

## Pengaruh Sudut Kampuh V Tunggal terhadap Sifat Mekanis Sambungan Las SMAW pada Pipa Baja Karbon API 5L X46

*The Effect of Single V Bevel Angle of SMAW Welded Joint on Mechanical Properties of API 5L X46 Carbon Steel Pipe*

Aris Widyo Nugroho\*, Sigit Hartanto, Muhammad Arinalhaq Eko Nugroho, Rela Adi Himarosa

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia.

\*Corresponding author email: [ariswidyo.nugroho@umy.ac.id](mailto:ariswidyo.nugroho@umy.ac.id)



### Kata Kunci:

Sudut kampuh; SMAW; tegangan lentur; API

### Abstrak

Penelitian untuk mengetahui pengaruh sudut kampuh V pengelasan SMAW terhadap sifat mekanis sambungan las pada material pipa API 5L X46 telah dilakukan. Proses pengelasan dilakukan dengan sambungan *butt-joint* kampuh V tunggal menggunakan material pipa API 1104 5L grade X46 dengan tebal pipa 12,7 mm. Sudut kampuh yang digunakan adalah 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, dan 75°. Sambungan lasan kemudian dilakukan beberapa pengujian meliputi inspeksi visual, uji NDT RI, uji metalografi menggunakan standar ASTM E340-15, uji kekerasan menggunakan standar ASTM E92-82, dan uji bending menggunakan standar API 1104. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar sudut kampuh las maka *heat input* dan waktu proses semakin besar. Secara umum kekerasan HAZ dan WM meningkat seiring dengan peningkatan sudut kampuh. Nilai kekerasan sebesar 135,73 VHN pada HAZ, dan 146,19 VHN pada WM diperoleh pada sudut kampuh 75°. Tegangan bending maksimum pada *root bend* dan *side bend test* meningkat seiring dengan kenaikan sudut kampuh dan berturut-turut tercapai pada variasi sudut kampuh 60° sebesar 5.685 MPa dan 4.222 MPa, kemudian tegangan lentur menurun bila sudut kampuh membesar. Sudut kampuh 60° merupakan sudut kampuh optimal dari segi sifat mekanis sambungan dan produktifitas proses pengelasan.

### Keywords:

Bevel angle; SMAW; bending strength; API.

### Abstract

*The effect of the SMAW welding V groove angle on the mechanical properties of the welded joints in API 5L X46 pipe material was investigated. A single V groove butt-joint made of API 1104 5L grade X46 pipe with a thickness of 12.7 mm was used in the welding process. The angles of the V grooves used are 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, and 75°. The welded joints were then put through a series of tests, including visual inspection, RI NDT testing, metallographic testing per the ASTM E340-15 standard, hardness testing in accordance with the ASTM E92-82 standard, and bending testing using the API 1104 standard. The results showed that as the weld groove angle increased, so did the heat input and processing time. Whilst, generally, the hardness of HAZ and WM increases as the groove angle increases reaching up 135.73 VHN and 146.19 VHN respectively at a groove angle of 75°, the maximum bending stress at the root bend and side bend tests increased with groove angle and was achieved at variations of 60° groove angle of 5,685 MPa and 4,222 MPa, respectively, afterward the bending stress decreased as the groove angle increased. The groove angle of 60° is the optimal angle in terms of joint mechanical properties and welding process productivity.*

## PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan proses fabrikasi yang digunakan untuk menyambung bahan, biasanya logam atau termoplastik dengan penerapan panas, dan terkadang disertai tekanan (Goetsch *et al.*, 2010; Oyetunji & Nwigboji, 2014). Proses penyambungan melalui proses pengelasan ini banyak digunakan dalam proses penyambungan komponen di berbagai industri (Jain, 2013). Teknik ini dikenal sebagai cara paling ekonomis untuk menyambung komponen dari segi penggunaan material dan biaya fabrikasi, meskipun diketahui proses

ini menghasilkan gradien suhu tinggi di sekitar lasan (Gejendhiran, Satheesh Kumar, & Sivakumar, 2014; A Oyetunji, 2015). Shielded Metal Arc Welding (SMAW) merupakan salah satu jenis teknik pengelasan yang paling luas digunakan, dimana pada proses pengelasannya panas yang dibangkitkan berasal dari busur listrik antara elektroda dan benda kerja. Pada industri minyak dan gas, pipa logam banyak digunakan untuk menyalurkan produk, dan pipa-pipa tersebut sebagian disambung menggunakan SMAW.

Studi terdahulu mengemukakan, ada beberapa parameter proses yang mempengaruhi kekuatan sambungan las meliputi kecepatan pengelasan, arus dan tegangan pengelasan, ketebalan pelat, dan geometri sambungan las (Gejendhiran, Satheesh Kumar, & Sivakumar, 2014; Murugan & Gunaraj, 2005; Oyetunji & Nwigboji, 2014; Rao *et al.*, 2005). Geometri sambungan mencakup diantaranya sudut kampuh, dan bentuk kampuh sambungan. Kampuh *butt V* tunggal merupakan salah satu jenis bentuk kampuh las yang banyak digunakan untuk pengelasan pipa di industri migas dimana jenis kampuh ini juga dipengaruhi oleh besar sudut kemiringan kampuhnya. Mahendramani & Swamy (2012) melaporkan bahwa sudut pada sudut V tunggal memiliki pengaruh yang besar terhadap penyusutan suatu logam sehingga mempengaruhi kekuatan logam tersebut. Menurut Hamin (2014), sudut kemiringan pada kampuh V tunggal mempengaruhi integritas sambungan las dalam hal tegangan sisa, distorsi dan profil suhu las. Sejalan dengan hasil penelitian tersebut, Pathak *et. al* (2021) menyatakan bahwa kekerasan dari sambungan lasan meningkat seiring dengan peningkatan sudut kampuh V ( $40^{\circ}$ - $75^{\circ}$ ). Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen, Pedapati *et. al*, (2017) mengemukakan bahwa kekuatan tarik dari baja tahan karat meningkat pada sudut kampuh sampai dengan sudut tertentu kemudian menurun seiring dengan kenaikan sudut tersebut. Pada proses pengelasan terjadi siklus thermal yang dipengaruhi oleh *heat input* (Kayode, Akinola, & Akinwekomi, 2020). Mishra & Rajesha (2014) mengidentifikasi bahwa kekuatan baja tahan karat austenitik menurun seiring dengan meningkatnya *heat input*. Berkaitan dengan sudut kampuh V, semakin besar kuat arus listrik dan sudut kampuh V pengelasan maka masukan panas juga meningkat (Huda & Setiawan, 2016). Peningkatan *heat input* dapat menyebabkan ukuran butir yang pada daerah sambungan las bertambah yang berakibat pada kenaikan keuletan dari sambungan las, dan sebaliknya (Iswanto, Mudjijana, & Himarosa, 2017). Lee dkk (2016) dengan menggunakan ketebalan plat di atas 12 mm mengkonfirmasi tentang karakteristik sifat mekanis sambungan las pada sudut kampuh  $< 60^{\circ}$  ( $25^{\circ}$  dan  $35^{\circ}$ ) untuk meningkatkan produktivitas proses penyambungan dimana sudut kampuh V las  $25 \pm 5^{\circ}$  telah diverifikasi sebagai sudut yang sesuai untuk desain dan fabrikasi pada industri perkapalan menggunakan las FCAW. Dari studi terdahulu tentang pengaruh sudut kampuh terhadap kualitas sambungan las, sebagian besar sambungan menggunakan plat dengan ketebalan di bawah 10 mm (3-8 mm) dan fokus pada sifat mekanis sambungan saja, sedangkan pertimbangan produktifitas (waktu proses) masih jarang dikemukakan.

Sudut kampuh V sebesar  $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$  umumnya digunakan dalam proses penyambungan pipa API 5L X46. Namun pada beberapa kondisi dimana terjadi *repairing* pada kampuh atau pertimbangan waktu pengerjaan, sudut kampuh tidak sesuai dengan nilai tersebut yang mungkin dapat berpengaruh pada sifat mekanis sambungan las. Berdasarkan hal tersebut dan kajian pustaka di atas, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh besar sudut kampuh V tunggal sambungan las *but joint* terhadap sifat mekanis dari sambungan las SMAW pada plat tebal (12.7 mm). Durasi proses pengelasan juga menjadi pertimbangan produktifitas proses pengelasan pada masing-masing sudut kampuh.

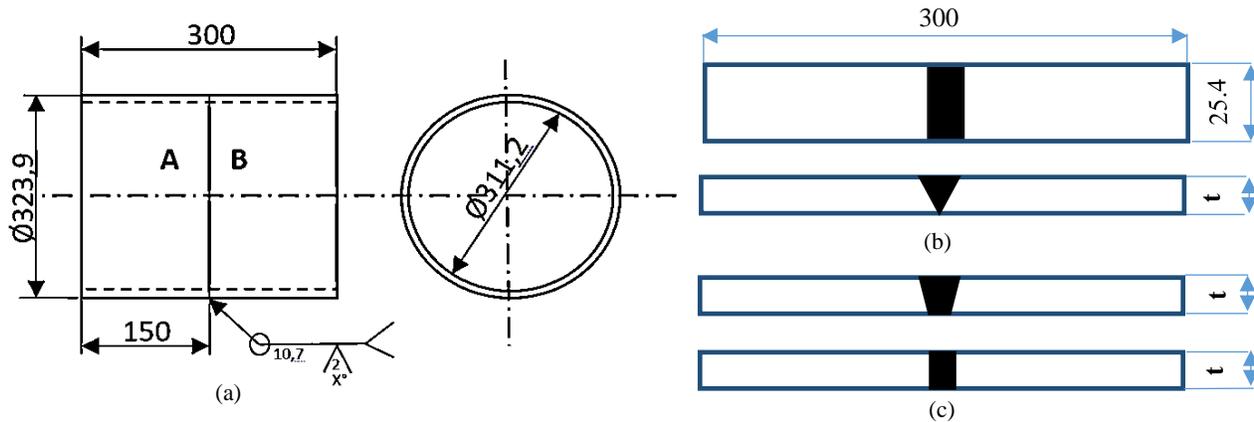
## METODE PENELITIAN

### *Alat dan Bahan*

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah pipa API 5L X46. Pipa yang digunakan memiliki dimensi ukuran panjang total 300 mm, diameter luar  $\varnothing 323.9$  mm, dan tebal 12,7 mm. Dimensi ukuran pipa yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1.a. Pematangan dilakukan dengan menggunakan mesin gerinda tangan dan mesin milling di Laboratorium Manufaktur Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta menjadi spesimen. Pipa yang telah tersambung kemudian spesimen *root bend* dan *side bend* (Gambar 1.b dan c). Komposisi kimia lembaran plat baja karbon rendah produk PT. Krakatau Steel ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komposisi unsur pipa API 5L X46

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Cu (%)	Al (%)	Fe (%)
0,112	< 0,117	0,443	<0,0008	< 0,0002	0,0085	0,0143	0,0065	0,0176	0,0381	99,35



**Gambar 1.** Dimensi pipa yang dilakukan penyambungan dengan las SMAW (a), Spesimen *Root Bend* (b), Spesimen *Side Bend* (c), dimana t : tebal pipa, 12.7 mm

*Proses Pengelasan*

Proses awal yang harus dilakukan adalah memotong material pipa menjadi 2 bagian yang masing panjangnya 150 mm. Selanjutnya dilakukan pembuatan kampuh sesuai variasi yang digunakan dan di *tack weld* dengan *root gap* sebesar 2 mm (Gambar 2). Selama proses pengelasan diperlukan *amperemeter* dan *voltmeter* digital Sanwa untuk merekam arus dan tegangan selama proses pengelasan. Proses pengelasan dilakukan per variasi sudut kampuh dan dilakukan sampai semua variasi selesai dilas. *Heat input (H)* dari proses pengelasan dihitung dengan menggunakan persamaan (1), dimana V adalah tegangan dalam volt, I adalah arus dalam ampere dan v adalah kecepatan pengelasan dalam mm/menit.

$$H = \frac{V \cdot I \cdot 60}{v} \left( \frac{Joule}{mm} \right) \tag{1}$$

**Tabel 2.** *Welding procedure* penyambungan pada berbagai sudut kampuh

Material	Weld Pass	Process	Electrode		Current Type and Polarity	Ampere (A)	Volts (V)	Bevel Type	Joint Design	Welding Position
			Class	Diameter						
Pipe API 5L X46	Root	SMAW	E6010	3,2	DCEP	71-101	19-28	Single V	Butt Joint	5G
Pipe API 5L X67	Hot	SMAW	E7010-P1	3,2 - 4	DCEP	77-115	20-29	Single V	Butt Joint	5G
Pipe API 5L X46	Fill	SMAW	E7010-P2	3,2 - 4	DCEP	91-135	20-30	Single V	Butt Joint	5G
Pipe API 5L X46	Cap	SMAW	E7010-P3	3,2 - 4	DCEP	88-129	20-29	Single V	Butt Joint	5G



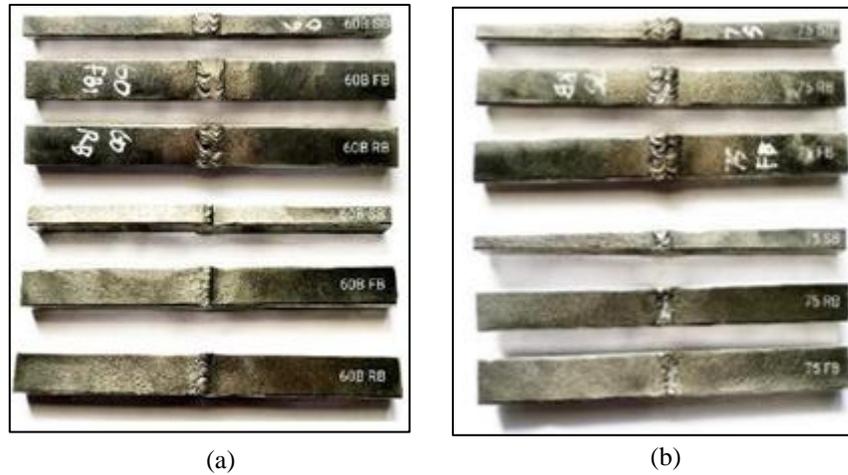
**Gambar 2.** Material sebelum di *tack weld* (a), setelah *tack weld* (b), setelah pengelasan (c)

### Proses Pengujian

Setelah proses pengelasan selesai dilakukan inspeksi secara visual antara lain seperti *arc strike*, *porosity*, *crack*, *undercut* dan lainnya sesuai dengan standar API 1104 ((API), 2021). Sernua pengelasan *accepted criteria* inspeksi visual dilakukan rnengacu pada standar API 1104. Ada beberapa pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik material hasil lasan. Pengujian tersebut antara lain *Non-Destructive Test Radiographic Interpretation* (NDT RI) di PT. Nindya Karya di Kutowinangun, Kebumen, Jawa Tengah menggunakan X-Ray Generator dengan *Radio isotop (gamma-ray) source* beserta film radiografi 13 mm x 88,9 mm, *Macro & Micro Examination* menggunakan Mikroskop optik Olympus SZ61 dan Mikroskop optik Olympus BX53M, *Vickers Hardness Test* menggunakan *Micro Vickers* Mitutoyo TIME HM-100, dan *Bend Test* menggunakan *Universal Testing Machine*. Untuk NDT RI dan *Bend Test* mengacu pada standar API 1104, sedangkan *Macro & Micro Examination* mengacu pada ASTM E340-15, dan *Vickers Hardness Test* mengacu pada ASTM E92-82. Semua pengujian mekanis dan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

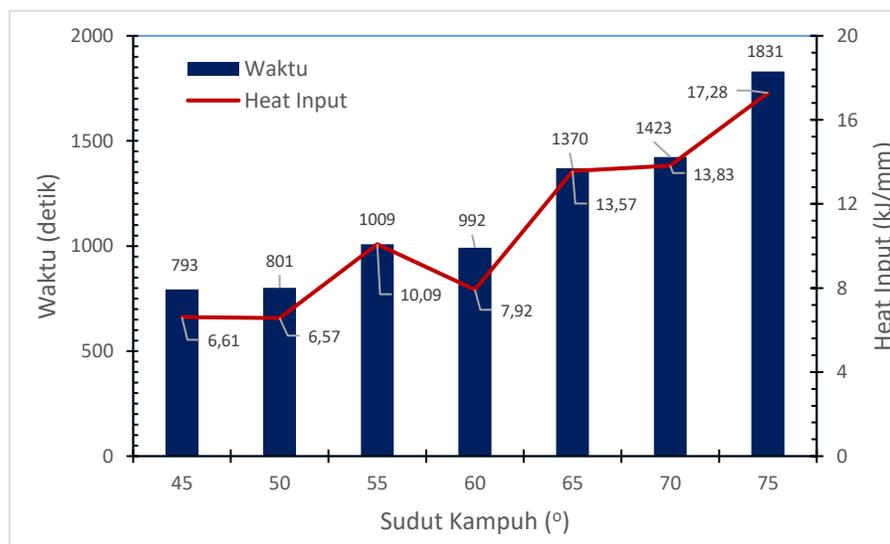
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesimen uji *root bend* yang diperoleh dari hasil pengelasan dapat dilihat di Gambar 3. Dari inspeksi visual baik dari sisi muka atau pandangan atas (*face*), dan pandangan bawah (*root*) sambungan terlihat menyatu dan terhubung dengan sempurna. Pemeriksaan visual penampang WM dan HAZ menunjukkan fusi lengkap dan bebas retakan, tidak teramati cacat las yang signifikan, dan dapat *judgment Acc* menurut API 1044. Secara visual dari pandangan atas dan samping dapat diamati pada sudut kampuh yang lebih besar, 75° (Gambar 3.b), lasan lebih lebar dibanding sudut kampuh 60° (Gambar 3.a). Volume isian lasan juga menjadi lebih besar mengakibatkan proses pengelasan membutuhkan waktu untuk tiap *welding pass* lebih banyak atau kecepatan *welding pass* lebih rendah.



**Gambar 3.** Hasil las variasi sudut kampuh 60° (a), dan 75° (b) masing-masing dengan urutan tampak samping kiri, tampak atas (*face*), tampak samping kanan dan tampak bawah (*root*)

Pada sudut kampuh 45°, 50° dan 55° proses pengelasan dilakukan dalam 5 *weld pass*, sedangkan untuk sudut 60°–75° dilakukan dalam 7 *weld pass*. Pada sudut kampuh 55° dengan 5 *weld pass* untuk memenuhi volume kampuhnya, dibutuhkan waktu lebih lama dibanding sudut kampuh 60°, sehingga kecepatan pengelasannya menurun. Pada pengelasan sambungan dengan sudut kampuh 60°, pengisian volume lasannya dilakukan dalam 7 *weld pass* sehingga digunakan kecepatan lebih tinggi dengan waktu total lebih rendah. Dengan kecepatan pengelasan yang lebih kecil sedangkan arus dan tegangan dijaga tetap maka nilai *heat input* (sudut kampuh 55°) menjadi lebih besar dibandingkan dengan sudut kampuh 60°. Pemilihan 5 *weld pass* untuk sudut kampuh 55° menghasilkan waktu pengelasan dan *heat input* tidak meningkat secara kontinyu seiring dengan kenaikan sudut kampuh. Nilai *heat input* yang dihitung secara teoritis dan besar waktu yang dibutuhkan dalam proses pengelasan untuk masing-masing sudut kampuh ditunjukkan oleh Gambar 4. Kenaikan waktu proses pengelasan dari sudut kampuh 45°–60° hanya 200 detik, sedangkan kenaikan waktu dari 60°–75° adalah sekitar 850 detik atau hampir dua kali lipat. Secara umum dapat dikatakan bahwa waktu pengelasan dengan sudut kampuh lebih kecil membutuhkan waktu yang lebih rendah, atau dapat dikatakan memiliki produktifitas yang lebih tinggi dibanding pengelasan dengan sudut kampuh besar. Hasil ini sejalan dengan penelitian dari Lee, dkk (2016).



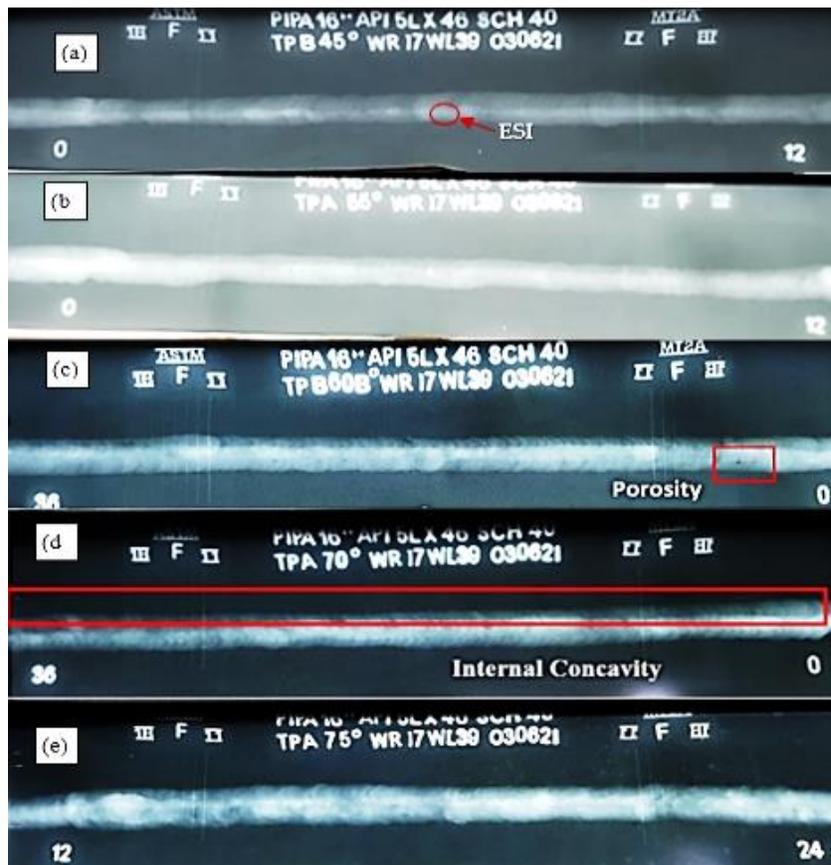
**Gambar 4.** Hubungan antara *heat input* dan waktu proses pengelasan pada berbagai sudut kampuh

*Hasil NDT RI*

*Non-Destructive Test* adalah salah satu teknik pengujian yang dilakukan dengan tidak merusak spesimen yang diuji. Salah satu pengujian tidak merusak adalah pengujian radiografi. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui diskontinuitas yang terjadi pada hasil las yang nantinya akan diputuskan apakah dinilai sebagai cacat las atau bukan. Hasil pengujian radiografi yang dilakukan pada hasil pengelasan SMAW material pipa API 5L grade X46 dengan variasi sudut kampuh dapat dilihat pada Gambar 5 dan Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil pengujian radiografi

Variasi Sudut	Densitas	Remark	Judgement
45°	7,7	ESI 3 mm	ACC
50°	7,7	ESI 3 mm	ACC
55°	7,7	-	ACC
60°	7,7	Porosity 1 mm	ACC
65°	7,7	-	ACC
70°	7,7	Internal Concavity	ACC
75°	7,7	-	ACC

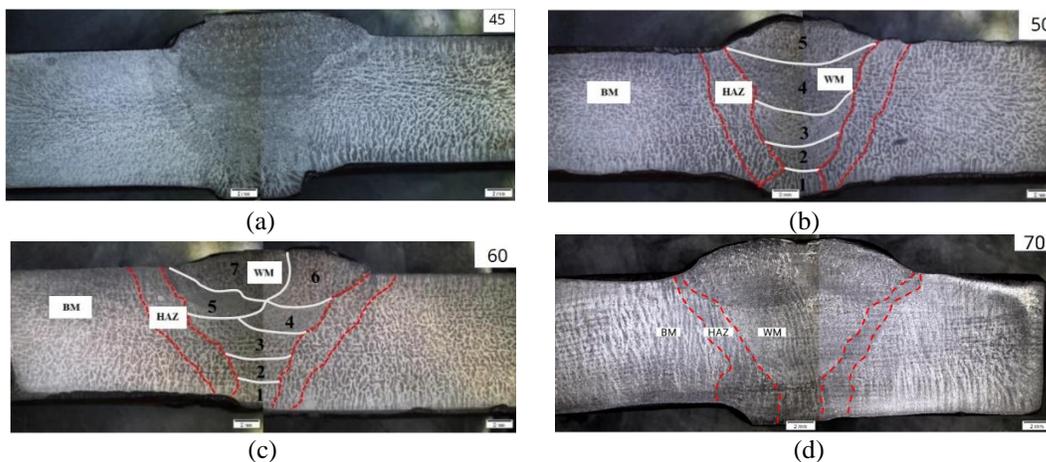


**Gambar 5.** Hasil pengujian radiografi pengelasan SMAW sambungan *butt joint* variasi sudut 45° (a), 55° (b), 60° (c), 70° (d), dan 75° (e).

Berdasarkan Tabel 3 hasil interpretasi dari pengujian radiografi yang dilakukan pada hasil pengelasan SMAW material pipa API 5L grade X46 dengan variasi sudut kampuh, dapat dilihat bahwa pada variasi sudut 45° dan 50° terdapat diskontinu *Elongated Slug Inclusion* (ESI) sepanjang 3 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 5.a. Sedangkan pada variasi sudut 55° tidak terdapat diskontinyu (Gambar 5.b) dan pada variasi sudut 60° terdapat diskontinu *porosity* sepanjang 1 mm (Gambar 5.c). Pada variasi sudut 65°, dan 75° tidak terdapat diskontinu sama sekali. Sedangkan pada variasi sudut 70° terdapat diskontinu yaitu *internal concavity* (IC) yang terjadi hampir sepanjang hasil lasan. Pada variasi sudut 65°, dan 75° mendapatkan *judgement accepted* atau dapat diterima. Pada variasi sudut 60° dan 70° meskipun terdapat cacat namun mendapatkan *judgement accepted* dikarenakan jika merujuk pada standar API 1104 ((API), 2021), yaitu berapapun ukuran IC yang terjadi pada lasan tetap akan diterima selama densitasnya tidak lebih tipis dari bagian material las yang paling tipis dan dimensi *total porosity* yang diijinkan adalah sebesar 3 mm. IC dapat terjadi karena beberapa hal, antara lain *root gap* yang terlalu lebar, *travel speed* pada saat melakukan *root pass* terlalu cepat, dan arus pengelasan yang terlalu besar, sedangkan *porosity* dapat terjadi karena terdapat minyak atau air yang menguap.

### Hasil Pengamatan Makro

Pengujian makro ini dilakukan untuk mengamati area pengelasan yang terdiri dari *base metal* (BM), *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal* (WM). Pengamatan menggunakan mikroskop optik *Olympus SZ61* dengan perbesaran 6,7x. Tipikal foto makro dari hasil pengelasan SMAW material pipa API 5L grade X46 dengan variasi sudut kampuh dapat dilihat pada Gambar 6. Daerah BM, HAZ dan WM teramati dengan jelas pada pengelasan dengan sudut kampuh 45° (Gambar 6.a) termasuk tiap-tiap *welding pass*-nya. Untuk lebih jelas dari *welding pass* yang telah dilakukan, ditunjukkan oleh Gambar 6.b dimana proses pengelasan dengan sudut kampuh 50° dilakukan dalam 5 pass, terdiri dari *root pass*, *hot pass*, *2x fill pass*, dan *cap pass*. Pada sudut kampuh >60°, pengelasan dilakukan dalam 7 pass (Gambar 6.c).

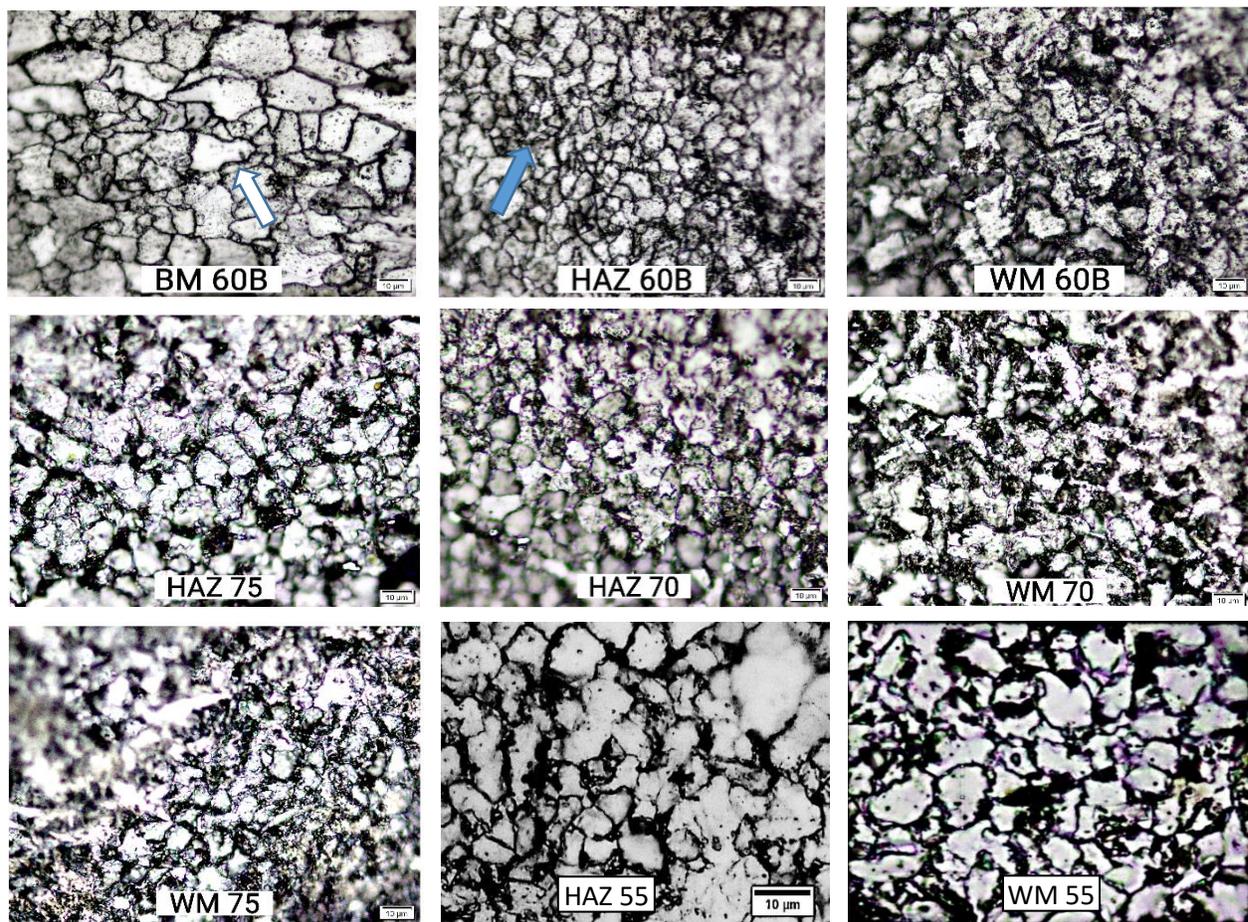


**Gambar 6.** Hasil foto makro sambungan SMAW dengan sudut kampuh 45° (a), 50° (b), 60° (c), dan 70° (d)

Dapat diamati bahwa semakin besar variasi sudut kampuh pengelasan maka semakin lebar WM pada bagian puncak yang berarti semakin banyak logam las yang diperlukan untuk mengisi volume kampuh dan semakin lama juga waktu yang diperlukan untuk proses pengelasan. Daerah HAZ juga cenderung melebar pada pengelasan dengan sudut kampuh yang lebih besar. Hal inilah yang mempengaruhi *heat input* karena waktu adalah salah satu variabel yang digunakan untuk menentukan *heat input* pada proses pengelasan, dimana semakin lama waktu yang diperlukan saat proses pengelasan maka semakin besar pula *heat input* yang dihasilkan seperti sudah dijelaskan pada bagian sebelumnya.

### Hasil Pengamatan Struktur Mikro

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui dan mengamati struktur mikro, bentuk, dan ukuran butir pada area BM, HAZ, dan WM. Umumnya, sambungan las mencakup sejumlah besar heterogenitas dalam struktur mikro. Distribusi struktur mikro pada sambungan las penting untuk diskusi mekanis tentang efek perubahan yang disengaja dari sifat mekanik logam las. Pemilihan komposisi kimia elektroda dan *heat input* memiliki pengaruh besar pada struktur mikro logam las pada sambungan las fusi. Hasil dari heterogenitas dalam struktur mikro terutama disebabkan oleh variasi termal antara logam las dan logam dasar serta solidifikasi dari logam las. Profil penampang las yang representatif dan struktur mikro pada zona las yang berbeda dari sambungan SMAW material pipa *API 5L grade X46* dengan variasi sudut kampuh dapat dilihat pada Gambar 7. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik *Olympus BX53M* dengan perbesaran 100x.



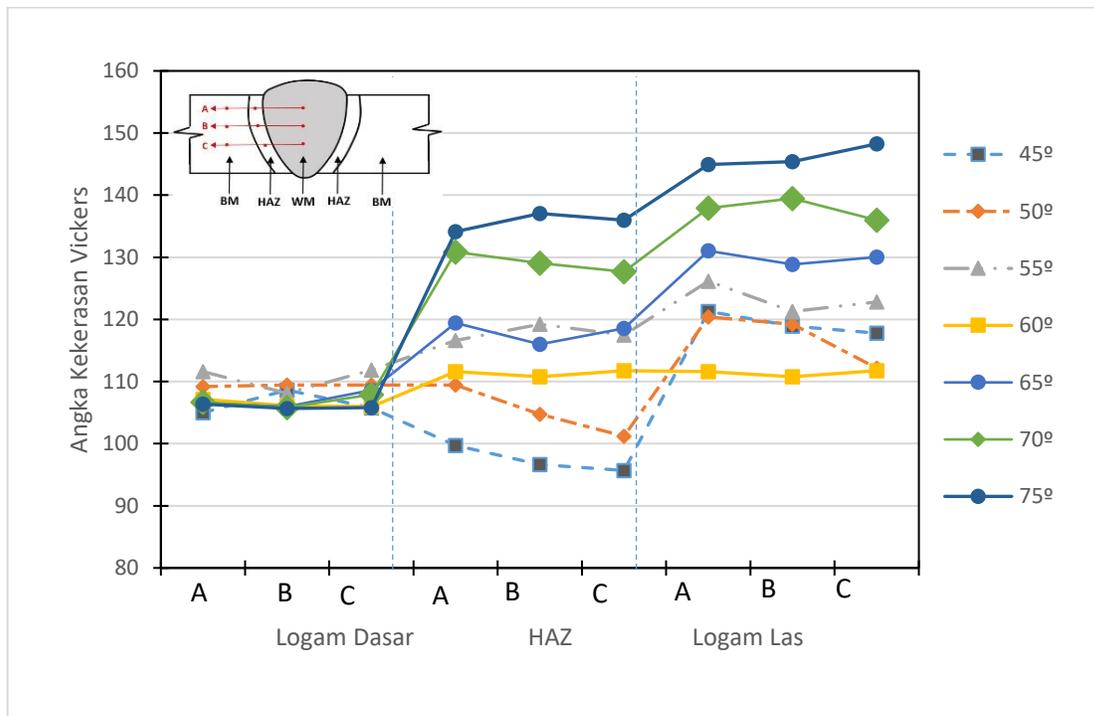
**Gambar 7.** Hasil pengamatan struktur mikro daerah BM, HAZ dan WM pada beberapa sudut kampuh (55°, 60°, 70° dan 75°)

Dari Gambar 7. (BM60B) terlihat bahwa BM memiliki bentuk ferit poligonal (tanda panah putih) bersama dengan sedikit perlit. Daerah ini tidak terpengaruh oleh variasi termal selama proses pengelasan dan tetap seperti struktur mikro aslinya. Selain itu, logam dasar memiliki ukuran butiran terbesar dibandingkan dengan HAZ dan logam las. Hal ini menunjukkan bahwa pada daerah ini, logam dasar bersifat ulet tetapi menunjukkan kekuatan yang relatif rendah dibandingkan dengan HAZ dan logam las. Selain itu, karena intensitas proses SMAW yang tinggi, butiran ferit kasar dengan sedikit martensit ditemukan di zona yang

terpengaruh panas (HAZ). Dibandingkan dengan struktur mikro pada WM dan BM, HAZ memiliki matriks ferit berbutir lebih uniform dan lebih kecil. Selain itu, di HAZ, suhu puncak yang dialami selama proses pengelasan diperkirakan berada di antara A1 dan A3 pada diagram Fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C. Akibatnya, transformasi fasa dari  $\delta$ -ferit menjadi austenit selama proses pengelasan tidak lengkap karena suhu yang tidak mencukupi dari daerah *inter-critical*, menghasilkan koeksistensi struktur butir yang lebih kecil dari  $\alpha$ -ferit dan austenit. Karena pertumbuhan butir austenit terbatas di HAZ dan karena laju pendinginan yang cepat pada suhu kamar akibat dari adanya *heat input* (Darsin, Junusii, & Triawan, 2010; Kayode, Akinola, & Akinwekomi, 2020), austenit yang terbentuk sebagian diubah kembali menjadi ferit, menghasilkan struktur mikro di wilayah ini yang terdiri dari ferit halus yang baru terbentuk di sekitar HAZ. Oleh karena itu, dari sudut pandang metalurgi, diyakini bahwa HAZ tidak dipengaruhi secara signifikan oleh deformasi mekanis karena pembentukan butiran ferit yang halus dan kasar yang berkontribusi pada kinerja mekanik yang baik. Namun pada struktur mikro di daerah HAZ dan WM untuk sambungan dengan sudut kampuh 55° memiliki butiran yang relatif besar dan enderung membulat. Hal ini diduga karena kecepatan pengelasan yang rendah sehingga masukan panas berlebih. Di sisi lain, struktur mikro *ferit acicular/dendrit* ditemukan pada WM dengan sedikit sisa austenit dan martensit. Ini karena multi pass las telah dilakukan pada WM, sehingga mengalami laju pendinginan lambat yang mengurangi energi antarmuka antara austenit dan ferit, sehingga menghasilkan pembentukan *ferit acicular/dendrit* dengan sifat kekuatan, kekerasan dan ketangguhan yang berpotensi tinggi (Iswanto, Mudjijana, & Himarosa, 2017).

*Hasil Vickers Hardness Test*

Pengujian kekerasan Vickers dilakukan di 3 titik di tiap daerah las yaitu BM, HAZ, dan WM. Hasil pengujian berupa nilai kekerasan pada tiap titik pijakan indenter disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 8.

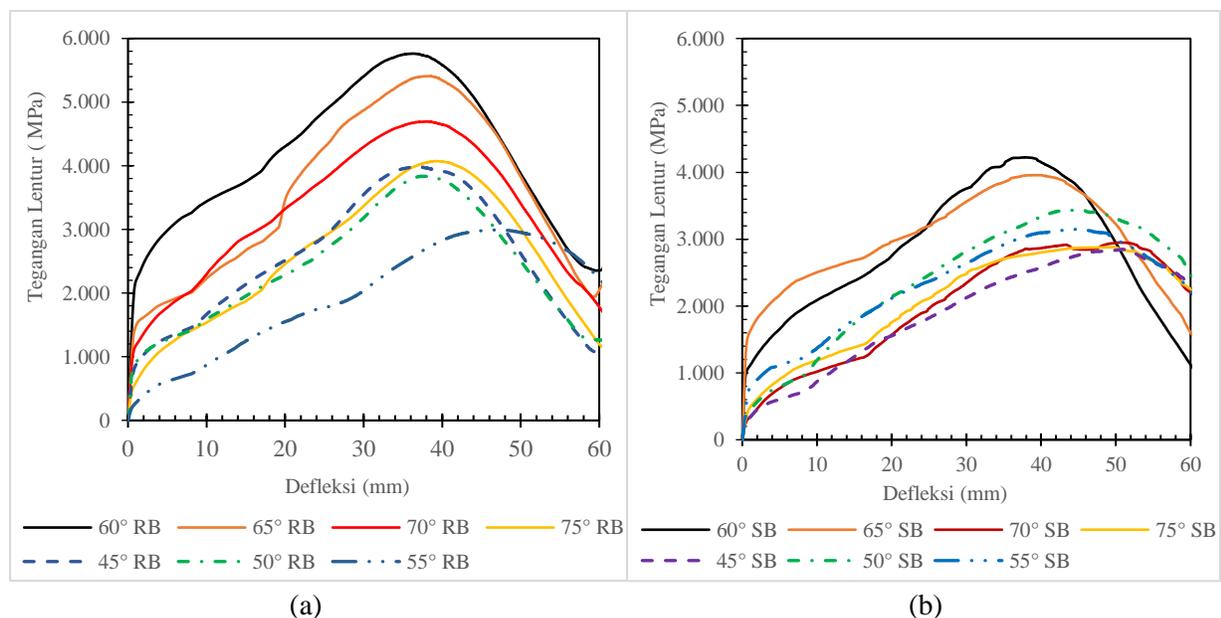


**Gambar 8.** Nilai kekerasan tiap daerah sambungan las; BM, HAZ dan WM pada setiap sudut kampuh

Uji kekerasan spesimen las material *API 5L grade X46 2* memiliki tingkat kekerasan yang berbeda pada WM, HAZ, dan area BM, berkaitan erat dengan ukuran butir struktur mikro, yang dipengaruhi oleh laju pendinginan material. Secara umum, nilai kekerasan di HAZ lebih tinggi dibandingkan BM, dan WM menunjukkan nilai kekerasan tertinggi (sampai dengan sekitar 150 HV). Terdapat perbedaan kekerasan yang signifikan antara BM, HAZ, dan WM dengan variasi sudut kampuh yang mana menimbulkan perbedaan di *heat input*-nya. Kekerasan akan meningkat jika butiran yang dihasilkan kecil seperti yang telah disebutkan dalam persamaan *Hall and Petch*. Ini dapat terjadi karena pada butir yang lebih kecil pergerakan dislokasi akan lebih sulit. Sedangkan jika laju pendinginannya cepat, maka butir tidak sempat berubah menjadi besar sehingga butir yang kecil memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada butir yang berukuran besar. Pada daerah HAZ kekerasannya lebih tinggi dibandingkan daerah base metal karena HAZ daerah adalah bagian dari logam yang terkena pemanasan langsung dari proses pengelasan dan mengalami laju pendinginan yang cepat sehingga atom yang terdistorsi meningkatkan nilai kekerasan di daerah HAZ. Pada pengelasan dengan sudut kampuh  $60^\circ$ , terlihat hanya sedikit perubahan/kenaikan nilai kekerasan dibanding dengan sudut lainnya. Hasil pengujian kekerasan ini juga memperlihatkan bahwa seiring dengan membesarnya sudut kampuh, kekerasan di daerah WM juga meningkat. Hasil pengujian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Pathak dkk, (2021).

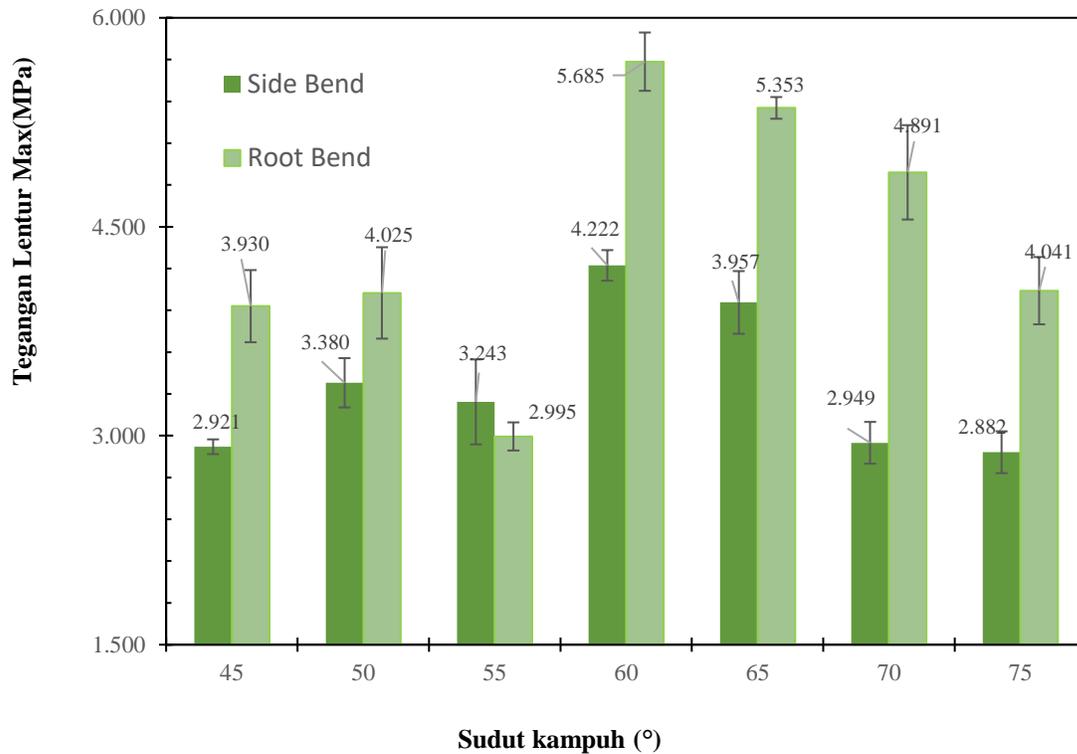
### Hasil Uji Bending

Uji bending dilakukan untuk mengevaluasi keuletan dan kualitas sambungan las yang diasosiasikan dengan adanya cacat las. Dalam penelitian ini, uji bending dilakukan dalam dua konfigurasi; yaitu *root bend* dan *side bend*. *Side bend* juga dilakukan karena material memiliki ketebalan di atas 10 mm (Putra dkk, 2021). Selain itu cacat seperti *undercut* yang berlebihan atau kurangnya fusi dinding samping yang dekat dengan tutup dapat diekspos melalui uji *side bending*, sedangkan cacat lain seperti kurangnya fusi atau penetrasi dapat diamati melalui uji *root bending*. Dari proses pengujian bending didapatkan hasil berupa grafik yang menggambarkan hubungan tegangan bending terhadap defleksi selama proses mulai *loading nose* menyentuh permukaan spesimen hingga spesimen membentuk profil U. Grafik tegangan-defleksi dapat dilihat pada Gambar 9 dimana Gambar 9.a untuk spesimen uji *root bend* dan Gambar 9.b untuk spesimen uji *side bend*.



**Gambar 9.** Tipikal hubungan tegangan *bending*-defleksi pengujian *root bend* (a) dan *side bend* (b) dengan berbagai sudut kampuh

Grafik tegangan-defleksi menunjukkan tipikal perilaku material ulet, dimana tegangan lentur dimulai di daerah elastis yang relatif lebih sempit, kemudian melampaui tegangan luluhnya dan berlanjut dengan daerah plastis yang lebar. Semua spesimen hampir menunjukkan perilaku yang hampir sama, dan tegangan *bending* maksimal tiap spesimen terjadi pada saat defleksi terjadi di kisaran 35-45 mm. Setelah mencapai tegangan *bending* maksimum semua spesimen mengalami penurunan tegangan lentur sampai dengan spesimen uji berbentuk profil U.



**Gambar 10.** Diagram tegangan bending maksimal *root bend* dan *side bend* pada berbagai sudut kampuh

Secara umum berdasarkan Gambar 10 dapat dikatakan bahwa tegangan lentur maksimum dari sambungan SMAW material pipa *API 5L grade X46* baik *root bend* atau *side bend* meningkat seiring dengan kenaikan sudut kampuh dan mencapai nilai tegangan lentur maksimum di sudut 60° sebesar 5.685 MPa, namun setelah sudut kampuh tersebut tegangan lentur akan menurun seiring dengan kenaikan sudut kampuh sambungan las. Hal tersebut hampir sama dengan yang telah diidentifikasi oleh Pedapati, dkk. Pemilihan jumlah *welding pass* berpengaruh dengan *heat input* pada sambungan las. *Heat input* akan berkaitan dengan struktur mikro, dan berujung pada pada sifat mekanik sambungan las. Ketidakkontinyuan naiknya tegangan lentur pada sudut kampuh 55° telah dijelaskan di bagian depan.

Kedua konfigurasi uji bending tersebut (*side* dan *root*) berhasil ditekuk ke permukaan cembung 180°, ditemukan lubang kecil yang terdeteksi cacat, hanya pada uji *root bend*. Cacat seperti itu mungkin disebabkan adanya porositas yang tidak terdeteksi pada WM, dan cacat tersebut lebih tampak nyata di sudut kampuh 75° (lebih dari 3 mm), dimana WM memiliki kekerasan tertinggi yang berarti keuletannya terendah dibanding dua daerah lain. Namun, hasil ini dapat diterima karena cacat (selain yang ada di spesimen 75°) tersebut terdeteksi di bawah kisaran kriteria penerimaan uji bending.



**Gambar 11.** Foto spesimen *root bend* (a) dan *side bend* (b) setelah dilakukan pengujian bending

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pengelasan SMAW sambungan kampuh V tunggal menggunakan variasi sudut kampuh 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, dan 75°, dapat diambil beberapa kesimpulan. Kekuatan bending pada *root bend* dan *side bend test* meningkat seiring dengan kenaikan sudut kampuh dan mencapai maksimum pada sudut kampuh 60° masing-masing sebesar 5.685 MPa dan 4.222 Mpa. Kemudian kekuatan bending menurun bila sudut kampuh diperbesar. Nilai kekerasan di daerah HAZ dan WM meningkat seiring dengan besar sudut kampuh. Pada sudut kampuh 60°, nilai kekerasan sedikit mengalami kenaikan, karena adanya sedikit perubahan struktur mikro. Waktu pengelasan bertambah seiring dengan membesarnya sudut kampuh. Pengelasan dengan sudut kampuh 60° menghasilkan produktifitas yang optimum dimana dibutuhkan waktu pengelasan rendah, sebesar 992 detik, *defect free* dan memiliki kekuatan bending paling tinggi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Proyek Pengembangan PIPANISASI CY-III Lomanis-Rewulu yang dilakukan oleh PT. Nindya Karya yang telah menyediakan material pipa, *sertified welder*, alat radiografi penelitian ini. Terima kasih juga diucapkan kepada Laboratorium Teknik Mesin UMY untuk penyediaan tempat dan peralatan penelitian ini.

## REFERENSI

- (API), A. P. I. (2021). *Welding of Pipelines and Related Facilities*. In (Vol. 1104).
- Darsin, M. D., Junusii, S., & Triawan, Y. I. (2010). Analisa sifat mekanik dan struktur mikro paduan Aluminium 5083 akibat pengelasan Metal Inert Gas (MIG) dengan variasi preheat dan post heat. *Jurnal ROTOR*, 3(2), 67-74.
- Gejendhiran, S., Satheesh Kumar, V., & Sivakumar, A. (2014). A study of welding parameters on mechanical properties of gas metal arc welding and gas tungsten arc welding: A review. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 3(2), 118-119.

- Goetsch, D. L., Chalk, W. S., Nelson, J. A., & Rickman, R. L. (2010). *Technical drawing and engineering communication, International student edition*. Delmar Cengage Learning: Boston.
- Hamin, M. (2014). Finite element analysis of residual stress in welded thick plates of a single butt weld with different included bevel angles. *UTPEDIA*. Retrieved, 10.
- Huda, M., & Setiawan, F. (2016). Pengaruh variasi sudut kampuh V dan kuat arus dengan las shielded metal arc welding (SMAW) pada baja A36 terhadap sifat mekanik. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin UMSIDA*, 1-9.
- Iswanto, P. T., Mudjijana, M., & Himarosa, R. A. (2017). Karakterisasi sambungan SMAW baja karbon rendah menggunakan 3 jenis elektroda. *JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur)*, 1(2), 103-109. <https://doi.org/10.18196/jmpm.v1i2.3612>
- Jain, R. K. (2013). *Production technology (Manufacturing processes, technology and automation)*. Khana Publisher.
- Kayode, J., Akinola, A. O., & Akinwekomi, A. D. (2020). Effects of bevel angle and heat input on tensile property and microstructures of mild steel weldments. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 18(1), 33-38.
- Lee, S.-C., Jo, S. W., Yang, J. S., Choi, K. W., & Seo, J. K. (2016). Effects of reduction groove angle on strength characteristics of FCAW weldment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(6), 473-481. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2016.53.6.473>
- Mahendramani, G., & Lakshmana Swamy, N. (2012). Effect of included angle in V-groove butt joints on shrinkages in submerged arc welding process. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 14.
- Mishra, R. R., Tiwari, V. K., & Rajesha, S. (2014). A study of tensile strength of MIG and TIG welded dissimilar joints of mild steel and stainless steel. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, 3(2), 23-32.
- Murugan, N., & Gunaraj, V. (2005). Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(3), 478-487. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.001>
- Oyetunji, A. (2015). Influence of welding variables on the microstructural and tensile properties of 304L austenitic stainless steel heat affected zone. *Journal of Science, Engineering and Technology, Kathmandu University*, 11, 44-53.
- Oyetunji, A., & Nwigboji, N. (2014). Effect of welding process, type of electrode and electrode core diameter on the tensile property of 304L austenitic stainless steel. *Leonardo Electronics Journal of Practices and Technologies*, 25, 210-222.
- Pathak, D., Singh, R. P., Gaur, S., & Balu, V. (2021). Influence of groove angle on hardness and reinforcement height of shielded metal arc welded joints for low carbon AISI 1016 steel plates. *Materials Today: Proceedings*, 38, 40-43. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.597>
- Pedapati, S., Sidiq, A.B., Awang, M., Hashim, F.M., & Jebaraj, S. (2017). Effect of bevel angles on tensile strength of SS304 steel weld joints. *2nd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering*, 95-106.
- Putra, R. J., Arifin, N. L., Havwini, T., & Ariyanto, N. P. (2021). Kualifikasi welder FCAW-GS pada posisi 6G menggunakan multiple code (AWS D1. 1, ASME Sec. IX, dan ISO 9606-1). *Jurnal Teknologi dan Riset Terapan (JATRA)*, 3(2), 64-72.
- Srinivasa Rao, P., Gupta, O., & Murty, S. (2005). *Influence of process parameters on bead geometry in pulsed gas metal arc welding*. Paper presented at the IIW International Congress.