

## Dampak Variasi Kecepatan Pengelasan Terhadap Kekerasan HAZ pada Pengelasan *In-Service Sleeve* Metode FCAW dan Pipa API 5L Grade B serta Batasan Aman Terhadap Risiko *Hydrogen Cracking*

W. R. Prahara\*, M. N. Ilman

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Email: \*wahyu.reza@gmail.com

### Abstract

*Pipe sleeve and in-service welding have been utilized for decades as a critical method to repair pipes without interrupting the flowing medium. Lower heat input may increase the risk of hydrogen cracking in the HAZ area whenever the hardness is higher than 350 VHN. In this research, circumferential welding on a type B sleeve is done on a 4", 6 mm thick pipe employing an FCAW semi-automatic robot with flowing water of 5 liters/minute. Daiden MIGi 200 is used as the welding machine and a 0.8 mm E71T-11 electrode is fed to the workpiece. Welding parameters such as current, voltage, and wire-speed are constant over the welding process which is set to 120 amperes, 20 volts, and 7.5 meters/minute respectively. The welding travel speed is varied from 10, 6, and 1 mm/s. The weldment apparently yields the highest hardness compared to the HAZ section. Along the HAZ line, CGHAZ is observed to have higher hardness than FGHAZ. The maximum HAZ hardness for 1, 6, and 10 mm/s speed (or heat input of 4,800; 400; and 240 J/mm) with flowing water is 250, 351, and 465 VHN respectively. It is reasonable to conclude that HAZ hardness is trending up with increasing welding travel speed. Hydrogen cracking risk is highly likely to occur at a welding travel speed of 6 mm/s (heat input 400 J/mm), consequently, it is best to control the speed lower than the reference value.*

**Keywords:** API 5L Grade B, Hydrogen crack, In-service welding, Sleeve repair, Welding travel speed

### Abstrak

Salah satu metode perbaikan pipa tanpa menghentikan aliran fluida yang mengalir adalah *sleeve repair* dengan pengelasan *in-service*. Risiko *hydrogen cracking* pada pengelasan *in-service* dapat dihindari dengan mengontrol kekerasan pada HAZ maksimum 350 VHN. Pada penelitian ini, dilakukan pengelasan melingkar pada konfigurasi *sleeve* tipe B berdiameter 4" dan tebal 6 mm menggunakan metode pengelasan FCAW (semi otomatis) dengan aliran air sebesar 5 liter/menit. Alat yang digunakan untuk pengelasan adalah robot memutar sederhana pada pipa dan mesin las Daiden MIGi 200 dengan elektroda E71T-11 berdiameter 0,8 mm. Beberapa parameter pengelasan seperti arus, voltase, dan kecepatan *feed* elektroda diatur konstan berturut-turut sebesar 120 ampere, 20 volt, dan 7,5 meter/menit. Sementara kecepatan pengelasan divariasikan mulai dari tercepat 10 mm/detik, 6 mm/detik, hingga paling lambat 1 mm/detik. Kekerasan pada las sendiri teramati lebih tinggi dari HAZ. Sementara itu, kekerasan pada CGHAZ diamati lebih tinggi daripada FGHAZ. Kekerasan HAZ cenderung meningkat seiring bertambahnya kecepatan pengelasan. Nilai kekerasan maksimum untuk kecepatan 1, 6, dan 10 mm/s (atau *heat input* 4.800, 400, dan 240 J/mm) berturut-turut sebesar 250, 351, dan 465 VHN. Menimbang batasan kekerasan yang diacu, potensi terjadinya *hydrogen cracking* dapat diamati pada kecepatan pengelasan 6 mm/s (*heat input* 400 J/mm) sehingga direkomendasikan agar pengelasan dilakukan dengan kecepatan di bawah itu.

**Kata kunci:** API 5L Grade B, Hydrogen crack, In-service welding, Kecepatan pengelasan, *Sleeve repair*

## 1. Pendahuluan

Peralatan pada industri minyak dan gas khususnya pipa tidak luput dari kerusakan. Kerusakan yang paling umum terjadi adalah korosi atau/ dan retakan sehingga harus diperbaiki agar peralatan dapat kembali berfungsi sesuai peruntukannya. Metode perbaikan pipa sebenarnya cukup sederhana, namun jika tidak dilakukan dengan efisien maka akan menelan biaya yang cukup besar terlebih jika harus menghentikan operasi. Penghentian operasi berdampak pada berkurang atau/ dan hilangnya potensi produksinya minyak dan gas sehingga hal ini biasanya dihindari. Salah satu metode perbaikan yang digunakan untuk pipa tanpa menghentikan aliran fluida di dalamnya adalah *in-service welding*.

Terdapat dua risiko penting pada metode *in-service welding* yaitu bocornya fluida saat pengelasan (*burn-through*) dan retak akibat hidrogen (*hydrogen induced cracking*). Pada pipa dengan tebal  $\geq 0,254$ " (6,4mm) risiko utama yang dihadapi adalah *hydrogen cracking*, bukan *burn-through*. Salah satu indikator dalam menanggulangi risiko *hydrogen cracking* adalah nilai kekerasan pada daerah HAZ. Dengan mengontrol nilai kekerasan di bawah 350 VHN [1], maka risiko *hydrogen cracking* dapat dianggap tidak ada. Meskipun [2] dan [3] mengkritisi angka batasan kekerasan HAZ sebesar 350 VHN pada *in-service welding*, untuk aplikasi las-lasan dengan material karbon rendah pada tingkat hidrogen tinggi, akan lebih baik jika tingkat kekerasan tetap dibatasi di angka 350 VHN untuk menurunkan risiko retak sehingga dapat lebih meningkatkan keamanan dan kehandalan las-lasan.

Metode alternatif otomatis selain SMAW sebagai metode pengelasan pada *in-service welding* diteliti oleh [4]. Diamati bahwa laju pendinginan rendah menurunkan risiko *hydrogen susceptibility*. PMCAW dan PGMAW mendemonstrasikan nilai kekerasan CGHAZ yang lebih rendah daripada SMAW pada *heat input* yang sama. Alternatif metode pengelesan selain SMAW menunjukkan risiko yang lebih besar terhadap *burn-through* kemungkinan besar karena efisiensi busur sehingga menyebabkan peningkatan suhu puncak yang lebih tinggi pada pipa bagian dalam. SSFCAW (*self shield FCAW*) paling berisiko terhadap *burn-through*, sementara SMAW dengan elektroda 2.4 mm memiliki risiko terendah. Ada kemungkinan dengan mengubah parameter pulsa gelombang dapat menurunkan risiko *burn-through*.

Penelitian sebelumnya didominasi oleh pengelasan metode SMAW yang banyak digunakan di lapangan. Pada penelitian ini, digunakan metode FCAW yang diharapkan dapat berperan sebagai pengaya literatur khususnya pada proses pengelasan *in-service* pada pipa sehingga bermanfaat bagi industri minyak dan gas khususnya untuk titik awal dalam menentukan parameter pengelasan.

### Dampak Pengelasan *In-Service* Terhadap Kekerasan

Dampak *in-service welding* terhadap nilai kekerasan pada HAZ menggunakan metode pengelasan SMAW pada pipa API 5L X60 diamati oleh [5]. Dilakukan pemeriksaan struktur makro untuk memeriksa cacat dan melihat sejauh mana logam pengisi melekat. Didapati nilai kekerasan pada daerah HAZ lebih tinggi dari nilai kekerasan di pipa induk dan area pengelasan.

Pengaruh tekanan, kecepatan alir fluida, dan ketebalan pipa terhadap perilaku distribusi temperatur terhadap waktu (*cooling rate*) dan ukuran HAZ dianalisis oleh [6]. Model 3D *finite element* dibuat dengan mempertimbangkan aspek *thermomechanical*. Model diverifikasi terhadap eksperimen yang dilakukan peneliti sebelumnya. Ukuran HAZ dan *thermal cycle* pipa bagian dalam mengalami penurunan seiring peningkatan laju alir fluida, tekanan gas, dan ketebalan pipa. Koefisien perpindahan panas sangat dipengaruhi laju alir dan tekanan fluida, dalam hal ini gas. Pada rentang tertentu, koefisien perpindahan panas berkorelasi linear dengan tekanan fluida. Namun pada peningkatan kecepatan alir fluida 0,3–5,0 m/s, koefisien tersebut meningkat secara eksponensial. Peningkatan kecepatan alir, tekanan fluida, dan ketebalan pipa menyebabkan  $t_{8/5}$ ,  $t_{8/3}$ , dan  $t_{8/1}$  mengalami penurunan.

Hubungan antara fluida bersuhu rendah terhadap *cooling rate* dan nilai kekerasan diteliti oleh [7]. Eksperimen dilakukan dengan membuat *laboratory rigscale setup* menyesuaikan kondisi nyata. Air digunakan dengan suhu tertentu sebagai fluida pendingin. Sampel pengelasan diperiksa secara visual dan NDT (*penetrating liquid, magnetic particle, dan ultrasonic*); *destructive (tensile, bending, V Charpy, fracture, dan kekerasan)*; analisis makro dan mikro. Didapat hasil bahwa efek fluida mengalir bertemperatur rendah lebih signifikan dibandingkan ketebalan pipa untuk meningkatkan laju pendinginan. Namun, efek suhu fluida mengalir tersebut tetap bukan faktor utama

yang bertanggung jawab untuk peningkatan laju pendinginan. Suhu fluida rendah menyebabkan peningkatan nilai kekerasan pada zona fusi dan HAZ.

Teknik pengelasan *in-service* dengan *tempered-bead* terhadap nilai kekerasan maksimum HAZ ternyata memiliki kaitan [8]. Diamati bahwa perbandingan *overlap weld* sebesar 50–75% berhasil menurunkan nilai kritis kekerasan HAZ secara signifikan. Perbedaan jenis urutan pengelasan manik las tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai kritis kekerasan HAZ dengan menambah jumlah manik las. Proses pengelasan SMAW disarankan digunakan untuk pengelasan lanjutan (tambalan pada manik las pertama) karena mampu menurunkan nilai maksimum HAZ pada *root weld pass*. Jika dibandingkan antara pipa dan *sleeve plate*, nilai maksimum kekerasan selalu terjadi pada *root weld pass* pada pipa.

Kekerasan maksimum HAZ turun jika *heat input* meningkat [9]. *Heat input* merupakan faktor penentu jika dibandingkan dengan lajur alir fluida. Pada titik tertentu, meningkatnya *flow rate* tidak memberikan dampak apa-apa terhadap perubahan kekerasan HAZ. Berbeda dengan ketebalan pipa, ketebalan pipa tidak berpengaruh terhadap hasil kekerasan HAZ. Hal ini sesuai dengan rumus kalkulasi yang disarankan PRCI.

### **Hydrogen Cracking**

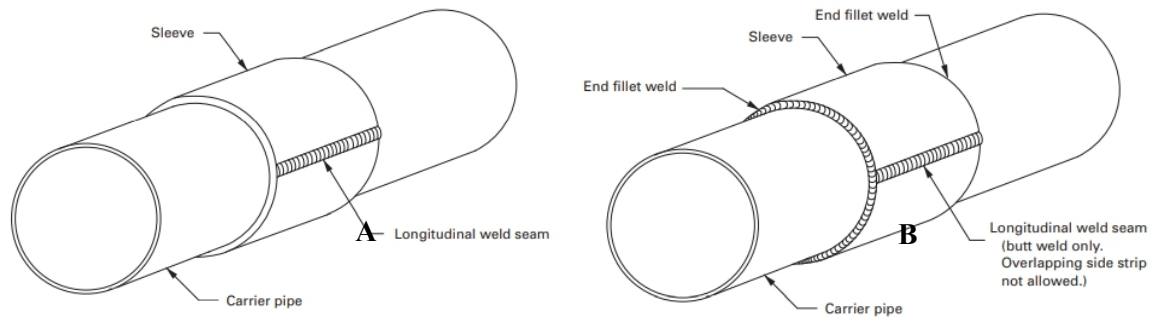
*Hydrogen crack* akan terjadi jika terdapat empat faktor yang menyebabkan *hydrogen crack* terjadi bersama – sama yaitu adanya hidrogen pada logam lasan, *stress* yang tinggi, mikrostruktur yang rentan, dan suhu yang relatif rendah (sampai dengan 200°C). *Stress* yang tinggi dapat diakibatkan oleh proses pendinginan yang diikuti dengan penyusutan dan kontraksi termal. Mikrostruktur yang memiliki kekerasan dan kegetasan tinggi lebih rawan terbentuk *hydrogen crack*. *Hydrogen crack* juga cenderung terbentuk pada suhu dingin, sehingga sering disebut *cold cracking* atau disebut juga *delayed cracking* karena memerlukan waktu inkubasi bagi retakan untuk terbentuk yang lamanya tidak dapat diperkirakan.

Dampak ketebalan pipa, *heat input* pengelasan, dan kecepatan fluida yang mengalir dalam pipa terhadap risiko *hydrogen induced cracking* diteliti oleh [10] melalui studi kasus menggunakan pendekatan rumus analitikal dibantu dengan MATLAB. Pada proses *in-service welding*, mula-mula suhu di pipa bagian luar meningkat drastis dan menyebabkan *stress failure*. Sementara itu, suhu di pipa bagian dalam meningkat setelahnya dengan laju yang lebih lambat daripada bagian luar. Dalam penelitiannya, didapati bahwa metode *intermittent welding* baik digunakan untuk mencegah terjadinya *stress failure* di pipa bagian dalam. Pipa yang lebih tebal memberikan ketahanan yang lebih besar terhadap *stress failure* pada proses *in-service welding*. Dampak *heat input* terhadap distribusi suhu sekitar *welding area* dan *allowable stress* diamati pipa sangat signifikan. *Heat input* besar membuat *molten pool* yang lebih dalam. *Heat input* yang relatif kecil sebenarnya meningkatkan faktor keamanan. Namun perlu dipertimbangkan bahwa saat kecepatan fluida mengalir meningkat, suhu di pipa bagian dalam menurun cukup signifikan, sementara itu *allowable stress* pipa meningkat. Kecepatan alir yang tinggi meningkatkan potensi HIC.

Dalam penelitian [2] dan [3] dikaji hubungan antara kekerasan maksimum HAZ, kandungan hidrogen yang dapat terdifusi, *restraint*, dan perilaku retak pada aplikasi *in-service welding*. Hasil dari penelitian sebelumnya mengindikasikan bahwa relaksasi penggunaan batas kekerasan 350 VHN dapat digunakan untuk beberapa material, sehingga *in-service welding* dapat digunakan lebih luas. Namun, untuk aplikasi lainnya (seperti las-lasan untuk material karbon rendah pada tingkat hidrogen tinggi), akan lebih baik jika tingkat kekerasan tetap dibatasi untuk menurunkan risiko retak sehingga dapat lebih meningkatkan keamanan dan kehandalan las-lasan.

### **Teknik Perbaikan pada Pipa**

Setidaknya, ada beberapa skenario *in-service welding* yang jamak dilakukan pada pipa [11]: (1) Pipa di atas pipa (*pipe-on-pipe*) atau biasa dikenal dengan sebutan perbaikan dengan selongsong pipa (*sleeve repair*). Pada kasus ini, pipa induk yang ingin diperbaiki diselubungi dengan potongan pipa baru kemudian dilas. Terdapat dua jenis *sleeve* yang biasa digunakan yaitu tipe A dan tipe B.



Gambar 1. Perbaikan *Pipe-on-Pipe/Sleeve Type A dan B* [11]

*Sleeve* tipe A tidak dilas melingkar ke pipa induk di ujung-ujungnya sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. *Sleeve* tipe ini tidak didesain untuk mampu menahan tekanan internal pipa namun berfungsi sebagai penguat untuk area yang mengalami cacat. Biasanya *sleeve* tipe A digunakan untuk memperbaiki cacat yang tidak berupa bocoran atau cacat yang diperkirakan tidak akan berkembang hingga bocor. Berkebalikan dengan *sleeve* tipe A, *sleeve* tipe B dilas melingkar ke pipa induk dan mampu menahan tekanan yang disebabkan fluida. *Sleeve* tipe ini menggunakan las-lasan tipe *fillet* pada ujung-ujungnya; (2) Cabang pada pipa (*branch-on-pipe*) biasa diaplikasikan sebelum proses *hot-tapping*. *Hot-tapping* sendiri adalah teknik yang digunakan untuk melubangi pipa dimana fluida di dalamnya masih mengalir. Sebelum pelaksanaan *hot-tapping*, pipa yang ingin dimodifikasi diberi tambahan berupa percabangan selongsong dengan tambahan kerangan (*valve*) atau *weld-o-let* kemudian dilas; (3) Manik las pada pipa (*bead-on-pipe*) atau mengendapkan manik las secara langsung (*direct deposition welding*). Pada skenario ini, pipa induk biasa mengalami korosi atau cacat berupa retakan kemudian digerinda dan diberikan tambalan manik las untuk mengembalikan/menambah tebal; dan (4) Tambalan (*patching*) dilakukan dengan menambahkan potongan lempeng baja baru pada struktur yang ingin diperbaiki.

### Heat Input Pengelasan

*Heat input* merupakan suatu variabel penting untuk menentukan karakteristik perpindahan panas dari busur las ke benda kerja. Ada tiga faktor yang mempengaruhi *heat input* ke benda kerja antara lain: (1) besarnya laju energi masukan (hasil perkalian dari efisiensi dan energi per waktu yang dihasilkan sumber panas, biasanya bersatuan Watt), (2) distribusi *heat input*, dan (3) kecepatan pengelasan.

Saat proses pengelasan berlangsung, benda kerja menyerap hanya sebagian keseluruhan energi yang disuplai oleh sumber panas. Panas yang diserap ini menentukan performa pengelasan, antara lain: proses pembentukan *liquid pool*, faktor pembentuk distribusi suhu vs waktu untuk seluruh bagian pengelasan, struktur dan properti dari las-lasan.

Pada setiap proses pengelasan, energi diserap oleh benda kerja yang ditransmisikan sumber energi bergantung pada material, jenis sumber energi, dan parameter proses pengelasan. *Heat input* biasa dinotasikan sebagai  $Q$  yang merepresentasikan perbandingan antara daya busur yang mengalir ke benda kerja dengan kecepatan pengelasan. Perbandingan tersebut dikenal dengan efisiensi termal, dinotasikan dengan lambang  $\eta$  sebagaimana persamaan di bawah.

$$Q = \eta \cdot \frac{E \cdot I}{v} \quad (1)$$

dengan  $Q$  adalah *heat input* [J/mm],  $\eta$  adalah efisiensi termal [%],  $E$  adalah tegangan [V]; diukur sedekat mungkin ke busur,  $I$  adalah arus pengelasan [A], dan  $v$  adalah kecepatan pengelasan [mm/s].

## 2. Metode

### Karakterisasi Material Induk

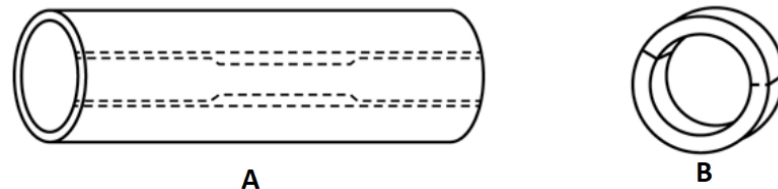
Untuk menguji apakah material pipa yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan standar API atau tidak, perlu dilakukan uji tarik dan komposisi untuk kemudian hasil pengujian tersebut dicocokkan dengan spesifikasi API yang dimaksud. Uji tarik adalah suatu pengujian rusak yang dilakukan pada spesimen uji dimana spesimen ditarik terus-menerus hingga putus/patah. Standar uji tarik yang umum digunakan adalah ASTM A370 [12]. Spesimen uji tarik untuk produk tubular (dalam hal ini pipa) diatur di bagian A2. Steel Tubular Products pada dokumen ASTM A370 [12]. Pengujian dilakukan dengan terlebih dahulu memotong bagian pipa menjadi spesimen berbentuk bilah (strip) yang dipotong secara memanjang sesuai Gambar 2.

Uji komposisi bertujuan untuk memberikan gambaran terhadap bahan-bahan yang terkandung dalam pipa. Hasil dari pengujian komposisi ini adalah konstituen dari masing-masing komposisi kimia dari unsur utama pembentuk baja karbon yaitu Fe, C, Mn, Ni, Si, Mo, V, dan lain-lain.

### Prosedur Pengelasan & Pengujian Sampel

Eksperimen menggunakan metode pengelasan FCAW dengan spesifikasi rinci pada Tabel 1. Parameter Pengelasan dan Fluida. Mula-mula dilakukan eksperimen pengelasan *sleeve* pada variasi debit fluida dan kecepatan pengelasan sesuai dengan nilai yang telah disebut di atas.

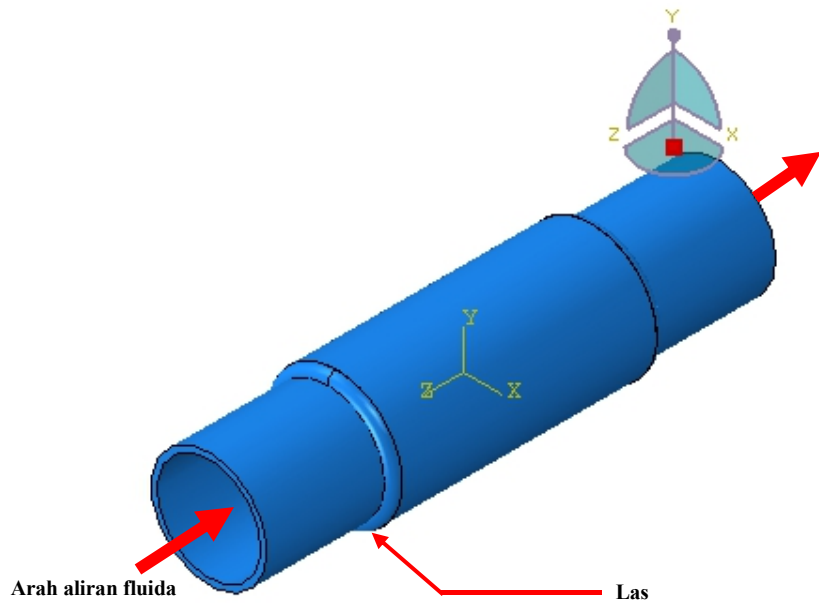
Pipa yang digunakan dibuat menggunakan standar API 5L Grade B dengan diameter 4 inch. Pengelasan dilakukan dengan konfigurasi repair sleeve tipe B. Fluida mengalir di dalam pipa adalah air dengan suhu ruangan pada laju alir 5 L/menit untuk mensimulasikan efek pendinginan sebagaimana skenario di lapangan untuk fluida minyak dan gas. Adapun parameter pengujian dirinci pada Tabel 1 dengan skematik rig pengujian pada Gambar 4.



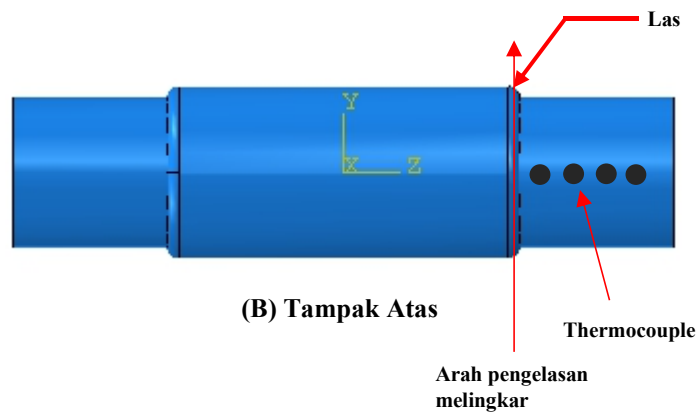
Gambar 2. Spesimen Uji Bilah Memanjang (A) dan Melingkar (B) [12]

Tabel 1. Parameter Pengujian

Parameter	Nilai
Metode Pengelasan	FCAW
Tegangan Listrik	20 volt
Arus Listrik	120 ampere
Material Induk	API 5L Grade B Diameter 4 Inch Panjang 1 meter
Elektroda	E71T-11 (SS)
Kecepatan Pengelasan	Variatif mulai dari 1, 6, dan 10 mm/detik
Gas Pelindung	Tidak ada
Debit Alir	5 liter/menit
Tekanan Fluida	1 barg ( $1 \times 10^5$ Pa)
Metode Pengelasan	FCAW



(A) Tampak Isometrik



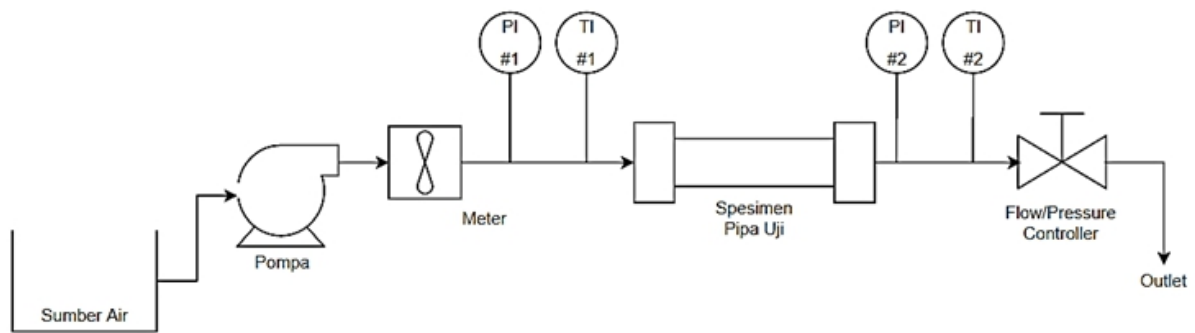
(B) Tampak Atas

Gambar 3. Konfigurasi Pengelasan pada Pipa dan Sleeve

Tabel 2. Referensi Acuan Komposisi Elektroda E71T-11

Unsur	(% Max)
C	0,30
Mn	1,75
Si	0,60
S	0,03
P	0,03
Al	1,80

Elektroda yang digunakan untuk pengelasan adalah E71T-11. Mengacu pada AWS A5.20 [13], komposisi kimia elektroda harus tersusun atas unsur pada Tabel 2 di bawah (nilai maksimum). Adapun elektroda E71T-11 adalah elektroda untuk pengelasan FCAW dengan polaritas arus DCEN dan dapat digunakan untuk segala posisi. Kekuatan luluh dan patah yang disyaratkan berturut-turut minimal sebesar 58 kpsi dan 70 kpsi.



Gambar 4. Diagram skematik kontrol dan spesimen uji

Tabel 3. Komposisi Spesimen Uji (API, 2007)

Unsur	%	Unsur	%	Unsur	%
C	0,19	Sn	0,00	V	0,00
Si	0,26	Cu	0,09	Co	0,01
Mn	0,42	Ni	0,02	Pb	0,01
P	0,00	Mo	0,04	Ca	0,00
S	0,00	W	0,00	Zn	0,01
Cr	0,09	Ti	0,00	Fe	98,84
Al	0,02	Nb	0,00		

Uji kekerasan dilakukan menggunakan alat Vickers Microhardness untuk mendapatkan nilai VHN. Adapun bagian yang diuji daerah las, HAZ, dan logam induk.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### Karakterisasi Material Pipa

Pengujian tarik material pipa dilakukan pada tiga sampel uji sesuai dengan prosedur acuan ASTM A370. Sampel diambil searah dengan panjang pipa. Hasil uji tarik untuk berturut-turut sampel uji S1, S2, dan S3 menunjukkan kekuatan luluh sebesar 26 kN, 26 kN, dan 24,5 kN. Sementara kekuatan tertinggi hingga patah untuk sampel uji S1, S2, dan S3 adalah sebesar 37,8 kN, 38,8 kN, dan 35,8 kN. Dengan demikian, nilai kekuatan luluh rata-rata adalah sebesar 339 MPa dan kekuatan patah sebesar 498 MPa. batas kekuatan minimum luluh dan patah untuk API 5L Grade B yakni berturut-turut sebesar 245 MPa dan 415 MPa sehingga material logam induk yang diuji tersebut masih sesuai dengan referensi acuan.

Adapun pengujian komposisi kimia menggunakan analisis spektrometer pada logam material induk mengindikasikan bahwa material pipa tersusun paling banyak oleh logam besi sebesar 98,84% kemudian disusul oleh elemen paduan lain seperti mangan 0,4165%, karbon 0,1878%, silikon 0,2555%, kromium 0,0854%, tembaga 0,0854%, dan lain sebagainya (Tabel 3). Material logam induk pipa diduga adalah API 5L Grade B. Standar API 5L [14] mengatur komposisi kimia penyusun pipa API 5L Grade B yang dinyatakan dalam ambang batas, baik maksimum persentase C, Mn, P, dan S berturut-turut sebesar 0,28%, 1,20%, 0,03%, dan 0,03%. Jumlah Nb, Ti, dan V tidak boleh melebihi 0,15%. Sedangkan Jumlah Nb dan V dijaga pada maksimum 0,06%. Merujuk pada nilai referensi yang diberikan, unsur karbon, mangan, fosfor, sulfur, dan kombinasi niobium & vanadium, serta kombinasi niobium, vanadium, dan titanium masih sesuai dengan standar API 5L Grade B yang diacu.

### Heat Input

Nilai *heat input* pengelasan merupakan fungsi dari arus I, voltase E, efisiensi pengelasan  $\eta$ , dan kecepatan pengelasan  $v$ . Arus dan voltase untuk pengelasan tersebut dibangkitkan menggunakan mesin las Daiden MIGi 200 dengan fitur pengaturan las FCAW. voltase diatur tetap pada nilai 20 volt sementara arus tergenerasi secara otomatis menyesuaikan diameter elektroda dan jarak antara elektroda dan benda kerja. Semakin dekat jarak antara elektroda dan benda kerja, arus yang dibangkitkan semakin besar pula. Begitu pula halnya dengan diameter elektroda, semakin besar diameter elektroda yang digunakan semakin besar pula arus yang akan tergenerasi. Pada kasus ini, digunakan elektroda E71T-11 dengan diameter 0,8 mm dan jarak antara elektroda dan benda kerja sekitar 3–5 cm.

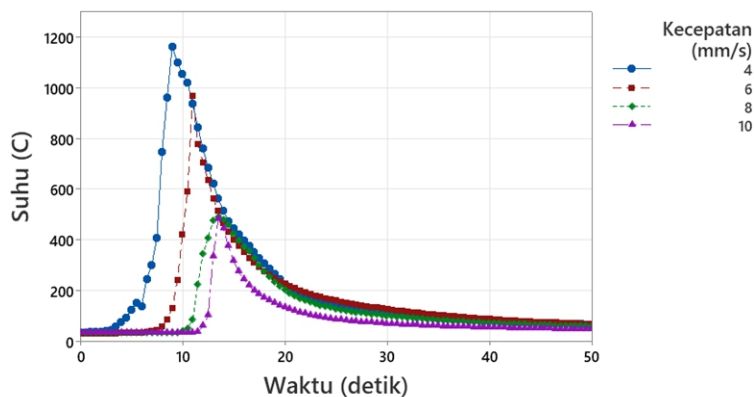
Oleh karena voltase diatur pada angka yang tetap, maka nilainya cenderung konstan sehingga angka 20 volt dapat digunakan untuk perhitungan. Lain halnya dengan voltase, arus pada mesin las Daiden MIGi 200 ini tidak dapat diatur. Selain itu, pada saat *mode* pengelasan diubah menjadi FCAW, tidak ada indikator arus pada panel sehingga pengukuran arus dilakukan menggunakan bantuan *shunt* dan mikrokontroler. Angka arus yang didapatkan sangat rapat dengan laju *sampling* tinggi sehingga harus dirata-rata menggunakan metode RMS. Namun, pada hampir seluruh pengelasan, arus cenderung berkisar di angka 110–130 ampere sehingga untuk memudahkan perhitungan maka arus yang digunakan untuk perhitungan adalah 120 ampere. Sementara nilai efisiensi diasumsikan sempurna sebesar 100%.

Dengan demikian, *heat input* untuk setiap kecepatan pengelasan dapat dihitung sebagaimana dirinci pada tabel di bawah. Oleh karena nilai *heat input* independen terhadap laju alir, maka nilai *heat input* untuk setiap laju alir yang berbeda asalkan kecepatan pengelasannya sama akan menghasilkan nilai yang sama (Tabel 4).

Pada saat proses pengelasan berlangsung, suhu pada beberapa titik di sekitar lasan diukur menggunakan *thermocouple*. Suhu yang diamati kemudian direkam setiap selang waktu tertentu dan digambar pada grafik. Grafik ini menunjukkan peningkatan suhu yang tajam ketika sumber panas las (elektroda yang mencair) mendekati *thermocouple*, kemudian berangsur-angsur turun hingga mendekati suhu fluida yang mengalir atau ruangan. Suhu pada dinding pipa diukur pada jarak yang sangat dekat dengan HAZ menggunakan 4 (empat) titik *thermocouple*.

Tabel 4. Perhitungan Heat Input Pengelasan

Kecepatan Pengelasan (mm/s)	Heat Input (J/mm)
10,0	240
8,0	300
6,0	400
4,0	600
2,0	1.200
1,0	2.400
0,5	4.800



Gambar 5. Laju Pendinginan dengan Laju Aliran Fluida 5 liter/menit pada Variasi Kecepatan Pengelasan



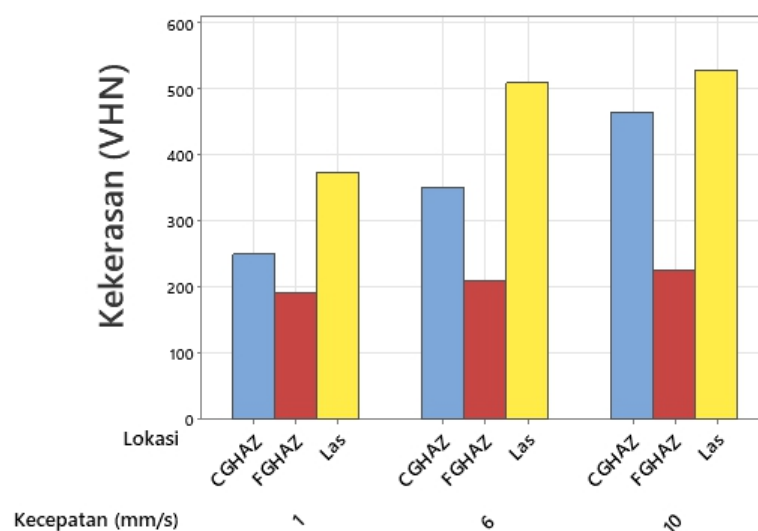
Gambar 5 menunjukkan pengukuran suhu pada *thermocouple* terdekat dengan lasan. Pada laju aliran 5 liter/menit dan kecepatan rendah (4 mm/s), suhu yang terekam mencapai puncak yang sangat tinggi di angka 1.163°C. Kemudian di kecepatan pengelasan 6 mm/s, suhu puncak turun ke angka 969°C. Pada kecepatan pengelasan 8 dan 10 mm/s, suhu puncak berada pada angka yang hampir sama yaitu sekitar 482 °C.

### Kekerasan Las dan HAZ

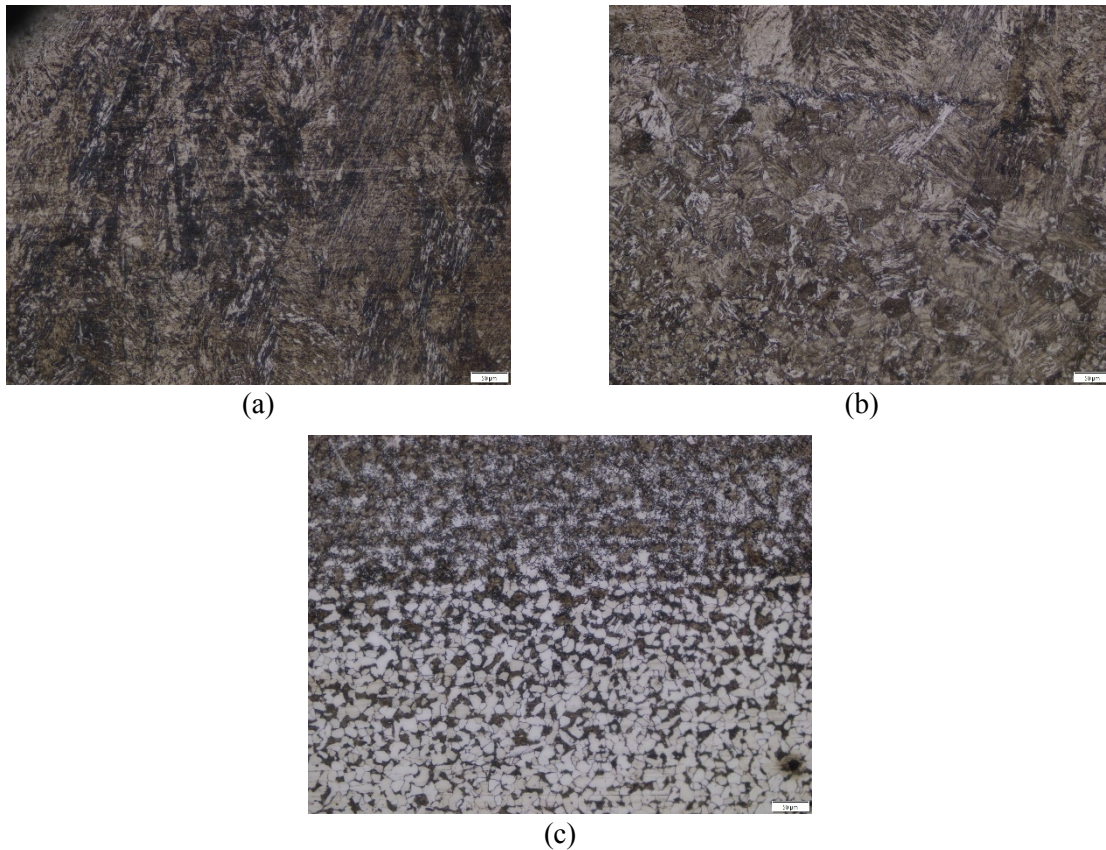
Kekerasan pada las (528, 509, dan 374 VHN pada berbagai kecepatan) teramati lebih tinggi (Gambar 6) dari HAZ dan material induk yang hanya berkisar di angka 175–192 VHN pada beberapa pengambilan uji. Kekerasan las yang lebih tinggi ini disebabkan oleh kandungan karbon elektroda E71T-11 relatif lebih tinggi daripada material induk API 5L Grade B. Temuan ini sedikit berbeda dengan [5] yang mendapati nilai kekerasan pada HAZ lebih tinggi dari las disebabkan oleh material induk yang digunakan adalah API 5L X60 memiliki kandungan karbon lebih tinggi dibandingkan API 5L Grade B.

CGHAZ memiliki kekerasan lebih tinggi daripada pada FGHAZ. Nilai kekerasan CGHAZ maksimum untuk kecepatan 1 mm/s, 6 mm/s, dan 10 mm/s pada laju alir fluida 5 liter/menit berturut-turut sebesar 250, 351, dan 465 VHN. Kekerasan HAZ cenderung meningkat seiring bertambahnya kecepatan pengelasan [7]. Peningkatan kekerasan pada HAZ seiring meningkatnya kecepatan diakibatkan oleh panas las melewati suatu titik lebih lebih cepat daripada pengelasan di kecepatan lambat. Hal tersebut dapat dijelaskan oleh [9] yang mengamati bahwa kekerasan maksimum HAZ meningkat jika *heat input* berkurang, dalam hal ini disebabkan oleh kecepatan yang semakin tinggi. Dilihat dari siklus termal yang dialami, *heat input* pengelasan yang terjadi pada pipa semakin rendah seiring dengan menurunnya kecepatan pengelasan. *Heat input* yang lebih kecil meningkatkan laju pendinginan. Sedangkan *heat input* rendah mengakibatkan suhu puncak yang lebih tinggi dan waktu bagi material untuk berada di suhu tinggi menjadi lebih lama.

*Martensite*, fasa paling keras penyusun mikrostruktur, jarang terjadi di HAZ pada pengelasan dengan material baja karbon rendah seperti API 5L Grade B, akan tetapi *martensite* bisa saja terbentuk jika laju pemanasan dan pendinginan sangat tinggi. Fasa *austenite* akan mengalami pertumbuhan butir dengan sangat pesat di daerah ini dan kemudian jika didinginkan dengan laju yang cukup tinggi maka dapat membentuk *ferrite* Widmanstatten atau *bainite*. Ukuran butir pada CGHAZ biasa jauh lebih besar dari zona yang lebih jauh. Menjauh dari las dan CGHAZ, namun masih bagian HAZ, mungkin saja terjadi transformasi *austenite* namun suhunya cukup rendah untuk terjadinya pertumbuhan butir.



Gambar 5. Nilai Kekerasan Vickers pada Las dan HAZ



**Gambar 6. Mikrostruktur Hasil Pengelasan pada Area Las (A), Batas Las-HAZ (B), dan Batas HAZ-Logam Induk**

Pada bagian HAZ, terdapat CGHAZ (*coarse grain HAZ*) yang berada sangat dekat dengan las. Fasa *austenite* akan mengalami pertumbuhan butir dengan sangat pesat di daerah ini dan kemudian jika didinginkan dengan laju yang cukup tinggi maka dapat membentuk *ferrite Widmanstatten* atau bainite. Ukuran butir pada CGHAZ biasa jauh lebih besar dari zona yang lebih jauh.

Menjauh dari las dan CGHAZ, namun masih bagian HAZ, mungkin saja terjadi transformasi *austenite* namun suhunya cukup rendah untuk terjadinya pertumbuhan butir. Martensite, fasa paling keras penyusun mikrostruktur, jarang terjadi di HAZ pada pengelasan dengan material baja karbon rendah, akan tetapi *martensite* bisa saja terbentuk jika laju pemanasan dan pendinginan sangat tinggi. Pada HAZ *high-carbon austenite* terbentuk saat proses pemanasan berlangsung, dan karena laju pendinginan yang tinggi, kandungan karbon tidak memiliki cukup waktu untuk terdifusi keluar sehingga butir bertransformasi menjadi martensite dengan kandungan karbon yang tinggi dan bersifat getas dan keras. Semakin mendekati pada zona fusi, temperatur puncak dan waktu difusi meningkat, sehingga *martensite* yang terbentuk memiliki kandungan karbon yang lebih rendah jika dibandingkan dengan *martensite* pada sisi yang lebih jauh dari zona fusi.

#### 4. Kesimpulan

Kekerasan HAZ cenderung meningkat seiring bertambahnya kecepatan pengelasan. Risiko *hydrogen cracking* teramati terjadi kecepatan pengelasan 6 mm/s pada laju alir 5 liter/menit dengan kekerasan di angka 351 VHN. Dengan demikian, pengelasan untuk parameter di atas dianjurkan dilakukan dengan kecepatan pengelasan kurang dari 6 mm/s.

## Referensi

- [1] API, *API 1104: Welding of Pipelines and Related Facilities*, 21 ed. Washington DC, 2015.
- [2] W. A. Bruce dan B. C. Etheridge, "Further Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding," in *Volume 3: Materials and Joining*, 2012, hal. 71–81.
- [3] W. A. Bruce, B. C. Etheridge, dan A. Carman, "Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding," in *2008 7th International Pipeline Conference, Volume 3*, 2008, hal. 1–9.
- [4] D. Begg, "Alternate Welding Processes for In-Service Welding," Kanata, 2009.
- [5] E. Martides dan G. G., "Pengaruh Proses in-Service Welding," *Majalah Metalurgi*, 2015.
- [6] Z. Huang, H. Tang, Y. Ding, Q. Wei, dan G. Xia, "Numerical Simulations of temperature for the in-service welding of gas pipeline," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 248, no. January, hal. 72–78, 2017.
- [7] J. P. Soares, P. Faria, dan R. Paranhos, "Efeito do arrefecimento causado pelo fluido durante a soldagem em operação em tubulações com espessura de parede de 6 e 11 mm," *Soldag. e Insp.*, vol. 22, no. 3, hal. 269–280, 2017.
- [8] S. Srisutraporn, R. Paoniam, B. Poopat, dan S. Kwankaew, "Effect of tempered bead techniques on maximum HAZ hardness for in-service pipeline welding," *MATEC Web Conf.*, 2018.
- [9] S. Kwankaew, R. Paoniam, B. Poopat, dan S. Srisutraporn, "In-service operating conditions affecting on weld HAZ hardness for API5L Gr.B pipe steel maintenance.," *MATEC Web Conf.*, vol. 192, hal. 8–11, 2018.
- [10] C. Niu, Y. Tan, dan J. Fu, "Thermodynamic Characteristics Investigation of the In-situ Gas Pipelines Welding Process," *ICPTT*, no. 2010, hal. 622–630, 2013.
- [11] ASME International, "ASME PCC-2–2015. Repair of Pressure Equipment and Piping," *Am. Soc. Mech. Eng.*, hal. 1–216, 2015.
- [12] ASTM, "ASTM A370 - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products," *ASTM Int.*, vol. 01.03, no. Rapproved, hal. 1–48, 2004.
- [13] AWS, *AWS A5.20/A5.20M Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding*, 6th Editio. 2021.
- [14] API, "Specification for Line Pipe," no. December 2012, 2013.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*