



TUGAS AKHIR (607408A)

**ANALISIS PENGARUH *FRICTION WELDING* PADA
MATERIAL *AUSTENITE STAINLESS STEEL* 316L
TERHADAP *MECHANICAL PROPERTIES* DAN
STRUKTUR MIKRO**

RECHTATO CENDIKA AJI
NRP 0716040050

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. WIWIK DWI PRATIWI, M.T.
ERIEK W.R. WIDODO, S.Si., M.T.

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGELASAN
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2020**



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (607408A)

**ANALISIS PENGARUH *FRICTION WELDING* PADA
MATERIAL *AUSTENITE STAINLESS STEEL 316L*
TERHADAP *MECHANICAL PROPERTIES* DAN
STRUKTUR MIKRO**

RECHTATO CENDIKA AJI

NRP 0716040050

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Ir. WIWIK DWI PRATIWI, M.T.

ERIEK W.R. WIDODO, S.Si., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGELOMAN

JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

SURABAYA

2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH FRICTION WELDING PADA MATERIAL AUSTENITE STAINLESS STEEL 316L TERHADAP MECHANICAL PROPERTIES DAN STRUKTUR MIKRO

Disusun Oleh:

Rechtato Cendika Aji

0716040050

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Pengelasan
Jurusan Teknik Bangunan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir, Tanggal Ujian: 24 Agustus 2020
Periode Wisuda: Oktober 2020

Menyetujui,

Dosen Penguji

NIDN

Tanda Tangan

- | | | |
|---------------------------------|---------|---------|
| 1. Dr. Ir. Wiwik Dwi P, M.T. | (.....) | (.....) |
| 2. Eriek W.R. Widodo, S.Si, M.T | (.....) | (.....) |
| 3. Imam Khoirul R., SST, M.T. | (.....) | (.....) |
| 4. Dika Anggara, SST, M.T. | (.....) | (.....) |

Dosen Pembimbing

NIDN

Tanda Tangan

- | | | |
|---------------------------------|---------|---------|
| 1. Dr. Ir. Wiwik Dwi P, M.T. | (.....) | (.....) |
| 2. Eriek W.R. Widodo, S.Si, M.T | (.....) | (.....) |

Menyetujui,

Ketua Jurusan,

Mengetahui,

Koordinator Program Studi,

Ruddianto, S.T., M.T., MRINA.

NIP:196910151995011001

Muhamad Ari, S.T., M.T.

NIP: 198009052015041001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

	<u>PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT</u>	No. : F.WD 1.021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
---	--	--

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Rechtato Cendika Aji

NRP. : 0716040050

Jurusan/Prodi : Teknik Bangunan Kapal / D4 Teknik Pengelasan

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

Analisis Pengaruh Friction Welding Pada *Austenite Stainless Steel* 316L
 Terhadap *Mechanical Properties* dan Struktur Mikro

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut,
 maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Madiun, 13 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



(Rechtato Cendika Aji)

NRP. 0716040050

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISIS PENGARUH *FRICTION WELDING* PADA MATERIAL *AUSTENITE STAINLESS STEEL 316L* TERHADAP *MECHANICAL PROPERTIES* DAN STRUKTUR MIKRO

Rechtato Cendika Aji

ABSTRAK

Friction Stir Welding atau FSW adalah sebuah metode pengelasan yang tidak menggunakan tambahan *filler* atau logam pengisi untuk menyambungkan logamnya. Pengelasan *friction* biasanya diaplikasikan pada sektor otomotif dan *aeroplane* yang pada mulanya pengelasan ini berfungsi untuk mengurangi biaya produksi, namun ternyata hasilnya sangat efektif jika diaplikasikan di dalam kedua sektor tersebut. Pengelasan *friction* yang diaplikasikan bantuan gesekan dan tekanan antara kedua benda. Selain itu penggunaan parameter seperti kecepatan rotasi *tools*, besar gaya tekan, sudut kemiringan *tools* dan kecepatan pengelasan juga mempengaruhi hasil dari pengelasan tersebut. Pengelasan *friction* yang dilakukan pada material *austenite stainless steel* AISI 316L memiliki hasil yang cukup memuaskan, walaupun tidak menggunakan logam pengisi namun pengelasan *friction* juga memberikan efek yang baik pada material melalui *mechanical properties* dan struktur mikro. Material pengelasan *friction* yang diuji kekuatan tariknya mengalami peningkatan seiring dengan perubahan pada parameternya. Sama halnya dengan kekerasan material yang mengalami kenaikan nilai *hardness*nya. Untuk struktur mikro material mengalami perbaikan butir pada daerah yang dilewati *tools* sehingga menjadi lebih halus jika dibandingkan sebelum dilakukannya pengelasan *friction*.

Kata kunci: FSW; *mechanical properties*; *microstructure*; *stainless steel*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**ANALYSIS THE EFFECT OF FRICTION WELDING ON AUSTENITE
STAINLESS STEEL 316L MATERIALS ON MECHANICAL PROPERTIES
AND MICRO STRUCTURE**

Rechtato Cendika Aji

ABSTRACT

Friction Stir Welding or FSW is a welding method that does not use additional filler or filler metal to connect the metal. Friction welding is usually applied to the automotive and aero plane sectors, which initially served to reduce production costs, but it turns out that the results are very effective when applied in both sectors. Friction welding that is applied to help with friction and pressure between the two objects. In addition, the use of parameters such as tool rotation speed, compressive force, tools tilt angle and welding speed also affect the results of the welding. Friction welding carried out on austenite stainless steel AISI 316L has satisfactory results, although it does not use filler metal, friction welding also has a good effect on the material through its mechanical properties and microstructure. The tensile strength of the friction welding material has increased along with changes in its parameters. Likewise, the hardness of the material has increased its hardness value. The microstructure of the material has improved grain in the area through which the tools are passed so that it becomes smoother when compared to before friction welding.

Key words: FSW; mechanical properties, microstructure, stainless steel

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Syukur saya ucapkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga dapat terselesaikan Tugas Akhir yang berjudul *ANALISIS PENGARUH FRICTION WELDING PADA AUSTENITE STAINLESS STEEL 316L TERHADAP MECHANICAL PROPERTIES DAN STRUKTUR MIKRO*. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih atas segala sesuatu yang diberikan kepada penulis, khususnya kepada:

1. Ibu, Nenek dan Kakek yang selalu memberikan motivasi, finansial serta dukungan yang tidak pernah berhenti kepada penulis.
2. Bapak Ir. Eko Julianto, M.sc., MRINA selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
3. Bapak Ruddianto, S.T., M.T., MRINA. selaku Ketua Prodi Teknik Pengelasan.
4. Bapak Mukhlis, S.T., M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir.
5. Ibu Dr. Ir. Wiwik Dwi Pratiwi, M.T. selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir yang telah banyak meberikan bimbingan dan arahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Eriek W.R. Widodo, S.Si., M.T. selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir yang telah banyak meberikan bimbingan dan arahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
7. Bapak Imam Khoirul Rohmat SST., M.T dan Bapak Dika Anggara SST., M.T. selaku Dosen Penguji yang selalu memberi solusi dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman Teknik Pengelasan 2016 yang selalu memberi inspirasi dan motivasi.
9. Seluruh Staff Dosen dan Karyawan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
10. Teman-teman BIG BRO yang selalu memberikan semangat dan motivasi selama pengerjaan Tugas Akhir

11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang selalu memberi bantuan dan semangat kepada penulis.

Penulis menyadari atas kurang sempurnanya penelitian ini, sehingga masih terdapat kekurangan yang tidak disengaja. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun dan berguna dibutuhkan untuk perbaikan serta penelitian selanjutnya. Semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat memberi manfaat serta dapat digunakan sebagai salah satu referensi untuk pengembangan Tugas Akhir selanjutnya di kemudian hari dan dapat menjadi nilai tambah khususnya bagi penulis dan umumnya bagi pembaca.

Madiun, 13 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Tugas Akhir.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
“Halaman ini sengaja dikosongkan”.....	4
BAB 2.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Friction Welding	5
2.2 Komponen Dalam Mesin Friction Stir Welding	6
2.2.1 Essential Component	6
2.2.2 Additional Component	9
2.3 Stainless Steel	10

2.4Klasifikasi <i>Stainless Steel</i>	11
2.4.1 AISI 316L	13
2.5Sifat Mekanik	13
2.6Pengujian Material	13
2.6.1 Pengujian Kekerasan.....	14
2.6.3 Pengujian Struktur Mikro	17
2.6.4 Struktur Mikro Pada Pengelasan Friction	19
BAB 3	21
METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir	21
3.2 Menentukan Topik	22
3.3 Memilih Jurnal yang Sesuai Topik	22
3.4 Pengumpulan Jurnal atau Pustaka.....	23
3.5 Rangkuman Jurnal yang Sesuai Dengan Topik	23
3.6 Analisa Hasil Jurnal atau Pustaka	27
3.7 Perbandingan Hasil Analisa	27
3.8 Kesimpulan	27
BAB 4	29
PEMBAHASAN	29
4.1 Pengaruh <i>Friction Welding</i> Terhadap Kekuatan Tarik.....	29
4.2 Pengaruh Friction Welding Terhadap Kekerasan	35
4.3 Pengaruh <i>Friction Welding</i> Terhadap Struktur Mikro.....	42
4.4 Diskusi	49
BAB 5	55
KESIMPULAN.....	55
DAFTAR PUSTAKA	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Mesin <i>Friction Stir Welding</i>	6
Gambar 2. 2 <i>Spindle</i>	7
Gambar 2. 3 Mesin Motor FSW	7
Gambar 2. 4 Controller FSW	8
Gambar 2. 5 Macam-Macam <i>Basic Tools</i> FSW	9
Gambar 2. 6 Ilustrasi Pengujian <i>Hardness</i>	15
Gambar 2. 7 Spesimen Uji Tarik	16
Gambar 2. 8 Mesin Uji Tarik	17
Gambar 3. 1 Diagram Alir	21
Gambar 4. 1 Pengaruh Kecepatan Rotasi <i>Tools</i> Terhadap Kekuatan Tarik	30
Gambar 4. 2 Pengaruh Kecepatan Rotasi <i>Tools</i> Terhadap Kekuatan Tarik	31
Gambar 4. 3 Letak Patahan Spesimen Uji Tarik	32
Gambar 4. 4 Pengaruh Kecepatan Rotasi <i>Tools</i> Terhadap Kekuatan Tarik	33
Gambar 4. 5 Hasil Patahan Pengujian <i>Tensile</i>	34
Gambar 4. 6 Pengaruh Derajat Kemiringan <i>Tools</i> Terhadap Kekuatan Tarik	35
Gambar 4. 7 Pengaruh Kecepatan Rotasi <i>Tools</i> Terhadap Kekerasan	36
Gambar 4. 8 Perbandingan Nilai <i>Hardness</i> Pada Spesimen	38
Gambar 4. 9 Pengaruh Kecepatan Rotasi <i>Tools</i> Terhadap Kekerasan	38
Gambar 4. 10 Perbandingan Titik Pengujian <i>Hardness</i>	39
Gambar 4. 11 Pengaruh Kecepatan Rotasi <i>Tools</i> Terhadap Kekerasan	40
Gambar 4. 12 Perbandingan Nilai <i>Hardness Test</i>	41
Gambar 4. 13 Pengaruh Derajat Kemiringan <i>Tools</i> Terhadap Kekerasan	42
Gambar 4. 14 Perbandingan Hasil Uji Mikro Base Metal, 200 - 63 dan 315 - 63	43
Gambar 4. 15 Hasil Uji Mikro (a) 400, (b) 600, (c) 800	45
Gambar 4. 16 Hasil Pengujian Mikro (a) BM, (b) TMAZ, (c) SZ, dan (d) <i>Dislokasi Cell</i>	46
Gambar 4. 17 Perbedaan HAB dan LAB	46
Gambar 4. 18 Letak Pengambilan Sampel	47
Gambar 4. 19 Hasil Pengujian Mikro (a) BM, (b) 0°, (c) 1.5°, (d) 3°	48

Gambar 4. 20 FSW-LM-BM16	52
Gambar 4. 21 FSW-TS-S08.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia	13
Tabel 2. 2 <i>Mechanical Properties</i>	13
Tabel 3. 1 Parameter Pengelasan.....	24
Tabel 3. 2 Parameter Pengelasan.....	24
Tabel 3. 3 Parameter Pengelasan.....	25
Tabel 3. 4 Parameter Pengelasan.....	26
Tabel 4. 1 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekuatan Tarik	29
Tabel 4. 2 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekuatan Tarik	31
Tabel 4. 3 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekuatan Tarik	33
Tabel 4. 4 Pengaruh Derajat Kemiringan Tools Terhadap Kekuatan Tarik	34
Tabel 4. 5 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekerasan	36
Tabel 4. 6 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekerasan	37
Tabel 4. 7 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekerasan	39
Tabel 4. 8 Pengaruh Derajat kemiringan Tools Terhadap Kekerasan.....	41
Tabel 4. 9 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Average Grain Size	44
Tabel 4. 10 pengaruh Derajat kemiringan Tools Terhadap Average Grain Size ...	48
Tabel 4. 11 Perbandingan Nilai Optimal.....	49

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan dunia industri yang sangat luas terdapat berbagai macam perusahaan yang bergerak pada bidang manufaktur. Manufaktur yang berada di Indonesia tidak semuanya memiliki hasil produksi yang besar, namun semua industri manufaktur yang ada di Indonesia memiliki kemampuan saing yang tinggi antar industri satu dengan yang lainnya. Sama halnya dengan industri penerbangan, industri otomotif, industri kereta api maupun industri maritim, seluruh industri di Indonesia pasti menggunakan alat berat untuk membantu pekerjaannya, seperti crane, truk, dll (Ma'arif, Syamsul 2017). Penggunaan mesin alat berat dan lain-lain jika digunakan secara terus menerus tentunya memerlukan perawatan secara berkala, jika diperlukan akan dilakukan pergantian komponen jika suatu komponen pada mesin tersebut sudah tidak layak untuk digunakan.

Contohnya adalah *engine valve* yang memiliki umur penggunaan yang harusnya panjang, akan tetapi jika digunakan secara terus menerus akan mengurangi umur komponen tersebut. Jika terjadi kerusakan pada sistem kendaraan dan yang menyebabkan *timing belt* putus sehingga menyebabkan poros bubungan (*camshaft*) tidak berputar dan terjadi benturan antara *valve* dengan piston. Akibat benturan dua komponen maka katup akan rusak dan katup harus diganti (Husodo, dkk 2012).

Penggunaan bahan untuk komponen mesin atau *spare part* ini dipilih berdasarkan tingkat penggunaan dari *spare part* atau bagian dari mesin itu sendiri. Contohnya saja pada bagian *engine valve*, beberapa industri menggunakan material berbahan *cast iron* dan industri lainnya menggunakan material *stainless steel*. *Stainless steel* dipilih karena memiliki ketahanan korosi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan *cast iron*, dan jika terjadi kerusakan untuk *repair* atau penggantian *part* lebih mudah material *stainless steel*. Pemilihan pengelasan yang

dilakukan untuk membuat atau *me-repair part* dari mesin adalah menggunakan *friction stir welding*. *Friction stir welding* dipilih karena memiliki keunggulan dalam hal biaya dan ramah lingkungan. Karena pengelasan *friction* tidak menggunakan logam pengisi untuk menyambungkan logam satu dengan yang lainnya, karena hal tersebut *friction welding* memiliki keunggulan dalam hal biaya dan ramah lingkungan. Akan tetapi walaupun tanpa logam pengisi, pada pengelasan *friction material austenite stainless steel* akan tetap mengakibatkan beberapa perubahan pada material karena terkena panas yang dihasilkan oleh penekanan dan gesekan dari *tools*. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka pada penulisan tugas akhir ini penulis memiliki tujuan untuk meneliti tentang pengaruh pengelasan *friction* pada material *austenite stainless steel* terhadap *mechanical properties* dan struktur mikronya.

1.2 Rumusan Masalah

Latar belakang di atas menjadi dasar untuk perumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan *friction welding* pada material *austenite stainless steel* terhadap kekuatan tarik?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan *friction welding* pada material *austenite stainless steel* terhadap kekerasan?
3. Bagaimana pengaruh penggunaan *friction welding* pada material *austenite stainless steel* terhadap struktur mikro?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan ini memiliki beberapa tujuan untuk dicapai, antara lainnya adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh *friction welding* pada material *austenite stainless steel* terhadap kekuatan tarik.
2. Mengetahui pengaruh *friction welding* pada material *austenite stainless steel* terhadap kekerasan.
3. Mengetahui pengaruh *friction welding* pada material *austenite stainless steel* terhadap struktur mikro.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

Penelitian terhadap pengaruh proses *friction stir welding* pada material *stainless steel* ini diharapkan dapat memiliki manfaat sebagai berikut:

1. Bidang akademis, dengan penelitian ini bisa menjadi penerapan ilmu yang telah diperoleh selama kuliah maupun selama proses *On the Job Training*. Selain itu juga untuk memperdalam wawasan dan ilmu tentang penggunaan ilmu pengelasan terhadap material *austenite stainless steel*.
2. Bidang industri, diharapkan penelitian ini dapat digunakan sebagai saran atau referensi terhadap industri manufaktur yang menggunakan metode pengelasan dan material yang sama.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian dapat diterima dan dianggap *valid*, maka diperlukan hal hal yang membatasi permasalahan. Gunanya sebagai acuan dalam pengerjaan penelitian ini. Batasan batasan permasalahan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah material *austenite stainless steel* tipe 316L
2. Pengelasan menggunakan proses *friction stir welding*
3. Peramater utama yang menjadi acuan adalah kecepatan pengelasan, kecepatan rotasi *tools*, dan derajat kemiringan *tools*.
4. Pengelasan material dilakukan dengan mengunakan *set up square butt joint*
5. Pengujian yang digunakan hanya terfokus pada isi yang terkandung dalam jurnal yang bersangkutan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Friction Welding*

Dalam dunia pengelasan banyak terdapat proses pengelasan yang banyak digunakan antara lain ada *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), *Submerged Arc Welding* (SAW), *Plasma Arc Welding* (PAW), *Friction Stir Welding* (FSW). Dari beberapa proses pengelasan tersebut hanya *friction stir welding* yang tidak menggunakan logam pengisi untuk proses pengelasannya. Selain itu pengelasan menggunakan *friction stir welding* juga hanya menggunakan gesekan dan penekanan untuk melelehkan material yang akan dilas. Sama seperti menurut beberapa ahli yang mengungkapkan pengertian *friction stir welding*.

Friction Welding adalah proses penyatuan material *solid* yang dapat menghasilkan lasan dengan kualitas tinggi antara dua material yang sama atau dua material yang berbeda. Kedua material digesekkan satu sama lain sehingga menimbulkan panas pada bagian *interface* kemudian dari panas tersebut bahan akan melunak dan bisa menjadi area *weld pool* (Maalekian, 2007). Sedangkan menurut *American Welding Society* (AWS) C6-1-89 *friction welding* adalah penggabungan material *solid* yang menghasilkan perpaduan bahan di bawah kontak kekuatan benda kerja berputar atau bergerak relatif untuk menghasilkan panas dan melunakkan material yang selanjutnya akan menyatu menjadi material lasan. Logam pengisi, fluk, dan *shielding gas* tidak diperlukan dalam proses ini. Sehingga pengelasan *friction* adalah pengelasan yang dilakukan untuk menggabungkan material satu dengan yang lainnya dengan bantuan gesekan alat dan tanpa menggunakan logam pengisi ataupun pelindung gas.

Pengelasan *friction* memiliki sebuah prinsip kerja dasar yang harus dilakukan atau harus berjalan jika menggunakan proses pengelasan *friction*. Prinsip pengelasan tersebut adalah rotasi *tools*, gesekan pada benda kerja dan penekanan terhadap benda kerja. Ketiga prinsip kerja tersebut harus dicapai, jika salah

satunya tidak ada atau tidak tercapai maka pengelasan *friction* tidak akan berjalan atau tidak akan terjadi proses pengelasan pada benda kerja. Berikut Gambar 2.1 adalah contoh dari mesin *friction welding*.



Gambar 2.1 Mesin *Friction Stir Welding* (*Friction Welding Handbook* ESAB, 2019)

2.2 Komponen Dalam Mesin *Friction Stir Welding*

Friction Stir Welding (FSW) memiliki berbagai macam komponen dalam mesin yang berguna untuk membantu kinerja mesin untuk menciptakan hasil lasan *friction* yang baik. Komponen dalam mesin pengelasan *friction* bisa dibagi menjadi 2 kategori, yaitu *essential* komponen dan *additional* komponen. Untuk *essential* komponen ini harus dimiliki seluruh mesin *friction stir welding* yang berfungsi sebagai motor utama mesin. Sedangkan untuk *additional* komponen adalah komponen tambahan yang bisa diaplikasikan dalam mesin *friction stir welding* yang berfungsi untuk mendapatkan hasil lasan yang diinginkan (*Friction Stir Welding Handbook*, 2017).

2.2.1 *Essential Component*

Mesin *Friction Stir Welding* atau FSW memiliki komponen *essential* yang harus dimiliki yang berfungsi untuk menopang pekerjaan pengelasan *friction*. Komponen utama dalam mesin tersebut adalah sebagai berikut.

1. *Spindle*

Adalah poros tiang yang memiliki fungsi untuk menahan *tools* agar tetap berputar pada porosnya dan bisa digerakkan sesuai dengan keinginan operator. Komponen ini sangat signifikan karena jika *tools* bisa berputar namun tidak bisa dikendalikan maka, tidak akan didapatkan hasil pengelasan seperti yang diinginkan. Berikut Gambar 2.2 *Spindle*



Gambar 2.2 *Spindle (Friction Stir Welding Handbook, 2017)*

2. Motor Mesin

Motor mesin adalah komponen utama untuk penggerak geser mesin *Friction Stir Welding*. Motor mesin ini harus memiliki kemampuan putar yang tinggi dan bisa diatur kecepatannya sesuai dengan kebutuhan saat dilakukan pengelasan. Berikut Gambar 2.3 Motor Mesin FSW



Gambar 2.3 *Mesin Motor FSW (Friction Stir Welding handbook, . 2017)*

3. *Controller*

Controller adalah sebuah alat yang berfungsi untuk menginput data data yang harus dilakukan mesin untuk melakukan pekerjaan, seperti memasukkan

parameter pengelasan. Selain itu *controller* juga berfungsi untuk memonitor pergerakan mesin dan semua kemungkinan yang bisa dilakukan mesin bisa diatur dan dilihat pada bagian *controller* ini. Berikut adalah Gambar 2.4 *Controller FSW*



Gambar 2.4 Controller FSW (*Friction Welding Handbook*, .2017)

4. *Pin Tools*

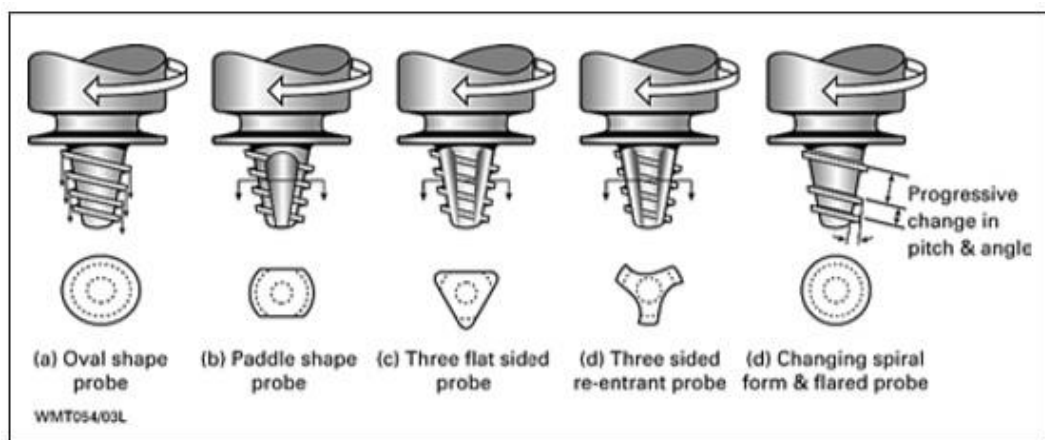
Pin tools adalah alat pengelasan utama yang digunakan dalam pengelasan *friction*, *pin tools* berfungsi untuk langsung menghadapi material dan melelehkan material hingga menjadi suatu campuran logam las. Desain alat pengelasan ini atau *pin tools* sangat penting dalam *friction stir welding*. Bentuk yang dipilih juga bisa meningkatkan panas yang dikeluarkan oleh gesekan atau mencapai pengadukan material yang lebih efisien (*Friction Stir Welding Handbook ESAB*, 2019)

Material yang digunakan tools FSW harus memiliki beberapa *characteristic* sebagai berikut:

- Tahan aus
- Tidak memiliki reaksi negatif pada material lasan
- Kekuatan tinggi, stabilitas dimensi, dan ketahanan mulur
- Kemampuan menahan siklus *thermal* berulang
- Memiliki ketangguhan yang tinggi

- Koefisien ekspansi *thermal* rendah
- *Machineability* yang baik sehingga dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan.

Material yang mungkin digunakan dalam pembuatan tools tersebut adalah seperti baja perkakas, *silicon nitride*, paduan *molybdenum polycrystalline cubic boron nitride* (PNBC), dan bahan perkakas berbahan *tungsten* (Friction Welding Handbook, 2017). Berikut Gambar 2.5 Macam Macam *Basic Tools* FSW



Gambar 2.5 Macam-Macam *Basic Tools* FSW (TWI)

2.2.2 *Additional Component*

Additional component adalah fitur-fitur tambahan yang bisa dipasangkan kedalam mesin *friction stir welding* yang mempunyai tujuan untuk mempermudah mencapai target hasil pengelasan, tanpa mengurangi *essential component* yang sudah terpasang terlebih dahulu. Beberapa *additional component* dijelaskan sebagai berikut:

a) Kontrol CNC

Kontrol proses CNC penuh, yang biasanya meliputi *touchscreen interface*, akuisisi data, dan sistem pemantauan pengelasan pengelasan

b) *Production Monitoring*

Operator dapat memilih jenis kontrol untuk melakukan pengelasan. Pilihan yang tersedua antara lain kontrol posisi, kekuatan atau ketinggian.

Pemantauan visual yang diumpankan pada kamera dapat memberikan pandangan yang aman terhadap lingkungan produksi las

c) *Weld Temperature Monitoring*

Stasiun IO jarak jauh yang terletak pada sekitar mesin FSW memungkinkan mengukur titik non kontak dari lasan secara terus menerus dan disampaikan kembali ke sistem kontrol secara *real time*.

d) *Joint Tracking*

Sistem *tracking* yang dilakukan secara otomatis untuk mengikuti jahitan atau manik las. Perangkat ini memonitor sistem pelacakan dan menggerakkan sumbu Y untuk memastikan alat las tetap berada pada jalur lasan yang ditentukan.

e) *Machine Fixturing*

Perlengkapan mesin khusus seperti klem samping, *mandrell* dan penyangga yang dapat dimasukkan kedalam desain alat berat.

f) *Height Sensing*

Kepala pengukur tinggi yang dapat terus mengukur posisi relatif alat ke komponen dan memegangnya dalam pita toleransi yang sempit.

g) *Data Akuisisi Sistem*

Untuk mengukur dan merekam semua data las yang tersedia, dan kemudian diarsipkan kedalam *hard disk local*. Variabel proses yang direkam meliputi gaya aksial turun, gaya lintasan, kecepatan putaran *spindle*, kecepatan dan lintasan pahat alat.

2.3 *Stainless Steel*

Material *stainless steel* pertama kali ditemukan pada tahun 1913 oleh seorang bernama Harry Brearly di laboratorium *Brown-Firth*. Penemuan ini terjadi karena pada laboratorium *Brown-Firth* melakukan peneitian terhadap daya tahan karat terhadap laras senapan. Penelitian itu terfokus pada perhitungan jumlah *karbon*, *kromium* dan besi pada material senapan tersebut (1912). Setelah kurang lebih satu tahun melakukan penelitian tersebut, akhirnya laboratorium *Brown-Firth* dapat memproduksi *satinless steel* pada tanggal 13 agustus 1913.

Penggunaan *stainless steel* masih berlangsung hingga sekarang dan bahkan mengalami banyak perubahan dan memiliki banyak keunggulan dari pertama kali ditemukan dan di produksi pada tahun 1913. *Stainless steel* pada era sekarang banyak digunakan sebagai alat-alat dapur, tanki kimia, knalpot kendaraan, industri makanan, *heat exchanger* bahkan juga alat alat medis menggunakan material *stainless steel*.

Material *stainless steel* memiliki keunggulan dibandingkan dengan material baja karbon yang juga banyak digunakan di dunia industri. Berikut adalah beberapa keunggulan material *stainless steel* dibandingkan dengan material baja karbon

1. Memiliki ketahanan korosi yang lebih tinggi dibandingkan dengan material baja karbon, karena *stainless steel* memiliki kandungan unsur *chromium* (BOC Group, 2009)
2. Berat jenis *stainless steel* adalah $8,00 \text{ g/cm}^3$, sedangkan untuk material baja karbon memiliki masa jenis yang hampir sama namun sedikit dibawahnya, yaitu $7,83 \text{ g/cm}^3$. Hal ini menjadi keuntungan karena selain memiliki ketahaan korosi yang lebih tinggi berat jenis dari *stainless steel* juga lebih besar daripada baja karbon.

2.4 Klasifikasi *Stainless Steel*

Stainless steel dapat diklasifikasikan atau dikelompokkan berdasarkan struktur *metalografi* dan kandungannya menjadi 5 kelompok besar yaitu

1. *Ferritic Stainless Steel*

Memiliki kadar *Chromium* sekitar 10% hingga 18%. Memiliki ketahanan korosi yang berada pada level baik dan memiliki permasalahan yaitu material sedikit lebih sulit dilakukan proses *machining* (BOC Group, 2009)

2. *Austenite Stainless Steel*

Austenite stainless steel adalah *stainless steel* yang memiliki kandungan *chromium* sedikitnya 18% dan campuran *nickel* sebesar 8%. Campuran kedua kandungan tersebut saling menyempurnakan, tidak hanya tahan korosi tetapi juga memiliki kemampuan pengelasan yang baik pula.

Austenitic stainless steel juga memiliki ketahanan pada pengoperasian suhu rendah. (BOC Group, 2009)

3. *Martensite Stainless Steel*

Martensite stainless steel memiliki kandungan *chromium* sebesar 16% dan campuran *nickel* sebesar 2%, hal yang membedakan dengan *austenite* dan *ferritic* adalah pada *stainless steel martensite* ini memiliki lebih banyak unsur karbon, sehingga material ini memiliki sifat yang cenderung lebih keras dibandingkan dengan material *stainless steel* yang lain. Akan tetapi kemampuan las pada material ini sudah cukup baik karena mempunyai kandungan *nickel*. (BOC Group, 2009)

4. *Duplex*

Stainless steel tipe *duplex* memiliki sifat yang campuran antara *Ferritic* dan *Austenitic*. Menggabungkan keunggulan yang dimiliki oleh masing masing *austenitic* dan *ferritic* maka terciptalah *duplex*. Memiliki ketahanan korosi yang tinggi, tidak hanya itu *duplex* juga memiliki tingkat ketangguhan dan kekuatan yang tinggi. *duplex* akan beroperasi secara maksimal pada *range* suhu 50°C hingga 300°C.

5. *Precipitation Hardening*

Material *stainless steel* ini memiliki sifat keras dan kuat karena terdapat suatu *precipitate* atau endapan pada struktur mikro logam. Sehingga gerakan *deformasi* akan terhambat dan memperkuat material *stainless steel* itu sendiri. Pengendapan ini terbentuk karena penambahan unsur *tembaga*, *titanium*, dan *niobium*. Proses pengutan umumnya terjadi pada saat pengerjaan dingin atau *cold work*.

2.4.1 AISI 316L

Stainless AISI 316L adalah *stainless steel* yang termasuk kedalam *austenite stainless steel* dan memiliki komposisi kimia seperti pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Komposisi Kimia

C	S	P	Mn	Mo	Cr	Ni	N
0.03	0.75	0.045	2.00	2 – 3	16 - 18	10 – 14	0.10

Sumber: Data Pribadi

Tabel 2.2 *Mechanical Properties*

No.	Tensile (MPa)	0.2% Strain (MPa)	Elongation	HRBW
1	485	170	40	217

Sumber: Data Pribadi

2.5 Sifat Mekanik

Sifat mekanik material adalah kemampuan material untuk menerima penekanan atau beban atau tegangan tanpa mengalami kegagalan ataupun patah. Sifat mekanik ini juga sangat berguna dalam menentukan kegunaan dari material itu sendiri. Biasanya sifat mekanik material dinyatakan dalam nilai atau angka yang memiliki satuan pasti (*BOC Group*, 2009).

Sifat mekanik dari material satu dengan material yang lain tentu akan berbeda, karena setiap material memiliki komposisi kimia yang berbeda pula. Hal tersebut yang menyebabkan sifat mekanik material berbeda-beda. Walaupun masih dalam satu kelompok *stainless steel*, jika berbeda *type* maka sifat mekanik yang dimiliki akan berbeda, sama halnya dengan nilai-nilai yang keluar dalam hasil pengujian sifat mekanik.

2.6 Pengujian Material

Pengujian material memiliki tujuan untuk mengetahui *diskontinuitas* atau cacat yang berada pada material uji. Pengujian ini dapat dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu pengujian merusak dan pengujian tidak merusak. Pengujian

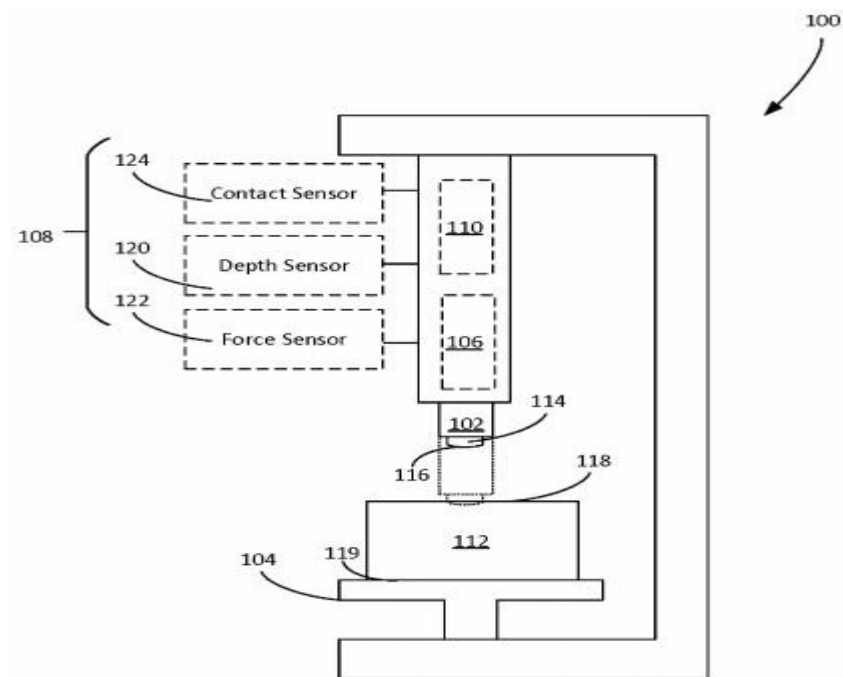
merusak dilaksanakan dengan cara merusak bagian bagian pada material uji guna mengetahui apakah ada cacat pada material tersebut, biasanya dilakukan pembebanan kemudian dihitung hingga berapa banyak beban yang mampu ditanggung oleh material hingga mengalami kegagalan. Kemudian hasilnya dibandingkan dengan *mill certificate* dan *standard* yang digunakan.

Selanjutnya adalah proses pengujian tidak merusak, adalah pengujian yang dilakukan menggunakan alat bantu ataupun bahan yang bisa digunakan untuk mendeteksi *diskontinuitas* atau cacat pada material, baik di dalam material ataupun hanya dipermukaan material itu saja. Pengujian ini tidak dilakukan pembebanan seperti pengujian merusak, akan tetapi dilakukan dengan menggunakan beberapa prosedur yang berbeda hingga ditemukan cacat pada material tersebut. Jika ditemukan cacat pada material, biasanya akan dilakukan penandaan pada permukaan material yang man akan memudahkan untuk dilakukan repair material. Berikut ini adalah pengujian yang akan dilaksanakan dalam penelitian Tugas Akhir ini.

2.6.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan adalah suatu pengujian mekanik pada material dan termasuk kedalam pengujian yang merusak. Kekerasan memiliki definisi sebagai kekuatan material untuk menahan suatu beban penetrasi atau indentasi terhadap permukaannya. Dalam hal ini pengujian kekerasan dibedakan kedalam beberapa kelompok besar berdasarkan bentuk *indentor* atau alat untuk menekan pada material tersebut. Macam macam *indentor* tersebut antara lain *adalah brinell, Vickers, dan Rockweel*.

Pengujian *hardness* dilakukan dengan cara menempatkan spesimen kedalam mesin pengujian kemudian spesimen tersebut diberikan beban tertentu hingga mendapatkan jejak dari pembebanan tersebut. Setelah didapatkan jejak dari pembebanan tersebut, maka langkah selanjutnya adalah dengan menghitung jejak dari pembebanan tersebut. Ada juga mesin yang sudah canggih dan dapat menentukan nilai dari kekerasan material sesaat setelah dilakukan pembebanan tanpa perlu dilakukan penghitungan secara manual. Berikut adalah Gambar 2.6 ilustrasi pengujian *hardness* (Smullin, 2020) .



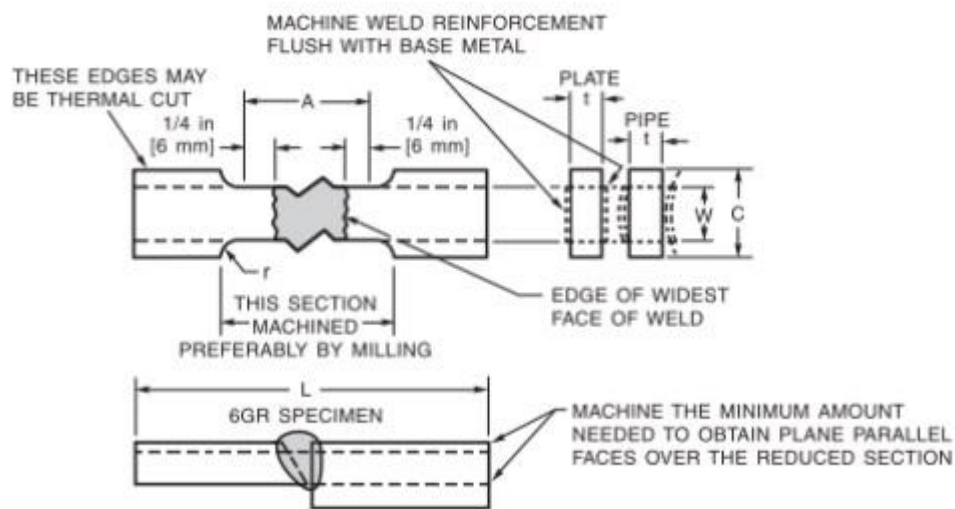
Gambar 2.6 Ilustrasi Pengujian *Hardness* (Smullin, . 2020)

2.6.2 Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian Kekuatan tarik adalah pengujian terhadap material yang memiliki fungsi untuk mengetahui nilai kuat tarik dari suatu material tersebut. Selain untuk mengetahui nilai kekuatan tarik dari material ada hal lain yang bisa didapatkan dari pengujian tarik antara lain adalah pertambahan panjang material sebelum mengalami putus, kekuatan material menerima beban tanpa mengalami perubahan plastis, serta bisa mengetahui batasan beban aman yang bisa ditanggung oleh material tersebut.

Pengujian tarik biasa dilakukan untuk menguji material lasan dan untuk menguji suatu material apakah sudah sesuai dengan *mill certificate* yang dimilikinya. Oleh karena itu pengujian tarik sangat penting untuk bukti kekuatan suatu material. Material yang biasa digunakan untuk pengujian tarik adalah material berbahan logam. Pengujian tarik bisa juga dilakukan dengan material non logam, akan tetapi pada material non logam jarang dilakukan karena penggunaan material logam lebih banyak daripada non logam dalam aplikasi industri.

Proses pengujian tarik dilakukan dengan cara memotong spesimen sesuai dengan *standard* atau *code* yang digunakan, hal tersebut dilakukan agar pengukuran terhadap kekuatan tarik material dapat mengeluarkan hasil yang maksimal. Untuk setiap *standard* atau *code* memiliki dimensinya masing masing, namun bentuk spesimen uji tarik kurang lebih sama untuk setiap *standard* atau *code* yang digunakan sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.7 Spesimen Uji Tarik



Gambar 2.7 Spesimen Uji Tarik (*American Welding Society D1.1*)

Setelah didapatkan specimen uji dengan bentuk dan dimensi yang sesuai dengan standard atau code tertentu maka langkah selanjutnya adalah meletakkan pada mesin pengujian tarik dan mengoperasikannya. Nilai dari kekuatan tarik material akan otomatis tercatat dan tidak perlu melakukan Penghitungan manual untuk mencari nilai kekuatan tarik tersebut. Hasil yang keluar dari mesin tersebut ada 2 buah poin utama yaitu, nilai kekuatan tarik dari material yang diuji kemudian yang kedua adalah kurva antara beban dan pertambahan panjang material yang bisa digunakan untuk mengukur nilai dari *yield* dan elongasi dari material yang diuji tersebut. Berikut adalah Gambar 2.8 Mesin Uji Tarik



Gambar 2.8 Mesin Uji Tarik (BOC Group, .2009)

2.6.3 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro adalah pengujian untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada material yang telah mengalami proses pemanasan atau proses dingin sebelum diaplikasikan pada suatu barang atau produk. Dengan mengetahui perubahan struktur mikro dari material akan mudah untuk menentukan pengerjaan selanjutnya yaitu untuk mengembalikan struktur mikro ke bentuk semula atau mengubah struktur mikro tersebut sesuai dengan apa yang diinginkan.

Selain itu pengujian struktur mikro juga bisa untuk mengungkapkan perbedaan bagian dari material yang telah melalui proses sebelumnya dan bagian material yang tidak mengalami proses sebelumnya. Hal ini karena pada pengujian struktur mikro didapatkan hasil yang berupa butir butir pada material oleh karena itu mudah untuk mengidentifikasi apakah material sudah mengalami pengerjaan sebelumnya atau tidak.

Pengujian struktur mikro ini juga membantu untuk menginvestigasi pengujian lainnya, seperti pengujian *hardness* atau pengujian kekerasan. Jika nilai kekerasan dari suatu material terlampaui tinggi dari *standard* maka dengan pengujian mikro dapat diketahui apa yang menyebabkan nilai *hardness* tersebut

terlampau tinggi dari standard material tersebut. Oleh karena itu pengujian struktur mikro juga bisa digunakan sebagai bukti untuk pengujian *hardness*. Jika nilai *hardness* tinggi karena struktur mikronya berubah, jika nilai *hardness* rendah karena struktur mikronya berubah.

Untuk melakukan pengujian mikro, material terlebih dahulu harus melewati beberapa proses antara lain adalah sebagai berikut:

- **Pemotongan Spesimen**
Pemotongan spesimen dilakukan untuk mempermudah pengerjaan pada proses selanjutnya. Setelah dipotong spesimen tersebut dilakukan penggerindaan agar tidak terdapat bagian material yang memiliki permukaan yang kasar
- **Pemolesan**
Setelah itu material harus dilakukan pemolesan kembali untuk mendapatkan tingkat kekasaran tertentu agar bisa dilakukan pengujian struktur mikro
- **Pengetsaan**
Pengetsaan adalah pemberian cairan yang bersifat korosif terhadap material dan memiliki *holding time* tertentu setelah itu cairan etsa harus dihilangkan dari permukaan material
- **Pencucian Cairan Etsa**
Pencucian cairan etsa yang pertama adalah menggunakan air kemudian setelah itu harus dilakukan penyemprotan alkohol untuk menghentikan proses korosi pada material
- **Pengamatan Spesimen**
Pengamatan spesimen ini dilakukan dibawah mikroskop micron yang memiliki perbesaran yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan mikroskop biasa sehingga dapat mengamati struktur mikro material
- **Pemotretan Spesimen**
Pemotretan material ini bertujuan untuk pelaporan hasil pengujian, atau bisa dikatakan dengan bukti hasil pengujian yang dilakukan.

2.6.4 Struktur Mikro Pada Pengelasan Friction

Pengaplikasian pengelasan *friction* pada material akan mempengaruhi struktur mikro material tersebut. Karena pengelasan *friction* memiliki beberapa variable yang dimana variable tersebut dapat mengubah bentuk dari struktur mikro material, seperti kecepatan rotasi *tools*, kecepatan pengelasan dan derajat kemiringan dari *tools* yang digunakan. Berikut adalah bagian-bagian struktur mikro yang dijumpai pada proses pengelasan *friction*.

- BM atau *Base Metal*

Struktur mikro pada BM pada setelah pengelasan *friction* tidak akan mengalami perubahan apapun. Hal tersebut dikarenakan pada daerah BM jauh dari weldpool dan efek panas yang ditimbulkan oleh proses pengelasan tidak mencapai daerah ujung-ujung dari base metal. Oleh karena itu struktur mikro di daerah ini tidak mengalami perubahan apapun.

- TMAZ atau *Thermomechanically Affected Zone*

Pada daerah TMAZ struktur mikro sedikit banyak terpengaruh oleh panas yang dihasilkan oleh proses pengelasan, dan hal tersebut mengubah butir-butir yang ada pada daerah TMAZ. Butir-butir yang berubah mengalami perbaikan daripada yang ada pada base metal. Perbaikan yang dimaksud adalah semakin halusnyabutir pada daerah TMAZ yang mengakibatkan kekuatan material lebih tinggi. Perubahan yang terjadi biasanya adalah perubahan struktur yang menjadi lebih kecil dan memanjang.

- SZ atau *Stir Zone*

SZ atau *stir zone* adalah daerah dimana proses pengelasan material terjadi, sering disebut juga daerah lasan. Pada daerah ini terjadi perubahan struktur mikro yang diakibatkan dari proses pengelasan tersebut. Perubahan yang dimaksudkan adalah perubahan butir-butir pada daerah SZ mengalami perbaikan. Perbaikan pada hal ini adalah struktur mikro mengalami tekanan dan panas yang mengakibatkan butir menjadi lebih kecil dan panjang, sehingga menambahkan kekuatan dari material tersebut. Sehingga jika

dilakukan pengujian, maka nilai yang didapatkan akan lebih tinggi jika dibandingkan daerah TMAZ ataupun BM.

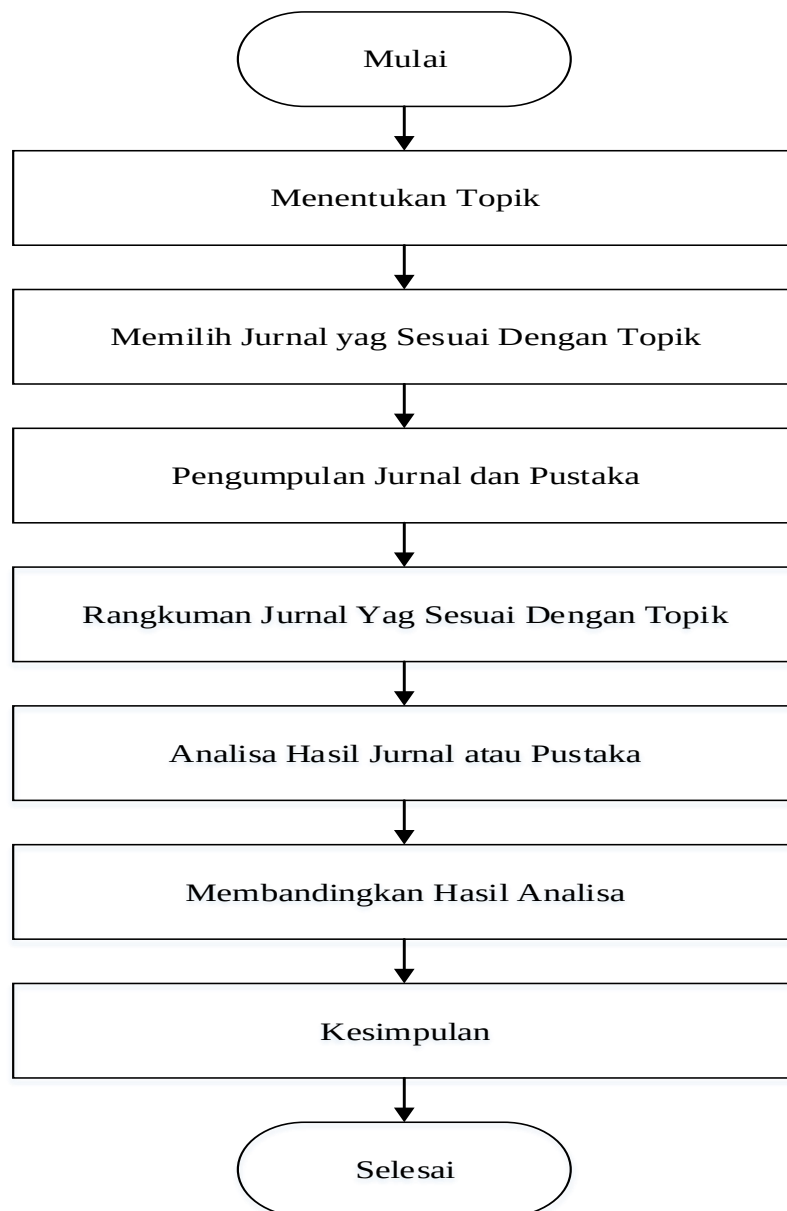
- LAB dan HAB

LAB atau *Low angle Boundary* adalah dimana batas butir pada material jika dilakukan pengamatan struktur mikro memiliki tempat atau lokasi yang rendah, ditandai dengan batas yang hitam atau lebih gelap daripada daerah sekitarnya. Sedangkan HAB adalah *High Angle Boundary* adalah batas butir yang memiliki lokasi lebih tinggi dan lebih dekat terhadap kamera pengamatan. Sehingga memiliki tanda yaitu lebih terang atau ditandai dengan warna tertentu untuk beberapa alat pengamatan struktur mikro.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir

3.2 Menentukan Topik

Penentuan topik pada tugas akhir yang berbasis *review paper* atau jurnal adalah suatu yang sangat penting, karena akan menentukan alur pengerjaan tugas akhir. Selain itu penentuan sebuah topik pada tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal juga berfungsi untuk mengerucutkan pembahasan dan perbandingan antar jurnal atau *paper* yang digunakan. Oleh karena itu penentuan topik pada tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal sangat riskan dan harus dilakukan atau ditentukan sebelum memulai pengerjaan tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal. Topik utama dalam tugas akhir ini adalah pengelasan *friction welding* pada material *austenite stainless steel*

3.3 Memilih Jurnal yang Sesuai Topik

Pemilihan jurnal adalah langkah selanjutnya yang harus dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal. Pemilihan jurnal harus disesuaikan dengan topik utama tugas akhir, hal ini dikarenakan untuk memudahkan pengerjaan di langkah-langkah selanjutnya. Pemilihan jurnal yang tidak sesuai dengan topik hanya akan mempersulit untuk pengumpulan jurnal dengan variasi yang serupa atau parameter yang serupa sehingga tidak mungkin untuk didapatkan hasil yang maksimal karena jurnal yang tidak sesuai dengan topik tidak bisa dibandingkan hasilnya satu dengan yang lain.

Pemilihan jurnal yang memiliki kesamaan topik dengan topik tugas akhir berbasis *review jurnal* akan memudahkan pengumpulan jurnal yang memiliki parameter pengelasan, variabel yang divariasikan dan yang paling penting adalah material yang sama. Jika pemilihan jurnal sudah sesuai dengan topik pengelasan *friction welding* pada material *austenite stainless steel* dan memiliki parameter pengelasan yang sama, variabel pengelasan yang sama dan yang paling penting adalah material yang sama maka pengerjaan tugas akhir dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya, yaitu pengumpulan jurnal atau pustaka.

3.4 Pengumpulan Jurnal atau Pustaka

Pemilihan jurnal atau pustaka yang sudah dibedakan berdasarkan parameter pengelasan, variabel yang divariasikan dan material yang sama sudah dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah pengumpulan jurnal tersebut. Pengumpulan jurnal tersebut memiliki tujuan untuk mencari persamaan yang lebih pada jurnal yang telah dipilih. Pengumpulan jurnal yang memiliki bahasan yang sama dalam artian memiliki penelitian dan perbandingan pengelasan terhadap pengujian yang sama akan lebih baik untuk digunakan dalam pengerjaan tugas akhir berbasis *review* jurnal. Hasil yang didapatkan dari pengumpulan pustaka ini adalah didapatkan 4 jurnal yang memiliki kesamaan yaitu jurnal yaitu jurnal *Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L stainless steel* oleh Hajian dkk (2014), *Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AISI 316L Austenitic Stainless Steel Joints* oleh Kumar dkk (2017), *Effect of tool tilt angle on weld joint properties of friction stir welded AISI 316L stainless steel sheets* oleh Kumar dkk (2019), dan *Relationship between microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L steel produced by selective laser melting* oleh Peng dkk (2020). Keempat jurnal tersebut adalah jurnal yang akan digunakan sebagai acuan utama untuk pengerjaan tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal.

3.5 Rangkuman Jurnal yang Sesuai Dengan Topik

Jurnal yang telah terkumpul kemudian akan melalui proses penyuntingan untuk mengetahui apa saja persamaan bahasan didalam empat jurnal tersebut. Setelah dilakukan penyuntingan terhadap empat jurnal tersebut didapatkan hasil yang sesuai dengan harapan, yaitu memiliki persamaan dalam hal parameter pengelasan, variabel yang divariasikan dan material penelitian yang sama. Persamaan-persamaan tersebut akan dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut.

Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L stainless steel oleh Hajian dkk (2014) meneliti tentang pengelasan *friction welding* terhadap material *austenite stainless steel* AISI 316L dan memiliki parameter sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Parameter Pengelasan

No	Parameter	Trial 1	Trial 2
1.	Kecepatan Pengelasan	63 mm/min	63 mm/min
2.	RPM	200	315
3.	Derajat kemiringan Tools	3°	3°

Sumber: Hajian, dkk (2014)

Dalam penelitian Hajian, dkk (2014) membandingkan penelitian tersebut terhadap pengujian mekanik yaitu pengujian *tensile*, pengujian kekerasan atau *hardness* dan pengujian struktur mikro. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Hajian, dkk (2014) tidak menyebutkan secara spesifik *standard* atau *code* yang digunakan dalam pengujian mekanik. Akan tetapi seluruh hasil pengujian mekanikal akan dibandingkan dengan hasil pengujian antar parameter kemudian dibandingkan kembali dengan nilai dari *base metal*. Diasumsikan bahwa nilai dari kriteria keberterimaan didapatkan dari hasil yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai dari *base metal*.

Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AISI 316L Austenitic Stainless Steel Joints oleh Kumar dkk (2017) meneliti tentang material austenite stainless steel AISI 316L yang dilakukan proses pengelasan *friction welding* dan memiliki parameter pengelasan sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.2 berikut

Tabel 3.2 Parameter Pengelasan

No.	Parameter	Trial 1	Trial 2	Trial 3
1	Kecepatan Pengelasan	45 mm/min	45 mm/min	45mm/min
2	RPM	400	600	800
3	Derajat Kemiringan	1.5°	1.5°	1.5°

Sumber: Kumar, dkk (2017)

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kumar, dkk (2017) membandingkan penelitian tersebut terhadap pengujian mekanik yaitu pengujian kekuatan tarik,

pengujian kekuatan tekan atau hardness dan pengujian struktur mikro sama seperti peneliti sebelumnya yaitu Hajian, dkk (2014).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kumar, dkk (2017) tidak menyebutkan secara spesifik *standard* atau *code* yang digunakan dalam pengujian mekanik. Akan tetapi seluruh hasil pengujian mekanikal akan dibandingkan dengan hasil pengujian antar parameter kemudian dibandingkan kembali dengan nilai dari *base metal*. Diasumsikan bahwa nilai dari kriteria keberterimaan didapatkan dari hasil yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai dari *base metal*.

Effect of tool tilt angle on weld joint properties of friction stir welded AISI 316L stainless steel sheets oleh Kumar dkk (2019) meneliti kembali dengan proses pengelasan yang sama dan material yang sama dengan tahun 2017 yaitu pengelasan *friction welding* pada material *austenite stainless steel* AISI 316L dengan menggunakan parameter yang sedikit berbeda sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.3

Tabel 3.3 Parameter Pengelasan

No.	Parameter	Trial 1	Trial 2	Trial 3
1.	Kecepatan Pengelasan	45 mm/min	45 mm/min	45 mm/min
2.	RPM	600	600	600
3.	Derajat Kemiringan	0°	1.5°	3°

Sumber: Kumar, dkk (2019)

Dalam penelitian kali ini Kumar, dkk (2019) melakukan penelitian kembali pada material *austenite stainless steel* dengan menggunakan proses pengelasan *friction welding* namun memiliki sedikit perbedaan pada parameter pengelasannya. Selain itu perbandingan terhadap pengujiannya juga masih sama, yaitu terhadap pengujian kekuatan tarik, pengujian kekuatan tekan atau *hardness* dan pengujian struktur mikro.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kumar, dkk (2019) tidak menyebutkan secara spesifik *standard* atau *code* yang digunakan dalam pengujian mekanik. Akan tetapi seluruh hasil pengujian mekanikal akan dibandingkan dengan hasil

pengujian antar parameter kemudian dibandingkan kembali dengan nilai dari *base metal*. Diasumsikan bahwa nilai dari kriteria keberterimaan didapatkan dari hasil yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai dari *base metal*.

Relationship between microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L steel produced by selective laser melting oleh Peng dkk (2020) melakukan penelitian terhadap material austenite stainless steel dengan menggunakan proses pengelasan *friction welding* dengan menggunakan parameter pengelasan sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.4 berikut

Tabel 3. 4 Parameter Pengelasan

No.	Parameter	Trial 1
1.	Kecepatan Pengelasan	37.5 mm/min
2.	RPM	375
3.	Derajat Kemiringan	2°

Sumber: Peng, dkk (2020)

Penelitian Peng, dkk (2020) tersebut melakukan perbandingan penelitian terhadap pengujian mekanik berupa pengujian kekuatan tarik, pengujian kekuatan tekan atau *hardness* dan pengujian struktur mikro. Hal tersebut adalah sama dengan peneliti pada jurnal sebelumnya, jadi keempat jurnal tersebut dapat digunakan dalam tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal dan dapat dibandingkan untuk mendapatkan kesimpulan pada tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal.

Standard yang digunakan dalam pengujian *tensile* oleh Peng, dkk (2020) menggunakan *standard* ISO 10275:2007. *Standard* tersebut mengatakan nilai kekuatan tarik memenuhi kriteria jika regangan tidak melebihi $0.008s^{-1}$. Serta nilai kekuatan *yield* dan *ultimate* sama dengan nilai *yield* dan *ultimate* dari *base metal*.

3.6 Analisa Hasil Jurnal atau Pustaka

Analisa hasil jurnal atau pustaka dilakukan setelah didapatkan hasil yang diinginkan dari menyunting setiap jurnal yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir berbasis review paper atau jurnal. Analisa tersebut dilakukan untuk mencari inti bahasan dari masing masing jurnal yang telah dikumpulkan, setelah mendapatkan inti atau pokok bahasan yang diteliti dalam jurnal maka jurnal tersebut dapat dianalisa tentang pokok bahasan atau inti dari jurnal tersebut. Keempat jurnal yang digunakan dalam tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal ini memiliki banyak kesamaan dan memiliki perbedaan dalam parameter yang jelas, sehingga memudahkan untuk menganalisa tiap jurnal tersebut. Setelah jurnal-jurnal tersebut selesai dilakukan analisa hasil maka langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil analisa dari tiap jurnal. Proses ini dilakukan untuk mendapatkan hasil perbandingan yang dimana dapat digunakan dalam menarik kesimpulan tugas akhir berbasis *review paper* atau jurnal.

3.7 Perbandingan Hasil Analisa

Perbandingan hasil analisa dari tiap jurnal dilakukan untuk mengetahui *trend* atau kemungkinan yang kerap terjadi pada pengelasan *friction welding* terhadap material *austenite stainless steel* AISI 316L. perbandingan hasil analisa ini difokuskan dalam perbandingan hasil setelah material dilakukan serangkaian pengujian yaitu pengujian kekuatan tarik, pengujian kekuatan tekan atau *hardness* dan pengujian struktur mikro. Ketiga pengujian tersebut akan dibandingkan hasilnya dari jurnal satu dengan jurnal yang lainnya. Dari perbandingan tersebut akan memudahkan penarikan kesimpulan dari pengelasan *friction welding* pada material *austenite stainless steel*.

3.8 Kesimpulan

Setelah dilaksanakan analisa terhadap beberapa pustaka atau jurnal atau *paper* yang telah dikumpulkan maka didapatkan hasil dari masing masing pustaka atau jurnal atau *paper* tersebut. Dari hasil yang sudah terkumpul maka kemudian dilakukan perbandingan antara pustaka atau jurnal atau *paper* satu dengan yang lainnya, sehingga setelah semua pustaka atau jurnal atau *paper* tersebut dilakukan perbandingan maka hasil akhir dari penelitian ini sudah tercapai yaitu penarikan

kesimpulan. Kesimpulan yang dikemukakan harus berhubungan dengan pustaka yang dianalisa tidak boleh menyimpang atau berbeda.

BAB 4

PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh *Friction Welding* Terhadap Kekuatan Tarik

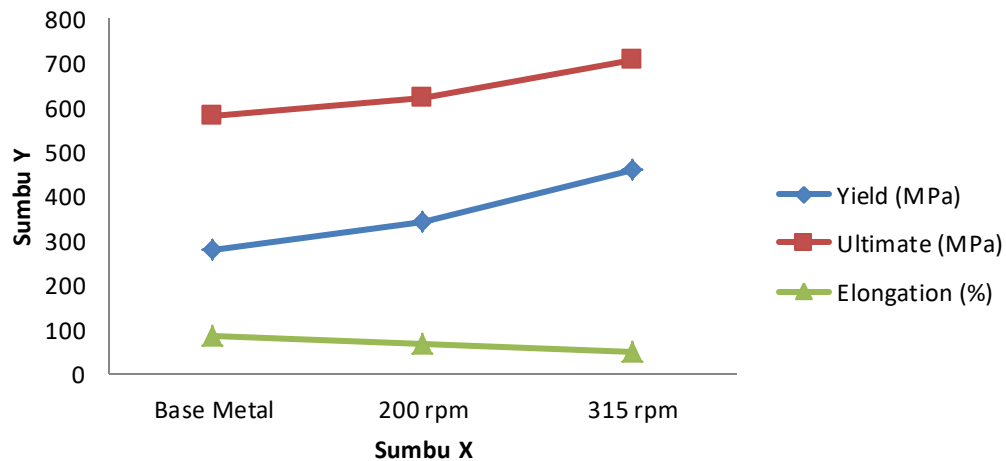
Hajian, dkk (2014) meneliti tentang *friction welding* terhadap pengelasan material *austenite stainless steel* tipe 316L. Parameter pengelasan yang digunakan adalah menggunakan *pin less tools* dengan menggunakan kecepatan pengelasan yang konstan 63 mm/min. Parameter yang divariasikan adalah kecepatan rotasi *tools* atau rpm yaitu sebesar 200 dan 315 rpm. Menurut parameter pengelasan tersebut didapatkan hasil yaitu semakin tinggi rpm maka akan semakin tinggi pula nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluhnya, akan tetapi semakin tinggi rpm tersebut juga mempengaruhi nilai elongasi yang mana akan cenderung lebih turun.

Hal tersebut merupakan dampak dari penggunaan proses pengelasan *friction*, dimana proses pengelasan *friction* tersebut memperbaiki bagian batas butir material sehingga batas butir yang tidak mengalami perbaikan tersebut dapat menghalangi terjadinya *dislokasi* butir dan meningkatkan kekuatan tariknya. Sebaliknya tanpa ada perbaikan butir yang signifikan mengakibatkan *elongation* dari spesimen tersebut menurun drastis karena telah mengalami proses pemanasan saat terjadinya pengelasan *friction*, bahkan nilai *elongation* tersebut memiliki nilai lebih rendah seperti pada Tabel 4.1 hasil pengujian tarik dan Gambar 4.1 hasil pengujian tarik.

Tabel 4. 1 Pengaruh Kecepatan Rotasi *Tools* Terhadap Kekuatan Tarik

RPM	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (UTS) (MPa)	Elongation (%)
<i>BaseMetal</i>	280 ± 17	582 ± 11	85 ± 7
200	460 ± 13	706 ± 14	51 ± 4
315	340 ± 10	623 ± 11	67 ± 5

Sumber: Hajian, dkk (2014)



Gambar 4.1 Pengaruh Kecepatan Rotasi *Tools* Terhadap Kekuatan Tarik (Hajian, dkk 2014)

Kumar, dkk (2017) meneliti tentang pengelasan *friction* terhadap material *austenite stainless steel* (AISI 316L) dengan menggunakan parameter pengelasan yaitu kecepatan pengelasan yang konstan 45 mm/min, derajat kemiringan tools sebesar 1.5°. Kemudian parameter yang divariasikan adalah kecepatan putaran tools yaitu sebesar 400 rpm, 600 rpm dan 800 rpm. Menurut parameter pengelasan tersebut didapatkan hasil pengujian *tensile* yang berbeda untuk setiap spesimen.

Spesimen pengelasan yang menggunakan rpm 400 memiliki nilai kekuatan tarik yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan *base metal* dan spesimen pengelasan yang menggunakan 600 rpm memiliki hasil yang lebih tinggi pula dari spesimen yang menggunakan 400 rpm. Akan tetapi, jika dibandingkan dengan spesimen yang menggunakan 800 rpm maka nilai kekuatan tarik akan lebih tinggi spesimen yang menggunakan 600 rpm. Dari hasil pengujian tersebut didapatkan hasil yaitu semakin tinggi rpm maka akan semakin tinggi nilai kekuatan tarik material, akan tetapi rpm tersebut memiliki nilai optimal yang diisyaratkan dengan nilai sebesar 600 rpm. Jika melebihi 600 rpm maka nilai kekuatan tarik dari spesimen akan kembali menurun.

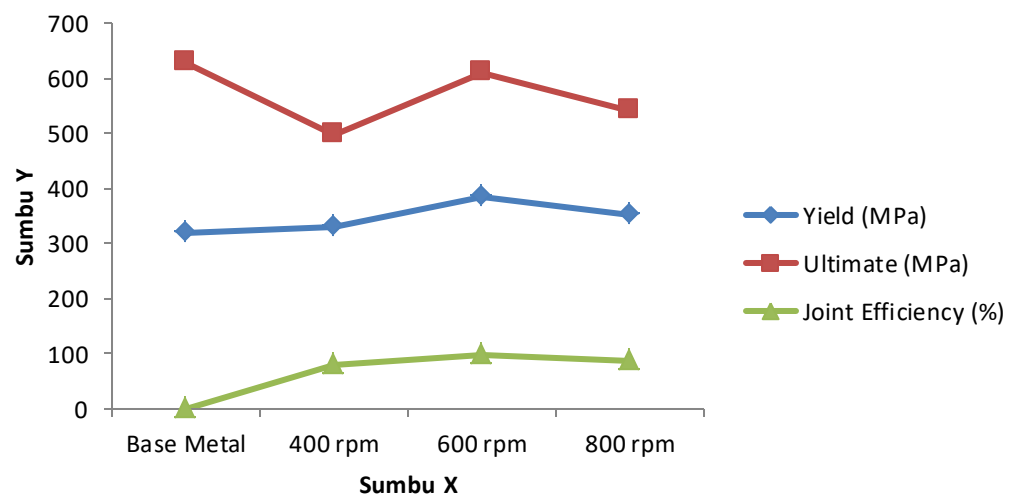
Fenomena kenaikan nilai kekuatan tarik dan nilai optimum untuk kecepatan rotasi tools dalam pengelasan *friction welding* tersebut juga mencakup nilai *yield strength* dan nilai *ultimate tensile strength*. Dibuktikan dengan pengamatan butir spesimen setelah dilakukan FSW dan didapatkan hasil butir pada daerah BM,

TMAZ dan SZ tidak mengalami perubahan fase setelah dilakukan pengelasan *friction* tersebut. Hasil pengujian tarik didapatkan hasil dengan kecepatan rotasi *tools* sebesar 600 rpm memiliki nilai kekuatan tarik paling tinggi disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu kecepatan rotasi *tools* 600 rpm sebagai nilai optimum menggunakan kecepatan rotasi *tools* dan pada saat pengujian tarik patahan yang terjadi pada spesimen ini terletak pada *interface* BM dengan TMAZ sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.2, Gambar 4.2 untuk hasil pengujian *tensile strength* dan Gambar 4.3 untuk letak patahan pada setiap spesimen pengujian.

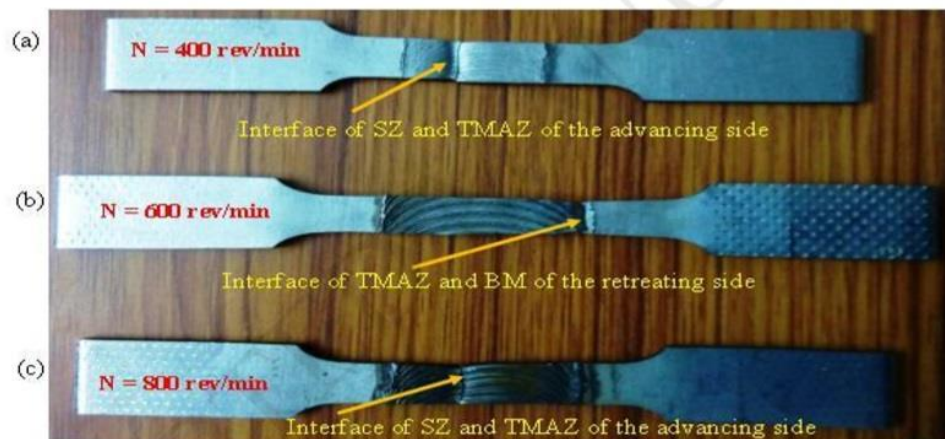
Tabel 4.2 Pengaruh Kecepatan Rotasi *Tools* Terhadap Kekuatan Tarik

Specimen	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)	Joint Efficiency (%)
Base Metal	320	630	0
400	331	498	79
600	386	610	97
800	351	542	86

Sumber: Kumar, dkk (2017)



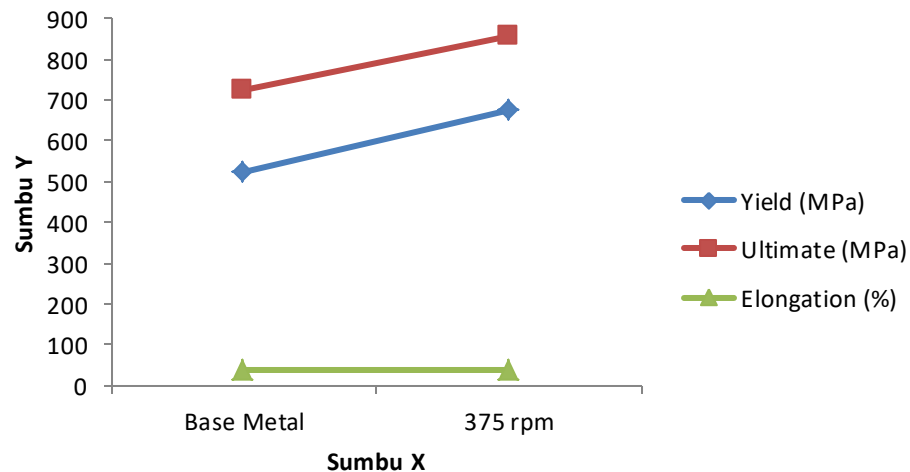
Gambar 4.2 Pengaruh Kecepatan Rotasi *Tools* Terhadap Kekuatan Tarik
Kumar, dkk (2017)



Gambar 4.3 Letak Patahan Spesimen Uji Tarik
Kumar, dkk (2017)

Peng, dkk (2020) meneliti tentang pengaruh peleburan laser yang selektif dari pengelasan *friction welding* pada material (AISI 316L), yang menggunakan parameter pengelasan yaitu kecepatan pengelasan sebesar 37.5 mm/min, derajat kemiringan *tools* yang digunakan adalah 2° dan kecepatan rotasi *tools* 375 rpm.

Menurut parameter pengelasan tersebut didapatkan hasil pengujian yang akan dibandingkan dengan kekuatan tarik dari *base metal*. Perbandingan antara hasil pengelasan dengan menggunakan *friction welding* dengan *base metal* mengalami peningkatan yang signifikan pada *yield strength* dan *ultimate tensile strength*. Hal tersebut dikarenakan oleh secara umum pada bagian spesimen yang mengalami kontak langsung dengan *tools* akan mengalami penekanan dan butir-butir di area tersebut akan semakin rapat dan menghalangi jalur dislokasi dan meningkatkan nilai tarik dari material. Sebaliknya, semakin rapat butir-butir pada material akan mengurangi pertambahan panjang dari material sehingga material mengalami penurunan *elongation* sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.4 dan Tabel 4.3 untuk hasil pengujian *tensile*.



Gambar 4.4 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekuatan Tarik
Peng, dkk (2020)

Tabel 4.3 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekuatan Tarik

Spesimen	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)	Elongation (%)
Base Metal	522	724	37
Trial 1	674	856	37

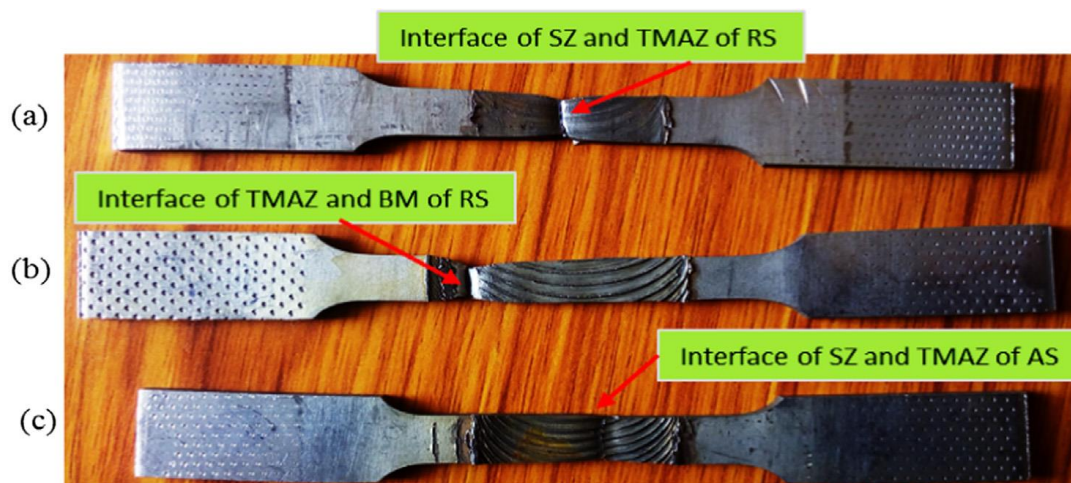
Sumber: Peng, dkk (2020)

Kumar, dkk (2019) meneliti tentang pengelasan *friction* pada material *austenite stainless steel* (AISI 316L) dengan menggunakan parameter pengelasan kecepatan pengelasan konstan yaitu 45 mm/min, kecepatan putaran tools konstan 600 rpm. Parameter yang divariasikan adalah derajat kemiringan tools yaitu menggunakan 0°, 1.5° dan 3°. Menurut parameter pengelasan tersebut didapatkan hasil yaitu *yield strength* mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan *base metal*.

Base metal memiliki nilai 320 MPa sedangkan untuk hasil pengujian dengan variasi derajat kemiringan tools 0°, 1.5° dan 3° didapatkan hasil 334 MPa, 380 MPa dan 369 MPa. Namun untuk *ultimate tensile strength* mengalami penurunan jika dibandingkan dengan *base metal* yang memiliki nilai *ultimate tensile strength* sebesar 630MPa sedangkan untuk hasil pengujian dengan variasi

derajat kemiringan *tools* 0°, 1.5° dan 3° didapatkan hasil 555 MPa, 605 MPa, 590 MPa. Nilai *yield* yang lebih tinggi ini dipengaruhi oleh butiran halus yang terdapat pada SZ dan penyempurnaan batas butir dengan dislokasi parsial. Sedangkan penurunan nilai *ultimate tensile strength* dipengaruhi oleh sudut kemiringan *tools* yang digunakan, dan hal tersebut mempengaruhi spesimen pada bagian SZ.

Hal ini terjadi karena pada daerah *stir zone* mengalami perubahan butir yang menjadi lebih besar dan mengakibatkan dislokasi antar butir yang harusnya mengalami peningkatan pada kekuatan tariknya, namun patah yang terjadi pada pengujian semua terletak jauh dari *stir zone*. Patahan yang terjadi terletak pada bagian TMAZ ataupun pada bagian pertemuan antara daerah TMAZ dan bagian *base metal* sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.5 letak patahan pengujian tensile dan Tabel 4.4, Gambar 4.6 untuk hasil pengujian *tensile*.

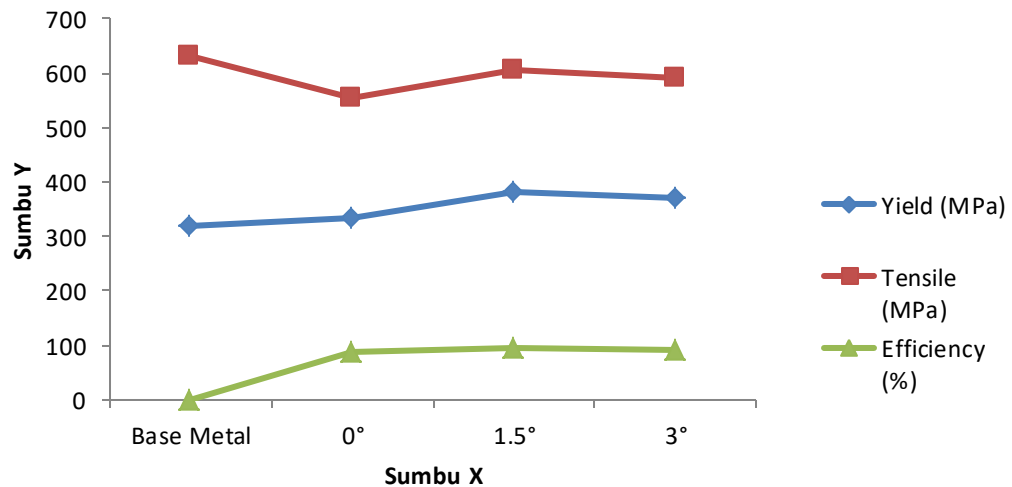


Gambar 4.5 Hasil Patahan Pengujian *Tensile*
Kumar, dkk (2019)

Tabel 4.4 Pengaruh Derajat Kemiringan *Tools* Terhadap Kekuatan Tarik

Spesimen	Yield (MPa)	Tensile (MPa)	Efficiency (%)
Base Metal	320	630	0
0°	334	555	88
1.5°	380	605	96
3°	369	590	93

Sumber: Kumar, dkk (2019)



Gambar 4.6 Pengaruh Derajat Kemiringan *Tools* Terhadap Kekuatan Tarik
Kumar, dkk (2019)

4.2 Pengaruh Friction Welding Terhadap Kekerasan

Hajian, dkk (2014) meneliti tentang *friction welding* terhadap pengelasan material AISI 316L parameter pengelasan *friction* yang digunakan adalah kecepatan pengelasan yang konstan 63 mm/min derajat kemiringan *tools* yang konstan sebesar 3°. Kemudian parameter yang divariasikan adalah kecepatan putaran *tools* yaitu sebesar 200 rpm dan 315 rpm. Menurut parameter pengelasan tersebut didapatkan hasil pengujian kekerasan dari material AISI 316L adalah mengalami peningkatan pada nilai kekerasan dibandingkan dengan *base metal* yang mana hanya memiliki nilai kekerasan sebesar 173 HV sedangkan untuk spesimen pengelasan yang menggunakan rotasi 200 rpm memiliki nilai kekerasan sebesar 900 HV.

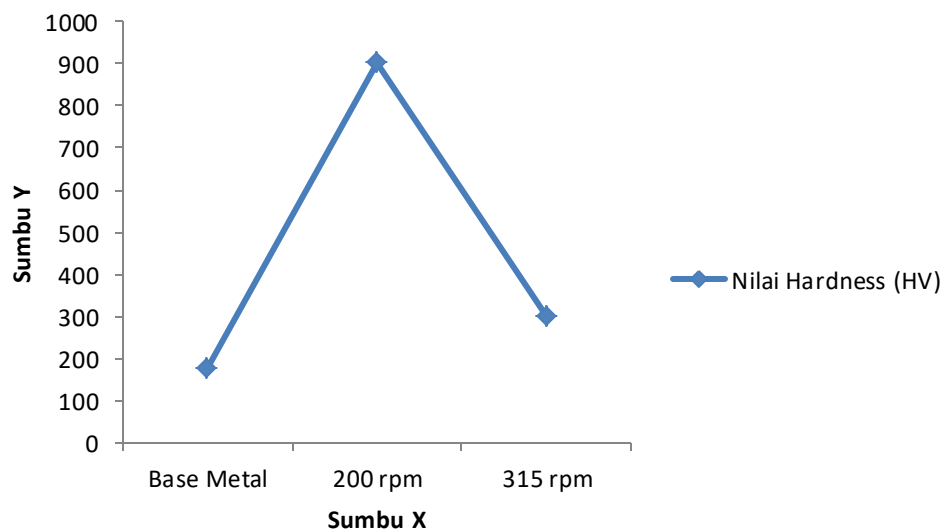
Perbedaan yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan *base metal*. Akan tetapi pada spesimen pengelasan yang menggunakan rotasi sebesar 315 rpm mengalami penurunan nilai kekerasan yaitu hanya 300 HV, hal ini jelas penurunan yang signifikan jika dibandingkan dengan spesimen pengelasan yang menggunakan rotasi 200 rpm. Hal ini bisa terjadi karena butir-butir material pada daerah SZ mengalami penekanan dan terkena suhu panas akibat gesekan yang dapat mengakibatkan butir-butir tersebut semakin berhimpit antara satu dengan yang lainnya dan pada spesimen pengelasan yang menggunakan rotasi sebesar

200 rpm merupakan nilai optimum dari pengelasan *friction* untuk mendapatkan nilai kekerasan yang paling tinggi, karena tingkat perbaikan butir pada saat pengelasan terjadi lebih baik pada rotasi 200 rpm. Sama halnya dengan teori *Hall-Petch* yaitu semakin halus butir-butir maka semakin tinggi nilai kekerasannya. sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.7 menunjukkan hasil pengujian *hardness* yang dilaksanakan pada bagian melintang dari material sampel FSW.

Tabel 4.5 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekerasan

No.	Spesimen	Nilai Hardness (HV)
1.	Base Metal	173 ± 15 HV
2.	200	900 ± 30 HV
3.	315	300 ± 50 HV

Sumber: Hajian, dkk (2014)



Gambar 4.7 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekerasan
Hajian, dkk (2014)

Kumar, dkk (2017) meneliti tentang pengelasan *friction* terhadap material AISI 316L dengan menggunakan parameter pengelasan yaitu kecepatan pengelasan yang sama sebesar 45 mm/min, derajat kemiringan *tools* yang sama

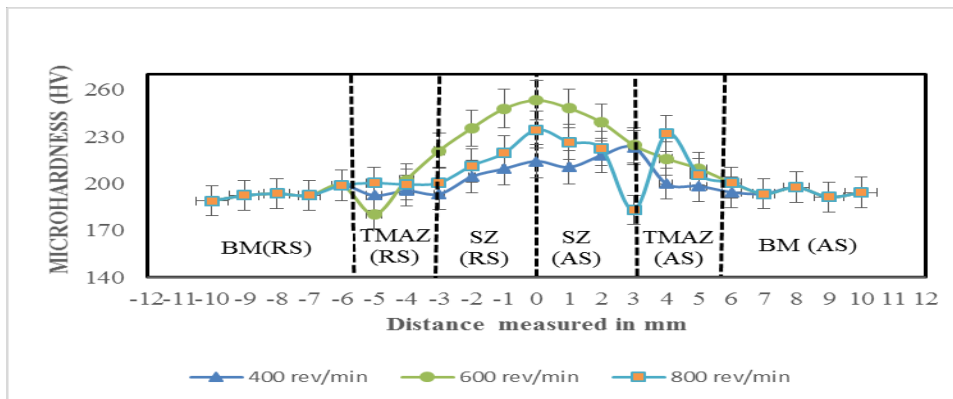
yaitu sebesar 1.5°. parameter yang divariasikan adalah kecepatan rotasi *tools* yaitu 400 rpm, 600 rpm dan 800 rpm. Menurut parameter tersebut didapatkan hasil pengujian *hardness* pada daerah *stir zone* atau SZ mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan daerah *base metal* yang hanya memiliki nilai kekerasan 190 HV, sedangkan untuk nilai optimum dari spesimen pengelasan adalah pada rotasi 600 rpm dimana spesimen tersebut memiliki nilai kekerasan sebesar 258 HV. Nilai tersebut adalah nilai tertinggi dari spesimen pengelasan yang lain dengan rotasi 400 rpm dan 800 rpm yang memiliki nilai kekerasan 210 HV dan 220 HV.

Hal tersebut bisa terjadi karena pada rotasi 600 rpm perbaikan butir pada daerah SZ mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan rotasi 400 rpm atau 800 rpm. Dengan demikian semakin tinggi rotasi putaran akan menghasilkan nilai *hardness* yang semakin tinggi, namun maksimum rotasi putaran adalah 600 rpm yang menghasilkan nilai *hardness* paling tinggi. Perbaikan butir tersebut karena spesimen pengelasan mengalami tekanan dari *tools* dan terkena panas dari efek gesekan antara *tools* dengan material. Hasil dari pengujian ditampilkan pada Tabel 4.6, Gambar 4.9 dan perbedaan hasil pengujian *hardness* pada daerah tertentu pada Gambar 4.8 berikut.

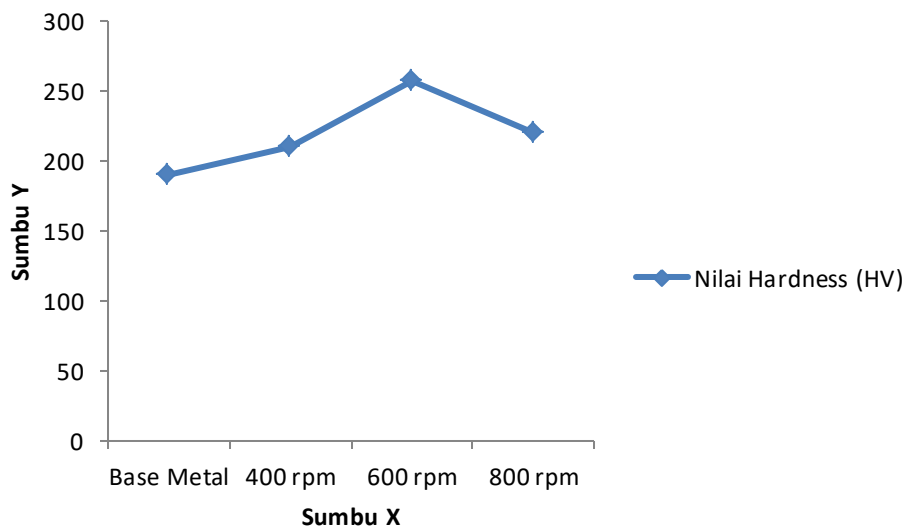
Tabel 4. 6 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekerasan

No.	Spesimen	Nilai Hardness (HV)
1.	Base Metal	190 ± 5
2.	400 rpm	210 ± 5
3.	600 rpm	258 ± 4
4.	800 rpm	220 ± 4

Sumber: Kumar. dkk (2017)



Gambar 4.8 Perbandingan Nilai *Hardness* Pada Spesimen Kumar, dkk (2017)



Gambar 4.9 Pengaruh Kecepatan Rotasi *Tools* Terhadap Kekerasan Kumar, dkk 2017

Peng, dkk (2020) meneliti tentang pengaruh peleburan laser yang selektif dari pengelasan *friction welding* pada material AISI 316L, yang menggunakan parameter pengelasan kecepatan pengelasan yang konstan 37.5 mm/min, rotasi *tools* sebesar 375 rpm dan derajat kemiringan *tools* sebesar 2°. Tidak ada parameter yang divariasikan karena jurnal ini hanya membandingkan *trial* 1 dengan *base metal*. Menurut parameter pengelasan tersebut didapatkan hasil pengujian *hardness* yang melebihi ekspektasi dari penguji, yaitu nilai kekerasan atau *hardness* meningkat sebesar 24.8% dari estimasi nilai kekerasan yang sudah ditentukan. Dimana yang awal mula sebelum pengujian diperkirakan nilai

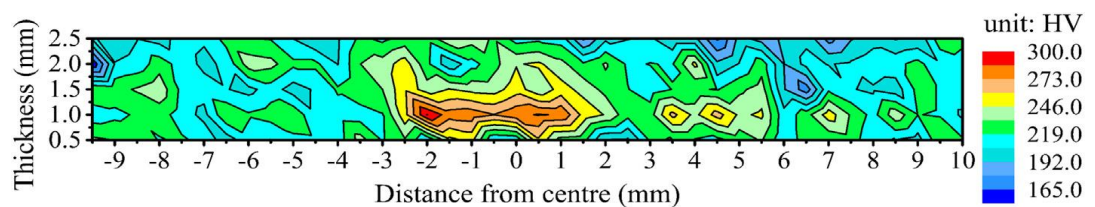
hardness dari BM dan trial sebesar 218 HV dan 272 HV, akan tetapi setelah dilakukan pengelasan terjadi peningkatan nilai *hardness* pada trial 1 yang melebihi perkiraan sebesar 24.8% menjadi 300 HV.

Hal ini terjadi karena dua fakta yaitu di satu sisi FSW menghilangkan cacat lubang pada BM, meningkatkan tingkat keseragaman struktur mikro dan meningkatkan kepadatan. Di sisi lainnya mekanisme penguatan serat halus berdasarkan hubungan *Hall-Petch* peningkatan kekerasan dengan penyempurnaan butir. Secara tidak langsung *friction stir welding* menghilangkan *defect* pada *base metal*, menjadikan struktur mikro dari *base metal* lebih seragam dan meningkatkan *density* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.7, Gambar 4.11 hasil pengujian *hardness* dan Gambar 4.10 perbandingan titik pengujian *hardness*.

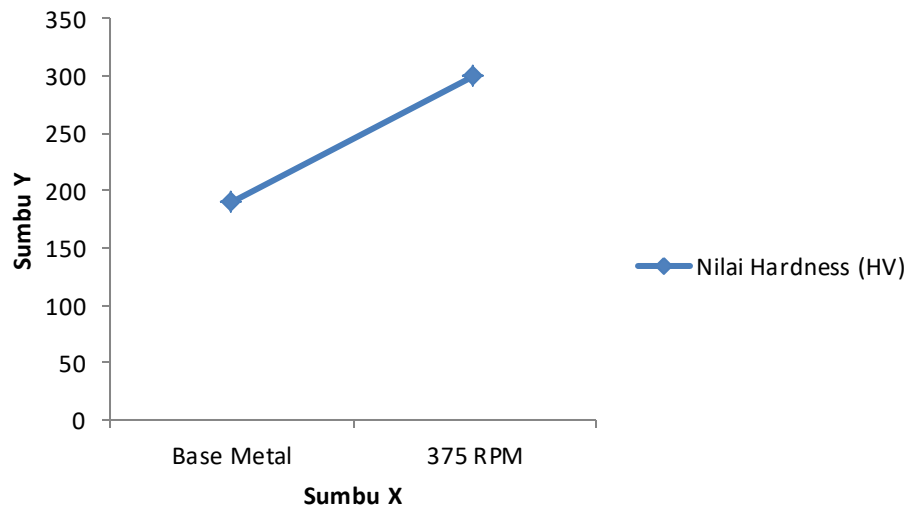
Tabel 4. 7 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Kekerasan

No.	Spesimen	Nilai Hardness (HV)
1.	Base Metal	190
2.	375 – 37.5	300

Sumber: Peng, dkk (2020)



Gambar 4. 10 Perbandingan Titik Pengujian *Hardness*
Peng, dkk (2020)



Gambar 4.11 Pengaruh Kecepatan Rotasi *Tools* Terhadap Kekerasan
Peng, dkk 2020

Kumar, dkk (2019) meneliti tentang pengelasan *friction* pada material AISI 316L dengan menggunakan parameter pengelasan kecepatan pengelasan konstan sebesar 45 mm/min, kecepatan rotasi *tools* yang konstan sebesar 600 rpm. Kemudian parameter yang divariasikan adalah derajat kemiringan *tools* masing-masing sebesar 0°, 1.5° dan 3°. Menurut parameter pengelasan tersebut didapatkan hasil pengujian kekerasan pada daerah TMAZ, dan memiliki hasil pengujian *hardness* yang lebih tinggi daripada *base metal* yang memiliki nilai kekerasan 190 HV, jika dibandingkan dengan spesimen pengelasan yang menggunakan parameter 1.5° akan didapatkan hasil yang jauh berbeda karena memiliki nilai kekerasan sebesar 250 HV.

Nilai tersebut adalah nilai kekerasan tertinggi dibandingkan dengan spesimen pengelasan yang menggunakan derajat kemiringan *tools* 0° dan 3° yang masing-masing memiliki nilai 205 HV dan 230 HV. Puncak temperatur pengelasan adalah alasan perbedaan nilai kekerasan pada penelitian yang dilakukan oleh Kumar, dkk (2019), pada spesimen pengelasan yang menggunakan derajat kemiringan 1.5° memiliki temperatur puncak pengelasan paling tinggi jika dibandingkan dengan spesimen dengan derajat kemiringan *tools* yang lain. Pengujian dilakukan di daerah TMAZ karena memiliki struktur butir yang lebih halus daripada di *base metal*. Pengujian pada daerah TMAZ dilakukan karena

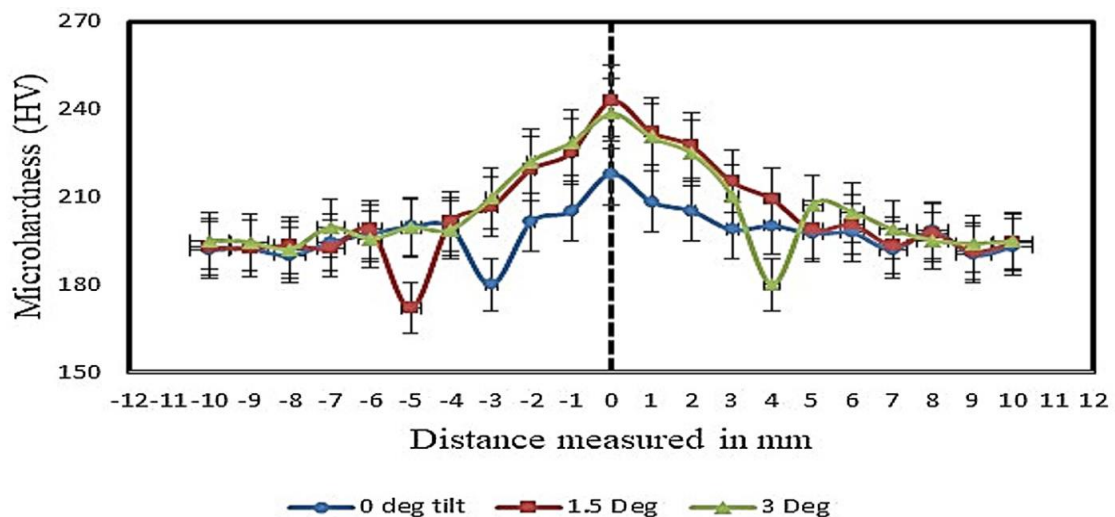
pengujian tiap perbedaan sudut kemiringan *tools* memiliki perbedaan seperti permukaan TMAZ dengan SZ atau TMAZ dengan BM.

Pada daerah TMAZ terjadi perbaikan butir yang menyebabkan butir menjadi lebih halus, hal ini akan meningkatkan nilai kekerasan yang signifikan. Nilai kekerasan pada permukaan daerah TMAZ dan BM pada bagian *Advancing Side* atau AS akan berbeda dengan daerah TMAZ dan BM pada bagian *Retreating Side* atau RS. Berikut adalah Tabel 4.8, Gambar 4.13 untuk hasil pengujian *hardness* dan Gambar 4.12 untuk perbandingan nilai *hardness* berdasarkan derajat kemiringan *tools*.

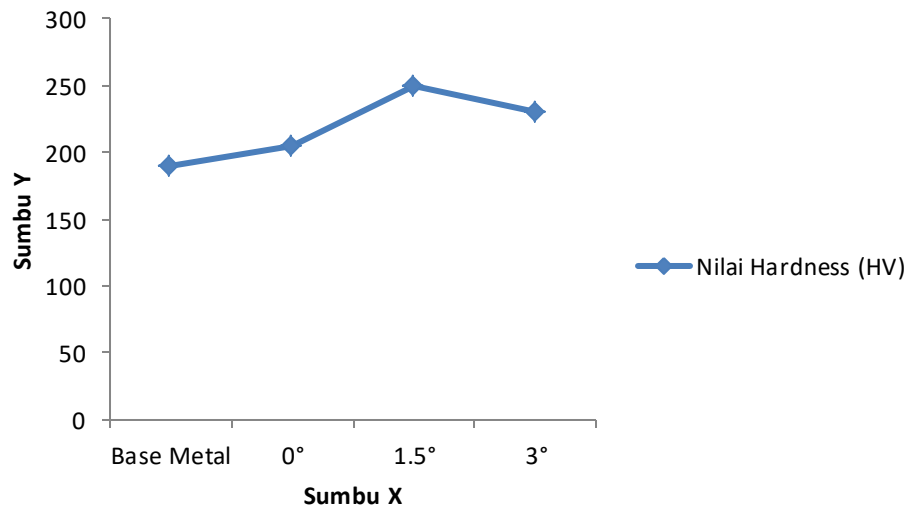
Tabel 4.8 Pengaruh Derajat kemiringan Tools Terhadap Kekerasan

No	Spesimen	Nilai Hardness (HV)
1.	Base Metal	190 ± 5
2.	0°	205 ± 5
3.	1.5°	250 ± 5
4.	3°	230 ± 5

Sumber: Kumar, dkk (2019)



Gambar 4.12 Perbandingan Nilai *Hardness Test*
Kumar, dkk (2019)



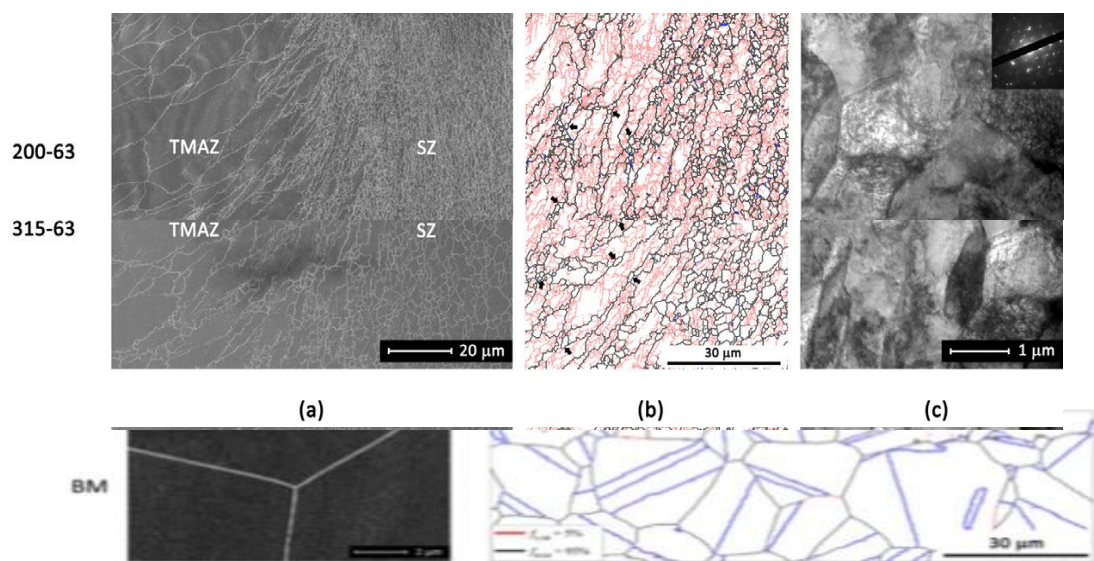
Gambar 4.13 Pengaruh Derajat Kemiringan *Tools* Terhadap Kekerasan
Kumar, dkk 2019

4.3 Pengaruh *Friction Welding* Terhadap Struktur Mikro

Hajian, dkk (2014) meneliti tentang *friction welding* terhadap pengelasan material AISI 316L parameter pengelasan yang digunakan adalah kecepatan pengelasan yang konstan sebesar 63mm/min, derajat kemiringan *tools* yang sama sebesar 3°. Parameter yang divariasikan adalah kecepatan rotasi *tools* yaitu sebesar 200 rpm dan 315 rpm. Menurut parameter tersebut, didapatkan hasil pengujian mikro yang terbagi menjadi 3 bagian yaitu bagian BM, bagian TMAZ dan bagian SZ.

Ketiga bagian tersebut memiliki struktur mikro yang berbeda-beda, pada bagian BM struktur mikro didominasi oleh *High Angle Boundaries* atau HAB dengan komposisi sebesar 95% sedangkan untuk *Low Angle Boundaries* hanya sebesar 5% dan *grain size* dari struktur mikro adalah 14.8 μm . pada daerah SZ spesimen 315 rpm memiliki perubahan komposisi pada HAB dan LAB dimana masing-masing memiliki nilai sebesar 55% dan 45% serta *grain size* sebesar 2.2 μm . untuk spesimen 200 rpm memiliki persamaan dalam komposisi HAB dan LAB namun memiliki perbedaan pada *grain size* yang lebih kecil, yaitu 0.8 μm . berbeda dengan SZ pada daerah TMAZ bentuk struktur mikro lebih memanjang dan tegak lurus dari arah *transversal* yang disebabkan oleh deformasi plastis yang dihasilkan oleh *tools*.

Bentuk butir dalam TMAZ memiliki ciri khas yang lebih bergerigi dibandingkan struktur mikro pada bagian yang lain. Dalam kecepatan pengelasan yang konstan, kecepatan rotasi yang semakin tinggi akan menghasilkan *heat input* yang lebih banyak, akan tetapi kecepatan rotasi *tools* yang lebih rendah akan lebih efektif menghasilkan butir-butir yang lebih halus. Selain itu ada efek dari rotasi yang dilakukan oleh *tools* yang mengakibatkan struktur mikro di daerah SZ menjadi seperti bergeser dan menjadi relatif lebih kecil dari daerah TMAZ dan BM, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.14



Gambar 4. 14 Perbandingan Hasil Uji Mikro Base Metal, 200 - 63 dan 315 - 63
Hajian, dkk (2014)

Kumar, dkk (2017) meneliti tentang pengelasan *friction* terhadap material AISI 316L dengan menggunakan parameter pengelasan kecepatan pengelasan sebesar 45 mm/min konstan, dengan derajat kemiringan *tools* yang sama pada 1.5°. Parameter pengelasan yang divariasikan adalah kecepatan rotasi *tools* yaitu menggunakan 400 rpm, 600 rpm dan 800 rpm. Menurut parameter pengelasan tersebut, didapatkan hasil pengujian mikro yang menunjukkan besaran *grain size* struktur mikro yang berbeda dari tiap parameter yang digunakan dalam pengelasan *friction welding*. Perbedaan struktur mikro pada material ini terjadi karena adanya perbedaan kecepatan rotasi yang mana kecepatan rotasi yang berbeda juga menghasilkan temperatur puncak yang berbeda.

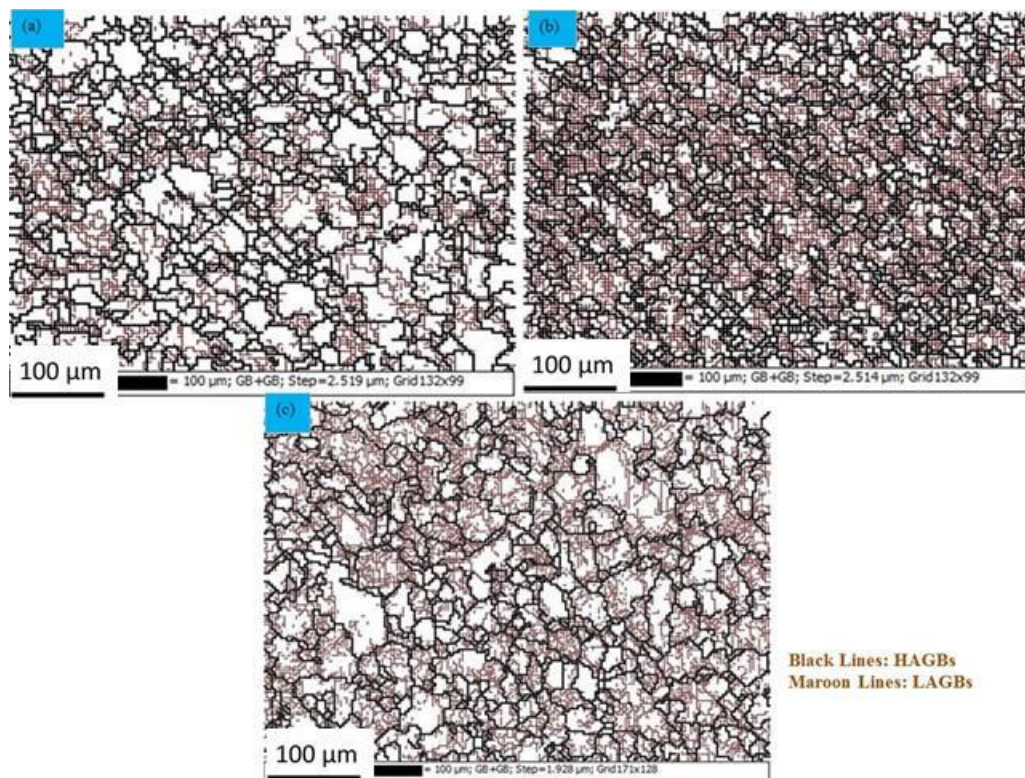
Pada bagian SZ spesimen yang menggunakan kecepatan rotasi 400 rpm dan 600 rpm memiliki prosentase LAB sebesar 70% dan 85% sedangkan untuk HAB memiliki nilai 30% dan 15%. Hal ini berbeda dengan spesimen yang menggunakan kecepatan rotasi sebesar 800 rpm yang mana memiliki persentase LAB sebesar 45% dan HAB sebesar 55%, walaupun nilai tersebut masih sangat jauh daripada BM yang memiliki HAB sebesar 95% dan LAB sebesar 5% namun itu sudah menjadikan spesimen 800 rpm tersebut lebih baik daripada spesimen yang lain dalam hal struktur mikro. Pada daerah TMAZ memiliki rata-rata *grain size* sebesar 12 μm , 9 μm dan 18 μm untuk spesimen pengujian dengan rotasi 400, 600 dan 800 rpm.

Perbedaan *grain size* dan nilai persentase HAB dan LAB tersebut dapat menjelaskan keadaan material setelah dilakukan pengelasan apakah terkena dampak yang besar atau masih dapat mempertahankan struktur mikronya sehingga tidak banyak mengubah kekuatan dari material tersebut. Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.15 untuk hasil pengujian mikro.

Tabel 4. 9 Pengaruh Kecepatan Rotasi Tools Terhadap Average Grain Size

No.	Spesimen	Average Grain Size	Precentage Boundary Fracture
1	400	$10 \pm 2 \mu\text{m}$	70 %
2	600	$5 \pm 3 \mu\text{m}$	85%
3	800	$15 \pm 3 \mu\text{m}$	55%

Sumber: Kumar, dkk (2017)

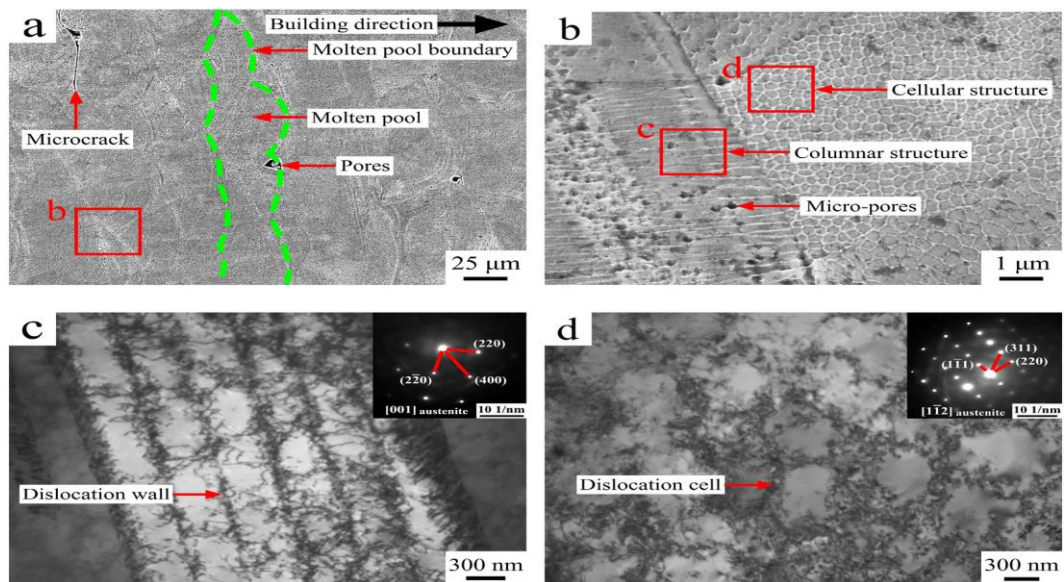


Gambar 4.15 Hasil Uji Mikro (a) 400, (b) 600, (c) 800
Kumar, dkk (2017)

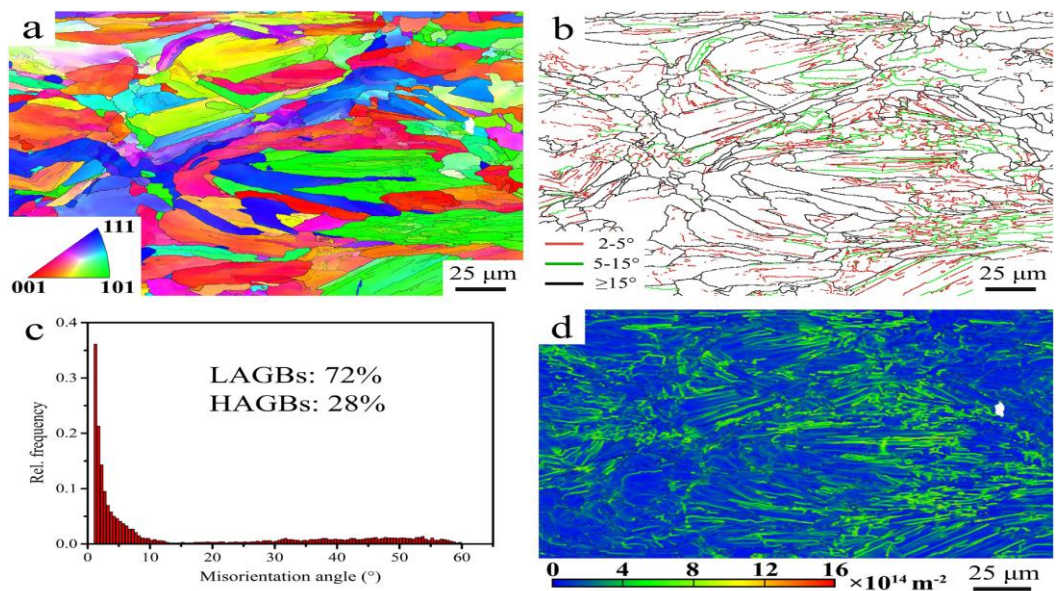
Peng, dkk (2020) meneliti tentang pengaruh peleburan laser yang selektif dari pengelasan *friction welding* pada material AISI 316L, yang menggunakan parameter pengelasan kecepatan pengelasan sebesar 37.5 mm/min, kecepatan rotasi *tools* sebesar 375rpm dan derajat kemiringan *tools* sebesar 2°. Tidak ada parameter yang divariasikan karena pengujian pada *trial* 1 akan langsung dibandingkan dengan *base metal*. Menurut parameter tersebut, didapatkan hasil pengujian mikro yang mengalami perbedaan pada BM dan SZ.

Pada bagian BM memiliki *grain size* tidak seragam dengan ukuran sebesar 4 – 70 μm dengan rata-rata 6.6 μm sedangkan untuk daerah SZ memiliki *grain size* dengan ukuran 0.4 – 2.5 μm dengan rata-rata 0.9 μm. pada bagian SZ memiliki persentase LAB dan HAB sebesar 58% dan 42% memiliki perubahan yang cukup besar jika dibandingkan dengan BM yang memiliki persentase LAB dan HAB sebesar 5% dan 95%. Hal tersebut dikarenakan kecepatan pendinginan pada SZ dan BM sangat berbeda. Hal tersebut yang menyebabkan hasil pengujian struktur mikro mengalami perbedaan antara BM, dan SZ. Sebagaimana

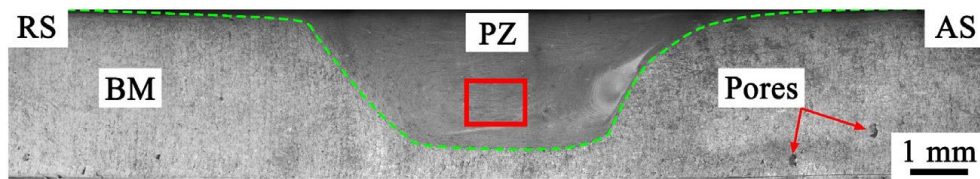
ditampilkan pada Gambar 4.16 dan 4.17 perbedaan LAB dan HAB, hasil tersebut diambil pada bagian PZ sebagaimana ditunjukkan Gambar 4.18



Gambar 4.16 Hasil Pengujian Mikro (a) BM, (b) TMAZ, (c) SZ, dan (d) Dislokasi Cell Peng, dkk (2020)



Gambar 4.17 Perbedaan HAB dan LAB Peng, dkk (2020)



Gambar 4.18 Letak Pengambilan Sampel
Peng, dkk (2020)

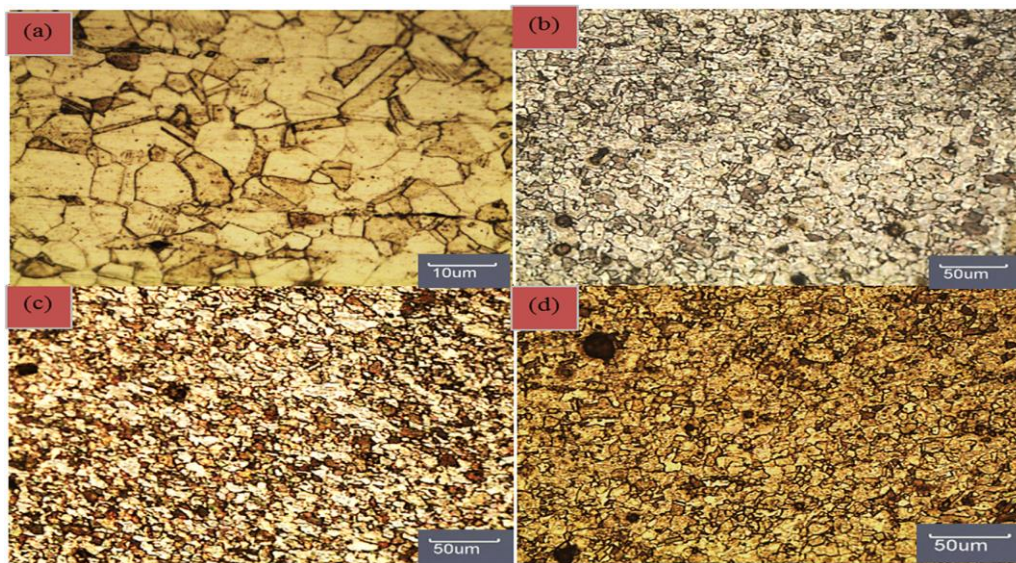
Kumar, dkk (2019) meneliti tentang pengelasan *friction* pada material AISI 316L dengan menggunakan parameter pengelasan kecepatan pengelasan yang konstan dengan nilai 45 mm/min, kecepatan rotasi *tools* yang konstan dengan nilai 600 rpm. Parameter yang divariasikan adalah derajat kemiringan *tools* yaitu dibedakan menjadi 0°, 1.5° dan 3°. Menurut parameter pengelasan tersebut didapatkan hasil perbandingan *grain size* menurut derajat kemiringan *tools* dan hasil pengujian mikro antara *tools* 0° yang memiliki besaran *grain size* 8µm, *tools* 1.5° yang memiliki besaran *grain size* 5 µm, dan *tools* 3° memiliki besaran *grain size* 6 µm.

Perbedaan hasil *grain size* pada setiap perbedaan parameter memiliki arti semakin tinggi derajat kemiringan *tools* yang digunakan akan menyebabkan besaran *grain size* akan semakin kecil. Perbedaan *grain size* tersebut disebabkan oleh perbedaan temperatur puncak pada masing masing parameter derajat kemiringan *tools*, temperatur puncak yang didapatkan adalah 968°C, 901.5°C dan 865°C untuk derajat kemiringan *tools* 0°, 1.5° dan 3°. Perbedaan kemiringan derajat *tools* memiliki pengaruh yang besar terhadap penekanan yang terjadi pada material, seperti pada sudut 0° akan sangat berbeda dengan sudut 3° oleh karena itu semakin tinggi derajat kemiringan *tools* maka temperatur puncak akan semakin turun dan tidak optimal. Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.10 dan Gambar 4.19 berikut.

Tabel 4. 10 pengaruh Derajat kemiringan Tools Terhadap *Average Grain Size*

No.	Spesimen	Average Grain Size	Peak temperature
1.	0°	$8 \pm 3 \mu\text{m}$	968° C
2.	1.5°	$5 \pm 2 \mu\text{m}$	901.5° C
3.	3°	$6 \pm 3 \mu\text{m}$	856° C

Sumber: Kumar, dkk (2019)



Gambar 4. 19 Hasil Pengujian Mikro (a) BM, (b) 0°, (c) 1.5°, (d) 3°
Kumar, dkk (2019)

4.4 Diskusi

Tabel 4. 11 Perbandingan Nilai Optimal

Peneliti	Kecepatan Rotasi Tools (rpm)	Kecepatan Pengelasan (mm/min)	Derajat Kemiringan Tools	Kekuatan Tarik (MPa)		Kekerasan (HV)
Hajian, dkk 2014	200	63	3°	460	706	900
Kumar, dkk 2017	600	45	1.5°	386	610	258
Peng, dkk 2020	375	37.5	2°	674	856	300
Kumar, dkk 2019	600	45	1.5°	380	605	250

Sumber: Data Pribadi

Perbandingan berdasarkan pada analisa kekuatan tarik material AISI 316L yang dilas menggunakan metode pengelasan *friction* menurut beberapa jurnal memiliki persamaan dan beberapa perbedaan. Menurut Hajian, dkk (2014) pengelasan *friction* memiliki pengaruh terhadap kekuatan tarik material AISI 316L yaitu terhadap *yield strength* dan *ultimate tensile strength* yang mengalami peningkatan pada pengelasan *friction* yang menggunakan rotasi *tools* rendah ke yang tinggi, akan tetapi nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* memiliki nilai optimal pada rotasi putaran *tools* 200rpm. Namun material AISI 316L tersebut mengalami penurunan pada *elongation*. Hal tersebut juga dikemukakan oleh Peng, dkk (2020) yang mengungkapkan nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* dari material AISI 316L mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan *base metal*. Sedangkan untuk *elongation* mengalami penurunan karena material perbaikan butir dan meningkatkan densitas, dimana jika densitas tinggi maka tingkat kehalusan butir akan semakin tinggi. Jika tingkat kehalusan butir makin tinggi maka akan menghambat terjadinya dislokasi, hal tersebut yang mengakibatkan elongasi mengalami penurunan.

Namun kumar, dkk 2017 mengemukakan pendapat yang berbeda melalui penelitian yang dilakukannya dimana nilai *yield strength* dari material AISI 316L mengalami peningkatan jika dikenakan rotasi putaran *tools* yang semakin tinggi, akan tetapi nilai *ultimate tensile strength* material tersebut cenderung lebih

rendah, rotasi putaran *tools* yang memiliki nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* paling tinggi adalah pada rotasi putaran *tools* 600 rpm. Karena pada rotasi putaran *tools* sebesar 600 rpm material memiliki join efisiensi paling besar, yaitu sebesar 97%. Nilai tersebut adalah nilai join efisiensi paling tinggi jika dibandingkan parameter yang lain. Sehingga walaupun semakin tinggi rotasi putaran *tools* akan menghasilkan nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* yang semakin tinggi, akan tetapi memiliki batas maksimal yaitu pada 600 rpm.

Perbandingan berdasarkan analisa kekerasan material AISI 316L yang dilas menggunakan metode pengelasan *friction* menurut beberapa jurnal memiliki hasil sebagai berikut. Menurut Hajian, dkk (2014) pengelasan *friction* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekerasan material AISI 316L, karena nilai kekerasan material setelah dilakukan pengelasan *friction* memiliki hasil yang jauh diatas nilai kekerasan pada *base metal*, akan tetapi jika putaran rotasi *tools* yang terlalu tinggi akan menurunkan nilai kekerasan material. Karena material dengan putaran rotasi *tools* yang semakin besar memiliki *grain size* yang *homogen*, sedangkan pada putaran rotasi yang lebih rendah *grain size* tersebut membentuk lebih lonjong dan bergeser keatas dan hal tersebut menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi. Sehingga penambahan rotasi putaran pada *tools* memiliki nilai maksimal sebesar 200 rpm. Hal tersebut diyakini berasal dari teori *Hall-Patch* yang menyatakan semakin halus butir-butir pada material akan meningkatkan nilai kekerasan material tersebut. Sama halnya dengan Peng,dkk (2020) yang melakukan penelitian terhadap nilai kekerasan material AISI 316L setelah dilaplikasikan pengelasan *friction* yang mana juga mempercayai tentang teori *Hall-Patch* tersebut.

Peneilitian yang dilaksanakan Peng, dkk (2020) juga memiliki hasil yang serupa yaitu nilai kekerasan material AISI 316L yang lebih tinggi setelah dilakukan pengelasan *friction* jika dibandingkan dengan *base metal*. Berbeda dengan Kumar, dkk (2019) yang memiliki pendapat tersendiri tentang meningkatnya nilai kekerasan pada material AISi 316L setelah melalui pengelasan *friction*. Pada penelitiannya Kumar, dkk (2019) juga memiliki hasil yang serupa, yaitu nilai kekekrasan dari material AISI 316L setelah dilakukan pengelasan mengalami peningkatan pada masing masing perbedaan derajat kemiringan *tools*,

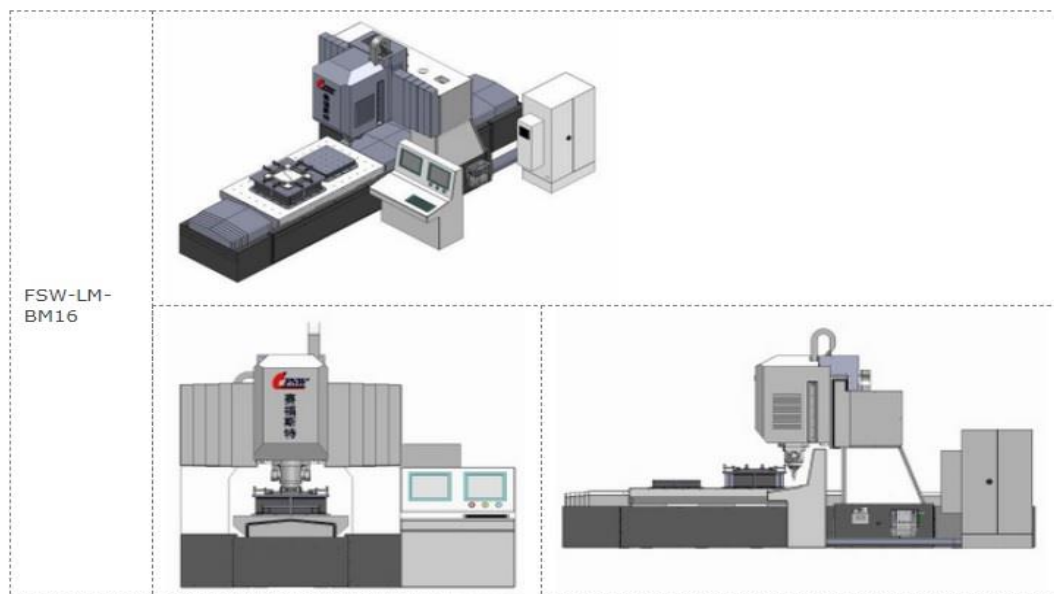
akan tetapi pada derajat kemiringan *tools* sebesar 1.5° terdapat nilai kekerasan tertinggi dibandingkan dengan derajat kemiringan 0° dan 3° . Menurut Kumar, dkk (2019) peningkatan tersebut dikarenakan adanya efek tekan pada material pada saat terjadinya proses pengelasan sehingga memicu terjadinya *advancing side* dan *retreating side* pada material setelah dilakukan pengelasan. Nilai kekerasan material yang tinggi tersebut didapatkan setelah dilakukan pada kedua daerah tersebut, sehingga Kumar, dkk (2019) memiliki pandangan yang berbeda dengan Hajian, dkk (2014) dan Peng, dkk (2020).

Perbandingan berdasarkan analisis struktur mikro material AISI 316L yang dilas menggunakan metode pengelasan *friction* menurut beberapa jurnal yang digunakan sebagai perbandingan hasil pengujian struktur mikro setelah dilakukan pengelasan pada material AISI 316L didapatkan hasil yang sama pada setiap jurnal. Menurut Kumar, dkk (2019) hal yang sedikit membedakan struktur mikro pada bagian yang dilakukan pengelasan adalah terletak pada daerah *stir zone*. Dimana daerah ini dilewati oleh *tools* yang kemudian mengalami penekanan dan panas sehingga hal tersebut sedikit mengubah bentuk butir dari material menjadi lebih padat. Kepadatan butiran tersebut dihasilkan oleh perbedaan derajat kemiringan *tools*, dimana nilai *grain size* paling tinggi dimiliki oleh spesimen dengan menggunakan derajat kemiringan *tools* sebesar 1.5° .

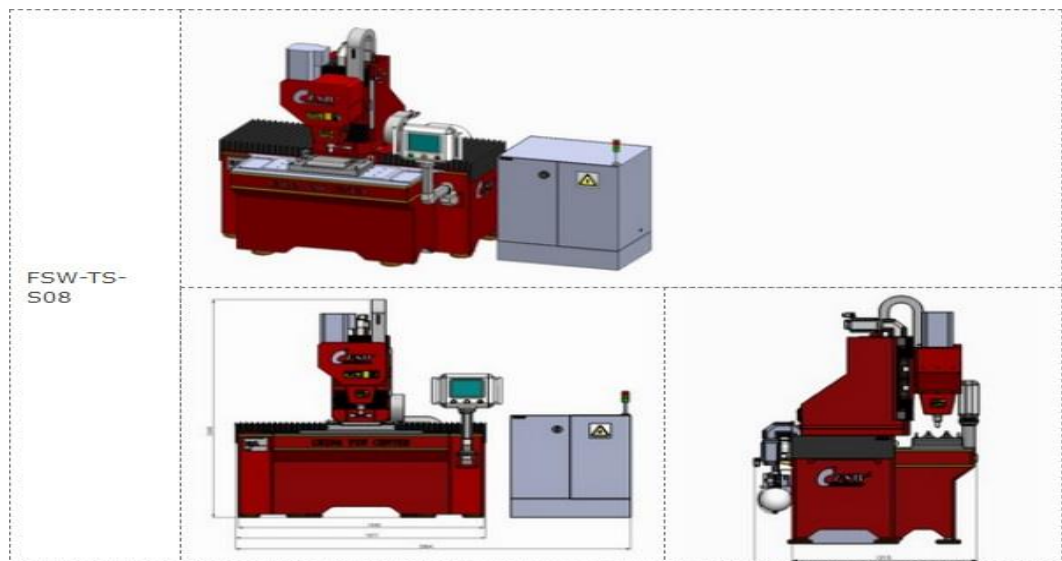
Sama halnya dengan Hajian, dkk (2014) yang mengemukakan pendapat serupa, perbedaan besar butir ini dipengaruhi oleh gesekan *tools* dan panas yang dihasilkan dari gesekan tersebut, akan tetapi kedua hal tersebut tidak sampai mengubah fase dari material yang dilas. Gesekan *tools* dan material tersebut menyebabkan panas dan panas tersebut bergantung pada kecepatan rotasi putaran *tools*, putaran *tools* yang maksimal menurut penelitian Hajian, dkk (2014) adalah 200 rpm. Peng, dkk (2020) juga mengemukakan pendapat serupa yang menilai perubahan ukuran butir atau *grain size* dari butir tersebut adalah karena ada parameter pengelasan yang ditambahkan maka akan mengubah struktur mikro dari material, sehingga jika dibandingkan struktur mikro pada material sebelum dan sesudah pengelasan maka akan terdapat perbedaan terutama perbedaan pada daerah *stir zone*. Proses pengelasan yang dilakukan memaksa material menerima panas, tekanan dan gesekan dari *tools* sehingga butir butir yang semula dalam

keadaan normal akan dipaksa oleh *tools* bergerak menjadi lebih rapat dan lebih kecil sehingga pada bagian *stir zone* ini sedikit mengalami perbedaan bentuk butir yang mana hal tersebut juga mempengaruhi terhadap kekerasan material yang dilakukan pengelasan *friction*, akan tetapi efek yang ditimbulkan tidak terlalu signifikan karena tidak sampai mengubah fase dari material tersebut.

Penggunaan *tools* dan mesin FSW pada setiap jurnal berbeda, akan tetapi untuk saran penggunaan mesin dan *tools* FSW terhadap PPNS sudah baik untuk keperluan pengajaran. Berikut adalah mesin yang dijelaskan spesifikasinya dijelaskan lengkap oleh Peng, dkk (2020) yaitu mesin FSW-LM-BM16, mesin tersebut adalah mesin yang besar dan digunakan dalam skala industri. Untuk contoh mesin yang lebih sederhana yaitu ada mesin FSW-TS-S08, adalah mesin skala medium yang tidak terlalu besar dan lebih mudah pengoperasiannya karena tidak terlalu banyak pilihan fitur yang ditawarkan jika dibandingkan dengan FSW-LM-BM16. Berikut adalah Gambar 4.20 mesin FSW-LM-BM16 dan Gambar 4.21 mesin FSW-TS-S08



Gambar 4.20 FSW-LM-BM16



Gambar 4. 21 FSW-TS-S08

Untuk penggunaan *tools* pada pengelasan FSW pada setiap jurnal juga menggunakan material yang berbeda akan tetapi Kumar, dkk pada tahun 2017 dan tahun 2019 menggunakan *tools* yang sama yaitu dengan menggunakan tungsten lanthanum oksida ($W=1\% \text{ La}_2 \text{ O}_3$). Penggunaan *tools* yang secara konstan digunakan pada tahun 2017 dan 2019 membuktikan bahwa *tools* yang digunakan ini memiliki kekuatan yang baik dan tidak mudah habis terkikis oleh material yang dilas. Oleh karena itu jika PPNS akan menggunakan proses pengelasan *friction* maka bisa mempertimbangkan menggunakan *tools* yang memiliki spesifikasi seperti yang tersebut diatas.

“Halaman sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan seluruh hasil *review* terhadap jurnal yang digunakan dalam topik pengaruh pengelasan *friction welding* pada material *austenite stainless steel* terhadap *mechanical properties* dan struktur mikro, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaplikasian pengelasan *friction* pada material *austenite stainless steel* 316L memiliki pengaruh terhadap nilai dari kekuatan tarik material. Didapatkan nilai kekuatan tarik yang semakin tinggi seiring dengan penambahan pada parameter kecepatan rotasi *tools*, kecepatan pengelasan dan derajat kemiringan *tools*. Nilai maksimum diperoleh pada kecepatan rotasi *tools* sebesar 600 rpm, kecepatan pengelasan sebesar 45 mm/min dan dengan derajat kemiringan *tools* sebesar 1.5°.
2. Pengaplikasian pengelasan *friction* pada material *austenite stainless steel* 316L memiliki pengaruh yang terhadap nilai kekerasan dari material. Peningkatan nilai kekerasan tersebut dipengaruhi oleh parameter pengelasan yang digunakan, yaitu kecepatan rotasi *tools*, kecepatan pengelasan dan derajat kemiringan *tools*. Dengan penambahan nilai parameter sebesar 200 rpm untuk kecepatan rotasi *tools*, 63 mm/min untuk kecepatan pengelasan dan derajat kemiringan sebesar 3° mengakibatkan terjadinya perbaikan butir-butir pada material pengelasan. Sehingga menghasilkan nilai kekerasan maksimum material.
3. Pengaplikasian pengelasan *friction* pada material *austenite stainless steel* 316L memiliki pengaruh pada struktur mikro. Pengaruh yang paling terlihat adalah perubahan pada LAB dan HAB yang ada pada material sebelum dan sesudah pengelasan *friction*. Perubahan pada LAB dan HAB tersebut terjadi dikarenakan adanya perubahan nilai pada parameter pengelasan yang digunakan. Perubahan parameter tersebut mengakibatkan material mengalami perbaikan butir-butir dan menjadikan

struktur mikro dari material menjadi lebih halus. Halusnya butir-butir material tersebut juga mempengaruhi nilai kekuatan tarik dan kekerasan.

DAFTAR PUSTAKA

- AWS. (2004). C6-1-89 Friction Stir Welding. USA: American Welding Society.
- AWS D1.1. (2004). *Welding Handbook Vol 2 Welding Process, Part 1*. USA: American Welding Society.
- BOC Group. (2009). *Fundamentals of Flame Straightening*. Manchester: BOC Publishing.
- ESAB. (2019). Technical Handbook Friction Stir Welding. Swedia: LAXA.
- FSW-Tech. (2017). Friction Stir Welding Handbook. European: Erasmus +.
- Hajian, dkk. (2014) Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Processed AISI 316L Stainless Steel. India.
- Husodo, dkk. (2012). Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) Dalam Proses Penyambungan Dua Buah Pipa Logam Baja Karbon Rendah. Surabaya: Institute Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kumar, dkk (2017). Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AISI 316L Austenite Stainless Steel Joints. India.
- Kumar, dkk. (2019). Effect of Tool Tilt Angle on Weld Joint Properties of Friction Stir Welded AISI 316L Stainless Steel Sheets. India.
- Ma'arif, Syamsul M. (2017). Teknologi Terkini Friction Stir Welding Untuk Aplikasi di Dunia Penerbangan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Peng, dkk. (2020). Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Processed AISI 316L Steel Produced by Selective Laser Melting. China.
- Smullin, dkk. (2020). Hardness Testing Systems and Related Methods. United States.