

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Kuningan

##### 2.1.1. Pengertian Kuningan

Kuningan merupakan salah satu jenis logam paduan *alloy* yang dibentuk dari dua unsur utama, yaitu tembaga (Cu) sebagai unsur dasar dan seng (Zn) sebagai unsur paduan. Dalam klasifikasi metalurgi, kuningan tergolong dalam kelompok *copper-based alloys* (paduan berbasis tembaga) yang memiliki karakteristik mekanik dan kimia yang beragam, tergantung pada komposisi unsur-unsurnya. Umumnya, kuningan mengandung antara 55% hingga 95% tembaga, dengan sisanya terdiri dari seng dan elemen tambahan lainnya seperti timbal (Pb), timah (Sn), besi (Fe), silikon (Si), mangan (Mn), fosfor (P), arsenik (As), atau antimon (Sb) [7].

Daya tarik utama kuningan sebagai material teknik terletak pada sifatnya yang dapat direkayasa *engineered*. Sifat-sifat seperti kekuatan tarik, keuletan, ketahanan aus, ketahanan korosi, dan kemudahan pemesinan dapat dioptimalkan melalui pengaturan komposisi kimia serta penerapan perlakuan termal dan mekanik yang tepat. Dari sisi estetika, kuningan memiliki warna kuning keemasan yang khas, yang dapat berubah menjadi lebih kemerahan atau keperakan tergantung pada kadar seng. Pada kadar seng rendah (<20%), warnanya cenderung merah keemasan menyerupai tembaga murni, sedangkan pada kadar seng yang lebih tinggi (>35%), warna kuningan menjadi lebih terang hingga mendekati putih keperakan.

Sifat mekanik kuningan menunjukkan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan. Penambahan seng dalam struktur kristal tembaga mampu meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam tanpa mengurangi sifat plastisitas yang penting dalam proses pembentukan logam. Oleh karena itu, kuningan sering diaplikasikan pada proses deformasi dingin seperti penekukan, penarikan kawat, dan pembentukan presisi. Selain itu, kuningan sangat cocok untuk proses pengecoran karena viskositasnya rendah saat dalam fase cair dan tidak mudah teroksidasi secara berlebihan saat dituangkan ke dalam cetakan [8].

Dari aspek konduktivitas, meskipun tidak setinggi tembaga murni, kuningan tetap memiliki kemampuan menghantarkan panas dan listrik yang cukup baik. Hal ini menjadikannya cocok untuk digunakan dalam komponen kelistrikan, konektor, dan sistem perpipaan yang memerlukan kombinasi antara konduktivitas, kekuatan, dan ketahanan korosi. Secara kimia, kuningan memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap korosi akibat atmosfer, air laut, dan bahan kimia ringan. Oleh karena itu, kuningan banyak digunakan pada aplikasi kelautan seperti *fitting* kapal, katup, pelapis, dan sambungan pipa [9].

Dengan sifat yang fleksibel, ekonomis, dan tahan lama, kuningan telah menjadi salah satu material utama di berbagai bidang seperti industri otomotif, arsitektur, peralatan rumah tangga, sistem kelistrikan, hingga kerajinan logam. Kombinasi antara performa teknik, ketahanan lingkungan, dan nilai estetika menjadikan kuningan sebagai logam paduan yang sangat kompetitif dalam pasar manufaktur global [7].



## 2. Kuningan Alpha

Jenis kuningan yang hanya mengandung fasa alfa, dimana kandungan sengnya relatif rendah biasanya kurang dari 35%. Kuningan ini lunak, mudah dibentuk, dan memiliki kelenturan yang baik. Digunakan untuk produk yang membutuhkan sifat plastisitas tinggi.

## 3. Kuningan Cartridge

Paduan kuningan yang umumnya mengandung sekitar 70% tembaga dan 30% seng. Dinamai "Cartridge" karena sering digunakan untuk pembuatan selongsong peluru. Kuningan ini mudah dibentuk dan memiliki ketahanan korosi yang baik.

## 4. Kuningan Nikel

Kuningan yang mengandung nikel sebagai unsur paduan tambahan selain tembaga dan seng. Penambahan nikel meningkatkan ketahanan korosi, kekuatan mekanik, dan kestabilan suhu paduan tersebut.

## 5. Kuningan Aich

Jenis kuningan yang mengandung aluminium sebagai unsur tambahan. Penambahan aluminium meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi, terutama terhadap air laut.

## 6. Kuningan Alumunium

Paduan tembaga-seng yang mengandung aluminium dalam jumlah tertentu. Sifatnya lebih tahan terhadap korosi dan memiliki kekuatan mekanik yang lebih baik dibanding kuningan biasa.

## 7. Kuningan Umum

Jenis kuningan yang paling sering digunakan dan diproduksi secara massal, dengan kandungan seng biasanya antara 30% sampai 40%. Memiliki sifat mekanik yang baik dan tahan korosi, digunakan dalam berbagai aplikasi sehari-hari.

#### 8. Kuningan Tinggi Paduan

Kuningan dengan kandungan seng yang tinggi lebih dari 40%, serta unsur paduan lain yang lebih banyak. Memiliki kekuatan mekanik dan kekerasan tinggi, namun kelenturannya menurun. Biasanya digunakan untuk komponen mesin yang membutuhkan ketahanan tinggi.

#### 9. Kuningan Rendah Paduan

Paduan kuningan dengan kandungan seng rendah biasanya kurang dari 30% dan sedikit atau tanpa unsur paduan lain. Memiliki sifat lunak dan mudah dibentuk, cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kelenturan tinggi.

#### 10. Kuningan Mangan

Paduan kuningan yang mengandung mangan sebagai unsur tambahan. Mangan meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan aus, sering digunakan pada aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap gesekan.

#### 11. Kuningan Merah

Jenis kuningan dengan kandungan tembaga yang sangat tinggi biasanya di atas 85%, sehingga warnanya mendekati merah tembaga murni. Memiliki kelenturan dan ketahanan korosi yang sangat baik, biasa digunakan untuk alat musik dan perhiasan [10].

### 2.1.3. Paduan Kuningan

Secara ilmiah, istilah "paduan kuningan" merujuk pada material hasil pencampuran antara tembaga (Cu) dan seng (Zn) dalam proporsi tertentu, yang menghasilkan suatu sistem logam dengan struktur mikro dan sifat fisik serta mekanik yang berbeda dari logam murninya. Salah satu karakteristik terpenting dari paduan ini adalah terbentuknya fase-fase kristal tertentu seperti fase  $\alpha$  dan  $\beta$ , yang masing-masing memiliki pengaruh berbeda terhadap performa logam. Menurut, paduan kuningan dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama berdasarkan struktur mikronya, yaitu kuningan alfa ( $\alpha$ ) dan kuningan beta ( $\beta$ ) [11] [9].

Kuningan alfa didominasi oleh fase  $\alpha$ , yaitu larutan padat seng dalam tembaga dengan struktur kristal FCC (face-centered cubic). Fase ini memiliki keuletan tinggi, sifat kerja dingin yang baik, dan stabilitas dimensi yang tinggi. Fase  $\alpha$  biasanya terbentuk pada paduan dengan kandungan Zn kurang dari  $\pm 35\%$ . Sebaliknya, kuningan beta terdiri dari fase  $\beta$  yang muncul pada kandungan Zn lebih tinggi, dengan struktur BCC (body-centered cubic) yang lebih keras namun lebih getas dibandingkan fase  $\alpha$ . Fase  $\beta$  memiliki kekuatan tarik yang tinggi tetapi tidak cocok untuk deformasi dingin, karena kerapuhan strukturnya [9].

Pada suhu sekitar  $902\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dalam diagram fasa Cu-Zn terjadi transformasi peritektik di mana fasa cair bereaksi dengan fasa padat  $\alpha$  untuk membentuk fasa  $\beta$ . Dalam kondisi pendinginan cepat (seperti pada pengecoran industri), sering kali fase  $\beta$  tidak sempat terbentuk karena larutan padat fasa  $\alpha$  membeku lebih cepat. Hal ini menyebabkan struktur

mikro akhir didominasi oleh fasa  $\alpha$ , yang secara mekanis lebih stabil dan ulet. Oleh karena itu, paduan dengan Zn sekitar 39% setelah perlakuan panas umumnya mempertahankan struktur homogen  $\alpha$  [9].

Paduan kuningan juga sering dimodifikasi dengan penambahan unsur mikro seperti timbal (Pb) untuk meningkatkan kemampuan mesinabilitas, atau timah (Sn) untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan keausan. Unsur seperti arsenik (As) atau antimon (Sb) kadang ditambahkan pada paduan dengan kadar Zn tinggi untuk mencegah dezincification, yaitu korosi selektif terhadap Zn. Modifikasi ini dilakukan sesuai dengan kebutuhan spesifik suatu aplikasi [7].

Dalam praktik manufaktur, pemahaman terhadap struktur mikro paduan kuningan sangat penting dalam menentukan metode pemrosesan yang tepat, seperti pengecoran, pengerolan, atau perlakuan panas. Dalam konteks penelitian dan pengembangan material teknik, pengaruh variabel seperti suhu tuang, laju pendinginan, dan kandungan paduan menjadi fokus utama karena mempengaruhi pembentukan fasa dan ukuran butir. Misalnya, peningkatan suhu pengecoran dapat memperbesar proporsi fase  $\beta$  dan mengurangi kekerasan material. Sebaliknya, pada suhu yang lebih rendah (sekitar 900 °C), terbentuk butiran halus fase  $\alpha$  yang meningkatkan kekerasan hingga 395 HV [11].

## 2.2. Sifat Kimia dan Mekanik Paduan Kuningan

### 2.2.1. Sifat Kimia Paduan Kuningan

Secara kimia, paduan kuningan dikenal memiliki ketahanan korosi yang cukup baik dalam berbagai lingkungan, terutama di lingkungan yang tidak terlalu agresif. Ketahanan ini sebagian besar berasal dari kemampuan tembaga untuk membentuk lapisan oksida pelindung pada permukaan logam. Seng yang terkandung dalam paduan juga berperan penting dalam membentuk lapisan pasif yang memperkuat perlindungan terhadap korosi. Paduan kuningan dengan kandungan seng sedang memiliki lapisan oksida yang lebih stabil, sehingga lebih tahan terhadap korosi dibandingkan dengan paduan yang mengandung seng terlalu tinggi [12].

Namun, jika kadar seng melebihi 40%, struktur mikro paduan berubah dengan munculnya fasa  $\beta$  yang cenderung lebih rapuh dan kurang tahan terhadap korosi galvanik. Kondisi ini membuat paduan lebih rentan terhadap degradasi, khususnya saat terpapar lingkungan yang mengandung ion klorida atau bahan kimia agresif lainnya [13]. Oleh karena itu, dalam aplikasi tertentu seperti peralatan kelautan dan komponen mesin yang kontak langsung dengan air asin, paduan kuningan dengan kandungan seng rendah hingga sedang lebih disarankan.

Selain itu, kuningan juga kurang tahan terhadap serangan kimia dari asam kuat, seperti asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) dan asam nitrat ( $HNO_3$ ). Untuk meningkatkan ketahanan kimianya, unsur tambahan seperti timah (Sn), arsenik (As), dan antimon (Sb) sering ditambahkan dalam jumlah kecil. Timah berfungsi memperhalus struktur mikro dan meningkatkan ketahanan

terhadap korosi intergranular, sedangkan arsenik dan antimon membantu mencegah pembentukan senyawa berbahaya, seperti karbida, yang dapat memicu korosi lokal [12].

Secara umum, sifat kimia paduan kuningan menjadikannya material yang cocok untuk aplikasi di lingkungan sedang hingga agak korosif. Dengan pemilihan komposisi unsur tambahan yang tepat dan perlakuan panas yang sesuai, kuningan dapat digunakan secara luas, mulai dari komponen mesin, peralatan kelistrikan, hingga elemen dekoratif.

### **2.2.2. Komposisi Unsur Menggunakan SEM-EDX**

Scanning Electron Microscope (SEM) dan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) merupakan dua teknik karakterisasi material yang saling melengkapi. SEM berfungsi untuk mengamati morfologi permukaan, sedangkan EDX digunakan untuk mengetahui komposisi unsur pada suatu area tertentu dari sampel.

#### **a. Pengertian SEM-EDX**

SEM adalah alat mikroskopi elektron yang memanfaatkan berkas elektron untuk memperoleh citra permukaan material dengan perbesaran dan resolusi sangat tinggi. Berkas elektron ini menghasilkan sinyal berupa elektron sekunder (SE) dan elektron pantul (BSE) yang ditangkap oleh detektor untuk membentuk citra digital [14]. Citra yang dihasilkan mampu menunjukkan detail permukaan seperti retakan mikro, pori-pori, batas butir, dan struktur antar fasa.

Sementara itu, EDX adalah teknik analisis unsur berbasis sinar-X yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis dan konsentrasi unsur-unsur penyusun material. Ketika berkas elektron mengenai sampel, atom dalam material tersebut akan tereksitasi dan memancarkan sinar-X karakteristik. Sinar-X tersebut kemudian dianalisis oleh detektor untuk menentukan unsur kimia berdasarkan energi puncaknya [15].

#### **b. Prinsip kerja SEM-EDX**

Pada Scanning Electron Microscope (SEM), elektron-elektron dengan energi tinggi, biasanya dalam kisaran tegangan percepatan antara 5 hingga 30 kilovolt (kV), difokuskan dan ditembakkan ke permukaan sampel yang berada di dalam ruang vakum. Kondisi vakum sangat penting untuk mencegah hamburan elektron oleh molekul udara sehingga berkas elektron dapat mencapai permukaan sampel dengan presisi tinggi. Saat berkas elektron ini mengenai permukaan, terjadi interaksi dengan atom-atom penyusun material yang menyebabkan pelepasan beberapa jenis sinyal, termasuk elektron sekunder (SE) dan elektron pantul (Backscattered Electrons, BSE). Elektron sekunder adalah elektron dengan energi rendah yang berasal dari lapisan sangat tipis permukaan sampel, sehingga sinyal SE sangat sensitif terhadap kontur permukaan dan digunakan untuk membentuk citra topografi dengan resolusi tinggi. Sementara itu, elektron pantul merupakan elektron yang dipantulkan kembali dari inti atom dengan energi lebih tinggi dan memberikan kontras citra berdasarkan perbedaan nomor atom unsur penyusun sampel. Unsur dengan nomor atom yang lebih tinggi

akan tampak lebih terang pada citra BSE, sehingga metode ini sangat berguna untuk membedakan fasa atau material dengan komposisi berbeda pada permukaan sampel [16].

Di sisi lain, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) merupakan teknik analisis unsur yang memanfaatkan sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh atom-atom dalam sampel akibat interaksi dengan berkas elektron SEM. Ketika elektron dari SEM menumbuk atom, elektron kulit dalam dapat terlepas, kemudian elektron dari kulit luar akan mengisi posisi kosong tersebut, yang menyebabkan emisi sinar-X dengan energi spesifik yang unik untuk tiap unsur. Detektor EDX kemudian mengukur energi sinar-X ini dan menghasilkan spektrum energi yang menunjukkan puncak energi khas setiap unsur. Spektrum ini tidak hanya memungkinkan identifikasi kualitatif unsur-unsur penyusun, tetapi juga analisis kuantitatif kandungan unsur dalam bentuk persentase berat (%wt) maupun persentase atom (%at). Kombinasi SEM dan EDX sangat efektif untuk memperoleh informasi lengkap mengenai morfologi permukaan sekaligus komposisi kimia lokal pada area sampel yang sama, sehingga banyak digunakan dalam berbagai bidang penelitian material [14].

### **c. Tujuan dan manfaat penggunaan SEM-EDX**

Teknik Scanning Electron Microscope (SEM) yang dipadukan dengan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) merupakan metode analisis yang sangat penting dan banyak digunakan dalam penelitian serta pengembangan material. Kombinasi dua teknik ini

memungkinkan pengamatan secara simultan terhadap struktur permukaan dan komposisi kimia secara lokal pada sampel, sehingga memberikan informasi yang komprehensif dan mendalam mengenai karakteristik material yang diteliti. Berikut adalah beberapa tujuan dan manfaat utama dari penggunaan SEM-EDX dalam berbagai aplikasi penelitian material:

### 1. Mengamati Morfologi Permukaan

SEM menyediakan citra beresolusi tinggi yang mampu memperlihatkan detail morfologi permukaan material, seperti ukuran dan bentuk butir kristal, tekstur permukaan, adanya retakan mikro, porositas, oksidasi, serta batas antar fasa dalam material. Informasi ini sangat berguna untuk memahami struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanik dan fisik material, serta untuk mengevaluasi kualitas dan proses manufaktur.

### 2. Menganalisis Komposisi Unsur Utama dan Minor

Dengan integrasi EDX, analisis unsur kimia pada titik atau area spesifik permukaan sampel dapat dilakukan secara akurat. Teknik ini mampu mengidentifikasi unsur utama seperti tembaga (Cu), seng (Zn), dan besi (Fe), maupun unsur minor atau pengotor yang mungkin hadir dalam paduan logam. Informasi kuantitatif ini penting untuk verifikasi komposisi material, kontrol kualitas, dan studi pengaruh unsur minor terhadap sifat material.

### 3. Melakukan Mapping Unsur (*Elemental Mapping*)

SEM-EDX dapat melakukan pemetaan distribusi unsur secara spasial pada area tertentu dari permukaan sampel. Pemetaan ini memberikan gambaran visual yang menunjukkan sebaran dan konsentrasi unsur di berbagai wilayah material, yang berguna untuk mempelajari homogenitas paduan, segregasi unsur, serta proses difusi atau korosi.

#### 4. Mengidentifikasi Fasa Material

Dengan mengombinasikan citra morfologi dari SEM dan data komposisi unsur dari EDX, peneliti dapat mengidentifikasi berbagai fasa yang ada pada material. Hal ini sangat penting dalam analisis mikrostruktur logam paduan, keramik, maupun material komposit, karena fasa yang berbeda biasanya memiliki sifat mekanik dan kimia yang berbeda pula.

#### 5. Menganalisis Kegagalan Material

SEM-EDX banyak digunakan dalam studi kegagalan material, misalnya untuk menganalisis zona sambungan las, area korosi, oksidasi, atau cacat manufaktur. Dengan melihat perubahan morfologi dan komposisi kimia di area kegagalan, peneliti dapat menentukan penyebab kegagalan dan merumuskan langkah perbaikan yang tepat [16][14].

### 2.2.3. Sifat Mekanik Paduan Kuningan

Sifat mekanik paduan kuningan terutama ditentukan oleh kandungan seng dan perlakuan panas yang diberikan. Tiga parameter utama yang sering

diukur untuk mengetahui performa mekanik paduan ini adalah kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan regangan (*elongasi*).

1. Kekuatan tarik adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh material sebelum mengalami kegagalan atau putus. Pada paduan kuningan, kekuatan tarik cenderung meningkat seiring bertambahnya kandungan seng. Hal ini terjadi karena adanya mekanisme penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*), di mana atom Zn menggantikan posisi Cu dalam kisi kristal dan menghambat pergerakan dislokasi, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap deformasi.

Secara umum, nilai kekuatan tarik kuningan berada di kisaran 300 hingga 600 MPa, tergantung pada komposisi dan kondisi termal material [17].

Tujuan pengujian kekuatan tarik:

- a. Mengetahui batas maksimum ketahanan material terhadap tegangan tarik sebelum putus.
  - b. Menilai apakah kuningan hasil daur ulang masih memenuhi standar kekuatan struktural.
  - c. Digunakan untuk membandingkan performa mekanik material sebelum dan sesudah proses daur ulang.
2. Kekuatan luluh adalah tegangan pada saat material mulai mengalami deformasi plastis permanen. Semakin tinggi kekuatan luluh, semakin besar beban yang dapat ditahan oleh material tanpa mengalami perubahan bentuk yang tidak dapat kembali ke semula. Dalam paduan kuningan, kekuatan luluh juga meningkat dengan bertambahnya

kandungan seng karena efek penguatan mikrostruktur. Hal ini penting dalam aplikasi yang menuntut stabilitas bentuk dan ketahanan terhadap beban kerja berulang, seperti pada komponen mesin atau fitting pipa.

Tujuan pengujian kekuatan luluh:

- a. Menentukan batas elastis material, yaitu titik di mana deformasi elastis berubah menjadi plastis.
  - b. Memastikan bahwa material dapat digunakan dalam aplikasi dinamis tanpa deformasi permanen.
  - c. Mengukur performa bahan daur ulang dalam mempertahankan bentuk struktural saat bekerja. tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh material sebelum mengalami deformasi permanen.
3. Regangan adalah rasio perubahan panjang terhadap panjang awal yang mengindikasikan seberapa besar deformasi yang dapat ditoleransi oleh material sebelum patah. Regangan tinggi menunjukkan material bersifat ulet, sedangkan regangan rendah menunjukkan material getas. Dalam kuningan, peningkatan kadar seng cenderung menurunkan nilai regangan, karena bertambahnya kandungan fasa  $\beta$  yang bersifat lebih keras namun rapuh. Paduan kuningan alfa ( $\alpha$ ) dengan struktur kristal *face-centered cubic* (FCC) memiliki regangan yang tinggi, berkisar antara 10% hingga 40%, sehingga masih memungkinkan untuk dikerjakan dan dibentuk dengan proses cold working. Sebaliknya, paduan  $\beta$  menunjukkan regangan rendah, membuatnya kurang cocok untuk pembentukan [18].

Tabel 2.1. Komposisi Kimia dan Sifat Mekanik Umum Kuningan Menurut ASM [2]

Alloy type	UNS No.	Composition, %										Yield strength, 0.5%		Tensile strength		Elongation, %
		Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Al	Mn	Si	Other	MPa	ksi	MPa	ksi	
Yellow brass	C85200	72	1	3	24	..	..	..	..	..	..	90	13	262	38	35
	C85400	67	1	3	29	..	..	..	..	..	83	12	234	34	35	
	C85700	61	1	1	37	..	..	..	..	..	124	18	345	50	40	
	C85800	62	1	1	36	..	..	..	..	..	207	30	379	55	15	
	C87900	65	..	..	34	..	..	..	..	1	..	241	35	483	70	25
White brass	C99700	58	..	2	22	5	..	1	12	..	..	172	25	379	55	25
	C99750	58	..	1	20	..	..	1	20	..	..	221	32	448	65	30

Tabel 2.2. Komposisi Kimia dan Sifat Mekanik Umum Kuningan Menurut DIN [2]

Alloy Name	Mat No.	Composition	Delivery	Yield strength, 0.2% MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	HBN	Specific Weight Kg/dm <sup>3</sup>
G-CuZn15	2.0241.01	Cu: 83.0-87.5 As: 0.05-0.2 Zn: rest	SC	70	170	25	45	8.6
G-CuZn33Pb	2.0290.01	Cu: 63.0-67.0 Pb: 1.0-3.0 Zn: rest	SC	70	180	12	45	8.5
GD-CuZn37Pb GK-CuZn37Pb	2.0340.05 2.0340.02	Cu: 59.0-63.0 Al: 0.2-0.8 Pb: 0.5-2.5 Zn: rest	PDC GDC	120 90	280 280	4 20	75 70	8.5
G-CuZn38Al	2.0591.02	Cu: 59.0-64.0 Al: 0.1-0.8 Zn: rest	GDC	130	380	20	75	8.5
G-CuZn40Fe GZ-CuZn40Fe	2.0590.01 2.0590.03	Cu: 56.0-62.0 Fe: 0.2-1.2 Zn: rest	SC CC	130 150	300 325	15 15	75 85	8.6
GK-CuZn37Al1	2.0595.02	Cu: 60.0-64.0 Al: 0.3-1.8 Zn: rest	GDC	170	450	25	105	8.5
G-CuZn35Al1 GZ-CuZn35Al1 GK-CuZn35Al1	2.0592.01 2.0592.03 2.0592.02	Cu: 56.0-65.0 Al: 0.5-2.0 Fe: 0.5-2.0 Mn: 0.3-3.0 Zn: rest	SC CC GDC	170 200 200	450 500 475	20 18 18	110 120 110	8.6
G-CuZn34Al2 GZ-CuZn34Al2 GK-CuZn34Al2	2.0596.01 2.0596.03 2.0596.02	Cu: 55.0-66.0 Al: 1.0-3.0 Fe: 0.5-2.5 Mn: 0.3-4.0 Zn: rest	SC CC GDC	200 260 260	600 620 600	15 14 10	140 150 140	8.6
G-CuZn25Al5 GZ-CuZn25Al5 GK-CuZn25Al5	2.0589.01 2.0589.03 2.0589.02	Cu: 60.0-67.0 Al: 3.0-7.0 Fe: 1.5-4.5 Mn: 2.5-5.0 Zn: rest	SC CC GDC	450 450 480	750 750 750	8 5 8	180 190 180	8.2
G-CuZn15Si4 GD-CuZn15Si4 GK-CuZn15Si4	2.0492.01 2.0492.05 2.0492.02	Cu: 78.0-83.0 Si: 3.8-5.0 Zn: rest	SC PDC GDC	230 300 300	400 550 500	10 8 10	100 125 120	8.6

SC: Sand Casting

PDC: Pressure Die Casting

GDC: Gravity Die Casting

CC: Centrifugal Casting

### 2.3. Manfaat Lingkungan dari Daur Ulang Kuningan

Daur ulang paduan kuningan, yang terdiri dari tembaga (Cu) dan seng (Zn), memiliki peranan penting dalam upaya pelestarian lingkungan dan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Proses produksi kuningan dari bahan baku mentah umumnya membutuhkan konsumsi energi yang sangat besar serta menghasilkan emisi gas rumah kaca yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan oleh tahapan penambangan, pemurnian, dan peleburan logam yang intensif energi serta berdampak besar terhadap lingkungan. Oleh karena itu, daur ulang kuningan menjadi alternatif yang efektif untuk mengurangi dampak negatif tersebut [19][20].

Proses daur ulang kuningan dapat menghemat energi hingga 90% dibandingkan dengan produksi kuningan dari bijih tembaga dan seng yang masih mentah [20]. Penghematan energi ini secara langsung berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan gas rumah kaca lainnya yang menjadi penyebab utama perubahan iklim global. Dengan demikian, penerapan daur ulang kuningan tidak hanya mengurangi beban industri logam terhadap lingkungan, tetapi juga mendukung upaya global dalam mitigasi perubahan iklim [21].

Selain manfaat dari sisi pengurangan konsumsi energi dan emisi, daur ulang kuningan juga berkontribusi pada pengurangan ketergantungan terhadap sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui. Tembaga dan seng sebagai bahan utama kuningan merupakan logam yang keberadaannya terbatas di bumi dan penambangannya seringkali menimbulkan dampak ekologis negatif seperti degradasi lahan, pencemaran air, dan kerusakan

habitat [22]. Proses penambangan dan pemurnian yang tidak ramah lingkungan ini menimbulkan ancaman serius terhadap keberlanjutan ekosistem. Dengan mendaur ulang kuningan, kebutuhan terhadap penambangan dapat dikurangi secara signifikan, sehingga berperan dalam menjaga kelestarian sumber daya alam dan mengurangi tekanan terhadap lingkungan akibat aktivitas ekstraktif [20].

Lebih lanjut, daur ulang kuningan juga memiliki peranan penting dalam pengurangan limbah padat dan konservasi sumber daya air. Kuningan adalah logam yang tahan lama dan sulit terurai secara alami jika dibuang sembarangan di tempat pembuangan akhir (TPA). Penumpukan limbah kuningan di TPA tidak hanya menghabiskan ruang yang semakin terbatas, tetapi juga berpotensi mencemari tanah dan sumber air di sekitarnya [22]. Dengan mendaur ulang kuningan, jumlah limbah yang masuk ke TPA dapat dikurangi secara drastis, sehingga berkontribusi pada pengelolaan limbah yang lebih baik dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan [23].

Selain itu, pengurangan limbah logam ini juga membantu menekan produksi gas metana ( $\text{CH}_4$ ), yaitu gas rumah kaca yang jauh lebih kuat daripada karbon dioksida dan dihasilkan dari dekomposisi limbah organik di TPA. Walaupun kuningan bukan limbah organik, pengurangan limbah secara keseluruhan berkontribusi pada penurunan emisi gas metana dan gas rumah kaca lainnya yang berasal dari tumpukan sampah [21]. Oleh karena itu, daur ulang kuningan menjadi bagian integral dari strategi pengelolaan limbah padat yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, proses daur ulang kuningan membawa banyak manfaat mulai dari penghematan energi, pengurangan emisi gas rumah kaca, pelestarian sumber daya alam, hingga pengelolaan limbah yang lebih efektif. Dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan, penerapan teknologi dan kebijakan yang mendukung daur ulang kuningan harus terus dikembangkan agar kontribusi positifnya terhadap lingkungan dapat terus meningkat [19][20].

#### 2.4. Pengecoran Logam

Pengecoran logam merupakan proses manufaktur dimana logam dipanaskan hingga mencapai kondisi cair, lalu dialirkan ke dalam cetakan yang telah dirancang dengan presisi untuk menghasilkan bentuk produk yang diinginkan. Cetakan tersebut bisa dibuat dari pasir, logam, keramik, atau lilin dalam teknik (*lost-wax*), tergantung metode yang digunakan. Setelah logam cair dituangkan, material akan mengalami pendinginan dan proses solidifikasi dimulai dari tahap nukleasi kristal hingga pertumbuhan kristal yang membentuk struktur padat mengikuti rongga cetakan hingga menjadi bentuk akhir

Metode ini memiliki sejarah panjang, sudah dikenal sejak peradaban Mesopotamia sekitar 4.000 SM terutama dalam pengecoran tembaga dan perunggu menggunakan cetakan batu atau lilin dan terus berkembang ke teknik sand casting di China abad ke-7-5 SM serta kehilangan lilin (*lost-wax*) di Mesir dan Mesopotamia. Pengecoran kemudian menjadi teknologi utama selama Revolusi Industri, dengan inovasi seperti cetakan permanen,

pegecoran sentrifugal, die-casting, hingga casting logam canggih seperti titanium dan aloi khusus.

Secara teknis dan ekonomis, pengecoran unggul dalam menciptakan komponen berbentuk kompleks, termasuk bagian dengan rongga internal atau dinding tipis yang hampir mustahil atau mahal jika dibuat dengan penempaan atau pemotongan dengan toleransi dan finishing permukaan yang baik terutama pada metode seperti investment casting . Selain itu, proses ini juga efisien untuk memproduksi komponen berukuran besar, karena cetakan dapat disesuaikan hingga ukuran puluhan ton, sementara metode lain seperti CNC machining akan menghasilkan banyak limbah logam dan biaya tinggi.

Dari sisi keberlanjutan, pengecoran sangat mendukung prinsip produksi sirkular karena memungkinkan penggunaan logam daur ulang misalnya aluminium, baja, atau kuningan yang membutuhkan energi hingga 74–95% lebih sedikit dibandingkan logam murni baru. Selain itu, limbah cetakan (pasir atau shell) dapat didaur ulang berulang kali, mengurangi jumlah limbah dan emisi karbon dioksida secara signifikan. [24]

Dalam dunia industri manufaktur modern, proses pengecoran logam banyak diaplikasikan untuk menghasilkan berbagai jenis komponen yang sangat beragam, mulai dari alat-alat rumah tangga dan ornamen dekoratif hingga bagian-bagian penting dari mesin dan kendaraan bermotor. Metode pengecoran ini memiliki keunggulan dalam kemampuannya membentuk produk dengan geometri kompleks dalam satu tahap produksi yang efisien, sehingga sangat cocok untuk produksi massal dengan biaya yang relatif rendah [8].

Untuk memastikan produk hasil pengecoran memiliki kualitas yang optimal, berbagai parameter proses seperti suhu peleburan logam, komposisi kimia paduan, dan desain cetakan harus dikendalikan secara tepat. Suhu leleh yang terlalu rendah dapat menyebabkan logam cair kurang mengisi cetakan dengan sempurna sehingga memicu cacat seperti porositas dan retakan, sedangkan suhu yang terlalu tinggi berisiko menimbulkan penguapan unsur-unsur volatil seperti seng (Zn), yang dapat mengurangi kualitas produk akhir [11].

Selain itu, desain cetakan dan saluran tuang yang baik berperan penting dalam menghindari cacat pengecoran seperti penyusutan volumetrik dan porositas internal [25]. Proses pengecoran ulang paduan kuningan, khususnya, sangat berpengaruh terhadap pembentukan struktur mikro material yang dihasilkan. Struktur mikro tersebut mencakup ukuran butir, distribusi, dan proporsi fase  $\alpha$  dan  $\beta$ , yang sangat menentukan sifat mekanik paduan. Fase  $\alpha$ , yang umumnya lebih lunak dan plastis, berfungsi memberikan ductilitas, sedangkan fase  $\beta$  yang lebih keras memberikan kekuatan, meskipun bersifat lebih getas. Pengaturan suhu tuang yang optimal, seperti pada kisaran  $900^{\circ}\text{C}$ , menghasilkan butir yang lebih halus dan fase  $\alpha$  yang dominan, meningkatkan kekerasan hingga sekitar 395 HV. Sementara itu, suhu tuang yang lebih tinggi cenderung memperbesar proporsi fase  $\beta$  sehingga menurunkan kekerasan [11].

Selain itu, perlakuan panas setelah pengecoran juga terbukti efektif dalam mengoptimalkan struktur mikro paduan kuningan. Studi oleh Arroyan et al. (2024) menunjukkan bahwa perlakuan panas dapat

memperkuat jaringan fase  $\alpha$  dan  $\beta$ , sehingga meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus material secara signifikan [26]. Dengan demikian, pengaturan proses pengecoran dan perlakuan panas secara terpadu dapat menghasilkan produk paduan kuningan dengan kualitas mekanik yang tinggi dan tingkat cacat yang rendah.

#### **2.4.1. Tungku Tahanan Listrik**

Tungku tahanan listrik adalah alat pemanas yang digunakan untuk menghasilkan suhu tinggi dengan cara mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui elemen pemanas yang memiliki tahanan listrik tinggi. Proses pemanasan ini terjadi karena adanya efek Joule, di mana arus listrik yang mengalir pada elemen pemanas akan menghasilkan panas akibat resistansi bahan tersebut. [25]

Alat ini banyak digunakan dalam berbagai bidang industri dan penelitian yang memerlukan pengendalian suhu yang presisi dan suhu tinggi, seperti peleburan logam, perlakuan panas, produksi keramik, serta sintesis bahan [27].

Tungku tahanan listrik terdiri dari elemen pemanas, isolator termal, sistem pengontrol suhu, dan ruang kerja yang tahan terhadap suhu tinggi. Elemen pemanas biasanya terbuat dari bahan seperti nichrome, kanthal, atau grafit yang memiliki sifat tahan panas dan tahan korosi. Isolator termal, seperti serat keramik, berfungsi untuk menjaga agar panas tidak cepat hilang sehingga efisiensi pemanasan meningkat. Sistem pengontrol suhu menggunakan sensor termokopel yang mengukur suhu aktual di dalam

tungku dan secara otomatis mengatur pasokan listrik untuk menjaga suhu sesuai dengan parameter yang diinginkan [28].

Keunggulan tungku tahanan listrik terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan suhu yang tinggi dan pengendalian suhu yang sangat presisi, serta tidak menghasilkan emisi gas berbahaya sehingga ramah lingkungan. Oleh karena itu, alat ini banyak digunakan dalam proses yang membutuhkan suhu stabil dan bersih. Namun, tungku ini memiliki keterbatasan dalam hal kapasitas volume yang bisa dipanaskan dan biaya operasional yang bergantung pada konsumsi listrik [11].

Penggunaan tungku tahanan listrik juga berkembang seiring kemajuan teknologi dengan adanya sistem kontrol digital dan otomatisasi yang memungkinkan proses pemanasan menjadi lebih efisien, aman, dan mudah dikendalikan. Oleh karena itu, tungku tahanan listrik menjadi salah satu alat penting dalam proses manufaktur dan penelitian modern [27].



Gambar 4.4.1 Tungku Tahanan listrik

Sumber [https://id.made-in-china.com/co\\_nanbei-china/product\\_1000c-Industrial-Lab-Heating-Oven-Electric-Muffle-Furnace\\_uorsioeyyy.html](https://id.made-in-china.com/co_nanbei-china/product_1000c-Industrial-Lab-Heating-Oven-Electric-Muffle-Furnace_uorsioeyyy.html)

## 2.5. Hipotesis Penelitian

- Hipotesis 1 : Proses pengecoran ulang paduan kuningan dapat mempengaruhi komposisi unsur material, sehingga berpotensi menurunkan unsur paduan.
- Hipotesis 2 : Proses daur ulang paduan kuningan dapat mempengaruhi sifat mekanik material.

