

Pengaruh aliran dan kedalaman air terhadap hasil pengelasan dan kekerasan sambungan las bawah air baja SS400

Juan Anindito¹, Fajar Paundra¹, Triyono², Nurul Muhayat²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

²Staf Pengajar, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami No.36 A, Pucangawit, Jebres, Surakarta 57126

Email korespondensi: triyono74@staff.uns.ac.id

Abstrak

Pengelasan bawah air basah banyak digunakan dalam perbaikan konstruksi lepas pantai maupun pipa bawah air dengan metode shielded metal arc welding (SMAW). Kajian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari aliran (0 m/s, 1 m/s, dan 2 m/s) dan kedalaman air (2,5 m dan 5 m) terhadap sifat fisik dan kekerasan sambungan las bawah air baja SS400. Variabel kontrol yang digunakan adalah kecepatan las 1,5 mm/s, arus 90 A, elektroda E6013 (RB26) dengan diameter 4 mm, jenis polaritas elektroda negatif, jarak penyemprotan 10 cm, arah penyemprotan berlawanan arah pengelasan, dan air tawar. Hasil menunjukkan bahwa variasi kecepatan dan kedalaman air berpengaruh terhadap cacat, struktur mikro, dan kekerasan sambungan las bawah air. Cacat yang terjadi meliputi incomplete penetration (I) yang terjadi di semua sambungan las, spatter (S), porositas (P), undercut (U), concavity (V), dan irregular surface (Z). Meningkatnya kecepatan aliran dan kedalaman air menyebabkan perbedaan struktur mikro bertambahnya porositas pada logam las. Porositas terbesar terjadi pada kedalaman 5 m dan kecepatan aliran air 2 m/s dengan diameter 1310 μm . Kenaikan kedalaman dan kecepatan aliran air menyebabkan struktur mikro ferrite with second phase (FSP) dan acicular ferrite (AF) semakin banyak muncul dan daerah HAZ akan terbentuk butir yang semakin halus. Kekerasan tertinggi terdapat pada pengelasan bawah air basah dengan kedalaman 5 m pada kecepatan aliran air 2 m/s dengan nilai kekerasan tertinggi pada daerah logam las 188,8 HV, daerah HAZ 233,7 HV, dan logam induk 110,7 HV.

Kata kunci: underwater wet welding, SS400, kedalaman air, kecepatan aliran air, cacat las, struktur mikro, kekerasan vickers.

Abstract

Underwater wet welding (UWW) most used in maintenance process of offshore construction or underwater pipe with shielded metal arc welding (SMAW) method. This study aims to determine the effect of flow (0 m/s, 1 m/s and 2 m/s) and depth of water (2.5 m and 5 m) on physical properties and hardness of the underwater weld joint of SS400 steel. Control variable which used were 1.5 mm/s of welding velocity, 90 A of electric current, E6013 (RB26) of electrode with 4 mm of diameter, the polarity was negative electrode, 10 cm of spraying distance, spraying direction was the opposite with welding direction, and tasteless water. The result shows that variation of the velocity and depth of water were affect to the weld defective, microstructure and hardness of underwater weld joint. The defective that happens were incomplete penetration (I) in all weld joints, spatter (S), porosity (P), undercut (U), concavity (V) and irregular surface (Z). Increasing of the flow rate and depth of water affected different microstructure which increasing the porosity in weld metal. The highest porosity happens in 5 m depth of water and 2 m/s of flow rate with 1310 μm of diameter. Increase of depth and flow rate affected increasing the appear of ferrite with second phase (FSP) and acicular ferrite (AF) microstructure and HAZ zone would formed more smooth grain. The highest value of hardness happens in underwater welding with 5 m depth of water, 2 m/s of flow rate in 188.8 HV of weld metal zone, 233.7 HV of HAZ zone and 110.7 HV of base metal.

Keywords: underwater wet welding, SS400, depth of water, water flow rate, weld defective, microstructure, vickers hardness.

1. Pendahuluan

Pengelasan merupakan suatu proses penggabungan dua logam sejenis maupun lain jenis yang diharapkan kekuatan logam hasil pengelasan sama dengan kekuatan logam induknya. Salah satu penerapan metode pengelasan saat ini adalah pengelasan bawah air atau biasa disebut *underwater welding* yang merupakan pengembangan dari proses pengelasan yang umum dilakukan [1]. Metode pengelasan bawah air dibagi menjadi dua jenis utama, metode basah dan

kering. Proses pengelasan bawah air basah atau biasa disebut *underwater wet welding* (UWW) dilakukan pada lingkungan yang terkena air secara langsung tanpa penghalang fisik antara air dan busur las. Sedangkan pengelasan bawah air kering dilakukan di ruang tertutup kedap air pada sekitar struktur yang akan dilas yang diisi dengan campuran gas helium dan oksigen [2].

UWW banyak digunakan di industri lepas pantai seperti konstruksi laut, perbaikan pipa dan

pembangkit listrik tenaga nuklir. Hal ini dilakukan karena mudah dilakukan, fleksibel, dan memiliki biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pengelasan bawah air lainnya [3, 4]. Kerugian UWW adalah adanya pendinginan cepat dari logam las oleh air di sekitarnya. Hal tersebut meningkatkan kekuatan tarik lasan, namun mengurangi keuletan dan kekuatan dampak dari lasan serta meningkatkan kekerasan [2]. Selain itu, karena disosiasi air oleh busur las menyebabkan inklusi oksigen dan hidrogen di logam cair lasan yang menyebabkan porositas dan retak [5, 6]. *Hydrogen assist cracking* (HAC) adalah masalah umum pada pengelasan baja. Efek merusak dari hidrogen pada baja, umumnya dikenal sebagai hidrogen embrittlement. Retak pada *heat affected zone* (HAZ) terutama dipengaruhi oleh kandungan hidrogen [7, 8].

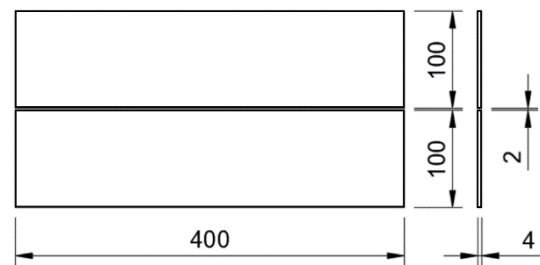
Parameter UWW seperti laju aliran air, suhu air, dan tekanan air memiliki dampak yang signifikan pada busur las. Kualitas pengelasan akan berubah sesuai kondisi lingkungan air yang berbeda seperti laju aliran air yang berbeda. Peningkatan kecepatan aliran air menyebabkan penurunan stabilitas busur yang akan mempengaruhi hasil lasan [9]. Laju pendinginan yang sangat cepat mengganggu pertumbuhan butir yang menyebabkan ukuran butir lebih kecil sehingga pada *heat affected zone* (HAZ) didominasi oleh *martensite* [10, 11, 12, 13]. Penggerindaan dan perlakuan dampak ultrasonik bawah air menunjukkan peningkatan sifat *fatigue* dari sambungan las basah bawah laut serta pengurangan tegangan sisa yang signifikan pada sambungan las [14]. Gelembung pelindung busur las mempengaruhi stabilitas busur [5, 10, 11]. Gelembung pelindung busur las merupakan faktor kunci yang dapat menjaga busur tetap menyala. Ukuran gelembung yang lebih besar didapat proses pengelasan yang lebih stabil. Ukuran maksimum gelembung pelindung menurun secara bertahap seiring dengan meningkatnya tekanan air [6].

Sebagian besar kajian terdahulu hanya berfokus pada karakter mikrostruktur dan sifat mekanik pengelasan bawah air basah yang dilakukan pada air yang diam, sedangkan pada pengelasan dalam kondisi air yang mengalir hanya berfokus pada stabilitas busur. Pada kondisi di lapangan, UWW banyak dilakukan pada air dengan kondisi mengalir pada kedalaman dan kecepatan tertentu. Kondisi tersebut banyak ditemukan pada pengelasan bawah air basah di laut, pelabuhan maupun sungai. Masih sangat terbatas ditemui kajian mengenai pengaruh aliran air dan kedalaman pada pengelasan bawah air basah terhadap sifat fisik dan kekerasan. Chen telah mempelajari pengaruh aliran air pada stabilitas busur dan transfer logam dalam UWW menggunakan jenis pengelasan *flux cored arc welding* (FCAW) pada material baja karbon rendah (Q235) [9]. Informasi mengenai sifat fisik dan kekerasan hasil UWW menggunakan jenis pengelasan *shielded metal arc welding* (SMAW) pada air yang mengalir pada kecepatan dan kedalaman

tertentu belum didapatkan. Oleh karena itu, kajian ini dilaksanakan untuk mengamati cacat hasil UWW yang dilakukan pada air yang mengalir pada variasi kedalaman tertentu dengan kecepatan aliran yang divariasasi.

2. Metode

Bahan yang digunakan dalam kajian ini adalah baja karbon rendah SS400 dengan dimensi 400 mm x 100 mm x 4 mm yang ditunjukkan Gambar 1. SS400 merupakan golongan baja karbon rendah yang memiliki tingkat kemurnian sebesar 96,4 % [17]. Komposisi kimia berdasarkan uji spectrometer ditunjukkan pada Tabel 1.

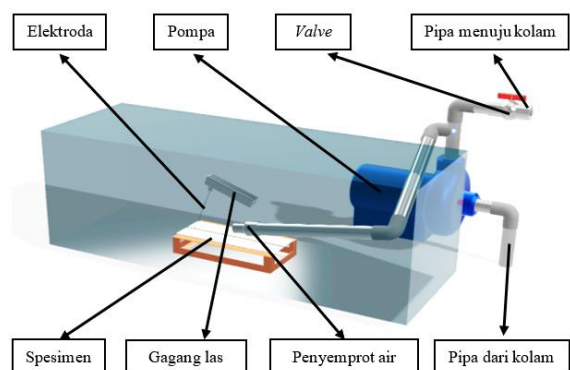


Gambar 1. Dimensi spesimen (mm).

Tabel 1. Komposisi kimia baja SS400 berdasarkan uji spectrometer.

Unsur	Fe	C	Si	Mn	P	Cr	S	Cu
%	96,4	0,0337	0,193	0,288	0,0018	0,0273	0,005	0,0136

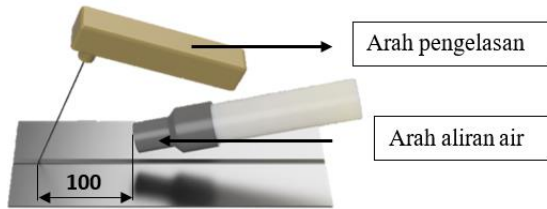
Pengelasan dilakukan di dalam air dengan pompa penyemprot yang dibuat sedemikian rupa agar mendapatkan kecepatan aliran air yang ditentukan. Pompa yang digunakan adalah Yamamax 1,5 HP dengan debit 450 liter/menit serta saluran input dan output sebesar 2 inci dengan ukuran ujung *nozzle* 1 ¼". Pengukuran kecepatan aliran diukur di darat. Sistem penyemprot aliran air ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem penyemprot aliran air.

Variabel terkontrol dalam kajian ini adalah kecepatan las pada 1,5 mm/s, arus 90 A, elektroda E6013 (RB26) dengan diameter 4 mm, jenis polaritas elektroda negatif, jarak penyemprotan 10 cm, arah aliran air berlawanan dengan arah pengelasan, dan air tawar. Pengujian yang dilakukan antara lain; pengujian foto

radiografi untuk mengetahui cacat pada sambungan las, pengujian makro untuk mengetahui cacat dan kedalaman penetrasi, pengujian mikro untuk mengetahui struktur mikro, dan pengujian kekerasan *vickers* untuk mengetahui perbedaan kekerasan hasil las. Variabel bebas yaitu, kedalaman air (darat, 2,5 m, dan 5 m) dan kecepatan aliran air (0 m/s, 1 m/s, dan 2 m/s). Skema pengelasan ditunjukkan pada Gambar 3.

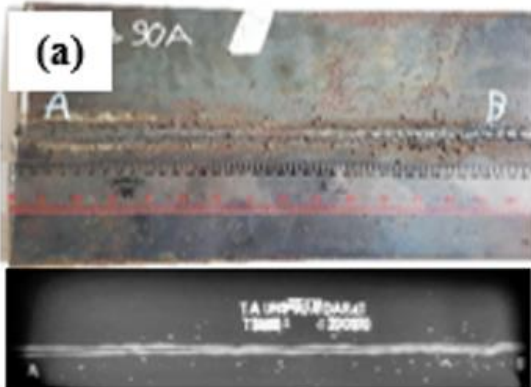


Gambar 3. Skema pengelasan (mm).

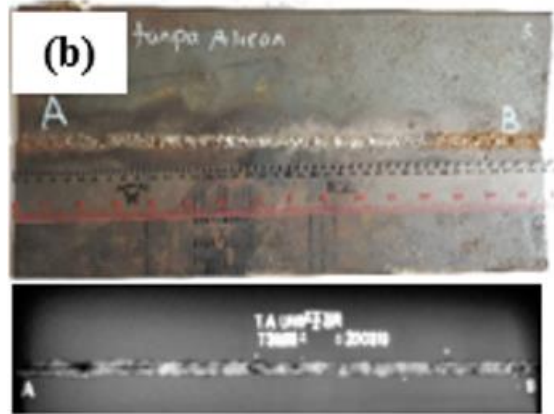
3. Hasil dan Pembahasan

Data Hasil Uji Radiografi

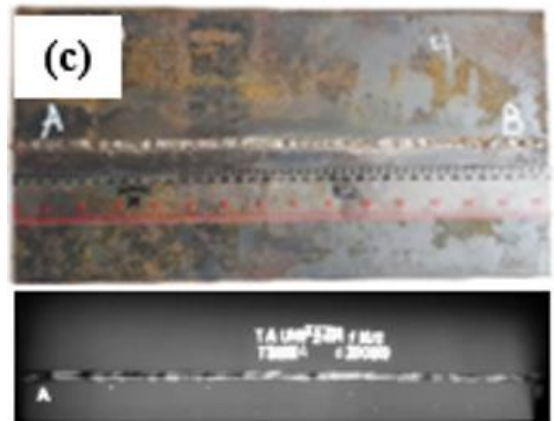
Berdasarkan hasil uji radiografi pada Gambar 4 menunjukkan bahwa terjadi berbagai macam cacat pada sambungan las terutama pada kondisi pengelasan bawah air basah. Cacat yang terjadi meliputi *incomplete penetration* (*I*) yang terjadi di semua sambungan las, *spatter* (*S*), porositas (*P*), *undercut* (*U*), *concavity* (*V*), dan *irregular surface* (*Z*). *Incomplete penetration* adalah kurangnya penembusan logam cair lasan yang terjadi karena teknik pengelasan yang kurang baik terutama *heat input* yang kurang. Cacat *spatter* banyak terjadi pada pengelasan di darat yang disebabkan oleh suhu logam cair las yang terlalu tinggi. Cacat tersebut jumlah dan ukuran terbesar dapat dilihat pada Tabel 2.



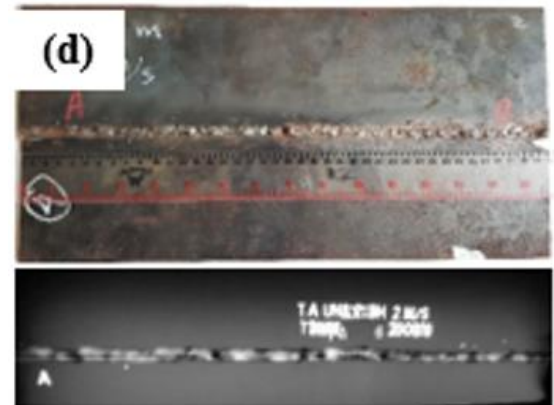
Darat



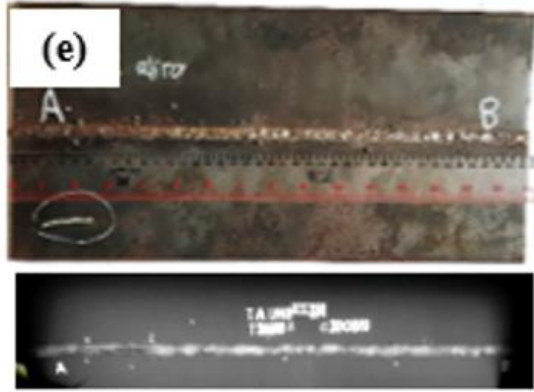
Kedalaman 2,5 m, tanpa aliran



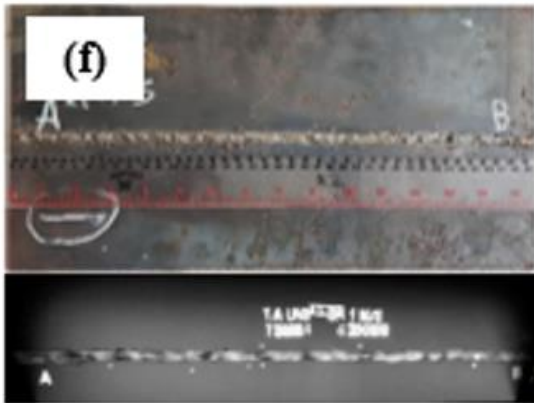
Kedalaman 2,5 m, aliran 1 m/s



Kedalaman 2,5 m, aliran 2 m/s



Kedalaman 5 m, tanpa aliran



Kedalaman 2,5 m, aliran 1 m/s



Kedalaman 5 m, aliran 2 m/s

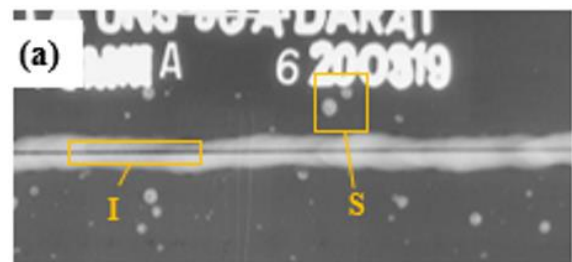
Gambar 4. Hasil pengelasan dan uji radiografi.

Pengelasan bawah air basah menyebabkan terjadinya cacat porositas yang ditunjukkan pada Gambar 5 (d, e, f, dan g) dengan jumlah dan ukuran porositas terdapat pada Tabel 2. Porositas tersebut terjadi karena inklusi hidrogen yang muncul akibat adanya kontak dengan air secara langsung. Air yang terjadi kontak langsung dengan busur las pada suhu yang tinggi terdisosiasi menjadi gas hidrogen dan oksigen [6]. Partikel gas tersebut tidak sempat keluar ke permukaan dan terjebak dalam logam cair lasan akibat pemadatan yang cepat [13]. Tabel 2 menunjukkan bahwa kedalaman maupun tekanan air yang meningkat menyebabkan meningkatnya porositas pada logam las.

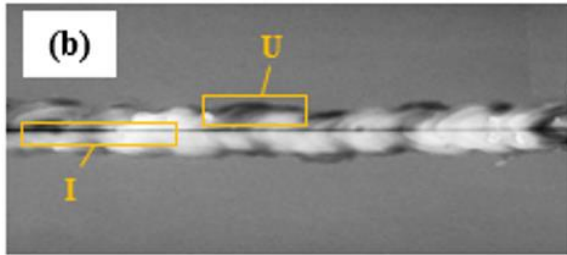
Tabel 2. Daftar cacat sambungan las hasil radiografi.

Spesimen	Jenis cacat	Jumlah	Ukuran terbesar
(a)	Incomplete Penetration (I)	1	400 mm
	Spatter (S)	79	3,93 mm
(b)	Incomplete penetration (I)	1	400 mm
	Spatter (S)	5	3,7 mm
	Undercut (U)	5	20,4 mm
(c)	Incomplete penetration (I)	1	400 mm
	Undercut (U)	8	27,8 mm
(d)	Incomplete penetration (I)	1	400 mm
	Undercut (U)	7	51,3 mm
	Porositas (P)	12	485,02 μm
	Concavity (V)	4	5,4 mm
(e)	Incomplete penetration (I)	1	400 mm
	Porositas (P)	89	0,5 mm
(f)	Incomplete penetration (I)	1	400 mm
	Undercut (U)	8	21 mm
	Porositas (P)	12	0,6 mm
	Concavity (V)	2	10,5 mm
(g)	Incomplete penetration (I)	1	400 mm
	Undercut (U)	9	24 mm
	Porositas (P)	14	1310 μm
	Concavity (V)	2	7,2 mm
	Irregular surface (Z)	8	53,5 mm

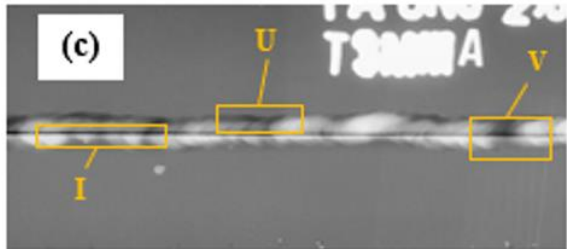
Undercut terlihat pada Gambar 5 (b, c, d, f, dan g) dan concavity terlihat pada Gambar 5 (c, d, f, dan g). Pengelasan dalam air dengan kecepatan aliran 2 m/s terdapat undercut dan concavity yang paling banyak. Berdasarkan Tabel 2, Undercut lebih banyak terjadi pada pengelasan yang terdapat aliran air. Hal ini terjadi karena meningkatnya disipasi panas pengelasan akibat kecepatan aliran air yang tinggi yang mengakibatkan penurunan suhu busur dan penyusutan busur [9]. Kecepatan aliran air yang tinggi (2 m/s) mengakibatkan adanya banyak cacat irregular surface yang ditunjukkan pada Gambar 5 (d dan g) serta Gambar 5 (d dan g) yaitu permukaan logam las yang terlalu lebar dan terlalu sempit serta permukaan yang terlalu cembung dan cekung. Irregular surface terjadi akibat stabilitas busur pengelasan yang buruk. Irregular surface juga terjadi akibat proses transfer busur logam cair yang kurang baik akibat terdorong oleh aliran air yang tinggi [17, 9, 18, 20].



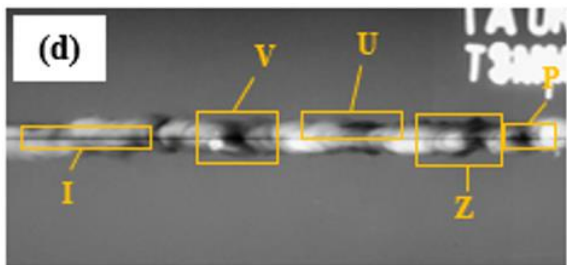
Darat



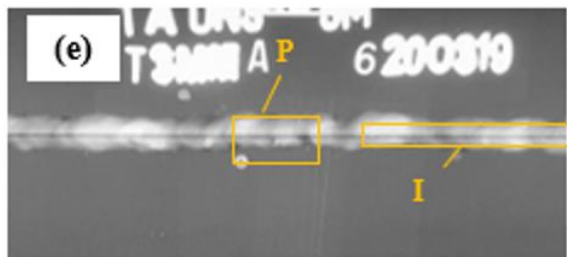
Kedalaman 2,5 m, tanpa aliran



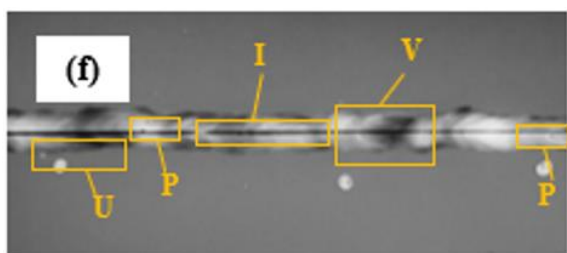
Kedalaman 2,5 m, aliran 1 m/s



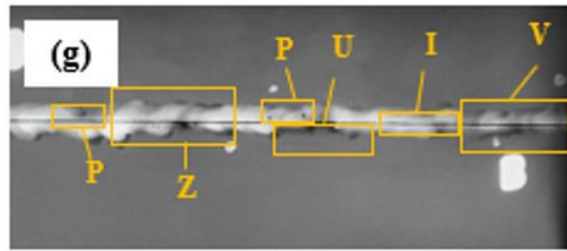
Kedalaman 2,5 m, aliran 2 m/s



Kedalaman 5 m, tanpa aliran



Kedalaman 2,5 m, aliran 1 m/s



Kedalaman 5 m, aliran 2 m/s

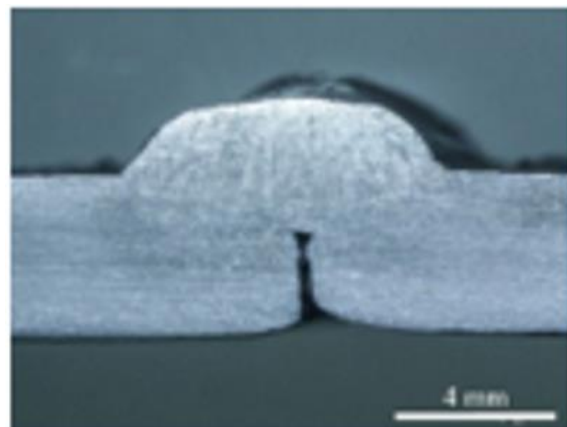
Keterangan:

I : *incomplete penetration* U : *undercut* P : *porositas*
 Z : *irregular surface* V : *concavity* S : *spatter*

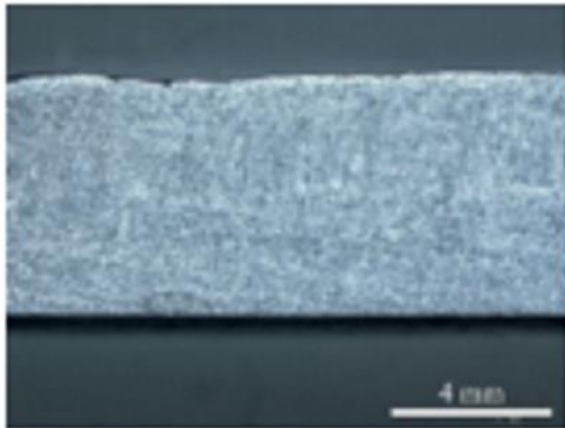
Gambar 5. Cacat las bawah air hasil uji radiografi.

Data Foto Makro

Foto makro pada Gambar 6 dan Tabel 3 merupakan hasil pemotongan spesimen las yang dipotong secara melintang dan membujur. Pengujian foto makro pada Tabel 3 terlihat bahwa terjadi perbedaan kedalaman penetrasi las dan porositas akibat perbedaan kedalaman pengelasan dan kecepatan aliran air. Berdasarkan hasil uji foto makro yang ditunjukkan pada Tabel 3 terlihat jelas akibat peningkatan kecepatan aliran air menyebabkan adanya porositas. Pengelasan bawah air basah pada kecepatan aliran air 2 m/s seperti pada Tabel 3 (c dan f) terlihat jelas adanya porositas yang besar pada logam las. Inklusi gas akan meningkat seiring dengan peningkatan laju pendinginan [21]. Pengelasan yang dialiri air menyebabkan terjadinya perpindahan panas konveksi secara paksa. Kecepatan aliran air yang semakin tinggi berbanding lurus dengan *heat loss* [22]. Hal tersebut menyebabkan adanya pendinginan yang sangat cepat dibandingkan pengelasan di darat maupun pada air yang diam. Pendinginan yang sangat cepat tersebut menyebabkan pepadatan logam las yang cepat sehingga gas yang ada dalam logam cair tidak sempat keluar [7, 18]. Peningkatan arus las dan pengurangan kecepatan pengelasan dapat menaikkan *heat input*. *Heat input* yang lebih besar akan mengurangi kecepatan pendinginan dan waktu pepadatan logam cair las yang lebih lama sehingga gas dalam logam cair dapat keluar [24].



Melintang



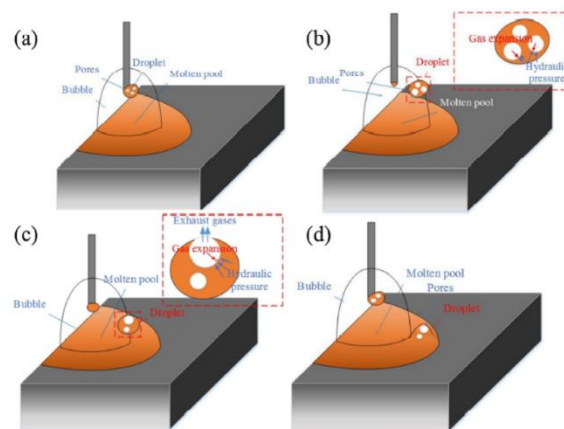
Membujur

Gambar 6. Foto makro potongan melintang dan membujur las darat.

Hasil pengelasan pada kedalaman 2,5 m dan 5 m dengan kecepatan aliran 2 m/s pada Tabel 3 (c dan f) jika dibandingkan jelas terlihat bahwa pengelasan dengan kedalaman 5 m menghasilkan porositas yang lebih besar daripada pengelasan pada kedalaman 2,5 m. Fydrych dan Rogalski [25] menyatakan air merupakan salah satu sumber utama adanya hidrogen. Peningkatan arus pengelasan dan salinitas menyebabkan penurunan kandungan hidrogen [26]. Jumlah difusi hidrogen tergantung pada tekanan air atau kedalaman pengelasan [25]. Peningkatan kedalaman air menyebabkan tekanan hidrostatik yang semakin tinggi. Tekanan hidrostatik menyebabkan gelembung pelindung las semakin cepat naik ke permukaan. Peningkatan kecepatan gelembung pelindung las ke permukaan dan ukuran gelembung semakin kecil menyebabkan perlindungan pada busur las berkurang [27, 28]. Kurangnya perlindungan busur las dari gelembung menyebabkan meningkatnya porositas [6]. Gas penyebab porositas yang muncul pada logam cair akan sulit keluar akibat tekanan hidrostatik yang tinggi seperti yang terlihat pada skema Gambar 7 (b) [6]. Gambar 7 (c) menjelaskan skema porositas yang terjadi pada hasil pengelasan pada Tabel 3 (g) di mana pada saat gelembung gas porositas mulai keluar dari logam cair terjadi pembekuan yang sangat cepat sehingga terbentuk porositas yang bentuknya seperti gelembung gas yang naik ke permukaan.

Tabel 3. Hasil foto makro potongan daerah sambungan las.

Variasi	Kecepatan aliran		
	0 m/s	1 m/s	2 m/s
2,5 m	Melintang (a)	Melintang (b)	Melintang (c) Porositas
	Membujur	Membujur	Membujur Porositas
5 m	Melintang (d)	Melintang (e) Undercut	Melintang (f)
	Membujur	Membujur	Membujur Porositas

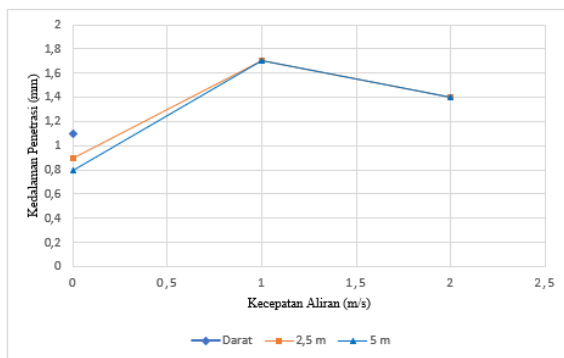


Gambar 7. Skema analisa gaya pada ekspansi gas porositas pada saat transmisi droplet [6].

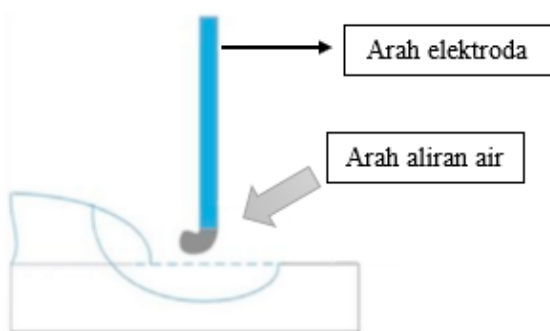
Hasil pengukuran kedalaman penetrasi logam las secara langsung yang ditunjukkan pada Gambar 8 membuktikan bahwa kedalaman pengelasan dan kecepatan aliran air berpengaruh terhadap penetrasi logam las. Gambar 8 menunjukkan bahwa pengelasan tanpa aliran dengan meningkatnya kedalaman pengelasan mengakibatkan kedalaman penetrasi yang berkurang. Pengelasan bawah air basah tanpa aliran air menghasilkan kedalaman penetrasi yang paling rendah dengan kedalaman penetrasi 0,9 mm pada kedalaman 2,5 m dan 0,8 mm pada kedalaman 5 m. Hasil pengelasan bawah air basah dengan kecepatan 1 m/s menunjukkan kedalaman penetrasi yang paling tinggi mencapai 1,7 mm pada kedalaman 2,5 m maupun 5 m. Kedalaman penetrasi berkurang pada aliran air dengan kecepatan 2 m/s dengan kedalaman penetrasi 1,4 mm pada kedalaman 2,5 m maupun kedalaman 5 m. Kedalaman penetrasi akan berkurang seiring dengan kedalaman air yang meningkat [6]. Tekanan tinggi menaikkan titik didih titik air dan

busur las terkompresi. Bertambahnya titik didih mengakibatkan panas las lebih banyak hilang selama pengelasan proses, yang menyebabkan tingkat pengenceran las menurun seiring meningkatnya kedalaman. Penurunan panas las akan menurunkan kedalaman penetrasi las [6].

Pengelasan dengan aliran air pada kecepatan aliran air 1 m/s menghasilkan kedalaman penetrasi yang paling dalam yang diakibatkan oleh *droplet* yang selama proses *metal transfer* terdorong oleh aliran air dengan skema seperti pada Gambar 9 Logam cair las juga terdorong oleh air menuju belakang elektroda las dan terkumpul yang menyebabkan energi panas yang diterima *base metal* menjadi lebih banyak. Dorongan dari aliran air yang lebih mendominasi daripada kenaikan kecepatan pendinginan ini menyebabkan penetrasi logam las yang lebih dalam. Kecepatan aliran air yang bertambah tinggi hingga 2 m/s menyebabkan adanya *heat loss* yang tinggi. Adanya *heat loss* yang tinggi akibat konveksi paksa ini menyebabkan *heat input* yang berkurang sehingga logam cair volumenya menurun yang mengakibatkan kedalaman penetrasi berkurang [9].



Gambar 8. Grafik pengaruh kedalaman dan kecepatan aliran air terhadap kedalaman penetrasi logam las.



Gambar 9. Skema transfer droplet.

Data Foto Mikro

Base metal pada baja SS400 berdasarkan pengamatan terlihat seperti pada Gambar 10 (a) dengan struktur *ferrite* dan *pearlite*. Struktur *ferrite* mempunyai kekerasan dan kekuatan tarik rendah serta ulet, sedangkan struktur *pearlite* memiliki kekuatan tarik lebih kuat dan keras serta lebih getas dibanding *ferrite* [29].

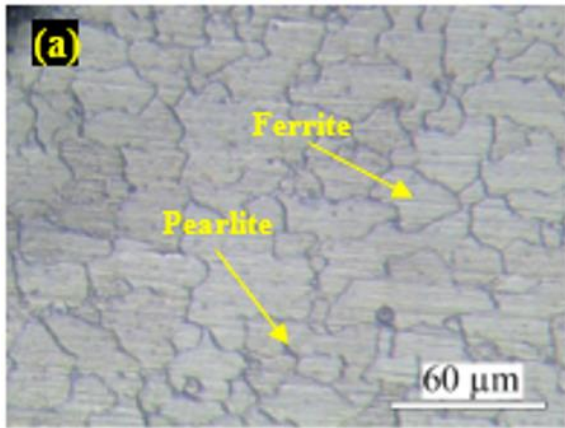
Gambar 10 (b-h) menunjukkan daerah *weld metal* hasil pengelasan dengan variasi kedalaman dan kecepatan aliran air. *Weld metal* terdiri dari empat jenis campuran *ferrite*: *grain boundary ferrite* (GBF), *ferrite with second phase* (FSP), *acicular ferrite* (AF) dan *polygonal ferrite* (PF) [30]. Pengelasan bawah air basah dengan aliran air yang semakin tinggi kecepatannya menyebabkan laju pendinginan yang semakin tinggi [9]. Laju pendinginan yang tidak merata dan suhu lingkungan yang lebih rendah menyebabkan struktur mikro daerah *weld metal* kurang seragam dan mengandung lebih sedikit PF [10]. Bertambahnya *heat input* pengelasan menghasilkan ukuran butir meningkat dengan jumlah relatif FSP dan AF berkurang serta meningkatnya GBF dan PF. Lebar GBF dan FSP juga meningkat dengan meningkatnya input panas pengelasan. *Heat input* las yang meningkat berarti berkurangnya kecepatan pendinginan selama proses pengelasan. FSP memiliki sifat dengan nilai dampak yang rendah serta nilai persentase elongasi yang rendah [30]. AF memiliki sifat kekuatan tarik dan kekerasan yang tinggi serta nilai dampak yang bagus dibanding PF dan GBF [16].

Gambar 10 (b) menunjukkan daerah *weld metal* hasil pengelasan darat terdapat PF, FSP, dan GBF. FSP dan GBF memiliki ukuran yang paling besar dibanding pengelasan di dalam air yang disebabkan oleh kecepatan pendinginan yang lambat. Meningkatnya kecepatan aliran air hingga 1 m/s pada pengelasan dengan kedalaman 2,5 m menghasilkan struktur GBF dan FSP yang lebih kecil dan pipih yang ditunjukkan pada Gambar 10 (d). Struktur AF banyak yang muncul dengan berkurangnya struktur PF. Kecepatan aliran 2 m/s pada kedalaman 2,5 m menyebabkan struktur GBF tidak muncul namun struktur AF menjadi lebih banyak serta struktur PF juga bertambah banyak.

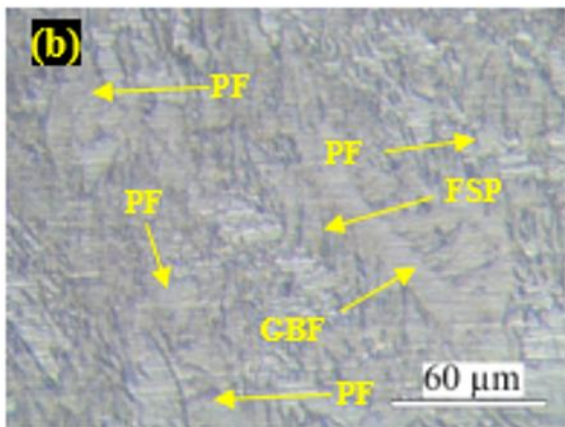
Pengelasan bawah air basah pada kedalaman 5 m memiliki struktur mikro yang sedikit berbeda dengan pengelasan pada kedalaman 2,5 m. Hasil pengelasan tanpa aliran jika dibandingkan dengan kedalaman 2,5 m memiliki struktur mikro GBF dan FSP yang lebih kecil dan pipih. Kedalaman 5 m dengan kecepatan aliran 1 m/s menghasilkan FSP dan AF yang lebih banyak dan rapat dibandingkan dengan kedalaman 2,5. Struktur mikro kecepatan aliran 2 m/s pada kedalaman 5 m banyak mengandung FSP dan AF dibanding kedalaman 2,5 m maupun kedalaman 5 m dengan kecepatan aliran 1 m/s maupun tanpa aliran. Jumlah PF juga mengalami banyak penyusutan akibat tidak ada waktu yang cukup untuk berkembang [10].

Adanya AF dan FSP menjadi faktor utama daerah *weld metal* memiliki kekerasan yang tinggi. Semakin banyak struktur AF maka *weld metal* akan menghasilkan hasil uji kekerasan yang semakin tinggi. Dengan demikian berdasarkan pengamatan struktur mikro pada pengelasan dengan kedalaman 5

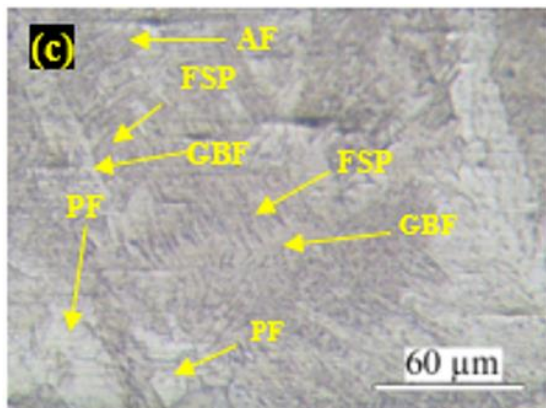
m dan kecepatan aliran 2 m/s akan menghasilkan kekerasan yang tinggi.



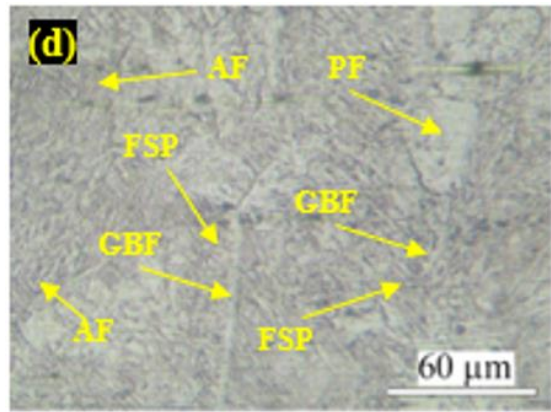
Base metal



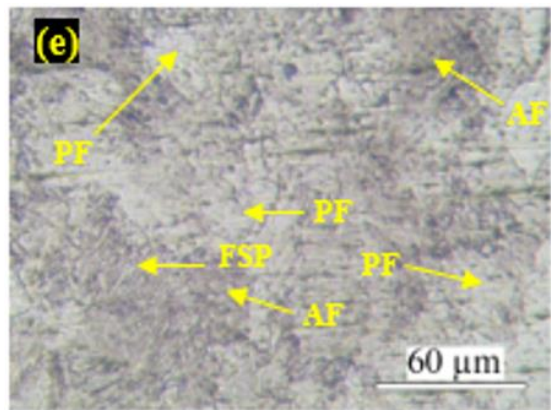
Weld metal las darat



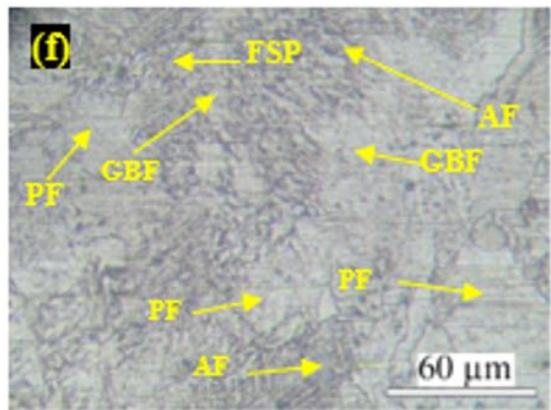
Weld metal kedalaman 2,5 m tanpa aliran



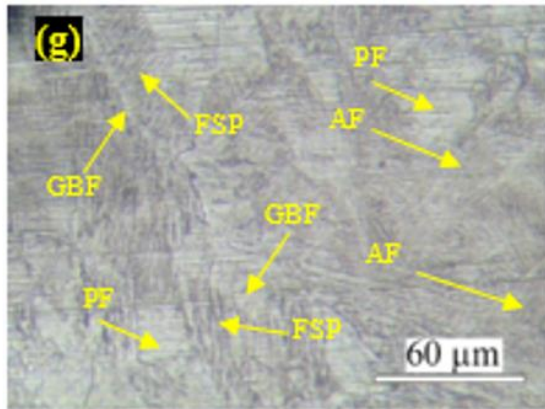
Weld metal kedalaman 2,5 m aliran 1 m/s



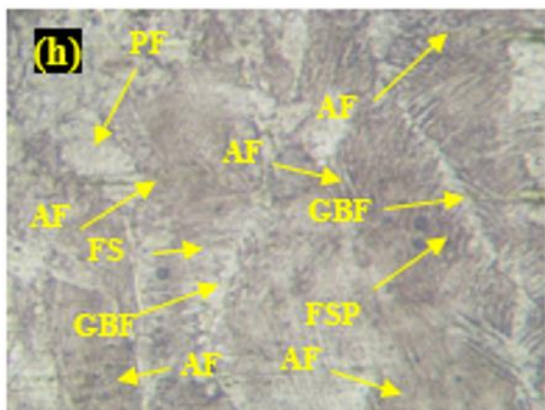
Weld metal kedalaman 2,5 m aliran 2 m/s



Weld metal kedalaman 5 m tanpa aliran



Weld metal kedalaman 5 m aliran 1 m/s



Weld metal kedalaman 5 m aliran 2 m/s

Gambar 10. Struktur mikro base metal dan weld metal.

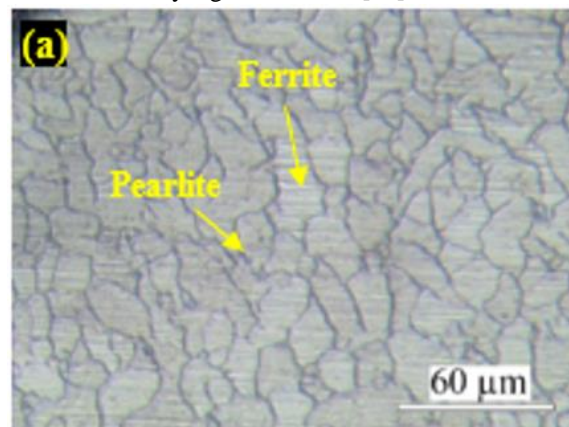
Daerah HAZ hasil pengelasan menghasilkan struktur mikro yang terdiri dari *ferrite* dan *pearlite* [31]. Gambar 11 menunjukkan bahwa semakin dalam dan semakin tinggi kecepatan aliran air membentuk struktur butir pada daerah HAZ yang semakin halus. Butir-butir paling halus terdapat pada pengelasan bawah air basah dengan kedalaman 5 m dan kecepatan aliran air 2 m/s seperti pada Gambar 11 (g). *Base metal* memiliki ukuran butir yang lebih kasar jika dibandingkan pada daerah HAZ pada pengelasan di darat. Kenaikan kecepatan aliran air menyebabkan adanya kenaikan laju pendinginan dan berkurangnya *heat input* pengelasan. Laju pendinginan yang sangat cepat mengganggu pertumbuhan butir dan menyebabkan ukuran butir jauh lebih halus daripada pengelasan di udara [10].

Daerah HAZ hasil pengelasan mengasilkan struktur mikro yang terdiri dari *ferrite* dan *pearlite*. Gambar 11 menunjukkan bahwa semakin dalam dan semakin tinggi kecepatan aliran air membentuk struktur butir pada daerah HAZ yang semakin halus. Butir-butir paling halus terdapat pada pengelasan bawah air basah dengan kedalaman 5 m dan kecepatan aliran air 2 m/s seperti pada Gambar 11 (g). Berdasarkan Gambar 11 (a dan b) ukuran butir pada pengelasan di darat memiliki ukuran yang jauh lebih kasar daripada pengelasan di dalam air. Kenaikan kecepatan aliran

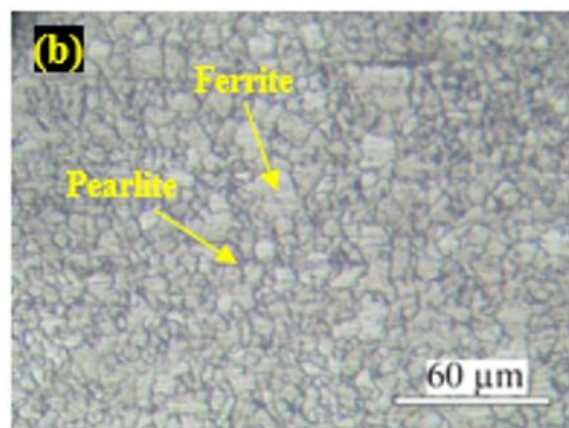
air menyebabkan adanya kenaikan laju pendinginan dan berkurangnya *heat input* pengelasan. Laju pendinginan yang sangat cepat mengganggu pertumbuhan butir dan menyebabkan ukuran butir jauh lebih halus daripada pengelasan di udara [10].

Sifat mekanik logam dipengaruhi oleh struktur mikro. Ukuran butir logam hasil pengelasan akan berubah sesuai dengan kecepatan pendinginan. Kenaikan kecepatan pendinginan akan menghasilkan ukuran butir yang semakin kecil. Semakin halus ukuran butir menyebabkan kekuatan tarik dan kekerasannya meningkat [32]. Berdasarkan hasil dari struktur mikro tersebut kedalaman pengelasan hingga 5 m memiliki efek yang lebih besar terhadap perubahan struktur mikro jika dibandingkan dengan pengaruh dari kecepatan aliran hingga 2 m/s. Gelembung pelindung pengelasan yang semakin cepat naik ke permukaan berakibat logam las semakin sering bersentuhan dengan air yang berakibat naiknya kecepatan pendinginan [6].

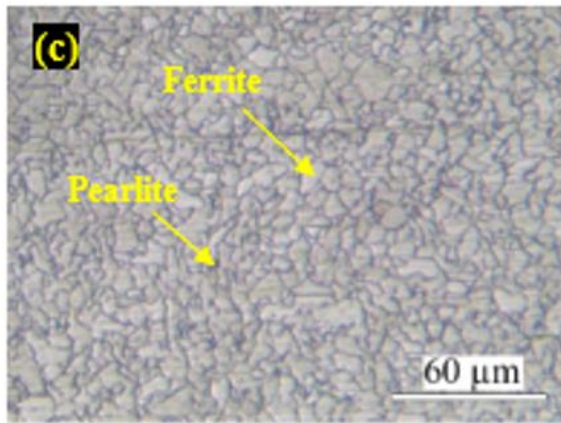
Input panas nyata selama pengelasan bawah air adalah sekitar 8% lebih rendah daripada di udara. Suhu busur pengelasan bawah laut sekitar 4% lebih rendah dari busur pengelasan di udara dan perbedaannya lebih besar untuk air yang lebih dalam [10].



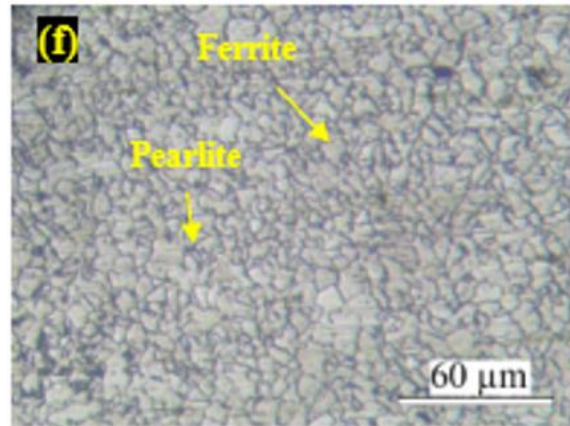
HAZ las darat



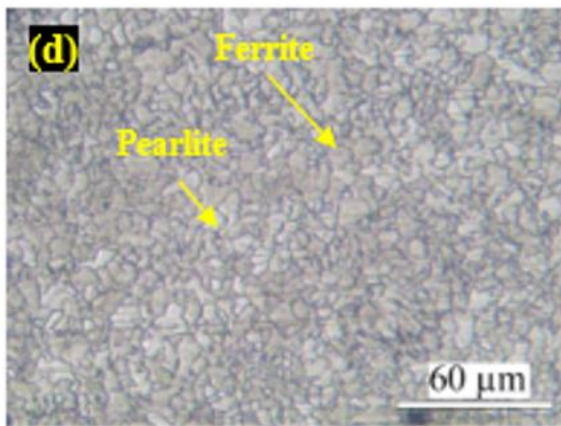
HAZ kedalaman 2,5 m tanpa aliran



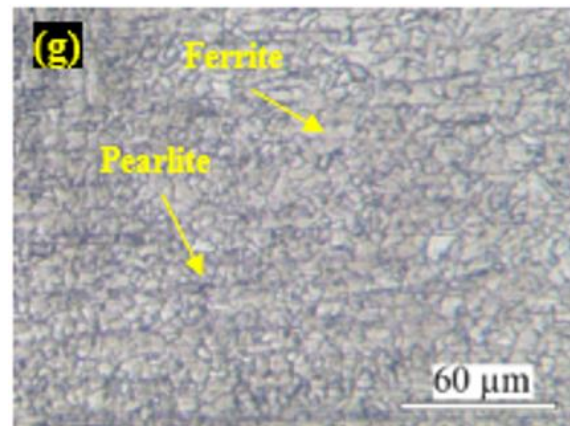
HAZ kedalaman 2,5 m aliran 1 m/s



HAZ kedalaman 5 m/s aliran 1 m

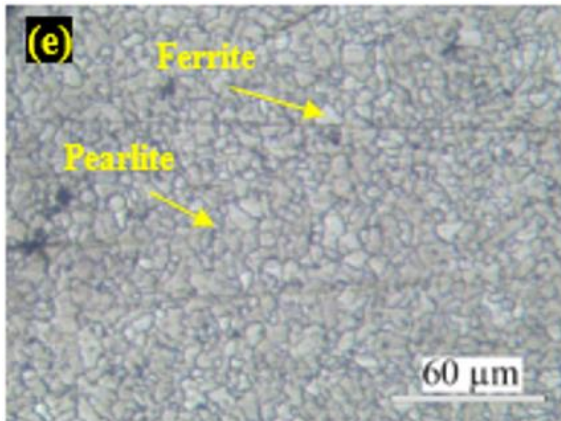


HAZ kedalaman 2,5 m aliran 2 m/s



HAZ kedalaman 5 m aliran 2 m/s

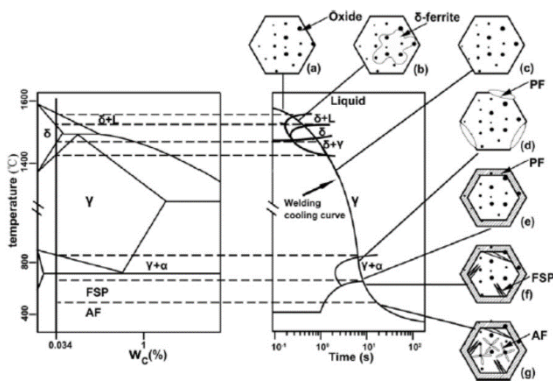
Gambar 11. Struktur mikro weld metal daerah HAZ.



HAZ kedalaman 5 m tanpa aliran

Gambar 12 menunjukkan diagram transformasi fasa *continuous cooling transformation* (CCT) dari baja karbon rendah dengan kadar C sebesar 0,34%. Kandungan kadar C tersebut sangat mirip dengan material yang digunakan sebagai *base metal* dalam pengelasan ini. Tingkat pendinginan, terutama di pengelasan bawah air di mana waktu pendinginan sangat singkat. Waktu (Δt) 8/5 (waktu pendinginan dari 800° hingga 500°C) adalah antara 1 dan 6 detik yang merupakan pendinginan yang sangat cepat dan tidak memberikan cukup waktu untuk gas meninggalkan kolam las [33].

Pendinginan ke kisaran suhu 700-550°C ditunjukkan pada Gambar 12, FSP tumbuh pada daerah *proeutektoid ferrite* atau *austenite* dan meluas ke interior butir *austenite* yang tidak dapat berubah. Pendinginan sekitar 500°C AF akan tumbuh pada inklusi yang terletak di interior butir *austenite* dan tumbuh dalam bentuk jarum. Pada pendinginan lebih lanjut ke suhu kamar, *austenite* yang tersisa dapat berubah sepenuhnya atau sebagian menjadi *martensite*. Secara umum, struktur mikro *ferrite acicular* dengan kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang sangat baik menjadi struktur mikro yang menguntungkan [21].



Gambar 12. Diagram transformasi fasa CCT baja karbon rendah [21].

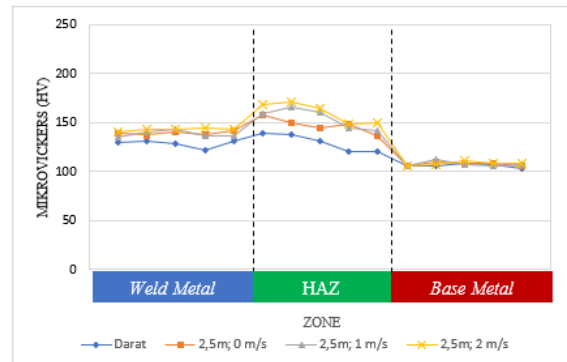
Data Uji Kekerasan (Micro Vickers)

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dengan uji keras vickers maka data kekerasan hasil pengelasan dapat dijabarkan pada Gambar 13 dan 14 Kekerasan paling rendah terdapat pada pengelasan di darat dengan nilai kekerasan tertinggi pada daerah *weld metal* 131,4 HV, daerah HAZ 139,5 HV, dan *base metal* 108 HV. Sedangkan nilai kekerasan tertinggi terdapat pada pengelasan bawah air basah dengan kedalaman 5 m pada kecepatan aliran air 2 m/s dengan nilai kekerasan tertinggi pada daerah *weld metal* 188,8 HV, daerah HAZ 233,7 HV, dan *base metal* 110,7 HV. Pengelasan bawah air basah yang memiliki kekerasan paling rendah terdapat pada pengelasan dengan kedalaman 2,5 m tanpa aliran air. Nilai kekerasan tertinggi pada daerah *weld metal* 141,7 HV, daerah HAZ 157 HV, dan *base metal* 109,6 HV.

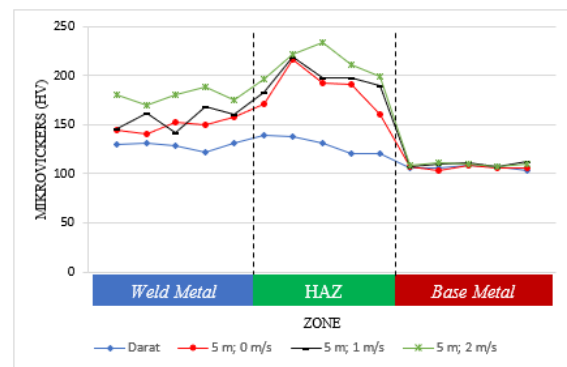
Peningkatan kedalaman pengelasan dari kedalaman 2,5 m ke 5 m berpengaruh terhadap kekerasan secara signifikan yang grafiknya dapat dilihat pada Gambar 13 dan 14. Kedalaman pengelasan memiliki pengaruh yang lebih besar daripada kenaikan kecepatan aliran air terhadap nilai kekerasan pada daerah *weld metal* maupun HAZ. Daerah HAZ pada pengelasan dengan kedalaman 2,5 m pada kecepatan aliran 2 m/s mempunyai kekerasan tertinggi sebesar 170,6 HV sedangkan kekerasan tertinggi pada kedalaman 5 m dengan aliran 2 m/s adalah 233,7 HV.

Kenaikan kekerasan sambungan las akibat kenaikan kedalaman air dan kecepatan aliran air tersebut diakibatkan kecepatan pendinginan yang meningkat atau akibat berkurangnya *heat input*. Hal tersebut terjadi karena *weld metal* dan *base metal* bersentuhan langsung dengan air dan terjadi konveksi paksa karena adanya aliran air [9]. Peningkatan kedalaman pengelasan mengakibatkan gelembung pelindung cepat naik ke permukaan sehingga sambungan las lebih banyak terkena air secara langsung [5, 35, 39]. Peningkatan kecepatan pendinginan atau berkurangnya *heat input* akan menyebabkan pertumbuhan AF dan FSP yang meningkat. Peningkatan AF dan FSP berperan terhadap kenaikan kekerasan sambungan las bawah air basah.

Peningkatan *heat input* menghasilkan butir yang kasar sehingga akan mengurangi kekerasan dan kekuatan pada daerah HAZ [35]. Semakin halus ukuran butir menyebabkan kekuatan tarik dan kekerasannya meningkat [32].



Gambar 13. Distribusi kekerasan dari weld metal, HAZ dan base metal kedalaman 2,5 m.



Gambar 14. Distribusi kekerasan dari weld metal, HAZ dan base metal kedalaman 5 m.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari kajian ini adalah bahwa peningkatan kecepatan aliran dan kedalaman air menyebabkan porositas yang semakin banyak dan besar. Pengelasan dalam air dengan kecepatan aliran 2 m/s terdapat *undercut* dan *concavity* yang paling banyak serta terjadinya cacat *irregular surface*. Porositas terbesar terjadi pada pengelasan dengan kedalaman 5 m dengan kecepatan aliran 2 m/s. Peningkatan kedalaman air pada pengelasan tanpa aliran menyebabkan berkurangnya penetrasi *weld metal*. Kecepatan aliran 1 m/s menghasilkan penetrasi logam las paling tinggi di semua kedalaman pengelasan dengan kedalaman 1,7 mm. Struktur mikro *acicular ferrite* (AF) dan *ferrite with second phase* (FSP) meningkat seiring dengan kenaikan kedalaman dan kecepatan aliran air. AF dan FSP paling banyak ditemui pada kedalaman 5 m dan kecepatan aliran air 2 m/s. Daerah HAZ memiliki struktur mikro yang semakin kecil seiring dengan kenaikan kedalaman dan kecepatan aliran air. Kekerasan sambungan las meningkat seiring dengan kenaikan kedalaman dan kecepatan aliran air. Kedalaman pengelasan 5 m dengan kecepatan aliran 2 m/s memiliki kekerasan yang paling tinggi pada

daerah *weld metal* maupun HAZ. Kekerasan tertinggi daerah *weld metal* 188,8 HV dan daerah HAZ 233,7 HV.

Daftar Pustaka

- [1] H. Sagara, Y. Nishio, dan H. Wada, 1997, "Method of Underwater Welding," United States Pat., no. 19, hal. 1–6.
- [2] E. F. Alajmi dan A. A. Alqenaei, 2017, "Underwater Welding Techniques," Int. J. Eng. Res. Appl., vol. 7, no. 2, hal. 14–17.
- [3] B. Chen, C. Tan, dan J. Feng, 2016, "A Study on the Arc Characteristics of Underwater Wet Welding Process," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 86, no. 1–4, hal. 557–564.
- [4] Q. J. Sun, W. Q. Cheng, Y. B. Liu, J. F. Wang, C. W. Cai, dan J. C. Feng, 2016, "Microstructure and Mechanical Properties of Ultrasonic Assisted Underwater Wet Welding Joints," Mater. Des., vol. 103, hal. 63–70.
- [5] C. L. Tsai dan K. Masubuchi, 1979, "Mechanisms of Rapid Cooling in Underwater Welding," Appl. Ocean Res., vol. 1, no. 2, hal. 99–110.
- [6] H. Chen, N. Guo, X. Shi, Y. Du, J. Feng, dan G. Wang, 2018, "Effect of Hydrostatic Pressure on Protective Bubble Characteristic and Weld Quality in Underwater Flux Cored Wire Wet Welding," J. Mater. Process. Tech., vol. 259, no. 2, hal. 159–168.
- [7] D. Fydrych, A. Wierczynska, dan G. Rogalski, 2015, "Effect of underwater wet welding conditions on the diffusible hydrogen content in deposited metal," Metall. Ital., vol. 107, no. 11–12, hal. 47–52.
- [8] N. Saini, C. Pandey, dan M. Mohan, 2017, "Effect of Diffusible Hydrogen Content on Embrittlement of P92 Steel," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 42, no. 27, hal. 17328–17338.
- [9] H. Chen, N. Guo, X. Shi, Y. Du, dan J. Feng, 2018, "Effect of Water Flow on the Arc Stability and Metal Transfer in Underwater Flux Cored Wet Welding," J. Manuf. Process., vol. 31, hal. 103–115.
- [10] Y. Zhang, C. Jia, B. Zhao, J. Hu, dan C. Wu, 2016, "Heat Input and Metal Transfer Influences on the Weld Geometry and Microstructure During Underwater Wet FCAW," J. Mater. Process. Technol., vol. 238, hal. 373–382.
- [11] S. Narayan, S. Tanaka, A. Mori, dan K. Hokamoto, 2017, "Welding of Sn and Cu Plates Using Controlled Underwater Shock Wave," J. Mater. Process. Technol., vol. 245, hal. 300–308.
- [12] J. Wang, Q. Sun, L. Wu, Y. Liu, J. Teng, dan J. Feng, 2017, "Effect of Ultrasonic Vibration on Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Underwater Wet Welding Joint," J. Mater. Process. Technol., vol. 246, hal. 185–197.
- [13] R. Johnson, 1997, The Effect of Water Temperature on Underbead Cracking of Underwater Wet Weldments, no. September. Monterey: Naval Postgraduate School.
- [14] W. Gao, D. Wang, F. Cheng, C. Deng, Y. Liu, dan W. Xu, 2015, "Enhancement of the Fatigue Strength of Underwater Wet Welds by Grinding and Ultrasonic Impact Treatment," J. Mater. Process. Technol., vol. 223, hal. 305–312.
- [15] J. Feng, J. Wang, Q. Sun, H. Zhao, L. Wu, dan P. Xu, 2017, "Investigation on Dynamic Behaviors of Bubble Evolution in Underwater Wet Flux Cored Arc Welding," J. Manuf. Process., vol. 28, hal. 156–167.
- [16] A. J. Wang, Q. Sun, S. Zhang, L. Wu, dan J. Feng, 2017, "Through a Visual Sensing Method Characterization of the Underwater Welding Arc Bubble Through a Visual Sensing Method," J. Mater. Process. Tech.
- [17] J. W. D. Callister, 2001, Fundamentals of Materials Science and Engineering.
- [18] X. Liu, G. Wang, Y. Shi, dan J. Zhong, 2007, "Finite Element Simulation of Three Dimensional Temperature Field in Underwater Welding," Int J Adv Manuf Technol, vol. 16, hal. 59–65.
- [19] H. L. Li, D. Liu, Y. T. Yan, N. Guo, dan J. C. Feng, 2016, "Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Underwater Wet Flux Cored Wire Welded 316L Stainless Steel Joints," J. Mater. Process. Technol., vol. 238, hal. 423–430.
- [20] J. Wang, Q. Sun, J. Ma, J. Teng, P. Jin, dan J. Feng, 2019, "Investigation of Acoustic Radiator Affecting Bubble Acoustic Interaction in Ultrasonic Wave Assisted UWW at Shallow Water," J. Manuf. Process., vol. 37, no. September 2018, hal. 563–577.
- [21] X. Di, S. Ji, F. Cheng, D. Wang, dan J. Cao, 2015, "Effect of Cooling Rate on Microstructure, Inclusions and Mechanical Properties of Weld Metal in Simulated Local Dry Underwater Welding," Mater. Des., vol. 88, hal. 505–513.
- [22] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, dan A. S. Lavine, 2011, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed. New York: John Wiley and Sons.
- [23] W. G. D. Wang, F. C. C. Deng, dan W. Xu, 2015, "Underwater Wet Welding for HSLA Steels: Chemical Composition, Defects, Microstructures, and Mechanical Properties," Acta Metall. Sin. (English Lett.).
- [24] Y. Shi, Y. Hu, Y. Yi, S. Lin, dan Z. Li, 2017, "Porosity and Microstructure of Underwater Wet FCAW of Duplex Stainless Steel," Metallogr. Microstruct. Anal., vol. 6, no. 5, hal. 383–389.
- [25] P. Taylor, D. Fydrych, dan G. Rogalski, 2011, "Effect of Shielded Electrode Wet Welding Conditions on Diffusion Hydrogen Content in Deposited Metal," Weld. Int., no. January 2015, hal. 37–41.

- [26] D. Fydrych dan G. Rogalski, 2017, "Diffusible Hydrogen Management in Underwater Wet Self Shielded Flux Cored Arc Welding," *Int. J. Hydrogen Energy*, hal. 1–9.
- [27] N. Guo, Y. Du, J. Feng, W. Guo, dan Z. Deng, 2015, "Study of Underwater Wet Welding Stability Using an X-ray Transmission Method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 225, hal. 133–138.
- [28] H. Chen, N. Guo, L. Huang, X. Zhang, dan J. Feng, 2019, "Effects of Arc Bubble Behaviors and Characteristics on Droplet Transfer in Underwater Wet Welding Using In Situ Imaging Method," *Mater. Des.*, hal. 107696.
- [29] Y. Zhao, X. Tong, X. H. Wei, S. S. Xu, S. Lan, dan Z. W. Zhang, 2019, "Effects of Microstructure on Crack Resistance and Low Temperature Toughness of Ultra Low Carbon High Strength Steel," *Int. J. Plast.*, vol. 64, hal. 1–35.
- [30] W. Gao, D. Wang, F. Cheng, X. Di, C. Deng, dan W. Xu, 2016, "Microstructural and Mechanical Performance of Underwater Wet Welded S355 Steel," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 238, hal. 333–340.
- [31] J. Nixon dan J. Billingham, 1987, "A Survey of Underwater Welding Techniques," *Pergamon Journals Ltd.*, vol. 11, no. 3, hal. 143–148.
- [32] F. C. Liu dan T. W. Nelson, 2018, "A Grain Structure Evolution , Grain Boundary Sliding and Material Flow Resistance in Friction Welding of Alloy 718," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 710, no. October 2017, hal. 280–288.
- [33] E. C. P. Pessoa dan S. Liu, 2003, "Study of Porosity Location in Fresh Water Wet Welds," *Offshore Mech. Arct. Eng.*, hal. 1–7.
- [34] J. Wang, Q. Sun, Z. Pan, J. Yang, dan J. Feng, 2018, "Effects of Welding Speed on Bubble Dynamics and Process Stability in Mechanical Constraint-Assisted Underwater Wet Welding of Steel Sheets," *J. Mater. Process. Tech.*
- [35] R. Kumar, S. Chattopadhyaya, dan S. Kumar, 2015, "Influence of Welding Current on Bead Shape ,Mechanical and Structural Property of Tungsten Inert Gas Welded Stainless Steel," *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, hal. 3342–3349.