

The Effect of Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Process Parameters on AA5083 Aluminum on Impact Strength and Hardness [Pengaruh Parameter Proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Pada Aluminium AA5083 Terhadap Kekuatan Impak dan Kekerasan]

Ibrahim Nur Alamsyah¹⁾, mulyadi²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Email Penulis Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. Underwater Friction Stir Welding (UFSW) is a solid-state welding method developed to improve the quality of aluminum joints by controlling heat input through water media. AA5083 aluminum is widely used in marine and transportation structures, requiring joints with good impact toughness and hardness. This study aims to analyze the effect of UFSW process parameters on the impact strength and hardness of AA5083 joints. The research method uses the Taguchi L9(3⁴) experimental design with variations in tool rotational speed, welding speed, and tool penetration depth. Impact testing is carried out based on the ASTM E23 standard, while hardness testing uses the Brinell method. The results showed that the highest impact strength reached 0.694 J/mm² and the maximum absorbed energy was 27.767 J, while the highest hardness value reached 81.3 HB in the joint zone. ANOVA analysis showed that all process parameters had no statistically significant effect at the 95% confidence level ($p > 0.05$), but the tool rotational speed provided the largest practical contribution to the response variation. Cooling by water media resulted in a more stable heat distribution so that the mechanical properties of the joint were relatively uniform. The results of this study indicate that UFSW is feasible to be applied for joining AA5083 aluminum in structural applications that require resistance to shock loads and plastic deformation.

Keywords - Underwater Friction Stir Welding (UFSW); Aluminum AA5083; impact strength; Brinell hardness; process parameter.

Abstrak. Underwater Friction Stir Welding (UFSW) merupakan metode pengelasan keadaan padat yang dikembangkan untuk meningkatkan kualitas sambungan aluminium dengan mengendalikan masukan panas melalui media air. Aluminium AA5083 banyak digunakan pada struktur kelautan dan transportasi sehingga memerlukan sambungan dengan ketangguhan impak dan kekerasan yang baik. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh parameter proses UFSW terhadap kekuatan impak dan kekerasan sambungan AA5083. Metode penelitian menggunakan desain eksperimen Taguchi L9(3⁴) dengan variasi kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, dan kedalaman penetrasi tool. Pengujian impak dilakukan berdasarkan standar ASTM E23, sedangkan pengujian kekerasan menggunakan metode Brinell. Hasil menunjukkan bahwa kekuatan impak tertinggi mencapai 0,694 J/mm² dan energi serap maksimum sebesar 27,767 J, sedangkan nilai kekerasan tertinggi mencapai 81,3 HB pada zona sambungan. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa seluruh parameter proses tidak berpengaruh signifikan secara statistik pada taraf kepercayaan 95% ($p > 0,05$), namun kecepatan putar tool memberikan kontribusi praktis terbesar terhadap variasi respon. Pendinginan oleh media air menghasilkan distribusi panas yang lebih stabil sehingga sifat mekanik sambungan relatif seragam. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa UFSW layak diterapkan untuk penyambungan aluminium AA5083 pada aplikasi struktural yang memerlukan ketahanan terhadap beban kejutan dan deformasi plastis.

Kata Kunci - Underwater Friction Stir Welding (UFSW); Aluminium AA5083; kekuatan impak; kekerasan Brinell; parameter proses

I. PENDAHULUAN

Pengelasan dapat dipahami sebagai proses pembentukan ikatan antar logam yang terjadi akibat reaksi metalurgi pada daerah sambungan ketika material berada dalam kondisi meleleh. Berdasarkan konsep tersebut, pengelasan didefinisikan sebagai metode penyambungan secara lokal pada dua atau lebih batang logam dengan memanfaatkan energi panas, baik yang berasal dari arus listrik maupun dari nyala api hasil pembakaran gas.[1]. Dalam perkembangan industri modern saat ini, proses pengelasan memainkan peran yang sangat penting di berbagai sektor manufaktur. Teknologi *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) umumnya banyak diterapkan di bidang konstruksi, seperti di industri otomotif, pembuatan kapal, konstruksi jembatan, fasilitas transportasi, dan sektor lainnya. Keberadaan sistem pengelasan menjadi sangat penting karena mendukung proses perbaikan dan rekayasa material logam, yang terus meningkat kualitas dan efisiensinya seiring dengan kemajuan teknologi.[2]. Seiring dengan perkembangan teknologi pengelasan yang sangat pesat, berbagai penelitian terus dilakukan untuk mengembangkan metode pengelasan yang

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

mampu menghasilkan kualitas sambungan yang optimal. Salah satu metode yang banyak dikaji adalah *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW), yang dinilai mampu meningkatkan sifat mekanik dan kualitas metalurgi sambungan, sekaligus menekan biaya produksi dan perawatan. Selain itu, penggunaan metode ini dinilai lebih ekonomis dalam jangka panjang karena mampu memperpanjang umur pakai sambungan dan menurunkan biaya perawatan pada struktur industri [3].

Underwater Friction Stir welding (UFSW) adalah proses pengelasan di mana teknik pengelasan gesekan dilakukan di bawah permukaan air. Metode ini membantu mengurangi masukan panas, mengontrol pertumbuhan intermetalik, dan meningkatkan struktur mikro dan sifat sambungan, terutama pada sambungan logam yang berbeda seperti aluminium dan titanium [4]. Proses ini melibatkan pemanasan dan plastifikasi material di area sambungan dengan putaran alat khusus, sehingga menghasilkan sambungan yang kuat dan berkualitas tinggi. Keunggulan UFSW meliputi pengurangan deformasi *thermal*, pengendalian suhu yang lebih baik, serta peningkatan sifat mikrostruktur dan mekanik dari sambungan, terutama pada bahan aluminium dan logam lainnya yang sensitif terhadap panas [5]. Proses *underwater friction stir welding* (UFSW) teknik pengelasan yang dilakukan di bawah air menggunakan prinsip *friction stir welding* (FSW). Proses ini melibatkan pemanasan dan deformasi plastis bahan di bawah suhu pengelasan tanpa mencairkan bahan secara penuh, sehingga menghasilkan sambungan yang kuat dan halus. Keuntungan utama dari UFSW adalah pengurangan distorsi *thermal* dan peningkatan kualitas sambungan karena pendinginan cepat yang disebabkan oleh lingkungan air [6].

Tool adalah alat dalam sebuah proses UFSW harus mempunyai titik cair dan kekerasan yang lebih dibandingkan dengan material kerja. Tool H13 yaitu jenis alat yang terbuat dari baja paduan H13 yang digunakan dalam proses pengelasan, khususnya dalam *underwater friction stir welding* (UFSW) [7]. Alat ini juga dirancang untuk menahan suhu tinggi dan tekanan selama proses pengelasan serta memiliki bentuk tertentu untuk menghasilkan sambungan yang kuat dan berkualitas tinggi [8]. Kualitas dan kinerja peralatan UFSW berkontribusi pada konsistensi hasil pengelasan. Peralatan yang konsisten dan berkualitas terjamin akan menghasilkan lasan yang seragam dan andal dari waktu ke waktu. Hal ini penting untuk memastikan bahwa setiap lasan memenuhi spesifikasi kekuatan, kualitas, dan desain yang dibutuhkan. Pemilihan, perawatan, dan penggantian peralatan secara berkala sangat penting untuk memastikan keberhasilan proses pengelasan UFSW. [9].

Aluminium 5083 adalah jenis aluminium paduan yang dikenal karena kekuatan tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan kemampuan untuk menahan beban berat serta suhu tinggi [10]. Paduan ini biasanya digunakan dalam aplikasi kelautan, kendaraan, dan struktur yang memerlukan ketahanan terhadap lingkungan yang keras, *aluminium-magnesium-mangan* (Al-Mg-Mn) yang dikenal karena kekuatan tinggi, ketahanan korosi luar biasa, dan kemampuan las yang sangat baik. Paduan ini termasuk dalam kelompok aluminium *non-heat-treatable*, artinya kekuatannya diperoleh melalui pengerjaan dingin daripada perlakuan panas [11]. Dalam penelitian *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW), pemilihan paduan aluminium 5083 merupakan dasar material yang sangat relevan yang tinggi terhadap aplikasi dan karakteristik [12]. UFSW merupakan metode pengelasan keadaan padat yang memanfaatkan panas gesekan antara alat berputar untuk melunakkan logam mencapai titik leleh material tanpa menyebabkan kerusakan atau perubahan fase akibat pencairan logam [13].

Pengujian impak merupakan salah satu metode pengujian mekanik yang banyak digunakan untuk mengevaluasi perilaku material ketika menerima beban dinamis. Melalui pengujian ini, tingkat ketangguhan material dapat diketahui, sehingga dapat dibedakan apakah material tersebut bersifat ulet atau cenderung rapuh [14]. Pengujian kekerasan mengukur resistensi suatu material terhadap deformasi plastis lokal akibat penetrasi oleh indenter standar [15]. Hasil pengujian ini memberikan informasi tentang kekuatan, ketahanan aus, dan kualitas perlakuan panas suatu material. Metode ini banyak digunakan karena relatif cepat, tidak merusak secara signifikan, dan dapat dilakukan di laboratorium maupun lapangan. Dengan demikian, penelitian mengenai pengaruh parameter proses UFSW terhadap kekuatan impak sambungan pada aluminium seri AA5083 dan kekerasan sangat relevan untuk mendukung pengembangan metode penyambungan yang lebih handal dan efisien, terutama pada kondisi ekstrim seperti lingkungan berair atau terendam.

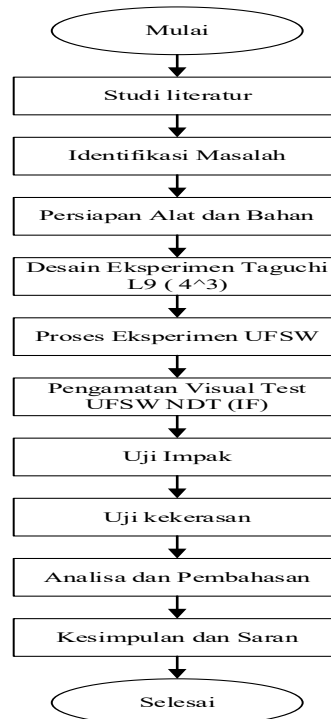
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada kajian pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* terhadap sifat mekanik sambungan aluminium AA5083, khususnya kekuatan impak dan kekerasan. Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: (1) bagaimana pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* terhadap kekuatan impak sambungan, dan (2) bagaimana pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* terhadap kekerasan sambungan.

II. METODE

A. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir ini dibuat untuk memastikan bahwa penelitian ini dilakukan sesuai dengan tahapan dan untuk menghindari kebingungan selama proses penelitian. Oleh karena itu, diagram alir dibuat untuk penelitian

"Pengaruh Parameter Proses Pengelasan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) pada Sambungan AA5083 terhadap Kekuatan dan Kekerasan Impak." Diagram alir berikut ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Diagram alir

B. Persiapan Alat dan Bahan

Sebelum eksperimen atau penelitian dilaksanakan, perlu dilakukan tahap persiapan terhadap peralatan dan material yang akan digunakan untuk memastikan proses berjalan dengan baik serta menghasilkan data yang akurat. Perangkat utama dalam penelitian ini mencakup mesin frais vertikal yang berfungsi sebagai penggerak proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW), *tool* FSW yang terdiri atas bagian *shoulder* dan pin, serta spesimen berupa pelat aluminium paduan AA5083. Di samping itu, digunakan juga berbagai perlengkapan pendukung lainnya.

1. Mesin *milling* Vertikal

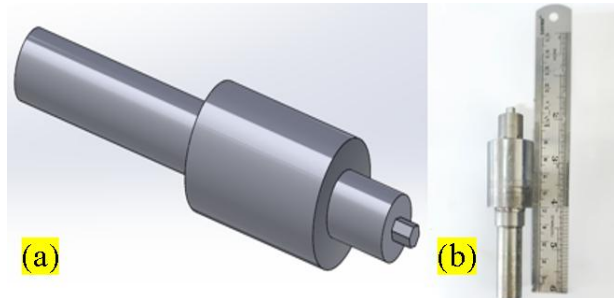
Mesin *milling* yang ditunjukkan pada Gambar 2 dapat dioperasikan baik sebagai mesin *frais* vertikal maupun horizontal. Dalam penelitian ini, konfigurasi yang digunakan adalah mesin *frais* vertikal, yaitu dengan posisi *tool* tegak lurus terhadap permukaan spesimen. Mesin *frais* berperan penting dalam proses ini, yaitu sebagai alat untuk menjepit benda kerja, mengatur pergerakan spesimen, serta memutar dan memberikan tekanan pada *tool* sehingga proses pengelasan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) dapat berlangsung dengan baik.



Gambar 2. Mesin *Milling* vertikal

2. Tool Pengelasan

Pada penelitian ini, material yang digunakan sebagai *tool* adalah baja H13. Pemilihan material tersebut didasarkan pada sifat mekaniknya yang unggul seperti kekerasan, kekuatan mekanik dan ketahanan aus yang tinggi serta stabil pada temperatur tinggi akibat panas gesek selama proses UFSW, sehingga tidak mudah mengalami deformasi maupun kerusakan saat digunakan untuk pengelasan paduan aluminium AA5083.



Gambar 3. (a). Desain tool dan (b). Manufaktur tool

3. Aluminium AA5083

Bahan utama yang digunakan pada penelitian ini berupa aluminium paduan AA5083 dalam bentuk pelat dengan ukuran panjang 180 mm, lebar 75 mm, dan tebal 5 mm. Material ini memiliki komposisi kimia serta sifat mekanik tertentu yang ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Unsur	Kandungan (%)
Aluminium (Al)	Sisa (Balance)
Magnesium (Mg)	4.0 – 4.9
Mangan (Mn)	0.4 – 1.0
Kromium (Cr)	0.05 – 0.25
Besi (Fe)	≤ 0.40
Silikon (Si)	≤ 0.40
Tembaga (Cu)	≤ 0.10
Seng (Zn)	≤ 0.25
Titanium (Ti)	≤ 0.15

Gambar 4. Kandungan Sifat Mekanik AA5083

Sifat Mekanik	Nilai
Kekuatan tarik (Ultimate Tensile Strength)	275 – 350 MPa
Kekuatan luluh (Yield Strength)	125 – 200 MPa
Perpanjangan (Elongation)	10 – 16 %
Kekerasan (Brinell)	75 – 95 HB
Modulus elastisitas	± 70 GPa
Massa jenis	2.66 g/cm ³

Gambar 5. Sifat Mekanik AA5083

C. Desain Eksperimen

Dalam penelitian ini menggunakan desain metode *Tahuchi Orthogonal Array* digunakan untuk perancangan eksperimen, yang bertujuan untuk merancang eksperimen guna menganalisis data eksperimen, serta digunakan untuk menentukan jumlah minimum eksperimen yang diperoleh dan memberikan informasi mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi parameter.

No.SPC	N (rpm)	WS (mm/min)	TL (°)	T (°C)	Level		
					R1	R2	R3
1	1283	43	2	8	-	-	-
2	1283	54	2.5	29	-	-	-
3	1283	65	3	60	-	-	-
4	1866	43	2.5	60	-	-	-
5	1866	54	3	8	-	-	-
6	1866	65	2	29	-	-	-
7	3000	43	3	29	-	-	-
8	3000	54	2	60	-	-	-
9	3000	65	2.5	8	-	-	-

Gambar 6. Parameter *Tahuchi Orthogonal Array* L9(3⁴) OA

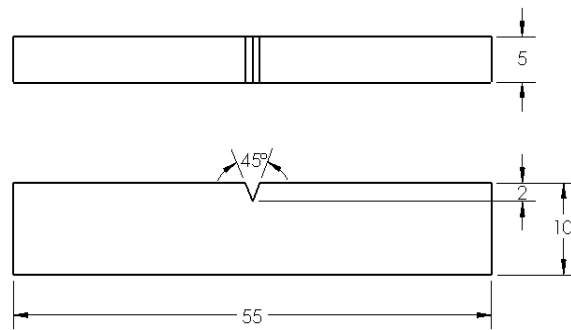
D. Proses Eksperimen

Proses pengelasan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) dilakukan dengan memanfaatkan mesin milling universal, dengan tahapan pelaksanaan sebagai berikut:

1. Menyiapkan mesin milling dan mengatur posisinya pada konfigurasi vertikal.
2. Menata instalasi penelitian agar posisi spesimen sesuai dengan arah dan metode pengelasan yang direncanakan.
3. Menempatkan serta menjepit benda kerja padaudukan yang telah dipersiapkan.
4. Memasang *tool* pengelasan pada chuck mesin milling dengan penguncian yang kuat.
5. Mengatur sudut kemiringan *tool* sesuai parameter yang ditentukan, dengan cara mengendurkan baut pada ram mesin menggunakan kunci pas ukuran 17, kemudian menggeser milling head hingga diperoleh sudut kemiringan sebesar 2°, 2,5°, atau 3°.
6. Menyetel kecepatan putar spindle pada nilai 1283 rpm, 1866 rpm, dan 3000 rpm, serta mengatur variasi kecepatan pemakanan (*feed rate*).
7. Melaksanakan proses pengelasan UFSW mulai dari titik awal hingga mencapai titik akhir sambungan.
8. Melepaskan spesimen yang telah selesai dilas dari sistem penjepitan..
9. Memberikan penandaan atau kode pada setiap benda kerja sesuai dengan parameter proses pengelasan yang digunakan.
10. Mengulangi langkah nomor 3 hingga 9 untuk seluruh variasi parameter yang telah ditentukan.
11. Mematikan mesin milling dan melepas seluruh benda kerja dari instalasi penelitian atau alat pencekam pada meja mesin.

E. Uji Impak

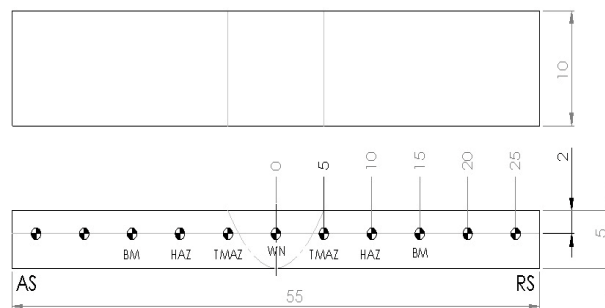
Setelah proses pengelasan selesai, spesimen sambungan yang dihasilkan kemudian diuji dengan uji impact. Uji ini diterapkan pada sambungan yang dibuat menggunakan metode *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) dan dilakukan sesuai dengan standar ASTM E23 yang dikeluarkan oleh *American Society for Testing and Materials*. Tujuan uji impact adalah untuk menentukan kemampuan spesimen menyerap energi akibat beban impact dan untuk menilai ketangguhan sambungan las yang dihasilkan. Mesin uji impact yang digunakan ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 7. Desain spesimen uji impak

F. Uji Kekerasan

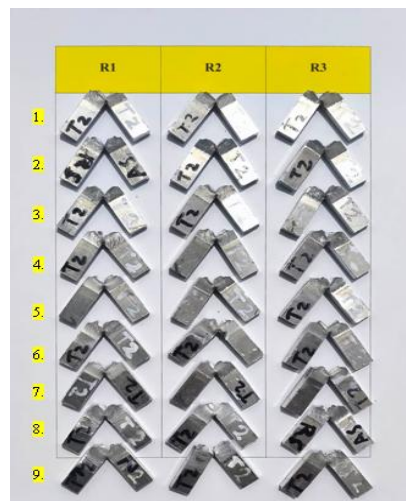
Uji kekerasan pada penelitian ini dilaksanakan menggunakan prosedur pengujian *Brinell* sebagai metode evaluasi sifat material, yaitu melalui penekanan indenter berbentuk bola baja atau karbida dengan diameter tertentu ke permukaan spesimen menggunakan beban dan waktu penahanan yang telah ditetapkan. Nilai kekerasan *Brinell* (HB) dihitung berdasarkan perbandingan antara beban yang diberikan dan luas jejak indentasi yang terbentuk. Data hasil pengujian tersebut dimanfaatkan untuk menganalisis perubahan sifat mekanik material sebagai akibat dari proses pengelasan UFSW.



Gambar 8. Desain spesimen uji kekerasan

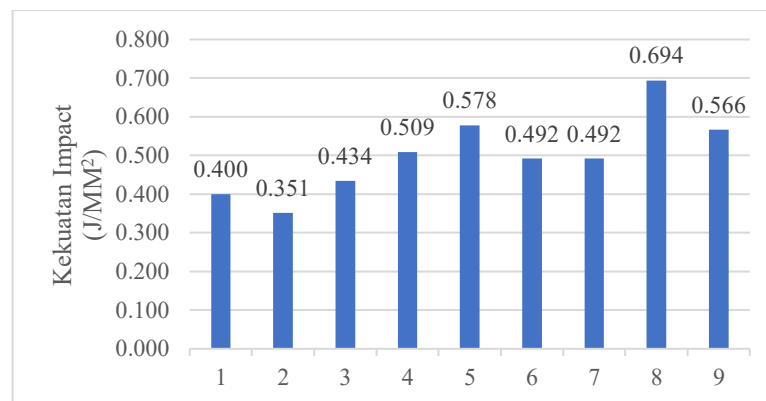
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Impak Eksperimen



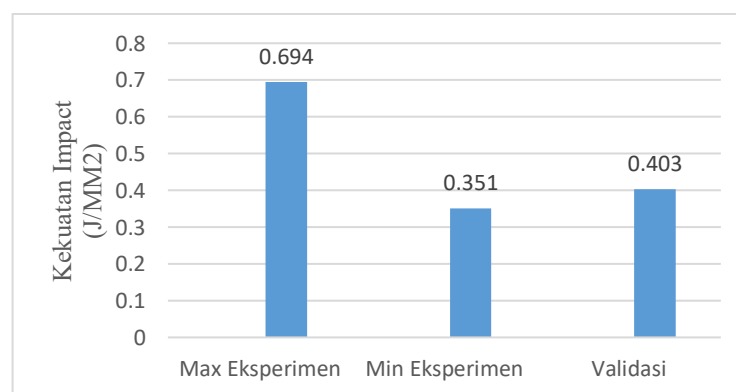
Gambar 9. Spesimen hasil Uji Kekuatan Impak

Pengamatan makroskopik permukaan patahan menunjukkan variasi mekanisme patah dari getas hingga ulet. Spesimen 1 dan 9 didominasi oleh permukaan patahan yang relatif rata dan sempit dengan deformasi plastis minimal, yang mengindikasikan mekanisme patah getas dan energi impact rendah. Spesimen 2 menunjukkan karakter transisi dari getas menuju ulet dengan mulai terbentuknya struktur berserat halus, sedangkan spesimen 3 menampilkan Permukaan patahan menunjukkan tekstur yang lebih kasar serta bentuk yang tidak teratur. disertai peningkatan zona berserat, yang mencerminkan ketangguhan impact tingkat sedang. Spesimen 4 memperlihatkan dominasi patahan ulet dengan deformasi plastis yang nyata di sekitar takik, menunjukkan ketangguhan sedang hingga tinggi. Spesimen 5 dan 6 menunjukkan karakteristik paling ulet, ditandai oleh permukaan patahan yang sangat kasar, luas, struktur berserat dominan, serta deformasi plastis besar, dengan spesimen 6 memiliki ketangguhan tertinggi. Spesimen 7 masih menunjukkan karakter ulet dengan ketangguhan tinggi namun sedikit lebih rendah dibandingkan spesimen 6. Sementara itu, spesimen 8 menunjukkan penurunan ketangguhan yang ditandai dengan berkurangnya luas patahan dan deformasi plastis sedang.



Gambar 10. Grafik Eksperimen Uji Impact

Uji impact merupakan metode paling penting untuk mengevaluasi ketangguhan material dan kemampuannya menahan beban benturan atau dampak. Dalam analisis sambungan las bawah air material AA5083, uji impact memberikan informasi kritis tentang kemampuan sambungan untuk menyerap energi tanpa mengalami kegagalan. Hasil uji impact menunjukkan bagaimana parameter proses UFSW mempengaruhi ketangguhan sambungan dan sejauh mana sambungan mempertahankan integritasnya dalam kondisi beban dinamis. Hasil uji impact yang ditampilkan pada Gambar 11 menunjukkan bahwa kekuatan impact tertinggi di capai pada spesimen eksperimen maksimum sebesar 0.694 joule/mm². Selanjutnya, spesimen validasi menghasilkan kekuatan impact sebesar 0.403 joule/mm², dan eksperimen minimum hanya mencapai 0.351 joule/mm². Hasil ini menunjukkan bahwa parameter proses yang diterapkan pada spesimen eksperimen maksimum lebih efektif dalam menghasilkan sambungan yang memiliki ketangguhan yang lebih baik dibandingkan dengan spesimen validasi dan spesimen eksperimen minimum.



Gambar 11. Grafik Uji Kekuatan Impact

Spesimen pada kondisi eksperimen maksimum menunjukkan kekuatan benturan tertinggi sebesar 0,694 J/mm², yang diperoleh pada kecepatan putar 3000 rpm dan kecepatan proses pengelasan 54 mm/menit. Kombinasi parameter ini menghasilkan input panas yang relatif tinggi dan stabil, sehingga memungkinkan distribusi panas yang merata serta aliran material yang optimal di zona pengadukan. Kondisi tersebut mendukung terbentuknya ikatan metalurgi yang kuat dan struktur mikro yang lebih homogen, sehingga sambungan memiliki ketangguhan tinggi dan kemampuan menyerap energi dampak yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan.

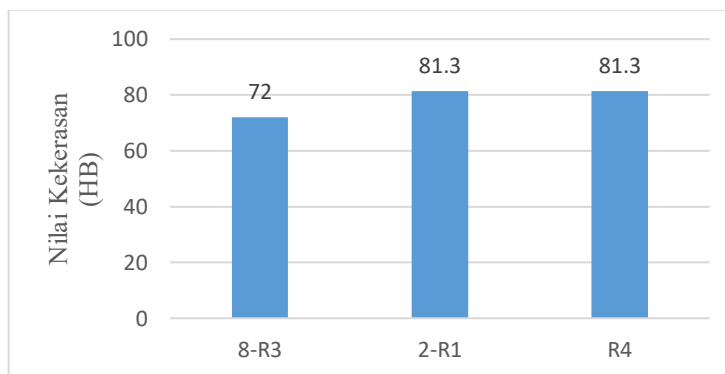
Spesimen pada kondisi eksperimen minimum menghasilkan kekuatan benturan terendah sebesar 0,351 J/mm², yang terjadi pada kecepatan putar 1283 rpm dan kecepatan proses pengelasan 54 mm/menit. Kombinasi parameter ini menghasilkan input panas paling rendah serta waktu kontak antara *tool* dan material yang relatif singkat, sehingga aliran plastis material di daerah adukan tidak berlangsung secara optimal. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan cacat mikro seperti ikatan yang tidak sempurna atau terbentuknya rongga (*void*) di zona sambungan, yang selanjutnya menurunkan kemampuan sambungan dalam menyerap energi akibat beban dinamis.

Spesimen pada kondisi validasi menunjukkan kekuatan benturan sebesar 0,403 J/mm², dengan kecepatan putar 2368 rpm dan kecepatan proses pengelasan 50 mm/menit. Nilai ini lebih rendah dibandingkan kondisi eksperimen maksimum, yang mengindikasikan bahwa penurunan kecepatan rotasi dan peningkatan kecepatan pengelasan menyebabkan berkurangnya input panas serta tingkat deformasi plastis selama proses pengelasan. Akibatnya, proses pencampuran material dan pembentukan ikatan metalurgi tidak berlangsung secara optimal, sehingga ketangguhan sambungan yang dihasilkan menjadi lebih rendah.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa kecepatan rotasi *tool* dan kecepatan pengelasan merupakan parameter utama yang mempengaruhi kekuatan benturan sambungan UFSW. Kombinasi kecepatan rotasi tinggi dengan kecepatan pengelasan rendah cenderung meningkatkan input panas dan deformasi plastis, memperhalus struktur mikro, serta menghasilkan sambungan yang lebih homogen dan tangguh.

B. Hasil Penelitian Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan digunakan sebagai salah satu teknik utama dalam evaluasi sifat mekanik pada sambungan las, karena mampu menunjukkan kemampuan material dalam menahan perubahan bentuk permanen ketika dikenai pembebanan. Dalam konteks pengelasan AA5083 menggunakan *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW), analisis kekerasan digunakan untuk mengamati distribusi kekerasan di area sambungan, khususnya di zona *weld nugget* (WN). Hasil uji yang ditampilkan pada Gambar 11 menunjukkan bagaimana parameter proses pengelasan mempengaruhi mikrostruktur sambungan dan kekerasannya.



Gambar 12. Grafik Uji Kekerasan pada posisi *weld nugget* (WN)

Spesimen 8-R3 menunjukkan nilai kekerasan terendah sebesar 72 HB, yang diperoleh pada kecepatan putar 1283 rpm dan kecepatan proses pengelasan 54 mm/menit. Nilai kekerasan yang relatif rendah ini berkaitan dengan input panas yang kecil akibat rendahnya kecepatan putar *tool*, sehingga distribusi panas dan proses pengadukan material di zona las tidak berlangsung secara optimal. Kondisi tersebut menyebabkan proses penghalusan butir dan homogenisasi mikrostruktur di daerah sambungan kurang efektif, serta berpotensi menimbulkan pelunakan lokal pada daerah *heat affected zone* (HAZ).

Spesimen 2-R1 memiliki nilai kekerasan sebesar 81,3 HB, yang diperoleh pada kecepatan putar 2368 rpm dan kecepatan proses pengelasan 50 mm/menit. Kombinasi parameter ini menghasilkan tingkat deformasi plastis dan rekristalisasi dinamis yang relatif optimal di zona pengadukan, sehingga terbentuk mikrostruktur yang lebih halus dan homogen. Kondisi tersebut berkontribusi langsung terhadap peningkatan nilai kekerasan sambungan dibandingkan spesimen 8-R3.

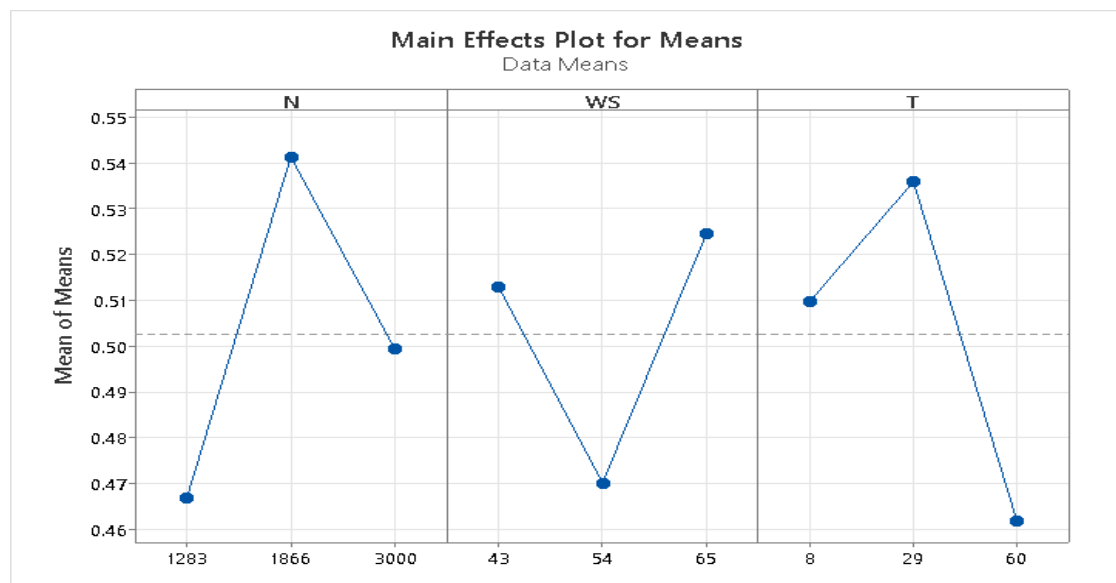
Spesimen R4 juga menunjukkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 81,3 HB, yang dicapai pada kecepatan putar 3000 rpm dan kecepatan proses pengelasan 54 mm/menit. Kecepatan putar yang tinggi meningkatkan input panas dan intensitas deformasi plastis selama proses UFSW, sehingga mempercepat terjadinya rekristalisasi dinamis dan penghalusan ukuran butir di zona las. Mikrostruktur yang lebih halus dan seragam ini menghasilkan sambungan dengan kekerasan yang tinggi dan stabil.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa parameter proses UFSW, khususnya kecepatan putar dan kecepatan proses pengelasan, berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan sambungan. Kombinasi kecepatan rotasi yang lebih tinggi dengan kecepatan pengelasan yang relatif lebih rendah cenderung meningkatkan input panas dan deformasi plastis, sehingga mendorong terbentuknya mikrostruktur yang lebih halus dan homogen serta meningkatkan kekerasan dan stabilitas mekanik sambungan.

Tabel 1. Analisis General Linear Model (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
N	2	0.008323	29.69%	0.008323	0.004161	1.31	0.433
WS	2	0.004922	17.56%	0.004922	0.002461	0.77	0.564
T	2	0.008432	30.08%	0.008432	0.004216	1.33	0.430
Error	2	0.006358	22.68%	0.006358	0.003179		
Total	8	0.028034	100.00%				

Hasil analisis data menggunakan metode ANOVA menunjukkan bahwa nilai *p-value* untuk parameter N, WS, dan T berturut-turut adalah 0,433; 0,564; dan 0,430, yang seluruhnya melebihi batas signifikansi 0,05. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada taraf kepercayaan 95%, ketiga parameter tersebut belum memberikan pengaruh yang bermakna terhadap respon yang diteliti. Meskipun demikian, hasil perhitungan kontribusi relatif memperlihatkan bahwa parameter T memiliki pengaruh paling besar dengan persentase sebesar 30,08%, disusul oleh parameter N sebesar 29,69% dan WS sebesar 17,56%. Dengan demikian, dari sudut pandang praktis, parameter T dan N dapat dianggap lebih dominan dibandingkan parameter lainnya. Selain itu, kontribusi galat (error) yang mencapai 22,68% menunjukkan adanya pengaruh faktor-faktor lain di luar variabel yang diteliti serta mengindikasikan masih cukup besarnya variasi dalam proses. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa walaupun parameter N, WS, dan T belum terbukti signifikan secara statistik, parameter T dan N tetap memiliki peranan penting dalam penentuan kondisi proses yang optimal. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menambah jumlah replikasi serta memasukkan variabel proses tambahan guna memperoleh model yang lebih representatif dan akurat



Gambar 13. Grafik *Effects Plot For Means*

Grafik Main *Effects Plot* menunjukkan bahwa faktor N dan T memiliki perubahan nilai rata-rata respon yang paling besar dibandingkan WS, sehingga keduanya lebih dominan mempengaruhi respon. Nilai rata-rata tertinggi diperoleh pada N = 1866 rpm, WS = 65 mm/menit, dan T = 29 mm. Sebaliknya, nilai terendah terjadi pada N = 1283 rpm, WS = 54 mm/menit, dan T = 60 mm. Meskipun perbedaan antar level terlihat secara visual, hasil ini sejalan dengan ANOVA yang menunjukkan bahwa pengaruh ketiga faktor tersebut belum signifikan secara statistik. Namun demikian, kombinasi level dengan nilai rata-rata tertinggi dapat dipertimbangkan sebagai kondisi proses yang relatif optimal secara praktis.

C. Nilai F-Hitung

Tabel 2. F-hitung

Faktor	df	MS Faktor	MS Error	F-hitung	F-tabel	Keputusan
N	2	0,6591	1,9831	0,33	5,41	H ₀ diterima
WS	2	0,4138	1,9831	0,21	5,41	H ₀ diterima
T	2	1,1829	1,9831	0,60	5,41	H ₀ diterima

Berdasarkan hasil ANOVA terhadap nilai *Signal to Noise Ratio* (SN ratio), diperoleh bahwa nilai F-hitung untuk parameter kecepatan putar *tool* (N), kecepatan pengelasan (WS), dan parameter T masing-masing memiliki nilai sebesar 0,33; 0,21; dan 0,60, yang seluruhnya lebih kecil dibandingkan nilai F-tabel sebesar 5,41 pada tingkat signifikansi sebesar $\alpha = 0,05$. Temuan ini mengindikasikan bahwa respon kekuatan impak berada dalam rentang yang relatif stabil terhadap variasi parameter proses UFSW yang digunakan, sehingga hipotesis nol (H₀) dapat diterima. Penggunaan media air pada proses UFSW berperan dalam menghasilkan laju pendinginan yang cepat dan distribusi panas yang lebih terkendali, sehingga karakteristik mikrostruktur sambungan yang terbentuk cenderung seragam. Di antara parameter yang diuji, parameter T memiliki nilai F-hitung tertinggi, yang mengindikasikan kontribusi relatif lebih dominan terhadap variasi respon kekuatan impak dan berpotensi menjadi parameter utama dalam pengembangan dan optimasi proses pada penelitian selanjutnya.

D. Hipotesis

- **H₀₁ (Hipotesis nol):**
Parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (kecepatan putar *tool* (N), kecepatan pengelasan (WS), dan parameter T) tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan impak sambungan aluminium AA5083.
- **H₁₁ (Hipotesis alternatif):**
Parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (kecepatan putar *tool* (N), kecepatan pengelasan (WS), dan parameter T) berpengaruh signifikan terhadap kekuatan impak sambungan aluminium AA5083.
- **H₀₂ (Hipotesis nol):**
Parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (kecepatan putar *tool* (N), kecepatan pengelasan (WS), dan parameter T) tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan sambungan aluminium AA5083.
- **H₁₂ (Hipotesis alternatif):**
Parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (kecepatan putar *tool* (N), kecepatan pengelasan (WS), dan parameter T) berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan sambungan aluminium AA5083.

Berdasarkan rumusan masalah mengenai pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) terhadap kekuatan impak dan kekerasan sambungan aluminium AA5083, penelitian ini menyusun asumsi awal bahwa variabel proses yang meliputi kecepatan putar *tool*, kecepatan pengelasan, dan parameter T diduga berkontribusi terhadap perubahan sifat mekanik sambungan yang terbentuk. Hipotesis nol pertama (H₀₁) menyatakan bahwa variasi parameter proses UFSW tidak menimbulkan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan impak sambungan, sedangkan hipotesis alternatif pertama (H₁₁) menyatakan bahwa parameter proses tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap kekuatan impak. Selanjutnya, hipotesis nol kedua (H₀₂) menyebutkan bahwa perubahan parameter proses UFSW tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekerasan sambungan, sementara hipotesis alternatif kedua (H₁₂) menyatakan adanya pengaruh yang signifikan terhadap kekerasan sambungan akibat variasi parameter proses. Seluruh

hipotesis tersebut diuji menggunakan metode Analysis of Variance (ANOVA) dengan taraf signifikansi 5% guna menentukan keberadaan pengaruh parameter proses terhadap respon kekuatan impact dan kekerasan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan, dapat dinyatakan bahwa metode *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) mampu membentuk sambungan aluminium AA5083 dengan karakteristik kekuatan impact dan kekerasan yang cenderung konsisten pada seluruh kombinasi parameter yang diterapkan. Keberadaan media air sebagai sistem pendingin berperan dalam menekan masukan panas, sehingga sebaran temperatur selama proses pengelasan menjadi lebih terkendali dan sifat mekanik sambungan relatif homogen. Pengujian menunjukkan bahwa nilai kekuatan impact tertinggi mencapai 0,694 J/mm² dengan energi serap maksimum sebesar 27,767 J, sementara nilai kekerasan paling tinggi pada daerah sambungan tercatat sebesar 81,3 HB. Hasil analisis menggunakan ANOVA mengindikasikan bahwa variabel kecepatan putar tool (N), kecepatan pengelasan (WS), dan parameter T tidak menunjukkan pengaruh yang bermakna secara statistik terhadap kekuatan impact maupun kekerasan pada tingkat kepercayaan 95% ($p > 0,05$). Walaupun demikian, perhitungan kontribusi relatif memperlihatkan bahwa parameter T dan kecepatan putar tool (N) memberikan pengaruh praktis yang lebih besar dibandingkan parameter lainnya dalam memengaruhi variasi respon. Temuan ini menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut tetap perlu dipertimbangkan secara khusus dalam proses optimasi UFSW. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa UFSW memiliki potensi yang baik untuk diaplikasikan pada penyambungan aluminium AA5083, terutama pada struktur yang menuntut ketahanan terhadap beban kejutan dan deformasi plastis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, khususnya Program Studi Teknik Mesin, atas ketersediaan fasilitas dan dukungan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya juga disampaikan kepada Bapak Dr. Mulyadi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, serta masukan yang konstruktif selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh teknisi laboratorium dan rekan-rekan mahasiswa yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan eksperimen dan pengolahan data.

REFERENSI

- [1] H. Rated, *Teknologi Pengelasan Mulyadi S T M T Iswanto S T M T*, vol. 0.
- [2] R. Firdaus and M. N. Rizki, "Pengaruh parameter proses friction stir welding dengan material aluminium alloy AA6061-T651 terhadap distorsi dan uji kekerasan," vol. 11, no. 2, pp. 169–176, 2022.
- [3] F. W. Prasetya, "Analysis of Underwater Friction Stir Welding of Process Connection on Aluminium Series 6005-T6 on Impact Strength and Micro Structure [Analisis Sambungan Proses Underwater Friction Stir Welding pada Aluminium Seri 6005-T6 terhadap Kuat Impact dan Struktur Micro]," pp. 1–8.
- [4] M. A. WAHID, Z. A. KHAN, and A. N. SIDDIQUEE, "Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 28, no. 2, pp. 193–219, 2018, doi: 10.1016/S1003-6326(18)64653-9.
- [5] I. Sabry and A. M. Hewidy, "Underwater friction-stir welding of a stir-cast AA6061-SiC metal matrix composite: optimization of the process parameters, microstructural characterization, and mechanical properties," *Mater. Sci. Pol.*, vol. 40, no. 1, pp. 101–115, 2022, doi: 10.2478/msp-2022-0013.
- [6] T. Tarmizi, R. Indrawan, and I. Irfan, "Pengaruh Tool Rotation Speed Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Aluminium Paduan 6061-T6 Pada Proses Friction Stir Welding," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 25, no. 3, pp. 153–164, 2019, doi: 10.17146/urania.2019.25.3.5703.
- [7] D. Prabowo *et al.*, "PENGARUH PERLAKUAN MEKANIKAL PADA PENGELASAN FRICTION STIR WELDING (FSW) ALUMINIUM AA2024-T3 digunakan untuk struktur pesawat adalah friction stir welding

- (FSW) dapat dilihat pada terutama jika diaplikasikan untuk bahan dinamis adalah terbentuknya tegangan sisa akibat siklus thermal selama pengelasan,” vol. 12, no. 02, 2023.
- [8] F. I. Masruhan, F. B. Darsono, M. S. Malisi, T. Mesin, and U. N. Semarang, “Pengaruh Feed Rate pada Friction Stir Welding Polypropylene Menggunakan Tool Aluminium 7075 Terhadap Kekuatan Tarik dan Lentur Effect of Feed Rate on Friction Stir Welding of Polypropylene Using an Aluminum 7075 Tool on Tensile and Flexural Strength,” vol. 5, no. 12, pp. 3548–3559, 2025.
 - [9] S. Welded and D. A. A. Joints, “G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan,” vol. 8, no. 1, pp. 226–236, 2024.
 - [10] I. Priyahapsara and B. Y. Habibie, “Ketahanan Korosi Sambungan Friction Stir Welding dengan Variasi Material Pin Tool,” vol. 4, no. 2, pp. 76–82, 2020.
 - [11] M. Iqbal, Tarkono, and G. A. Ibrahim, “Pengaruh Putaran Dan Kecepatan Tool Terhadap Sifat Mekanik Pada Pengelasan Friction Stir Welding Aluminium 5052,” *J. FEMA, Vol. 2, Nomor 1, Januari 2014*, vol. 2, no. 1, pp. 23–27, 2014, [Online]. Available: <https://www.neliti.com/id/publications/98337/pengaruh-putaran-dan-kecepatan-tool-terhadap-sifat-mekanik-pada-pengelasan-frict>
 - [12] P. A. Hutagaol and F. A. Kurniawan, “ANALISA HEAT TREATMENT TERHADAP KEKUATAN UJI IMPACT ALUMINIUM 5083 TAHUN 2021,” pp. 1–4, 2022.
 - [13] B. T. Pengelasan, U. Friction, and S. Welding, *Teknologi Pengelasan Underwater Friction Stir Welding : Teori , Praktik , dan Aplikasi pada Material Aluminum Alloy*.
 - [14] A. Suprayoga, “Experimental Study on AA6005-T6 Material Welded with Friction Stir Welding Using Impact Test : Studi Eksperimental Pada Material AA6005-T6 Dilas dengan Friction Stir Welding Menggunakan Uji Impak,” vol. 13, pp. 1–5, 2021, doi: 10.21070/ijins.v13i.532.
 - [15] M. V. Yulianto, “The Influence of the Underwater Stir Welding Process on the Hardness and Surface Roughness of AA6005-T6 Aluminium Joints : Eksperimental Investigation [Pengaruh Proses Underwater Friction Stir Welding terhadap Kekerasan dan Kekasaran pada Paduan Aluminium AA6005-T6 : Investigasi Eksperimental],” pp. 1–7.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.