

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian terhadap *Friction Stir Welding* telah banyak dilakukan. FSW adalah salah satu metode atau teknik pengelasan *solid state* dimana sambungan las terbentuk tanpa penambahan logam pengisi (*filler metal*). Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dapat disampaikan sebagai berikut :

Wijayanto dkk (2011) melakukan penelitian tentang *Friction Stir Welding* pada aluminium seri 6061 dan seri 2024 dengan tebal plat masing-masing 3 mm. Variasi yang digunakan adalah kecepatan putar tool 1500 rpm dengan *feed rate* 50, 100, dan 150 mm/min dan jenis tool yang digunakan adalah baja EMS 45 dengan panjang 100 mm, diameter pin tool 3 mm, panjang pin tool 3 mm, dan diameter shoulder 20 mm. Adapun hasil penelitian tersebut diperoleh, untuk pengujian kekerasan terjadi penurunan nilai kekerasan pada daerah logam las terhadap material induknya. Nilai kekerasan raw material Al 6061 adalah ± 105 VHN dan Al 2024 adalah 316 VHN dan pada pusat las (*stirred welding*) yaitu ± 99 VHN. Sedangkan nilai tegangan tarik tertinggi adalah pada variabel *feed rate* 50 mm/min pada putaran tool 1500 rpm yaitu $109,4 \text{ kg/mm}^2$. Nilai tegangan tarik terendah terjadi pada variabel *feed rate* 150 mm/min yaitu $94,5 \text{ kg/mm}^2$, hal ini disebabkan oleh masukan panas yang rendah ketika *feed rate* pada proses pengelasan meningkat.

Riswanda dan Ilman (2011) melakukan penelitian tentang pengaruh variasi putaran terhadap struktur mikro dan sifat mekanik sambungan las tak sejenis paduan aluminium seri 5083 dan 6061-T6 pada proses las FSW. Variasi putaran pada proses las ini antara lain 1200, 1400, dan 1600 rpm. Pengujian yang dilakukan meliputi pengamatan visual, foto mikro, kekerasan dan uji tarik. Adapun hasil penelitian tersebut diperoleh bahwa bentuk struktur mikro secara umum berubah sehingga mempengaruhi sifat mekanik. Pada putaran 1400 rpm menunjukkan hasil lasan yang paling halus (*smooth*) dibandingkan dengan parameter putaran lainnya. Pada pengujian kekerasan didapat nilai rata-rata

kekerasas tertinggi pada daerah nugget terjadi pada parameter putaran 1400 rpm yaitu 47,98 kg/mm², sedangkan rata-rata kekerasan terendah terdapat pada spesimen putaran 1600 rpm yaitu 45,52 kg/mm². Untuk pengujian tarik nilai kekuatan tarik tertinggi ada pada parameter putaran 1600 rpm yaitu 151 MPa, sedangkan kekuatan tarik terendah pada parameter putaran 1200 rpm yaitu 138 MPa. Kekuatan tarik maksimal terdapat pada putaran 1600 rpm, kekuatan tarik menurun seiring dengan menurunnya kecepatan putar *tool*.

Nugroho (2016) melakukan penelitian pengelasan FSW menggunakan aluminium dengan kuningan. Material yang digunakan adalah plat aluminium dan plat kuningan dengan ukuran masing-masing material 100 mm x 60 mm dengan tebal 2,7 mm. Kecepatan putar *tool* 1550 rpm dengan *feed rate* 20 mm/min dibuat konstan. Variasi yang digunakan adalah penambahan panas selama pengelasan sehingga suhu geseknya mencapai 300°C dan perlakuan panas *Artificial aging* setelah pengelasan dengan suhu 150°C selama 3,5 jam. Dari hasil penelitian didapatkan hasil sebagai berikut, pada pengujian kekerasan didapatkan nilai kekerasan tertinggi pada pengelasan dengan penambahan panas yaitu 278,4 VHN, sedangkan nilai terendah pada pengelasan dengan perlakuan panas *Artificial Aging* sebesar 237,7 VHN. Pada pengujian tarik didapatkan nilai tertinggi pada spesimen pengelasan gabungan perlakuan panas keduanya yaitu penambahan panas dan perlakuan *Artificial Aging* dengan nilai 50,91 MPa, sedangkan nilai uji tarik terendah pada pengelasan tanpa perlakuan panas dengan nilai 12,69 MPa.

Dari beberapa penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa pengelasan dengan metode *friction stir welding* terdapat parameter yang mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik dari hasil sambungan las tak sejenis (*dissimilar joint*). Parameter tersebut adalah kecepatan putar *tool*, kecepatan pengelasan (*feed rate*) ataupun perlakuan terhadap proses pengelasan seperti penambahan panas selama proses pengelasan. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian dengan parameter lainnya dalam pengelasan FSW, salah satunya dengan menggunakan parameter pengaruh bentuk *pin tool* pada pengelasan FSW *dissimilar* aluminium berbeda jenis yang belum banyak dilakukan.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Pengelasan

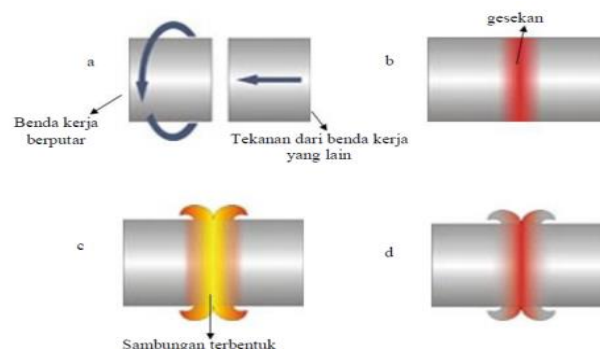
Pengelasan adalah proses penyambungan logam secara metalurgi dengan memanfaatkan beberapa jenis sumber panas sebagai media penyambungan. Pengelasan dapat diartikan sebagai proses penyambungan yang menghasilkan penggabungan antara dua material dengan cara memanaskannya hingga *temperature* pengelasan, dengan atau tanpa adanya tekanan atau hanya menggunakan tekanan dan dengan atau tanpa menggunakan logam pengisi. Dalam perkembangan dunia konstruksi metode pengelasan telah dipergunakan lebih dari 40 jenis pengelasan termasuk pengelasan yang dilakukan dengan cara menekan dua logam yang disambung sehingga terjadi ikatan antara atom-atom molekul dari logam yang disambungkan. Aplikasi penggunaan teknik pengelasan dalam konstruksi cukup luas meliputi jembatan, rangka baja, pipa saluran, bejana tekan, perkapalan dan sebagainya.

2.2.2. Jenis Pengelasan secara *Solid State Welding* (SSW)

Metode pengelasan secara SSW pada *friction stir welding* dibagi menjadi tiga jenis pengelasan gesek, yaitu:

1. *Friction continuous drive welding*

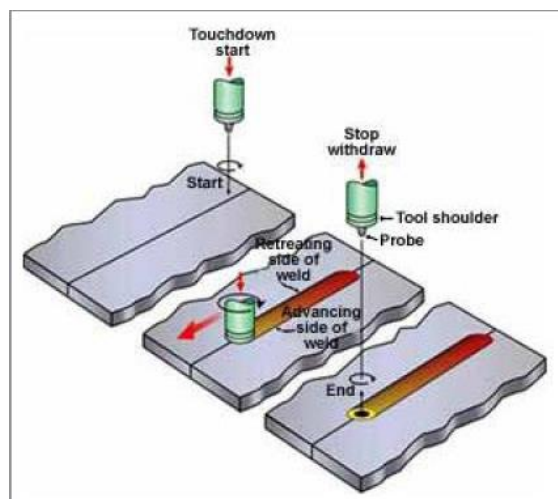
Continuous drive friction welding adalah proses pengelasan gesek yang mendapatkan energi panas untuk penyambungan dengan memberi putaran pada salah satu benda kerja dan memberikan tekanan pada benda kerja yang lain. Benda kerja diputar dengan kecepatan konstan atau bervariasi dan benda kerja yang lain diberi gaya tekan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Prinsip *Continuous Drive Friction Welding* (Sudrajat,2012)

2. Friction Stir Welding.

FSW adalah proses pengelasan yang memanfaatkan putaran dari tool yang bergesek terhadap dua buah lempengan logam yang akan disambung. Pengelasan ini biasanya digunakan pada plat-plat logam. Plat yang akan disambung diletakkan berjejer dan di cekam, kemudian *tool* yang berputar digerakan secara kontinyu dan dengan gerakan aksial yang konstan. Prinsip dasar dari proses pengelasan FSW sangat sederhana yaitu dengan menggunakan sebuah *tool* yang terdiri dari *pin* dan *shoulder* yang diputar pada kecepatan putaran tertentu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. *Tool* tersebut kemudian melakukan penetrasi pada 2 buah ujung pelat atau lembaran logam yang akan disambung. Setelah penetrasi pada tingkat kedalaman tertentu, *tool* akan bergerak sepanjang garis sambungan antara logam yang disambung.

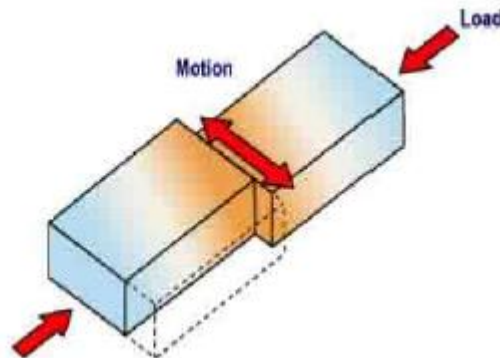


Gambar 2.2 Prinsip *Friction Stir Welding* (Endartyana,2013)

Dalam pengelasan FSW, *tool* memiliki 2 peranan utama yaitu memanaskan logam induk yang disambung dan menggerakkan material untuk menghasilkan sambungan. Panas yang dihasilkan pada pengelasan FSW tercipta akibat adanya gesekan antara *tool* FSW dan benda kerja. Panas lokal yang terjadi mengakibatkan adanya pelunakan logam induk bagian adukan *tool*. Kombinasi putaran dan translasi *tool* FSW memungkinkan material bergerak dari sisi depan *pin* hingga sisi belakang *pin*.

3. *Friction Linier Welding*.

Friction Linier Welding adalah proses pengelasan gesek yang mendapat panas dari gesekan linier dari salah satu benda kerja dan benda kerja yang lain diberi tekanan secara konstan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Prinsip *Friction Linier Welding* (www.weldguru.com)

2.2.3. Pengertian *Friction Stir Welding*

Friction stir welding (FSW) adalah suatu teknologi pengelasan yang merupakan proses *solid state joining* yang bisa digunakan untuk menyambungkan material berbeda. Pada proses FSW, material yang dilas tidak benar-benar mencair pada saat proses berlangsung (temperatur kerjanya tidak melewati titik lebur benda kerja) sehingga FSW termasuk *unconsumable solid state joining process* (Thomas dkk, 1991).

Metode pengelasan FSW adalah pengelasan yang relative baru. FSW ditemukan dan dikembangkan oleh W.Thomas dan rekan-rekannya dari The Welding Institute (TWI) dan mendapatkan hak paten pertama pada desember 1991 di UK. Metode pengelasan ini sebetulnya berawal dari keingintahuan dan percobaan laboratorium, tetapi dalam perkembangannya FSW menjadi teknik pengelasan yang banyak sekali memberikan manfaat terutama untuk penyambungan logam aluminium. Masalah-masalah yang sering timbul dalam proses pengelasan FSW adalah sering terjadinya cacat pada daerah stir zone.

Cacat-cacat tersebut antara lain ialah *incomplete penetration*, *void* dan *flash/ripplesh*.

1. *Incomplete Penetration*

Cacat yang disebabkan karena proses pengelasan yang terlalu dingin mengakibatkan material tidak meleleh dan menyatu dengan sempurna sehingga terbentuk celah atau lubang pada daerah lasan.

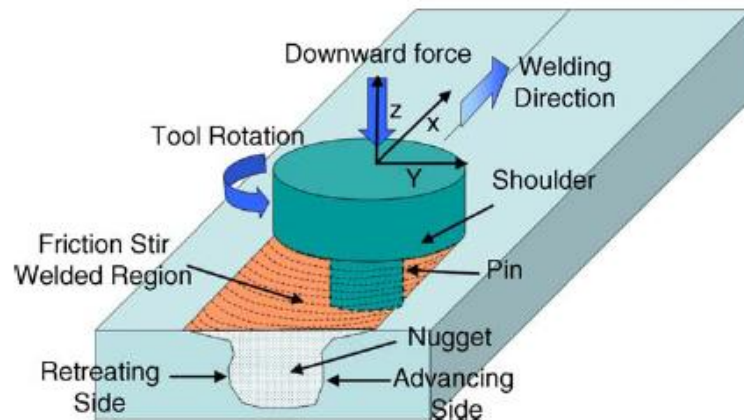
2. *Flash/Ripples*

Material yang terkelupas atau keluar kepermukaan dari sisi *advancing* dan sisi *retreating* akibat penekanan/penetrasi dari *welding tool* yang terlalu dalam serta pergerakan maju dan gerak berputar dari *welding tool* terhadap *welding direction*

3. *Void*

Cacat rongga yang terjadi karena kurangnya tekanan *welding tool* terhadap material benda kerja dan mengakibatkan *friction heat* yang dihasilkan dari gesekan antara *welding tool* dengan material benda kerja tidak mampu melelehkan material dengan sempurna.

FSW merupakan salah satu metode atau teknik pengelasan gesek dimana sambungan las terbentuk tanpa penambahan logam pengisi (*filler metal*). Panas yang digunakan untuk mencairkan benda kerja dihasilkan dari gesekan antara benda kerja yang diam dengan *tool* yang berputar. *Tool* berputar dengan kecepatan konstan disentuh ke material benda kerja yang dicekam dengan putaran *tool* berlawanan arah jarum jam dan bertranslasi dari sisi *advancing* ke sisi *retreating*. Pada sisi *advancing* vektor kecepatan aliran logam cair searah dengan sambungan las. Sedangkan pada sisi *retreating* vektor kecepatan aliran logam cair berlawanan arah dengan sambungan las (Mishra, 2005).



Gambar 2.4 Skema FSW (Mishra, 2005)

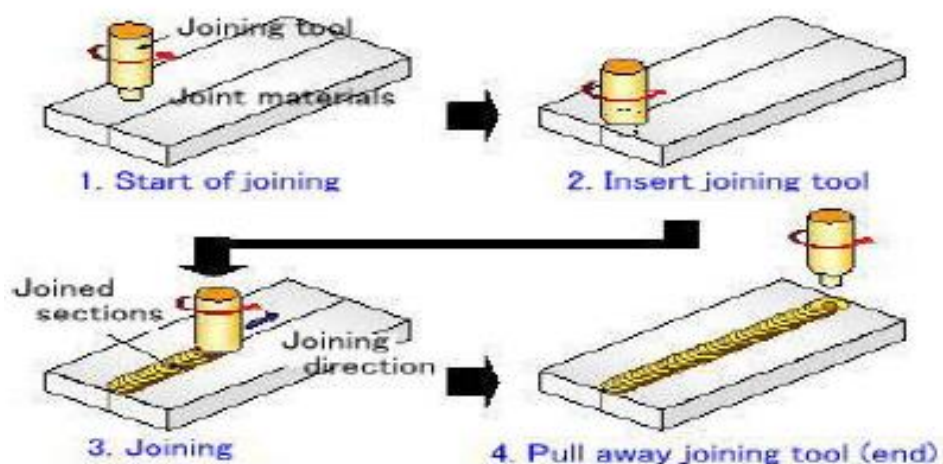
Menurut Mishra dkk, (2014) terdapat beberapa istilah dalam pengelasan dengan metode *friction stir welding*. sebagai berikut:

1. Tool shoulder adalah bagian tool yang bersentuhan dengan permukaan benda kerja.
2. Tool pin yaitu bagian tool yang masuk ke dalam benda kerja dan berpengaruh terhadap aliran material baik horizontal maupun vertikal.
3. Retreating side area adalah sisi dimana arah putaran tool (kecepatan tangensial) berlawanan arah dengan sambungan las (welding direction). Aliran material pada sisi ini lebih mudah mengalir karena permukaan pin yang membantu mengalirkan ke belakang arah sambungan las.
4. Advancing side area yaitu sisi dimana arah putaran tool (kecepatan tangensial) searah dengan sambungan las (welding direction). Karena tool bergerak ke depan, material benda kerja akan mengalir ke belakang. Tetapi putaran pada pin tool memiliki arah yang berlawanan dengan aliran pada sisi ini.
5. Tool rotational rate merupakan kecepatan putaran pada tool dan berkontribusi besar pada input panas dan aliran material.

2.2.3.1. Prinsip Kerja *Friction Stir Welding*

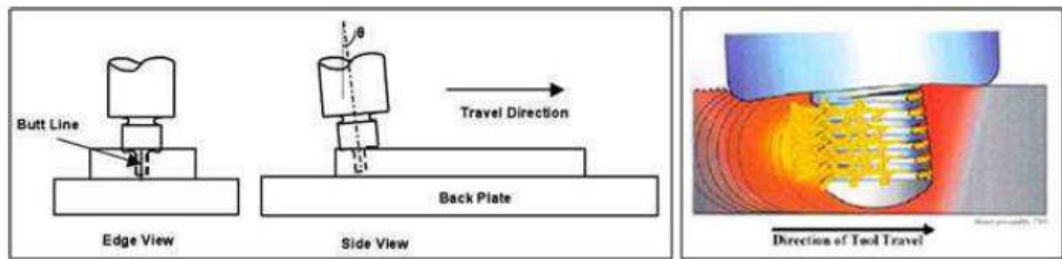
Dalam proses kerja FSW, *tool* pengelasan dengan atau tanpa profil yang terpasang pada *probe* berputar dan bergerak dengan kecepatan konstan sepanjang jalur sambungan antara dua material yang di las. Benda kerja harus dicekam dengan kuat pada ragum untuk mempertahankan posisi akibat gaya yang terjadi pada waktu proses pengelasan. Panjang *pin tool* harus lebih pendek dari pada tebal benda kerja dan *shoulder* dari *tool* harus bersentuhan dengan permukaan benda kerja yang sedang dilas.

Gesekan yang terjadi antara *pin* dan *shoulder* dari *welding tool* dengan material benda kerja menghasilkan gesekan panas (*friction heat*). Gesekan panas ini bersama dengan panas yang dihasilkan dari proses pengadukan mekanik (*mechanical mixing*) akan menyebabkan material yang diaduk akan melunak tanpa melewati titik leburnya (*melting point*), sehingga *welding tool* pengelasan memungkinkan untuk bisa bergerak sepanjang jalur las. Ketika *pin welding tool* bergerak sepanjang jalur las, permukaan depan *pin* akan memberikan gaya dorong plastis terhadap material ke arah belakang *pin* sambil memberikan gaya tempa yang kuat untuk mengkonsolidasikan logam las.



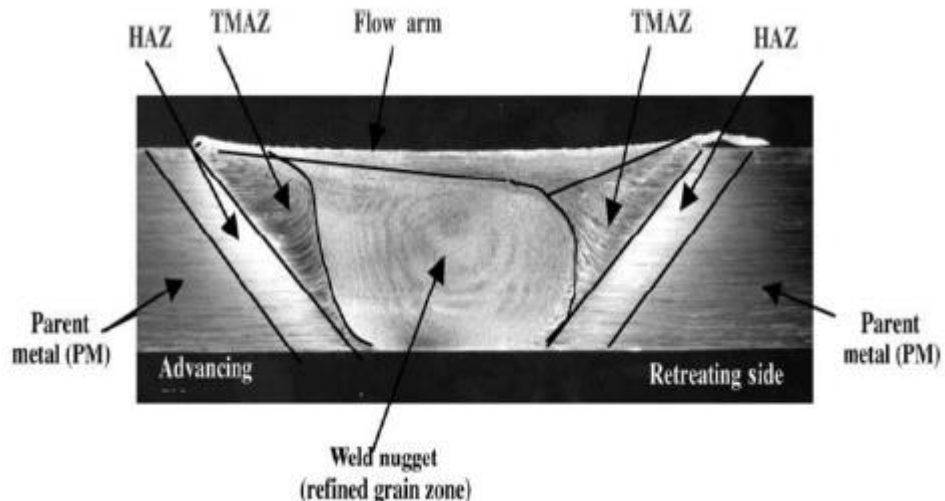
Gambar 2.5 Proses *Friction Stir Welding* (Tarmizi, 2016)

Benda kerja yang akan dilas harus dicekam dengan kuat dan ditempatkan diatas *backing* pelat sehingga beban yang diberikan pada *tool* dan diteruskan ke benda kerja tidak menyebabkan bagian bawah plat yang dilas terdeformasi.



Gambar 2.6 Skema Kerja FSW (Polmear, 1995)

Panas yang terjadi akibat gesekan membuat material yang ada disekitar *pin tool* menjadi melunak dan material yang ada di depan *pin tool* bergerak ke arah belakang *pin tool* karena adanya gerak rotasi dan translasi dari *welding tool*. Hal ini terjadi terus menerus selama gerakan translasi berlangsung dan menghasilkan sambungan yang diinginkan. Gesekan antara benda kerja dengan *welding tool* tersebut menimbulkan panas sampai $\pm 80\%$ dari titik lebur material kerja dan selanjutnya *welding tool* ditekan dan ditarik searah daerah yang akan di las.



Gambar 2.7 Heat Zone pada FSW (Tarmizi dkk, 2016)

Akibat adanya panas yang terjadi, maka terjadi perubahan struktur mikro pada area yang di las, dan dapat dibagi menjadi 5 zona yaitu (Gambar 2.6):

1. *Base metal/Parent metal (PM)*, merupakan bagian dari material benda kerja yang tidak terkena pengaruh panas yang dihasilkan selama proses FSW berlangsung.

2. *Heat-Affected Zone* (HAZ), merupakan area yang paling dekat dengan lokasi pengelasan, material pada area ini sudah mengalami siklus *thermal* yang menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dari *base* material, tetapi pada area ini tidak terjadi deformasi plastis akibat proses pengelasan.
3. *Thermo Mechanically Affected Zone* (TMAZ), pada area ini *welding tool* mendeformasi material secara plastis dan tentunya panas yang dihasilkan pada saat proses pengelasan juga membawa pengaruh terhadap material. Pada material aluminium panas tersebut memungkinkan untuk menghasilkan regangan plastis tanpa adanya proses rekristalisasi, dan biasanya ada batas yang jelas yang membedakan antara area rekristalisasi (*weld nugget*) dan area TMAZ yang terdeformasi.
4. *Weld Nugget*, merupakan daerah yang secara utuh mengalami rekristalisasi atau terkadang daerah yang disebut juga dengan *stir zone*. Daerah ini merupakan daerah yang menghasilkan sambungan akibat gerakan *tool* (Thomas dkk, 2006).
5. *Flow Arm Zone*, adalah area yang terseret adukan oleh *shoulder* yang menjadi batas pengelasan dari FSW.

2.2.4. Siklus Proses *Friction Stir Welding*

Siklus dari proses *friction stir welding* dapat dibagi menjadi beberapa langkah dimana pada masing-masing langkah memiliki aliran panas dan *thermal profile* yang berbeda, siklus-siklus tersebut adalah (arifin dkk, 2007):

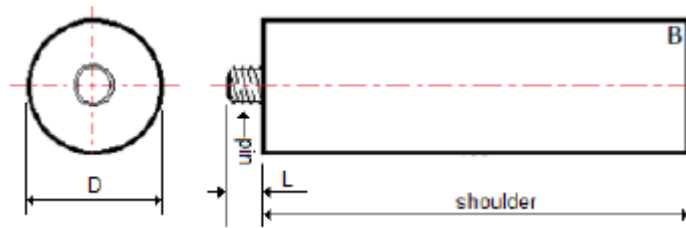
1. *Dwell Time*, pada langkah proses pemanasan awal dilakukan pada benda kerja dengan cara membiarkan *welding tool* berputar tanpa gerakan translasi (*stationery*). Pada langkah ini material benda kerja yang ada dibawah *welding tool* dipanaskan hingga benar-benar melunak dan *welding tool* siap bergerak translasi sepanjang jalur pengelasan. Biasanya pada langkah ini juga dilakukan proses penekanan *pin tool* dimulai.

2. *Transient Heating*, dimana pada saat *welding tool* mulai bergerak translasi biasanya ada saat pemanasan sementara dimana pada saat itu panas yang diciptakan dan suhu pada saat sekitar *welding tool* menjadi tidak stabil dan bergerak hingga menjadi *steady-state* pada saat *welding tool* sudah mulai bergerak.
3. *Pseudo Steady-State*, walaupun pada saat proses berlangsung terjadi fluktuasi suhu pada daerah sekitar *welding tool* tetapi secara *thermal* pada daerah tersebut sudah konstan paling tidak secara mikrostruktur.
4. *Post Steady-State*, pada saat menjelang akhir dari proses pengelasan, panas akan meningkat pada sekitar *welding tool*.

2.2.5. Parameter Pengelasan *Friction Stir Welding*

Pada proses pengelasan FSW parameter yang menentukan kualitas hasil lasan adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan putar *welding tool* (rpm), adalah kecepatan putar *probe* per menit. Kecepatan putar *welding tool* yang tinggi dapat meningkatkan *strain rate* dan dapat mempengaruhi proses rekristalisasi. Putaran yang tinggi menghasilkan *temperature* yang tinggi dan tingkat pendinginan yang lambat.
2. Kecepatan pengelasan (mm/s), memiliki peran yang penting dalam menghasilkan sambungan las yang baik. Dengan kecepatan pengelasan yang rendah akan menghasilkan sambungan dengan kuat tarik yang tinggi. Tetapi jika kecepatan pengelasan terlalu tinggi dari batas yang ditentukan maka akan timbul banyak cacat di sepanjang jalur lasan.
3. Gaya aksial (KN), tekanan *welding tool* adalah gaya tekan *welding tool* ke dalam benda kerja. Pada tugas akhir ini, gaya tekan ini digantikan dengan *shoulder depth plung* (mm) karena pengukuran gaya aksial sulit dilakukan dalam penelitian ini.
4. Geometri *welding tool*
Geometri *welding tool* dapat dilihat pada (Gambar 2.7):



Gambar 2.8 geometri *welding tool* (Tarmizi & Prayoga, 2016)

- a. D/d ratio of tool
- b. Pin length (mm)
- c. Tool Shoulder diameter, D (mm)
- d. Pin diameter, d (mm)
- e. Tool inclined angel (degrees)

2.2.6. Desain *Welding Tool*

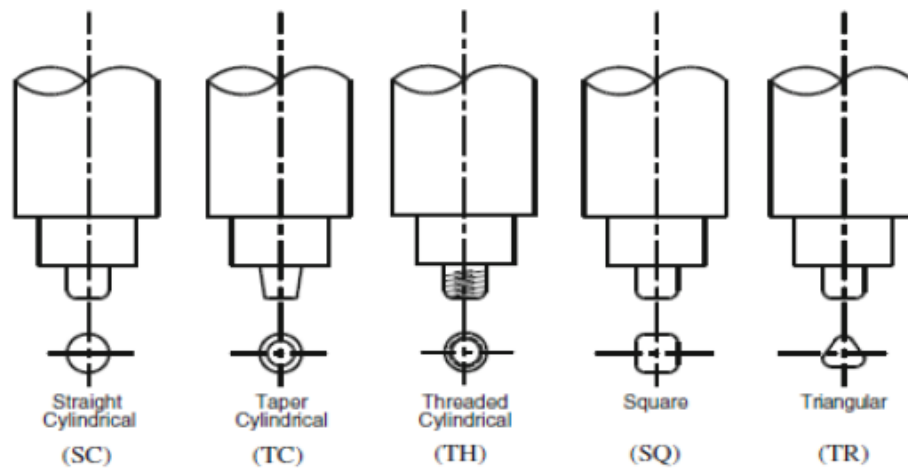
Desain *welding tool* adalah salah satu faktor penting yang mempengaruhi struktur mikro, profil, sifat mekanik dan kualitas hasil sambungan las. Material *welding tool* merupakan faktor yang menentukan akan koefisien gesek, pembangkitan panas dan kehandalan *welding tool*. Oleh karena itu desain *welding tool* merupakan hal yang sangat penting dari FSW.

Hal pertama yang harus diperhatikan dalam merancang *welding tool* yang akan digunakan adalah pemilihan material yang tepat, beberapa karakter material yang harus dipenuhi oleh sebuah *welding tool* adalah:

1. Memiliki kekuatan yang baik di suhu ruangan dan di suhu tinggi.
2. Stabilitas material tetap terjaga pada suhu tinggi.
3. Material yang digunakan tidak bereaksi dengan benda kerja.
4. Tahan gesek dan aus.
5. *Thermal expansion* rendah.
6. Memiliki ketangguhan yang baik.
7. Homogen secara *microstructure* dan massa jenis.
8. Tersedia luas di pasaran.

Hal yang kedua adalah bentuk *pin* dan *shoulder* dari *welding tool*, dua bagian utama ini yang akan menentukan hasil dari sambungan las dalam FSW, seperti berikut:

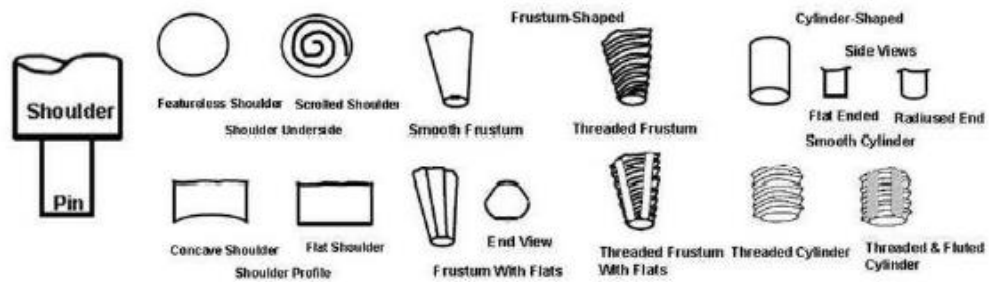
1. *Pin/Nib/Probe* (Gambar 2.8) adalah bagian yang melakukan penetrasi ke dalam benda kerja, dimana bagian dari *welding tool* ini adalah bagian yang mengaduk material atau mengalirkan material yang sudah melunak akibat panas yang dihasilkan dari *shoulder*, sehingga dapat menciptakan suatu sambungan antara dua material.



Gambar 2.9 contoh desain *pin* pada *welding tool* FSW (Elangovan & Balasubramanian, 2007)

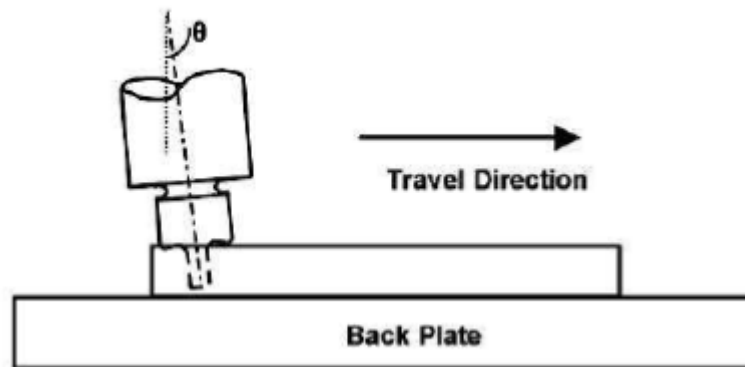
Selanjutnya ukuran dari *tool*, diameter *shoulder*, diameter *pin*, panjang *pin* dan panjang *welding tool* secara keseluruhan diatur sesuai dengan proses yang diinginkan yaitu ketebalan benda kerja, kemiringan *tool* pada saat proses pengelasan, kekuatan sambungan dan *clearance* antar benda kerja.

2. *Shoulder* adalah bagian yang membangun panas dengan gesekan yang dilakukannya terhadap benda kerja, bagian ini juga yang menjadi penahan material panas yang ada dibawahnya. Disamping itu bagian ini pun yang memberi gaya vertikal ke arah benda kerja yang menjaga kondisi kontak *tool* dengan benda kerja. Desain *tool* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.10 Konfigurasi desain *welding tool* FSW (Thomas dkk, 1991)

2.2.7. *Depth Of Weld dan Kemiringan Tool*

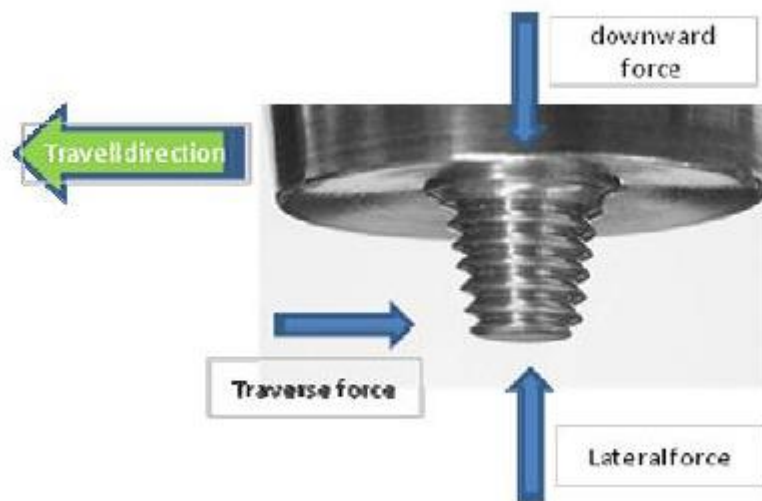


Gambar 2.11 Skema *stir welding* (Polmear, 1995)

Depth of weld dapat diartikan sebagai kedalaman titik terendah *welding tool shoulder* yang menembus benda kerja sedangkan kemiringan *welding tool* adalah besarnya sudut yang dibuat antara sumbu *welding tool* dengan permukaan benda kerja yang harus diperhatikan karena akan sangat mempengaruhi hasil lasan dari metode FSW. Kemiringan yang dibuat adalah adalah $2-4^{\circ}$ dimana bagian *shoulder* lebih rendah dibandingkan dengan bagian depannya (Gambar 2.11).

2.2.8. *Gaya pada Friction Stir Welding*

Pada saat proses pengelasan dengan metode FSW dilakukan, terdapat gaya-gaya yang bekerja pada *welding tool* seperti ditunjukkan pada (Gambar 2.12)



Gambar 2.12 Gaya-Gaya pada Pengelasan FSW (Rahayu, 2012)

1. *Downward force*, adalah gaya utama yang dipakai untuk mempertahankan posisi *welding tool* dengan benda kerja sehingga tingkat penetrasi dan panas yang dihasilkan tetap terjaga selama proses berlangsung.
2. *Traverse force*, merupakan gaya yang sejajar dengan arah pergerakan *welding tool*. Peningkatan gaya *transversal* merupakan wujud resistansi material benda kerja terhadap pergerakan *welding tool* dan sejalan dengan proses gaya ini akan berkurang sejalan dengan naiknya temperatur kerja.
3. *Lateral force*, yaitu gaya yang bekerja tegak lurus dengan arah dari pergerakan *welding tool* dan hal ini terjadi karena adanya kemiringan dari *welding tool*.
4. *Torque*, diburuhkan untuk memutar *welding tool*, besarnya tergantung dari *downward force* dan nilai koefisien gesek atau *flow strength* dari material benda kerja.

2.3. Keuntungan dan Aplikasi *Friction Stir Welding*

Beberapa hal yang menjadi pertimbangan dalam pemilihan pengelasan dengan metode FSW antara lain:

1. Ramah lingkungan.
2. Tidak memerlukan busur las untuk pengelasan.
3. Tidak memerlukan *filler metal* atau bahan pengisi.
4. Tidak terjadi pelelehan selama pengelasan.
5. Tidak memerlukan gas pelindung (*shielding gas*).
6. Bisa mengelas semua jenis Aluminium *alloys*.

Friction Stir Welding bisa digunakan untuk menyambung material aluminium (*casting* maupun *alloy*) baik satu atau berbeda *series*, baja, tembaga, titanium, magnesium *alloy*, logam paduan dan komposit matrik logam (Thomas dkk, 2006). FSW dapat digunakan untuk menghasilkan sambungan *butt*, sudut, bertumpuk (*lap*), T, *spot*, dan *fillet* serta dapat digunakan pula untuk menyambung benda berongga, seperti tangki, tabung dan pipa berkontur 3 dimensi. Selain untuk membuat sambungan las, FSW juga cocok digunakan untuk memperbaiki sambungan yang sudah ada.

2.4. Aluminium

Aluminium adalah jenis logam *Non-Ferrous* yang mempunyai kelebihan tertentu dibandingkan logam lain yang dipergunakan dalam dunia industri seperti mempunyai ketahanan korosi yang baik dan penghantar listrik yang baik. Selain itu aluminium juga memiliki sifat mampu bentuk (*wrought alloy*) dimana paduan aluminium ini dapat dikerjakan atau diproses baik dalam pengerjaan dingin maupun pengerjaan panas. Banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan kekuatan mekanik aluminium, diantaranya dengan penambahan unsur-unsur seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dan sebagainya, baik dicampur secara satu persatu maupun secara bersama-sama. Paduan aluminium dapat di kelompokkan menjadi beberapa kelompok utama, antara lain:

1. Paduan aluminium cor (*aluminium casting alloy*)

Paduan ini diciptakan untuk menghasilkan bentuk benda yang diharapkan didapat dari logam cair yang dituang pada cetakan dengan bentuk yang diharapkan dan dibiarkan membeku (*freeze*), sehingga produk yang dihasilkan mendekati bentuk asli untuk kemudian dilakukan *finishing*.

2. Paduan aluminium tempa (aluminium *Wrought alloy*)

Pada paduan ini aluminium dibuat menjadi benda kerja berbentuk seperti plat, lembaran, ataupun kawat dengan proses forming.

3. Paduan aluminium yang dapat diberi perlakuan panas (*Heat Treatable-Aluminium Alloy*)

Pada paduan ini aluminium ditambahkan beberapa unsur-unsur yang bertujuan meningkatkan kekuatan mekaniknya, unsur yang ditambahkan biasanya *copper* (seri 2xxx), magnesium dan silikon (seri 6xxx) dan *zinc* (seri 7xxx). Pada proses heat treatable material dipanaskan hingga 900-1050°F tergantung dari paduannya. Kekuatan mekanik paduan aluminium tergantung pada proses pemanasan, *quenching*, dan *artificial aging*.

4. Paduan aluminium yang tidak diberi diperlakukan panas (*Non Heat-Treatable aluminium alloy*)

Pada paduan ini aluminium ditambahkan beberapa unsur-unsur yang bertujuan meningkatkan kekuatan mekanik paduan aluminium dan aluminium murni (seri 1xxx), unsur yang ditambahkan pada paduan jenis ini adalah mangan (seri 3xxx), silikon (seri 4xxx) dan magnesium (seri 5xxx). Untuk meningkatkan kekuatan mekanik dari paduan aluminium ini dilakukan dengan proses memvariasikan suhu dari *cold working* (pendinginan) atau *strain hardening*.

2.4.1. Sifat Aluminium

Aluminium memiliki warna seperti putih kebiru-biruan, lebih keras dari timah putih namun lebih lunak dari pada seng. Kekuatan tarik aluminium adalah 10 kg/mm, penambahan unsur paduan ditunjukkan untuk memperbaiki sifat mekanis dari aluminium. Berikut adalah sifat-sifat yang dimiliki aluminium, yaitu:

1. Ringan

Aluminium merupakan jenis logam yang sangat ringan, berat jenisnya sekitar 2720 kg/m, sehingga aluminium banyak dipergunakan dalam pembuatan alat-alat dan benda-benda yang

membutuhkan berat ringan namun memiliki kekuatan yang baik seperti bodi mobil, pesawat, dan rangka konstruksi berkekuatan sedang.

2. Tahan karat

Aluminium merupakan salah satu logam yang memiliki daya tahan karat terhadap korosi yang cukup baik, berbeda dengan beberapa logam lain yang mengalami pengikisan jika terkena oksigen, air atau bahan kimia lainnya. Namun reaksi kimia dapat menyebabkan korosi pada logam tersebut.

3. Penghantar listrik yang baik

Aluminium memiliki daya hantar listrik yang cukup baik yaitu kurang lebih 65% dari daya hantar tembaga. Disamping itu aluminium lebih liat sehingga lebih mudah diulur menjadi kawat.

2.4.2. Unsur-Unsur Paduan Aluminium

1. Besi (Fe) : untuk mengurangi terjadinya keretakan panas pada material aluminium dapat dilakukan penambahan unsur besi didalamnya.
2. *Manganase* (Mn) : unsur mangan yang ditambahkan pada material aluminium dapat memperbaiki *ductility* pada logam tersebut.
3. *Silicon* (Si) : unsur *silicon* yang ditambahkan pada material aluminium akan membuat aluminium tahan terhadap karat, akan tetapi sulit *dimachining*.
4. *Copper* (Cu) : unsur *copper* yang ditambahkan dapat membuat material aluminium mudah untuk *dimachining*.
5. *Magnesium* (Mg) : unsur magnesium yang ditambahkan akan memperbaiki sifat kekuatan material aluminium, tetapi menjadi sulit ketika proses pekerjaan penuangan.
6. *Zinc* (Zn) : unsur seng yang ditambahkan pada material aluminium akan memperbaiki sifat tahan terhadap korosi dan mengurangi terjadinya keretakan panas dan pengerutan.

2.4.3. Karakterisasi Paduan Aluminium

Logam aluminium perlu digolongkan berdasarkan komposisi kimia, untuk itulah perlu adanya standarisasi material aluminium. Berdasarkan proses pembuatannya aluminium paduan dibagi menjadi : Paduan Cor (Cast Alloys), dan Paduan Tempa (Wrought Alloys). Menurut American National Standard Institute (ANSI) pengelompokan klasifikasi paduan cor dan paduan tempa dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi aluminium paduan berdasarkan cara pembuatannya menurut (American National Standard Institute (ANSI))

Wrought Alloys	Alloys Number	Casting Alloys	Alloys Number
Aluminium 99.9% (minimum and greater)	1 XXX	Aluminium 99.9% (minimum and greater)	1 XXX
Alloys grouped by alloying elements :		Alloys grouped by alloying elements :	
Cooper	2 xxx	Cooper	2 xxx
Manganese	3 xxx	Si with Cu and Mg	3 xxx
Silicon	4 xxx	Silicon	4 xxx
Magnesium	5 xxx	Magnesium	5 xxx
Magnesium and Silicon	6 xxx	Zinc	7 xxx
Zinc	7 xxx	Ti	8 xxx
Other Element	8 xxx	Other Element	9 XXX
Unused Element	9 XXX	Unused Element	6 xxx

Pengkodean aluminium berdasarkan International Alloy Designation System adalah sebagai berikut :

- a) Seri 1xxx merupakan merupakan aluminium murni dengan kandungan minimum 99% aluminium berdasarkan beratnya. Pengaplikasian aluminium jenis ini adalah untuk tangki dan peralatan dapur. Pengaplikasian aluminium jenis ini adalah untuk tangki dan peralatan dapur.
- b) Tembaga adalah unsur paduan utama dalam paduan seri 2xxx atau dengan magnesium sebagai tambahan sekunder. Paduan ini memerlukan

perlakuan panas untuk mendapatkan sifat yang optimal. Paduan aluminium seri 2xxx tidak memiliki ketahanan korosi yang baik seperti kebanyakan aluminium seri lainnya, dan dalam kondisi tertentu mungkin mengalami korosi intergranular. Oleh karena itu, paduan ini dalam bentuk lembaran biasanya dibalut dengan aluminium kemurnian tinggi, paduan magnesium-silikon dari seri 6xxx, atau paduan yang mengandung 1% Zn. Pelapisan, biasanya dari 2 hingga 5% dari ketebalan total pada setiap sisi, memberikan perlindungan galvanik dari bahan inti dan dengan demikian sangat meningkatkan ketahanan terhadap korosi.

- c) Mangan adalah unsur paduan utama dari seri 3xxx. Paduan ini umumnya *non-heat-treatable* tetapi memiliki kekuatan sekitar 20% lebih besar dari alloy seri 1xxx. Karena hanya persentase mangan yang terbatas (hingga sekitar 1,5%) yang dapat secara efektif ditambahkan ke aluminium, mangan digunakan sebagai elemen utama hanya dalam beberapa paduan. Namun, salah satunya, paduan 3003 yang populer, secara luas digunakan sebagai paduan tujuan umum untuk aplikasi berkekuatan sedang yang membutuhkan kemampuan kerja yang baik.
- d) Unsur paduan utama dalam paduan seri 4xxx adalah silikon, yang dapat ditambahkan dalam jumlah yang cukup (hingga 12%) untuk menyebabkan penurunan besar dari rentang leleh tanpa menghasilkan kerapuhan. Untuk alasan ini, paduan aluminium-silikon digunakan dalam kawat las dan sebagai paduan mematri, dimana rentang leleh lebih rendah dari logam dasar diperlukan. Kebanyakan paduan dalam seri ini non-heat treatable, tetapi ketika digunakan dalam pengelasan paduan yang dapat diolah panas, mereka mengambil beberapa unsur paduan dari yang terakhir dan dengan demikian merespon perlakuan panas sampai batas tertentu. Paduan yang mengandung sejumlah besar silikon menjadi abu-abu gelap menjadi arang ketika selesai oksida anodik diterapkan dan karenanya permintaan untuk aplikasi arsitektur. Alloy 4032 memiliki koefisien ekspansi termal rendah dan ketahanan aus yang tinggi sehingga sangat cocok untuk produksi piston mesin.

- e) Unsur paduan utama dalam paduan seri 5xxx adalah magnesium. Ketika digunakan sebagai elemen paduan utama atau dengan mangan, hasilnya adalah paduan *work hard enable* moderat hingga tinggi. Magnesium jauh lebih efektif daripada mangan sebagai pengeras, sekitar 0,8% Mg sama dengan 1,25% Mn, dan dapat ditambahkan dalam jumlah yang jauh lebih tinggi. Paduan dalam seri ini memiliki karakteristik pengelasan yang baik dan ketahanan yang baik terhadap korosi di atmosfer laut. Namun, pembatasan tertentu harus ditempatkan pada jumlah kerja dingin dan suhu operasi yang aman diperbolehkan untuk paduan magnesium tinggi (lebih dari ~ 3,5% untuk suhu operasi di atas ~ 65 ° C, atau 150 ° F) untuk menghindari kerentanan terhadap stres. korosi retak.
- f) Paduan dalam seri 6xxx mengandung silikon dan magnesium dalam proporsi yang diperlukan untuk pembentukan magnesium silicide (Mg_2Si), sehingga membuatnya panas dapat diatasi. Meskipun tidak sekuat paduan seri 2xxx dan 7xxx alloys, alloy seri 6xxx memiliki formability yang baik, kemampuan las, machinability, dan ketahanan terhadap korosi, dengan kekuatan sedang. Paduan dalam gugus yang dapat diolah panas ini dapat dibentuk dalam temper T4 (larutan yang diolah panas tetapi tidak dipanaskan dengan panas yang diolah) dan diperkuat setelah membentuk untuk sifat-sifat T6 penuh dengan perlakuan panas pengendapan.
- g) Zinc, dalam jumlah 1 sampai 8%, adalah unsur paduan utama dalam paduan 7xxx series, dan ketika digabungkan dengan persentase yang lebih kecil dari magnesium menghasilkan paduan yang dapat diolah panas dengan kekuatan sedang sampai sangat tinggi. Biasanya unsur lain, seperti tembaga dan kromium, ditambahkan dalam jumlah kecil. Encerkan penambahan skandium juga meningkatkan properti. Paduan seri 7xxx digunakan dalam struktur air frame, peralatan bergerak, dan bagian lain yang sangat kuat. Kekuatan tinggi paduan 7xxx menunjukkan ketahanan yang berkurang terhadap korosi retak tegangan dan sering digunakan dalam temperamen sedikit *overaged* untuk memberikan

kombinasi kekuatan, ketahanan korosi, dan ketangguhan patah yang lebih baik.

- h) Seri 8xxx adalah paduan aluminium dengan paduan berbagai komposisi kimia. Sebagai contoh, peningkatan kinerja suhu tinggi dicapai melalui penggunaan paduan Al-Fe-Ce yang diperkuat dengan dispersi (misalnya, 8019) atau paduan Al-Fe-V-Si (misalnya, 8009) yang dibuat oleh pemrosesan metalurgi serbuk. Kepadatan rendah dan kekakuan yang lebih tinggi dapat dicapai dalam paduan yang mengandung lithium (mis., 8090). Paduan yang terakhir, yang pengendapannya dapat dipadatkan, telah menggantikan paduan 2xxx dan 7xxx berkekuatan sedang hingga tinggi pada beberapa aplikasi pesawat / aerospace (misalnya, komponen helikopter).

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium seri 5052 dan 1100. Seri 5052 termasuk dalam golongan paduan aluminium seri 5xxx, yaitu paduan aluminium dengan magnesium (Mg). Paduan ini memiliki sifat tidak dapat diperlakukan panas sehingga pengaplikasiannya terbatas hanya pada temperatur rendah. Seri 1100 termasuk dalam golongan paduan aluminium seri 1xxx aluminium ini memiliki kemurnian antara 99,0% dan 99,9%. Aluminium dalam seri ini sifatnya baik dalam tahan karat, konduksi panas dan konduksi listrik. Hal yang kurang menguntungkan adalah kekuatannya rendah. Batas kandungan unsur pada aluminium 5052 dan 1100 dijelaskan pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 .

Tabel 2.2. Kandungan Unsur Aluminium 5052 (ASM Al 5052-H112)

Unsur	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
Jumlah	95.7 –	0.15 -	Max	Max	2.2-	Max	Max	Max
(%)	97.7	0.35	0.1	0.4	2.8	0.1	0.25	0.1

Tabel 2.3. Kandungan Unsur Aluminium 1100 (ASM Al 1100-H14)

Unsur	Al	Cu	Fe	Mn	Si	Zn
Jumlah	99 - 99.95	0.050 -0.2	Max	Max	Max	Max
(%)			1.0	0.050	1.0	0.1

