

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 *Blade* Turbin PLTP

Turbin bilah *geothermal* merupakan komponen pembangkit listrik khusus yang dirancang untuk memanfaatkan energi termal dari bagian dalam bumi dengan mengubah uap bertekanan tinggi atau air panas dari reservoir *geothermal* menjadi energi mekanis dan akhirnya listrik. Turbin ini direayasa untuk menahan tantangan lingkungan *geothermal*, termasuk paparan air yang sangat bermineral, gas korosif, dan kondisi uap variabel yang dapat berkisar dari keadaan jenuh hingga super panas. Bilah turbin biasanya memiliki komposisi metalurgi khusus dan lapisan pelindung untuk menahan erosi dan pengelupasan dari silika dan endapan mineral lainnya, sementara desainnya mengoptimalkan efisiensi di seluruh perbedaan suhu yang lebih rendah yang menjadi ciri khas sumber daya *geothermal*. Turbin bilah *geothermal* canggih menggabungkan sistem nosel variabel yang dapat beradaptasi dengan kondisi sumber daya yang berfluktuasi, memungkinkan produksi listrik berkelanjutan dari berbagai bidang *geothermal* - dari sumber daya entalpi tinggi yang melebihi 200°C hingga aplikasi suhu rendah melalui sistem siklus biner di mana fluida *geothermal* mentransfer panas ke fluida kerja sekunder dengan titik didih yang lebih rendah untuk menggerakkan mekanisme turbin (Di Pippo, 2016).

Turbin bilah *geothermal* beroperasi di lingkungan yang sangat korosif, di mana turbin menghadapi paparan terhadap cairan *geothermal* yang mengandung hidrogen sulfida (H_2S), karbon dioksida (CO_2), klorida, dan senyawa kimia agresif lainnya yang mempercepat degradasi elektrokimia dan korosi pitting pada permukaan logam, sementara secara bersamaan mengalami benturan abrasif dari partikel silika dan endapan mineral yang dapat mencapai kecepatan melebihi 150 m/s di ujung bilah.

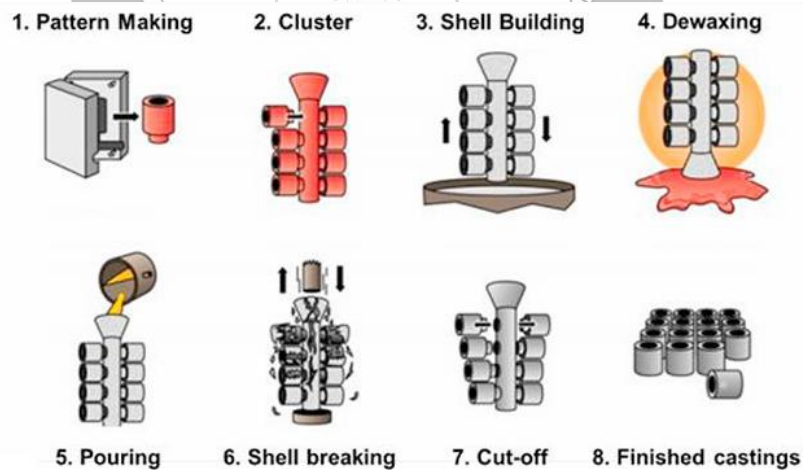
Beban mekanis utama berasal dari gaya sentrifugal yang dapat melebihi 5000 kN/m² pada akar bilah. Untuk menahan kondisi yang keras ini sambil mempertahankan integritas struktural selama masa pakai operasional yang diharapkan 20-30 tahun. Persyarat kinerja mekanis menuntut, karena komponen turbin mengalami pembebanan sentrifugal pada 3000-3600 rpm. Material turbin yang optimal harus menunjukkan sifat mekanis baik termasuk *yield strength* tinggi (biasanya >800 MPa), ketahanan lelah yang sangat baik di bawah beban siklus, ketangguhan patah yang cukup (*sufficient fracture toughness*). kemampuan untuk mempertahankan stabilitas dimensi pada suhu berkisar antara 150-250°C untuk menahan tekanan operasional (Di Pippo, 2016). Persyaratan kekerasan permukaan memerlukan 42-48 HRC (392 – 461 HBN) untuk menahan erosi benturan partikel, dengan beberapa lapisan khusus mencapai 65-70 HRC (862-987 HBN) .Nilai modulus elastisitas yang diperlukan berkisar sekitar 180 hingga 210 Gpa untuk memberikan kekakuan yang diperlukan, sekaligus memberikan fleksibilitas untuk meredam getaran (Zarrouk & Moon, 2014).

Sifat korosif dari fluida panas bumi menuntut material *corrosion rates* dibawah 0.1 mm/year dalam pengujian standar menggunakan *simulated brine* dengan nilai pH berkisar 4-9 dan pada praktek terbaik menargetkan *allowable corrosion rates* dibawah 0,05 mm/year untuk memastikan umur panjang peralatan, pada saat yang sama menunjukkan angka ekuivalen ketahanan korosi ($PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$) melebihi 40 untuk aplikasi dimana konsentrasi klorida melampaui 1500 mg/L. Lingkungan *geothermal* yang korosif menimbulkan gaya elektrokimia melalui mekanisme *Stress Corrosion Cracking* (SCC) yang dapat dimulai dari 20-30% dari kekuatan luluh (120-180MPa) di lingkungan yang mengandung klorida, dengan *crack propagation rates* 10^{-7} - 10^{-6} m/s – sekitar 10-100× lebih cepat daripada di udara (Nogara & Zarrouk, 2018).

Tabel 2.1 Data Karakteristik minimal material blade turbin PLTP

Parameter	Nilai minimum yang dibutuhkan
Ketahanan korosi	
Laju korosi maksimum (mm/y)	0.1 mm/year (target <0.05mm/year)
PREN (Pitting Resistance)	> 40
<i>Stress Corrosion Cracking initiation</i>	120-180 MPa
Sifat mekanis	
Yield Strength (σ_y)	> 800 MPa
Kekerasan Permukaan (HBN)	42 - 48 HRC (392 - 461 HBN)
Modulus Elastisitas (E)	180 - 210 Gpa
Kecepatan benturan partikel	> 150 m/s
Rotasi Operasional	3000-3600 rpm
Stabilitas Dimensi	150-250°C
<i>Crack Propagation Rate</i>	10^{-7} - 10^{-6} m/s

Sumber : *Geothermal, Application, Case Studies and Environmental Impact*
(Di Pippo, 2016)



Gambar 2.1 Skematik Investment Casting Proccess

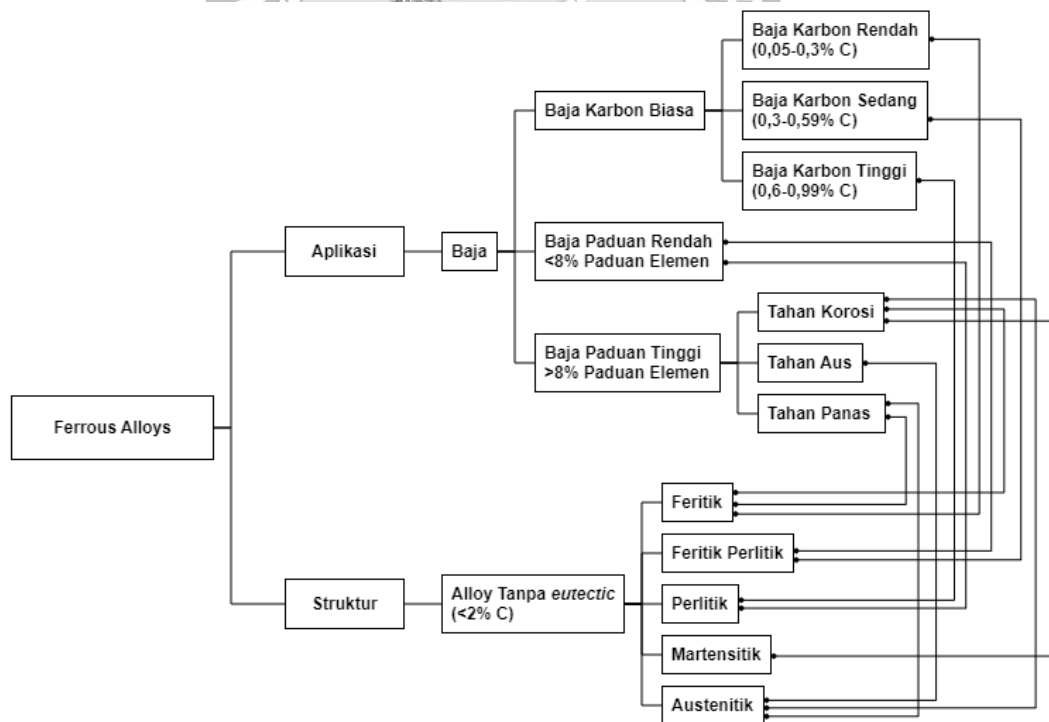
Sumber : *Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Pattens for Rapid Investment Casting*
(Wang et al., 2019)

2.1.2 Material Baja Nirkarat

2.1.2.1 Baja

Baja merupakan paduan logam yang terdiri dari besi dengan kandungan karbon tertentu, berkisar antara 0,02% hingga 2,1% berdasarkan beratnya. Material ini memiliki peran krusial dalam industri dan konstruksi karena sifatnya yang kuat, tahan lama, serta mudah untuk diproses dan dibentuk (J.R. Davis, 1996).

Kata “*steel*” berarti bahwa besi merupakan bagian terbesar dari material sedangkan penggunaan kata sifat “*stainless*” menunjukkan tidak adanya noda, karat atau korosi di lingkungan dimana baja normal rentan (Lo et al., 2009).



Gambar 2.2 Klasifikasi Baja

Sumber : Metallographer's Guide : Irons and Steels
(Bramfitt et al., 2001)

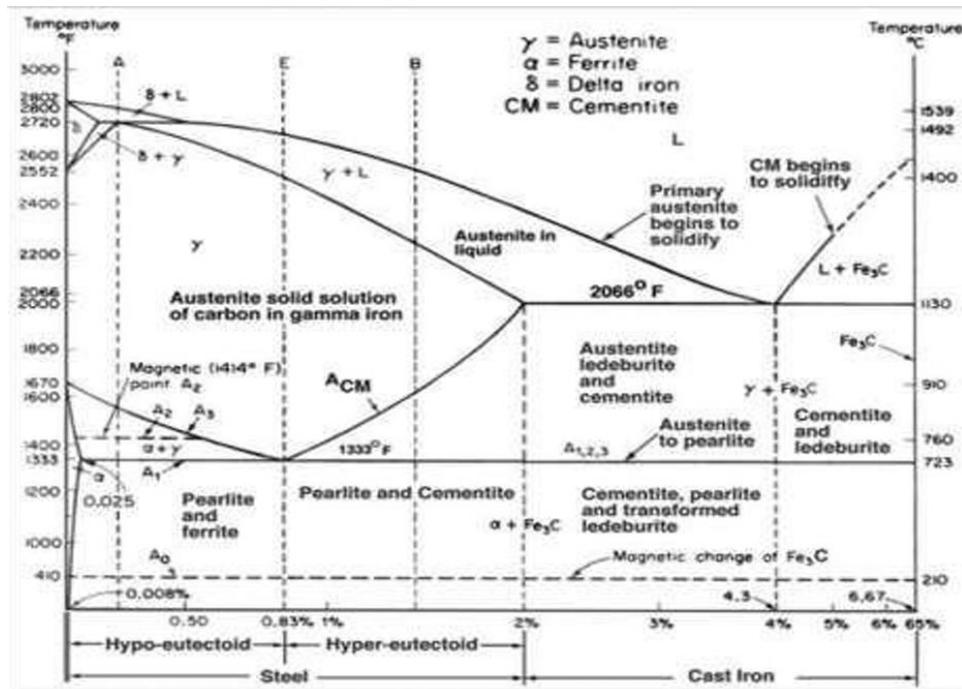
Berdasarkan tabel klasifikasi diatas, Baja *stainless steel* tergolong dalam kategori baja paduan tinggi dengan lebih dari 8% elemen paduan, karena mengandung paduan kromium, nikel dan tembaga dalam jumlah yang tinggi.

Baja nirkarat adalah paduan besi yang mengandung minimal 10,5% kromium, yang membentuk lapisan oksida kromium yang sangat tipis dan stabil pada permukaan baja, melindunginya dari korosi. Selain kromium, baja nirkarat sering mengandung unsur lain seperti nikel, molibdenum, dan mangan untuk meningkatkan sifat-sifatnya. Keunggulan baja nirkarat meliputi ketahanan terhadap korosi, kekuatan tinggi, duktilitas baik, kemampuan dibentuk yang baik, dan penampilan estetis (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

2.1.2.2 Fase Baja

Baja merupakan perpaduan antara besi (Fe) dan karbon (C), jumlah kandungan karbon dan perlakuan termal membentuk berbagai fase baja. Berkembang melalui diagram transformasi *thermal*. Diagram ini yang menjadi dasar awal dalam mengembangkan berbagai sifat baja karbon dan baja paduan dari beragam variasi (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

Fasa dapat diartikan sebagai bagian dari bahan yang memiliki struktur atau komposisi yang khas. Diagram fasa Fe-C, yang juga dikenal sebagai diagram kesetimbangan besi-karbon, berfungsi sebagai alat untuk mengidentifikasi berbagai fasa yang terbentuk dalam baja selama proses perlakuannya. Dasar dari diagram fasa ini adalah untuk mempelajari interaksi antara besi dan paduannya dalam kondisi setimbang. Hubungan ini tercermin dalam suhu dan komposisi, di mana perubahan pada komposisi atau suhu akan memengaruhi struktur mikro material tersebut.



Gambar 2.3 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

sumber : (ASM Handbook, 1993)

Fasa fasa ini secara signifikan mempengaruhi sifat mekanis, seperti kekuatan, ketangguhan dan keuletan baja. Fasa fasa utama dalam baja adalah:

a. Ferit-Perlit ($\alpha - (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$)

Struktur ferit-perlit terbentuk dari beberapa unsur paduan yang memengaruhi sifat mekaniknya. Sebagai contoh, belerang berperan sebagai penguat, mangan berfungsi untuk menghilangkan oksidasi, dan aluminium digunakan sebagai agen penghilang oksidator. Pada baja ferit-perlit, kandungan karbon serta ukuran butir yang dihasilkan menjadi faktor utama yang menentukan struktur mikro dan sifat material baja tersebut (Bramfitt, 1998).

Peningkatan kandungan karbon dalam baja berdampak signifikan terhadap kekerasan material. Hal ini terjadi karena semakin tinggi kadar karbon, semakin besar pula volume fraksi perlit dalam struktur mikro baja dibandingkan dengan fraksi ferit.

Akibatnya, peningkatan volume perlit berperan penting dalam meningkatkan kekerasan baja (Bhadeshia & Honeycombe, 2017). Feri memiliki struktur kristal berbentuk BCC (*Body Centered Cubic*). Material ini stabil pada suhu di bawah 98°C dan tidak bisa mengalami pengerasan karena kadar karbonnya yang sangat rendah. Kandungan karbon maksimum yang dimilikinya hanya mencapai 0,0255 pada suhu kritis. Feri memiliki sifat yang lunak, mudah ditempa, tahan terhadap korosi, serta memiliki tingkat kekerasan berkisar antara 60 hingga 100 HBN (Handoko et al., 2017).

b. Martensit

Baja nirkarat martensitik adalah salah satu jenis baja nirkarat yang dapat dikeraskan melalui perlakuan panas. Baja ini mengandung 11,5-18% kromium dan 0,1-1,2% karbon. Ketika didinginkan cepat dari suhu austenisasi, struktur kristalnya berubah menjadi martensit, yang memberikan kekerasan dan kekuatan tinggi. Karakteristik baja nirkarat martensitik meliputi kekerasan dan kekuatan tinggi, ketahanan aus yang baik, ketahanan korosi moderat (lebih rendah dibanding jenis austenit), kemampuan untuk dikeraskan dengan perlakuan panas, dan sifat magnetik (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

Martensit merupakan larutan padat antara karbon dan besi yang terbentuk akibat pendinginan cepat (*quenching*) dari austenit. Struktur kristalnya berbentuk BCT (*Body Centered Tetragonal*). Martensit memiliki karakteristik seperti stabil pada suhu di bawah 1500°C, sangat keras namun rapuh, bersifat magnetis, memiliki kandungan karbon lebih dari 0,2%, serta memiliki kemampuan konduktivitas panas dan listrik yang rendah. Tingkat kekerasannya berkisar antara 700 hingga 850 HBN.

c. Austenit (γ)

Austenit adalah struktur yang memiliki bentuk *face-centered*

cubic (FCC) pada besi, yang terbentuk dalam rentang suhu 912–1394°C. Fase austenitik berperan sebagai dasar dalam berbagai transformasi struktur pada baja (Voort & Vander, 2015). Fase austenitik adalah fase yang bersifat lunak dan ulet, namun dapat diperkuat hingga mencapai kekuatan yang tinggi. Austenit yang tertahan dalam baja berpotensi mengalami transformasi menjadi fase martensit, yang dapat menyebabkan material menjadi lebih getas atau menurunkan ketahanan terhadap keausan (Voort & Vander, 2015).

d. Bainit

Bainit adalah fasa metastabil yang terbentuk dari austenit pada suhu lebih rendah dari perlit tetapi lebih tinggi dari martensit. Jika baja eutektoid didinginkan cepat antara 250-500°C, terbentuk struktur yang terdiri dari ferit dan sementit, disebut Bainit. Kekerasannya berkisar 45-55 HRC, tergantung suhu transformasi. Bainit yang terbentuk pada suhu tinggi disebut *Upper Bainite*, sementara yang terbentuk pada suhu rendah disebut *Lower Bainite*. *Upper Bainite* mirip perlit halus, sementara *Lower Bainite* menyerupai martensit temper (W. Callister & Rethwisch, 2020).

e. Sementit(Fe_3C)

Fase sementit (Fe_3C) dalam diagram fasa baja terbentuk pada suhu yang lebih rendah dari titik eutektik, sekitar 727°C, terutama pada baja dengan kandungan karbon tinggi. Sementit merupakan senyawa intermetallic yang mengandung 6,7% karbon dan memiliki struktur kristal ortorombik, yang menjadikannya sangat keras namun rapuh. Pada diagram fasa, sementit muncul ketika baja mendingin dari fase austenit (yang memiliki struktur FCC) menuju struktur berlapis yang terdiri dari ferit dan sementit (perlit), terutama saat suhu melewati titik eutektik. Meskipun pembentukan sementit dapat meningkatkan kekerasan baja, sifat

rapuhnya dapat menurunkan ketangguhan. Jumlah sementit yang terbentuk bergantung pada komposisi karbon dalam baja, di mana baja dengan karbon lebih tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak sementit, yang secara signifikan mempengaruhi kekuatan material tersebut (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

f. Ledeburit ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$)

Ledeburit adalah campuran eutektik yang terbentuk ketika cairan besi-karbon dengan komposisi 4,3% karbon didinginkan hingga suhu eutektik 1147°C (W. Callister & Rethwisch, 2020).

g. Besi Delta (δ)

Besi delta adalah fase yang terdapat pada rentang suhu antara 1400°C hingga 1538°C dan memiliki struktur sel satuan BCC (*Body Centered Cubic*) dengan kandungan Carbon 0,1%C. Fase ini hanya stabil pada suhu tinggi, lebih dari 1493°C dan memiliki struktur mirip dengan ferit (α). Besi delta akan meleleh pada suhu 1538°C (Pramono, 2020).

2.1.2.3 Baja Nirkarat (Stainless Steel)

Baja tahan karat adalah kelompok baja paduan tinggi yang dirancang untuk memberikan ketahanan korosi yang tinggi. Elemen paduan utama dalam baja tahan karat adalah kromium, biasanya di atas 15%. Kromium dalam paduan membentuk lapisan oksida tipis dan kedap air dalam atmosfer pengoksidasi, yang melindungi permukaan dari korosi. Nikel adalah bahan paduan lain yang digunakan dalam baja tahan karat tertentu untuk meningkatkan perlindungan korosi. Karbon digunakan untuk memperkuat dan mengeraskan logam. Meningkatkan kandungan karbon memiliki efek mengurangi perlindungan korosi karena kromium karbida terbentuk untuk mengurangi jumlah Cr bebas yang tersedia dalam paduan. (Groover, 2010)

Stainless steel secara tradisional dibagi menjadi tiga kelompok,

dinamai berdasarkan fase dominan yang terdapat dalam paduan pada suhu sekitar.

- a. *Stainless steel* Austenitik memiliki komposisi khas sekitar 18% Cr dan 8% nikel dan merupakan yang paling tahan korosi dari ketiga kelompok tersebut. Karena komposisi ini, *stainless steel* ini terkadang diidentifikasi sebagai *stainless steel* 18-8. *Stainless steel* ini bersifat nonmagnetik dan sangat ulet; tetapi menunjukkan pengerasan kerja yang signifikan. Nikel memiliki efek memperbesar daerah austenit dalam diagram fase besi-karbon, sehingga membuatnya stabil pada suhu ruangan. *Stainless steel* austenitik digunakan untuk membuat peralatan kimia dan pengolahan makanan, serta komponen mesin yang memerlukan ketahanan korosi yang tinggi (Groover, 2010).
- b. *Stainless steel* feritik memiliki sekitar 15% hingga 20% kromium, karbon rendah, dan tidak mengandung nikel. Ini menghasilkan fase ferit pada suhu ruangan. Baja tahan karat feritik bersifat magnetis dan kurang ulet serta tahan korosi dibandingkan austenitik. Komponen yang terbuat dari baja tahan karat feritik berkisar dari peralatan dapur hingga komponen mesin jet (Groover, 2010).
- c. *Stainless steel* martensitik memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi daripada *stainless steel* feritik. Dengan demikian, *stainless steel* ini dapat diperkuat dengan perlakuan panas. *Stainless steel* ini mengandung hingga 18% Cr tetapi tidak mengandung Ni. *Stainless steel* ini kuat, keras, dan tahan terhadap kelelahan, tetapi umumnya tidak tahan terhadap korosi seperti dua kelompok *stainless steel* lainnya. Produk yang umum digunakan meliputi peralatan makan dan instrumen bedah (Groover, 2010).

2.1.2.4 Stainless steel 17-4 PH

Baja *Precipitation Hardening* (PH) adalah kelompok baja nirkarat yang dapat diperkuat melalui proses presipitasi. Proses ini melibatkan pembentukan partikel presipitat halus dalam matriks baja, yang meningkatkan kekuatan dan kekerasan material. Baja PH menggabungkan kekuatan tinggi dengan ketahanan korosi yang baik, membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi di industri aerospace, minyak dan gas, serta peralatan medis (Gladman, 1999).

Baja nirkarat 17-4 PH adalah jenis baja PH yang paling umum digunakan. Komposisinya terdiri dari sekitar 17% kromium, 4% nikel, 4% tembaga, dan 0,3% niobium. Baja ini memiliki kekuatan tinggi, ketahanan korosi yang baik, dan dapat mencapai kekerasan hingga 45 HRC melalui perlakuan panas yang tepat. 17-4 PH digunakan dalam komponen pesawat terbang, turbin gas, dan peralatan minyak bumi (Murayama et al., 1999).

Pengujian dilakukan dengan mitra perusahaan dan pengerjaan laboratorium untuk pembandingan dari hasil yang ada. Berikut data komposisi kimia SS 17-4 PH PT SPVMB.

Tabel 2.2 Data Komposisi Kimia SS 17-4 PH PT SPVMB

Nomor Heat	%C	%Mn	%P	%Si	%Cr	%Ni	%Cu	%Nb + Ta
Persyaratan min	0.000	0.000	0.000	0.000	15.500	3.600	2.500	0.150
Persyaratanmax	0.070	0.700	0.035	1.000	1.000	1.000	1.000	0.350
23E 163	0.050	0.170	0.020	0.160	16.500	4.590	2.750	0.240

Sumber : data diolah oleh peneliti

Tabel 2.3 Data Standar Precipitation Hardening ASTM A747

Condition	PH Temperature, ^C	Time in hours	Cooling Treatment
	Temperature, °F [°C] °F [°C]	hours, minimum	Treatment
SA	Not precipitation hardened (see 5.2.3)		
H900	900 [480]	1.5	air cool
H925	925 [495]	1.5	air cool
H1025	1025 [550]	4.0	air cool
H1075	1075 [580]	4.0	air cool
H1100	1100 [595]	4.0	air cool
H1150	1150 [620]	4.0	air cool
H1150M	1400 [760]	2.0	air cool
	1150 [620]	4.0	air cool
	1150 [620]	4.0	air cool
H1150 DBL	1150 [620]	4.0	air cool
	1150 [620]	4.0	air cool

^A The furnace and controls used shall be calibrated and capable of uniformity of heating in order to ensure consistent results.

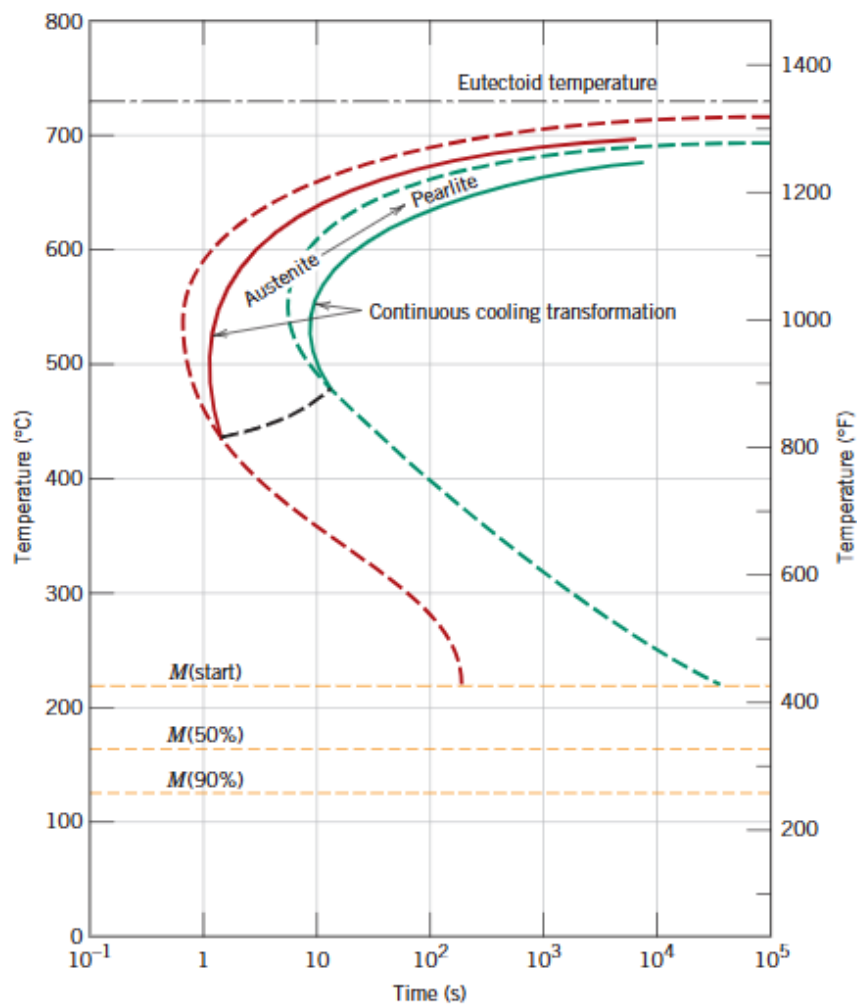
^B See **Note 1**.

^C $\pm 25^{\circ}\text{F}$ [$\pm 15^{\circ}\text{C}$], $\pm 25^{\circ}\text{F}$ [$\pm 15^{\circ}\text{C}$].

Sumber : (Standard Specification for Steel Castings, Stainless, Precipitation Hardening¹, n.d.)

2.1.3 Perlakuan Panas (*Heat treatment*)

Heat treatment Baja *stainless steel* diperlukan untuk meningkatkan karakterisitk dan sifat mekaniknya, Rekayasa ini dilakukan dengan perlakuan panas (*heat treatment*).



Gambar 2.4 Continuous Cooling Transformation Diagram

Sumber : *Material science and Engineering 10th Edition*
(W. D. Callister & Rethwisch, 2018)

Diagram *Isothermal Transformation* (TTT - *Time-Temperature-Transformation*) menunjukkan representasi grafis yang menggambarkan kinetika transformasi fasa austenit menjadi produk mikrostruktur seperti martensit, bainit, atau ferrit-pearlit pada kondisi isothermal, sebagai fungsi waktu dan suhu. Diagram ini menjadi instrumen kritis dalam metalurgi fisik untuk merancang proses perlakuan panas, seperti anil atau quenching, dengan memprediksi waktu inkubasi dan laju pembentukan fasa tertentu. Pada diagram TTT, kurva C menunjukkan ketergantungan transformasi fasa terhadap suhu, di mana daerah stabilitas austenit, transformasi difusi

(pearlit/bainit), dan transformasi tanpa difusi (martensit) dapat diidentifikasi. Analisis diagram ini memungkinkan optimasi parameter perlakuan panas untuk mencapai sifat mekanik yang diinginkan, seperti kekerasan atau ketangguhan, melalui kontrol mikrostruktur (W. D. Callister & Rethwisch, 2020).

Tahap awal dalam setiap proses perlakuan panas dimulai dengan memanaskan logam atau paduan hingga mencapai suhu tertentu, kemudian menahannya pada suhu tersebut selama beberapa waktu dan diikuti dengan pendinginan menggunakan laju dan media pendingin yang telah ditentukan. Selama proses pemanasan dan pendinginan ini terjadi perubahan pada struktur mikro, seperti bentuk atau ukuran butir kristal yang pada akhirnya mengubah sifat-sifat dari logam atau paduan tersebut. Terdapat berbagai jenis perlakuan panas yang dipilih berdasarkan jenis material dan tujuan yang ingin dicapai. Secara umum, proses perlakuan panas dibedakan berdasarkan suhu pemanasan, durasi penahanan, serta kecepatan pendinginan. Beberapa metode perlakuan panas yang umum digunakan antara lain *quenching*, *annealing*, *tempering*, dan *normalizing* (Suherman, 1999).

a. **Annealing**

Annealing melibatkan pemanasan material hingga suhu tertentu, mempertahankannya pada suhu tersebut untuk jangka waktu tertentu, lalu mendinginkannya secara perlahan. Suhu pemanasan, durasi penahanan, serta kecepatan pendinginan ditentukan oleh berbagai faktor, seperti komposisi kimia baja, ukuran dan bentuk komponennya, serta sifat akhir yang diinginkan. *Annealing* dapat menjadi langkah penyelesaian akhir atau persiapan untuk perlakuan panas berikutnya. Tujuan dari proses ini mencakup: menghilangkan tegangan internal yang muncul akibat proses seperti pemadatan, pemesinan, penempaan, penggulangan, atau pengelasan; meningkatkan atau mengembalikan keuletan dan ketangguhan material; memperbaiki kemampuan pemesinan; mengatasi ketidakseragaman kimia;

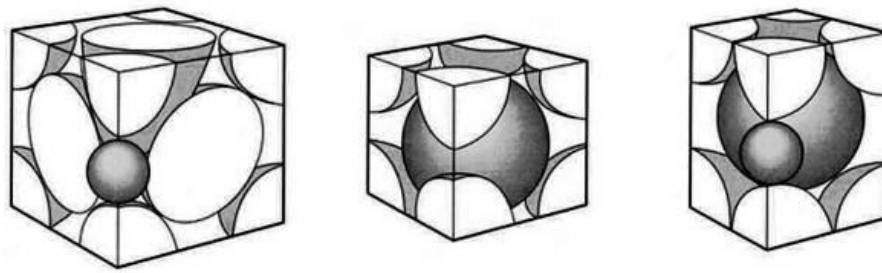
memperbaiki ukuran butiran; dan mengurangi kandungan gas dalam baja. (Rajan et al., 2023).

b. **Hardening**

Hardening adalah metode perlakuan panas yang bertujuan untuk meningkatkan kekerasan suatu material. Proses ini dilakukan dengan cara memanaskan material hingga mencapai suhu tertentu (suhu austenisasi), kemudian ditahan pada suhu tersebut selama beberapa waktu dan didinginkan secara cepat melalui proses quenching. Pendinginan cepat ini bertujuan agar material memiliki struktur mikro martensit.

Martensit terbentuk ketika karbon terjebak dalam struktur kristal akibat proses pendinginan cepat, sehingga struktur kristal tidak sempat bertransformasi secara sempurna. Pada baja hipoutektoid, struktur kristal austenit dengan susunan *Face Centered Cubic (FCC)* akan berubah menjadi ferit dengan struktur *Body Centered Cubic (BCC)* saat didinginkan secara lambat. Namun, ketika proses pendinginan dilakukan dengan cepat, atom karbon tidak sempat keluar dari susunan FCC. Hal ini menyebabkan struktur kristal FCC berubah menjadi *Body Centered Tetragonal (BCT)*. Proses perubahan yang tidak sempurna ini menciptakan distorsi dalam struktur BCT, menimbulkan tegangan internal yang tinggi. Tegangan inilah yang menjadikan martensit sangat keras. Selain itu, bentuk struktur kristal tetragonal menyebabkan martensit memiliki karakteristik berupa bentuk jarum.

Kandungan karbon memegang peranan penting dalam menentukan kekerasan baja. Semakin tinggi kandungan karbon, maka kekerasan baja akan meningkat, namun keuletannya cenderung menurun. Sementara itu, kemampuan baja untuk mengalami pengerasan (*hardenability*) dipengaruhi oleh unsur-unsur paduan yang terkandung di dalamnya (Campbell, 2008).



Austenit FCC

Ferit BCC

Martensit BCT

Gambar 2.5 Struktur Kristal (a) BCC, (b) FCC dan (c) BCT

Sumber : (Zulfadli, n.d.)

c. **Quenching**

Quenching adalah proses pendinginan secara cepat dengan menggunakan berbagai jenis media pendingin, seperti air, oli, atau *brine* untuk media berbentuk cair, serta helium, argon, atau nitrogen untuk media berbentuk gas.

Semakin cepat proses *quenching* dilakukan, semakin besar peluang terbentuknya struktur martensit. Namun, di sisi lain risiko terjadinya distorsi dan retak (*cracking*) juga meningkat. Distorsi umumnya disebabkan oleh tiga faktor utama, yaitu *warping* (pembengkokan), deformasi termal, dan transformasi menjadi martensit. Sementara itu, *cracking* terjadi akibat adanya distorsi serta ketika tegangan lokal pada material melebihi batas maksimal yang dapat ditahannya

Proses pendinginan cepat adalah metode perlakuan panas yang bertujuan untuk mencapai tingkat kekerasan optimal pada baja. Proses ini melibatkan transformasi struktur perlit menjadi austenit, kemudian austenit diubah menjadi martensit melalui pendinginan cepat. Pendinginan dilakukan sedemikian rupa sehingga kurva pendinginan pada diagram CCT tidak bersentuhan dengan "hidung kurva" dan langsung menuju titik *Martensite Start*. Kekerasan maksimum dapat dicapai ketika seluruh austenit telah berubah sepenuhnya menjadi martensit. Selain itu, semakin tinggi kandungan karbon dalam baja, maka tingkat kekerasan yang diperoleh juga akan semakin meningkat

(Amalia, 2018).

d. **Normalizing**

Normalizing pada baja adalah proses perlakuan panas yang dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai fase austenit untuk membentuk struktur mikro austenit. Setelah itu, baja didinginkan di udara terbuka hingga mencapai suhu kamar. Proses ini memungkinkan struktur material yang sebelumnya berubah akibat perlakuan mekanik atau pengaruh suhu ekstrem, baik tinggi maupun rendah, dapat kembali ke kondisi normalnya. Langkah-langkahnya meliputi pemanasan baja hingga melebihi suhu kritis, mempertahankannya pada suhu tersebut selama beberapa waktu, dan kemudian mendinginkannya secara alami di udara hingga suhu kamar, sekitar 27 derajat Celsius (Sukmayanti, 2023).

e. **Tempering**

Proses *tempering* dilakukan setelah material mengalami perlakuan *Hardening* atau *normalizing*. Material dipanaskan hingga suhu di bawah suhu kritis, lalu didinginkan dengan laju tertentu untuk meningkatkan elastisitas dan kekuatan, serta membantu memperbaiki ukuran butir. Selain itu, *tempering* juga berguna untuk melepaskan tegangan sisa dan mengurangi kekerasan yang timbul akibat proses pengelasan atau akibat tegangan dari proses *machining*.

Dalam beberapa kondisi tertentu, *tempering* tidak selalu menyebabkan penurunan kekerasan. Jika baja ditemper pada suhu yang sangat rendah, kekerasannya mungkin tetap sama, tetapi *yield strength* dapat meningkat. Sementara itu, baja paduan yang mengandung elemen pembentuk karbida seperti kromium, molibdenum, vanadium, atau tungsten dapat mengalami *secondary hardening*. Proses ini menyebabkan kekerasan material justru meningkat sebagai hasil dari *tempering*. (Amalia, 2018)

Dengan menerapkan siklus pemanasan dan pendinginan tertentu yang terkontrol, struktur mikro material berubah untuk mencapai sifat

mekanis yang diinginkan.

2.1.4 Pengujian Material

2.1.4.1 Uji Tarik (*Tensile Test*)

Uji tarik (*tensile test*) adalah metode pengujian mekanik yang fundamental dalam ilmu material dan teknik mesin, digunakan untuk mengevaluasi perilaku material di bawah beban tarik. Dalam prosedur ini, spesimen material dengan dimensi standar ditarik hingga patah, sementara beban dan perpanjangan diukur secara kontinyu. Tujuan utama uji tarik adalah menentukan sifat-sifat mekanik material seperti kekuatan tarik maksimum, elastisitas, *modulus young*, titik luluh, dan elongasi. Hasil uji ini umumnya disajikan dalam bentuk kurva tegangan-regangan, yang menggambarkan respons material terhadap beban tarik, termasuk fase elastis, titik luluh, dan titik patah. (W. D. Callister & Rethwisch, 2018)

Hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang bahan tersebut. Ini disebut daerah linear. Mengikuti aturan hooke bahwa rasio tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) adalah konstan. Persamaan umum:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Dimana :

F = Gaya Tarikan

A = Luas Penampang

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

Dimana :

ΔL = Pertambahan Panjang

L = Panjang Awal

Pada Teori Elastisitas Linear, material dianggap bersifat elastis sesuai dengan hukum hooke yang menyatakan bahwa tegangan (σ)

berbanding lurus dengan regangan (ϵ) dalam batas elastis material. Persamaan umumnya :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.3)$$

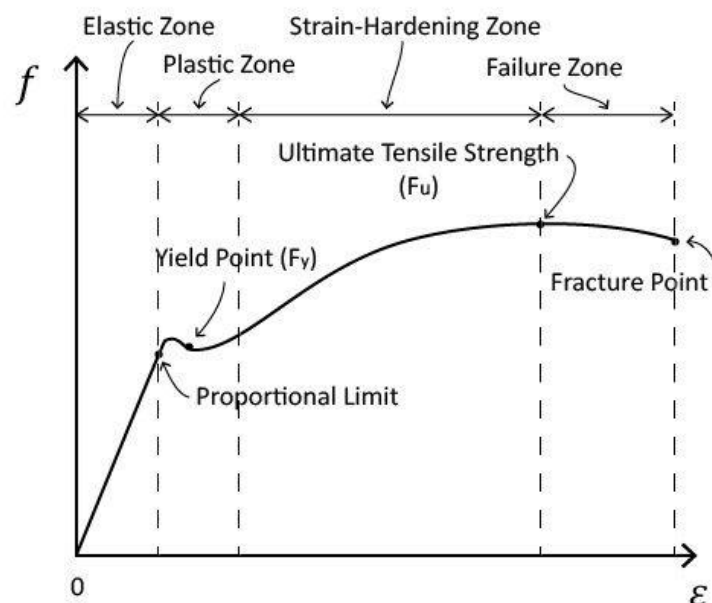
Dimana :

σ = Tegangan (*Stress*)(N/m atau Pa)

ϵ = Regangan (*Strain*)

E = *Modulus Young*

Hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang bahan tersebut. Ini disebut daerah linear. Mengikuti aturan hooke bahwa rasio tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) adalah konstan.



Gambar 2.6 Stress Strain Curves

Sumber : *Use of high-strength reinforcement for earthquake-resistant concrete structures*
(Kelly et al., 2014)

2.1.4.2 Uji Kekerasan (Hardness Test)

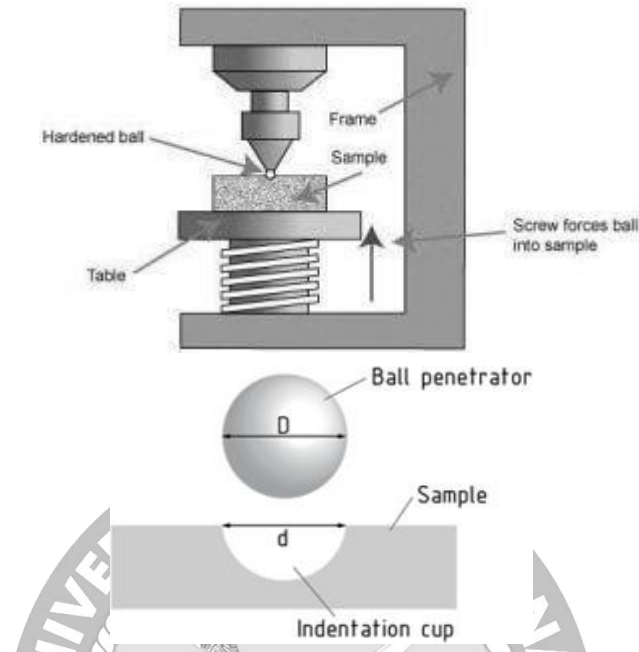
Kekerasan merupakan karakteristik material yang menggambarkan ketahanannya terhadap deformasi lokal atau perubahan bentuk permanen akibat gaya eksternal. Sifat ini sangat penting karena mencerminkan kemampuan material untuk menahan goresan, abrasi, pemotongan, atau

penetrasi. Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengukur kekerasan, seperti uji *Brinell*, Rockwell, dan Vickers, yang masing-masing menggunakan teknik dan indentasi yang berbeda untuk mendapatkan hasil yang presisi. Pengujian kekerasan memainkan peran krusial dalam pemilihan material serta pengendalian kualitas di industri, memastikan material memenuhi persyaratan aplikasi yang dituju. Selain itu, pemahaman tentang kekerasan material membantu memprediksi responsnya terhadap tekanan mekanis, sehingga mendukung pengembangan produk yang lebih kuat, tahan lama, dan andal (Anand et al., 2022).



Gambar 2.7 *Brinell Hardness Testing Machine*

Sumber : diolah oleh peneliti



Gambar 2.8 Skematik *Brinell Hardness Test*
 Sumber : (Sinaga et al., 2024)

Uji kekerasan *Brinell* terdiri dari pembentukan lekukan dengan memaksa bola penekan bulat standar ke permukaan material di bawah beban statis tertentu yang diterapkan selama jangka waktu tertentu (Bhaduri, 2018). Bola baja berdiameter 10 µm digunakan sebagai standar. Untuk pengujian kekerasan pada baja, diterapkan gaya tekan sebesar 3000 kg. Sementara itu, logam non-ferrous yang lebih lunak diuji dengan gaya tekan 1000 kg atau 500 kg, dengan durasi penekanan antara 10 hingga 15 detik (Pramono, 2020).

Kekerasan Brinell dinyatakan sebagai *Brinell Hardness Number* (BHN), yang dihitung berdasarkan besarnya beban yang diberikan dan luas permukaan lekukan.

Rumus Brinell:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.4)$$

Dimana :

BHN	: <i>Brinell Hardness Number</i> (Angka Kekerasan <i>Brinell</i>)
P	: Beban yang diberikan (kgf)
D	: Diameter bola indentor (mm)
d	: Diameter rata rata lekukan (mm)

2.1.4.3 Uji Korosi

Korosi adalah degradasi material, umumnya logam, akibat reaksi dengan lingkungannya. Proses ini melibatkan reaksi elektrokimia yang mengubah logam menjadi senyawa yang lebih stabil, seperti oksida dan hidroksida (M.G.Fontana, 2005).

Korosi seragam merupakan jenis korosi di mana logam mengalami penurunan massa secara merata di seluruh permukaannya akibat interaksi elektrokimia dengan lingkungan sekitarnya. Korosi ini cenderung dapat diprediksi dan dihitung menggunakan prinsip Hukum Faraday, yang menyatakan bahwa laju kehilangan material atau tingkat korosi pada logam berbanding lurus dengan jumlah muatan listrik yang terlibat dalam proses elektrokimia (Li et al., 2022). Dapat dinyatakan sebagai :

$$m = \frac{M.I.t}{n.F} \quad (2.5)$$

dimana :

m	= massa logam yang terkorosi (gram)
M	= Massa molar logam (g/mol)
I	= Arus listrik yang terkait dalam reaksi elektrokimia (ampere)
T	= waktu proses korosi (detik)
N	= Jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi oksidasi logam
F	= Konstanta Faraday

Rapat arus korosi (I_{corr}) dapat diketahui pada pembacaan grafik polarisasi linear pengujian korosi dengan menggunakan metode ekstrapolasi tafel. Laju korosi dapat dihitung dengan menggunakan rumus

berikut.

$$CR = \frac{KI_{corr}EW}{\rho} \quad (2.6)$$

dimana :

CR = laju korosi (mmpy)

K = $3,27 \times 10^{-3}$ mm.g/ μ A.cm.y

I_{corr} = rapat arus korosi (μ A/cm²)

EW = berat ekivalen spesimen (g/mol)

ρ = densitas spesimen (g/cm³)

a. *Open Circuit Potential*

Metode Open Circuit Potential (OCP) adalah teknik elektrokimia mendasar yang digunakan untuk mengevaluasi perilaku korosi material di lingkungan tertentu. Metode ini melibatkan pengukuran perbedaan potensial alami antara elektroda kerja (material yang diuji) dan elektroda referensi tanpa arus eksternal yang diterapkan. Potensi ini mencerminkan kecenderungan termodinamika material untuk mengalami korosi dan dipengaruhi oleh reaksi permukaan seperti oksidasi dan reduksi. Pemantauan OCP dari waktu ke waktu memberikan wawasan tentang stabilitas lapisan pasif dan kerentanan material terhadap korosi lokal. Metode ini sering digunakan sebagai pendahulu teknik elektrokimia yang lebih maju seperti analisis Tafel atau Spektroskopi Impedansi Elektrokimia (EIS). (Fajardo et al., 2017).

b. *Potentiodynamic Polarization*

Potentiodynamic polarization adalah teknik elektrokimia yang digunakan untuk menganalisis ketahanan korosi suatu material dengan mengamati perubahan arus listrik akibat variasi potensial yang diberikan secara bertahap. Melibatkan pemindaian potensial elektroda kerja dalam rentang tertentu, dari kondisi anodik ke katodik ataupun sebaliknya. Arus korosi dicatat untuk membentuk kurva polarisasi (grafik arus terhadap potential), memberikan informasi

corrosion current density (i_{corr}), *corrosion potential* (E_{corr}), laju dan mekanisme reaksi korosi (Revie & Uhlig, 2008).

EIS bekerja berdasarkan prinsip impedansi listrik, yaitu parameter yang mengukur hambatan terhadap aliran arus bolak-balik (AC) dalam suatu rangkaian. Berbeda dengan resistansi yang hanya berlaku pada arus searah (DC), impedansi mempertimbangkan kombinasi resistansi dan reaktansi, yakni hambatan terhadap perubahan arus listrik. Dalam metode EIS, tegangan berbentuk sinyal sinusoidal diterapkan pada sel elektrokimia, dan arus yang dihasilkan sebagai respons akan diukur. Nilai impedansi diperoleh dari perbandingan antara tegangan dan arus tersebut, yang dihitung pada berbagai frekuensi untuk menghasilkan spektrum respons frekuensi (Peroff, 2023).

2.1.5 Karakterisasi Material

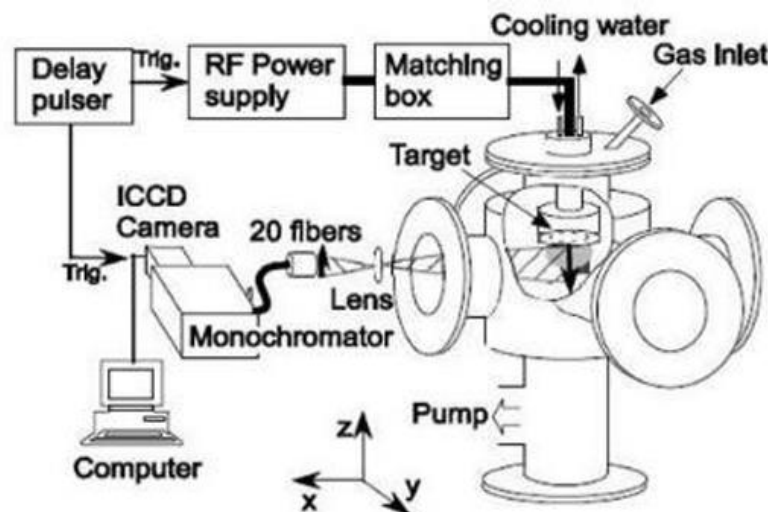
2.1.5.1 Pengujian Komposisi Kimia (*Optical Emission Spectroscopy*)

Prinsip dasar *Optical Emission Spectroscopy* (OES) berlandaskan pada emisi cahaya dengan panjang gelombang spesifik yang dihasilkan oleh atom-atom yang tereksitasi ketika kembali ke kondisi energi dasarnya. Dalam analisis *stainless steel*, eksitasi sampel umumnya dilakukan menggunakan pelepasan busur atau percikan listrik. Energi tinggi yang dihasilkan dari proses ini menyebabkan atom-atom di permukaan sampel mengalami eksitasi dan ionisasi. Ketika atom-atom tersebut kembali ke keadaan dasar, mereka memancarkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu yang bersifat khas untuk setiap elemen penyusun baja (Nölte, 2021).

Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES) dilakukan untuk mengetahui persentase kandungan unsur kimia dalam spesimen uji. Metode pengujian ini mengacu pada standar ASTM A571, yang mencakup prosedur analisis komposisi kimia untuk baja, baja tahan karat, dan baja paduan lainnya. Sebelum pengujian dilakukan, spesimen dipersiapkan

dengan cara mengamplas permukaan hingga rata dan bersih.

Dalam metode OES, emisi cahaya pada frekuensi tertentu digunakan untuk mengidentifikasi jenis unsur dalam spesimen. Berdasarkan teori kuantum, elektron dalam kondisi normal (*ground state*) akan berada di level energi terendah. Namun, ketika atom diberi energi eksternal, elektron akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi, yang disebut sebagai kondisi tereksitasi. Elektron yang tereksitasi ini akan memancarkan energi saat kembali ke tingkat energi lebih rendah. Emisi cahaya tersebut ditangkap oleh detektor, kemudian dianalisis oleh sistem komputer untuk mengenali konfigurasi energi elektron. Dengan demikian, kandungan unsur dalam spesimen dapat diidentifikasi baik secara kualitatif maupun kuantitatif (Amalia, 2018).



Gambar 2.9 Skema Uji OES

Sumber : *An Introduction to optical emission spectroscopy and Laser Aided Spectroscopy Techniques for Low-Temperature Plasma Analyses*
(Nayan et al., 2009)

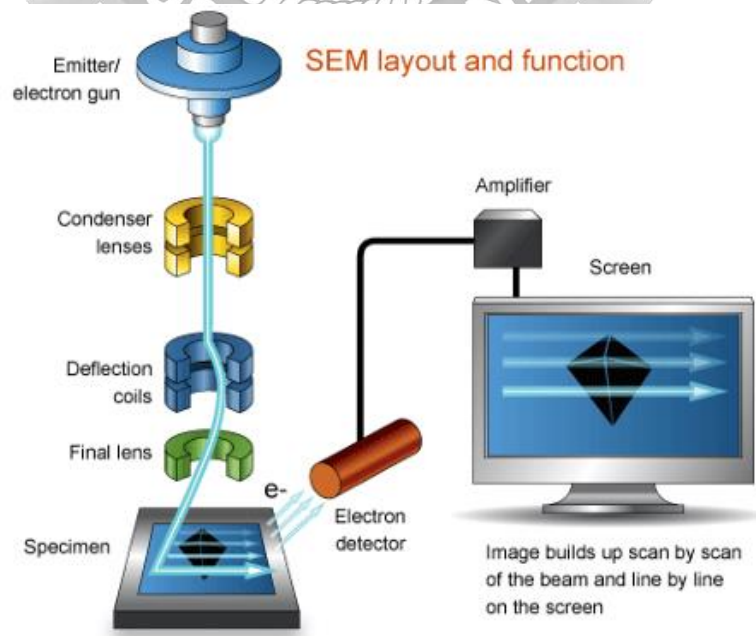
2.1.5.2 SEM-EDS (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)

Analisis mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) adalah metode untuk menyelidiki efek berbagai perlakuan panas pada baja nirkarat. Metode ini menyediakan pencitraan beresolusi tinggi

dan analisis komposisi untuk mengamati dan mengukur perubahan mikrostruktur yang terjadi selama berbagai proses perlakuan panas. Ketika hal ini diterapkan pada baja tahan karat yang mengalami berbagai perlakuan panas, *SEM* dapat mengungkapkan informasi seperti transformasi fase, pertumbuhan butiran, fenomena presipitasi dan distribusi elemen paduan (Voort, 2004).

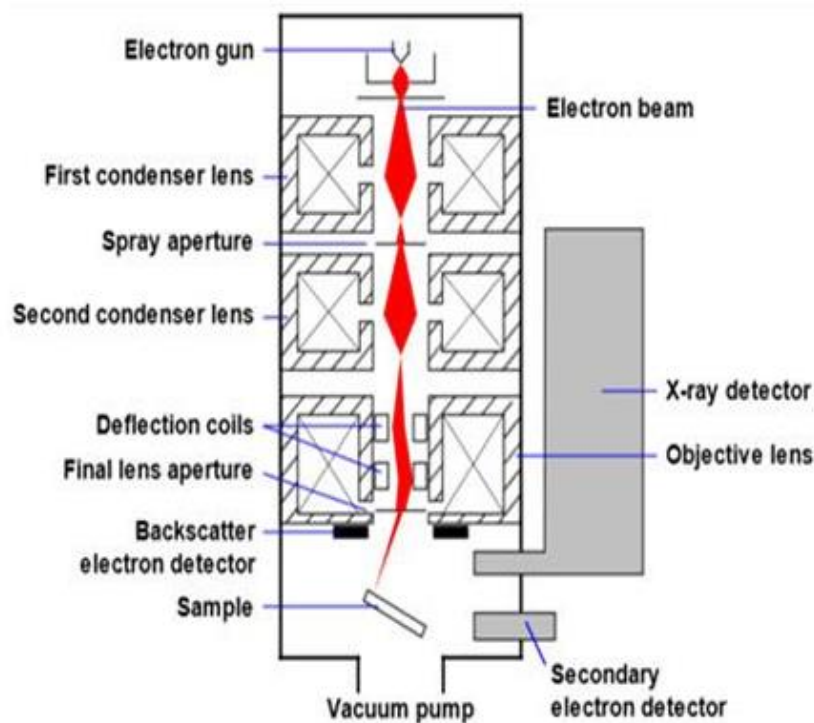
Pada baja tahan karat dengan pengerasan presipitasi, *SEM* terutama bila digabungkan dengan *X-Ray Dispersion (XRD)*, dapat melacak pembentukan dan pertumbuhan presipitat penguat selama *aging treatment* (Hsiao et al., 2002).

Penerapan *SEM* pada sampel baja tahan karat telah mengalami perlakuan panas biasanya melibatkan berbagai preparasi sampel seperti, pemotongan, pemasangan, pemolesan dan etsa untuk mengungkap struktur mikro. Berbagai mode pencitraan, seperti pencitraan elektron sekunder (SE) dan elektron hamburan balik (BSE), digunakan untuk menyoroti perbedaan topografi, fraktografi permukaan, ukuran butir, cacat struktural dan komposisi pencemaran material (J. Goldstein et al., 2018).



Gambar 2.10 Semua Komponen SEM

Sumber : *Application of Nanomaterials in Environmental Improvement*
(Salman Ali, 2020)



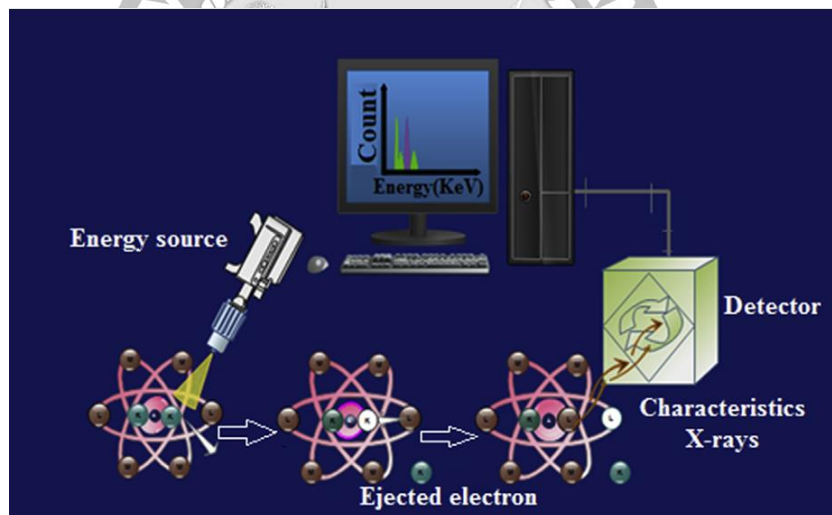
Gambar 2.11 Skematik dari *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Sumber : *Scanning Electron Microscopy (SEM) : A Review*
(Mohammed & Abdullah, n.d.)

Scanning Electron Microscopy (SEM) beroperasi dengan menembakkan berkas elektron berenergi tinggi, umumnya dalam rentang 1–30 keV, yang dihasilkan dari sumber seperti *filament tungsten* atau *field emission gun*. Elektron ini difokuskan menggunakan lensa elektromagnetik untuk memindai permukaan sampel. Saat berkas elektron berinteraksi dengan material, berbagai sinyal terbentuk, termasuk *Secondary Electron (SE)* dan *Back Scattered Electron (BSE)*. *SE*, yang berasal dari lapisan paling atas sampel dengan kedalaman sekitar 1–10 nm, menangkap detail topografi dengan resolusi tinggi. Sementara itu, *BSE*, yang muncul akibat pantulan elektron primer oleh inti atom dalam sampel, menghasilkan kontras berdasarkan perbedaan nomor atom unsur yang ada. Kedua jenis sinyal ini ditangkap oleh detektor khusus misalnya, detektor *Everhart-Thornley* untuk *SE* lalu dikonversi menjadi citra digital yang menampilkan karakteristik morfologi dan komposisi material. Agar analisis optimal,

sampel harus bersifat konduktif atau dilapisi dengan material konduktif seperti emas atau karbon guna mencegah akumulasi muatan listrik (*charging*) (J. I. Goldstein et al., 2017).

Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS) merupakan teknik analisis elemental yang digunakan bersama *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi komposisi unsur dalam suatu material. Prinsip kerja EDS didasarkan pada deteksi sinar-X karakteristik yang dipancarkan ketika sampel dibombardir oleh elektron berenergi tinggi dari berkas SEM. Setiap unsur memiliki energi sinar-X spesifik yang unik, sehingga spektrum EDS memungkinkan identifikasi unsur berdasarkan puncak energi tersebut (J. I. Goldstein et al., 2017).



Gambar 2.12 Skematik cara kerja EDS

Sumber : *Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy Techniques for Nanomaterial* (Mishra et al., 2017)

Ketika elektron dari SEM menumbuk atom sampel, elektron inner-shell terlepas, menyebabkan elektron dari kulit luar berpindah ke kulit yang lebih dalam untuk mengisi kekosongan. Proses ini melepaskan energi dalam bentuk sinar-X karakteristik, yang unik untuk setiap unsur berdasarkan perbedaan energi antar kulit elektron. Sinar-X tersebut ditangkap oleh detektor EDS (biasanya detektor *silikon drift detector*/SDD) yang mengonversi energi sinar-X menjadi sinyal listrik. Sinyal ini kemudian dianalisis oleh perangkat lunak untuk menghasilkan spektrum energi yang

menampilkan puncak-puncak sesuai energi sinar-X unsur penyusun sampel. Setiap puncak diidentifikasi berdasarkan database energi sinar-X unsur, memungkinkan kuantifikasi komposisi elemental dengan sensitivitas hingga 0,1-1% berat (Egerton, 2016).

2.1.5.3 X-Ray Diffraction (XRD)

X-ray Diffraction (XRD) adalah teknik analisis material yang mengidentifikasi struktur kristal dan komposisi fasa dengan mengukur pola difraksi sinar-X yang dihasilkan dari interaksi antara sinar-X monokromatik dan bidang atom dalam material. Prinsip dasarnya mengikuti Hukum Bragg.

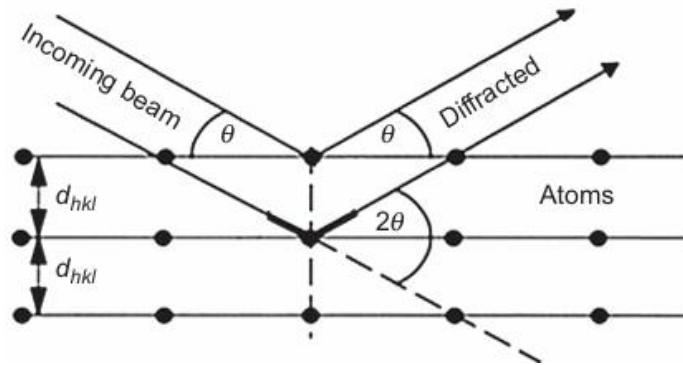
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.8)$$

Dimana sinar-X dengan panjang gelombang (λ) tertentu berdifraksi pada sudut (θ) yang bergantung pada jarak antar bidang kristal (d). Pola difraksi yang dihasilkan berfungsi sebagai "sidik jari" unik untuk setiap fase kristalin, memungkinkan identifikasi struktur (misalnya kubik, heksagonal) dan parameter kisi (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

Dalam analisis ini, indeks miller digunakan untuk mempresentasikan orientasi bidang kristal yang berkontribusi terhadap pola difraksi tersebut. Indeks miller (hkl) adalah sistem notasi tiga bilangan bulat yang merepresentasikan orientasi bidang kristal dalam kisi kristal. Hubungan antara XRD dan indeks miller terletak ada hukum bragg dimana jarak antar bidang kristal (d_{hkl}) bergantung pada indeks miller (hkl) dan parameter kisi material (a, b, c). Untuk struktur kubis, d_{hkl} dapat dihitung dengan rumus :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.7)$$

Setiap puncak pola XRD berkorespondensi dengan bidang (hkl) tertentu, sehingga analisis posisi sudut (θ) dan intensitas puncak memungkinkan identifikasi struktur kristal dan parameter kisi.



Gambar 2.13 Kondisi Geometri untuk Difraksi dari bidang kisi

Sumber : Moderne Rontgenbeugung
(Spieß et al., 2009)

2.1.5.4 Uji Metallography

Metallografi adalah studi yang berkaitan dengan karakteristik struktur logam atau paduan. Melalui metallografi, kita dapat menganalisis ukuran butir, bentuk, serta distribusi struktur mikro dan inklusi, yang semuanya memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanis material. Proses persiapan material untuk pengujian meliputi pemotongan (*cutting*), penggerindaan (*grinding*), *mounting*, dan pemolesan (*polishing*). Tahap preparasi ini penting agar permukaan material menjadi bersih dan bebas dari goresan, sehingga struktur mikro serta batas butir dapat terlihat dengan jelas. Setelah tahap preparasi selesai, dilakukan proses *etching* atau pengetsaan menggunakan larutan yang sesuai dengan standar yang berlaku. Selanjutnya, material tersebut dianalisis dengan menggunakan mikroskop untuk mengamati struktur mikronya secara detail (Avner, 1974).

Struktur mikro logam terbentuk dari kombinasi satu atau lebih jenis struktur kristal. Umumnya, logam terdiri atas banyak kristal atau disebut sebagai kristal majemuk. Namun, ada juga logam yang hanya memiliki satu kristal tunggal. Logam dengan struktur kristal majemuk memiliki keunggulan karena memungkinkan pengembangan berbagai sifat material, sehingga memperluas aplikasi dan penggunaannya. Dalam logam, kristal sering disebut sebagai butiran, sedangkan area yang memisahkan dua kristal dikenal sebagai batas butir (*grain boundary*) (Setya Kurniawan & Poppy

Puspitasari, 2014).



2.2 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu

No	Penulis, Tahun	Judul	Permasalahan	Metode	Hasil	Perbedaan
1.	(Mahmoudi & Elwani, 2017)	<i>Mechanical and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel</i>	Pengujian <i>mechanical properties</i> dan <i>microstructural</i> dari SS 17-4 PH <i>Stainless steel</i> di produksi dan diuji orientasi struktur, <i>heat treatment</i> , <i>Thermal history</i> , dan parameter proses SLM (<i>Selective Laser Melting</i>)	Berbagai set sampel uji dibuat pada sistem ProX 100 di bawah lingkungan Argon. Studi karakterisasi dilakukan menggunakan uji tarik dan kompresi mekanis, uji mikrohardness, mikroskopi optik, difraksi x ray dan SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	Komponen yang dibangun secara vertikal menunjukkan kekuatan dan perpanjangan hingga gagal yang relatif lebih rendah daripada komponen yang dibangun secara horizontal. Perlakuan panas meningkatkan hasil dan kekuatan tarik akhir, kekuatan tekan dan kekerasan mikro.	Perbedaan cara pembuatan sampel, lama proses annealing pada <i>heat treatment</i> selama 1 jam. Metode yang digunakan dalam pencetakan material menggunakan <i>Selective laser melting</i> . Sedangkan yang penulis

						gunakan adalah <i>investment casting</i>
2.	Mirzadeh, Najafizade h., 2009)	<i>Aging kinetics of 17-4 PH Stainless steel</i>	Mengamati pengaruh dari temperatur aging dan waktu dalam hal parameter tempering terhadap perilaku penguatan baja	Dimodelkan dan dianalisis dengan menggunakan <i>Artificial Neural Network</i> (ANN)	Pada parameter tempering rendah peningkatan kekerasan sangat rendah, pada nilai yang lebih tinggi hingga titik puncak, kekerasan meningkat karena presipitasi Cu	Dimodelkan dan dianalisis menggunakan an <i>Artificial Neural Network (ANN)</i> . Metode yang penulis gunakan adalah <i>investment casting</i>

3.	(Jianhua Yao, Liang Wang, 2021)	<i>Surface laser alloying of 17-4 PH Stainless steel steam turbine blade</i>	Permukaan blade 17-4 PH dicampur dengan menggunakan laser CO2 berkekuatan tinggi. Mikrostruktur dan mikrohardness digunakan, menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffraction (XRD), Energy Disperse Spectroscopy.	Metode yang digunakan dengan menggunakan pengujian LAB Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), energy disperse spectroscopy (EDS) dan mikrohardness tester	Setelah paduan laser permukaan, lapisan permukaan menjadi lebih padat dan butirannya lebih halus, sedangkan kekerasan mikro permukaan rata rata menjadi satu kali lebih tinggi daripada kekerasan mikro bahan substrat.	Permukaan blade yang dipaduan dengan laser alloying. Sedangkan metode yang penulis gunakan untuk fabrikasi material adalah <i>investment casting</i>
----	---------------------------------	--	---	---	---	--

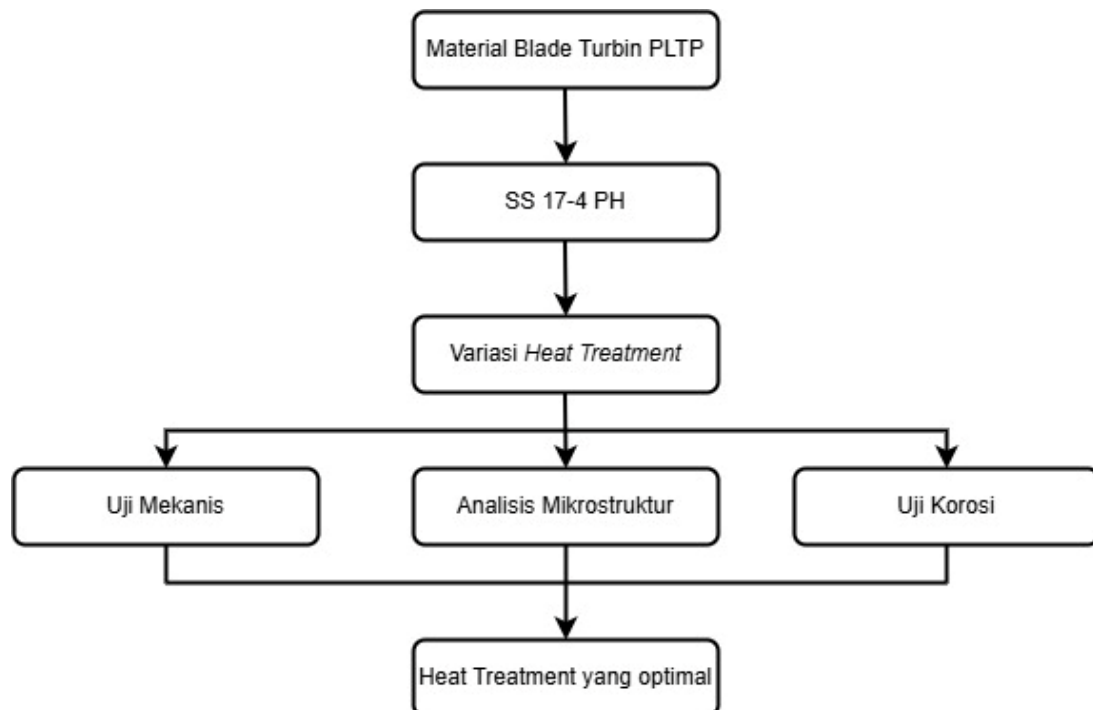
4.	(Jose Alfredo, Christian Marisol 2023)	<i>Corrosion Fatigue Analysis in Power Steam Turbine Blade</i>	Pengujian Perilaku korosi fatigue dari martensitic <i>Stainless steel</i> AISI 410 dengan 12% Cr	Dilakukan 2 stages of rotational bending tes kelelahan dengan stage 1-6 pada kondisi udara terbuka dan stage 7-12 diikuti dengan paparan 3% NaCl. Dilakukan pengujian <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> dan <i>Energi Dispersive X-ray Spectroscopy</i>	Diperoleh bahwa larutan natrium klorida memperburuk kelelahan material hingga 40% daripada suhu ruangan, batas kelelahan diperkirakan sebesar 345,65 MPa untuk spesimen yang terkorosi	Perbedaan jenis material dan perlakuan material yang diikuti paparan 3% NaCl. Sedangkan penulis menggunakan <i>brine</i> alami yang berasal dari PLTP di Indonesia yaitu PLTP Dieng
----	--	--	--	---	--	---

5.	(Sudha Cheruvat hur, Eric A. Lass ., 2016)	<i>Additive Manufacturing of 17-4 PH Stainless steel : Post Processing Heat treatment to Achieve Uniform Reproducible Microstructure</i>	Dilakukan perlakuan panas untuk mendapatkan mikrostruktur yang seragam. Metode fabrikasi sampel yang digunakan adalah <i>additive manufacturing</i> .	Metode waktu dan <i>heat treatment</i> temperatur yang digunakan adalah 650°C dan 1050°C selama 1 jam dan 1150°C selama 2 jam. Semua sampel di polish menggunakan Swede's etchant. Analisis mikrostruktur dilakukan menggunakan JEOL SEM	Material yang dibentuk menunjukkan fraksi volume dari BCC/ Martensite dan FCC/ Austenit yang kira kira sama. Annealing dari SS 17-4 PH pada suhu 650°C selama 1 jam tidak efektif dalam mengubah struktur mikro pepadatan terarah, walaupun kekerasan meningkat secara signifikan	Siklus <i>heat treatment</i> berbeda dengan yang akan dilakukan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah <i>Additive manufacturing</i> sedangkan untuk pencetakan material yang penulis lakukan menggunakan metode <i>investment casting</i>
----	--	--	---	--	---	--

6.	(Jodi Heri, et al., 2010)	<i>Corrosion Behavior of 17-4 PH Stainless steel in Simulated Marine Environment</i>	Pengaruh material SS 17-4 PH dalam lingkungan korosif, Diberikan 3 perlakuan panas kemudian dianalisis perubahan mikrostruktur dan laju korosi	SS 17-4 PH diberikan 3 perlakuan panas yaitu <i>single stage aging</i> (550°C) (kondisi A), <i>double stage aging</i> (520°C dan 550°C) (kondisi B) dan <i>additive intermediate treatment</i> (tambahan 820°C) (kondisi C) kemudian dilihat perubahan mikrostruktur dan pengaruhnya terhadap ketahanan korosi. Pengujian korosi menggunakan larutan NaCl 3,5 wt% sebagai simulasi lingkungan laut. Metode pengujian adalah <i>potentiodynamic polarization test</i> dan <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	Kondisi C memiliki ketahanan korosi terbaik dengan Ecorr paling positif (-0.385 V) dan icorr terendah (4.98×10^{-6} A/cm ²), menunjukkan laju korosi yang paling lambat. Kondisi B memiliki ketahanan korosi terburuk dengan Ecorr paling negatif (-0.418 V) dan icorr tertinggi (1.18×10^{-5} A/cm ²), menunjukkan laju korosi paling cepat	Fabrikasi sampel menggunakan metode <i>plates rolling</i> , siklus <i>heat treatment</i> yang berbeda. Larutan yang digunakan untuk pengujian korosi adalah larutan NaCl 3,5 wt%
----	---------------------------	--	--	--	--	--

7.	(A Nikitasari, et al., 2019)	<i>Pitting corrosion resistance of CA6NM as geothermal turbine blade material in simulated artificial geothermal brine</i>	Ketahanan korosi dari material CA6NM sebagai material Turbin PLTP diuji menggunakan <i>brine</i> panas bumi buatan yang disintesis dari campuran cairan untuk mesimulasikan lingkungan panas bumi. Diuji dengan perbedaan dengan dan tanpa gas CO ₂	Eksperimen dilakukan dengan pengukuran elektrokimia dengan teknik polarisasi siklik dengan tekanan sekitar, suhu ruangan dan pH netral dalam <i>brine geothermal</i> buatan. Kemudian pengamatan SEM (JOEL Model JSM-5400) digunakan untuk mengukur ukuran korosi pitting	Material CA6NM tanpa gas CO ₂ memiliki kerentanan terhadap pitting korosi sedangkan material dalam <i>brine</i> dengan CO ₂ tidak memiliki kecendrungan untuk korosi pitting meskipun lingkungannya lebih agresif. Diameter pitting korosi meningkat seiring dengan bertambahnya kandungan Mo dan N pada CA6NM	Material yang digunakan untuk uji korosi berbeda dan larutan yang digunakan adalah <i>simulated artificial geothermal brine</i>
----	------------------------------	--	--	---	--	---

2.3 Kerangka Berpikir



Gambar 2.14 Kerangka Berpikir Penelitian

Sumber : diolah oleh peneliti

2.4 Hipotesis

- Proses rekayasa termal dan mekanis pada baja nirkarat 17-4 PH dapat meningkatkan sifat mekanis seperti kekuatan tarik dan kekerasan.
- Variasi *heat treatment* akan menyebabkan variasi mikrostruktur pada *stainless steel* 17-4 PH, seperti ukuran butir
- Perlakuan *heat treatment* tertentu akan meningkatkan ketahanan korosi baja nirkarat *stainless steel* 17-4 PH.