

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja adalah paduan utama antara besi dan karbon, dengan komposisi yang memengaruhi sifat mekanik seperti kekuatan dan ketangguhan. Kadar karbon dalam baja bervariasi antara 0,02% hingga 2%, yang menentukan karakteristik material. Baja dengan kadar karbon tinggi cenderung lebih kuat tetapi kurang ulet, sedangkan baja dengan kadar karbon rendah lebih mudah dibentuk.

Struktur kristal baja, yang dapat berupa ferrit, austenit, atau martensit, memainkan peran penting dalam sifat material. Ferrit memiliki sifat lunak dan ulet, sedangkan austenit lebih kuat. Proses perlakuan panas, seperti quenching dan tempering, digunakan untuk memodifikasi struktur dan meningkatkan sifat mekanik. Baja juga rentan terhadap korosi, tetapi penambahan elemen paduan seperti krom dan nikel meningkatkan ketahanannya, menghasilkan baja tahan karat.

Karena sifat-sifatnya yang beragam, baja digunakan luas dalam berbagai industri, termasuk konstruksi, otomotif, dan manufaktur.

Baja memiliki kandungan karbon kurang dari 2,14%. Ada tiga macam baja karbon yaitu: baja karbon rendah, baja karbon medium, baja karbon tinggi.

2.1.1 Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja karbon rendah merupakan baja dengan kandungan utama besi dan karbon dengan komposisi karbon $< 0,3\%$. Karbon dibawah 0,15% dinamakan dead mild steel yang banyak digunakan pada sheet, strip, wire, ship plate.

- Metode penguatnya dengan “*Cold Working*”.
- Struktur mikronya terdiri dari ferit dan perlit.
- Relatif lunak dan lemah.
- Ulet dan tangguh.
- Mampu mesin dan mampu lasnya baik.

Aplikasi baja karbon rendah diantaranya sebagai: body mobil, bentuk struktur (profil I, L, C, H), dan pipa saluran.

2.1.2 Baja Karbon Medium

Memiliki kandungan karbon antara 0,3 – 0,8%. Baja karbon medium dapat dinaikkan sifat mekaniknya melalui perlakuan panas austenitizing, quenching, dan tempering. Jenis baja karbon medium banyak dipakai dalam kondisi hasil tempering sehingga struktur mikronya martensit dan lebih kuat dari baja karbon rendah. Aplikasi baja karbon medium diantaranya sebagai: poros, roda gigi, dan crankshaft.

2.1.3 Baja Karbon Tinggi

Memiliki kandungan karbon 0,8 – 2%. Sifat mekaniknya dapat dinaikkan melalui perlakuan panas austenitizing, quenching dan tempering. Baja karbon tinggi banyak dipakai dalam kondisi hasil tempering sehingga struktur mikronya martensit. Kemudian jenis baja carbon ini merupakan yang paling keras, paling kuat, dan paling getas di antara baja karbon lainnya serta tahan aus. Baja karbon tinggi dapat diaplikasikan pada pegas, pisau cukur, kawat kekuatan tinggi, pekakas potong, dan dies.

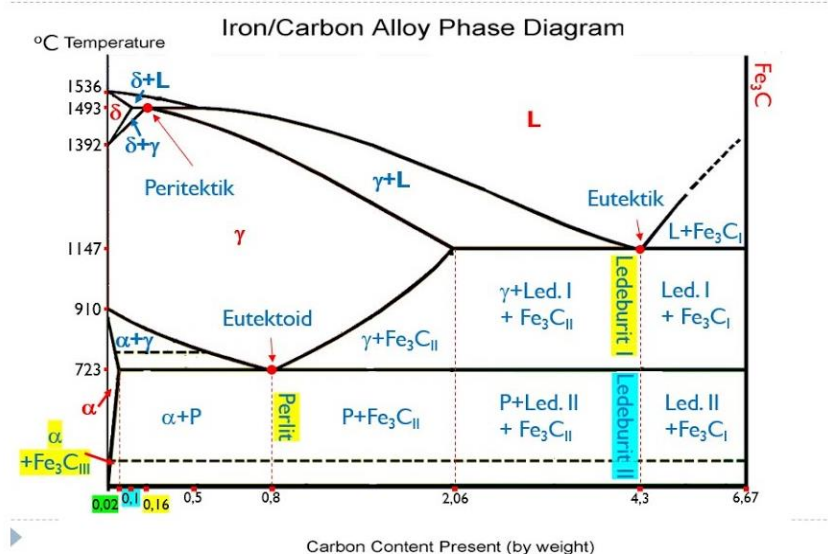
Baja karbon sedang telah banyak digunakan sebagai material struktural untuk industri otomotif seperti bahan cranshaf, pembuatan kapal, dan konstruksi karena keseimbangan yang sangat baik antara kekuatan, dan keuletan serta kekerasannya. Quenching merupakan sebuah proses perlakuan panas terhadap material baja tersebut dipanaskan pada suhu tertentu dan tergantung pada kandungan karbon dan fasa yang dimiliki oleh material baja tersebut, selanjutnya setelah mencapai suhu ditentukan serta ditahan selama waktu yang ditentukan, kemudian material baja tersebut di dinginkan secara kejut menggunakan media quench seperti air garam, oli dan air. Di antara baja karbon grade sedang, baja grade S45C (JIS) atau AISI 1045 (ASTM) merupakan baja berkualitas baik dengan kandungan karbon sekitar 0,45%. Baja tipe-S45C memiliki sifat mekanik yang baik seperti kekuatan yang dapat diterima, kekerasan, dan keuletan yang baik (Ibrahim & Sayuti, 2015). Selain itu, dapat mencapai kekerasan dan yang diinginkan peningkatan kekuatan melalui proses perlakuan panas karena efisiensi perlakuan panasnya yang tinggi. Oleh karena itu, baja ini cocok untuk pemrosesan mekanis serta pembuatan bagian-

bagian mesin seperti ulir, baut, poros, roda gigi, flensa baja, sabit, lubang, bor, dan pisau, dan lain-lain.

2.2 Perlakuan Panas

Perlakuan panas (*heat treatment*) merujuk pada proses pengolahan bahan (biasanya logam atau paduan) dengan cara pemanasan dan pendinginan yang terkontrol untuk mencapai sifat-sifat tertentu, seperti kekerasan, kekuatan, ketangguhan, atau kelenturan yang diinginkan. Proses ini sangat penting dalam bidang metalurgi, ilmu material, dan rekayasa.

Perlakuan panas berlandaskan pada fenomena perubahan fasa dalam material. Ketika material dipanaskan hingga temperatur tertentu, atom-atomnya mendapatkan energi dan mulai bergerak, memungkinkan terjadinya difusi. Proses ini memicu perubahan struktur kristal (fasa) dan distribusi elemen paduan. Kemudian, kecepatan pendinginan akan "mengunci" fasa yang terbentuk pada temperatur tinggi, atau memungkinkannya bertransformasi menjadi fasa lain yang diinginkan pada temperatur rendah.



Gambar 2. 1 Diagram Fase Paduan Besi/Karbon

Berikut adalah beberapa jenis proses perlakuan panas:

1. Anil (*Annealing*)

Bertujuan untuk melembutkan bahan, mengurangi tegangan internal, serta meningkatkan kelenturan dan kemudahan pengerjaan. Prosesnya dengan cara bahan dipanaskan hingga suhu tertentu dan kemudian didinginkan secara perlahan, biasanya dalam tungku. Biasa digunakan dalam produksi baja dan pengerjaan logam, terutama untuk meningkatkan kemampuan pemrosesan.

2. Penyejukan Cepat (*Quenching*)

Bertujuan untuk mengeraskan bahan dengan pendinginan cepat. Dengan cara bahan dipanaskan hingga suhu tinggi dan kemudian didinginkan dengan cepat, biasanya menggunakan air, minyak, atau udara. Pada umumnya proses ini digunakan untuk baja bertujuan meningkatkan kekerasannya.

3. Penempaan (*Tempering*)

Untuk mengurangi kerapuhan bahan setelah penyejukan cepat, sambil mempertahankan kekerasannya. Dengan cara bahan dipanaskan ke suhu lebih rendah (di bawah titik kritisnya) dan kemudian didinginkan secara perlahan. Biasa digunakan setelah proses penyejukan cepat untuk menyesuaikan keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan.

4. Normalisasi (*Normalizing*)

Untuk memperhalus struktur butir bahan dan mencapai keseragaman sifat material. Dengan cara bahan dipanaskan di atas suhu kritisnya dan kemudian didinginkan di udara. Biasanya digunakan untuk baja untuk meningkatkan sifat mekanik dan konsistensi.

5. Penghardian Permukaan (*Case Hardening*)

Untuk mengeraskan permukaan bahan sementara bagian dalamnya tetap lebih lunak dan tangguh. Dengan cara permukaan luar bahan diperkaya dengan karbon atau nitrogen, lalu dipanaskan dan didinginkan. Pada umumnya digunakan pada gigi roda, bantalan, dan poros.

6. Karburisasi (*Carburizing*)

Meningkatkan kekerasan permukaan baja karbon rendah dengan cara menambahkan kadar karbon pada lapisan permukaan (*case*) material. Tujuannya adalah mendapatkan permukaan yang sangat keras untuk ketahanan aus, sementara bagian inti (*core*) tetap ulet dan tangguh untuk menahan beban kejut. Di proses

dengan cara Material baja dipanaskan hingga suhu tinggi (biasanya dalam rentang austenitisasi) dalam sebuah lingkungan yang kaya karbon (gas, cair, atau padat). Pada suhu ini, atom-atom karbon berdifusi (menyebar) dan terserap ke dalam struktur kristal permukaan baja. Biasanya ideal untuk komponen mesin yang membutuhkan kombinasi sifat material yang kontras: kekerasan permukaan tinggi untuk ketahanan aus dan fatigue (kelelahan), serta kekuatan inti yang tinggi dan keuletan/ketangguhan untuk menahan beban dinamis. Seperti Gigi roda, Poros, Pin piston, Bantalan (*bearings*).

7. Nitrisasi (Nitriding)

Untuk memperkenalkan nitrogen ke lapisan permukaan untuk membuat lapisan yang keras dan tahan aus. Prosesnya Adalah dengan Bahan dipanaskan dalam lingkungan yang kaya nitrogen (seperti gas amonia). Sering digunakan pada komponen yang memerlukan ketahanan terhadap aus dan korosi, seperti komponen mesin.

8. Relaksasi Tegangan (Stress Relieving)

Untuk mengurangi tegangan sisa yang mungkin terbentuk selama proses pengelasan, pengecoran, atau pemesinan. Prosesnya Adalah dengan Bahan dipanaskan pada suhu sedang dan kemudian didinginkan secara perlahan. Digunakan untuk baja, aluminium, dan bahan lain setelah pemesinan atau pengelasan.

2.2.1 Aplikasi Perlakuan Panas

- **Industri Otomotif**

Gigi, poros engkol, dan komponen transmisi diperlakukan panas untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan aus.

- **Pembuatan Alat**

Alat seperti mata bor, alat potong, dan cetakan diperlakukan panas untuk mencapai kekerasan dan ketahanan aus yang diinginkan.

- **Aerospace**

Komponen pesawat sering mengalami perlakuan panas untuk memastikan keandalan dan kinerja di bawah kondisi ekstrem.

- **Konstruksi**

Elemen struktur baja seperti balok, kolom, dan penguat dapat diperlakukan panas untuk meningkatkan sifat mekaniknya.

Dengan mengontrol suhu dan laju pendinginan dengan hati-hati, proses perlakuan panas membantu mencapai keseimbangan sifat mekanik yang tepat untuk aplikasi material yang dimaksud.

2.3 Tempering

Tempering merupakan suatu proses panas yang bertujuan untuk menurunkan kekerasan pada suatu material baja, mengurangi tegangan dalam yang dapat menyebabkan material baja tersebut bersifat rapuh dan merubah struktur kristal material baja sehingga dapat bersifat lunak. sehingga material baja tersebut memiliki sifat kombinasi antara kekerasan, kekuatan, keuletan, keliatan, dan berstruktur kristal stabil. Melalui sebuah proses tempering, kegetasan dan kekerasan dapat diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan. Kekuatan tarik turun, kekerasan akan turun pula sedang keliatan dan ketangguhan material baja meningkat. yang telah dikeraskan pada kondisi suhu di bawah suhu kritis, disusul dengan pendinginan pada suhu kamar.

Parameter penting lainnya dari perlakuan panas adalah waktu pemaparan. Selama waktu penahanan pada suhu tertinggi perlakuan panas, belum terjadi transformasi fasa baru. Namun, tahap ini diperlukan untuk meratakan suhu antara inti dan permukaan spesimen, sehingga transformasi fasa yang sama dapat terjadi di dalam inti seperti halnya di permukaan. Selain itu, untuk menyelesaikan transformasi fase, waktu penahanan perlu mencapai tingkat tertentu. Di sisi lain, jika waktu penahanan terlalu lama, fase austenitik mungkin menjadi lebih besar, menyebabkan baja menjadi lebih rapuh. Oleh karena itu, waktu tunggu harus diperhitungkan dengan cermat. Waktu penahanan panas tergantung pada ukuran dan bentuk spesimen, suhu pemanasan, perlakuan panas metode, dan kualitas baja (Bouissa et al., 2019)

2.3.1 Jenis Jenis Fasa

Pada baja (steel), terdapat beberapa jenis fasa yang terbentuk selama proses

pendinginan atau pemanasan. Fasa-fasa ini sangat penting karena mempengaruhi sifat mekanik dan fisik baja, seperti kekuatan, kelenturan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap korosi. Berikut adalah jenis-jenis fasa yang dapat terbentuk pada baja:

- **Ferrit**
- **Austenit**
- **Perlit**
- **Sementit**
- **Martensit**
- **Bainit**

Fasa-fasa ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti komposisi kimia, laju pendinginan, dan proses perlakuan panas yang diterapkan pada baja. Setiap fasa memiliki peranannya masing-masing dalam menentukan sifat akhir dari baja tersebut.

2.3.2 Fasa Ferrit

Fasa ferrit (α -Fe) adalah fasa yang terbentuk pada baja dengan kandungan karbon rendah, umumnya di bawah 0,02% C. Ferrit memiliki struktur kristal kubus berpusat pada badan (BCC) dan terbentuk pada suhu rendah. Fasa ini sangat lunak dan ulet, sehingga baja yang mengandung ferrit cenderung memiliki kekuatan yang rendah tetapi baik dalam hal kelenturan dan daya tahan terhadap deformasi. Ferrit sering ditemukan pada baja karbon rendah dan memiliki sifat yang mudah dibentuk dan dilas, meskipun tidak cukup keras untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan tinggi.

2.3.3 Fasa Austenit

Fasa austenit (γ -Fe) adalah salah satu fasa dalam baja yang memiliki struktur kristal kubus berpusat pada wajah (*face-centered cubic*, FCC). Fasa ini terbentuk pada suhu yang lebih tinggi dan dapat melarutkan lebih banyak karbon dibandingkan dengan ferrit. Secara umum, fasa austenit ditemukan pada suhu antara

727°C hingga 1.200°C pada baja karbon rendah, namun suhu transisinya bisa lebih tinggi pada baja paduan.

Ciri-ciri Fasa Austenit

1. Struktur Kristal

Austenit memiliki struktur FCC, yang memungkinkan atom besi mengikat lebih banyak karbon dalam bentuk larutan padat. Ini memberi austenit sifat mekanik yang baik, seperti kelenturan dan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan ferrit.

2. Kemampuan Melarutkan Karbon

Austenit dapat melarutkan karbon dalam jumlah yang lebih besar (hingga sekitar 2,1% C pada suhu tinggi), yang mempengaruhi kekuatan dan ketahanan baja setelah pendinginan atau perlakuan panas lainnya.

3. Kekerasan dan Ketangguhan

Austenit cenderung lebih ulet dan lebih tangguh dibandingkan dengan fasa lainnya seperti ferrit atau cementite. Namun, kekerasannya tidak setinggi martensit atau sementit.

4. Stabilitas pada Suhu Tinggi

Fasa austenit lebih stabil pada suhu tinggi, tetapi pada suhu kamar (suhu ruang), fasa ini akan menjadi tidak stabil pada baja karbon rendah dan akan berubah menjadi ferrit atau perlit. Pada baja paduan tertentu, seperti baja tahan karat (*stainless steel*), austenit bisa dipertahankan pada suhu kamar dengan menggunakan elemen paduan seperti nikel.

Pembentukan Fasa Austenit:

1. Pemanasan

Ketika baja dipanaskan hingga suhu tertentu (di atas suhu transformasi austenit, sekitar 727°C pada baja karbon), struktur kristal berubah menjadi austenit. Pada suhu ini, atom-atom besi mengatur diri mereka dalam struktur FCC yang memungkinkan lebih banyak karbon terlarut.

2. Pencapaian Keseimbangan

Pada kondisi ini, jika baja didinginkan dengan lambat, austenit akan

bertransformasi menjadi struktur lainnya, seperti perlit atau bainit. Namun, jika pendinginan cepat dilakukan (seperti dalam proses *quenching*), fasa ini dapat berubah menjadi martensit yang lebih keras dan rapuh.

Sifat Fasa Austenit:

1. Austenit lebih ulet daripada ferrit dan lebih kuat daripada perlit pada suhu tinggi. Karena struktur FCC-nya, austenit lebih mudah mengalami deformasi plastis dibandingkan dengan ferrit, yang memiliki struktur BCC.
2. Austenit memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah dibandingkan dengan ferrit, tetapi masih relatif baik.
3. Pada baja paduan (seperti baja tahan karat atau stainless steel), austenit membantu meningkatkan ketahanan terhadap korosi, karena struktur ini lebih stabil dan tidak mudah teroksidasi.

Penggunaan Fasa Austenit:

Fasa austenit sangat penting dalam banyak aplikasi, terutama untuk baja paduan dan baja tahan karat. Baja tahan karat austenitik, misalnya, banyak digunakan dalam industri kimia, makanan, medis, dan otomotif karena ketahanannya terhadap korosi dan kemampuan untuk mempertahankan ketangguhan pada suhu tinggi.

Selain itu, fasa austenit juga digunakan dalam proses-proses perlakuan panas untuk memperoleh sifat mekanik yang diinginkan. Sebagai contoh, dalam proses *quenching* dan *tempering*, austenit dapat diubah menjadi martensit atau bainit, yang memberikan kekerasan dan kekuatan tinggi pada baja.

Secara keseluruhan, austenit adalah fasa yang sangat penting dalam pengolahan dan pengembangan baja, memberikan dasar bagi banyak sifat baja yang digunakan dalam berbagai industri.

2.3.4 Fasa Perlit

Perlit adalah fasa eutektik yang terbentuk dalam baja dengan kandungan karbon sekitar 0,8% pada suhu sekitar 727°C. Perlit merupakan campuran ferrit (α -Fe) dan sementit (Fe_3C) yang tersusun dalam lapisan-lapisan yang sangat tipis dan teratur. Struktur ini memberikan kombinasi antara kekerasan dan kelenturan pada baja.

Ciri-ciri Fasa Perlit:

1. **Komposisi:** Perlit terbentuk dari campuran dua fasa:
 - **Ferrit:** Fasa yang lunak dan ulet, dengan struktur kristal BCC (kubus berpusat pada badan).
 - **Sementit:** Fasa keras yang terdiri dari senyawa Fe_3C (karbida besi), yang lebih keras tetapi rapuh.
2. **Struktur:** Pada skala mikroskopik, perlit memiliki struktur lamellar (lapisan-lapisan), di mana lapisan ferrit dan sementit berdekatan dalam pola yang sangat teratur dan halus. Struktur lamellar ini memberikan sifat mekanik yang seimbang antara kekuatan dan ketangguhan.
3. **Suhu Pembentukan:** Perlit terbentuk pada suhu sekitar 727°C pada baja dengan kandungan karbon sekitar 0,8% C, yang merupakan komposisi eutektik untuk baja karbon. Pada suhu ini, transformasi eutektik terjadi, di mana cairan atau austenit mengubah dirinya menjadi campuran ferrit dan sementit dalam bentuk struktur lamellar.
4. **Sifat Mekanik:**
 - **Kekerasan:** Karena adanya sementit (Fe_3C) dalam perlit, baja yang mengandung perlit memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada baja yang hanya mengandung ferrit.
 - **Kelenturan:** Ferrit memberikan sifat kelenturan pada perlit, sehingga baja yang mengandung perlit masih dapat menahan deformasi sebelum patah.
 - **Ketahanan Aus:** Baja yang mengandung perlit memiliki ketahanan aus yang baik karena struktur sementit yang keras.

Pembentukan Fasa Perlit:

Perlit terbentuk melalui transformasi eutektik pada suhu 727°C. Pada proses pendinginan lambat (dari suhu austenit ke suhu sekitar 727°C), baja dengan kandungan karbon sekitar 0,8% akan mengalami transformasi di mana austenit akan terpisah menjadi dua fase, yaitu ferrit dan sementit, yang tersusun dalam bentuk lapisan-lapisan halus.

Jika baja didinginkan secara perlahan dari suhu tinggi, struktur perlit akan terbentuk sebagai hasil dari keseimbangan eutektik antara ferrit dan sementit. Semakin lambat laju pendinginan, semakin besar kemungkinan perlit akan terbentuk dengan baik.

Sifat Fasa Perlit:

1. **Kekuatan yang Moderat:** Perlit memberikan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan ferrit murni, tetapi tidak setinggi martensit. Perlit lebih kuat daripada ferrit karena adanya lapisan sementit yang keras.
2. **Ketangguhan yang Baik:** Perlit memiliki ketangguhan yang lebih baik dibandingkan dengan sementit murni karena pengaruh lapisan ferrit yang ulet.
3. **Kombinasi Kekuatan dan Kelenturan:** Perlit menawarkan keseimbangan yang baik antara kekuatan dan kelenturan, menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi yang membutuhkan keduanya.

Pengaruh Proses Pendinginan:

Kecepatan pendinginan sangat mempengaruhi formasi perlit. Pada laju pendinginan lambat (seperti pada proses *annealing* atau pendinginan alami), perlit akan terbentuk secara jelas. Namun, pada laju pendinginan yang cepat (misalnya melalui proses *quenching*), austenit tidak sempat mengalami transformasi eutektik dan akan berubah menjadi martensit, yang lebih keras dan lebih rapuh.

Penggunaan Fasa Perlit:

- **Baja dengan 0,8% C** yang memiliki perlit sangat sering digunakan dalam berbagai aplikasi teknik dan industri. Baja jenis ini digunakan dalam pembuatan berbagai komponen seperti batang baja, kawat baja, dan bagian mesin yang memerlukan keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan.

- **Baja struktural** dengan kandungan karbon sekitar 0,8% sering mengandung perlit, memberikan material dengan sifat yang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan aus dan daya tahan.

2.3.5 Fasa Sementit

Sementit (Fe_3C) adalah fasa karbida besi yang terbentuk pada baja dengan kandungan karbon tinggi (biasanya lebih dari 0,8% C) dan merupakan senyawa intermetalik antara besi dan karbon. Sementit memiliki komposisi kimia Fe_3C dan struktur kristal ortorombik. Fasa ini sangat keras dan rapuh, dan sering kali ditemukan pada baja yang diproses dengan cara yang menghasilkan kandungan karbon tinggi, baik melalui paduan atau perlakuan panas tertentu.

Ciri-ciri Fasa Sementit:

1. Komposisi:

- Sementit adalah senyawa kimia Fe_3C yang terdiri dari tiga atom besi (Fe) dan satu atom karbon (C).
- Sementit biasanya ditemukan dalam baja dengan kandungan karbon lebih dari 0,8%. Fasa ini terbentuk pada suhu tertentu selama proses pendinginan baja dari austenit.

2. Struktur Kristal:

- Sementit memiliki struktur kristal ortorombik, yang berarti susunan atomnya tidak simetris. Struktur ini membuat sementit menjadi sangat keras namun rapuh, karena keteraturan susunan atom yang tidak memungkinkan banyak pergeseran plastis.

3. Sifat Mekanik:

- **Kekerasan:** Sementit sangat keras, jauh lebih keras dibandingkan dengan ferrit atau perlit, dan memiliki kekerasan sekitar 700-800 HV (Vickers hardness). Hal ini membuat sementit sangat tahan terhadap aus, namun sifat kerasnya juga membuatnya rapuh.

- **Kerapuhan:** Sifat rapuh sementit membuatnya tidak cocok untuk aplikasi yang membutuhkan ketangguhan atau deformasi plastis. Ini adalah alasan mengapa fasa sementit seringkali dicampurkan dengan ferrit atau perlit, yang lebih ulet dan lentur.

4. Suhu Pembentukan:

- Sementit terbentuk pada suhu rendah, setelah fase austenit (γ -Fe) mendingin dan mengandung cukup karbon. Transformasi dari austenit menjadi sementit terjadi pada suhu yang lebih rendah (di bawah 727°C pada baja karbon tinggi).
- Sementit dapat terbentuk dalam kondisi eutektik pada suhu 727°C untuk baja dengan kandungan karbon sekitar 0,8%. Namun, untuk baja dengan kandungan karbon lebih tinggi, sementit bisa terbentuk pada suhu lebih rendah selama proses pendinginan.

Peran Sementit dalam Baja:

1. **Menambah Kekerasan Baja:** Sementit memberikan baja kekerasan yang tinggi. Ketika tercampur dengan fasa ferrit atau perlit, sementit dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan aus baja, tetapi juga menurunkan ketangguhan material secara keseluruhan.
2. **Membatasi Deformasi Plastis:** Karena sifatnya yang sangat keras dan rapuh, sementit membatasi kemampuan baja untuk mengalami deformasi plastis. Inilah sebabnya baja dengan kandungan sementit yang tinggi cenderung rapuh dan rentan terhadap patah.
3. **Pengaruh pada Proses Perlakuan Panas:** Sementit terbentuk sebagai hasil dari transformasi fasa selama perlakuan panas, terutama pada baja dengan kandungan karbon tinggi atau baja paduan. Oleh karena itu, pengontrolan jumlah sementit dalam baja sangat penting dalam menentukan sifat akhir baja tersebut.

Pembentukan Sementit:

- **Pada Proses Pendinginan:** Sementit terbentuk ketika baja dengan kandungan karbon tinggi mendingin dari austenit. Pada suhu yang

lebih rendah, karbon yang larut dalam austenit akan membentuk **cementite (Fe_3C)**. Pada baja dengan lebih dari 0,8% karbon, sementit terbentuk sebagai fasa yang mendominasi setelah proses transformasi eutektik atau pada fase pendinginan yang lebih lambat.

- **Pada Baja Karbon Tinggi:** Dalam baja dengan kandungan karbon lebih dari 0,8%, fasa cementite (Fe_3C) akan lebih banyak terbentuk daripada fasa perlit, yang mengarah pada baja yang lebih keras namun lebih rapuh.

Pengaruh Sementit terhadap Sifat Baja:

1. **Kekerasan dan Ketahanan Aus:** Baja yang mengandung banyak sementit sangat tahan terhadap aus karena sementit adalah salah satu material yang paling keras dalam baja. Namun, ketangguhan baja ini akan menurun, dan material tersebut bisa lebih mudah retak atau patah di bawah beban yang tinggi.
2. **Meningkatkan Kekuatan:** Karena sementit keras, baja yang mengandung sementit lebih kuat dalam menahan beban tarik, tetapi tidak terlalu baik dalam menahan deformasi plastis atau bending. Oleh karena itu, fasa ini sering dikombinasikan dengan fasa lain (seperti ferrit atau perlit) untuk mencapai kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang optimal.

Penggunaan Sementit dalam Baja:

- **Baja Karbon Tinggi:** Baja yang mengandung banyak sementit digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan kekerasan tinggi dan ketahanan aus, seperti pisau, alat potong, atau rol baja.
- **Baja dengan Paduan Khusus:** Sementit juga dapat ditemukan dalam beberapa baja paduan, seperti baja cepat (*high-speed steel*), yang memiliki kandungan karbon tinggi dan digunakan untuk alat pemotong yang memerlukan ketahanan terhadap aus dan deformasi.
- **Aplikasi Khusus:** Sementit terkadang digunakan dalam komponen-komponen yang tidak memerlukan kelenturan tinggi, tetapi

membutuhkan kekuatan dan ketahanan aus, seperti gigi roda, bantalan, dan bagian mesin lainnya.

2.3.6 Fasa Martensit

Martensit adalah fasa yang terbentuk pada baja melalui proses pendinginan yang sangat cepat (disebut *quenching*) dari fasa austenit pada suhu tinggi. Fasa ini memiliki struktur kristal tetragonal yang tidak simetris dan terbentuk ketika austenit yang mengandung karbon didinginkan dengan cepat, sehingga tidak cukup waktu untuk membentuk fasa yang lebih stabil seperti ferrit atau perlit.

Martensit sangat keras dan rapuh, sehingga sifat mekaniknya sangat berbeda dibandingkan dengan fasa lainnya seperti ferrit atau perlit. Meskipun martensit memiliki kekerasan yang sangat tinggi, biasanya diperlukan perlakuan panas lebih lanjut (seperti *tempering*) untuk mengurangi kerapuhannya dan mencapai kombinasi sifat mekanik yang lebih baik, seperti ketangguhan dan kekuatan.

Ciri-ciri Fasa Martensit:

1. **Struktur Kristal Tetragonal**

Martensit memiliki struktur kristal tetragonal (berbeda dengan struktur kristal cubic dari ferrit atau austenit), yang menyebabkan perubahan besar dalam susunan atom besi. Ketika austenit mendingin dengan cepat, atom karbon terperangkap dalam struktur tetragonal, yang membuat martensit sangat keras namun rapuh.

2. **Kekerasan Tinggi**

Martensit memiliki kekerasan yang sangat tinggi (dalam rentang 700–900 HV, tergantung pada kandungan karbon), karena struktur tetragonal yang terkunci dan terperangkapnya karbon dalam kisi kristal besi. Hal ini menjadikan martensit sangat tahan terhadap goresan dan aus.

3. **Kerapuhan:**

Karena struktur kristalnya yang terdistorsi dan terperangkap karbon, martensit memiliki sifat rapuh. Ini berarti meskipun martensit sangat keras, baja yang mengandung martensit tidak dapat menahan deformasi

plastis dengan baik dan cenderung pecah atau retak di bawah beban yang besar.

Proses Pembentukan Martensit:

Martensit terbentuk dalam proses quenching, yaitu dengan mendinginkan baja yang sedang berada dalam fasa austenit (struktur FCC pada suhu tinggi) dengan sangat cepat, biasanya dengan merendamnya dalam air atau minyak. Proses ini mencegah karbon untuk membentuk struktur yang lebih stabil (seperti perlit atau ferrit), sehingga karbon terperangkap dalam kisi besi, menghasilkan struktur tetragonal martensit.

- **Suhu Transformasi:** Pada suhu tinggi, baja berada dalam fasa austenit yang stabil dan dapat melarutkan karbon dalam jumlah yang lebih besar. Namun, ketika baja tersebut didinginkan dengan sangat cepat (misalnya, dengan mendinginkannya dalam air atau minyak), karbon tidak dapat keluar dari kisi austenit dengan cepat, dan menghasilkan struktur martensit.
- **Kecepatan Pendinginan:** Proses pembentukan martensit sangat bergantung pada kecepatan pendinginan. Semakin cepat baja didinginkan, semakin banyak martensit yang terbentuk. Dalam proses quenching yang ideal, kecepatan pendinginan yang tinggi mengarah pada pembentukan martensit yang lebih banyak.
- **Pentingnya Kandungan Karbon:** Kandungan karbon dalam baja mempengaruhi kemampuan untuk membentuk martensit. Semakin tinggi kandungan karbon (lebih dari 0,8% C), semakin mudah martensit terbentuk karena karbon larut dalam austenit pada suhu tinggi, dan lebih banyak karbon yang terperangkap dalam struktur martensit.

Sifat-sifat Martensit:

1. Kekerasan

Martensit memiliki kekerasan yang sangat tinggi dibandingkan dengan fasa baja lainnya, seperti ferrit atau perlit. Kekerasan ini berasal dari struktur tetragonal yang tidak simetris, yang menghalangi pergeseran dislokasi dan menyebabkan baja menjadi sangat keras.

2. Kerapuhan

Martensit cenderung rapuh, yang berarti meskipun sangat keras, martensit tidak mampu menahan beban yang besar atau deformasi plastis tanpa retak atau patah. Untuk meningkatkan ketangguhan martensit, sering kali diperlukan perlakuan lebih lanjut seperti **tempering**.

3. Ketahanan Aus

Karena kekerasannya yang tinggi, martensit sangat tahan terhadap aus, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap keausan, seperti dalam alat potong atau komponen mesin yang sering terkena gesekan.

4. Daya Tarik dan Kekuatan

Martensit memiliki daya tarik yang rendah dan cenderung lebih rapuh di bawah tekanan atau tarik dibandingkan dengan fasa lainnya seperti ferrit atau perlit. Oleh karena itu, meskipun kuat, martensit sering membutuhkan tempering untuk meningkatkan ketangguhan.

Martensit yang terbentuk melalui proses quenching sangat keras namun rapuh. Untuk mengurangi kerapuhan dan meningkatkan ketangguhan, proses *tempering* dilakukan. Tempering melibatkan pemanasan baja martensit pada suhu yang lebih rendah (biasanya antara 150–700°C) setelah proses quenching.

- **Tujuan Tempering**

Tujuan tempering adalah untuk mengurangi kekerasan martensit yang berlebihan dan meningkatkan ketangguhan material. Selama tempering, sebagian karbon yang terperangkap dalam struktur martensit dapat keluar, mengurangi distorsi pada kisi kristal dan menghasilkan martensit yang lebih stabil dan lebih ulet.

- **Kombinasi Sifat**

Proses tempering memungkinkan untuk mendapatkan baja dengan kombinasi kekuatan yang lebih tinggi dan ketangguhan yang lebih baik. Dengan mengontrol suhu tempering, kekerasan dan ketangguhan baja dapat dioptimalkan sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

Penggunaan Martensit:

Martensit banyak digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kekerasan tinggi dan ketahanan terhadap aus, meskipun sering kali disertai dengan tempering untuk meningkatkan ketangguhan. Beberapa contoh penggunaan martensit adalah:

- **Alat Pemotong**

Seperti pisau, gergaji, dan pahat, karena martensit memberikan ketahanan aus yang sangat baik.

- **Baja Alat**

Seperti baja cepat (high-speed steel), digunakan dalam mesin bor atau alat potong lainnya.

- **Komponen Otomotif dan Mesin**

Seperti gigi roda, poros, dan bagian-bagian mesin yang perlu menahan beban dan keausan tinggi.

2.3.7 Fasa Bainit

Fasa Bainit adalah salah satu jenis struktur mikro yang terdapat dalam baja yang telah mengalami proses perlakuan panas, khususnya dalam proses pendinginan cepat atau quenching. Bainit muncul pada suhu yang lebih tinggi dibandingkan martensit dan memiliki sifat mekanik yang baik, seperti kekuatan tinggi dan ketangguhan yang lebih baik dibandingkan martensit. Fasa bainit terbentuk dalam dua bentuk utama, yaitu bainit halus dan bainit kasar, tergantung pada temperatur dan laju pendinginan baja.

Pembentukan Fasa Bainit:

1. **Temperatur Pembentukan**

Bainit terbentuk pada rentang suhu antara 250°C hingga 550°C, tergantung pada komposisi kimia baja dan laju pendinginan.

2. **Struktur Mikro**

Bainit terdiri dari campuran ferrit dan karbon yang terkendali dalam bentuk struktur jarum-jarum halus. Pada suhu yang lebih rendah, bainit halus terbentuk, sedangkan pada suhu yang lebih tinggi, bainit kasar dapat terbentuk.

3. Proses Pembentukan

Untuk membentuk bainit, baja harus didinginkan dengan kecepatan yang moderat, tidak secepat proses martensitisasi yang mengarah pada pembentukan martensit. Pendekatan ini memungkinkan terbentuknya struktur bainit yang lebih stabil dan memiliki kombinasi sifat yang baik.

Ciri-ciri Fasa Bainit:

- Memiliki kekuatan yang lebih baik daripada ferrit, tetapi lebih rendah daripada martensit.
- Ketangguhan yang lebih baik dibandingkan martensit karena struktur mikro yang lebih besar.
- Menyediakan keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan.
- Fasa bainit lebih stabil pada suhu lebih tinggi dibandingkan martensit.

Keuntungan Fasa Bainit:

- Fasa bainit sering dipilih dalam aplikasi yang membutuhkan kekuatan tinggi dan ketangguhan, seperti pada komponen otomotif dan alat-alat berat.
- Karena struktur mikro yang lebih halus, bainit dapat memberikan kestabilan yang lebih baik dalam kondisi kerja yang ekstrim.

2.4 Baja S45C



Gambar 2. 2 Baja S45C

Baja S45C adalah jenis baja karbon menengah yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi teknik. Nama S45C merujuk pada kode standar yang digunakan di Jepang untuk menggambarkan komposisi dan sifat materialnya.

2.4.1 Karakteristik Baja S45C

1. Komposisi Kimia:

- **Karbon (C)**
Sekitar 0,45% – ini adalah kadar karbon yang moderat, menjadikannya lebih keras dibandingkan baja karbon rendah tetapi lebih mudah diproses daripada baja karbon tinggi.
- **Silicon (Si)**
Biasanya antara 0,15% - 0,35%.
- **Mangan (Mn)**
Sekitar 0,60% - 0,90%.
- **Besi (Fe)**
Sisanya adalah besi, yang menjadi bahan utama baja ini.

2. Kekuatan dan Kekerasan:

- Baja S45C memiliki sifat mekanik yang baik, dengan kekuatan tarik sekitar 600–700 MPa dan kekerasan yang bervariasi tergantung pada proses perlakuan panas yang diterapkan.

- Material ini cukup keras setelah proses quenching dan tempering, namun masih relatif mudah untuk diproses dan dibentuk.

3. Kegunaan

- Baja S45C banyak digunakan dalam pembuatan komponen mesin yang membutuhkan keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan pemrosesan, seperti poros, gigi roda, baut, ring, dan komponen otomotif lainnya.
- S45C juga digunakan dalam pembuatan roda gigi, piston, dan komponen yang membutuhkan kekerasan tetapi tetap memerlukan ketangguhan pada bagian dalamnya.
-

2.4.2 Perlakuan Panas pada Baja S45C

Baja S45C dapat diperlakukan panas untuk meningkatkan kekerasan dan sifat mekaniknya sesuai kebutuhan aplikasi tertentu. Berikut adalah beberapa proses yang umum dilakukan pada baja S45C:

1. Anil (Annealing):

- Proses ini digunakan untuk melembutkan baja dan meningkatkan kemudahan pemesinan. Baja S45C dipanaskan pada suhu sekitar 680–700°C, kemudian didinginkan perlahan di dalam tungku atau di udara.

2. Penyejukan Cepat (Quenching):

- Baja S45C dapat dipanaskan ke suhu sekitar 850–900°C, kemudian didinginkan dengan cepat menggunakan air atau minyak untuk meningkatkan kekerasan permukaan.

3. Penempaan (Tempering):

- Setelah proses quenching, baja ini sering dipanaskan lagi pada suhu yang lebih rendah (sekitar 500–650°C) untuk mengurangi kerapuhan dan meningkatkan ketangguhan material.

4. Normalisasi:

- Baja S45C juga dapat dinormalisasi untuk mendapatkan struktur butir yang lebih halus dan meningkatkan homogenitas mekanik.

Proses ini dilakukan dengan pemanasan hingga suhu sekitar 850–900°C, kemudian didinginkan di udara.

2.4.3 Kelebihan Baja S45C

- **Kekuatan yang baik**

Baja S45C memiliki keseimbangan antara kekuatan dan kelenturan, membuatnya ideal untuk berbagai aplikasi teknik.

- **Mudah diproses**

Baja ini dapat diproses dengan berbagai cara, seperti pemesian, pengecoran, dan pembentukan.

- **Fleksibilitas dalam aplikasi**

Berbagai komponen industri, seperti mesin, otomotif, dan peralatan konstruksi, dapat menggunakan baja ini karena sifatnya yang serbaguna.

2.4.4 Kekurangan Baja S45C

- **Kekuatan korosi terbatas**

Baja S45C tidak tahan terhadap korosi dan biasanya memerlukan perlindungan tambahan seperti pelapisan atau cat untuk digunakan dalam lingkungan yang lembab atau korosif.

- **Rentan terhadap kelelahan**

Dalam aplikasi yang melibatkan beban siklik atau berulang, baja ini bisa lebih rentan terhadap kelelahan dibandingkan dengan paduan yang lebih kuat.

Secara keseluruhan, **Baja S45C** adalah pilihan material yang sangat baik untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan sedang, kemudahan pemrosesan, dan ketangguhan yang baik, tetapi tetap harus diperhatikan kondisi lingkungan tempat material ini akan digunakan.

2.5 JIG



Gambar 2. 3 JIG

JIG adalah perangkat atau alat bantu yang digunakan dalam proses manufaktur atau permesinan untuk memandu, menahan, atau mendukung suatu komponen agar tetap pada posisi yang benar selama proses produksi. JIG membantu memastikan presisi dan konsistensi dalam pembuatan komponen-komponen yang identik. Alat ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, dan mengurangi potensi kesalahan manusia dalam proses produksi. Jig menghilangkan kebutuhan untuk penandaan, penusukan, atau pengukuran manual yang berulang pada setiap benda kerja.

Dengan memandu alat potong, jig memastikan bahwa semua fitur dibuat pada lokasi yang tepat dengan toleransi yang ketat. Karena proses pengukuran dan penandaan dihilangkan, waktu siklus untuk setiap benda kerja menjadi jauh lebih singkat. Operator dapat dengan cepat menjepit benda kerja, melakukan pemesinan, dan melepaskannya, yang secara signifikan meningkatkan laju produksi. Setiap benda kerja yang diproses menggunakan jig yang sama akan memiliki fitur yang identik. Ini memastikan bahwa komponen-komponen dapat saling tukar (*interchangeable*) tanpa masalah perakitan, yang sangat penting dalam produksi massal.

2.5.1 Fungsi Utama JIG

1. Panduan Posisi

JIG digunakan untuk memastikan bahwa bagian yang sedang diproses tetap berada pada posisi yang benar sepanjang proses, seperti pemotongan, pengeboran, penggilingan, atau penggerindaan.

2. Menahan Komponen

JIG juga dapat menahan komponen agar tetap stabil dan aman selama proses produksi.

3. Peningkatan Presisi

Dengan menggunakan JIG, ukuran dan bentuk komponen yang diproduksi akan lebih konsisten dan tepat sesuai dengan desain yang diinginkan.

4. Efisiensi Produksi

Menggunakan JIG dalam produksi massal dapat mempercepat proses karena mengurangi waktu setup dan menghilangkan kebutuhan untuk pengukuran manual yang berulang.

2.5.2 Jenis-Jenis JIG

1. JIG Pengeboran (Drill Jig)

- Digunakan untuk pengeboran lubang di posisi yang sangat presisi pada komponen. JIG ini memiliki pemandu untuk memastikan posisi lubang yang tepat.
- Contoh: JIG untuk pengeboran di komponen mesin atau logam.

2. JIG Pemotongan (Cutting Jig)

- Digunakan untuk memandu pemotongan atau pembentukan komponen dengan ukuran atau bentuk tertentu.
- Contoh: JIG untuk pemotongan atau penggerindaan komponen yang memerlukan akurasi tinggi.

3. JIG Penggilingan (Milling Jig)

- Digunakan dalam proses penggilingan untuk memastikan bahwa bagian tetap berada di posisi yang benar saat proses pemotongan berlangsung.

- Digunakan untuk komponen yang membutuhkan bentuk atau alur yang presisi.

4. JIG Pengelasan (Welding Jig)

- Digunakan untuk menahan bagian-bagian logam agar tetap pada posisi yang benar selama proses pengelasan.
- JIG jenis ini sangat berguna dalam pengelasan struktur logam atau komponen yang memiliki banyak sambungan.

5. JIG Perakitan (Assembly Jig)

- Digunakan dalam proses perakitan untuk memastikan bagian-bagian dipasang dengan benar dan dalam posisi yang tepat.
- Contoh: JIG untuk merakit mesin atau perangkat elektronik.

2.5.3 Kelebihan Penggunaan JIG

- **Akuran Tinggi**

JIG memastikan bahwa komponen yang diproduksi memiliki dimensi dan posisi yang tepat, mengurangi cacat dalam produksi.

- **Peningkatan Kecepatan Produksi**

Menggunakan JIG mengurangi waktu setup dan meningkatkan produktivitas karena dapat mengurangi waktu pengukuran dan penyesuaian yang diperlukan.

- **Konsistensi**

Dengan JIG, setiap komponen yang diproduksi akan memiliki hasil yang konsisten dan identik, cocok untuk produksi massal.

- **Meningkatkan Keamanan**

JIG membantu menahan komponen dengan aman selama proses, mengurangi kemungkinan kecelakaan atau kerusakan.

2.5.4 Kekurangan Penggunaan JIG

- **Biaya Awal**

Pembuatan JIG membutuhkan biaya yang lebih tinggi, terutama jika diperlukan desain khusus untuk aplikasi tertentu.

- **Tidak Fleksibel**

JIG biasanya dirancang untuk aplikasi tertentu, sehingga memerlukan pembuatan ulang jika ada perubahan dalam desain atau proses.

- **Keterbatasan dalam Penggunaan**

JIG lebih efektif untuk aplikasi berulang atau produksi massal, dan mungkin tidak praktis untuk produksi dengan volume rendah atau item unik.

2.5.5 Aplikasi JIG

- **Industri Otomotif**

Digunakan untuk memproduksi dan merakit komponen mesin, rangka kendaraan, dan bagian lainnya dengan presisi tinggi.

- **Industri Elektronik**

Digunakan dalam perakitan komponen elektronik kecil seperti papan sirkuit tercetak (PCB) atau perangkat yang memerlukan akurasi tinggi.

- **Industri Manufaktur**

Digunakan dalam pembuatan komponen mesin, alat, dan produk-produk lainnya yang membutuhkan pengeboran, pemotongan, atau penggilingan dengan presisi tinggi.

Secara keseluruhan, JIG adalah alat yang sangat penting dalam proses manufaktur untuk memastikan ketepatan dan efisiensi dalam pembuatan produk dengan presisi tinggi.

2.6 Pengertian *X-ray Diffraction (XRD)*

X-ray Diffraction (XRD) atau Difraksi Sinar-X adalah teknik analisis non-destruktif yang sangat serbaguna dan kuat, digunakan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi material kristalin. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip difraksi sinar-X oleh kisi-kisi atom dalam suatu material.

Secara fundamental, XRD memberikan "sidik jari" unik dari struktur atomik periodik dalam suatu material kristalin. Ini berarti bahwa setiap senyawa kristalin memiliki pola difraksi sinar-X yang khas, mirip dengan bagaimana sidik jari manusia itu unik. Pola ini dapat digunakan untuk:

- **Identifikasi Fasa (Phase Identification)**
Menentukan senyawa kimia atau mineral apa saja yang ada dalam sampel.
- **Analisis Struktur Kristal**
Mengidentifikasi jenis struktur kristal (misalnya kubik, heksagonal), parameter kisi (ukuran unit sel), dan grup ruang.
- **Penentuan Ukuran Kristalit (Crystallite Size)**
Mengestimasi ukuran butir kristal yang sangat kecil (nanometer hingga mikrometer).
- **Pengukuran Tegangan Kisi (Lattice Strain)**
Mendeteksi adanya tegangan atau regangan dalam kisi kristal.
- **Orientasi Kristal Preferensial (Preferred Orientation/Texture)**
Menentukan apakah kristal-kristal dalam sampel memiliki arah orientasi tertentu.
- **Persentase Kristalinitas**
Menentukan rasio material kristalin dibandingkan dengan material amorf dalam sampel.

Tentu, mari kita jelaskan secara lengkap tentang *X-ray Diffraction (XRD)*:

2.6.1 Pengertian X-ray Diffraction (XRD)

X-ray Diffraction (XRD) atau Difraksi Sinar-X adalah teknik analisis non-destruktif yang sangat serbaguna dan kuat, digunakan untuk mengidentifikasi dan

mengkarakterisasi material kristalin. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip difraksi sinar-X oleh kisi-kisi atom dalam suatu material.

Secara fundamental, XRD memberikan "sidik jari" unik dari struktur atomik periodik dalam suatu material kristalin. Ini berarti bahwa setiap senyawa kristalin memiliki pola difraksi sinar-X yang khas, mirip dengan bagaimana sidik jari manusia itu unik. Pola ini dapat digunakan untuk:

- **Identifikasi Fasa (Phase Identification)**
Menentukan senyawa kimia atau mineral apa saja yang ada dalam sampel.
- **Analisis Struktur Kristal**
Mengidentifikasi jenis struktur kristal (misalnya kubik, heksagonal), parameter kisi (ukuran unit sel), dan grup ruang.
- **Penentuan Ukuran Kristalit (Crystallite Size)**
Mengestimasi ukuran butir kristal yang sangat kecil (nanometer hingga mikrometer).
- **Pengukuran Tegangan Kisi (Lattice Strain)**
Mendeteksi adanya tegangan atau regangan dalam kisi kristal.
- **Orientasi Kristal Preferensial (Preferred Orientation/Texture)**
Menentukan apakah kristal-kristal dalam sampel memiliki arah orientasi tertentu.
- **Persentase Kristalinitas**
Menentukan rasio material kristalin dibandingkan dengan material amorf dalam sampel.

2.6.2 Prinsip Dasar Kerja XRD

Prinsip kerja XRD didasarkan pada Hukum Bragg, yang ditemukan oleh Sir William Henry Bragg dan Sir William Lawrence Bragg. Hukum ini menjelaskan kondisi di mana sinar-X yang mengenai kristal akan berdifraksi secara konstruktif.

1. Sinar-X dan Struktur Kristal

Sinar-X memiliki panjang gelombang (λ) yang sebanding dengan jarak antar-atom dalam kristal (jarak bidang kisi, d).

2. Interaksi dengan Elektron

Ketika berkas sinar-X monokromatik (sinar-X dengan satu panjang gelombang) mengenai sampel kristalin, sinar-X akan berinteraksi dengan elektron-elektron atom dalam bidang-bidang kisi kristal.

3. Difraksi dan Interferensi

Atom-atom ini berfungsi sebagai pusat hamburan. Sinar-X yang dihamburkan dari bidang-bidang atom yang berbeda akan mengalami interferensi. Difraksi terjadi ketika sinar-X yang dihamburkan secara konstruktif saling menguatkan.

2.6.3 Instrumen XRD (*Difraktometer Sinar-X*)

Difraktometer sinar-X terdiri dari komponen utama:

1. Sumber Sinar-X (X-ray Source)

Biasanya tabung sinar-X yang menghasilkan sinar-X monokromatik (misalnya Cu K α).

2. Goniometer

Perangkat presisi yang memungkinkan rotasi sampel dan detektor pada sudut yang telah ditentukan untuk mengumpulkan data difraksi. Sampel berputar dengan sudut θ sementara detektor bergerak dengan sudut 2θ .

3. Detektor (Detector)

Mengukur intensitas sinar-X yang terdifraksi.

4. Sistem Kontrol dan Analisis Data

Komputer untuk mengontrol instrumen dan memproses data difraksi menjadi difraktogram (grafik intensitas vs. 2θ).

2.6.4 Persiapan Sampel untuk XRD

Persiapan sampel sangat penting untuk mendapatkan data XRD yang baik

- **Sampel Serbuk (Powder Samples)**

Ini adalah bentuk sampel yang paling umum untuk XRD. Material padat digiling menjadi serbuk halus ($<10\ \mu\text{m}$) untuk memastikan orientasi kristal yang acak dan mewakili seluruh volume sampel. Serbuk kemudian ditempatkan pada holder sampel datar.

- **Sampel Padat (Bulk Samples)**

Untuk sampel padat, permukaannya harus rata, halus, dan bebas dari cacat. Kadang-kadang perlu dipoles.

- **Film Tipis (Thin Films)**

Memerlukan teknik khusus untuk memastikan bahwa sinyal berasal dari film itu sendiri dan bukan dari substrat.

2.6.5 Interpretasi Difraktogram XRD

Hasil dari pengukuran XRD adalah difraktogram, yang merupakan plot intensitas sinar-X yang terdifraksi sebagai fungsi dari sudut difraksi (2θ).

- **Posisi Puncak (2θ)**

Posisi puncak pada difraktogram secara langsung berkaitan dengan jarak bidang kristal (d-spacing) melalui Hukum Bragg. Posisi ini adalah "sidik jari" untuk identifikasi fasa.

- **Intensitas Puncak**

Intensitas relatif dari setiap puncak bergantung pada jumlah atom dalam bidang kisi dan jenis atom. Ini memberikan informasi tentang kuantitas relatif dari setiap fasa dalam sampel campuran.

- **Lebar Puncak**

Lebar puncak berkaitan dengan ukuran kristalit dan adanya tegangan mikro atau cacat dalam kristal. Puncak yang lebih lebar menunjukkan ukuran kristalit yang lebih kecil atau tegangan yang lebih tinggi (sesuai persamaan Scherrer).

- **Bentuk Puncak**

Bentuk puncak dapat memberikan informasi lebih lanjut tentang homogenitas dan struktur kristal.

Identifikasi fasa dilakukan dengan membandingkan pola difraksi sampel yang tidak diketahui dengan database pola difraksi standar (misalnya, dari International Centre for Diffraction Data / ICDD).

2.6.6 Keunggulan dan Kekurangan XRD

Keunggulan:

- **Non-Destruktif**
Tidak merusak sampel, memungkinkan sampel untuk digunakan kembali atau dianalisis dengan teknik lain.
- **Informasi Struktur Kristal yang Lengkap**
Dapat memberikan informasi detail tentang fasa, parameter kisi, orientasi, ukuran kristalit, dan tegangan.
- **Identifikasi Fasa yang Akurat**
Sangat andal untuk mengidentifikasi fasa kristalin, bahkan dalam campuran yang kompleks.
- **Persiapan Sampel Relatif Mudah**
Terutama untuk sampel serbuk.
- **Analisis Kuantitatif**
Mampu menentukan proporsi relatif dari fasa-fasa kristalin dalam campuran.

Kekurangan:

- **Hanya untuk Material Kristalin**
- Tidak dapat menganalisis material amorf (tidak memiliki struktur teratur) secara langsung, meskipun dapat menentukan rasio kristalin/amorf.
- **Keterbatasan Deteksi Fasa Minor**
Sulit mendeteksi fasa yang hadir dalam jumlah sangat kecil (biasanya di bawah 1-5% tergantung fasa dan sampel).
- **Kebutuhan Sampel Halus**
Untuk analisis serbuk, sampel harus digiling sangat halus untuk menghindari bias orientasi.
- **Kebutuhan Database**
Identifikasi fasa memerlukan database pola difraksi yang komprehensif.
- **Fenomena Orientasi Preferensial**
Jika sampel memiliki orientasi kristal preferensial, ini dapat memengaruhi intensitas puncak dan mempersulit analisis kuantitatif tanpa penanganan khusus.

2.6.7 Aplikasi XRD

XRD digunakan secara luas di berbagai bidang ilmiah dan industri:

- **Ilmu Material dan Teknik:**
 - Identifikasi fasa paduan logam, keramik, polimer kristalin, dan komposit.
 - Studi transformasi fasa (misalnya pada perlakuan panas).
 - Penentuan ukuran partikel nano.
 - Analisis tegangan sisa pada komponen.
 - Karakterisasi lapisan tipis dan film (HR-XRD).
- **Geologi dan Mineralogi:**
 - Identifikasi mineral dalam batuan dan tanah.
 - Analisis tanah liat.
- **Farmasi:**
 - Identifikasi polimorf (bentuk kristal yang berbeda dari senyawa kimia yang sama) obat.
 - Studi stabilitas dan kemurnian formulasi obat.
- **Kimia:**
 - Karakterisasi senyawa anorganik dan organik baru.
 - Penentuan kemurnian bahan kimia.
- **Lingkungan:**
 - Analisis debu partikulat.
 - Identifikasi polutan kristalin.

Singkatnya, XRD adalah alat fundamental dalam penelitian dan kontrol kualitas material, memberikan wawasan tak ternilai tentang struktur atom dan komposisi fasa material.

2.6.8 Cara Menghitung Hasil Xrd

Kepadatan struktur kristal dapat ditentukan melalui difraksi sinar-X dengan membandingkan nilai jarak bidang kristal (d) dan intensitas puncak difaksi dengan data referensi.

Dengan membandingkan puncak data pada grafik dengan yang ada di database ICDD, dimungkinkan untuk menentukan puncak grafik XRD dari data yang diterima dari temuan XRD. Teknik analisis Rietveld yang diidentifikasi dalam perangkat lunak RIETAN kemudian digunakan untuk menyempurnakan data XRD. Fasa yang terkandung dalam sampel, bersama dengan strukturnya, kelompok ruang, dan parameter kisi, diketahui sebagai hasil penyempurnaan ini.

Pernyataan ini dinamakan hukum Bragg untuk difraksi kristal (Murtiono, 2012), secara matematis dapat dituliskan dalam bentuk persamaan dibawah ini:

$$d_{hkl} = a / (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

a = parameter kisi

hkl = indeks miller bidang

dhkl = jarak antar bidang

Puncak difraksi sinar-X dari pola difraktogram digunakan untuk menghitung dan menilai ukuran/diameter kristalit menggunakan metode persamaan Debye Scherrer (Purnomo et al., 2019) yaitu:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \dots\dots\dots(2)$$

Rumus untuk menentukan nilai regangan kisi:

$$\varepsilon = \frac{\beta}{(4 \tan\theta)} \dots\dots\dots(3)$$

Rumus untuk menentukan nilai kerapatan dislokasi:

$$\rho = \frac{1}{D^2} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

D = Diameter kristalit(Å)

θ = Sudut difraksi(derajat)

ρ = Kerapatan Dislokasi (garis/mm²)

λ = 1,54056 Å (Panjang gelombang dari sinar-X)

K = 0,9-1 (Faktor bentuk dari kristal)

ε = Regangan Kisi

β = Nilai dari FWHM (rad)

