

Studi Eksperimental Pengendalian *Heat Input* Guna Pencegahan *Burn-Through* pada Perbaikan Pipa Dengan Metode *Weld-Deposition*

K. A. Pambudi* dan M. N. Ilman

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: kurniawan4480@gmail.com

Abstrak

Pada industri minyak dan gas bumi, selain digunakan dalam proses penyambungan pipa minyak dan gas bumi, pengelasan juga digunakan untuk perbaikan penguatan dinding pipa ketika terjadi penurunan ketebalan, salah satunya dengan metode perbaikan yang dilakukan adalah *weld-deposition*. Namun demikian, metode ini memiliki risiko kegagalan berupa *burn-through* dan *hydrogen cracking*. Pada penelitian ini, dilakukan pengelasan deposisi pada pipa API 5L X52 dengan nominal diameter 4 inchi (101.6 mm) dan sisa ketebalan dinding pipa 4 mm yang dialiri air dengan kecepatan 15,4 liter per menit (lpm). Dari hasil pengujian ini, akan didapatkan nilai temperatur pada dinding pipa dan waktu yang diperlukan untuk terjadi penurunan suhu dari 800°C ke 500°C ($\Delta t_{8/5}$). Pengujian menggunakan beberapa nilai *heat input* yang merupakan manifestasi dari kuat arus I antara 160 – 200 A, voltase V sekitar 24 – 30 V, dan kecepatan pengelasan v bervariasi dengan interval 2 – 10 mm/s yang menghasilkan *heat input* pada rentang 0,3031 kJ/mm sampai dengan 1,6907 kJ/mm, sedangkan parameter lain diasumsikan tetap. Penelitian ini menghasilkan rekomendasi pengelasan dengan metode *weld-deposition* pada pipa *in-service* dengan mengaplikasikan *heat input* pada rentang 0,5388 kJ/mm sampai dengan 1,3526 kJ/mm untuk debit alir fluida air 15,4 lpm untuk menghindari potensi timbulnya *hydrogen crack* dan *burn-through*. Burn-through sendiri terjadi pada *heat input* 1,6907 kJ/mm pada kecepatan pengelasan 2 mm/s.

Kata kunci : API 5L X52, *weld-deposition*, *burn-through*, *hydrogen crack*, *heat input*, *in-service welding*.

Abstract

In the oil and gas industry, welding is widely used for joining welded steel and pipelines. A welding technique is also used for repair damage of the piping system due to a decrease in thickness. One of the repair methods used is *weld-deposition*. However, this method causes a risk of failure in the form of *burn-through* and *hydrogen cracking*. In this study, deposition welding was carried out on API 5L X52 pipe having a nominal diameter of 4 inches (101.6 mm) and the remaining thickness of the pipe wall of 4 mm in which water was flowed at average speed of 15.4 litres per minutes (lpm). The welding process was conducted at current I of 160 - 200 A, the voltage V of around 24 - 30 V whereas the welding speed v was varied in the intervals of 2 - 10 mm/s hence resulting in different weld heat inputs of 0, 3031 kJ/mm to 1,6907 kJ/mm while other parameters are assumed to be constant. During experiments, the pipe wall temperatures were measured using thermocouples from which the cooling time from 800 °C to 500 °C, namely $\Delta t_{8/5}$ for various welding speeds were obtained. This research produces recommendations for welding with the *weld-deposition* method on *in-service* pipes by applying heat input in the range 0.5388 kJ/mm to 1.3526 kJ/mm for a water flow rate of 15,4 lpm to avoid potential *hydrogen crack* and *burn-through*. Results show that increasing heat input hence lowering welding speed tends to decrease the HAZ and *burn through* occurs at the heat input of 1,6907 kJ/mm corresponding to the welding speed of 2 mm/s.

Keywords : API 5L X52, *weld-deposition*, *burn-through*, *hydrogen crack*, *heat input*, *in-service welding*.

1. PENDAHULUAN

Pada industri minyak dan gas bumi, pengelasan sangat erat dengan penggunaan pipa baja yang digunakan sebagai moda transportasi minyak dan/atau gas bumi. Selain digunakan untuk menyambung pipa minyak dan gas bumi, pengelasan juga dilakukan untuk memperbaiki kerusakan yang terjadi pada sistem perpipaan. Kerusakan pada dinding pipa dapat mengakibatkan penurunan ketebalan pipa, sehingga mengakibatkan menurunnya kekuatan pipa dalam menahan tekanan fluida yang mengalir. Pada kondisi ini perkuatan dinding pipa perlu dilakukan salah satunya dengan metode *weld-deposition*. Namun demikian, metode ini memiliki risiko kegagalan berupa *burn-through* dan *hydrogen crack*.

Pada studi ini, akan dilakukan pembahasan mengenai perbaikan pada sistem perpipaan dengan metode *weld-deposition* dengan lebih spesifik menentukan parameter-parameter pengelasan yang digunakan untuk mencegah terjadinya kegagalan *burn-through* pada proses pengelasan pipa yang dialiri fluida (*in-service*) dan mencegah terjadinya *hydrogen crack*. Sehingga, diharapkan ketika perbaikan dilakukan tanpa menghentikan aliran fluida dalam pipa, maka dapat mengurangi *potential commercial lost*.

Metode yang digunakan untuk mengidentifikasi terjadinya *burn-through* adalah mengukur temperatur maksimum pada dinding dalam pipa dan menggunakan distribusi temperatur untuk mengetahui penurunan kekuatan dari pipa. Boring dkk (2008) menyatakan bahwa temperatur di dinding dalam pipa harus dijaga agar tetap berada di bawah suhu 982oC untuk alasan keamanan. Nilai ini sudah mengakomodasi faktor keamanan sebesar 278oC sesuai kajian Bruce dan Amend (2009) yang menyatakan bahwa *burn-through* tidak terjadi pada temperatur di bawah 1260oC. Wade (1978) menggunakan pipa X60 dan elektroda berdiameter 3,2 dan 4,0 mm pada pipa dengan ketebalan sampai dengan 6 mm menggunakan heat input 1,8 kJ/mm menghasilkan kesimpulan bahwa untuk pipa dengan ketebalan 5 mm perlu dilakukan pembatasan tekanan dalam pipa maksimum 3 MPa dan heat input maksimum 1,4 kJ/mm. *Burn-through* juga dapat terjadi pada pipa dengan ketebalan kurang dari 3 mm meskipun pada tekanan dalam pipa yang sangat rendah. Penentuan potensi terjadinya *hydrogen crack* dilakukan dengan mengukur kekerasan pada HAZ dengan siklus termal las yang selanjutnya menentukan nilai besaran waktu yang diperlukan untuk penurunan temperatur dari suhu 800oC menjadi 500oC dan dikenal dengan nama *cooling time* ($\Delta t_{8/5}$). Waktu pendinginan $\Delta t_{8/5}$ ini akan mempengaruhi kekerasan pada HAZ. Tingkat kekerasan pada HAZ ini secara umum digunakan sebagai indikator dalam menentukan potensi akan terjadinya *hydrogen crack*. Nilai kekerasan di bawah 350 VHN dinilai memiliki potensi yang rendah untuk terjadi *crack*. Bailey (1970) menyatakan bahwa pada pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dengan elektroda rendah hidrogen tidak menimbulkan *crack* pada nilai kekerasan HAZ di bawah 350 VHN sebagai batas atas konservatif pada pengelasan dengan hidrogen rendah. Cola dan Treadgill (1988) menggunakan pipa baja dengan CE 0,3 – 0,5 dan kemudian menyatakan bahwa *crack* akan terjadi apabila $\Delta t_{8/5}$ kurang dari 5 detik dan pada kekerasan >400 VHN.

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi literatur pada proses pengelasan untuk menentukan parameter-parameter pengelasan pada pipa apabila akan diperbaiki dengan metode *weld-deposition* untuk mencegah terjadinya *burn-through* dan *hydrogen crack* pada ketebalan dinding yang tersedia. Data akuisisi dilakukan dengan metode eksperimental dalam menentukan parameter-parameter pengelasan untuk dapat beroperasi dalam kondisi aman. Hal ini dapat menjadi aspek pertimbangan dalam industri yang menggunakan sistem perpipaan seperti industri minyak dan gas bumi untuk memilih metode yang tepat dalam pelaksanaan perbaikan apabila terjadi kerusakan atau cacat pada sistem perpipaan yang dimiliki tanpa menghentikan aliran fluida.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi panas pada dinding pipa yang dilas dengan metode *weld-deposition*. Gas Metal Arc Welding (GMAW)/ Metal Inert Gas (MIG) otomatis digunakan untuk melakukan pengelasan pada sampel dengan elektroda yang *consumable*. Dampak dari diketahuinya distribusi panas ini akan menentukan parameter-parameter pengelasan yang kemudian menjadi variabel yang dapat dikendalikan untuk mencegah terjadinya kegagalan pengelasan *burn-through* dan/atau *hydrogen crack*. Analisis diawali dengan melakukan akuisisi data dari eksperimen untuk mendapatkan data pada kondisi tertentu dari dimensi pipa, aliran fluida, dan parameter pengelasan. Selanjutnya, perhitungan pada kondisi spesifik dimensi pipa, aliran gas, dan parameter pengelasan didapatkan dari interpolasi dari database tersebut. Nilai $\Delta t_{8/5}$ diperlukan untuk mendapatkan nilai kekerasan HAZ yang dapat diterima untuk kondisi grade pipa yang spesifik menggunakan hubungan empiris antara nilai $\Delta t_{8/5}$ dan kekerasan menggunakan hubungan sesuai dengan hasil studi dari Yurioka dkk. (1987). Nilai kekerasan ini akan diverifikasi dengan pelaksanaan pengukuran secara aktual pada sampel dengan alat uji kekerasan Vickers.

Untuk mencapai hasil tersebut, mula – mula perlu dilakukan pengujian eksperimental dengan melakukan pengelasan deposisi pada pipa dengan diameter dan ketebalan tertentu. Dari hasil pengujian ini, akan didapatkan

nilai yang diinspeksi, yaitu temperatur pada dinding pipa dan waktu yang diperlukan untuk terjadi penurunan suhu dari 800°C ke 500°C ($\Delta t/5$). Pengujian akan menggunakan beberapa nilai heat input yang merupakan manifestasi dari kuat arus I [A], voltase V [V], dan kecepatan pengelasan v [mm/s] serta kecepatan aliran fluida sebagai variabel kemampuan disipasi panas, sedangkan parameter lain diasumsikan tetap.

2.1. Prosedur Pengelasan

Metode Gas Metal Arc Welding (GMAW)/ Metal Inert Gas (MIG) otomatis digunakan untuk melakukan pengelasan pada sampel dengan elektroda yang consumable. Penggunaan pengelasan secara otomatis akan meminimalisasi terjadinya kesalahan pada parameter-parameter pengelasan yang digunakan untuk mendapatkan nilai heat input yang mungkin dapat terjadi pada pengelasan secara manual. Adapun parameter pengujian yang dilakukan dapat dilihat sesuai dengan Tabel 1.

Spesimen menggunakan material pipa API 5L X52 berdiameter 4 inci yang memiliki spesifikasi material sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2. Spesimen uji diuji dengan melakukan pengelasan dengan metode weld-deposition langsung pada kondisi in-service. Fluida alir yang digunakan merupakan air yang bertekanan untuk mensimulasikan kondisi aktual fluida alir yang bertekanan. Skematik pemasangan spesimen uji dan kontrol atas parameter-parameter aliran fluida dapat dilihat pada Gambar 1.

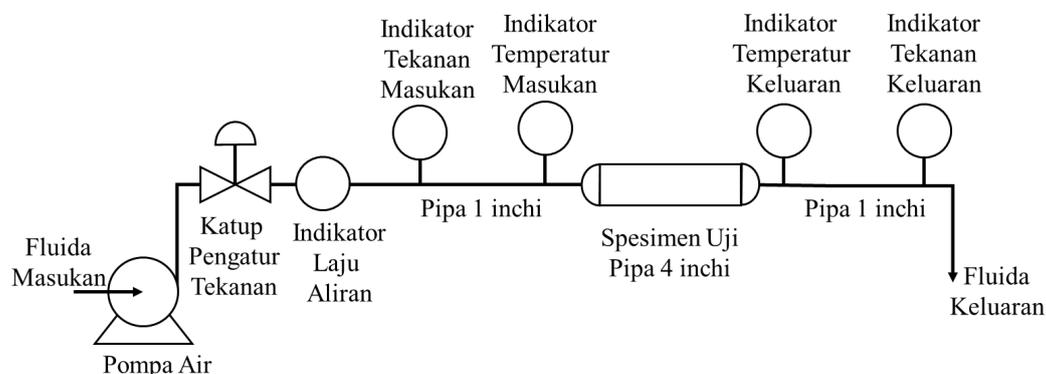
Tabel 1. Parameter Pengujian

Parameter	Nilai
Metode Pengelasan	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (GMAW) Menggunakan mesin las Tenjima model MIG 200S
Tegangan listrik	24 – 30 volt (dihasilkan secara otomatis)
Kuat arus listrik	160 – 200 ampere (dihasilkan secara otomatis)
Material Induk	API 5L X52 Nominal Diameter 4 inci
Elektroda	E70S-6 Diameter 0,8 mm
Kecepatan Pengelasan (mm/s)	10; 8; 6; 4; 3; 2.
Kisaran <i>Heat input</i> (kJ/mm)	0,288 – 0,360; 0,360 – 0,450; 0,480 – 0,600; 0,720 – 0,900; 0,960 – 1,200; 1,440 – 1,800.
Gas pelindung	Gas CO ₂
Debit Alir Fluida/Kecepatan aliran *	15,4 liter per menit / 0,0317 m/s
Tekanan Fluida *	1 barg (1 x 10 ⁵ Pa)

* Kecepatan aliran fluida dan tekanan fluida didapatkan dari akuisisi pada pelaksanaan pengujian di lapangan

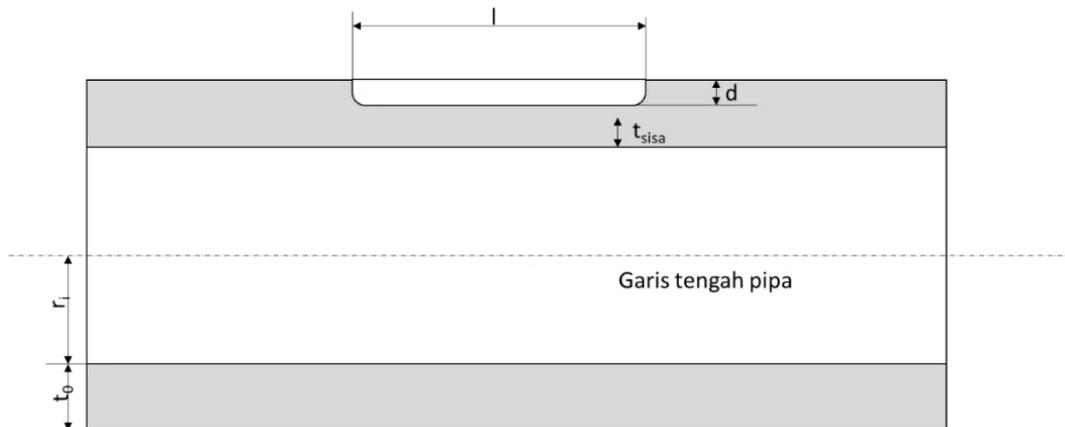
Tabel 2. Komposisi Spesimen Uji (API, 2007)

Komposisi (%)	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	Cr	B	V	Nb	N
API 5L X52	0,14	0,14	0,975	0,006	0,001	0,004	0,022	0,0003	0,005	0,038	0,014



Gambar 1. Diagram skematik kontrol dan spesimen uji

Sampel material induk akan dibuat *bevel* dengan bentuk semi-silindris horisontal dengan arah longitudinal (sejajar panjang pipa) untuk membuat simulasi bahwa telah terjadi penurunan ketebalan dari ketebalan asli material sesuai Gambar 2 dengan dimensi yang ditunjukkan pada Tabel 3 (API, 2007).



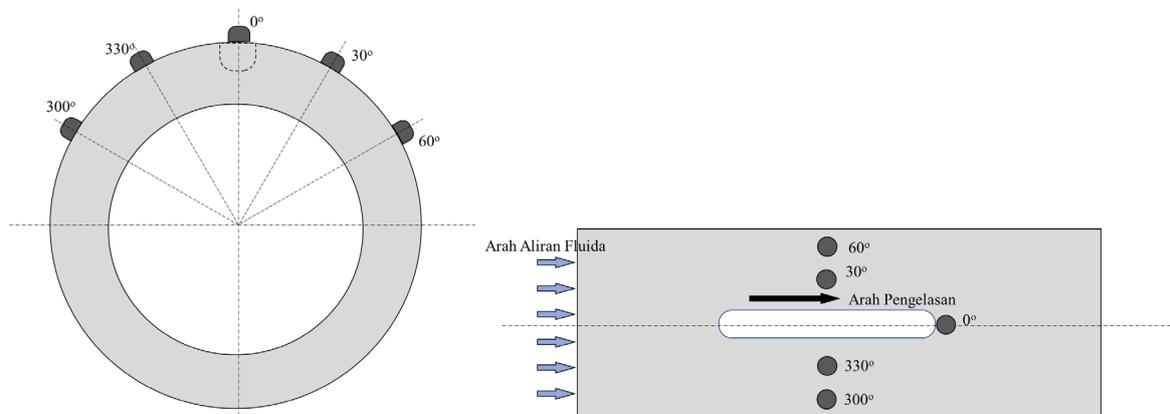
Gambar 2. Bentuk spesimen material induk

Tabel 3. Dimensi Spesimen Uji

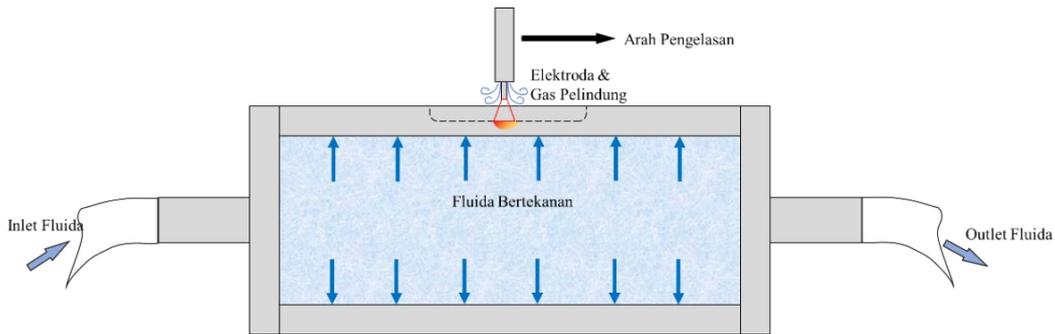
Parameter	Nilai
l	± 70 mm
d	2,02 mm
t_{sisa}	4 mm
t_0	6,02 mm
r_i	51,13 mm

2.2. Akuisisi Data

Dari pengujian yang dilaksanakan, dilakukan akuisisi atas data $\Delta t_{8/5}$ dan temperatur di dinding pipa dengan pemasangan *thermocouple* yang ditempelkan pada beberapa titik dengan cara ditanam di dalam material dengan *blind hole*. Temperatur pada zona pengelasan didapatkan menggunakan *thermocouple* pada ujung akhir *bevel* lasan yang dipasang untuk memantau perubahan suhu di area pengelasan pada jarak 2 mm dari ujung *bevel*. Titik – titik yang diukur untuk mendapatkan nilai temperatur dinding pipa dan skematik proses pengelasan untuk mengukur temperatur pada *weld-zone* dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Temperatur dinding pipa dan temperatur lasan yang diukur akan dijadikan acuan sebagai indikator sampai terjadi *burn-through*. Pengujian dilakukan terhadap beberapa sampel yang kemudian dikomparasi untuk menentukan nilai batas aman terjadinya *burn-through*.



Gambar 3. Lokasi pengukuran temperatur dinding pipa dengan *thermocouple*



Gambar 4. Skematik proses pengelasan spesimen uji

Data temperatur yang didapatkan dari *termocouple* ini kemudian dianalisis dan dihitung untuk mendapatkan nilai $\Delta t_{8/5}$ dari berbagai nilai *heat input* sebagai masukan yang merupakan manifestasi dari variasi nilai kuat arus, voltase, dan kecepatan pengelasan, sedangkan jenis elektroda yang digunakan tetap. Selain mengacu kepada nilai $\Delta t_{8/5}$ dari berbagai nilai *heat input*, nilai kekerasan mikro juga dilakukan secara langsung dengan metode pengukuran nilai kekerasan menggunakan metode Vickers untuk mendapatkan nilai VHN.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

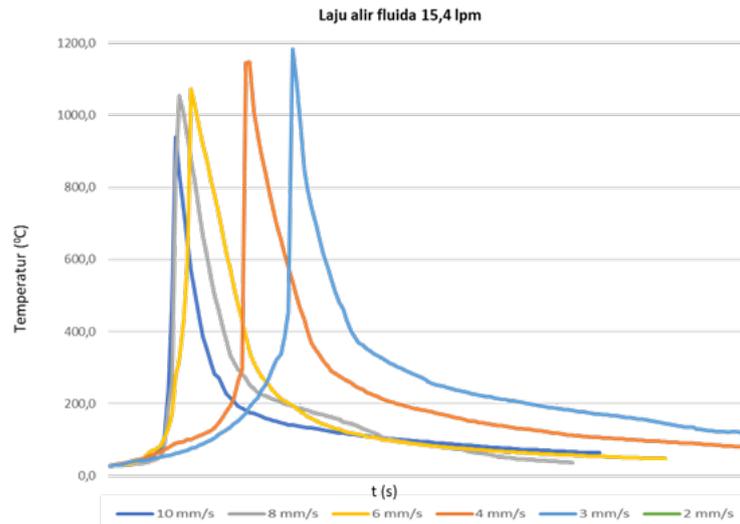
Nilai *heat input* per satuan panjang lasan merupakan fungsi dari kuat arus I , voltase V , efisiensi panas elektroda pengelasan η_e , dan kecepatan pengelasan v . Nilai kuat arus dan voltase yang didapatkan ini kemudian dijadikan basis perhitungan nilai besaran *heat input* per satuan waktu dengan nilai efisiensi panas elektroda sebesar 0,75 pada kondisi *open arc, metal electrode* (Rykalin, 1957). Nilai pengukuran *heat input* dapat dilihat dalam Tabel 4 kolom (4) dan (5).

3.1. Siklus Termal

Pengukuran temperatur dilakukan pada kampuh lasan. Alat ukur temperatur (*termocouple*) yang digunakan diletakkan pada titik akhir lasan, sehingga profil temperatur pada kampuh lasan yang dihasilkan menjadi lebih runcing akibat dari ekspos dan akumulasi panas yang semakin meningkat ketika elektroda lasan semakin mendekati alat ukur sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Sesaat sebelum mengenai alat ukur, pengelasan dihentikan dan alat ukur memantau penurunan temperatur pada kampuh lasan. Laju penurunan temperatur ini kemudian diamati dan diukur spesifik pada waktu yang diperlukan untuk terjadinya penurunan temperatur dari 800°C ke 500°C atau disebut $\Delta t_{8/5}$. Nilai $\Delta t_{8/5}$ ini kemudian akan menentukan nilai kekerasan pada pengelasan yang berpotensi memunculkan *hydrogen crack* sesaat setelah pengelasan selesai atau pada kemudian hari. Nilai $\Delta t_{8/5}$ dituangkan dalam Tabel 4 pada kolom (6).

3.2. Kekerasan Material

Dari perhitungan $\Delta t_{8/5}$ sebagaimana tertulis pada Tabel 4 pada kolom (6), maka akan dihitung nilai kekerasan berdasarkan korelasi yang dikembangkan oleh Yurioka, dkk (1987) sesuai dengan persamaan (1) sampai dengan (12). Komposisi material yang digunakan sebagai basis perhitungan sesuai dengan yang tertulis pada Tabel 2. Hasil perhitungan dikompilasi dan dituliskan pada Tabel 4 pada kolom (7).



Gambar 5. Profil temperatur pada kampuh lasan

$$H_v = \frac{H_M + H_B}{2} - \frac{H_M - H_B}{2,2} \times \arctan(x) \tag{1}$$

$$x = 4 \times \frac{\log(\Delta t_{8/5} / t_M)}{\log(t_B / t_M)} - 2 \tag{2}$$

$$H_M = 884 \times C(1 - 0,3 \cdot C^2) + 294 \tag{3}$$

$$t_M = \exp(10,6 \cdot CE_I - 4,8) \tag{4}$$

$$CE_I = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr(1-0,16\sqrt{Cr})}{8} + f(B) \tag{5}$$

$f(B)$ merupakan peningkatan tingkat kekerasan karena kandungan Boron pada kondisi $C \leq 0,8\%$ dan $N \leq 0,01\%$.

$$f(B) \begin{cases} B \leq 0,0001 & f(B) = 0 \\ 0,0001 < B < Bx & f(B) = 0,09 \cdot f(C) \cdot \frac{B-0,0001}{Bx-0,0001} \\ Bx \leq B & f(B) = 0,09 \cdot f(C) \end{cases} \tag{6}$$

dengan,

$$Bx = 0,0004 + 0,0006 \cdot \frac{N-0,0020}{0,0080} \tag{7}$$

$$f(C) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{C}{0,80}\right) \tag{8}$$

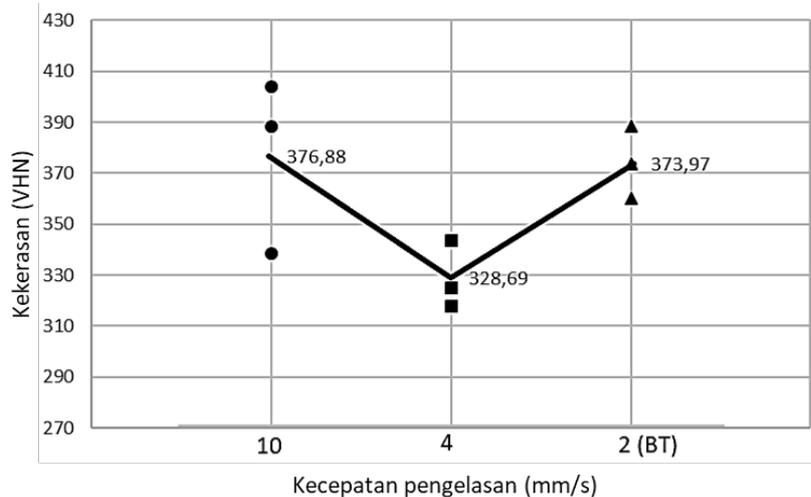
$$H_B = 145 + 130 \cdot \tanh(2,65 \cdot CE_{II} - 0,69) \tag{9}$$

$$CE_{II} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2,5} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{3} \tag{10}$$

$$t_B = \exp(6,2 \cdot CE_{III} - 0,74) \tag{11}$$

$$CE_{III} = C + \frac{Mn}{3,6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} \tag{12}$$

Selain mendasarkan nilai kekerasan material pada perhitungan melalui metode Yurioka, dkk (1987), nilai kekerasan juga divalidasi dengan pengukuran secara langsung menggunakan alat uji kekerasan Vickers. Namun demikian, pelaksanaan uji nilai kekerasan ini hanya dilakukan pada 3 sampel yang dinilai cukup mewakili keseluruhan spesimen pada variabel pengujian yang dilakukan. Hasil Pengukuran secara langsung ini dapat dilihat pada Gambar 6 dan nilai interpolasi yang diperlukan untuk menentukan batas aman 350 VHN dituangkan dalam Tabel 4 pada kolom (8).

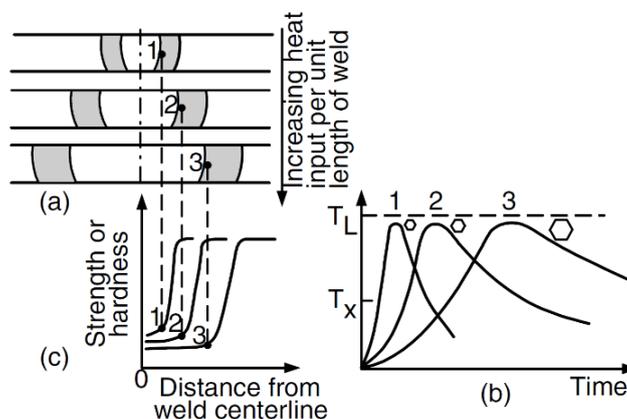


Gambar 6. Hasil Pengukuran Kekerasan Vickers pada HAZ

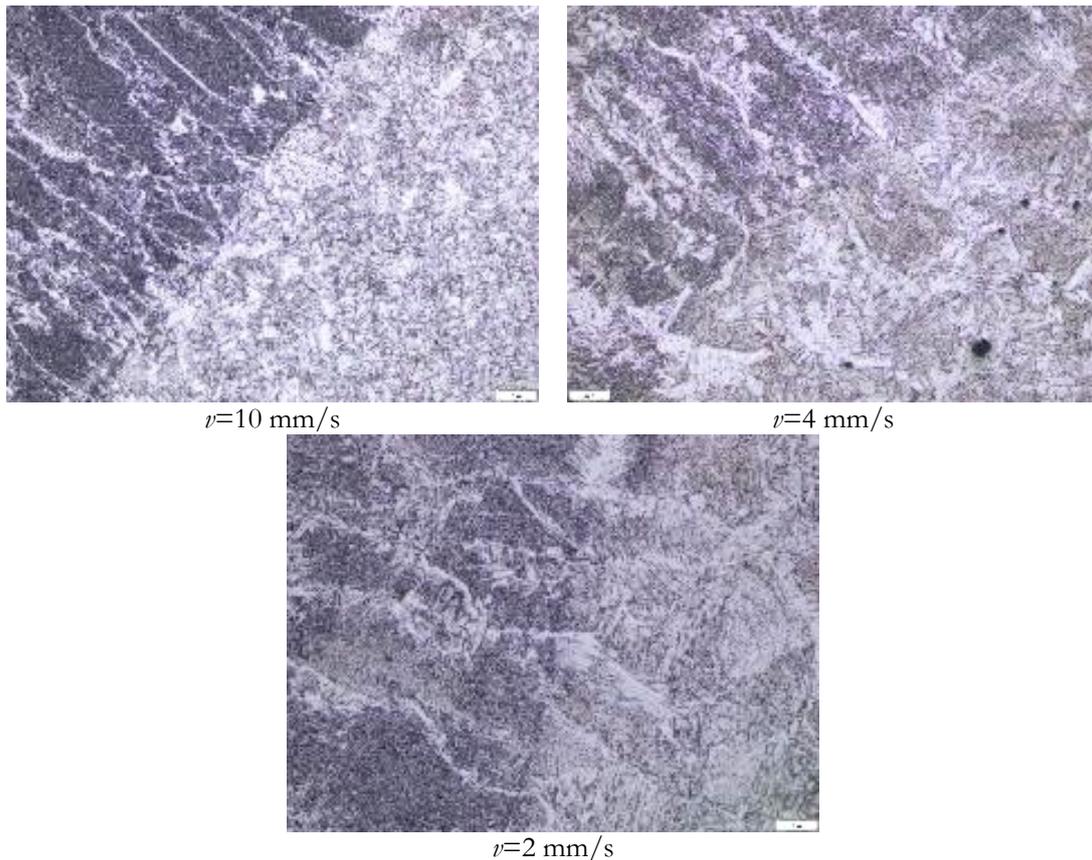
Peningkatan nilai kekerasan pada sampel dengan kecepatan pengelasan 2 mm/s yang mengalami *burn-through* disebabkan karena sesaat setelah *burn-through* terjadi, proses pengelasan langsung dihentikan, sehingga *heat input* berhenti seketika. Sementara itu, penghentian aliran fluida tidak serta merta langsung berhenti mengingat bahwa fluida dalam pipa adalah fluida bertekanan yang mengalami *depressurizing*. Proses penurunan tekanan ini membuat pendinginan masih berlangsung ketika *heat input* telah berhenti. Hal ini menyebabkan spesimen mengalami pendinginan secara tiba-tiba sebagaimana efek pada proses *quenching* yang mengakibatkan nilai kekerasan meningkat jika dibandingkan dengan nilai kekerasan pada parameter kecepatan sebelumnya (4 mm/s).

3.3. Struktur Mikro

Semakin rendah kecepatan pengelasan, maka semakin tinggi *heat input* yang diberikan. Dengan meningkatnya *heat input*, maka laju pendinginan pada material akan menurun. Semakin tinggi *heat input* yang diberikan, maka akan semakin tinggi pula temperatur puncak pada material di HAZ dan semakin banyak waktu bagi material untuk berada pada temperatur tinggi. Dengan demikian, ukuran butir pada HAZ akan semakin besar pula. Efek dari besaran *heat input* terhadap kekuatan HAZ dapat dilihat pada Gambar 7. Hal ini dapat menjelaskan ukuran butir pada HAZ yang ditunjukkan pada Gambar 8 yang semakin besar dengan semakin meningkatnya besaran *heat input* yang merupakan manifestasi dari menurunnya kecepatan pengelasan.



Gambar 7. Efek *heat input* pada (a) lebar HAZ (b) siklus termal dan ukuran butir HAZ (c) profil kekerasan (Kou, 2003)

Gambar 8. Komparasi ukuran grain pada *fusion zone* dan HAZ (perbesaran 200x)

Tabel 4. Hasil Pengukuran dan Perhitungan

No.	Debit Alir Fluida (lpm)	Kecepatan Pengelasan (mm/s)	Heat Input per satuan panjang		$\Delta t_{8/5}$ (detik)	Kekerasan HAZ (VHN)	
			(J/mm)	(kJ/mm)		Yurioka, dkk (1987)	Pengukuran Spesimen Uji
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1		10	303,1379	0,3031	2,1881	1134,1405	376,88
2		8	415,2639	0,4153	2,7877	629,9225	360,30**
3	15,4	6	538,8319	0,5388	3,4207	416,6273	342,03**
4		4	783,8015	0,7838	4,1301	348,4588	328,69
5		3	1117,4986	1,1175	4,5280	327,6413	
6		2	1690,6907	1,6907	N/A	N/A	373,97

** nilai yang didapatkan dari interpolasi dengan basis besaran *heat input*.

3.4. Parameter Rekomendasi

Parameter pengelasan yang direkomendasikan adalah rentang nilai tertentu yang dinilai aman untuk dilakukan pengelasan. Rentang parameter yang aman ini memiliki dua batasan, yaitu batas atas yang merupakan besaran nilai heat input yang diaplikasikan saat proses pengelasan berlangsung sampai dengan terjadinya burn-through dikalikan dengan faktor keamanan (safety factor) 80% dan batas bawah yang merupakan besaran heat input yang memadai untuk melakukan pendinginan dalam jangka waktu tertentu agar meminimalisasi timbulnya hydrogen crack pada kekerasan lebih dari 350 VHN (Fischer dkk., 1981).

Pada Tabel 4 kolom (8), interpolasi dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan pada HAZ pada kecepatan pengelasan 8 mm/s dan 6 mm/s. Interpolasi dilakukan secara linear dengan basis heat input untuk mengetahui letak batas bawah nilai yang dapat diterima, yaitu nilai kekerasan kurang dari 350 VHN. Nilai batas bawah ini didapatkan ketika pengelasan dilakukan pada kecepatan 6 mm/s dengan nilai heat input 0,5388 kJ/mm yang menghasilkan nilai kekerasan 342,03 VHN yang dapat diterima. Sedangkan nilai kekerasan pada kecepatan pengelasan 2 mm/s yang mengalami anomali sebagaimana dijelaskan pada angka 3.2, dinilai tidak relevan dijadikan

acuan dalam menentukan batas penerimaan 350 VHN karena pada nilai ini telah terjadi kegagalan lain yang digunakan sebagai batas atas penerimaan, yaitu terjadi burn-through.

Dari Tabel 5, dapat dituliskan batas bawah, batas atas, dan batas aman rekomendasi heat input berdasarkan nilai tingkat kekerasan material yang dibentuk maksimal sebesar 350 VHN yang terbentuk pada $\Delta t_{8/5}$ selama 4,1055 detik dengan mengambil nilai sebesar 0,7513 kJ/mm yang didapatkan pada kecepatan pengelasan sekitar 4 mm/s. Batas atas yang digunakan adalah nilai saat percobaan mengalami burn-through. Nilai batas atas yang ini dikoreksi dengan safety factor (SF) sebesar 80% dari nilai batas atas atau sebesar 1,3526 kJ/mm.

Nilai rekomendasi *heat input* di atas merupakan nilai yang didapatkan berdasarkan perhitungan menggunakan formula yang dikembangkan oleh Yurioka, dkk (1987). Nilai ini dikomparasi berdasarkan hasil pengukuran spesimen uji dan interpolasi berbasis besaran *heat input* sebagaimana tertuang dalam Tabel 4 kolom (8). Sehingga, pada material pipa API 5L X52 yang dialiri fluida dengan dinding pipa yang memiliki sisa ketebalan 4 mm, direkomendasikan untuk melakukan pengelasan dengan metode *weld-deposition* pada pipa *on-service* dengan mengaplikasikan *heat input* pada rentang 0,5388 kJ/mm sampai dengan 1,3526 kJ/mm untuk debit alir fluida air 15,4 lpm untuk menghindari potensi timbulnya *hydrogen crack* dan *burn-through* sebagaimana tertulis dalam Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Batas yang Direkomendasikan dari Berbagai Besaran Debit Alir Fluida

Debit Alir Fluida (lpm)	Heat Input (kJ/mm)				Keterangan
	Batas Bawah	Batas Bawah (Koreksi)	Rekomendasi Batas Aman (SF 80%)	Batas Atas	
15,4	0,7513	0,5388	1,3526	1,6907	Terjadi burn-through pada nilai batas atas

4. KESIMPULAN

Berdasarkan studi eksperimental pengendalian *heat input* guna pencegahan *burn-through* pada perbaikan pipa dengan metode *weld-deposition* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. *Heat input* yang diaplikasikan pada proses pengelasan dengan metode GMAW dihasilkan secara otomatis oleh mesin las Tenjima model 200S yang secara umum semakin meningkatnya *heat input*, maka semakin tinggi pula temperatur puncak pada grafik profil temperatur pada kampuh lasan.
2. *Burn-through* dapat terjadi apabila *heat input* yang diberikan terlalu tinggi. Terjadinya *Burn-through* dapat diakibatkan oleh penurunan kekuatan dinding pada pipa, yang menyebabkan dinding pipa tidak mampu menahan tekanan fluida yang mengalir.
3. Pada material pipa API 5L X52 yang dialiri fluida dengan dinding pipa yang memiliki sisa ketebalan 4 mm, direkomendasikan untuk melakukan pengelasan dengan metode *weld-deposition* pada pipa *on-service* dengan mengaplikasikan *heat input* pada rentang 0,5388 kJ/mm sampai dengan 1,3526 kJ/mm untuk debit alir fluida air 15,4 liter/menit untuk menghindari potensi timbulnya *hydrogen crack* dan *burn-through*.

Selanjutnya, metode pengelasan dengan *weld-deposition* dapat dilakukan dengan arah pengelasan lain, misalkan dengan arah sirkumferensial (arah melingkar pipa) atau secara *raster* untuk membentuk luasan area untuk memperluas validitas kajian.

5. DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Industry, 2007, *ANSI/API Specification 5L: Specification for Line Pipe* 44th Edition, Washington.
- Bailey, N., 1970, *Welding Procedures for Low Alloy Steels*, The Welding Institute Cambridge, England.
- Boring M.A., Zhang W., Bruce W.A., 2008, *Improve Burnthrough Prediction Model for In-Service Welding*. Proceedings of ICP 2008, 7th International Pipeline Conference, Calgary.
- Bruce, W. A, Amend, W.E., 2009, *Guidelines for Pipeline Repair by Direct Deposition of Weld Metal*, WTIA/APIA Welded Pipeline Symposium, Welding Institute of Australia, Sydney, Australia.
- Cola, M. J., Threadgill, P. L., 1988, *Final Report on Criteria for Hot Tap Welding*, American Gas Association, Edison Welding Institute Project J7038.
- Fischer, R. D., Kiefner, J. F., Whitacre, G. R., 1981, *User Manual for Model 1 & Model 2 Computer Programs for the Predicting Critical Cooling Rates and Temperatures During Repair and Hot Tap Welding on Pressurised Pipelines*, Battelle Memorial Institute Report, Columbus.
- Kou, Sindo, 2003, *Welding Metallurgy 2nd Edition*, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken
- Rykalın, N.N., 1957, *Berechnung der Wärmevergänge beim Schweißen*, VEB Verlag Technik, Berlin, (Original: 1951, *Raschetny Teplotnykh Protsesov Pri Svarke*, Mashgiz, Moscow)

- Wade, J.B., 1978, *Hot Tapping of Pipelines*, Australian Welding Research Association Research Report, Snowy Mountains Corporation, Melbourne.
- Yurioka, N., Okumura, M., Kasuya, T., Cotton, H.J.U., 1987, *Prediction of HAZ Hardness of Transformable Steels*, Metals Construction, Vol 19, pp. 217R - 223R.