

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Banyak penelitian perlakuan panas yang telah dilakukan, diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Yusuf dan Nurlaila. (2023), yang membahas tentang pengaruh variasi suhu tempering terhadap nilai kekuatan tarik dan kekerasan baja karbon sedang. Telah dilakukan perlakuan panas baja karbon berupa proses pengerasan dan temper. Kadar karbon dari baja karbon sedang spesimen penelitian sebesar 0,47%. Hasil pengujian tarik menunjukkan kekuatan tarik baja karbon sedang yang telah mengalami proses temper berkisar antara 84,31 kgf/mm² - 125,36 kgf/mm², dimana kekuatan tarikan tertinggi terdapat pada suhu *temper* 450_{HAI}C dan terendah pada suhu *temper* 550_{HAI}C. Baja karbon sedang dengan suhu *temper* 300_{HAI}C (A) menghasilkan kekerasan tertinggi sebesar 76,9 HRC dan terendah 71,1 HRC untuk temperatur 550_{HAI}C (C). Peningkatan suhu temper berakibat pada penurunan tingkat kekerasan material baja. Peningkatan waktu temper telah berpengaruh terhadap karakteristik baja karbon sedang dan jenis perpatahan yang terjadi pada pengujian adalah patah getas, ulet dan patah campuran (Yusuf dan Nurlaili, 2023).

Begitupun dengan penelitian yang dilakukan oleh Barry dan Zuraida, (2022) yang membahas tentang pengaruh *Hardening* dan *Tempering* terhadap kekuatan tarik (ASTM E 8) dan kekerasan (*Rockwell*) yang diterapkan pada baja karbon sedang. Proses perlakuan panas *hardening* dipanaskan tungku pemanas (*furnance*) pada temperatur 900°C dan 920°C kemudian ditahan selama 30 menit dan didinginkan secara cepat lalu diproses lanjutan *tempering* dengan di temper masing - masing 500°C didinginkan secara perlahan. Hasil yang didapat hasil kekerasan untuk *raw material* dengan nilai kekerasan sebesar 5,7 HRC, untuk variasi temperatur *hardening* dengan temperatur 900°C sebesar 7,52 HRC dan temperatur 920°C sebesar 8,08 HRC sedangkan untuk proses lanjutan dari proses *hardening* yaitu proses *tempering* dengan memvariasikan temperatur sama yaitu 500°C dengan nilai kekerasannya sebesar 7,24 HRC dan 6,4 HRC. Pada proses *hardening*

pengaruh temperatur dengan variasi temperatur 900 °C dan 920°C nilai kekerasannya lebih besar dari pada tempering. Sedangkan untuk nilai *ultimate stress*, dan *yield strength* pada raw material 516,095 MPa, lebih besar dibandingkan dengan proses perlakuan panas *hardening* dan tempering 451,065 MPa dan 417,635 MPa. Proses *hardening* dan *tempering* nilai *ultimate stress* lebih tinggi *hardening* namun untuk nilai *yield strength* lebih tinggi *tempering* (Barry dan Zuraida, 2022).

Jasman. Syahrul, dkk.,(2018) Melakukan penelitian tentang analisis sifat mekanik dan struktur mikro baja aisi 4140 akibat perbedaan temperatur pada perlakuan panas tempering. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen, dengan menggunakan bahan baja karbon sedang yang mengandung kadar karbon 0,38 - 0,45 % C, yaitu baja AISI 4140. Dengan pengambilan 5 kelompok spesimen, yaitu kelompok tanpa perlakuan, *hardening*, *tempering* 200°C, *tempering* 400°C, *tempering* 600°C. Penelitian yang telah dilakukan maka didapat nilai rata-rata kekerasan baja AISI 4140 tanpa perlakuan sebesar 30 HRC, *hardening* sebesar 48,7 HRC, *tempering* 200°C sebesar 47 HRC, *tempering* 400°C sebesar 37,8 HRC, *tempering* 600°C sebesar 30,2 HRC. Nilai rata - rata tegangan spesimen tanpa perlakuan $1041,838 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, *hardening* $203,815 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, *tempering* 200°C $461,795 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, *tempering* 400°C $530,77 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, *tempering* 600°C $110,417 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur tempering maka nilai kekerasan baja AISI 4140 menurun bila dibandingkan dengan spesimen *hardening*, sedangkan kekuatan dan ketangguhan material kembali meningkat (Jasman, Syahrul, dkk., 2018).

Hariningsih dkk., 2022, Melakukan penelitian yang membahas studi eksperimental kekerasan dan struktur mikro baja karbon AISI 1045 setelah *hardening-quenching* dan *tempering*. *Hardening* dilakukan pada suhu 850°C selama 30 menit, kemudian dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan air, oli isorapid dan oli SAE20W50. *Tempering* dilakukan dengan memanaskan kembali sampel yang telah di-*quenching* menggunakan air pada suhu 350°C dengan waktu tahan (*holding time*) 30 menit dan 60 menit, kemudian dilanjutkan dengan pendinginan di udara bebas. Kekerasan benda uji diukur menggunakan alat uji kekerasan Rockwell. Hasil uji kekerasan menunjukkan *quenching* dengan air menghasilkan kekerasan tertinggi sebesar 61,24HRC, dengan

struktur mikro martensit dan setelah *tempering* berubah menjadi struktur martensit temper. Waktu tahan *tempering* yang lebih lama menghasilkan kekerasan yang lebih rendah (Hariningsih dkk., 2022).

2.2 Baja

Baja adalah besi carbon campuran logam yang dapat berisi konsentrasi dari elemen campuran lainnya, ada ribuan campuran logam lainnya yang 39 mempunyai perlakuan bahan dan komposisi berbeda. Sifat mekanis baja sangat sensitif berdasarkan kandungan karbon, yang mana secara normal kurang dari 2,0%. sebagian dari baja digolongkan menurut konsentrasi karbon, yakni ke dalam rendah, medium dan jenis karbon tinggi (Jasman, Syahrul, dkk., 2018).

2.2.1 Baja Karbon (*Carbon Steel*)

Baja merupakan salah satu jenis logam ferro dengan unsur carbon (C) 1,7%. Di samping itu baja juga mengandung unsur-unsur lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn), dan sebagainya yang jumlahnya dibatasi. Sifat baja pada umumnya sangat dipengaruhi oleh prosentase karbon dan struktur mikro. Struktur mikro pada baja karbon dipengaruhi oleh perlakuan panas dan komposisi baja (Lestari dkk., 2021).

Karbon dengan unsur campuran lain dalam baja membentuk karbida yang dapat menambah kekerasan, tahan gores dan tahan suhu baja. Perbedaan prosentase karbon dalam campuran logam baja karbon menjadi salah satu cara mengklasifikasikan. Berdasarkan kandungan karbonnya, baja dapat dikelompokkan menjadi tiga macam yaitu:

1. Baja Karbon Rendah

Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*) mengandung karbon antara 0,10 -0,30 %. Baja karbon ini dalam perdagangan dibuat dalam plat baja, baja strip dan baja batangan atau profil (Murtalim dkk., 2021).

2. Baja Karbon Sedang

Baja Karbon Menengah (*Medium Carbon Steel*) mengandung karbon antara 0,30% - 0,60% C. Baja karbon menengah ini banyak digunakan untuk keperluan alat-alat perkakas bagian mesin juga dapat digunakan untuk berbagai keperluan seperti untuk keperluan industri kendaraan, roda gigi, pegas (Murtalim dkk., 2021).

3. Baja Karbon Tinggi

Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*) mengandung kadar karbon antara 0,60% - 1,4 % C (Callister 2007). Baja ini mempunyai tegangan tarik paling tinggi dan banyak digunakan untuk material tools. Salah satu aplikasi dari baja ini adalah dalam pembuatan kawat baja dan kabel baja. Berdasarkan jumlah karbon yang terkandung didalam baja maka baja karbon ini banyak digunakan dalam pembuatan pegas, alat-alat perkakas seperti palu, gergaji atau pahat potong (Murtalim dkk., 2021).

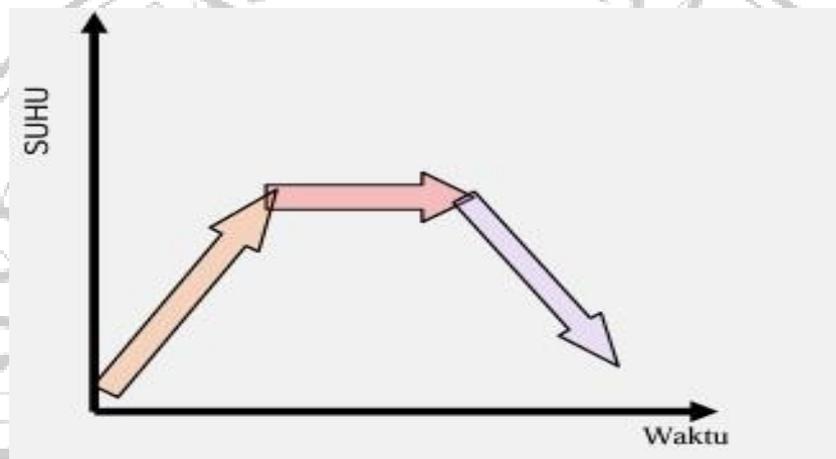
2.2.2 Baja Paduan (*Alloy Steel*)

Baja paduan adalah baja yang mengandung sebuah unsur lain atau lebih dengan kadar yang berlebih dari pada kadar biasanya dalam baja karbon. Unsur - unsur yang biasanya terdapat dalam baja karbon adalah C, Mn, Si, P dan S. untuk memperoleh sifat - sifat yang lebih baik maka kadar Mn atau Si ditambah, atau unsur-unsur lain seperti Cr, Ni, Mo, Co, Ti, W dan sebagainya. Dengan demikian selain memperbaiki sifat-sifat mekanisnya juga memperbaiki sifat tahan korosi, tahan suhu tinggi, tahan aus dan sifat-sifat listrik serta magnetiknya. Baja paduan terbagi atas dua kelompok, yaitu baja paduan rendah dan baja paduan tinggi (Yusuf, 2023). Kelompok pertama mengandung karbon dari 0,25 hingga 0,35%, sedangkan kelompok kedua dari 0,35 hingga 0,65%. Respon kelompok kedua terhadap perlakuan panas lebih baik, sedangkan kelompok pertama buruk. Itulah sebabnya baja kelompok pertama untuk komponen yang cukup tertekan seperti, cincin penggerak, perkakas tangan, soket dan tuas, mobil dan pesawat terbang. Karena kandungan karbon yang lebih tinggi, baja kelompok ke-2 memiliki kekuatan yang lebih biasanya diaplikasikan dalam beban tinggi, seperti spindel peralatan mesin, roda gigi, baut, poros engkol, dll (Sr dkk., 2018)

2.3 Perlakuan panas (*Heat treatment*)

Proses perlakuan panas adalah untuk meningkatkan keuletan, menghilangkan tegangan internal (*internal stress*), menghaluskan ukuran butir kristal dan meningkatkan kekerasan atau tegangan tarik logam. Jadi dapat disimpulkan bahwa perlakuan panas (*heat treatment*) adalah suatu proses kombinasi dari proses

pemanasan dan pendinginan material secara terkontrol dengan tujuan untuk memperbaiki, menghasilkan atau mengubah sifat-sifat pada logam maupun baja (Syaiyullah dkk., 2021), dimana proses tersebut yang mengakibatkan perubahan sifat mekanik, fisik maupun kimia dari material seperti kekerasan dan kekuatan mekaniknya sesuai dengan kebutuhannya (Budi dan Subagyo, 2021). Menurut Wahyudin K dan Wahjoe Hidayat (1978: 9), sifat mekanik suatu logam adalah kemampuan atau kelakuan logam untuk menahan beban - beban yang dikenakan kepadanya, baik pembebanan statis atau dinamis pada suhu biasa, suhu tinggi atau pun suhu dibawah 0° (Jasman, Syahrul, dkk., 2018). Proses perlakuan panas ini dapat ditunjukkan melalui diagram temperatur VS waktu seperti gambar 2.1



Gambar 2. 1 Prinsip Perlakuan panas Temp. VS (Karmin, 2009)

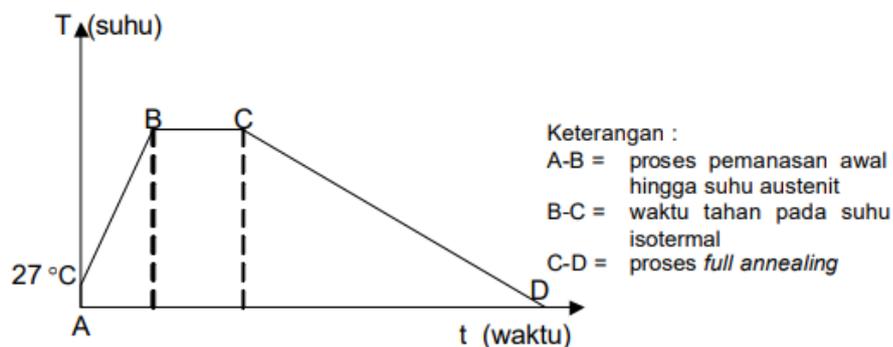
Ketiga kondisi diatas tergantung dari sifat yang ingin dicapai. Selama pemanasan dan pendinginan diharapkan didalam logam terjadi perubahan struktur mikro yang pada akhirnya akan diperoleh sifat baru yang kita inginkan, perlu kita ketahui bahwa struktur mikro yang terjadi pada akhir proses perlakuan panas dipengaruhi oleh komposisi unsur dalam material, perlakuan panas yang dilakukan pada bahan, dan kondisi awal spesimen (Karmin, 2009).

Proses perlakuan panas ada dua kategori, *Softening* (pelunakan) usaha untuk menurunkan sifat mekanik agar menjadi lunak dengan cara mendinginkan material yang sudah dipanaskan di dalam tungku (*Annealing*) untuk mendinginkan dalam udara terbuka (*Normalizing*) dan Proses perlakuan panas *hardening* (pengerasan) usaha untuk meningkatkan sifat material terutama kekerasan dengan cara celup cepat (*quenching*) material yang sudah dipanaskan ke dalam *quenching* berupa air,

air garam dan oli (Mujaddedy dkk., 2020). Berikut adalah jenis-jenis proses perlakuan panas yang biasa dilakukan sebagai berikut:

2.3.1 Annealing

Proses *Annealing* merupakan salah satu proses perlakuan panas yang digunakan untuk meniadakan pengaruh pengerjaan dingin, dan juga berfungsi untuk melunakkan material serta meningkatkan keuletan. Jenis anil berbeda-beda, tergantung pada kondisi benda kerja, suhu pemanasan, lama waktu penahanan, laju pendinginan, dan sebagainya. *Annealing* berfungsi agar meminimalkan tegangan sisa yang terdapat pada suatu material atau pemanasan di atas temperatur kritis. Material dipanaskan 25°C di atas suhu kritis, lalu disuhu yang telah ditentukan dalam beberapa saat (*holding time*), dan kemudian didinginkan secara lambat di dalam tungku pemanas hingga mencapai suhu kamar (Budiarto dkk., 2020). Proses *annealing* ditunjukkan pada gambar 2.2

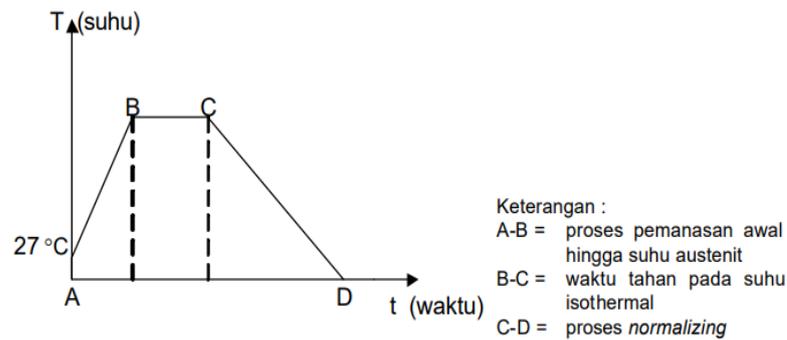


Gambar 2. 2 Proses *Annealing* (Budiarto dkk., 2020)

2.3.2 Normalizing

Perlakuan panas *normalizing* adalah proses perlakuan yang bertujuan memperbaiki struktur butiran logam yang mengalami deformasi akibat proses pengerjaan. Hasil dari proses ini butiran logam menjadi halus, berbentuk bola dan homogen, disamping sifat mampu mesin dan mampu bentuk logam menjadi lebih baik. Dampak negative *normalizing* adalah menurunkan ketangguhan bahan logam. Indikator ketangguhan logam ditentukan oleh kekerasan (*hardness*), kuat tarik (*tensile strength*), kuat pukul (*impact strength*). Perpaduan ketiganya secara proporsional menghasilkan ketangguhan yang optimal, dan memberikan *life time service* lebih lama (Jasman, Hotmartua, dkk., 2018). Proses penormalan umumnya

diterapkan pada baja karbon dan baja paduan rendah. Baja paduan pemanasan dilakukan pada temperatur 870 s/d 925°C, sedangkan untuk baja karbon pemanasan dilakukan pada temperatur 830 s/d 915°C (Pratiwi dan Utami, 2020a). Gambar proses *normalizing* ditunjukkan pada gambar 2.3



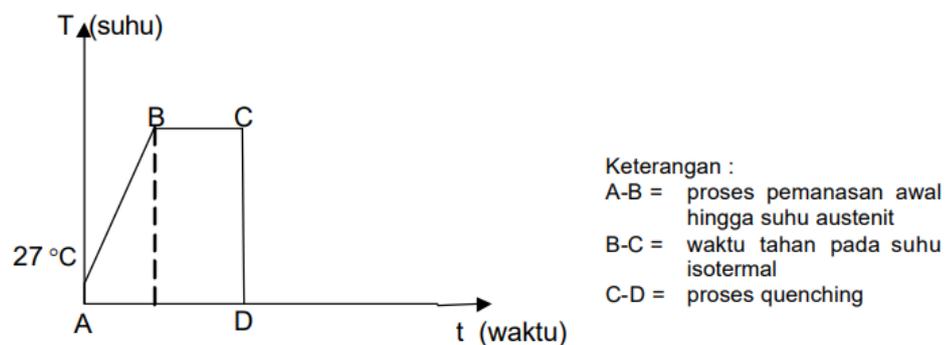
Gambar 2. 3 proses *normalizing* (Pratiwi dan Utami, 2020b)

2.3.3 *Quenching*

Perlakuan panas *quenching* adalah proses perlakuan panas dimana prosesnya dilakukan dengan pendinginan yang relatif cepat dari temperatur austenit (umumnya pada jarak temperatur 815°C - 870°C) pada baja (Mujaddedy dkk., 2020). Media pendinginan dapat berupa air, air garam, oli dan udara bebas serta lainnya (Sukarno dkk., 2023). Tujuan utama dari proses *quenching* secara umum pada baja (baja karbon, *low alloy steel* dan *tool steel*) adalah untuk proses *hardening*, yaitu menghasilkan baja dengan sifat kekerasan maksimal dari transformasi struktur austenit pada suhu tinggi menjadi struktur martensit tanpa terjadi pembentukan struktur perlit atau bainit yang disebut martensit (Syaifullah dkk., 2021). Faktor-faktor penting dalam proses *quenching* antara lain, disain peralatan, media pendingin, konsentrasi pendingin, temperatur bak, dan laju gerakan pendinginan. Faktor tersebut dapat mempengaruhi sifat akhir dari bahan logam sehingga harus diatur selama proses pendinginan berlangsung. Oleh karena itu, yang menarik dari metode *quenching* adalah bagaimana memilih media pendingin dan tahapan proses yang dilakukan sehingga akan meminimalkan beragam tegangan yang timbul yang dapat mengurangi terjadinya retak dan distorsi serta pada saat yang sama mampu menyediakan laju perpindahan panas yang cukup

untuk mendapatkan sifat akhir hasil *quenching* seperti kekerasan (Yunaidi dan Harnowo, 2015).

Material yang dikeraskan dengan metode *quench* haruslah memenuhi komposisi tertentu untuk dapat membentuk fasa martensit. Untuk itu pengecekan komposisi kimia material perlu dilakukan sebelum dikeraskan. Komposisi paduan dalam baja yang sangat berperan dalam hal pengaruhnya terhadap kemampuan baja untuk dikeraskan terutama unsur - unsur yang dapat membentuk karbida seperti unsur C, Mo, W dan lainnya. Khusus baja karbon hanya bisa dilakukan pengerasan dengan metoda *quenching* bila memiliki kadar karbon minimal 0,35% (Karmin, 2009). Gambar proses *quenching* ditunjukkan pada gambar 2.4



Gambar 2. 4 Proses Quenching (Fakhriansyah, 2019)

2.3.4 Hardening

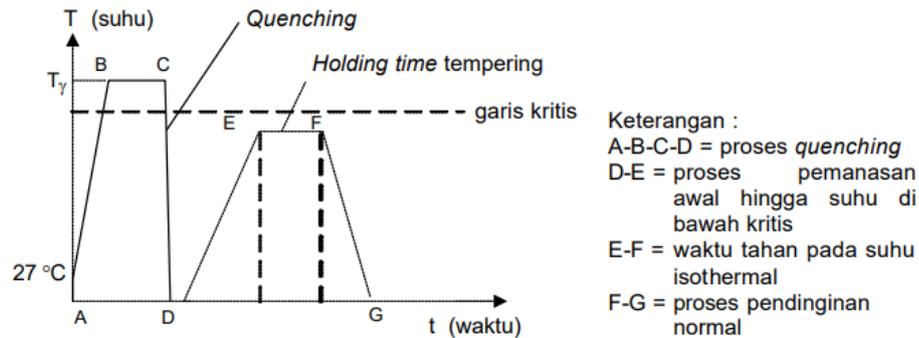
Perlakuan panas *hardening* adalah proses perlakuan panas untuk meningkatkan kekerasan benda kerja dan meningkatkan ketahanan aus. Perlakuan ini terdiri dari memanaskan baja hingga perubahan fasanya homogen atau sampai suhu austenit dan menahannya pada jangka waktu tertentu dan kemudian didinginkan dengan laju pendinginan yang sangat tinggi atau di *quenching* hingga terjadi perubahan struktur kital yang disebut martensit (Hasan dan Aprianto, 2022). Kecepatan proses pendinginan dapat menghasilkan tingkat kekerasan yang berbeda-beda, semakin cepat pendinginan maka semakin banyak struktur martensit yang terbentuk, semakin lambat pendinginan maka terbentuk struktur perlit yang menyebabkan nilai kekerasan semakin menurun. Triratna Shrestha dkk. melaporkan hasil penelitian bahwa perubahan nilai kekerasan baja melalui proses perlakuan panas, sangat dipengaruhi oleh hasil perubahan ukuran butir, perubahan

densitas dislokasi dan pengasaran endapan, dimana semakin halus ukuran butir akan meningkatkan kekerasannya (Djuhana dkk., 2021). Body Centered Tetragonal dari awal yaitu mula-mula austenit yang didinginkan dengan cepat dan dapat mencapai temperatur A1 tanpa terjadi perubahan struktur lain. Pada temperatur yang rendah ini austenit mengalami *driving force* berubah dari struktur *kristal face centred cubic* mencapai *Body Centered cubic*, sehingga menimbulkan pergeseran terhadap atom-atom. Hal ini menyebabkan atom-atomnya sedikit bergeser ke dalam bentuk Body Centered cubic tapi tidak dapat terbentuk, melainkan menjadi Body Centered Tetragonal karena salah satu rusuk sel satuannya lebih panjang dari yang lain. Akibat proses *hardening* pada baja, maka dapat menyebabkan kekerasan (*hardnes*) dan kegetasan (*brittleness*) sehingga baja tersebut belum cocok untuk digunakan. Untuk menentukan proses pemanasannya kapan bisa dibentuk dan kapan bisa dicelupkan ke air untuk mendapatkan ketajaman belum begitu banyak orang yang mengetahui pengetahuan tentang itu. Selain sifat mekanik bahan harus diketahui juga perlu dipertimbangkan spesifikasi dari bahan yang akan digunakan (Suarsana dkk., 2018).

2.3.5 Tempering

Perlakuan panas *tempering* adalah proses pemanasan ulang baja yang telah dikeraskan atau di-*hardening* pada temperatur di bawah temperatur kritis antara 100 – 600°C, dilanjutkan dengan pendinginan. Baja yang telah dikeraskan bersifat rapuh dan kurang cocok digunakan. Melalui perlakuan panas tempering ini menghasilkan baja lunak, dengan menggunakan proses ini maka keuletan baja dapat ditingkatkan sedangkan kekerasan dan ketangguhan baja menurun dikarenakan struktur martensit yang tidak stabil, Struktur yang tidak stabil memiliki kelemahan seperti dapat mengakibatkan percepatan kerusakan. Temperatur temper dan waktu mendinginkan material baja tergantung pada tipe dan tingkat kekerasan yang diinginkan media pendinginan yang berbeda memiliki efek signifikan pada efektivitas proses tempering. Beberapa peneliti terdahulu telah melaporkan pengaruh proses temper terhadap berbagai jenis baja, menurut W.O. Alexander (1991: 59) “Suhu temper adalah suhu kritis, yaitu antara 200°C dan 300°C laju difusi lambat dan hanya sebagian kecil karbon dibebaskan. Sehingga sebagian struktur tetap keras tetapi mulai kehilangan kerapuhannya, diantara suhu 500°C

dan 600°C , difusi berlangsung lebih cepat, dan atom karbon yang berdifusi diantara atom besi dapat membentuk sementit (Jasman, Syahrul, dkk., 2018). Proses *tempering* ditunjukkan pada gambar 2.5



Gambar 2. 5 Proses Tempering (Fakhriansyah, 2019)

Menurut tujuannya proses *tempering* dibagi dalam beberapa bagian, yaitu dibedakan sebagai berikut:

1. *Tempering* pada suhu rendah ($150^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$)

Tempering pada suhu rendah bertujuan hanya untuk mengurangi regangan kerut dan kerapuhan dari baja, tidak menghasilkan penurunan yang berarti, karena pemanasan menghilangkan tegangan dalam terlebih dahulu. Penemperan pada suhu hingga 200°C ini disebut penuaan buatan. Baja yang memperoleh perlakuan seperti ini memiliki ukuran yang tetap untuk waktu lama pada suhu ruangan. Biasanya digunakan untuk alat-alat potong, mata bor dan lainnya (Jasman, Syahrul, dkk., 2018).

2. *Tempering* pada suhu menengah ($300^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C}$)

Tempering ini bertujuan untuk menambah keuletan (*ductility*) dan kekerasannya (*hardness*) sedikit berkurang. Proses *tempering* ini digunakan pada alat-alat kerja yang mengalami beban berat, misalnya palu, pahat dan pegas (Jasman, Syahrul, dkk., 2018).

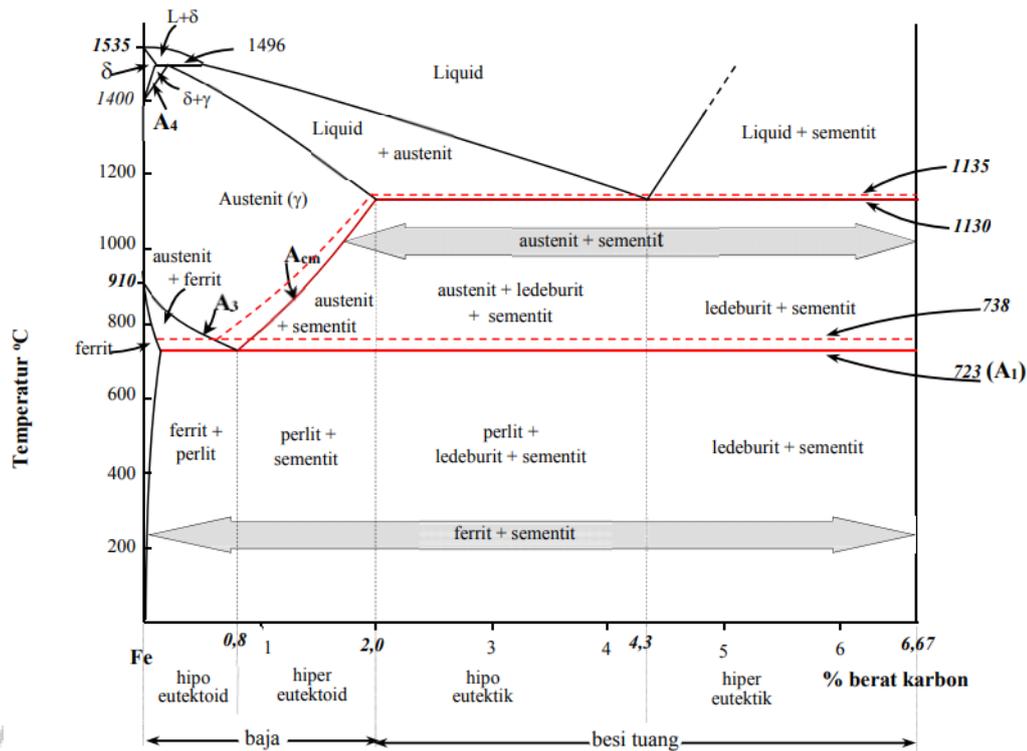
3. *Tempering* pada suhu tinggi ($550^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$)

Tempering ini bertujuan untuk meningkatkan kekerasan dengan menguraikan karbid. Penemperannya hanya pada baja perkakas paduan tinggi. Penemperan baja bukan paduan berlangsung pada suhu penemperan yang berpedoman pada karbon dan kekerasan yang dikehendaki. Proses ini digunakan pada material roda gigi, poros penggerak, dan lainnya (Jasman, Syahrul, dkk., 2018).

2.4 Diagram Fasa (Fe-Fe₃C)

Diagram fase Fe-Fe₃C merupakan diagram untuk kombinasi karbon dengan besi pada keadaan solid solution. Diagram yang menampilkan hubungan antara temperatur dimana terjadi perubahan fasa selama proses pendinginan dan pemanasan yang lambat dengan kadar karbon yang dibatasi 6,7% menjadi fokus utama untuk dilakukan *heat treatment*. Dimana fungsi diagram fasa memudahkan memilih temperatur pemanasan yang sesuai untuk setiap proses perlakuan panas baik proses *annealing*, *normalizing* maupun proses pengerasan (Jordi dkk., 2017). Diagram fase ini termasuk diagram *ase binary* menunjukkan hubungan antara dua variabel yaitu hubungan antara temperatur dan kandungan karbon (%C) selama pemanasan lambat. Dari diagram fasa tersebut dapat diperoleh fasa yang terjadi pada komposisi dan temperatur yang berbeda dengan kondisi pendinginan lambat, temperatur pembekuan dan daerah-daerah pembekuan paduan Fe-C bila dilakukan pendinginan lambat, temperatur cair dari masing-masing paduan, batas-batas kelarutan atau batas kesetimbangan dari unsur karbon pada fasa tertentu, reaksi-reaksi metalurgis yang terjadi, yaitu reaksi eutektik, peritektik dan eutectoid (Mujaddedy dkk., 2020).

Diagram fasa Fe-Fe₃C sangat penting dibidang metalurgi karena sangat bermanfaat dalam menggambarkan perubahan-perubahan fasa pada baja seperti tampak pada Gambar 2.6



Gambar 2. 6 Diagram Kesetimbangan besi – karbon (Jordi dkk., 2017)

Pada diagram dapat dilihat ada beberapa simbol yaitu ferrit (α), besi delta (δ) dan austenit (γ) sebagai larutan padat. Ferrit mempunyai struktur BCC (Body Centered Cubic), besi delta (δ) mempunyai struktur FCC (Face Centered Cubic), austenite (γ) mempunyai struktur FCC (Face Centered Cubic). Fasa A1 merupakan perubahan fase pada baja hypoeutectoid dari austenit (γ) menjadi perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) atau disebut temperatur reaksi eutectoid. Fasa A2 merupakan perubahan dari titik curie sifat magnetik besi dari ferromagnetic ke paramagnetic. Fasa A3 merupakan perubahan dari fasa austenit (γ) ke ferrit (α). Fasa ACM merupakan temperatur perubahan dari fasa austenit (γ) menjadi sementit. Sedangkan pada fasa A123 merupakan temperatur perubahan austenit (γ) menjadi perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) untuk baja hypereutectoid (Isworo dan Rahman, 2020).

Diagram fase menggambarkan perubahan suhu dan komposisi suatu unsur. Pada batas diagram terdapat campuran dua fase. Diagram tersebut memiliki titik tripel, yaitu titik di mana tiga fase suatu unsur berada dalam kesetimbangan. Diagram tersebut juga menunjukkan batas fase, yaitu titik di mana dua fase unsur terjadi sekaligus. Baja eutektoid memiliki komposisi karbon sekitar 0,7 baja yang memiliki

komposisi karbon kurang dari 0,71 dikenal sebagai hipo-eutektoid dan baja dengan kandungan karbon di atas 0,71 disebut baja hipereutektoid. Baja hipo-eutektik memiliki komposisi karbon yang lebih rendah daripada komposisi karbon eutektoid. Sementit terbentuk di antara batas bidang austenit dan sementit. Area diagram fasa yang diberi label austenit dengan huruf Yunani gamma adalah kubik dengan kemiringan muka dan area yang diberi label ferit dengan huruf Yunani alpha adalah kubik dengan kemiringan badan (Akinlabi dkk., 2020). Dari gambar 2.1 diatas dapat diterapkan atau dibaca diantaranya.

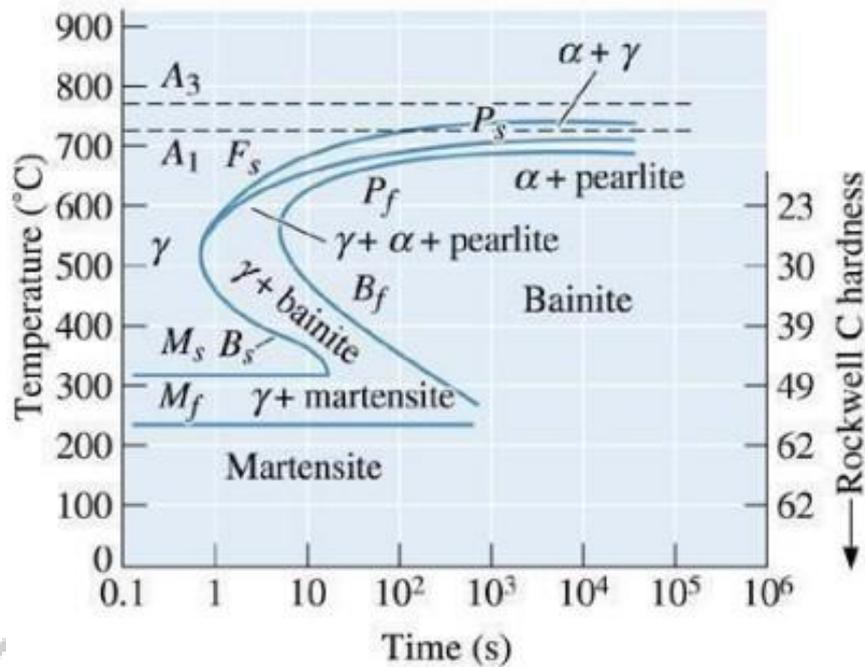
1. Austenit atau Besi Austenit merupakan larutan pada sela antara karbon dan besi dengan struktur FCC, dan mampu melarutkan maksimum 2% karbon secara intersitas pada temperatur 1129°C dalam bentuk larutan padat, austenit bersifat liat dan lunak.
2. Ferrit disebabkan oleh pendinginan secara lambat dari austenit baja hypotektoid pada saat mencapai A3. Ferrit merupakan larutan karbon yang solid dan unsur paduan lainnya pada besi kubus pusat badan (Fe). Tingkat kekerasan baja dengan dominasi struktur ferrit berkisar antara 70 BHN hingga 100 BHN, sehingga sangat lunak dan ulet dengan kemampuan konduktivitas yang tinggi.
3. Sementit merupakan senyawa karbida besi dengan prosentase karbon mencapai 6,67 %C terbentuk struktur mikro dinamakan Cementit Fe₃C (dapat dilihat pada garis vertikal paling kanan) struktur sementit memiliki tingkat kekerasan yang berkisar antara 5 HRC hingga 68 HRC.
4. Perlit memiliki tingkat kekerasan yang berkisar antara 10 HRC hingga 30 HRC. Struktur perlit terbentuk oleh campuran antara ferrit dan sementit. Perlit yang terbentuk sedikit di bawah temperatur eutektoid mempunyai tingkat kekerasan yang lebih rendah dan membutuhkan waktu inkubasi lebih banyak.
5. Bainit adalah fasa yang kurang stabil yang dihasilkan dari austenit pada suhu yang lebih rendah dari suhu transformasi ke perlit dan lebih tinggi dari transformasi ke martensit.
6. Martensit adalah larutan padat karbon yang lewat jenuh pada besi alfa sehingga latis-latis sel satuanya terdistorsi. Karbon merupakan unsur penyetabil austenit. Pada temperatur 1140 °C terjadi kelarutan maksimum yang berkisar antara 1,7% karbon pada fase austenit. Sedangkan kelarutan karbon pada ferrit naik dari 0%

pada temperatur 910 °C menjadi 0,025% pada temperatur 723 °C. Kelarutan karbon pada ferrit menurun menjadi 0,08% pada temperatur kamar saat mengalami pendinginan lanjut.

Beberapa jenis baja memiliki sifat-sifat yang tertentu sebagai akibat penambahan unsur paduan. Salah satu unsur paduan yang sangat penting yang dapat mengontrol sifat baja adalah karbon (C). Jika besi dipadu dengan karbon, transformasi yang terjadi pada rentang temperatur tertentu erat kaitannya dengan kandungan karbon. Berdasarkan pepaduan antara besi dan karbon, karbon di dalam besi dapat berbentuk larutan atau berkombinasi dengan besi membentuk karbida besi (Fe_3C) (Priyanto dkk., 2023). Diagram fasa (Fe_3C) dapat digunakan untuk memperkirakan beberapa kondisi transformasi tetapi untuk kondisi tidak setimbang tidak dapat menggunakan diagram fasa. Dengan demikian, untuk setiap kondisi transformasi lebih baik menggunakan diagram TTT (*Time Temperature Transformation*) (Murtalim dkk., 2021).

2.5 Diagram TTT (*Time Temperatur Transformation*)

Diagram *Time Transformation Temperature* (TTT) adalah diagram yang menggambarkan hubungan antar fasa atau struktur yang terbentuk setelah transformasi fasa akibat perubahan suhu dan waktu. Nama lain dari diagram ini adalah diagram S (S-Curve Diagram) atau diagram C (C-Curve Diagram) (Hariningsih dkk., 2022). Gambar diagram TTT (*Time Temperature Transformation*) ditunjukkan pada gambar 2.7



Gambar 2. 7 Diagram TTT (Time Temperature Transformation) untuk baja hypoeutectoid steel (Kandungan carbon maksimal 0,6%) (Murtalim dkk., 2021)

Diagram TTT (*Time Temperature Transformation*) menghubungkan transformasi austenit terhadap waktu dan temperatur. Melalui diagram ini dapat dipelajari kelakuan baja pada setiap tahap perlakuan panas. Diagram ini dapat juga digunakan untuk memperkirakan struktur dan sifat mekanik dari baja yang diquench (disepuh) dari temperatur austenitisasinya ke suatu temperatur dibawah A1. Pengaruh laju pendinginan pada transformasi austenit dapat diuraikan melalui penggunaan diagram TTT untuk jenis baja tertentu.

Diagram ini sumbu tegak menyatakan temperatur sedangkan sumbu datar menyatakan waktu yang diplot dalam skala logaritmik. Diagram ini merupakan ringkasan dari beberapa jenis struktur mikro yang diperoleh dari rangkaian percobaan yang dilakukan pada spesimen yang kecil yang dipanaskan pada temperatur austenitisasinya, kemudian diquench pada temperatur tertentu dibawah titik eutektoid A1, untuk jangka waktu yang tertentu pula sampai seluruh austenit bertransformasi. (Murtalim dkk., 2021).

2.6 Holding Time

Waktu tahan (*Holding time*) adalah suatu proses menahan temperatur di atas temperatur kritis pada temperatur austenisasi dengan tujuan mendapatkan hasil kekerasan maksimum dari suatu bahan atau material untuk memperoleh struktur austenit yang homogen dari kelarutan karbida atau sampai terjadi pendifusian unsur paduannya dengan karbon (Isworo dan Rahman, 2020). *Holding time* yang ditentukan mempengaruhi dari kerataan austenisasi material tersebut dimana dalam proses perlakuan panas, lama waktu penahanan menentukan perambatan panas yang sama antar sisi dari baja. Salah satu faktor dalam penentuan lama waktu penahanan, yakni bergantung pada bentuk dan dimensi baja. Semakin rumit bentuk dan dimensinya, semakin lama waktu penahannya. Hal ini diperlukan agar panas yang diterima baja sampai ke inti material. Sedangkan *holding time* yang terlalu cepat atau terlalu lama akan mengakibatkan hasil sifat material tidak sesuai dengan yang diinginkan (Budi dan Subagyo, 2021). Dengan demikian, waktu penahanan harus dihitung dengan cermat. Waktu penahanan panas bergantung pada bentuk dan dimensi spesimen, suhu pemanasan, perlakuan panas metode, dan mutu baja (Hang, 2021). Untuk menentukan rekomendasi waktu tahan *holding time* pada proses perlakuan panas dapat dilihat dari tabel 2.1 berikut:

Tabel 2. 1 *Holding Time* (Isworo dan Rahman, 2020)

<i> Steel Type </i>	<i> Holding Time </i>
<i> Low carbon steel </i>	<i> 5 – 15 minutes </i>
<i> Medium alloy steel </i>	<i> 15 – 25 minutes </i>
<i> Low alloy toolsteel </i>	<i> 10 – 30 minutes </i>
<i> High alloy tool steel </i>	<i> 10 – 60 minutes </i>
<i> Hot work tool steel </i>	<i> 15 – 30 minutes </i>

Pedoman untuk menentukan holding time dari berbagai jenis – jenis baja pada umumnya diantaranya yaitu:

1. Baja konstruksi dari baja karbon dan baja paduan rendah yang mempunyai kandungan karbida yang mudah larut, membutuhkan *holding time* yang

singkat, 5 – 15 menit setelah mencapai temperatur pemanasnya di anggap sudah memadai.

2. Baja konstruksi dari baja paduan rendah menengah di haruskan menggunakan holding time 15 – 25 menit, tidak tergantung ukuran benda kerja yang akan di proses.
3. *Long Alloy Tool Steel* memerlukan holding time yang tepat agar kekerasan yang diinginkan dapat mencapai. Disarankan menggunakan 0,5 menit per milimeter tebal benda atau 10-30 menit.
4. *High Alloy Chorme Steel* membutuhkan *holding time* yang paling panjang diantara semua baja perkakas, dan juga tergantung temperatur pemanasan. Dan juga di perlukan kombinasi temperatur dan holding time yang tepat. Biasanya di haruskan menggunakan 0,5 menit per milimeter tebal benda dengan minimum 10 menit dan maksimum 3 jam.
5. *High Speed Steel* membutuhkan temperatur pemanasan yang sangat tinggi 1200 °C - 1300°C. Untuk mencegah yang akan terjadi pertumbuhan *holding time* di ambil yang hanya beberapa menit saja.

2.7 Metode Pendinginan

Proses pendinginan adalah pendinginan cepat benda bersuhu tinggi dengan paparan cairan yang jauh lebih dingin (Abdullah dkk., 2023). Untuk dapat memperoleh struktur yang sepenuhnya martensit maka laju pendinginan harus dapat mencapai laju pendinginan kritis (*critical cooling rate*). Pendinginan yang kurang dari laju pendinginan kritis akan mengakibatkan adanya sebagian austenit yang tidak bertransformasi menjadi martensit tetapi menjadi struktur lain, sehingga kekerasan maksimum tentu tidak akan tercapai. Laju pendinginan yang terjadi pada suatu benda kerja tergantung pada beberapa faktor, terutama: Jenis media pendinginnya, temperatur media pendingin dan kuatnya sirkulasi pada media pendingin (Suarsana dkk., 2018). Beberapa media pendingin yang umum di gunakan dalam proses perlakuan panas pada baja:

1. Udara

Pendinginan udara dilakukan untuk perlakuan panas yang membutuhkan pendinginan lambat. Untuk keperluan tersebut udara yang disirkulasikan ke dalam ruangan pendingin dibuat dengan kecepatan yang rendah. Udara sebagai pendingin

memberikan kesempatan kepada logam untuk membentuk kristal – kristal dan kemungkinan mengikat unsur – unsur lain dari udara. Adapun pendinginan pada udara terbuka akan memberikan oksidasi oksigen terhadap proses pendinginan (Jordi dkk., 2017).

2. Air

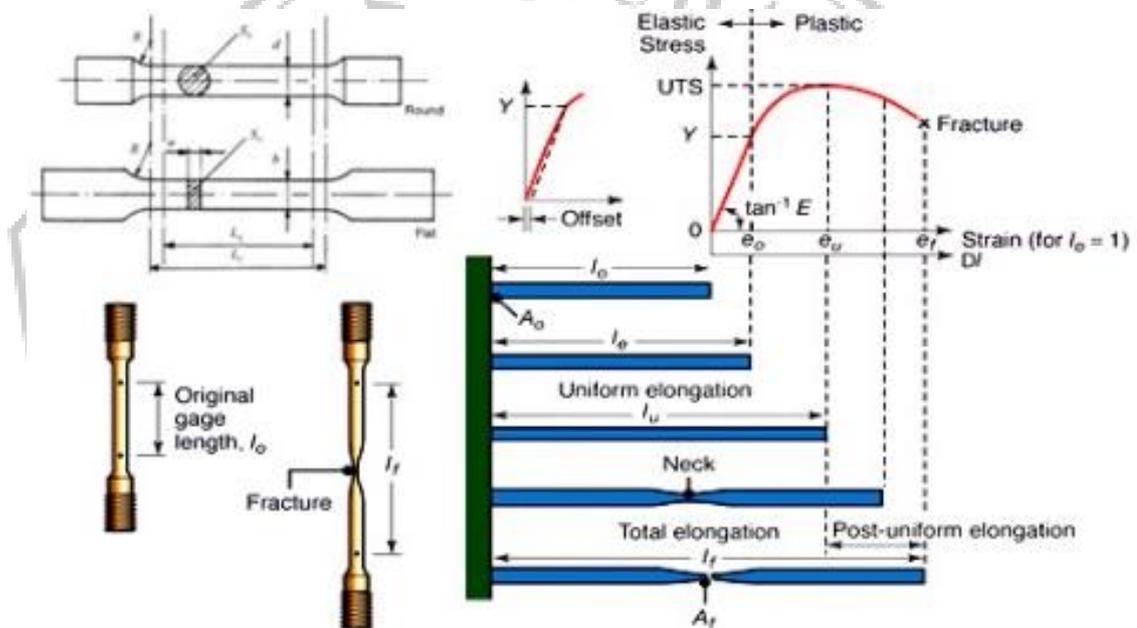
Pendinginan Air merupakan senyawa yang mengandung unsur (H) dan unsur oksigen (O), dengan perbandingan unsur 2 atom hidrogen dan 1 atom oksigen (H₂O). Kedua unsur ini memiliki sifat yang bertentangan, hidrogen adalah unsur yang dibutuhkan dalam pembakaran. Dalam persenyawaannya kedua unsur ini memiliki sifat-sifat baru yaitu tidak bisa terbakar (Aldo dan Hariyono, 2022). Media pendingin air mempunyai kemampuan pendinginan yang tinggi sekali, maka dari itu air biasanya digunakan untuk pendinginan dari baja yang tidak terlalu tinggi, seperti baja karbon. Kekurangan pendinginan air adalah laju pendinginan sangat tinggi pada daerah pembentukan martensit sehingga akan menyebabkan terjadinya tegangan sisa akibat transformasi dan selisih temperatur. Ini akan mendorong terjadinya keretakan pada saat quenching (Suarsana dkk., 2018).

3. Minyak atau Oli

Pendinginan minyak digunakan sebagai fluida pendingin dalam perlakuan panas benda kerja. Selain minyak yang khusus digunakan sebagai bahan pendingin pada proses perlakuan panas, dapat juga digunakan oli, minyak bakar atau solar. Derajat kekentalan (*viscosity*) berpengaruh pada *severity of quench* (Suarsana dkk., 2018). Secara umum, oli atau minyak mempunyai laju pendinginan yang lebih lambat dibandingkan dengan air atau air garam. Oleh karena itu, media pendingin ini dapat memberikan hasil *quenching* dengan distorsi dan retak yang lebih kecil. Oli mempunyai titik nyala yang beragam antara 130 - 290°C. Dalam aplikasinya temperatur bak pendingin biasanya antara 75 - 110°C di bawah titik nyalanya untuk menghindari kemungkinan oli terbakar (Yunaidi dan Harnowo, 2015). Meskipun pendinginan oli dapat secara efektif mengurangi risiko retak karena laju pendinginannya yang lebih lambat, hal itu dapat menyebabkan pencemaran lingkungan selama penggunaannya, yang memicu kekhawatiran tentang perlindungan lingkungan (Su dkk., 2024)

2.8 Pengujian Tarik

Pengujian tarik adalah salah satu dari pengujian mekanik yang sangat sederhana, mendasar/fundamental, tidak mahal dan telah di standarisasi di seluruh dunia seperti Amerika ASTM E 8 dan ASTM E 8M adalah pengujian tarik (*tensile test*) juga sering disebut sebagai *tension test*, dari pengujian ini dapat mengetahui kekuatan mulur, perpanjangan, reduksi, dan modulus elastisitas dari suatu material. Umumnya uji mekanik material yang dilakukan bertujuan untuk mengukur kekuatan tarik (*tensile strength*) dari suatu bahan dan didaerah plastis(Mulyadi, 2016). Spesimen standart ASTM E8 ditunjukkan pada Gambar 2.8

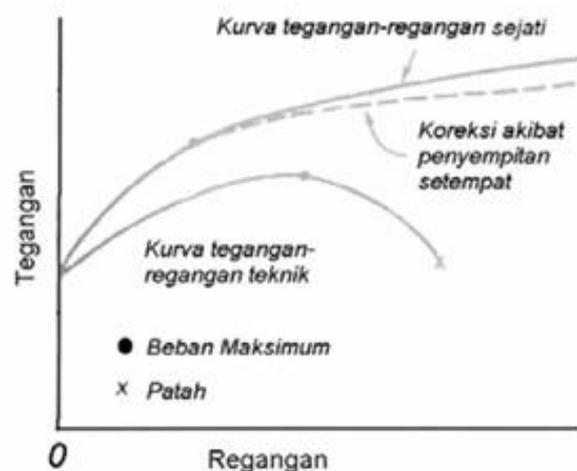


Gambar 2. 8 Spesimen Uji Tarik standart ASTM E8(Mulyadi, 2016)

Spesimen pengujian tarik dimensi penampang bulat ditunjukkan pada gambar 2.8 diatas. Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan bahan terhadap gaya tarik, Dengan menarik suatu bahan sampai putus maka dapat diketahui bagaimana suatu bahan tersebut bereaksi terhadap gaya tarik dan mengetahui sejauh mana material itu bertambah panjang (Fauzi K. P. dkk., 2016). Pengujian tarik pada umumnya menghasilkan parameter kekuatan tarik (*ultimate strength*) maupun kekuatan luluh (*yield strength*). Keuletan bahan biasanya disajikan dalam bentuk persentase perpanjangan, kontraksi dan reduksi penampang (*reduction of area*). Ini adalah kurva standart ketika melakukan eksperimen uji tarik dimana perbandingan

tegangan (σ) dan regangan (ϵ) selalu tetap, kurva yang menyatakan hubungan antara *strain* dan *stress* seperti ini disingkat kurva SS (SS curve) (Assiddiq S, 2021).

Pengujian tarik rekayasa sering dipergunakan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan. Pada uji tarik, benda uji tarik diberi beban gaya tarik sesumbu yang bertambah besar secara kontinyu. Diagram yang diperoleh dari uji tarik pada umumnya digambarkan sebagai diagram tegangan-regangan. Kurva tegangan-regangan memiliki dua macam kurva yaitu kurva tegangan-regangan rekayasa (tegangan teknik atau nominal) dan kurva tegangan regangan sejati, pada gambar 2.9 terlihat jelas perbedaan antara kedua kurva tersebut. Kurva tegangan-regangan rekayasa berdasarkan pada dimensi benda uji semula, sedangkan kurva tegangan-regangan sejati berdasarkan pada luas penampang benda uji yang sebenarnya, maka diperoleh kurva tegangan-regangan yang naik terus sampai patah. Gambar 2.9 menunjukkan Kurva tegangan regangan (Jordi dkk., 2017)



Gambar 2. 9 Perbandingan Kurva Tegangan-Regangan Rekayasa dengan Kurva Tegangan-regangan Sejati (Jordi dkk., 2017)

Kurva tegangan-regangan rekayasa diperoleh dari hasil pengukuran benda uji tarik. Tegangan yang diperlukan pada kurva diperoleh dengan membagi beban dengan luas awal penampang benda uji, dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2.1 persamaannya yaitu:

$$S = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

S = Tegangan, psi (lb/in²) atau pascal (N/m²)

P = Beban, kg atau KN

A₀ = Luas penampang awal, mm²

Regangan yang dipergunakan pada kurva diperoleh dengan membagi perpanjangan ukur benda uji dengan panjang awal, dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2.2 persamaannya yaitu (Tekan dkk., 2019):

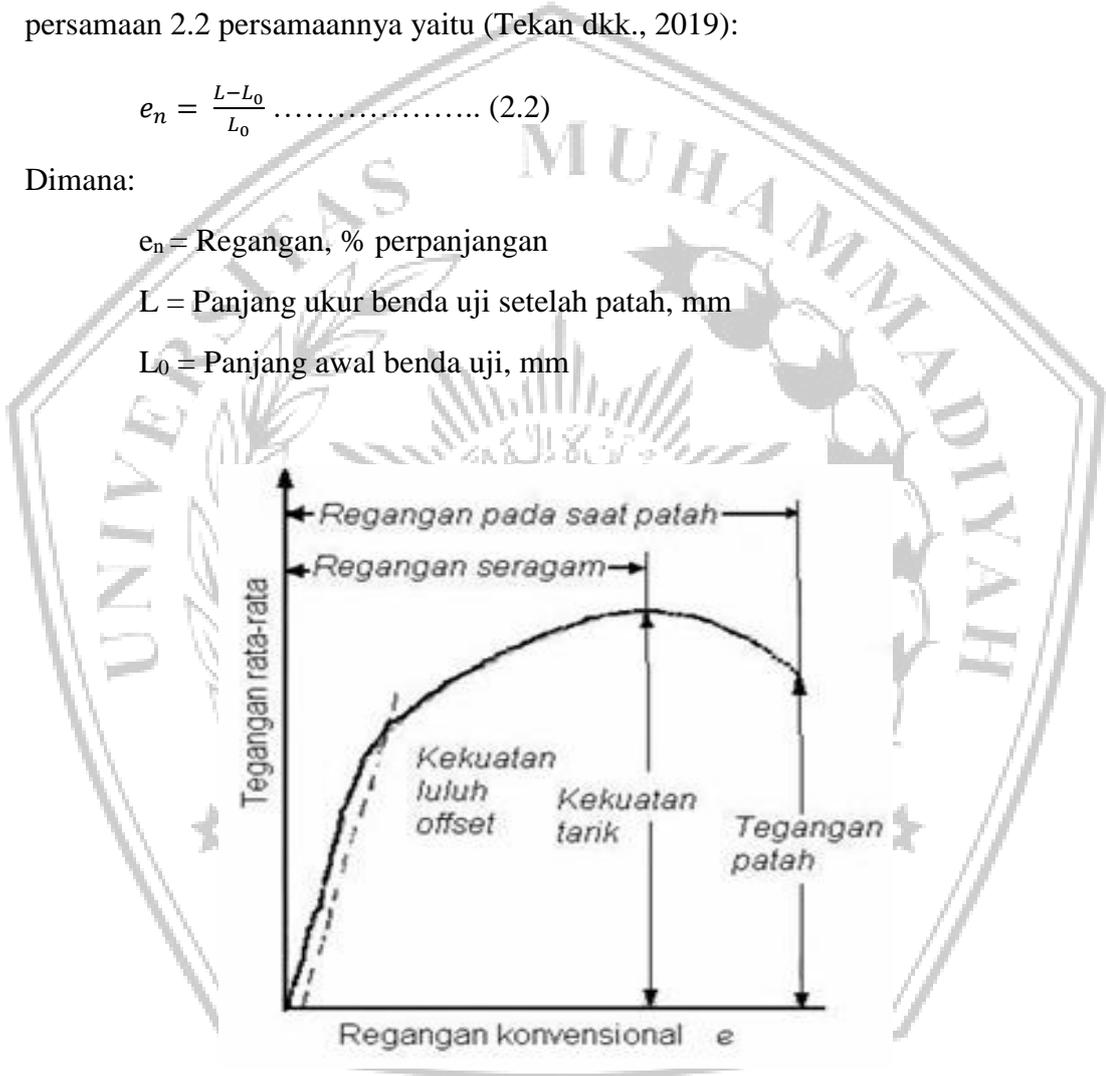
$$e_n = \frac{L-L_0}{L_0} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

e_n = Regangan, % perpanjangan

L = Panjang ukur benda uji setelah patah, mm

L₀ = Panjang awal benda uji, mm



Gambar 2. 10 Kurva tegangan - regangan rekayasa (Tekan dkk., 2019)

Bentuk dan besaran pada kurva tegangan regangan suatu logam tergantung pada komposisi, perlakuan panas, deformasi plastis yang pernah dialami, laju regangan, temperatur dan keadaan tegangan yang menentukan selama pengujian. Parameter-parameter yang digunakan untuk menggambarkan kurva tegangan-regangan logam adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan tarik (*Tensile strength*)

Kekuatan tarik maksimum (*Ultimate tensile strength*) adalah beban maksimum dibagi luas penampang awal benda uji, dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2.3 persamaannya yaitu:

$$S_u = \frac{P_{maks}}{A_0} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

S_u = Tegangan maksimum, pascal atau psi

P_{maks} = Beban maksimum, kg atau KN

2. Kekuatan luluh (*Yield strength*)

Kekuatan luluh adalah tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah kecil deformasi plastis yang ditetapkan. Untuk titik yang tidak jelas, kekuatan luluh sering disebut sebagai kekuatan luluh offset atau tegangan uji, yang ditentukan oleh tegangan yang berkaitan dengan perpotongan antara kurva tegangan-regangan dengan garis yang sejajar dengan elastis offset kurva oleh regangan tertentu. Besarnya kekuatan luluh offset biasanya ditentukan sebagai regangan 0,2 atau 0,1 persen, dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2.4 persamaannya yaitu :

$$S_o = \frac{P_{yield}}{A_0} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

S_o = Tegangan luluh, pascal atau psi

P_{maks} = Beban pada titik luluh (*yield point*), kg atau KN

Kurva tegangan regangan pada gambar 2.10, batas elastis yang didefinisikan sebagai tegangan terbesar yang dapat ditahan oleh logam tanpa mengalami regangan permanen apabila beban ditiadakan. Penentuan batas elastis tergantung dari kepekaan instrumen pengukur regangan, itulah sebabnya mengapa

batas elastis itu sering diganti dengan batas utama (batas proporsional) batas proporsional ialah tegangan dimana garis lengkung tegangan regangan menyimpang dari kelinierannya.

3. Perpanjangan (*elongation*)

Perpanjangan adalah regangan teknik pada saat patah, e_f , dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2.5 persamaannya (Bandanadjaja dan Idamayanti, 2020).

$$e_f = \frac{L_f - L_o}{L_o} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

e_f = Regangan pada saat patah, %

L_f = Panjang ukur benda uji setelah patah, mm

4. Pengurangan luas penampang (*reduction area*)

Pengurangan luas penampang adalah besarnya penyusutan penampang benda uji pada patahan q , dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2.6 persamaannya yaitu:

$$q = \frac{A_o - A_f}{A_o} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana =

q = Besarnya penyusutan penampang, %

A_f = Luas benda uji setelah patah, mm^2

2.9 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan logam didefinisikan sebagai ketahanan material menerima deformasi plastis atau deformasi permanen karena gaya yang bekerja dari luar. Pemilihan metode pengujian dipengaruhi oleh permukaan material, macam dan ukuran material, data yang dibutuhkan, dan juga ketersediaan alat pengujian. Beberapa metode pengujian kekerasan yang biasa dipakai adalah metode *Rockwell*, *Vickers* dan *Brinell* (Mujiarto dkk., 2022). Sifat kekerasan material berbanding terbalik bila materialnya berupa logam maka deformasi yang dimaksud yaitu deformasi plastis. Semakin keras suatu material maka material tersebut semakin

kuat. Kekerasan material berbanding lurus terhadap kegetasannya dan berbanding terbalik dengan keuletannya (Payana dkk., 2018).

Pengujian kekerasan dapat dilakukan menggunakan alat uji *portable hardness tester*. Jenis material dapat diatur berdasarkan jenis logamnya, Nilai kekerasan diperoleh berdasarkan hasil penekanan indenter pada permukaan material uji dan nilai kekerasan dapat terbaca yang ditunjukkan pada layar digital. Satuan skala dapat dikonversikan sesuai dengan yang diinginkan seperti HL, HRA, HRB, HRC, HV atau HS (Jasman, Syahrul, dkk., 2018). Gambar macam - macam teknik uji Kekerasan dapat dilihat pada gambar 2.10

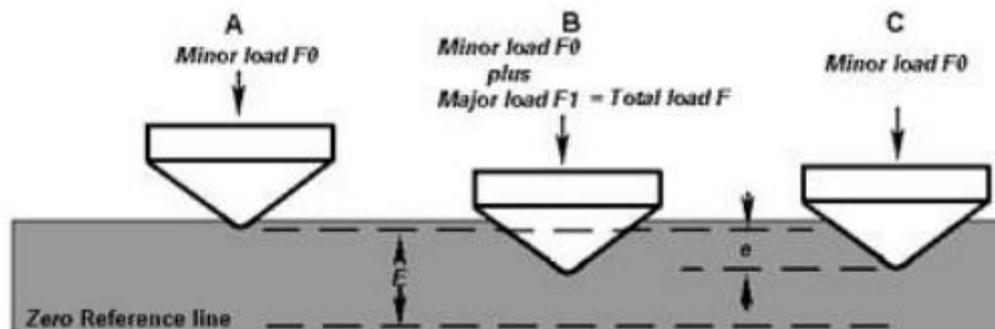
Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ¹
		Side View	Top View		
Brinell	10 mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV \approx 1.851P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK \approx 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> Diamond cone $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}$ in. diameter steel spheres 		 	60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg } 15 kg } Superficial Rockwell 30 kg } 45 kg }	

Gambar 2. 11 Macam macam Teknik Uji Kekerasan (Jasman, Syahrul, dkk., 2018)

Skala Rockwell menggunakan beban minor yang diikuti oleh beban mayor dan penetrasi yang dilakukan oleh masing-masing beban diukur dan nilai kekerasannya langsung terbaca dari sebuah dial. Keuntungan utama dari uji kekerasan Rockwell adalah tampilan nilai kekerasan secara langsung, sehingga menghilangkan kebutuhan akan perhitungan yang membosankan juga tidak memerlukan mikroskop untuk mengukur jejak, dan relatif tidak merusak (Akinlabi dkk., 2020). Tujuan pengujian kekerasan Rockwell adalah untuk mengetahui

kekerasan material ditinjau dari ketahanannya terhadap indentor yang merupakan bola baja atau kerucut intan ke permukaan material tersebut (Elbi Wiseno dan Muhamad Aldi Irwandi, 2023).

Metode Rockwell merupakan gabungan antara metode brinnell dan metode vikers, sehingga hasilnya cukup presisi dan tepat. Metode Rockwell terdapat dua macam indentor yang berbentuk dan kerucut dengan besar sudut 120° dan disebut sebagai *Rockwell Cone* dan bola baja dengan berbagai ukuran dan disebut sebagai *Rockwell Ball*. Cara Rockwell ini berdasarkan pada penekanan sebuah indentor dengan suatu gaya tekan tertentu ke permukaan yang rata dan bersih dari suatu logam yang diuji kekerasannya, material dipelajari dengan penerapan beban minor yang diikuti oleh penerapan beban mayor. Beban minor menetapkan titik nol. Pada skala ini, perhitungan untuk nilai kekerasan Rockwell bukanlah hasil pengukuran diameter atau diagonal bekas lekukan, tetapi justru dalamnya bekas lekukan yang terjadi. Semakin tinggi pembacaan, semakin keras material tersebut. Kedalaman penetrasi berbanding terbalik dengan kekerasan material, karena material yang keras akan memiliki kedalaman penetrasi yang kecil (Akinlabi dkk., 2020). Gambar pengujian kekerasan *Rockwell* dapat dilihat pada gambar 2.12 dibawah ini.



Gambar 2. 12 Gambar Pengujian Kekerasan Rockwell (Zayadi dkk., 2022)

Pengujian Rockwell yang umumnya dipakai ada tiga jenis, yaitu HRA, HRB, dan HRC. HR itu sendiri merupakan suatu singkatan kekerasan *Rockwell* atau *Rockwell Hardness Number*. Indentor yang dipakai dalam pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell*:

1. Carbida cemenit, baja tipis dan baja dengan lapisan keras yang tipis digunakan indentor kerucut intan sudut 120° dengan beban 60 kg dan skala kekerasan 100 HRA.
2. Logam yang lunak seperti paduan tembaga, baja lunak, paduan aluminium, besi tempa; digunakan indentor bola baja berdiameter 1/16” dengan beban 100 kg, dan skala kekerasan 130 HRB.
3. Baja yang keras dan bahan lain yang lebih keras dari skala B-100 digunakan indentor kerucut intan sudut 120° dengan beban 150 kg, dan skala kekerasan 100 HRC.

Pengujian kekerasan menurut Rockwell diukur kedalaman pembenaman (t) penekan. Sebagai penekan pada baja yang dikeraskan digunakan sebuah kerucut intan. Untuk menyeimbangkan ketidakrataan yang diakibatkan oleh permukaan yang tidak bersih, maka kerucut intan ditekan keatas bidang uji, pertama dengan beban pendahuluan 10 kg. setelah ini, beban ditingkatkan menjadi 150 kg sehingga tercapai kedalaman pembenaman terbesar. Sebagai ukuran digunakan kedalaman pembenaman menetap t dalam mm yang ditinggalkan beban tambahan. Sebagai satuan untuk ukuran t berlaku $e = t$ dalam 0,002 mm, dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2.1 persamaannya yaitu:

$$HRC = 100 - \frac{t}{0,002} \dots\dots\dots (2.6)$$

Contoh

$$\begin{aligned}
 t &= 0,07 \\
 HRC &= 100 - \frac{0,07}{0,002} \\
 &= 100 - 35 = 65 \\
 &= 65 \text{ HRC.}
 \end{aligned}$$

Pengujian Rockwell HRC sebagai cara yang paling cocok untuk pengujian bahan yang keras. (Ref. 4 hal. 198). Makin keras bahan yang diuji, makin dangkal masuknya penekan dan sebaliknya makin lunak bahan yang diuji, makin dalam masuknya. Cara Rockwell sangat disukai karena dengan cepat dapat diketahui kekerasannya tanpa menghitung dan mengukur. Nilai kekerassan dapat dibaca setelah beban utama dilepaskan, dimana beban awal masih menekan bahan.