ISBN 978-623-6833-69-8 (PDF)

TEKNOLOGI PENGELASAN

Mulyadi, ST., MT | Iswanto, ST., MT

BUKU AJAR
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SIDOARJO

TEKNOLOGI PENGELASAN

TEKNOLOGI PENGELASAN

Mulyadi, ST., MT | Iswanto, ST., MT

BUKU AJAR
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SIDOARJO

BUKU AJAR
TEKNOLOGI PENGELASAN

Oleh
Mulyadi, S.T., M.T.
Iswanto, ST., M.MT.

Diterbitkan Oleh : UMSIDA Press

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SIDOARJO
2020

BUKU AJAR
TEKNOLOGI PENGELASAN

Penulis:
Mulyadi, S.T., M.T.
Iswanto, ST., M.MT

ISBN :
978-623-6833-69-8

Editor:
Dr. Ir. Jamaaluddin, M.M.

Design Sampul dan Tata Letak:
Mochammad Nashrullah, S.Pd.
Amy Yoga Prajati, S.Kom.

Penerbit:
UMSIDA Press
Anggota IKAPI No. 218/ANggota Luar Biasa/JTI/2019
Anggota APPTI No. 002 018 1 09 2017

Redaksi
Universitas Muhammadiyah Sidoarjo
Jl. Mojopahit No 666B
Sidoarjo, Jawa Timur

Cetakan Pertama, September 2020
©Hak Cipta dilindungi undang undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dengan sengaja, tanpa ijin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga Buku Ajar TEKNOLOGI PENGELASAN edisi revisi ini selesai sesuai dengan yang direncanakan. Buku ajar Teknologi Pengelasan ini dibuat khusus untuk mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Sumber pustaka buku ajar ini diambil dari beberapa artikel, ebooks, diktat, Tugas Akhir dan lain-lain .

Penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Dr. Hindarto, S.Kom., M.T., Dekan Fakultas Sains dan Teknologi yang memberikan arahan dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan buku ajar ini.
2. Edi Widodo, S.T., M.T., Kaprodi Teknik Mesin yang telah memberikan dukungan untuk menyusun buku ajar ini.
3. Para narasumber yang penulis tidak dapat sebutkan satu persatu yang karya cipta pengetahuannya kami rujuk, untuk penyusunan penulisan buku ajar ini.

Saran dan kritik sangat penulis harapkan untuk mewujudkan buku ajar Teknologi Pengelasan yang lebih baik dan tentunya sesuai dengan amanat peraturan yang berlaku. Terimakasih.

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul i
Indentitas Buku Ajar ii
Kata Pengantar iii
Daftar Isi iv
Batang Tubuh vi

BAB 1 PENDAHULUAN
1.1 Klasifikasi Proses Pengelasan 1
1.2 Klasifikasi Proses Pemotongan 5
1.2.1 Pemotongan Gas 5
1.2.2 Pemotongan Busur Listrik 9

BAB 2 LAS BUSUR LISTRIK
2.1 Las Elektroda Terbungkus 11
2.2 Las Busur Gas 12
2.3 Las Busur Tanpa Gas 15
2.4 Las Busur Rendam 17

BAB 3 PENGELASAN KHUSUS
3.1 Las Listrik Terak 21
3.2 Las Listrik Gas 24
3.3 Las Resistansi Listrik 28
3.4 Las Sinar Elektron 32

BAB 4 METALURGI LAS
4.1 Struktur Mikro 35
4.2 Siklus Thermal Las 41
4.3 Input Panas 46
4.4 Daerah Lasan 46
4.5 Weldability 49
4.6 Heat Flow 51

4.7 Metal Transfer 53
4.8 Reaksi Pada Logam Cair 53
4.9 Proses Defusi 55
4.10 Terbentuknya Struktur Dendrit 56

BAB 5 PERENCANAAN KONTRUKSI LAS
5.1 Klasifikasi Sambungan Las 59
5.2 Tanda-Tanda Gambar Dalam Pengelasan 61
5.3 Kekuatan Sambungan Las 62
5.4 Patahnya Kontruksi Las 65

BAB 6 TEST DAN PEMERIKSAAN LASAN
6.1 Persiapan Dari Pengujian Dan Pemeriksaan 74
6.2 Pengujian Merusak 75
6.1 Pengujian Tak Merusak 77

BAB 7 FRICTION STIR WELDING
7.1 Proses Friction Stir Welding 79
7.2 Konfigurasi Friction Stir Welding 83
7.2.1 Tool Material Friction Stir Welding 84
7.2.2 Desain Sambungan Friction Stir Welding 87
7.3 Dasar Aliran Material Friction Stir Welding 88

BAB 8 STUDI KASUS
8.1 Pengamatan Makro 99
8.2 Pengamatan Struktur Mikro 102
8.3 Uji Kekerasan 113
8.4 Soal Evaluasi 116

DAFTAR PUSTAKA 120
BIODATA PENULIS 128

BATANG TUBUH DAN
SUB-CAPAIAN PEMBELAJARAN MATA KULIAH

Fakultas	:	Sains & Teknologi
Program Studi	:	Teknik Mesin
Mata Kuliah (MK)	:	TEKNOLOGI PENGELASAN
Kode MK	:	TM 00602
SKS	:	3 (tiga)
Semester	:	VII (tujuh)
Mata Kuliah Prasyarat	:	Menggambar Mesin dan Pengetahuan Bahan Teknik
StandarKompetensi (SK)	:	Mahasiswa mengetahui konsep proses pengelasan, sifat mampu las beberapa logam ditinjau dari aspek metalurgi, menyusun prosedur pengelasan yang tepat, membaca dan menggambarkan sambungan dengan proses las, cara pengujian dan keselamatan kerja

NO	POKOK BAHASAN	SUB-CAPAIAN MATA KULIAH
BAB 1	**PENDAHULUAN** Mahasiswa mengenal macam-macam metoda penyambungan logam dan pemotongan	Mahasiswa dapat menjelaskan klasifikasi proses pengelasan. Mahasiswa dapat menjelaskan klasifikasi proses pemotongan.

BAB 2	**LAS BUSUR LISTRIK** Mahasiswa mengenal dan mengetahui macam-macam jenis las dengan busur api serta jenis elektroda yang dipakai	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan las elektroda terbungkus. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan las busur gas. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan las busur tanpa gas. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan las busur rendam.
BAB 3	**PENGELASAN KHUSUS** Mahasiswa mengenal dan mengetahui macam-macam jenis las dengan busur api serta kedalaman penetrasi	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan las listrik terak. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan las listrik gas. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan las resistansi listrik. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan las sinar elektron.

BAB 4	**METALURGI LAS** Mahasiswa mampu memahami prinsip dasar roses pembekuan dalam penyambungan logam	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan struktur mikro pengelasan logam. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan siklus termal las. Mahasiswa dapat memahami dan melakukan penghitungan input panas pengelasan. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan daerah lasan. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan weldability pengelasan. Mahasiswa dapat memahami dan melakukan penghitungan heat flow pengelasan. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan metal tranfer pengelasan. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan reaksi pada logam pengelasan. Mahasiswa dapat memahami dan

		menjelaskan proses defusi pengelasan. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan terbentuknya struktur dendrit pada logam lasan.
BAB 5	**PERENCANAAN KONTRUKSI LAS** Mahasiswa mengenal dan mengetahui perencanaan kontruksi lasan	Mahasiswa dapat mengetahui macam-macam sambungan pengelasan. Mahasiswa dapat mengenal tanda-tanda gambar dalam pengelasan. Mahasiswa dapat menghitung kekuatan sambungan pengelasan. Mahasiswa dapat memprediksi patahnya kontruksi lasan dengan pendekatan matematis.
BAB 6	**TEST DAN PEMERIKSAAN LASAN** Mahasiswa mengenal macam-macam jenis pengujian kekuatan las dan pemeriksaan hasil pengelasan	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan persiapan pengujian dan pemerikasaan hasil pngelasan. Mahasiswa dapat memahami dan melakukan pengujian pengelasan dengan merusak.

		Mahasiswa dapat memahami dan melakukan pengujian pengelasan dengan tanpa merusak.
BAB 7	**FRICTION STIR WELDING** Mahasiswa mengenal pengelasan yang tergolong baru yang banyak digunakan untuk proses pengelasan khusus	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan proses friction stir welding. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan bagian-bagian dari friction stir welding. Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan parameter proses friction stir welding. Mahasiswa dapat mengetahui aliran material proses friction stir welding.
BAB 8	**STUDI KASUS** Mahasiswa mengenal dan mampu memahami penyelesaian studi kasus dari proses pengelasan	Mahasiswa dapat menjelaskan dan memahami studi kasus pengelasan, metode yang digunakan dan hasil yang didapatkan dari penyelesaian studi kasus. Mahasiswa mampu memahami kajian setiap BAB dengan latihan soal-soal evaluasi.

BAB 1 PENDAHULUAN

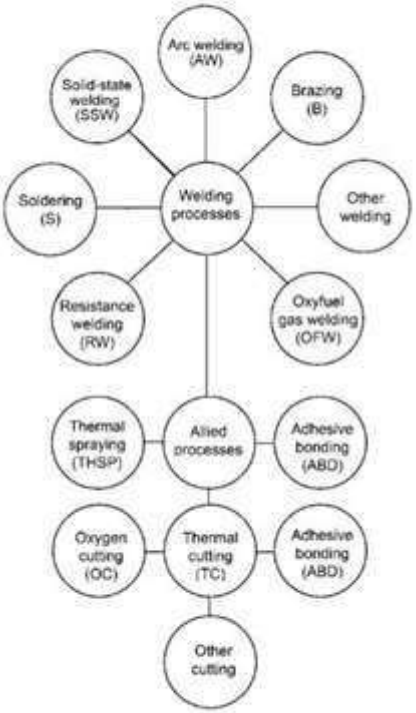
1.1 Klasifikasi Proses Pengelasan

Sambungan las adalah ikatan dua buah logam atau lebih yang terjadi karena adanya proses difusi dari logam tersebut. Proses difusi dalam sambungan las dapat dilakukan dengan kondisi padat maupun cair. Dalam terminologi las, kondisi padat disebut *Solid state welding (SSW)* atau *Presure welding* dan kondisi cair disebut *Liquid state welding (LSW)* atau *Fusion welding.*

Proses SSW biasanya dilakukan dengan tekanan sehingga proses ini disebut juga *Presure welding*. Proses SSW memiliki beberapa kelebihan, diantaranya adalah dapat menyambung dua buah material atau lebih yang tidak sama, proses cepat, presisi, dan hampir tidak memiliki daerah terpengaruh panas (*heat affected zone / HAZ*). Namun demikian SSW juga mempunyai kelemahan yaitu persiapan sambungan dan prosesnya rumit, sehingga dibutuhkan ketelitihan sangat tinggi.

LSW merupakan proses las yang sangat populer di kalangan masyarakat kita, sambungan las terjadi karena adanya pencairan ujung kedua material yang disambung. Energi panas yang digunakan untuk mencairkan material berasal dari busur listrik, tahanan listrik, pembakaran gas, dan juga beberapa cara lain diantaranya adalah sinar laser, sinar electron, dan busur plasma. Penyambungan material dengan cara ini mempunyai persyaratan material harus sama, karena untuk mendapatkan sambungan yang

sempurna suhu material harus sama, jika tidak proses penyambungan tidak akan terjadi. Kelebihan metode pengelasan ini adalah proses dan persiapan sambungan tidak rumit, beaya murah, pelaksanaannya mudah.



(a)

Group	Welding process	Letter designation
Arc welding	Carbon arc	CAW
	Electrogas	EGW
	Flux-colored arc	FCAW
	Gas metal arc	GMAW
	Gas tungsten arc	GTAW
	Plasma arc	PAW
	Shielded metal arc	SMAW
	Stud arc	SW
	Submerged arc	SAW
Brazing	Diffusion brazing	DFB
	Dip brazing	DB
	Furnace brazing	IB
	Induction brazing	IRB
	Resistance brazing	RB
	Torch brazing	TB
Oxyfuel gas welding	Oxyacetylene welding	OAW
	Oxyhydrogen welding	OHW
	Air acetylene	...
	Pressure gas welding	PGW
Resistance welding	Flash welding	FW
	Projection welding	DFW
	Resistance seam welding	RSEW
	Resistance spot welding	RSW
	Upset welding	UW
Solid-state welding	Cold welding	CW
	Diffusion welding	DFW
	Explosion welding	EXW
	Forge welding	FOW
	Friction welding	FRW
	Hot pressure welding	HPW
	Roll welding	ROW
	Ultrasonic welding	USW
Soldering	Dip soldering	DS
	Furnace soldering	FS
	Induction soldering	IS
	Infrared soldering	IRS
	Iron soldering	INS
	Resistance soldering	RS
	Torch soldering	TS
	Wave soldering	WS
Other welding processes	Electron beam	EBW
	Electroslag	ESW
	Flow	FLOW
	Induction	IW
	Laser beam	LBW
	Percussion	PEW
	Thermit	TW

(b)

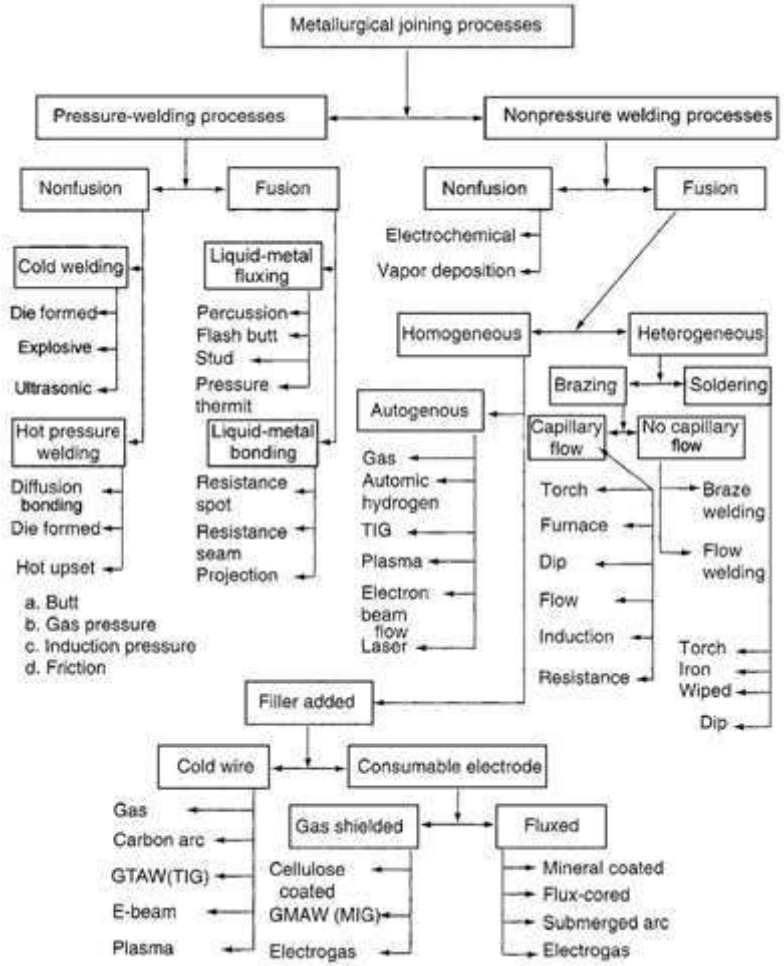
Gambar 1.1 (a) Master chart of welding and allied processes used by the American Welding Society (AWS). (b) List of the abbreviations used by the AWS for various welding, brazing, and soldering processes. Source: R.L. O'Brien, Ed., Jefferson's Welding Encyclopedia, 18th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1997, p 634

Kelemahannya adalah memerlukan juru las yang terampil, terjadinya HAZ yang menyebabkan perubahan sifat bahan, dan ada potensi kecelakaan dan terganggunya kesehatan juru las.

Pada Gambar 1.1 menyajikan bagan induk proses pengelasan dan allied yang dikembangkan oleh American Welding Society (AWS). Ini berguna untuk tiga hal. Pertama, ini membagi proses pengelasan ke dalam kategori utama (mis., Pengelasan busur, pengelasan gas oxyfuel, pengelasan resistansi, dll.). Kedua, ini menunjukkan hubungan umum dari apa yang disebut proses allied, yang menggunakan sumber energi yang sama (mis., Busur listrik dan pembakaran gas oxyfuel) untuk proses yang berhubungan dengan termal seperti proses pemotongan dan penyemprotan bahan termal. Ketiga, ini memberikan akronim penunjukan AWS untuk referensi tangan pendek ke proses tertentu (mis., GMAW untuk pengelasan busur logam gas).

Sedangkan pada Gambar 1.2 menyajikan taksonomi proses pengelasan dibagi menjadi kategori tekanan dan non-tekanan, sementara di bawah tingkat ini masing-masing

dibagi menjadi subtipe nonfusi dan fusi. Hubungan dari perwujudan proses spesifik dengan cara-cara mendasar di mana lasan dapat dibuat dalam bahan nyata untuk mengatasi hambatan untuk pembentukan kontinuitas bahan segera jelas; yaitu, tekanan yang menyebabkan deformasi plastis atau panas yang menyebabkan leleh dapat digunakan. Dalam subklasifikasi umum dari proses pengelasan tanpa tekanan yang beroperasi dengan mengandalkan fusi, subdivisi lebih lanjut ke dalam proses yang bergantung pada fusi bahan dasar yang identik atau identik bahan pengisi atau dari bahan dasar dan pengisi yang berbeda.



Gambar 1.2 Schematic representation of the overall taxonomy of welding processes. GTAW, gas tungsten arc welding; GMAW, gas metal arc welding; TIG, tungsten inert gas; MIG, metal inert gas. Source: R.W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to

Enabling Technology, Butterworth – Heine – mann / Elsevier, Burlington, MA, 2004, p 300, 301, 313, 315, 316, 320–324, 327– 330

1.2 Klasifikasi Proses Pemotongan

Proses pemotongan logam dengan nyala api adalah proses momisahkan sebagian atau seluruhnya dari logam dengan bantuan panas. Panas yang digunakan dapat dihasilkan dari perpaduan gas ataupun dari sumber arus listrik. Pada proses pemotongan logam dengan sumber panas yang dihasilkan oleh gas, panas dihasilkan oleh pembakaran gas oksigen dengan asetilin atau juga dari proses pembakaran oksigen dengan LPG. Sedangkan sumber panas dari listrik dihasilkan oleh trapo pembangkit listrik.

1.2.1 Pemotongan Gas

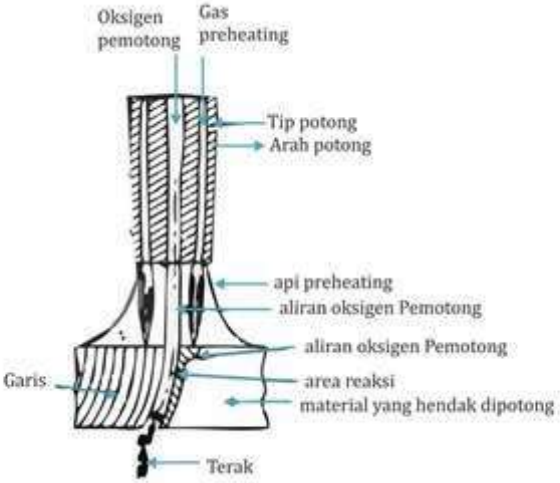
Meskipun bagian dari benda kerja besi atau baja terlebih dahulu dipanaskan dengan nyala api hingga titik api (kira-kira 900 ° C) dan kemudian oksigen bertekanan tinggi murni ditiupkan ke logam dasar langsung di tengah api pemanasan awal, zona berkas meleleh dan memisahkan oksida besi. Hasil pembakaran disebut slag. Jadi pemotongan terus menerus menciptakan alur untuk menyelesaikan pemotongan gas. Kehadiran pemotongan oksigen sangat penting karena menggunakan aliran oksigen yang dipotong. Dengan kata lain terdiri dari: aksi energi kimia dan energi

mekanik yang menghembuskan terak (slag) dan membakar besi atau baja menggunakan fungsi bantuan pembakaran oksigen.

Kondisi pemotongan dengan menggunakan gas oksigen adalah sebagai berikut :

1. Suhu lebur dari oksida logam yang menutupi permukaan dari logam induk harus dibawah titik lebur logam induk.
2. Cairan dari terak (hasil dari pembakaran) harus cukup bagus sehingga terak (slag) dapat dibuang dengan mudah dari logam induk.
3. Suhu pembakaran dari logam induk harus dibawah titik lebur dari oksida logam
4. Substansi (bahan) yang tidak terbakar pada logam induk harus diminimalisir.
5. Logam yang mempunyai konduktivitas termalnya tinggi atau nilai kalori dari oksidasi rendah maka tidak dapat dipotong dengan pemotongan gas.

Karena cara ini hanya berlaku untuk besi atau baja karbon rendah dan hanya khusus untuk memotong baja tahan karat, paduan aluminium atau besi. Proses pemotongan busur plasma digunakan untuk mengatasi masalah yang tidak dapat dicapai dengan pemotongan gas. Gambar 1.3 menunjukkan skematik proses pemotongan dengan gas.



Gambar 1.3 Skematik proses pemongan dengan gas. Source: http: // kawatlas. Jaya Manunggal. com

Kecepatan potong dan kebersihan terkait satu sama lain dalam pemotongan gas. Kecepatan pemotongan menurun dengan penurunan kemurnian oksigen; Penurunan 1% dalam kemurnian oksigen menghasilkan penurunan kecepatan pemotongan sekitar 25% dan penurunan konsumsi oksigen sekitar 25%. Penurunan kemurnian oksigen menyebabkan: permukaan pemotongan lebih kasar, waktu mulai lebih lama, lebih sulit untuk menghilangkan terak dari permukaan, alur pemotongan (garitan) lebih lebar.

Oleh karena itu, kemurnian oksigen haruslah tinggi. Karena oksigen dapat diperoleh dengan kemurnian lebih dari 99,8%,

hal ini tidak lagi menjadi masalah serius. Selama pengoperasian yang sebenarnya, kemurnian dapat menurun karena oksigen yang keluar dari ujung dapat bercampur dengan gas di sekitarnya, termasuk udara, sebelum mencapai area pemotongan. Meskipun api pemanasan awal membantu menjaga kemurnian oksigen, rumah ujung dengan lubang suplai oksigen tambahan di sekitar pemutusan oksigen membantu dalam melakukan pemotongan oksigen.

Secara empiris (perhitungan pendekatan), jika plat yang akan dipotong tebal dapat menggunakan tekanan oksigen yang lebih tinggi. Meskipun kecepatan pancaran oksigen naik bersama dengan tekanan, kenaikan berhenti dan kecepatan menjadi tetap pada sebuah titik yang ditentukan oleh bentuk konfigurasi internal tip. Bentuk tip yang lurus konvensional berarti bentuk ini baik dan kuat. Dan Jika tekanan dinaikkan dengan tidak semestinya, maka energi tekanan dapat menyebabkan aliran pancaran jet oksigen berkembang dalam bentuk getaran dan tidak berubah ke energi kinetik yang diperlukan untuk pemotongan gas.

Kenaikan tekanan dapat menyebabkan gelombang kejut melepaskan oksigen dan menjadi tidak dapat digunakan serta dengan cepat menghilangkan energi kinetik. Pemancar oksigen berdiameter lebih besar (lubang sembur) lebih cocok untuk memotong logam dasar yang lebih tebal pada kecepatan pemotongan yang lebih tinggi. Meningkatkan diameter lubang tip akan meningkatkan kapasitas pemotongan dan konsumsi oksigen. Peningkatan tekanan oksigen meningkatkan konsumsi oksigen saat pemotongan.

Namun, peningkatan tekanan ini pada akhirnya memiliki efek yang lebih buruk karena turbulensi aliran semburan oksigen. Jika tekanan oksigen akan dinaikkan, bentuk potongan yang berbeda harus digunakan untuk menyesuaikan setiap tekanan suplai oksigen.

Proses sekali pemotongan gas dimulai, selanjutnya operasi pemotongan hanya dengan menghembuskan oksigen potong. Secara aktual, pemanasan dengan nyala pemanasan awal dilakukan untuk memudahkan pemotongan, ditujukan ke logaminduk untuk membuang terak alur potong (kerf) dan untuk mengganti panas yang diradiasikan ke udara maka cuncum potong. Fungsi dari nyala preheating adalah menjaga kemurnian oksigen, untuk pemanasan logam induk sampai ke temperatur nyala, bila pemotongan akan dimulai, menyiapkan arah pemancaran oksigen untuk pemotongan, menaikkan kualitas permukaan potong, mengaktifkan permukaan plat baja sehingga membuat pemotongan awal lebih mudah.

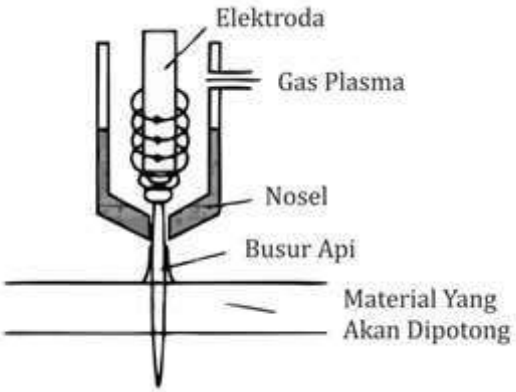
Bahan bakar gas untuk pemanasan awal nyala api antara lain LPG yaitu propylene, acetylene, propane gas, campuran acetylene dan LPG, serta gas pembakaran lainnya seperti LNG dan hidrogen. Saat memilih bahan bakar gas, dengan mempertimbangkan konsumsi dan biaya, suhu nyala api dan kemampuan untuk memusatkan, berat spesifik gas, suhu penyalaan, keselamatan yang berkaitan dengan nilai batas ledakan dan efisiensi ekonomi harus diperhitungkan.

Pemotongan adalah memilih gas bakar, perhatikan temperatur nyala dan kemampuan konsentrasinya, berat dari gas, temperatur penyalaan, keeamanan dalam hal batas-batas peledakan, effisiensi secara ekonomis . Dan kondisi pemotongan dengan menggunakan
gas oksigen adalah temperatur pembakaran dari logam induk harus dibawah titik lebur dari oksida logam tersebut diatas, temperatur lebur dari oksida logam yang menutupi permukaan dari logam induk harus dibawah titik lebur logam induk, bahan yang tidak terbakar pada logam induk harus diminimalisir, Cairan dari terak (hasil dari pembakaran) harus cukup bagus sehingga terak (slag) dapat dibuang dengan mudah dari logam induk.

1.2.2 Pemotongan Busur Listrik

Pada Gambar 1.4 adalah prinsip pemotongan menggunakan busur plasma yang dikembangkan untuk memotong baja tahan karat dan logam non besi seperti aluminium yang pada umumnya sulit dilakukan pemotongan dengan gas karena adanya kendala kualitas hasil pemotongan. Saat suhu gas naik, maka atom yang ada di dalam gas terionisasi oleh aktivitas panas dan dipisah menjadi elektron muatan negatif dan ion muatan positif dan masuk dalam kondisi gerak aktif. Kondisi ini disebut plasma, secara elektrik ada di kondisi netral. Semakin tinggi suhu, gerakan atom akan semakin aktif, yang akan memudahkan arus mengalir dan juga suhu gas jadi lebih tinggi sikarenakan kenaikan energi.

Jika dalam kondisi plasma udara disuplai oleh energi listrik untuk membentuk kolom busur di area sekeliling yang diinginkan, arus tidak bisa mengalir dengan mudah pada kondisi dingin karena tahanan listrik yang naik, maka srus akan terkonsentrasi ke daerah busur pada pusat nyala api, dan menyebabkan naiknya temperatur pada area tersebut.



Gambar 1.4 Prinsip pemotongan dengan busur plasma. Source: http://kawatlas.jaya manunggal.com

Kolom pada busur plasma di bagian pusat atau sumbunya lebih sempit karena efek jepitan panas yang membentuk busur plasma dengan suhu 2000 derajat celcius sampai 3000 derajat celcius. Saat terjadi penyempitan pada nozzle, maka busur plasma menjadi panas dan sempit dari busur tersebut dan akan melehkan benda kerja, maka busur plasma bisa digunakan untuk memotong.

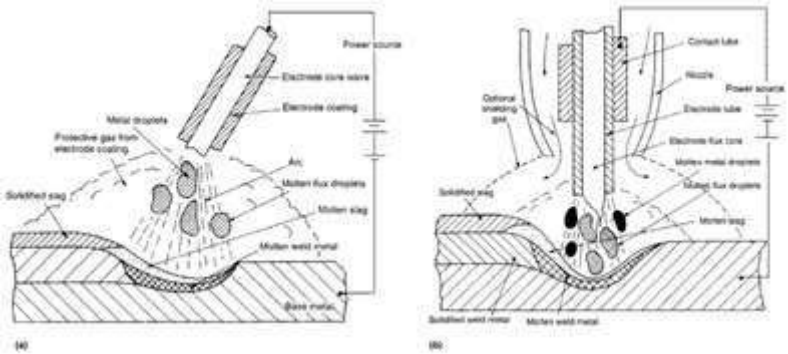
Pada pemotongan gas, proses memotong dengan aksi kimia menggunakan reaksi oksidasi metal, busur plasma merupakan

pemotongan dengan fisik yang memotong benda benda kerja menggunakan plasma dengan suhu tinggi. benda kerja akan dilelehkan menggunakan energi dari busur plasma dan juga daerah yang meleleh ditembus oleh aliran gas plasma dengan kecepatan tinggi untuk melengkapi proses pemotongan benda kerja. Kecepatanaliran gas plasma yang tipis dan mengecil dari torch standar yaitu tingginya 6-10 mili meter sebesar 2000 /detik.

BAB 2 LAS BUSUR LISTRIK

2.1 Las Elektroda Terbungkus

Las elektroda terbungkus atau pengelasan SMAW (*shielded Metal Arc Welding*) pada Gambar 2.1 sering disebut juga dengan pengelasan listrik. Pengelasan SMAW adalah proses menyatukan dua atau lebih potongan logam serupa menggunakan sumber panas yang terdiri dari listrik, menggunakan elektroda yang dibungkus sebagai aditif atau pengisi untuk membuat sambungan yang kokoh.



Gambar 2.1 Schematic illustration comparing (a) shielded metal arc welding and (b) flux-cored arc welding processes. Source: R.W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology, Butterworth-Heine- mann / Elsevier, Burlington, MA, 2004, p 300, 301, 313, 315, 316, 320–324, 327– 330

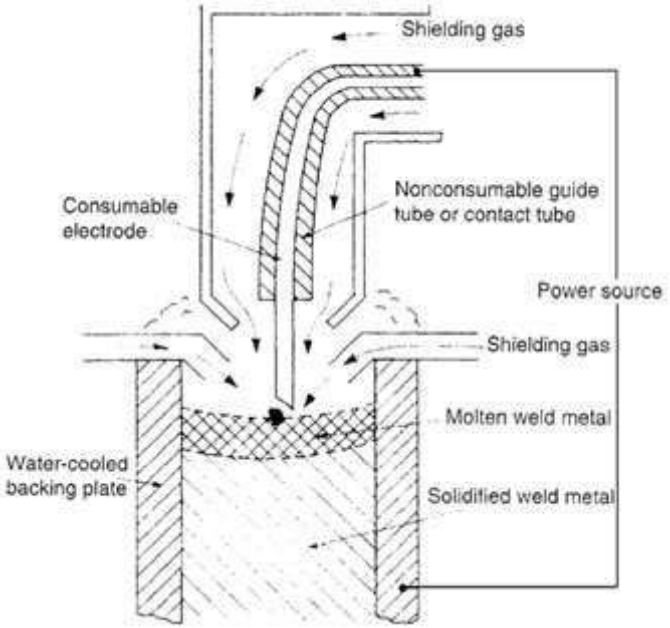
Prinsip kerja dari las SMAW ini yaitu saat ujung elektroda didekatkan pada benda kerja terjadi panas listrik (busur listrik) yang membuat antara benda kerja dengan ujung elektroda terbungkus tersebut mencair secara bersamaan. Dengan adanya pencairan ini maka kampuh pada las akan terisi oleh cairan logam dari elektroda dan logam induk yang mencair secara bersamaan. Elektroda sendiri merupakan kawat/logam yang terbungkus fluks.Fluks pada elektroda berfungsi sebagai pemantap busur dan juga sebagai sumber terak (slag) yang akan melindungi hasil las yang baru dari kontaminasi udara luar.

Pada saat proses pengelasan berlangsung pemindahan logam dari elektroda tergantung dari besar kecilnya arus listrik yang digunakan. Apabila menggunakan arus yang besar maka butiran-butiran logam akan menjadi halus, tetapi sebaliknya apabila menggunakan arus yang yang kecil pemindahan logam dari elektroda akan menjadi lebih besar.

Menurut Riswan Dwi Djatmiko, M.Pd pada Modul Teori Pengelasan Logam : 2008, secara umum dapat dikatakan bahwa mempunyai sifat mampu las tinggi bila pemindahan terjadi dengan butiran yang halus, sedangkan proses pemindahan dipengaruhi oleh besar kecilnya arus dan juga oleh komposisi bahan pembungkus elektroda (fluks) yang digunakan. Saat melakukan proses pengelasan dengan SMAW, pemilihan elektroda juga penting. Penggunaan elektroda disesuaikan dengan material yang akan dilas dan ketebalan benda kerja serta kekuatan arus yang digunakan harus sesuai dengan peraturan untuk mencapai kemampuan las yang baik.

2.2 Las Busur Gas

Las Busur Gas pada Gambar 2.2 adalah jenis proses pengelasan dimana gas dihembuskan ke daerah las untuk melindungi busur dan logam yang mencair terhadap atmosfer, Gas yang digunakan sebagai pelindung adalah gas helium (He), gas Argon (Ar), Gas Karbondioksida (CO2), atau campuran gas tersebut.



Gambar 2.2 Schematic illustration of the electro gas welding process used for heavy deposition welding in position or in a vertical plane using special tooling (as shown). Source: R.W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology, Butterworth-Heine- mann / Elsevier, Burlington, MA, 2004, p 300, 301, 313, 315, 316, 320–324, 327– 330

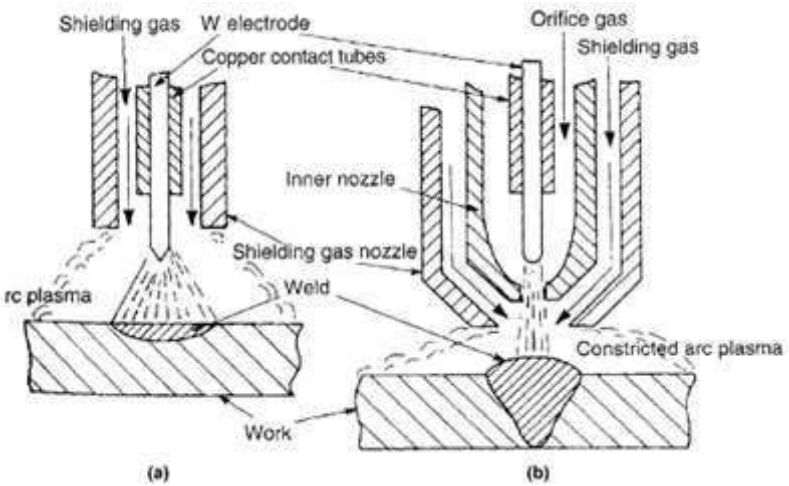
Proses pengelasan ini sambungan dibentuk oleh panas yang ditimbulkan oleh busur yang dibangkitkan diantara elektroda dan benda kerja dimana busur dilindungi oleh gas mulia seperti argon, atau bahkan gas CO2 atau campuran gas lainnya. Ada dua jenis pengelasan dengan cara ini yaitu : las TIG (tungsten inert gas) atau disebut juga pengelasan menggunakan elektroda wolfram dengan logam pengisi, dan las MIG (metal inert gas) atau disebut juga pengelasan menggunakan elektroda terumpan. Kedua jenis pengelasan ini bias dilakukan secara manual atau pun otomatik serta tidak memerlukan fluk satau pun lapisan kawat las untuk melindungi sambungan.

Las busur yang menggunakan elektroda wolfram (elektroda tak terumpan) dikenal pula dengan sebutan las busur wolfram gas. Skema dari pengelasan jenis ini bisadi lihat pada gambar dibawah. Pada proses ini las dilindungi oleh selubung gas mulia yang dialirkan melalui pemegang elektroda yang didinginkan dengan air. Pengelasan ini bias menggunakan arus bolak-baliok ataupun arus searah, dimana pemilihan tergantung pada jenis logam yang dilas. Arus searah polaritas langsung digunakan untuk pengelasan baja, besi cor, paduan tembaga dan baja tahan karat, sedangkan polaritas terbalik jarang digunakan.

Untuk arus bolak-balik banyak digunakan untuk pengelasan aluminium, magnesium, besi cor dan beberapa jenis logam lainnya. Proses ini banyak dilakukan untuk pengelasan pelat tipis karena biaya nya akan mahal jika digunakan untuk pengelasan pelat tebal. Pengelasan las gas

mulia elektroda terumpan bisa dilihat pada gambar dibawah dimana antara benda kerja dan elektroda terumpan dilindungi dengan gas pelindung. Efisiensi pengelasan jenis ini lebih tinggi dan kecepatan pengelasan jauh lebih baik. Pengelasan ini umumnya dilakukan secara otomatik. Gas karbon dioksida sering digunakan sebagai gas pelindung untuk pengelasan logam baja karbon dan baja paduan rendah.

Pada Gambar 2.3 membandingkan GTAW dan PAW dalam ilustrasi skematis. Dibandingkan dengan GTAW, PAW menghasilkan lasan yang menembus lebih dalam, dapat beroperasi pada kecepatan pengelasan yang lebih cepat, dan lebih bersih karena pelindung ganda dan dengan mencegah sentuhan tak sengaja ujung elektroda tungsten ke benda kerja yang menyebabkan kontaminasi oleh tungsten .



Gambar 2.3 Schematic illustration comparing (a) gas tungsten arc welding and (b) plasma arc welding processes. Source: R.W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology, Butterworth-Heine- mann / Elsevier, Burlington, MA, 2004, p 300, 301, 313, 315, 316, 320–324, 327– 330

Sementara GTAW dapat dioperasikan dalam mode DCSP, DCRP, atau ac, harus sangat berhati-hati untuk mencegah panas berlebih dan meleleh di ujung elektroda tungsten dengan panas terkonsentrasi di sana dalam mode DCRP. Pengelasan busur plasma dioperasikan hampir secara eksklusif dalam mode DCSP.

2.3 Las Busur Tanpa Gas

Operasi pengelasan ini sama dengan operasi pengelasan las busur gas. Dalam hal semi otomatik, kawat las digerakkan secara otomatik sedang alat pembakar digerakkan dengan tangan, sedangkan dalam hal otomatik penuh kedua-duanya digerakkan secara otomatik. Pengelasan ini tidak menggunakan selubung gas apapun juga, oleh karena itu proses pengelasan menjadi lebih sederhana. Berikut ini adalah beberapa hal yang penting dalam las busur tanpa gas:

1. Tidak menggunakan gas pelindung sehingga pengelasan dapat dilakukan di lapangan yang berangin.
2. Efisiensi pengelasan lebih tinggi dari pengelasan dengan busur terlindung.
3. Dapat menggunakan las listrik AC.
4. Dihasilkan gas yang banyak sekali.
5. Kualitas pengelasan lebih rendah dari pengelasan yang lain.

Berhubung karena tidak ada gas dari luar yang melindungi maka dalam pengelasan ini digunakan kawat las berisi fluks yang bersifat dapat menghasilkan gas yang banyak dan dapat membentuk terak, mempunyai sifat deoksidator dan denitrator, dan dapat memantapkan busur.

Kelebihan Las Busur Tanpa Gas :

1. Hasil pengelasan tidak perlu dibersihkan karena tidak menghasilkan slag.
2. Aliran gas menjadikan daerah disekitar cairan logam tidak mengandung udara sehingga mencegah pengotoran oleh nitrogen dan oksigen,yang dapat menyebabkan oksidasi.
3. Hasil lasan lebih kuat karena dapat penetrasi yang dalam dan ketahanan korosi lebih tinggi.
4. Hasil pengelasan sangat bersih.
5. Proses pengelasan dapat diamati dengan mudah, asap yang timbul tidak banyak.
6. Jarang terjadi deformasi karena pusat panas sangat kecil.
7. Tidak menghasilkan spater atau percikan las sehingga hasil las lebih bersih.

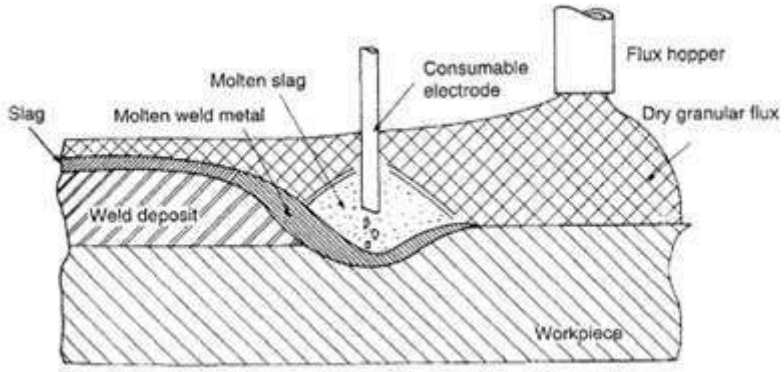
Kekurangan Las Busur Tanpa Gas :

1. Untuk efisiensi kecepatan las rendah.
2. Saat proses pengelasan berlangsung dapat terjadi burnback.
3. Cacat las porositas atau lubang-lubang kecil sering terjadi jika gas pelindung permukaan pengelasan tidak dapat melindungi secara maksimal.
4. Dapat terjadi tungsten inclusion.

2.4 Las Busur Rendam

Prinsip Kerja Pada dasarnya prinsip kerja dari mesin las busur rendam (*Submerged Arc Welding*), dapat dilihat dari Gambar 2.4 berikut. Kawat Elektroda berbentuk

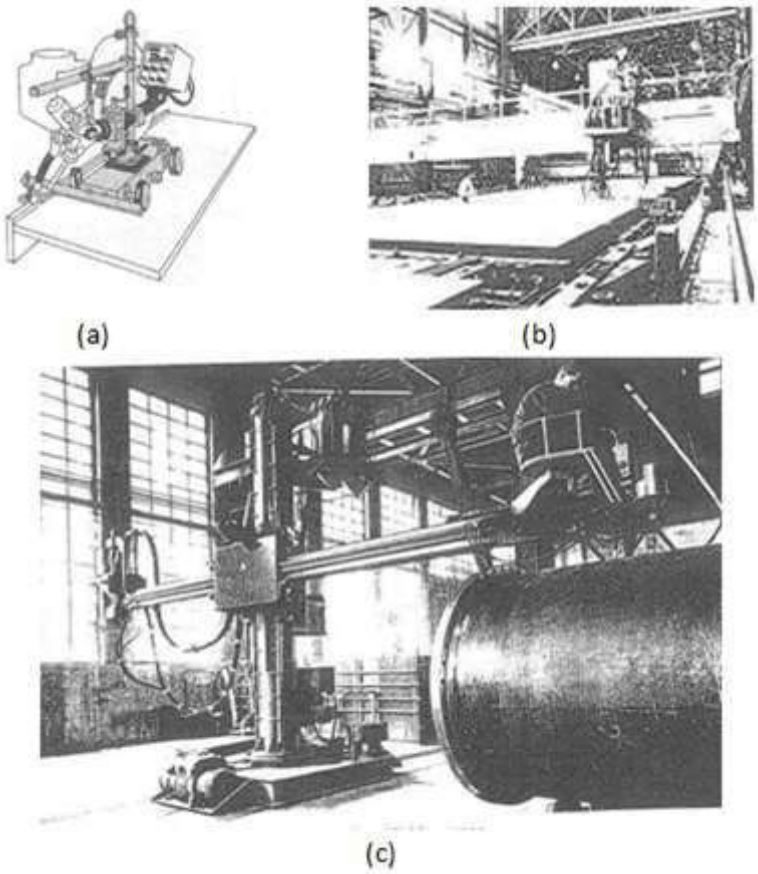
kumparan dengan panjang total bervariasi dari 20 Meter sampai dengan 100 Meter, yang terpasang pada suatu unit Motor pengatur kecepatan. Sehingga kecepatan pengisian Kawata Elektroda tersebut dapat konstan. Kawat Elektroda ini akan melewati Nozzle yang berfungsi sebagai penyearah serta penahan panas. Cerobong Fluksi berfungsi sebagai tempat penampung fluksi yang pengisiannya dilakukan bersamaan dengan pengisian kawat Elektroda. Dalam hal pengelasan dengan menggunakan kawat Elektroda Tunggal (*Single Wire Elektroda*). Batang Kawat Elektroda berjalan dan mengalir melalui Kontak Nozzle yang terletak didalam Cerobong yang terisi dengan Fluksi. Busur api terjadi / timbul diantara Kawat Elektroda dan Material Las (Base Metal), yang kemudian akan mencair serta larut bersama. Bersamaan dengan itu sebagian dari Fluksi akan ikut mencair dan setelah mendingin akan disebut dengan Terak**.** Terak ini akan menutupi serta melindungi cairan logam dan busur api yang terbentuk pada saat proses pengelasan. Sehingga Cairan yang terjadi akan terlindungi dari pengaruh udara luar sampai dengan saat pendinginannya.



Gambar 2.4 Schematic illustration of the submerged arc welding process used for heavy deposition in plane (i.e., down-hand) only. Source: R.W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology, Butterworth-Heine- mann / Elsevier, Burlington, MA, 2004, p 300, 301, 313, 315, 316, 320–324, 327– 330

Jenis-jenis Mesin Las Busur Rendam (*SAW*) berdasarkan posisi pembawanya (*Mounting*) terdapat 3 jenis Mesin pada Gambar 2.5 yaitu:

a. Tracktor SAW Machine .
b. Gantry SAW Machine.
c. Crane SAW Machine



Gambar 2.5 Mesin Las Busur Rendam (SAW) (a) Tractor SAW Machine; (b) Gantry SAW Machine; (c) Crane SAW Machine.

Tractor SAW Machine ini termasuk yang termurah dan berguna untuk pengelasan panjang seperti pada

pengelasan sudut (Fillet) pada Beam-beam Jembatan atau sambungan datar (Butt Joint) untuk panel-panel pada Kapal laut. Kecepatan pengelasan, Voltase serta kecepatan Kawat Elektrodanya dapat diatur sesuai dengan yang dibutuhkan. Maximum Diameter Kawat Elektroda yang digunakan 4 mm, sedangkan Sumber Powernya harus memiliki karakter Voltase konstan. Sedangkan bagian untuk pengelasannya (Welding Head) dapat berputar dan bergerak sepanjang rel baik ke depan, atas, maupun kebawah serta memungkin untuk pengelasan secara melingkar.

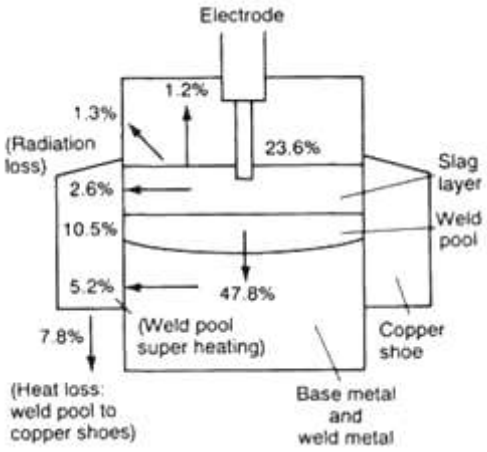
Gantry / Crane SAW Machine termasuk dalam kategori mesin yang sangat mahal, karena mesin ini dilengkapi dengan peralatan yang sangat mempermudah pengerjaan las karena dilengkapi dengan Gantry atau Crane, sehingga memungkinkan untuk digunakan pengelasan didalam Bejana Tekan. Selain itu mesin type ini pada umumnya dilengkapi dengan unit pengatur kecepatan, baik untuk Kecepatan Kawat Elektroda maupun kecepatan pengelasannya sehingga menjamin kestabilan busur api yang terjadi selama proses pengelasan, serta maximum Diameter Kawat Elektroda yang dipergunakan sampai dengan 6 mm .

BAB 3 PENGELASAN KHUSUS

3.1 Las Listrik Terak

Proses pengelasan di mana energi panas untuk melelehkan logam dasar (*base metal*) dan logam pengisi

(filler) berasal dari terak yang berfungsi sebagai tahanan listrik ketika terak tersebut dialiri arus listrik. Pada awal pengelasan, fluks dipanasi oleh busur listrik yang mengenai dasar sambungannya. Kemudian logam las terbentuk pada arah vertikal sebagai hasil dari campuran antara bagian sisi dari logam induk dengan logam pengisi (*filler*) cair. Proses pencampuran ini berlangsung sepanjang alur sambungan las yang dibatasi oleh pelat yang didinginkan dengan air . Pada Gambar 3.1 merupakan diagram keseimbangan distribusi panas.



Gambar 3.1 Heat Balance Diagram Of A Typical Electroslag Weldment. Source: B. Paton, Electroslag Welding, AWS, 1962

Proses ESW (*Electro Slag Welding*) merupakan proses mesin yang digunakan terutama untuk pengelasan dalam posisi vertikal. ESW (Electro Slag Welding) adalah pengelasan busur terhenti, pengelasan sejenis SAW namun bedanya pada jenis ESW busurnya nyala mencairkan fluks, busur terhenti dan proses pencairan fluk berjalan terus dan menjadi bahan pengantar arus listrik (*konduktif*).

Sehingga elektroda terhubungkan dengan benda yang dilas melalui konduktor tersebut. Panas yang dihasilkan dari tahanan terhadap arus listrik melalui cairan fluk / slag cukup tinggi untuk mencairkan bahan tambahan las dan bahan induk yang dilas tempraturnya mencapai 3500° F atau setara dengan 1925° C. Ini biasanya dipakai untuk memperoleh las lintasan tunggal (satu kali jalan) seperti untuk sambungan pada penampang kolom yang besar.

Logam las ditimbun ke dalam alur yang dibentuk oleh tepi plat yang terpisah dan ”sepatu" (alas) yang didinginkan dengan air. Terak cair yang konduktif melindungi las serta mencairkan bahan pengisi dan tepi plat. Karena terak padat tidak konduktif, busur nyala diperlukan untuk mengawali proses dengan mencairkan terak dan memanaskan plat. Busur nyala dapat dihentikan setelah proses berjalan dengan baik. Selanjutnya, pengelasan dilakukan oleh panas yang ditimbulkan melalui tahanan terak terhadap aliran arus listrik

ESW adalah suatu proses las otomatis dengan laju deposit tinggi yang digunakan untuk mengelas logam dengan tebal 2 inci atau lebih secara vertikal. Pemakaiannya yaitu

pada pengelasan pressure vessel, kapal, dan struktur. Ada dua jenis proses las ESW:

- Metode panduan tidak terumpan (konvensional).

- Metode panduan terumpan.

Pada ESW konvensional, alas tembaga berpendingin air yang bisa dipindah-pindah diletakkan pada sisi bagian depan dan belakang sambungan, untuk menahan logam cair tetap berada pada tempatnya sampai membeku. Proses ini dimulai dengan menyalakan busur diantara kawat elektroda dengan *bottom starting tab* pada cekungan yang terbentuk antara pinggiran alat yang mempunyai celah dengan sepatu tembaga. Butiran flux diletakkan pada cekungan. Busur listrik dinyalakan pada permulaan proses, dan berlangsung terus sehingga terbentuk slag konduktif. Segera setelah slag menjadi konduktif, busur padam dan slag tetap cair karena resistansi panas yang berasal dari arus yang lewat diantara elektroda dengan benda kerja.

Fluks ditambahkan secara teratur selama proses pengelasan untuk memastikan keakuratan terak yang menutupi kolam logam cair. Ketahanan panas dari terak melelehkan kawat pengisi dan tepi pelat membentuk genangan logam cair yang ditahan oleh sepatu tembaga. Selama pembekuan, sepatu secara otomatis bergerak ke permukaan pelat. Satu atau lebih kabel dapat digunakan tergantung pada ketebalan pelat. Gambar 100-13 menunjukkan sistem electroslag slot tebal yang

menggunakan tiga batang las dan cocok untuk bejana tekan pengelasan.

Feeded Guide ESW menggunakan tabung pemandu yang diumpankan untuk menempatkan kabel elektroda di sambungan dan sepatu tembaga permanen berpendingin air. Tabung pemandu tidak bergerak, tetapi terbakar selama pengelasan. Ini menyebabkan kawah las muncul di lapisan. Tabung pemandu umpan menambahkan logam pengisi ke logam las dan juga menyediakan fluks untuk terak konduktif dari luar lapisan (misalnya elektroda tertutup dengan lubang besar). Lebih dari satu tabung pemandu berpemandu dapat digunakan untuk mengelas logam tebal.

3.2 Las Listrik Gas

Las MIG (*Metal Inert Gas*) yaitu merupakan proses penyambungan duaMaterial logam atau lebih menjadi satu melalui proses pencairan setempat, dengan Menggunakan elektroda gulungan (*filler metal*) yang sama dengan logam dasarnya (*base metal*) dan menggunakan gas pelindung (*inert gas*). Las MIG (*Metal Inert Gas*) merupakan las busur gas yang Menggunakan kawat las sekaligus sebagai elektroda. Elektroda tersebut Berupa gulungan kawat (rol) yang gerakannya diatur oleh motor listrik. Las Ini menggunakan gas argon dan helium sebagai pelindung busur dan logam Yang mencair dari pengaruh atmosfir.

Penggunaan las MIG (*Metal Inert Gas*) misalnya digunakan dalam pengelasan di dunia Industri untuk pembuatan suatu barang atau alat. Dengan contoh dalam pembuatan kapal terbang, rangka mobil, teralis besi dan sebagainya. Adapun contoh Gambar 3.2 aplikasi pengunaan las MIG (*Metal InertGas*) dapat dilihat :

Gambar 3.2 Aplikasi Las MIG (*Metal Inert Gas*).

Source:
http://arifidya.blogspot.com/2015/11/proses-las-gmaw-gas-metal-arc-welding.html

Penggunaan Las MIG (*Metal Inert Gas*) dalam berbagai pengelasan memiliki beberapa kelebihan antara lain dapat disebutkan berikut ini :

1. Sangat efisien dan proses pengerjaan yang cepat.

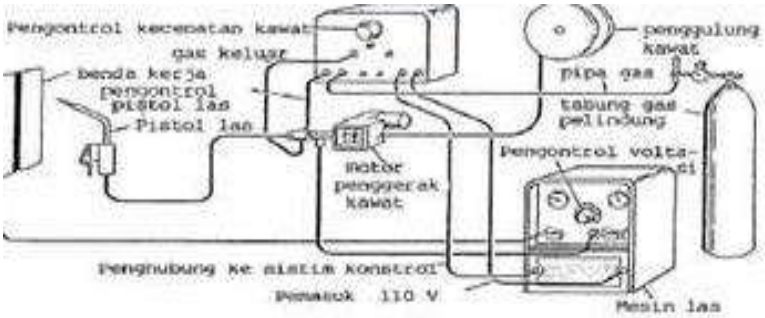
2. Dapat digunakan untuk semua posisi pengelasan welding positif.
3. Tidak menghasilkan slag atau terak, layaknya terjadi pada las SMAW.
4. Memiliki angka deposisi (*deposition rates*) yang lebih tinggi dibandingkan SMAW.
5. Membutuhkan kemampuan operator yang baik
6. Proses pengelasan MIG (*metal inert gas*)sangat cocok untuk pekerjaan konstruksi.
7. Membutuhkan sedikit pembersihan *post-weld.*

Pada proses pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*) memiliki beberapa kelemahan , antara lain :

1. *Wire-feed*er yang memerlukan pengontrolan yang kontinous.
2. Sewaktu waktu dapat terjadi *Burnback.*
3. cacat las *porositi* sering terjadi akibat pengunaan kualitas gas pelindung yang tidak baik.
4. Busur yang tidak stabil, akibat ketrampilan operator yang kurang baik.
5. Pada awalnya set-up pengelasan merupakan permulaan yang sulit.

Sistem pembangkit tenaga pada mesin MIG (*metal inert gas*) pada prinsipnya adalah sama dengan mesin SMAW yang dibagi dalam 2 golongan, yaitu : Mesin las arus bolak balik (*Alternating Current / ACWelding Machine*) dan Mesin las arus searah (*Direct Current/DC WeldingMachine*), namun sesuai dengan tuntutan pekerjaan dan jenis bahan yang di las yang kebanyakan adalah jenis baja, maka secara luas proses

pengelasan dengan MIG (*metal inert gas*) adalah menggunakan mesinlas DC. Adapun Gambar 3.3 rangkaian perlengkapan mesin las adalah sebagai berikut:



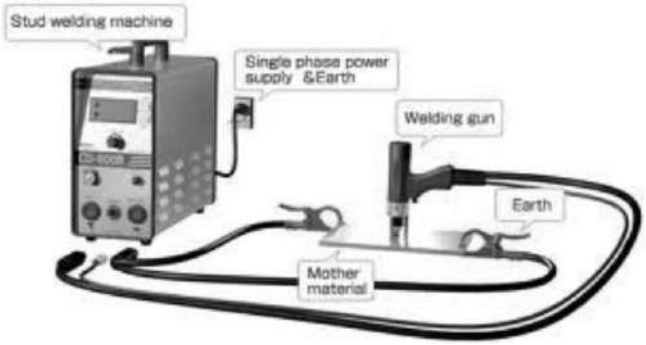
Gambar 3.3 Rangkaian mesin las mig.

Source:https://dokumen.tips/documents/laporan-pengelasan-lanjutpdf.html

Mesin las MIG merupakan mesin las DC, umumnya berkemampuan sampai 250 amper. Dilengkapi dengan sistem kontrol, penggulung kawat gas pelindung, system pendingin dan rangkaian lain. Sumber tenaga untuk Las MIG (*metal inert gas*) merupakan mesin las bertegangan konstan. Tenaga yang dikeluarkan dapat berubah-ubah sendiri sesuai dengan panjang busur.

Panjang busur adalah jarak antara ujung elektroda ke benda kerja. Panjang busur ini bisa distel. Bila busur berubah

menjadi lebih pendek dari setelan semula, maka arus bertambah dan kecepatan kawat berkurang. Sehingga panjang busur kembali semula. Sebaliknya bila busur berubah menjadi lebih panjang, arus berkurang, kecepatan kawat elektroda bertambah. Dengan sistem otomatis seperti ini, yaitu mesin yang mengatur sendiri, maka panjang busur akan konstan dan hasil pengelasan akan tetap baik. Adapun contoh Gambar 3.4 mesin las mig sesuai keterangan diatas adalah sebagai berikut :



Gambar 3.4 Mesin las MIG (*metal inert gas*).

Source: https:// www. niagamas.com/ product / daiden industrial- welding-inverter-machine-mesin-las-mig-250

Umumnya mesin las arus searah (DC) mendapatkan sumber tenaga listrik dari trafo las (AC) yang kemudian

diubah menjadi arus searah dengan voltage yang konstan (*constant-voltage*). Pemasangan kabel-kabel las (pengkutuban) pada mesin las arus searah dapat diatur/dibolak-balik sesuai dengan keperluan pengelasan, ialah dengan cara:

Pengkutuban langsung (*Direct Current Straight Polarity* / DCSP / DCEN):

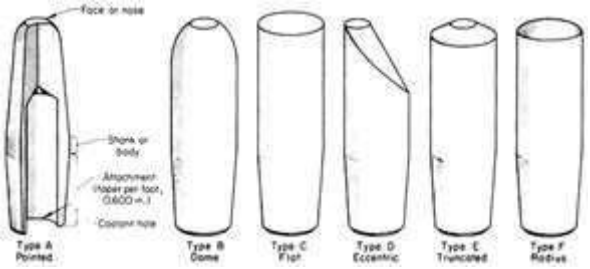
> Dengan pengkutuban langsung berarti kutub positif(+) mesin las dihubungkan dengan benda kerja dan kutub negatif (-) dihubungkan dengan kabel elektroda. Dengan hubungan seperti ini panas pengelasan yang terjadi 1/3 bagian panas memanaskan elektroda sedangkan 2/3 bagian memanaskan benda kerja.

Pengkutuban terbalik (*Direct Current Reverce Polarity* /DCRP/ DCEP):

> Pada pengkutuban terbalik, kutub negatif (-) mesin las dihubungkan dengan benda kerja, dan kutub positif (+) dihubungkan dengan elektroda. Pada hubungan semacam ini panas pengelasan yang terjadi 1/3 bagian panas memanaskan benda kerja dan 2/3 bagian memanaskan elektroda.

3.3 Las Resistansi Listrik

Pengelasan tahanan listrik (*resistance welding, RW*). Dalam proses pengelasan ini, permukaan lembaran yang akan disambung ditekan satu sama lain dan arus yang cukup besar kemudian dialirkan melalui logam untuk memberikan panas ke sambungan. Panas tertinggi terjadi pada daerah dengan hambatan listrik tertinggi yaitu pada permukaan kontak dua lembar. Komponen ini meliputi benda kerja yang akan dilas (*usually sheet metal*), dua elektroda yang saling berhadapan, dan sumber daya AC, model elektroda pada Gambar 3.5. Hasil dari operasi tersebut dalam daerah lebur antara dua bagian benda kerja, dalam pengelasan titik disebut manik las (*weld nugget*).



Gambar 3.5 Standard-Resistance Spot Welding Electrode Face And Nose Configurations. Source: ASM Metals Handbook, Vol 06

Dalam pengelasan ini tidak digunakan gas pelindung, fluks, atau logam pengisi, dan elektrode yang menghubungkan daya listrik merupakan elektrode tak terumpan. Pengelasan risistansi listrik diklasifikasikan sebagai

pengelasan lebur karena panas yang timbul melebur permukaan kontak ke dua lembaran logam tersebut. Namun demikian, terdapat pengecualian, beberapa pengelasan resistansi listrik menggunakan suhu di bawah titik lebur logam yang disambung, jadi tidak terjadi proses peleburan.

Ada beberapa proses pengelasan tahanan listrik yang banyak digunakan di industri, yaitu:

1. Pengelasan tempat hambatan listrik (RSW),

2. Pengelasan jahitan hambatan listrik (RSEW),

3. Pengelasan proyeksi hambatan listrik (RPW),

4. Pengelasan hambatan listrik lainnya.

Pengelasan tempat hambatan listrik; adalah pengelasan hambatan listrik yang paling banyak digunakan, misalnya dalam produksi massal mobil, peralatan rumah tangga, furnitur logam, dan produk lembaran logam lainnya. Dalam proses pengelasan ini, fusi permukaan kontak pada sambungan tumpang tindih lembaran logam dicapai dengan menggunakan elektroda yang berlawanan. Ketebalan lembaran yang akan disambung kira-kira 0,125 inci. (3 mm) atau kurang, biasanya dilakukan pada serangkaian pengelasan titik dengan syarat pengelasan tidak kedap udara. Ukuran dan bentuk las titik ditentukan oleh ujung elektroda, umumnya berbentuk bola; tapi terkadang bentuk lain seperti segi enam, persegi panjang dan bentuk lainnya. Lasan yang dihasilkan umumnya berdiameter 0,2 hingga 0,4 inci. (5

hingga 10 mm) dan HAZ di sekitarnya. Proses pengelasan spot dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Benda kerja ditempatkan di antara elektroda terbuka.
2. Elektroda ditutup dan gaya tekanan diterapkan.
3. Arus listrik diterapkan (disebut waktu pengelasan).
4. Arus listrik dimatikan, tekanan diperbaiki atau dinaikkan (terkadang arus kecil digunakan sebelum akhir tahap ini untuk menghilangkan tegangan sisa dari area pengelasan).
5. Elektroda dibuka dan benda kerja yang dilas dilepas.

Bahan elektroda yang umum digunakan terdiri dari dua kelompok, yaitu:

1. Paduan tembaga dan
2. Komposisi logam tahan api seperti kombinasi tembaga dan tungsten.

Kelompok kedua memiliki sifat ketahanan aus yang tinggi, sehingga banyak digunakan dalam proses pembuatan. Alat selalu aus secara bertahap dengan penggunaan berulang. Dalam prakteknya, elektroda dilengkapi dengan saluran air pendingin. Saat pengelasan titik menjadi lebih umum, berbagai mesin dan metode telah dikembangkan untuk melakukan operasi pengelasan titik, termasuk:

1. Tukang las tempat lengan rocker.
2. Mesin las spot dan senjata las spot portabel.

Tukang las spot cut-sleeve memiliki elektroda bawah stasioner dan elektroda atas dapat digerakkan ke atas dan ke bawah untuk memuat dan menurunkan benda kerja.

Elektroda atas dihubungkan ke lengan pemisah, yang gerakannya dapat dikontrol dengan menekan pedal kaki. Mesin modern dapat diprogram untuk mengontrol gaya dan arus selama siklus kerja. Tukang las spot ini adalah jenis tukang las spot stasioner dimana benda kerja dibawa ke mesin.

Tukang las *pressure spot* untuk benda kerja besar. Elektroda atas memiliki gerakan linier yang disiapkan untuk penekanan vertikal dengan tenaga pneumatik atau hidrolik. Tekanan yang digunakan lebih besar dan biasanya diprogram untuk siklus kerja yang lebih kompleks. Seperti halnya tukang las *break-sleeve spot*, tukang las press spot juga menempatkan mesin dalam posisi diam saat benda kerja dibawa ke mesin.

Portable Spot Welding Gun, mesin las spot dengan pistol las portabel; digunakan untuk mengelas benda kerja besar yang sulit untuk dipindahkan. Rakitan senjata terdiri dari elektroda menghadap dengan mekanisme penjepit. Setiap unitnya ringan sehingga bisa dioperasikan oleh manusia atau robot industri. Pistol dihubungkan ke sumber daya melalui kabel listrik fleksibel (untuk mengalirkan arus listrik) dan selang udara (untuk gerakan penjepitan pneumatik). Jika perlu, air pendingin untuk elektroda juga dapat diolah menggunakan selang air. Pistol las spot portabel banyak digunakan dalam perakitan mobil untuk mengelas badan logam lembaran.

Pengelasan jahitan resistansi menggunakan elektroda roda yang dapat diputar dan serangkaian pengelasan titik yang tumpang tindih dibuat di sepanjang sambungan yang tumpang tindih. Proses pengelasan ini dapat membuat pengelasan kedap udara, sehingga banyak digunakan dalam pembuatan tangki bensin, muffler mobil, dan berbagai macam pembuatan container lembaran logam. Secara teknis, pengelasan jahitan sama dengan pengelasan spot, kecuali di sini elektroda roda biasanya dioperasikan secara kontinyu, yang mengarah ke jahitan las lurus atau garis lengkung yang seragam. Sulit untuk bekerja dengan sudut tajam dengan metode ini.

Jarak antara manik-manik pengelasan selama pengelasan resistansi tergantung pada pergerakan roda elektroda relatif terhadap penerapan arus pengelasan. Proses tersebut biasa digunakan dan disebut pengelasan kontinyu (*continuous welding*). Roda berputar terus menerus dengan kecepatan konstan dan arus listrik diterapkan pada interval waktu tertentu sesuai dengan jarak titik pengelasan yang diinginkan.

Pengelasan proyeksi resistansi listrik hampir sama dengan pengelasan titik resistansi listrik. Lembaran logam yang akan dilas, dipres dahulu dengan mesin pons, sehingga terjadi sembulan (proyeksi) dari dalam logam. Diameter permukaan proyeksi sama dengan tebal lembaran, sedang tinggi proyeksi lebih kurang 60 % dari tebal lembaran tadi. Proyeksi tersebut merupakan titik-titik dimana akan

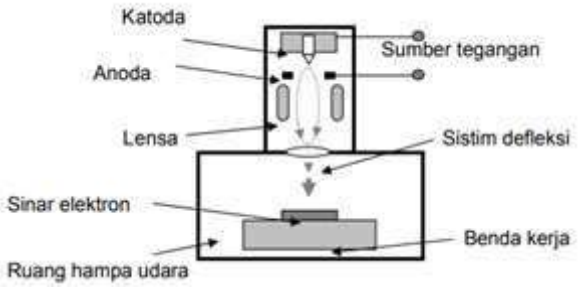
dilakukan sambungan las, sehingga cara ini dapat dihasilkan beberapa sambungan las sekaligus.

Keunggulan pengelasan proyeksi dibandingkan dengan pengelasan titik adalah :

1. Penampilan lebih baik.
2. Umur elektrode lebih panjang karena digunakan permukaan rata.
3. Pemeliharaan elektrode lebih mudah.
4. Pembuatan titik-titik proyeksi diperlukan biaya, tetapi dengan menghemat biaya pengelasan, maka secara keseluruhan biaya menjadi lebih murah.

3.4 Las Sinar Elektron

Las Sinar elektron juga tergolong pengelasan yang menggunakan energi panas. Energi panas didapat dari energi sebuah elektron yang di tumbukkan pada benda kerja. Prinsip kerjanya adalah sebagai berikut, elektron yang dipancarkan oleh katoda ke anoda difokuskan oleh lensa elektrik ke sistim defleksi. Lihat Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Prinsip Kerja Las Sinar Elektron.
Source:http://anaksmk3.blogspot.com/2016/10/macam-macam-pengelasan.html

Sistim defleksi meneruskan sinar elektron yang sudah fokus ke benda kerja. Sinar yang sudah fokus tersebut digunakan untuk melakukan pengelasan benda kerja. Benda kerja harus ditempatkan di dalam ruang hampa udara agar deposit logam tidak teroksidasi udara luar. Mesin las Sinar elektron dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.

Selain sinar laser yang digunakan dalam las laser, sinar elektron juga bisa dipakai untuk memanaskan logam hingga titik leburnya. Bahan yang akan dilas dihujani elektron bermuatan negatif dari batang logam untuk menyambung, yang akan menuju ke muatan positif dari bahan yang akan dikerjakan. Sinar elektron yang terdiri atas sejumlah elektron, setelah bertubrukan dengan logam akan memproduksi panas.

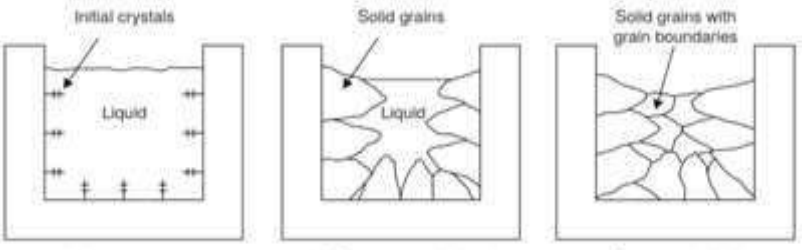
Gambar 3.7 Mesin Las Sinar Elektron.

Las dengan sinar elektron selain digunakan dalam industri nuklir, juga digunakan dalam pembuatan mesin jetpesawat terbang. Namun kelemahannya hanya bisa dipakai di ruangan hampa udara. Molekul udara dapat mencerai beraikan sinar elektron dan energinya langsung memudar.

BAB 4 METALURGI LAS

4.1 Struktur Mikro

Struktur mikro adalah gambaran dari kumpulan fasa-fasa yang dapat diamati melalui teknik metalografi. Struktur mikro suatu logam dapat dilihat dengan menggunakan mikroskrop. Struktur yang dimiliki oleh baja karbon rendah didominasi oleh ferit dan sedikit perlit. Penambahan unsur paduan biasanya dilakukan pada pengelasan baja karbon rendah ini, penambahan unsur ini dapat meningkatkan kekuatan baja tanpa mengurangi keuletannya. Pelat baja karbon rendah dapat dilas dengan semua cara pengelasan dan hasilnya akan baik bila persiapannya sempurna dan persyaratannya dipenuhi. Pada Gambar 4.1 adalah proses pembekuan logam pengelasan dari cair sampai padat.



Gambar 4.1 Parttern of solidification of metal. Source: Md. Ibrahim Khan, Welding Science and Technology

Struktur mikro material terbagi atas :

a. Atom

Merupakan suatu unsur terkecil dari material yang tidak dapat dibagi lagi dengan reaksi kimia biasa.

b. Sel Satuan

Merupakan susunan dari beberapa atom yang teratur dan mempunyai pola yang berulang. Sel satuan terdiri dari kubus (BCC, FCC, dan HCP), hexagonal, tetragonal, triklin, monoklin, pada Gambar 4.2. Adapun sel satuan yang berbentuk kubus antara lain :

1. BCC (*Body Centered Cubic*)

Adanya pemusatan satu atom di tengah-tengah kubus.

Jumlah atom (n) = (1/8) x 8 + 1 = 2

4R = a√3

a = (4/√3) R

2. FCC (*Face Centered Cubic*)

Adanya pemusatan satu atom di setiap sisi kubus.

Jumlah atom (n) = 1/8 x (8) + ½ x (6) = 4

4R = a√2

a = 4/√2 x R

3. HCP (*Hexagonal Closed Package*)

Jumlah atom (n) = (3×1) + (12 x 1/6) + (2 x ½) = 6

Tinggi = 1,633 a

Luas A = 6 x luas segitiga

$= 6 \times (1/2\ a \times a \sin 60)$

$= 3a^2 \sin 60$

Volume sel satuan = a x t

$= 3a^2 \sin 60 \times 1{,}633\ a$

$= 4{,}24\ a^3$; a = 2 R

$= 4{,}24\ (2R)^3$

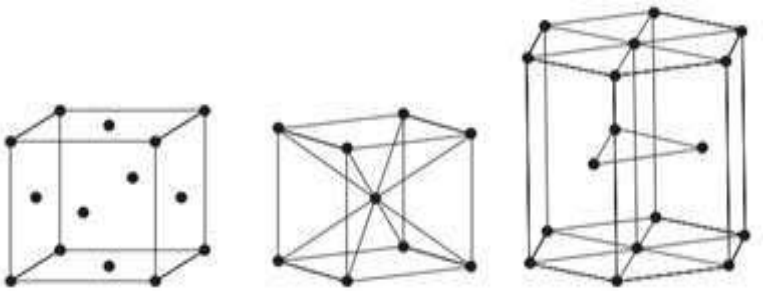
$= 33{,}94\ R^3$

c. Butir

Merupakan kumpulan dari sel satuan yang memiliki arah dan orientasi sama dalam 2 dimensi.

d. Kristal

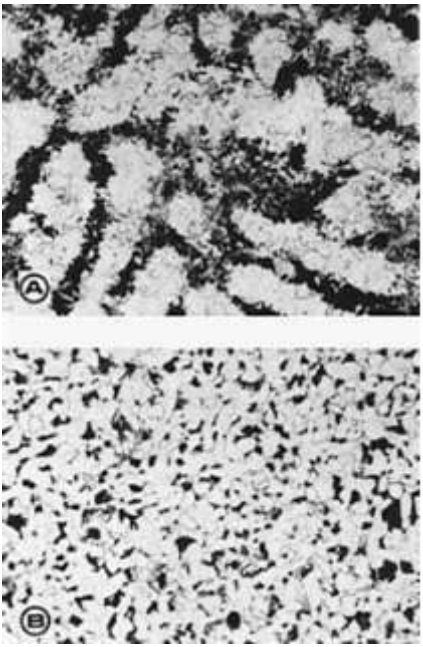
Merupakan kumpulan dari sel satuan yang memiliki arah dan orientasi sama dalam 3 dimensi.



Gambar 4.2 The three most common crystal structure in metals and alloys. Left: face centred cubic (FCC) Centre: Body centred cubic (BCC) and right: hexagonal close packed (HCP). Source: Md. Ibrahim Khan, Welding Science and Technology

Struktur mikro pada Gambar 4.3 merupakan struktur yang dapat diamati dibawah mikroskop optik. Meskipun dapat pula diartikan sebagai hasil dari pengamatan menggunakan scanning electron microscope (SEM). Mikroskop optik dapat memperbesar struktur hingga 1500 kali. Untuk dapat mengamati struktur mikro sebuah material oleh mikroskop optik, maka harus dilakukan tahapan-tahapan sebagai berikut :

1. Melakukan pemolesan secara bertahap hingga lebih halus dari 0,5 mikron. Proses ini biasanya dilakukan dengan menggunakan ampelas secara bertahap dimulai dengan grid yang kecil (100) hingga gird yang besar (2000). Dilanjutkan dengan pemolesan oleh mesin poles dibantu dengan larutan pemoles.
2. Etsa dilakukan setelah memperluas struktur mikro. Etsa adalah membilas atau mencelupkan permukaan material yang akan diamati ke dalam sebuah larutan kimia yang dibuat sesuai kandungan paduan logamnya. Hal ini dilakukan untuk memunculkan fasa-fasa yang ada dalam struktur mikro.



Gambar 4.3 Microstructure of a carbon steel: (a) as-cast condition; (b) after homog- enization. Reprinted from Aidun and Savage (12). Courtesy of American Welding Society.

Metalografi adalah cara untuk melihat struktur mikro dari sebuah paduan. Metalografi juga dilakukan untuk melihat fasa, persen fasa, ukuran butiran, pemeriksaan mikro memberikan informasi karakteristik-karakteristik struktural mikro seperti ukuran butiran, bentuk dan distribusi fasa-fasa kedua dan inklusi-inklusi non metalik. Pengetahuan mengenai semua ini memberikan kemungkinan bagi

seseorang ahli metalurgi untuk dapat memperkirakan dengan pertimbangan ketepatan sifat-sifat atau perilaku dari logam ketika digunakan untuk tujuan tujuan tertentu. Struktur mikro dalam batasan tertentu, mampu memberikan sejarah yang hampir lengkap dari logam tertentu yang telah mengalami perlakuan mekanik maupun perlakuan panas. Di industri-industri bahan dan metalurgi, analsisi struktur mikro digunakan secara luas untuk spesifikasi bahan, kendali mutu bahan, evaluasi proses dan analisis kerusakan logam.

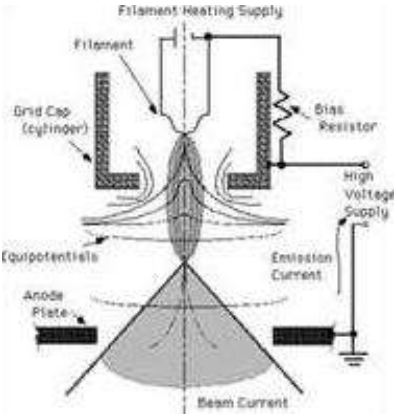
Pengujian yang dilakukan untukmelihat struktur mikro adalah menggunakan alat uji SEM. *Scanning Electron Microscope (SEM)* adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk menyelidiki permukaan dari objek solid secara langsung. SEM memiliki perbesaran 10 – 3000000x, *depth of field* 4 – 0.4 mm dan resolusi sebesar 1 – 10 nm. Kombinasi dari perbesaran yang tinggi, *depth of field* yang besar, resolusi yang baik, kemampuan untuk mengetahui komposisi dan informasi kristalografi membuat SEM banyak digunakan untuk keperluan penelitian dan industri. Adapun fungsi utama dari SEM antara lain dapat digunakan untuk mengetahui informasi-informasi mengenai:

1. Topografi, yaitu ciri-ciri permukaan dan teksturnya (kekerasan, sifat memantulkan cahaya, dan sebagainya).
2. Morfologi, yaitu bentuk dan ukuran dari partikel penyusun objek (kekuatan, cacat pada *Integrated Circuit (IC)* dan *chip*, dan sebagainya).

3. Komposisi, yaitu data kuantitatif unsur dan senyawa yang terkandung di dalam objek (titik lebur, kereaktifan, kekerasan, dan sebagainya).
4. Informasi kristalografi, yaitu informasi mengenai bagaimana susunan dari butir-butir di dalam objek yang diamati (konduktifitas, sifat elektrik, kekuatan, dan sebagainya).

Prinsip kerja SEM pada Gambar 4.4 yaitu bermula dari *electronbeam* yang dihasilkan oleh sebuah filamen pada *electrongun*. Pada umumnya *electron gun* yang digunakan adalah *tungsten hairpin gun* dengan filamen berupa lilitan *tungsten* yang berfungsi sebagai katoda. Tegangan diberikan kepada lilitan yang mengakibatkan terjadinya pemanasan. Anoda kemudian akan membentuk gaya yang dapat menarik elektron melaju menuju ke anoda.

Kemudian *electron beam* difokuskan ke suatu titik pada permukaan sampel dengan menggunakan dua buah *condenser lens*. *Condenser lens* kedua (atau biasa disebut dengan lensa objektif) memfokuskan *beam* dengan diameter yang sangat kecil, yaitu sekitar 10-20 nm. Hamburan elektron, baik *Secondary Electron (SE)* atau *Back Scattered Electron (BSE)* dari permukaan sampel akan dideteksi oleh detektor dan dimunculkan dalam bentuk gambar pada layar CRT.



Gambar 4.4 Prinsip Kerja SEM.

Source:https://yudiprasetyo53.wordpress.com/2011/11/07/scanning-electron-microscope-sem-dan-optical-emission-spectroscope-oes

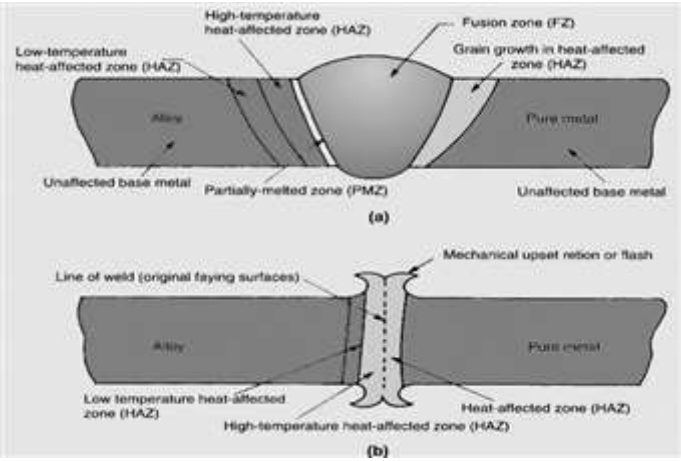
SEM memiliki beberapa detektor yang berfungsi untuk menangkap hamburan elektron dan memberikan informasi yang berbeda-beda. Detektor-detektor tersebut antara lain:

1. Detektor EDX, yang berfungsi untuk menangkap informasi mengenai komposisi sampel pada skala mikro.
2. *Backscatter detector*, yang berfungsi untuk menangkap informasi mengenai nomor atom dan topografi.
3. *Secondary detector*, yang berfungsi untuk menangkap informasi mengenai topografi.

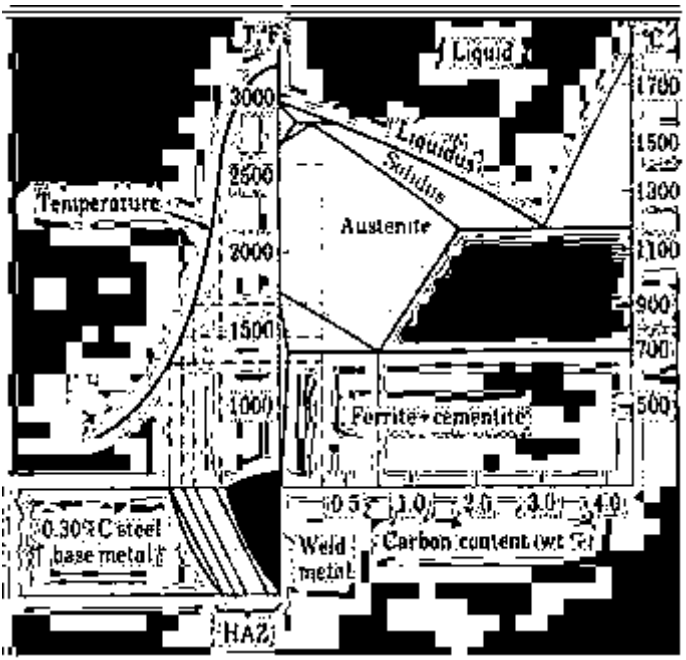
4. Pada SEM, terdapat sistem vakum pada *electron-optical column* dan *sample chamber* yang bertujuan antara lain:
5. Menghilangkan efek pergerakan elektron yang tidak beraturan karena adanya molekul gas pada lingkungan tersebut, yang dapat mengakibatkan penurunan intensitas dan stabilitas.
6. Meminimalisasi gas yang dapat bereaksi dengan sampel atau mengendap pada sampel, baik gas yang berasal dari sampel atau pun mikroskop. Karena apabila hal tersebut terjadi, maka akan menurunkan kontras dan membuat gelap detail pada gambar.
7. Semua sumber elektron membutuhkan lingkungan yang vakum untuk beroperasi.

4.2 Siklus Thermal Las

Proses pengelasan menyebabkan siklus thermal yang tidak seragam pada lasan yang merupakan pemicu masalah-masalah pada sambungan las seperti kegagalan fatik prematur, korosi-retak-tegangan (SCC), retak hidrogen (HICC) dan patahan. Evaluasi distribusi temperatur transient pada lasan merupakan aspek penting dalam kontrol kwalitas lasan dan merupakan alat bantu dalam penentuan prosedur standar pengelasan (WPS).



Gambar 4.5 Skematik pembagian daerah pengelasan



Gambar 4.6 Skematik siklus thermal pengelasan

Daerah lasan terdiri dari 3 bagian yaitu logam lasan, daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone*) seperti pada Gambar 4.5. Selama proses pengelasan berlangsung, logam las dan daerah pengaruh panas akan mengalami serangkaian siklus thermal yang berupa pemanasan sampai mencapai suhu maksimum dan diikuti dengan pendinginan seperti pada Gambar 4.6. Pada pengelasan baja, kandungan C pada logam las biasanya dibuat rendah yaitu 0,1 % massa, dengan tujuan untuk mempertahankan sifat mampu las atau *weldability* (Easterling, 1992). Sebagai akibatnya, jika kondisi kesetimbangan *(equilibrium*) tercapai maka logam las akan

mengalami serangkaian transformasi fasa selama proses pendinginan, yaitu dari logam las cair berubah menjadi ferit-δ kemudian γ (*austenit*) dan akhirnya menjadi α*(ferrit*). Pada umumnya laju pendinginan pada proses pengelasan cukup tinggi sehingga kondisi kesetimbangan tidak terjadi dan akibatnya struktur mikro yang terbentuk tidak selalu mengikuti diagram fasa.

Gambar 4.7 Alat pengukur siklus thermal.

Siklus termal pada posisi tertentu diukur dengan sensor termokopel dengan menggunakan data logger USB 6211 pada Gambar 4.7. Gap dipersiapkan mengikuti standar AS 2885.2 beserta rencana layer dari kampuh las. Suhu maksimum pada siklus thermal diatas perlu diketahui karena dapat dipakai untuk memprediksi perubahan metalurgi seperti peleburan logam, pembentukan austenit,

pembentukan kristal baru *(rekristalisasi*), dll. Suhu maksimum ini dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{1}{T_P - T_0} = \frac{(2\pi e)^{0,5}\,\rho chy}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0} \qquad (4.1)$$

Keterangan :

T_P : suhu maksimum (^oK)
T_o : suhu awal las (^oK)
e : bilangan natural
ρ : massa jenis (g/mm^3)
c : panas jenis logam induk (J/g^oK)
y : sama dengan nol pada batas las
h : tebal logam induk (mm)
T_m : suhu cair logam induk (^oK)
H_{net} : *heat input* (J/mm)

Faktor lain yang mempengaruhi siklus termal adalah waktu pendinginan (*cooling time*). Suhu yang dipakai sebagai acuan dalam menentukan waktu pendinginan adalah antara 800 ºC-500 ºC.Besarnya waktu pendinginan dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\Delta t_{8/5} = \frac{q/v}{2\pi k}\left[\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0}\right] \qquad (4.2)$$

Proses pengelasan dimodelkan dengan campuran model sumber panas uniform dan model panas volumetrik oleh Goldak. Panas uniform mewakili panas yang diberikan oleh logam pengisi dan model Goldak untuk merepresentatikan input panas oleh busur laske logam induk. Logam pengisi pada pengelasan busur bisa mencapai suhu Jurnal Rekayasa Mesin Vol.5, No.3 Tahun 2014: 253-261 ISSN 0216-468X 255 2400°C, sehinggalaju panas yang diperlukan untuk memanaskan logam pengisi dari suhu ruang hingga 2400°C dapat dihitung dengan persamaan .

$$\dot{q}_{filler} = A_{wb} V C_p \Delta T \quad (4.3)$$

Perlu diingat bahwa cp harganya berubah mengikuti temperatur, dan harga Awbv untuk layer tertentu berharga konstan sehingga harga dihitung berdasar integral ∫ . Panas yang diterima oleh logam induk dari welding torch dapat dihitung berdasar persamaan.

$$\dot{q}_{torch} = EI - \dot{q}_{filler} \quad (4.4)$$

Nilai daya listrik EI dapat diperoleh dari data pengukuran AMV 4000.Tidak seperti panas oleh logam pengisi, panas yang diinputkan oleh busur las terdistribusi menurut persamaan Goldak seperti terlihat pada.

$$\dot{q}'''_{(t,n,l)} = \frac{6\sqrt{3\dot{q}_{torch}}}{\pi\sqrt{\pi r_t}.r_n.r_l} \exp(-\frac{3t^2}{r_t{}^2} - \frac{3n^2}{r_n{}^2} - \frac{3l^2}{r_l{}^2}) \qquad (4.5)$$

Besarnya panas yang diinputkan pada elemen tertentu dengan posisi relatif terhadap sumber panas (t,n,l) yakni jarak transversal,normal dan longitudinal tergantung terhadap posisi relativnya dan karakteristik dari busur las (rt , rn, rl). Nilai rt , rn dan rl secara berturutan adalah 5mm, 2mm dan 3mm[12]. Persamaan 4 pada pusat dari sumber panas (0,0,0) berharga maksimum seperti pada persamaan.

$$\dot{q}'''_{(max)} = \frac{6\sqrt{3\dot{q}_{torch}}}{\pi\sqrt{\pi r_t}.r_n.r_l} \qquad (4.6)$$

dan persamaan 4 dapat ditulis ulang dalam bentuk persamaan.

$$\dot{q}'''_{(t,n,l)} = \dot{q}'''_{(max)} \exp\left(-\frac{3t^2}{r_t^2} - \frac{3n^2}{r_n^2} - \frac{3l^2}{r_l^2}\right) \quad (4.7)$$

4.3 Input Panas

Panas yang dihasilkan selama proses pengelasan memiliki pengaruh yang kuat terhadap distribusi suhu, tegangan sisa, dan deformasi. Selain itu, panas juga mempengaruhi transisi fasa, yang selanjutnya mempengaruhi struktur mikro serta sifat fisik dan mekanik lapisan las.

Sumber energi / pengelasan panas membutuhkan dua hal yang sangat penting, yaitu:

Sebuah.

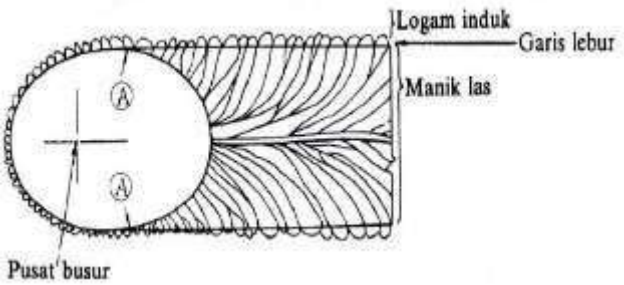
a. Energi panas (*heat*).
b. Energi mekanik berupa tekanan.

Sumber energi panas diperoleh dari energi kimia (misalnya pembakaran gas dengan oksigen) dan energi listrik (misalnya busur dan sinar intensitas tinggi). Besarnya energi (Q) yang terkandung dalam suatu sumber panas disebut tingkat energi atau kapasitas energi.

4.4 Daerah Lasan

Daerah logam las Daerah logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Komposisi logam las terdiri dari komponen logam induk dan bahan tambah dari elektroda. Karena logam las dalam proses pengelasan ini mencair kemudian membeku, maka kemungkinan besar terjadi pemisahan komponen yang menyebabkan terjadinya struktur yang tidak homogen, ketidakhomogennya struktur akan menimbulkan struktur ferit kasar dan bainit atas yang

menurunkan ketangguhan logam las. Pada daerah ini struktur mikro yang terjadi adalah struktur cor. Struktur mikro di logam las dicirikan dengan adanya struktur berbutir panjang (columnar grains). Struktur ini berawal dari logam induk dan tumbuh ke arah tengah daerah logam las (Sonawan, 2004).



Gambar 4.8 Arah Pembekuan Dari Logam Las.

Source: WIRYOSUMARTO, H.Dan OKUMURA, T., Teknologi Pengelasan Logam, PT. Pradya Paramita, Jakarta, 2000.

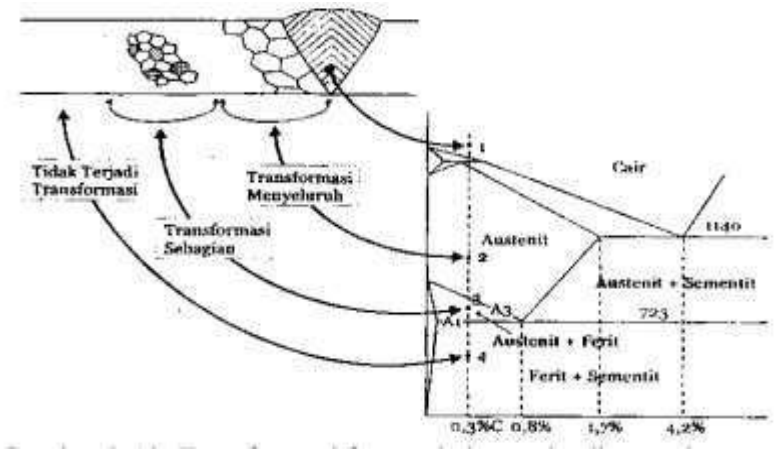
Gambar 4.8 menunjukkan secara skematis proses pertumbuhan kristal logam las kolom. Titik A pada gambar tersebut merupakan titik awal struktur pilar yaitu dari logam tidak mulia. Titik ini tumbuh menjadi garis leleh searah dengan sumber panas. Pada garis leleh ini, sebagian logam dasar meleleh selama proses pembekuan logam las, yang tumbuh pada butiran logam dasar dengan sumbu kristal yang sama. Penambahan elemen alloying pada deposit las menyebabkan mikrostruktur cenderung bainit dengan batas

butir ferit yang kecil. Kedua jenis mikrostruktur tersebut juga dapat terbentuk bila ukuran butir austenitnya besar. Waktu pendinginan yang lama meningkatkan ukuran batas butir ferit. Selain itu, waktu pendinginan yang lama menyebabkan terbentuknya ferit Widmanstatten. Struktur mikro logam las biasanya kombinasi dari struktur mikro dibawah ini:

1. Batas butir ferit, terbentuk pertama kali pada transformasi austenit-ferit biasanya terbentuk sepanjang batas austenit pada suhu 1000-6500 C.
2. Ferit Widmanstatten atau ferrite with aligned second phase, struktur mikro ini terbentuk pada suhu 750-6500 C di sepanjang batas butir austenit, ukurannya besar dan pertumbuhannya cepat sehingga memenuhi permukaan butirnya.
3. Ferit acicular, berbentuk intragranular dengan ukuran yang kecil dan mempunyai orientasi arah yang acak. Biasanya ferit acicular ini terbentuk sekitar suhu 6500 C dan mempunyai ketangguhan paling tinggi dibandingkan struktur mikro yang lain.
4. Bainit, merupakan ferit yang tumbuh dari batas butir austenit dan terbentuk pada suhu 400-5000 C. Bainit mempunyai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan ferit, tetapi lebih rendah dibanding martensit.
5. Martensit akan terbentuk, jika proses pengelasan dengan pendinginan sangat cepat, struktur ini

mempunyai sifat sangat keras dan getas sehingga ketangguhannya rendah.

Heat Affected Zone (HAZ) adalah logam dasar yang berdekatan dengan logam las yang melewati siklus termal pemanasan dan pendinginan yang cepat selama proses pengelasan, menjadikan area ini paling kritis dari sambungan las. Di daerah yang dekat dengan garis las, struktur logam menjadi lebih kasar secara visual. Ada tiga titik berbeda di area HAZ. Poin 1 dan 2 menunjukkan bahwa suhu pemanasan mencapai fase austenit. Ini dikenal sebagai konversi komprehensif. Ini berarti bahwa struktur mikro baja pertama adalah ferit + perlit kemudian 100% austenit. Poin 3 menunjukkan suhu pemanasan, permukaan mencapai fasa ferit dan austenit dan ini disebut transformasi parsial. Ini berarti bahwa dengan ferit + perlit, struktur mikro baja awalnya berubah menjadi ferit dan austenit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 di bawah ini.



Gambar 4.9 Transformasi fasa pada logam hasil pengelasan.

Source: WIRYOSUMARTO, H.Dan OKUMURA, T., Teknologi Pengelasan Logam, PT. Pradya Paramita, Jakarta, 2000.

4.5 Weldability

Kemampulasan (weldability) adalah pengukuran seberapa mudah kita melakukan suatu pengelasan pada material tertentu tanpa menimbulkan retak (crack) dan memperoleh sifat mekanis yang diinginkan. Jika suatu material mudah dilas tanpa ada retak, maka material tersebut dikatan weldable. Faktor-faktor yang mempengaruhi kemampulasan antara lain:

a. Welding Metallurgy (Metalurgi las)
   Welding Metallurgy, adalah perubahan yang terjadi dalam suatu logam yang mengalami berbagai macam

efek mekanis dan panas dalam suatu proses pengelasan. Welding Metallurgy tergantung dari susunan atom dan bagaimana suatu susunan atom tersebut dipengaruhi oleh gaya dan panas. Jenis susunan atom logam menyebabkan perbedaan sifat mekaniknya. Dengan demikian kita dapat melihat hubungan perlakuan metalurgi terhadap logam yaitu pemanasan awal, pemanasan akhir, pelepasan tegangan dll dengan kemampuan mekanis yang diakibatkannya.

b. Welding Chemistry (Kimia Pengelasan)
Welding Chemistry merupakan hubungan secara kimiawi diantara logam induk, logam pengisi, dan bahan kimia lain yang ada pada proses pengelasan. Kemampuan logam induk dan logam pengisi untuk berfusi tanpa menyebabkan suatu efek kimia yang buruk merupakan hal yang penting dalam hubungannya dengan weld ability.
c. Kondisi Permukaan Sambungan
Joint Surface Condition (kondisi permukanan sambungan) dan Joint Geometry (bentuk sambungan) merupakan faktor akhir yang mempengaruhi kemapuan untuk dilas (weld ability).
d. Geometri (bentuk) Sambungan
Kondisi permukaan sambungan termasuk efek dari kekasaran dan kebersihan permukaan sambungan. Bentuk/geometri dari sambungan juga mempengaruhi kemampuandilas. Jumlah tegangan juga mempengaruhi kemampuan dilas.

Meskipun persoalan weld ability dapat diatasi oleh para insinyur tetapi welding Inspector harus tetap mengingat bahwa problem weld ability masih tetap ada. Cacat las yang berulang atau bukan karena kesalahan welder harus dicatat dan dilakukan perbaikan. Dengan mengetetahui metalurgi pengelasan dan kimiawi pengelasan Welding Inspector lebih mampu mengantisipasi problem weldability dengan mengetahui tanda-tanda awal.

4.6 Heat Flow

Aliran panas atau perpindahan panas merupakan suatu proses dalam pengelasan dimana proses ini sangat menentukan kualitas dari pengelasan, karena aliran panas mempengaruhi mikrostruktur, reaksi oksidasi / reduksi, tegangan sisa dan deformasi. Perpindahan panas dalam lapisan las terjadi melalui konduksi dan pada tingkat yang lebih rendah melalui konveksi dan radiasi. Konveksi dan radiasi dapat diabaikan.

Area tempat terjadinya pemanasan bergantung pada beberapa faktor, antara lain:

1. Peningkatan kecepatan *v* pada panas masukan *q* constant menyebabkan daerah yang tepengaruh panas menjadi mengecil dimana garis-garis isothermis menyempit pada arah tegak lurus arah las dan memendek pada arah pengelasan.
2. Kenaikan panas masukan *q* pada kecepatan *v* constant memperluas daerah terpengaruh panas dimana garis-

garis isothermis melebar pada arah tegak lurus las dan memanjang pada arah las.

3. Kenaikan masukan panas *q* dan kecepatan *v* pada harga masukan panas (*q/v*) constant memperluas daerah terpengaruh panas sebanding dengan panas masukan dan kecepatan.
4. Kenaikan suhu preheat T_0 pada masukan panas dan kecepatan constant memperluas daerah terpengaruh panas.
5. Konduktivitas themal (*k)* sangat mempengaruhi daerah terpengaruh panas. Jika nilai *k* kecil panas masukan (*q)* yang diperlukan saat pengelasan kecil. Sebagai akibatnya baja tahan karat austenit Cr-Ni (austhenitic stainless steel) dapat dilas dengan masukan panas yang kecil sedangkan alumunium (Al) dan tembaga (Cu) membutuhkan masukan panas yang besar.

Pada proses pengelasan, kecepatan busur listrik (sumberpanas) lebih besar dari kecepatan perpindahan panas. Kecepatan aliran panas searah dengan gerakan busur listrik. Dengan demikian daerah di sekitar las mengalami siklus thermal berupa pemanasan sampai suhu maksimum tercapai kemudian diikuti dengan pendinginan.

Besar suhu maksimum:

$$\frac{1}{T_P - T_0} = \frac{(2\pi e)^{0,5}\,\rho c h y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0} \qquad (4.8)$$

dimana:

T_p = Suhumaksimum (K)

T_o = Suhuawal las (K)

e = bilangan natural

ρ = massajenis (g/mm^{2+})

c = Panasjenislogaminduk (J/gK)

h = Teballogaminduk (mm)

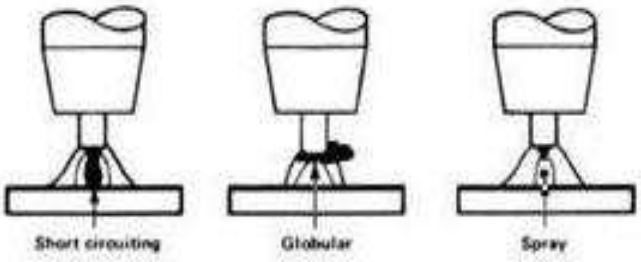
y = batas las (Tp=To)

T_m = Suhucairlogaminduk (k)

H_{net} = Masukanpanas

4.7 Metal Transfer

Proses perpindahan metal pada dasarnya mencakup tiga teknik proses khusus: transfer logam korsleting, transfer globular, dan busur semprot pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Types of Metal Transfer.

Source:https://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig1_3.htm

Teknik-teknik ini menggambarkan cara di mana logam ditransfer dari kawat ke kolam las. Dalam hubungan arus pendek transfer logam, juga dikenal sebagai "Short Arc", "Dip Transfer", dan "Microwire", transfer logam terjadi ketika sirkuit pendek listrik didirikan. Ini terjadi karena logam cair di ujung kawat menyentuh kolam lasan cair. Dalam pengelasan busur semprot, tetesan logam cair kecil dilepas dari ujung kawat dan diproyeksikan oleh gaya elektromagnetik ke arah kolam las. Transfer globular terjadi ketika tetesan logam cukup besar dan bergerak ke arah kolam pengelasan di bawah pengaruh gravitasi. Faktor-faktor yang menentukan cara transfer logam adalah arus pengelasan, ukuran kawat,

panjang busur (tegangan), karakteristik pasokan daya, dan gas pelindung.

4.8 Reaksi Pada Logam Cair

Pada proses LSW, bagian logam yang akan dilas harus dipanaskan hingga meleleh. Memanaskan logam ke suhu yang sangat tinggi dapat menyebabkan reaksi kimia antara logam dan oksigen serta nitrogen di udara. Jika logam cair (weld pool) tidak terlindung dari pengaruh udara selama proses pengelasan, logam tersebut akan bereaksi dengan oksigen dan nitrogen membentuk oksida dan nitrida, yang dapat menyebabkan logam menjadi rapuh karena adanya kotoran (terak inklusi) dan menjadi keropos, sedangkan kandungan karbon elementer dalam logam membentuk gas CO, yang dapat menyebabkan void pada logam las (rongga).

Reaksi kimia lain juga dapat terjadi pada logam las (kolam las). Gas hidrogen dan uap air juga dapat menyebabkan cacat pengelasan. Hidrogen, yang bereaksi dengan oksida dalam logam tidak mulia, dapat menghasilkan uap, yang menyebabkan porositas pada logam las.

Dengan teknologi pengelasan SMAW, logam las dilindungi dalam dua langkah. Ketika logam las dalam keadaan cair, itu dilindungi oleh berbagai gas yang dihasilkan saat elektroda las dibakar, dan ketika dibekukan, cairan ini dilindungi oleh lapisan terak yang terbentuk dari fluks pembekuan.

Perlindungan endapan deposit las saat pengelasan metal inert gas (MIG) dan tungsten inert gas (TIG) didasarkan pada sifat inert gas, yang tidak dapat mengikat elemen lain di udara, sehingga tidak terjadi reaksi kimia. Ketika gas pelindung CO2 digunakan dalam pengelasan MIG, proses deoksidasi CO2 terjadi saat terbakar dengan busur. Gas ini terurai menjadi karbon monoksida (CO) dan oksigen (O2). Oksigen yang dilepaskan tidak bersentuhan dengan logam las, sedangkan deoxidizer bereaksi dengan oksigen untuk membentuk lapisan terak yang sangat tipis pada permukaan deposit logam las.

Dengan pengelasan OAW, deposit logam las dapat dilindungi dari oksidasi dan efek reaksi kimia lainnya dengan menggunakan fluks. Fluks adalah kombinasi berbagai elemen yang meminimalkan oksidasi. Komposisi kimiawi dari fluks bervariasi tergantung pada jenis logam yang akan dilas.

4.9 Proses Difusi

Difusi memainkan peran penting dalam banyak proses metalurgi. Hampir semua perubahan fasa dalam sistem paduan melibatkan redistribusi atom konstituen, dan sebagainya bergantung pada fenomena difusi. Misalnya, usia pengerasan, pembentukan senyawa, penghapusan coring dalam paduan dilemparkan oleh anneling, pengerasan permukaan, ikatan logam, pertumbuhan film oksida, teknik metalurgi bubuk, pemulihan dan rekristalisasi semua

fenomena dimana pengetahuan darigerakan elemen terlarut diperlukan sebelum proses dapat sepenuhnya dijelaskan.

Difusi adalah efek statistik yang tergantung sepenuhnya pada gerakan relatif dan konsentrasi atom yang merupakan sistem. Dari pertimbangan sederhana paduan mengandung gradien konsentrasi, yang selama difusi akan cenderung kearah distribusi seragam, hukum dasar yang mengatur proses difusi mungkin diturunkan. Atom atau molekul dalam sistem fisik atau kimia terus berusaha untuk mengambil posisi di mana energi dari sistem ini adalah minimum.

Difusi dapat digambarkan dalam hal perubahan energi dari pada konsentrasi, karena telah menunjukkan bahwa sementit dalam kontak intim dengan pameran austenit tanpa kecenderungan untuk kehilangan karbon untuk austenit. Bahkan, austenit jenuh sehubungan dengan sementit cenderung kehilangan karbon untuk menghasilkan karbon tahap lebih tinggi, yaitu karbon berdifusi dari daerah (austenit) dimana dalam konsentrasi, karena potensial kimia yang lebih tinggi (energi) dari karbon dalam austenit. Perubahan energi bebas adalah kekuatan pendorong di belakang transformasi kimiadanfisik dan itu harus diharapkan bahwa perubahan energi bebas terlibat dalam laju reaksi. Mempertimbangkan kasus yang akan berhubungan dengan konduktivitas termal atau listrik, oleh karena itu, tingkat difusi dapat dirumuskan oleh:

$$J = F / R \qquad (4.9)$$

Dimana:

J = laju difusi (atau laju aliran massa) - analog dengan lancar.

F = gaya penggerak (perbedaan dalam energi antara keadaan awal dan akhir) - analog dengan ggl.

R = untuk gerakan perlawanan - analog dengan tahanan.

Dari persamaan di atas dapat dilihat, bahwa ingkat difusi tergantung tidak hanya pada kekuatan pendorong tetapi juga pada perlawanan terhadap pergerakan atom melalui kisi. Resistensi diturunkan dengan menaikkan suhu dari sistem yang menyebar, karena amplitudo yang lebih tinggi dari getaran atom pelarut memberikan jalan yang lebih jelas ke atom terlarut bermigrasi.

4.10 Terbentuknya Struktur Dendrit Pada Logam Las

Dendrit dalam metalurgi adalah struktur Kristal mirip pohon yang tumbuh sebagai logam cair membeku, bentuk yang dihasilkan oleh pertumbuhan yang lebih cepat di sepanjang arah kristalografi yang menguntungkan secara energetik. Pertumbuhan dendrite kini memiliki konsekuensi besar dalam hal sifat material.

Dendrit terbentuk dalam sistem unary (satu komponen) serta sistem multi-komponen. Syaratnya adalah cairan (bahan cair) didinginkan, alias didinginkan , di bawah

titik beku padatan. Awalnya, inti padat bulat tumbuh di lelehan yang tidak didinginkan. Ketika bola tumbuh, morfologi bola menjadi tidak stabil dan bentuknya menjadi terganggu. Bentuk padat mulai mengarah kekristal. Arah pertumbuhan ini mungkin disebabkan oleh anisotropi pada energy permukaan antar muka padat-cair, atau kemudahan pelekatan atom ke antar muka pada bidang kristalografi yang berbeda, atau keduanya. Dalam system logam, kinetika attachment antar muka biasanya dapat diabaikan (untuk kasus yang tidak dapat diabaikan, lihat dendrit (kristal)). Dalam system logam, padatan kemudian mencoba untuk meminimalkan area permukaan dengan energi permukaan tertinggi. Dengan demikian dendrite menunjukkan ujung yang lebih tajam dan lebih tajam saat tumbuh. Jika anisotropi cukup besar, dendrite dapat menyajikan morfologi faceted. Skala panjang struktur mikro ditentukan oleh interaksi atau keseimbangan antara energy permukaan dan gradient suhu (yang mendorong difusi panas / zat terlarut) dalam cairan pada antar muka.

Ketika pembekuan berlangsung, semakin banyak atom yang kehilangan energy kinetiknya, menjadikan prosesnya eksoterm. Untuk bahan murni, panas laten dilepaskan pada antar muka padat-cair sehingga suhunya tetap konstan sampai leleh benar-benar membeku. Laju pertumbuhan zat kristalin yang dihasilkan akan tergantung pada seberapa cepat panas laten ini dapat dihilangkan. Dendrit yang tumbuhd alam lelehan yang kurang didinginkan dapat diperkirakan sebagai Kristal mirip jarum parabola yang tumbuh dalam bentuk pengawet dengan kecepatan konstan. Nukleasi dan pertumbuhan menentukan ukuran butir dalam

solidifikasi ekuivalen sementara persaingan antara dendrit yang berdekatan menentukan jarak utama dalam pertumbuhan kolom. Secara umum, jika lelehan didinginkan secara perlahan, nukleasi Kristal baru akan kurang dari pada pendinginan besar. Pertumbuhan dendritik akan menghasilkan dendrite berukuran besar. Sebaliknya, siklus pendinginan yang cepat dengan pendinginan bawah yang besar akan meningkatkan jumlah inti dan dengan demikian mengurangi ukuran dendrit yang dihasilkan (dan seringkali menyebabkan butiran kecil).

Dendrit yang lebih kecil umumnya menyebabkan keuletan produk yang lebih tinggi. Salah satu aplikasi dimana pertumbuhan dendritik dan sifat material yang dihasilkan dapat dilihat adalah proses pengelasan . Dendrit juga umum dalam produkcor , di mana mereka dapat terlihat oleh etsa spesimen yang dipoles. Saat dendrite berkembang lebih jauh kedalam logam cair, mereka menjadi lebih panas karena mereka terus mengekstraksi panas. Jika terlalu panas, mereka akan kembali. Peleburan kembali dendrite ini disebut rekalesensi.

Dendrit juga terbentuk selama pembekuan banyak zatbukan logam seperties . Dendrit biasanya terbentuk di bawah kondisi non-keseimbangan. Bahan logam dendritik yang umum adalah nikelkarbonil , di mana partikel memiliki morfologi "runcing" klasik.

BAB 5 PERENCANAAN KONTRUKSI LAS

5.1 Klasifikasi Sambungan Las

Secara umum sambungan las ada dua macam, yaitu sambungan sudut (fillet) dan sambungan tumpul (butt). Adapun macam-macam bentuknya adalah sebagai berikut :

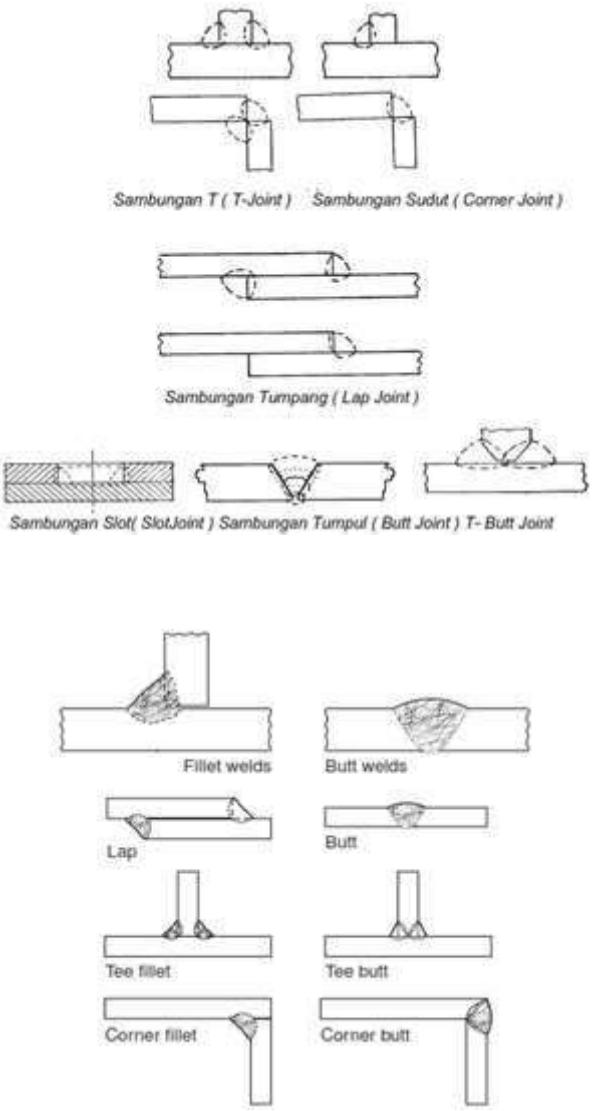
1. Sambungan sudut dalam (*T-joint atau L-joint*)
2. Sambungan sudut luar (*Corner joint*)
3. Sambungan tumpang (*lap joint*)
4. Sambungan sumbat (*Plug joint*)
5. Sambungan celah (*Slot joint*)
6. Sambungan tumpul (*Butt joint*)

Bentuk-bentuk Kampuh Las.

Kampuh las adalah bentuk persiapan pada suatu sambungan. Umumnya hanya ada pada sambungan tumpul, namun ada juga pada beberapa bentuk sambungan sudut tertentu, yaitu untuk memenuhi persyaratan kekuatan suatu sambungan sudut. Bentuk kampuh las yang banyak dipergunakan pada pekerjaan las dan fabrikasi logam adalah :

1. Kampuh I (Open square butt)
2. Kampuh V (Single Vee butt)
3. Kampuh X (Duoble Vee butt)
4. Kampuh U (Single U butt)
5. Kampuh K/Sambungan T dengan penguatan pada kedua sisi (*Reinforcemen on T-butt weld*)
6. Kampuh J/ Sambungan T dengan penguatan satu sisi (Single J-butt weld)

Berikut ini adalah Gambar 5.1 bentuk-bentuk sambungan dan kampuh las.



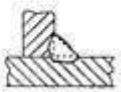
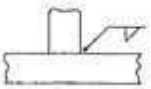
Gambar 5.1 Bentuk-bentuk Sambungan.

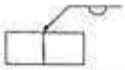
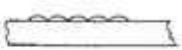
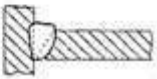
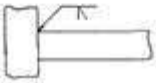
Source: Welding Science and Technology

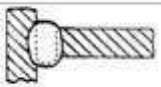
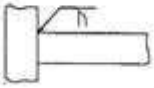
5.2 Tanda-Tanda Gambar Dalam Pengelasan

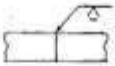
Pada pekerjaan las dan fabrikasi logam gambar kerja sangat memegang peranan penting, terutama tentang simbol las, karena dengan adanya simbol las seorang pekerja akan dapat menentukan konstruksi sambungan yang akan dikerjakan. Oleh karena itu pemahaman tentang simbol-simbol las sangat perlu dikuasai oleh seseorang yang bekerja di bidang las dan fabrikasi logam. Pada Tabel 5.1 adalah macam-macam simbol las secara umum/ dasar yang digunakan dalam berbagai konstruksi pengelasan :

Tabel 5.1 Macam-macam simbul las

Bentuk Pengelasan	Gambar	Simbol
Sambungan Sudut (Fillet)		

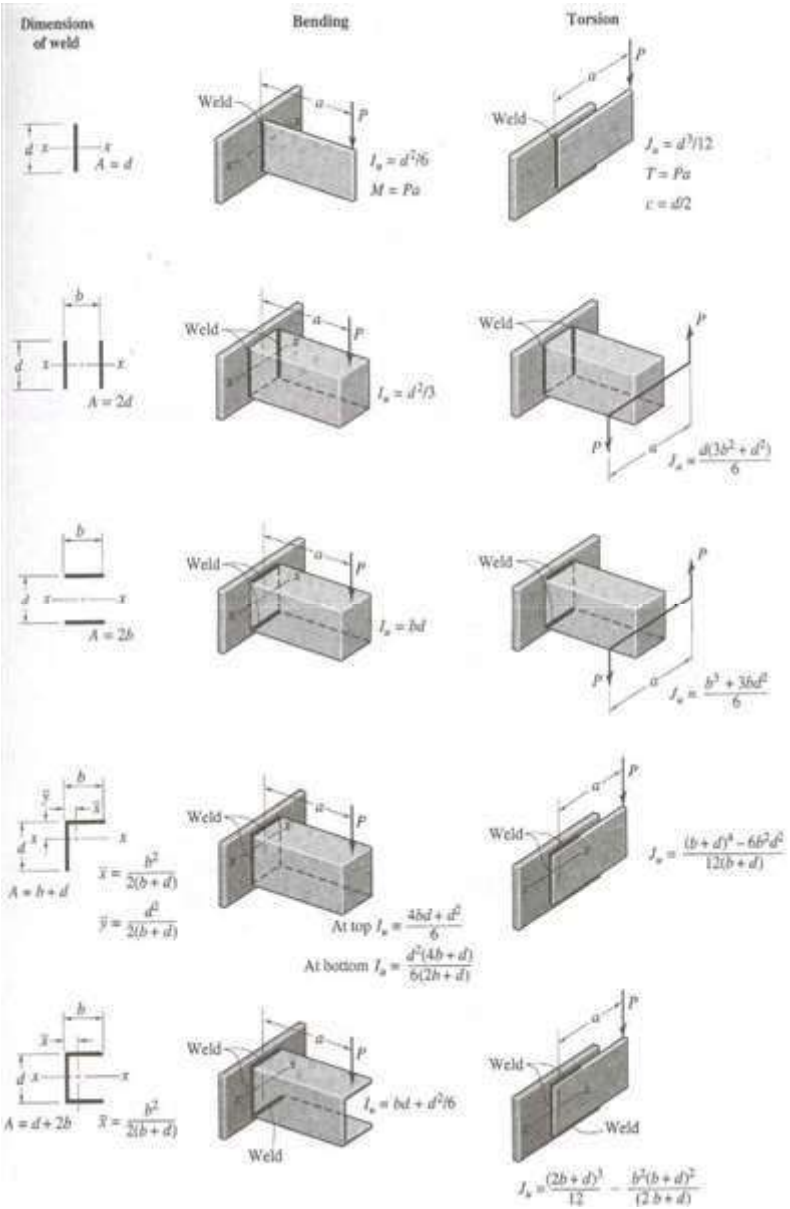
Jalur Las		
Penebalan Permukaan		
Sambungan Tumpul (***umum***)	*(Penetrasi penuh pada sambungan tumpul)*	
Sambungan Tumpul (***Kampuh I***)		
Sambungan Tumpul (***Kampuh V***)		
Sambungan T (***di bevel***)		

Sambungan Tumpul (***Kampuh U***)		
Sambungan T (***Kampuh J***)		

Rata		
Cembung		
Cekung		

5.3 Kekuatan Sambungan Las

Beban yang bekerja pada struktur sambungan dengan tipe las fillet dapat berupa beban paralel, beban geser, beban torsi, dan beban tekuk. Untuk menganalisis tegangan yang terjadi pada sambungan las, terlebih dahulu harus diperhitungkan geometri sambungan las. Konfigurasi sambungan las jenis fillet dinyatakan dengan panjang *leg,* h_e. Umumnya panjang leg adalah sama besar, tetapi tidak selalu harus demikian. Untuk keperluan *engineering* praktis, tegangan pada sambungan las yang terpenting adalah tegangan geser pada leher fillet (throat). Panjang leher, $t_e$didefinisikan sebagai jarak terpendek dari interseksi pelat ke garis lurus yang menghubungkan *leg* atau kepermukaan *weld bead*. Untuk kasus yang umum yaitu las convex, panjang leher adalah pada posisi 45^0 dari leg, atau $t_e = 0{,}707\ h_e$. Jadi luas leher yang digunakan untuk perhitungan tegangan adalah $A_w = t_e L$, dimana L adalah panjang las.


Dimensions of weld
Bending
Torsion
Weld
$A = d$
$I_u = d^2/6$
$M = Pa$
$J_u = d^3/12$
$T = Pa$
$c = d/2$
$A = 2d$
$I_u = d^2/3$
$J_u = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
$A = 2b$
$I_u = bd$
$J_u = \frac{b^3 + 3bd^2}{6}$
$A = b + d$
$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b + d)}$
$\bar{y} = \frac{d^2}{2(b + d)}$
At top $I_u = \frac{4bd + d^2}{6}$
At bottom $I_u = \frac{d^2(4b + d)}{6(2b + d)}$
$J_u = \frac{(b + d)^4 - 6b^2d^2}{12(b + d)}$
$A = d + 2b$
$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b + d)}$
$I_u = bd + d^2/6$
$J_u = \frac{(2b + d)^3}{12} - \frac{b^2(b + d)^2}{(2b + d)}$

Kekuatan bahan sambungan las, Elektroda yang digunakan dalam pengelasan busur ditandai dengan huruf E diikuti dengan angka empat digit. Contoh E6018. Dua angka pertama menunjukkan kekuatan material setelah menjadi ikatan dalam ribuan pound per inci persegi (ksi). Digit ketiga menunjukkan posisi pengelasan, mis. B. datar, vertikal atau overhead. Sedangkan angka terakhir menunjukkan variabel dalam pengelasan, seperti: B. jumlah listrik. Tabel 5.2 menunjukkan daya minimum untuk beberapa elektroda yang biasanya digunakan untuk komponen mesin. Dengan mengetahui kekuatan luluh material dan tegangan yang akan timbul akibat beban kerja, maka desainer dapat menentukan tegangan desain dan faktor keamanan yang diinginkan.

Tabel 5.2 Kekuatan elektroda las

Electrode number	Ultimate tensile strength, S_u, ksi	Yield strength, S_y, ksi	Elongation, e_4, percent
E60XX	62	50	17–25
E70XX	70	57	22
E80XX	80	67	19
E90XX	90	77	14–17
E100XX	100	87	13–16
E120XX	120	107	14

Kekuatan Kelelahan Las Ketika struktur sambungan las terkena beban bolak-balik (siklis), kemungkinan kegagalan fatik memainkan peran penting dalam struktur. Adanya void dan inklusi pada sambungan las memiliki dampak yang lebih kecil pada beban statis, tetapi secara signifikan mengurangi kekuatan fatik.

Retakan biasanya menyebar di zona yang terpengaruh panas (HAZ) karena area ini adalah area terlemah di sambungan. Sangat jarang retakan menyebar pada logam pengisi. Beberapa buku teks merekomendasikan agar Anda tidak menggunakan sambungan las pada komponen yang mengalami beban kelelahan. Ini tidak membantu insinyur merancang karena komponen mesin umumnya menerima beban dinamis. Untuk kemudahan, nilai faktor konsentrasi tegangan fatik untuk berbagai jenis sambungan las diberikan pada Tabel 5.3 berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Jennings.

Tabel 5.3 Faktor konsentrasi tegangan fatigue sambungan las

Type of Weld	Fatigue stress concentration factors, K_f
Reinforced but weld	1,2

Toe of Transverse fillet weld	1,5
End of parallel fillet weld	2,7
T-butt joint with sharp corner	2,0

5.4 Patahnya Kontruksi Las

Sambungan yang dilas adalah bagian yang paling rentan mengalami kegagalan. Mesin / komponen karena perubahan sifat material akibat pengaruh panas dan kecenderungan cacat las terjadi pada sambungan. Untuk komponen / struktur yang mengalami beban dinamis berulang (kelelahan), hal ini dapat menjadi sumber dan pemicu perambatan retak hingga umur kelelahan sambungan berkurang drastis. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengantisipasi kerentanan tersebut, misalnya. B. Pengelasan yang benar sesuai dengan WPS (spesifikasi prosedur pengelasan), kualifikasi dan inspeksi tukang las.

Sambungan yang dilas dengan pengujian non-destruktif (NDT), shot peening, dll. Kelelahan adalah proses terus-menerus mengubah struktur material karena tekanan berulang (tegangan atau regangan) yang menyebabkan retak atau pecah. Sedangkan shot peening merupakan proses perlakuan mekanis dimana partikel besi dibakar ke permukaan material dengan kecepatan tinggi, sehingga

terjadi deformasi plastis pada lapisan permukaan. Akibat dari deformasi plastis ini, tegangan sisa tekan muncul. lapisan ini.

Semua jenis cacat las pada umumnya disebabkan kurangnya pengetahuan dari welder / juru las terhadap teknik-teknik pengelasan termasuk pemilihan parameter las. Oleh karena itu dari mulai pengelasan sampai akhir pengelasan harus selalu diadakan pemeriksaan dengan cara-cara yang telah ditentukan, misalnya secara visual, dye penetrant / dye check, radiography, ultrasonic atau dengan cara-cara lain.

Cacat las/defect weld adalah suatu keadaan yang mengakibatkan turunnya kualitas dari hasil lasan. Kualitas hasil las-an yang dimaksud adalah berupa turunnya kekuatan dibandingkan kekuatan bahan dasar base metal atau tidak baiknya performa/tampilan dari suatu hasil las. atau dapat juga berupa terlalu tingginya kekuatan hasil las-an sehingga tidak sesuai dengan tuntutan kekuatan suatu konstruksi.

Terjadinya cacat las ini akan mengakibatkan banyak hal yang tidak diinginkan dan mengarah pada turunnya tingkat keselamatan kerja, baik keselamatan alat, pekerja/user/operator, lingkungan dan perusahaan/industri/instansi. Di samping itu juga secara ekonomi akan mengakibatkan melonjaknya biaya produksi dan pada gilirannya industri/perusahaan/instansi tersebut mengalami kerugian atau penurunan laba.

Sedangkan definisi pengelasan sendiri adalah proses penyambungan antara dua logam /baja atau lebih dengan menggunakan energi panas sebagai media-nya. Karena proses ini maka logam disekitar las-an mengalami siklus termal cepat yang menyebabkan terjadinya deformasi. Hal ini sangat erat hubungan-nya dengan terjadinya cacat las yang mempunyai pengaruh fatal terhadap keamanan kontruksi material yang di-las terutama pada bagian Lambung Kapal.

Cacat las pada umumnya dapat dikategorikan seperti :

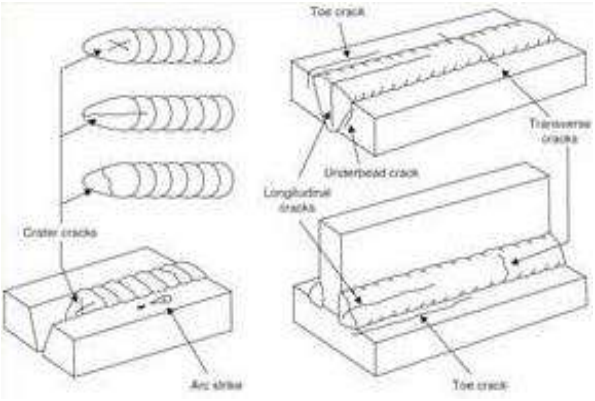
1. Rounded indication atau cacat bulat.
2. Linear indication atau cacat memanjang.

Rounded indication atau cacat bulat adalah merupakan cacat las yang diperbolehkan apabila dimensi / ukuran panjang kumpulan cacat masih berada pada cacat maksimum sesuai kriteria penerimaan yang dipakai, misal : liang-liang renik (porosity). Linear indication atau cacat memanjang adalah cacat yang tidak diperbolehkan sama sekali (retak, penembusan kurang, peleburan kurang). Berikut adalah penyebab beberapa cacat yang terjadi pada proses pengelasa.

1. Retak Las

Cacat las yang sering sekali terjadi pada saat proses pengelasan adalah retak las yang dapat dibagi menjadi dua kategori yakni : retak dingin dan retak panas pada Gambar 5.2.

- Retak dingin adalah retak yang terjadi pada daerah las pada suhu kurang lebih 300oC. Sedangkan retak panas adalahretak yang terjadi pada suhu diatas 500°C. Retak dingin tidak hanya terjadi pada daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) atau sering disebut dengan daerah pergaruh panas tetapi biasanya terjadipada logam las. Retak dingin ini dapat terjadi pada daerah panas yang sering terjadi. Dan retakan ini dapat dilihat dibawah manik Ias, retak akar dan kaki, serta retak melintang.
- Retak panas dibagi menjadi dua kelas yaitu retak karena pembebasan tegangan pada daerah pengaruh panas yang terjadi pada suhu 500°C - 700°C dan retak yangterjadi pada suhu diatas 900°C yang terjadi pada peristiwa pembekuan logam las. Retak panas sering teriadi pada logam las karena pembekuan, biasanya berbentuk kawah dan retak memanjang. Retak panas ini terjadi karena pembebasan tegangan pada daerah kaki didalam daerah pengaruh panas.



Gambar 5.2 Types of cracks in welded joints.

Source: Md.Ibrahim khan,Welding Science and Technology

Retak ini biasanya terjadi pada waktu logam mendingin setelah pembekuan dan terjadi karena adanya tegangan yang timbul, yang disebabkan oleh penyusutan dan sifat bajayang ketangguhannya turun pada suhu dibawah suhu pembekuan. Keretakkan las yang lainadalah retak sepanjang rigi-rigi lasan retak disamping las dan retak memanjang diluar rigi-rigilasan. Akan tetapi penyebab umum pada semua jenis keretakan las ini adalah:

1. Pilihan jenis elektroda yang salah atau tidak tepat.
2. Benda kerja terbuat dari baja karbon tinggi.
3. Pendinginan setelah pengelasan yang terlalu cepat.
4. Benda kerja yang dilas terlalu kaku.

5. Penyebaran panas pada bagian-bagian yang di las tidak seimbang.

Penanggulangan Retak Las, menghindari terjadinya retakan las pada daerah panas, atau usaha penaggulanganya supaya tidak terjadi retak pada las antara lain :

1. Menggunakan elektroda yang betul, dalam hal ini sedapat mungkin menggunakan elektroda dengan fluk yang mempunyai kadar hydrogen rendah.
2. Sebelum mengelas, pada daerah sekitar kampuh harus dibersihkan dari air, karat, debu,minyak dan zat organik yang dapat menjadi sunrber hidrogen.
3. Mendinginkan perlahan-lahan setelah dilas.
4. Membebaskan kampuh dari kekakuan.
5. Mengadakan pemanasan pendahuluan sebelum memulai pengelasan, dengan cara ini retak las dapat terhindarkan.

2. Penembusan Kurang Baik

Selain retak cacat las yang juga sering terjadi, adalah penembusan las yang kurang dan jelek. Jika penembusan pengelasan kurang maka akibat yang timbul pada konstruksi adalahkekuatan konstruksi yang kurang kokoh karena penembusan yang kurang. Karena kurangpenembusan inilah maka penyambungan tidak sempurna. Penyebab dari penembusan yangkurang ini antara lain :

1. Kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi.
2. Arus terlalu rendah.
3. Diameter elektroda yang terlalu besar atau terlalu kecil.
4. Benda kerja terlalu kotor.
5. Persiapan kampuh atau sudut kampuh tidak baik.
6. Busur las yang terlalu panjang.

Penanggulangan Penembusan Las Yang Kurang Baik, Cara untuk mengatasi cacat las penembusan yang kurang baik dapat dilakukan denganlangkahlangkah sebagai berikut :

1. Penyetelan arus pengelasan yang tepat.
2. Pengelasan diperlambat dan stabil agar panas yang didapat lebih merata.
3. Mengatur kecepatan las, sehingga kedua sisi benda kerja mencair dengan baik.
4. Memilih diameter elektroda yang sesuai dengan ukuran coakan.
5. Membersihkan benda kerja dari terak dan kotoran yang ada.
6. Mempertahankan panjang busur nyala yang tepat.
7. Membetulkan sudut kampuh.

3. Pengerukan / Under cut

Cacat las yang lain adalah pengerukan atau yang sering disebut dengan under cut pada benda kerja. Pengerukan ini terjadi pada benda kerja atau konstruksi yang termakan olehlas sehingga benda kerja tadi berkurang

kekuatan konstruksi meskipun sebelumnya telah dilakukan pengelasan. Sebab-sebab pengerukan las antara lain :

1. Arus yang terlalu tinggi.
2. Kecepatan pengelasaan yang terlalu tinggi pula.
3. Busur nyala yang terlalu panjang.
4. Ukuran elektroda yang salah.
5. Posisi elektroda selama pengelasan tidak tepat.
6. Ayunan elektroda selama pengelasan tidak teratur.

Penanggulangan Pengerukan las (Under Cut), Cara untuk mengatasi cacat las pengerukan/under cut dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Menyetel arus yang tepat.
2. Mengurangi kecepatan mengelas.
3. Mempertahankan panjang busur nyala yang tepat.
4. Menggunakan ukuran elektroda yang benar.
5. Menyetel posisi elektroda, sehingga gaya busur nyala akan menahan cairan pengelasan.
6. Mengupayakan ayunan elektroda dengan teratur.

4. Keropos

Keropos merupakan cacat las yang juga sering terjadi dalam pengelasan. Keropos ini bila didiamkan, lama kelamaan akan menebar yang diikuti dengan perkaratan atau korosi padakonstriksi sehingga kontruksi menjadi rapuh karena korosi tadi. Cacat ini memang kelihatannya sepele akan tetapi dampak yang ditimbulkan oleh cacat ini cukup membahayakan juga. Penyebab keropos ini yakni :

1. Busur pendek.
2. Kecepatan mengelas yang terlalu tinggi atau terlalu rendah.
3. Kurang waktu pengisian.
4. Terdapat kotoran-kotoran pada benda kerja.
5. Kesalahan memilih jenis elektroda.

Penanggulangan Cacat Las Karena Keropos, Cara untuk mengatasi cacat las keropos dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagaiberikut:

1. Mempertahankan jarak busur yang baik.
2. Mengurangi kecepatan pengelasan atau kecepatan dipertinggi.
3. Member waktu pengisian yang cukup untuk melepaskan gas.
4. Membersihkan benda kerja.
5. Menggunakan elektroda yang tepat.

6. Bentuk Yang Tidak Sempurna

Cacat jenis ini mengakibatkan geometri sambungan las tidak baik (tidak sempurna), mis. Misal: undercut, underfill, overlap, penguatan berlebihan dan lain-lain. Morfologi geometris dari cacat ini biasanya bervariasi. Pengerukan ini terjadi pada benda kerja atau struktur yang dikonsumsi oleh pengelasan, sehingga benda kerja mengalami penurunan kekuatan struktur meskipun sebelumnya telah dilas.

Sebab-sebab pengerukan las antara lain :

1. Ayunan elektroda selama pengelasan tidak teratur.
2. Kecepatan pengelasaan yang terlalu tinggi pula.
3. Busur nyala yang terlalu panjang.
4. Posisi elektroda selama pengelasan tidak tepat.
5. Ukuran elektroda yang salah.
6. Arus yang terlalu tinggi
7. sudut dari brander dan bahan tambah yang tidak benar.

8. Penggerutan Benda Kerja.

Pada dasarnya setiap logam mengembang saat dipanaskan dan berkontraksi saat dingin. Ketika salah satu permukaan las tipis dilas dalam arah longitudinal, pembengkokan atau pembengkokan atau deformasi terjadi setelah dingin. Dan pada dua buah lamella yang terbuat dari plat tipis yang dilas (tanpa terlebih dahulu membuat binder), kedua sisi padat tersebut masih bebas bergeser, bahkan hingga kedua sisinya bisa roboh. Penyebab penyusutan adalah:

1. Pengisian pengelasan kurang.
2. Pengkleman salah.
3. Pemanasan yang berlebihan.
4. Kesalahan persiapan kampuh.
5. Pemanasan tidak merata.
6. Penempatan bagian-bagian yang disambung kurang baik.
7. Salah urutan pengelasan.

9. Hot Cracking

Retakan yang biasanya timbul pada saat vairan las mulai membeku karena luas penampang yang terlalu kecil dibandingkan dengan benda kerja yang akan yang akan dilas sehingga terjadi pendinginan.

10.Under bread cracking

Adanya hydrogen ataupun karena kuatnya kontruksi penguat sampingan.dapat di tanggulangi dengan menggunakan elektroda las low hydrogen atau pemanasan awal benda kerja sampai suhu 120 C.

11.Luck of fussion

Cacat antara bahan dasar dengan logam las tidak dapat di tanggulangi dengan menambah kuat arus ,ayunan las dapat di tambah.

BAB 6 TEST DAN PEMERIKSAAN LASAN

6.1 Persiapan Pengujian Dan Pemeriksaan

Pemeriksaan proses pengelasan dilakukan untuk memastikan kualitas pengelasan sesuai dengan peraturan dan standar yang digunakan. Pengujian ini dilakukan selama proses pengelasan (sebelum pengelasan, selama pengelasan dan setelah pengelasan). Pengujian yang dilakukan sebelum pengelasan meliputi:

1. Periksa kesiapan peralatan las, mis. B. sumber listrik, aksesoris yang dibutuhkan, alat bantu las dan lain-lain.
2. Memastikan elektroda atau bahan pengisi yang digunakan sesuai dengan spesifikasi yang tertera di WPS, termasuk kesesuaian gas casing yang akan digunakan dalam proses pengelasan saat pengelasan dengan proses yang membutuhkan penggunaan gas casing.
3. Persiapan desain pengelasan (sudut kemiringan, bukaan akar, permukaan akar), kebersihan atau kehalusan permukaan benda kerja, penyesuaian pengelasan.
4. Pastikan persiapan untuk pengkondisian las, seperti B.Pemanasan awal, pemanasan akhir dan perlakuan panas setelah pengelasan dapat dilakukan.

5. Pemeriksaan persiapan tukang las yang akan melakukan proses pengelasan.

Ujian ini mencakup status kualifikasi, keterampilan dan pengalaman tukang las. Semua persiapan sebelum pengelasan diperiksa dan kinerjanya harus diperhatikan. Pemeriksaan berikut harus dilakukan selama proses pengelasan:

1. Kesesuaian penerapan proses pengelasan dengan variabel WPS seperti perlakuan panas, parameter pengelasan (arus, tegangan, kecepatan pengelasan, jarak langkah pengelasan dan posisi pengelasan) pekerjaan pengelasan.
2. Pengamatan dilakukan pada setiap lapisan pengelasan untuk melihat tampilan hasil pengelasan dan untuk mengidentifikasi kemungkinan distorsi pada pengelasan.

Verifikasi paling dasar dari hasil akhir pengelasan dilakukan dengan inspeksi visual (VT). Inspeksi visual dilakukan dengan mengamati tampilan dan bentuk lasan. Pemeriksaan tersebut meliputi bentuk lasan, bentuk dan kedalaman penetrasi lasan, cacat yang mungkin terjadi dan kesempurnaan fusi. Setelah pemeriksaan visual, hasil pengelasan harus diuji. Proses pengujian dibagi menjadi dua proses utama, yaitu proses destruktif dan proses non-destruktif.

1. Pengujian yang merusak, Uji destruktif dilakukan dengan mengeluarkan benda uji dari produk yang

dilas, bukan pada keseluruhan produk (kecuali produk kecil), dan melakukan uji destruktif pada benda uji.

2. Pengujian non-destruktif, Pengujian non destruktif dilakukan dengan memeriksa hasil pengelasan tanpa "merusak" produk lasan.

6.2 Pengujian Merusak

Pengujian destruktif dilakukan dengan pengambilan spesimen uji dari produk hasil lasan, tidak pada produk keseluruhan (kecuali pada produk berukuran kecil) dan dilakukan pengujian yang bersifat merusak terhadap spesimen uji tersebut antara lain:

1. Pengujian Kimia (*Chemical Tests*)
   Pengujian kimia dilakukan untuk mengetahui sifat logam las dengan metode analisis kimia kandungan logam, uji korosi, dan uji hidrogen terfusi.

2. Pengujian Mekanikal (*Mechanical Tests*)
   Pengujian mekanikal dilakukan untuk mengukur sifat dari logam yang telah dilas:

   1. Uji Tarik (*Tensile Test*); Pengujian untuk mengukur kekuatan akhir dari sambungan las kampuh.
   2. Uji Tekan (*Bend Test*); Dilakukan untuk mengukur tingkat kebaikan struktur dan elastisitas sambungan las kampuh.
   3. Uji Kekerasan (*Hardness Test*); Pengujian ini dilakukan untuk mengukur kekerasan, baik

dilakukan pemeriksaan dengan pembesaran diatas 1000 kali sampai jutaan kali. Dengan pengujian ini dapat dilihat struktur mikro yang terkristalisasi, retak kecil, dan inklusi pada spesimen uji.

6.1 Pengujian Tak Merusak

Pengujian non destruktif dilakukan dengan memeriksa hasil pengelasan tanpa “merusak” hasil pengelasan, antara lain:

1. Pemeriksaan Rontgen (RT)
   Melalui pemeriksaan X-ray (pemeriksaan sinar-X). Pemeriksaan ini dilakukan dengan X-ray atau sinar gamma. Pemeriksaan sinar-X dapat mengungkapkan cacat pengelasan seperti retakan, fusi tidak lengkap, terak, dan porositas. Proses ini harus dilakukan oleh juru radiografi bersertifikat. Toleransi kesalahan dalam hasil pengelasan berkaitan dengan standar penerimaan sambungan las yang digunakan.
2. Pemeriksaan USG (UT)
   Gelombang suara frekuensi tinggi digunakan dalam pemeriksaan USG. Gelombang ditembakkan ke benda kerja untuk mendeteksi cacat di permukaan atau di dalam lasan. Cacat pengelasan dikenali dan dianalisis berdasarkan gelombang yang dipantulkan.
3. Partikel Magnetik (MT)

Pemeriksaan partikel magnet dilakukan dengan mengamati garis gaya serbuk kering atau cairan suspensi magnet yang terbentuk dari medan magnet yang dihasilkan pada permukaan produk hasil las. Metode ini dapat mendeteksi cacat seperti retakan dan porositas pada garis gaya magnet.

5. Cairan Penetrasi (PT)
   Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan fluorescent atau cairan merah untuk menemukan cacat seperti retakan atau bukaan di area pengelasan. Jika terjadi cacat, cairan merembes ke celah. Cairan pengembang digunakan pada permukaan yang telah diolah dengan cairan uji. Pada posisi di mana cairan diserap, cairan muncul ke permukaan. Proses pengujian ini dapat dilakukan segera setelah proses pengelasan, karena tidak mempengaruhi struktur pengelasan.

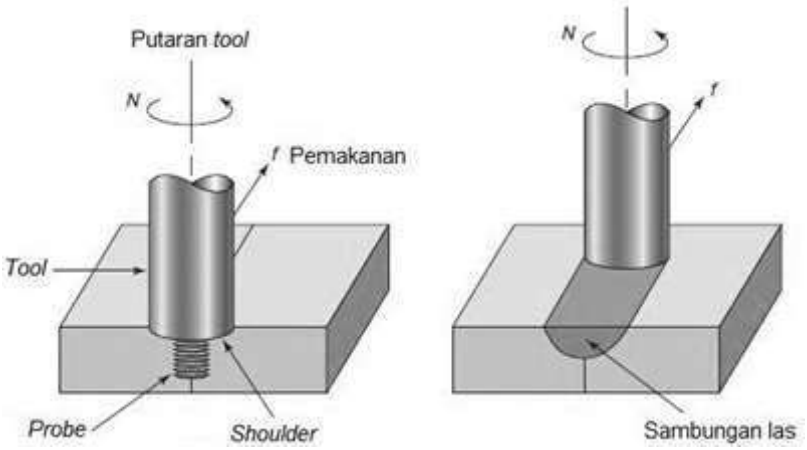
BAB 7 FRICTION STIR WELDING

7.1 Proses Friction Stir Welding

Friction stir welding (FSW) adalah proses penggabungan logam yang relatif baru dan solid yang ditemukan oleh Wayne Thomas et al. di The Welding Institute (TWI) pada tahun 1991 (Dawes & Thomas,1996). Prosesnya adalah tool silinder yang berputar dengan probe yang diprofilkan dimasukkan ke dalam sambungan antara

dua benda kerja sejenis maupun tidak sejenis yang dijepit, hingga bahu, yang memiliki diameter lebih besar dari pin, menyentuh permukaan benda kerja. Probe ini sedikit lebih pendek dari kedalaman pengelasan yang dibutuhkan, dengan bahu tool berada di atas permukaan kerja. Setelah waktu diam yang singkat, tool akan bergerak maju sepanjang garis sambungan dengan kecepatan pengelasan yang telah ditentukan sebelumnya.

Panas gesekan dihasilkan antara tool tahan aus dan benda kerja. Panas ini, bersama dengan panas yang dihasilkan oleh proses pencampuran mekanis dan panas adiabatik di dalam material, menyebabkan bahan yang diaduk melunak tanpa meleleh. Saat tool digerakkan ke depan, profil khusus pada probe memaksa material yang terplastis dari permukaan depan ke belakang, di mana gaya tinggi membantu mengikat pengelasan yang ditempa. Proses tool yang melintasi sepanjang garis las dalam poros tubular plastisisasi dari logam menghasilkan deformasi solid-state yang tinggi yang melibatkan rekristalisasi dinamis dari material dasar. Gambar 7.1 mengilustrasikan definisi proses untuk tool dan material kerja dalam konfigurasi butt-joint.



Gambar 7.1. Skematis dari FSW dalam konfigurasi butt-joint. Source: R.S. Mishra and Z. Y. Ma, (2005), "Friction stir welding and processing", Mater. Sci. Eng. Vol.50, pp. 1-78.

Sifat solid-state FSW mengarah pada beberapa keunggulan dibandingkan metode pengelasan fusi, karena masalah yang terkait dengan pendinginan dari fase cair dapat dihindari. Masalah seperti porositas, redistribusi zat terlarut, retak solidifikasi dan retak likuidasi tidak muncul selama FSW. Secara umum, FSW ditemukan menghasilkan cacat dengan konsentrasi rendah dan sangat toleran terhadap variasi parameter dan bahan. Namun demikian, FSW dikaitkan dengan sejumlah cacat unik jika tidak dilakukan dengan benar. Temperatur las yang tidak mencukupi, karena kecepatan rotasi rendah atau kecepatan pengelasan tinggi,

misalnya, berarti material las tidak dapat mengakomodasi deformasi yang luas selama pengelasan. Hal ini dapat mengakibatkan cacat panjang seperti terowongan di sepanjang lasan, yang dapat terjadi di permukaan atau di bawah permukaan. Temperatur rendah juga dapat membatasi aksi penempaan tool dan dengan demikian mengurangi kontinuitas ikatan antara material dari setiap sisi pengelasan. Kontak ringan antar material telah melahirkan nama "retak halus (kissing bond)". Cacat ini sangat mengkhawatirkan, karena sangat sulit dideteksi menggunakan metode nondestruktif seperti pengujian sinar-X atau ultrasonik. Jika pin tidak cukup panjang atau pahat naik keluar dari pelat, maka antarmuka di bagian bawah pengelasan tidak boleh terganggu dan ditempa oleh tool, yang mengakibatkan cacat karena kurangnya penetrasi. Ini pada dasarnya adalah takik pada material, yang dapat menjadi sumber potensial retakan kelelahan.

Sejumlah keunggulan potensial FSW dibandingkan proses pengelasan fusi konvensional telah diidentifikasi: (Johsen,1999; Thomas&Nicholas,1997; Mishra,2005)

1. Sifat mekanik yang baik dalam kondisi as-welded.
2. Peningkatan keamanan karena tidak adanya asap beracun atau percikan material yang meleleh.
3. Tidak ada bahan habis pakai - Pin berulir yang terbuat dari baja perkakas konvensional, misalnya, H13 yang diperkeras, dapat mengelas aluminium lebih dari 1 km (0,62 mil), dan tidak diperlukan pengisi atau pelindung gas untuk aluminium.

4. Otomatis mudah dilakukan pada mesin milling sederhana - biaya penyiapan lebih rendah dan lebih sedikit pelatihan.
5. Dapat beroperasi di semua posisi (horizontal, vertikal, dll.), Karena tidak ada kolam las.
6. Penampilan las umumnya bagus dan ketebalan minimal under / over-matching, sehingga mengurangi kebutuhan akan pemesinan yang mahal setelah pengelasan.
7. Dapat menggunakan bahan yang lebih tipis dengan kekuatan sambungan yang sama.
8. Dampak lingkungan rendah.
9. Kinerja umum dan manfaat biaya dari peralihan dari fusi ke gesekan.

Gambar 7.2. Aplikasi FSW dalam Ship building & Off-Shore , Automotive, Railway, Aerospace, dan Fabrication. Source: C. Mahananda, S. Jeet and S. Kar, (2018), “Review on Application of Friction Stir Welding”, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 9, Issue 4.

Namun, beberapa kelemahan dari proses tersebut telah diidentifikasi:

1. Keluar dari lubang yang tersisa saat pahat ditarik.
2. Gaya turun yang besar dibutuhkan dengan penjepitan tugas berat yang diperlukan untuk menahan pelat bersama-sama.
3. Kurang fleksibel dibandingkan proses manual dan busur (kesulitan dengan variasi ketebalan dan pengelasan non-linier).
4. Seringkali laju lintasan lebih lambat daripada beberapa teknik pengelasan fusi, meskipun ini dapat diimbangi jika lintasan pengelasan yang diperlukan lebih sedikit.

Sedangkan, aplikasi proses FSW digunakan pada: Ship building & Off-Shore , Automotive, Railway, Aerospace, dan Fabrication dan lain-lain (Mahanda, 2018). Pada Gambar 7.2 merupakan aplikasi dari proses FSW.

7.2 Konfigurasi Friction Stir Welding

FSW melibatkan pergerakan material yang kompleks dan deformasi plastis. Parameter pengelasan, geometri tool dan desain sambungan memberikan pengaruh yang signifikan pada pola aliran material dan distribusi suhu, sehingga mempengaruhi evolusi mikro struktural material. Oleh karena itu, kecepatan pengelasan, kecepatan putar tool, sudut kemiringan tool, material tool dan desain tool variabel independen utama yang digunakan untuk mengontrol proses FSW. Parameter proses utama dan efek yang ditimbulkan dalam proses FSW adalah sebagai berikut (Mishra,2005; Kumar,2015).

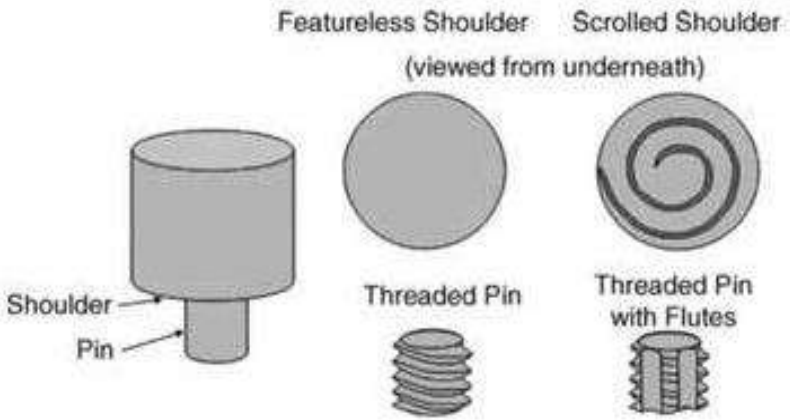
1. Kecepatan rotasi tool (RT) memberikan efek: Keceptan rotasi tool yang lebih tinggi menghasilkan suhu yang lebih tinggi karena pemanasan gesekan yang lebih tinggi dan menghasilkan pengadukan dan pencampuran material yang lebih intens. Kecepatan putaran yang lebih rendah menghasilkan pengadukan yang lebih luas pada material, zona pengadukan yang lebih besar dan pengelasan antarmuka pengelasan yang lebih tinggi, beban kegagalan dan kekuatan geser yang lebih tinggi.
2. Kecepatan pengelasan (TS) memberikan efek: Ukuran butir di zona aduk berkurang dengan meningkatnya kecepatan pengelasan karena masukan panas yang lebih rendah. Kekuatan tarik meningkat dengan meningkatnya kecepatan pengelasan.

3. Gaya aksial (FA) memberikan efek: Gaya aksial berpengaruh signifikan terhadap pembentukan cacat, ukuran butir dan kekerasan zona pengaduk dan selanjutnya sifat tarik las pengaduk gesekan.
4. Desain tool (DT) memberikan efek: Tool ini memiliki dua fungsi utama: (a) pemanas lokal, dan (b) aliran material. Pada tahap awal tool terjun, hasil pemanasan terutama dari gesekan antara pin dan benda kerja.
5. Kedalaman tool pada benda kerja (PD) memberikan efek: Kedalaman plunge untuk kecepatan putaran tool, kecepatan traverse, material, dan mesin uji perlu dioptimalkan untuk mendapatkan pengelasan yang bebas cacat.
6. Geometri sambungan (GS) memberikan efek: Selama terjun awal tool, gaya cukup besar dan perhatian ekstra diperlukan untuk memastikan bahwa dua material yang disambung tidak terpisah bergantung pada geometri sambungan.
7. Sudut kemiringan tool (TL) memberikan efek: Kemiringan spindel yang sesuai ke arah trailing memastikan bahwa bahu tool menahan material yang diaduk dengan pin profile dan memindahkan material secara efisien dari depan ke belakang pin.

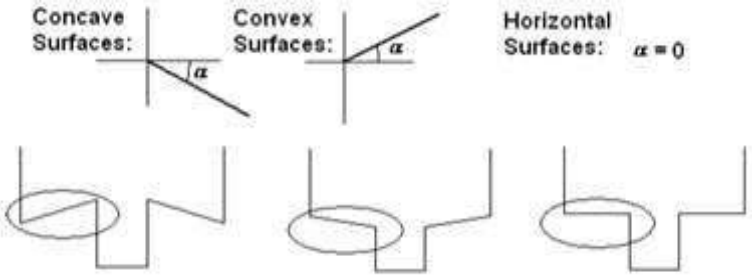
7.2.1 Tool Material Friction Stir Welding

Tool FSW terdiri dari pundak dan pin yang dapat disatukan dengan pundak atau sebagai sisipan terpisah yang

mungkin dari bahan yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.3. Desain bahu dan pin sangat penting untuk kualitas lasan.



Gambar 7.3. Skematik tool FSW. Source: R.S. Mishra and Z. Y. Ma, (2005), "Friction stir welding and processing", Mater. Sci. Eng. Vol.50, pp. 1-78.



Gambar 7.4. Bentuk bahu tool FSW. Source: R.S. Mishra and Z. Y. Ma, (2005), "Friction stir welding and processing", Mater. Sci. Eng. Vol.50, pp. 1-78.

Pin alat menghasilkan panas dan mengaduk material yang dilas tetapi pundak juga memainkan peran penting dengan memberikan perawatan gesekan tambahan serta mencegah material plastis keluar dari daerah las. Ukuran diameter bahu tidak boleh terlalu besar untuk meminimalkan lebar garis zona pengelasan. Dengan kata lain, jika diameter bahu terlalu besar, itu akan menyebabkan bagian pelat yang lebar menjadi plastis. Diameter bahu biasanya diambil dua kali lipat diameter pin. Pada Gambar 7.4 merupakan bentuk bahu tool FSW.

Kualitas sambungan FSW yang baik membutuhkan bahan pahat yang tepat untuk dipilih untuk aplikasi yang diinginkan. Tantangan baru telah muncul dengan kebutuhan bahan pengelasan, seperti komposit matriks logam, titanium, atau baja (Mishra,2005). Penting untuk memiliki alat FSW yang menjaga stabilitas dimensi dan tidak kehilangan fitur atau patah selama proses pengelasan. Sangat diinginkan bahwa bahan alat memiliki (Fuller,2007; Zhang,2012):

1. Kekuatan mekanik yang baik: pada suhu kamar dan, terutama, pada suhu tinggi. Proses pengelasan dilakukan sekitar 70 hingga 90% dari titik leleh material, jadi penting agar material pahat memiliki

kekuatan yang cukup pada suhu ini, jika tidak, ia akan gagal;

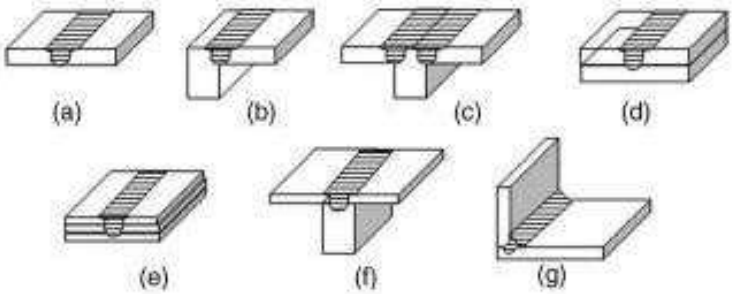
2. Ketahanan keausan makanan: meskipun ada beberapa efek yang mungkin tidak diinginkan pada struktur mikro sambungan las, keausan pahat yang signifikan meningkatkan biaya proses FSW;
3. Tidak ada reaktivitas dengan bahan benda kerja: pembentukan fase yang tidak diinginkan selama proses pengelasan, jika reaksi alat dan bahan benda kerja dapat menyebabkan degradasi bahan alat;
4. Ketangguhan patah yang baik: adalah wajib bahwa alat menolak kerusakan yang dilakukan selama periode terjun dan tinggal. Selain kesulitan dalam produksi alat yang mengarah ke peningkatan biaya, sering diinginkan untuk mengorbankan beberapa daya tahan untuk harga alat yang dapat diterima;
5. Koefisien ekspansi termal yang rendah: selama proses pengelasan bidang suhu benda kerja tergantung pada konduktivitas termal bahan pahat. Nilai konduktivitas termal yang tepat tergantung pada variabel proses, bahan benda kerja, dan beberapa sifat bahan alat lainnya. Koefisien ekspansi termal dapat memengaruhi tekanan termal pada alat. Koefisien ekspansi termal yang rendah antara probe dan material bahu mengurangi tekanan termal. Namun, konduktivitas termal yang tinggi mungkin tidak diinginkan jika penghilangan panas yang berlebihan dari antarmuka benda kerja memerlukan alat

kecepatan putaran alat yang tinggi untuk melunakkan bahan benda kerja dan mengurangi tekanan pahat;

6. Kemampuan mesin yang baik: Kemampuan mesin yang baik adalah penting untuk memfasilitasi pembuatan fitur kompleks pada permukaan bahu dan probe.

7.2.2 Desain Sambungan Friction Stir Welding

Konfigurasi sambungan yang paling nyaman untuk FSW adalah butt joint dan lap joint. Butt joint persegi sederhana ditunjukkan pada Gambar 7.5a. Dua pelat atau lembaran dengan ketebalan yang sama ditempatkan pada backing plate dan dijepit dengan kuat untuk mencegah permukaan sambungan yang berbatasan dipaksa terpisah. Selama terjun awal tool, gaya cukup besar dan perhatian ekstra diperlukan untuk memastikan bahwa pelat dalam konfigurasi butt joint tidak terpisah. Tool berputar dimasukkan ke dalam garis sambungan dan dilintasi sepanjang garis ini ketika bahu tool bersentuhan erat dengan permukaan pelat, menghasilkan lasan di sepanjang garis yang berbatasan.



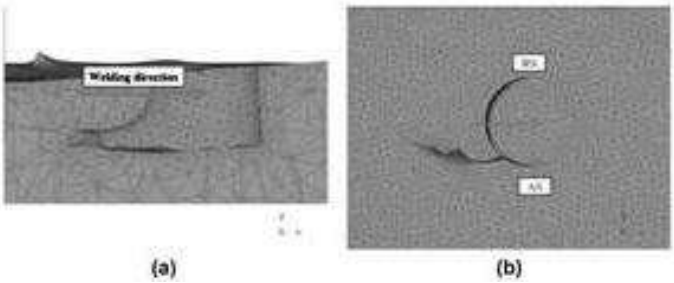
Gambar 7.5. Geometri sambungan FSW. Source: R.S. Mishra and Z. Y. Ma, (2005), "Friction stir welding and processing", Mater. Sci. Eng. Vol.50, pp. 1-78.

Di sisi lain, untuk lap joint sederhana, dua pelat atau lembaran yang dibelitkan dijepit pada pelat pendukung. Sebuah tool berputar secara vertikal dimasukkan melalui pelat atas dan ke dalam pelat bawah dan dilintasi sepanjang arah yang diinginkan, menghubungkan kedua pelat (Gbr. 7.5d). Banyak konfigurasi lain yang dapat dibuat dengan kombinasi butt joint dan lap joint. Terlepas dari konfigurasi butt joint dan lap joint, jenis desain sambungan lainnya, seperti sambungan fillet (Gbr. 7.5g), juga dimungkinkan sesuai kebutuhan untuk beberapa aplikasi teknik. Penting untuk dicatat bahwa tidak diperlukan persiapan khusus untuk FSW butt joint dan lap joint. Dua pelat logam bersih dapat dengan mudah digabungkan dalam bentuk butt joint dan lap joint tanpa mempedulikan kondisi permukaan pelat.

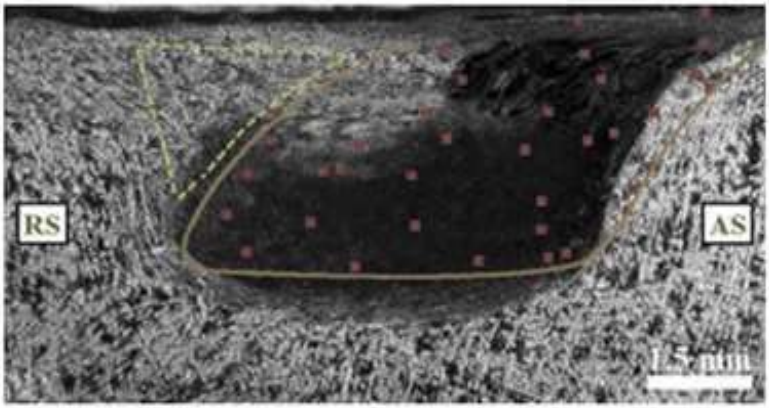
7.3 Dasar Aliran Material Friction Stir Welding

Aliran material memainkan peran mendasar dalam FSW karena menentukan keefektifan sambungan. Sebagian besar aliran material terjadi melalui sisi retreating dan pengangkutan material plastis di belakang alat membentuk sambungan FSW. Aliran material di sekitar pahat sangat kompleks tergantung pada geometri pahat, parameter proses dan material yang akan dilas (Nandan,2007). Oleh karena itu, sangat penting untuk memahami karakteristik aliran material untuk desain pahat yang optimal dan kombinasi parameter proses. Beberapa model proses FSW telah dikembangkan untuk perhitungan perpindahan panas dan aliran material (Nandan,2007; Nandan,2008; Seidel,2001; Schneider,2006; Guerra, 2002).

Tujuan dari makalah Tutunchilar et al., 2012 adalah untuk mengembangkan simulasi metode FE inkremental Lagrangian 3D dari pemrosesan pengadukan gesekan menggunakan perangkat lunak DEFORM-3D. Metode simulasi ini juga dapat digunakan untuk memprediksi aliran material FSW. Hasil 3D dari pola aliran material di tengah, sisi maju dan mundur diekstraksi menggunakan pelacakan titik. Gbr. 7.6 menunjukkan formasi rongga tunneling dan formasi slot di belakang pin.



Gambar 7.6. Formasi rongga terowongan dan slot di belakang pin. Source: Tutunchilar S, Haghpanahi M, Besharati Givi MK, Asadi P, Bahemmat P. Simulation of material flow in friction stir processing of a cast Al–Si alloy. Mater Des 2012;40:415–26.



Gambar 7.7. Perbandingan daerah pengadukan eksperimen dan simulasi. Source: Tutunchilar S,

Haghpanahi M, Besharati Givi MK, Asadi P, Bahemmat P. Simulation of material flow in friction stir processing of a cast Al–Si alloy. Mater Des 2012;40:415–26.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bagian utama aliran material terjadi di dekat permukaan atas dan di sisi muka (AS). Material dekat permukaan atas diregangkan ke sisi depan menghasilkan bentuk zona pengadukan yang tidak simetris. Gambar 7.7 menunjukkan perbandingan bentuk zona pengadukan simulasi dan eksperimen.

Studi aliran material dapat memberikan informasi berharga tentang campuran material dan memungkinkan perbaikan dalam desain alat dan pemilihan parameter proses. Makalah sistematis Colegrove et al.,(2004; 2003; 2004; 2005; 2003) menjelaskan penerapan kode komputasi dinamika fluida (CFD), FLUENT, untuk memodelkan aliran logam 2D atau 3D dalam proses FSW. Profil pahat berulir standar digunakan untuk analisis dan fitur seperti sudut penggaruk pahat, pembangkitan panas, dan aliran panas disertakan. Tujuan utamanya adalah untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang aliran material di sekitar pahat FSW yang kompleks dan untuk mendemonstrasikan efek sudut penggaruk pahat, serta kecepatan pengelasan dan rotasi. Makalah juga mendemonstrasikan beberapa teknik pemodelan baru. Yang pertama adalah kondisi batas slip dalam tiga dimensi, di mana tegangan geser pembatas

diterapkan pada permukaan dan material dibiarkan tergelincir pada pahat. Yang kedua melibatkan pengaturan tegangan geser pembatas sehingga kekuatan las model cocok yang diperoleh secara eksperimental. Teknik terakhir adalah memasukkan profil suhu dengan menginterpolasi hasil dari model termal. Hal ini meniadakan kebutuhan untuk menyelesaikan profil termal dalam hubungannya dengan model aliran. Model CFD dari pengelasan butt berbeda dari baja aluminium diimplementasikan menggunakan software FE Comsol v4.3 (Idagawa,2013). Model mengasumsikan perilaku material viscoplastik dan dikalibrasi menggunakan pengukuran suhu untuk dua offset pahat yang berbeda (+0,5 dan +1,5 mm) sehubungan dengan garis sambungan. Model dapat mereproduksi suhu terukur maksimum dan masukan panas, tetapi laju pendinginan lebih tinggi daripada yang eksperimental. Aliran material yang disimulasikan adalah aliran laminar dan bergantung pada geometri pahat. Model tersebut juga dapat memberikan informasi tentang mekanisme utama pembangkitan panas untuk setiap material: gesekan pada baja dan deformasi plastik pada aluminium.

Model FE berdasarkan mekanika padat dikembangkan untuk mempelajari pola aliran dan tegangan sisa dalam proses FSW (Zhang,2005; Zhang,2005). Aliran logam selama FSW diselidiki menggunakan partikel pelacak. Terlihat bahwa aliran pada sisi maju dan mundur berbeda. Setelah beberapa kali rotasi, material yang berputar di sekitar ujung pena akan terlepas setelah pin, terutama di sisi

depan. Sebuah model numerik 3D disajikan untuk studi aliran material dalam proses FSW (Wang,2007). Hasil penelitian menunjukkan bahwa material di depan pin bergerak ke atas karena efek ekstrusi dari pin dan berputar dengan pin. Di belakang alat yang berputar, material mulai bergerak ke bawah dan mengendap di belakang. Sebagian besar aliran material dalam proses FSW bersifat tangensial. Ada pusaran di sisi yang maju dan dengan peningkatan kecepatan translasi, aliran material terbalik di sisi yang maju menjadi lebih cepat. Bahu dapat meningkatkan kecepatan aliran material di kedua arah radial dan arah singgung di dekat permukaan atas. Proses FSW dimodelkan dengan menggunakan program berbasis FE untuk menghasilkan peta termal material dan aliran massa yang sesuai (Santiago, 2009). Hasil termal numerik dibandingkan dengan peta termo-grafis eksperimental dan hasil aliran material numerik dibandingkan dengan menggunakan teknik visualisasi aliran material, dengan persetujuan yang dapat diterima.

Model perpindahan panas transien untuk alat dan benda kerja dalam proses FSW disajikan (Song,2003; Song,2004). Sebuah koordinat bergerak diperkenalkan untuk mengurangi kesulitan pemodelan generasi panas karena pergerakan pin pahat. Metode beda hingga digunakan untuk menyelesaikan persamaan energi. Jaring kisi yang tidak seragam dibuat untuk perhitungan guna meningkatkan resolusi suhu di dekat pahat. Aliran material di FSW di bawah parameter proses yang berbeda disimulasikan menggunakan teknik FE berdasarkan mekanika kontinum nonlinier

(Zhang,2005,2006,2007). Distribusi regangan plastis ekivalen berkorelasi baik dengan distribusi zona mikrostruktur pada lasan. Aliran material dapat dipercepat dengan peningkatan kecepatan translasi dan kecepatan sudut pin. Pola aliran material 3D dapat dibandingkan dengan kasus 2D untuk menunjukkan bahwa aliran material yang diperoleh dalam simulasi numerik 2D sesuai dengan aliran di dekat permukaan dasar yang diperoleh dalam simulasi 3D (Zhang,2007). Distribusi regangan plastis yang setara juga menunjukkan bahwa bahu dapat mempengaruhi perilaku aliran material di dekat permukaan atas dan bahwa efek bahu menjadi lebih lemah di dekat permukaan bawah. Ini menunjukkan bahwa case 2D sesuai dengan aliran di dekat permukaan bawah dalam case 3D.

Evolusi tekstur selama FSW baja tahan karat diselidiki menggunakan model plastisitas poli-kristal (Cho,2005,2008). Pengaruh kondisi gesekan dengan pin pahat dan bahu pada aliran dalam arah ketebalan diperiksa dalam kaitannya dengan dampaknya pada tekstur kristalografi yang berkembang. Tren penguatan dan pelemahan tekstur dibahas dalam kaitannya dengan besaran relatif laju deformasi dan putaran. Tekstur yang dihitung dibandingkan dengan pengukuran difraksi hamburan balik elektron dan dibahas sehubungan dengan distribusinya sepanjang orientasi serat dan juga sehubungan dengan komponen tekstur dominan di sepanjang serat. Dalam studi sistematis, model termo-mekanis yang digabungkan sepenuhnya dari proses FSW dikembangkan (Zhang,2008,2009,2011). Hasil

penelitian menunjukkan bahwa rotasi bahu dapat mempercepat aliran material di dekat permukaan atas. Deformasi material dan bidang suhu juga dapat dikaitkan dengan evolusi mikrostruktur. Tekstur dan tampilan sambungan FSW dapat berkorelasi dengan baik dengan distribusi regangan plastik yang setara di permukaan atas. Bidang suhu dalam proses FSW kira-kira simetris di sekitar jalur pengelasan. Aliran bervariasi dengan ketebalan material yang berbeda.

Sebuah studi tentang proses AA2024-T3 FSW dengan ketebalan material yang berbeda telah dilakukan (Zhang,2011). Hasil penghitungan menunjukkan bahwa aliran material di sisi mundur dan sisi depan lebih tinggi. Oleh karena itu, tingkat tergelincir di sisi mundur dan depan lebih rendah daripada di sisi belakang dan depan. Inilah alasan mengapa fluks panas pada trailing dan sisi depan lebih tinggi, yang menyebabkan suhu yang lebih tinggi di wilayah ini untuk pelat tipis dan tebal. Energi yang memasuki pelat las menyumbang lebih dari 50% dari total energi dan sekitar 85% energi berasal dari panas gesekan dalam FSW AA2024-T3. Keseimbangan panas dihasilkan oleh efek mekanis. Metode FE digunakan untuk memodelkan aliran material paduan Al 6061-T6 dalam proses FSW dan untuk menetapkan hubungan antara aliran material dan kecepatan sudut pin (Zhang,2005,2009,2011). Dengan peningkatan kecepatan sudut, aliran material menjadi lebih cepat. Bahan di depan pin bergerak ke arah putaran dan ke atas karena efek ekstrusi

dari pin. Material di belakang pin didorong ke bawah, selama proses FSW berkelanjutan.

Arah aliran material selama FSW dari poli-vinil klorida transparan (PVC) diselidiki menggunakan kamera video kecepatan tinggi (Shimoda,2011). Tujuannya adalah untuk mensimulasikan aliran dalam paduan aluminium. Pada saat yang sama, kecepatan aliran material diukur dengan kecepatan gambar partikel (PIV). Aliran material juga disimulasikan secara numerik menggunakan perangkat lunak DEFORM-3D FE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aliran material ke arah yang berbeda di sisi maju dan mundur. Kecepatan materil berkisar dari sekitar 2 hingga 20 mm / s di sisi depan dan dari 1 hingga 5 mm / detik di sisi mundur. Perilaku material dan fitur mekanis dalam pengelasan non-line dipelajari untuk membantu pemahaman tentang mekanisme FSW (Zhang,2006). Hasilnya menunjukkan bahwa aliran material di sekitar pin pada sisi yang mundur jauh lebih cepat daripada aliran material di sisi yang maju. Juga bahan di dekat permukaan atas mengalir paling cepat. Memindahkan pin ke sisi depan akan meningkatkan kecepatan aliran material di sekitar pin. Memvariasikan arah translasi dari pin mengubah hukum distribusi aliran material.

Aliran material di FSW dari paduan aluminium T-joint diselidiki oleh (Fratini et al.,2009). Mereka memvariasikan parameter teknologi dan geometris yang paling relevan baik dalam simulasi numerik maupun eksperimen. Penelitian mereka menyelidiki aliran logam, berbagai tes eksperimental dan observasi. Mereka menggunakan foil kuningan tipis

sebagai penanda, ditempatkan pada antarmuka dari dua blanko yang akan dilas. Beberapa kesimpulan yang relevan tentang mekanisme proses dan aliran material aktual yang menentukan ikatan material diuraikan, memungkinkan wawasan tentang FSW sambungan-T. Sebuah 3D elastic-plastik dan model FE termo-mekanis digabungkan untuk FSW dari 7075 pelat paduan aluminium dikembangkan berdasarkan kode eksplisit dinamis ABAQUS / eksplisit (Guo,2012). Proses FSW dari 7075 aluminium alloy plate disimulasikan dan perilaku aliran material dianalisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada arah horizontal pelat, dihasilkan dua pola migrasi material: (1) material berputar dengan pahat dan akhirnya mengendapkan rongga tentatif di belakang pin; (2) transfer material dalam mode aliran laminar. Model FE viscoplastik termo-mekanis berpasangan berdasarkan karakter FSSW disajikan oleh (Gao et al.,2012). Model dikalibrasi dengan membandingkan riwayat suhu yang diperoleh dari simulasi dengan data eksperimen dan selanjutnya digunakan untuk menyelidiki distribusi regangan efektif di zona lasan serta aliran material dan bentuk zona pengadukan. Model aliran termal / material gabungan dari proses FSW dikembangkan dan diterapkan pada penggabungan ekstrusi paduan aluminium (7042-T6) yang dimodifikasi Sc (Hamilton,2013). Model tersebut menunjukkan bahwa material permukaan ditarik dari sisi retreating ke zona pengelasan dimana material tersebut disisipkan dengan material in situ. Karena kontak gesekan dengan bahu, bahan permukaan lebih panas daripada bahan in situ, sehingga mikrostruktur las akhir terdiri dari pita

bahan dengan riwayat suhu yang berbeda. Berdasarkan simulasi numerik dan data analisis termal dari kalorimetri pemindaian diferensial, mekanisme pembentukan onion ring dalam zona lasan disajikan.

Aliran material benda kerja dan pengadukan / pencampuran selama FSW diselidiki secara komputasi oleh (Grujicic et al.,2012). Alat FSW diperlakukan sebagai komponen Lagrangian, sedangkan material benda kerja diperlakukan sebagai komponen Eulerian. Analisis komputasi Eulerian / Lagrangian berpasangan yang digunakan dari proses FSW adalah karakter termo-mekanis dua arah, sementara suhu diizinkan untuk memengaruhi aspek mekanis model melalui sifat material yang bergantung pada suhu. Bahan benda kerja diwakili menggunakan versi modifikasi dari model klasik John-son-Cook sedangkan bahan perkakas FSW dimodelkan sebagai bahan isotropik linier-elastis. Hasil yang berkaitan dengan aliran material selama FSW dibandingkan dengan rekan eksperimental mereka. Model volume terbatas FSW dibuat berdasarkan perangkat lunak ANSYS FLUENT dan digunakan untuk mempertimbangkan geometri praktis dari alat rotasi dan hubungan antara parameter material dan suhu (Ji,2012). Pengaruh geometri bahu dan geometri pin pada perilaku aliran plastik material dipelajari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan aliran material di dalam lasan ditingkatkan dengan mengurangi sudut kerucut dari pin atau dengan mengurangi lebar alur ulir. Ketika alat rotasi dengan pin sekrup kiri berputar searah jarum jam, arah aliran

material di dekat pin adalah ke bawah sedangkan arah aliran di dekat zona yang terpengaruh termal-mekanis adalah ke atas, yang berlawanan dengan arah untuk pin sekrup kanan.

Dalam studi simulasi sebelumnya, kondisi kontak yang terjadi di FSW umumnya digambarkan sebagai stick dan / atau slip, menurut metodologi yang berbeda tetapi deskripsi ini memiliki keterbatasan. Sebuah metode kombinasi baru disajikan untuk mengkarakterisasi kondisi kontak yang terjadi selama proses FSW (Wang, 2013). Hasil termal dan mekanis dari model dengan kondisi stick dan slip yang ditentukan dibandingkan untuk mengidentifikasi hasil dan kelemahan dari asumsi kondisi kontak yang berbeda. Metode baru ini menghasilkan perkiraan pembangkitan panas yang lebih masuk akal, sebagaimana divalidasi oleh pengukuran termal eksperimental. Simulasi termo-mekanis dari proses FSBW dan FSSW dilakukan untuk lembaran AA5083-H18 menggunakan kode FVM komersial (Kim, 2009). Simulasi didasarkan pada formulasi Eulerian. Untuk proses FSBW, kode dinamika fluida komputasi, STAR-CCM +, digunakan dalam kondisi steady state. Diketahui bahwa dengan memasukkan sifat termal yang sesuai dari backing plate (landasan), keakuratan hasil simulasi meningkat secara signifikan. Untuk proses FSSW, kode dinamika fluida komputasi, STAR-CD, digunakan dalam kondisi tidak stabil untuk memahami pengaruh geometri pin pada aliran material dan kekuatan las.

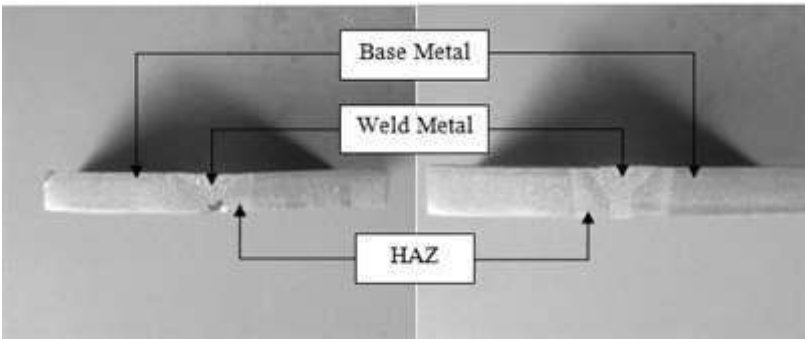
Model FE plastik kental 3D dapat dibuat berdasarkan mekanika fluida komputasi. Material selama proses

pengelasan dianggap sebagai fluida non-Newtonian yang mematuhi hukum konstitutif Norton-Hoff, dan disipasi kental diasumsikan sebagai sumber panas yang unik. Model ini digunakan untuk mensimulasikan aliran material dan perpindahan panas secara numerik dalam proses FSW (Su, 2013). Bidang kecepatan digunakan untuk menghitung aliran aliran material. Aliran viskoplastik 3D dan perpindahan panas selama FSW baja ringan diselidiki secara eksperimental dan teoritis oleh (Nandan et al., 2007). Persamaan yang melibatkan kekekalan massa, momentum dan energi diselesaikan dalam 3D menggunakan sifat termo-fisik variabel spa dan metodologi yang diadaptasi dari pekerjaan sebelumnya yang mapan dalam pengelasan fusi. Viskositas non-Newtonian untuk aliran logam dihitung, dengan mempertimbangkan suhu dan tegangan aliran yang bergantung pada laju regangan. Hasil yang dihitung menunjukkan aliran viscoplastik yang signifikan di dekat permukaan alat, dan konveksi ditemukan sebagai mekanisme utama untuk perpindahan panas di wilayah ini. Aliran material 3D di bawah parameter proses yang berbeda dalam proses FSW dari 1018 baja dipelajari dengan menggunakan model konstitutif yang bergantung pada laju (Zhang, 2008). Hasil numerik menunjukkan bahwa batas bahu dapat mempengaruhi aliran material di dekat antarmuka pelat bahu. Campuran material di setengah bagian bawah FSW dapat memperoleh manfaat dari peningkatan kecepatan sudut atau penurunan kecepatan pengelasan. Tetapi cacat dapat terjadi jika kecepatan sudut sangat tinggi atau kecepatan translasi sangat kecil.

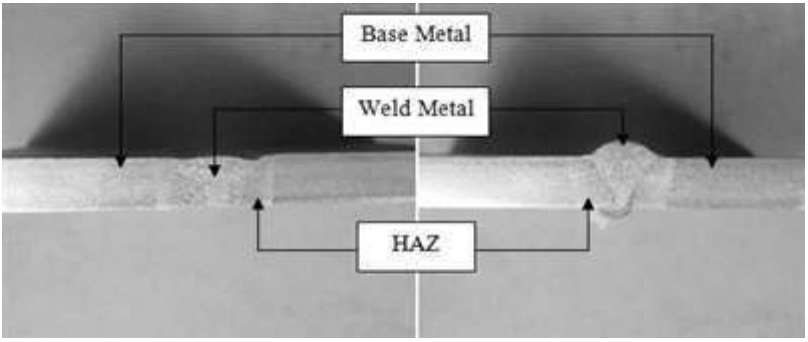
BAB 8 STUDI KASUS

8.1 Pengamatan Makro

Pengamatan makro terhadap hasil lasan dilakukan untuk mengetahui bentuk dan lebar daerah HAZ *(Heat Effected Zone)*. Hasil pengamatan dalam pengujian makro terhadap spesimen seperti pada Gambar 8.1-8.8 berikut ini:

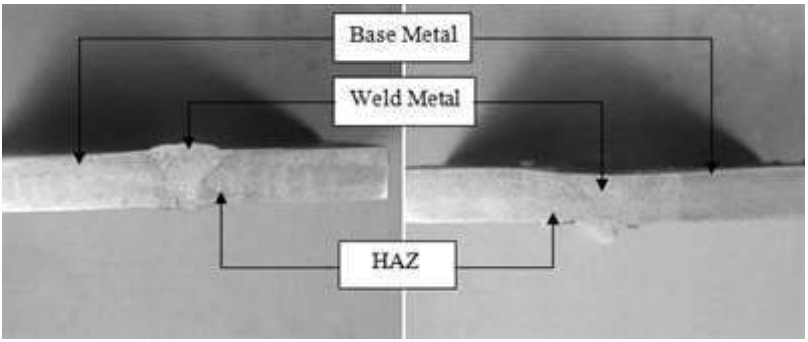


Gambar 8.1 Spesimen A1 RB 130



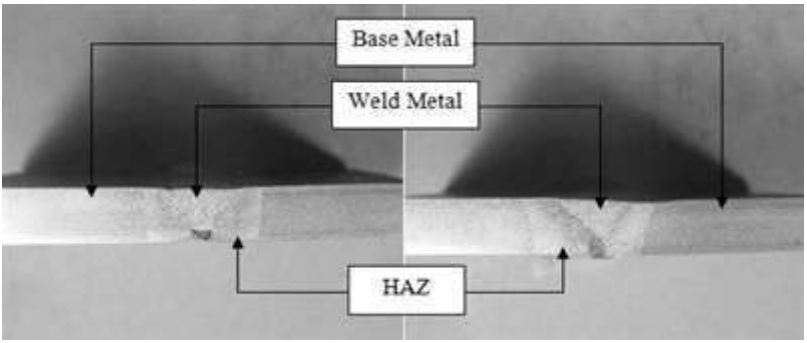
Gambar 8.2 Spesimen B1 LB 130

Gambar 8.3 Spesimen A2 RB 140



Gambar 8.4 Spesimen B2 LB 140

Gambar 8.5 Spesimen A3 RB 150



Gambar 8.6 Spesimen B3 LB 150

Gambar 8.7 Spesimen A4 RB 160 **Gambar 8.8** Spesimen B4 LB 160

Pengamatan secara makro pada hasil pengelasan selain digunakan untuk mengetahui bentuk dan lebar daerah *HAZ*, juga dapat digunakan untuk mengamati kedalaman penetrasi lasan. Bentuk dan lebar *HAZ* pada dasarnya dipengaruhi oleh heat input dan kecepatan pengelasan. Pada spesimen yang uji didapatkan lebar *HAZ* yang berbeda, spesimen yang menggunakn filler RB 26 AWS E6013 dan filler LB 52 AWS E7016 didapatkan lebar *HAZ* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.1-8.2 berikut ini:

Tabel 8.1 Menggunakan filler RB 26 AWS E6013

No Spesimen	Arus	Lebar *HAZ*
A1	130	3,60 mm
A2	140	4,25 mm
A3	150	5,00 mm
A4	160	5,50 mm

Tabel 8.2 Menggunakan filler LB 52 AWS E7016

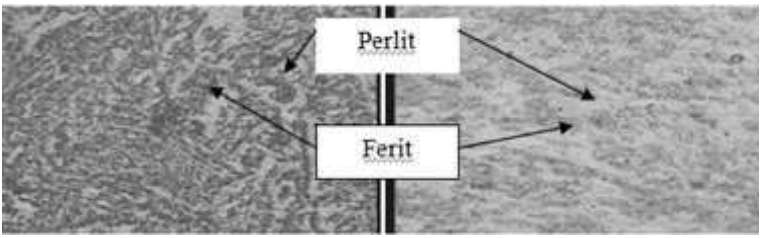
No Spesimen	Arus	Lebar *HAZ*
B1	130	3,60 mm
B2	140	4.55 mm
B3	150	5,26 mm
B4	160	5,70 mm

Dari 8 spesimen yang diuji didapatkan lebar *HAZ* yang berbeda – beda antara spesimen A dan spesimen B. Dimana spesimen A yang menggunakan filler RB 26 AWS E6013 dengan parameter pengelasan arus 160 A, menghasilkan lebar *HAZ* yang paling besar yaitu 5,50 mm, sedangkan spesimen dengan parameter arus yang rendah yaitu 130 A menghasilkan lebar *HAZ* yang paling kecil yaitu 3,60 mm. Pada spesimen B dengan menggunakan filler LB 52 AWS E7016 dengan parameter pengelasan 160 A menghasilkan lebar *HAZ* yang paling besar yaitu 5,70 mm sedangkan yang menggunakan arus yang rendah yaitu 130 A menghasilkan lebar *HAZ* yang kecil yaitu 3,60.

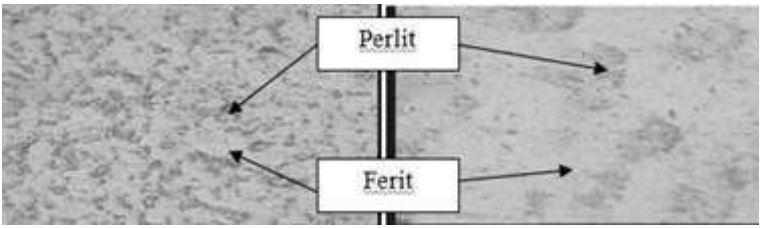
8.2 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur mikro atau ukuran butir didaerah *Weld Metal, HAZ* dan *Base Metal* sehingga dapat diketahui perubahan dan fenomena – fenomena yang terjadi pada hasil lasan.

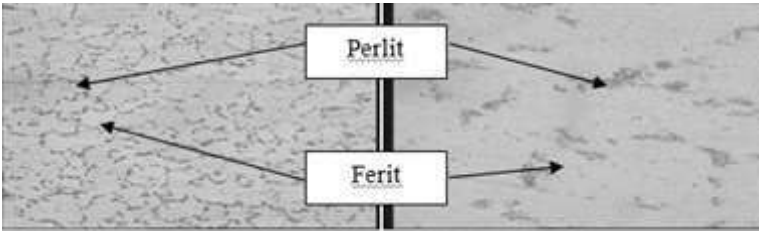
➢ **Arus 130 Spesimen A1 Filler RB 26 AWS E6013**



Gambar 8.9 Hasil Foto Mikro *Weld Metal* perbesaran 100x dan 500x



Gambar 8.10 Hasil Foto Mikro *HAZ* Perbesaran 100x dan 500x

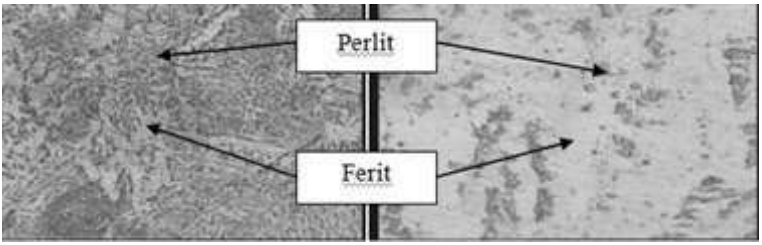


Gambar 8.11 Hasil Foto Mikro *Base Metal* Perbesaran 100x dan 500x

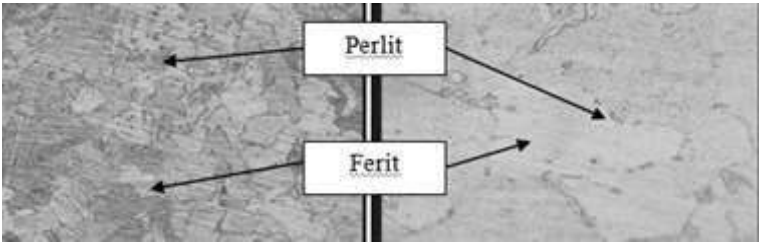
Pada spesimen dengan menggunakan arus 130 dan filler 26 AWS E6013 pada Gambar 8.9-8.11 yang terjadi pada daerah *Weld Metal* didominasi oleh stuktur perlit sedangkan struktur feritnya sedikit ini mengakibatkan sifat kekerasan pada baja tersebut menjadi rendah. Sedangkan pada daerah *HAZ* didominasi struktur ferit dan struktur perlitnya tidak dominan ini disebabkan karena elektroda E6013 banyak mengandung kalium sehingga sehingga memudahkan pada arus yang rendah. Pada daerah *Base Metal* struktur ferit mendominasi dibandingkan dengan struktur perlit ini

disebabkan karena elektroda yang digunakan banyak mengandung kalium.

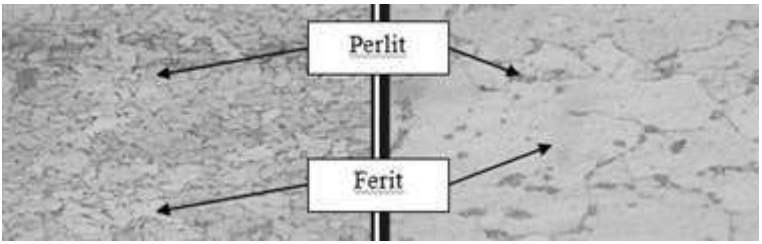
➢**Arus 140 Spesimen A2 Filler RB 26 AWS E6013**



Gambar 8.12 Hasil Foto Mikro *Weld Metal* Perbesaran 100x dan 500x



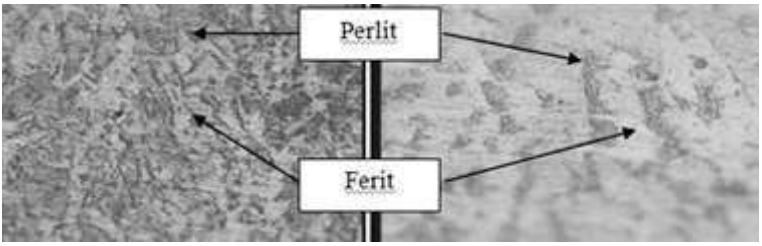
Gambar 8.13 Hasil Foto Mikro *HAZ* Perbesaran 100x dan 500x



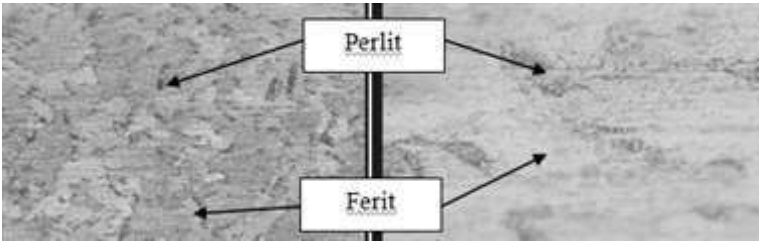
Gambar 8.14 Hasil Foto Mikro *Base Metal* Perbesaran 100x dan 500x

Pada spesimen dengan menggunakan arus 140 dan filler 26 AWS E6013 pada Gmabar 8.12-8.14 yang terjadi pada daerah *Weld Metal* didominasi oleh struktur ferit sedangkan struktur perlitnya sedikit ini berbanding terbalik dengan yang menggunakan arus 130, baja tersebut akan medapatkan tingkat keuletan yang tinggi. Sedangkan untuk daerah *HAZ* masih didominasi dengan struktur ferit dan struktur perlitnya bertambah. Pada daerah *Base Metal* masih didominasi struktur ferit ini dikarnakan elektroda E6013 banyak mengandung kalium.

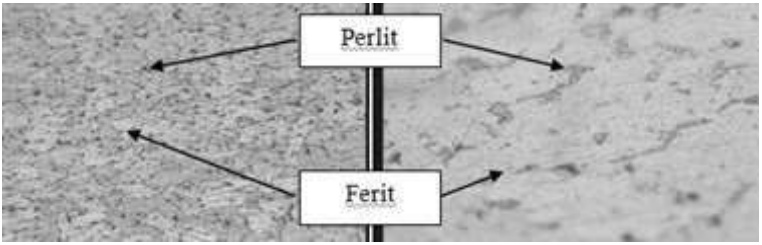
➢**Arus 150 Spesimen A3 Filler RB 26 AWS E6013**



Gambar 8.15 Hasil Foto Mikro *Weld Metal* Perbesaran 100x dan 500x



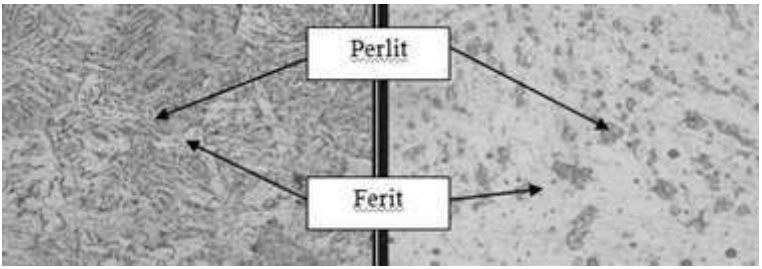
Gambar 8.16 Hasil Foto Mikro *HAZ* Perbesaran 100x dan 500x



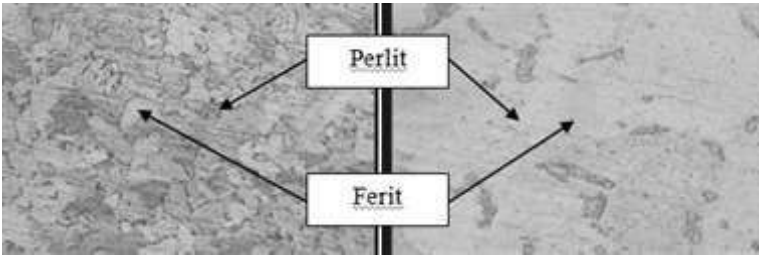
Gambar 8.17 Hasil Foto Mikro *Base Metal* Perbesaran 100x dan 500x

Pada spesimen dengan menggunakan arus 150 dan filler RB 26 AWS E6013 pada Gambar 8.15-8.17 yang terjadi pada daerah *Weld Metal* didominasi struktur ferit tetapi struktur perlitnya semakin banyak ini dikarnakan arus yang digunakan semakin besar. Sedangkan untuk daerah *HAZ* masih didominasi struktur ferit karena masih menggunakan filler E6013 yang mengandung banyak kalium, dan pada daerah *Base Metal* masi didominasi ferit sedangkan daerah perlitnya masih sedikit.

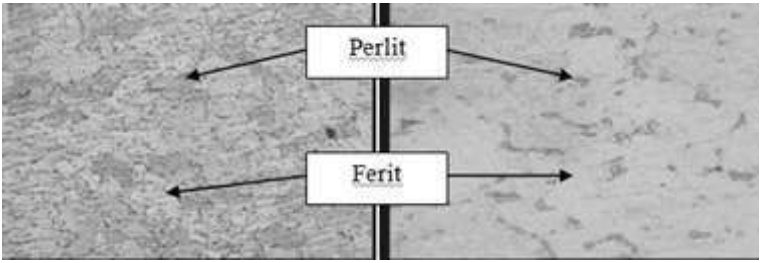
- **Arus 160 Spesimen A4 Filler RB 26 E6013**



Gambar 8.18 Hasil Foto Mikro *Weld Metal* Perbesaran 100x dan 500x



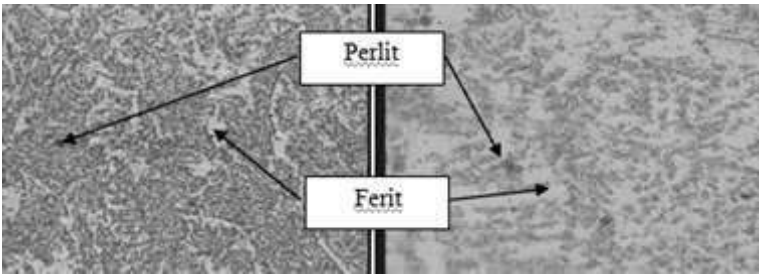
Gambar 8.19 Hasil Foto Mikro *HAZ* Perbesaran 100x dan 500x



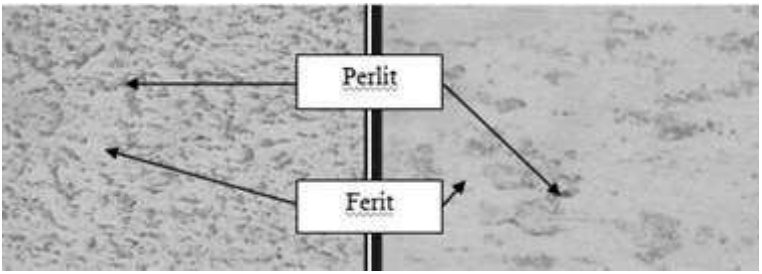
Gambar 8.20 Hasil Foto Mikro *Base Metal* Perbesaran 100x dan 500x

Pada spesimen dengan menggunakan arus 160 dan filler RB 26 AWS E6013 pada Gambar 8.18-8.20 yang terjadi pada daerah *Weld Metal* didominasi struktur ferit tetapi struktur perlit semakin besar karena arus yang digunakan semakin besar, sedangkan pada daerah *HAZ* masih didominasi daerah ferit meskipun menggukan arus yang besar dan pada daerah *Base Metal* juga sama masih didominasi struktur ferit meskipun menggunakan arus yang besar.

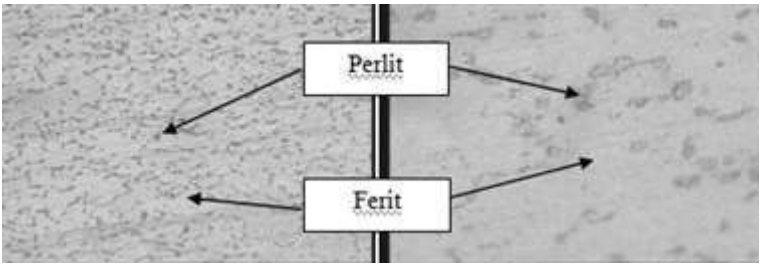
- **Arus 130 Spesimen B1 Filler LB 52 *AWS* E7016**



Gambar 8.21 Hasil Foto Mikro *Weld Metal* Perbesaran 100x dan 500x



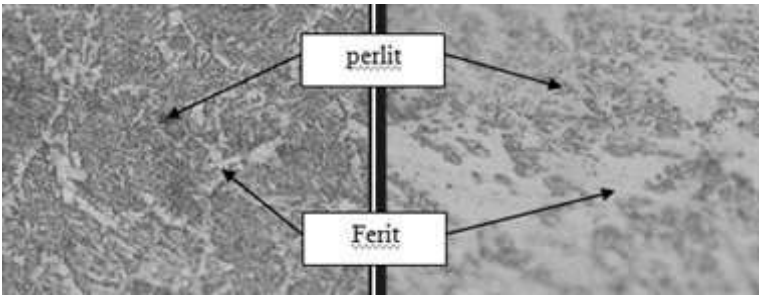
Gambar 8.22 Hasil Foto Mikro *HAZ* Perbesaran 100x dan 500x



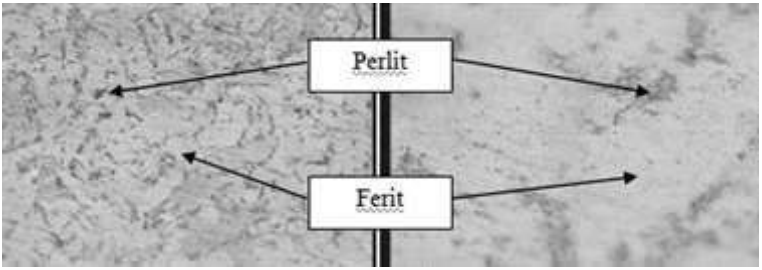
Gambar 8.23 Hasil Foto Mikro *Base Metal* Perbesaran 100x dan 500x

Pada spesimen dengan menggunakan arus 130 dan filler LB 52 AWS E7016 pada Gambar 8.21-8.23 yang terjadi pada daerah *Weld Metal* didominasi struktur perlit sedangkan struktur ferit sedikit ini dikarnakan ferit dan karbida terbentuk secara bersamaan dan keluarnya saling bercampur, sedangkan untuk daerah *HAZ* didominasi struktur ferit sedangkan struktur perlitnya tidak begitu banyak mungkin karena masi menggunakan arus 130 sehingga struktur perlitnya tidak terlalu banyak, sedangkan untuk daerah *Base Metal* didominasi struktur ferit sedangkan struktur feritnya nampak sedikit.

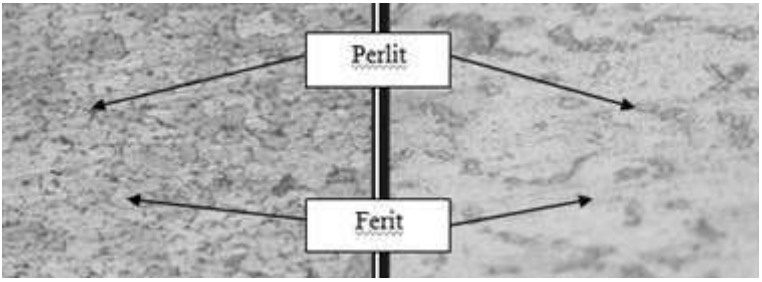
- **Arus 140 Filler Spesimen B2 LB 52 *AWS* E7016**



Gambar 8.24 Hasil Foto Mikro *Weld Metal* Perbesaran 100x dan 500x



Gambar 8.25 Hasil Foto Mikro *HAZ* Perbesaran 100x dan 500x



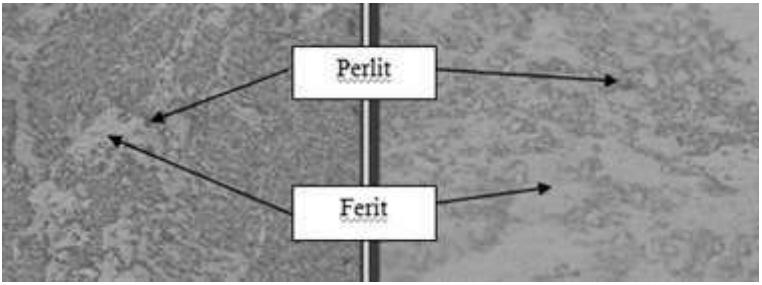
Gambar 8.26 Hasil Foto Mikro *Base Metal* Perbesaran 100x dan 500x

Pada spesimen yang menggunakan arus 140 dan filler LB 52 AWS E7016 pada Gambar 8.24-8.26 yang terjadi pada

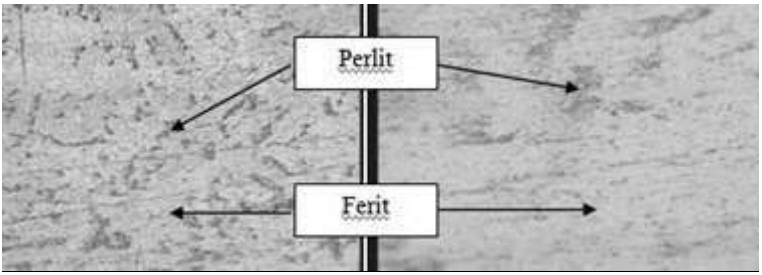
daerah *Weld Metal* didominasi struktur perlit sedangkan struktur feritnya sedikit mungkin ini terjadi karena laju pendinginannya dilakukan secara perlahan – lahan maka atom karbon dapat berdifusi lebih lama dan dapat menempuh jarak lebih jauh, sehingga diperoleh bentuk perlit yang besar, sedangkan untuk daerah *HAZ* didominasi struktur ferit sedangkan struktur perlitnya sedikit dan pada daerah *Base Metal* didominasi struktur ferit sedangkan struktur perlitnya lumayan banyak mungkin karena arus yang digukan semakin besar.

.

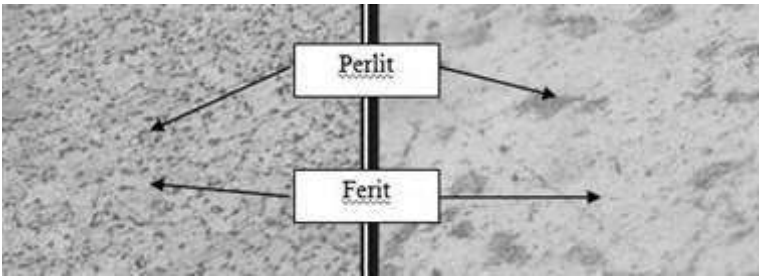
- **Arus 150 Filler Spesimen B3 LB 52 *AWS* E7016**



Gambar 8.27 Hasil Foto Mikro *Weld Metal* Perbesaran 100x dan 500x



Gambar 8.28 Hasil Foto Mikro *HAZ* Perbesaran 100x dan 500x

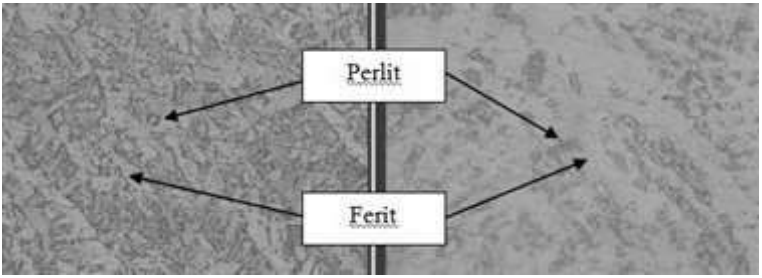


Gambar 8.29 Hasil Foto Mikro *Base Metal* Perbesaran 100x dan 500x

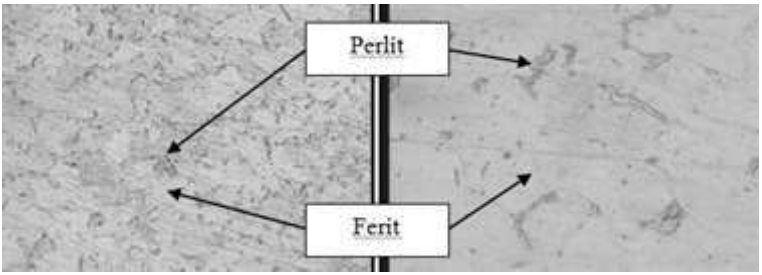
Pada spesimen dengan menggunakan arus 150 dan filler LB 52 AWS E7016 pada Gambar 8.27-8.29 yang terjadi pada daerah *Weld Metal* didominasi struktur perlit dan sturktur ferit tidak begitu dominan sedangkan untuk daerah *HAZ* didominasi struktur ferit dan struktur perlit tidak begitu sedikit dan pada daerah *Base Metal* didominasi struktur ferit dan struktur perlitnya tidak begitu banyak.

- **Arus 160 Filler Spesimen B4 LB 52 *AWS* E7016**

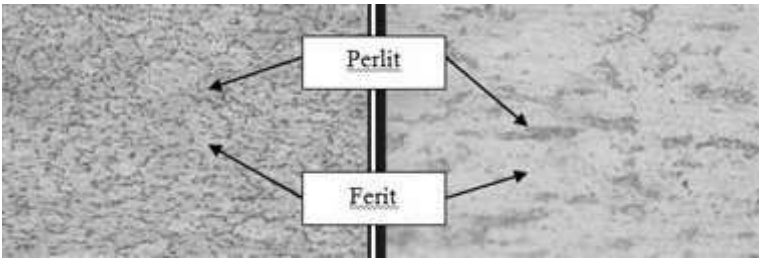
Pada spesimen dengan menggunakan arus 160 dan filler LB 52 AWS E7016 pada Gambar 8.30-8.32 yang terjadi pada daerah Weld Meatal didominasi oleh struktur perlit sedangkan struktur feritnya sedikit banyak dibandingkan yang menggunakan arus 150 mungkin ini karena menggunakan filler E7016 yang biasa digunakan untuk pengelasan yang akan mengalami tekanan sedangkan untuk daerah HAZ didominasi oleh struktur ferit yang nampak semakin jelas tetapi struktur perlitnya sangat sedikit dan pada daerah Base Metal didominasi struktur ferit sedangkan struktur perlitnya tidak begitu banyak.



Gambar 8.30 Hasil Foto Mikro *Weld Metal* Perbesaran 100x dan 500x



Gambar 8.31 Hasil Foto Mikro *HAZ* Perbesaran 100x dan 500x



Gambar 8.32 Hasil Foto Mikro *Base Metal* Perbesaran 100x dan 500x

- **Analisis Struktur Mikro**

Pada daerah *Weld Metal* spesimen yang menggunakan filler Rb 26 AWS E6013 didominasi oleh struktur ferit pada seluruh fariasi las, sedangkan untuk struktur perlitnya cenderung semakin banyak seiring dengan penggunaan arus yang semakin besar, seperti ditunjukan pada gambar 4.9, 4.12, 4.15, 4.18. Sedangkan spesimen yang menggunakan filler Lb 52 AWS E7016 didominasi oleh struktur perlit lebih besar dibandingkan dengan struktur ferit,

tetapi jika menggukan arus yang semakin besar struktur perlit cenderung berkurang. Ini ditunjukkan pada gambar 4.21, 4.24, 4.27, 4.30. penggunaan elektroda tipe E6013 menyebabkan jumlah ferit yang lebih banyak jika menggunakan arus yang rendah dibandingkan dengan penggunaan elektroda E7016. Karena elektroda E6013 yang mengandung lebih banyak kalium memudahkan pemakaian pada voltage mesin yang rendah. Sedangkan untuk elektroda E7016 elektroda ini mengandung hidrogen yang rendah kurang dari 0,5 % sehingga diposit las dapat bebas dari porositas sehingga struktur perlit dapat mendominasi dibandingkan dengan struktur ferit.

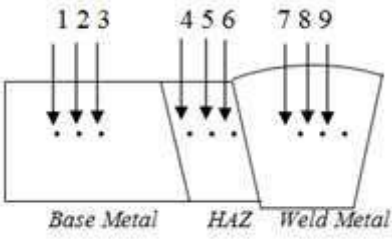
Daerah HAZ pada spesimen A yang menggunakan filler Rb 26 AWS E6013 nampak didominasi struktur ferit yang semakin banyak seiring dengan meningkatnya arus yang diberikan pada pengelasan ini ditunjukkan pada gambar 4.10, 4.13, 4.16, 4.19. karena elekroda E6013 mengandung lebih banyak kalium. Sedangkan pada spesimen B dengan menggunakan filler Lb 52 AWS E7016 nampak didominasi struktur ferit sedangkan untuk daerah perlit nampak semakin bertambah dengan bertambahnya arus yang diberikan. Ini ditunjukkan pada gambar 4.22, 4.25, 4.28, 4.31. Karena elektroda E7016 ini dipakai untuk pengelasan yang memerlukan mutu tinggi dan bebas dari porositas.

Daerah *Base Metal* pada spesimen A didominasi struktur ferit yang tampak berwarna putih seperti pada gambar 4.11, 4.14, 4.17, dan 4.20. Sedangkan pada spesimen B juga didominasi oleh struktur ferit seperti ditunjukkan pada

gambar 4.23, 4.26, 4.29, dan 4.32. Banyaknya struktur ferit ini terjadi karena larutan padat karbon dalam besi maksimumnya 0,025 % pada temperatur 723 C. pada temperatur kamar, kandungan karbonnya 0,008 % . Sifat ferit adalah lunak, ulet, dan tahan korosi.

7.3 Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan metode pengujian kekerasan *Vickers.* Adapun titik identasi uji kekerasan *Vickers* yang digunakan seperti pada Gambar 8.33 berikut:



Gambar 8.33 Posisi titik pengujian

Data nilai distribusi kekerasan las dengan menggunakan elektroda Rb 26 AWS E6013 dan Lb 52 AWS E7016 dengan arus yang berbeda, dimana titik 1,2,3 merupakan daerah *Base Metal,* titik 4,5,6 adalah daerah HAZ

dan titik 7,8,9 daerah *Weld Metal.*nilai kekerasan dari setiap spesimen dimasukkan kedalam table 8.3 dibawah ini:

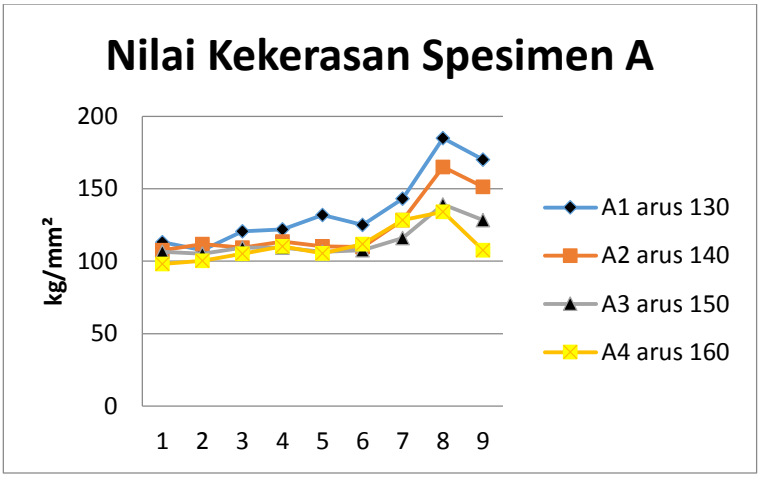
Tabel 8.3 Hasil uji kekerasan *Vickers* menggunakan elektroda Rb 26 AWS E6013

Titik	Daerah	Spesimen			
		Arus 130	Arus 140	Arus 150	Arus 160
1	Base Metal	113,1	107,7	106,6	98,0
2		107,7	111,9	105,1	100,3
3		120,7	109,3	109,3	105,1
Rata – Rata		**113,8**	**109,6**	**107**	**101,1**
4	HAZ	121,9	113,6	109,3	110,3
5		131,9	110,3	106,6	105,3
6		125,1	107,7	107,7	111,9
Rata – Rata		**126,3**	**111,2**	**161,8**	**109,1**

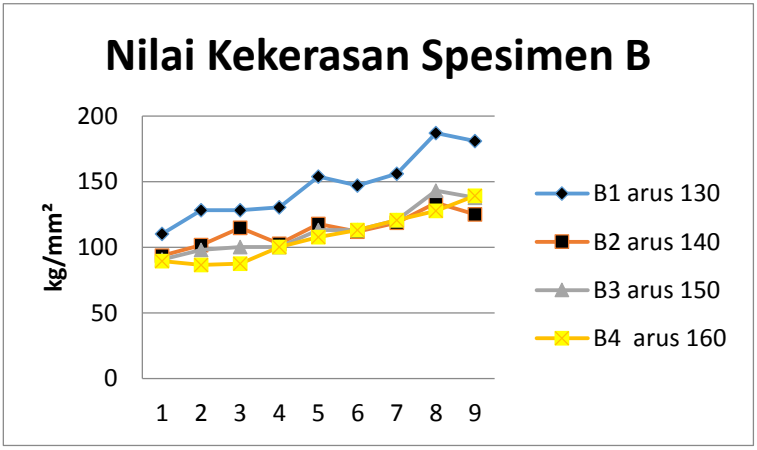
7		143,1	128,4	115,9	128,4
8	Weld Metal	185	165	139,2	134,0
9		170	151,4	128,4	107,7
Rata – Rata		**166**	**148,2**	**127,8**	**123,3**

- **Analisis Hasil Uji Kekerasan**

Pengujian kekerasan dilakukan dijurusan Teknik Matrial ITS menggunakan metode *Vickers.* Pengukuran nilai kekerasan dilakukan pada daerah *Bese Metal, HAZ* dan *Weld Metal.* Hasil pengujian kekerasan yang dibandingkan adalah logam lasan yang sama namun berbeda arus dan elektroda. Dimana pada titik 1,2,3 adalah daerah *Bese Metal*, titik 4,5,6 merupakan daerah HAZ dan titik 7,8,9 daerah *Weld Metal.* Kemudian dibuat grafik distribusi kekerasannya seperti pada Gambar 8.34-8.35 berikut:



Gambar 8.34 Perbandingan nilai kekerasan spesimen A



Gambar 8.35 Perbandingan nilai kekerasan spesimen B

Tingginya nilai kekerasan di daerah *Weld Metal* bila dibandingkan di daerah *Base Metal* dan *HAZ.* Karena di daerah *Weld Metal* menggunakan elektroda E6013 dan E7016. Dimana elektroda E6013 yang menganandung lebih banyak kalium yang memudahkan penggunaan pada voltage yang rendah. Penggunaan elektroda E7013 elektroda ini mengandung hidrogen rendah kurang dari 0,5 % sehinggah deposit las dapat bebas dari porositas sehinggah struktur perlit dapat mendominasi ini dapat dilihat pada tabel dimana nilai kekerasan pada spesimen A tidak sebesar pada spesimen B.

Nilai kekerasan pada spesimen A pada arus 130 Amper merupakan nilai kekerasan yang paling tinggi yang terletak pada daerah *Weld Metal* yaitu sebesar 166 kg/mm², sedangkan nilai kekerasan yang paling kecil terdapat pada arus 160 Amper yang terletak pada daerah *Base Metal* yaitu sebesar 101,1 kg./mm². Pada spesimen B nilai kekerasan yang paling tinggi terletak pada arus 130 Amper yang terletak pada daerah *Weld Metal* yaitu sebesar 174 kg/mm² sedangkan nilai kekerasan yang paling kecil terletak pada arus 160 Amper di daerah *Base Metal* yaitu sebesar 87 kg/mm².

Penyimpangan pada pengujian ini bisa diakibatkan struktur dari daerah lasan yang tidak homogen selain itu prosedur teknis kadang mempengaruhi nilai kekerasan, misalnya bila indentor terlalu dekat dengan tepi spesimen

dan jarak penekanan terlalu dekat kekerasan nilai spesimen uji juga sangat menentukan keakuratan hasil pengujian.

7.4 SOAL-SOAL EVALUASI Per-BAB

A. Soal BAB 1

1. Jelaskan pengertian sambungan las dan bagaimana terminology las.
2. Jelaskan klasifikasi mendasar tentang proses pengelasan,menurut standar AWS.
3. Jelaskan aplikasi dari GMAW (Gas Metal Arc Welding).
4. Apa perbedaan pressure welding proses dan nonpressure welding proses.
5. Sebutkan dan jelaskan 2 macam las potong.

B. Soal BAB 2

1. Jelaskan fungsi dan macam-macam elektroda khusus baja.
2. Bagaimana prinsip kerja las SMAW, Jelaskan dan berikan contoh aplikasinya.
3. Jelaskan kelebihan dan kekurangan las busur tanpa gas, berikan contoh aplikasinya.
4. Bagaimana prosedur penggunaan las busur rendam, berikan contoh aplikasinya.
5. Apa perbedaan las DCRP dan DCSP, berikan contoh aplikasinya.

C. Soal BAB 3

1. Jelaskan proses electro slag welding, apa kelebihan dan kekurangannya.
2. Jelaskan proses metal inert gas welding, apa kelebihan dan kekurangannya.
3. Jelaskan proses resistance welding, apa kelebihan dan kekurangannya.
4. Jelaskan proses las sinar elektron, apa kelebihan dan kekurangannya.
5. Aplikasi dari las resistance banyak digunakan pada pengelasan untuk plate-plate tipis, mengapa demikian jelaskan

D. Soal BAB 4

1. Jelaskan pembagian dasar struktur mikro material, terutama pada material baja.
2. Bagaimana langkah-langkah untuk dapat mengamati struktur mikro, jelaskan.
3. Sebutkan dan jelaskan alat-alat yang digunakan untuk mengamati struktur mikro.
4. Jelaskan efek-efek yang merugikan dari siklus thermal proses pengelasan.
5. Bagaimana cara memprediksi lebar HAZ pada hasil proses pengelasan SMAW, jelaskan dengan pendekatan analitik.

E. Soal BAB 5

1. Klasifikasikan macam-macam sambungan las, berikan contoh aplikasinya.
2. Gambarlah simbul sambungan las yang banyak digunakan pada proses pembuatan kontruksi bangunan terutama kuda-kuda.
3. Hitunglah kekuatan salah satu model sambungan yang banyak digunakan pada proses pembuatan kontruksi bangunan terutama kuda-kuda.
4. Sebutkan macam-macam cacat hasil proses pengelasan, dan bagaimana cara meminimalisir terjadinya cacat tersebut.
5. Bagaimana prosedur mengelas yang baik pada sambungan butt joint posisi flat.

F. Soal BAB 6

1. Buatlah prosedur pengujian dan pemerikasaan hasil proses pengelasan SMAW sambungan butt joint material baja.
2. Sebutkan dan jelaskan macam-macam pengujian hasil proses pengelasan dengan cara merusak.
3. Sebutkan dan jelaskan macam-macam pengujian hasil proses pengelasan dengan cara tidak merusak.
4. Apa yang mengakibatkan hasil dari pengujian dan pemerikasaan hasil proses pengelasan kurang tepat.

5. Buatlah suatu contoh rekomendasi pemeriksaan dan pengujian hasil proses pengelasan.

G. Soal BAB 7

1. Jelaskan proses friction stir welding dan parameter utama yang digunakan.
2. Jelaskan aplikasi dari proses friction stir welding, dan apa kelebihan dan kekurangannya.
3. Jelaskan bagian-bagian dari geometri tool fiction stir welding, berapa perbedaan kekerasan material yang direkomdasikan dengan material induk.
4. Jelaskan fungsi dari geometri bahu cekung, cembung dan normal dan bagaimana dengan aplikasi dari masing-masing geometri bahu tersebut.
5. Software apasaja yang banyak diaplikasikan untuk memprediksi aliran material dari proses friction stri welding.

DAFTAR PUSTAKA

AWS A2.4, AWS A51, ASME

ASM Metals Handbook, Vol 06

ASM Internationan Hand Book Comitte, ASM Vol 6: Welding Soldering and Brazing,1995

B. Paton, Electroslag Welding, AWS, 1962

C. Mahananda, S. Jeet and S. Kar, (2018), "Review on Application of Friction Stir Welding", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 9, Issue 4.

C.J. Dawes and W.M. Thomas, (1996), "Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys", Weld. J., vol. 75, pp. 41–45.

Colegrove PA. Modelling and development of the Trivex friction stir welding tool. Welding World 2004;48:10–26.

Colegrove PA, Shercliff HR. Two-dimensional CFD modelling of flow round profiled FSW tooling. Sci Technol Weld Join 2004;9:483–92.

Colegrove PA, Shercliff HR. 3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile. J Mater Process Technol 2005;169:320–7.

Colegrove PA, Shercliff HR. Experimental and numerical analysis of aluminium alloy 7075-T7351 friction stir welds. Sci Technol Weld Join 2003;8:360–8.

Cho JH, Dawson PR. Modeling texture evolution during friction stir welding of stainless steel with comparison to

experiments. J Eng Mater Technol, Trans ASME 2008;130:0110071–01100712.

Cho JH, Boyce DE, Dawson PR. Modeling strain hardening and texture evolution in friction stir welding of stainless steel. Mater Sci Eng A 2005;398:146–63.

Easterling, K, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths and Co, 1983

Folkhard, E, Welding Metallurgy of Stainless Steels, Springer-Verlag/Wien,1988

F. Setiawan, Mulyadi, Analisa Hasil Pengelasan Pada Baja St 42 Dengan Menggunakan Las Smaw Terhadap Lebar Haz, 2014

Fuller, C.B. (2007), Chapter 2: "Friction Stir Tooling: Tool material and designs, friction stir welding and processing", ASM International.

Fratini L, Buffa G, Micari F, Shivpuri R. On the material flow in FSW of T-joints: influence of geometrical and technological parameters. Int J Adv Manuf Technol 2009;44:570–8.

Guerra M, Schmidt C, McClure JC, Murr LE, Nunes AC. Flow patterns during friction stir welding. Mater Charact 2002;49:95–101.

Guo ZH, Zhao GY, Ke LM, Xing L, Zhu SF. Finite element analysis of materials flow behavior in friction stir welding of 7075 aluminum alloy plate. Appl Mech Mater 2012;117–119:1621–4.

Gao Z, Krumphals F, Sherstnev P, Enzinger N, Niu JT, Sommitsch C. Analysis of plastic flow during friction stir

spot welding using finite element modeling. Key Eng Mater 2012;504–506:419–24.

Grujicic M, Arakere G, Pandurangan B, Ochterbeck JM, Yen CF, Cheeseman BA, et al. Computational analysis of material flow during friction stir welding of AA5059 aluminum alloys. J Mater Eng Perform 2012;21:1824–40.

Hyoe T, Colegrove PA, Shercliff HR. Thermal and microstructure modelling in thick plate aluminium alloy 7075 friction stir welds. In: TMS annual meeting; 2003. p. 33–42.

Harsono W, Toshie O, Teknologi pengelasan Logam, Pradnya Paramita,1986

Hamilton C, Kopyscianski M, Senkov O, Dymek S. A coupled thermal/material flow model of friction stir welding applied to Sc-modified aluminum alloys. Metall Mater Trans A 2013;44:1730–40.

Introduction to Physical Metallurgy of Welding. Easterling K. 1992.

Idagawa HS, Torres EA, Ramirez AJ. CFD modeling of dissimilar aluminum-steel friction stir welds. In: ASM proceedings of the international conference: trends in welding research; 2013. p. 604–10.

Ji SD, Shi QY, Zhang LG, Zou AL, Gao SS, Zan LV. Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry. Comput Mater Sci 2012;63:218–26.

Ji SD, Zou AL, Yue YM, Luan GH, Jin YY, Li F. Numerical simulation of effect of rotational tool with screw on

material flow behavior of friction stir welding of Ti6Al4V alloy. Acta Metall Sinica (Engl Lett) 2012;25:365–73.

Kenyon,W..Dasar-dasar Pengelasan. Erlangga.1985.

Kim D, Badarinarayan H, Ryu I, Kim J, Kim C, Okamoto K, et al. Numerical simulation of friction stir welding process. Int J Mater Form 2009;2:383–6.

Kim D, Chung K, Badarinarayan H. An experimental and numerical approach to evaluate the effect of welding conditions on temperature during friction stir spot welding. In: ASM proceedings of the international conference: trends in welding research; 2009. p. 60–6.

M.R. Johnsen, (1999), "Friction Stir Welding Takes off at Boeing", Weld. J., vol. 78, pp. 35–39.

Md. Ibrahim Khan, Welding Science and Technology

Nandan R, Roy GG, Lienert TJ, Debroy T. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel. Acta Mater 2007;55:883–95.

Nandan R, Prabu B, De A, Debroy T. Improving reliability of heat transfer and materials flow calculations during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys. Weld J (Miami, Fla) 2007;86:313–22.

Nandan R, Lienert TJ, DebRoy T. Toward reliable calculations of heat and plastic flow during friction stir welding of Ti–6Al–4V alloy. Int J Mater Res 2008;99:434–44.

R.L. O'Brien, Ed., Jefferson's Welding Encyclopedia, 18th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1997, p 634

R.W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology, Butterworth

– Heine – mann / Elsevier, Burlington, MA, 2004, p 300, 301, 313, 315, 316, 320–324, 327– 330

R.W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology, Butterworth-Heine- mann / Elsevier, Burlington, MA, 2004, p 300, 301, 313, 315, 316, 320–324, 327– 330

R.W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology, Butterworth-Heine- mann / Elsevier, Burlington, MA, 2004, p 300, 301, 313, 315, 316, 320–324, 327– 330

R.S. Mishra and Z. Y. Ma, (2005), "Friction stir welding and processing", Mater. Sci. Eng. Vol.50, pp. 1-78.

R. Kumar, A. Ghosh, S. Chattopadhyaya, (2015), "Emerging Friction Stir Welding for Aluminium and its Applications", Journal of Manufacturing and Industrial Engineering, vol.14. pp. 1-6.

Seidel TU, Reynolds AP. Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique. Metall Mater Trans A 2001;32:2879–84.

Schneider JR, Beshears R, Nunes Jr AC. Interfacial sticking and slipping in the friction stir welding process. Mater Sci Eng A 2006;435-436:297–304.

Santiago D, Urquiza S, Lombera G, de Vedia L. 3D Modeling of material flow and temperature in friction stir welding. Soldagem e Inspecao 2009;14:248–56 [in Portuguese].

Song M, Kovacevic R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. Int J Mach Tool Manuf 2003;43:605–15.

Song M, Kovacevic R. Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding. Proc Inst Mech Eng Part B 2003;217:73–85.

Song M, Kovacevic R. Heat transfer modelling for both workpiece and tool in the friction stir welding process: a coupled model. Proc Inst Mech Eng Part B 2004;218:17–33.

Shimoda Y, Tsubaki M, Yasui T, Fukumoto M. Experimental and numerical studies of material flow during welding by friction stirring. Quart J Jpn Weld Soc 2011;29:114s–8s.

Su H, Wu C, Chen M. Analysis of material flow and heat transfer in friction stir welding of aluminium alloys. China Weld (Engl Ed) 2013;22:6–10.

Tutunchilar S, Haghpanahi M, Besharati Givi MK, Asadi P, Bahemmat P. Simulation of material flow in friction stir processing of a cast Al–Si alloy. Mater Des 2012;40:415–26.

Wang H, Colegrove PA, Dos Santos JF. Numerical investigation of the tool contact condition during friction stir welding of aerospace aluminium alloy. Comput Mater Sci 2013;71:101–8.

Wang GX, Zhu LL, Zhang Z. Modeling of material flow in friction stir welding process. Chin Weld (Engl Ed) 2007;16:63–70.

W.M. Thomas and E.D. Nicholas, (1997), “Friction Stir Welding for the Transportation Industries”, Mater, Vol. 18, pp. 269–273.processing”, Mater. Sci. Eng. Vol.50, pp. 1-78.

Welding Metallurgy. John Wiley & Sons, 1987.

WIRYOSUMARTO, H.Dan OKUMURA, T., Teknologi Pengelasan Logam, PT. Pradya Paramita, Jakarta, 2000.

Zhang Z, Chen JT. The simulation of material behaviors in friction stir welding process by using rate-dependent constitutive model. J Mater Sci 2008;43:222–32.

Zhang Z, Zhang HW. A fully coupled thermo-mechanical model of friction stir welding. Int J Adv Manuf Technol 2008;37:279–93.

Zhang Z, Liu YL. Effect of preheating time on friction stir welding. Chin J Mech Eng 2009;45:13–8 [in Chinese].

Zhang Z, Chen JT, Zhang ZW, Zhang HW. Coupled thermo-mechanical model based comparison of friction stir welding processes of AA2024-T3 in different thicknesses. J Mater Sci 2011;46:5815–21.

Zhang HW, Zhang Z, Chen JT. Effect of angular velocity of the pin on material flow during friction stir welding. Acta Metall Sinica 2005;41:853–9 [in Chinese].

Zhang HW, Zhang Z, Chen JT. Effect of translational velocity on material flow in friction stir welding. Acta Aeronaut Astronaut Sinica 2006;27:949–56 [in Chinese].

Zhang Z, Zhang HW. Simulation of 3D material flow in friction stir welding of AA6061-T6. Chin Weld (Engl Ed) 2008;17:57–63.

Zhang Z, Zhang HW. Material behavior analysis in joining non straight line weld by using friction stir welding. J Plast Eng 2006;13:108–14 [in Chinese].

Zhang HW, Zhang Z, Chen JT. 3D modeling of material flow in friction stir welding under different process parameters. J Mater Process Technol 2007;183:62–70.

Zhang Z, Chen JT, Zhang HW. Modeling of the friction stir process under different pressures on the shoulder. J Aeronaut Mater 2005;25:33–7 [in Chinese].

Zhang HW, Zhang Z, Chen JT. Analysis of 3D flow in friction stir welding process. China Mech Eng 2006;17:719–23 [in Chinese].

Zhang Z, Liu YL, Chen JT, Zhang HW. Material flow patterns in friction stir welding. Trans China Weld Inst 2007;28:17–21 [in Chinese].

Zhang HW, Zhang Z, Chen JT. The finite element simulation of the friction stir welding process. Mater Sci Eng A 2005;403:340–8.

Zhang HW, Zhang Z, Chen JT. Finite element analysis of friction stir welding process. Trans Chin Weld Inst 2005;26:13–8 [in Chinese].

Zhang, Y.N., Cao, X.,Larose, S.and Wanjara, P. (2012), "Review of tools for friction stir welding and processing", Science and technology of welding and Joining, 51(3):250-60.

http://anaksmk3.blogspot.com/2016/10/macam-macam-pengelasan.html

http://arifidya.blogspot.com/2015/11/proses-las-gmaw-gas-metal-arc-welding.html

https://dokumen.tips/documents/laporan-pengelasan-lanjutpdf.html

https://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig1_3.htm

http: // kawatlas. Jaya Manunggal. Com

https://www.niagamas.com/product/daiden-industrial-welding-inverter-machine-mesin-las-mig-250

http://rizkaadi. blogspot. com/ 2012/ 10/ kerusakan-terhadap-sambungan-las.html-akses tanggal 02 juli 2019

http://tekniklasdasar. blogspot. Com/ 2017/ 05/persiapan-pengelasan.html-akses tanggal 02 juli 2019

https://yudiprasetyo53.wordpress.com/2011/11/07/scanning-electron-microscope-sem-dan-optical-emission-spectroscope-oes

BIODATA PENULIS

MULYADI, lahir di Probolinggo, 10 Maret 1978 sebagai pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Telah menempuh pendidikan S1 Teknik Mesin di Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, kemudian melanjutkan S2 Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Saat ini masih menyelesaikan tugas belajar pada jenjang S3 jurusan Rekayasa Perancangan Manufaktur di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember-Surabaya. Buku ajar yang pernah ditulis Pemrograman NC/CNC, 2017 dan Buku Ajar CADCAM, 2018. Dalam meneliti penulis dapat hibah penelitian ristekdikti: Rekayasa Elektroda Mild Steel (Lb-52) Dicelup Olie Sebagai Pengganti Alternatif Elektroda Besi Cor (Cia-1) Pada Pengelasan Besi Cor Kelabu Fc-30 Di Lihat Dari Segi Kekuatan Tarik Hasil Pengelasan, 2016 dan Rancang Bangun Jig Penyambung Pipa Multi Dimensi, 2017.

ISWANTO, lahir di Banyuwangi 10 Mei 1977. Saat ini aktif sebagai dosen di Prodi Teknik Mesin Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Selain kegiatan mengajar, penulis aktif dalam kegiatan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat baik yang didanai mandiri, internal, maupun pemerintah.