baji untuk memperbaiki distorsi: a) bagian dirol standar yang membutuhkan koreksi pada dua bidang; b) tekukan pada ujung plat sebagai alternatif untuk dirol; c) Pembuatan kotak yang terdistorsi keluar dari bidang (TWI, 2018)

Tindakan pencegahan

Ada resiko yang berbahaya dengan menggunakan teknik pelurusan termal yaitu menimbulkan menyusutnya area yang terlalu luas atau menyebabkan perubahan metalurgi dengan memanaskan pada suhu yang terlalu tinggi. Ketika meluruskan distorsi pada baja, suhu area harus dibatasi hingga sekitar 600-650 °C. Jika pemanasan terganggu atau panas hilang, operator harus membiarkan logam hingga dingin kemudian proses pemanasan dimulai lagi.

Cara Yang Terbaik Untuk Meluruskan Distorsi Dengan Pemanasan Termal

Berikut ini yang harus dilakukan operator ketika menggunakan teknik termal untuk menghilangkan distorsi yaitu dengan:

- Gunakan pemanasan lokal untuk menghilangkan tekukan pada struktur lembaran yang tipis.
- Selain pemanasan langsung di panel tipis, gunakan teknik pemanasan berbentuk baji.
- Gunakan pemanasan sepanjang lasan untuk memperbaiki distorsi sudut pada pelat.
- Batasi area pemanasan untuk menghindari komponen yang terlalu menyusut.
- Batasi suhu hingga 600-650 °C (warna merah kusam) pada baja untuk mencegah kerusakan metalurgi.
- Pada pemanasan berbentuk baji, panaskan dari alas ke puncak baji, menembus secara merata melalui ketebalan pelat dan pertahankan suhu yang merata.

Bab 14

Prinsip Metalurgi Lasan

14.1. Pendahuluan

Tujuan bab ini adalah untuk meninjau prinsip-prinsip dasar yang mengatur perubahan struktur mikro pada lasan. Karena kerentanan retak pada struktur yang dilas adalah fungsi dari struktur mikro, lingkungan, dan tegangan yang terjadi, penting untuk memahami prinsip-prinsip dasar yang mengatur perubahan struktur mikro selama pengelasan. Bab ini akan fokus terutama pada lasan fusi, tetapi bagian khusus untuk lasan solid-state juga disertakan.

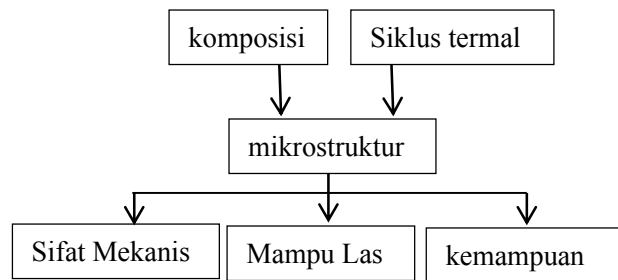
Ada sejumlah proses metalurgi yang dapat mengontrol struktur mikro dan sifat hasil lasan. Peleburan dan pembekuan (*solidification*) adalah suatu proses yang penting, karena merupakan kunci untuk mencapai sambungan yang dapat diterima dalam semua proses pengelasan fusi. Jika digabungkan dengan proses pembekuan adalah proses pemisahan dan difusi yang menghasilkan variasi komposisi yang sangat lokal yang memengaruhi kemampuan las dan performansinya.

Banyak proses metalurgi terjadi dalam keadaan padat, termasuk transformasi fasa, reaksi presipitasi, rekristalisasi, pertumbuhan butir, dan lain-lain. Luasnya reaksi ini dapat secara signifikan mengubah struktur mikro dan properti dari pengelasan (logam las dan zona yang terpengaruh panas (HAZ)) relatif terhadap logam induk. Banyak dari reaksi-reaksi ini, atau kombinasi reaksi yang cukup kompleks, dapat mengakibatkan perapuhan (*embrittlement*), atau retak, lasan. *Embrittlement* ini dapat terjadi karena likuidasi, adanya lapisan film cair dalam matriks padat, atau dalam keadaan padat karena hilangnya keuletan.

Ekspansi termal selama pemanasan dan kontraksi selama pendinginan dapat menghasilkan pola tegangan yang cukup kompleks di dalam dan di sekitar lasan. Tegangan-tekanan ini selanjutnya dapat mempengaruhi struktur mikro dan sifat-

sifat lasan dan dapat meningkatkan keretakan di daerah-daerah di mana regangan tarik yang dihasilkan dari tekanan ini melebihi keuletan material.

Sifat mikrostruktur las pada suatu bahan merupakan hasil dari kombinasi siklus termal las dan komposisi material. Secara umum, laju pemanasan dan pendinginan yang terkait dengan pengelasan cukup tinggi (10-1000 °C/ detik) dan biasanya mencegah prediksi struktur mikro berdasarkan prinsip-prinsip termodinamika kesetimbangan. Semua proses metalurgi yang mempengaruhi mikrostruktur bergantung pada suhu dan laju pemanasan/ pendinginan, dan dengan demikian, siklus termal pengelasan memainkan peran penting dalam evolusi mikro dan, pada akhirnya, kemampuan pengelasan material, seperti ditunjukkan secara skematis pada Gambar 14.1.



Gambar 14.1 Diagram perubahan dan kinerja mikrostruktur las.

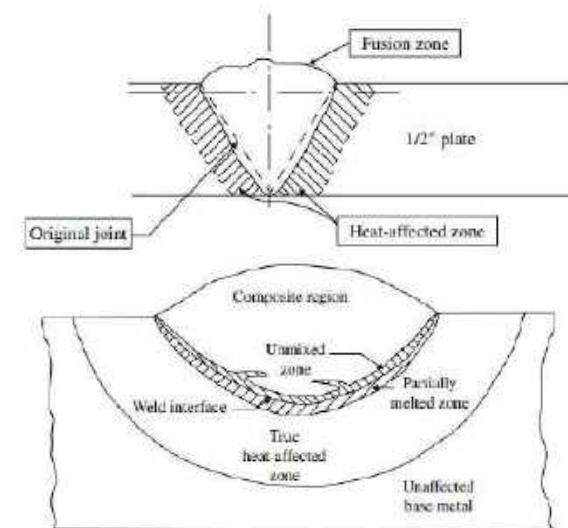
14.2. Daerah dari Las Fusi (Fusion weld)

Pemeriksaan yang dilakukan pada sambungan yang dilas menunjukkan daerah mikrostruktur yang berbeda. Pada Zona fusi (*fusion zone*) sangat berkaitan dengan proses peleburan antar elektroda las dan logam induk. Pada daerah Haz, meskipun tidak meleleh akan tetapi dipengaruhi oleh panas dari proses penyambungan. Di luar daerah HAZ merupakan logam dasar (*base metal*) yang tidak terpengaruh panas. Zona fusi dan HAZ dapat dibagi lagi, seperti dijelaskan dalam bagian ini.

Zona fusi digambarkan demikian karena merupakan wilayah di mana peleburan dan pembekuan terjadi untuk membentuk sambungan, atau lasan. Karena

semua logam bersifat kristal, banyak yang memiliki struktur kisi kristal kubik, ada fenomena pembekuan umum yang biasa terjadi pada semua logam. Dalam banyak bahan, perilaku pembekuan sangat sensitif terhadap komposisi. Misalnya, penambahan sejumlah kecil karbon dan nitrogen ke beberapa baja dapat mengubah perilaku pembekuannya dari struktur feritik (BCC) menjadi austenitik (FCC). Penambahan belerang (*sulfur*) kedalam baja dapat meningkatkan retak pembekuan (*solidification cracking*) di zona fusi. Paduan aluminium yang cukup rentan terjadi retak dilasan, dengan menambahkan logam pengisi yang mengandung lebih dari 6% silikon dengan tujuan untuk menghindari retak.

Struktur mikro dan sifat-sifat HAZ semata-mata dikendalikan oleh kondisi termal yang dialami selama pengelasan dan perlakuan panas pasca-las (*Post Weld Heat Treatment*). Paduan aluminium terbentuk karena proses pengerasan endapan atau dikeraskan untuk meningkatkan kekuatan; proses pengelasan yang dilakukan pada paduan aluminium benar-benar dapat menghilangkan efek penguatan ini terutama di daerah HAZ. Sedangkan pada Baja mengalami transformasi fase, yang dapat menghasilkan HAZ yang memiliki struktur mikro dan sifat yang sangat berbeda dari logam dasar atau zona fusi.



Gambar 14.2. a) Skema awal daerah lasan fusi b) Daerah las fusi yang baru (Lippold, 2015)

Pemahaman tentang daerah lasan telah berkembang pesat sejak tahun 1960-an. Pada waktu itu, lasan fusi dianggap hanya terdiri dari dua daerah yaitu zona fusi dan daerah HAZ sekitarnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.2 (a). Banyak penelitian yang dilakukan oleh W.F. Savage dan murid-muridnya di RPI pada 1960-an dan 1970-an mengungkapkan bahwa ada daerah lain yang berbeda dari las fusi (Lippold, 2015).

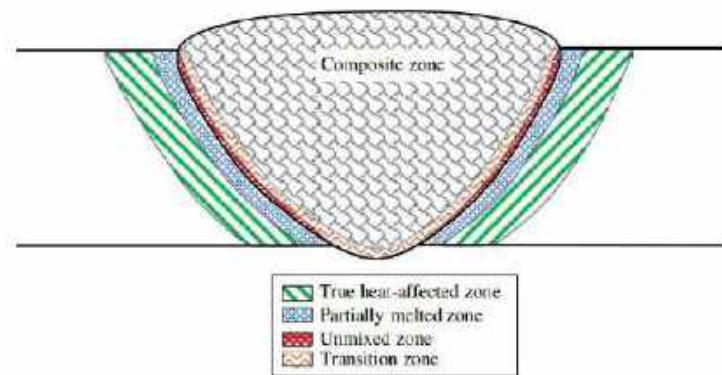
Pada tahun 1976, Savage et al. mengusulkan beberapa perubahan pada terminologi yang digunakan untuk menggambarkan mikrostruktur fusi las, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.2 (b). Zona fusi dianggap terdiri dari dua daerah. Daerah campuran mewakili bagian dari zona fusi di mana logam dasar dan logam pengisi bercampur dalam paduan komposisi. Disekeliling wilayah ini di sepanjang batas fusi, mereka mendefinisikan wilayah yang disebut zona tidak tercampur (*Unmixed Zone /UMZ*). UMZ terdiri dari logam dasar yang dilelehkan dan kembali membeku yang tentunya tidak bercampur dengan logam pengisi. Dalam beberapa sistem paduan, UMZ dapat menunjukkan struktur mikro dan sifat yang sangat berbeda dari daerah paduan, terutama ketika logam pengisi yang berbeda digunakan.

Daerah HAZ dapat dibagi lagi menjadi dua wilayah, zona leleh sebagian (*Partially Melted Zone/PMZ*) dan zona yang terkena dampak panas "*True Heat Affected Zone/ T-HAZ*". PMZ ada di semua lasan fusi karena adanya transisi dari 100% fasa cair ke 100% fasa padat harus terjadi melintasi batas fusi. Selain itu, mekanisme lain yang diidentifikasi menghasilkan pencairan lokal (atau likuidasi) di wilayah sempit di sekitar zona fusi. Ini termasuk peleburan batas butir karena pemisahan dan fenomena yang digambarkan sebagai "pencairan konstitusional" yang dihasilkan dari pencairan sebagian yang terkait dengan partikel penyusunnya. Daerah T-HAZ digunakan untuk membedakan daerah HAZ di mana semua reaksi metalurgi terjadi dalam keadaan padat, yaitu, tidak ada pencairan, atau pencairan terjadi.

Tidak banyak yang berubah sejak tahun 1976 terkait dengan terminologi untuk menggambarkan daerah lasan fusi, meskipun banyak penelitian telah dilakukan pada berbagai sistem paduan untuk memverifikasi bahwa daerah ini benar-benar ada dalam sistem material ini. Penyempurnaan tambahan telah dibuat untuk terminologi ini. Sebagai contoh, T-HAZ dalam baja telah dibagi lagi menjadi berbagai sub regional, seperti HAZ berbutir kasar (CGHAZ), HAZ berbutir halus (FGHAZ), dan wilayah HAZ (ICHAZ).

Satu-satunya penambahan untuk terminologi pada Gambar 14.2 (b) adalah wilayah transisi dalam zona fusi. Dalam lasan heterogen, di mana logam pengisi memiliki komposisi yang berbeda dari logam dasar, ini akan mewakili transisi komposisi dari wilayah komposit ke UMZ. Dalam beberapa sistem paduan, zona transisi ini (TZ) dapat menunjukkan struktur mikro yang berbeda dari daerah sekitarnya. Misalnya, dalam lasan antara baja tahan karat dan baja paduan rendah, struktur martensitik mungkin terbentuk di daerah transisi yang tidak terjadi di tempat lain di lasan.

Skema yang baru dari daerah lasan fusi disediakan pada Gambar 14.3 untuk lasan heterogen. Ini mirip dengan ilustrasi pada Gambar 14.2 (b) tetapi mengandung komposisi TZ yang mungkin ada dalam beberapa sistem. Bagian-bagian berikut akan meninjau berbagai daerah yang ditentukan sebelumnya secara rinci dan akan menjelaskan mekanisme yang terlibat dalam pembentukannya.



Gambar 14.3. Skema modern menunjukkan daerah lasan fusi.

14.3 Zona Fusi (Fusion Zone)

Zona fusi mewakili daerah lasan fusi tempat terdapat peleburan dan pembekuan kembali logam selama proses pengelasan. Struktur mikro di zona fusi adalah fungsi dari komposisi dan kondisi pembekuan. Perbedaan kecil dalam komposisi sering menghasilkan variasi besar dalam struktur mikro dan sifatnya. Dalam beberapa sistem, perubahan tingkat pembekuan dan pendinginan juga dapat mengubah struktur mikro, kadang-kadang terjadi secara dramatis.

Zona fusi biasanya sangat berbeda dari daerah HAZ dan logam dasar di sekitarnya ketika diamati metalografinya. Hal ini disebabkan fluktuasi makroskopis dan mikroskopis dalam komposisi yang dihasilkan dari proses pembekuan.

Dalam lasan dimana logam pengisi memiliki komposisi yang berbeda dari logam dasar, secara teoritis ada tiga daerah. Yang terbesar adalah zona campuran (*Composite Zone/ CZ*), yang terdiri dari logam pengisi yang dicairkan secara seragam dengan logam dasar. Berdekatan dengan batas fusi, dua daerah tambahan mungkin ada. Zona *Unmixed (UMZ)* terdiri dari logam dasar yang dilelehkan dan membeku kembali di mana telah terjadi pencampuran yang dapat diabaikan dengan logam pengisi. Antara UMZ dan CZ, zona transisi (TZ) harus ada di mana gradien komposisi dari logam dasar ke CZ hadir.

Tiga jenis zona fusi telah didefinisikan: *autogen*, *homogen*, dan *heterogen*. Klasifikasi ini didasarkan pada apakah logam pengisi (*filler metal*) digunakan atau tidak dan komposisi dari logam pengisi sesuai dengan bahan dasar. Ketiga jenis zona fusi ini umumnya ditemui.

Lasan autogen (Autogenous Weld)

Lasan autogen adalah tidak adanya logam pengisi yang ditambahkan dan zona fusi terbentuk oleh peleburan dan pembekuan kembali logam dasar. Hal ini umum dalam situasi di mana ketebalan minimal dari logam yang dilas dan penetrasi dapat dengan mudah dicapai dengan proses yang dipilih. Pada pengelasan logam yang tipis, pengelasan autogenous sering dapat diterapkan pada kecepatan tinggi, dan biasanya, jumlah minimum persiapan sambungan diperlukan, yaitu, sambungan tumpul dapat digunakan. Proses pengelasan dapat disesuaikan dengan pengelasan autogen termasuk jenis pengelasan GTAW, EBW, LBW, PAW, dan pengelasan resistansi. Zona fusi pada dasarnya adalah komposisi yang sama dengan logam dasar, kecuali untuk kemungkinan kerugian akibat penguapan atau pengambilan gas dari atmosfer pelindung. Tidak semua material dapat disatukan secara autogen karena masalah kemampuan lasnya.

Lasan homogen (Homogenous Weld)

Proses pengelasan ini melibatkan penggunaan logam pengisi (*filler metal*) yang sesuai dengan komposisi logam dasar. Jenis zona fusi ini digunakan ketika aplikasi mensyaratkan bahwa sifat pengisi dan logam dasar harus sesuai. Sifat seperti respon terhadap perlakuan panas atau ketahanan korosi adalah contoh dari sifat-sifat tersebut. Beberapa contoh umum termasuk penggunaan logam dasar Tipe 316L yang disambung dengan logam pengisi 316L untuk mencocokkan sifat korosi dan penggunaan logam pengisi E10016-D2 pada baja AISI 4130 Cr-Mo, yang biasanya diberi perlakuan PWHT penuh untuk memberikan kekuatan yang seragam.

Lasan heterogen (Heterogenous Weld)

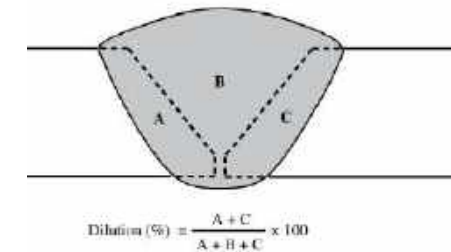
Pengelasan las heterogen adalah lasan fusi yang dibuat dengan logam pengisi yang komposisinya berbeda dari logam dasar. Dalam banyak situasi, logam pengisi yang cocok mungkin tidak ada atau sifat las yang diinginkan mungkin tidak dapat dicapai dengan komposisi yang cocok. Juga harus diakui bahwa banyak komposisi logam dasar dapat memiliki kemampuan las yang buruk dan logam pengisi yang berbeda diperlukan untuk mencapai sifat yang dapat diterima atau kinerja layanan. Beberapa pertimbangan yang membutuhkan penggunaan logam pengisi komposisi yang berbeda termasuk kekuatan, pembentukan cacat las (misalnya porositas), ketahanan retak/ retak pembekuan, respon perlakuan panas, ketahanan korosi, biaya logam pengisi, dan karakteristik pengoperasian bahan habis pakai tersebut.

Saat menggunakan logam pengisi yang memiliki komposisi berbeda dari logam dasar, efek dilusi harus dipertimbangkan dengan cermat atau hasil yang diinginkan mungkin tidak seperti yang diharapkan. Contoh umum pengelasan heterogen meliputi penggunaan logam pengisi Tipe 308L pada logam dasar Tipe 304L untuk kemampuan pengelasan dan ketahanan korosi dan penggunaan logam pengisi aluminium 4043 pada aluminium 6061 agar tahan retak saat pembekuan.

Seperti disebutkan sebelumnya, penggunaan lasan heterogen seringkali membutuhkan perhatian khusus terhadap efek pengenceran/dilusi. dilusi dapat didefinisikan sebagai perubahan komposisi logam pengisi karena pencampurannya dengan logam dasar selama proses peleburan. Dalam banyak kasus, dilusi tidak diinginkan dan harus dikontrol dengan hati-hati. Perubahan komposisi logam las yang disimpan dengan pengenceran dapat meniadakan atau mengurangi sifat logam las yang diinginkan yang akan dicapai oleh logam pengisi dalam kondisi tidak dilusi. Satu kasus di mana dilusi sangat tidak diinginkan adalah dalam operasi permukaan di mana logam pengisi berbeda secara signifikan dari bahan dasar dan dipilih untuk menghasilkan sifat yang sangat spesifik seperti ketahanan abrasi, ketahanan korosi, atau sifat impak. Misalnya, jika baja tahan karat digunakan sebagai *cladding* pada baja karbon untuk ketahanan terhadap korosi, dilusi yang

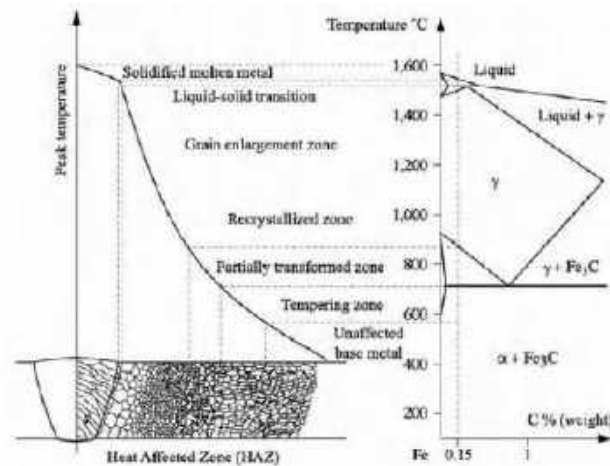
signifikan (~ 40%) dapat mengurangi kandungan kromium ke level di mana lapisan *cladding* tidak lagi tahan terhadap korosi.

Dilusi diekspresikan dalam bentuk pengenceran logam pengisi oleh logam dasar dan ditunjukkan secara skematis pada Gambar 2.4. Secara matematis, dilusi adalah rasio jumlah logam dasar yang dilelehkan dengan jumlah total logam leburan. Misalnya, lasan dengan dilusi 10% akan mengandung logam dasar 10% dan logam pengisi 90%. Untuk sebagian besar proses pengelasan, dilusi biasanya dikontrol di bawah 50%. Pada potongan melintang las, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.4, dapat digunakan untuk memperkirakan pengenceran berdasarkan geometri sambungan, atau komposisi aktual dari logam las dapat ditentukan dengan analisis, dan dilusi dihitung jika komposisi dasar dan pengisi logam.



Gambar 14.4 Ilustrasi skematik dari penentuan dilusi dalam lasan yang heterogen.

kecepatan siklus termal pada pengelasan tidak memungkinkan untuk menggunakan diagram keseimbangan untuk memperkirakan sifat dari berbagai fase di sekitar garis fusi. Namun, dengan mengikuti contoh Easterling, jenis diagram ini adalah titik awal yang cocok untuk menafsirkan modifikasi mikro secara kualitatif. Sebagai contoh, baja struktural, yang paling banyak digunakan dalam aplikasi pengelasan, akan dipertimbangkan dengan memeriksa diagram (Fe-C) secara paralel dengan suhu maksimum yang dicapai dalam sambungan yang dilas (lihat Gambar 3.9).



Gambar 3.9. Presentasi berbagai bagian dari sambungan yang dilas (Bondeau,2001)

Mari kita perhatikan misalnya kasus pengelasan baja 0,15%C. Ketika kita mendekati zona leleh, situasi zona berikut dapat ditemukan.

Logam dasar belum mengalami fase transformasi dalam pemanasan, yaitu telah dipanaskan hingga suhu lebih rendah dari titik transformasi A1 (727 ° C). Karena itu, ini adalah struktur mikro yang terdiri dari ferit D (penyisipan karbon larutan padat dalam besi, dari struktur kubik terpusat) dan dari besi karbida Fe₃C (atau cementite) atau lebih tepatnya dari perlit, agregat pipih dari ferit dan sementit.

Kami memiliki zona subkritis, di mana pergeseran fasa belum terjadi. Namun, ketika suhu yang dicapai cukup tinggi (misalnya T > 600 ° C), fenomena tertentu seperti temper, spheroidisasi dari lamella sementit, rekristalisasi dalam kasus pengelasan produk pengerasan regangan, penuaan, dll., Dapat mungkin terjadi

Glosarium

- Akar Las (Root)** ialah Zona di sisi pengelasan pertama terjauh dari tukang las.
- Celah (Gap)** adalah jarak minimum pada setiap penampang antara tepi, ujung, atau permukaan bergabung.
- Daerah Las (Weld Metal)** adalah semua logam meleleh selama proses pengelasan dan menjadi daerah lasan.
- Ecess Weld** adalah kelebihan logam las pada daerah logam las baik tinggi maupun lebarnya dari hasil pengukuran sesuai dengan suatu standar.
- Filler metal** adalah logam penambah selama proses pengelasan, atau mematri
- Full Penetration Weld** adalah suatu sambungan las di mana logam las sepenuhnya menembus sambungan dengan penuh sampai ke akar (root)
- Fusion line** adalah sebuah batas antara logam las dan daerah HAZ dalam lasan fusi.
- Joint** adalah proses penyambungan di mana komponen atau suatu bagian yang terpisah, dipersiapkan dan dirakit, disambung dengan cara pengelasan atau bisa juga dengan brazing.
- Laminasi** adalah cacat yang terjadi saat proses pembuatan baja, yang berasal dari cacat ingot casting
- Land** adalah bagian lurus dari permukaan fusi antara permukaan akar dan jari-jari dari kampuh J atau U bisa 0.
- Laps** adalah cacat pada baja disebabkan karena setelah pengerolan baja yang dalam kondisi panas baja yang saling tumpang tindih sebagian lengket ke yang lainnya.
- Logam Induk (Parent Metal)** adalah logam dasar yang akan digabungkan/sambung dengan proses pengelasan, bras weld atau brazing.
- Partial Joint Penetration** adalah suatu sambungan las tanpa penetrasi penuh menurut standar AWS diistilahkan dengan sambungan penetrasi parsial.

Pengelasan adalah suatu operasi di mana dua atau lebih bagian disatukan oleh panas, tekanan atau dengan keduanya, dengan sedemikian rupa sehingga ada kontinuitas dalam sifat logam antara bagian-bagian ini.

Permukaan Las (Face Weld) merupakan permukaan dari daerah las fusi akhir dari sebuah proses pengelasan yang dilakukan.

Polaritas merupakan penentu apakah sebagian besar energi busur (panas) terkonsentrasi pada permukaan elektroda atau di permukaan logam induk

Radius akar adalah jari-jari bagian melengkung dari permukaan fusi dalam komponen disiapkan untuk pengelasan dengan kampuh J atau U tunggal atau ganda.

Sambungan Dissimilar/ Transition adalah proses penyambungan logam dengan pengelasan di mana logam induk memiliki perbedaan yang signifikan pada sifat mekanik dan/ atau komposisi kimia.

Sambungan Heterogen adalah proses penyambungan logam dengan pengelasan di mana logam las dan material induk memiliki perbedaan signifikan dalam sifat mekanik dan/ atau komposisi kimia.

Sambungan Homogen adalah proses penyambungan dengan pengelasan di mana logam las (weld metal) dan logam induk tidak memiliki perbedaan signifikan dalam sifat mekanik dan/ atau komposisi kimia.

Sudut bevel adalah sudut di mana tepi komponen disiapkan untuk membuat lasan.

Toe adalah Batas antara permukaan lasan dan logam induk atau antara lintasan awal.

Weldability kemampuan suatu bahan untuk dilakukan penyambungan tanpa terjadinya retak

Zona pengelasan (Weld Zone) adalah Zona yang mengandung logam las dan daerah HAZ.

Zona terpengaruh panas (Heat Affected Zone) merupakan bagian logam induk yang dipengaruhi oleh panas saat proses pengelasan atau pemotongan termal tetapi tidak meleleh/cair.

Indeks

A

Acceptance Criteria
Angular Distortion
angular distortion
Argon
Autogenous Weld

B

Baja tahan karat
Basic
Bend Testing
bowing
Burn Through
Butt weld

C

Cacat lubang (cavities)
Cacat Retak (cracks)
Carbon Steels
Cellulosic
centreline cracking
Chipping Mark
cladding
cold laps
Complete Joint Penetration
Composite Zone
Concave fillet weld
Contact Tip to Work Distance
continius undercut
Convex double V butt weld
crater
Crater Cracking
crater cracking
Crater Pipe

D

DCEN
DCEP
Delayed cracking
dishing
Double bevel butt weld

Double J butt weld
Double U butt weld
Double V butt weld
downhand

E

Elektroda tungsten
Elektroda zirconia
Embrittlement
Excess Penetrations
Excess Weld Metal
FCAW

F

filler metal
Filler wires
Fillet weld with both toes blended
smoothly
Flat (flush) single V butt weld with
flat (flush) backing run
Flux inclusions
Free Machining Steels
Full penetrasi
Fusion weld

G

Gap
gas porosity
Grinding Mark
GTAW

H

HAZ cracking
High-Carbon Steel
High-Strength Low-Alloy Steels
higroskopis
hot shortness
Hydrogen Cracking

I

Impact Test
Imperfect shape and dimensions
Incomplete Filled Groove
Incomplete Root Penetration
Induktansi
Inklusi Tungsten
Intergranular Korosi
intermittent undercut
inter-run undercut.
Irregular Width

J

Jig dan Fixtures Las
Joint

K

karbon ekuivalen
kecepatan pengelasan
kromium karbida

L

lack of fusion
Lack of fusion and penetration
lack of inter run fusion
Lack of Penetration
lack of root fusion
Lack of sidewall fusion
lamellar tearing
Linier Misalignment
liquation cracks
Low Carbon Steels

M

MAG
Medium-Carbon Steels
MIG
Mild Steels
Misalignment of Opposite Runs
Miscellaneous imperfections
MMA

N

Nick-Break

Overhead

O

Overlap
Oxide Inclusions
Oxy fuel gas welding

P

Partially Melted Zone/PMZ
Pengujian kekerasan
pitting corrosion
Plasma arc Welding
Post Weld Heat Treatment
Preheat

R

Root Concavity
root gap
Rutile

S

SAW
segregation bands
shrinkage cavity
single V butt weld
Single V butt weld with broad root
face and backing run
slag inclusions
Slag inklusi
SMAW
solid inclusions
Solid Inclusions
solidification cracking
Solidifikasi
Spatter
springing
Stiffening
Stray Arc
Strongbacks dan Wedges
surface porosity
Symbol las

T

Tack welding

Termokopel
thoriated
TIG
Toe crack
Torn Surface
transfer globular
transfer spray
True Heat Affected Zone
Tungsten inclusions

U

Uji Kekuatan Tarik
Under Flushing
underbead

Undercut
Unmixed Zone

V

Visible Oxide Film

W

weld decay
Weld Decay
weld pool
Weldability
Welding Inspector
Welding Prosedure Specification
Worm Hole

Daftar Pustaka

- American Welding Society, 2001, Welding Handbook Ninth Edition Volume 1
Welding Science And Technology
- American Welding Society, 2004, Welding Handbook Ninth Edition Volume 2
Welding Processes, Part 1
- American Welding Society, 2011, Welding Handbook Ninth Edition Volume 4
Materials and Applications, part 1, American Welding Society.
- Blondeau, R., 2001, Metallurgy and Mechanics of Welding Processes and
Industrial Applications, John Wiley & Sons, Inc
- E. N. Gregory and A. A. Armstrong, 2005, Welding symbols on drawings,
Published by Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington
- G.E. Linnert, 1994 Welding Metallurgy Carbon and Alloy Steels Volume I
Fundamentals, Fourth Edition, GML Publications Hilton Head Island, South
Carolina, USA
- G. Deyev and Dmitriy Deyev, 2006, Surface Phenomena in Fusion Welding
Processes, Publisher Taylor & Francis Group
- J.C. Lippold, 2015, Welding Metallurgy and Weldability, publisher John Wiley &
Sons, Inc, Ohio State University
- K. Weman, 2003 Welding processes handbook, Woodhead Publishing Limited,
Cambridge, England
- R.W. Messler, Jr. 2004, Principles of Welding Processes, Physics, Chemistry, and
Metallurgy, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- S. Kou, 2003, Welding Metallurgy Second Edition, A John Wiley & SONS, INC.,
Publication
- T.S., Boniszewski T., Eaton N.F., "Notch toughness of commercial submerged-arc
weld metal", Welding and Metal Fabrication, p. 327-339, August 1969.
- TWI, 2018, Welding Inspector (WI), CSWIP 3.1 Training and Examination
Service, Cambridge, UK
- W. Chuaiphan and L. Srijaroenpramong, 2012, Effect Of Filler Alloy On
Microstructure, Mechanical And Corrosion Behaviour Of Dissimilar
Weldment Between Aisi 201 Stainless Steel And Low Carbon Steel Sheets
Produced By A Gas Tungsten Arc Welding, Advanced Materials Research
Vols 581-582 pp 808-816

- W. Chuaiphan and L. Srijaroenpramong, 2014, Effect of welding speed on
microstructures, mechanical properties and corrosion behavior of GTA-
welded AISI 201 stainless steel sheets, Journal of Materials Processing
Technology, pp 402-408
- W. Chuaiphan and L. Srijaroenpramong, 2019, Optimization of gas tungsten arc
welding parameters for the dissimilar welding between AISI 304 and AISI
201 stainless steels, journal Defence Technology, pp 170-178

Biodata Penulis



Suherman, S.T., M.T, Penulis lahir di Bagan Baru pada tanggal 09 Juli 1979, Penulis menyelesaikan pendidikannya di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Medan (ITM) tahun 2003, selanjutnya pada tahun 2004 penulis melanjutkan pendidikan di Program Pasca sarjana (S2) Program Studi Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada (UGM). Saat ini penulis merupakan Dosen tetap di Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) dan telah banyak mempublikasikan hasil penelitiannya dibidang Teknik Pengelasan dan Pengecoran Logam baik di jurnal nasional maupun internasional. Sejak tahun 2007 penulis mengajar berbagai mata kuliah seperti Material Teknik, Metalurgi Fisik, Teknik Pengelasan, Teknik Pengecoran Logam, Bejana Tekan di beberapa PTS di Sumatera Utara. Penulis memiliki Sertifikat kompetensi bidang Welding Engineer (WI) CSWIP 3.0 dan Badan Nasional Standar Profesi (BNSP).



Prof. Dr. Ir. Ilmi Abdullah, M.Sc, Penulis merupakan Guru Besar di Departemen Teknik Mesin Universitas Sumatera Utara (USU) Medan. Sehari-hari penulis mengajar mata kuliah Termodinamika, Perpindahan Panas dan Mekanika Fluida. Selain sebagai dosen, penulis memiliki pengalaman di bidang industry seperti di PT Deserco, PT Indah Kiat, Pollution Engineering (M) Sdn Bhd, Selangor Malaysia, PT Kawasan Industri Medan (KIM). Penulis menyelesaikan pendidikan (S1) tahun 1988 di USU dan menyelesaikan pendidikan pada program pascasarjana di Departemen Mechanical dan Material Engineering Universitas Kebangsaan Malaysia (UKM) Malaysia pada tahun 1997 sedangkan S-3 penulis peroleh pada tahun 2002 di Universitas yang sama (UKM). Penulis telah banyak mempublikasikan hasil penelitian baik di jurnal Nasional maupun internasional dengan bidang kajian energy dan pembakaran.