BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Dan Sifat-Sifatnya

2.1.1 Definisi Material

Material adalah segala jenis bahan yang digunakan dalam bidang teknik untuk membuat bagian atau produk yang dapat digunakan sesuai dengan kebutuhan aplikasinya. Struktur atom, ikatan kimia, dan proses manufaktur yang dialami mempengaruhi karakteristik yang dimiliki material. Callister (2020) mendefinisikan material teknik sebagai bahan yang dapat diubah sifatnya melalui perlakuan panas, deformasi, dan proses fabrikasi untuk memenuhi persyaratan performa seperti kekuatan, kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan aus. Namun, Smith & Hashemi (2019) menyatakan bahwa pemilihan material sangat penting karena menentukan umur pakai komponen dan tingkat keamanan dalam pengoperasian sistem teknik.

Material teknik terdiri dari beberapa kelompok utama, yaitu logam, keramik, polimer, dan komposit. Logam merupakan material dengan struktur kristal yang mampu menghantarkan panas dan listrik, serta memiliki kekuatan dan keuletan tinggi sehingga dapat ditempa, dibentuk, dan umumnya memiliki kilap khas. Keramik adalah material anorganik non logam yang diproses pada suhu tinggi, dikenal keras, tahan aus, dan tahan korosi, namun cenderung bersifat getas. Polimer tersusun dari rantai

molekul organik panjang yang membuatnya ringan, lentur, dan memiliki kekuatan tarik tertentu, dengan bentuk umum seperti plastik, karet, serta berbagai jenis termoplastik, termoset, dan elastomer. Sementara itu, komposit merupakan material hasil penggabungan dua atau lebih material berbeda untuk memperoleh sifat gabungan yang lebih unggul, biasanya terdiri dari matriks dan penguat sehingga menghasilkan kekuatan tinggi dengan massa yang relatif rendah.

2.1.2 Sifat-Sifat Material

Sifat material biasanya dibagi menjadi 4 kategori yang saling berhubungan.

1. Sifat mekanik

Kemampuan material untuk menahan beban tanpa rusak disebut sebagai sifat mekanik. Beberapa yang paling signifikan adalah Kekuatan tarik merupakan kemampuan suatu material untuk menahan gaya tarik hingga mencapai titik patahnya, sedangkan kekerasan menunjukkan tingkat ketahanan material terhadap penetrasi dan keausan. Keuletan (ductility) menggambarkan kemampuan material untuk mengalami perubahan bentuk sebelum mengalami kegagalan, sementara ketangguhan *(toughness)* adalah kapasitas material dalam menyerap energi sebelum patah.

2. Sifat fisik

Sifat fisik yang terkait, yang dapat diukur tanpa mengubah komposisi kimia material, Sifat fisik material mencakup kerapatan *(density)* yang menunjukkan massa per satuan volume, titik leleh yang menggambarkan suhu saat material mulai mencair, konduktivitas panas yang nyatakan kemampuan material menghantarkan

panas, serta konduktivitas listrik yang menunjukkan kemampuan material menghantarkan arus listrik. Misalnya, komponen yang bekerja di suhu tinggi atau menghantar panas membutuhkan konduktivitas termal.

3. Sifat kimia

menggambarkan reaksi material terhadap zat kimia atau lingkungan. Sifat kimia material meliputi ketahanan korosi yang menunjukkan kemampuan material bertahan dari proses perusakan akibat lingkungan, reaktivitas terhadap asam, udara, atau kelembapan yang menggambarkan sejauh mana material mudah bereaksi dengan zat-zat tersebut, serta kestabilan kimia yang menunjukkan kemampuan material mempertahankan komposisi dan sifatnya tanpa mengalami perubahan kimia.

4. Sifat teknologi (*manufacturability*)

Sifat teknologi adalah sifat material yang berkaitan dengan kemudahan pengerjaan selama proses manufaktur, Sifat teknologi suatu material mencakup machinability yang menunjukkan kemudahan material untuk dipotong atau dibubut, weldability yang menggambarkan kemampuan material untuk disambung melalui proses pengelasan, serta *hardenability* yang merupakan kemampuan material untuk mengalami pengerasan ketika diberi perlakuan panas.

2.2 Baja Karbon

Baja karbon adalah logam paduan yang banyak digunakan oleh manusia untuk membuat perkakas, mesin, dan komponen peralatan sehari-hari. Karena banyak digunakan, banyak pihak membuat klasifikasi untuk memudahkan

kebutuhan fungsi masing-masing jenis baja paduan. Baja karbon diklasifikasikan berdasarkan cara pembuatan, penggunaan, kekuatan, struktur mikro, dan komposisi kimianya. Baja karbon juga dapat dianggap sebagai logam paduan, di mana unsur besi (Fe) berfungsi sebagai logam dasar berpadu dengan karbon dan beberapa campuran lainnya.

Baja karbon dapat di klasifikasikan sebagai berikut:(Sulistiyo, 2016)

1. Baja Karbon Rendah, Baja ini lunak dan ulet, memiliki kandungan karbon di bawah 0,25 persen, dan kurang sensitif terhadap perlakuan panas untuk membentuk martensit.
2. Baja Karbon Sedang, juga dikenal sebagai baja karbon sedang, memiliki kandungan karbon antara 0,25 persen dan 0,60 persen. Baja jenis ini dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekaniknya.
3. Baja Karbon Tinggi, juga dikenal sebagai baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon antara 0,60 persen dan 1,40 persen. Ini adalah baja karbon yang paling kuat dan keras, tetapi kurang ulet.

Aplikasi umum dari baja ST 37 termasuk elemen struktur, kerangka, profil bangunan, dan bagian mesin yang memikul beban tidak terlalu berat seringkali dipilih karena pertimbangannya yang ekonomis saat kebutuhan akan ketahanan aus dan ketahanan lelah tidak terlalu tinggi. Dengan kemudahan dalam proses pembuatan dan biaya yang relatif terjangkau, ST 37 banyak digunakan dalam industri manufaktur dalam negeri dan sektor konstruksi sipil, sehingga peningkatan sifat permukaan (misalnya melalui karburisasi) menjadi metode yang menarik untuk memperpanjang masa layanan komponen tanpa perlu mengganti bahan

dasarnya. Beberapa studi penelitian praktis di Indonesia menyoroti penggunaan ST 37 dalam penelitian perlakuan permukaan untuk memperpanjang usia pakai komponen.(Jayanti, 2021)

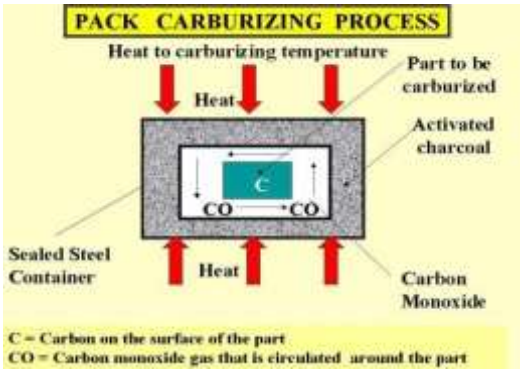
Kelemahan utama dari baja karbon rendah seperti ST 37 adalah daya tahannya terhadap keausan yang cukup rendah karena kandungan karbon di permukaan yang sedikit dan struktur permukaannya yang lembut (*ferrit-perlit*). Dalam penggunaan yang melibatkan gesekan atau abrasi, permukaan ST 37 akan cepat mengalami keausan tanpa perlakuan yang dapat meningkatkan kandungan karbon atau kekerasan pada permukaan. Oleh sebab itu, metode peningkatan permukaan (*case hardening*) seperti *pack carburizing* sering direkomendasikan untuk menciptakan lapisan permukaan yang memiliki kandungan karbon lebih tinggi (*case*), yang akan meningkatkan kekerasan permukaan sambil mempertahankan kekuatan inti yang baik. Penelitian laboratorium di Indonesia menunjukkan bahwa perlakuan pak karburisasi bisa meningkatkan kekerasan permukaan dan mengubah struktur mikro pada baja karbon rendah, namun parameter proses harus diatur dengan baik untuk menghindari masalah seperti retakan atau penurunan ketangguhan inti (Nurharyanto dkk., 2019c).

Pemahaman yang mendalam mengenai komposisi kimia dan sifat mekanik ST37 sangat penting untuk merancang parameter *pack carburizing* seperti temperatur, waktu penahanan, dan media karburizer. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa laju difusi karbon, perubahan fase saat proses pendinginan, serta respons terhadap keausan sangat tergantung pada keadaan awal material. Maka dari itu, analisis karakteristik material ST 37 dianggap sebagai langkah penting dalam

penelitian mengenai dampak variasi waktu penahanan terhadap hasil akhir keausan dan struktur mikro.(Gunawan dkk., 2016)

2.3 *Pack Carburizing*

Prinsip utama dari karburisasi padat adalah meletakkan objek baja dalam bahan padat yang menghasilkan karbon di dalam wadah tertutup, kemudian memanaskan keseluruhan susunan hingga mencapai suhu austenisasi. Pada suhu ini, atom karbon yang ada di medium dapat menyebar ke permukaan baja. Yang membedakan *pack carburizing* dari metode gas atau cair adalah sumber karbon yang digunakan (padat) serta cara pemindahannya pada *pack*, karbon muncul dari bahan organik atau arang melalui proses dekomposisi atau reaksi kimia dengan *energizer*, lalu menyebar ke permukaan yang sebelumnya berada dalam *fase austenit*. Dalam literatur teknik di Indonesia, terdapat penjelasan mengenai langkah-langkah *pack carburizing* yang umum dilakukan: pemilihan komposisi medium, penambahan aktivator seperti $BaCO_3$ atau $NaCO_3$, serta pemilihan profil pemanasan yang tepat untuk mengatur kedalaman lapisan(Fauzan dkk., 2023b).



Gambar 2. 1 proses pack carburising
Sumber: *(Monty, 2019)*

Mekanisme penyebaran karbon dalam baja mengikuti prinsip difusi *Fick* saat berada dalam kondisi austenitisasi: konsentrasi karbon yang tinggi di permukaan

menciptakan perbedaan konsentrasi yang mendorong pergerakan atom karbon ke dalam matriks austenit. Setelah proses pendinginan cepat (*quench*), lapisan permukaan yang kaya karbon cenderung berubah menjadi martensit atau struktur yang lebih keras, sementara bagian inti tetap lebih lunak. Faktor proses seperti temperatur dan durasi memengaruhi koefisien difusi yang efektif serta kedalaman penetrasi karbon, sesuai dengan rumus (kedalaman dan akar waktu), sehingga waktu penahanan menjadi variabel penting dalam menentukan kedalaman case dan profil karbon. Berbagai penelitian mengenai *pack carburizing* di tingkat lokal menekankan pentingnya hukum difusi ini dalam menjelaskan variasi kedalaman lapisan seiring dengan perubahan waktu penahanan.(Hartanto dkk., 2020b)

Faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan proses *pack carburizing* terdiri dari: suhu proses yang harus melebihi suhu austenitisasi agar difusi dapat terjadi, durasi penahanan (*holding time*) yang berpengaruh pada kedalaman difusi, jenis serta komposisi media *carburizer* di mana keberadaan arus karbon bebas dan aktivator/energizer mempengaruhi kinerja karbon, ukuran partikel media dan kepadatan pengemasan, serta kondisi pendinginan yang menentukan fase akhir yang terbentuk. Penelitian eksperimental di Indonesia memperlihatkan variasi hasil yang nyata ketika salah satu faktor ini diubah contohnya, penggunaan arang sekam padi sebagai media memberikan karakteristik input karbon berbeda dibandingkan arang tempurung atau bahan komersial, sehingga diperlukan pengoptimalan. Sebagai tambahan praktis, diagram alur untuk proses *pack carburizing* (persiapan media pengemasan spesimen pemanasan hingga suhu austenit penahanan/soaking

pendinginan/*quench* analisis permukaan) umum digunakan dalam perencanaan eksperimen dan pengendalian kualitas.(Fauzan dkk., 2023c)

2.4 Arang Sekam Padi

Sekam padi memiliki komposisi kimia yang unik: selain fraksi karbon organik setelah mengalami proses pengarangan, sekam padi dikenal memiliki kandungan silika (SiO_2) yang bisa mencapai tingkat yang cukup tinggi pada abu sekam; penelitian di tingkat nasional menunjukkan bahwa kandungan silika pada sekam padi dan abu sekam bisa berada di kisaran 15–25% tergantung pada cara budidaya dan pemrosesannya. Kadar karbon (setelah proses pirolisis/arang) dan keberadaan silika memengaruhi sifat medium sebagai sumber karbon dalam proses *pack carburizing* silika cenderung tidak berfungsi sebagai sumber karbon tetapi berpengaruh pada karakteristik fisik dan termal arang. Beberapa artikel dan prosiding di Indonesia telah melakukan pengukuran terhadap komposisi silika dan karakteristik arang/abu sekam padi, yang penting ketika sekam padi digunakan sebagai alternatif *carburizer*.(Putri dkk., 2022c)

Proses produksi arang dari sekam padi yang digunakan sebagai *carburizer* umumnya terdiri dari beberapa tahap, yaitu pengeringan, pirolisis atau pembakaran terkontrol (menggunakan retort atau tungku) untuk menghilangkan bagian volatil, dan terkadang juga meliputi aktivasi atau perlakuan kimia untuk mengurangi kadar silika atau meningkatkan kemampuan permukaan. Aktivasi dengan bahan dasar seperti NaOH atau Na_2CO_3 serta kalsinasi telah terbukti dapat memperbaiki sifat-sifat karbon aktif dan menyesuaikan kemampuan dalam melepaskan karbon.(Chia dkk., 2022) Beberapa penelitian lokal menguraikan faktor-faktor dalam proses

pembuatan arang (suhu pirolisis, durasi waktu) yang berdampak pada rasio karbon tetap dan karakteristik fisik dari media, sehingga pemilihan metode pembuatan arang menjadi aspek yang sangat penting dalam perancangan eksperimen *pack carburizing*.



Gambar 2. 2 mengkarbonisasi sekam padi
Sumber:*(Lee, 2021)*

Keunggulan dari arang sekam padi dibandingkan dengan media karburisasi biasa antara lain: ketersediaan yang melimpah di lingkungan sekitar yang dapat menekan biaya, potensi untuk keberlanjutan dengan memanfaatkan limbah dari sektor pertanian, serta kemampuan untuk menghasilkan media karbon padat yang tepat untuk proses *pack carburizing* jika diproses dengan benar. Meski demikian, terdapat tantangan seperti kandungan silika dan variasi sifat arang yang memerlukan karakterisasi awal sebelum penggunaannya. Penelitian yang membandingkan media *karburizing* di Indonesia menunjukkan bahwa arang sekam padi—setelah melalui proses aktivasi atau pencampuran dengan energizer—dapat memberikan peningkatan yang kompetitif dalam hal kekerasan permukaan dan kedalaman case, menjadikannya pilihan praktis untuk penggunaan di tingkat industri lokal.(Permana & Tawaqal, 2025)

2.5 Sifat Sifat Logam

Kandungan kimia (C, Mn, Si), struktur fase (ferrit-perlit, bainit, martensit), ukuran butir, dan penyebaran inklusi adalah sifat-sifat logam yang penting untuk karburisasi dan daya tahan aus. Secara teoritis, perubahan komposisi permukaan dapat berdampak pada transformasi fase saat pendinginan, mempengaruhi kekerasan dan ketahanan permukaan. Peta mikrokeras (atau peta kekerasan mikro) dan variasi komposisi adalah faktor penting dalam memprediksi performa aus, menurut penelitian terbaru tentang sifat mekanik baja. Oleh karena itu, pengukuran sifat-sifat ini setelah proses karburisasi menjadi bagian penting dari mengevaluasi hubungan antara durasi penahanan dan kinerja tribologis.(Ånmark dkk., 2015)

1. Komposisi Kimia

Proses difusi karbon dan hasil karburisasi sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia logam dasar (terutama baja karbon rendah seperti ST 37). Komposisi kimia baja sangat mempengaruhi hasil proses karburisasi maupun sifat mekaniknya. Kandungan karbon (C) berperan penting karena semakin tinggi kadar karbon, semakin besar kemungkinan terbentuknya martensit saat pendinginan, yang pada akhirnya meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus. Unsur mangan (Mn) membantu memperlambat difusi karbon serta meningkatkan kekerasan dan kekuatan ferit tanpa mengurangi keuletan. Silikon (Si) berfungsi menstabilkan sementit dan meningkatkan kekuatan ferrit, meskipun keberadaannya dapat memperlambat pertumbuhan karbida. Sementara itu, unsur pengotor seperti sulfur (S) dan fosfor (P) dapat menimbulkan cacat mikro atau segregasi yang menghambat difusi karbon dan menurunkan ketahanan aus material.

2. Struktur *Fase*

Struktur *fase* sebelum dan sesudah karburisasi menentukan hasil kekerasan dan ketahanan aus. Sifat mekanik baja dipengaruhi secara signifikan oleh struktur mikronya, terutama setelah proses karburisasi. *Fase ferrit-perlit* biasanya ditemukan pada baja karbon rendah. Itu lunak dan memungkinkan difusi karbon dengan mudah, tetapi tidak tahan aus. Martensit dikenal sangat keras dan sangat tahan aus setelah fase austenit dingin. *Bainit* adalah struktur yang dapat muncul pada kondisi pendinginan sedang dan memiliki kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik. *Austenit*, di sisi lain, adalah *fase* yang memungkinkan difusi karbon yang optimal selama proses karburisasi, sehingga sangat penting untuk pembentukan lapisan karbon yang lebih keras.

3. Ukuran Butir *(Grain Size)*

Ukuran partikel material berpengaruh terhadap proses karburisasi dan karakteristik keausannya. Struktur dengan butir halus memiliki jumlah butir yang lebih banyak, sehingga memungkinkan difusi karbon terjadi lebih cepat dan menghasilkan lapisan karburisasi yang lebih merata. Namun, partikel yang sangat halus juga dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya deformasi plastis saat material menjalani pengujian keausan.

4. Distribusi dan Jenis Inklusi

Inklusi non-logam (oksida, sulfida, silikat) dapat menjadi pusat inisiasi retak atau titik lemah saat gesekan. Distribusi inklusi yang seragam dan kecil akan memperbaiki ketahanan aus.

5. Kekerasan *(Hardness)* dan Profil Mikrokeras

Kekerasan permukaan meningkat secara signifikan setelah karburisasi, dan pengukuran microhardness mapping penting untuk memahami gradien kekerasan dari permukaan ke inti.

Semakin tinggi kekerasan dan semakin lembut inti, semakin baik kombinasi ketahanan aus dan keuletan.

2.6 *Heat Treatment*

Perlakuan panas meliputi serangkaian proses termal seperti *austenitisasi*, *carburizing*, pendinginan, dan/atau tempering yang secara keseluruhan mengatur mikrostruktur serta karakteristik mekanik akhir. Pendekatan modern dalam perlakuan panas menekankan pentingnya optimasi siklus termal sebagai metode untuk merancang mikrostruktur yang sesuai dengan fungsi tertentu (misalnya, kombinasi permukaan keras dan inti yang *fleksibel*). Dalam penelitian ini, proses *pack carburizing* pada suhu 550 °C dengan variasi waktu tahan, diikuti oleh metode pendinginan tertentu, merupakan bagian dari siklus perlakuan panas yang bertujuan untuk mengubah profil karbon dan menciptakan kombinasi sifat permukaan yang diinginkan. Tinjauan literatur terbaru mengenai perlakuan panas menyoroti penting untuk pengendalian parameter termal dan analisis multi-skala untuk memahami keterkaitan antara proses, mikrostruktur, dan performa (Campos Becerra, 2025)

Adapun kegunaan perlakuan panas pada logam adalah sebagai berikut, pengujian material bertujuan untuk mengetahui berbagai sifat penting seperti tingkat kekerasan, keuletan, ketahanan terhadap karat, daya tahan terhadap keausan,

dan karakteristik lain yang diperlukan. Melalui pengujian tersebut, sifat material dapat dinilai secara lebih mendalam sehingga dapat menentukan kesesuaian penggunaan.Selain itu, penerapan perlakuan panas sesuai metode yang digunakan mampu mempengaruhi sifat material. Proses ini dapat menghilangkan tegangan sisa dalam material, serta memungkinkan perubahan ukuran butir pada struktur mikro, baik menjadi lebih kecil maupun lebih besar sesuai dengan tujuan perlakuannya.

Secara umum perlakuan panas dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Proses pelunakkan (*Annealing*)

Proses annealing adalah proses perlakuan panas dengan memanaskan logam hingga suhu tertentu, kemudian menahannya (*soak*) dan mendinginkannya dengan laju yang sangat lambat, biasanya di dalam tungku. Tujuannya adalah untuk meningkatkan keuletan (*ductility*), mengurangi kekerasan internal, dan mengurangi tegangan sisa (*residual stress*) yang dihasilkan dari pengerjaan dingin atau plastis. Contohnya, annealing memungkinkan butir baja untuk rekristalisasi, mengurangi deformasi yang tersisa, dan menghasilkan struktur butir yang lebih halus.(*Treating*, 2021) Oleh karena itu, proses ini sangat bermanfaat dalam kasus di mana komponen logam memerlukan proses pembentukan lebih lanjut (*form-working*), pemesinan, atau keuletan tinggi.

2. Penormalan (*Normalizing*)

Normalisasi adalah perlakuan panas yang mirip dengan *annealing*, tetapi pendinginan dilakukan lebih cepat setelah pemanasan, biasanya di udara terbuka, hingga sedikit di atas suhu kritis tinggi (Ac3 atau Acm pada baja). Tujuannya adalah untuk menghasilkan struktur mikro yang lebih seragam (struktur biji yang

seragam), meningkatkan kekuatan dan keuletan secara seimbang, dan menghilangkan variasi struktur yang timbul dari proses pengecoran atau pengerjaan panas sebelumnya.(Casting, 2019) Baja yang dinormalisasi dapat memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi as-cast atau kondisi pengerjaan tanpa perlakuan. Ini membuat baja ideal untuk bagian struktural yang membutuhkan kinerja sederhana.

3. Pengerasan (*Hardening / Quenching*)

Pengerasan adalah proses yang memanaskan logam (khususnya baja) hingga fasa austenit masuk, kemudian didinginkan dengan cepat (air, minyak, atau garam) untuk membentuk martensit atau struktur yang sangat keras dan rapuh. Proses ini sering disebut quenching ketika melibatkan pendinginan cepat dari suhu austenitisasi. Tujuannya adalah untuk secara signifikan meningkatkan kekerasan permukaan atau keseluruhan, yang akan meningkatkan kekuatan, ketahanan aus, dan resistensi terhadap deformasi plastis. Namun, pengerasan biasanya diikuti oleh proses tempering untuk menyeimbangkan sifat mekanik karena kekerasan yang tinggi sering kali diiringi dengan kegetasan (*brittleness*) dan tegangan sisa yang tinggi.

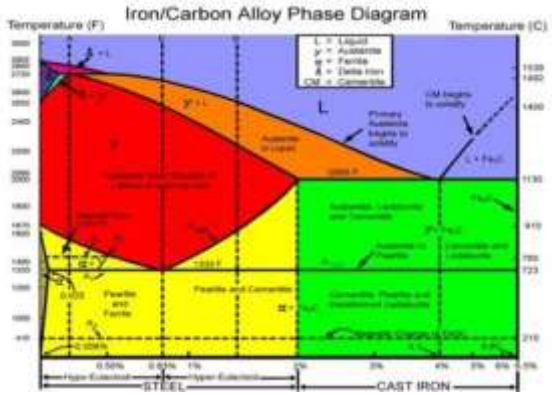
4. *Tempering*

Setelah pengerasan, atau pengerasan, logam didinginkan cepat, dipanaskan ulang ke suhu yang lebih rendah di bawah titik kritis, dan kemudian didinginkan dengan laju yang moderat. Tujuannya adalah untuk mengurangi kegetasan, tegangan sisa, dan keseimbangan kekerasan dan keuletan. Struktur martensit yang sangat keras sebagian diubah menjadi ferit dan karbida atau martensit yang lebih

stabil selama proses tempering. Ini membuat komponen lebih tahan terhadap retak dan kelelahan. Jika komponen yang telah dikeraskan akan digunakan dalam kondisi beban siklik atau beban benturan, proses ini sangat penting agar komponen tidak gagal karena retak terlalu cepat.

Proses pencelupan, juga disebut sebagai "*quenching cooling*", melibatkan penggunaan media pendinginan tertentu (seperti air, minyak, atau garam cair) setelah pemanasan untuk mengontrol laju pendinginan logam. Laju pendinginan ini memengaruhi perubahan mikrostruktur, seperti bentuk martensit dibandingkan dengan pembentukan *bainit* atau *perlit*, dan berdampak pada sifat akhir logam. Selama proses pengerasan dan tempering, pemilihan media dan kondisi pencelupan yang tepat sangat penting untuk mencapai sifat yang diinginkan, yaitu kekerasan ideal tanpa retak atau distorsi yang berlebihan. Oleh karena itu, kontrol media laju pendinginan sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja logam setelah perlakuan panas.

Diagram fasa Fe-C menunjukkan hubungan perubahan fasa yang terjadi selama proses pendinginan yang lambat dengan kadar karbon. Dengan demikian, diagram ini dapat membantu menentukan suhu pemanasan dari pengujian yang menunjukkan perlakuan panas.



Gambar 2. 3 Diagram fa-c
Sumber:(Iron-Carbon Phase Diagram Explained [with Graphs], t.t.)

2.7 Quenching

Quenching merupakan metode pendinginan yang dilakukan dengan cepat untuk mengubah struktur austenit yang mengandung banyak karbon menjadi martensit yang keras. Faktor seperti kecepatan pendinginan, jenis medium pendingin, dan temperatur awal berpengaruh terhadap jumlah martensit yang terbentuk, keberadaan austenit, dan tingkat tegangan sisa. Definisi quenching dalam literatur terbaru menyoroti fungsinya dalam "mengunci" komposisi permukaan dengan kandungan karbon yang tinggi menjadi mikrostruktur yang keras. Namun, terdapat peringatan mengenai adanya kompromi antara kekerasan pada permukaan dengan ketahanan dari inti akibat adanya tegangan sisa dan kemungkinan terbentuknya fasa yang rapuh. Dalam studi ini, metode pendinginan menggunakan udara atau air telah dipilih sesuai dengan batasan yang ada.(Kozłowska & Skowronek, 2025) Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan dampak dari laju pendinginan terhadap perubahan fase dan distribusi tegangan saat menafsirkan hasil penelitian.

2.8 Ketahanan Aus

Ketahanan terhadap keausan baja karbon rendah seperti ST 37 tidak terlalu baik karena kandungan karbon yang sedikit dan fraksi karbida yang minim; dari sudut pandang tribologi, permukaan *ferrit-perlit* cenderung mudah mengalami abrasi dan deformasi plastis saat berinteraksi dengan gesekan atau partikel keras. Teori tentang keausan menyatakan bahwa peningkatan kekerasan pada permukaan

melalui proses karburisasi bisa mengurangi laju keausan abrasif, namun perlu dianalisis dengan mempertimbangkan faktor fragilisasi, perbedaan kekerasan, serta integritas lapisan. Studi integratif menemukan bahwa pengoptimalan waktu penahanan dan peran produk media seperti arang sekam padi sangat penting untuk mencapai keseimbangan antara kekerasan pada permukaan dan ketahanan inti agar performa keausan dapat meningkat tanpa risiko kegagalan lebih awal. Metode yang sah untuk mengevaluasi keberhasilan intervensi ini adalah dengan mengukur laju keausan melalui tes standar serta analisis mikrostruktur.(Kozłowska & Skowronek, 2025)

Hubungan antara kekerasan permukaan dan ketahanan terhadap keausan biasanya bersifat positif: permukaan yang memiliki kekerasan lebih tinggi seperti yang terjadi pada pembentukan martensit dengan karbon tinggi cenderung menunjukkan pengurangan laju keausan dalam kondisi *abrasif* dan *adhesif* tertentu karena peningkatan ketahanan terhadap deformasi plastis pada permukaan. Namun, saat kekerasan menjadi sangat tinggi dan sifatnya menjadi rapuh, hal ini dapat mempercepat terjadinya retakan pada permukaan dan pengelupasan, sehingga penting untuk menyeimbangkan kekerasan dengan toughness inti; ini menegaskan perlunya perlakuan permukaan yang menghasilkan gradien sifat (permukaan keras /inti ductile). Metode pengujian kekerasan permukaan (seperti *Vickers* dan pemetaan kekerasan mikro *Rockwell*) yang dipadukan dengan pengujian keausan (seperti *pin-on-disk* dan *wear reciprocating*) menjadi metode umum untuk menilai hubungan ini dalam penelitian karburisasi.(M.r dkk., 2018)

$$Laju\ keausan\ (W) = \frac{\Delta w}{s} \quad \text{.....(2.1)}$$

dimana :

W = Laju keausan (gr/s)

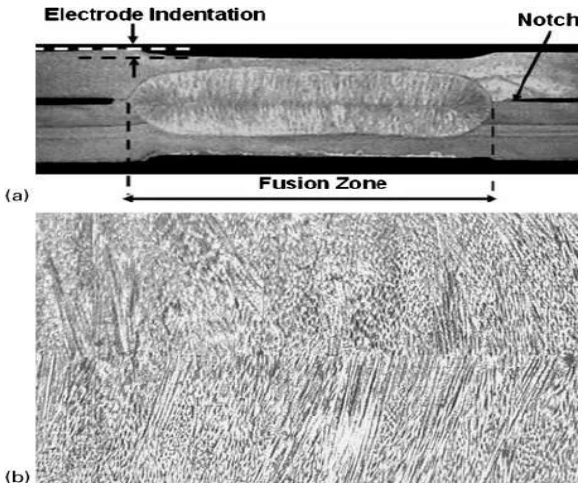
Δw =Hasil selisih berat (gr)

s = Waktu total pengujian (s)

2.9 Struktur Mikro

Struktur makro merupakan susunan atau bentuk struktur pada suatu material yang dapat diamati secara langsung dengan mata tanpa menggunakan mikroskop, atau hanya dengan bantuan alat pembesar sederhana seperti kaca pembesar. Pengamatan struktur makro biasanya dilakukan pada permukaan benda uji yang telah dipoles dan diberi larutan etsa agar pola struktur yang ada dapat terlihat lebih jelas.

Pada material logam, struktur makro dapat memperlihatkan berbagai ciri seperti ukuran butir yang besar, pola aliran logam (flow line), porositas, retakan, serta cacat lain yang muncul selama proses pengecoran maupun proses pembentukan. Melalui pengamatan ini, dapat diketahui kualitas proses pembuatan material serta kemungkinan adanya ketidaksempurnaan pada logam tersebut.



Gambar 2. 4 Struktur Makro
sumber:(*Figure 1 a Shows a Typical Macrostructure of AISI 304 Stainless Steel...*, t.t.)

Pengamatan struktur makro umumnya digunakan sebagai langkah awal dalam analisis material sebelum dilakukan penelitian yang lebih mendalam terhadap struktur mikro. Dengan mempelajari struktur makro, peneliti dapat memperoleh gambaran umum mengenai kondisi dan keseragaman suatu material.

2.10 Baja ST 37

Baja karbon ST37 adalah jenis baja karbon rendah *(low carbon steel)* yang memiliki kandungan karbon sekitar ≤ 0,20%. Kandungan karbon yang rendah ini membuat baja ST37 memiliki sifat yang lunak, ulet, mudah dibentuk, dilas, dan dikerjakan secara mekanis, sehingga sangat cocok untuk aplikasi struktural dan komponen umum. Material ini umumnya digunakan pada konstruksi bangunan, rangka mesin, pipa, poros, serta komponen mekanik yang tidak membutuhkan kekuatan atau kekerasan sangat tinggi.

Karena kandungan karbonnya rendah, baja ini memiliki sifat ulet, mudah dibentuk dan dilas, serta memiliki kemampuan deformasi plastis yang baik. Namun, baja ST37 memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang relatif rendah, sehingga sering diberikan perlakuan panas seperti carburizing atau quenching untuk meningkatkan performa permukaan. Baja ini banyak dipakai pada aplikasi konstruksi, rangka struktur, poros ringan, bantalan, pipa, serta komponen mesin yang tidak memerlukan kekuatan tinggi tetapi membutuhkan keuletan dan kemudahan manufaktur.

Dengan kekuatan tarik 41-49 kg/mm* atau sekitar 410/490 N/mm, baja ST 37 memiliki kekuatan tarik maksimum sebelum bahan patah, tetapi kekuatan tarik *vield* (oy) baja lebih rendah daripada kekuatan tarik maksimum, yang menjadikannya bahan yang banyak digunakan dalam kontruksi umum. Baja pada batas kemampuan *vield* mengalami perubahan sifat dari elastis menjadi plastis. Dalam kondisi tertentu, perubahan sifat material ini sangat berbahaya untuk operasi konstruksi mesin.(Suprijanto & Mahendra, t.t.)

Selain manfaat dari segi mekanik dan kemudahan dalam pembuatan baja karbon rendah juga memiliki keunggulan dalm fleksibilitas penggunaan khusus pada bagian-bagian yang memerlukaan pembentukan tanpa mengalami kerusakan seperti poros ringan, panel bodi kendaraan, dan elemen struktural. Dengan penerapan perlakuan permukaan yang tepat material ini dapat dilapisi dengan permukaan yang keras dan tahan terhadap aus sambil tetap menjaga kekuatan inti yang lentur sehingga secara signifikan memperpanjang masa pakai komponen. Keunggulan dari segi biaya dan kemudahan dalam proses menajdikan baja karbon rendah sebagai pilihan utama dalam sektor industri yang memerlukan gabungan antara kekuatan permukaan, daya tahan inti dan efisiensi biaya.

Aplikasi baja ST 37 pada bidang teknik antara lain digunakan untuk:

1. Baja konstruksi mulai dari rangka bangunan
2. Baja tulangan beton
3. Rangka kendaraan
4. Mur dan baut

5. Plat
6. Pipa dan lain-lain

2.10 Jurnal Rujukan

Marianus Wiskarjo,W.Bungnaen, J. Ut Jasron (2025), "Karakterisasi Baja Karbon ST 37 Akibat *Pack Carburizing* Menggunakan Arang Cangkang Kemiri dengan Katalisator Serbuk Kerang Ale-Ale", Metode penelitian *Pack carburizing* menggunakan arang cangkang kemiri, *holding time* 2 jam, 900°C, Hasil dari penelitian ini Meningkatkan kekerasan dan perubahan sifat mekanik, tidak membahas wear & microstructure pada media sekam padi.

Supriyanto dan Ismanto (2020), "Analisa Pengaruh Holding Time Pada Proses Karburasi Dalam Media Arang Kayu Jati Terhadap Kekerasan Baja ST-37", Variasi *holding time, pack carburizing* arang kayu jati, Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekerasan meningkat seiring lamanya holding time, namun studi ini tidak membahas wear & microstructure secara detail, sehingga fokusnya lebih pada sifat mekanik makro saja.

Dwi Handoko, Vivaldi, dan Sutrisno (2002), "Pengaruh Variasi Jenis Katalisator Dan Holding Time Pada Proses Pack Carburizing Terhadap Perubahan Komposisi Karbon Dan Nilai Kekerasan Baja ST 37", Proses pack carburizing media arang aktif & tempurung kelapa + katalis, Hasilnya menunjukkan adanya peningkatan kedalaman difusi karbon dan kekerasan, namun penelitian ini tidak menggunakan arang sekam padi dan tidak membahas keausan, sehingga ruang kajian terhadap wear masih terbuka.

Sigit Budi Gunawan (2022), “Efek Waktu Tahan Pack Carburizing Terhadap Kekerasan dan Keausan Nosel Imitasi Truk Barang”, Metode pack carburizing tempurung kelapa dengan variasi holding time, Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kekerasan dan ketahanan aus meningkat, serta menemukan bahwa holding time optimal 210 menit (kekerasan) dan 150 menit (keausan), memberikan gambaran hubungan spesifik antara durasi perlakuan panas dan performa komponen.

Aris Wibowo dkk (2018). “Holding Time Karburasi Media Arang Tempurung Kelapa Sawit Terhadap Kekerasan Dan Kedalaman Difusi Baja St41”, metode penelitian Variasi *holding time*, St41 steel, Hasil penelitian menunjukkan kedalaman difusi dan kekerasan meningkat, namun studi ini bukan pada ST 37 dan bukan menggunakan sekam padi, sehingga tidak secara langsung dapat dibandingkan dengan penelitian berbasis ST 37 atau media karbon lain seperti sekam.

Mihael Brunčko dkk (2011), “*Microstructural Changes during Vacuum Carburizing of Steels*”, metode penelitian *Vacuum carburizing* microstructure analysis membahas secara mendalam vacuum carburizing microstructure analysis”. Fokus penelitian ini adalah pada perubahan microstructure umum, namun tidak khusus ST 37 atau sekam padi, sehingga relevansinya lebih pada teori dasar dan fenomena umum dalam karburisasi.

Suryo Darmo dkk (2022), “Pengaruh waktu tahan *pack carburizing* dan *cane molasse*s terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja karbon rendah

menggunakan proses pack carburizing arang jati + tulang sapi dengan variasi waktu tahan", metode penelitian *Pack carburizing* arang jati + tulang sapi, variasi waktu tahan, Hasil penelitian menunjukkan adanya perubahan microstructure dan peningkatan sifat mekanik, tetapi studi ini tidak menggunakan sekam padi, sehingga kontribusinya lebih pada variasi media berbasis biomassa lainnya.

Nitha dkk (2023), "*The Effectiveness Of The Effect Of Holding Time On The Toughness And Macro Structure Of Low Carbon Steel Due To Carburizing Pack Of Pine Charcoal*", *Pine charcoal carburizing, variasi holding time*, Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa holding time ↑ → struktur lebih rapat dan toughness meningkat, sehingga memperkuat temuan umum bahwa durasi perlakuan memiliki pengaruh langsung terhadap karakteristik mekanik baja karbon rendah.

Mastur dkk. (2023) "Pengaruh Variasi *Holding Time* pada Proses *Pack Carburizing* dengan Arang Tempurung Kelapa Barium Carbonat Terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Baja ST 42", Coconut shell + $baco_3$ dengan variasi holding time, Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekerasan meningkat seiring waktu tahan, namun penelitian ini bukan pada ST 37 & bukan sekam padi, sehingga masih terdapat kebutuhan penelitian lanjutan pada variasi material dan media karburisasi lainnya.