

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Titanium

Tahun 1791, William Gregor, seorang pendeta Inggris sekaligus ahli mineral dan kimia, pertama kali menemukan titanium. Ia meneliti pasir magnetik dari sungai *Helford* di *Cornwall*, Inggris, dan menemukan mineral ilmenit. Beberapa tahun kemudian, ahli kimia Jerman yaitu Heinrich Klaproth menemukan titanium oksida yang dikenal sebagai rutil. *Klaproth* kemudian memberi nama unsur tersebut titanium, yang berarti "bumi" dalam beberapa bahasa dan terinspirasi dari mitologi Yunani, yaitu para *titan* (Sarah, 2019).

Titanium adalah logam berwarna putih keperakan dengan titik lebur sebesar 1.668 °C dan massa jenis sekitar 4,505 kg/dm<sup>3</sup>. Dalam perdagangan, titanium yang tidak murni atau berupa campuran dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok (Samlawi, 2016), yaitu:

- a. Unsur-unsur yang membentuk larutan padat *interstisial* (*solid solution*), seperti oksigen (O<sub>2</sub>), nitrogen (N), karbon (C), dan hidrogen (H<sub>2</sub>), serta lain-lain.
- b. Unsur-unsur yang membentuk larutan padat substitusi, seperti besi (Fe) dan logam-logam lainnya.

#### 1. Titanium Grade 2

Titanium grade 2 termasuk dalam fasa alfa, yang merupakan *allotropi heksagonal* titanium yang terbentuk pada suhu rendah. Paduan titanium semakin populer digunakan dalam struktur pesawat tempur modern karena menawarkan pengurangan berat, penghematan biaya, efisiensi struktural, serta perpanjangan umur layanan sebagai fokus utama pengembangannya. Titanium grade 2 memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap korosi lingkungan. Fasa titanium grade 2 dapat diklasifikasikan berdasarkan temperatur menjadi fasa alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), dan alfa-beta ( $\alpha+\beta$ ). Pada suhu ruang, titanium grade 2 stabil dalam fasa alfa ( $\alpha$ ), namun jika dipanaskan melebihi suhu 882 °C, fasa tersebut akan berubah dan menjadi stabil pada fasa beta ( $\beta$ ) (Napitu, 2025).

Terdapat keunggulan dari material titanium grade 2 ini, yang membuat material satu ini menjadi pilihan untuk berbagai aplikasi, terutama dalam industri petrokimia dan kelautan. Material ini memiliki ketahanan yang tinggi terhadap korosi akibat air laut dan berbagai macam bahan kimia yang bersifat agresif, yang membuatnya sangat cocok digunakan untuk pembuatan alat penukar panas seperti pipa, serta komponen yang terpapar lingkungan korosif. Selain itu, material ini juga memiliki biokompatibilitas yang sangat baik, menjadikannya pilihan yang populer dalam industri medis untuk pembuatan implan dan peralatan bedah.

Titanium *grade 2* masuk dalam kategori *commercially pure (CP)* titanium, yang dimana Sebagian besar komposisinya berupa titanium murni dengan beberapa elemen lainnya. Dikutip dari (*ASM Aerospace Specification Metals Inc*) berikut adalah komposisi kimia dari titanium *grade 2* yang diuraikan pada tabel 2.1 dibawah ini:

**Tabel 2.1 Komposisi Kimia Titanium Grade 2**

Komposisi	Persentase
Titanium (Ti)	99,71%

## 2. Baja karbon

Baja karbon merupakan paduan yang terdiri dari besi dan karbon, serta mengandung sedikit unsur seperti silikon (Si), mangan (Mn), fosfor (P), belerang (S), dan tembaga (Cu). Sifat-sifat baja karbon sangat dipengaruhi oleh kadar karbonnya, sehingga baja ini diklasifikasikan berdasarkan persentase karbon yang terkandung. Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon kurang dari 0,3%, baja karbon sedang mengandung karbon antara 0,3% hingga 0,45%, sedangkan baja karbon tinggi memiliki kadar karbon antara 0,45% hingga 1,7% (Dinov, 2021).

Karbon berfungsi untuk meningkatkan tegangan (*strength*) dari baja murni. Baja dikategorikan berdasarkan kandungan karbonnya, mulai dari ingot iron (baja bongkah) yang hampir tidak mengandung karbon sama sekali, hingga cast iron (besi tuang) yang memiliki kandungan karbon minimal sekitar 1,70% (Rahman dan Kurniawan, 2022). Pada penelitian ini baja karbon rendah

yang digunakan adalah baja A 36 dengan komposisi kimia yang diuraikan pada tabel 2.2 dibawah ini.

**Tabel 2.2 komposisi kimia Baja A36**

Unsur	Presentasi kandungan
c	0,15 - 0,20
mn	0,60 – 0,90
P	≤ 0,04
S	≤ 0,05
Fe	99,47

Menurut (Dinov, 2021), baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi baja karbon rendah, baja karbon sedang dan baja karbon tinggi yang diuraikan pada tabel 2.3 di bawah ini:

**Tabel 2.3 Klasifikasi Baja Karbon**

Jenis	Kadar karbon (%)	Kek. luluh ( $kg//mm^2$ )	Kek tarik ( $kg//mm^2$ )	Kek brinell ( $kg//mm^2$ )	Penggunaan
<b>Baja Karbon Rendah</b>					
Baja lunak khusus	0,08	18-28	32-36	95-100	Batang kawat pelat tipis
Baja sangat lunak	0,08-0,12	20-29	36-42	80-120	
Baja lunak	0,12,02	22-30	38-48	100-130	
<b>Baja Karbon Sedang</b>					
Baja setengah lunak	0,2-0,3	24-36	44-45	112-145	Komponen mesin konstruksi umum
Baja karbon sedang	0,3-0,5	30-40	50-60	140-170	

Jenis	Kadar karbon (%)	Kek. luluh ( $kg/mm^2$ )	Kek tarik ( $kg/mm^2$ )	Kek brinell ( $kg/mm^2$ )	Penggunaan
Baja Karbon Tinggi					
Baja keras	0,5-0,6	34-46	58-70	160-200	Perkakas
Baja sangat keras	0,6-0,8	36-47	180-235	180-235	rel,pegas Kawat piano

Jenis jenis baja carbon antara lain sebagai berikut:

a. Baja karbon rendah (*low carbon steel*)

Baja karbon rendah adalah baja yang memiliki kandungan karbon di bawah 0,25%. Baja jenis ini tidak merespon perlakuan panas (*heat treatment*) yang bertujuan mengubah struktur mikronya menjadi martensit. Penguatan (*strengthening*) pada baja karbon rendah biasanya dilakukan melalui perlakuan dingin (*cold work*). Struktur mikro baja karbon rendah terdiri dari unsur pokok ferit dan perlit. Karena itu, baja ini relatif lunak dan lemah, tetapi memiliki kelenturan dan kekerasan yang baik. Selain itu, baja karbon rendah mudah untuk dikerjakan (*machinable*) dan memiliki kemampuan las yang baik (Sulistiyo dan Prasetyo, 2016).

Baja AISI 1018 termasuk dalam kategori baja karbon rendah yang banyak diaplikasikan di berbagai sektor industri. Material ini memiliki sejumlah keunggulan sifat mekanik, antara lain kemudahan dalam proses permesinan, kekuatan yang cukup tinggi, serta kemampuan yang baik untuk dilakukan penyambungan (Azmy *et al.*, 2023).

b. Baja karbon menengah (*medium carbon steel*)

Baja karbon menengah adalah baja yang mengandung karbon antara 0,25% hingga 0,55% berat (C). Dalam setiap satu ton baja karbon menengah, kandungan karbonnya berkisar antara 30 hingga 60 kg. Baja karbon menengah banyak digunakan untuk pembuatan alat-alat perkakas dan komponen mesin. Berdasarkan kadar karbonnya, baja karbon menengah cocok untuk berbagai keperluan industri,

seperti pembuatan komponen kendaraan, roda gigi, dan pegas, karena memiliki keseimbangan yang baik antara kekuatan dan keuletan (Rahman dan Kurniawan, 2022).

c. Baja Karbon Tinggi (*High carbon steel*)

Baja karbon tinggi biasanya mengandung karbon sebesar 0,60% hingga 1,4% berat (wt% C). Baja ini merupakan jenis baja karbon yang paling sulit untuk dibentuk, ditempa, dilas, dan dipotong, namun memiliki tingkat kekerasan dan ketahanan aus yang sangat tinggi. Selain itu, baja karbon tinggi memiliki keuletan yang relatif tinggi dibandingkan dengan kekerasannya. Baja ini biasa digunakan untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan aus dan kekerasan tinggi, seperti mesin pemotong, pisau, pisau gergaji besi, pegas (*spring*), dan kawat baja berkekuatan tinggi (Afandi dan Arief, 2015).

**B. Tantangan dalam penyambungan**

Proses pengelasan antara baja dan titanium menghadapi tantangan besar akibat kelarutan besi yang rendah dalam titanium alfa pada suhu kamar. Pada saat pengelasan dilakukan, terbentuk fase intermetalik  $FeTi$  dan  $Fe_2Ti$  yang bersifat sangat keras serta rapuh, sehingga menghambat produksi sambungan las yang layak secara teknis (Elrefaey dan Tillmann, 2007).

Pengelasan fusi konvensional antara titanium (Ti) dan baja tahan karat sering kali menghasilkan segregasi unsur kimia, konsentrasi tegangan, serta pembentukan lapisan senyawa intermetalik (IMC) yang tebal. Secara khusus, kombinasi antara paduan Ti dan Fe cenderung membentuk banyak IMC pada zona antarmuka, yang disebabkan oleh ketidaklarutan penuh Ti dan Fe dalam fase padat. Proses pengelasan fusi juga melibatkan peleburan dan pepadatan ulang logam dasar, sehingga menimbulkan distorsi geometri pada logam yang dilas serta tegangan residual berlebih di antarmuka akibat perbedaan koefisien ekspansi linier antara logam-logam yang disambung (Elrefaey dan Tillmann, 2010).

**C. Brazing**

Salah satu metode yang paling sesuai untuk memperoleh sambungan yang kuat antara titanium dan baja adalah *brazing*, karena proses ini hanya

melibatkan peleburan bahan pengisi tanpa menyentuh logam dasar, sehingga dapat mengatasi berbagai permasalahan yang timbul akibat penggabungan logam yang berbeda. Untuk mencegah kontaminasi oleh zat pengotor berbahaya seperti oksigen dan nitrogen, sangat krusial agar paduan titanium disambungkan dalam lingkungan inert. Dengan demikian, proses *brazing* pada sambungan titanium atau baja dilakukan di dalam tungku vakum (Elrefaey dan Tillmann, 2007).

### 1. Prinsip Dasar *Brazing*

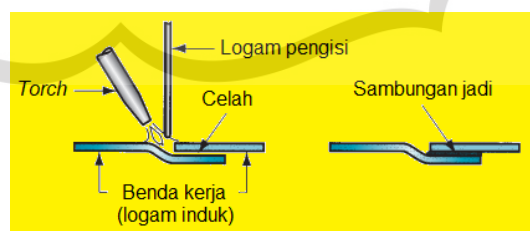
*Brazing* adalah metode penyambungan di mana logam dihubungkan menggunakan logam pengisi yang memiliki suhu lebur (liquidus) lebih dari 450 °C (840 °F), tetapi tetap di bawah suhu lebur logam dasar. Logam pengisi yang umum digunakan biasanya terdiri dari paduan perak (Ag), aluminium (Al), emas (Au), tembaga (Cu), kobalt (Co), atau nikel (Ni) (Metco, 2014). *Brazing* memiliki sejarah yang panjang dan telah berkembang menjadi proses yang sering digunakan, terutama dengan munculnya berbagai teknik seperti *induction brazing*, *torch brazing*, dan *furnace brazing* (Mardiyanto dan Anggono, 2021).

### 2. jenis *Brazing*

Di bawah ini adalah beberapa jenis brazing, antara lain sebagai berikut:

#### a. *Torch brazing*

*Torch brazing* merupakan metode pematerian yang paling sering digunakan. Metode ini terbagi menjadi tiga kategori utama, yaitu manual, mesin, dan otomatis metode torch brazing dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini.

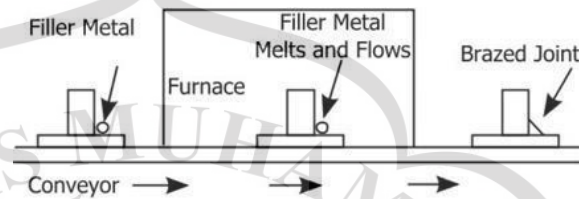


Gambar 2.1 Metode *Torch Brazing*

Sumber: (Hasan basri hasibuan, 2024)

b. *Furnace Brazing* (mematri tungku)

*Furnace brazing* adalah proses semi-otomatis yang banyak digunakan dalam operasi industri pematerian karena kemampuannya beradaptasi untuk produksi massal serta dapat dijalankan oleh tenaga kerja yang tidak terampil, skema metode furnace brazing dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini:



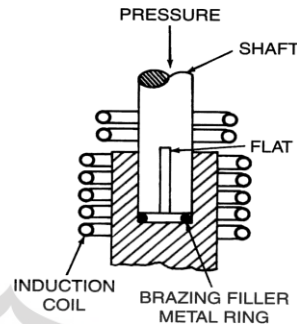
Gambar 2.2 Metode Furnace Brazing

Sumber: (Morrissette, 2013)

Metode pematerian dengan tungku ini memiliki banyak keunggulan dibandingkan metode pemanasan lainnya, sehingga sangat cocok untuk produksi massal. Tungku biasanya dipanaskan menggunakan listrik, gas, atau minyak, tergantung pada jenis tungku dan aplikasinya. Namun, metode ini juga memiliki beberapa kelemahan, seperti biaya peralatan yang tinggi, tantangan dalam desain, serta konsumsi energi yang besar.

c. *Induction brazing*

Induction brazing cocok untuk berbagai jenis logam, terutama bahan magnetik yang lebih mudah dipanaskan. Untuk bahan keramik, pemanasan biasanya terjadi melalui konduksi dari bagian logam di sekitarnya atau dengan menggunakan sesptor (Sue Dunkerton,1). Menurut Ambrell Group Application Labs, logam pengisi yang sering digunakan dalam pematerian induksi adalah perak, karena memiliki titik leleh yang rendah, ilustrasi metode *induction brazing* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Metode *Induction Brazing*

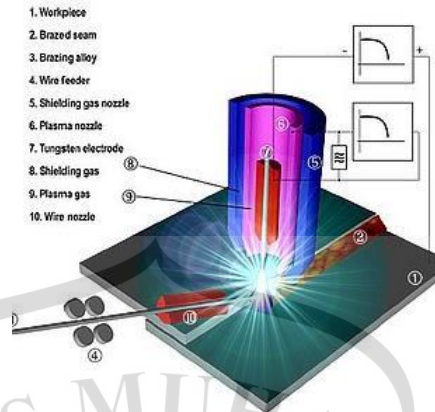
Sumber: (Kaybrazing.com)

d. *TIG Brazing*

Las TIG merupakan metode penyambungan logam yang memadukan prinsip las gas dan las busur listrik. Busur listrik dihasilkan dari interaksi antara elektroda tungsten yang bersifat tidak terumpan dengan permukaan logam yang dilas. Tungsten Inert Gas (TIG) termasuk ke dalam jenis las busur listrik (Arc Welding) yang menggunakan elektroda tungsten atau wolfram serta gas inert sebagai pelindung.

Untuk mencegah masuknya kontaminasi dari udara sekitar, area pengelasan dilindungi oleh gas pelindung yang bersifat tidak aktif, sehingga kualitas hasil sambungan menjadi lebih baik. Besar kecilnya panas yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh pengaturan arus listrik; semakin tinggi arus yang digunakan, maka semakin besar pula panas yang dihasilkan, dan sebaliknya.

Oleh karena itu, proses TIG brazing memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan metode difusi dan oxyacetylene, terutama dalam kemampuannya menyambung komponen dengan variasi bentuk dan ukuran. Selain itu, proses ini memungkinkan pengendalian input panas yang lebih presisi serta penggunaan gas pelindung, sehingga memberikan perlindungan optimal pada sambungan dan menghasilkan bentuk brazing yang lebih rapi dan berkualitas. ilustrasi metode *TIG Brazing* ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Metode *TIG Brazing*

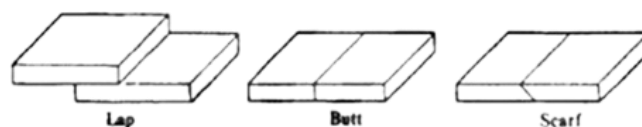
Sumber: (Migal.co)

### 3. Keunggulan *Brazing* untuk Sistem *Ti-Fe*

*Brazing* menjadi salah satu metode penyambungan dua atau lebih material tanpa melelehkan bahan utamanya. Keunggulan dari sambungan ini adalah kemampuannya untuk menggabungkan berbagai kombinasi material utama yang berbeda. Contohnya, baja dapat disambung dengan tembaga, di mana campuran tembaga memiliki titik leleh sekitar 450 hingga 1200°C.

Pemanasan bahan utama dapat dilakukan menggunakan api, koil induksi, oven pemanas, atau salt bath. Permukaan material dibersihkan dengan menggunakan fluks atau dengan cara mengurangi pengaruh atmosfer. Logam *brazing* biasanya mengalir ke dalam celah sambungan melalui gaya tegangan permukaan yang dikenal sebagai aksi kapiler (*capillary action*),

Beberapa jenis sambungan *brazing* dapat dilihat seperti pada Gambar di bawah ini (Sinaga, 2012)



Gambar 2.5 Jenis Sambungan *Brazing*

Sumber: ( sinaga, 2012)

Menurut Ernawan (2019), *brazing* memiliki banyak keuntungan, antara lain sebagai berikut:

- a. Sambungan yang dihasilkan melalui proses *brazing* memiliki kekuatan yang tinggi.
- b. Pada logam dan baja non-besi, kekuatan tarik sambungan yang dibuat dengan benar sering kali melebihi kekuatan logam yang disambungkan.
- c. Proses *brazing* biasanya mudah dan cepat dilakukan, tergantung pada keterampilan operator.
- d. Metode *brazing* memungkinkan penggabungan logam yang berbeda, sehingga dapat dengan mudah menyambungkan besi dengan logam nonferrous, serta logam dengan titik leleh yang sangat bervariasi.

#### **D. Filler Metal**

Logam pengisi atau (*filler*) yang berbentuk batang kawat sudah umum dipakai oleh para juru las, logam pengisi atau filler berperan penting dalam *brazing* sebagai bahan tambah. Proses *brazing* dilakukan dengan memanaskan sambungan hingga mencapai suhu di mana logam pengisi (*filler metal*) meleleh. Logam pengisi tersebut kemudian mengalir ke dalam celah antara logam dasar melalui gaya kapiler, lalu mengeras saat mendingin sehingga membentuk sambungan yang kuat dan tahan lama.

##### *1. Filler Metal*

*Filler* perak di standarisasikan terdiri atas tembaga (Cu), perak (Ag), seng (Zn), mangan (Mn), nikel (Ni), dan lain-lain. Beberapa jenis ada yang mengandung kadmium (Cd) untuk menurunkan titik lebur. Makin tinggi kandungan Cd, makin rendah suhu kerja *brazing*. Suhu kerja paling rendah 610°C dimiliki jenis *filler* L-Ag 40 Cd (Suharisman, 2011). Berikut ini adalah sifat-sifat dari *filler* perak:

- a. Sangat encer dan mengalir dengan kecepatan tinggi ke dalam celah
- b. Jalur hasil penyambungan sangat kuat, liat, tahan karat, dan putih
- c. Dengan memperhatikan sifat jenis *filler* ini, *filler* perak cocok untuk *brazing* berbagai logam berat.

## 2. Kriteria Pemilihan *Filler* Metal

Untuk memilih *filler* metal yang tepat menurut (Watanabe *et al.*, 2011) pemilihan *filler metal brazing* harus memiliki titik leleh yang lebih rendah dibandingkan logam induk yang akan di sambung. Selain itu, logam pengisi tersebut tidak hanya harus memiliki kemampuan basah (*wetting*) yang baik dan mampu menghasilkan sambungan dengan sifat mekanik yang unggul, tetapi juga harus memiliki kemampuan untuk mengalami deformasi plastis.

## 3. Jenis *Filler Metal* yang Digunakan pada Penelitian ini

### a. *Filler* BAg-24



Gambar 2.6 *Filler* BAg-24

Sumber: (American Welding Society).

BAg-24 adalah salah satu paduan pengisi *brazing* berbasis perak (Ag) yang diklasifikasikan dalam standar AWS (American Welding Society) untuk *filler* berbasis perak BAg-24 (Ag-Cu berbasis perak) memiliki keuletan tinggi, daya basah baik, dan menghasilkan lapisan intermetalik tipis. Komposisi umumnya mencakup Ag (Perak): 50%, Cu (Tembaga): 34% dan Zn (Seng): 16%.

#### 1) Titik Leleh *Filler* BAg-24

Rentang suhu leleh: 690 - 780°C. Titik leleh yang lebih rendah daripada paduan berbasis tembaga murni membuatnya ideal untuk proses *brazing* pada material yang rentan terhadap panas, seperti titanium.

#### 2) Sifat Utama *Filler* BAg-24

a) Kemampuan *wetting* yang tinggi terhadap berbagai logam, termasuk baja karbon rendah dan titanium, khususnya jika didukung oleh *flux* atau lingkungan vakum.

- b) Kekuatan mekanis yang memadai pada sambungan, disertai dengan tingkat keuletan yang relatif baik.
- c) Ketahanan terhadap korosi yang cukup, walaupun tidak sekuat paduan berbasis nikel.
- d) Konduktivitas dan termal yang tinggi, yang didukung oleh kandungan perak.

b. *Filler* BCu-1

*Filler* BCu-1 adalah filler berbasis Tembaga murni dengan komposisi Cu 99,9%, p 0,15-0,0140%, pb 0,02%, fe0,05%. *Filler* BCu-1 memiliki titik di rentang suhu 900°C. yang lebih rendah dari titik leleh logam induk yang akan di *brazing*.

1. Sifat utama *filler* BCu-1

- a) Bebas kadmium (*Cd-free*) sehingga lebih aman bagi lingkungan dan Kesehatan
- b) Memiliki sifat alir (*fluidity*) yang sangat baik sehingga dapat meresap ke celah sambungan kecil
- c) Bersifat self-fluxing pada tembaga, tetapi tidak pada baja atau titanium Fosfor dalam BCu-1 berfungsi sebagai agen deoksidasi saat proses *brazing* pada sambungan tembaga-tembaga dalam atmosfer netral atau inert, sehingga tidak memerlukan fluks tambahan. Namun, pada baja karbon, baja tahan karat, atau titanium, BCu-1 tidak memiliki kemampuan membasahi (*wettability*) yang cukup tanpa fluks aktif atau interlayer, dan berisiko membentuk fasa rapuh.
- d) Kekuatan sambungan tinggi pada sambungan tembaga-tembaga, tetapi rapuh pada logam dissimilar Ketahanan korosi lebih baik dibanding paduan tembaga murni berkat kandungan peraknya

4. Pengaruh *Filler Metal*

Logam pengisi *brazing* (*filler metal*) memegang peranan penting dalam menentukan kualitas sambungan, karena komposisinya langsung memengaruhi mikrostruktur antarmuka serta sifat mekanik hasil *brazing*. Umumnya, *filler* yang kaya akan unsur perak atau tembaga memiliki kemampuan basah (*wettability*)

yang baik sehingga dapat meresap secara merata ke dalam celah sambungan. Namun, pada sambungan logam reaktif seperti titanium atau baja karbon tinggi, interaksi difusi antara *filler* dan logam dasar dapat membentuk fase intermetalik yang keras dan rapuh.

Jika lapisan *intermetalik* ini terlalu tebal, sambungan cenderung menjadi getas dan kekuatannya menurun. Oleh karena itu, sifat mekanik sambungan *brazing* termasuk kekuatan tarik, kekuatan geser, dan ketangguhan sangat dipengaruhi oleh mikrostruktur yang terbentuk akibat pemilihan *filler* yang tepat. Penggunaan *filler* yang sesuai mampu menghasilkan sambungan dengan kekuatan mendekati material induk, sementara *filler* yang kurang tepat dapat menimbulkan lapisan rapuh yang merugikan kinerja sambungan.

#### **E. Sifat Mekanik Sambungan *Brazing***

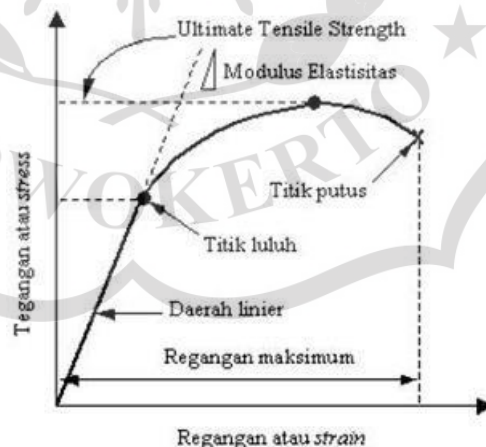
Sifat mekanik didefinisikan sebagai ukuran kemampuan suatu bahan untuk membawa atau menahan gaya atau tegangan yang diberikan padanya. Saat menahan beban, atom-atom atau struktur molekul bahan berada dalam keadaan kesetimbangan. Gaya ikatan pada struktur tersebut menahan setiap usaha yang berupaya mengganggu kesetimbangan ini, seperti gaya luar atau beban yang diterapkan. (Hasibuan, 2024). Klasifikasi sifat mekanik material meliputi di bawah ini:

- a. Kekuatan (*Strength*): Sifat suatu material ini diukur dari tegangan maksimum yang dapat ditahan saat material mengalami regangan sebelum mengalami kerusakan. Nilai kekuatan material tersebut tidak dapat ditetapkan secara tunggal karena perilaku material bervariasi tergantung pada jenis pembebanan dan kondisi beban yang diterapkan.
- b. Kekerasan (*Hardness*): Sifat bahan yang berkaitan dengan kekerasan dapat diuji melalui berbagai metode, tergantung pada prinsip pengujian yang digunakan. Dalam bidang teknik, khususnya pada logam, kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan material untuk menahan indentasi, penetrasi, atau abrasi, atau dengan kata lain, sebagai ketahanan logam terhadap deformasi plastis.

- c. Elastisitas (*Elasticity*): Material yang memiliki sifat elastisitas mampu kembali ke bentuk atau ukuran semula setelah beban yang diberikan dihilangkan. Namun, penentuan nilai elastisitas yang tepat sangatlah sulit. Oleh karena itu, pengukuran biasanya hanya difokuskan pada penentuan batas elastisitas atau rentang elastisitas dari material tersebut.
- d. Ketahanan (*Toughness*): Kemampuan bahan menyerap energi dan menahan patah saat mengalami beban benturan.
- e. Keuletan (*Ductility*): Kemampuan bahan untuk mengalami deformasi plastis tanpa patah.

### 1. Uji Tarik

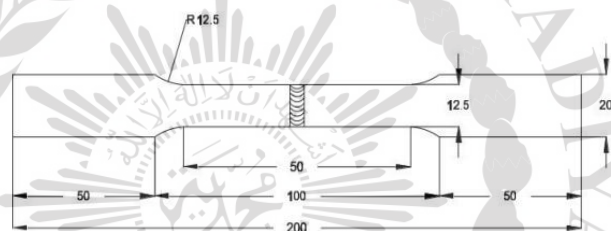
Uji tarik dilakukan untuk memperoleh data mengenai kekuatan sambungan *lap joint* yang dibuat melalui metode *brazing* dalam menahan beban yang diberikan. Beban pada uji tarik diberikan secara kontinu dengan peningkatan yang perlahan. Kurva hasil pengujian akan memperlihatkan nilai kekuatan tarik material. Kekuatan tarik didefinisikan sebagai kemampuan suatu bahan dalam menahan beban yang bekerja sejajar dengan sumbu bahan hingga menyebabkan terjadinya putus tarik (Saputro, 2019). Berikut adalah kurva Tegangan dan Regangan yang di tunjukan oleh Gambar 2.7



Gambar 2.7 Kurva tegangan dan regangan

Sumber: (Santoso, 2006)

Tegangan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material dalam menahan gaya luar yang bekerja padanya, yang dinyatakan sebagai besarnya gaya per satuan luas. Untuk menganalisis gaya yang bekerja pada suatu bagian benda, digunakan persamaan keseimbangan statis sehingga dapat diperoleh hubungan antara gaya luar yang membebani konstruksi dengan gaya internal yang timbul sebagai reaksi terhadap beban tersebut. Pengujian tarik dilakukan menggunakan mesin uji tarik atau *Universal Testing Machine* (UTM) sesuai standar ASTM E8. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan kekuatan tarik bahan komposit maupun sambungan yang diuji. Proses pengujian dilaksanakan dengan menggunakan *Universal Tensile Machine* (UTM). Berikut adalah contoh spesimen uji tarik ASTM E8 yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Spesimen Uji Tarik ASTM E8

Sumber: (Setyarto, 2023)

Tegangan merupakan salah satu jenis tegangan yang bertindak secara paralel atau tangensial terhadap permukaan suatu material. Sementara itu, kekuatan didefinisikan sebagai kemampuan material untuk menahan gaya yang diterapkan sejajar dengan permukaannya hingga mencapai titik kegagalan (Renggajati, 2021). Perhitungan tegangan dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan dibawah ini:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot c}$$

Keterangan:

$\sigma$  = Tegangan Tarik (Mpa)

F = Beban (Kgf)

A = Luas penampang ( $mm^2$ )

b = Lebar (mm)

C = Tebal (mm)

## 2. Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan pada material bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan bahan uji. Kekerasan material didefinisikan sebagai kemampuan suatu bahan untuk menahan tekanan dari material lain yang lebih keras. Tekanan ini dapat berupa pantulan, penggosokan (starching), atau indentasi yang dilakukan oleh alat penguji pada permukaan benda yang diuji (Anam, 2018).

Pengujian kekerasan pada logam dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu metode goresan, metode penekanan, dan metode dinamik. Sedangkan untuk menentukan nilai kekerasan, terdapat tiga cara yang umum digunakan, yaitu metode Brinell, Vickers, dan Rockwell (Dinov, 2021).

Pengujian kekerasan pada seluruh spesimen dilakukan menggunakan metode Rockwell skala B (HRB) sesuai dengan standar ASTM E18. Metode ini menggunakan indenter berupa bola baja berdiameter 1/16 inch dengan beban mayor sebesar 100 kgf dan beban minor 10 kgf. Nilai kekerasan yang diperoleh menunjukkan ketahanan material terhadap penetrasi indenter pada permukaan spesimen.

Pengujian dilakukan pada beberapa lokasi pengamatan, yaitu Base Metal (BM), dan Weld Metal (WM). Pada setiap lokasi tersebut dilakukan tiga kali pengukuran, dengan jarak antar titik pengujian minimal 2 mm guna menghindari pengaruh deformasi dari pengujian sebelumnya. Nilai kekerasan yang dilaporkan merupakan rata-rata aritmetika dari ketiga hasil pengukuran pada masing-masing zona. Metode Rockwell dipilih karena mampu memberikan hasil pengujian yang cepat, langsung terbaca, serta sesuai untuk material logam dengan tingkat kekerasan rendah hingga menengah, sehingga efektif untuk membandingkan variasi kekerasan antar zona hasil pengelasan.

Berikut merupakan gambar *hardness rockwell* yang ada pada Gambar 2.9 di bawah ini:



Gambar 2.9 Alat Uji Kekerasan Rockwell

Sumber : (Alibaba.com)

Dibawah ini adalah rumus untuk mencari nilai kekerasan rockwel dengan skala HRB.

$$HRB = N - \frac{h}{0,002}$$

Keterangan :

h = kedalaman penetrasi permanen (mm)

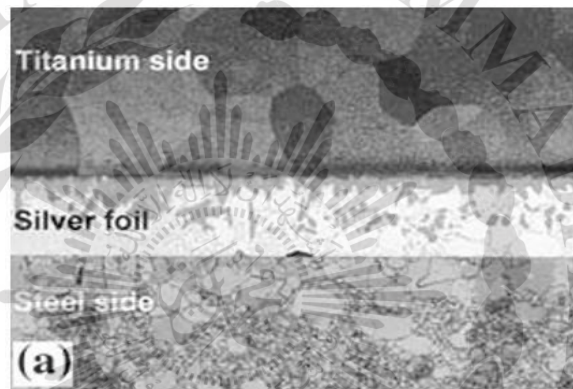
0,002 mm = satuan kedalaman Rockwell

N = konstanta skala

### 3. Uji Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro merupakan proses untuk mengenali susunan fasa dalam suatu spesimen atau benda uji. Salah satu cara untuk mengamati struktur bahan adalah melalui teknik metalografi menggunakan mikroskop optik. Prosedur ini melibatkan pencelupan sampel ke dalam larutan nital selama sekitar 5 detik, kemudian sampel dibersihkan dengan air dan alkohol, lalu dikeringkan. Setelah kering, struktur mikro diamati dengan pembesaran 200 kali menggunakan mikroskop optik merek Olympus (Samodro, 2024).

Berikut merupakan gambar hasil uji mikro struktur yang diuraikan pada Gambar 2. 10.



Gambar 2.10 Hasil Uji Mikro Struktur

Sumber: (Elrefaey dan Tillmann, 2007).

Untuk mengamati struktur bahan melalui pembesaran menggunakan mikroskop khusus metalografi. Dengan uji struktur mikro, kita dapat mengamati bentuk dan ukuran kristal logam, kerusakan logam akibat proses deformasi, efek perlakuan panas, serta perbedaan komposisi dalam material. Pengujian ini sangat penting untuk memahami sifat mekanik dan karakteristik material secara mendetail (Prayoga, 2025).

### F. Studi Terdahulu dan Celah Penelitian

Proses penyambungan logam yang tidak sejenis, khususnya antara titanium dan baja karbon rendah, menghadirkan tantangan metalurgis yang signifikan dalam rekayasa material. Perbedaan besar dalam koefisien muai termal,

afinitas terhadap oksigen, serta kecenderungan membentuk senyawa intermetalik rapuh menyebabkan sambungan antara kedua material ini rentan terhadap keretakan dan degradasi kekuatan mekanik. Dalam konteks tersebut, *brazing* sebagai metode penyambungan padat-cair-menjadi alternatif menarik karena memungkinkan penyambungan pada suhu di bawah titik leleh substrat, sehingga meminimalkan distorsi termal dan perubahan fasa pada material dasar.

(Studi awal oleh Wada dkk. 1967) mengevaluasi penggunaan *filler* berbasis perak murni untuk *brazing* titanium. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun sambungan bersifat ulet, kekuatan mekanisnya rendah. Peningkatan kekuatan dicapai dengan penambahan *Cu* pada sistem *Ag-Cu*; namun, kandungan *Cu* > 10% memicu pembentukan fase intermetalik *Ti-Cu* yang rapuh. Sebaliknya, penambahan *Ni* sekitar 2-3% terbukti efektif dalam menekan segregasi *Cu* dan meningkatkan homogenitas struktur sambungan sehingga kekuatan geser dapat mencapai ~294 MPa.

(Elrefaey & Tillmann 2007) mengkaji lebih lanjut sambungan antara *commercially pure titanium (CP-Ti)* dan baja karbon rendah menggunakan *filler* berbasis *Ag* dan *Cu*. Mereka menemukan bahwa kekuatan geser sambungan sangat dipengaruhi oleh lebar tumpang tindih (*overlap length*) dan jenis *filler*. Interaksi metalurgis antara *filler* dan substrat menghasilkan senyawa intermetalik seperti *CuTi*, *Cu<sub>2</sub>Ti*, dan *FeTi* pada sistem *Ag-Cu*, serta *TiCu* dan *TiCuFe* pada sistem *Cu* murni. Fase-fase ini, meskipun diperlukan untuk ikatan antarmuka, umumnya bersifat getas dan menjadi lokasi preferensial inisiasi retak.

Penelitian lanjutan, (Elrefaey & Tillmann 2010) membandingkan tiga komposisi *filler*: *Cu-12Mn-2Ni*, *Ag-34Cu-ZTi*, dan *Ag-27.25Cu-12.5In-1.25Ti*. Hasil menunjukkan bahwa sistem *Ag-Cu-In-Ti* memberikan kekuatan geser tertinggi (113 MPa pada 750 °C), yang dikaitkan dengan lapisan intermetalik yang lebih tipis dan kontinyu. Dalam kondisi ini, fraktur terjadi di dalam logam pengisi yang relatif ulet, bukan pada antarmuka yang dikuasai oleh IMC (*intermetallic compounds*) rapuh-suatu indikator kualitas sambungan yang lebih baik. Strategi modifikasi komposisi *filler* juga dieksplorasi oleh (Takada dkk. 1991) melalui penambahan *Sn* pada sistem *Ag-Al*. *Sn* berperan sebagai *melting point depressant*

sekaligus peningkat kemampuan basah (*wettability*). Komposisi optimal Ag-20AL 2.5Sn menghasilkan kekuatan tarik hingga 290 MPa pada suhu *brazing* yang jauh di bawah suhu transisi  $\alpha$ - $\beta$  titanium (~882 °C), sehingga mencegah pertumbuhan butir berlebihan dan degradasi sifat mekanik substrat.

Sementara itu, (Watanabe dan Tamaki 2005) mengembangkan *filler* komersial BAg-7 dengan penambahan Ni (1-5%) untuk *brazing* CP-Ti dalam atmosfer inert (Ar). Penambahan Ni meningkatkan difusi antarunsur dan memperbaiki sudut basah, yang berdampak langsung pada peningkatan kekuatan tarik. Pada konsentrasi 3% Ni, kekuatan tarik meningkat -20% dibandingkan BAg-7 standar, dan kegagalan terjadi pada logam induk-bukan pada sambungan menunjukkan bahwa integritas sambungan telah melebihi kekuatan material dasar.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa kinerja sambungan *brazing* titanium-baja sangat ditentukan oleh:

1. Komposisi kimia *filler*
2. Ketebalan dan jenis senyawa intermetalik yang terbentuk di antarmuka, serta
3. Kemampuan *filler* untuk membasahi substrat secara merata.

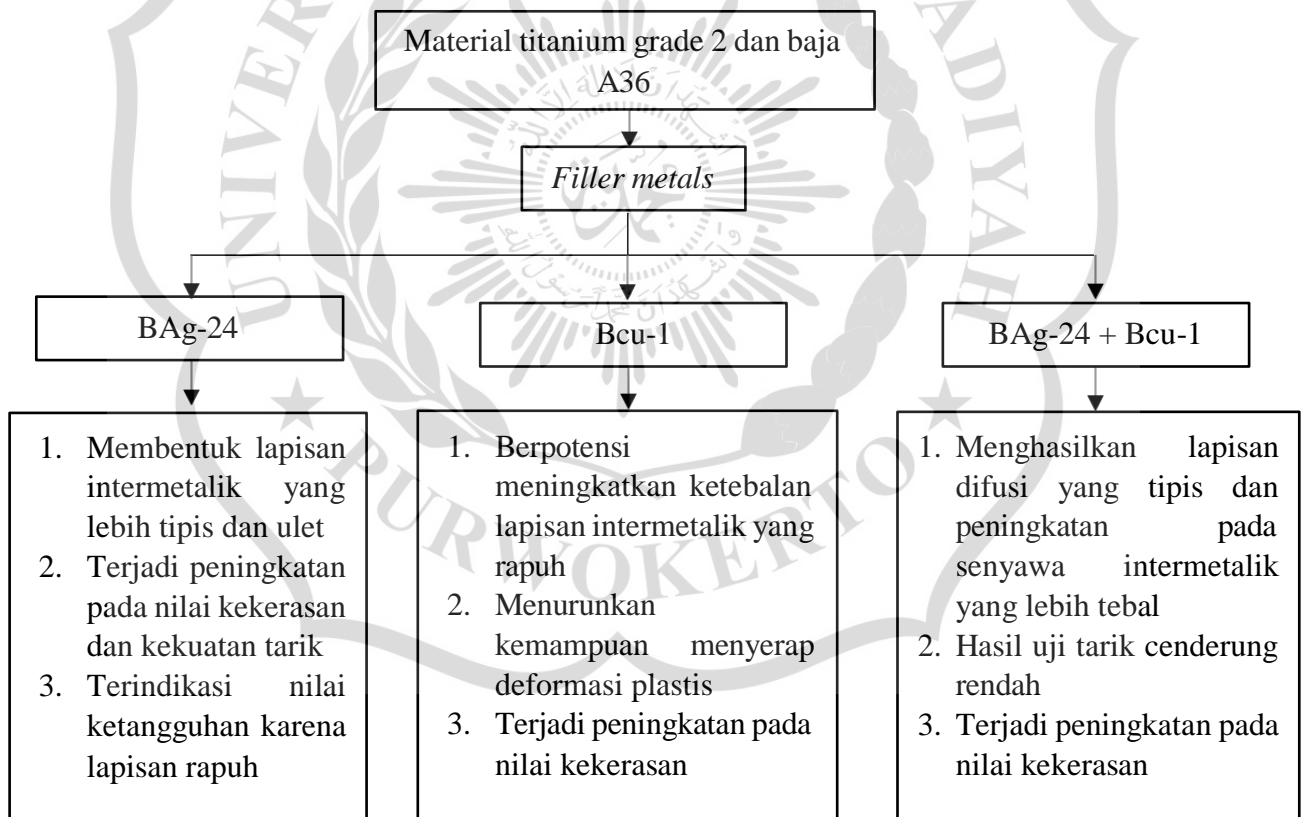
*Filler* berbasis Ag-Cu umumnya memberikan hasil lebih baik dibanding sistem Cu murni, terutama bila dimodifikasi dengan unsur *mikroalloying* seperti Ni, In, atau Sn yang mampu menekan pertumbuhan IMC dan meningkatkan stabilitas termal sambungan. Namun demikian, mayoritas penelitian sebelumnya menggunakan titanium paduan (misalnya Ti-6Al-4V) sebagai substrat, sedangkan studi terhadap pure titanium Grade 2-yang memiliki kemurnian tinggi dan sifat deformasi yang berbeda-masih sangat terbatas.

Selain itu, analisis yang dilakukan umumnya bersifat parsial: hanya menguji kekuatan tarik atau geser tanpa menghubungkannya secara langsung dengan profil kekerasan *Rockwell* dan evolusi mikrostruktur di sepanjang zona sambungan. Korelasi antara distribusi kekerasan, morfologi IMC, dan respons mekanik merupakan kunci dalam memahami mekanisme kegagalan dan mengoptimalkan parameter proses. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan

1. Menggunakan pure titanium *Grade 2* sebagai *substrat*,
2. Membandingkan tiga variasi *filler* BAg-24, BCu-1, dan kombinasi keduanya dalam proses brazing terhadap baja karbon rendah
3. Menganalisis secara terintegrasi pengaruh filler terhadap mikrostruktur antarmuka, profil kekerasan *Rockwell*, dan kekuatan tarik sambungan. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyediaan data eksperimental komprehensif yang menghubungkan parameter proses, karakteristik material, dan performa mekanik-sehingga dapat menjadi acuan dalam perancangan sambungan hibrida titanium-baja untuk aplikasi struktural di bidang aerospace, otomotif, dan energi.

### G. Kerangka penelitian

Gambar kerangka penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 2.11 di bawah ini:



Gambar 2.11 kerangka penelitian

## H. Hipotesis

Berdasarkan tinjauan literatur dan prinsip metalurgi sambungan logam tak sejenis, diajukan hipotesis sebagai berikut:

1. Penggunaan variasi logam pengisi berbasis Ag–Cu (BAg-24, BCu-1, dan kombinasi keduanya) dalam proses TIG *brazing* antara *pure titanium Grade 2* dan baja karbon rendah. A 36 berpengaruh signifikan terhadap morfologi lapisan *intermetalik*, distribusi kekerasan *Vickers*, serta sifat mekanik sambungan. Secara spesifik.
2. *Filler* BAg-24 (Ag–28Cu), yang memiliki komposisi mendekati eutektik, diperkirakan akan membentuk matriks yang relatif homogen dan menghasilkan profil kekerasan yang lebih merata, sehingga memberikan respons deformasi yang lebih ulet. Sebaliknya.
3. *Filler* BCu-1 (Cu-rich) berpotensi mempercepat pembentukan fasa *intermetallic* seperti  $Ti_2Cu$  di *Heat Affected Zone* titanium selama proses TIG *brazing*, yang dapat meningkatkan kekerasan lokal namun menurunkan kemampuan menyerap deformasi plastis.
4. Sementara itu, kombinasi BAg-24 dan BCu-1 diperkirakan akan menghasilkan distribusi unsur yang lebih kompleks, dengan kemungkinan terbentuknya gradien kekerasan yang tidak seragam di sepanjang antarmuka.
5. Berdasarkan prinsip metalurgi sambungan logam tak sejenis, filler BAg-24 diharapkan memberikan keseimbangan yang lebih baik antara kekuatan dan ketangguhan dalam sambungan *dissimilar* Ti–A36 yang dihasilkan melalui proses TIG *brazing* dalam atmosfer argon."