

Effect of Rice Husk Ash and Clay Powder as Cooling Media in Post Weld Heat Treatment (PWHT) on The Impact Toughness of SMAW-Welded SS400 Steel

Angga Hermawansyah^{1*}, Zainal Abadi¹, Delima Yanti Sari¹, and Rifelino¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

*Corresponding author: anggahermawansyah@gmail.com

Received April 23th 2026; Revised April 30th 2026; Accepted May 11th 2026

Abstract

This study investigates the effect of variations in cooling media during Post Weld Heat Treatment (PWHT) on the impact toughness of low carbon steel SS400. The main problem addressed in this research is how differences in cooling medium characteristics influence the cooling rate, which subsequently affects the impact toughness of welded material. The objective of this study is to determine the effect of using rice husk ash, clay, and air as cooling media on the impact toughness value of SS400 steel. The experimental method was employed by applying PWHT to SMAW-welded specimens, followed by Charpy impact testing to obtain the final deflection angle, which was then converted into impact energy and impact value (HI). The results show that clay cooling medium provides the highest average impact toughness value of 1.175 J/mm², followed by rice husk ash at 1.107 J/mm², while air cooling yields the lowest value of 0.845 J/mm². These differences indicate that the thermal characteristics of the cooling media significantly influence the material's ability to absorb energy before fracture, which is related to the stability of the cooling rate during the PWHT process. It can be concluded that variations in cooling media affect the impact toughness of SS400 steel, where more stable cooling conditions lead to higher toughness values.

Keywords: PWHT; SS400; Cooling Media; Impact Toughness; SMAW

Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi dan Bubuk Tanah Liat sebagai Media Pendingin pada Proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap Ketangguhan Impak Hasil Las pada Baja SS400

Abstrak

Penelitian ini membahas pengaruh variasi media pendingin pada proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap ketangguhan impak material baja karbon rendah SS400. Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana perbedaan karakteristik media pendingin dapat mempengaruhi laju pendinginan yang berdampak pada perubahan sifat ketangguhan material hasil pengelasan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan media pendingin abu sekam padi, tanah liat, dan udara terhadap nilai ketangguhan impak material SS400. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan perlakuan PWHT pada spesimen hasil pengelasan SMAW, kemudian dilakukan pengujian impak metode Charpy untuk memperoleh sudut akhir yang selanjutnya dikonversi menjadi nilai ketangguhan impak (*impact value*/HI). Hasil penelitian menunjukkan bahwa media pendingin tanah liat menghasilkan nilai rata-rata ketangguhan impak tertinggi sebesar 1,175 J/mm², diikuti abu sekam padi sebesar 1,107 J/mm², sedangkan nilai terendah diperoleh pada pendinginan udara sebesar 0,845 J/mm². Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik termal media pendingin berpengaruh terhadap kemampuan material dalam menyerap energi sebelum terjadi patah, yang berkaitan dengan stabilitas laju pendinginan selama proses PWHT. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi media pendingin berpengaruh terhadap ketangguhan impak material SS400, di mana media dengan kontrol pendinginan yang lebih stabil menghasilkan nilai ketangguhan yang lebih tinggi.

Kata Kunci: PWHT; SS400; Media Pendingin; Ketangguhan Impak; SMAW

I. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan metode penyambungan logam yang banyak digunakan dalam industri konstruksi, manufaktur, dan permesinan karena mampu menghasilkan sambungan yang kuat dan permanen. Proses *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) menjadi salah satu teknik yang paling umum diterapkan karena fleksibel, mudah digunakan di lapangan, serta sesuai untuk baja karbon rendah seperti SS400 (Azis & Saputro, 2019). Namun demikian, proses pengelasan menghasilkan siklus termal berupa pemanasan lokal dan pendinginan tidak seragam yang dapat memicu terbentuknya tegangan sisa dan perubahan struktur mikro pada daerah las dan *Heat Affected Zone* (HAZ) (Ramadhani et al., 2022).

Perubahan struktur mikro dan tegangan sisa akibat pengelasan terbukti memengaruhi sifat mekanik material, khususnya kekerasan dan ketangguhan impak. Variasi parameter pengelasan dapat menyebabkan peningkatan kekerasan lokal yang diikuti oleh penurunan keuletan material, sehingga meningkatkan potensi kegagalan pada sambungan las (Kusminah et al., 2024). Selain itu, distribusi tegangan sisa yang tidak merata akibat gradien suhu yang tinggi selama proses pengelasan juga berkontribusi terhadap menurunnya ketahanan terhadap beban dinamis pada material (Jiang et al., 2021).

Post Weld Heat Treatment (PWHT) merupakan metode perlakuan panas yang diterapkan setelah proses pengelasan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Proses ini bertujuan untuk mereduksi tegangan sisa, menstabilkan struktur mikro, serta meningkatkan keandalan sambungan las melalui pemanasan hingga suhu tertentu di bawah titik transformasi fasa, diikuti dengan pendinginan terkontrol (Jeffus, 2012; Lancaster, 1980). Penerapan PWHT telah terbukti efektif dalam meningkatkan performa material, terutama pada komponen industri seperti *pressure vessel*, pipa, dan *boiler* yang bekerja pada kondisi beban tinggi (Kalyankar & Chudasama, 2018).

Peningkatan suhu PWHT diketahui berpengaruh terhadap sifat mekanik hasil las. Kenaikan suhu PWHT dilaporkan mampu menurunkan kekerasan pada daerah HAZ dan logam las serta meningkatkan energi serap impact akibat terjadinya relaksasi tegangan sisa dan homogenisasi struktur (Mansjur & Suharto, 2024; Nasra et al., 2020). Meskipun demikian, parameter lain seperti laju pendinginan setelah PWHT juga memiliki peranan penting dalam menentukan sifat akhir material.

Laju pendinginan pasca PWHT memengaruhi pembentukan struktur mikro dan sifat mekanik material. Pendinginan yang lebih lambat cenderung menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil dan meningkatkan ketangguhan, sedangkan pendinginan cepat meningkatkan kekerasan namun berpotensi menyebabkan kerapuhan material (Roslan et al., 2024; Song et al., 2024). Oleh karena itu, pemilihan media pendinginan menjadi faktor krusial dalam mengontrol hasil akhir proses PWHT.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan media pendinginan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap sifat mekanik baja karbon, khususnya ketangguhan impact. (Arrochman & Rasyid, 2024) menggunakan material baja karbon rendah jenis ST37 dengan variasi media pendingin berupa minyak sayur, oli SAE 20, dan udara pada proses PWHT, dan menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik media pendingin menghasilkan nilai ketangguhan impact yang berbeda. Media dengan kemampuan pelepasan panas yang lebih lambat cenderung menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil sehingga meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi sebelum patah, sedangkan media dengan pendinginan lebih cepat berpotensi menurunkan ketangguhan. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh (Wahyunanta & Drastiawati, 2023) menggunakan material SS400 dengan media pendingin padat berupa pasir gunung, pasir sungai, dan pasir pantai pada proses PWHT, yang menunjukkan bahwa variasi karakteristik fisik media pendingin juga mempengaruhi respon mekanik material melalui perbedaan laju pendinginan. Meskipun terdapat perbedaan jenis material, ST37 dan SS400 sama-sama termasuk dalam kategori baja karbon rendah struktural sehingga memiliki karakteristik yang relatif sebanding dalam merespon perlakuan panas. Dengan demikian, kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa media pendingin memiliki peran penting dalam mengontrol kondisi pendinginan yang berdampak pada sifat mekanik material.

Kajian mengenai penggunaan media pendingin padat alternatif yang bersifat lebih isolatif, seperti abu sekam padi dan bubuk tanah liat, masih terbatas, khususnya pada baja struktural SS400. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan abu sekam padi dan bubuk tanah liat sebagai media pendingin pada proses PWHT terhadap ketangguhan impact hasil las SMAW pada baja SS400. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan media pendinginan lambat non-konvensional yang ekonomis dan ramah lingkungan, serta menjadi acuan dalam pengendalian sifat mekanik sambungan las pada aplikasi industri.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh perlakuan *post weld heat treatment* (PWHT) dengan variasi media pendingin terhadap ketangguhan impact hasil pengelasan SMAW pada baja SS400. Variasi media pendingin PWHT berperan sebagai variabel bebas, sedangkan nilai impact sebagai variabel respon. Spesimen dibuat melalui proses pengelasan SMAW pada material SS400 dengan parameter pengelasan yang dikontrol untuk menjaga konsistensi hasil. Setelah proses pengelasan, spesimen diberikan perlakuan PWHT pada suhu sub-kritis sesuai acuan standar ASME, kemudian didinginkan menggunakan variasi media pendingin untuk menghasilkan perbedaan laju pendinginan.

Pengujian ketangguhan dilakukan menggunakan metode Charpy sesuai standar ASTM E23, sehingga diperoleh nilai energi serap impact sebagai indikator ketahanan material terhadap beban kejutan. Data hasil pengujian selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menggambarkan pengaruh perlakuan terhadap perubahan nilai ketangguhan material.

1. Variabel Penelitian

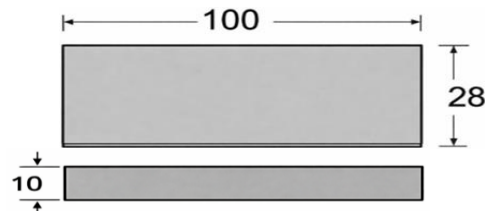
Dalam penelitian ini, variabel ditetapkan untuk mengkaji pengaruh perlakuan PWHT dengan variasi media pendingin terhadap perubahan sifat mekanik hasil pengelasan. Variabel yang digunakan meliputi faktor perlakuan sebagai variabel bebas, hasil pengujian sebagai variabel terikat, serta variabel kontrol yang dijaga konstan untuk menjaga konsistensi hasil. Variable dan parameter pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Variabel dan Parameter Penelitian

Variabel	Parameter
Bebas	Media pendinginan PWHT
Terikat	Nilai impact
Kontrol	Material spesimen, parameter proses pengelasan, suhu dan waktu PWHT

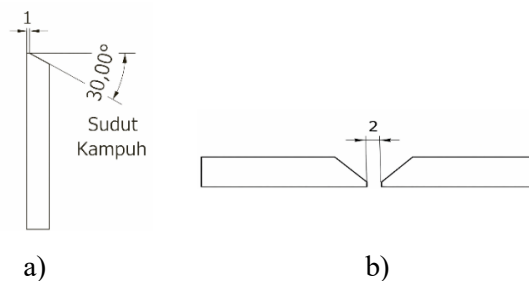
2. Desain Spesimen

Desain spesimen pada penelitian ini diawali dengan penentuan dimensi pelat dasar yang akan disambung, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 1**.



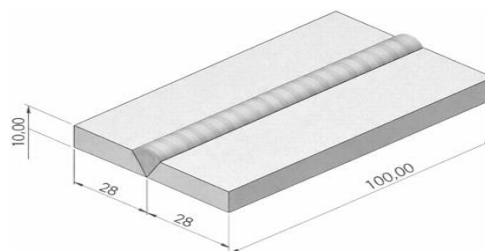
Gambar 1. Dimensi plat baja SS400

Selanjutnya, dilakukan perancangan geometri kampuh yang meliputi bentuk alur, ukuran root face, dan root gap untuk memastikan penetrasi las yang optimal dan keseragaman hasil pengelasan, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. a) Dimensi Kampuh dan *Root Face*; b) *Root Gap*

Setelah itu, bentuk spesimen setelah proses pengelasan selesai yang memperlihatkan hasil pengisian kampuh hingga bagian capping, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Desain Pengelasan Spesimen

3. Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen dilakukan melalui proses pemotongan pelat baja SS400 sesuai dimensi yang telah dirancang, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan kampuh serta persiapan permukaan dengan membersihkan area pengelasan dari kotoran, minyak, dan oksida. Proses pengelasan dilakukan menggunakan metode SMAW dengan parameter yang sama. Parameter pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Parameter Pengelasan

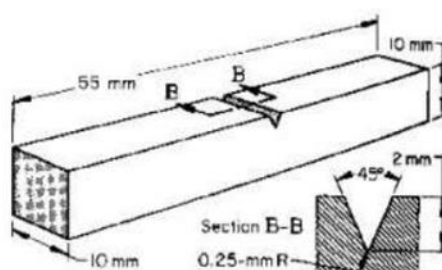
Parameter	Keterangan
Proses pengelasan	SMAW
Jenis arus	DC
Posisi pengelasan	1G
Elektroda	E6013 2,6 mm
Arus pengelasan	90 A

Setelah proses pengelasan selesai dilakukan dengan parameter yang telah ditetapkan, spesimen dibiarkan mengalami pendinginan secara alami pada suhu ruang. Selanjutnya, dilakukan pemeriksaan visual awal untuk memastikan bahwa hasil pengelasan telah mengisi kampuh dengan baik dan tidak terdapat cacat permukaan yang signifikan. Spesimen hasil pengelasan kemudian didokumentasikan untuk menunjukkan kondisi aktual sambungan las yang terbentuk, termasuk profil manik las pada permukaan. Tampilan spesimen setelah proses pengelasan ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Hasil Sambungan Las pada Spesimen

Setelah proses pengelasan selesai, spesimen selanjutnya dipotong untuk pembuatan benda uji impak sesuai dengan standar pengujian ASTM E23. Pemotongan dilakukan dengan memperhatikan posisi daerah las agar bagian yang diuji merepresentasikan kondisi sambungan, khususnya pada daerah heat affected zone (HAZ) dan logam las. Dimensi spesimen uji impak yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Desain Spesimen Uji Impak (Saragi et al., 2023)

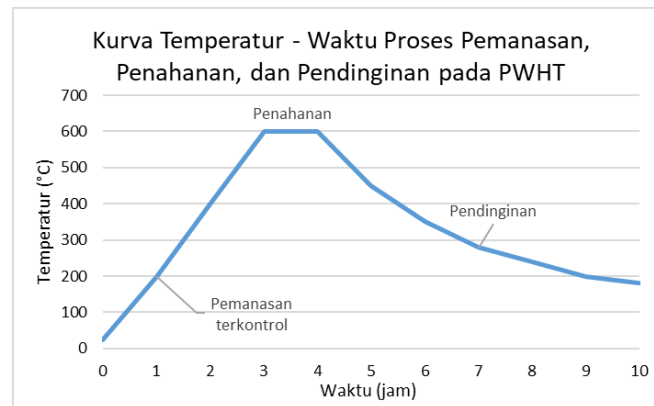
Pemotongan dilakukan secara hati-hati untuk menjaga keakuratan dimensi serta menghindari perubahan struktur akibat panas berlebih selama proses pemotongan. Proses pemotongan spesimen dari pelat hasil pengelasan ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Pemotongan Spesimen Impak

4. Proses PWHT

Proses *post weld heat treatment* (PWHT) dilakukan untuk mengurangi tegangan sisa akibat pengelasan serta meningkatkan ketangguhan material. Spesimen hasil pengelasan dipanaskan menggunakan tungku hingga mencapai suhu 600°C dengan waktu pemanasan selama 3 jam untuk memastikan kenaikan temperatur berlangsung secara bertahap dan merata. Setelah mencapai suhu yang ditentukan, spesimen ditahan (*holding time*) selama 1 jam agar distribusi panas homogen pada seluruh bagian spesimen. Kurva temperature – waktu proses pemanasan, pemanasan, dan pendinginan PWHT dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Kurva Temperatur – Waktu pada Proses PWHT

Selama proses pemanasan dan penahanan, spesimen ditempatkan secara teratur di dalam tungku untuk menjaga keseragaman temperatur, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Penempatan spesimen di dalam *furnace*

Setelah waktu penahanan selesai, spesimen dikeluarkan dari tungku dan langsung didinginkan menggunakan variasi media pendinginan, yaitu abu sekam padi, bubuk tanah liat, dan udara sebagai media pendinginan konvensional untuk menghasilkan perbedaan laju pendinginan. Proses pendinginan dilakukan dengan cara menimbun spesimen secara merata hingga suhu mendekati suhu lingkungan.

5. Pengujian Impak

Pengujian impak pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Charpy dengan spesifikasi alat yang telah ditentukan. Alat uji yang digunakan memiliki massa pemukul sebesar 22 kg dengan panjang lengan pendulum 800 mm. Sudut awal pemukulan ditetapkan sebesar 140°, yang digunakan sebagai acuan dalam menentukan energi potensial awal sebelum spesimen dikenai beban impak. Spesifikasi dan skema alat uji impak yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Spesifikasi Alat Uji Impak Charpy

Energi serap impak dihitung berdasarkan perubahan energi potensial bandul sebelum dan sesudah tumbukan, yang dinyatakan dengan Persamaan 1.

$$E = m \cdot g \cdot \lambda (\cos \beta - \cos \alpha) \dots (1)$$

dimana: E = Energi terserap mematahkan spesimen uji (J)

m = Berat Pendulum (Kg)

g = Gravitasi (9,81 m/s²)

λ = Jarak lengan pengayun (m)

α = Sudut posisi awal pendulum

β = Sudut posisi akhir pendulum

Selanjutnya, nilai impak dihitung dengan membandingkan energi serap terhadap luas penampang efektif spesimen pada daerah takik menggunakan Persamaan 2.

$$HI = \frac{E}{A} \dots (2)$$

dimana: HI = Nilai impak (J/mm²)

E = Energi terserap mematahkan spesimen uji (J)

A = Luas penampang spesimen di bawah takikan (mm²)

III. HASIL PENELITIAN

Hasil pengujian impak yang dilakukan pada spesimen setelah proses pengelasan dan perlakuan *post weld heat treatment* (PWHT) disajikan dalam bentuk nilai energi serap dan nilai impak untuk setiap variasi perlakuan. Data yang diperoleh menunjukkan perbedaan kemampuan material dalam menyerap energi kejut akibat pengaruh media pendingin yang digunakan. Nilai hasil pengujian tersebut disajikan secara lengkap pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil Uji Impak

Variasi	α	β	Energi Impak (Joule)	Nilai Impak (J/mm ²)	Rata-rata Nilai Impak (J/mm ²)
Abu Sekam Padi	140	101,5	97.84	1.223	1.107
	140	106,5	83.23	1.040	
	140	106	84.67	1.058	

Bubuk Tanah Liat	140	106	83.23	1.040	1.175
	140	99,5	103.77	1.297	
	140	102,5	94.89	1.186	
Udara	140	114	62.04	0.775	0.845
	140	112	67.58	0.845	
	140	110	73.21	0.915	

IV. PEMBAHASAN

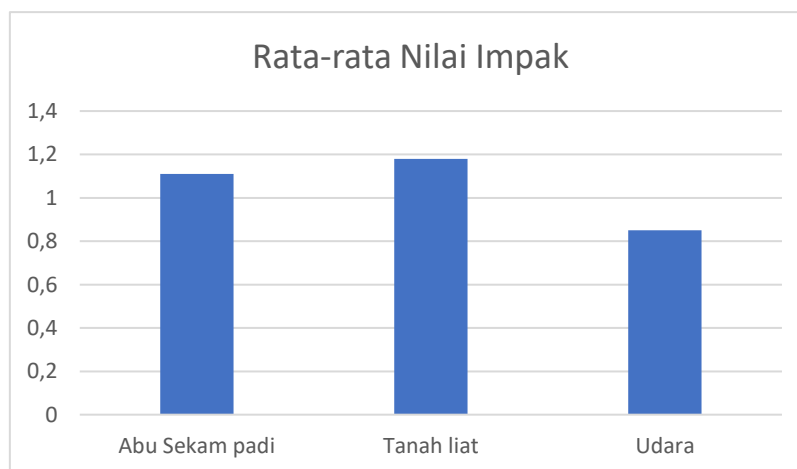
Pembahasan pada penelitian ini difokuskan pada pengaruh variasi media pendingin terhadap sifat mekanik material SS400 setelah perlakuan PWHT yang ditinjau melalui nilai energi serap dan ketangguhan impact. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap media pendingin memberikan respon yang berbeda terhadap material, yang ditunjukkan oleh variasi nilai energi serap dan *impact value* (HI).

Pada media pendingin tanah liat, diperoleh nilai rata-rata energi serap sebesar 94,07 J dengan ketangguhan impact sebesar 1,18 J/mm². Nilai ini merupakan yang tertinggi dibandingkan media lainnya, dengan rentang energi serap 84,61–103,73 J. Konsistensi nilai yang relatif tinggi menunjukkan bahwa proses pendinginan berlangsung lebih stabil, yang mengindikasikan kondisi perpindahan panas yang lebih terkendali sehingga mendukung terbentuknya struktur mikro yang lebih homogen.

Pada media abu sekam padi, diperoleh nilai rata-rata energi serap sebesar 88,88 J dengan ketangguhan impact 1,11 J/mm². Nilai ini berada di bawah tanah liat namun masih lebih tinggi dibandingkan pendinginan udara, dengan rentang energi serap 83,78–98,29 J. Penurunan nilai ini berkaitan dengan karakteristik media yang lebih berpori, sehingga perpindahan panas tidak berlangsung seefektif media yang lebih padat. Kondisi ini menyebabkan distribusi temperatur menjadi kurang merata yang berdampak pada variasi struktur mikro.

Sementara itu, pada pendinginan udara diperoleh nilai rata-rata energi serap sebesar 67,63 J dengan ketangguhan impact 0,85 J/mm², yang merupakan nilai terendah. Rentang energi serap pada kondisi ini berada pada 62,01–73,21 J. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa media penahan panas, laju pendinginan berlangsung lebih cepat dan tidak terkontrol, sehingga struktur mikro yang terbentuk cenderung kurang homogen dan menurunkan kemampuan material dalam menyerap energi impact.

Untuk memperjelas perbandingan ketangguhan impact antar media pendingin, nilai rata-rata impact value (HI) masing-masing media disajikan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Rata-rata Nilai Impact antara Media Pendingin

Berdasarkan **Gambar 10**, media pendingin tanah liat menghasilkan nilai ketangguhan impact tertinggi sebesar 1,175 J/mm², diikuti abu sekam padi sebesar 1,107 J/mm², dan pendinginan udara sebesar 0,845

J/mm². Perbedaan ini menunjukkan bahwa jenis media pendingin berpengaruh terhadap kemampuan material dalam menyerap energi sebelum patah. Pada penelitian ini, penggunaan media pendingin padat menghasilkan nilai dampak yang lebih tinggi dibandingkan pendinginan udara, yang mengindikasikan bahwa kondisi pendinginan yang lebih terkendali berkontribusi terhadap peningkatan ketangguhan material.

Temuan tersebut sejalan dengan penelitian (Arrochman & Rasyid, 2024) yang melaporkan nilai rata-rata ketangguhan dampak pada variasi media pendingin minyak sayur sebesar 0,788 J/mm², oli SAE 20 sebesar 0,9015 J/mm², dan udara sebesar 1,095 J/mm². Hasil tersebut menunjukkan bahwa pendinginan udara memberikan nilai ketangguhan dampak yang lebih tinggi dibandingkan media cair minyak sayur dan oli SAE 20. Hal ini dapat dijelaskan melalui perbedaan koefisien perpindahan panas masing-masing media yang memengaruhi laju pendinginan selama proses PWHT. Media cair memiliki koefisien perpindahan panas lebih tinggi sehingga mampu menyerap panas lebih cepat dari material, menyebabkan laju pendinginan menjadi lebih cepat. Pendinginan yang cepat ini cenderung membatasi waktu difusi atom selama transformasi fasa, sehingga meningkatkan potensi terbentuknya struktur yang lebih keras dan kurang ulet serta masih menyimpan tegangan sisa. Sebaliknya, udara dengan koefisien perpindahan panas yang lebih rendah menghasilkan pendinginan yang lebih lambat, memberikan waktu yang lebih panjang bagi proses relaksasi tegangan sisa dan transformasi mikrostruktur menuju kondisi yang lebih stabil. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan material dalam menyerap energi dampak.

Jika dibandingkan dengan penelitian ini, hasil yang diperoleh juga menunjukkan kecenderungan yang sama bahwa perbedaan karakteristik media pendingin yang padat dengan udara memengaruhi respon ketangguhan dampak material melalui mekanisme pengendalian laju pendinginan. Pada penelitian ini, media pendingin abu sekam padi dan tanah liat memiliki sifat termal yang cenderung bersifat isolatif akibat rendahnya konduktivitas panas serta struktur partikel yang mampu menghambat aliran panas. Kondisi tersebut menyebabkan perpindahan panas dari material berlangsung lebih lambat dibandingkan media udara, sehingga laju pendinginan menjadi lebih terkendali. Laju pendinginan yang lebih lambat ini memungkinkan berlangsungnya proses difusi atom dan relaksasi tegangan sisa secara lebih optimal selama tahap pendinginan pasca PWHT, yang pada akhirnya mendukung terbentuknya struktur mikro yang lebih stabil dan berkontribusi terhadap peningkatan ketangguhan dampak material.

Selain perbedaan karakteristik antara media pendingin padat, cair, dan udara, karakteristik diantara beberapa media pendingin padat juga berpengaruh pada proses PWHT. Hal ini terlihat pada hasil penelitian yang dilakukan oleh (Wahyunanta & Drastiawati, 2023) yang menggunakan media pendingin padat berupa pasir gunung, pasir sungai, dan pasir pantai pada proses PWHT menunjukkan perbedaan diantara ketiga media pendingin. Berdasarkan hasil pengujian tarik, nilai kekuatan tarik terendah diperoleh pada pasir gunung sebesar 394,5 MPa, diikuti pasir sungai sebesar 404,32 MPa, dan nilai tertinggi pada pasir pantai sebesar 413,93 MPa. Sementara itu, nilai regangan menunjukkan peningkatan berturut-turut yaitu 31% pada pasir gunung, 32% pada pasir sungai, dan 33% pada pasir pantai. Walaupun seluruh media pendingin tersebut termasuk kategori pendinginan lambat, perbedaan sifat mekanik tetap terjadi akibat variasi karakteristik fisik masing-masing media seperti kepadatan, ukuran butir, porositas, serta kemampuan kontak termal dengan permukaan material.

Hal yang serupa terlihat pada penelitian ini, di mana abu sekam padi dan tanah liat sama-sama berperan sebagai media yang memperlambat pendinginan, namun hasil ketangguhan dampak menunjukkan perbedaan. Tanah liat menghasilkan nilai dampak yang lebih tinggi, yang diduga karena mampu memberikan kontak yang lebih rapat terhadap permukaan material sehingga pelepasan panas berlangsung lebih stabil dan merata. Kondisi pendinginan yang lebih terkontrol tersebut memungkinkan proses relaksasi tegangan sisa dan penataan ulang struktur mikro berlangsung lebih baik, sehingga berpengaruh terhadap peningkatan ketangguhan dampak.

Selain itu, parameter proses PWHT juga turut mempengaruhi hasil yang diperoleh. Pada penelitian ini digunakan suhu 600°C dengan waktu penahanan 1 jam, sedangkan pada penelitian (Arrochman &

Rasyid, 2024) menggunakan suhu 850°C dengan waktu penahanan 90 menit, dan (Wahyunanta & Drastiawati, 2023) menggunakan suhu 900°C dengan waktu penahanan 10 menit. Perbedaan kondisi tersebut mempengaruhi proses termal selama perlakuan panas, termasuk relaksasi tegangan sisa dan perubahan struktur mikro material. Oleh karena itu, variasi parameter PWHT turut berkontribusi terhadap perbedaan nilai ketangguhan impact pada masing-masing penelitian.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi media pendingin pada proses PWHT terhadap sifat mekanik material SS400 yang ditinjau melalui energi serap dan ketangguhan impact, dapat disimpulkan bahwa variasi media pendingin memberikan pengaruh terhadap respon mekanik material akibat perbedaan laju perpindahan panas selama proses pendinginan. Media pendingin tanah liat menghasilkan nilai rata-rata energi serap dan ketangguhan impact tertinggi, diikuti oleh abu sekam padi, sedangkan nilai terendah diperoleh pada pendinginan udara. Hal ini menunjukkan bahwa media dengan karakteristik termal yang lebih mampu menghambat pelepasan panas cenderung menghasilkan ketangguhan material yang lebih baik karena proses pendinginan berlangsung lebih terkendali.

Perbedaan hasil tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh jenis media pendingin, tetapi juga oleh karakteristik fisik masing-masing media seperti kepadatan, porositas, ukuran partikel, serta kemampuan kontak termal dengan permukaan material yang turut memengaruhi efektivitas perpindahan panas selama proses PWHT. Dengan demikian, urutan ketangguhan impact material SS400 dari yang tertinggi hingga terendah adalah tanah liat, abu sekam padi, dan udara.

Selain itu, disarankan bagi praktisi pengelasan maupun industri yang menggunakan material SS400 untuk mempertimbangkan penggunaan media pendingin yang mampu memberikan pengendalian laju pendinginan yang lebih stabil guna meningkatkan ketangguhan impact material. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan variasi parameter PWHT yang lebih luas serta analisis mikrostruktur yang lebih mendalam agar hubungan antara karakteristik pendinginan, struktur mikro, dan sifat mekanik material dapat dipahami secara lebih komprehensif.

VI. REFERENSI

- Arrochman, A. F., & Rasyid, A. H. A. (2024). Pengaruh Variasi Media Pendingin Setelah PWHT Pengelasan SMAW Baja ST37 Terhadap Ketangguhan Dan Struktur Mikro. *Jtm*, 13(02), 75–82. <https://doi.org/10.26740/jtm.v13n02.p75-82>
- Azis, R. A., & Saputro, H. (2019). Pengaruh Variasi Diameter Elektroda E7018 Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, dan Struktur Mikro Pengelasan pada Baja Karbon Rendah Jenis SS400 dengan Metode SMAW. *JURNAL TEKNIK*, 17(2), 94–105.
- Chairul, N., Irzal, Muliati, & Nurdin, H. (2022). Pengaruh Variasi Kuat Arus Terhadap Kekuatan Tarik Hasil Pengelasan Smaw Pada Baja Karbon Rendah Dengan Elektroda E-7018. *Jurnal Vokasi Mekanika (VoMek)*, 4(4), 167–172. <https://doi.org/10.24036/vomek.v4i4.470>
- Dzaky, M. D., Sari, D. Y., Waskito, & Adri, J. (2025). Effect of Weld Groove Type Variations on Deformation in Structural Carbon Steel Butt Joint Welding Using the Finite Element Method. *Jurnal Vokasi Mekanika (VoMek)*, Vol 7 No 3 (2025): *Jurnal Vokasi Mekanika*, 367–379. <http://vomek.ppj.unp.ac.id/index.php/vomek/article/view/877/433>
- Jeffus, L. (2012). *Welding and Metal Fabrication*. Delmar.
- Jiang, W., Luo, Y., Zeng, Q., Wang, J., & Tu, S. T. (2021). Residual stresses evolution during strip clad welding, post welding heat treatment and repair welding for a large pressure vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 189, 104259. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104259>
- Kalyankar, V. D., & Chudasama, G. (2018). Effect of post weld heat treatment on mechanical properties of pressure vessel steels. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24675–24684. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.265>

- Kusminah, I. L., Anggara, D., Wardani, D., Widodo, E. W. R., Nafi, M., Handoko, L., Djati, A. L., & Trianto, R. A. (2024). Analysis of the Effect of PWHT on the Corrosion Test of API 5L X65 Material in Submerged Arc Welding. *Journal of Mechanical Engineering, Science, and Innovation*, 4(2), 122–132. <https://doi.org/10.31284/j.jmesi.2024.v4i2.6556>
- Lancaster, J. F. (1980). *Metallurgy of Welding Third Edition* (3rd ed.). Allen & Unwin.
- Mansjur, Z., & Suharto, M. F. (2024). Pengaruh Media Pendingin Post–Weld Heat Treatment (PWHT) Terhadap Karakteristik Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Hasil Pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW). *Jurnal Mesin Nusantara*, 7(1), 126–137. <https://doi.org/10.29407/jmn.v7i1.22434>
- Nasra, K. A., Zuldesmi, & Kewas, J. C. (2020). Pengaruh Post Weld Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon ST42 dengan Pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding). *ACTUATOR: Jurnal Teknik ...*, 1(1), 26–36. <http://ejurnal-mapalus-unima.ac.id/index.php/actuator/article/view/115>
- Pasaribu, A. L., Irzal, Yufrizal, A., & Purwantono. (2022). ANALISA PERBANDINGAN HASIL PENGELASAN SMAW (SHIELD METAL ARC WELDING) DAN LAS MIG (METAL INERT GAS) TERHADAP KEKUATAN TARIK BAJA KARBON RENDAH ST 37. *Jurnal Vokasi Edukasi (VomEk)*, Vol 4 No 2 (2022): *Jurnal Vokasi Mekanika*, 39–41. <http://vomek.ppj.unp.ac.id/index.php/vomek/article/view/341/189>
- Priyono, B., Irzal, Nurdin, H., & Primawati. (2021). ANALISIS PENGARUH VARIASI KUAT ARUS PENGELASAN METAL INERT GAS (MIG) TERHADAP KETANGGUHAN MATERIAL SAMBUNGAN LAS PADA BAJA ST 37. *Jurnal Vokasi Edukasi (VomEk)*, Vol 3 No 3 (2021): *Jurnal Vokasi Mekanika*, 8–14. <http://vomek.ppj.unp.ac.id/index.php/vomek/article/view/207/118>
- Ramadhani, S., Basyirun, B., Rusiyanto, R., & Sunyoto, S. (2022). Pengaruh Variasi Temperatur Preheat Pada Pengelasan Smaw Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Baja Karbon SS400. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, 7(1), 12–20. <https://doi.org/10.21831/dinamika.v7i1.46929>
- Roslan, N. S., Hadzir, M. M., Ismail, I. F., Mat, M. N. H., & Yusup, E. M. (2024). A Review on The Effect of Post-Weld Heat Treatment (PWHT) on Its Thermal Analysis and Mechanical Properties of Welded Metallic Pipe. *International Journal of Integrated Engineering*, 16(2), 296–313. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.02.031>
- Saragi, J. F. H., Bahri Pratama, A., Boangmanalu, E. P. D., Qadry, A., & Sinaga, F. T. H. (2023). Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Impak pada Material Besi Nako 10 mm. *Jurnal Mesil (Mesin Elektro Sipil)*, 04(01), 45–51. <https://ceredindonesia.or.id/index.php/mesil>
- Song, T., Wang, Z., Bao, Y., Gu, C., & Zhang, Z. (2024). Effect of Silicon–Manganese Deoxidation on Oxygen Content and Inclusions in Molten Steel. *Processes*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/pr12040767>
- Syah, K. R., Erizon, N., Sari, D. Y., & Purwantono. (2023). PENGARUH VARIASI MEDIA PENDINGIN AIR DAN OLI TERHADAP KEKUATAN TARIK PADA PENGELASAN SMAW (SHIELD METAL ARC WELDING) BAJA ST 37. *Jurnal Vokasi Edukasi (VomEk)*, Vol 5 No 1 (2023): *Jurnal Vokasi Mekanika*, 89–96. <http://vomek.ppj.unp.ac.id/index.php/vomek/article/view/489/265>
- Wahyunanta, C., & Drastiawati, N. S. (2023). Pengaruh Variasi Media dalam Proses PWHT Pengelasan SMAW untuk Material Baja SS400 terhadap Nilai Kekerasan dan Kekuatan Tarik. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(1), 13–18.