

TEKNOLOGI PENGELASAN

UNDERWATER FRICTION STIR WELDING

TEORI, PRAKTIK, DAN APLIKASI
PADA MATERIAL ALUMINIUM ALLOY



2025

Mulyadi
Rachmat Firdaus
Novia Ariyanti
A'rasy Fahrudin



Teknologi Pengelasan Underwater Friction Stir Welding: Teori, Praktik, dan Aplikasi pada Material Aluminum Alloy

Penulis:

Mulyadi

Rachmat Firdaus

Novia Ariyanti

A'rasy Fahrudin



Diterbitkan oleh

UMSIDA PRESS

Jl. Mojopahit 666 B Sidoarjo

ISBN: 978-623-464-128-8

Copyright©2025

Authors

All rights reserved

Teknologi Pengelasan Underwater Friction Stir Welding: Teori, Praktik, dan Aplikasi pada Material Aluminum Alloy

Penulis: Mulyadi; Rachmat Firdaus; Novia Ariyanti; A'rasy Fahrudin

ISBN: 978-623-464-128-8

Editor: M. Tanzil Multazam, M.Kn & Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, M.Pd.

Copy Editor: Wiwit Wahyu Wijayanti

Design Sampul dan Tata Letak: -

Penerbit: UMSIDA Press

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

Cetakan Pertama, November 2025

Hak Cipta © 2025 Mulyadi; Rachmat Firdaus; Novia Ariyanti; A'rasy Fahrudin

Pernyataan Lisensi Atribusi Creative Commons (CC BY)

Konten dalam buku ini dilisensikan di bawah lisensi Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY).

Lisensi ini memungkinkan Anda untuk:

Menyalin dan menyebarkan materi dalam media atau format apa pun untuk tujuan apa pun, bahkan untuk tujuan komersial.

Menggabungkan, mengubah, dan mengembangkan materi untuk tujuan apa pun, bahkan untuk tujuan komersial. Pemberi lisensi tidak dapat mencabut kebebasan ini selama Anda mengikuti ketentuan lisensi.

Namun demikian, ada beberapa persyaratan yang harus Anda penuhi dalam menggunakan buku ini: Atribusi - Anda harus memberikan atribusi yang sesuai, memberikan informasi yang cukup tentang penulis, judul buku, dan lisensi, dan menyertakan tautan ke lisensi CC BY.

Penggunaan yang Adil - Anda tidak boleh menggunakan buku ini untuk tujuan yang melanggar hukum atau melanggar hak-hak orang lain. Dengan menerima dan menggunakan buku ini, Anda setuju untuk mematuhi persyaratan lisensi CC BY sebagaimana diuraikan di atas.

Catatan : Pernyataan hak cipta dan lisensi ini berlaku untuk buku ini secara keseluruhan, termasuk semua konten yang terkandung di dalamnya, kecuali dinyatakan lain. Hak cipta situs web, aplikasi, atau halaman eksternal yang digunakan sebagai contoh dipegang dan dimiliki oleh sumber aslinya

Prakata

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga buku ajar ini dapat disusun dengan baik. Buku ini disusun untuk memberikan manfaat kepada dosen dan mahasiswa, khususnya di bidang Teknik Mesin, serta akademisi lainnya di berbagai institusi pendidikan tinggi. Materi yang disajikan diambil dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dengan fokus pada **Teknologi Pengelasan Underwater Friction Stir Welding: Teori, Praktik, dan Aplikasi pada Material Aluminum Alloy**. Harapannya, buku ini dapat memberikan wawasan dan pengetahuan yang lebih mendalam mengenai teknik ini, serta menjadi referensi yang berguna dalam pengajaran, penelitian, dan pengembangan teknologi di bidang terkait. Kami mengucapkan terima kasih kepada:

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM) Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, atas dukungan hibah Riset Fundamental yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk mengembangkan karya ilmiah ini.
2. Direktorat Riset, Pengabdian kepada Masyarakat (DRPM) Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, yang telah memberikan dukungan dan fasilitasi dalam proses penyusunan buku ini.
3. Para narasumber yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu dengan pengetahuan dan keterampilan yang diberikan dalam penyusunan buku ini.
4. Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah banyak membantu dalam penyusunan buku ini.

Akhir kata, kritik dan saran sangat diharapkan untuk penyempurnaan buku ini. Semoga buku ini dapat digunakan sebagai tambahan referensi dan memberikan manfaat bagi para pembacanya.

Penulis

Daftar Isi

PRAKATA	II
DAFTAR ISI	V
DAFTAR GAMBAR	VI
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG PENGELASAN	1
1.2 PENGENALAN <i>FRICTION STIR WELDING</i> (FSW)	6
1.3 PERKEMBANGAN TEKNOLOGI UNDERWATER FSW (UFSW)	8
1.4 APLIKASI UFSW PADA MATERIAL AA6005-T6	10
BAB 2	12
PRINSIP DASAR UNDERWATER FRICTION STIR WELDING (UFSW)	12
2.1 KONSEP DAN MEKANISME UFSW	12
2.2 ALAT DAN PERLENGKAPAN UFSW	13
2.3 LINGKUNGAN PENGELASAN BAWAH AIR	14
2.5 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KUALITAS SAMBUNGAN	15
BAB 3	16
KARAKTERISTIK MATERIAL AA6005-T6	16
3.1 KOMPOSISI DAN SIFAT MATERIAL AA6005-T6	16
3.2 TANTANGAN DALAM PENGELASAN MATERIAL AA6005-T6	17
3.3 PENGARUH LINGKUNGAN BAWAH AIR PADA PENGELASAN AA6005-T6	18
3.4 KOMPOSISI DAN SIFAT MATERIAL AA5083	19
3.5 TANTANGAN DALAM PENGELASAN MATERIAL AA5083	21
3.5 PENGARUH LINGKUNGAN BAWAH AIR PADA PENGELASAN MATERIAL AA5083	22
BAB 4	26
HEAT GENERATION RATE DAN PARAMETER-PROSES UFSW	26
4.1 HEAT GENERATION RATE	26
4.2 PARAMETER PROSES UTAMA UFSW	33
BAB 5	36
STUDI KASUS DAN PENERAPAN PRAKTIS	36
5.1 PENDAHULUAN	36
5.2 METODE	37
5.3 ANALISA DAN PEMBAHASAN	39
5.4 KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.5 PENERAPAN PRAKTIS PENGELASAN UNDERWATER FRICTION STIR WELDING (UFSW) PADA MATERIAL AA6005-T6 UNTUK INDUSTRI KELAUTAN	46
5.6 TUGAS STUDI KASUS	49
PUSTAKA	52
BIODATA PENULIS	53

Daftar Gambar

Figur 1: (a) Schematic illustration of the shielded metal arc welding process. About one-half of all large-scale industrial welding operations use this process. (b) Schematic illustration of the shielded metal arc welding operation (Kalpakjian, 2009)	2
Figur 2: Three basic types of oxyacetylene flames used in oxyfuel gas welding and cutting operations: (a) neutral flame; (b) oxidizing flame; (c) carburizing, or reducing, flame. (d) The principle of the oxyfuel gas welding operation (Kalpakjian, 2009)	3
Figur 3: Sequence of operations in the friction welding process. (1) The part on the left is rotated at high speed. (2) The part on the right is brought into contact under an axial force. (3) The axial force is increased, and the part on the left stops rotating; flash begins to form. (4) After a specified upset length or distance is achieved, the weld is completed. The upset length is the distance the two pieces move inward during welding after their initial contact; thus, the total length after welding is less than the sum of the lengths of the two pieces. If necessary, the flash can be removed by secondary operations, such as machining or grinding (Kalpakjian, 2009)	3
Figur 4: The schematic diagram of laser welding (Yanfei <i>et al.</i> , 2022)	4
Figur 5: (a) Components of an ultrasonic welding machine for lap welds. (b) Ultrasonic seam welding using a roller (Kalpakjian, 2009)	4
Figur 6: Schematic diagram of the Underwater Friction Stir Welding (UFSW) (Wang <i>et al.</i> , 2015)	5
Figur 7: Daerah <i>heat generation rate</i> pada tool FSW: (a). <i>Straight Cylindrical</i> ; (b). <i>Taper Cylindrical</i> ; (c). <i>Tapered Square</i> ; dan (d). <i>Hexagonal</i>	26
Figur 8: Skematik permukaan tool	27
Figur 9: Geometri pin <i>tapered cylindrical</i>	29
Figur 10: Skematik dari orientasi permukaan dan area <i>infinitesimal</i> : (a). permukaan <i>shoulder</i> , (b). selimut pin, dan (c). permukaan pin	30
Figur 11: Skematik permukaan pin: (a). permukaan melintang untuk geometri pin segitiga, dan (b) posisi serta dimensi dari area <i>infinitesimal</i>	31
Figur 12: Skematik elemen <i>infinitesimal</i> pada selimut pin	31
Figur 13: (a) Desain alat UFSW, (b) Mesin milling manual merk Weida X6332C untuk proses UFSW	39
Figur 14: Model pelaksanaan eksperimen UFSW	39
Figur 15: Hasil pengelasan UFSW dipilih 3 spesimen terbaik secara visual	40
Figur 16: Pengamatan penampang spesimen secara makro	40
Figur 17: Grafik uji kekuatan Tarik hasil pengelasan UFSW	42
Figur 18: Grafik uji kekuatan Impak hasil pengelasan UFSW	43
Figur 19: Grafik uji kekerasan hasil pengelasan UFSW pada posisi <i>weld nugget</i> (WN)	44

BAB 1

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang Pengelasan

Pengelasan adalah proses penyatuan dua atau lebih material, biasanya logam atau termoplastik, dengan memanfaatkan panas, tekanan, atau kombinasi keduanya, untuk menciptakan sambungan yang permanen. Pengelasan telah menjadi salah satu teknik paling penting dalam industri manufaktur dan konstruksi, memungkinkan pembuatan berbagai struktur mulai dari bangunan, jembatan, hingga kapal dan pesawat terbang. Seiring perkembangan teknologi, berbagai metode pengelasan telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan yang semakin kompleks dalam berbagai sektor industri.

Sejarah pengelasan dapat ditelusuri kembali ke ribuan tahun yang lalu, saat manusia pertama kali mulai bekerja dengan logam. Pada zaman dahulu, teknik pengelasan yang digunakan sangat sederhana, seperti memanaskan logam hingga merah membara dan kemudian menekannya bersama-sama untuk menciptakan sambungan. Teknik ini, yang dikenal sebagai pengelasan tempa, menjadi dasar dari berbagai metode pengelasan modern.

Pengelasan modern mulai berkembang pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20, seiring dengan kemajuan dalam teknologi listrik dan kimia. Penemuan busur listrik pada tahun 1800-an oleh Sir Humphry Davy membuka jalan bagi pengembangan teknik pengelasan busur, yang menjadi salah satu metode pengelasan paling populer hingga saat ini. Pada awal abad ke-20, pengelasan resistansi dan pengelasan gas juga mulai dikembangkan, memberikan opsi tambahan untuk aplikasi pengelasan yang lebih spesifik.

Sejak itu, teknologi pengelasan telah berkembang pesat. Metode-metode baru seperti pengelasan laser, pengelasan gesek, dan pengelasan ultrasonik telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan pengelasan dalam aplikasi yang lebih canggih dan presisi tinggi. Teknologi pengelasan modern kini memungkinkan pembuatan sambungan yang lebih kuat, lebih tahan lama, dan lebih efisien, serta mampu menggabungkan berbagai jenis material yang sebelumnya sulit atau tidak mungkin untuk dilas.

Pengelasan memainkan peran yang sangat penting dalam industri modern, terutama dalam pembuatan dan perbaikan berbagai struktur dan produk. Dalam industri otomotif, misalnya, pengelasan digunakan untuk menyatukan bagian-bagian bodi mobil, rangka, dan komponen lainnya. Tanpa teknologi pengelasan yang tepat, produksi kendaraan bermotor secara massal tidak akan mungkin dilakukan dengan efisien.

Di sektor konstruksi, pengelasan digunakan untuk menyatukan elemen-elemen struktural seperti balok baja, kolom, dan panel, yang membentuk kerangka bangunan tinggi dan jembatan. Kekuatan dan ketahanan struktur tersebut sangat bergantung pada kualitas sambungan las yang dihasilkan. Kesalahan dalam proses pengelasan dapat berakibat fatal, menyebabkan kegagalan struktur yang berpotensi membahayakan nyawa manusia.

Industri minyak dan gas juga sangat mengandalkan teknologi pengelasan, terutama dalam pembuatan dan perbaikan pipa, tangki, dan struktur lepas pantai. Sambungan las yang buruk dalam pipa minyak atau gas dapat menyebabkan kebocoran yang berakibat pada bencana lingkungan dan kerugian finansial yang besar.

Dalam industri kelautan, pengelasan digunakan untuk menyatukan bagian-bagian kapal dan struktur laut lainnya, seperti platform minyak lepas pantai. Tantangan pengelasan di lingkungan laut sangat tinggi, karena pengelasan harus dilakukan di bawah kondisi yang keras dan kadang-kadang dalam air.

Kualitas sambungan las di lingkungan ini sangat penting untuk memastikan keselamatan dan umur panjang dari struktur tersebut.

Selain itu, pengelasan juga digunakan dalam industri penerbangan dan ruang angkasa, di mana presisi dan kekuatan sambungan sangat penting. Komponen pesawat dan roket harus dilas dengan sangat hati-hati untuk memastikan bahwa mereka dapat menahan tekanan ekstrem dan beban yang dialami selama penerbangan. Pengelasan juga digunakan dalam pembuatan satelit dan stasiun luar angkasa, di mana ketangguhan sambungan menjadi kunci keberhasilan misi. Ada berbagai metode pengelasan yang telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan spesifik dalam berbagai aplikasi industri.

Beberapa metode pengelasan yang paling umum digunakan:

1. Pengelasan Busur Listrik (*Arc Welding*)

Pengelasan busur listrik pada Figur 1 adalah salah satu metode pengelasan yang paling populer dan serbaguna. Proses ini melibatkan penggunaan busur listrik untuk melelehkan material dasar dan bahan pengisi, yang kemudian menyatu untuk membentuk sambungan. Pengelasan busur listrik digunakan secara luas dalam industri konstruksi, manufaktur, dan perbaikan.

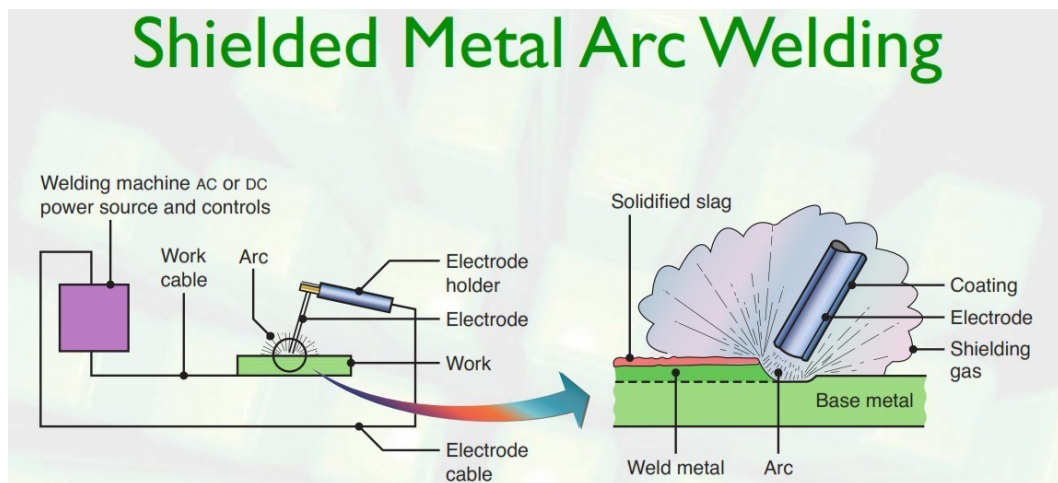
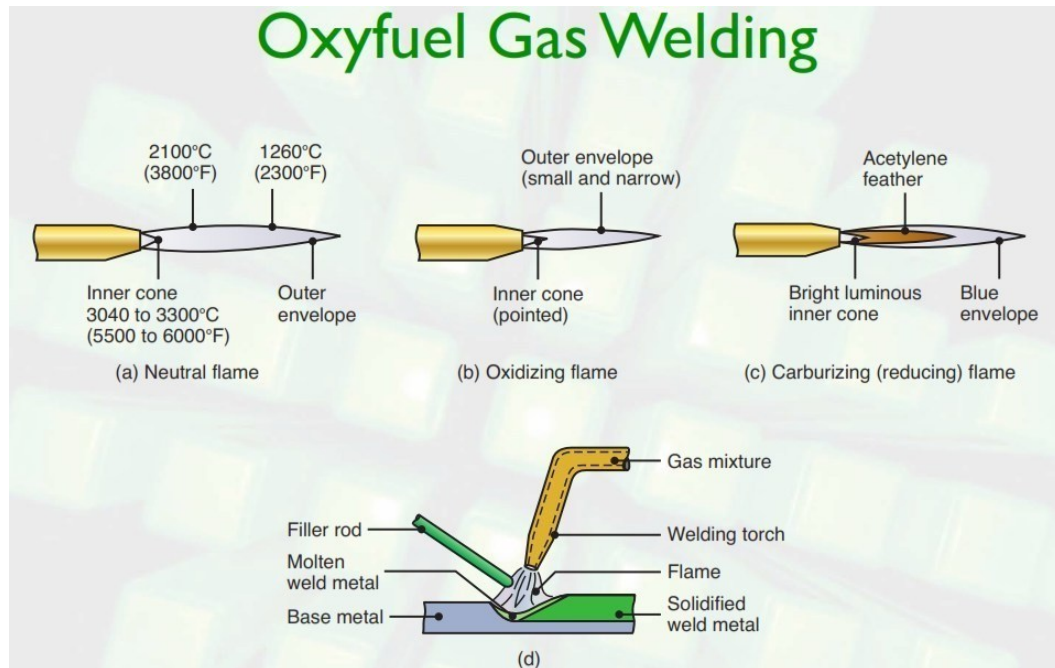


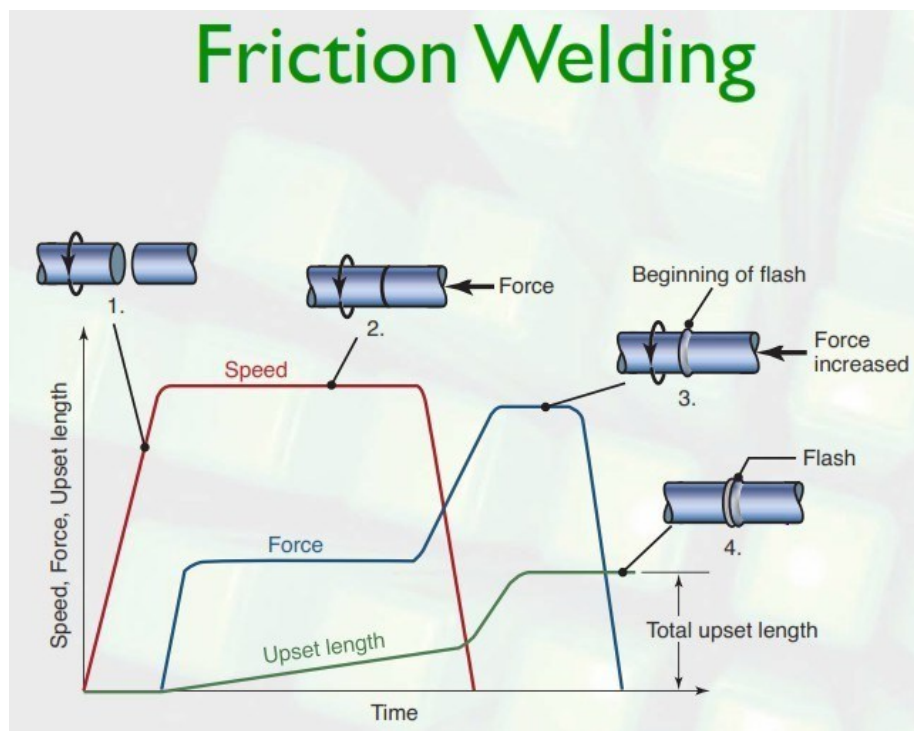
Figure 1: (a) Schematic illustration of the shielded metal arc welding process. About one-half of all large-scale industrial welding operations use this process. (b) Schematic illustration of the shielded metal arc welding operation (Kalpakjian, 2009).

2. Pengelasan Gas (*Gas Welding*)

Pengelasan gas melibatkan penggunaan api yang dihasilkan dari campuran gas, seperti oksigen dan asetilen, untuk melelehkan material dasar dan bahan pengisi seperti pada Figure 2. Metode ini sering digunakan dalam pekerjaan perbaikan dan fabrikasi kecil, serta dalam pengelasan logam tipis.



Figur 2: Three basic types of oxyacetylene flames used in oxyfuel gas welding and cutting operations: (a) neutral flame; (b) oxidizing flame; (c) carburizing, or reducing, flame. (d) The principle of the oxyfuel gas welding operation (Kalpakjian, 2009).



Figur 3: Sequence of operations in the friction welding process. (1) The part on the left is rotated at high speed. (2) The part on the right is brought into contact under an axial force.

(3) The axial force is increased, and the part on the left stops rotating; flash begins to form. (4) After a specified upset length or distance is achieved, the weld is completed. The upset length is the distance the two pieces move inward during welding after their initial contact; thus, the total length after welding is less than the sum of the lengths of the two pieces. If necessary, the flash can be removed by secondary operations, such as machining or grinding (Kalpakjian, 2009).

3. Pengelasan Gesek (*Friction Welding*)

Pengelasan gesek pada Figur 3 adalah metode pengelasan yang melibatkan gesekan antara dua permukaan logam untuk menghasilkan panas yang cukup untuk menyatukan material tersebut. Pengelasan gesek sering digunakan dalam aplikasi otomotif dan dirgantara, di mana sambungan yang kuat dan bebas dari cacat sangat penting.

4. Pengelasan Laser (*Laser Welding*)

Pengelasan laser pada Figure 4 menggunakan sinar laser yang sangat terkonsentrasi untuk melelehkan material dasar. Metode ini sangat presisi dan memungkinkan pengelasan material yang sangat tipis atau kompleks. Pengelasan laser banyak digunakan dalam industri elektronik dan medis, serta dalam pembuatan komponen presisi tinggi.

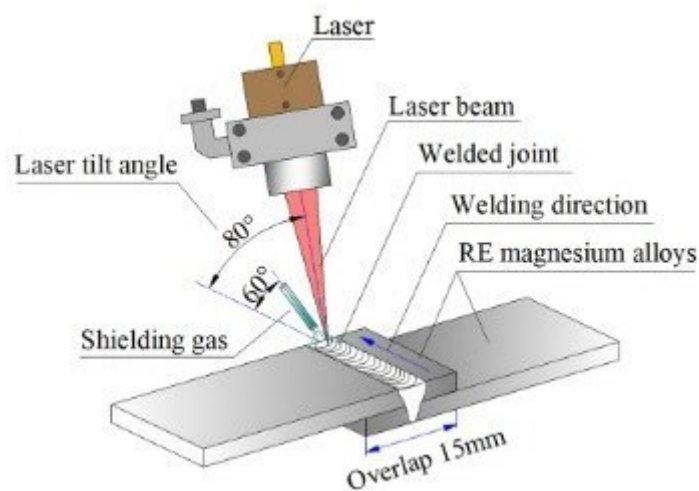


Figure 4: The schematic diagram of laser welding (Yanfei *et al.*, 2022).

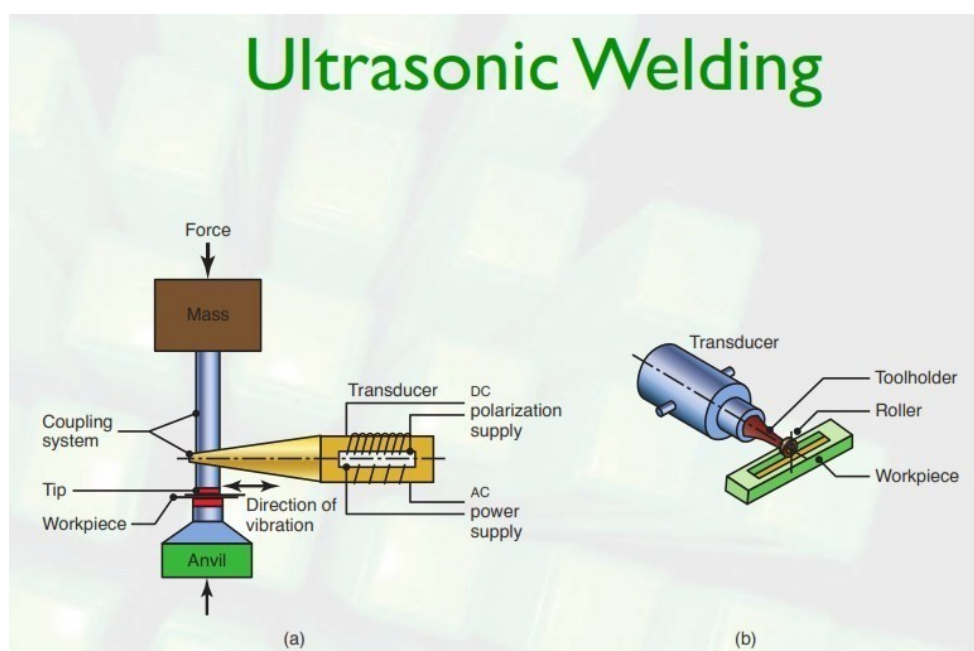


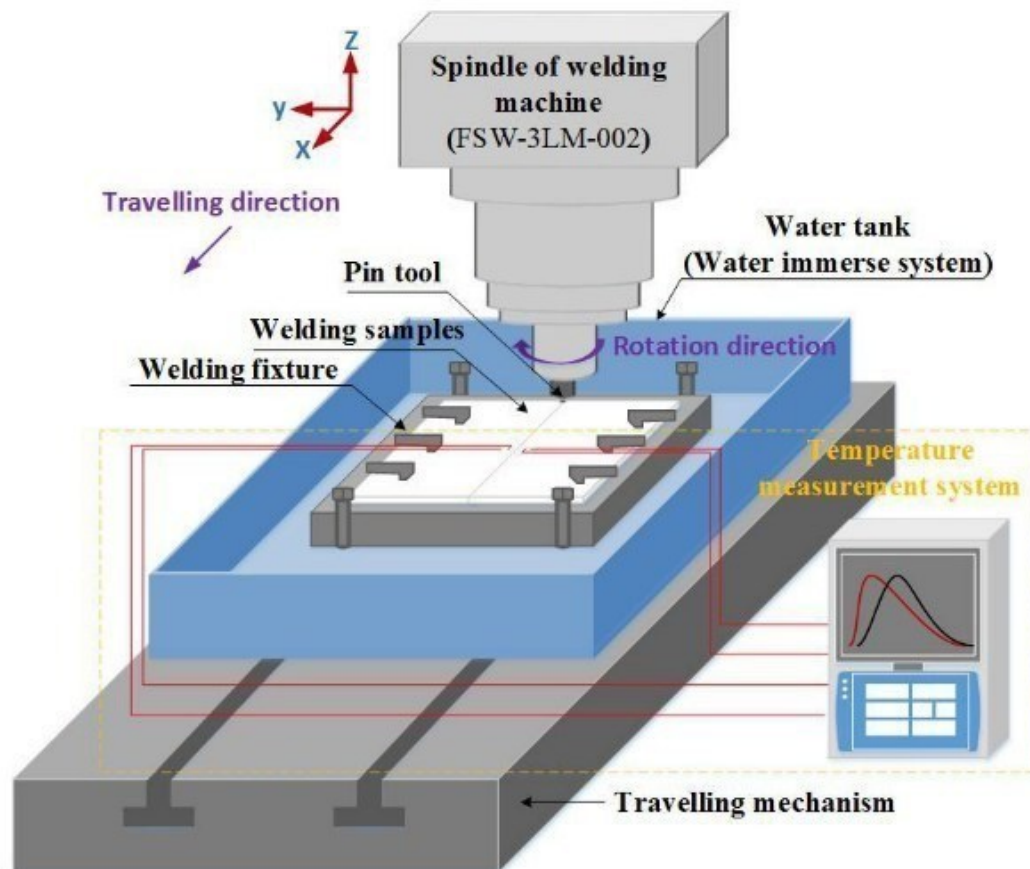
Figure 5: (a) Components of an ultrasonic welding machine for lap welds. (b) Ultrasonic seam welding using a roller (Kalpakjian, 2009).

5. Pengelasan Ultrasonik (*Ultrasonic Welding*)

Pengelasan ultrasonik pada Figure 5 melibatkan penggunaan gelombang ultrasonik untuk menciptakan gesekan pada permukaan material, sehingga menghasilkan panas yang cukup untuk menyatukan material tersebut. Metode ini sering digunakan dalam pengelasan plastik dan logam tipis, serta dalam aplikasi medis dan elektronik.

6. Pengelasan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW)

UFSW pada Figur 6 adalah teknik pengelasan yang dilakukan di bawah air menggunakan prinsip pengelasan gesek aduk (*Friction Stir Welding*). Metode ini menggabungkan keunggulan FSW dengan kemampuan untuk melakukan pengelasan di lingkungan bawah air, yang sangat berguna dalam industri kelautan dan perbaikan struktur bawah air.



Figur 6: Schematic diagram of the Underwater Friction Stir Welding (UFSW) (Wang *et al.*, 2015).

Meskipun pengelasan merupakan teknik yang sangat berguna, ada sejumlah tantangan yang dihadapi dalam proses pengelasan. Salah satu tantangan utama adalah pengendalian kualitas sambungan las. Kualitas sambungan las sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis material, metode pengelasan, parameter-proses, dan keterampilan operator. Kesalahan kecil dalam salah satu faktor ini dapat mengakibatkan sambungan yang lemah atau cacat, yang dapat menyebabkan kegagalan struktur.

Tantangan lainnya adalah penanganan material yang berbeda. Tidak semua material dapat dilas dengan mudah, dan beberapa material memerlukan teknik pengelasan khusus atau bahan pengisi yang sesuai. Misalnya, pengelasan aluminium memerlukan kontrol panas yang sangat hati-hati, karena aluminium memiliki titik leleh yang rendah dan mudah teroksidasi.

Pengelasan di lingkungan yang ekstrem, seperti di bawah air atau di ruang angkasa, menghadirkan tantangan tambahan yang unik. Di bawah air, pengelasan harus dilakukan dalam kondisi tekanan tinggi dan akses yang sering kali terbatas, memerlukan teknik khusus dan peralatan yang dapat beroperasi dengan efektif dalam kondisi tersebut. Sementara itu, di ruang angkasa, pengelasan harus mempertimbangkan kondisi vakum dan suhu ekstrem, yang memerlukan adaptasi teknologi dan pendekatan yang berbeda dari pengelasan di Bumi.

Teknologi pengelasan terus berkembang untuk mengatasi tantangan-tantangan ini dan memenuhi kebutuhan industri yang semakin kompleks. Inovasi dalam pengelasan laser, pengelasan robotik, dan pengelasan aditif (additive welding) merupakan beberapa contoh bagaimana teknologi pengelasan bergerak maju. Pengelasan robotik memungkinkan pelaksanaan dengan presisi tinggi dan dalam skala besar tanpa keterlibatan manusia secara langsung, sangat berguna dalam produksi massal dan pengelasan di lingkungan yang berbahaya. Pengelasan aditif, sebagai bagian dari teknologi manufaktur aditif atau pencetakan 3D, membuka peluang baru untuk desain dan produksi yang lebih efisien dan fleksibel.

Ke depan, pengelasan diharapkan memainkan peran penting dalam pengembangan teknologi energi terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga angin dan surya. Struktur besar seperti turbin angin dan panel surya membutuhkan sambungan las yang kuat dan tahan lama untuk mencapai efisiensi maksimal. Selain itu, dengan meningkatnya minat terhadap eksplorasi luar angkasa, pengelasan akan menjadi elemen kunci dalam pembuatan dan perbaikan struktur di luar angkasa, seperti stasiun luar angkasa, satelit, dan habitat di bulan atau Mars.

1.2 Pengenalan *Friction Stir Welding* (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) adalah salah satu teknik pengelasan paling inovatif yang diperkenalkan pada akhir abad ke-20. Metode ini pertama kali dikembangkan oleh The Welding Institute (TWI) di Inggris pada tahun 1991. FSW segera menarik perhatian luas di kalangan industri karena kemampuannya untuk mengatasi banyak tantangan yang dihadapi oleh metode pengelasan tradisional. Pengelasan ini merupakan proses penyatuan material logam melalui gesekan mekanis yang menghasilkan panas untuk melebur logam, tanpa perlu menggunakan bahan pengisi atau pelindung gas, seperti yang umum dalam pengelasan konvensional. Karena proses ini berlangsung di bawah titik leleh material, FSW menawarkan keuntungan signifikan dalam hal kualitas sambungan, kekuatan, dan efisiensi energi.

FSW bekerja berdasarkan prinsip gesekan dan plastisitas material. Prosesnya dimulai dengan menempatkan dua lembaran logam bersebelahan, kemudian menggunakan alat khusus yang disebut "tool" untuk melakukan pengelasan. Alat ini terdiri dari pin (ujung yang menonjol) dan bahu (shoulder) yang lebih besar. Pin berputar dengan kecepatan tinggi sambil ditekan ke bawah pada sambungan antara kedua lembaran logam. Gesekan yang dihasilkan oleh putaran alat menciptakan panas yang cukup untuk melunakkan, tetapi tidak melelehkan, logam. Alat kemudian bergerak sepanjang garis sambungan, menyebabkan material logam yang dilunakkan bergerak plastis di sekitar pin dan terbentuk menjadi sambungan yang kuat ketika mendingin.

Tool atau alat pengelasan FSW terdiri dari dua bagian utama: pin dan shoulder. Pin adalah bagian yang menembus ke dalam material dan bertanggung jawab untuk menciptakan zona gesek di mana logam dilunakkan. Panjang pin biasanya sedikit lebih pendek dari ketebalan material yang akan dilas, sehingga dapat menembus hampir seluruh ketebalan material tanpa menembus sisi lainnya. Shoulder, di sisi lain, adalah bagian alat yang lebih lebar dan tetap berada di permukaan material. Fungsi shoulder adalah untuk menciptakan panas tambahan melalui gesekan dan membantu memindahkan material plastis ke seluruh sambungan.

Mesin FSW mirip dengan mesin freis (milling machine) atau mesin bor CNC (Computer Numerical Control). Mesin ini harus mampu memberikan gaya tekan yang konstan dan cukup besar untuk menekan tool ke dalam material. Selain itu, mesin FSW harus mampu mengendalikan kecepatan putaran tool dan kecepatan laju pengelasan dengan presisi tinggi. Karena FSW adalah proses yang sensitif terhadap parameter proses, pengendalian yang tepat sangat penting untuk menghasilkan sambungan las yang berkualitas.

Proses *Friction Stir Welding* melibatkan beberapa tahapan utama:

1. **Inisiasi:** Pada tahap ini, alat FSW ditekan ke dalam material pada awal sambungan. Pin menembus material hingga shoulder menyentuh permukaan material, menciptakan gesekan dan panas yang cukup untuk melunakkan material di sekitar pin.
2. **Pengelasan:** Setelah material lunak terbentuk di sekitar pin, alat mulai bergerak sepanjang garis sambungan. Shoulder terus menghasilkan panas tambahan melalui gesekan, sementara pin mencampur material lunak di sekitar sambungan, membentuk zona pengelasan yang homogen.
3. **Pendinginan:** Setelah alat FSW mencapai akhir sambungan, alat diangkat dari material. Material yang telah dilas kemudian mendingin dan mengeras, membentuk sambungan yang solid dan kuat.

Friction Stir Welding menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan metode pengelasan tradisional, terutama dalam aplikasi di mana kualitas sambungan dan integritas struktural sangat penting.

1. Salah satu keunggulan utama FSW adalah kekuatan sambungan yang dihasilkan. Karena FSW adalah proses pengelasan fase padat, tidak ada pelelehan material yang terjadi. Ini berarti bahwa struktur mikro material tetap utuh, yang mengurangi risiko terjadinya retakan atau porositas dalam sambungan. Sebagai hasilnya, sambungan FSW sering kali memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode pengelasan leleh konvensional.
2. Dalam pengelasan konvensional, distorsi termal adalah masalah yang umum terjadi, terutama pada material yang memiliki koefisien ekspansi termal tinggi, seperti aluminium. Distorsi ini dapat menyebabkan perubahan bentuk atau dimensi pada komponen yang dilas, yang memerlukan proses pasca-pengelasan tambahan untuk memperbaikinya. FSW, dengan panas yang lebih rendah dan lebih terlokalisasi, secara signifikan mengurangi distorsi termal, menjaga keutuhan dimensi dan bentuk asli komponen.
3. FSW dikenal sebagai proses pengelasan yang lebih hemat energi dibandingkan dengan pengelasan tradisional. Karena proses ini tidak memerlukan panas eksternal untuk melelehkan material, kebutuhan energi yang digunakan jauh lebih rendah. Ini tidak hanya mengurangi biaya operasional, tetapi juga membuat FSW menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan dalam aplikasi pengelasan.
4. Beberapa material, seperti aluminium, magnesium, dan paduan tembaga, sulit dilas menggunakan metode konvensional karena kecenderungan mereka untuk retak atau meleleh secara tidak merata. FSW mampu mengatasi tantangan ini karena prosesnya terjadi di bawah titik leleh material, sehingga meminimalkan risiko retak dan memungkinkan pengelasan material yang sulit dengan kualitas yang baik.
5. FSW tidak memerlukan bahan pengisi tambahan atau gas pelindung untuk melindungi sambungan dari oksidasi. Ini mengurangi biaya dan kompleksitas proses, sekaligus menghasilkan sambungan yang lebih bersih dan bebas dari kontaminasi.

Friction Stir Welding telah digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena keunggulan yang ditawarkannya. Beberapa industri yang paling banyak menggunakan FSW adalah:

1. FSW digunakan secara luas dalam industri otomotif, terutama dalam pembuatan komponen kendaraan yang terbuat dari aluminium. Misalnya, pembuatan sasis mobil, panel bodi, dan komponen mesin sering kali melibatkan FSW karena kekuatan dan keandalan sambungan yang dihasilkan. Penggunaan FSW di industri otomotif membantu mengurangi berat kendaraan, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi bahan bakar.
2. Industri dirgantara adalah salah satu sektor yang paling diuntungkan oleh FSW. Paduan aluminium yang banyak digunakan dalam pesawat terbang dan roket dapat dilas dengan FSW untuk menghasilkan sambungan yang kuat dan ringan. FSW juga digunakan dalam pembuatan tangki bahan bakar dan struktur lain yang membutuhkan integritas struktural tinggi.
3. Dalam industri kelautan, FSW digunakan untuk mengelas lambung kapal dan struktur lain yang terbuat dari aluminium dan paduan lainnya. Keunggulan FSW dalam mengurangi distorsi termal sangat penting dalam menjaga bentuk dan dimensi yang tepat pada komponen besar yang digunakan dalam kapal.
4. FSW juga menemukan aplikasi dalam industri elektronik, terutama dalam pembuatan perangkat yang memerlukan sambungan logam yang kuat dan bebas dari cacat, seperti casing baterai dan heat sinks. Proses FSW yang bersih dan bebas kontaminasi membuatnya ideal untuk aplikasi ini.
5. FSW digunakan dalam industri energi untuk mengelas pipa, tangki, dan struktur lain yang digunakan dalam pembangkit listrik, termasuk pembangkit listrik tenaga angin dan surya. Sambungan yang kuat dan tahan lama yang dihasilkan oleh FSW sangat penting dalam memastikan keandalan dan efisiensi operasi.

1.3 Perkembangan Teknologi Underwater FSW (UFSW)

Pengelasan seperti yang telah dijelaskan sebelumnya adalah salah satu teknik penyambungan material yang paling penting dan telah menjadi tulang punggung banyak industri, termasuk otomotif, konstruksi, dirgantara, dan energi. Namun, pengelasan di lingkungan bawah air membawa tantangan yang unik dan signifikan. Lingkungan bawah air sangat berbeda dengan pengelasan di udara bebas karena melibatkan kondisi tekanan tinggi, visibilitas yang terbatas, serta risiko korosi dan kerapuhan akibat kontak langsung dengan air. Tradisionalnya, pengelasan bawah air dilakukan menggunakan teknik pengelasan basah atau kering. Namun, masing-masing metode ini memiliki keterbatasan tertentu, terutama terkait dengan kualitas sambungan dan keselamatan operator.

Pengelasan basah dilakukan di bawah air dengan menggunakan elektroda yang terisolasi, tetapi metode ini sering menghasilkan sambungan yang memiliki porositas tinggi dan rentan terhadap korosi. Di sisi lain, pengelasan kering dilakukan dalam ruang kering yang diciptakan di sekitar sambungan melalui penggunaan habitat pengelasan, tetapi metode ini sangat mahal dan memerlukan peralatan yang kompleks. Kedua metode ini memiliki peran penting dalam industri kelautan dan perbaikan struktur bawah air, namun, seiring dengan berkembangnya kebutuhan akan sambungan berkualitas tinggi dan biaya yang lebih rendah, teknologi baru mulai dikembangkan.

Friction Stir Welding (FSW), yang diperkenalkan pada awal 1990-an, menawarkan solusi alternatif untuk pengelasan bawah air. FSW adalah metode pengelasan fase padat yang memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan antara alat pengelasan (tool) dan material untuk melunakkan material dasar dan menyatukannya tanpa melelehkan material tersebut. Proses ini menghasilkan sambungan yang kuat, bebas dari porositas, dan memiliki distorsi termal yang minimal. Melihat keberhasilan FSW di berbagai aplikasi darat, para peneliti dan insinyur

mulai mengeksplorasi potensi penerapan teknologi ini di bawah air, yang dikenal sebagai *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW).

Sejak diperkenalkan oleh The Welding Institute (TWI) di Inggris pada tahun 1991, Friction Stir Welding telah mengalami perkembangan yang pesat. Metode ini cepat diadopsi oleh berbagai industri, terutama dalam pengelasan aluminium dan paduannya, karena FSW mampu mengatasi banyak masalah yang dihadapi oleh teknik pengelasan tradisional, seperti masalah retak panas, distorsi, dan kualitas sambungan. FSW awalnya digunakan secara luas dalam industri otomotif dan dirgantara, di mana kebutuhan akan sambungan berkualitas tinggi dan ringan sangat penting. Seiring dengan berkembangnya teknologi, FSW mulai diterapkan pada material lain, seperti magnesium, tembaga, dan baja, meskipun dengan tantangan yang lebih besar terkait dengan suhu operasi dan desain tool.

Teknologi FSW tidak hanya diterapkan pada sambungan lurus tetapi juga pada sambungan berbentuk kompleks, seperti sambungan T-joint, lap joint, dan sudut. Selain itu, FSW juga telah diterapkan pada material berlapis dan komposit, memperluas jangkauan aplikasi teknik ini di berbagai sektor. Inovasi lebih lanjut dalam desain tool, kontrol parameter proses, dan integrasi teknologi CNC telah memungkinkan FSW untuk mencapai tingkat presisi dan repetisi yang tinggi, menjadikannya pilihan utama untuk aplikasi manufaktur modern.

Dengan latar belakang keberhasilan FSW di darat, perhatian mulai beralih ke potensi penerapan teknik ini di lingkungan yang lebih menantang, seperti bawah air. Ini menandai awal mula pengembangan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW), sebuah pendekatan yang diharapkan dapat mengatasi banyak masalah yang dihadapi oleh teknik pengelasan bawah air tradisional.

Industri kelautan, minyak dan gas lepas pantai, serta sektor energi angin lepas pantai menghadapi tantangan besar dalam pemeliharaan dan perbaikan struktur bawah air. Struktur seperti platform minyak, pipa bawah laut, anjungan lepas pantai, dan komponen lainnya sering mengalami kerusakan akibat korosi, kelelahan material, atau dampak lingkungan laut yang keras. Pengelasan bawah air menjadi sangat penting dalam memperbaiki dan memperpanjang masa pakai struktur-struktur ini.

Namun, metode pengelasan bawah air tradisional, seperti pengelasan basah dan kering, memiliki sejumlah kelemahan yang signifikan. Pengelasan basah, misalnya, cenderung menghasilkan sambungan dengan porositas tinggi dan risiko kontaminasi hidrogen yang dapat menyebabkan retak pada sambungan las. Selain itu, pengelasan basah memiliki risiko keselamatan yang tinggi bagi penyelam yang melakukan pengelasan di bawah air. Pengelasan kering, meskipun menawarkan kualitas sambungan yang lebih baik, membutuhkan habitat pengelasan yang kompleks dan mahal, serta memerlukan waktu persiapan yang lama.

Untuk mengatasi masalah ini, ada kebutuhan yang mendesak untuk mengembangkan teknologi pengelasan bawah air yang lebih efisien, aman, dan mampu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi. Dalam konteks inilah, *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) mulai menarik perhatian sebagai solusi potensial.

Underwater Friction Stir Welding (UFSW) adalah adaptasi dari teknologi FSW untuk diterapkan dalam kondisi bawah air. Prinsip dasar dari UFSW sama dengan FSW konvensional, yaitu melibatkan gesekan mekanis antara alat pengelasan yang berputar (tool) dan material dasar untuk menghasilkan panas yang cukup untuk melunakkan, tetapi tidak melelehkan, material tersebut. Tool kemudian bergerak sepanjang garis sambungan, mengaduk material lunak dan menciptakan sambungan yang solid ketika mendingin.

Namun, ketika proses ini dilakukan di bawah air, beberapa tantangan tambahan muncul. Air memiliki kapasitas pendinginan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan udara, yang berarti bahwa panas yang dihasilkan oleh gesekan dengan cepat diserap oleh air. Hal ini dapat menyebabkan pendinginan yang terlalu cepat pada material yang dilas, yang dapat menghasilkan sambungan dengan kekerasan yang lebih tinggi dan potensi retak yang lebih besar. Selain itu, tekanan air pada kedalaman tertentu dapat mempengaruhi perilaku material yang dilas dan kinerja tool.

Untuk mengatasi tantangan ini, desain tool UFSW biasanya dimodifikasi untuk meningkatkan efisiensi pengadukan dan distribusi panas. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa penggunaan kecepatan putaran yang lebih tinggi dan gaya tekan yang lebih besar dapat membantu mengimbangi efek pendinginan air. Selain itu, dalam beberapa kasus, pelumas khusus atau pelindung termal digunakan untuk melindungi zona las dari pendinginan yang terlalu cepat.

Pengembangan teknologi UFSW telah menjadi fokus penelitian di berbagai lembaga dan industri sejak awal 2000-an. Para peneliti telah melakukan berbagai studi untuk memahami perilaku material dalam kondisi bawah air dan mengoptimalkan parameter proses untuk menghasilkan sambungan las yang berkualitas tinggi. Beberapa inovasi utama dalam pengembangan UFSW meliputi:

Desain tool adalah salah satu aspek paling kritis dalam UFSW. Tool yang digunakan dalam UFSW biasanya terbuat dari bahan yang sangat tahan terhadap keausan dan memiliki geometri yang dirancang khusus untuk memaksimalkan efisiensi gesekan dan pengadukan material. Penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan tool dengan pin yang lebih panjang dan shoulder yang lebih lebar dapat membantu meningkatkan penetrasi dan kualitas sambungan dalam UFSW. Selain itu, beberapa desain tool juga mencakup fitur tambahan, seperti sirip atau pelat pengaduk, untuk meningkatkan homogenitas pengadukan material.

Parameter proses, seperti kecepatan putaran tool, laju pengelasan, dan gaya tekan, sangat mempengaruhi kualitas sambungan dalam UFSW. Pengendalian yang tepat terhadap parameter-parameter ini sangat penting untuk mengimbangi efek pendinginan air dan tekanan bawah air. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran dan laju pengelasan dapat membantu mengurangi risiko pendinginan yang terlalu cepat dan meningkatkan sifat mekanis sambungan.

Salah satu tantangan utama dalam UFSW adalah pendinginan cepat yang disebabkan oleh kontak langsung dengan air. Untuk mengatasi hal ini, beberapa pendekatan telah dikembangkan, termasuk penggunaan pelumas khusus yang diterapkan pada tool atau area sambungan untuk mengurangi kontak langsung dengan air. Selain itu, beberapa penelitian juga mengeksplorasi penggunaan pelindung termal yang ditempatkan di sekitar zona las untuk menjaga suhu proses tetap stabil.

1.4 Aplikasi UFSW pada Material AA6005-T6

Material AA6005-T6 adalah salah satu paduan aluminium yang banyak digunakan dalam industri otomotif, transportasi, dan konstruksi karena kombinasi optimal antara kekuatan mekanis, ketahanan terhadap korosi, dan kemampuan untuk dibentuk. Paduan ini sangat cocok untuk aplikasi struktural, terutama pada komponen yang memerlukan keseimbangan antara kekuatan dan bobot yang ringan. Namun, seperti halnya dengan banyak paduan aluminium lainnya, pengelasan material ini, terutama dalam kondisi bawah air, menghadirkan tantangan tersendiri. Dalam konteks ini, teknologi *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) menawarkan solusi yang potensial untuk mengatasi tantangan tersebut. Salah satu tantangan utama dalam pengelasan material AA6005-T6 di bawah air adalah sensitivitasnya terhadap pembentukan porositas dan retakan ketika mengalami pelelehan atau pendinginan yang tidak terkendali. Pengelasan konvensional, seperti pengelasan busur listrik, sering kali menghasilkan zona terpengaruh panas (Heat Affected Zone atau HAZ) yang luas, yang dapat mengurangi kekuatan mekanis material akibat over-aging atau pelelehan parsial. Selain itu, kecepatan pendinginan yang cepat di bawah air dapat menyebabkan pengerasan yang tidak diinginkan, yang berpotensi menyebabkan kerapuhan dan retakan pada sambungan.

Underwater Friction Stir Welding (UFSW) adalah metode pengelasan fase padat yang tidak melibatkan pelelehan material, sehingga mampu mengatasi beberapa tantangan yang dihadapi oleh teknik pengelasan tradisional. Dengan UFSW, panas dihasilkan melalui gesekan antara alat pengelasan (tool) yang berputar dan material dasar. Ini menghasilkan panas yang cukup untuk melunakkan material di sekitar zona pengelasan tanpa melelehkannya, sehingga mengurangi risiko pembentukan porositas dan retakan.

Pengelasan AA6005-T6 menggunakan UFSW juga meminimalkan pembentukan zona terpengaruh panas yang luas, menjaga integritas struktur mikro material dan mempertahankan kekuatan mekanisnya. Dalam kondisi bawah air, air berfungsi sebagai media pendingin alami yang membantu mengontrol suhu proses, namun dengan risiko pendinginan yang terlalu cepat. Namun, dengan pengaturan parameter proses yang tepat, seperti kecepatan putaran tool dan laju pengelasan, UFSW

mampu menghasilkan sambungan yang kuat dan tahan terhadap korosi, bahkan dalam lingkungan bawah air yang keras.

Berbagai studi telah menunjukkan bahwa UFSW dapat diterapkan dengan sukses pada material AA6005-T6. Penelitian menunjukkan bahwa sambungan yang dihasilkan oleh UFSW pada material ini memiliki sifat mekanis yang mendekati atau bahkan melebihi material dasar, dengan struktur mikro yang seragam dan minim cacat. Sambungan UFSW juga menunjukkan ketahanan korosi yang baik, yang merupakan aspek penting dalam aplikasi bawah air.

Aplikasi UFSW pada AA6005-T6 sangat relevan dalam perbaikan dan pemeliharaan struktur kelautan, seperti anjungan lepas pantai dan komponen struktural lainnya yang terbuat dari paduan aluminium. Selain itu, kemampuan untuk melakukan pengelasan di bawah air tanpa memerlukan habitat pengelasan yang kompleks menjadikan UFSW sebagai pilihan yang ekonomis dan efisien untuk perbaikan di lapangan.

BAB 2

Prinsip Dasar Underwater Friction Stir Welding (UFSW)

2.1 Konsep dan Mekanisme UFSW

Seperti halnya FSW, UFSW bekerja berdasarkan prinsip pengelasan fasa padat, di mana pengelasan dilakukan tanpa melelehkan material dasar. Proses ini melibatkan penggunaan sebuah tool atau alat pengaduk yang berputar pada kecepatan tinggi dan menghasilkan panas melalui gesekan. Panas yang dihasilkan cukup untuk melunakkan material di sekitar area pengelasan, sehingga memungkinkan material untuk diaduk dan disambung tanpa melalui fase cair. Keunggulan utama dari pendekatan ini adalah minimnya perubahan struktur mikro dan menghindari pembentukan cacat yang umum terjadi pada teknik pengelasan konvensional yang melibatkan pelelehan, seperti porositas dan retakan.

Mekanisme *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) melibatkan proses pengelasan yang memanfaatkan gesekan antara alat las khusus dengan material logam di bawah air, menghasilkan panas yang cukup untuk melunakkan material tanpa mencairkannya. Alat las berputar dan bergerak sepanjang garis sambungan, mengaduk logam yang dilunakkan, sehingga tercipta sambungan yang kuat dan homogen. Proses ini terjadi dalam lingkungan air yang menambah tantangan seperti tekanan hidrostatik tinggi dan pendinginan cepat, yang mempengaruhi distribusi panas dan mikrostruktur akhir dari sambungan. Meski demikian, UFSW mampu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi dengan kekuatan mekanik yang memadai untuk aplikasi di lingkungan bawah air, seperti pada konstruksi dan perbaikan infrastruktur maritim, dengan keunggulan minimnya distorsi dan cacat las dibandingkan metode pengelasan konvensional. Pada proses UFSW yang menjadi pertimbangan utama adalah:

a. Pemilihan Tool dan Material

Tool yang digunakan dalam UFSW terdiri dari dua bagian utama: bahu (shoulder) dan pin. Bahu berfungsi untuk menghasilkan panas melalui gesekan dengan permukaan material, sedangkan pin bertugas untuk mengaduk material yang melunak dan membentuk sambungan. Pemilihan material tool sangat penting karena tool harus tahan terhadap aus dan mampu bekerja pada suhu tinggi. Tool yang digunakan biasanya terbuat dari material yang memiliki kekerasan dan ketahanan aus tinggi, seperti tungsten, molybdenum, atau paduan keramik. Dalam UFSW, bentuk dan ukuran tool harus disesuaikan dengan jenis material yang akan dilas dan ketebalan material tersebut. Panjang dan diameter pin serta desain bahu yang tepat sangat penting untuk memastikan distribusi panas yang merata dan pembentukan sambungan yang homogen.

b. Pembangkitan Panas dan Distribusi Suhu

Salah satu aspek kunci dalam UFSW adalah pembangkitan panas yang cukup melalui gesekan antara tool dan material dasar. Panas ini melunakkan material di sekitar area pengelasan tanpa menyebabkan pelelehan. Dalam kondisi bawah air, media air berperan sebagai pendingin alami yang mempercepat laju pendinginan material. Sementara ini membantu dalam mencegah overheating, tantangan yang muncul adalah pengendalian suhu yang tepat agar tidak terjadi pendinginan yang terlalu cepat, yang dapat mengakibatkan pengerasan material dan potensi retakan. Distribusi suhu yang tepat di sekitar zona adukan sangat penting untuk memastikan kualitas sambungan. Pendinginan yang terlalu cepat dapat menyebabkan terbentuknya struktur mikro yang tidak diinginkan, seperti butir yang kasar atau struktur yang tidak homogen, yang dapat mempengaruhi sifat mekanis sambungan. Oleh karena itu,

parameter proses seperti kecepatan putaran tool, laju pengelasan, dan sudut kemiringan tool harus diatur dengan cermat untuk mencapai distribusi suhu yang optimal.

c. Zona yang Terbentuk dalam UFSW

Proses UFSW menghasilkan tiga zona utama di sekitar sambungan: zona las (weld nugget), zona terdeformasi termomekanik (Thermo-Mechanically Affected Zone atau TMAZ), dan zona terpengaruh panas (Heat Affected Zone atau HAZ). Zona Las (Weld Nugget): Ini adalah area di mana material diaduk oleh pin tool dan mengalami deformasi plastis yang intensif. Di zona ini, butir-butir material mengalami rekristalisasi dinamis, menghasilkan struktur mikro yang halus dan seragam. Zona ini biasanya menunjukkan sifat mekanis yang unggul, seperti kekuatan tarik yang tinggi dan ketahanan terhadap korosi yang baik. Zona Terdeformasi Termomekanik (TMAZ): Di zona ini, material mengalami deformasi plastis namun tidak cukup untuk mengalami rekristalisasi penuh. Struktur mikro di zona ini mungkin menunjukkan butir yang terdistorsi atau memanjang, yang dapat mempengaruhi sifat mekanis material. Zona Terpengaruh Panas (HAZ): Ini adalah area di sekitar zona las yang terpengaruh oleh panas namun tidak mengalami deformasi plastis. HAZ pada UFSW biasanya lebih sempit dibandingkan dengan metode pengelasan konvensional, karena UFSW menghasilkan panas yang lebih terkonsentrasi dan proses pendinginan lebih cepat. Namun, perubahan mikrostruktur di HAZ dapat mempengaruhi sifat mekanis, seperti kekerasan dan ketangguhan.

d. Pendinginan dan Dampaknya

Pendinginan cepat yang terjadi dalam kondisi bawah air memiliki dampak signifikan terhadap sifat akhir sambungan. Air berperan sebagai media pendingin yang sangat efektif, yang dapat menyebabkan penurunan suhu yang cepat setelah pengelasan. Meskipun ini membantu dalam menjaga zona terpengaruh panas tetap kecil, ada risiko bahwa pendinginan yang terlalu cepat dapat menghasilkan struktur mikro yang keras dan getas, yang dapat mengurangi ketangguhan sambungan. Untuk mengatasi ini, parameter-proses UFSW harus diatur sedemikian rupa sehingga suhu selama proses pengelasan tetap terkendali, memastikan bahwa material tidak mengalami pendinginan yang terlalu cepat yang dapat mempengaruhi integritas sambungan.

2.2 Alat dan Perlengkapan UFSW

Alat dan perlengkapan yang digunakan dalam *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) memiliki peran penting dalam memastikan kualitas sambungan las yang dihasilkan, terutama karena proses ini berlangsung di lingkungan bawah air dengan berbagai tantangan unik. Salah satu komponen utama dalam UFSW adalah *tool* atau alat las, yang dirancang khusus untuk beroperasi di bawah air. Alat ini umumnya terbuat dari bahan dengan ketahanan tinggi terhadap korosi dan keausan, seperti baja paduan atau material komposit. Desain alat las ini melibatkan bentuk yang presisi pada bagian bahu dan pin, yang keduanya bertanggung jawab dalam menghasilkan gesekan dan mengaduk material selama proses las. Bahu alat membantu dalam menghasilkan panas melalui gesekan, sementara pin menyusup ke dalam material, menciptakan zona aduk (*stir zone*) yang homogen.

Selain *tool*, sistem penahan atau *clamping system* juga sangat penting dalam UFSW. Sistem ini bertugas untuk memastikan bahwa material yang akan dilas tetap pada posisi yang stabil selama proses pengelasan, mencegah gerakan yang tidak diinginkan yang bisa menyebabkan cacat pada sambungan. Sistem penahan ini harus dirancang agar dapat bekerja efektif di bawah air, dengan kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan hidrostatik dan gaya mekanik yang terjadi selama pengelasan. Material yang digunakan untuk sistem penahan biasanya memiliki sifat anti-karat dan kekuatan tinggi, seperti baja tahan karat atau aluminium paduan yang dilapisi.

Perlengkapan tambahan lainnya mencakup perangkat kontrol suhu dan tekanan. Karena pengelasan dilakukan di bawah air, pengaturan suhu menjadi lebih kritis, mengingat air memiliki kemampuan konveksi yang lebih tinggi dibandingkan udara, yang menyebabkan pendinginan cepat pada daerah las. Perangkat kontrol ini membantu menjaga suhu optimal di sekitar zona las untuk memastikan bahwa material tidak mendingin terlalu cepat, yang

dapat mengakibatkan retakan atau cacat pada sambungan. Selain itu, perangkat ini juga memantau tekanan hidrostatik yang mungkin bervariasi tergantung pada kedalaman air, dan melakukan penyesuaian yang diperlukan pada parameter proses.

Selanjutnya, perlengkapan penyalur energi, seperti generator listrik dan sistem tenaga hidrolik, juga memainkan peran penting. Dalam UFSW, energi yang digunakan untuk menggerakkan alat las dan sistem penahan harus cukup besar untuk mengatasi gaya gesek dan tekanan air. Generator listrik berdaya tinggi dan sistem hidrolik yang handal diperlukan untuk memberikan tenaga yang stabil dan terkontrol selama proses pengelasan. Sistem ini harus dirancang dengan ketahanan terhadap lingkungan air yang korosif dan mampu beroperasi dalam kondisi tekanan tinggi.

Terakhir, sistem monitoring dan pengendalian proses sangat vital dalam UFSW. Teknologi sensor yang canggih, seperti sensor suhu, tekanan, dan kecepatan rotasi, digunakan untuk memantau secara real-time kondisi proses pengelasan. Data yang diperoleh dari sensor ini kemudian dianalisis oleh sistem kontrol untuk melakukan penyesuaian pada parameter proses secara otomatis. Sistem ini tidak hanya membantu dalam menjaga kualitas sambungan, tetapi juga meminimalkan risiko kegagalan pengelasan, terutama dalam kondisi lingkungan yang sulit diprediksi. Dengan adanya sistem monitoring yang efektif, proses UFSW dapat berjalan lebih efisien dan menghasilkan sambungan dengan kualitas yang konsisten.

2.3 Lingkungan Pengelasan Bawah Air

Pengelasan di bawah air, atau sering disebut sebagai underwater welding, merupakan salah satu metode pengelasan yang paling menantang dan kompleks, karena melibatkan kondisi lingkungan yang berbeda secara signifikan dari pengelasan di darat. Lingkungan bawah air memperkenalkan berbagai faktor yang mempengaruhi proses pengelasan, termasuk tekanan hidrostatik yang tinggi, suhu air yang rendah, serta risiko korosi yang lebih besar. Tekanan hidrostatik, yang meningkat seiring dengan kedalaman, dapat mempengaruhi bentuk dan stabilitas busur las serta menyebabkan masalah seperti porositas dalam logam las. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang bagaimana tekanan dan kondisi lingkungan ini mempengaruhi pengelasan sangat penting untuk menghasilkan sambungan yang kuat dan bebas cacat.

Salah satu tantangan utama dalam pengelasan bawah air adalah pengendalian suhu. Air memiliki kemampuan menyerap panas yang tinggi, sehingga proses pendinginan pada sambungan las terjadi lebih cepat dibandingkan di darat. Pendinginan yang terlalu cepat ini dapat menyebabkan terjadinya retak dingin atau penurunan kekuatan mekanik pada logam las. Oleh karena itu, dalam teknik pengelasan seperti Underwater Friction Stir Welding (UFSW), pengaturan suhu dan kecepatan pengelasan harus diatur dengan hati-hati untuk memastikan bahwa panas yang dihasilkan cukup untuk mencairkan dan mengaduk material tanpa menyebabkan pendinginan yang terlalu cepat.

Selain tantangan suhu dan tekanan, korosi adalah masalah lain yang harus dihadapi dalam pengelasan bawah air. Air laut, khususnya, sangat korosif karena kandungan garamnya yang tinggi, yang dapat mempercepat proses oksidasi pada logam. Untuk mengatasi hal ini, bahan-bahan yang digunakan dalam proses pengelasan bawah air, termasuk elektroda dan bahan tambahan las, harus dipilih dengan sifat anti-korosi yang tinggi. Selain itu, pelindung anti-korosi seperti lapisan khusus atau penggunaan gas pelindung juga sering digunakan untuk melindungi area las dari kontak langsung dengan air selama proses pengelasan.

Pengelasan di bawah air juga menghadirkan tantangan dalam hal visibilitas dan aksesibilitas. Pekerjaan las di kedalaman sering kali dilakukan dengan visibilitas yang terbatas, yang dapat mempersulit pengelasan yang presisi. Teknologi pengelasan bawah air sering menggunakan kamera khusus dan sistem pencahayaan untuk membantu pengelasan dalam kondisi visibilitas rendah. Di sisi lain, aksesibilitas juga menjadi masalah, terutama ketika bekerja di struktur bawah air yang rumit atau di kedalaman yang sangat dalam. Dalam situasi ini, metode pengelasan otomatis atau pengelasan robotik mulai banyak digunakan untuk menggantikan pekerjaan manual, sehingga mengurangi risiko kesalahan dan meningkatkan efisiensi pengelasan.

Akhirnya, faktor keselamatan menjadi perhatian utama dalam pengelasan bawah air. Pengelasan di lingkungan yang ekstrem ini menuntut protokol keselamatan yang ketat untuk melindungi para pekerja dari risiko seperti ledakan, kebocoran gas, atau kecelakaan karena tekanan tinggi. Pengelasan bawah air juga sering melibatkan penggunaan peralatan selam khusus yang dirancang untuk melindungi pengelas dari tekanan dan suhu yang

ekstrem, serta sistem komunikasi yang andal untuk memastikan koordinasi yang baik selama operasi pengelasan. Oleh karena itu, pelatihan khusus dan prosedur keselamatan yang ketat sangat penting dalam setiap operasi pengelasan bawah air.

2.5 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kualitas Sambungan

Kualitas sambungan hasil dari Underwater Friction Stir Welding (UFSW) dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berkaitan dalam proses pengelasan. Salah satu faktor utama adalah **parameter-proses** yang digunakan selama pengelasan, seperti kecepatan putaran alat, kecepatan pengelasan, dan gaya dorong (axial force). Parameter ini menentukan seberapa baik alat pengelasan dapat mengaduk material di zona las, yang pada akhirnya mempengaruhi struktur mikro dan makro sambungan. Kecepatan putaran yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menyebabkan kurangnya pencampuran material atau overheating, yang masing-masing dapat menghasilkan cacat seperti porositas atau retakan dalam sambungan.

Selain parameter-proses, **material alat** yang digunakan dalam UFSW juga memainkan peran penting dalam menentukan kualitas sambungan. Alat pengelasan harus cukup kuat untuk menahan kondisi lingkungan bawah air yang keras dan cukup tahan terhadap keausan dan deformasi selama pengelasan. Material alat yang tidak sesuai dapat menyebabkan keausan yang cepat atau deformasi alat, yang akan mengurangi efisiensi proses pengelasan dan menghasilkan sambungan dengan kualitas yang lebih rendah. Oleh karena itu, pemilihan material alat yang tepat sangat penting untuk memastikan hasil pengelasan yang konsisten dan berkualitas tinggi.

Lingkungan pengelasan di bawah air juga memberikan tantangan tersendiri yang mempengaruhi kualitas sambungan. Tekanan hidrostatik yang tinggi dan aliran air di sekitar zona las dapat mempengaruhi distribusi panas dan pendinginan selama proses pengelasan. Pendinginan yang terlalu cepat, yang umum terjadi di bawah air, dapat menyebabkan struktur mikro yang rapuh atau pembentukan retak pada sambungan. Selain itu, adanya kontaminasi dari air, seperti partikel-partikel kecil atau ion-ion tertentu, dapat mengakibatkan cacat pada sambungan, seperti korosi atau porositas, yang mengurangi kekuatan mekanik sambungan.

Komposisi material dasar (base material) yang digunakan juga berpengaruh terhadap kualitas sambungan UFSW. Material seperti AA6005-T6 memiliki karakteristik tertentu, seperti komposisi kimia dan sifat mekanik, yang mempengaruhi bagaimana material tersebut bereaksi terhadap panas dan tekanan selama pengelasan. Perbedaan dalam homogenitas material atau adanya ketidaksempurnaan dalam struktur awal material dapat mempengaruhi bagaimana material tersebut meleleh dan mengalir selama proses pengelasan, yang pada gilirannya mempengaruhi kualitas akhir sambungan.

Terakhir, **keahlian dan pengendalian proses oleh operator** juga berperan besar dalam menentukan hasil UFSW. Meskipun proses ini sebagian besar otomatis, operator masih harus mengawasi dan mengendalikan proses untuk memastikan bahwa semua parameter diatur dengan benar dan kondisi lingkungan tetap stabil selama pengelasan. Ketidakmampuan operator dalam mengidentifikasi atau menyesuaikan parameter-proses yang tidak sesuai dapat menyebabkan hasil pengelasan yang tidak optimal dan sambungan dengan kualitas yang lebih rendah. Dengan demikian, pelatihan dan pengalaman operator juga merupakan faktor penting dalam memastikan keberhasilan dan kualitas sambungan hasil UFSW.

BAB 3

Karakteristik Material AA6005-T6

3.1 Komposisi dan Sifat Material AA6005-T6

Material AA6005-T6 adalah salah satu jenis paduan aluminium dari seri 6000, yang dikenal karena kombinasi sifat mekanik dan ketahanan terhadap korosi yang baik. Komposisi kimia material ini terdiri dari aluminium sebagai komponen utama, dengan penambahan elemen paduan seperti magnesium dan silikon. Magnesium dalam paduan ini berkisar antara 0,6% hingga 0,9%, sementara silikon berkisar antara 0,7% hingga 1,1%. Kedua elemen ini berperan penting dalam membentuk fasa Mg_2Si , yang memberikan kekuatan dan kekerasan tambahan pada paduan tersebut setelah melalui proses pengerasan atau heat treatment.

Salah satu sifat material AA6005-T6 yang menonjol adalah **kekuatan tarik**nya yang cukup tinggi. Proses heat treatment dengan kode "T6" menunjukkan bahwa material ini telah mengalami proses solusi heat treatment diikuti dengan pendinginan cepat dan penuaan alami atau buatan. Proses ini meningkatkan kekuatan tarik material hingga sekitar 260 MPa hingga 310 MPa. Selain itu, material ini juga memiliki kekuatan luluh yang cukup tinggi, yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi struktural yang memerlukan material dengan kekuatan tinggi namun tetap ringan.

Selain kekuatan, **ketahanan terhadap korosi** juga menjadi salah satu keunggulan utama dari material AA6005-T6. Paduan ini memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi atmosferik, yang menjadikannya pilihan yang sering digunakan dalam aplikasi luar ruangan atau lingkungan yang terpapar cuaca. Kombinasi aluminium dengan magnesium dan silikon membantu membentuk lapisan oksida pelindung yang mencegah korosi lebih lanjut. Namun, meskipun ketahanan korosi pada umumnya baik, material ini mungkin memerlukan perlindungan tambahan jika digunakan di lingkungan yang sangat korosif, seperti di bawah air laut.

Dalam hal **keterlasan (weldability)**, material AA6005-T6 memiliki sifat yang cukup baik untuk pengelasan, terutama dengan metode pengelasan seperti Friction Stir Welding (FSW) dan Underwater Friction Stir Welding (UFSW). Paduan ini dapat dilas tanpa mengalami penurunan signifikan pada sifat mekaniknya, asalkan parameter-proses pengelasan diatur dengan tepat. Keterlasan yang baik ini disebabkan oleh komposisi kimianya yang memungkinkan terjadinya pencampuran yang baik antara logam induk dan material las, serta stabilitas struktur mikro selama proses pengelasan.

Kekerasan material AA6005-T6 juga menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan, terutama dalam aplikasi yang memerlukan resistensi terhadap deformasi. Kekerasan material ini setelah proses T6 biasanya berkisar antara 80 hingga 95 HV (Vickers Hardness). Kekerasan ini memberikan indikasi bahwa material tersebut mampu menahan beban mekanik dan goresan, sehingga cocok untuk aplikasi di mana ketahanan terhadap keausan diperlukan. Namun, perlu dicatat bahwa kekerasan material ini bisa berkurang setelah proses pengelasan, terutama jika parameter pengelasan tidak diatur dengan benar.

Terakhir, **densitas rendah** dari material AA6005-T6 merupakan salah satu alasan mengapa paduan ini sangat populer dalam industri otomotif dan transportasi. Dengan densitas sekitar $2,7 \text{ g/cm}^3$, material ini jauh lebih ringan dibandingkan dengan baja, tetapi tetap menawarkan kekuatan yang cukup tinggi. Hal

ini memungkinkan desain yang lebih efisien dan pengurangan berat keseluruhan pada kendaraan atau struktur, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi. Kombinasi dari kekuatan, ketahanan korosi, keterlasan, kekerasan, dan densitas rendah menjadikan AA6005-T6 sebagai material yang sangat serbaguna untuk berbagai aplikasi teknik.

3.2 Tantangan dalam Pengelasan Material AA6005-T6

Mengelas material AA6005-T6, yang merupakan salah satu paduan aluminium dari seri 6000, menimbulkan sejumlah tantangan unik, terutama ketika menggunakan berbagai metode pengelasan seperti *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Friction Stir Welding* (FSW), dan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW). Setiap metode ini memiliki kelebihan dan kekurangannya, serta tantangan yang berbeda terkait dengan sifat material dan kondisi lingkungan pengelasan.

1. Tantangan dalam Pengelasan dengan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)

- GMAW adalah salah satu metode pengelasan konvensional yang banyak digunakan dalam industri. Namun, ketika diterapkan pada material AA6005-T6, ada beberapa tantangan yang perlu diperhatikan:
- **Sensitivitas terhadap Retak Panas:** Paduan aluminium dari seri 6000, termasuk AA6005-T6, sangat rentan terhadap retak panas selama proses GMAW. Ini disebabkan oleh adanya fasa eutektik rendah yang mencair pada suhu sekitar 548°C. Selama pengelasan, suhu ini mudah tercapai, menyebabkan retak mikro di zona pengaruh panas (HAZ), yang pada akhirnya mengurangi integritas struktural sambungan las.
- **Distorsi dan Tegangan Residual:** Karena konduktivitas termal aluminium yang tinggi, panas yang dihasilkan selama proses pengelasan GMAW cepat menyebar ke seluruh material, yang bisa menyebabkan distorsi signifikan. Selain itu, karena koefisien ekspansi termal aluminium yang tinggi, terjadi tegangan residual yang besar setelah pengelasan, yang dapat mengakibatkan deformasi atau bahkan retakan pada sambungan.
- **Penurunan Kekuatan Mekanik:** AA6005-T6 mendapatkan kekuatannya melalui proses penguatan penguatan. Namun, selama pengelasan dengan GMAW, zona pengaruh panas mengalami suhu tinggi yang mengakibatkan penurunan kekuatan mekanik. Ini karena struktur mikro dalam HAZ mengalami pelunakan akibat rekristalisasi parsial atau penguraian presipitat yang terjadi selama proses pengelasan.

2. Tantangan dalam Pengelasan dengan *Friction Stir Welding* (FSW)

- FSW adalah metode pengelasan yang lebih inovatif dan cocok untuk paduan aluminium karena tidak melibatkan pencairan material. Namun, ada tantangan yang muncul ketika menerapkan FSW pada AA6005-T6:
- **Pemilihan Parameter-Proses yang Tepat:** Salah satu tantangan utama dalam FSW adalah menentukan parameter-proses yang optimal, seperti kecepatan putar alat, kecepatan pengelasan, dan tekanan vertikal. Parameter yang tidak tepat dapat menyebabkan cacat dalam struktur mikro, seperti void, atau menyebabkan deformasi pada sambungan yang dihasilkan.
- **Kualitas Sambungan di Zona Pengadukan (Stir Zone):** Meskipun FSW tidak menciptakan HAZ yang sama seperti dalam metode pengelasan fusi seperti GMAW, terdapat zona pengadukan (stir zone) di mana material mengalami plastifikasi dan pencampuran intensif. Kualitas pengadukan material sangat bergantung pada geometri alat dan parameter-proses yang

digunakan, serta dapat mempengaruhi kekuatan dan ketahanan korosi dari sambungan yang dihasilkan.

- **Konsistensi Kualitas Sambungan:** Karena FSW adalah proses pengelasan solid-state, perbedaan kecil dalam kondisi operasi dapat mempengaruhi kualitas sambungan secara signifikan. Kontrol yang cermat diperlukan untuk memastikan bahwa sambungan yang dihasilkan bebas dari cacat dan memiliki sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

3. Tantangan dalam Pengelasan dengan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW)

- UFSW merupakan adaptasi dari FSW yang dirancang untuk pengelasan di bawah air, menambah lapisan kompleksitas tambahan pada proses pengelasan AA6005-T6:
- **Pengelolaan Lingkungan Berair:** Salah satu tantangan utama UFSW adalah pengelolaan kondisi lingkungan berair. Air berfungsi sebagai media pendingin yang sangat efektif, yang dapat mengakibatkan pendinginan cepat dari sambungan las. Pendinginan yang terlalu cepat dapat menyebabkan pembentukan struktur mikro yang tidak diinginkan, seperti presipitat kasar, yang dapat mengurangi kekuatan dan ketahanan korosi sambungan.
- **Tekanan Air dan Stabilitas Alat:** Selama UFSW, tekanan air di sekitar area pengelasan bisa menjadi tantangan karena dapat mempengaruhi stabilitas alat las dan kualitas sambungan yang dihasilkan. Alat pengelasan harus dirancang untuk menahan tekanan tersebut dan tetap berfungsi dengan baik di lingkungan yang berair.
- **Perubahan Sifat Termal Material:** Pendinginan cepat selama UFSW bisa mengakibatkan perubahan sifat termal dari material AA6005-T6, khususnya dalam hal distribusi presipitat di dalam zona pengelasan. Pengaruh ini harus dikendalikan dengan baik untuk menghindari penurunan sifat mekanik, seperti kekuatan tarik dan kekerasan.
- **Kekakuan dan Keausan Alat:** Alat yang digunakan dalam UFSW perlu memiliki kekakuan yang tinggi dan ketahanan terhadap keausan, karena kondisi kerja di bawah air meningkatkan risiko korosi dan keausan alat. Pemilihan material alat dan desain yang sesuai sangat penting untuk menjaga kinerja dan umur panjang alat.

3.3 Pengaruh Lingkungan Bawah Air pada Pengelasan AA6005-T6

Pengelasan material AA6005-T6 di lingkungan bawah air menghadirkan tantangan unik yang mempengaruhi kualitas sambungan yang dihasilkan. Lingkungan bawah air memiliki karakteristik khusus, seperti tekanan tinggi, suhu rendah, dan keberadaan air sebagai media pendingin, yang semuanya dapat mempengaruhi proses pengelasan dan sifat mekanik sambungan. Berikut adalah penjelasan mengenai pengaruh lingkungan bawah air terhadap pengelasan AA6005-T6.

1. Pendinginan Cepat dan Dampaknya terhadap Struktur Mikro

- Salah satu pengaruh utama dari pengelasan bawah air adalah pendinginan cepat yang terjadi karena air memiliki kapasitas pendinginan yang sangat tinggi. Ketika proses pengelasan selesai, sambungan las mengalami penurunan suhu yang cepat, yang dapat mempengaruhi struktur mikro material. Pada AA6005-T6, pendinginan cepat ini bisa mengakibatkan pembentukan presipitat yang tidak diinginkan atau bahkan struktur mikro yang kurang stabil. Akibatnya, kekuatan tarik dan kekerasan sambungan dapat menurun, serta potensi untuk terjadinya retak mikro meningkat karena tidak adanya waktu yang cukup untuk relaksasi tegangan.

2. Pengaruh Tekanan Air terhadap Kualitas Sambungan

- Tekanan air yang tinggi di lingkungan bawah air dapat mempengaruhi stabilitas alat las dan proses pengelasan itu sendiri. Pada kedalaman tertentu, tekanan air meningkat secara signifikan, yang dapat menyebabkan distorsi pada alat pengelasan atau bahkan deformasi pada material yang sedang dilas. Selain itu, tekanan air yang tinggi juga dapat meningkatkan risiko terjadinya cacat seperti porositas atau inklusi gas dalam sambungan, karena gas yang terjebak dalam proses pengelasan mungkin tidak sepenuhnya keluar sebelum material membeku. Hal ini sangat berpengaruh pada kekuatan mekanik dan keandalan sambungan yang dihasilkan.

3. Korosi Galvanik dan Ketahanan terhadap Korosi

- Lingkungan bawah air cenderung mempercepat proses korosi pada material logam, termasuk AA6005-T6. Dalam proses pengelasan bawah air, perbedaan potensial antara material yang dilas dan lingkungan sekitarnya dapat memicu korosi galvanik, terutama jika ada perbedaan kimiawi antara zona pengelasan dan base metal. AA6005-T6, yang memiliki kandungan magnesium dan silikon yang signifikan, bisa lebih rentan terhadap jenis korosi ini jika tidak dilindungi dengan baik. Korosi yang terjadi pada sambungan las dapat mengurangi umur pakai komponen dan mempengaruhi integritas struktural jangka panjang.

4. Dampak Pembentukan HAZ di Lingkungan Bawah Air

- Pengaruh lingkungan bawah air juga terlihat pada pembentukan zona pengaruh panas (HAZ) selama pengelasan. HAZ adalah area di sekitar sambungan las yang mengalami perubahan suhu cukup tinggi sehingga mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik material. Di bawah air, pembentukan HAZ pada AA6005-T6 bisa menjadi lebih parah karena kombinasi pendinginan cepat dan tekanan air. HAZ yang terbentuk cenderung lebih rapuh dan bisa mengalami penurunan sifat mekanik, seperti penurunan kekuatan dan ketahanan terhadap retak. Pemahaman dan pengendalian HAZ sangat penting untuk memastikan kualitas sambungan tetap optimal.

5. Kondisi Pengerjaan dan Efisiensi Proses Pengelasan

- Pengelasan di lingkungan bawah air memerlukan peralatan khusus dan keterampilan yang berbeda dibandingkan dengan pengelasan di udara terbuka. Kondisi lingkungan yang menantang, seperti visibilitas yang terbatas, kesulitan dalam mengontrol posisi alat, dan keterbatasan akses ke area yang dilas, dapat mengurangi efisiensi proses pengelasan. Alat dan teknik pengelasan yang digunakan harus dirancang untuk beroperasi secara efektif dalam kondisi ini. Kurangnya kontrol yang tepat dapat mengakibatkan variasi dalam kualitas sambungan dan meningkatkan risiko kegagalan.
- Secara keseluruhan, pengelasan AA6005-T6 di lingkungan bawah air memerlukan pendekatan yang hati-hati dan pemahaman yang mendalam tentang bagaimana faktor-faktor lingkungan mempengaruhi proses pengelasan. Pengaruh lingkungan bawah air harus dipertimbangkan dengan serius untuk memastikan kualitas sambungan yang dihasilkan memenuhi standar industri yang ketat..

3.4 Komposisi dan Sifat Material AA5083

Mengelas Material **AA5083** merupakan salah satu jenis paduan aluminium dari **seri 5000**, yang dikenal karena **ketahanan korosi yang sangat baik** dan **kekuatan tinggi** dibandingkan dengan paduan aluminium non-heat treatable lainnya. Paduan ini menggunakan **magnesium (Mg)** sebagai unsur paduan utama, dengan tambahan kecil unsur **mangan (Mn)** dan **kromium (Cr)** untuk

meningkatkan kekuatan serta stabilitas struktur mikro. Kandungan magnesium dalam paduan ini berkisar antara **4,0% hingga 4,9%**, sedangkan mangan berada pada rentang **0,4% hingga 1,0%**, dan kromium sekitar **0,05% hingga 0,25%**. Kombinasi elemen tersebut menghasilkan **paduan aluminium-magnesium-mangan (Al-Mg-Mn)** yang memiliki keseimbangan ideal antara kekuatan mekanik, keuletan, dan ketahanan terhadap korosi.

Salah satu sifat yang paling menonjol dari material AA5083 adalah **ketahanannya terhadap korosi, khususnya di lingkungan laut dan industri kimia**. Kehadiran magnesium dalam jumlah tinggi membentuk lapisan oksida pelindung yang stabil di permukaan logam, sehingga mampu mencegah reaksi oksidasi lebih lanjut. Inilah alasan utama mengapa AA5083 banyak digunakan dalam **struktur kapal, tangki penyimpanan kriogenik, kendaraan militer, dan aplikasi kelautan lainnya**. Meskipun memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, material ini tetap perlu mendapat perlindungan tambahan jika digunakan dalam kondisi lingkungan yang sangat ekstrem, seperti air laut dengan kandungan ion klorida tinggi atau media asam kuat.

Berbeda dengan paduan seri 6000 yang dapat diperkuat melalui **perlakuan panas (heat treatment)**, paduan AA5083 termasuk dalam kategori **non-heat treatable alloy**. Artinya, peningkatan kekuatan pada paduan ini dicapai melalui proses **pengerjaan dingin (strain hardening)**, bukan dari perlakuan panas buatan. Melalui proses ini, kekuatan tarik (ultimate tensile strength) material dapat mencapai sekitar **270 hingga 350 MPa**, dengan kekuatan luluh (yield strength) berkisar **125 hingga 200 MPa**, tergantung pada kondisi pengerjaan dan ketebalan material.

Selain kekuatan mekaniknya yang tinggi, material ini juga menunjukkan **keuletan (ductility)** yang sangat baik, sehingga mampu menahan deformasi tanpa mengalami retak. Hal ini membuat AA5083 mudah dibentuk melalui proses **rolling, bending, dan deep drawing**, menjadikannya pilihan yang populer dalam industri manufaktur komponen struktural yang kompleks.

Dalam hal **keterlasan (weldability)**, AA5083 dikenal sebagai salah satu paduan aluminium dengan kemampuan las yang sangat baik. Material ini dapat dilas menggunakan berbagai metode pengelasan seperti **Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)**, dan terutama **Friction Stir Welding (FSW)**, termasuk varian bawah airnya (**Underwater Friction Stir Welding / UFSW**). Struktur mikro paduan ini yang relatif stabil terhadap panas membantu menjaga sifat mekanik setelah pengelasan, asalkan parameter proses dikontrol dengan baik. Namun, perlu diperhatikan bahwa pengelasan yang tidak optimal dapat menimbulkan **porositas dan retak panas**, terutama akibat tingginya kandungan magnesium yang sensitif terhadap kontaminasi hidrogen.

Dari sisi **kekerasan (hardness)**, AA5083 memiliki nilai kekerasan berkisar antara **75 hingga 95 HB (Brinell Hardness)**, tergantung pada tingkat pengerjaan dingin yang dilakukan. Nilai ini menunjukkan bahwa material tersebut cukup tangguh terhadap deformasi plastis dan goresan, sekaligus memberikan keseimbangan yang baik antara kekerasan dan keuletan. Akan tetapi, seperti pada paduan aluminium lainnya, kekerasan ini dapat menurun di daerah **Heat Affected Zone (HAZ)** setelah proses pengelasan akibat rekristalisasi sebagian struktur mikro.

Selain itu, **densitas rendah** dari AA5083, yaitu sekitar **2,66 g/cm³**, menjadi salah satu faktor utama yang menjadikannya material unggulan untuk aplikasi transportasi dan kelautan. Dibandingkan dengan baja, aluminium AA5083 memiliki berat yang jauh lebih ringan, sehingga mampu **mengurangi bobot struktur tanpa mengorbankan kekuatan mekanik**. Keunggulan ini memberikan manfaat besar dalam efisiensi energi, seperti penghematan bahan bakar dan peningkatan daya apung pada kapal.

Secara keseluruhan, kombinasi **kekuatan tinggi, ketahanan korosi yang luar biasa, kemampuan las yang baik, kekerasan yang memadai, dan densitas rendah** menjadikan AA5083 sebagai salah satu paduan aluminium paling serbaguna dan andal dalam dunia teknik. Paduan ini tidak hanya cocok untuk aplikasi kelautan, tetapi juga sangat ideal digunakan pada kendaraan darat, struktur tekanan

tinggi, dan sistem penyimpanan kriogenik yang memerlukan ketahanan mekanik dan lingkungan ekstrem secara bersamaan.

3.5 Tantangan dalam Pengelasan Material AA5083

- Meskipun **material AA5083** dikenal memiliki **keterlasan (weldability)** yang cukup baik dibandingkan banyak paduan aluminium lainnya, proses pengelasannya tetap menghadirkan berbagai **tantangan teknis** yang perlu diperhatikan. Tantangan-tantangan ini terutama disebabkan oleh **komposisi kimia paduan** yang mengandung kadar magnesium tinggi dan sifat aluminium yang memiliki **konduktivitas termal serta reflektivitas panas yang tinggi**. Jika tidak dikendalikan dengan baik, berbagai cacat pengelasan dapat terjadi dan berdampak langsung pada **penurunan kekuatan mekanik serta ketahanan korosi** hasil sambungan.

1. Retak Panas (Hot Cracking)

- Salah satu tantangan paling umum dalam pengelasan AA5083 adalah munculnya **retak panas (hot cracking)** di zona fusi. Fenomena ini terjadi akibat adanya **tegangan termal tinggi selama proses pendinginan logam cair**, di mana logam mulai mengeras tetapi belum sepenuhnya solid. Kandungan magnesium yang tinggi (sekitar 4–5%) meningkatkan risiko retak panas karena **menurunkan titik leleh eutektik dan memperluas rentang suhu solidifikasi**.
- Retak panas biasanya muncul di tengah-tengah jalur las atau di perbatasan zona fusi. Untuk mengurangi risiko ini, diperlukan **pengendalian arus las, kecepatan pengelasan, dan pemilihan logam pengisi yang sesuai**, misalnya **filler ER5356 (Al–5Mg)** atau **ER5183 (Al–4.5Mg–Mn)** yang memiliki kompatibilitas kimia tinggi dengan logam induk.

2. Porositas akibat Gas Hidrogen

- **Porositas** merupakan salah satu cacat paling sering dijumpai pada pengelasan aluminium, termasuk AA5083. Hal ini disebabkan oleh kecenderungan **aluminium cair menyerap gas hidrogen** dari kelembapan udara, pelindung gas, atau permukaan logam yang terkontaminasi minyak dan oksida. Saat logam membeku, hidrogen tidak dapat keluar dengan sempurna dan membentuk gelembung-gelembung kecil di dalam logam las.
- Porositas tidak hanya mengurangi kekuatan sambungan, tetapi juga **menurunkan ketahanan korosi** karena dapat menjadi titik awal serangan kimia atau elektrolitik. Pencegahannya dilakukan dengan **membersihkan permukaan logam sebelum pengelasan, menjaga kemurnian gas pelindung (argon atau helium), serta memastikan tidak ada kelembapan pada area kerja**.

3. Pembentukan Lapisan Oksida (Al_2O_3)

- Aluminium memiliki sifat sangat reaktif terhadap oksigen, membentuk **lapisan oksida aluminium (Al_2O_3)** secara alami di permukaannya. Lapisan ini memang memberikan perlindungan terhadap korosi, tetapi menjadi **penghalang utama selama pengelasan**. Lapisan oksida memiliki **titik leleh sekitar 2050°C**, jauh di atas titik leleh aluminium (660°C), sehingga jika tidak dihilangkan, dapat **menghambat pencampuran logam dan menyebabkan cacat fusi**.
- Untuk mengatasi hal ini, permukaan aluminium harus **dibersihkan secara mekanik atau kimia sebelum pengelasan**, dan bila menggunakan metode GMAW/GTAW, **arus AC atau efek pembersihan katodik** dari busur listrik digunakan untuk memecah lapisan oksida tersebut.

4. Degradasi Sifat Mekanik di Zona Terpengaruh Panas (HAZ)

- Daerah di sekitar sambungan las yang disebut **Heat Affected Zone (HAZ)** mengalami perubahan mikrostruktur akibat paparan panas. Karena AA5083 termasuk paduan **non-heat treatable**, kekuatannya bergantung pada pengerjaan dingin (strain hardening). Saat pengelasan dilakukan,

panas yang dihasilkan menyebabkan rekristalisasi parsial atau total di zona HAZ, sehingga menurunkan kekuatan luluh dan kekerasan material di area tersebut.

- Fenomena ini dikenal sebagai **softening effect**, dan dapat menyebabkan **penurunan kekuatan sambungan hingga 20–30%** dibandingkan logam induk. Solusi yang umum diterapkan adalah **mengatur input panas serendah mungkin**, menggunakan **pendinginan terkendali**, atau memilih teknik **Friction Stir Welding (FSW)** yang bersifat *solid-state*, sehingga tidak mencairkan logam dan dapat meminimalkan kerusakan di HAZ.

5. Distorsi dan Tegangan Sisa

- AA5083 memiliki **konduktivitas termal yang tinggi (sekitar 121 W/m·K)**, yang menyebabkan panas dari proses pengelasan menyebar dengan cepat ke seluruh bagian logam. Akibatnya, terjadi **gradien suhu yang besar antara daerah las dan sekitarnya**, yang menghasilkan **distorsi bentuk dan tegangan sisa (residual stress)** setelah pendinginan.
- Distorsi ini sering muncul dalam bentuk **pembengkokan (warping)** atau **tarikan (shrinkage)** yang dapat memengaruhi dimensi dan ketepatan geometris produk. Untuk mengatasinya, teknik seperti **pengelasan simetris, penjepitan kuat (clamping), dan kontrol urutan pengelasan** digunakan untuk menyeimbangkan gaya termal yang timbul selama proses.

6. Pemilihan Logam Pengisi (Filler Material)

- Pemilihan logam pengisi sangat penting untuk memastikan sambungan memiliki kekuatan dan ketahanan korosi yang baik. Penggunaan filler yang tidak sesuai dapat menyebabkan **korosi galvanik** akibat perbedaan potensial elektrokimia antara logam las dan logam induk.
- Untuk AA5083, pengisi **ER5356 (Al–5Mg)** dan **ER5183 (Al–4.5Mg–Mn)** adalah pilihan yang paling direkomendasikan karena kompatibel dalam hal komposisi kimia dan tidak menimbulkan reaksi antar-logam yang berlebihan. Namun, perlu diingat bahwa penggunaan filler dengan kandungan magnesium terlalu tinggi dapat meningkatkan risiko retak panas.

7. Pengaruh Lingkungan terhadap Proses Pengelasan

- AA5083 sering digunakan dalam **aplikasi kelautan dan bawah air**, di mana kelembapan, tekanan, dan suhu lingkungan sangat memengaruhi hasil las. Pengelasan di bawah air (*underwater welding*), misalnya, memperkenalkan risiko tambahan seperti **pendinginan cepat, ketidakstabilan busur listrik, dan peningkatan porositas akibat gas terlarut dalam air**. Kondisi ini menuntut penggunaan **metode pengelasan khusus seperti Underwater Friction Stir Welding (UFSW) atau pengelasan dalam ruang kedap air (dry chamber)** agar kualitas sambungan tetap terjaga.

8. Perubahan Mikrostruktur Pasca Pengelasan

- Selama proses pengelasan, sebagian besar daerah las mengalami **pencairan dan pendinginan cepat**. Proses ini mengakibatkan terbentuknya **butiran kolumnar kasar di zona fusi (Fusion Zone)** serta **rekristalisasi halus di HAZ**. Struktur ini berpengaruh pada distribusi kekerasan dan kekuatan sambungan, di mana daerah HAZ biasanya menjadi titik lemah. Oleh karena itu, **pengendalian kecepatan pendinginan dan penggunaan metode solid-state seperti FSW** dapat membantu mempertahankan stabilitas mikrostruktur.

3.5 Pengaruh Lingkungan Bawah Air pada Pengelasan Material AA5083

Pengelasan bawah air (**underwater welding**) merupakan proses penyambungan logam yang dilakukan dalam kondisi terendam sebagian atau seluruhnya di dalam air. Dalam konteks material **AA5083**, lingkungan bawah air memberikan tantangan tersendiri karena memengaruhi **karakteristik termal, metalurgi, dan elektrokimia** dari proses pengelasan. Meskipun AA5083 dikenal memiliki ketahanan korosi yang sangat baik dan keterlasan yang

tinggi, kondisi ekstrem di bawah permukaan air dapat menyebabkan perubahan signifikan pada **struktur mikro**, **sifat mekanik**, serta **kualitas sambungan las**.

1. Tekanan Hidrostatik dan Stabilitas Busur Las

- Salah satu pengaruh paling mendasar dari pengelasan bawah air adalah adanya **tekanan hidrostatik** yang meningkat seiring dengan kedalaman. Tekanan air ini secara langsung memengaruhi **bentuk dan kestabilan busur listrik** selama proses pengelasan. Pada kedalaman yang lebih besar, tekanan tinggi menyebabkan busur menjadi **lebih pendek dan menyempit**, sehingga **penetrasi panas ke dalam logam berkurang**. Akibatnya, **daerah fusi (fusion zone)** menjadi lebih dangkal, sempit, dan tidak merata. Selain itu, tekanan tinggi juga meningkatkan risiko **pemadaman busur (arc instability)** akibat terganggunya aliran gas pelindung oleh air yang merembes ke area las. Kondisi ini sering menyebabkan sambungan tampak tidak seragam serta menimbulkan cacat permukaan seperti **undercut** atau **incomplete fusion**.
- Jika proses pengelasan AA5083 dilakukan di dalam air, beberapa hal penting perlu diperhatikan agar kualitas **sambungan** tetap optimal. **Pengendalian tekanan hidrostatik** menjadi faktor utama karena dapat mengganggu stabilitas busur listrik dan mengubah bentuk kolam las. Untuk mengatasi hal ini, digunakan **sistem pelindung lokal** seperti **gas bubble shield** atau **ruang kedap air (dry habitat chamber)** guna menjaga area las tetap kering dan stabil di bawah tekanan tinggi.
- Selain itu, pendinginan **yang sangat cepat akibat air** menyebabkan perbedaan suhu yang ekstrem antara daerah las dan logam induk. Laju pendinginan tinggi ini dapat menimbulkan **tegangan termal tinggi, retak mikro, dan sifat getas** pada hasil las. Oleh karena itu, **pengaturan arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan** harus dikontrol dengan cermat agar distribusi panas tetap seimbang.
- Lingkungan air juga mengandung **hidrogen dan oksigen terlarut** yang dapat bereaksi dengan logam cair, menimbulkan **porositas** pada sambungan las. Untuk meminimalkan hal ini, metode **Underwater Friction Stir Welding (UFSW)** sering digunakan, karena proses ini tidak melibatkan fase cair dan mampu menghasilkan sambungan padat tanpa cacat gas.
- Selain faktor proses, **pemilihan logam pengisi (filler)** juga berperan penting. Penggunaan filler yang kompatibel seperti **ER5183 (Al-4.5Mg-Mn)** atau **ER5356 (Al-5Mg)** direkomendasikan untuk mencegah **korosi galvanik** antara logam induk dan hasil las. Setelah pengelasan, sambungan perlu diberikan **perlakuan pelindung tambahan**, seperti **anodisasi atau pelapisan epoksi**, untuk meningkatkan **ketahanan terhadap korosi laut**.
- Dengan memperhatikan faktor-faktor tersebut—mulai dari **tekanan hidrostatik, pengendalian panas, pencegahan porositas, hingga perlindungan pasca-las**—proses pengelasan AA5083 di bawah air dapat menghasilkan sambungan yang **kuat, tahan korosi, dan memiliki keandalan tinggi**, meskipun dilakukan di lingkungan yang ekstrem.

2. Pendinginan Cepat dan Dampaknya terhadap Struktur Mikro

- Air memiliki **kapasitas pendinginan (cooling rate)** yang jauh lebih tinggi dibandingkan udara. Selama pengelasan di bawah air, panas yang dihasilkan oleh busur las langsung diserap oleh air di sekitarnya, sehingga logam las dan daerah terpengaruh panas (**HAZ – Heat Affected Zone**) mengalami **pendinginan yang sangat cepat**.
- Proses pendinginan cepat ini menimbulkan beberapa efek metalurgi penting:
- Butiran menjadi lebih halus (grain refinement)** di zona fusi, yang secara umum meningkatkan kekerasan dan kekuatan sambungan.

- Namun, laju pendinginan yang terlalu cepat dapat menimbulkan **tegangan termal internal (thermal stress)**, yang meningkatkan risiko **retak mikro (microcrack)** di batas butir.
- Zona HAZ juga dapat mengalami **penurunan keuletan (ductility loss)** karena terjadinya rekristalisasi tidak sempurna.
- Dengan demikian, meskipun struktur mikro menjadi lebih halus, hasil las dapat menjadi **lebih keras tetapi juga lebih getas**, terutama bila tidak ada kontrol suhu selama pengelasan.

3. Porositas Akibat Reaksi Gas di Dalam Air

- Lingkungan bawah air mengandung **gas-gas terlarut** seperti hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) yang dapat bereaksi dengan logam cair selama pengelasan. Saat busur menyala, suhu tinggi menyebabkan air di sekitar area las terurai menjadi **hidrogen dan oksigen bebas**. Hidrogen yang terlarut dengan mudah masuk ke logam cair dan membentuk **gelembung gas (pori)** ketika logam mulai membeku.
- Porositas ini merupakan cacat paling umum pada **underwater welding** dan sangat sulit dihindari tanpa sistem pelindung. Gelembung gas yang terperangkap tidak hanya **menurunkan kekuatan sambungan**, tetapi juga menjadi **titik awal korosi** di kemudian hari. Oleh karena itu, penggunaan **metode solid-state seperti Friction Stir Welding (FSW) atau Underwater Friction Stir Welding (UFSW)** lebih direkomendasikan untuk material AA5083, karena proses tersebut tidak melibatkan fase cair yang memungkinkan difusi hidrogen.

4. Korosi Galvanik dan Elektrolisis

- Dalam lingkungan air laut, terutama yang bersifat elektrolit kuat karena kandungan **ion klorida (Cl^-)** yang tinggi, terjadi potensi perbedaan tegangan antara **logam las dan logam induk**. Perbedaan ini dapat memicu **korosi galvanik** di sekitar daerah sambungan, terutama bila logam pengisi (filler) yang digunakan tidak sepenuhnya kompatibel dengan logam induk.
- Selain itu, selama proses pengelasan di bawah air, arus listrik dari busur dapat menyebabkan **reaksi elektrolisis** pada air di sekitar sambungan. Proses ini menghasilkan gas hidrogen dan oksigen tambahan yang dapat memperburuk korosi lokal. Untuk mengurangi efek ini, digunakan logam pengisi **ER5183 (Al-4.5Mg-Mn)** atau **ER5356 (Al-5Mg)** yang memiliki **potensial elektrokimia mendekati logam induk** serta **lapisan pelindung anodisasi atau cat epoksi** setelah pengelasan untuk mencegah kontak langsung dengan air laut.

5. Penurunan Ketahanan Korosi Hasil Las

- Meskipun AA5083 secara alami memiliki **ketahanan korosi laut yang sangat baik**, proses pengelasan di bawah air dapat menurunkan kemampuan ini secara signifikan. Beberapa faktor penyebabnya meliputi:
- **Porositas tinggi** yang menciptakan celah bagi ion korosif.
- **Perubahan komposisi lokal** akibat kehilangan magnesium di zona fusi (evaporasi Mg pada suhu tinggi).
- **Struktur mikro tidak homogen** antara logam las dan logam induk, yang memicu korosi diferensial.
- Daerah yang paling rentan terhadap korosi adalah **zona HAZ dan garis fusi**, di mana perbedaan potensial listrik antar fasa logam paling besar. Oleh karena itu, dalam pengelasan bawah air, penerapan **lapisan protektif dan anodisasi** menjadi langkah penting untuk mempertahankan ketahanan korosi paduan ini.

6. Keterbatasan Visibilitas dan Aksesibilitas

- Selain tantangan metalurgi, kondisi fisik di bawah air seperti **minimnya visibilitas, turbulensi arus, dan tekanan tinggi** juga memengaruhi kualitas hasil pengelasan. Operator atau penyelam las sering mengalami kesulitan menjaga **jarak busur, kecepatan gerakan elektroda, serta orientasi pengelasan**. Kesalahan kecil dalam sudut atau jarak dapat mengakibatkan cacat **undercut, incomplete fusion**, atau

slag inclusion. Oleh sebab itu, pengelasan AA5083 di bawah air umumnya dilakukan oleh **penyelam berpengalaman** dengan bantuan **alat mekanik semi-otomatis** yang mampu mempertahankan konsistensi gerakan.

7. Solusi dan Pendekatan Teknologi

- Beberapa solusi teknis telah dikembangkan untuk mengurangi dampak negatif lingkungan bawah air pada pengelasan AA5083, antara lain:
 1. **Dry Underwater Welding** – menggunakan ruang kedap air (habitat chamber) berisi gas pelindung seperti argon, yang memungkinkan pengelasan dilakukan dalam kondisi “kering” meski di bawah air.
 2. **Underwater Friction Stir Welding (UFSW)** – teknik solid-state tanpa lelehan logam, sehingga bebas dari porositas dan retak panas.
 3. **Local Dry Chamber atau Gas Bubble Shield** – sistem pelindung lokal di area las yang mencegah kontak langsung dengan air.
 4. **Pengaturan parameter pengelasan** seperti arus, tegangan, dan kecepatan agar distribusi panas tetap stabil dan pendinginan tidak terlalu ekstrem.
 5. **Pasca-perlakuan (Post-Weld Treatment)** seperti anodisasi atau pelapisan cat epoksi untuk meningkatkan ketahanan korosi hasil las.

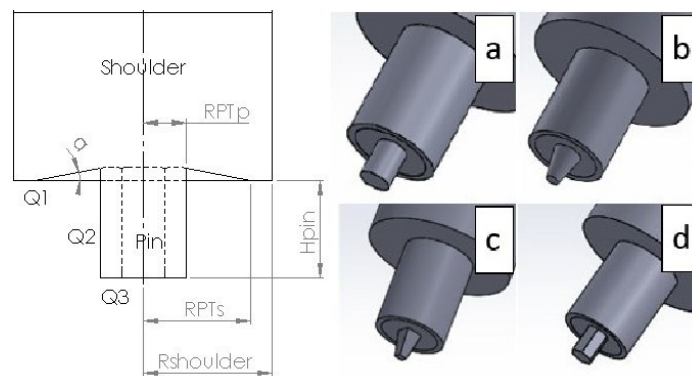
BAB 4

Heat Generation Rate dan Parameter-Proses UFSW

4.1 Heat Generation Rate

Heat generation rate pada alat (tool) *Friction Stir Welding* (FSW) adalah tingkat atau laju di mana panas dihasilkan selama proses pengelasan akibat gesekan antara tool yang berputar dan material kerja. Panas ini dihasilkan terutama dari gesekan di antara bahu tool dan permukaan material, serta interaksi antara pin tool dan material kerja di bagian dalam.

Panas yang dihasilkan ini sangat penting karena berdampak melunakkan material tanpa mencairkannya, sehingga memungkinkan tool untuk mengaduk material dan membentuk sambungan las yang kuat. Tingkat panas yang dihasilkan dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti kecepatan putaran tool, kecepatan pengelasan, gaya aksial yang diterapkan, dan desain tool, serta sifat termal material yang sedang dilas. **Mengatur heat generation rate** dengan tepat adalah kunci untuk mencapai pengelasan FSW yang berkualitas, karena panas yang dihasilkan akan mempengaruhi mikrostruktur, kekuatan mekanis, dan kualitas keseluruhan sambungan las (Mulyadi *et al.*, 2023)(Pontjonoto *et al.*, 2023).



Figur 7: Daerah *heat generation rate* pada tool FSW: (a). *Straight Cylindrical*; (b). *Taper Cylindrical*; (c). *Tapered Square*; dan (d). *Hexagonal*.

Perhitungan *heat generation rate* dalam penelitian ini memanfaatkan faktor slip (*slip factor*) sebesar 0,35 untuk menghitung Q_1 dan Q_3 , hal ini disebabkan oleh penilaian bahwa pengaruh dari gesekan sangat dominan pada bagian ini. Sebaliknya, pada perhitungan Q_2 , digunakan *slip factor* sebesar 0,5 karena pada tahap ini temperatur telah meningkat akibat deformasi plastis yang telah terjadi. Daerah Q_1 , Q_2 , dan Q_3 pada tool ditunjukkan pada Figur 7. Adapun untuk Kecepatan Rotasi Tool, konversi dilakukan ke dalam satuan rad/s menggunakan Persamaan 4.1. Kecepatan rotasi tool yang dikonversi ke dalam satuan rad/s dalam penghitungan *heat generation rate* dilakukan karena penggunaan sistem metrik internasional dan konsistensi unit dalam analisis termal.

$$\omega \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) = V(\text{rpm}) \times \frac{2\pi}{60} \quad (4.1)$$

4.1.1 Heat Generation Rate pada Straight Cylindrical

Model analitik dari *heat input* mengestimasi *power input* berdasarkan parameter pengelasan, model ini juga menggunakan kondisi kontak pada *tool interface*. Model ini menyatakan bahwa kontribusi *heat*

input (dq) untuk area (dA) dengan menggunakan istilah *contact shear* ($\tau_{contact}$), pada radius pusat (r) adalah:

$$dq = \omega \tau_{contact} r dA \quad (4.2)$$

Persamaan 4.2 merupakan persamaan yang telah umum digunakan sebagai dasar untuk menghitung nilai *heat input* pada permukaan tool dalam proses FSW. Dalam Persamaan 4.2, terlihat bahwa prediksi analitik untuk *heat input* sangat bergantung pada kondisi kontak dari tool. Kondisi kontak ini melibatkan dua aspek penting, yaitu area kontak dan jenis kontak. Area kontak mencakup seluruh permukaan antarmuka tool, sementara jenis kontak dapat bervariasi antara *stick*, *slip*, atau kombinasi dari *stick/slip*.

Pada kondisi *stick*, energi dari FSW setara dengan energi yang diperlukan saat terjadi *interfacial shearing* pada material. Untuk area terbatas dA pada permukaan tool dengan radius r , jika dilihat dari poros perputaran tool, *heat input* dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.3:

$$dq = \omega \tau_{yield} r dA \quad (4.3)$$

Dimana ω adalah kecepatan sudut tool dan τ_{yield} adalah *shear strength* dari material yang akan disambung. *Shear strength* dari material didapat dari *yield strength* material dengan mengaplikasikan *von Mises yield criterion* pada *uniaxial tension* dan *pure shear* sehingga menjadi Persamaan 4.4:

$$\tau_{yield} = \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

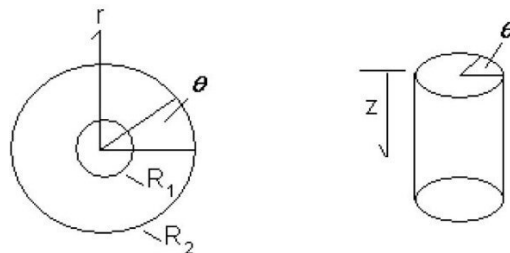
Pada kondisi *slip*, torsi yang diperlukan untuk mengatasi gesekan yang terjadi digunakan untuk menghitung *heat input*. Persamaan untuk menghitung *heat input* menjadi Persamaan 4.5:

$$dq = \omega \tau_{friction} r dA = \omega \mu p r dA \quad (4.5)$$

Dimana p adalah rata-rata tekanan yang diberikan oleh tool terhadap *workpiece*. Jumlah *heat contribution* dari seluruh *interface surface* sama dengan jumlah total *heat input* dari tool yaitu:

$$Q = dq_1 + dq_2 + dq_3 + \dots \quad (4.6)$$

Untuk permukaan tool dengan simetri radial dapat dibagi menjadi bagian horizontal (permukaan *shoulder* dan *pin*) dan bagian vertikal (sisi/selimut *pin*) ditunjukkan pada Figur 8.



Figur 8: Skematik permukaan tool.

Untuk bagian horizontal, nilai dari *heat input* dapat dihitung dengan Persamaan 4.7:

$$Q_{horizontal} = \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \omega \tau_{contact} r^2 \partial r \partial \theta$$

$$= \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega (R_2^3 - R_1^3) \quad (4.7)$$

Sedangkan untuk bagian vertikal dapat dihitung dengan Persamaan 4.8:

$$Q_{vertical} = \int_0^{2\pi} \int_0^{H_{wall}} \omega \tau_{contact} R_{wall}^2 \partial r \partial \theta$$

$$= 2 \pi \tau_{contact} \omega R_{wall}^2 H_{wall} \quad (4.8)$$

Persamaan 4.7 dan 4.8 dapat digunakan jika bentuk *shoulder* yang dipakai adalah *shoulder* yang sederhana atau *shoulder* yang tidak memiliki sudut bahu dan tidak menggunakan *tilt angle* pada proses FSW. Jika *tool* yang dipakai memiliki sudut terhadap garis horizontal dengan nilai < 45 , maka dapat menggunakan *inclination factor*.

Persamaan untuk $Q_{horizontal}$ jika menggunakan *concave* maupun *convex shoulder* dengan Persamaan 4.9:

$$Q_{horizontal} = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \tan(1 + \alpha),$$

untuk $\alpha \leq 45^\circ$ (4.9)

Faktor lain pada proses FSW adalah *tilt angle* (β) yang diukur dari garis vertikal, persamaan yang digunakan jika menggunakan *tilt angle* dengan Persamaan 4.10:

$$Q_{horizontal} = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega ((R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \left(\frac{1}{\cos \beta}\right)^3) \quad (4.10)$$

Dengan faktor ini, *heat generation rate* akan meningkat seiring dengan bertambahnya *tilt angle*, persamaan ini menggunakan asumsi bahwa kedalaman penetrasi *shoulder* disesuaikan dengan sudut kemiringan sehingga tidak ada rongga karena kemiringan *tool*. Dimana untuk $Q_{horizontal}$ dapat diartikan sebagai Q_1 sedangkan $Q_{vertical}$ dapat diartikan sebagai Q_2 .

Perhitungan Q_1 untuk *straight cylindrical* dapat menggunakan persamaan 4.7, namun karena pada tabel 4.2. desain eksperimen terdapat sudut bahu cekung dan sudut kemiringan *tool*, maka persamaan untuk menghitung Q_1 harus digabungkan dengan Persamaan 4.9 dan Persamaan 4.10. Sehingga persamaan tersebut menjadi Persamaan 4.11:

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta}\right)^3 \quad (4.11)$$

Pada penelitian ini menggunakan *slip factor*, sehingga $\tau_{contact}$ yang terjadi ada 2 macam, yaitu *sliding* dan *sticking*. Jika digabungkan dengan Persamaan 4.3, maka Persamaan 4.5. dapat diubah menjadi Persamaan 4.12:

$$Q_{1total} = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \tau_{sliding} \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3 + \delta \frac{2}{3} \pi \tau_{sticking} \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3 \quad (4.12)$$

Untuk perhitungan Q_2 dapat menggunakan persamaan 4.8, jika digabung dengan Persamaan 4.5 maka persamaan tersebut akan menjadi Persamaan 4.13:

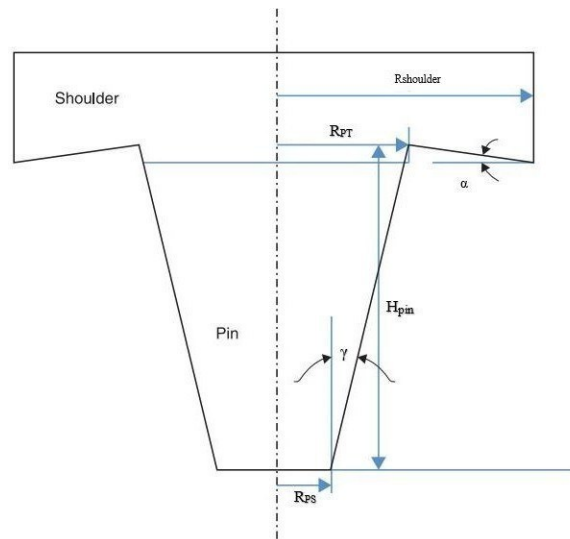
$$Q_{2total} = (1 - \delta) 2\pi \tau_{contact} \omega R_{pin}^2 H_{pin} + \delta 2\pi \tau_{contact} \omega R_{pin}^2 H_{pin} \quad (4.13)$$

Sedangkan untuk persamaan Q_3 dapat menggunakan Persamaan 4.7 dimana jika digabungkan dengan Persamaan 4.2 menjadi Persamaan 4.14:

$$Q_{3total} = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} R_{pin}^3 + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} R_{pin}^3 \quad (4.14)$$

4.1.2 Heat Generation Rate pada Taper Cylindrical

Perhitungan Q_1 untuk *tapered cylindrical* dapat menggunakan Persamaan 4.11 dengan R_{pin} adalah diameter pangkal pin (R_{PT}), dimana untuk geometri ini mempunyai diameter pangkal pin sebesar 4 mm. Sedangkan untuk perhitungan Q_2 , dengan pin bergeometri *Tapered Cylindrical* dengan radius bawah (R_{PS}), radius atas (R_{PT}), dan tinggi pin (H_{pin}) sebagaimana ditunjukkan pada Figur 9.



Figur 9: Geometri pin *tapered cylindrical*.

Oleh karena itu, *heat generation rate* pada bagian selimut pin (Q_2) dapat dihitung dengan Persamaan 4.15:

$$Q_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^l \omega r^2 \tau_{contact} d\theta dr$$

$$Q_2 = 2\pi \omega \tau_{contact} l \left(\frac{R_{PS} + R_{PT}}{2} \right)^2$$

$$Q_2 = \frac{\pi \omega \tau_{contact} H_{pin}}{2 \cos \gamma} (R_{PS} + R_{PT})^2 \quad (4.15)$$

jika digabungkan dengan Persamaan 4.5 akan menjadi Persamaan 4.16:

$$Q = (1 - \delta) \frac{\pi \omega \tau_{contact} H_{pin}}{2 \cos \gamma} (R_{PS} + R_{PT})^2 + \delta \frac{\pi \omega \tau_{contact} H_{pin}}{2 \cos \gamma} (R_{PS} + R_{PT})^2 \quad (4.16)$$

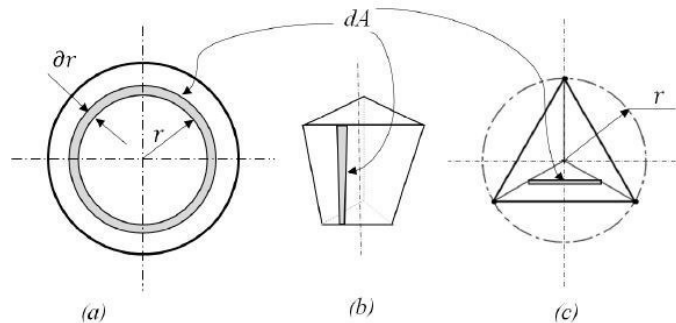
Heat generation rate pada permukaan pin (Q_3) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.14 dengan $R_{pin} = R_{PS}$. Jika R_{PS} tidak diketahui, maka dapat disubstitusikan dengan $R_{PS} = R_{PT} - H_{pin} \tan \gamma$. Hasil perhitungan *heat generation rate* pada tool FSW dengan geometri pin *taper cylindrical* pada Tabel 4.5.

4.1.3 Heat Generation Rate pada Hexagonal

Geometri pin hexagonal termasuk dalam kategori geometri polygonal, sehingga persamaan dasar untuk menghitung *heat generation rate* pada pin *hexagonal* dapat menggunakan Persamaan 4.17:

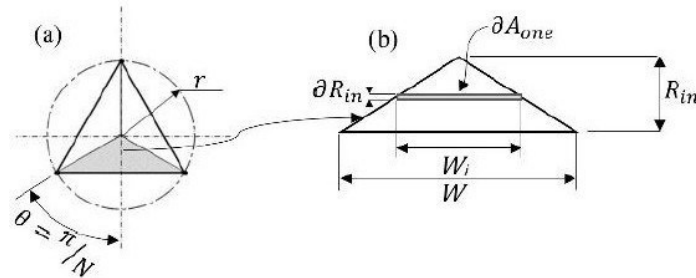
$$\partial Q = \omega \partial M = \omega x \partial F = \omega x \tau_{contact} \partial A \quad (4.17)$$

Dimana M adalah momen, F adalah gaya, A adalah area kontak, dan x adalah *shear force arm*. Sedangkan dA adalah elemen dengan area melintang antara matrix dan permukaan tool. Letak dari elemen ini ditunjukkan pada Figur 10. Elemen yang digunakan untuk menghitung area dari *shoulder*, selimut pin, dan permukaan pin berbentuk lingkaran dan persegi panjang sebagaimana ditunjukkan pada Figur 10.



Figur 10: Skematik dari orientasi permukaan dan area *infinitesimal*: (a). permukaan *shoulder*, (b). selimut pin, dan (c). permukaan pin.

Pada ujung pin, perhitungan area dA dilakukan dengan cara membagi area tersebut menjadi beberapa segitiga sesuai dengan jumlah sisi (N) sebagaimana ditunjukkan pada Figur 11.



Figur 11: Skematik permukaan pin: (a). permukaan melintang untuk geometri pin segitiga, dan (b) posisi serta dimensi dari area *infinitesimal*.

Sehingga dA dapat dihitung dengan Persamaan 4.18:

$$\partial A = N dA_{one} = N w_i \partial R_{in} \quad (4.18)$$

Dimana w_i adalah tebal dari elemen dan ∂R_{in} adalah tinggi dari elemen. Dari Figur 12, w_i dapat dihitung dengan Persamaan 4.19:

$$w_i = 2 r \sin \theta \quad (4.19)$$

Sedangkan ∂R_{in} dapat dihitung dengan Persamaan 4.20:

$$\partial R_{in} = \partial r \cos \theta \quad (4.20)$$

Dari Persamaan 4.19 dan 4.20, persamaan untuk menghitung dA menjadi Persamaan 4.21:

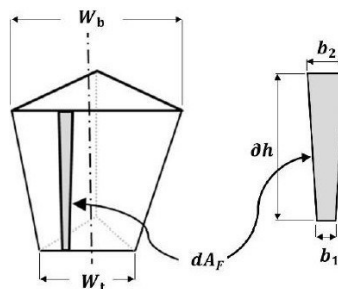
$$\partial A = 2 N \sin \theta \cos \theta r \partial r \quad (4.21)$$

Dari Persamaan 4.21, dapat diasumsikan bahwa *area factor* (F_A) menjadi Persamaan 4.22:

$$F_A = 2 N \sin \theta \cos \theta \quad (4.22)$$

Sehingga Persamaan 4.21 menjadi Persamaan 4.23:

$$\partial A = F_A r \partial r \quad (4.23)$$



Figur 12: Skematik elemen *infinitesimal* pada selimut pin

Untuk bagian selimut pin, bentuk dari area *infinitesimal* menyerupai bentuk trapesium sebagaimana ditunjukkan pada Figur 12. Sehingga untuk area dA dapat dihitung dengan Persamaan 4.24:

$$\partial A = N dA_F \quad (4.24)$$

Dimana dA_F adalah area untuk 1 sisi dan N adalah jumlah sisi pada selimut pin, karena pin bergeometri *straight hexagonal*, maka w_t dan w_b sama sehingga menjadi Persamaan 4.25:

$$dA_F = \delta w_t \times \delta h$$

$$\text{dimana: } w_t = 2 \times r \times \sin\theta$$

$$dA_F = 2 \times \sin\theta \times \delta r \times \delta h$$

$$dA = N \times dA_F = 2 \times N \times \sin\theta \times \delta r \times \delta h$$

$$\text{sehingga, } F_P = 2 \times N \times \sin\theta \quad (4.25)$$

Karena w_t dan w_b sama, maka $F_P = 2 \times N \times \sin\theta$ dengan demikian persamaan perhitungan Q_1 pada geometri pin *hexagonal* dengan Persamaan 4.26:

$$Q = (1 - \delta)^2 \pi \omega \tau \left(R_{\text{contact}}^3 - \left(\frac{2 N \sin\theta \cos^2\theta}{2\pi} \right) R_{\text{pin}}^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos\beta} \right)^3 + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{\text{sticking}} \left(R_{\text{shoulder}}^3 - \left(\frac{2 N \sin\theta \cos^2\theta}{2\pi} \right) R_{\text{pin}}^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos\beta} \right)^3 \quad (4.26)$$

Untuk perhitungan Q_2 , karena bentuk pin *straight*, maka nilai F_R untuk pangkal atau ujung pin adalah sama yaitu $F_R = \cos\theta$, maka persamaan menjadi Persamaan 4.27:

$$Q = (1 - \delta)^2 \pi \omega \tau \left(\frac{6 N \sin\theta \cos\theta}{4\pi} R_{\text{pin}}^2 H_{\text{pin}} \left(\frac{1}{\cos\beta} \right)^3 \right) + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{\text{sticking}} \left(\frac{6 N \sin\theta \cos\theta}{4\pi} R_{\text{pin}}^2 H_{\text{pin}} \left(\frac{1}{\cos\beta} \right)^3 \right) \quad (4.27)$$

Sedangkan untuk Q_3 dapat dihitung dengan Persamaan 4.28:

$$Q = (1 - \delta)^2 \pi \omega \tau \left(\frac{2 N \sin\theta \cos^2\theta}{2\pi} R_{\text{pin}}^3 \left(\frac{1}{\cos\beta} \right)^3 \right) + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{\text{sticking}} \left(\frac{2 N \sin\theta \cos^2\theta}{2\pi} R_{\text{pin}}^3 \left(\frac{1}{\cos\beta} \right)^3 \right) \quad (4.28)$$

Hasil perhitungan *heat generation rate* pada tool FSW dengan geometri pin *hexagonal* pada Tabel 4.6.

4.1.4 Heat Generation Rate pada Straight Cylindrical

Dari Persamaan 4.17, x adalah *shear force arm*, dimana untuk menghitung pada permukaan *shoulder*, selimut pin, dan permukaan pin dapat menggunakan Persamaan 4.29:

$$x = F_R r \quad (4.29)$$

Dimana F_R adalah *radius factor* dan nilai dari F_R untuk permukaan *shoulder* dan permukaan pin adalah menjadi Persamaan 4.30:

$$F_R = \frac{R_{in,b}}{R_p} = \frac{R_p \cos \theta}{R_p} = \cos \theta \quad (4.30)$$

Sedangkan F_R untuk selimut pin adalah menjadi Persamaan 4.31:

$$F_R = \frac{R_{in,b} \pm R_{in,t}}{2 R_p} = \frac{(R_p \cos \theta \pm T_r R_p \cos \theta)}{2 R_p}$$

$$F_R = \frac{\cos \theta (1 + T_r)}{2} \quad (4.31)$$

Perhitungan Q_1 pada geometri *tapered square* dapat juga menggunakan Persamaan 4.7, dengan menggabungkan F_R yang merupakan *adjust factor* dan nilai dari F_R untuk permukaan *shoulder* dan permukaan pin adalah $F_R = \frac{F_{PS}}{R_{PS}} = \cos \theta$ sedangkan *area factor* (F_A) adalah $F_A =$

$2 N \sin \theta \cos \theta$ maka persamaan tersebut akan menjadi Persamaan 4.32:

$$Q = (1 - \delta)^2 \pi \omega \tau \left(R_{sliding}^3 - \left(\frac{F_R F_A}{2\pi} \right) R_{pin}^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3 + \delta_3 \pi \omega \tau_{sticking} \left(R_{shoulder}^3 - \left(\frac{1}{2\pi} \right) R_{pin}^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3 \quad (4.32)$$

Untuk perhitungan Q_2 dapat menggunakan Persamaan 4.8 dengan menggabungkan F_R untuk selimut pin adalah $F_R = \frac{\cos \theta (1 + T_r)}{2}$, maka persamaan tersebut menjadi Persamaan 4.33:

$$Q = (1 - \delta)^2 \pi \omega \tau \left(\frac{3 F_R F_A}{4\pi} R_{pin}^3 - \left(\frac{1}{2\pi} \right) R_{pin}^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3 + \delta_3 \pi \omega \tau_{sticking} \left(\frac{3 F_R F_A}{4\pi} R_{pin}^3 - \left(\frac{1}{2\pi} \right) R_{pin}^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3 \quad (4.33)$$

Sedangkan untuk Q_3 dapat dihitung dengan Persamaan 4.34 berikut:

$$Q = (1 - \delta)^2 \pi \omega \tau \left(\frac{F_R F_A}{2\pi} R_{PS}^3 - \left(\frac{1}{2\pi} \right) R_{PS}^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3 + \delta_3 \pi \omega \tau_{sticking} \left(\frac{F_R F_A}{2\pi} R_{PS}^3 - \left(\frac{1}{2\pi} \right) R_{PS}^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3 \quad (4.34)$$

4.2 Parameter Proses Utama UFSW

Proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) sangat bergantung pada berbagai parameter yang harus dikendalikan dengan hati-hati untuk menghasilkan sambungan yang kuat dan tahan lama. Parameter proses utama dalam UFSW sangat menentukan kualitas sambungan, dan mencakup kecepatan putaran alat (tool rotation speed), kecepatan pengelasan (welding speed), gaya aksial (axial force), desain alat (tool design), serta parameter lingkungan seperti suhu dan tekanan air. Berikut ini adalah uraian mendalam tentang setiap parameter tersebut.

1. Kecepatan Putaran Alat (Tool Rotation Speed)

- Kecepatan putaran alat adalah salah satu parameter kritis dalam UFSW karena mempengaruhi jumlah panas yang dihasilkan selama proses pengelasan. Dalam UFSW, panas yang dihasilkan dari gesekan antara alat dan material kerja adalah faktor utama yang melunakkan material di sekitar pin alat sehingga memungkinkan terjadinya adukan material tanpa mencairkannya. Kecepatan putaran alat yang terlalu rendah dapat menghasilkan panas yang tidak mencukupi, sehingga material tidak cukup melunak dan menghambat pembentukan sambungan yang baik. Sebaliknya, kecepatan yang terlalu tinggi dapat

menghasilkan panas berlebih yang mengarah pada pengurangan kualitas sambungan, seperti pembentukan voids atau porositas. Oleh karena itu, pemilihan kecepatan putaran alat yang tepat sangat penting untuk memastikan keseimbangan yang optimal antara panas yang dihasilkan dan homogenitas material yang diaduk.

2. Kecepatan Pengelasan (*Welding Speed*)

- Kecepatan pengelasan adalah parameter lain yang mempengaruhi kualitas sambungan UFSW. Kecepatan pengelasan menentukan seberapa cepat alat bergerak sepanjang jalur las. Kecepatan pengelasan yang rendah memungkinkan waktu yang lebih lama bagi panas untuk menyebar ke seluruh area sambungan, yang dapat membantu mencapai adukan material yang lebih seragam. Namun, kecepatan yang terlalu rendah juga dapat menyebabkan overheating dan degradasi mikrostruktur material. Di sisi lain, kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi mungkin tidak memberikan cukup waktu untuk adukan material yang efektif, menghasilkan sambungan yang lemah atau cacat seperti incomplete fusion atau lack of penetration. Oleh karena itu, kecepatan pengelasan harus diatur dengan hati-hati untuk memastikan bahwa panas yang dihasilkan cukup untuk melunakkan material tanpa menyebabkan overheating.

3. Gaya Aksial (*Axial Force*)

- Gaya aksial yang diterapkan pada alat selama UFSW juga merupakan faktor penting yang harus dipertimbangkan. Gaya aksial menentukan seberapa dalam alat menembus ke dalam material kerja dan seberapa kuat tekanan yang diberikan selama proses pengelasan. Gaya aksial yang terlalu rendah dapat menyebabkan penetrasi yang tidak memadai, sehingga material tidak cukup diaduk dan mengakibatkan sambungan yang lemah. Sebaliknya, gaya aksial yang terlalu tinggi dapat menyebabkan deformasi material yang berlebihan dan kerusakan alat. Gaya aksial yang optimal harus cukup untuk memastikan penetrasi alat yang memadai ke dalam material kerja, tetapi tidak terlalu besar sehingga menyebabkan kerusakan atau cacat pada sambungan.

4. Desain Alat (*Tool Design*)

- Desain alat dalam UFSW mencakup berbagai aspek, seperti bentuk dan ukuran pin, bentuk bahu alat, serta material alat itu sendiri. Desain alat yang tepat sangat penting untuk mencapai adukan material yang optimal dan pembentukan sambungan yang kuat. Pin alat bertanggung jawab untuk mengaduk material di zona las, sementara bahu alat menghasilkan panas melalui gesekan dengan permukaan material kerja. Bentuk dan ukuran pin dapat mempengaruhi aliran material dan distribusi panas di zona las. Misalnya, pin yang lebih panjang dapat menghasilkan penetrasi yang lebih dalam, tetapi juga membutuhkan gaya aksial yang lebih besar. Bahu alat dengan bentuk cekung atau konveks dapat mempengaruhi distribusi tekanan dan panas selama proses pengelasan. Material alat juga harus cukup kuat untuk menahan tekanan dan suhu tinggi selama proses UFSW, sambil tetap mampu mempertahankan bentuk dan fungsinya.

5. Suhu dan Tekanan Air

- Karena UFSW dilakukan di bawah air, parameter lingkungan seperti suhu dan tekanan air juga memainkan peran penting dalam proses pengelasan. Suhu air mempengaruhi laju pendinginan sambungan setelah pengelasan. Air yang lebih dingin akan menyebabkan pendinginan yang lebih cepat, yang dapat mengarah pada pembentukan mikrostruktur yang lebih keras dan lebih rapuh. Sebaliknya, air yang lebih hangat dapat memperlambat laju pendinginan dan menghasilkan mikrostruktur yang lebih ulet. Tekanan air juga mempengaruhi proses UFSW, terutama pada kedalaman yang lebih besar di mana tekanan

hidrostatik lebih tinggi. Tekanan air yang lebih tinggi dapat meningkatkan gaya yang diperlukan untuk penetrasi alat ke dalam material kerja, serta mempengaruhi distribusi panas dan aliran material selama pengelasan.

6. Penetrasi Tool (*Tool Penetration Depth*)

- Kedalaman penetrasi tool dalam UFSW juga merupakan parameter yang perlu diperhatikan dengan cermat. Tool penetration depth mengacu pada seberapa dalam pin tool memasuki material kerja. Kedalaman ini harus cukup untuk memastikan bahwa seluruh lapisan material yang akan dilas mengalami adukan yang efektif. Jika penetrasi terlalu dangkal, maka adukan material tidak akan merata, dan dapat menyebabkan cacat seperti lack of fusion atau incomplete penetration. Sebaliknya, penetrasi yang terlalu dalam dapat menyebabkan overheating atau deformasi material yang berlebihan di bagian bawah sambungan. Oleh karena itu, kedalaman penetrasi tool harus diatur sedemikian rupa untuk mencapai keseimbangan yang optimal antara adukan material dan distribusi panas.

7. Sudut Kemiringan Tool (*Tool Tilt Angle*)

- Sudut kemiringan tool adalah sudut antara sumbu vertikal tool dan permukaan material kerja. Sudut kemiringan ini biasanya dipilih antara 0 hingga 3 derajat, tergantung pada material dan aplikasi spesifik. Sudut kemiringan yang tepat membantu memastikan bahwa material yang dilunakkan oleh panas gesekan didorong ke belakang oleh bahu tool dan terdistribusi secara merata di sepanjang jalur las. Jika sudut kemiringan terlalu kecil, maka material mungkin tidak cukup terdorong ke belakang, menyebabkan voids atau porositas dalam sambungan. Sebaliknya, sudut kemiringan yang terlalu besar dapat menyebabkan deformasi berlebih di permukaan atas sambungan, mengurangi kualitas sambungan. Pemilihan sudut kemiringan yang optimal membantu mencapai distribusi material yang merata dan pembentukan sambungan yang berkualitas tinggi.

8. Parameter Tambahan: Tekanan Hidrostatik dan Ketinggian Air

- Selain parameter utama yang telah disebutkan, dalam UFSW ada faktor tambahan seperti tekanan hidrostatik dan ketinggian air yang juga berpengaruh pada kualitas sambungan. Tekanan hidrostatik adalah tekanan yang dihasilkan oleh berat air di atas sambungan las, dan ini meningkat seiring dengan kedalaman. Tekanan ini dapat mempengaruhi distribusi panas dan material selama pengelasan, serta berpengaruh pada kemampuan alat untuk mencapai penetrasi yang memadai. Ketinggian air, atau kedalaman pengelasan, juga mempengaruhi tekanan hidrostatik dan dengan demikian harus diperhitungkan dengan cermat dalam pengaturan parameter proses UFSW.

BAB 5

Studi Kasus dan Penerapan Praktis

5.1 Pendahuluan

Dalam era teknologi yang terus berkembang, industri manufaktur memainkan peran kunci dalam memenuhi kebutuhan produk yang kuat, tahan lama, dan berkualitas tinggi. Pengelasan adalah salah satu elemen vital dalam rantai produksi, yang memungkinkan penyatuan material logam untuk membentuk struktur kompleks yang digunakan dalam berbagai sektor, seperti otomotif, konstruksi, dan industri kelautan (Rathinasuriyan and Kumar, 2020). Pengelasan *friction stir welding* (FSW) telah lama dikenal sebagai metode inovatif yang menggabungkan beberapa keunggulan, seperti ketahanan panas yang rendah, minimnya pencemaran udara, dan kualitas sambungan yang tinggi (Mishra, 2020). Namun, pengelasan di bawah air, sebuah tantangan khusus dalam dunia manufaktur, seringkali menjadi suatu kebutuhan mendesak dalam berbagai proyek konstruksi dan pemeliharaan di lingkungan laut, seperti kapal, platform lepas pantai, dan struktur bawah air lainnya (Surojo *et al.*, 2020). Lingkungan bawah air memperkenalkan sejumlah kompleksitas tambahan, mulai dari tekanan hidrostatik hingga masalah logistik, yang harus diatasi untuk mencapai pengelasan yang berkualitas dan aman (Gonzalez Romero *et al.*, 2023).

Dalam menghadapi tantangan ini, teknologi "*Underwater Friction Stir Welding*" (UFSW) telah muncul sebagai solusi potensial yang menjanjikan. UFSW adalah metode pengelasan revolusioner yang memungkinkan penyambungan material logam di bawah air tanpa bergantung pada atmosfer di atas permukaan air. Ini membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan kualitas pengelasan dalam konteks lingkungan bawah air yang kompleks (Yang *et al.*, 2020). Penelitian dan pengembangan teknologi UFSW menjadi semakin penting karena industri terus mencari cara untuk mengatasi tantangan pengelasan di bawah air. Dalam konteks ini, penelitian ini akan menjelajahi potensi dan aplikasi UFSW dalam berbagai sektor, mengidentifikasi parameter kunci yang memengaruhi kualitas sambungan, serta merinci tantangan teknis yang terkait dengan pelaksanaan UFSW di bawah air.

Penelitian-penelitian terkait UFSW telah dilakukan oleh: S. S. Sabari dkk. (Sree Sabari, Malarvizhi and Balasubramanian, 2016) melakukan penelitian studi perbandingan untuk mengetahui pengaruh kecepatan putaran pahat terhadap karakteristik zona aduk dan sifat tarik yang dihasilkan sambungan FSW dan UFSW. Dari penyelidikan ini, ditemukan bahwa sambungan UFSW yang dibuat menggunakan kecepatan putaran pahat 1200 rpm menunjukkan sifat tarik yang lebih unggul dibandingkan sambungan FSW. Di tahun yang sama S. S. Sabari dkk. (Sree Sabari, Malarvizhi and Balasubramanian, 2016) melakukan penyelidikan untuk mengevaluasi sifat mekanik dan karakteristik mikrostruktur sambungan paduan aluminium AA2519-T87 yang dibuat dengan proses FSW dan UFSW. Analisis elemen hingga digunakan untuk memperkirakan distribusi temperatur dan lebar daerah TMAZ pada kedua sambungan dan hasilnya dibandingkan dengan hasil eksperimen dan selanjutnya dikorelasikan dengan sifat mekanik. Kemudian R. Chandran dkk. (Rathinasuriyan and Santhanam, 2020) melakukan penelitian dengan tujuan untuk menentukan kelayakan pengelasan aduk gesek terendam paduan aluminium 6061-T6 pada kepala air yang berbeda melalui analisis makrostruktur. Dalam karya ini, paduan aluminium 6061-T6 dilas aduk gesek dalam kondisi normal dan terendam pada kecepatan putaran yang berbeda. dari 400 rpm, 800 rpm, 1200 rpm, 1600 rpm. Ketinggian air divariasikan dari 10 hingga 30 mm dalam kasus proses pengelasan aduk gesek terendam. Pada proses pengelasan aduk gesek normal dan terendam, kecepatan pengelasan 45 mm/menit, beban normal 30 kN, sudut kemiringan pahat 2°, kedalaman penetrasi pahat, dan geometri pahat dijaga konstan.

Selanjutnya, P. V. Krishna dkk. (Krishna, Jaware and Srikant, 2020) melakukan penelitian yang hasilnya menunjukkan signifikan perbedaan suhu puncak WPS dan UFSW sepanjang dengan pengurangan zona terkena panas di UFSW sedangkan hasil kecepatan aliran material menggarisbawahi perbedaannya antara FSW dan UFSW dalam hal nilai puncak pengadukan kecepatan dengan perubahan parameter yang mempengaruhi. Selain itu, M. A. Wahid dkk. (Wahid, Khan and Siddiquee, 2018) melakukan review on UFSW: *A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties*. Dari review tersebut disimpulkan bahwa UFSW merupakan metode yang lebih baik dibandingkan dengan FSW dalam meningkatkan kekuatan sambungan.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh berbagai peneliti, terdapat temuan-temuan penting terkait dengan UFSW. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sambungan yang dihasilkan melalui UFSW, terutama dengan kecepatan putaran pahat yang lebih rendah, dapat memiliki sifat tarik yang unggul dibandingkan dengan sambungan FSW konvensional. Selain itu, analisis mikrostruktur dan elemen hingga digunakan untuk memahami karakteristik zona aduk dan distribusi temperatur pada kedua jenis sambungan. Berkaitan dengan hal tersebut dalam penelitian ini, melakukan studi parameter kunci proses UFSW pada material AA6005-T6 untuk meningkatkan kekuatan dan kualitas sambungan, dan dengan harapan dapat memberikan manfaat signifikan dalam berbagai industri.

Pengelasan di bawah air adalah bidang yang terus berkembang dengan potensi besar di berbagai industri, termasuk kelautan, minyak dan gas, serta penelitian lingkungan bawah air. Namun, pengelasan di bawah air masih dihadapkan pada sejumlah tantangan, termasuk masalah tekanan hidrostatik yang tinggi, akses yang terbatas, dan ketahanan terhadap korosi (Anindito, Paundra and Muhayat, 2020). Teknologi UFSW merupakan salah satu inovasi terbaru yang menjanjikan dalam mengatasi kendala tersebut. Saat ini, UFSW sedang dalam tahap pengembangan dan penelitian yang intensif. Penelitian terkait UFSW di bawah air telah dilakukan untuk memahami parameter-proses kunci, seperti kecepatan putaran pahat, tekanan hidrostatik, jenis material, dan ketebalan material, serta bagaimana pengaruhnya terhadap kualitas sambungan logam di bawah air. Hasil penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa UFSW memiliki potensi untuk menghasilkan sambungan logam berkualitas tinggi dengan minimnya dampak lingkungan di lingkungan bawah air (Prastio and Mulyadi, 2024).

Salah satu kebaruan utama dalam penelitian ini adalah pengembangan pemahaman yang lebih mendalam tentang parameter-proses UFSW, khususnya pada pengelasan material AA6005-T6. Penelitian ini berfokus pada identifikasi parameter-proses yang optimal untuk menghasilkan sambungan dengan kualitas terbaik, baik dalam hal struktur makro, kekuatan tarik, dampak, maupun kekerasan. Melalui pendekatan ini, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan performa dan kualitas sambungan las pada kondisi pengelasan di bawah air. Harapan kedepannya yang bisa dilakukan adalah pengembangan sistem pemantauan dan pengendalian yang canggih. Ini termasuk penggunaan sensor dan teknologi otomatisasi untuk memantau dan mengendalikan proses UFSW secara *real-time*, sehingga memungkinkan perbaikan yang lebih cepat dan respons terhadap perubahan parameter-proses.

5.2 Metode

Penelitian ini melibatkan serangkaian langkah eksperimental dan analisis untuk menyelidiki parameter optimal proses UFSW pada material AA6005-T6 untuk meningkatkan kekuatan dan kualitas sambungan dalam lingkungan bawah air. Berikut adalah langkah-langkah metodologi penelitian yang dijalankan:

1. **Literatur review:** Langkah awal penelitian ini akan mencakup studi literatur mendalam tentang pengelasan di bawah air, teknologi UFSW, dan penelitian terkait lainnya. Tujuan dari studi literatur ini adalah untuk memahami konteks, tantangan, dan kemajuan yang telah dicapai dalam bidang ini.

2. **Perancangan Eksperimen:** Berdasarkan temuan dari studi literatur, dibuat rancangan eksperimen yang mencakup pemilihan material, parameter-proses (seperti kecepatan rotasi, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan dan sudut bahu cekung) pada Tabel 2.1, serta desain alat khusus yang memungkinkan pelaksanaan UFSW di bawah air. Rancangan proses pengelasan mencakup semua variabel yang akan diuji coba, seperti yang tercantum pada Tabel 2.2, dengan menggunakan desain eksperimen Taguchi. Dalam desain ini, R1 dan R2 merupakan replikasi eksperimen yang akan diuji baik secara mekanik maupun non-mekanik. Pendekatan ini memastikan validitas dan reliabilitas hasil penelitian, sekaligus memungkinkan identifikasi parameter-proses yang paling optimal.

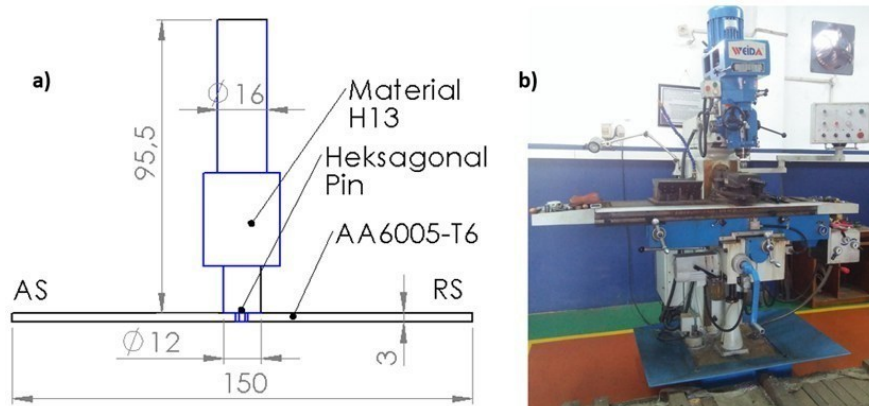
Tabel 2.1 Parameter Proses

No	Parameter	Unit	Notasi	Level		
				1	2	3
1.	Kecepatan rotasi tool	rpm	N	2200	2200	2200
2.	Kecepatan pengelasan	mm/min	KP	20	28	36
3.	Sudut kemiringan tool	derajat	SKT	2,5	3	3,5
4.	Sudut bahu cekung	derajat	SBC	5	8	11

Tabel 2.2 Desain Eksperimen $L_9(3^4)$

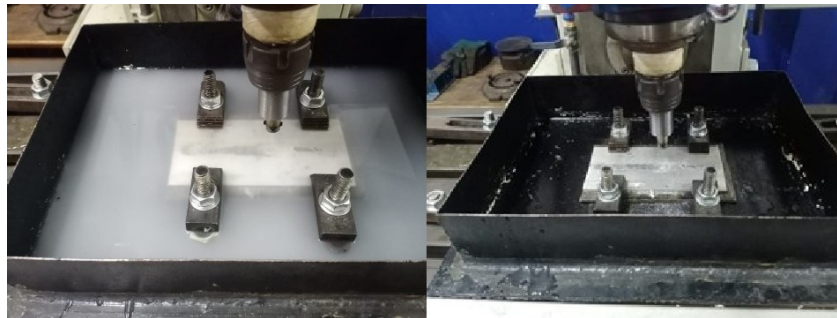
Spc	N (rpm)	KP (mm/min)	SKT (derajat)	SBC (derajat)	R1	R2
1.	2200	20	2,5	5		
2.	2200	28	3	8		
3.	2200	36	3,5	11		
4.	2200	20	3	11		
5.	2200	28	3,5	5		
6.	2200	36	2,5	8		
7.	2200	20	3,5	8		
8.	2200	28	2,5	11		
9.	2200	36	3	5		

3. **Persiapan Sampel dan Alat:** Sampel las yang digunakan untuk percobaan adalah paduan aluminium 6005-T6 setebal 3 mm dengan dimensi panjang 150 mm dan lebar 75 mm. Proses pengelasan Teknik UFSW dilakukan dengan alat yang terbuat dari baja perkakas H13 dengan dimensi diameter bahu 20 mm, diameter heksagonal pin 4 mm, dan panjang pin 2.7 mm, seperti terlihat pada Figur 13 (a). Pengelasan dilakukan dengan menggunakan mesin milling manual merk Weida X6332C disajikan pada Figur 13 (b).



Figur 13: (a) Desain alat UFSW, (b) Mesin milling manual merk Weida X6332C untuk proses UFSW.

4. **Pelaksanaan Eksperimen:** Eksperimen dilakukan menggunakan pemodelan di lingkungan bawah air yang terkendali disajikan pada Figure 14, dalam kolam uji bawah air atau sistem yang dapat mensimulasikan kondisi di bawah air. Selama eksperimen, parameter-proses yang telah ditentukan dicatat untuk setiap percobaan.



Figur 14: Model pelaksanaan eksperimen UFSW.

5. **Pengujian dan Analisis:** Setelah eksperimen selesai, sampel sambungan material AA6005-T6 dianalisis untuk menilai kualitas mekanik dan non-mekaniknya, yang mencakup struktur makro, kekuatan tarik, impak, serta kekerasan. Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana setiap parameter-proses mempengaruhi performa dan integritas sambungan yang dihasilkan.
6. **Analisis Data:** Data yang dikumpulkan selama eksperimen dianalisis secara menyeluruh untuk mengidentifikasi hubungan antara parameter-proses dan hasil akhir. Analisis ini bertujuan untuk menentukan parameter-proses yang paling optimal dalam menghasilkan sambungan dengan kualitas mekanik dan non-mekanik terbaik pada pengelasan di bawah air, khususnya untuk material AA6005-T6. Parameter-proses tersebut dievaluasi berdasarkan berbagai aspek, termasuk struktur makro, kekuatan tarik, impak, maupun kekerasan, guna memastikan performa dan integritas sambungan pengelasan yang optimal.

5.3 Analisa dan Pembahasan

Figur 15 menampilkan tiga sampel terpilih dari sembilan hasil eksperimen yang telah dilakukan. Sampel-sampel ini kemudian diuji secara mekanik dan non-mekanik untuk memberikan gambaran awal mengenai performa sambungan yang dihasilkan dari pengelasan material AA6005-T6 di bawah air. Berdasarkan hasil tersebut, dilakukan pembahasan lebih lanjut mengenai berbagai aspek kualitas

sambungan, termasuk struktur makro, kekuatan tarik, impak, kekerasan, dan kekasaran permukaan. Pembahasan ini bertujuan untuk menjelaskan bagaimana setiap parameter-proses mempengaruhi karakteristik mekanik dan non-mekanik dari sambungan yang dihasilkan, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap tercapainya kualitas sambungan yang optimal.



Figur 15: Hasil pengelasan UFSW dipilih 3 spesimen terbaik secara visual.

5.3.1 Struktur makro

Pengamatan struktur makro merupakan langkah awal yang krusial dalam menganalisis hasil sambungan pengelasan. Melalui pengamatan ini, dihasilkan gambaran umum dari struktur sambungan, termasuk bentuk, ukuran, dan distribusi butiran pada area yang dilas. Dalam konteks pengelasan material AA6005-T6 di bawah air, pengamatan struktur makro mengidentifikasi cacat-cacat seperti retakan, porositas, atau ketidakseragaman yang terjadi selama proses pengelasan. Analisis ini memberikan wawasan penting mengenai efektivitas parameter-proses yang digunakan serta kualitas keseluruhan dari sambungan yang dihasilkan. Dengan demikian, pengamatan struktur makro menjadi dasar yang penting sebelum melakukan analisis lebih mendalam terhadap sifat mekanik sambungan pengelasan.



Figur 16: Pengamatan penampang spesimen secara makro.

Pada Figur 16, bagian (a-spc 1) dengan parameter pengelasan kecepatan rotasi (N) 2200 rpm, kecepatan pengelasan (KP) 20 mm/min, sudut kemiringan tool (SKT) 2,5 derajat, dan sudut bahu cekung tool (SBC) 5 derajat menunjukkan adanya cacat flash terbanyak dibandingkan dengan bagian (b-spc 7) yang menggunakan parameter pengelasan N 2200 rpm, KP 20 mm/min, SKT 3,5 derajat, dan SBC 8 derajat, serta bagian (c-spc 3) dengan parameter N 2200 rpm, KP 36 mm/min, SKT 3,5 derajat, dan SBC 11

derajat. Hasil pengelasan dengan cacat flash paling sedikit terjadi pada spc 7, menunjukkan bahwa kombinasi parameter-proses tersebut lebih efektif dalam mengurangi terjadinya cacat flash.

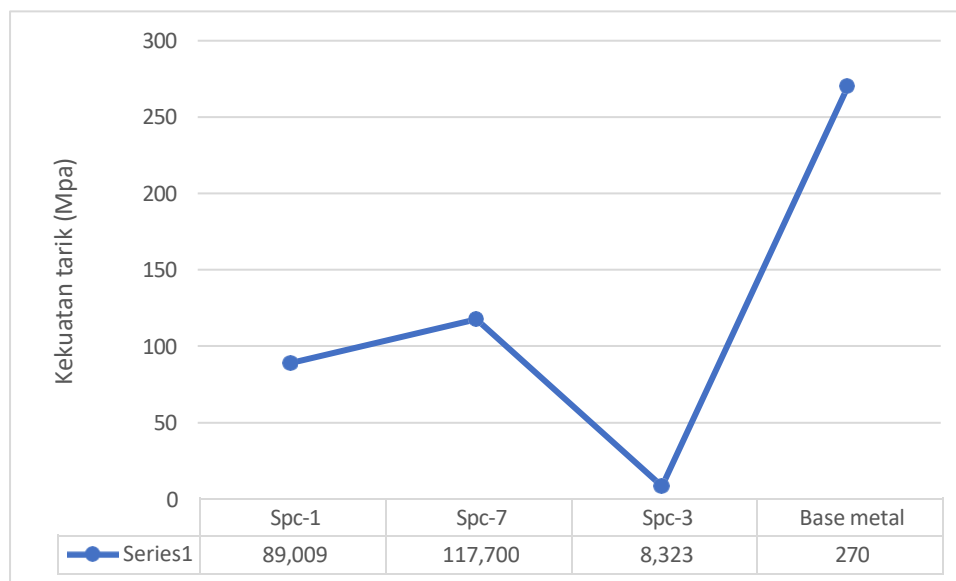
Cacat flash yang terjadi pada pengelasan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) dapat dijelaskan oleh interaksi beberapa parameter-proses, seperti kecepatan rotasi, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, dan sudut bahu cekung tool. Kecepatan rotasi yang tinggi (2200 rpm) menghasilkan panas yang signifikan, yang jika tidak diimbangi dengan kecepatan pengelasan yang tepat (misalnya, 20 mm/min), dapat membuat material menjadi terlalu plastis dan mengalir berlebihan, membentuk flash. Sudut kemiringan tool yang rendah (2,5 derajat) tidak cukup efektif untuk mengarahkan aliran material secara optimal, sementara sudut bahu cekung yang lebih kecil (5 derajat) tidak dapat mengontrol material dengan baik, sehingga lebih banyak material terdorong ke luar. Di sisi lain, parameter-proses pada spc 7 dengan kecepatan pengelasan yang sama, namun sudut kemiringan tool 3,5 derajat dan sudut bahu cekung 8 derajat memberikan keseimbangan yang lebih baik, mengurangi aliran material berlebih dan meminimalkan cacat flash. Lingkungan pengelasan di bawah air, yang memberikan pendinginan cepat, juga mempengaruhi distribusi panas, tetapi dalam kombinasi parameter-proses yang optimal, efek ini dapat dikendalikan, sehingga cacat flash diminimalkan.

Setelah spesimen dipotong dan diamati pada bagian penampangnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, terlihat bahwa terjadi cacat retak pada spc1, cacat terowongan (*tunnel defect*) pada spc3, sedangkan hasil pengelasan pada spc7 menunjukkan hasil optimal tanpa cacat. Cacat retak pada spc1 dapat dikaitkan dengan penggunaan parameter-proses yang kurang optimal, khususnya sudut kemiringan tool (SKT) yang rendah (2,5 derajat) dan sudut bahu cekung (SBC) yang juga kecil (5 derajat). Kombinasi ini menyebabkan distribusi tekanan yang tidak merata dan aliran material yang tidak terkendali, sehingga meningkatkan risiko retakan.

Sementara itu, cacat terowongan pada spc3 disebabkan oleh kecepatan pengelasan yang lebih tinggi (36 mm/min) dengan sudut bahu cekung yang besar (11 derajat). Kecepatan pengelasan yang tinggi mengurangi waktu paparan panas, yang bisa menyebabkan material tidak sepenuhnya mengisi area sambungan, menghasilkan rongga atau terowongan. Di sisi lain, parameter-proses yang digunakan pada spc7, dengan sudut kemiringan tool 3,5 derajat dan sudut bahu cekung 8 derajat, menunjukkan keseimbangan yang lebih baik dalam distribusi tekanan dan aliran material. Kecepatan pengelasan yang tetap moderat (20 mm/min) juga memastikan waktu pemanasan yang cukup untuk material mengalir dan mengisi sambungan dengan baik, sehingga tidak terjadi cacat. Kombinasi parameter-proses pada spc7 merupakan kontrol yang lebih baik terhadap dinamika material selama pengelasan, menghasilkan sambungan yang optimal tanpa cacat.

5.3.2 Kekuatan tarik

Pengujian kekuatan tarik merupakan langkah penting dalam mengevaluasi kualitas sambungan hasil pengelasan. Uji ini bertujuan untuk mengukur sejauh mana material sambungan dapat menahan gaya tarik sebelum terjadi kegagalan atau patah. Dalam konteks pengelasan material AA6005-T6 di bawah air, analisis kekuatan tarik memberikan informasi krusial mengenai integritas struktural sambungan, serta seberapa efektif parameter-proses yang digunakan dalam menghasilkan sambungan dengan kekuatan optimal. Hasil uji kekuatan tarik yang ditampilkan pada Figur 17 menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi dicapai pada spesimen spc 7 sebesar 117,7 MPa, sedangkan pada spesimen spc 1 sebesar 89,009 MPa, dan pada spesimen spc 3 hanya sebesar 8,323 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter-proses yang digunakan pada spc 7 lebih efektif dalam menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik yang unggul, dibandingkan dengan spc 1 dan spc 3.



Figur 17: Grafik uji kekuatan Tarik hasil pengelasan UFSW.

Perbedaan kekuatan tarik pada masing-masing spesimen dapat dijelaskan melalui hubungan antara parameter-proses dan cacat yang terjadi selama pengelasan. Spesimen spc 7, dengan parameter-proses optimal yaitu kecepatan rotasi 2200 rpm, kecepatan pengelasan 20 mm/min, sudut kemiringan tool 3,5 derajat, dan sudut bahu cekung 8 derajat, menunjukkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 117,7 MPa. Kombinasi parameter ini memungkinkan distribusi panas dan aliran material yang merata, tanpa cacat signifikan, sehingga sambungan memiliki integritas struktural yang baik.

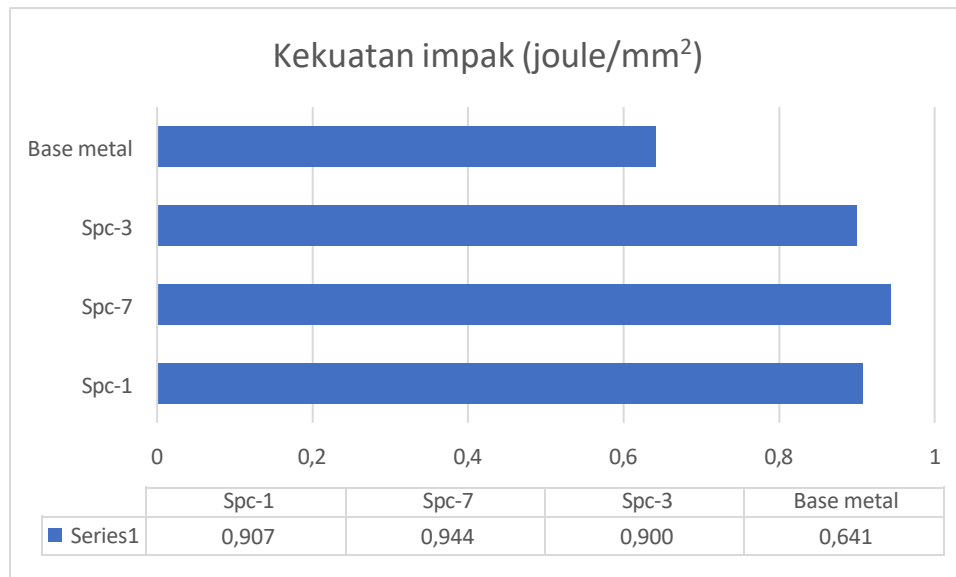
Sebaliknya, spesimen spc 1, dengan parameter-proses yang serupa namun sudut kemiringan tool 2,5 derajat dan sudut bahu cekung 5 derajat, menunjukkan kekuatan tarik menengah sebesar 89,009 MPa. Cacat retak pada sambungan ini mengurangi kekuatan tarik karena adanya titik lemah. Spesimen spc 3, dengan kecepatan pengelasan yang lebih tinggi (36 mm/min) dan sudut bahu cekung yang besar (11 derajat), menghasilkan kekuatan tarik terendah sebesar 8,323 MPa, karena cacat terowongan yang menunjukkan pengisian sambungan yang tidak sempurna. Cacat ini mengurangi kekuatan tarik secara signifikan, menunjukkan bahwa parameter-proses yang tidak optimal dapat menyebabkan penurunan kualitas sambungan.

Hasil pengelasan menggunakan metode *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) pada material AA6005-T6 menunjukkan kekuatan tarik yang jauh di bawah kekuatan tarik base metal AA6006-T6 sebesar 270 MPa, disebabkan oleh beberapa faktor. Cacat pengelasan seperti retak, porositas, atau cacat terowongan dapat mengurangi kekuatan sambungan jika parameter-proses tidak diatur dengan optimal. Parameter seperti kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan mempengaruhi distribusi panas dan aliran material; jika tidak sesuai, hasil pengelasan dapat menghasilkan sambungan yang lebih lemah. Selain itu, perubahan struktur mikro selama proses UFSW dan efek pendinginan cepat di bawah air juga mempengaruhi kualitas sambungan. Semua faktor ini bersama-sama menyebabkan kekuatan tarik sambungan yang dihasilkan dengan UFSW masih jauh di bawah kekuatan material dasar.

5.3.3 Kekuatan impact

Pengujian impact merupakan metode penting untuk mengevaluasi ketangguhan dan ketahanan material terhadap beban kejut atau benturan. Dalam analisis sambungan hasil pengelasan material AA6005-T6 di bawah air, uji impact memberikan informasi kritis tentang kemampuan sambungan untuk menyerap energi tanpa mengalami kegagalan. Hasil uji impact mengungkapkan bagaimana parameter-proses pengelasan mempengaruhi sifat ketangguhan sambungan serta sejauh mana sambungan tersebut dapat mempertahankan integritasnya di bawah kondisi beban dinamis. Hasil uji impact yang ditampilkan pada

Figur 18 menunjukkan bahwa kekuatan impak tertinggi dicapai pada spesimen spc 7, yaitu sebesar 0,944 joule/mm². Sebaliknya, spesimen spc 1 menghasilkan kekuatan impak sebesar 0,907 joule/mm², dan spesimen spc 3 hanya mencapai 0,900 joule/mm². Hasil ini menunjukkan bahwa parameter-proses yang diterapkan pada spc 7 lebih efektif dalam menghasilkan sambungan yang memiliki ketangguhan yang lebih baik dibandingkan dengan spesimen spc 1 dan spc 3.



Figur 18: Grafik uji kekuatan Impak hasil pengelasan UFSW.

Perbedaan kekuatan impak pada masing-masing spesimen dapat dikaitkan dengan parameter-proses dan cacat yang terjadi selama pengelasan. Spesimen spc 7, dengan parameter-proses optimal—kecepatan rotasi 2200 rpm, kecepatan pengelasan 20 mm/min, sudut kemiringan tool 3,5 derajat, dan sudut bahu cekung 8 derajat—menunjukkan kekuatan impak tertinggi sebesar 0,944 joule/mm². Parameter ini memungkinkan distribusi panas yang merata dan aliran material yang baik, menghasilkan sambungan dengan ketangguhan tinggi dan kemampuan menyerap energi yang lebih baik tanpa mengalami kegagalan.

Sebaliknya, spesimen spc 1, dengan sudut kemiringan tool yang lebih rendah (2,5 derajat) dan sudut bahu cekung yang lebih kecil (5 derajat), menunjukkan kekuatan impak sebesar 0,907 joule/mm². Parameter ini menyebabkan distribusi panas dan aliran material yang kurang optimal, mengakibatkan ketangguhan sambungan yang sedikit menurun. Spesimen spc 3, dengan kecepatan pengelasan lebih tinggi (36 mm/min) dan sudut bahu cekung yang lebih besar (11 derajat), menghasilkan kekuatan impak terendah sebesar 0,900 joule/mm². Kecepatan pengelasan yang tinggi mengurangi waktu pemanasan, menyebabkan pengisian sambungan yang tidak merata dan potensi cacat seperti terowongan, yang menurunkan kemampuan sambungan untuk menyerap energi.

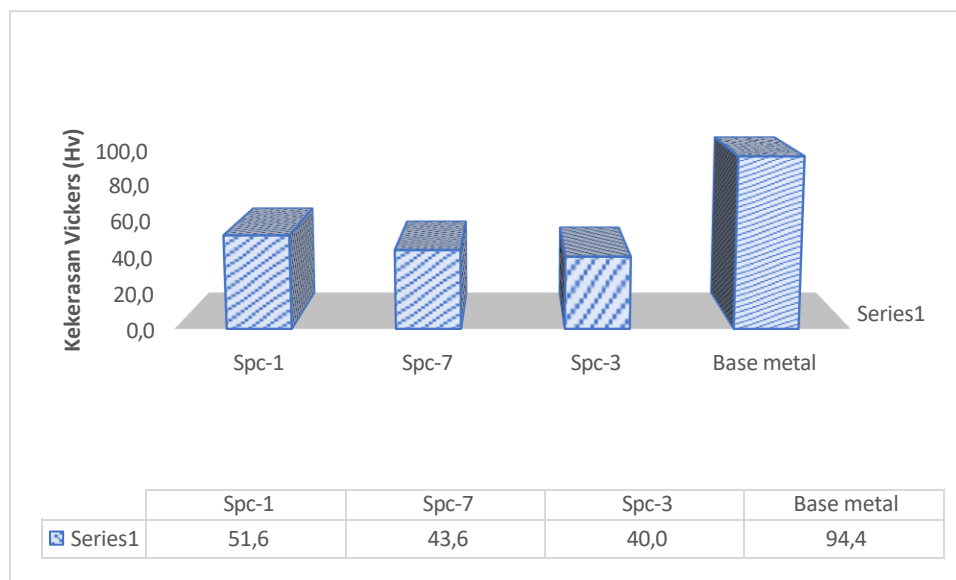
Jika dibandingkan dengan base metal AA6005-T6, kekuatan impak yang lebih tinggi pada sambungan hasil pengelasan UFSW dapat dijelaskan oleh peningkatan keuletan material yang terjadi selama proses pengelasan. Selama proses UFSW, material mengalami deformasi plastis yang signifikan karena pemanasan dan pengaruh mekanis dari tool pengelasan. Proses ini dapat meningkatkan struktur mikro material, seperti pembentukan grain yang lebih halus dan distribusi fase yang lebih merata, yang berkontribusi pada peningkatan ketangguhan sambungan.

Keuletan material yang dihasilkan melalui proses UFSW lebih tinggi daripada material dasar karena struktur mikro sambungan yang lebih seragam dan mengurangi kecenderungan terhadap pembentukan cacat seperti retak atau porositas. Proses pengelasan ini juga memungkinkan pembentukan sambungan yang lebih homogen, dengan perubahan struktur mikro yang dapat meningkatkan kemampuannya

untuk menyerap energi pada beban dinamis. Oleh karena itu, meskipun material base metal AA6005-T6 memiliki kekuatan impact yang lebih rendah secara intrinsik, hasil pengelasan UFSW dapat menunjukkan kekuatan impact yang lebih tinggi berkat keuletan tambahan dan kualitas sambungan yang lebih baik yang dihasilkan oleh parameter-proses pengelasan yang dioptimalkan.

5.3.4 Kekerasan

Pengujian kekerasan adalah metode penting untuk menilai sifat mekanik dari sambungan hasil pengelasan, memberikan informasi tentang ketahanan material terhadap deformasi permanen di bawah beban. Dalam konteks pengelasan material AA6005-T6 di bawah air, analisis kekerasan mengungkapkan distribusi kekerasan di sepanjang zona las, termasuk daerah weld nugget (WN) dan base metal (BM). Hasil pengujian yang ditampilkan pada Figur 19 menunjukkan bagaimana parameter-proses pengelasan mempengaruhi mikrostruktur sambungan dan kekerasannya.



Figur 19: Grafik uji kekerasan hasil pengelasan UFSW pada posisi *weld nugget* (WN).

Perbedaan kekerasan pada spesimen pengelasan dibandingkan dengan base metal AA6005-T6 dapat dikaitkan dengan parameter-proses yang digunakan selama pengelasan UFSW. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa kekerasan spesimen spc 1 (51,6 Hv), spc 7 (43,6 Hv), dan spc 3 (40 Hv) jauh lebih rendah dibandingkan dengan base metal yang memiliki kekerasan 94,4 Hv. Pada spesimen spc 1, parameter-proses seperti kecepatan rotasi tool, kecepatan pengelasan, dan sudut kemiringan tool yang lebih kecil menyebabkan distribusi panas yang tidak merata. Akibatnya, material di area sambungan mengalami rekristalisasi yang tidak ideal, menghasilkan kekerasan sambungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan spc 7 dan spc 3, tetapi tetap lebih rendah dari base metal.

Spesimen spc 7, meskipun menggunakan parameter-proses dengan kecepatan rotasi 2200 rpm dan kecepatan pengelasan 20 mm/min yang cukup optimal, menunjukkan kekerasan 43,6 Hv. Hal ini menunjukkan bahwa parameter tersebut, meskipun relatif baik, masih menyebabkan perubahan mikrostruktur di zona weld nugget (WN) yang mengakibatkan kekerasan lebih rendah dibandingkan dengan material dasar. Sudut kemiringan tool yang digunakan dalam spc 7 juga mempengaruhi distribusi panas dan pembentukan struktur mikro, yang berkontribusi pada kekerasan yang lebih rendah.

Spesimen spc 3, dengan kecepatan pengelasan yang lebih tinggi (36 mm/min) dan sudut bahu cekung yang besar (11 derajat), menunjukkan kekerasan terendah sebesar 40 Hv. Parameter-proses ini menyebabkan pendinginan yang lebih cepat dan pembentukan struktur mikro yang lebih lunak di zona sambungan, secara signifikan mengurangi kekerasan sambungan. Pendinginan yang cepat dan aliran

material yang buruk akibat sudut bahu cekung yang besar berpotensi menghasilkan struktur yang kurang padat, sehingga menurunkan kekerasan. Secara keseluruhan, parameter-proses UFSW mempengaruhi distribusi panas, aliran material, dan perubahan mikrostruktur, yang berdampak langsung pada kekerasan sambungan hasil pengelasan.

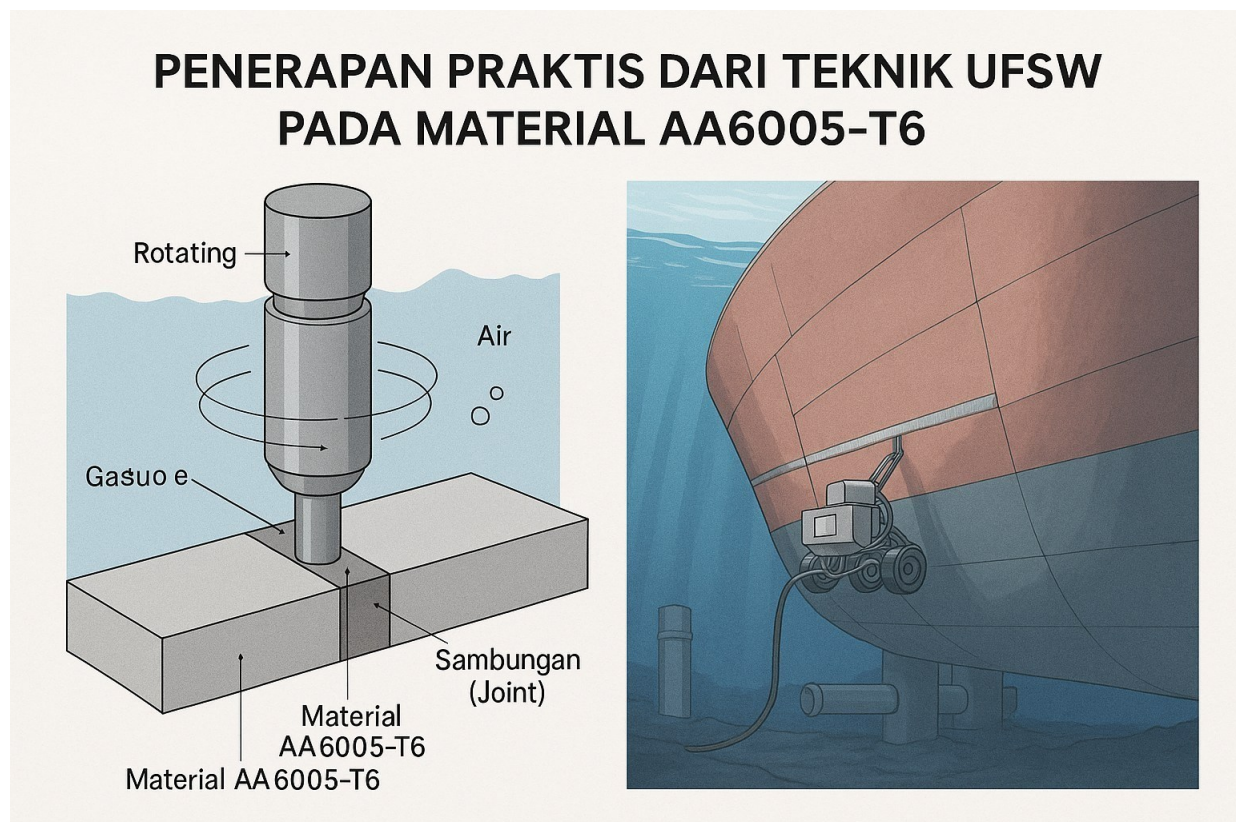
5.4 Kesimpulan dan Saran

- a) **Struktur Makro:** Pengamatan struktur makro sambungan hasil pengelasan UFSW pada material AA6005-T6 menunjukkan perbedaan signifikan antara spesimen dengan parameter-proses yang berbeda. Spesimen dengan parameter optimal, seperti pada spc 7, menunjukkan struktur makro yang lebih homogen dan bebas dari cacat besar seperti retak atau porositas, yang mengindikasikan kualitas sambungan yang baik. Sebaliknya, spesimen dengan parameter yang tidak ideal, seperti spc 1 dan spc 3, menunjukkan cacat seperti retak atau terowongan yang mengurangi integritas sambungan, sehingga mempengaruhi kualitas keseluruhan sambungan.
- b) **Kekuatan Tarik:** Hasil pengujian kekuatan tarik menunjukkan bahwa spesimen dengan parameter-proses yang lebih baik, yaitu spc 7, memiliki kekuatan tarik tertinggi sebesar 117,7 MPa, menunjukkan sambungan yang lebih kuat dan dapat menahan gaya tarik lebih baik. Spesimen dengan parameter yang kurang optimal, seperti spc 1 dan spc 3, menunjukkan kekuatan tarik yang lebih rendah, dengan spc 3 menunjukkan kekuatan tarik yang paling rendah sebesar 8,323 MPa. Perbedaan ini mencerminkan pengaruh signifikan dari parameter-proses terhadap kekuatan mekanik sambungan.
- c) **Kekuatan Impak:** Pengujian kekuatan impak mengungkapkan bahwa spesimen spc 7 memiliki kekuatan impak tertinggi sebesar 0,944 joule/mm², menunjukkan ketangguhan sambungan yang lebih baik dibandingkan dengan spesimen spc 1 dan spc 3, yang masing-masing memiliki kekuatan impak sebesar 0,907 dan 0,900 joule/mm². Parameter-proses yang optimal pada spc 7 memberikan sambungan yang lebih mampu menyerap energi kejutan tanpa mengalami kegagalan, sementara parameter yang kurang optimal pada spesimen lain mengakibatkan penurunan ketangguhan.
- d) **Kekerasan:** Pengujian kekerasan menunjukkan bahwa kekerasan sambungan hasil pengelasan UFSW, yang berkisar antara 40 hingga 51,6 Hv, lebih rendah dibandingkan dengan kekerasan base metal AA6005-T6 yang mencapai 94,4 Hv. Parameter-proses yang digunakan mempengaruhi struktur mikro sambungan, di mana kekerasan lebih rendah pada spesimen dengan kecepatan pengelasan yang tinggi atau sudut bahu cekung yang besar, menyebabkan struktur mikro yang lebih lunak. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengelasan UFSW mempengaruhi kekerasan sambungan melalui perubahan mikrostruktur dan distribusi panas selama pengelasan.
- e) Berdasarkan hasil penelitian ini, **disarankan** agar parameter-proses UFSW, seperti kecepatan putaran alat, kecepatan pengelasan, dan desain alat, dioptimalkan dengan hati-hati untuk setiap aplikasi spesifik pada material AA6005-T6. Pemilihan parameter yang tepat, seperti yang ditunjukkan oleh spesimen spc 7, dapat menghasilkan struktur makro yang lebih homogen, kekuatan tarik dan impak yang lebih tinggi, serta kekerasan yang lebih konsisten, meskipun lebih rendah dari base metal. Penelitian lebih lanjut dapat difokuskan pada pemahaman lebih dalam tentang interaksi antara parameter-proses dan mikrostruktur yang terbentuk selama pengelasan, untuk memperbaiki kualitas sambungan dan mengurangi cacat seperti retak atau porositas. Hal ini akan membantu dalam pengembangan teknik pengelasan yang lebih andal dan efisien untuk aplikasi di lingkungan bawah air.

5.5 Penerapan Praktis Pengelasan Underwater Friction Stir Welding (UFSW) pada Material AA6005-T6 untuk Industri Kelautan

5.5.1 Pendahuluan

Industri kelautan modern menuntut penggunaan material yang memiliki **rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan korosi yang unggul, serta kemampuan fabrikasi yang baik**. Salah satu material yang memenuhi kriteria tersebut adalah **aluminium paduan seri 6000**, khususnya **AA6005-T6**. Material ini banyak digunakan pada **struktur kapal, lambung ringan, pipa bawah laut, dan komponen platform lepas pantai**, berkat sifat mekaniknya yang seimbang antara kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan korosi terhadap air laut.



Figur 20: Ilustrasi penerapan pengelasan UFSW.

Namun demikian, pengelasan aluminium pada lingkungan bawah air pada Figure 20. menghadapi tantangan serius seperti **instabilitas busur listrik, pendinginan cepat, pembentukan porositas, serta penurunan sifat mekanik akibat perubahan mikrostruktur**. Oleh sebab itu, teknologi **Underwater Friction Stir Welding (UFSW)** dikembangkan sebagai solusi alternatif terhadap keterbatasan metode pengelasan fusi konvensional seperti MIG atau TIG.

Metode UFSW bekerja berdasarkan prinsip **solid-state joining**, yaitu penggabungan logam tanpa meleburkannya. Hal ini sangat relevan bagi material AA6005-T6 yang sensitif terhadap deformasi

termal dan kehilangan kekuatan akibat presipitasi berlebih selama proses fusi. Dengan karakteristik tersebut, **UFSW menawarkan potensi besar untuk diterapkan dalam perakitan dan perawatan struktur kelautan.**

5.5.2 Prinsip dan Mekanisme Proses UFSW

Gambar 1 menunjukkan ilustrasi skematik proses **Underwater Friction Stir Welding (UFSW)** pada material AA6005-T6. Pada metode ini, sebuah **tool berbentuk silinder** dengan pin di bagian ujungnya berputar dan menekan permukaan sambungan dua pelat aluminium. Gesekan antara tool dan logam menghasilkan panas lokal yang cukup untuk melunakkan material tanpa mencairkannya. Tool kemudian bergerak sepanjang garis sambungan, mencampur logam dari kedua sisi hingga terbentuk **daerah adukan (stir zone)** yang homogen.

Pada kondisi bawah air, fluida di sekeliling sambungan berperan sebagai **media pendingin alami**, mempercepat laju pelepasan panas. Meskipun dapat meningkatkan kekuatan akibat penyempurnaan butir, pendinginan cepat ini juga harus dikontrol karena dapat menimbulkan **tegangan sisa (residual stress)** dan menurunkan keuletan sambungan. Oleh karena itu, parameter proses seperti **kecepatan putaran tool, kecepatan pengelasan, gaya tekan, dan desain bahu** perlu dioptimalkan agar distribusi panas tetap seimbang.

Dari penelitian eksperimental terhadap material **AA6005-T6**, diketahui bahwa variasi parameter berpengaruh besar terhadap **struktur makro dan mikro** hasil las. Spesimen dengan parameter optimal (misalnya, spc 7) menunjukkan **struktur makro homogen tanpa cacat terowongan atau retak**, sedangkan parameter yang terlalu ekstrem (spc 1 dan spc 3) menghasilkan **defek internal** yang signifikan. Fakta ini menegaskan pentingnya kontrol proses dalam penerapan UFSW pada kondisi aktual di laut.

5.5.3 Penerapan pada Industri Kelautan

1. Struktur Lambung dan Sekat Kapal Aluminium

Dalam pembangunan **kapal cepat, feri penumpang, dan kapal patroli ringan**, material AA6005-T6 sering digunakan karena bobotnya yang ringan dan ketahanannya terhadap korosi air laut. Sambungan antar panel lambung dan sekat internal kapal umumnya membutuhkan metode pengelasan yang dapat menjamin **integritas mekanik dan ketahanan korosi jangka panjang.**

Dengan menerapkan **UFSW di bawah air**, pengelasan dapat dilakukan secara langsung pada kondisi perawatan atau penyambungan di laut tanpa harus mengangkat kapal ke dok kering. Proses ini menghilangkan risiko **porositas dan distorsi termal** yang sering terjadi pada pengelasan busur konvensional. Selain itu, **daerah HAZ (Heat Affected Zone)** yang dihasilkan lebih sempit, sehingga **kekuatan tarik dan dampak** sambungan mendekati logam induk. Hasil penelitian menunjukkan kekuatan tarik sambungan mencapai **117,7 MPa**, cukup tinggi untuk mendukung beban dinamis pada struktur kapal.

2. Pipa dan Sistem Saluran Bawah Laut

Industri kelautan juga banyak melibatkan **pipa transportasi fluida** seperti air laut, minyak, atau udara bertekanan. Pipa berbahan AA6005-T6 menjadi pilihan ideal karena tidak hanya ringan, tetapi juga memiliki ketahanan korosi tinggi terhadap ion klorida.

Penerapan UFSW pada pipa bawah laut memungkinkan **pengelasan sambungan melingkar** tanpa risiko kebocoran akibat porositas gas, yang umum pada proses fusi. Karena UFSW bekerja tanpa busur listrik dan tanpa bahan tambah, risiko **kontaminasi elektrokimia** akibat perbedaan potensial antara filler dan logam induk dapat diminimalkan.

Selain itu, pendinginan alami air laut membantu mempertahankan ukuran butir yang halus di zona adukan, yang berkontribusi terhadap **peningkatan kekuatan dan ketahanan aus** sambungan pipa. Dalam skenario perbaikan pipa bawah laut, penggunaan UFSW juga lebih aman bagi penyelam dan peralatan karena tidak menimbulkan percikan atau gas berbahaya.

3. Struktur Platform Lepas Pantai dan Tangki Penyimpanan

Struktur **platform pengeboran dan modul penyimpanan bawah laut** menuntut sambungan logam dengan kekuatan tinggi dan ketahanan korosi ekstrem. Dalam kondisi seperti ini, **Underwater Friction Stir Welding** memberikan solusi efektif untuk **penyambungan dan perbaikan lokal** tanpa perlu menghentikan operasi atau mengeringkan area kerja.

Penggunaan AA6005-T6 pada dinding tangki dan penopang platform dapat dikombinasikan dengan UFSW untuk menghasilkan sambungan yang tahan terhadap **beban siklik, tekanan internal, dan korosi elektrokimia**. Kekuatan impak sambungan mencapai **0,944 joule/mm²**, menunjukkan ketangguhan yang memadai untuk menahan getaran dan benturan akibat arus laut.

Selain itu, hasil pengujian kekerasan menunjukkan nilai 40–51,6 HV, memang lebih rendah dari base metal (94,4 HV), tetapi cukup stabil dan homogen. Hal ini menunjukkan bahwa zona adukan memiliki sifat yang konsisten dan tidak menunjukkan kelemahan signifikan terhadap deformasi plastis.

5.5.4 Keuntungan Penggunaan UFSW di Lingkungan Bawah Air

Penerapan teknologi UFSW di lingkungan bawah air memiliki sejumlah keunggulan praktis dan teknis dibandingkan metode pengelasan konvensional:

1. **Tidak ada busur listrik**, sehingga aman dilakukan di lingkungan basah dan bertekanan tinggi.
2. **Tidak terjadi pencairan logam**, sehingga mencegah cacat akibat porositas hidrogen dan segregasi elemen paduan.
3. **Pendinginan cepat alami oleh air** membantu memperhalus struktur butir, meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus.
4. **Efisiensi energi tinggi**, karena sebagian besar panas dihasilkan dari gesekan mekanis, bukan listrik.
5. **Tidak memerlukan bahan tambah (filler metal)**, sehingga menghindari korosi galvanik akibat perbedaan potensial elektrokimia.
6. **Ramah lingkungan**, karena tidak menghasilkan asap, gas, atau percikan berbahaya.

Keunggulan ini menjadikan UFSW sangat cocok untuk **perawatan kapal, penyambungan struktur bawah laut, serta fabrikasi modul kelautan di lokasi kerja**.

5.5.5 Faktor Desain dan Parameter Optimal

Keberhasilan penerapan UFSW di bawah air bergantung pada pengendalian **parameter proses** dan **desain alat**. Dari hasil penelitian, parameter yang paling berpengaruh terhadap kualitas sambungan meliputi:

- **Kecepatan putaran (rotational speed)**: menentukan jumlah panas yang dihasilkan; kecepatan terlalu tinggi dapat menyebabkan oksidasi berlebih, sedangkan terlalu rendah menghasilkan ikatan tidak sempurna.
- **Kecepatan pengelasan (traverse speed)**: memengaruhi ukuran zona adukan; kecepatan rendah memperluas zona HAZ, sedangkan kecepatan tinggi menurunkan homogenitas.
- **Gaya tekan (axial force)**: berpengaruh pada kedalaman adukan dan pengikatan antar logam.

- **Desain bahu (shoulder geometry):** bentuk cekung (concave shoulder) terbukti menghasilkan distribusi panas merata dan struktur makro yang lebih homogen.

Optimasi parameter tersebut, seperti pada spesimen **spc 7**, mampu menghasilkan sambungan dengan **kekuatan tarik dan dampak tertinggi**, serta **struktur bebas cacat besar**.

5.5.6 Integrasi Teknologi dalam Sistem Pemeliharaan Kapal

Dalam praktiknya, UFSW dapat diintegrasikan ke dalam **robot pengelasan bawah air** yang dikendalikan dari permukaan. Sistem ini memungkinkan perbaikan cepat pada bagian lambung atau sambungan tangki tanpa perlu mengangkat kapal ke permukaan. Penggunaan **sensor suhu dan tekanan digital** membantu memastikan konsistensi panas dan gaya tekan selama proses berlangsung.

Selain itu, dengan kemajuan **teknologi kontrol numerik (CNC)** dan **robotika bawah laut**, UFSW dapat diterapkan secara otomatis, menghasilkan **kualitas sambungan yang seragam dan dapat diulang**. Integrasi ini akan mendukung efisiensi waktu dan biaya dalam pemeliharaan armada laut skala besar.

5.5.7 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi kasus dan analisis penerapan praktis, dapat disimpulkan bahwa metode **Underwater Friction Stir Welding (UFSW)** merupakan solusi efektif untuk **pengelasan material AA6005-T6** di lingkungan kelautan. Proses ini menghasilkan sambungan dengan:

- Struktur makro homogen dan bebas cacat besar,
- Kekuatan tarik dan dampak yang tinggi (hingga 117,7 MPa dan 0,944 joule/mm²),
- Distribusi kekerasan yang stabil,
- Ketahanan korosi yang baik meskipun di lingkungan laut.

Untuk penerapan industri, disarankan agar:

1. **Parameter proses UFSW dioptimalkan** berdasarkan karakteristik spesifik setiap aplikasi.
2. **Robot pengelasan bawah air** dikembangkan untuk memastikan kestabilan proses.
3. **Perlakuan pelindung pasca-las**, seperti anodisasi atau pelapisan epoksi, diterapkan untuk memperpanjang umur sambungan.
4. Penelitian lanjutan diarahkan pada **analisis mikrostruktur dan sifat korosi jangka panjang** hasil pengelasan di lingkungan laut alami.

Dengan penerapan yang tepat, UFSW pada material AA6005-T6 dapat menjadi **teknologi unggulan** dalam perakitan dan perawatan struktur kelautan modern yang membutuhkan efisiensi, keandalan, dan ketahanan tinggi terhadap kondisi ekstrem.

5.6 Tugas Studi Kasus

5.6.1 Topik Penelitian

Studi Interaksi Termomekanik dalam *Underwater Friction Stir Welding* pada Aluminium AA5083: Analisis Eksperimental dengan Pendekatan Kecerdasan Buatan.

Proses pengelasan merupakan tahap krusial dalam industri manufaktur, khususnya pada sektor maritim yang membutuhkan struktur logam dengan kekuatan tinggi, ketahanan terhadap lingkungan laut, dan keandalan jangka panjang. Material seperti aluminium AA5083 semakin banyak digunakan dalam

konstruksi kapal cepat, kapal patroli, platform lepas pantai, dan struktur bawah laut karena keunggulannya yang ringan, tahan korosi, dan memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Namun, pengelasan aluminium bukan tanpa tantangan, terutama bila menggunakan metode konvensional seperti *Metal Inert Gas (MIG)* dan *Tungsten Inert Gas (TIG)*. Metode-metode ini menghasilkan zona panas yang luas, rentan menyebabkan distorsi termal, retakan, dan degradasi sifat mekanik di sekitar sambungan.

Sebagai alternatif, teknologi *Friction Stir Welding (FSW)* hadir sebagai metode *solid-state welding* yang mampu mengatasi banyak kekurangan proses fusi. FSW menggabungkan logam dengan mengaduk material dalam keadaan plastis, tanpa mencairkannya. Proses ini memberikan banyak keuntungan: menghasilkan sambungan yang lebih kuat, mengurangi zona terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), serta menurunkan kemungkinan porositas dan cacat las.

Salah satu inovasi terkini dari FSW adalah *Underwater Friction Stir Welding (UFSW)*, yakni pengelasan yang dilakukan dalam medium air. Dalam UFSW, lingkungan berair secara alami berfungsi sebagai sistem pendingin selama proses las berlangsung. Hal ini menyebabkan turunnya suhu puncak yang dihasilkan dan mempercepat laju pendinginan, sehingga mampu menekan deformasi termal dan residu tegangan secara signifikan. Keunggulan ini sangat strategis untuk diterapkan pada komponen aluminium dalam industri maritim yang sering beroperasi di lingkungan basah dan korosif.

Namun demikian, mekanisme interaksi termomekanik dalam UFSW masih belum sepenuhnya dipahami. Beberapa faktor kompleks seperti laju pendinginan tinggi, tekanan hidrostatik dari air, hingga gaya gesek antara tool dan material yang berubah secara dinamis menyebabkan perilaku logam menjadi sangat sulit diprediksi. Mikrostruktur hasil las dapat terpengaruh secara drastis, dan sifat mekanik seperti kekuatan tarik, kekerasan, serta ketangguhan bisa sangat bervariasi tergantung pada parameter proses yang digunakan. Karena itu, diperlukan pendekatan ilmiah dan sistematis untuk mengeksplorasi hubungan antar variabel proses dan kualitas sambungan yang dihasilkan.

Selain itu, proses eksperimen yang konvensional dan bersifat *trial-and-error* memakan waktu, energi, dan biaya yang besar. Oleh karena itu, pendekatan berbasis kecerdasan buatan (AI) seperti *Artificial Neural Network (ANN)* dan *Genetic Algorithm (GA)* mulai digunakan secara luas sebagai solusi modern. ANN mampu membangun model prediktif nonlinier yang menjelaskan hubungan antara parameter input seperti kecepatan putar, kecepatan maju, dan gaya aksial dengan output kualitas sambungan seperti kekuatan tarik dan kekerasan. Sementara itu, GA bekerja sebagai algoritma pencarian global yang dapat menemukan parameter optimal dari ruang kemungkinan yang sangat besar secara efektif dan efisien. Kombinasi ANN dan GA memungkinkan proses optimasi menjadi lebih cepat, efisien, dan akurat dibandingkan metode konvensional.

5.6.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang di atas, terdapat beberapa permasalahan utama yang akan diteliti dalam penelitian ini:

1. Bagaimana interaksi termomekanik dalam proses UFSW, khususnya terkait distribusi suhu, deformasi plastis, dan evolusi mikrostruktur terhadap material aluminium AA5083?
2. Bagaimana pengaruh parameter proses seperti kecepatan putar, kecepatan laju pengelasan, sudut kemiringan alat, dan suhu air terhadap kualitas sambungan UFSW?
3. Bagaimana model prediktif berbasis ANN dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan antara parameter proses dan hasil pengelasan?
4. Bagaimana optimasi parameter proses menggunakan GA dapat meningkatkan kualitas sambungan yang dihasilkan?

5.6.3 Pendekatan Pemecahan Masalah

Penelitian ini akan dilakukan melalui pendekatan eksperimental dan pemodelan kecerdasan buatan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Eksperimen UFSW: Dilakukan pengelasan pada material aluminium AA5083 dengan variasi parameter proses, diikuti dengan pengukuran distribusi suhu, uji mekanik (kekuatan tarik, kekuatan dampak, kekerasan), serta karakterisasi mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dan SEM.
2. Pengembangan Model ANN: Data hasil eksperimen digunakan untuk melatih model ANN yang mampu memprediksi hubungan antara parameter proses dan hasil pengelasan.
3. Optimasi dengan GA: Model ANN yang telah terlatih digunakan sebagai fungsi objektif dalam algoritma genetika untuk mencari kombinasi parameter yang menghasilkan sambungan optimal.
4. Validasi Eksperimental: Hasil optimasi diuji kembali secara eksperimental untuk memastikan kesesuaian antara prediksi model dan kenyataan.

A. State-of-the-Art

Penelitian mengenai FSW telah berkembang pesat sejak diperkenalkan oleh *The Welding Institute* (TWI) pada awal 1990-an. Penggunaan FSW pada aluminium terbukti menghasilkan sambungan yang lebih kuat dan stabil. Dalam konteks lingkungan basah, beberapa studi awal telah mengeksplorasi manfaat pengelasan FSW dalam air, terutama dalam mengontrol distorsi termal dan memperbaiki sifat mikrostruktur.

Namun, kebanyakan studi UFSW saat ini masih bersifat eksploratif dan terbatas pada pemahaman fenomena permukaan. Studi sistematis yang menghubungkan parameter proses dengan respons termomekanik internal dan properti mekanik sambungan masih sangat jarang. Selain itu, penggunaan metode prediktif berbasis AI dalam konteks UFSW juga masih sangat terbatas, terutama untuk pengelasan aluminium AA5083 dalam medium berair dengan kontrol parameter presisi tinggi.

B. Kebaruan Penelitian

Dibandingkan dengan studi sebelumnya, penelitian ini memiliki beberapa aspek kebaruan, yaitu:

1. Lingkup pengamatan interaksi termomekanik UFSW yang mendalam, termasuk distribusi suhu, pengaruh tekanan hidrostatik, dan deformasi plastis dalam media air.
2. Integrasi metode AI (ANN-GA) secara langsung pada konteks UFSW, yang belum banyak dilakukan dalam literatur.
3. Pemodelan dan optimasi berbasis data eksperimental aktual, bukan simulasi numerik semata, yang memberikan hasil lebih dekat dengan kondisi nyata di industri.
4. Relevansi langsung terhadap kebutuhan industri maritim Indonesia, seperti pembangunan kapal berbahan aluminium, kapal cepat, serta struktur bawah laut, yang membutuhkan sambungan berkualitas tinggi, efisien, dan tahan lama.

Pustaka

- Anindito, J., Paundra, F. and Muhayat, N. (2020) 'Pengaruh aliran dan kedalaman air terhadap hasil pengelasan dan kekerasan sambungan las bawah air baja SS400', *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 15(2), pp. 25–33.
- Gonzalez Romero, H. A. *et al.* (2023) 'Influence of Heat Input on the Weldability of ASTM A131 DH36 Fillet Joints Welded by SMAW Underwater Wet Welding', *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). doi: 10.3390/su151411222.
- Kalpakjian, S. and S. R. S. (2009) 'MANUFACTURING ENGINEERING Illinois Institute of Technology', p. Chapter 31-900-921.
- Krishna, P. V., Jaware, A. B. and Srikant, R. R. (2020) 'Modelling and Simulation of Friction Stir Welding and Under Water Friction Stir Welding of Al6063 Alloy', *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 8(2), pp. 67–83. doi: 10.13189/ujme.2020.080201.
- Mansyur, A. R. (2020) 'Dampak COVID-19 Terhadap Dinamika Pembelajaran Di Indonesia', *Education and Learning Journal*, Vol. 1, No, pp. 113–123.
- Mishra, A. (2020) 'Surface quality analysis of friction stir welded joints by using fourier transformation and local binary patterns algorithms', *Soldagem e Inspecao*, 25, pp. 1–11. doi: 10.1590/0104-9224/SI25.27.
- Mulyadi *et al.* (2023) 'The Influence of the Tool Concave Shoulder Angle on Heat Generation in the Stir Friction Welding Process with AA6061-T651 Materials', *Key Engineering Materials*, 943, pp. 55–61. doi: 10.4028/p-86p3c1.
- Pontjonoto, N. A. *et al.* (2023) 'Friction Stir Welding Process Optimization on 4 Tool Pin Geometries with Process Parameters and Shoulder Concave Angle in 6005A-T6 Aluminium Alloy Joining', *Key Engineering Materials*, 943, pp. 33–39. doi: 10.4028/p-4ui57t.
- Prastio, D. D. and Mulyadi, M. (2024) 'Influence of Process Parameters on the Quality of Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Joint in AA6005-T6 Series Aluminium Penetration and Porosity Study'. Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. doi: 10.21070/ups.4604.
- Rathinasuriyan, C. and Kumar, V. (2020) 'Optimisation of submerged friction stir welding parameters of aluminium alloy using RSM and GRA', *Advances in Materials and Processing Technologies*, pp. 1–14. doi: 10.1080/2374068X.2020.1793264.
- Rathinasuriyan, C. and Santhanam, S. K. V. (2020) 'Submerged friction stir welding of 6061-T6 aluminium alloy under different water heads', *Materials Research*, 21(6). doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-1070.
- Sree Sabari, S., Malarvizhi, S. and Balasubramanian, V. (2016) 'Characteristics of FSW and UWFSW joints of AA2519-T87 aluminium alloy: Effect of tool rotation speed', *Journal of Manufacturing Processes*, 22, pp. 278–289. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.03.014.
- Surojo, E. *et al.* (2020) 'Recent developments on underwater welding of metallic material', *Procedia Structural Integrity*, 27(2019), pp. 14–21. doi: 10.1016/j.prostr.2020.07.003.
- Wahid, M. A., Khan, Z. A. and Siddiquee, A. N. (2018) 'Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties', *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 28(2), pp. 193–219. doi: 10.1016/S1003-6326(18)64653-9.
- Wang, Q. *et al.* (2015) 'The adjustment strategy of welding parameters for spray formed 7055 aluminum alloy underwater friction stir welding joint', *Materials and Design*, 88, pp. 1366–1376. doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.038.
- Yanfei, C. *et al.* (2022) 'Study on the Strengthening Mechanism of Rare-Earth Element Ce on the Laser Welded Joints of Magnesium Alloys', *Materials Research*, 25. doi: 10.1590/1980-5373-MR-2022-0242.
- Yang, X. *et al.* (2020) 'Interface characteristics of high-entropy alloy/Al-Mg composites by underwater friction stir processing', *Materials Letters*, 275. doi: 10.1016/j.matlet.2020.128200.

Biodata Penulis



Dr. Mulyadi, ST., MT adalah seorang Dosen di Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, berlokasi di Kampus II, Jl. Raya Gelam 250, Candi, Sidoarjo. Beliau merupakan alumni Universitas Muhammadiyah Sidoarjo untuk Strata 1 di bidang Teknik Mesin dan melanjutkan studi Strata 2 dan Strata 3 di bidang Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Mulyadi, yang biasa dipanggil dengan nama tersebut, aktif mengajar mata kuliah seperti **Teknologi Pengelasan, Teknik Pembentukan, Pemrograman NC/CNC, dan Mekanika Getaran**. Di samping peran sebagai dosen, ia juga terlibat aktif dalam mengikuti hibah-hibah riset dan pengabdian baik dari kementerian, diktilitbang PP Muhammadiyah, maupun dari internal kampus. Untuk informasi lebih lanjut, Dr. Mulyadi dapat dihubungi melalui email di mulyadi@umsida.ac.id atau melalui telepon di nomor 082141994307.



Dr. Eng. Rachmat Firdaus, ST., MT adalah seorang Dosen di Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, berlokasi di Kampus II, Jl. Raya Gelam 250, Candi, Sidoarjo. Beliau merupakan alumni Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya untuk Strata 1 dan 2 di bidang Teknik Mesin serta melanjutkan studi Strata 3 di bidang Teknik Mesin di Kanazawa University Jepang. Firdaus, yang biasa dipanggil dengan nama tersebut, aktif mengajar mata kuliah seperti **Aljabar, Fisika Dasar, Fisika Lanjut, Teknologi Turbin, Pompa dan Kompresor, dan Mesin Pembangkit Tenaga**. Di samping peran sebagai dosen, ia juga terlibat aktif dalam mengikuti hibah-hibah riset dan pengabdian baik dari kementerian, diktilitbang PP Muhammadiyah, maupun dari internal kampus.



Novia Ariyanti, S.Si., M.Pd. lahir di Surabaya pada 10 November 1983. Beliau adalah dosen Program Studi Informatika Universitas Muhammadiyah Sidoarjo dengan pengalaman mengajar lebih dari 21 tahun. Lulusan S1 Matematika dan S2 Pendidikan Matematika Universitas Negeri Surabaya ini aktif menulis buku, di antaranya Matematika Diskrit dan Teknik Optimasi. Selain itu, beliau juga terlibat dalam berbagai hibah riset serta pengabdian kepada masyarakat di tingkat internal kampus, Diktilitbang PP Muhammadiyah, maupun Kemdiktisaintek. Dengan moto hidup “Berbagi ilmu adalah investasi abadi; semakin dibagi, semakin bertambah nilainya,” beliau terus berkomitmen memajukan pendidikan dan penelitian.



Dr. A'rasy Fahrudin, ST., MT adalah seorang Dosen di Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, berlokasi di Kampus II, Jl. Raya Gelam 250, Candi, Sidoarjo. Beliau merupakan alumni Universitas Brawijaya Malang untuk Strata 1 di bidang Teknik Mesin dan melanjutkan studi Strata 2 di Universitas Indonesia di bidang Teknik Mesin dan Strata 3 di bidang Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Fahrudin, yang biasa dipanggil dengan nama tersebut, aktif mengajar mata kuliah seperti **Perpindahan Panas Dasar Dan Konduksi, Perpindahan Panas dan Massa Lanjut, Elemen Mesin Dasar, Elemen Mesin Lanjut**. Di samping peran sebagai dosen, ia juga terlibat aktif dalam mengikuti hibah-hibah riset dan pengabdian baik dari kementerian, diktilitbang PP Muhammadiyah, maupun dari internal kampus.



UMSIDA PRESS
Universitas Muhammadiyah Sidoarjo
Jl.Mojopahit No 666 B
Sidoarjo - Jawa Timur