

**Ranah Research**

E-ISSN: 2655-0865

Journal of Multidisciplinary Research and Development

082170743613

ranahresearch@gmail.com

<https://jurnal.ranahresearch.com>DOI: <https://doi.org/10.38035/rrj.v8i4><https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Optimalisasi Serbuk Tempurung Kelapa dan MgO–SiO₂ pada Fluks Elektroda *Shield Metal Arc Welding* (SMAW) Untuk Peningkatan Kualitas Sambungan Las

Zelvia Momicia¹, Nurato Nurato²¹Master of Mechanical Engineering program, Faculty of Engineering, Universitas Mercu Buana, Meruya Selatan, Jakarta 11650, Indonesia,²Master of Mechanical Engineering program, Faculty of Engineering, Universitas Mercu Buana, Meruya Selatan, Jakarta 11650, Indonesia,Corresponding Author: Zelviamonica1021@gmail.com¹

Abstract: *The Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process is one of the most widely used metal-joining methods in industry due to its flexibility, cost efficiency, and ability to produce strong weld joints. The quality of the weld is strongly influenced by the composition and characteristics of the electrode flux, which serves to protect the molten metal, stabilize the electric arc, and form a protective slag layer. The optimization of MgO–SiO₂ and coconut shell powder combinations in SMAW electrode flux aims to improve the weld quality of medium-carbon steel joints. The flux was prepared with varying compositions of MgO–SiO₂ and coconut shell powder (10%, 20%, and 30%). The formulated flux was then applied in the SMAW process under constant current and voltage conditions. The weld results were evaluated through tensile tests, hardness tests, impact tests, and microstructure examinations to assess strength, toughness, and microstructural characteristics. This effort is expected to produce an MgO–SiO₂ and coconut-shell-based electrode flux formulation capable of enhancing weld joint quality while supporting the application of more environmentally friendly green welding concepts.*

Keyword: *SMAW, electrode flux, MgO–SiO₂, coconut shell, testing*

Abstrak: Proses pengelasan Shield Metal Arc Welding (SMAW) merupakan salah satu metode penyambungan logam yang banyak diterapkan di industri karena fleksibilitas, efisiensi biaya, serta kemampuannya menghasilkan sambungan yang kuat. Kualitas hasil pengelasan sangat dipengaruhi oleh komposisi dan karakteristik fluks elektroda yang berfungsi melindungi logam cair, menstabilkan busur listrik, dan membentuk lapisan slag pelindung. Optimalisasi kombinasi MgO–SiO₂ dan serbuk tempurung kelapa dalam fluks elektroda SMAW bertujuan meningkatkan kualitas sambungan las baja karbon sedang. Fluks dibuat dengan variasi komposisi MgO–SiO₂ dan serbuk tempurung kelapa (10%, 20%, dan 30%). Selanjutnya, fluks yang telah dibuat digunakan pada proses SMAW dengan arus dan tegangan yang dikondisikan konstan. Hasil las dievaluasi melalui uji tarik, kekerasan, impak, dan Uji struktur mikro guna menilai kekuatan, ketangguhan, serta karakteristik mikrostruktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi fluks dengan kandungan serbuk tempurung

kelapa sebesar 20% (Varian 2) menghasilkan performa terbaik dengan nilai kekerasan mencapai 228,3 HV, beban tarik maksimum sebesar 68,44 kN, dan energi impak sebesar 117 J. Peningkatan sifat mekanik tersebut berkaitan dengan terbentuknya struktur mikro ferrite-pearlite yang lebih homogen dan berbutir halus dibandingkan variasi lainnya. Upaya ini diharapkan mampu menghasilkan formulasi fluks elektroda berbasis MgO-SiO₂ dan serbuk tempurung kelapa yang mampu meningkatkan mutu sambungan las sekaligus mendukung penerapan konsep green welding yang lebih ramah lingkungan.

Kata Kunci: SMAW, fluks elektroda, MgO-SiO₂, tempurung kelapa, uji mekanik

PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan salah satu teknologi penyambungan logam yang memiliki peranan penting dalam berbagai sektor industri, seperti konstruksi, manufaktur, otomotif, perkapalan, dan fabrikasi baja. Kualitas sambungan las menjadi faktor utama yang menentukan keandalan suatu konstruksi karena berpengaruh langsung terhadap kekuatan, ketangguhan, dan umur pakai komponen. Salah satu metode pengelasan yang paling banyak digunakan adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) karena memiliki peralatan yang relatif sederhana, biaya operasional yang rendah, serta mampu digunakan pada berbagai posisi pengelasan dan jenis material (Surendran et al., 2018; Wang et al., 2018).

Pada proses SMAW, kualitas hasil pengelasan tidak hanya dipengaruhi oleh parameter pengelasan, tetapi juga oleh karakteristik elektroda yang digunakan, khususnya komposisi fluks pada lapisan elektroda. Fluks berfungsi sebagai pelindung logam cair dari kontaminasi atmosfer, menghasilkan gas pelindung, menstabilkan busur listrik, serta membentuk slag yang berperan dalam mengendalikan proses metalurgi selama pengelasan (Coetsee, 2022). Komposisi fluks yang tepat dapat meningkatkan sifat mekanik sambungan las, memperbaiki struktur mikro, serta mengurangi cacat pengelasan yang dapat menurunkan kualitas sambungan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa komponen oksida dalam fluks memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik hasil las. Silikon dioksida (SiO₂) diketahui mampu meningkatkan stabilitas busur dan memperbaiki karakteristik slag sehingga menghasilkan penetrasi yang lebih baik (Kumar, 2017). Magnesium oksida (MgO) berperan dalam mengendalikan viskositas slag, meningkatkan kestabilan termal, serta membantu pembentukan struktur logam las yang lebih homogen (Coetsee, 2022). Kombinasi MgO dan SiO₂ juga dilaporkan mampu meningkatkan kemampuan slag dalam menyerap inklusi oksida sehingga menghasilkan logam las yang lebih bersih dan berkualitas tinggi (Dong et al., 2016).

Di sisi lain, perkembangan teknologi pengelasan saat ini tidak hanya berfokus pada peningkatan kualitas sambungan, tetapi juga pada aspek keberlanjutan lingkungan. Penggunaan material berbasis biomassa sebagai bahan tambahan fluks menjadi salah satu alternatif yang menarik untuk mendukung konsep *green welding*. Tempurung kelapa merupakan limbah biomassa yang melimpah di Indonesia dan memiliki kandungan karbon tinggi serta stabilitas termal yang baik. Setelah melalui proses aktivasi, serbuk tempurung kelapa berpotensi berfungsi sebagai sumber karbon aktif yang dapat membantu proses deoksidasi, meningkatkan kestabilan busur, serta mengurangi pembentukan porositas pada logam las (Bichang, 2019; Afolalu et al., 2023).

Pemanfaatan serbuk tempurung kelapa telah banyak diteliti pada bidang material komposit dan adsorben, namun penerapannya sebagai komponen fluks elektroda SMAW masih relatif terbatas. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penambahan serbuk tempurung kelapa mampu meningkatkan sifat mekanik material dan mengurangi porositas, tetapi umumnya hanya digunakan sebagai bahan tunggal tanpa dikombinasikan dengan sistem oksida anorganik yang berfungsi mengontrol karakteristik slag dan transfer panas selama

proses pengelasan. Kondisi ini menunjukkan masih adanya kesenjangan penelitian (*research gap*) terkait integrasi material biomassa dengan sistem fluks berbasis oksida pada elektroda SMAW.

Berdasarkan kajian tersebut, kombinasi serbuk tempurung kelapa dengan sistem MgO–SiO₂ diperkirakan mampu menghasilkan sinergi antara fungsi karbon aktif sebagai agen pereduksi dan pembentuk gas pelindung dengan fungsi MgO–SiO₂ sebagai pengontrol sifat fisik-kimia slag. Kombinasi ini berpotensi meningkatkan kualitas sambungan las melalui perbaikan struktur mikro, peningkatan sifat mekanik, serta penurunan emisi fume yang dihasilkan selama proses pengelasan. Namun demikian, hingga saat ini masih sangat sedikit penelitian yang secara khusus mengkaji pengaruh kombinasi serbuk tempurung kelapa dan MgO–SiO₂ sebagai formulasi fluks elektroda SMAW.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengembangan fluks elektroda SMAW berbasis biomassa tempurung kelapa yang dikombinasikan dengan MgO dan SiO₂ sebagai material pengendali karakteristik slag. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan formulasi fluks yang tidak hanya meningkatkan kualitas sambungan las, tetapi juga mendukung penerapan teknologi pengelasan yang lebih ramah lingkungan melalui pemanfaatan limbah biomassa.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi serbuk tempurung kelapa, MgO, dan SiO₂ terhadap sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las SMAW, menentukan komposisi fluks optimum yang mampu menghasilkan kualitas sambungan terbaik, serta mengevaluasi potensi serbuk tempurung kelapa sebagai bahan alternatif dalam pengembangan fluks elektroda yang berkelanjutan. Pertanyaan penelitian yang diajukan adalah: (1) bagaimana pengaruh variasi komposisi serbuk tempurung kelapa pada fluks berbasis MgO–SiO₂ terhadap sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las SMAW; (2) komposisi fluks manakah yang menghasilkan kualitas sambungan las terbaik; dan (3) sejauh mana serbuk tempurung kelapa dapat digunakan sebagai bahan biomassa alternatif untuk mendukung konsep *green welding*.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi fluks berbasis serbuk tempurung kelapa dan komposit MgO–SiO₂ terhadap kualitas sambungan las hasil proses *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah persentase serbuk tempurung kelapa pada fluks elektroda, yaitu 10%, 20%, dan 30%, sedangkan variabel terikat meliputi nilai kekuatan tarik, kekerasan, ketangguhan impact, dan karakteristik struktur mikro hasil pengelasan.

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pengelasan dan Laboratorium Pengujian Material. Material yang digunakan berupa baja karbon sedang AISI 1045 dengan ukuran 100 mm × 50 mm × 8 mm sebagai logam induk. Bahan penyusun fluks terdiri atas magnesium oksida (MgO), silikon dioksida (SiO₂), titanium dioksida (TiO₂), kaolin, serbuk besi (*iron powder*), natrium silikat (Na₂SiO₃), dan serbuk tempurung kelapa berukuran 100 mesh yang telah diaktivasi. Elektroda yang digunakan memiliki kawat inti baja karbon berdiameter 3,2 mm.

Pembuatan fluks diawali dengan persiapan serbuk tempurung kelapa yang dibersihkan, dikeringkan, digiling hingga lolos ayakan 100 mesh, kemudian diaktivasi menggunakan larutan KOH 10% dan dipanaskan pada suhu 300°C selama 2 jam. Selanjutnya, seluruh bahan fluks ditimbang sesuai komposisi yang telah ditentukan dan dicampur menggunakan *mechanical mixer* hingga homogen. Campuran fluks kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 120°C selama 4 jam. Fluks yang telah kering dilapiskan pada kawat inti elektroda menggunakan metode *extrusion coating* dan dikeringkan kembali pada suhu 150°C selama 2 jam sebelum digunakan dalam proses pengelasan.

Komposisi bahan penyusun fluks dasar yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1. Komposisi campuran Fluks:

Tabel 1. Komposisi Campuran Fluks

Komponen	Fungsi	Varian 1 (10%)	Varian 2 (20%)	Varian 3 (30%)
Serbuk tempurung kelapa (karbon aktif)	Gas pelindung, stabilizer busur	50 g (10%)	100 g (20%)	150 g (30%)
TiO ₂ (Rutile)	Pembentuk slag dan stabilitas busur	175 g (35%)	150 g (30%)	140 g (28%)
Kaolin	Binder mineral dan penguat slag	75 g (15%)	75 g (15%)	75 g (15%)
Fe Powder	Pengisi Fe dan stabilizer transfer logam	50 g (10%)	50 g (10%)	50 g (10%)
MgO	Penstabil dan pengeras slag	25 g (5%)	25 g (5%)	25 g (5%)
SiO ₂	Pengikat slag	25 g (5%)	25 g (5%)	25 g (5%)
Natrium Silikat (Na ₂ SiO ₃)	Binder utama	100 g (20%)	75 g (15%)	35 g (7%)
Total		500 g	500 g	500 g

Proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin SMAW arus DC dengan parameter pengelasan berupa arus 120 A, tegangan 25 V, polaritas DCEP (*Direct Current Electrode Positive*), dan posisi pengelasan 1G (*flat position*). Sambungan yang digunakan adalah *butt joint* pada pelat baja karbon sedang. Setelah proses pengelasan selesai, spesimen didinginkan pada suhu ruang selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian.

Pengujian sifat mekanik meliputi uji tarik menggunakan standar ASTM E8/E8M, uji impak metode Charpy sesuai ASTM E23, dan uji kekerasan Vickers berdasarkan ASTM E384. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop metalografi pada daerah logam las (*weld metal*), daerah terpengaruh panas (*heat affected zone/HAZ*), dan logam induk (*base metal*) setelah melalui proses preparasi metalografi dan etsa menggunakan larutan nital 2–5%.

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan inferensial. Analisis deskriptif dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata dan simpangan baku dari setiap parameter pengujian. Selanjutnya dilakukan uji *Analysis of Variance* (ANOVA) pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi fluks terhadap sifat mekanik hasil pengelasan. Hasil pengujian mekanik kemudian dikorelasikan dengan perubahan struktur mikro untuk menentukan formulasi fluks yang memberikan kualitas sambungan las terbaik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Variasi Fluks terhadap Kekerasan Sambungan Las

Hasil pengujian kekerasan Vickers menunjukkan bahwa variasi komposisi fluks elektroda berbasis serbuk tempurung kelapa (CSP) dan MgO–SiO₂ memberikan pengaruh terhadap kekerasan logam las. Nilai kekerasan rata-rata masing-masing variasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan Vickers

Variasi	Rata-rata Kekerasan (HV)
Varian 1	175,4
Varian 2	228,3
Varian 3	192,7

Hasil pengujian menunjukkan bahwa Varian 2 menghasilkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 228,3 HV, meningkat 30,16% dibandingkan Varian 1 yang hanya mencapai 175,4 HV. Sementara itu, Varian 3 menghasilkan nilai kekerasan sebesar 192,7 HV.

Peningkatan kekerasan pada Varian 2 menunjukkan bahwa kombinasi CSP sebesar 20% dengan MgO–SiO₂ mampu menghasilkan karakteristik slag yang lebih baik sehingga proses solidifikasi logam las berlangsung lebih optimal. MgO berperan meningkatkan stabilitas termal slag, sedangkan SiO₂ membantu pembentukan lapisan pelindung yang efektif terhadap kontaminasi atmosfer. Kondisi ini menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dan homogen sehingga meningkatkan ketahanan terhadap deformasi plastis.

Sebaliknya, peningkatan CSP hingga 30% pada Varian 3 menyebabkan penurunan kekerasan. Penurunan ketangguhan pada Varian 3 diduga berkaitan dengan meningkatnya kandungan karbon yang berasal dari serbuk tempurung kelapa sehingga mempengaruhi transformasi mikrostruktur selama proses pendinginan logam las. Pada baja karbon sedang AISI 1045, peningkatan kandungan karbon dapat mendorong terbentuknya fraksi pearlite yang lebih tinggi serta kemungkinan munculnya daerah mikrostruktur yang lebih keras dan rapuh pada batas butir. Selain itu, kandungan karbon yang berlebihan dapat meningkatkan kecenderungan terbentuknya inklusi oksida dan karbida yang bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan (stress concentration sites). Inklusi tersebut dapat mempermudah inisiasi dan propagasi retak ketika material menerima beban impact (Coetsee.,2022).

Fenomena ini sejalan dengan teori metalurgi pengelasan yang menyatakan bahwa peningkatan kandungan karbon ekuivalen pada logam las cenderung meningkatkan kekerasan namun menurunkan ketangguhan akibat berkurangnya kemampuan deformasi plastis material. (Coetsee.,2022) melaporkan bahwa perubahan komposisi slag dan transfer unsur selama proses pengelasan dapat memengaruhi pembentukan mikrostruktur serta sifat mekanik logam las. Selain itu, (Başyigit dan Solak.,2020) menunjukkan bahwa perubahan karakteristik fluks berpengaruh langsung terhadap distribusi ferrite–pearlite, ukuran butir, dan ketangguhan sambungan las. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kandungan CSP sebesar 20% menghasilkan keseimbangan optimum antara pembentukan ferrite–pearlite yang homogen dan pengendalian inklusi dalam logam las, sedangkan peningkatan hingga 30% mulai menurunkan ketangguhan akibat meningkatnya kecenderungan terbentuknya mikrostruktur yang lebih getas.

Pengaruh Variasi Fluks terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las.

Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sambungan las dalam menahan beban tarik maksimum sebelum mengalami kegagalan. Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar variasi fluks

Tabel 3. Hasil Uji Tarik

Variasi	Beban Maksimum (kN)	Regangan (%)
Varian 1	11,25	2,33
Varian 2	68,44	2,62
Varian 3	62,97	3,07

Varian 2 menghasilkan beban maksimum tertinggi sebesar 68,44 kN, sedangkan Varian 1 hanya mencapai 11,25 kN. Terjadi peningkatan kekuatan tarik sebesar 508,4% pada Varian 2 dibandingkan Varian 1.

Tingginya kekuatan tarik pada Varian 2 menunjukkan bahwa kombinasi CSP 20% dan MgO–SiO₂ mampu menghasilkan kualitas logam las yang lebih baik melalui peningkatan stabilitas busur, pembentukan slag yang optimal, dan pengurangan cacat pengelasan. Struktur mikro yang lebih homogen juga berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik karena distribusi tegangan menjadi lebih merata selama pembebanan.

Varian 3 masih menunjukkan kekuatan tarik yang tinggi sebesar 62,97 kN, namun sedikit lebih rendah dibandingkan Varian 2. Menariknya, Varian 3 menghasilkan regangan

tertinggi sebesar 3,07%, yang menunjukkan peningkatan keuletan material. Kondisi ini mengindikasikan adanya hubungan timbal balik (*trade-off*) antara kekuatan dan keuletan akibat peningkatan kandungan CSP hingga 30%.

Pengaruh Variasi Fluks terhadap Ketangguhan Impak.

Pengujian impak Charpy dilakukan untuk mengetahui kemampuan sambungan las dalam menyerap energi benturan. Hasil pengujian impak ditunjukkan pada Tabel 3.

Variasi	Energi Impak (J)
Varian 1	14
Varian 2	117
Varian 3	11

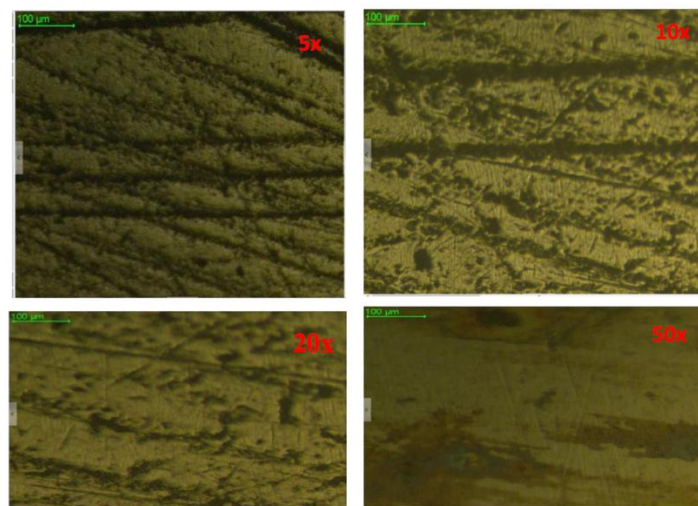
Nilai impak tertinggi diperoleh pada Varian 2 sebesar 117 J, sedangkan Varian 1 dan Varian 3 masing-masing hanya menghasilkan 14 J dan 11 J. Peningkatan energi impak pada Varian 2 mencapai 735,7% dibandingkan Varian 1.

Tingginya nilai impak pada Varian 2 menunjukkan bahwa struktur mikro yang terbentuk mampu menghambat propagasi retak secara efektif. Homogenitas ferrite dan pearlite yang lebih baik menyebabkan energi yang dibutuhkan untuk memperpanjang retakan menjadi lebih besar. Selain itu, kombinasi MgO–SiO₂ menghasilkan slag yang mampu mengurangi porositas dan inklusi sehingga meningkatkan integritas logam las.

Sebaliknya, Varian 3 menunjukkan penurunan drastis ketangguhan meskipun memiliki kekuatan tarik yang relatif tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan karbon akibat penambahan CSP yang terlalu besar dapat meningkatkan kecenderungan terbentuknya struktur yang lebih keras namun lebih getas.

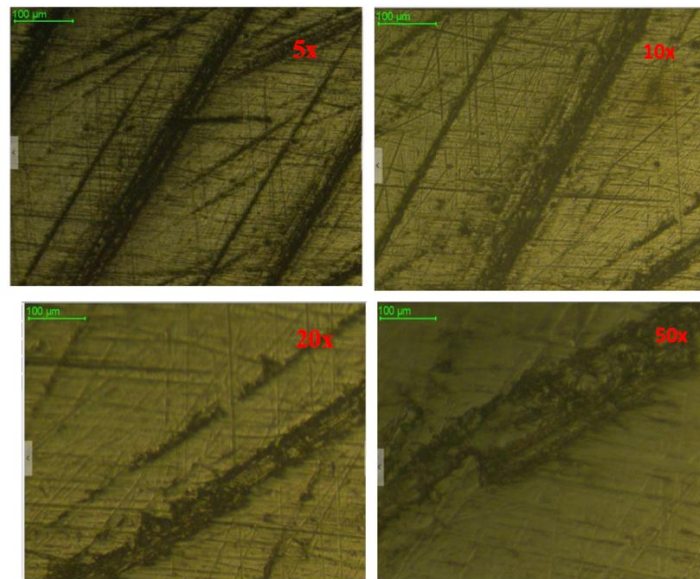
Pengaruh Variasi Fluks terhadap Struktur Mikro

Pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa variasi komposisi fluks mempengaruhi distribusi ferrite dan pearlite pada logam las.



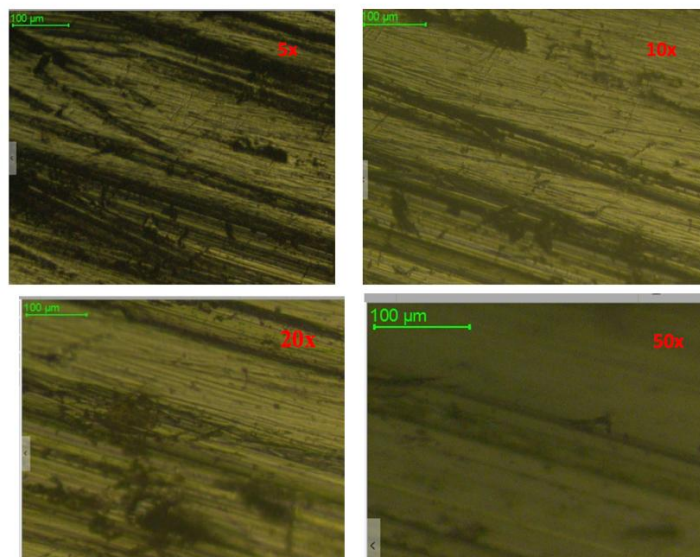
Gambar 1. Varian 1 Uji Mikroskop

Pada Varian 1, struktur mikro didominasi ferrite kasar dengan distribusi pearlite yang belum merata. Ukuran butir yang relatif besar menyebabkan sifat mekanik yang rendah, ditunjukkan oleh nilai kekerasan, kekuatan tarik, dan impak yang paling rendah di antara seluruh variasi.



Gambar 2. Varian 2 Uji Mikroskop

Varian 2 menunjukkan struktur mikro paling homogen dengan ukuran butir yang lebih halus dan distribusi ferrite–pearlite yang merata. Struktur mikro yang halus meningkatkan jumlah batas butir yang berfungsi menghambat pergerakan dislokasi sesuai teori Hall–Petch. Akibatnya, Varian 2 menghasilkan kekerasan, kekuatan tarik, dan ketangguhan impak tertinggi.



Gambar 3. Varian 2 Uji Mikroskop

Pada Varian 3, struktur mikro masih relatif rapat tetapi homogenitas mulai menurun akibat peningkatan kandungan CSP. Kondisi ini menyebabkan material tetap memiliki kekuatan yang tinggi, namun ketangguhannya menurun secara signifikan akibat meningkatnya kecenderungan struktur yang lebih keras dan getas.

Hubungan CSP–MgO–SiO₂ terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan CSP dalam sistem fluks MgO–SiO₂ memberikan pengaruh langsung terhadap karakteristik slag, struktur mikro, dan sifat mekanik hasil pengelasan. Kandungan CSP sebesar 20% menghasilkan kondisi optimum karena mampu meningkatkan kestabilan busur, memperbaiki perlindungan logam cair, serta

menghasilkan struktur ferrite–pearlite yang lebih homogen. Kondisi tersebut menghasilkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 228,3 HV, kekuatan tarik tertinggi sebesar 68,44 kN, dan ketangguhan impak tertinggi sebesar 117 J.

Dengan demikian, formulasi fluks berbasis CSP 20% dan MgO–SiO₂ dapat dinyatakan sebagai komposisi optimum dalam penelitian ini karena mampu menghasilkan keseimbangan terbaik antara kekerasan, kekuatan tarik, ketangguhan impak, dan kualitas struktur mikro sambungan las SMAW.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi komposisi serbuk tempurung kelapa dalam fluks berbasis MgO–SiO₂ berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las SMAW pada baja karbon sedang AISI 1045. Komposisi dengan kandungan serbuk tempurung kelapa sebesar 20% menghasilkan performa sambungan las yang paling optimal melalui peningkatan kekerasan, kekuatan tarik, dan ketangguhan impak yang didukung oleh terbentuknya struktur ferrite–pearlite yang lebih homogen dan halus. Sebaliknya, peningkatan kandungan serbuk tempurung kelapa hingga 30% menyebabkan penurunan ketangguhan akibat meningkatnya kecenderungan terbentuknya mikrostruktur yang lebih keras dan getas.

Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah tempurung kelapa sebagai material biomassa pada fluks elektroda SMAW berpotensi mendukung pengembangan teknologi pengelasan yang lebih berkelanjutan tanpa mengurangi kualitas sambungan las. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi ketahanan korosi sambungan las yang dihasilkan serta menganalisis emisi fume dan gas selama proses pengelasan guna mendukung pengembangan konsep green welding secara lebih komprehensif.

REFERENSI

- Afolalu, S. A., et al. (2023). *Bio-waste as an enhancement additive for nano-flux powder in welding: An overview*. IOP Conference Series, 01082, 1–12.
- Afolalu, S. A., et al. (2023). *Development of nano-flux powder from bio-waste for welding application*. Materials Today: Proceedings, 212, 1–8.
- Afolalu, S. A., Ogedengbe, T. S., Oke-Owo, T. A., & Ting, T. T. (2025). *Development of hybrid electrode for welding using nano additives from agro-wastes*. Revue des Composites et des Matériaux Avancés.
- Başıyigit, A. B., & Solak, B. (2020). *The effects of flux type on mechanical and microstructural properties of S235 structural steel by submerged arc welding*. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 7(2), 659–666.
- Bichang, D. O. (2019). *Coconut shell agro-waste-derived cellulosic powder as a potential reinforcement for sustainable polymeric composite application*.
- Coetsee, T. (2022). *The aluminium-assisted transfer of titanium in the submerged arc welding of carbon steel: Process mineralogy and thermochemical analysis* (Doctoral dissertation).
- Dahlia, D., Sembiring, S., & Simanjuntak, W. (2018). *Pengaruh suhu sintering terhadap karakteristik fisis komposit MgO–SiO₂*. Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika.
- Dong, Y., Jiang, Z., & Yu, A. (2016). *Dissolution behavior of alumina-based inclusions in CaF₂–Al₂O₃–CaO–MgO–SiO₂ slag used for the electroslag metallurgy process*. Environmental Science: Advances. (2026). *Occupational health risks from welding emissions: Exposure and deposition of PM10, PM2.5, and ultrafine particles across welding methods*.
- Fadhil, M. (2018). *Pengaruh posisi pengelasan dan jenis elektroda E7016 dan E7018 terhadap kekuatan tarik baja karbon rendah TRS 400*.

- Fan, J., Zhang, J., & Zhang, D. (2024). *Advancing methodologies for elemental transfer quantification in the submerged arc welding process*.
- FAO. (2009). *Coconut production in Indonesia*. Food and Agriculture Organization Statistics.
- Gautam, U. (2017). *Effect of flux in submerged arc welding: A review*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 4(12).
- Gupta, A. (2022). *Investigation of thermophysical and physicochemical characteristics of Al_2O_3 - SiO_2 - CaO - Na_3AlF_6 flux for SMAW electrode coating*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. (2017). *Study the effect of SiO_2 -based flux on dilution in submerged arc welding* (pp. 1–9).
- Jasni, M. Z., et al. (2017). *Preparation and characterization of activated carbon from *Cocos nucifera* shell and sugarcane bagasse*. Materials Science Forum, 416–421.
- Knott, P., Csorba, G., Bennett, D., & Kift, R. (2023). *Welding fume: A comparison study of industry used control methods*. Safety, 9(3), 42.
- Kumar, V. (2017). *Effect of SiO_2 flux powder for the welding of 304 austenitic stainless steel using gas tungsten arc welding*. International Journal of Engineering Research, 9(1), 34–45.
- Lehnert, M., et al. (2012). *Exposure to inhalable, respirable, and ultrafine particles in welding fumes*. Annals of Occupational Hygiene, 56(5), 557–567.
- Lutfi, M., Susilo, B., Prasetyo, J., & Prajogo, U. (2021). *Characteristics of activated carbon from coconut shell through chemical activation process*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 733(1), 012134.