

BAB VI

TRANSFORMASI FASE PADA LOGAM

Sebagian besar transformasi bahan padat tidak terjadi terus menerus sebab ada hambatan yang menghalangi jalannya reaksi dan bergantung terhadap waktu. Contoh : umumnya transformasi membentuk minimal satu fase baru yang mempunyai komposisi atau struktur kristal yang berbeda dengan bahan induk (bahan sebelum terjadinya transformasi). Pengaturan susunan atom terjadi karena proses difusi.

Secara struktur mikro, proses pertama yang terjadi pada transformasi fasa adalah *nukleasi* yaitu pembentukan partikel sangat kecil atau nuklei dari fase baru. Nuklei ini akhirnya tumbuh membesar membentuk fasa baru. Pertumbuhan fase ini akan selesai jika pertumbuhan tersebut berjalan sampai tercapai fraksi kesetimbangan.

Laju transformasi yang merupakan fungsi waktu (sering disebut kinetika transformasi) adalah hal yang penting dalam perlakuan panas bahan. Pada penelitian kinetik akan didapat kurva S yang di plot sebagai fungsi fraksi bahan yang bertransformasi vs waktu (logaritmik) .

Fraksi transformasi , y di rumuskan:

$$Y = 1 - \exp(-kt^n)$$

t = waktu

k, n = konstanta yang tidak tergantung waktu.

Persamaan ini disebut juga persamaan AVRAMI

Laju transformasi , r diambil pada waktu $\frac{1}{2}$ dari proses berakhir :

$$r = \frac{1}{t_{0,5}}$$

$t_{0,5}$ = waktu $\frac{1}{2}$ proses

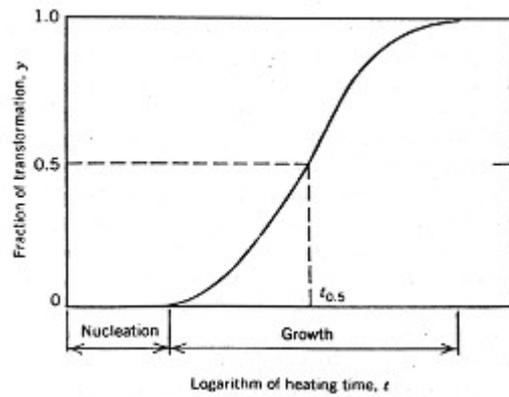


FIGURE 10.1 Plot of fraction reacted versus the logarithm of time typical of many solid-state transformations in which temperature is held constant.

Efek temperatur terhadap kinetik bisa dilihat pada gambar 10 ,2.

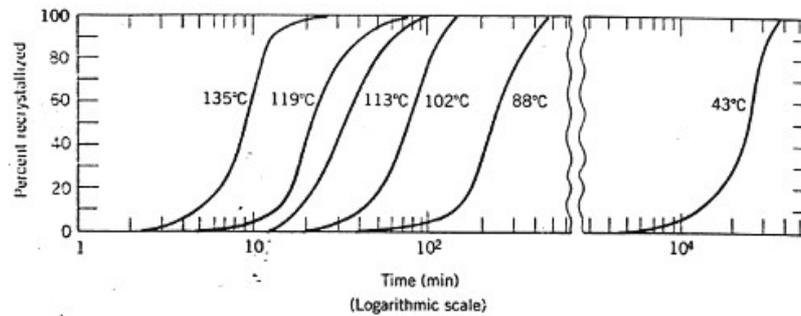


FIGURE 10.2 Percent recrystallization as a function of time and at constant temperature for pure copper. (Reprinted with permission from *Metallurgical Transactions*, Vol. 188, 1950, a publication of The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Pennsylvania. Adapted from B. F. Decker and D. Harker, "Recrystallization in Rolled Copper," *Trans. AIME*, 188, 1950, p. 888.)

Laju transformasi , r terhadap jangkauan temperatur dirumuskan :

$$r = Ae^{-Q/RT}$$

R = konstanta gas

T = temperatur mutlak

A = konstanta , tidak tergantung waktu.

Q = Energi aktivasi untuk reaksi tertentu.

TRANFORMASI MULTI FASA

Transformasi fasa bisa dilakukan dengan memvariasikan temperatur , komposisi dan tekanan. Perubahan panas yang terjadi bisa dilihat pada diagram fasa. Namun

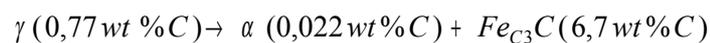
kecepatan perubahan temperatur berpengaruh terhadap perkembangan pembentukan struktur mikro. Hal ini tidak bisa diamati pada diagram fasa komposisi vs temperatur.

Posisi ketimbangan yang dicapai pada proses pemanasan atau pendinginan sesuai dengan diagram fasa bisa dicapai dengan laju yang sangat pelan sekali, sehingga hal ini tidak praktis. Cara lain yang dipakai adalah *supercooling* yaitu transformasi pada proses pendinginan dilakukan pada temperatur yang lebih rendah, atau *superheating* yaitu transformasi pada proses pemanasan dilakukan pada temperatur yang lebih tinggi.

PERUBAHAN SIFAT DAN STRUKTUR MIKRO PADA PADUAN BESI – KARBON

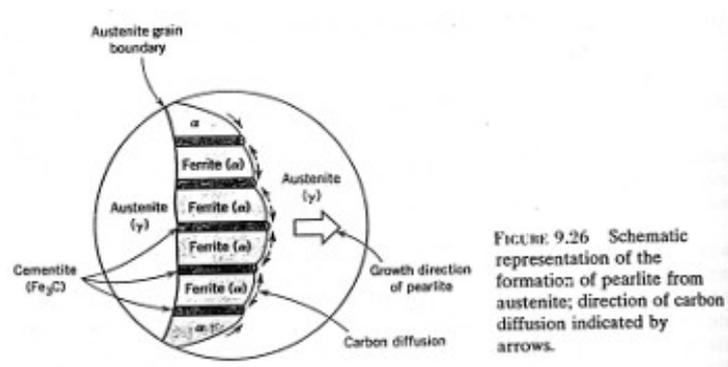
DIAGRAM TRANSFORMASI ISOTHERMAL

* PEARLITE *



Pada reaksi eutektoid, austenite dengan kandungan karbon sedang akan berubah menjadi ferit dengan kadar karbon kecil dan sementit dengan kadar karbon tinggi. Pada saat pembentukan pearlite, gerakan atom C bergerak dari ferit ke sementit (gb.9.26).

Pengaruh temperatur terhadap waktu pembentukan pearlite dilukiskan pada grafik 10.3.



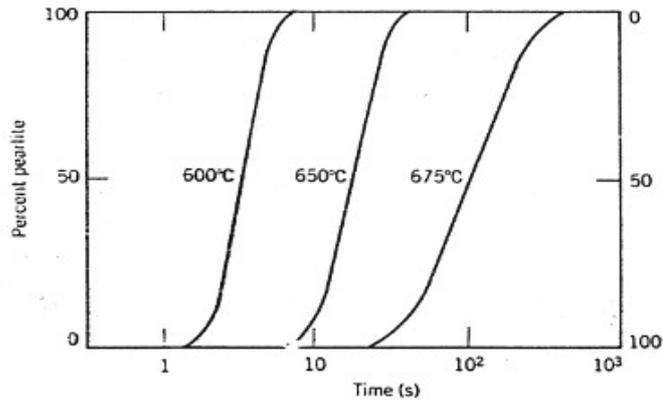


FIGURE 10.3 For an iron-carbon alloy of eutectoid composition (0.76 wt% C), isothermal fraction reacted versus the logarithm of time for the austenite-to-pearlite transformation.

Cara yang lebih menyenangkan dilukiskan pada gambar 10.4 dengan sumbu vertikal adalah temperatur dan sumbu horizontal adalah waktu. 2 kurva masing-masing adalah kurva awal yaitu mulai terjadinya transformasi dan kurva akhir yaitu berakhirnya transformasi. Dari transformasi tersebut, temperatur eutectoid adalah garis horizontal pada temperatur 727 °C. Transformasi terjadi dibawah garis eutectoid atau supercooling. Transformasi terjadi pada temperatur tetap atau isothermal. Kurva 10.4 disebut juga kurva TTT (time temperature transformation).

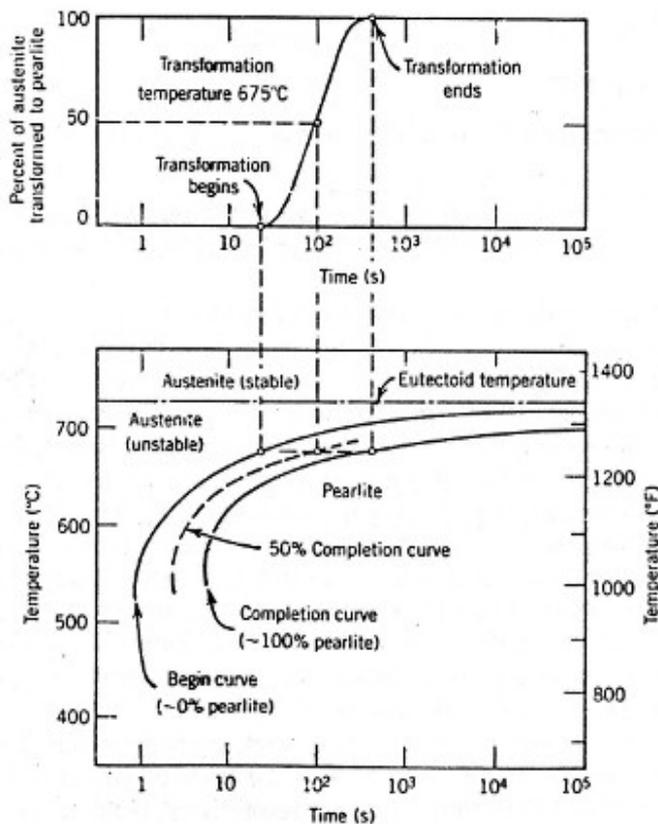
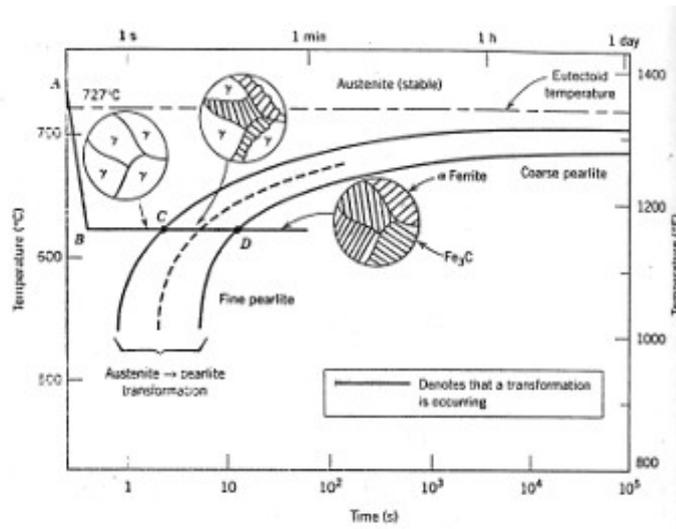


FIGURE 10.4 Demonstration of how an isothermal transformation diagram (bottom) is generated from percent transformation-versus-logarithm of time measurements (top). (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 369.)

Gb. 10.5 memperlihatkan transformasi fasa austenit ke pearlit. Austenit didinginkan secara cepat dari A ke B, kemudian temperatur ditahan pada proses BCD .

Jika temperatur ditahan pada sedikit dibawah temperatur eutectoid maka akan terbentuk lapisan ferit sementit yang tebal dan disebut juga “ coarse pearlite” (pearlite kasar), kebalikannya jika temperatur transformasinya lebih rendah disekitar 540 °C maka lapisan-lapisan perlite yang terbentuk akan tipis dan disebut juga “fine pearlite” (pearlite halus).

FIGURE 10.5
Isothermal transformation diagram for a eutectoid iron-carbon alloy, with superimposed isothermal heat treatment curve (ABCD). Microstructures before, during, and after the austenite-to-pearlite transformation are shown. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 28.)



Jika pada reaksi eutectoid terbentuk fasa proeutectoid bersama-sama pearlite maka pada kurva TTT perlu ditambahkan kurva lain yang menggambarkan transformasi proeutectoid. Untuk besi dengan kandungan 1,13 wt % C grafik TTT diberikan pada gb. 10.7.

BAINITE

Bainite adalah struktur ferit dan sementit yang berbentuk lidi atau plat tergantung temperatur transformasi. Struktur mikro bainit adalah sangat halus sehingga resolusinya hanya bisa dilihat dengan mikroskop elektron . Foto mikroskop untuk bainit bisa dilihat pada gambar 10.8.

Temperatur pembentukan bainit terjadi dibawah temperatur pembentukan pearlite yaitu diantara temperatur 215 °C-540 °C. Kurva TTT untuk bainit bisa dilihat pada gb. 10.9. Laju pembentukan bainit akan naik dengan naiknya temperatur.

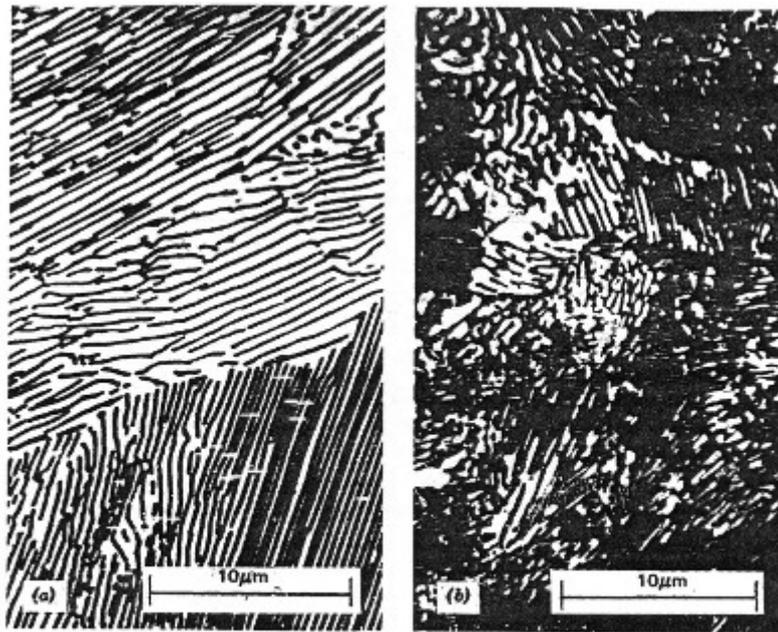


FIGURE 10.6 Photomicrographs of (a) coarse pearlite and (b) fine pearlite. 3000 \times . (From K. M. Ralls, et al., *An Introduction to Materials Science and Engineering*, p. 361. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

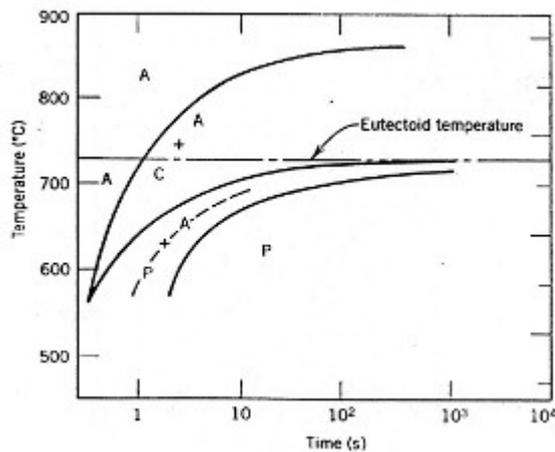


FIGURE 10.7 Isothermal transformation diagram for a 1.13 wt% C iron-carbon alloy: A, austenite; C, proeutectoid cementite; P, pearlite. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 33.)

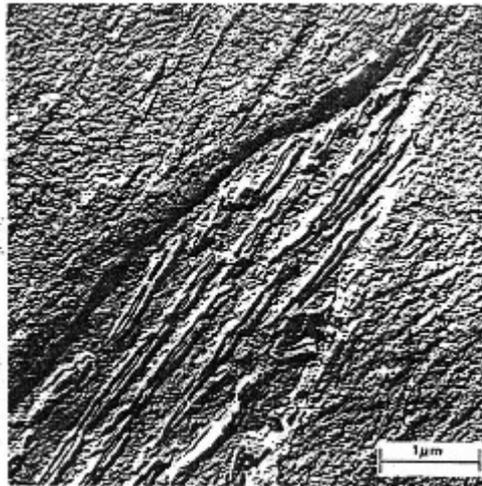


FIGURE 10.8 Replica transmission electron micrograph showing the structure of bainite. A needle of bainite passes from lower left to upper right-hand corners, which consists of elongated particles of Fe_3C within a ferrite matrix. The phase surrounding the bainite needle is martensite. (Reproduced with permission from *Metals Handbook*, Vol. 8, 8th edition, *Metallurgy, Structures and Phase Diagrams*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1973.)

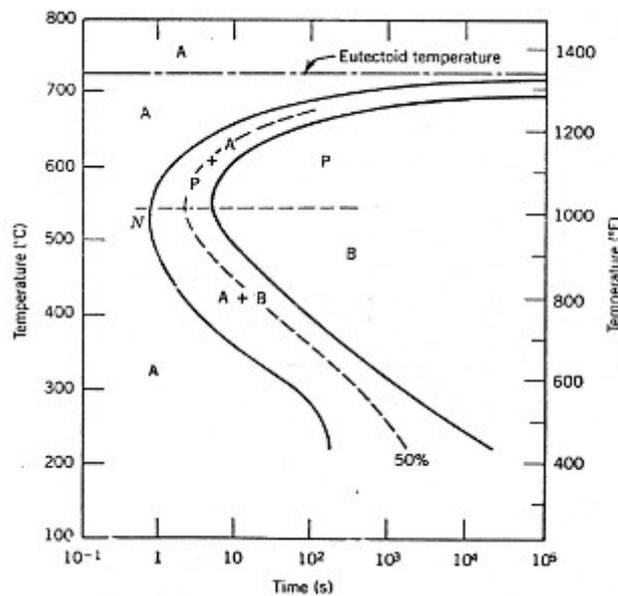


FIGURE 10.9 Isothermal transformation diagram for an iron-carbon alloy of eutectoid composition, including austenite-to-pearlite (A-P) and austenite-to-bainite (A-B) transformations. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 28.)

SPHEROIDITE

Jika paduan baja mempunyai struktur mikro pearlit atau bainit dipanaskan pada temperatur dibawah temperatur eutektoid dan ditahan untuk waktu yang lama katakanlah $t=700\text{ }^{\circ}C$ selama 18 s/d 24 jam, maka akan terbentuk struktur mikro yang lain dan disebut **spheroidite**.

Struktur spheroidite mempunyai bentuk dimana fasa Fe_3C muncul dalam bentuk lingkaran / bulat pada bahan ferit. Transformasi ini terjadi karena difusi atom karbon

tanpa perubahan komposisi ferit dan sementit. Foto mikrograph bisa dilihat pada gb. 10.10.

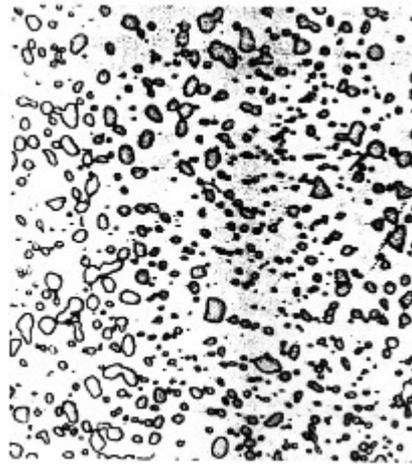


FIGURE 10.10 Photomicrograph of a steel having a spheroidite microstructure. The small particles are cementite; the continuous phase is α ferrite. 1000 \times . (Copyright 1971 by United States Steel Corporation.)

MARTENSITE

Fasa yang lain dari yang sudah disebutkan diatas adalah fasa martensit. Martensit terbentuk apabila besi austenit didinginkan dengan sangat cepat ke temperatur rendah, sekitar temperatur ambien. Martensit adalah fasa tunggal yang tidak seimbang yang terjadi karena transformasi tanpa difusi dari austenit. Pada transformasi membentuk martensite, hanya terjadi sedikit perubahan posisi atom relatif terhadap yang lainnya.

Struktur FCC austenit akan berubah menjadi struktur BCT (body centered tetragonal) martensit (gb 10.11), pada transformasi ini. Karena transformasi martensit tidak melewati proses difusi, maka ia terjadi seketika sehingga laju transformasi martensit adalah tidak bergantung waktu. Butir martensit berbentuk seperti lidi/jarum atau plat (gb,10.12). Pada struktur martensit masih didapati struktur austenit yang tidak sempat bertransformasi.

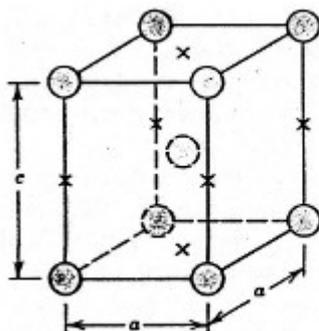


FIGURE 10.11 The body-centered tetragonal unit cell for martensitic steel showing iron atoms (circles) and sites that may be occupied by carbon atoms (crosses). For this tetragonal unit cell, $c > a$.



FIGURE 10.12 Photomicrograph showing the martensitic microstructure. The needle-shaped grains are the martensite phase, and the white regions are austenite that failed to transform during the rapid quench. 1220X. (Photomicrograph courtesy of United States Steel Corporation.)

Garis pembentukan martensite dapat dilihat pada diagram TTT pada gb.10.13

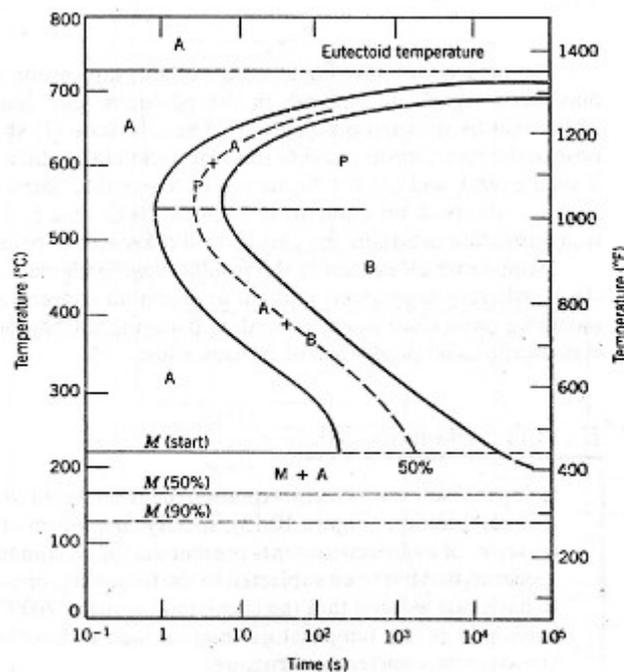


FIGURE 10.13 The complete isothermal transformation diagram for an iron-carbon alloy of eutectoid composition: A, austenite; B, bainite; M, martensite; P, pearlite.

Contoh soal

Dengan menggunakan diagram transformasi untuk paduan besi-karbon komposisi eutektik (gambar 10.13), tentukanlah kondisi alami struktur mikro akhir (dalam kondisi mikro yang ada dan persentase perkiraan) dari spesimen yang mengalami perlakuan berikut: Dalam setiap kasus diasumsikan bahwa perlakuan spesimen dimulai pada temperatur 760°C dan ditahan cukup lama pada temperatur ini untuk mendapatkan struktur austenit yang homogen dan sempurna.

- a. Dengan cepat didinginkan hingga 350°C , ditahan 10^4 detik, dan didinginkan dengan cepat ke temperatur ruang.
- b. Dengan cepat didinginkan hingga 250°C , ditahan 100 detik, dan didinginkan dengan cepat ke temperatur ruang.
- c. Dengan cepat didinginkan hingga 650°C , ditahan 20 detik, didinginkan dengan cepat ke temperatur 400°C , ditahan 10^3 detik, dan didinginkan dengan cepat ke temperatur ruang.

Jawab

Jalur waktu-temperatur untuk masing-masing kasus ditunjukkan oleh gambar 10.15. Pada setiap kasus, pendinginan awal cukup cepat untuk mencegah transformasi terjadi.

- a. Pada 350°C austenit secara isothermal akan bertransformasi ke bainit; reaksi ini dimulai setelah kira-kira 10 detik dan berlangsung sampai waktu 500 detik. Karena itu setelah 10^4 detik 100% spesimen adalah bainit dan tidak terjadi transformasi yang lain, walaupun pendinginan akhir melewati daerah martensit pada diagram.
- b. Dalam hal ini, perlu waktu 150 detik pada 250°C untuk mulai bertransformasi menjadi bainit. Sehingga untuk waktu 100 detik spesimen masih dalam keadaan 100% austenit. Ketika spesimen didinginkan melewati daerah martensite, dimulai pada 215°C , secara progresif austenite berubah menjadi martensite. Reaksi ini selesai ketika temperatur ruang tercapai. Sehingga struktur mikro akhirnya adalah 100% martensite.
- c. Untuk garis isothermal pada 650°C , pearlite mulai terbentuk setelah kira-kira 7 detik; ketika waktu penahanan sampai 20 detik, baru kira-kira 50% dari spesimen yang berubah menjadi pearlite. Pendinginan cepat ke 400°C ditunjukkan oleh garis vertikal; selama pendinginan ini, sangat sedikit, jika ada, austenite sisa akan bertransformasi baik ke pearlite atau bainit, walaupun garis pendinginan melewati daerah pearlite dan bainit pada diagram. Pada 400°C , kita mulai waktunya dari nol kembali, sehingga dengan waktu 10^3 detik, semua 50% austenite tersisa akan berubah menjadi bainit. Pada pendinginan secara cepat ke temperatur ruang, tidak lagi terjadi perubahan fasa karena tidak ada lagi austenit tersisa. Sehingga struktur mikro spesimen pada temperatur ruang adalah 50% pearlite dan 50% bainit.

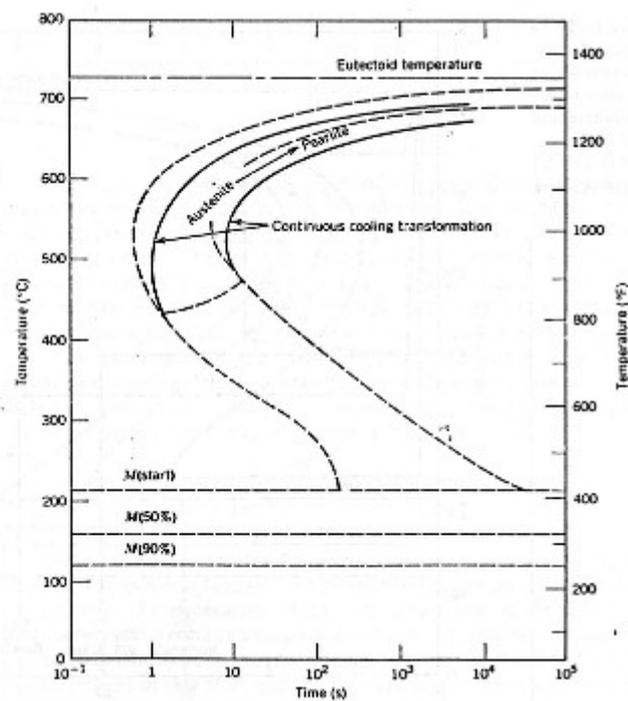
Gb 10.15

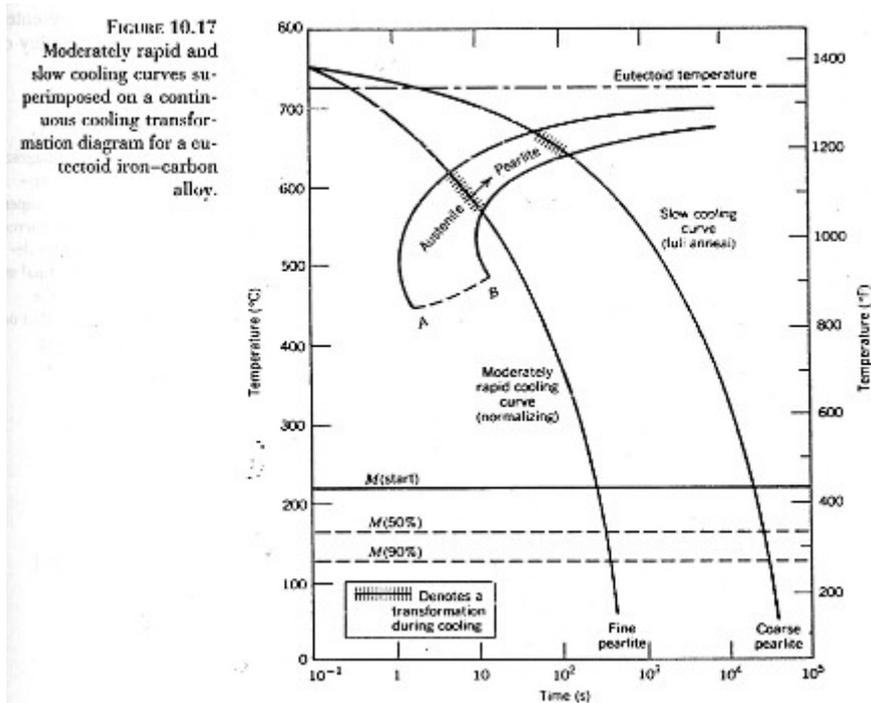
DIAGRAM CONTINUOUS COOLING TRANSFORMATION (CTT) (TRANSFORMASI PENDINGINAN KONTINYU)

Perlakuan panas isothermal pengerjaannya tidak praktis karena temperatur mesti dijaga. Disekitar temperatur eutektoid. Sebagian besar perlakuan panas untuk baja mencakup pendinginan secara kontinyu bahan sampai temperatur ruangan oleh sebab diagram TTT harus disesuaikan untuk pendinginan kontinyu tersebut.

Diagram yang dipakai disebut diagram transformasi pendinginan continyu (diagram CTT), bisa dilihat pada gambar 10.16 untuk bahan besi karbon.

FIGURE 10.16
Superimposition of isothermal and continuous cooling transformation diagrams for a eutectoid iron-carbon alloy. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 376.)





Pada gambar 10.17 diperlihatkan kurva pendinginan cepat dan lambat yang masing-masingnya menghasilkan pearlite halus dan pearlit kasar.

Pada diagram CTT tidak terbentuk bainit karena austenit akan membentuk pearlit pada saat seharusnya terbentuk bainit. Pada pendinginan melewati A-B (gbr 10.17). Austenit yang belum membentuk pearlit akan menjadi martensit ketika melewati garis M (start).

Untuk pendingin kontinu baja panduan dikenal “laju quenching kritis” yaitu laju minimum quenching (pencelupan) yang akan menghasilkan struktur martensit total (gbr 10.18) (laju quenching kritis = laju pendinginan kritis).

SIFAT MEKANIK BESI KARBON

- **PEARLITE**

Sementit bersifat lebih keras dan lebih rapuh dari perlit karena itu dengan menaikkan fraksi Fe_3C pada baja sementara elemen lain konstan maka material akan lebih keras dan lebih kuat, grafik sifat mekanik pearlit bisa dilihat pada gambar 10.20.

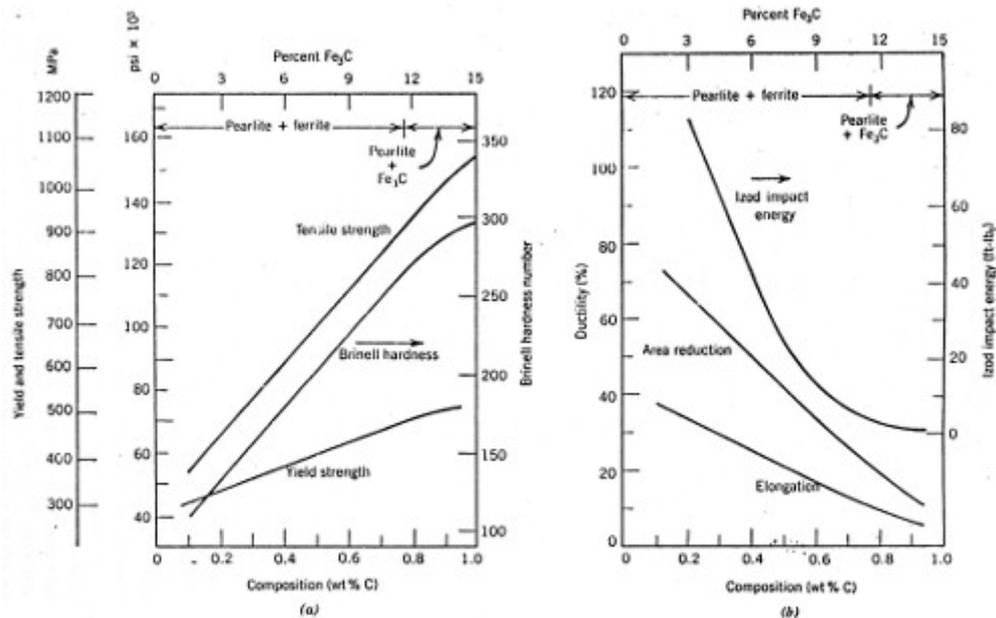


FIGURE 10.20 (a) Yield strength, tensile strength, and Brinell hardness versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. (b) Ductility (%EL and %AR) and Izod impact energy versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. (Data taken from *Metals Handbook: Heat Treating*, Vol. 4, 9th edition, V. Masseria, Managing Editor, American Society for Metals, 1981, p. 9.)

Ketebalan lapisan pearlit sementit juga mempengaruhi sifat mekanik sifat bahan. Pearlit halus lebih keras dan kuat dibandingkan dengan pearlit kasar. Hal ini diperlihatkan secara grafik pada gambar 10.21

Alasan kenapa pearlit mempunyai sifat ini dikarenakan fase sementit lebih kuat dan kaku dibandingkan ferit yang lebih lunak sehingga bisa menahan deformasi dan dengan kata lain sementit sebagai penguat ferit.

Pearlite halus akan lebih kuat di bandingkan dengan pearlit kasar karena butiran pearlit halus lebih banyak sehingga luas batas fase perunit volume akan lebih kasar sehingga mempunyai kemampuan yang lebih besar menahan gerakan dislokasi.

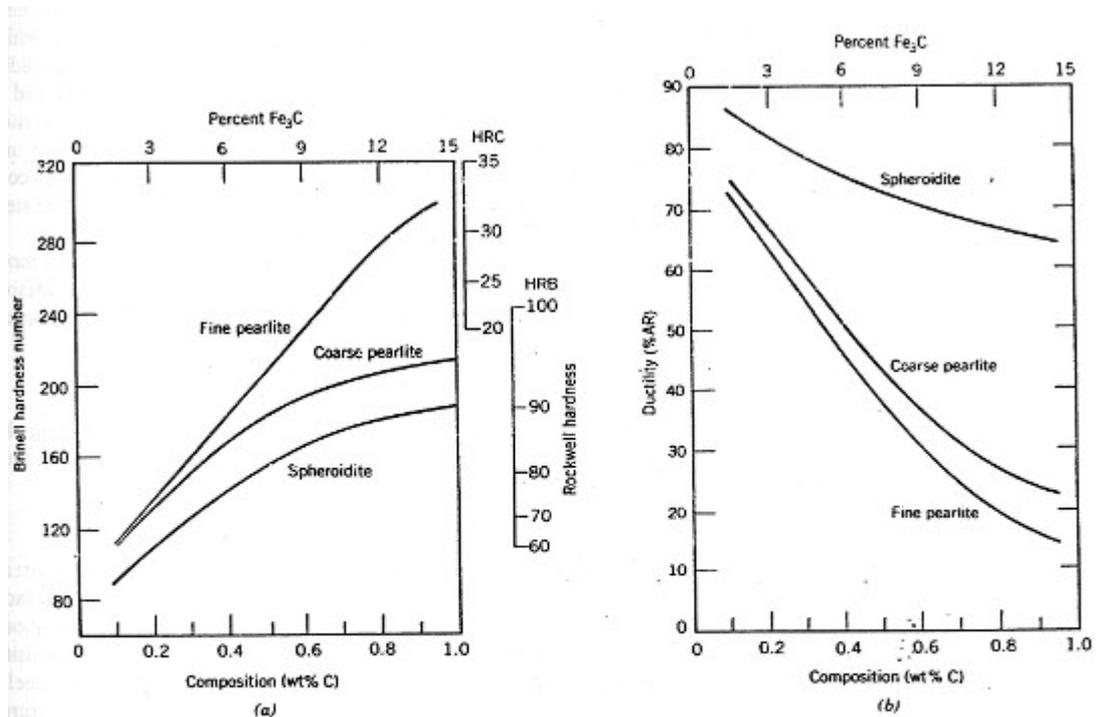


FIGURE 10.21 (a) Brinell and Rockwell hardness as a function of carbon concentration for plain carbon steels having fine and coarse pearlite as well as spheroidite microstructures. (b) Ductility (%AR) as a function of carbon concentration for plain carbon steels having fine and coarse pearlite as well as spheroidite microstructures. (Data taken from *Metals Handbook: Heat Treating*, Vol. 4, 9th edition, V. Masseria, Managing Editor, American Society for Metals, 1981, pp. 9 and 17.)

- **SPHEROITIDE**

Spheroidite mempunyai kekuatan dan kekerasan dibawah pearlit. Fenomena ini bisa diterangkan dengan metode penguatan oleh sementit dan hambatan gerakan dislokasi.

Luas permukaan batas butir spherodit pesatuan volume lebih sedikit dari pearlit sehingga kekuatannya dan kekerasannya lebih rendah.

- **BAINITE**

Karena baja banite mempunyai struktur kristal yang lebih halus maka banite lebih kuat dan keras dari pearlit.

- **MARTENSITE**

Dari bagian bentuk struktur mikro panduan baja, martensit adalah yang paling kuat dan keras namun paling rapuh. Kekerasannya tergantung kandungan karbon. Pengaruh kandungan karbon terhadap kekerasan martensit bisa dilihat pada gbr 10.22. Kekuatan dan kekerasan martensite tidak dikaitkan dengan struktur mikro tetapi lebih dikaitkan dengan efektifitas atom karbon yang larut dalam bentuk interstisi yang akan

menghalangi gerakan dislokasi dan juga karena sistem slip yang lebih sedikit untuk kristal BTC.

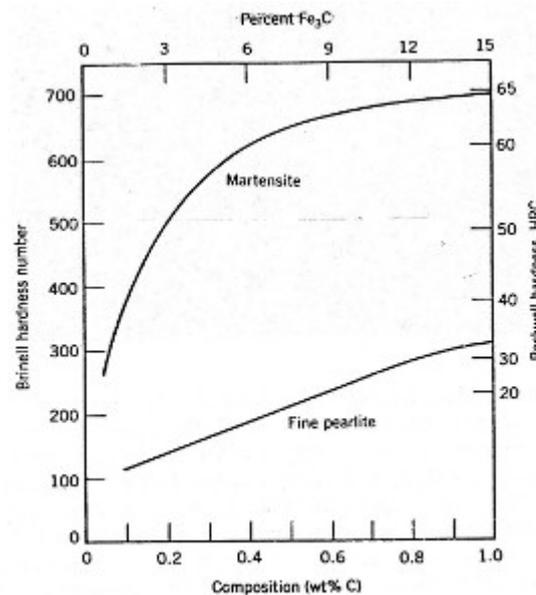


FIGURE 10.22 Hardness as a function of carbon concentration for plain carbon martensitic and fine pearlitic steels. (Adapted from Dr. Edgar C. Bain, *Functions of the Alloying Elements in Steel*, American Society for Metals, 1939, p. 36.)

- **TEMPERED MAERTENSITE**

Martensit adalah keras sehingga tidak bisa dipakai sebagian besar aplikasi. Disamping itu tegangan internal karena proses quenching juga memberikan efek perlemahan. Ketangguhan dan keuletan martensit bisa ditingkatkan dan tegangan internal bisa dibuang dengan cara perlakuan panas yang disebut tempering.

Tempering dilakukan dengan memanaskan baja martensit sampai temperatur dibawah eutectoid pada periode waktu tertentu. Biasanya tempering dilakukan pada temperatur antara 250-650 °C. Tegangan internal akan hilang pada suhu $\pm 200^{\circ}\text{C}$.

Proses tempering akan membentuk “tempered maetensite”.

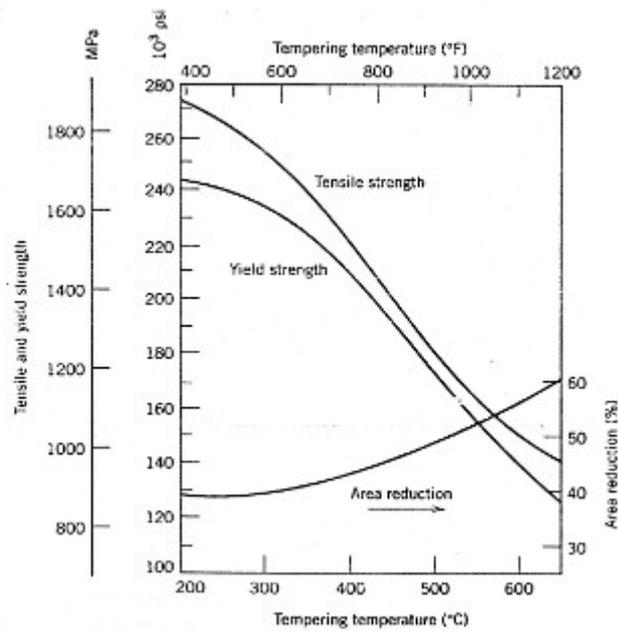


Foto struktur mikro tempered martensite sama dengan spheroidit hanya partikel sementit lebih banyak dan lebih kecil. Tempered martensit mempunyai sifat sekeras dan sekuat matensit namun ketangguhan dan keuletan lebih baik. Hubungan antara tegangan tarik, kekuatan luluh dan keuletan terhadap temperatur temper pada baja paduan bisa dilihat pada gbr 10.24.



FIGURE 10.23 Electron micrograph of tempered martensite. Tempering was carried out at 594°C (1100°F). The small particles are the cementite phase; the matrix phase is α ferrite. 9300 \times . (Copyright 1971 by United States Steel Corporation.)

FIGURE 10.24 Tensile and yield strengths and ductility (%AR) versus tempering temperature for an oil-quenched alloy steel (type 4340). (Adapted from figure furnished courtesy Republic Steel Corporation.)



- **PERAPUHAN TEMPER**

Pada proses tempering beberapa baja bisa mengalami penurunan ketangguhan, hal ini disebut perapuhan temper. Fenomena ini terjadi bila baja ditemper pada suhu diatas 575 °C dan diikuti pendinginan lambat sampai temperatur ruangan, atau jika tempering dilakukan pada suhu antara 375 – 575 °C.

Perapuhan ini disebabkan oleh kandungan elemen lain dalam jumlah yang cukup signifikan seperti mangan, nikel, crom dan fospor, arsen, timah putih. Perapuhan temper bisa dicegah dengan :

1. Pengontrolan komposisi
2. Tempering diatas 575°C atau dibawah 375°C diikuti dengan quenching pada temperatur ruang.

Ketangguhan baja yang telah mengalami perapuhan bisa diperbaiki dengan pemanasan samapai kira-kira 600°C, dan kemudian secara cepat didinginkan sampai temperatur dibawah 300°C.

Soal-soal

1. Sebutkan dua tingkat pembentukan partikel ke fase baru. Jelaskan masing-masingnya.
2. Untuk beberapa transformasi yang mengikuti persamaan Avrami, parameter n mempunyai harga 1,5. Jika setelah 125 s reaksi terbentuk 25%, berapa lama waktu total yang diperlukan sampai reaksi terbentuk 90%.
3. Hitunglah laju beberapa reaksi yang mengikuti kinetik Avrami, asumsikan konstanta n dan k masing-masing adalah 3,0 dan 7×10^{-3} untuk waktu dalam detik.
4. Di bawah ini adalah data fraksi rekristalisasi dan waktu untuk proses rekristalisasi pada 600°C dari baja terdeformasi. Diasumsikan proses mengikuti persamaan Avrami, carilah fraksi rekristalisasi setelah waktu total 22,8 menit.

Fraksi Rekristalisasi	Waktu (min)
0,20	13,1
0,70	29,1

5. Misalkan baja dengan komposisi eutektoid didinginkan ke temperatur 675°C dari 760°C kurang dari 0,5 s dan ditahan pada temperatur ini.
 - a. Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk reaksi austenite ke pearlite untuk 50% pembentukan, dan 100% pembentukan?
 - b. Perkirakanlah kekerasan paduan yang telah bertransformasi ke pearlite.
6. Secara singkat jelaskanlah perbedaan antara pearlit, bainit, dan spheroidite terhadap struktur mikro dan sifat mekaniknya.
7. Buatlah kopi dari gambar 10.13, dan kemudian buatlah sketsa dan label pada diagram ini untuk menghasilkan struktur mikro berikut:
 - a. 100% pearlite kasar.
 - b. 100% tempered martensite
 - c. 50% pearlite kasar, 25% bainit, dan 25% martensit.
8. Terangkanlah dengan ringkas prosedur perlakuan panas yang paling sederhana yang digunakan untuk merubah baja 0,76 wt%C dari satu struktur ke struktur lainnya, sebagai berikut:
 - a. Spheroidite ke tempered martensite
 - b. Tempered martensite ke pearlite.
 - c. Bainit ke martensite.
 - d. Martensite ke pearlite
 - e. Pearlite ke tempered martensite
 - f. Tempered martensite ke pearlite.
 - g. Bainit ke tempered martensite.