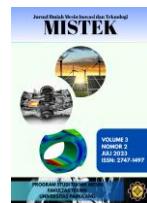




JURNAL TEKNIK MESIN

MISTEK

MESIN INOVASI DAN TEKNOLOGI



ANALISIS KEKUATAN SAMBUNGAN LAS SMAW DENGAN VARIASI ARUS PADA DINDING LUAR RUANG BAKAR INCINERATOR

Fajar Haetommy¹, Syaiful Arif², Nur Rohmat³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No.1, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail : fajarhaetommy030297@gmail.com¹, dosen00597@unpam.ac.id², dosen10017@unpam.ac.id³

Masuk : 9 Juni 2023

Direvisi : 21 Juli 2023

Disetujui : 28 Juli 2023

Abstrak: *Incinerator* adalah alat pembakaran yang digunakan untuk memproses limbah padat menjadi bentuk gas dan sisa padatan berupa abu (*bottom ash* dan *fly ash*). Metode *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* digunakan untuk menyatukan dua atau lebih logam melalui panas tinggi yang mencairkan logam induk dan logam pengisi. Metode ini dapat digunakan pada perancangan dinding luar *incinerator*. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi kekuatan sambungan las pada dinding luar ruang bakar *incinerator* dengan pendekatan yang efisien dan tepat guna. Pengujian dilakukan menggunakan metode *uji impak (Charpy test)* dan *uji kekerasan (Vickers test)* pada material baja SS400 yang dilas menggunakan kawat las E6013 dengan variasi arus 70A, 80A, dan 90A. Berdasarkan hasil uji, diperoleh nilai impak masing-masing sebesar 1,570 J/mm² (70A), 1,815 J/mm² (80A), dan 2,326 J/mm² (90A), dengan keuletan tertinggi tercatat pada arus 90A. Hasil uji kekerasan *Vickers* menunjukkan nilai sebesar 53,20 kg/mm² (70A), 108,34 kg/mm² (80A), dan 68,00 kg/mm² (90A), dengan nilai tertinggi diperoleh pada arus 80A sebesar 108,34 kg/mm².

Kata Kunci: *Incinerator*, Pengelasan SMAW, Uji Impak, Uji Kekerasan Vickers.

Abstract: *An incinerator is a combustion device used to process solid waste by converting it into gaseous form and solid residues such as bottom ash and fly ash. The Shielded Metal Arc Welding (SMAW) method is applied to join two or more metals by utilizing high heat that melts both the base metal and the filler metal. This method can be used in the design of the outer wall of an incinerator. The purpose of this study is to evaluate the strength of welded joints on the outer wall of the incinerator combustion chamber using an efficient and precise approach. The testing was carried out using the impact test (Charpy test) and the hardness test (Vickers test) on SS400 steel material welded with E6013 electrodes at different current variations of 70A, 80A, and 90A. Based on the results, the impact values were 1.570 J/mm² (70A), 1.815 J/mm² (80A), and 2.326 J/mm² (90A), with the highest ductility found at 90A. The Vickers hardness test results showed values of 53.20 kg/mm² (70A), 108.34 kg/mm² (80A), and 68.00 kg/mm² (90A), with the highest hardness obtained at 80A, reaching 108.34 kg/mm².*

Keywords: *Incinerator*, SMAW Welding, Impact Test, Vickers Hardness Test.

PENDAHULUAN

Sampah merupakan salah satu permasalahan utama yang dihadapi oleh kota-kota besar di Indonesia saat ini. Pengelolaan sampah yang kurang optimal sering kali tidak berjalan sesuai dengan rencana awal, sehingga menimbulkan berbagai persoalan seperti pelanggaran prosedur, konflik sosial dengan masyarakat, serta permasalahan etika, hukum, dan lingkungan hidup [1]–[3]. Hal ini menunjukkan bahwa persoalan sampah bukan hanya bersifat teknis, tetapi juga terkait dengan tata kelola dan pemenuhan hak masyarakat atas lingkungan yang bersih.

Saat ini, kebijakan dan praktik pengelolaan sampah di banyak daerah masih terfokus pada aspek teknis, sementara pendekatan yang berorientasi pada kebutuhan masyarakat dan keberlanjutan lingkungan sering kali terabaikan. Oleh karena itu, dibutuhkan sintesis sistem pembuangan sampah yang lebih komprehensif dan jelas, yang tidak hanya menekankan efisiensi teknis, tetapi juga memperhatikan aspek sosial dan ekologis [4].

Secara umum, metode yang masih banyak digunakan pemerintah kota maupun provinsi dalam menangani sampah adalah dengan menimbunnya di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) melalui sistem *landfill* [5]. Cara ini dianggap murah dan mudah, namun berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran tanah dan udara akibat sistem *open dumping*. Seiring meningkatnya volume sampah, metode ini dinilai kurang efektif untuk jangka panjang [6]–

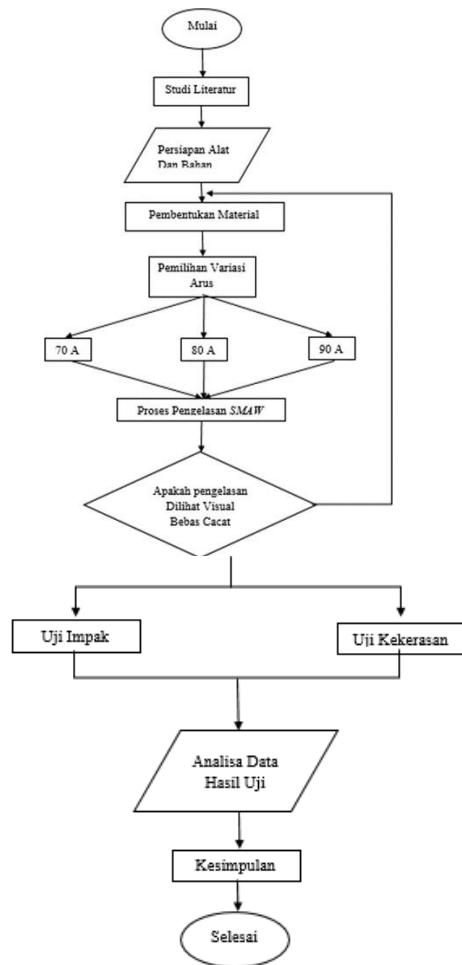
[8]. Sebagai alternatif, kini mulai dikembangkan teknologi pembakaran sampah berskala kecil dengan sistem pemanas teknis atau *simple incinerator*. Teknologi ini bekerja berdasarkan prinsip pembakaran pada suhu tinggi untuk mengubah sampah rumah tangga menjadi gas dan residu abu dalam waktu relatif singkat, sehingga volume sampah dapat berkurang secara signifikan [9]. Selain lebih efisien, *incinerator* juga dapat diterapkan di lingkungan perkotaan atau fasilitas kecil seperti gedung perkantoran dan permukiman padat [10].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja dan kekuatan sambungan las pada dinding luar ruang bakar *incinerator* guna mendukung rancangan *incinerator* yang aman dan tahan panas. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pengelolaan sampah yang ramah lingkungan, efisien, serta mendukung upaya pengurangan volume sampah di tingkat rumah tangga.

METODOLOGI

Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang tersusun secara sistematis seperti yang ditunjukkan pada diagram alir penelitian (Gambar 1). Setiap tahapan dirancang untuk memastikan proses pengujian dan analisis kekuatan sambungan las SMAW dengan variasi arus pada dinding luar ruang bakar *incinerator* dapat berjalan secara terarah dan terukur.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

1. Studi Literatur

Tahap ini mencakup pengumpulan data dan informasi dari berbagai sumber, baik buku, jurnal, maupun penelitian terdahulu, yang berkaitan dengan proses pengelasan SMAW, pengaruh variasi arus listrik, serta karakteristik mekanik material baja SS400. Studi literatur bertujuan untuk memperkuat dasar teori dan menentukan parameter pengujian yang sesuai.

2. Penyiapan Bahan dan Alat

Tahapan ini meliputi persiapan material uji berupa baja SS400, elektroda E6013, serta peralatan pendukung pengelasan seperti mesin SMAW, alat potong, dan peralatan pengujian (*Charpy impact tester* dan *Vickers hardness tester*). Benda uji dipersiapkan sesuai dengan standar bentuk dan ukuran spesimen uji.

3. Pembentukan Material

Material dipotong dan dibentuk sesuai standar spesimen yang akan digunakan dalam proses pengelasan SMAW. Pemotongan dilakukan untuk memperoleh dimensi yang seragam dan memenuhi ketentuan uji mekanik.

4. Penentuan Variasi Arus

Pada tahap ini ditentukan tiga variasi arus pengelasan, yaitu 70A, 80A, dan 90A. Variasi arus ini digunakan untuk mengetahui pengaruh perbedaan arus terhadap kekuatan dan kekerasan hasil sambungan las.

5. Proses Pengelasan SMAW

Proses pengelasan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Menyiapkan mesin las SMAW dan memastikan kondisinya berfungsi normal.
- Menyiapkan benda kerja baja SS400 di atas meja las.
- Menggunakan posisi pengelasan bawah tangan, di mana elektroda berada di atas benda kerja.
- Jenis kampuh las yang digunakan adalah kampuh-V dengan sudut 70° dan celah 2 mm.
- Elektroda yang digunakan adalah jenis *High Titania AWS A5.1 E6013* dengan diameter 2,0 mm.
- Setelah mesin las dinyalakan, amperemeter diatur ke posisi nol, kemudian dilakukan penyalakan elektroda untuk memastikan kondisi arus stabil. Pengelasan dilakukan berturut-turut dengan arus 70A, 80A, dan 90A.

6. Pengujian Hasil Pengelasan

Setelah proses pengelasan selesai, dilakukan pengujian terhadap hasil sambungan las SMAW dengan variasi arus yang telah ditentukan.

7. Uji Impak (*Charpy Test*)

Pada tahap ini, disiapkan mesin uji impak yang berfungsi dengan baik, spesimen uji yang telah dibentuk, serta alat ukur pendukung. Spesimen diletakkan pada *baseplate* alat uji, kemudian dilakukan pengujian untuk mengukur ketangguhan (toughness) material terhadap beban kejut.

8. Uji Kekerasan (*Vickers Test*)

Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji kekerasan *Vickers* yang telah dikalibrasi. Spesimen ditempatkan pada *baseplate* alat uji, kemudian dilakukan penekanan dengan beban tertentu untuk mendapatkan nilai kekerasan permukaan hasil pengelasan.

9. Analisis dan Pembahasan

Data hasil pengujian impak dan kekerasan dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi arus terhadap kekuatan sambungan las. Analisis dilakukan dengan cara membandingkan nilai antar variasi arus serta mengaitkannya dengan teori karakteristik material dan proses pengelasan.

10. Kesimpulan dan Saran

Tahap ini berisi perumusan hasil akhir penelitian berupa kesimpulan dari hasil analisis, serta saran yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian selanjutnya.

Data Spesimen Material yang Diuji

Penelitian ini menggunakan material baja SS400 sebagai bahan utama untuk pembuatan spesimen uji pada dinding luar ruang bakar *incinerator*. Material tersebut dipilih karena memiliki sifat mekanik yang baik, mudah dikerjakan, dan umum digunakan dalam konstruksi maupun komponen mesin.

1. Data Material Pengujian Dinding Luar Ruang Bakar *Incinerator*

Material merupakan logam induk yang digunakan dalam pembuatan spesimen uji. Benda uji tersebut mengalami beberapa tahapan proses, antara lain pemotongan, pengelasan, pembentukan, dan pengujian untuk mengetahui sifat mekaniknya terhadap variasi arus las SMAW. Tabel 1 berikut menunjukkan spesifikasi material yang digunakan sebagai spesimen uji.

Tabel 1. Data Material Pengujian Dinding Luar Ruang Bakar *Incinerator*

No	Baja SS400	Keterangan
1	Bentuk	Takik jenis V-45
2	Ukuran	Panjang 55 mm, Lebar 10 mm, Tebal 10 mm
3	Material	<i>Structural Steel 400</i>

2. Data Material Dinding *Incinerator*

Baja SS400 (JIS G3101 / ASTM A36) merupakan baja karbon rendah dengan kadar karbon maksimum 0,17%. Material ini tergolong baja struktural (*low carbon steel*) yang tidak dapat dikeraskan melalui proses *quenching* dan *tempering*, namun dapat diperkeras melalui proses pengerasan permukaan seperti karburasi, nitridasi, atau tridiasi karbon. Melalui proses tersebut, kekerasan permukaan baja SS400 dapat mencapai sekitar 500 Brinell. Selain itu, proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin las *Daiden 120A*, yang merupakan produk unggulan asal Jepang. Mesin ini memiliki performa tinggi dengan nyala busur api yang stabil, sehingga mampu menghasilkan hasil las yang kuat dan seragam. Mesin tersebut digunakan untuk pengelasan seluruh spesimen uji dalam penelitian ini. Tabel 2 berikut memperlihatkan data material dinding luar *incinerator* yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 2. Data Dinding *Incinerator*

No	Baja SS400	Keterangan
1	Material	<i>Structural Steel 400</i>
2	Tebal	4 mm × 4 mm

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Workshop dan Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pamulang, tempat seluruh tahapan penelitian dilakukan, mulai dari persiapan alat dan bahan, proses pemotongan serta pengelasan material, hingga pengujian *impact* dan *Vickers hardness*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

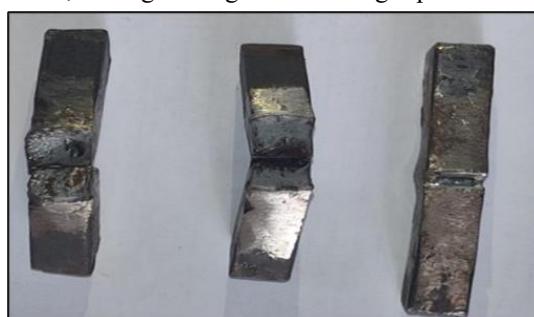
Hasil Penelitian Spesimen

Proses pengelasan dilakukan menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*. Penelitian ini mencakup dua jenis pengujian mekanik, yaitu *uji impak* dan *uji kekerasan*, untuk mengetahui pengaruh variasi arus terhadap karakteristik sambungan las pada material baja SS400. Variasi arus yang digunakan adalah 70A, 80A, dan 90A. Perbedaan masukan panas (*heat input*) pada masing-masing arus diharapkan memberikan hasil yang berbeda terhadap kekuatan sambungan las. Semakin tinggi arus yang digunakan, semakin besar pula panas yang dihasilkan selama proses pengelasan, sehingga dapat memengaruhi struktur mikro dan kekuatan mekanik logam las. Tabel 3 menunjukkan data material logam induk yang digunakan dalam proses pengelasan.

Tabel 3. Logam Induk Baja SS400

No	Nama	Keterangan
1	<i>Material Specification</i>	SS400
2	Tebal	10 mm
3	<i>AWS Classification</i>	E6013
4	<i>Filler Metal Diameter</i>	2,0 mm
5	Posisi Pengelasan	1G (bawah tangan)

Material baja SS400 dibentuk menjadi spesimen uji sesuai standar ASTM E23. Pelat SS400 dipotong dan diberi kampuh berbentuk V, kemudian dilakukan proses pengelasan dengan tiga variasi arus, yaitu 70A, 80A, dan 90A. Jumlah total spesimen uji adalah sembilan buah, masing-masing terdiri dari tiga spesimen untuk setiap variasi arus.

**Gambar 2. Hasil Pengujian Impak**

Berdasarkan hasil pengujian impak, diketahui bahwa peningkatan kuat arus cenderung menurunkan nilai ketangguhan (*impact strength*) material. Jenis patahan yang dihasilkan pada setiap sampel termasuk dalam kategori patahan plastis (*ductile fracture*).

Rekahan ulet yang terbentuk menunjukkan bahwa daerah sambungan las mampu menyerap energi tumbukan dalam jumlah besar sebelum mengalami kegagalan. Hal ini ditandai dengan permukaan patahan yang berwarna abu-abu, kasar, dan berserat, menunjukkan karakteristik khas dari material yang mengalami deformasi plastis sebelum patah. Pendinginan yang signifikan pada penampang patahan juga memperkuat indikasi bahwa mekanisme kegagalan didominasi oleh perilaku ulet.

Hasil Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan untuk mengetahui besarnya energi yang diserap oleh sambungan las baja SS400 terhadap beban kejut. Pengujian ini menggunakan alat *Charpy Impact Tester* dengan beban pendulum sebesar 16,39 kg, sudut awal 140°, dan panjang lengan 0,75 m.

a. Kapasitas Energi Alat

Sebelum pengujian spesimen, dihitung terlebih dahulu kapasitas maksimum energi yang dapat dihasilkan alat, yaitu energi potensial pendulum pada posisi awal:

$$W = m \cdot g \cdot l (1 - \cos \alpha)$$

$$W = 16,39 \times 9,81 \times 0,75 \times (1 - \cos 140^\circ)$$

$$W = 225,08 \text{ J}$$

Nilai ini menunjukkan energi maksimum pendulum tanpa spesimen.

b. Uji Blanko

Sebelum pengujian dilakukan pada benda uji, dilakukan *uji blanko* tanpa spesimen untuk mengetahui besarnya energi yang hilang akibat gesekan pada bantalan dan hambatan udara. Langkah-langkah uji blanko adalah:

1. Mengangkat pendulum pada posisi 140°.
2. Melepas pendulum dari pengaitnya.
3. Mencatat sudut akhir yang ditunjukkan jarum penunjuk.

Dari hasil pengujian diperoleh sudut setelah pemukulan (β) sebesar 136°, sehingga diperoleh selisih kerugian energi sebesar 4°.

c. Data Rencana Pengujian Impak

Setelah koreksi kerugian diketahui, dilakukan pengujian pada tiga variasi arus pengelasan: 70A, 80A, dan 90A. Parameter utama pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Rencana Pengujian Impak

Spesimen	Variasi Arus (A)	Berat Pendulum (kg)	Berat Pendulum (N)	Panjang Lengan (m)	Sudut Awal (°)	Sudut Akhir (°)	Luas Penampang (mm²)
A	70					70, 67, 64	
B	80	16,39	160,76	0,75	140	60, 58, 55	80
C	90					40, 37, 35	

d. Perhitungan Energi Impak

Energi yang diserap oleh spesimen dihitung dengan rumus:

$$W = m \cdot g \cdot l (\cos \beta - \cos \alpha)$$

Sebagai contoh, untuk spesimen arus 70 A:

$$W = 16,39 \times 9,81 \times 0,75 (\cos 70^\circ - \cos 140^\circ)$$

$$W = 133,62 \text{ J}$$

e. Koreksi Kehilangan Energi dan Perhitungan Energi Sebenarnya

Sudut β (sudut setelah pemukulan) diperoleh tanpa memperhitungkan kehilangan energi akibat gesekan pada bantalan dan hambatan udara. Oleh karena itu, perlu dilakukan koreksi terhadap sudut tersebut. Besarnya sudut koreksi dapat dihitung sebagai berikut:

$$\beta' = \beta + \text{losses}$$

$$\beta' = 70^\circ + 4^\circ = 74^\circ$$

Energi impak sebenarnya setelah memperhitungkan kerugian energi ditentukan dengan rumus:

$$W' = m \cdot g \cdot l (\cos \beta' - \cos \alpha)$$

$$W' = 16,39 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,75 \text{ m} (\cos 74^\circ - \cos 140^\circ)$$

$$W' = 125,62 \text{ J}$$

Persentase kehilangan energi akibat gesekan dan hambatan udara dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\% \text{losses} = 100\% \times \frac{(W - W')}{W}$$

$$\% \text{losses} = 100\% \times \frac{(133,62 - 125,62)}{133,62} = 6,37\%$$

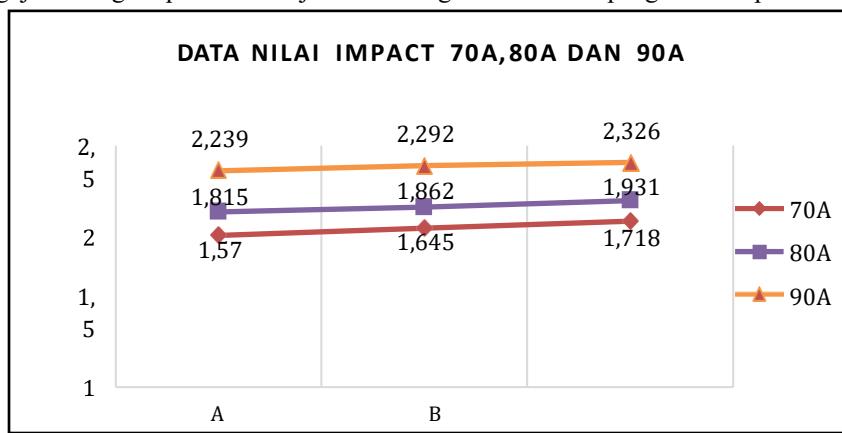
Nilai ketangguhan material, yaitu energi yang diserap per satuan luas penampang spesimen, dihitung dengan:

$$K = \frac{W'}{A}$$

$$K = \frac{125,62}{80} = 1,570 \text{ J/mm}^2$$

f. Hasil Pengujian Energi Impak

Hasil pengujian energi impak untuk baja SS400 dengan variasi arus pengelasan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Impak dengan Variasi Arus

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, diperoleh bahwa nilai energi impak meningkat seiring bertambahnya arus pengelasan. Pada arus 90A, sambungan las baja SS400 menghasilkan nilai energi impak tertinggi sebesar 2,326 J/mm², menunjukkan karakteristik material yang ulet (*ductile*). Permukaan patahan tampak berserat kasar dengan warna abu-abu, menandakan bahwa material mampu menyerap energi tumbukan dalam jumlah besar sebelum mengalami patahan. Pada arus 80A, nilai impak menurun menjadi 1,815 J/mm², sedangkan pada arus 70A, nilai terendah tercatat sebesar 1,570 J/mm². Penurunan nilai ini disebabkan oleh meningkatnya panas selama pengelasan pada arus tinggi, yang memperpanjang waktu pendinginan dan menyebabkan butiran logam las membesar sehingga struktur menjadi lebih getas (*brittle*). Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa arus 90A merupakan kondisi pengelasan paling optimal bagi baja SS400, karena menghasilkan sambungan las dengan ketangguhan dan keuletan terbaik.

Alat uji impak yang digunakan memiliki kapasitas maksimum 300 J, sehingga masih sesuai untuk pengujian baja SS400. Dengan rasio kerugian energi sebesar 4° dan persentase kehilangan 6,37%, pengelasan pada arus 90A (2,326 J/mm²) terbukti memberikan hasil las paling kuat dan paling ulet pada dinding luar ruang bakar *incinerator*.

Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers microhardness test untuk menentukan nilai kekerasan mikro pada sambungan las baja SS400. Dalam pengujian ini, beban sebesar 0,5 kgf diterapkan secara perlahan selama 5 detik menggunakan indentor berbentuk piramida intan. Setelah gaya dilepaskan, dua diagonal bekas penekanan diukur, kemudian dirata-ratakan untuk menghitung nilai Vickers Hardness Number (VHN) menggunakan persamaan berikut.

$$VHN = 1,854 \times \frac{P}{d^2}$$

Dengan:

- VHN = angka kekerasan Vickers (kg/mm²)
- P = beban penekanan (kgf)
- d = rata-rata panjang diagonal penekanan (mm)

Sebagai contoh, perhitungan dilakukan pada spesimen dengan arus 70A, di mana $P = 0,5 \text{ kgf}$, $d_1 = 88 \mu\text{m}$, $d_2 = 88 \mu\text{m}$, sehingga:

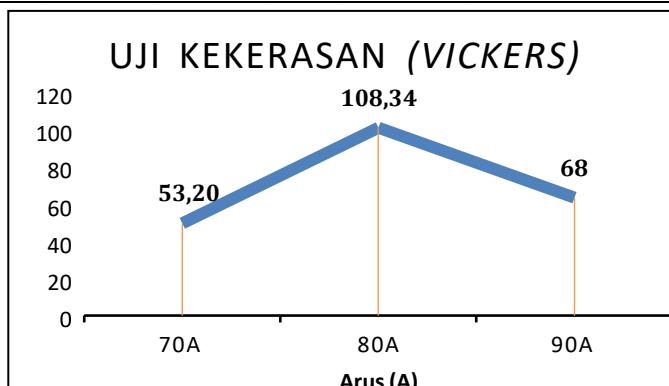
$$d_r \text{ata} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{88 + 88}{2} = 88 \mu\text{m} = 0,088 \text{ mm}$$

$$VHN = 1,854 \times \frac{0,5}{0,088^2} = 53,20 \text{ kg/mm}^2$$

Hasil pengujian untuk setiap variasi arus pengelasan ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Kekerasan Vickers Baja SS400 dengan Variasi Arus

No	Material	$d_1 (\mu\text{m})$	$d_2 (\mu\text{m})$	$\bar{d} (\mu\text{m})$	d (mm)	P (kgf)	VHN (kg/mm ²)	Variasi Arus
1	SS400 + SMAW	88	88	132	0,132	0,5	53,2	70A
2	SS400 + SMAW	64	57	92,5	0,0925	0,5	108,34	80A
3	SS400 + SMAW	75,5	82,5	116,8	0,1168	0,5	68	90A



Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Kekerasan dengan Variasi Arus

Berdasarkan hasil pada Tabel 5 dan Gambar 4, nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada arus 80A dengan nilai 108,34 VHN, sedangkan nilai terendah terjadi pada arus 70A sebesar 53,20 VHN. Sementara itu, pada arus 90A, nilai kekerasan mengalami penurunan menjadi 68,00 VHN. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan arus tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekerasan. Arus yang terlalu tinggi menghasilkan panas berlebih, memperlambat pendinginan, dan menyebabkan pertumbuhan butir (*grain growth*) pada daerah las (*weld metal*), sehingga struktur menjadi lebih lunak. Sebaliknya, arus yang terlalu rendah menyebabkan penetrasi las tidak sempurna, menghasilkan kekerasan yang juga rendah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa arus 80A merupakan kondisi optimal dalam proses pengelasan baja SS400 menggunakan metode SMAW, karena menghasilkan nilai kekerasan tertinggi dan struktur mikro yang lebih homogen.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

- Hasil pengujian impak menunjukkan bahwa nilai energi impak tertinggi terdapat pada arus 90A sebesar 2,326 J/mm², yang menunjukkan karakteristik sambungan las yang lebih ulet (*ductile*). Sedangkan nilai impak terendah terjadi pada arus 70A sebesar 1,570 J/mm², dengan karakteristik lebih getas (*brittle*). Dengan demikian, penggunaan arus 90A menghasilkan kekuatan sambungan las yang lebih baik.
- Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada arus 80A sebesar 108,34 VHN, sedangkan pada arus 90A mengalami penurunan menjadi 68,00 VHN. Hal ini disebabkan oleh peningkatan panas selama proses pengelasan yang memperlambat pendinginan dan menyebabkan pertumbuhan butir, sehingga menurunkan kekerasan. Oleh karena itu, arus 80A dinilai sebagai kondisi optimal untuk memperoleh kekerasan maksimum, sedangkan arus 90A memberikan keseimbangan terbaik antara kekerasan dan keuletan sambungan las.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan variasi arus dan jenis elektroda yang berbeda guna memperoleh hasil yang lebih komprehensif terhadap karakteristik mekanik sambungan las. Selain itu, pengujian tambahan seperti uji tarik, uji kekerasan Brinell atau Rockwell, serta analisis struktur mikro perlu dilakukan untuk memperkuat hasil penelitian ini. Seluruh proses pengelasan dan pengujian juga sebaiknya dilaksanakan sesuai prosedur keselamatan kerja (K3) agar hasil yang diperoleh lebih akurat dan aman.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. T. Hadomuan and R. W. Tuti, "Evaluasi Kebijakan terhadap Pengelolaan Sampah Kawasan dan Timbulan di Kota Tangerang Selatan," *Kebijak. J. Ilmu Adm.*, vol. 13, no. 1, pp. 7–14, 2022, doi: 10.23969/kebijakan.v13i1.4504.
- [2] A. F. Rahmawati, Amin, Rasminto, and F. D. Syamsu, "Analisis Pengelolaan Sampah Berkelanjutan pada Wilayah Perkotaan di Indonesia," *J. Binagogik*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2021, doi: 10.61290/pgsd.v8i1.289.
- [3] A. Marlina, "Tata Kelola Sampah Rumah Tangga melalui Pemberdayaan Masyarakat dan Desa di Indonesia," *J. Ilmu Pendidik. STKIP Kusuma Negara Jakarta*, vol. 11, no. 2, pp. 125–144, 2021, doi: 10.37640/jip.v11i2.127.
- [4] A. Ghosh, D. Pal, S. K. Acharya, and A. Biswas, "Municipal Waste Management: From Socio-ecological and Techno Managerial Perspective," *J. Community Mobilization Sustain. Dev.*, vol. 16, no. 1, pp. 279–288, 2021.
- [5] R. Y. Lesmana, "Estimasi Laju Timbulan Sampah dan Kebutuhan Landfill Periode 2018-2027 (Studi Kasus Kec. Mentawa Baru Ketapang, Kab. Kotawaringin Timur, Kalimantan Tengah)," *Media Ilm. Tek. Lingkung.*, vol. 2, no. 2, pp. 20–24, 2017, doi: 10.33084/milt.v2i2.124.
- [6] M. Muyassar and W. Budianta, "Pencemaran Logam Berat pada Tanah di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Piyungan, Bantul, Yogyakarta," *KURVATEK*, vol. 6, no. 1, pp. 11–22, May 2021, doi: 10.33579/krvtk.v6i1.2146.
- [7] E. Saputra, M. R. Fauzan, R. Muslim, I. Gunawan, R. Pebrianti, and Y. S. Astuti, "Adaptasi Masyarakat Terkait Pencemaran Air Di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Ciangir Kecamatan Tamansari Kota Tasikmalaya," *JISPENDIORA J. Ilmu Sos. Pendidik. Dan Hum.*, vol. 3, no. 2, pp. 37–44, May 2024, doi: 10.56910/jispendiora.v3i2.1349.
- [8] D. T. R. Cetha, C. Meidiana, and K. E. Sari, "Potensi Rehabilitasi Sel Penimbunan Sampah TPA Sowi dengan Landfill Mining," *Plan. Urban Reg. Environ. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 165–176, 2022.
- [9] I. D. M. C. Santosa, P. A. Suprapto, and S. Sudirman, "Aplikasi Insinerator Hemat Energi Solusi Timbunan Sampah Residu Rumah Tangga: Studi Kasus di Desa Adat Galiukir, Kabupaten Tabanan," *Bhakti Persada J. Apl. IPTEKS*, vol. 8, no. 2, pp. 117–124, Nov. 2022, doi: 10.31940/bp.v8i2.117-124.
- [10] H. Susastro, D. Ginting, E. W. Sinuraya, and G. M. Pasaribu, "Kajian Incinerator Sebagai Salah Satu Metode Gasifikasi Dalam Upaya Untuk Mengurangi Limbah Sampah Perkotaan," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 1, pp. 28–34, Mar. 2020, doi: 10.14710/jebt.2020.8137.