

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Nadim dan Ahmed (2014) melakukan penelitian tentang pengelasan antara aluminium dan tembaga dengan metode *Friction Stir Welding (FSW)*. Variasi yang digunakan adalah kecepatan putar tool 900 rpm dan 1500 rpm dengan kecepatan pengeelasan konstan di 25 mm/mnt dan menggunakan jenis *tool* yang berbeda yaitu *tool* jenis *round* dan *round with threaded*. Adapun hasil penelitian yang diperoleh adalah sebagai berikut, nilai tegangan tertinggi terjadi pada putaran 900 rpm dengan kecepatan pengelasan 25 mm/mnt dan dengan menggunakan *tool* jenis *round with threaded* yaitu 81,073 MPa, sedangkan untuk nilai kekerasannya diperoleh nilai rata-rata sebesar 156,33 HV. Untuk kecepatan *tool* 900 rpm dengan *tool* jenis *round* diperoleh nilai tegangan 78,2 MPa, sedangkan untuk nilai kekerasannya sebesar 165,67 HV. Untuk kecepatan putaran tool 1500 rpm dan kecepatan pengelasan 25 mm/mnt dengan menggunakan *tool* jenis *round with threaded* diperoleh nilai tegangan sebesar 54,674 MPa dan nilai kekerasannya sebesar 257,33 HV. Pada nilai kekerasan tertinggi terdapat pada kecepatan putaran *tool* 1500 rpm dengan kecepatan pengelasan 25 mm/mnt dan menggunakan *tool* jenis *round* diperoleh nilai rata-rata sebesar 267 HV. Sedangkan untuk nilai kekuatan tariknya diperoleh sebesar 40,323 MPa. Secara umum dapat disampaikan bahwa semakin rendah kecepatan putar *tool* maka kekuatan tariknya semakin tinggi tetapi nilai kekerasannya menurun, jika kecepatan putar *tool* semakin tinggi maka kekuatan tariknya menurun tetapi nilai kekerasannya meningkat.

Setyawan dkk (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh suhu aging terhadap kekuatan tarik dan porositas hasil sambungan las gesek aluminium 6061. Variasi suhu aging yang digunakan adalah 150°C, 175°C, 185°C, 200°C, dan 225°C dengan waktu penahanan selama 7 jam. Adapun hasil penelitian tersebut diperoleh kekuatan tarik tertinggi terdapat pada variasi suhu aging 150°C dengan waktu penahanan selama 7 jam sebesar 186,65 MPa, dikarenakan pada suhu aging 150° terjadi peningkatan kekuatan tarik karena pada suhu ini memasuki fasa pengerasan

tahap kedua sehingga nilai kekuatan tariknya maksimal. Sedangkan kekuatan tarik terendah terdapat pada variasi suhu aging 185°C dengan nilai kekuatan tariknya adalah 124,68 MPa. Pada variasi suhu 175°C dengan waktu penahanan 7 jam diperoleh hasil 149,50 Mpa, pada suhu ini memasuki fasa antara yaitu fasa dimana masih dapat memberikan sumbangan kekuatan tarik walaupun peningkatannya sangat lambat . Sedangkan untuk variasi suhu aging 200°C dan 225°C dengan waktu penahanan 7 jam diperoleh hasil kekuatan tarik sebesar 124,95 MPa dan 127,20 MPa, hal ini dikarenakan suhu aging terlalu panas untuk waktu selama 7 jam dan memasuki tahap pelunakan sehingga kekuatan tariknya mengalami penurunan.

Esmaeili dkk (2011) melakukan penelitian pengelasan antara kuningan dan aluminium dengan metode *Friction Stir Welding*. Variasi yang digunakan adalah kecepatan putar tool 200 rpm, 450 rpm, 650 rpm, dan 900 rpm dan dengan kecepatan pengelasan konstan pada 20mm/mnt. Dari hasil penelitian didapatkan hasil sebagai berikut , pada pengujian tarik didapat kekuatan yang paling rendah pada kecepatan puter 200 rpm sebesar 27,1 MPa. Sedangkan kekuatan tarik paling tinggi deperoleh pada kecepatan putar 450 rpm dengan nilai 100.1 MPa. Untuk kecepatan putar 600 rpm diperoleh kekuatan tarik sebesar 89,1 MPa, dan pada kecepatan putar 900 rpm didapat kekuatan tarik sebesar 76,85 MPa. Kekuatan tarik maksimal terdapat pada kecepatan putar 450 rpm, kekuatan menurun seiring dengan kenaikan kecepatan putar *tool*.

Dari beberapa tinjauan pustaka yang ditulis dapat disimpulkan bahwa penelitian yang dilakukan oleh nadim dan ahmed didapat bahwa penggunn *tool* jenis *round* dan *round with thraded* dan dengan menggunakan kecepatan putar *tool* 900 rpm dan 1500 rpm diperoleh nilai kekuatan tarik dan nilai kekerasa yang berbeda. Pada kecepatan putar 900 rpm kekuatan tariknya 81,073 MPa tetapi nilai kekerasannya hanya sebesar 156,33 HV dan pada keceptan putar 1500 rpm kekuatan tariknya menurun menjadi 40,323 MPa tetapi nilai kekerasannya naik menjadi 267 HV. Untuk penelitian yang dilakukan oleh setyawan dkk didapat bahwa dengan waktu yang sama suhu aging yang semakin tinggi dari 150°C belum tentu menghasilkan nilai kekuatan tarik dan kekerasan yang tinggi, dalam penelitian ini didapat semakin

tinggi suhu aging dapat mengakibatkan kekuatan tarik dan kekerasannya melunak, pada suhu 150°C ini didapat kekuatan tarik sebesar 186,65 MPa. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh esmaeili kecepatan putar *tool* yang dapat menghasilkan kekuatan tarik paling tinggi didapat pada 450 rpm dengan nilai sebesar 100,1 MPa, penelitian yang dilakukan esmaeili ini sudah berhasil dilakukan. maka penulis akan melakukan penelitian seperti esmaeili akan tetapi dilakukan pada kecepatan putar *tool* yang tinggi pada 1550 rpm untuk melihat efek yang terjadi. Dan menggunakan *tool* jenis round untuk menaikkan nilai kekerasannya seperti yang dilakukan oleh nadim dan ahmed, sedangkan suhu aging akan menggunakan sama seperti yang dilakukan oleh setyawan dkk yaitu sebesar 150°C dengan waktu setengah dari yang dilakukan setyawan yakni 3,5 jam.

## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Pengertian *Friction Stir Welding***

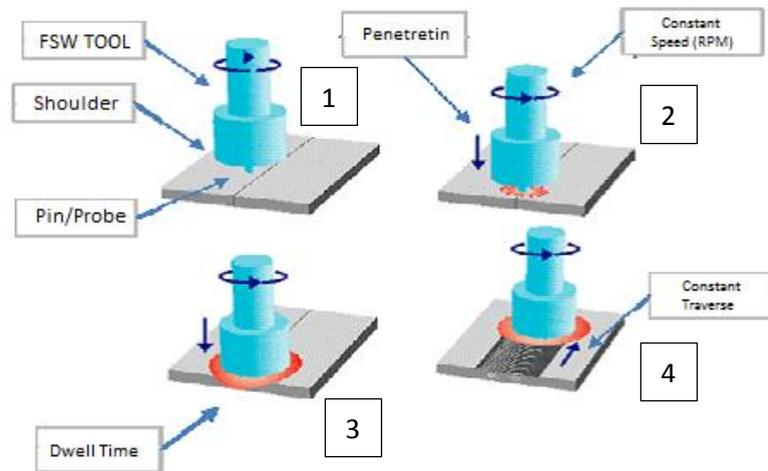
*Friction Stir Welding* (FSW) adalah suatu teknologi pegelasan yang merupakan proses *solid-state joining* yang bisa digunakan untuk menyambungkan material yang berbeda. Pada proses FSW, material yang dilas tidak benar-benar mencair pada saat proses berlangsung (temperatur kerjanya tidak melewati titik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

#### **2.2.1.1 Prinsip Kerja *Friction Stir Welding***

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

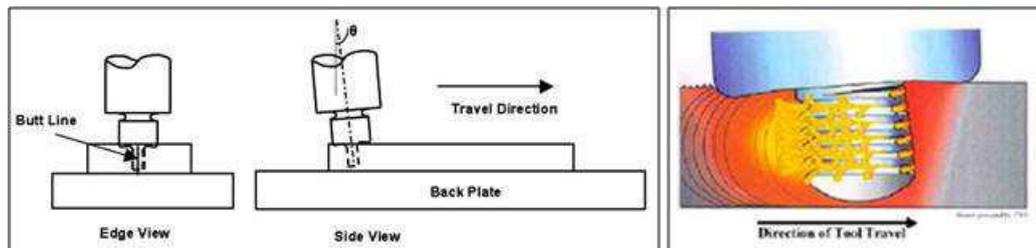
Gesekan panas (*Frictional Heat*) pada FSW dihasilkan oleh gesekan antara *probe* dan *shoulder* dari *welding tool* dengan material benda kerja. Panas ini bersama dengan panas yang dihasilkan dari proses pengadukan mekanik

(*mechanical mixing*) akan menyebabkan material yang diaduk akan melunak tanpa melewati titik leburnya (*melting point*), hal inilah yang memungkinkan *tool* pengelasan bisa bergerak sepanjang jalur pengelasan. Ketika *pin welding tool* bergerak sepanjang jalur pengelasan, permukaan depan *pin* akan memberikan gaya dorong plastis terhadap material ke arah belakang *pin* sambil memberikan gaya tempa yang kuat untuk mengkonsolidasikan logam las.



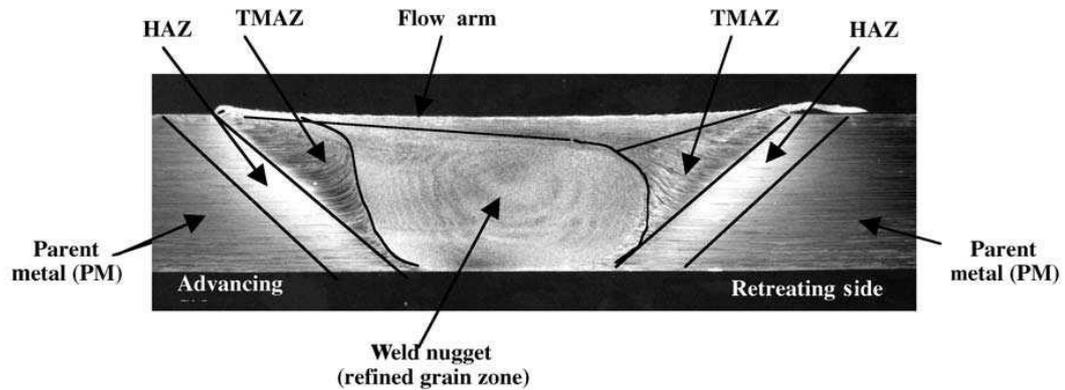
Gambar 2.1 Prinsip Dasar Proses FSW (Polmear, 1995)

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



Gambar 2.2 Skema Kerja FSW (Polmear, 1995)

Panas yang terjadi membuat material yang ada di sekitar *pin* menjadi melunak dan akibat adanya gerak rotasi dan translasi dari *tool* material yang ada di depan *pin* bergerak ke belakang *pin* dan ini terjadi terus menerus selama gerak translasi berlangsung dan menghasilkan sambungan yang diinginkan.



Gambar 2.3 Heat Zone pada FSW (Thomas dkk, 2006)

Akibat adanya panas yang terjadi, maka terjadi perubahan struktur mikro pada area yang di las, dan dapat dibagi menjadi 4 zona yaitu (gambar 2.3):

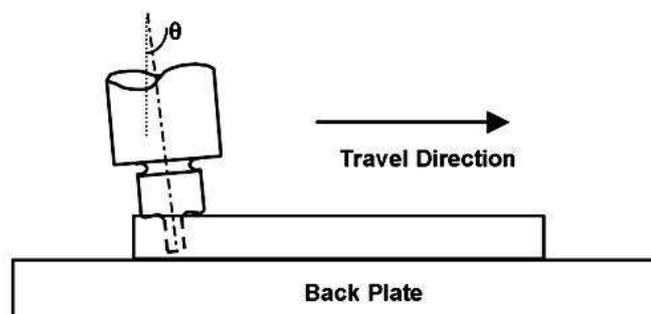
1. **Base metal**, merupakan bagian base material yang tidak terkena pengaruh panas yang dihasilkan selama proses FSW berlangsung.
2. **Heat-Affected Zone (HAZ)**, area ini merupakan area yang paling dekat dengan center dari lokasi pengelasan, material pada area ini sudah mengalami siklus termal yang menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dari base material, tetapi pada area ini tidak terjadi deformasi plastis akibat pengelasan.
3. **Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)**, pada area ini *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**, adalah area yang secara utuh mengalami rekristalisasi atau terkadang disebut juga *Stir Zone*. Area ini merupakan area yang menghasilkan sambungan akibat gerakan *tool* (Thomas dkk, 2006).

### 2.2.2 Siklus Proses *Friction Stir Welding*

Siklus dari proses FSW dapat dibagi-bagi menjadi beberapa langkah dimana pada masing-masing langkah memiliki aliran panas dan *thermal profile* yang berbeda, siklus-siklus tersebut adalah (Arifin dkk, karakter aluminium *casting*):

1. ***Dwell Time***, Pada langkah proses pemanasan awal dilakukan pada benda kerja dengan cara membiarkan *tool* berputar tanpa gerak translasi (*stationery*). Pada langkah ini material yang ada dibawah *tool* dipanaskan hingga benar-benar melunak dan *tool* siap untuk bergerak translasi sepanjang joint line. Biasanya pada langkah ini juga proses penetrasi *pin/nib* dimulai.
2. ***Transient Heating***, pada saat *tool* mulai untuk bergerak translasi biasanya ada saat pemanasan sementara dimana pada saat itu panas yang diciptakan dan suhu pada sekitar *tool* menjadi tidak stabil dan bergerak hingga menjadi *steady-state* pada saat *tool* sudah mulai bergerak.
3. ***Pseudo steady-state***, walaupun pada saat proses berlangsung terjadi fluktuasi suhu pada area sekitar *tool* tetapi secara termal pada area tersebut sudah konstan paling tidak secara mikrostruktur.
4. ***Post Steady State***, pada saat menjelang akhir dari proses pengelasan, panas akan meningkat pada sekitar *tool*.

### 2.2.3 *Depth Of Weld* dan Kemiringan *Tool*



Gambar 2.4 Skema *Stir Welding* (Polmear, 1995)

*Depth of Weld* dapat diartikan sebagai kedalaman titik terendah *tool shoulder* yang menembus benda kerja sedangkan kemiringan *tool* adalah besarnya sudut yang dibuat antara sumbu *tool* dengan permukaan benda kerja yang harus diperhatikan karena akan sangat mempengaruhi hasil dari FSW. Kemiringan yang dibuat adalah 2-4° dimana bagian belakang *shoulder* lebih rendah dibandingkan dengan bagian depannya.

#### **2.2.4 Desain Tool**

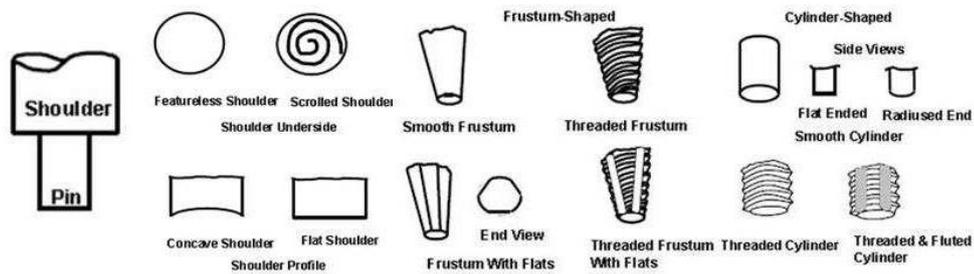
Desain *tool* merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi struktur mikro, profil dan sifat mekanik sambungan. Material *tool* merupakan faktor yang menentukan akan kehandalan *tool*, koefisien gesek, dan pembangkitan panas. Oleh karena itu *tool* design merupakan hal yang sangat penting dari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

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

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

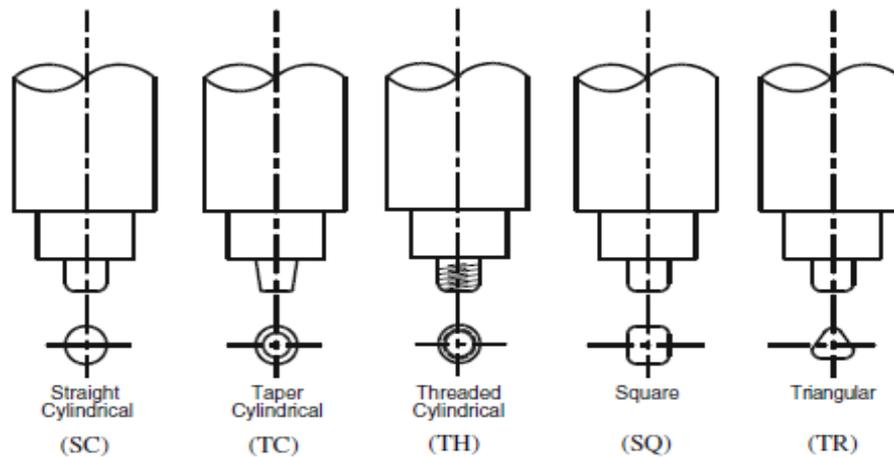
Hal yang kedua adalah bentuk dari *shoulder* dan *pin* dari *tool*, dua bagian utama dari sebuah *tool* yang digunakan dalam FSW adalah :

*Shoulder*, bagian ini adalah bagian yang membangun panas dengan gesekan yang dilakukannya terhadap benda kerja, bagian ini juga yang menjadi penahan material panas yang ada di bawahnya. Disamping itu bagian ini pun yang memberikan gaya *vertikal* ke arah benda kerja yang menjaga kondisi *contact tool* dengan benda kerja.



Gambar 2.5 Konfigurasi Desain *Tool* FSW (Thomas dkk, 1991)

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



Gambar 2.6 Contoh Desain *Pin* pada *Tool* FSW (Elangovan dkk , 2009)

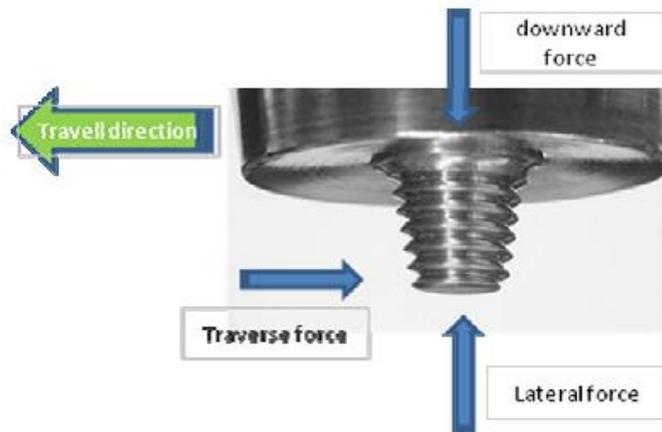
Yang selanjutnya adalah ukuran dari *tool*, diameter *shoulder*, diameter *pin*, panjang *pin* dan panjang *tool* secara keseluruhan diatur sesuai dengan process yang diinginkan yaitu ketebalan benda kerja, kemiringan *tool* pada saat proses, kekuatan sambungan dan *clearence* antar benda kerja.

### 2.2.5. Gaya Pada *Friction Stir Welding*

Dibawah ini gaya-gaya yang terjadi pada proses kerja FSW adalah :

- a. *Downward force*, merupakan gaya utama yang dipakai untuk mempertahankan posisi *tool* pada atau dibawah permukaan material benda kerja.

- b. *Traverse force*, gaya yang sejajar dengan arah pergerakan *tool*. Peningkatan gaya transversal merupakan wujud resistansi material terhadap pergerakan *tool* dan sejalan proses gaya ini akan berkurang sejalan dengan naiknya temperatur kerja.
- c. *Lateral force*, adalah gaya yang tegak lurus dengan arah dari pergerakan *tool* dan merupakan reaksi gaya dari *downward force*.
- d. Torsi dibutuhkan untuk memutar *tool*, besarnya tergantung dari *downward force* dan nilai koefisien gesek atau *flow strength* dari material.



Gambar 2.7 Gaya-Gaya pada *Friction Stir Welding* (Rahayu, 2012)

### 2.3 VARIABEL PROSES

Profil sambungan, struktur mikro, dan sifat material ditentukan oleh ketebalan dan jenis material yang dilas serta pemilihan variabel proses pengelasan (Thomas dkk, 2006). Adapun variable proses yang mempengaruhi proses FSW sebagai berikut (Thomas dkk, 1991):

1. Kecepatan gerak translasi *tool*, berpengaruh terhadap heat input
2. Kecepatan putar *tool*, berpengaruh terhadap heat input
3. *Tool design*, meliputi dimensi & bentuk *shoulder*, bentuk, jenis dan ukuran *pin*.
4. Kemiringan *Tool*, bergantung pada bentuk dan ukuran *shoulder* dari *tool*, tapi biasanya  $0^{\circ}$ -  $3^{\circ}$  (Rahayu, 2012)

5. Ketebalan material, mempengaruhi tingkat pendinginan dan temperatur gradien dari material.
6. Paduan material, parameter FSW tidak bisa disamakan untuk semua material, masing masing material memiliki parameter berbeda-beda.

#### **2.4 KEUNTUNGAN DAN APLIKASI FSW**

Adapun keuntungan dari proses pengelasan dengan metode FSW menurut Rahayu (2012):

1. Tidak terjadi pelelehan selama pengelasan
2. Bisa mengelas semua jenis Aluminium *alloys*
3. Tidak memerlukan bahan pengisi
4. Tidak memerlukan gas pelindung
5. *Tool* welding dapat digunakan berulang ulang
6. Ramah lingkungan

FSW bisa digunakan untuk mengelas material aluminium (*casting* maupun *alloy*) baik satu atau berbeda series, baja, titanium, tembaga, 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 tanki, tabung dan pipa dengan kontur 3 dimensi. Selain untuk membuat sambungan, FSW juga cocok digunakan untuk memperbaiki sambungan yang ada.

Sebagai contoh gambar 2.8 benda yang dihasilkan dari FSW sambungan *dissimilar* adalah *heat spreader* yang digunakan pada komponen kelistrikan dengan bahan material yang berbeda yaitu dengan menggabungkan antara material aluminium dan *copper alloy*.



Gambar 2.8 Heat Spreader

(*Friction Stir Welding: Consistently Enabling Stronger, More Efficient Structures*, 13 October 2014, <http://www.slideshare.net/DesignWorldOnline/friction-stir-welding-consistently-enabling-stronger-more-efficient-structures>, diakses tanggal 30 Desember 2016)

## 2.5 PROSES HEAT TREATMENT PADA PADUAN ALUMINIUM

Paduan aluminium baik *wrought product* maupun *cast product* dapat ditingkatkan sifat mekanisnya dengan cara heat treatment (paduan yang dapat di heat treatment), sedangkan untuk paduan yang tidak dapat di heat treatment hanya mengandalkan efek pengerjaan dingin untuk pencapaian sifat mekanis yang dibutuhkan (Eifelson dan Sarah, 2007).

Tujuan utama proses *heat treatment* pada paduan aluminium adalah (*Aluminium Technology, Casting aluminium*, 1974):

1. Melunakkan paduan untuk meningkatkan proses pengerjaan (tidak relevan untuk *casting*).
2. Untuk meningkatkan kekuatan dan menghasilkan properti mekanis yang diinginkan.
3. Untuk menstabilkan properti fisik ataupun mekanis atau ketahanan korosi, dan untuk menghindari perubahan yang akan muncul karena waktu pada temperatur ruang atau temperatur yang dinaikkan.
4. Untuk memastikan kestabilan dimensi selama pemakaian
5. Untuk menghilangkan tegangan sisa yang disebabkan oleh pendinginan yang tak merata.

### 2.5.1 Penandaan untuk Kondisi *Heat-Treatment*

W dan T merupakan penandaan yang diberikan pada aluminium *wrought* dan *cast* yang dapat di *heat-treatment* (artinya logam-logam yang dapat dikuatkan dengan pemberian panas atau proses thermal). Penandaan W menyatakan kondisi tidak stabil dan tidak umum digunakan. Penandaan T yang diikuti angka 1 sampai 10 menyatakan proses yang diberikan pada logam *cast* dan *alloy* tersebut. Penandaan *temper* dan penjelasan singkat mengenai prosesnya dijelaskan sebagai berikut (Mangonon, 1997):

- T1, didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu dan natural ageing sampai kondisi substansi stabil. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pekerjaan dingin setelah proses pembentukan dengan kenaikan suhu seperti proses pencetakan dan proses ekstrusi dan untuk properti mekanis setelah distabilisasi dengan ageing pada suhu ruang. Penandaan ini juga diberikan untuk produk yang diratakan dan diluruskan setelah proses pendinginan dari proses pembentukan.
- T2, didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu, pekerjaan dingin, natural ageing sampai kondisi substansi stabil. Penandaan ini diberikan untuk produk yang mengalami pekerjaan dingin untuk meningkatkan kekuatan setelah pendinginan dari proses pekerjaan panas seperti *rolling* atau ekstrusi dan untuk properti mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.
- T3, *Solution heat-treated, cold work, and naturally aged* sampai kondisi substansi stabil. T3 diberikan untuk produk yang mengalami pekerjaan dingin untuk meningkatkan kekuatan setelah *solution heat-treatment* dan untuk sifat mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.
- T4, *Solution heat-treated and naturally aged* sampai kondisi substansi stabil. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pekerjaan dingin setelah *solution heat-treatment* dan untuk properti mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.
- T5, didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan temperatur dan *artificially aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak

mengalami pengerjaan dingin setelah didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu, seperti pencetakan dan ekstrusi, dan untuk sifat mekanis yang telah dikembangkan dengan *artificial ageing*.

- T6, *Solution Heat-Treated dan artificially aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pendinginan setelah solution heat-treatment dan untuk properti mekanis, atau kestabilan dimensi, atau keduanya, yang substannya dikembangkan dengan *artificial ageing*.
- T7, *Solution Heat-Treated and overaged or stabilized*. Penandaan ini diberikan pada produk wrought yang telah mengalami *artificial ageing* setelah solution heat-treatment di luar puncak kekuatan agar dihasilkan karakter special, seperti mempertinggi ketahanan terhadap korosi retak tegang atau pengelupasan. Penandaan ini juga diberikan pada produk cast yang telah mengalami artificial ageing setelah *solution heat treatment* untuk mendapatkan stabilitas kekuatan dan dimensional.
- T8, *Solution Heat-Treated, cold work, and artificially aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang mengalami pengerjaan dingin, setelah *solution heat-treatment*, yang secara spesifik untuk meningkatkan kekuatan dan untuk sifat mekanis, atau kestabilan dimensional, atau keduanya, yang substannya dikembangkan dengan *artificial ageing*.
- T9, *Solution Heat-Treated, artificial ageing, dan pekerjaan dingin*. Penandaan ini diberikan pada produk yang mengalami pekerjaan dingin setelah *artificial ageing* yang secara spesifik untuk meningkatkan kekuatan.
- T10, didinginkan dari proses pembentukan kenaikan suhu, pekerjaan dingin, dan *artificial ageing*. Penandaan ini diberikan untuk produk yang mengalami pengerjaan dingin yang secara spesifik untuk meningkatkan kekuatan setelah proses pendinginan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu, seperti rolling atau ekstrusi, dan untuk properti mekanis yang telah dikembangkan oleh *artificial ageing*.

### **2.5.2 Pengerasan Presipitasi**

Pengerasan presipitasi adalah bentuk perlakuan panas yang paling umum pada paduan aluminium. Pengerasan presipitasi ini berprinsip pada pembentukan

presipitat fasa kedua yang dapat mendistorsi kisi dari kristal aluminium. Distorsi kisi/*lattice distortion* (LD) inilah yang digunakan sebagai penghambat laju dislokasi. LD ini terjadi karena terjadinya SSSS (*Super Saturated Solid Solution*) akibat dari pendinginan cepat/*quenching*. Kondisi ini bersifat tidak stabil dan mendorong terbentuknya endapan. Endapan yang terbentuk diasumsikan memiliki struktur transisi metastabil yang koheren dengan kisi, jadi kondisi tidak stabil tersebutlah yang membuat partikel-partikel fasa kedua berusaha untuk kembali mencapai keadaan setimbangnya/*equilibrium* dimana fasa kedua tersebut tidaklah larut dalam matriks aluminium.

Beberapa jenis paduan yang dapat dilakukan proses pengerasan presipitasi adalah sebagai berikut (Hatch, 1995):

- Al-Cu : Pembentukan endapan  $\text{CuAl}_2$
- Al-Cu-Mg : Mg berfungsi untuk memperbanyak endapan
- Al-Mg-Si : Pembentukan endapan  $\text{Mg}_2\text{Si}$
- Al-Zn-Mg : Pembentukan endapan  $\text{MgZn}_2$

Untuk mendapatkan tingkat kekerasan yang diinginkan maka harus dilakukan kombinasi pemanasan, pendinginan, waktu, jenis, fraksi volume, ukuran, dan distribusi dari partikel presipitat yang dihasilkan. Ada beberapa syarat agar pengerasan presipitasi ini dapat terjadi:

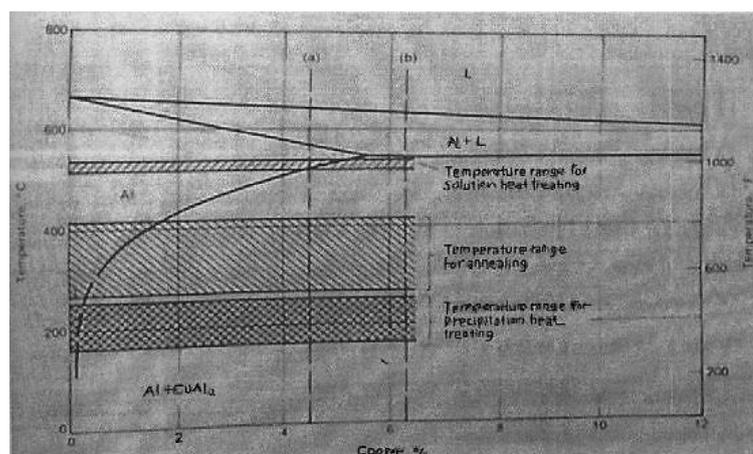
1. Adanya unsur yang dapat membentuk fasa kedua baik dengan aluminium ataupun dengan silikon.
2. Kelarutan yang cukup besar dari unsur tersebut di dalam aluminium.
3. Penurunan kelarutan yang signifikan seiring penurunan temperatur.

### **2.5.3 Solution Treatment**

Agar dapat membuat penguatan presipitasi terjadi, maka hal pertama yang harus dilakukan adalah membuat *solid solution* terlebih dahulu dan prosesnya dinamakan *solution treatment*. Proses ini bertujuan membawa unsur pembentuk presipitat ke batas kelarutan maksimumnya di dalam aluminium sesuai dengan diagram fasa yang ada sehingga tercapai fasa tunggal. Untuk mencapai batas kelarutan tersebut diperlukan temperatur yang tinggi dan waktu yang cukup agar

terjadi homogenisasi (ASM Handbook, 1990). Temperatur dan waktu *solution treatment* ini pada umumnya bervariasi tergantung dari banyak hal seperti banyak dan jenisnya unsur paduan, biaya, dan waktu yang tersedia. Tetapi dilihat dari diagram fasa, temperatur *solution treatment* ini berada tepat sebelum garis *solidus* mulai dan sebelum garis *solvus* berakhir atau mudahnya berada di bawah garis eutektik seperti pada Gambar 2.9. Proses *solution treatment* ini juga memberikan kontribusi kepada struktur yang tidak larut menjadi lebih *spheroid* (ASM Handbook, 1990).

Hal-hal yang mungkin terjadi didalam proses *solution treatment* ini adalah *overheating* dan juga *underheating*. *Overheating* terjadi apabila temperatur sudah melewati garis eutektik sehingga terdapat fasa *liquid*. Fasa *liquid* yang terjadi ini pada umumnya berawal dari batas butir karena memiliki tingkat energi yang tinggi akibat dari segregasi *impurities* yang menurunkan temperatur lebur. Akibat dari *overheating* ini adalah kerusakan struktur mikro akibat adanya porositas yang dapat menurunkan sifat mekanik. *Underheating* adalah temperatur *solution treatment* yang terlalu rendah sehingga tidak semua unsur penguat larut sempurna. Hal ini menyebabkan sedikitnya kuantitas dari partikel penguat yang akan terjadi sehingga kekuatan yang didapat tidak akan sesuai dengan yang diinginkan (ASM Handbook, 1990).



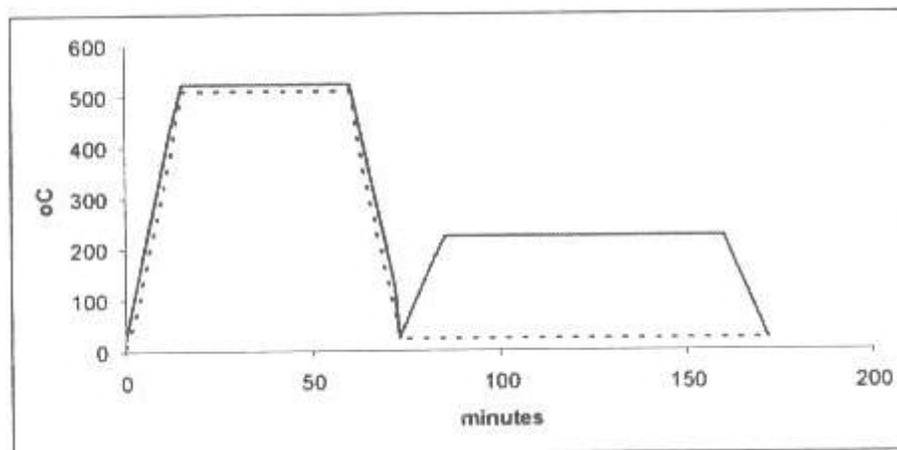
Gambar 2.9. Potongan diagram fasa Al-Cu yang menandakan daerah *solution treatment* dan *artificial ageing* (ASM Handbook, 1990)

#### 2.5.4 Quenching

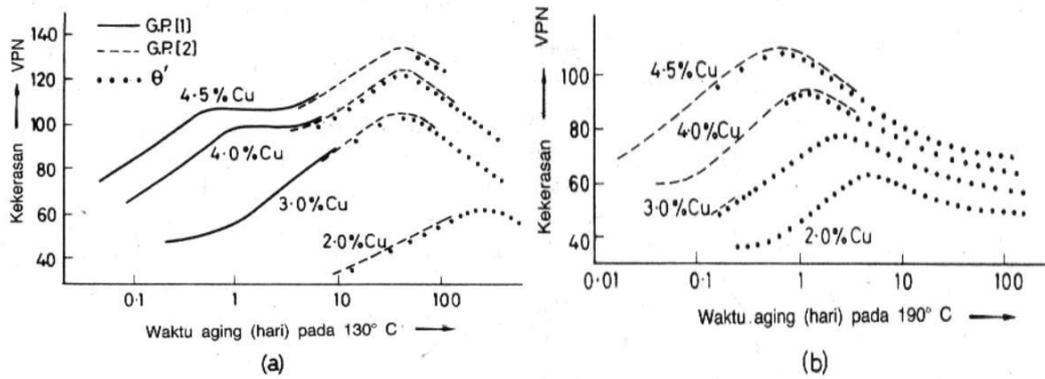
Merupakan proses pendinginan cepat ke temperatur ruang agar *solid solution* yang terjadi pada proses *solution treatment* berubah menjadi SSSS. Proses ini bukan hanya mempertahankan atom-atom terlarut agar tetap berada dalam larutan tetapi juga memastikan bahwa ada suatu jumlah minimum dari kisi yang kosong agar dapat terjadi proses difusi pada temperatur rendah. Jika tidak ada proses *quenching*, maka atom-atom terlarut tersebut akan bermigrasi ke daerah yang tidak teratur sehingga tidak didapatkan kekuatan yang diinginkan. Parameter yang ada pada proses *quenching* ini adalah jeda waktu antara transportasi sampel menuju media *quenching* dan jenis dari media *quenching* tersebut (*ASM Handbook, 1990*). Tetapi pada umumnya jeda waktu yang digunakan adalah secepat mungkin dan media *quenchnya* adalah air yang memiliki suhu temperatur ruang.

#### 2.5.5 Ageing

Ada beberapa proses *ageing* pada paduan aluminium. Tetapi yang umum digunakan adalah *natural ageing* (T4) dan *artificial ageing* (T6), contoh siklus dari proses *ageing* ini dapat dilihat dari Gambar 2.10. Tujuan utama dari *ageing* ini adalah meningkatkan sifat mekanik. Pada T4, proses *ageing* ini dilakukan tanpa alat apapun, jadi material aluminium dibiarkan begitu saja setelah proses *quenching* hingga puncak. Sedangkan pada T6, dilakukan peningkatan temperatur agar bisa mencapai puncak lebih cepat. Pada umumnya, semakin tinggi temperatur yang diberikan, maka puncak akan terjadi lebih cepat tetapi nilai kekerasannya tidak setinggi jika menggunakan temperatur yang lebih rendah seperti pada Gambar 2.11 (Gilbert dkk, 2004).



Gambar 2.10 Contoh siklus *ageing*, garis lurus adalah T6 dan garis putus-putus adalah T4 (*ASM Handbook, 1990*)



Gambar 2.11 Pengaruh temperatur penuaan dengan kekerasan, temperatur penuaan lebih rendah (a) menghasilkan kekerasan lebih tinggi dari temperatur penuaan lebih tinggi (b) (Gilbert dkk, 2004).