

# STUDI PARAMETER PROSES FRICTION STIR WELDING PADA PENGELASAN MATERIAL AA6061-T651 DENGAN SAMBUNGAN SUDUT TERHADAP STRUKTUR MAKRO

Mochammad Arizal Prasetyo Widodo

181020200082

Dr. Mulyadi, S.T., M.T.

TEKNIK MESIN  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SIDOARJO

# PENDAHULUAN

## Latar Belakang

1. *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.
2. 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.

Tujuan penelitian ini, untuk mengetahui pengaruh kecepatan pengelasan terhadap struktur makro pada sambungan *fillet joint*.

# PENDAHULUAN

- *Friction Stir Welding* adalah teknik pengelasan yang populer. Hal ini dikarenakan tidak memerlukan logam pengisi yang dapat menghilangkan atau mengurangi jumlah retakan dan cacat. 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. Kecepatan rotasi, kemiringan pahat, kecepatan geser, penetrasi, dan bahan pahat adalah semua parameter pengelasan.
- *Fillet joint* adalah jenis penyambungan logam yang membentuk sudut atau lengkungan, sering kali berbentuk seperti huruf "L". Sambungan ini digunakan ketika dua bagian bertemu pada sudut 90 derajat. FSW melibatkan pemanasan untuk melelehkan logam dengan menggerakkan pahat berputar melalui permukaan logam

# METODE

## 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 alumunium AA6061-T651 untuk material pengelasan.

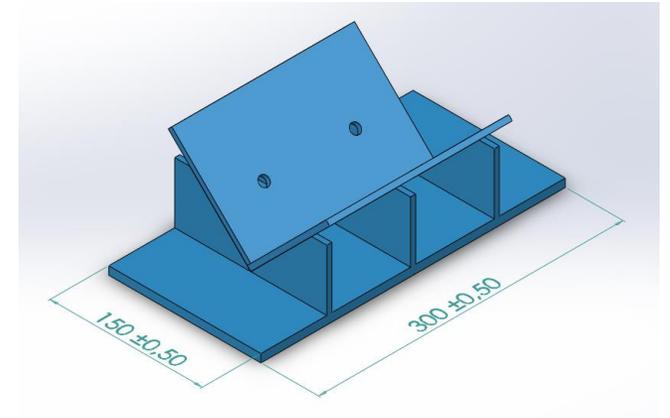


# Tools dan Jig

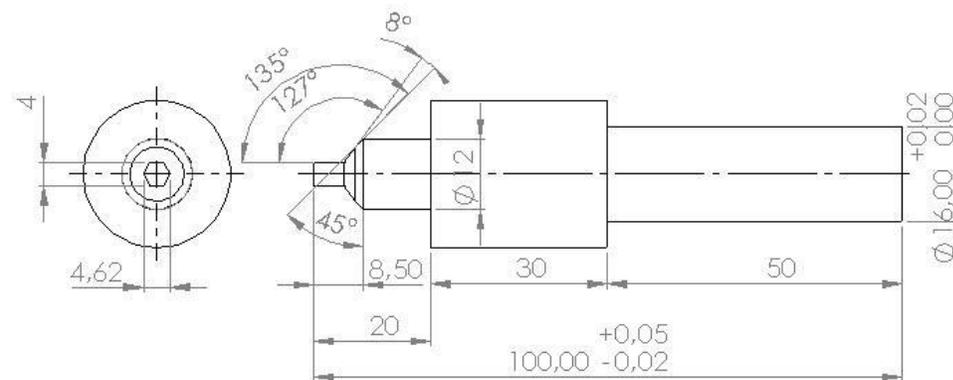
Pada proses pembuatan *tools* dan *jig* diperlukan desain untuk konsep benda kerja dengan tujuan agar proses pengujian dapat dengan mudah untuk menjalankan pekerjaan yang dilakukan



Desain *Tool* FSW



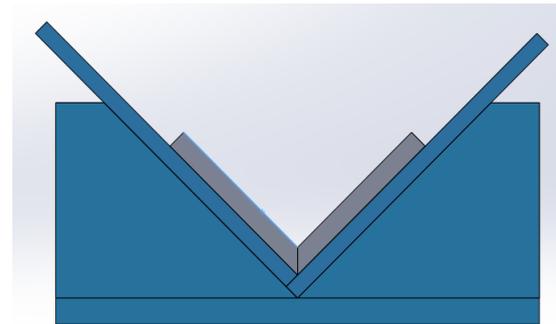
Jig FSW



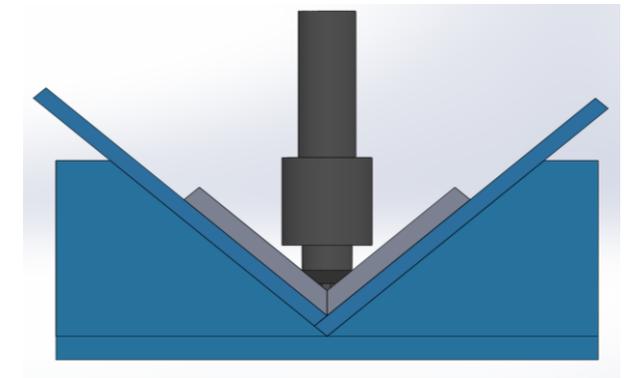
Detail 2D dari Geometri *Tool* FSW

# JENIS SAMBUNGAN

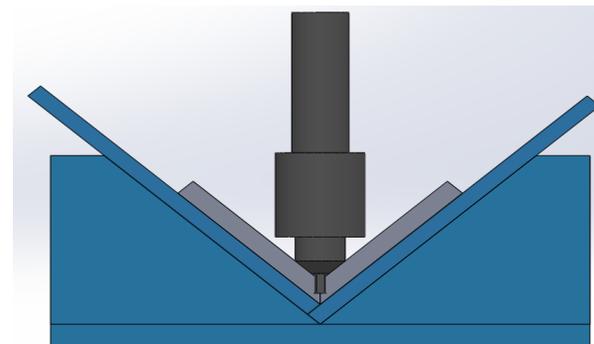
Fillet joint merupakan jenis penyambungan antara dua material yang membentuk sudut, biasanya 90 derajat. Sambungan ini menggunakan proses FSW yaitu metode pengelasan yang melibatkan gesekan dan tekanan antara pahat putar dan permukaan material yang akan disambung. Metode ini umumnya digunakan untuk logam,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



Posisi Spesimen pada Jig



Proses FSW



Posisi Tool pada proses FSW

# PENGUJIAN STRUKTUR MAKRO

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



Mikroskop Optik dan Komputer



Lensa kamera DSLR Makro

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## A. Persiapan Alat dan Bahan

### 1. Mesin *Milling* atau *Frais*

Mesin *milling*/frais digunakan untuk membuat sudut 45 derajat pada salah satu sisi aluminium dan juga digunakan untuk proses FSW



### 2. Mesin *CNC Milling*

Mesin *CNC milling* yang dipakai penelitian disini yaitu merk weidamc vmc-640 memiliki 3 axis yang berfungsi untuk membuat bentuk *tool* yang berbentuk hexagonal dan membuat jig untuk mencekam aluminium pada proses friction stir welding



# HASIL DAN PEMBAHASAN

## A. Persiapan Alat dan Bahan

### 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.



### 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.



# HASIL DAN PEMBAHASAN

## A. Persiapan Alat dan Bahan

### 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 28 pasang spesimen sehingga total menjadi 14 spesimen dengan dimensi 100 mm x 60 mm x 6 mm.



### 6. Kertas Gosok

Kertas gosok disini digunakan pada proses poles dan grinding. Pada penelitian ini digunakan kertas gosok ukuran 240, 500, 1000, dan 2000.

### 7. Cairan pengetsaan

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 hno<sub>3</sub>, dan 190 ml h<sub>2</sub>o.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## B. Proses Pengerjaan

1. Pengaturan putaran *spindle* yang sudah ditentukan oleh parameter. Yaitu dengancara memindah *belt* pada *pulley* motor dan *pulley spindle frais* sesuai dengan parameter kecepatan putaran *spindle* 765, 1208, 1907, 3020 (rpm).
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  $2^\circ$ ,  $2.5^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $3.5^\circ$ .
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.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## B. Proses Pengerjaan

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.

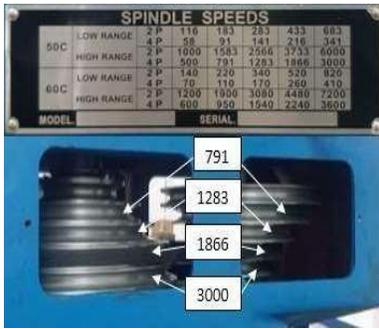
# HASIL DAN PEMBAHASAN

## B. Proses Pengerjaan

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

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## B. Proses Pengerjaan



Setting kecepatan putaran spindle



Setting sudut spindle



Setting kecepatan pemakanan



Dial permukaan spesimen



Posisi spesimen pada jig



Tuas datum titik nol

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## B. Proses Pengerjaan



Posisi *tool shoulder* pada titik awal pengelasan



Proses *friction stir welding*



Akhir proses FSW



Hasil spesimen *friction stir welding*

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## B. Proses Pengerjaan

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

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

Parameter Eksperimen OA Taguchi

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## C. Proses Pengujian Makrostruktur *Friction Stir Welding*

### 1. Pemotongan (Cutting) Spesimen

Pada proses pemotongan spesimen menggunakan mesin gerinda tangan. Spesimen yang dipotong memiliki dimensi ukuran panjang 30 mm, lebar 45 mm dan tebal 6 mm.

### 2. Poles dan Grinding/Pengaturan

Proses poles dan grinding adalah proses untuk menghaluskan permukaan spesimen. Mesin bubut digunakan untuk proses poles. Pada proses pemolesan menggunakan kertas gosok ukuran 1000,2000,3000 dan 5000.



Proses Pemotongan Spesimen



Alat poles tampak samping, dan tampak depan

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## C. Proses Pengujian Makrostruktur *Friction Stir Welding*

### 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. Cairan yang digunakan yaitu 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO<sub>3</sub>, dan 190 ml H<sub>2</sub>O dan menggunakan Alkohol 70%.

### 4. Metalorafi

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



Proses Etching

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## D. Hasil Uji Makro Struktur *Friction Stir Welding*

Setelah melalui proses pemotongan, poles dan *grinding*, etsa dan pengamatan makrostruktur melalui mikroskop optik. Pada hasil dari proses pengelasan *friction stir welding* terdapat 8 spesimen reject dan 8 spesimen berhasil dengan acuan table parameter proses pengelasan.

### 1. Spesimen 1

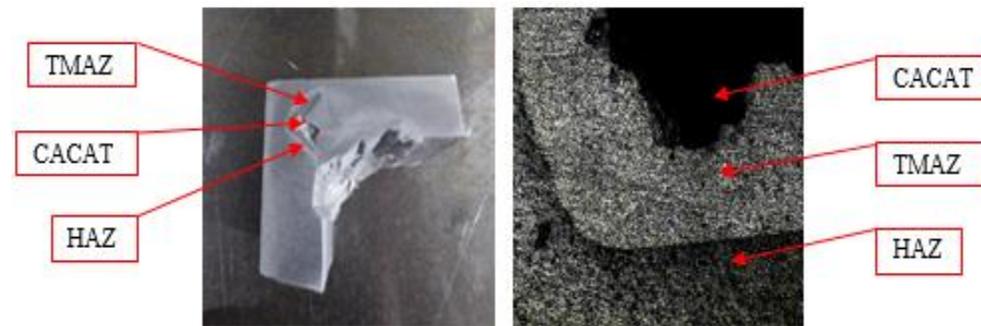


Dengan parameter kecepatan rotasi 765 rpm, sudut bahu cekung  $2^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2^\circ$ , kecepatan pengelasan 24 mm/menit. TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) mengecil. Sudut bahu cekung yang rendah ( $2^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang sempit. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $2^\circ$ ) 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.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## D. Hasil Uji Makro Struktur *Friction Stir Welding*

### 2. Spesimen 4



Dengan parameter kecepatan rotasi 765 rpm, sudut bahu cekung  $11^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , kecepatan pengelasan 90 mm/menit. TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) mengecil. Sudut bahu cekung yang rendah ( $11^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $3^\circ$ ) 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.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## D. Hasil Uji Makro Struktur *Friction Stir Welding*

### 3. Spesimen 5

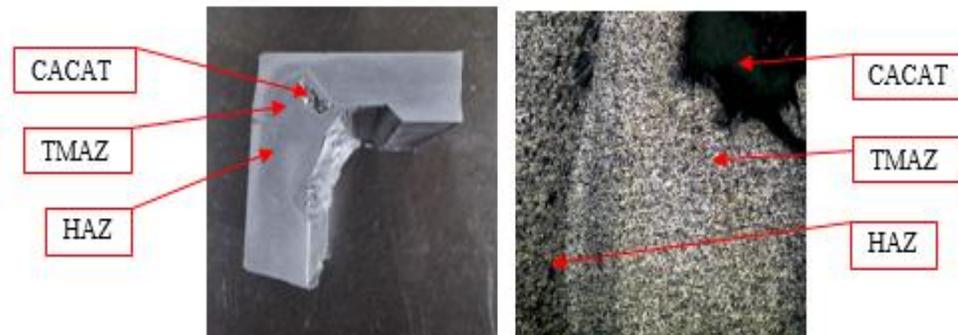


Dengan parameter kecepatan rotasi 1208 rpm, sudut bahu cekung  $2^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2.5^\circ$ , kecepatan pengelasan 65 mm/menit, TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) mengecil. Sudut bahu cekung yang rendah ( $2^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $2.5^\circ$ ) 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.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## D. Hasil Uji Makro Struktur *Friction Stir Welding*

### 4. Spesimen 6



Dengan parameter kecepatan rotasi 1208 rpm, sudut bahu cekung  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2^\circ$ , kecepatan pengelasan 90 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) mengecil. Sudut bahu cekung yang rendah ( $5^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $2^\circ$ ) 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.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## D. Hasil Uji Makro Struktur *Friction Stir Welding*

### 5. Spesimen 8



Dengan parameter kecepatan rotasi 1208 rpm, sudut bahu cekung  $11^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , kecepatan pengelasan 43 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar. Sudut bahu cekung yang rendah ( $11^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $3^\circ$ ) 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.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## D. Hasil Uji Makro Struktur *Friction Stir Welding*

### 6. Spesimen 9



Dengan parameter kecepatan rotasi 1907 rpm, sudut bahu cekung  $2^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , kecepatan pengelasan 90 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar. Sudut bahu cekung yang rendah ( $2^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $3^\circ$ ) 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.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## D. Hasil Uji Makro Struktur *Friction Stir Welding*

### 7. Spesimen 11



Dengan parameter kecepatan rotasi 1907 rpm, sudut bahu cekung  $8^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2^\circ$ , kecepatan pengelasan 24 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar. Sudut bahu cekung yang rendah ( $8^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas, yang dapat menghasilkan HAZ yang ikut menyempit. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $2^\circ$ ) 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.

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## D. Hasil Uji Makro Struktur *Friction Stir Welding*

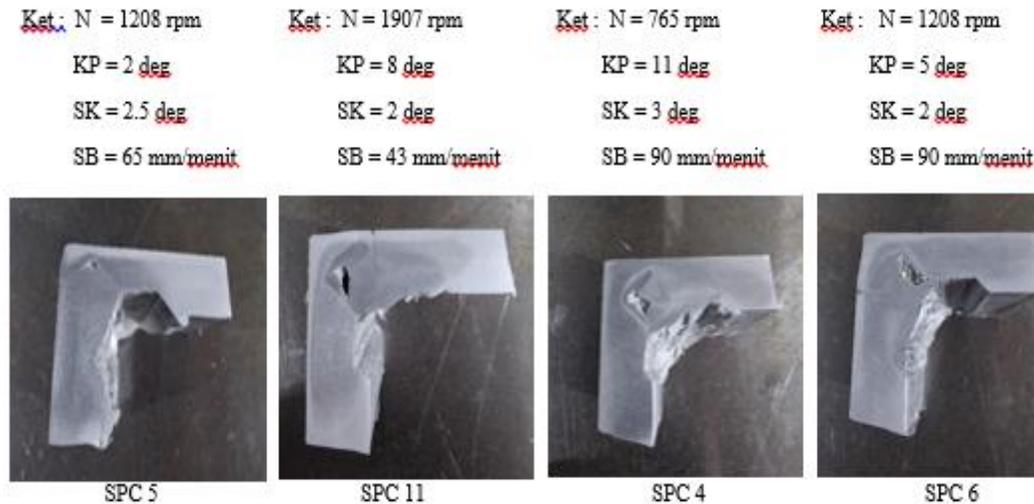
### 8. Spesimen 14



Dengan parameter kecepatan rotasi 3022 rpm, sudut bahu cekung  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , kecepatan pengelasan 24 mm/menit, terjadi fenomena dimana TMAZ (*Thermo-Mechanically Affected Zone*) dan Zona HAZ (*Heat Affected Zone*) melebar. Sudut bahu cekung yang rendah ( $5^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas, yang dapat menghasilkan HAZ yang ikut menyempit. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $3^\circ$ ) 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.

# Analisa dan Pembahasan Uji Makro Struktur Friction Stir Welding

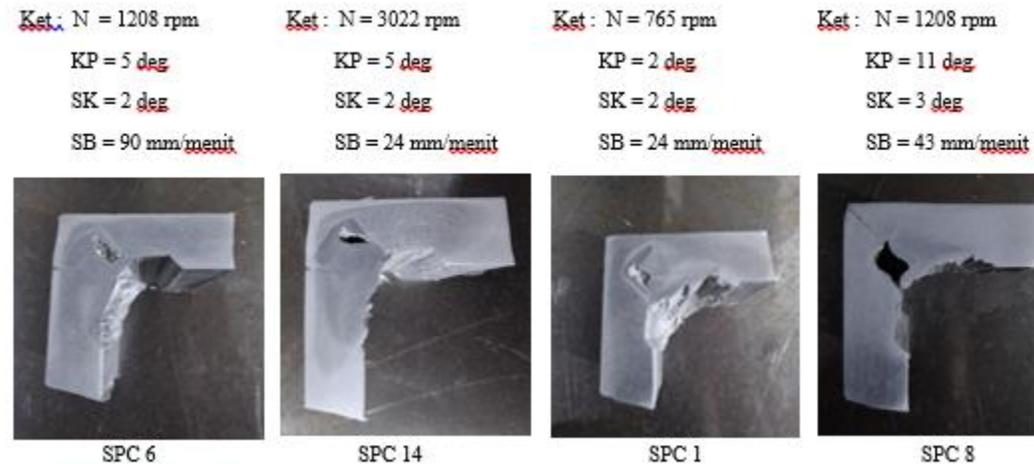
## 1. Analisa Spesimen Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* Terbaik pada Uji Makro Struktur



Dari 4 spesimen hasil pengelasan *Friction Stir Welding*, hasil pengelasan terbaik adalah spesimen 5 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung  $2^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2.5^\circ$ , 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  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2^\circ$ , kecepatan pengelasan 90 mm/menit karena terdapat cacat lubang yang lebih besar dan retakan dari pada 3 spesimen terbaik lainnya.

# Analisa dan Pembahasan Uji Makro Struktur Friction Stir Welding

## 2. Analisa Spesimen Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* Kurang Baik pada Uji Makro Struktur



Dari 4 spesimen hasil pengelasan kurang baik terdapat pengelasan terbaik adalah spesimen 6 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2^\circ$ , 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  $11^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , 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.

# KESIMPULAN

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  $2^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2.5^\circ$ , 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  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2^\circ$ , 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  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2^\circ$ , 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  $11^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , 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.

# DAFTAR PUSTAKA

- [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/jtmmx.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.

# DAFTAR PUSTAKA

- [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.

