

Study of Friction Stir Welding Process Parameters for Welding AA6061-T651 Material with Corner Joints 90° on Macro Structures

[Studi Parameter Proses Friction Stir Welding pada Pengelasan Material AA6061-T651 dengan Sambungan Sudut 90° Terhadap Struktur Makro]

Mochammad Arizal Prasetyo Widodo¹⁾, Mulyadi²⁾

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

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

Email Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. *Friction Stir Welding FSW welding is a process for joining AA 6061 T6 series aluminum alloy, in this process a solid state welding method that can produce high quality welds for several materials that have low weldability such as aluminum. The parameters required for this FSW welding research include milling machine rotation speed, feeding, pin shape and dimensions, tool slope, geometry, material and tools to be used. This research analyzes the impact of the macrostructure on the surface of the FSW welding area to determine the mechanical properties of the AA-6061-T6 series aluminum material. The results of the research and analysis are that there are 4 best welding specimens, namely specimen 5, specimen 11, specimen 4, specimen 6 and there are 4 less good specimens, namely specimen 6, specimen 14, specimen 1, specimen 8. There are also 8 rejected specimens, namely specimen 2, specimen 3, specimen 7, specimen 10, specimen 12, specimen 13, specimen 15, specimen 16.*

Keywords – Aluminium, FSW, Fillet join

Abstrak. *Pengelasan Friction Stir Welding FSW merupakan proses penyambungan aluminium paduan seri AA 6061 T6, pada proses ini metode pengelasan solid state yang dapat menghasilkan lasan dengan kualitas tinggi untuk beberapa material yang memiliki kemampuan las rendah seperti aluminium. Parameter yang diperlukan untuk penelitian pengelasan FSW ini meliputi kecepatan putaran mesin frais, feeding, bentuk dan dimensi pin, kemiringan tool, geometri, material, dan tool yang akan digunakan. Penelitian ini menganalisa dampak makrostruktur yang terdapat pada permukaan bidang pengelasan FSW untuk mengetahui sifat-sifat mekanik yang ada pada material Aluminium seri AA-6061-T6. Hasil penelitian dan analisa adalah terdapat 4 spesimen pengelasan terbaik yaitu spesimen 5, spesimen 11, spesimen 4, spesimen 6 dan terdapat 4 spesimen kurang baik yaitu spesimen 6, spesimen 14, spesimen 1, spesimen 8 juga terdapat 8 spesimen reject yaitu spesimen 2, spesimen 3, spesimen 7, spesimen 10, spesimen 12, spesimen 13, spesimen 15, spesimen 16.*

Kata Kunci - Aluminium, FSW, Fillet join

I. PENDAHULUAN

Friction Stir Welding adalah teknik pengelasan yang populer[1]. Hal ini dikarenakan tidak memerlukan logam pengisi yang dapat menghilangkan atau mengurangi jumlah retakan dan cacat[2]. Proses FSW berputar dan bergerak melintang, menyebabkan material ditempa di tengah lasan dan akhirnya meleleh[3]. Variabel dalam proses las FSW adalah *setting tool* dan parameter las[4]. Kecepatan rotasi, kemiringan pahat, kecepatan geser, penetrasi, dan bahan pahat adalah semua parameter pengelasan[5]. Untuk menilai ketahanan material perlu adanya pengujian kekerasan metode *vickers* dan kekuatan impact serta mempertimbangkan faktor-faktor dinamis yang dapat mempengaruhi kekuatan[6].

Fillet joint adalah jenis penyambungan logam yang membentuk sudut atau lengkungan, sering kali berbentuk seperti huruf "L"[7]. Sambungan ini digunakan ketika dua bagian bertemu pada sudut 90 derajat[8]. FSW melibatkan pemanasan untuk melelehkan logam dengan menggerakkan pahat berputar melalui permukaan logam[9]. Akibatnya, material sekitarnya tercampur dan membentuk sambungan yang kuat secara struktural. Keuntungan utama FSW dalam menciptakan *fillet joint* termasuk kekuatan sambungan yang tinggi, tidak perlu bahan pengisi tambahan, dan risiko deformasi yang rendah[10].

Friction Stir Welding (FSW) memiliki beragam aplikasi yang luas di berbagai sektor industri. Di industri otomotif, FSW digunakan untuk menyambung bagian bodi kendaraan seperti rangkaian bodi dan panel atap dengan sambungan yang kuat dan ringan[11]. Di sektor penerbangan dan dirgantara, teknik ini memainkan peran penting dalam pembuatan struktur pesawat seperti sayap dan dinding badan pesawat, membantu mengurangi berat dan meningkatkan efisiensi[12]. Penggunaan FSW juga mencakup industri maritim untuk pembuatan kapal yang tahan korosi, serta di industri energi untuk komponen seperti tangki penyimpanan bahan bakar. Bahkan dalam industri elektronik, FSW digunakan dalam pembuatan komponen yang memerlukan pengaliran panas yang efisien[13].

Friction Stir Welding (FSW) memiliki sejumlah permasalahan yang perlu diperhatikan. Teknik ini memiliki keterbatasan pada ketebalan material, lebih cocok untuk mengelas material tipis hingga sedang. Jenis logam juga memainkan peran penting, dengan FSW lebih cocok untuk logam paduan ringan seperti aluminium[14]. Penggunaan FSW memerlukan pemahaman mendalam tentang parameter proses yang mempengaruhi kualitas pengelasan. Permukaan material yang akan digabungkan harus bersih dan bebas kontaminan. Kendala geometri benda kerja dan kendali deformasi juga harus diperhatikan selama proses FSW. Dengan pemahaman yang baik dapat menciptakan sambungan logam yang kuat dan tahan lama[15]. Tujuan penelitian ini, untuk mengetahui pengaruh kecepatan pengelasan terhadap struktur makro pada sambungan *fillet joint*.

II. METODE

A. Material

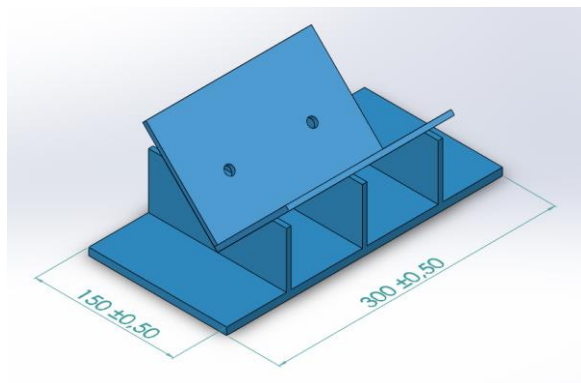
Dalam penelitian ini menggunakan material plat besi dengan ketebalan 8mm dan 5mm untuk pembuatan Jig. Besi batangan baja dengan kode H13 untuk pembuatan *tools FSW*. Plat aluminium AA6061-T651 untuk material pengelasan.

B. Tools dan Jig

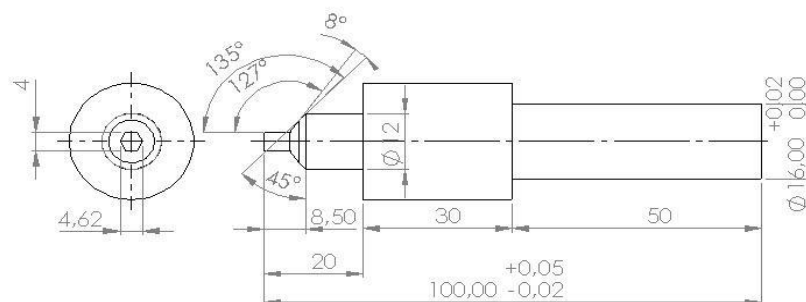
Pada proses pembuatan *tools* dan *jig* diperlukan desain untuk konsep benda kerja dengan tujuan agar proses pengujian dapat dengan mudah untuk menjalankan pekerjaan yang dilakukan. Berikut merupakan desain Tool dan Jig FSW *Friction Stir Welding*.



Gambar 1. Desain Tool FSW



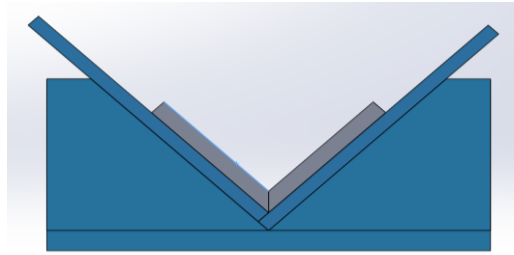
Gambar 2. Jig FSW



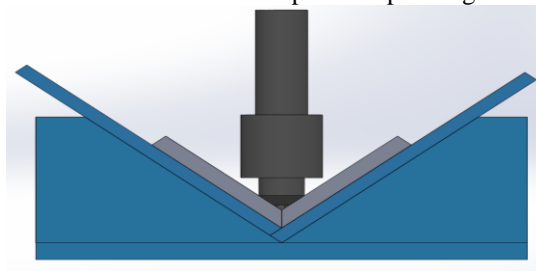
Gambar 3. Detail 2D dari Geometri Tool FSW

C. Jenis Sambungan Model Spesimen dan

Fillet joint merupakan jenis penyambungan antara dua material yang membentuk sudut, biasanya 90 derajat. Sambungan ini menggunakan proses FSW yaitu metode pengelasan yang melibatkan gesekan dan tekanan antara pahat putar dan permukaan material yang akan disambung. Metode ini umumnya digunakan untuk logam, terutama aluminium. Tool FSW menggunakan dari material besi H13 dengan mata berbentuk hexagonal (Segi enam) yang akan diputar dengan mesin *frails*.

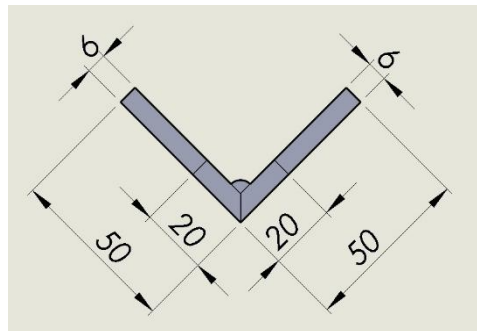


Gambar 4. Posisi Spesimen pada Jig



Gambar 5. Proses FSW

Setelah dilakukan proses FSW dengan posisi spesimen dengan sudut 90 derajat. Hasil penelasan dilakukan proses pemotongan spesimen menggunakan mesin CNC supaya hasil FSW pada saat diuji makro tidak berubah mikro strukturnya dan spesimen lebih presisi sesuai dengan ukuran yang diinginkan. Spesimen yang dipotong memiliki dimensi ukuran panjang 20 mm, lebar 30 mm dan tebal 6 mm. seperti gambar desain dimensi hasil FSW dan dimensi spesimen uji makro berikut :



Gambar 6. Dimensi Hasil FSW dan Dimensi Spesimen Uji Makro

D. Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan yang perlu dilakukan untuk melakukan eksperimen *friction stir welding* dan pengujian spesimen adalah sebagai berikut:

1. Mesin *Milling*/Frais

Mesin *milling*/frais digunakan untuk membuat sudut 45 derajat pada salah satu sisi aluminium, proses pembuatan *Jig* dan juga digunakan untuk proses FSW. Dengan parameter sebagai berikut:

Jenis mesin	: Mesin <i>Frais</i> universal
Type	: x6322c weida
Kecepatan spindle	: 2.192 (rpm)
Sudut kemiringan	: 3,4°
Kecepatan jalan	: 36,3 (mm/min)



Gambar 7. Mesin *frais*

2. Mesin CNC Milling

Mesin CNC *milling* yang dipakai penelitian disini yaitu merk weidamc vmc-640 memiliki 3 axis yang berfungsi untuk melakukan pemotongan spesimen, membuat bentuk *tool* yang berbentuk hexagonal dan membuat jig untuk mencekam aluminium pada proses friction stir welding, penggunaan mesin cnc milling harus memiliki program yang telah dibuat sebelumnya di aplikasi *Solidwork*.



Gambar 8. Mesin CNC

3. Mesin Bubut

Mesin bubut yang dipakai eksperimen menggunakan merk jiw gh6241x/1000 ini berfungsi untuk membuat *tool* yang memiliki beberapa bagian yang harus dibubut.



Gambar 9. Mesin Bubut

4. Tool Pengelasan

Pada penelitian ini material *tool* yang akan digunakan adalah besi h13. Alasan pemilihan bahan tersebut karena besi h13 memiliki pengerasan udara tinggi, kandungan tinggi karbon dan vanadium membuatnya memiliki ketahanan aus yang tinggi terhadap guncangan termal dan retak panas serta kekerasan pada suhu tinggi.



Gambar 10. Tool FSW

5. Aluminium AA6061-T651

Plat aluminium paduan 6061-T6 adalah bahan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini. Sesuai dengan banyaknya parameter proses dengan dua kali ulangan maka diperlukan 32 pasang spesimen sehingga total menjadi 16 spesimen dengan dimensi 100 mm x 60 mm x 6 mm.



Gambar 11. Plat aluminium AA6061-T651

6. Kertas Gosok

Kertas gosok disini digunakan pada proses poles dan grinding. Pada penelitian ini digunakan kertas gosok ukuran 1000, 2000, 3000 dan 5000.

7. Cairan Pegetsaan

Cairan kimia untuk etsa digunakan untuk mengikis permukaan supaya struktur mikro dapat dilihat. Komposisi cairan yang digunakan disebut komposisi Keller's yaitu 2 ml hf, 3 ml hcl, 5 ml hno₃, dan 190 ml h₂o.

E. Proses *Friction Stir Welding*

Pada penelitian ini proses *friction stir welding* dilakukan sebanyak 16 kali dengan perbedaan parameter yang telah ditentukan. Berikut adalah langkah-langkah proses *friction stir welding*:

1. Pengaturan putaran *spindle* yang sudah ditentukan oleh parameter. Yaitu dengan cara memindah *belt* pada *pulley* motor dan *pulley spindle* sesuai dengan parameter kecepatan putaran *spindle* 765, 1208, 1907, 3020 (rpm).



Gambar 12. Setting kecepatan putaran *spindle*

2. Pengaturan kemiringan *tool* yang sudah ditentukan oleh parameter. Untuk melonggarkan baut pada ram mesin *frais* dengan kunci pas 17, geser kemiringan ram sampai *milling head* miring sesuai parameter yaitu sebesar 2°, 2.5°, 3°, 3.5°.
3. Pengaturan kecepatan pemakanan (*feedrate*) yang sudah ditentukan oleh parameter. Ubah kode pada tabel kecepatan pemakanan sesuai parameter sebesar 24, 43, 65, 90 (mm/min).
4. Memasang *jig* pada meja mesin *frais* dan melakukan dial untuk meluruskan posisi *jig*.
5. Memilih *tool* sesuai dengan parameter yang akan digunakan.
6. Memasang *tool* dengan *collet* pada *spindle* dan merapatkan pengunci *spindle* agar *tool* rapat dan tidak goyang.
7. Memasang spesimen plat aluminium aa6061 T651 pada *jig* dan mengunci baut yang ada di *jig* supaya saat proses *friction stir welding* tidak terjadi deformasi yang signifikan.



Gambar 13. Posisi spesimen pada *jig*

8. Menyalakan mesin *frais* dengan putaran *spindle* searah jarum jam.
9. Mengarahkan *tool* mendekati titik nol pengelasan (*datum*) pada spesimen dan menjalankan meja mesin *frais* untuk memastikan jalur pengelasan sudah tepat.
10. Pin masuk diantara dua plat hingga *shoulder* menyentuh permukaan spesimen dengan menggerakkan *tool* kearah vertikal menggunakan tuas manual pemakanan sumbu Y sampai pin *shoulder* menyentuh spesimen. Kemudian putar tuas manual pemakanan sumbu Y untuk penetrasi.
11. Menghentikan tuas otomatis sumbu X ketika pengelasan sampai ujung spesimen. Setelah itu menggerakkan tombol otomatis sumbu Y kearah menjauhi spesimen yang sudah dilakukan proses *friction stir welding*.
12. Menekan tombol *off* untuk menghentikan putaran *spindle* dan melepas *tool* menggunakan kunci khusus *spindle*.
13. Melepas spesimen pada *jig* dan melakukan pembersihan di area pengelasan dan memberikan *marking number* spesimen sesuai dengan nomor parameter.
14. Melakukan langkah-langkah di atas sebanyak 16 kali dengan menyesuaikan parameter yang sudah ditentukan.
15. Menekan tombol *off* untuk menghentikan putaran *spindle* dan melepas *tool* menggunakan kunci khusus *spindle*.

16. Melepas spesimen pada *jig* dan melakukan pembersihan di area pengelasan dan memberikan *marking number* spesimen sesuai dengan nomor parameter.



Gambar 14. Hasil spesimen *friction stir welding*

17. Melakukan langkah-langkah di atas sebanyak 16 kali dengan menyesuaikan parameter yang sudah ditentukan.

Nilai parameter diambil berdasarkan spesifikasi mesin yang berada dilabotasiuim manufaktur tekkn mesin universitas muhammadiyah sidoarjo. Berikut adalah data table yang digunakan sebagai acuan parameter proses pengelasan *friction stir welding* dan Pemilihan hasil pengelasan *friction stir welding*.

Tabel 1. Parameter Eksperimen OA Taguchi

No. Spc	Kecepatan rotasi tool (N) rpm	Sudut Bahu Cekung (SB) ^o	Sudut Kemiringan Tool (SK) ^o	Kecepatan Pengelasan (KP) mm/m	Hasil FSW
1.	765	2	2	24	Accepted
2.	765	5	2.5	43	Reject
3.	765	8	3	65	Reject
4.	765	11	3	90	Accepted
5.	1208	2	2.5	65	Accepted
6.	1208	5	2	90	Accepted
7.	1208	8	3.5	24	Reject
8.	1208	11	3	43	Accepted
9.	1907	2	3	90	Accepted
10.	1907	5	3.5	65	Reject
11.	1907	8	2	43	Accepted
12.	1907	11	2.5	24	Reject
13.	3022	2	3.5	43	Reject
14.	3022	5	3	24	Accepted
15.	3022	8	2.5	90	Reject
16.	3022	11	2	65	Reject

Hasil dari proses pengelasan *friction stir welding* terdapat 8 spesimen reject dan 8 spesiment berhasil dengan acuan parameter proses pengelasan pada table diatas selanjutnya dilakukan proses pemotongan, poles dan *grinding*, etsa dan pengamatan makrostruktur.

F. Proses Uji Makrostruktur *Friction Stir Welding*

Pada penelitian ini dilakukan uji mikrostruktur spesimen yang telah dilakukan proses *friction stir welding*. Sebelum melakukan analisa hasil uji makrostruktur, spesimen harus dilakukan beberapa perlakuan sesuai standart ASTM e407-07. Berikut ini merupakan proses perlakuan spesimen yang akan diuji makrostruktur.

1. Pemotongan (Cutting) Spesimen

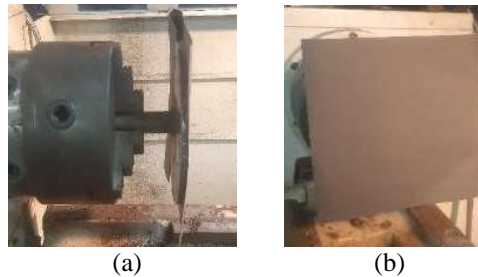
Pada proses pemotongan spesimen menggunakan mesin CNC supaya hasil FSW pada saat diuji makro tidak berubah mikro strukturnya dan spesiment lebih presisi sesuai dengan ukuran yang diinginkan . Spesimen yang dipotong memiliki dimensi ukuran panjang 20 mm, lebar 30 mm dan tebal 6 mm.



Gambar 15. Proses Pemotongan Spesimen

2. Poles dan *Grinding*

Proses poles dan grinding adalah proses untuk menghaluskan permukaan spesimen. Mesin bubut digunakan untuk proses poles.



Gambar 16. Alat poles (a) tampak samping, (b) tampak depan

Pada proses pemolesan menggunakan kertas gosok ukuran 1000,2000,3000 dan 5000. Saat pemolesan menggunakan cairan *coolant* (*dromus*) untuk menghindari panas akibat gesekan yang terjadi saat pemolesan. Setelah pemolesan sampai dengan permukaan spesimen menjadi rata kemudian dilakukan penggosokan menggunakan autosol sampai spesimen terlihat seperti mirroring. Berikut gambar dibawah hasil dari pemolesan dan penggrindingan yang telah dilakukan.

3. *Etching*

Proses etsa (*etching*) merupakan proses untuk memperlihatkan atau mengikis permukaan spesimen yang diuji agar fasa pada spesimen terlihat struktur mikro, fasa dan kandungan kimianya. Pada penelitian ini menggunakan Keller's reagent sesuai standart ASTM-e407-07. Cairan yang digunakan yaitu 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃, dan 190 ml H₂O dan menggunakan Alkohol 70% untuk membersihkan spesimen dari cairan etsa.



Gambar 17. Proses Etching

4. Mikroskop Optik dan Makro

Proses mikroskop optik dilakukan untuk melihat struktur macro dari spesimen yang diuji dan untuk penelitian ini dilakukan dengan pembesaran 50x. Proses pengambilan data pada mikroskop optik dilakukan dengan cara dibawah ini:

- Menyalakan komputer dan mikroskop optik.
- Mengatur cahaya mikroskop optik sampai setengah adjustment lamp.
- Meletakkan spesimen di meja uji.
- Mengatur lensa macro pembesaran 50 x
- Membuka aplikasi Capture 2.2.1 untuk mengoperasikan mikroskop optik.
- Mengatur titik fokus menggunakan adjustmen table sumbu x,y, dan z sampai spesimen terlihat fokus di monitor.
- Melakukan *capture* gambar di aplikasi kemudian *save* di komputer.
- Melakukan step tersebut sesuai dengan banyak spesimen yang dilakukan pengujian

5. Metalografi

Hasil pengambilan gambar akan dilakukan analisa pada proses metalografi. Proses metalografi bertujuan untuk memaparkan hasil dan dianalisa sesuai dengan gambar yang dihasilkan.

G. Pengujian Struktur Makro

Pada pengujian makrostruktur untuk spesimen yang telah dilakukan proses FSW perlu melakukan proses perlakuan spesimen yang akan diuji mikrostruktur, meliputi: Pemolesan benda uji, Poles dan Grinding, Pengetsaan, Mikroskop Optik, Metalografi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Uji Makrostruktur Friction Stir Welding

Setelah melalui proses pemotongan, poles dan *grinding*, etsa dan pengamatan makrostruktur. Pada hasil dari proses pengelasan *friction stir welding* terdapat 8 spesimen reject dan 8 spesimen berhasil dengan acuan table parameter proses pengelasan. Berikut hasil dari pengambilan makrostruktur pengelasan *friction stir welding* aluminium AA6061-T651 dengan uji makrostruktur.

Berikut dibawah ini adalah hasil uji makrostruktur dari proses *friction stir welding* dengan metode OA Taguchi.

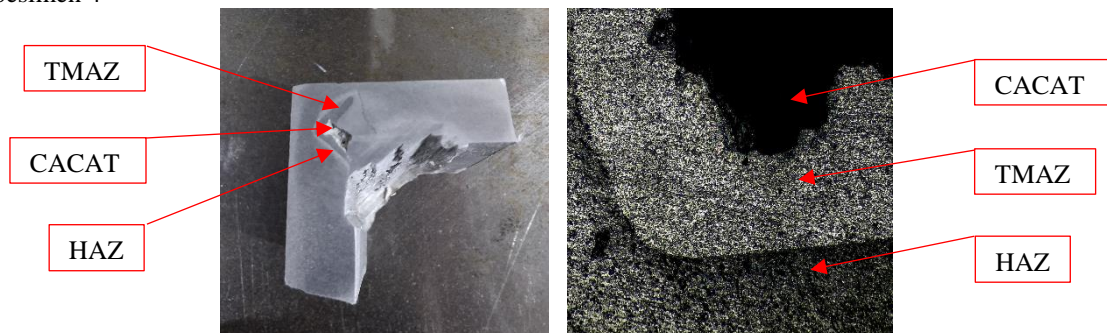
1. Spesimen 1



Gambar 18. Makrostruktur Spesimet 1

Sesuai dengan **Gambar 18**. Dengan parameter kecepatan rotasi 765 rpm, sudut bahu cekung 2° , sudut kemiringan tool 2° , kecepatan pengelasan 24 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) mengecil karena kecepatan rotasi tool yang pelan yaitu 765 rpm memberikan energi kinetik yang kecil pada tool, menghasilkan panas yang rendah di sekitar zona pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah (2°) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang sempit. Sudut kemiringan tool yang moderat (2°) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang rendah (24 mm/menit) memberikan waktu yang kurang memadai untuk proses pengadukan material yang terlalu lambat sehingga terbentuknya cacat las yaitu lubang besar atau retakan.

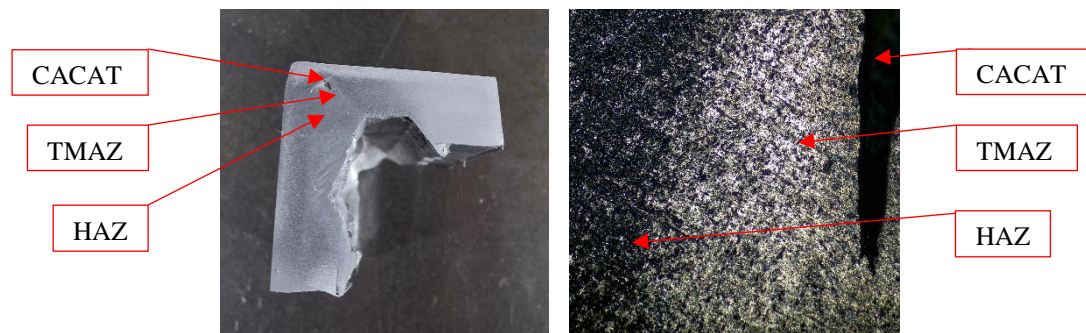
2. Spesimen 4



Gambar 19. Makrostruktur Spesimet 4

Sesuai dengan **Gambar 19**. Dengan parameter kecepatan rotasi 765 rpm, sudut bahu cekung 11° , sudut kemiringan tool 3° , kecepatan pengelasan 90 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar karena kecepatan rotasi tool yang lambat yaitu 765 rpm memberikan energi kinetik yang kecil pada tool, menghasilkan panas yang tinggi di sekitar zona pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah (11°) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat (3°) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang sedang (90 mm/menit) memberikan waktu yang memadai untuk proses pengadukan material yang terlalu tidak cepat atau lambat sehingga terbentuknya cacat las yaitu lubang kecil.

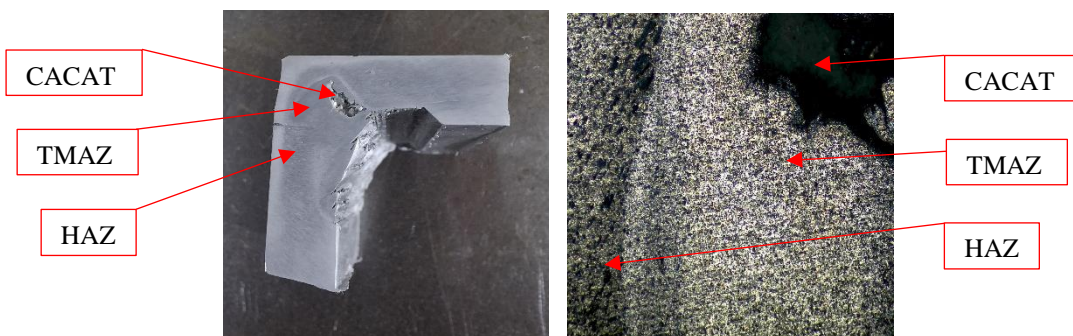
3. Spesimen 5



Gambar 20. Makrostruktur Spesimen 5

Sesuai dengan **Gambar 20**. Dengan parameter kecepatan rotasi 1208 rpm, sudut bahu cekung 2° , sudut kemiringan tool 2.5° , kecepatan pengelasan 65 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar karena kecepatan rotasi tool yang tidak terlalu cepat atau lambat yaitu 1208 rpm memberikan energi kinetik yang besar pada tool, menghasilkan panas yang tinggi di sekitar zona pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah (2°) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat (2.5°) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang sedang (65 mm/menit) memberikan waktu yang memadai untuk proses pengadukan material yang tidak lambat atau cepat sehingga terbentuknya cacat las yaitu lubang kecil.

4. Spesimen 6



Gambar 21. Makrostruktur Spesimen 6

Sesuai dengan **Gambar 21**. Dengan parameter kecepatan rotasi 1208 rpm, sudut bahu cekung 5° , sudut kemiringan tool 2° , kecepatan pengelasan 90 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar karena kecepatan rotasi tool yang tidak terlalu cepat atau lambat yaitu 1208 rpm memberikan energi kinetik yang besar pada tool, menghasilkan panas yang tinggi di sekitar zona pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah (5°) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat (2°) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang sedang (90 mm/menit) memberikan waktu yang memadai untuk proses pengadukan material yang terlalu tidak lambat atau cepat sehingga terbentuknya cacat las yaitu lubang kecil atau retakan.

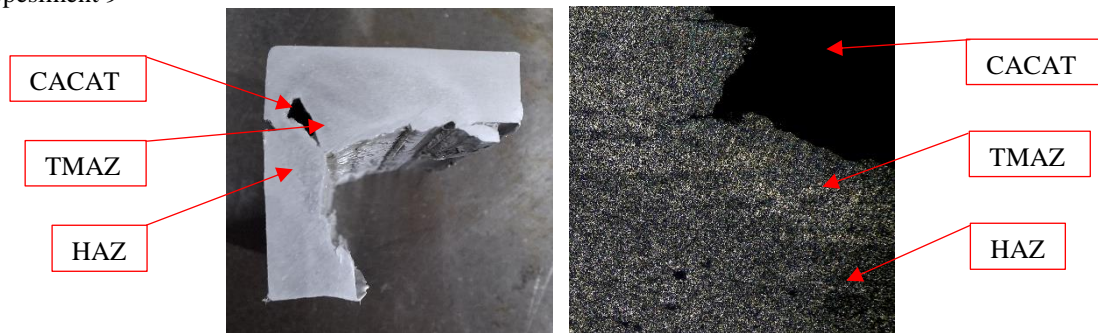
5. Spesimen 8



Gambar 22. Makrostruktur Spesimen 8

Sesuai dengan **Gambar 22**. Dengan parameter kecepatan rotasi 1208 rpm, sudut bahu cekung 11° , sudut kemiringan tool 3° , kecepatan pengelasan 43 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar karena kecepatan rotasi tool yang tidak terlalu cepat atau pelan yaitu 1208 rpm memberikan energi kinetik yang besar pada tool, menghasilkan panas yang tinggi di sekitar zona pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah (11°) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat (3°) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang sedang (43 mm/menit) memberikan waktu yang kurang memadai untuk proses pengadukan material yang terlalu lambat sehingga terbentuknya cacat las yaitu lubang besar atau retakan.

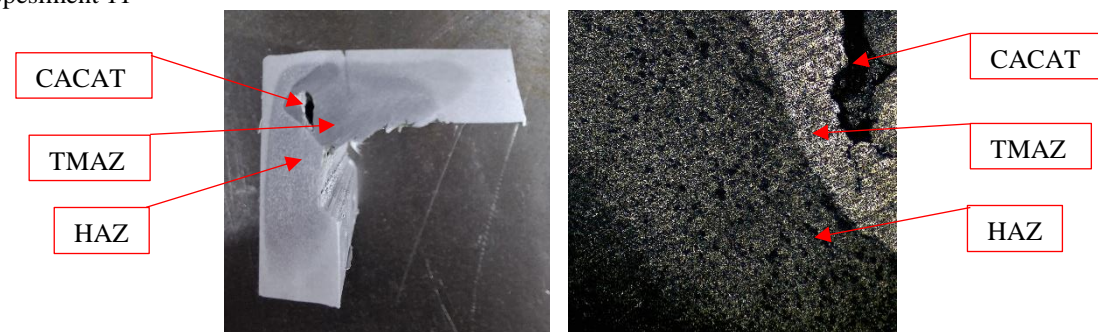
6. Spesiment 9



Gambar 23. Makrostruktur Spesiment 9

Sesuai dengan **Gambar 23**. Dengan parameter kecepatan rotasi 1907 rpm, sudut bahu cekung 2° , sudut kemiringan tool 3° , kecepatan pengelasan 90 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) mengecil karena kecepatan rotasi tool yang cepat yaitu 1907 rpm memberikan energi kinetik yang besar pada tool, menghasilkan panas yang tinggi di sekitar zona pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah (2°) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat (3°) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang sedang (90 mm/menit) memberikan waktu yang memadai untuk proses pengadukan material yang terlalu tidak lambat atau cepat sehingga terbentuknya cacat las yaitu lubang besar atau retakan yang lebar.

7. Spesiment 11



Gambar 24. Makrostruktur Spesiment 11

Sesuai dengan **Gambar 24**. Dengan parameter kecepatan rotasi 1907 rpm, sudut bahu cekung 8° , sudut kemiringan tool 2° , kecepatan pengelasan 24 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) mengecil karena kecepatan rotasi tool yang pelan yaitu 43 rpm memberikan energi kinetik yang kecil pada tool, menghasilkan panas yang rendah di sekitar zona pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah (8°) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas, yang dapat menghasilkan HAZ yang ikut menyempit. Sudut kemiringan tool yang moderat (2°) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang sedang (43 mm/menit) memberikan waktu yang kurang memadai untuk proses pengadukan material yang terlalu lambat sehingga terbentuknya cacat las yaitu lubang kecil.

8. Spesiment 14



Gambar 25. Makrostruktur Spesiment 14





Sesuai dengan **Gambar 25**. Dengan parameter kecepatan rotasi 3022 rpm, sudut bahu cekung 5° , sudut kemiringan tool 3° , kecepatan pengelasan 24 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar karena kecepatan rotasi tool yang cepat yaitu 3022 rpm memberikan energi kinetik yang besar pada tool, menghasilkan panas yang tinggi di sekitar zona pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah (5°) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas, yang dapat menghasilkan HAZ yang ikut menyempit. Sudut kemiringan tool yang moderat (3°) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang sedang (24 mm/menit) memberikan waktu yang kurang memadai untuk proses pengadukan material yang terlalu lambat sehingga terbentuknya cacat las seperti lubang besar dan retakan yang panjang.

B. Analisa dan Pembahasan Hasil Uji Makrostruktur *Friction Stir Welding*

Untuk memudahkan pemahaman pada data dari hasil uji makro struktur pada proses metalografi dilakukan proses analisa pada hasil *Friction Stir Welding*. Tujuan analisa ini guna visualisasi yang lebih baik dan lebih mudah dimengerti.

A. Analisa Spesimen Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* Terbaik Pada Uji Makrostruktur

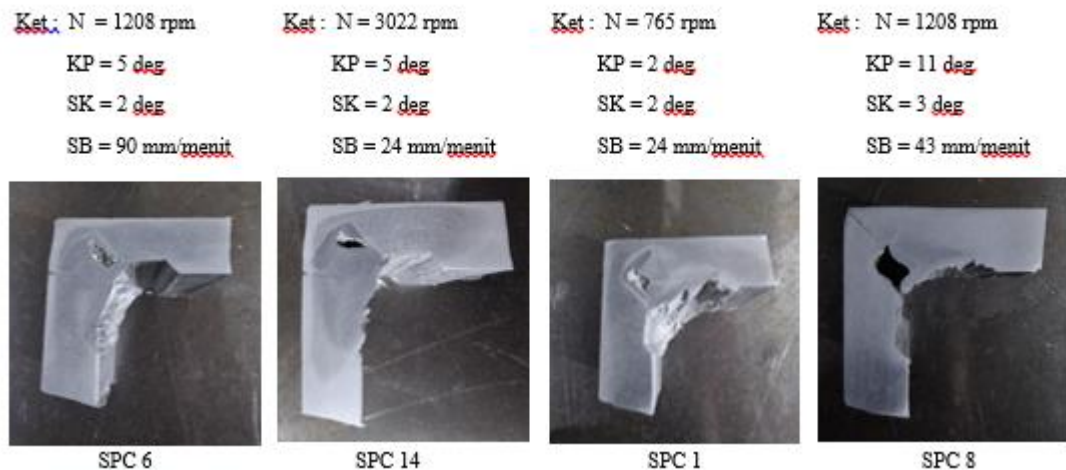
Ket: N = 1208 rpm	Ket: N = 1907 rpm	Ket: N = 765 rpm	Ket: N = 1208 rpm
KP = 2 deg	KP = 8 deg	KP = 11 deg	KP = 5 deg
SK = 2.5 deg	SK = 2 deg	SK = 3 deg	SK = 2 deg
SB = 65 mm/menit	SB = 43 mm/menit	SB = 90 mm/menit	SB = 90 mm/menit

			
SPC 5	SPC 11	SPC 4	SPC 6

Gambar 26. 4 Spesimen Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* Terbaik

Pada **Gambar 26**. diatas dari 4 spesimen hasil pengelasan *Friction Stir Welding*, hasil pengelasan terbaik adalah spesimen 5 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 2° , sudut kemiringan tool 2.5° , kecepatan pengelasan 65 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih kecil dari pada 3 spesimen terbaik lainnya. Hasil kurang baik dari 4 spesimen pengelasan terbaik adalah spesimen 6 dengan parameter parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 5° , sudut kemiringan tool 2° , kecepatan pengelasan 90 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih besar dan retakan dari pada 3 spesimen terbaik lainnya.

B. Analisa Spesimen Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* Kurang Baik Pada Uji Makrostruktur



Gambar 27. Spesimen Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* Kurang Baik

Pada **Gambar 27.** diatas dari 4 spesimen hasil pengelasan kurang baik terdapat pengelasan terbaik adalah spesimen 6 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 5°, sudut kemiringan tool 2°, kecepatan pengelasan 90 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih kecil dari pada 3 spesimen terbaik lainnya. Hasil kurang baik dari 4 spesimen pengelasan kurang baik adalah spesimen 8 dengan parameter parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 11°, sudut kemiringan tool 3°, kecepatan pengelasan 43 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih besar dan retakan dari pada 3 spesimen terbaik lainnya juga spesimet tersebut hampir patah.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa dari “Studi Parameter Proses *Friction Stir Welding* pada Pengelasan Material AA6061-T651 dengan Sambungan Sudut Terhadap Struktur Makro” dengan Pengujian analisa makrostruktur maka dapat di ambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada proses pengelasan *Friction Stir Welding* dengan tabel parameter pengelasan yang ada didapatkan 4 hasil pengelasan terbaik, 4 hasil pengelasan kurang baik dan 8 hasil pengelasan yang reject.
2. Berdasarkan hasil pengujian makro dari 4 hasil terbaik didapatkan hasil terbaik dan kurang baik yaitu hasil pengelasan terbaik adalah spesimen 5 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 2°, sudut kemiringan tool 2.5°, kecepatan pengelasan 65 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih kecil dari pada 3 spesimen terbaik lainnya. Hasil kurang baik dari 4 spesimen pengelasan terbaik adalah spesimen 6 dengan parameter parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 5°, sudut kemiringan tool 2°, kecepatan pengelasan 90 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih besar dan retakan dari pada 3 spesimen terbaik lainnya.
3. Berdasarkan hasil pengujian makro dari 4 hasil kurang baik didapatkan hasil terbaik dan kurang baik yaitu pengelasan terbaik adalah spesimen 6 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 5°, sudut kemiringan tool 2°, kecepatan pengelasan 90 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih kecil dari pada 3 spesimen terbaik lainnya. Hasil kurang baik dari 4 spesimen pengelasan kurang baik adalah spesimen 8 dengan parameter parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 11°, sudut kemiringan tool 3°, kecepatan pengelasan 43 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih besar dan retakan dari pada 3 spesimen terbaik lainnya juga spesimet tersebut hampir patah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepda Progam Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat serta rekan aslab, himpunan mahasiswa dan teman-teman yang telah membantu untuk menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] W. Fsw, T. Sifat, M. Dan, M. Pada, dan A. Paduan, *PENGARUH KECEPATAN FEEDRATE FRICTION STIR*, no. November 2021. 2024.
- [2] I. Guzmán, E. Granda, J. Acevedo, A. Martínez, Y. Dávila, and R. Velázquez, “Comparative in mechanical behavior of 6061 aluminum alloy welded by pulsed GMAW with different filler metals and heat treatments,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 24, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/ma1224157.
- [3] Firdaus, Rachmat, and Rahmania Sri Untari. "Optimization of Friction Stir Welding Parameters for AA6061-T651 Aluminum Alloy: Defect Analysis and Process Improvement." *Academia Open* 8.1 (2023): 10-21070..
- [4] Santoso, Habibi, Aep Surahto, and Fatimah Dian Ekawati. "The Effect of Rotation Speed on the Quality of Friction Welding Joints in Aluminum and Copper." *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa dan Inovasi* 6 (2024): 309-318..
- [5] Rahmat, D. A., & Naubnome, V. (2024). Pengaruh Feed Rate Terhadap Uji Kekerasan, Uji Tarik dan Mikro Struktur Pada Alumunium 6061 dengan Metode Friction Stir Welding. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(3), 10034-10041..
- [6] P. Rupajati and P. Rupajati, “Investigasi dan Optimasi Parameter Proses Micro Friction Stir Spot Welding Material A1100/Cu1100P Menggunakan Metode Taguchi,” *J. Tek. Mesin ITI*, vol. 3, no. 2, p. 59, 2019, doi: 10.31543/jtm.v3i2.340.
- [7] Agus Suprayitno, Rohman, and Dimas Sanjaya, “ANALISIS SIFAT MEKANIS BAJA St.60 HASIL PENGELASAN FRICTION WELDING DENGAN VARIASI PENDINGIN,” *J. Tek. Mesin Mech. Xplore*, vol. 2, no. 2, pp. 9–18, 2022, doi: 10.36805/jtmx.v2i2.2168.
- [8] Soleh, M. Z. A., & Mulyadi, M. (2021). Design and Build JIG Design on Friction Stir Welding Using Fillet Connection on AA6061-T6 Material. *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 14, 10-21070.
- [9] Prayitno, D., Silalahi, R., & Triyono, T. (2023). PENGARUH PANJANG PIN PADA FRICTION STIR WELDING (FSW) TERHADAP KEKUATAN TARIK, KEKERASAN LEMBARAN AL 5083 DAN AL 6061. *Metrik Serial Humaniora dan Sains*, 4(2), 33-40.
- [10] R. A. Y. Faruq, S. Jokosisworo, and E. S. Hadi, “Analisa Pengaruh Perbedaan Diameter Pin Tool terhadap Kekuatan Tarik, Impak, dan Mikrografi pada Aluminium 6061 dengan Metode Pengelasan Friction Stir Welding (FSW),” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, 2019.
- [11] Wardana, A. I., & Mulyadi, M. Analysis of Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Process Joint on AA6005-T6 Series Alumunium Alloy on Tensile Strength and Macro Structure: Analisa Sambungan Proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) pada Paduan Aluminium Seri AA6005-T6 terhadap Kuat Tarik dan Struktur Makro..
- [12] Subkhan, M. F., & Mulyadi, M. Confirmation Experiment of Friction Stir Welding Process on Aluminum Alloy Aa-6061-T6561 on Tensile Strength and Weld Penetration: Eksperimen Konfirmasi Proses Friction Stir Welding pada Material Alumunium Alloy Aa-6061-T6561 Terhadap Kekuatan Tarik dan Penetrasi Las.
- [13] T. Cahyono and P. H. Tjahjanti, “Analisa Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) pada Material Titanium (Ti-6Al-4V),” *Innov. Technol. Methodical Res. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–13, 2024, doi: 10.47134/innovative.v3i2.104.
- [14] M. A. I. Muslim and Iswanto, “Pengaruh Parameter Pengelasan Pada Friction Stir Welding Terhadap Sifat Mekanik Polimer Jenis Polyethylene,” *Progr. Stud. Tek. Mesin, Univ. Muhammadiyah Sidoarjo*, pp. 1–9, 2023.
- [15] Mulyadi, R. Firdaus, and R. S. Untari, “Optimization of Friction Stir Welding Parameters for AA6061-T651 Aluminum Alloy: Defect Analysis and Process Improvement,” *Acad. Open*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 2023, doi: 10.21070/acopen.8.2023.6665.

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.