

## TRANSFORMASI FASA SISTEM FE-C

- TRANSFORMASI PEARLITE
- STRUKTUR BAINITE
- SPHERODITE
- TRANSFORMASI MARTENSITIK
- KURVA TTT
- KURVA CCT

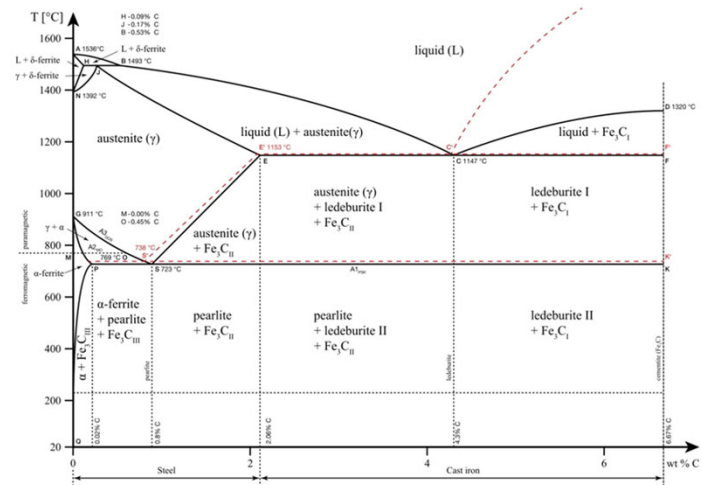
disampaikan oleh:  
Akhmad A. Korda



Department of Metallurgical Engineering  
Faculty of Mining and Petroleum Engineering  
Bandung Institute of Technology

1

## Diagram Fasa Kesetimbangan Sistem Fe-C



Akhmad A. Korda – Institut Teknologi Bandung

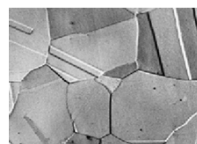


2

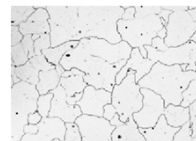
## Diagram Fasa Kesetimbangan Sistem Fe-C

Fasa padatan dan struktur mikro pada diagram fasa kesetimbangan Fe-Fe<sub>3</sub>C

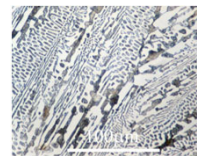
1. Ferrite ( $\alpha$ -Fe)
2. Austenite ( $\gamma$ -Fe)
3. Cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
4. Delta ferrite ( $\delta$ -Fe)
5. Pearlite (ferrite & cementite)



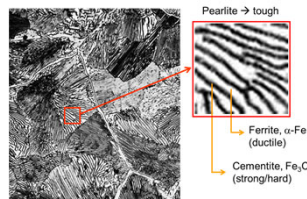
Austenite



Ferrite



Ledeburite



Pearlite

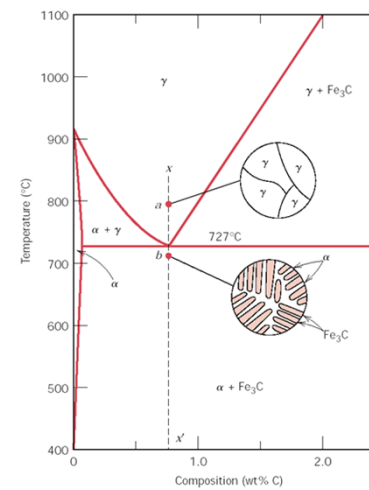
Pearlite  $\rightarrow$  tough  
Ferrite,  $\alpha$ -Fe (ductile)  
Cementite,  $\text{Fe}_3\text{C}$  (strong/hard)

Akhmad A. Korda – Institut Teknologi Bandung



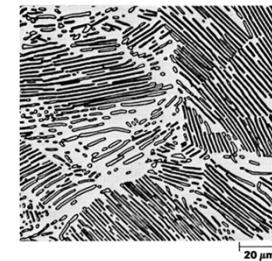
3

## Diagram Fasa Kesetimbangan Sistem Fe-C



Pendinginan equilibrium (lambat) dari area  $\gamma$  pada komposisi eutectoid (0,76 wt% C) menghasilkan struktur pearlite sbb:

$\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  (pearlite)

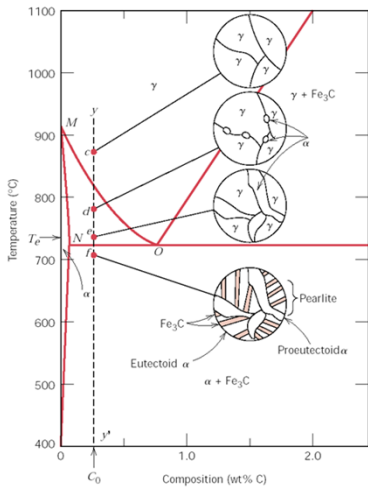


Akhmad A. Korda – Institut Teknologi Bandung

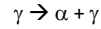


4

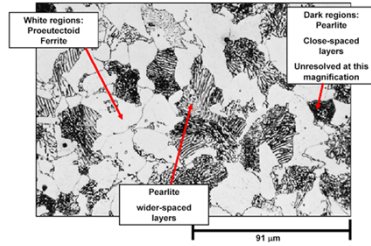
## Diagram Fasa Kesetimbangan Sistem Fe-C



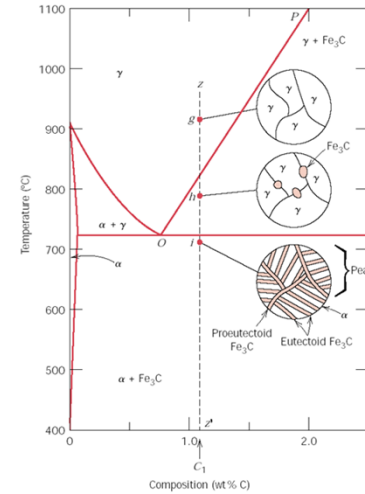
Transformasi pada komposisi hypo-eutectoid (wt% C < 0,76) :



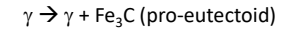
Dibawah 727°,  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$



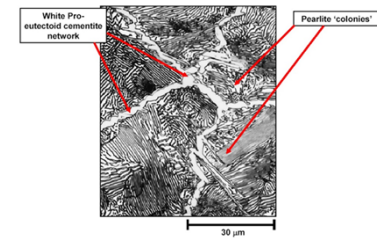
## Diagram Fasa Kesetimbangan Sistem Fe-C



Transformasi pada komposisi hyper-eutectoid (0,76 < wt% C < 2,1):

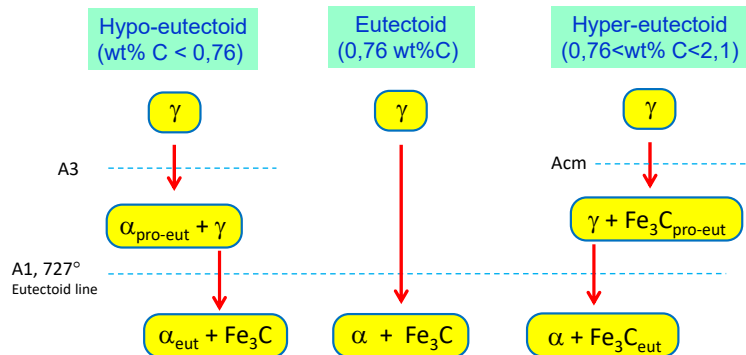


Dibawah 727°,  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  (eutectoid)



## Diagram Fasa Kesetimbangan Sistem Fe-C

Transformasi pada diagram fasa kesetimbangan Fe-Fe<sub>3</sub>C



## Transformasi Fasa

Transformasi fasa (perubahan struktur mikro) dapat dibagi menjadi:

1. Transformasi fasa melalui **difusi** (i.e. pergerakan atom jarak jauh) dengan **tidak adanya** perubahan komposisi /jumlah fasa yang ada (contoh pelelehan, pembekuan logam murni, transformasi alotropik, rekristalisasi dll)
2. Transformasi fasa melalui **difusi** dengan **adanya** perubahan komposisi/ jumlah fasa yang ada (contoh transformasi eutektoid)
3. Transformasi fasa **tanpa difusi (diffusionless or displacive transformation)**, menghasilkan fasa metastable melalui perpindahan semua atom pada struktur melalui kerja sama berupa gerakan homogen yang menghasilkan perubahan struktur. Contohnya adalah transformasi martensitik

## Kinetika Transformasi Fasa

Kebanyakan transformasi fasa melibatkan **perubahan komposisi** yaitu dimana diperlukan adanya redistribusi atom-atom melalui difusi. Proses transformasi fasa tersebut meliputi:

- 1. Nucleation (pengintian) dari fasa baru** → pembentukan partikel kecil (nuclei) yang stabil dari fasa baru tersebut. Nuclei (inti) umumnya terbentuk pada batas-batas butiran dan cacat-cacat (defects) lainnya.
- 2. Growth (pertumbuhan) dari fasa baru** dengan mengkonsumsi fasa asli

Persamaan laju nucleation dan growth dinyatakan melalui pers. Avrami:

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

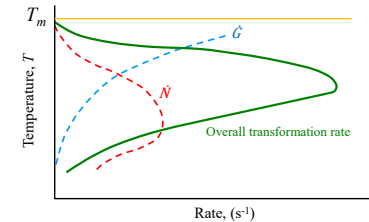
dimana  
 $y$  = fraksi yang bertransformasi  
 $t$  = waktu  
 $k, n$  = tetapan

Pers Avrami ini baik digunakan untuk menggambarkan kinetika transformasi dari transformasi fasa padat-padat.

## Kinetika Transformasi Fasa

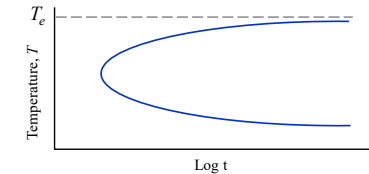
### Transformation Rate

- o Laju transformasi = laju nukleasi x laju pertumbuhan =  $N \times G$
- o Pertama, laju transformasi meningkat, mencapai nilai maksimum dan kemudian mulai menurun dengan menurunnya temperatur

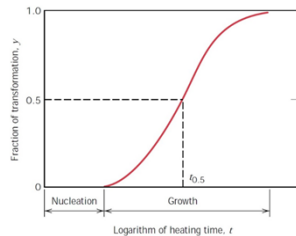


### Time for Transformation

- o Waktu yang diperlukan untuk transformasi sebagai fungsi suhu mengikuti tren terbalik dari laju transformasi.
- o Waktu yang diperlukan untuk transformasi pertama berkurang, mencapai minimum dan kemudian mulai meningkat dengan penurunan suhu.



## Kinetika Transformasi Fasa



Kurva S, fraksi yang bertransformasi (padat) vs log waktu transformasi pada **temperatur konstan**

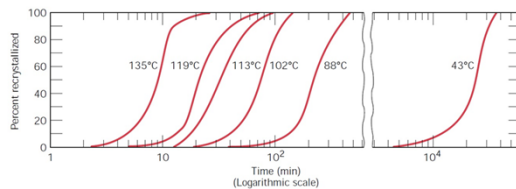
Laju transformasi  $r$

$$r = \frac{1}{t_{0.5}}$$

Laju transformasi meningkat menurut temperatur :

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

dimana:  
 $R$  = the gas constant  
 $T$  = absolute temperature  
 $A$  = a temperature-independent constant  
 $Q$  = an activation energy for the particular reaction



Laju rekristalisasi dari Cu murni pada temperatur yang berbeda

## Diagram Fasa Kesetimbangan vs Diagram TTT

- Meskipun diagram equilibrium Fe-C sangat berguna, namun **tidak memberikan informasi** tentang **transformasi austenit** ke struktur apa pun **selain struktur kesetimbangan**, dan juga **tidak memberikan informasi pengaruh laju pendinginan** pada pembentukan struktur yang berbeda.
- Dengan kata lain, diagram Fe-C **tidak menjelaskan** dekomposisi austenit dalam **kondisi non-kesetimbangan** yang melibatkan laju pendinginan yg **lebih cepat** daripada pendinginan kesetimbangan.
- Beberapa struktur (mis. martensit) yang tidak muncul pada diagram kesetimbangan dapat ditemukan dalam struktur mikro dalam baja.
- Maka dibuatlah diagram transformasi isothermal (diagram TTT) yg menjelaskan kondisi transformasi non-kesetimbangan

## Diagram Fasa Kesetimbangan vs Diagram TTT

### DIAGRAM FASA

- Menggambarkan perkembangan struktur mikro secara equilibrium
- Laju pendinginan atau pemanasan sangat lambat
- Tidak tersedia informasi waktu yang diperlukan untuk membentuk fasa

### DIAGRAM TTT

- Dapat memprediksi struktur yang terbentuk untuk beragam laju pendinginan.
- Secara grafis menggambarkan laju pendinginan untuk transformasi austenite menjadi pearlite, bainite, atau martensite
- Memberikan informasi temperatur dimana transformasi tersebut terjadi

Terdapat dua jenis diagram transformasi yang dapat membantu dalam memilih baja dan rute pemrosesan yang optimal untuk mencapai sifat-sifat yang diinginkan, yaitu: **Diagram Time-Temperature Transformation (TTT)** dan **Continuous Cooling Transformation (CCT)**.

## Diagram TTT vs Diagram CCT

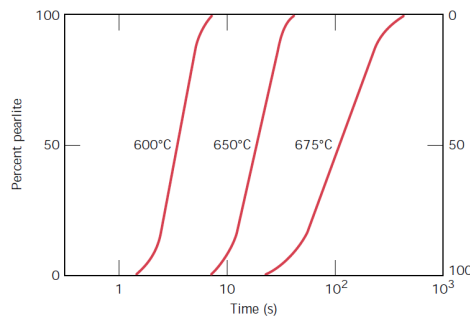
### DIAGRAM TTT

- Menunjukkan transformasi pada temp konstan
- Sampel diaustenisasi lalu didinginkan dg cepat ke suhu yg lebih rendah dan ditahan pada suhu itu sementara jumlah transformasi diukur (mis dg dilatometri)
- Memerlukan banyak percobaan untuk membuat diagram TTT yg lengkap

### DIAGRAM CCT

- Menunjukkan laju transformasi sbg fungsi waktu untuk temp yang terus menurun
- Sampel diaustenisasi lalu didinginkan pada laju yang telah ditentukan dan tingkat transformasi diukur (mis dg dilatometri)
- Memerlukan juga banyak percobaan untuk membuat diagram CCT yg lengkap

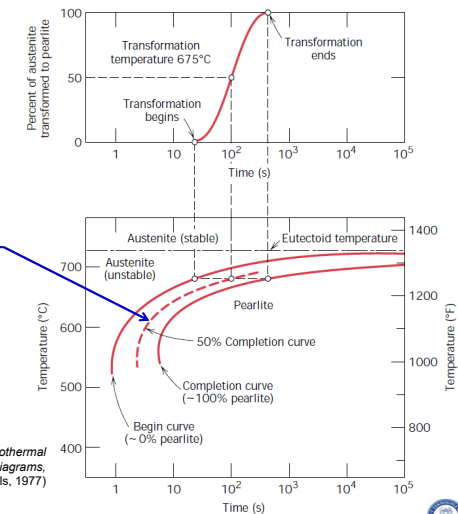
## Diagram TTT: Transformasi Pearlite



Kurva S bergeser ke waktu yang lebih lama pada T yang lebih tinggi, dimana menunjukkan transformasi didominasi oleh nukleasi (laju nukleasi meningkat dengan pendinginan) dan bukan oleh difusi (yang terjadi lebih cepat pada T yang lebih tinggi).

## Diagram TTT: Transformasi Pearlite

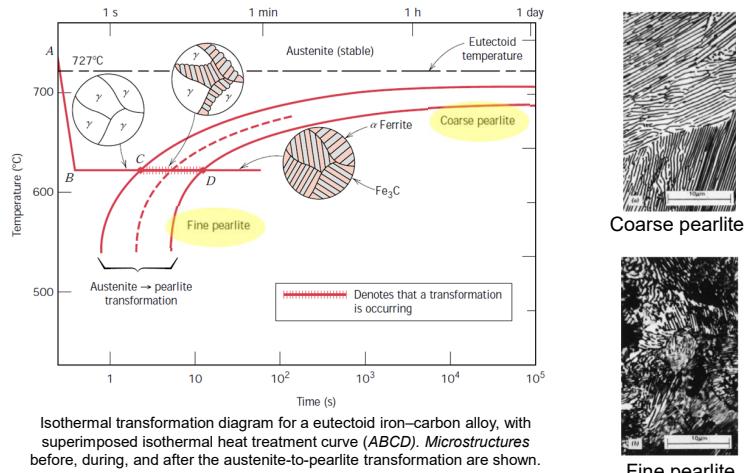
Kompilasi dari transformasi isothermal pearlite pada temperatur yang berbeda menghasilkan **Diagram TTT**



Garis putus-putus ditengah menunjukkan transformasi telah berlangsung setengahnya (50%) dari austenite menuju pearlite (50% austenite dan 50% pearlite)

(Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977)

## Diagram TTT: Transformasi Pearlite

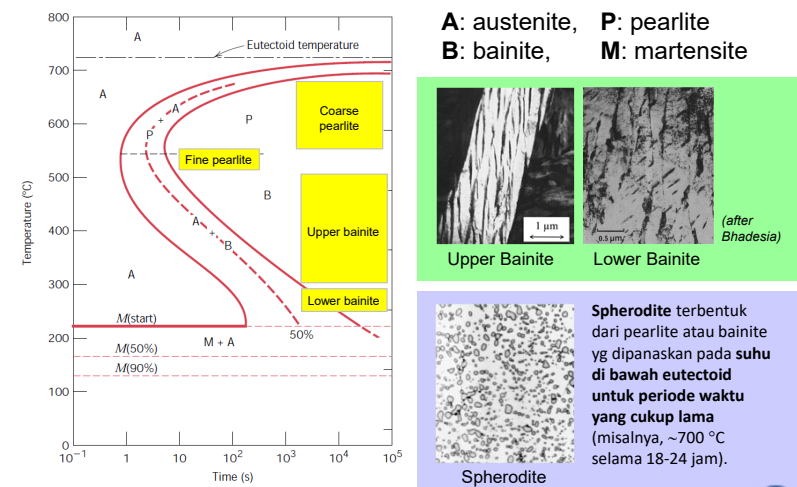


(Adapted from H. Boyer, Editor, Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams, American Society for Metals, 1977, p. 28.)

Akhmad A. Korda – Institut Teknologi Bandung

17

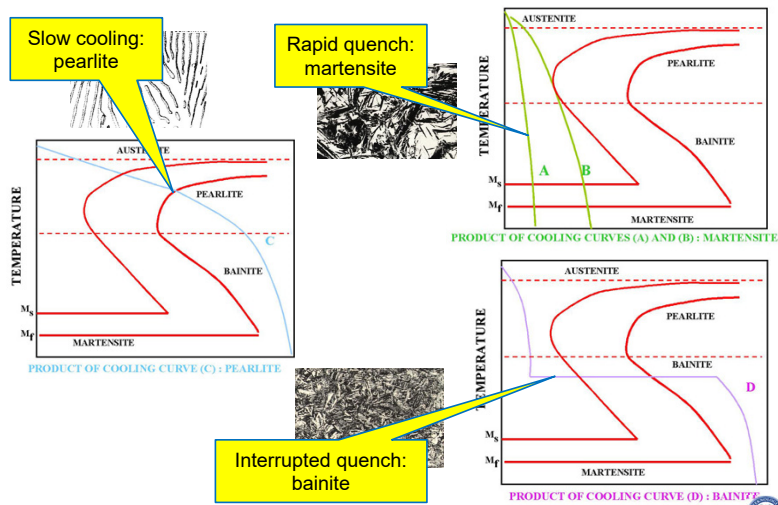
## Diagram TTT (Komposisi Eutektoid)



Akhmad A. Korda – Institut Teknologi Bandung

18

## Diagram TTT: Transformasi Pearlite

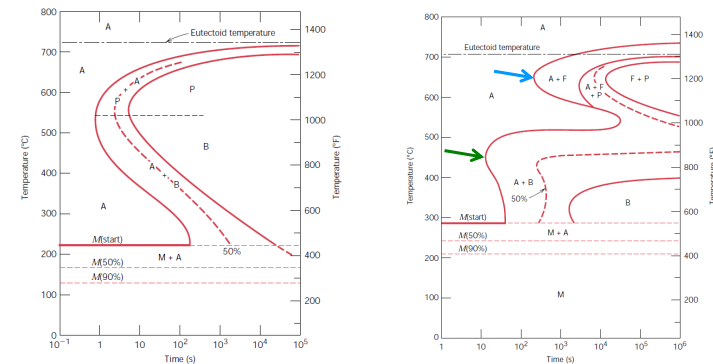


Akhmad A. Korda – Institut Teknologi Bandung

19

## TTT Diagram

Kehadiran elemen paduan selain C (mis., Cr, Ni, Mo, dan W) dapat menyebabkan perubahan posisi dan bentuk kurva TTT, seperti (1) pergeseran yang lebih jauh dari hidung transformasi austenite ke pearlite (dan juga hidung fasa proeutektoid, jika ada), dan (2) pembentukan hidung bainit yang terpisah.

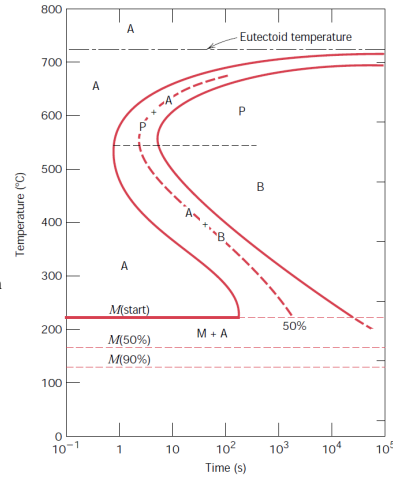


Akhmad A. Korda – Institut Teknologi Bandung

20

### TTT DIAGRAM: EXERCISE

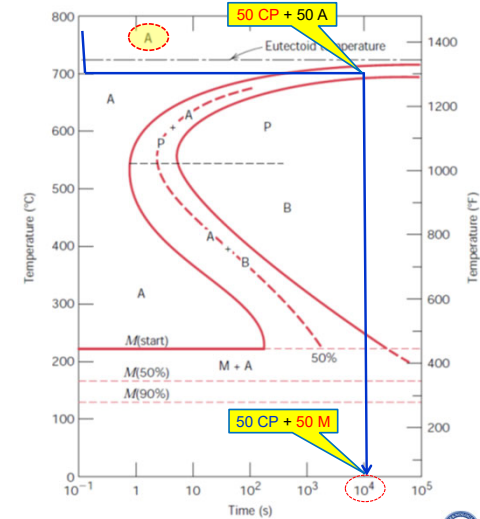
- Cool rapidly to 700°C, hold for 10<sup>4</sup> s, then quench to room temperature.
- Reheat the specimen in part (a) to 700°C for 20 h.
- Rapidly cool to 600°C, hold for 4 s, rapidly cool to 450°C, hold for 10 s, then quench to room temperature.
- Cool rapidly to 400°C, hold for 2 s, then quench to room temperature.
- Cool rapidly to 400°C, hold for 20 s, then quench to room temperature.
- Cool rapidly to 400°C, hold for 200 s, then quench to room temperature.
- Rapidly cool to 575°C, hold for 20 s, rapidly cool to 350°C, hold for 100 s, then quench to room temperature.
- Rapidly cool to 250°C, hold for 100 s, then quench to room temperature in water. Reheat to 315°C for 1 h and slowly cool to room temperature.



### TTT DIAGRAM: EXERCISE

- Cool rapidly to 700°C, hold for 10<sup>4</sup> s, then quench to room temperature.  
*Ans.:*

50% coarse pearlite  
and 50% martensite

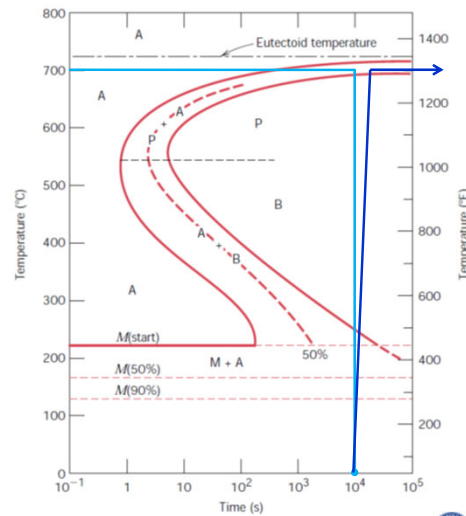


### TTT DIAGRAM: EXERCISE

- Reheat the specimen in part (a) to 700°C for 20 h.  
*Ans.:*

50% coarse pearlite and  
50% martensite

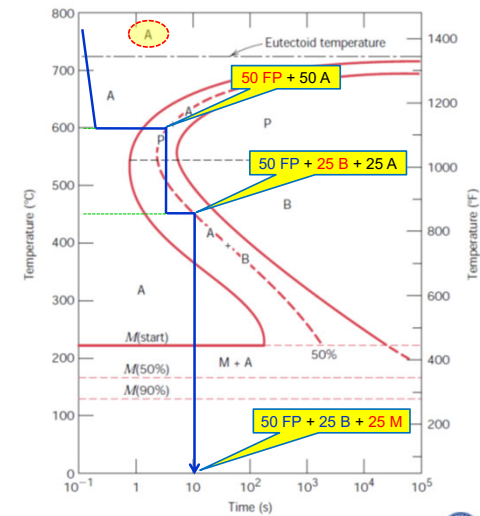
100% spheroidite



### TTT DIAGRAM: EXERCISE

- Rapidly cool to 600°C, hold for 4 s, rapidly cool to 450°C, hold for 10 s, then quench to room temperature.  
*Ans.:*

50% fine pearlite,  
25% bainite (upper),  
and 25% martensite

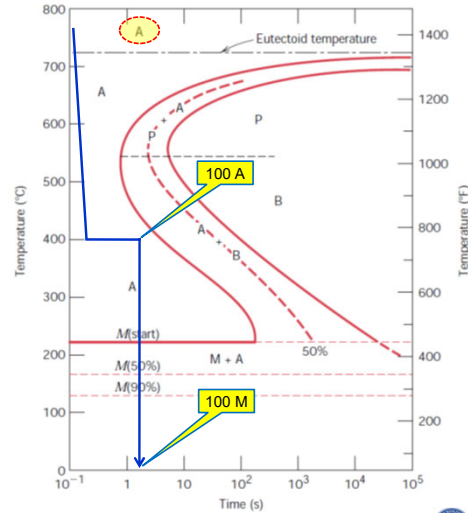


### TTT DIAGRAM: EXERCISE

- d) Cool rapidly to 400°C, hold for 2 s, then quench to room temperature.

Ans.:

100% martensite



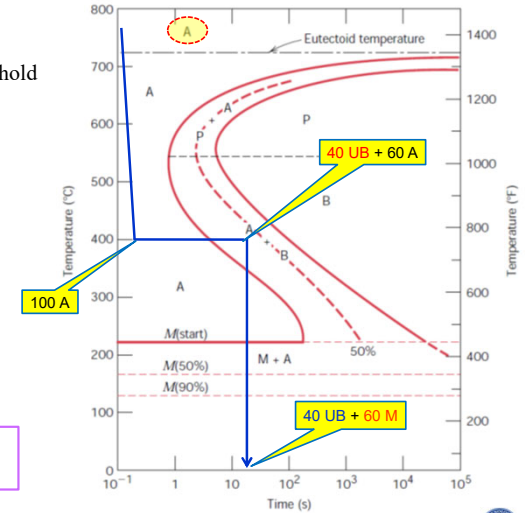
### TTT DIAGRAM: EXERCISE

- e) Cool rapidly to 400°C, hold for 20 s, then quench to room temperature.

Ans.:

40% bainite (upper) and 60% martensite

T ~300-540°C, upper bainite  
T ~200-300°C, lower bainite

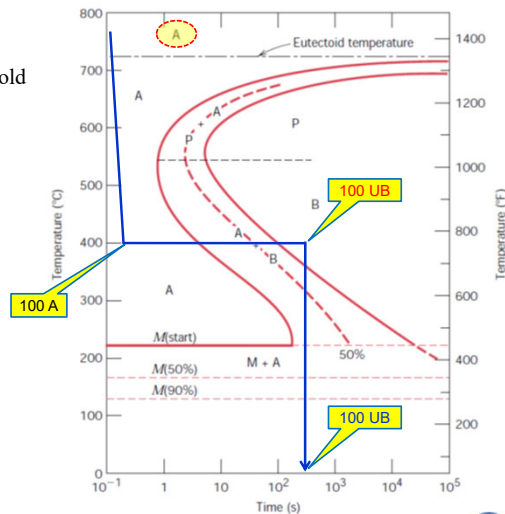


### TTT DIAGRAM: EXERCISE

- f) Cool rapidly to 400°C, hold for 200 s, then quench to room temperature.

Ans.:

100% bainite (upper)

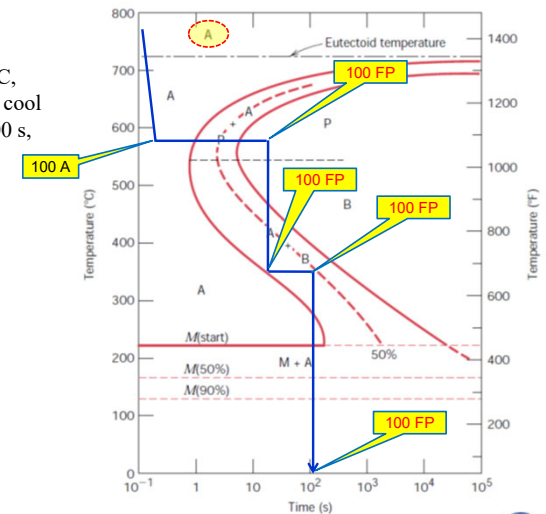


### TTT DIAGRAM: EXERCISE

- g) Rapidly cool to 575°C, hold for 20 s, rapidly cool to 350°C, hold for 100 s, then quench to room temperature.

Ans.:

100% fine pearlite

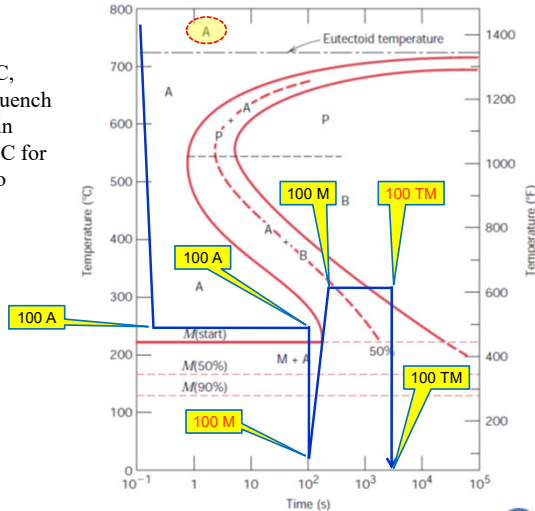


## TTT DIAGRAM: EXERCISE

- h) Rapidly cool to 250°C, hold for 100 s, then quench to room temperature in water. Reheat to 315°C for 1 h and slowly cool to room temperature.

**Ans.:**

100% tempered martensite

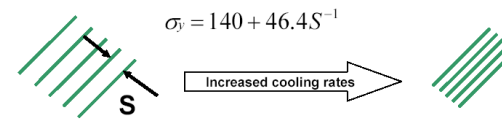


## MICROSTRUCTURE & MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS

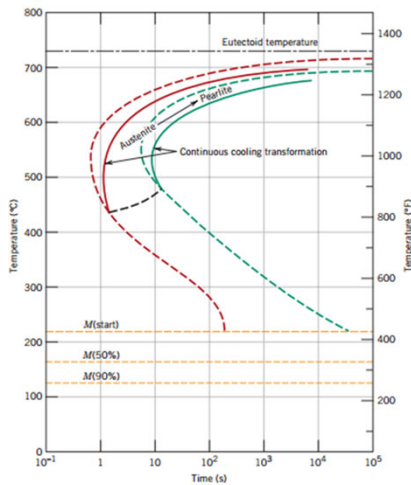
- The mechanical properties of steel are largely dictated by the phase transformations they undergo upon cooling
- If we heat steel to the single phase austenite region and vary the cooling rate, we can control the microstructure

Example: Railway Rails

- Eutectoid composition of 0.76 wt% C
- 100% pearlite structure
- pearlite is a natural 'composite'
- The strength of pearlite is dictated by its interlamellar spacing, S (mm)



## TTT & CCT DIAGRAMS



**TTT diagrams:** time temperature transformation or isothermal transformation diagrams.

**CCT diagrams:** continuous cooling transformation diagrams.

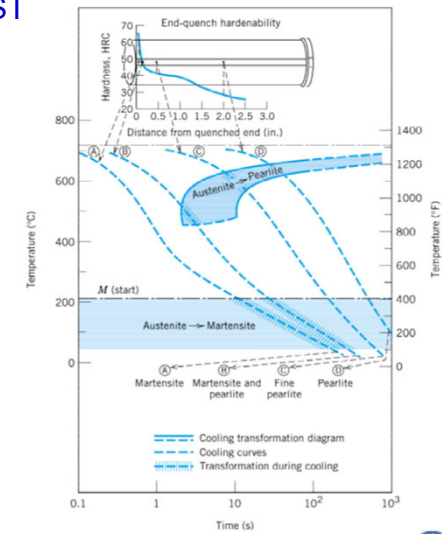
Addition of alloying elements shifts the transformation curves, which generates dissimilar microstructure at the same cooling rate

## HARDENABILITY TEST

Why Hardness Changes with Position?

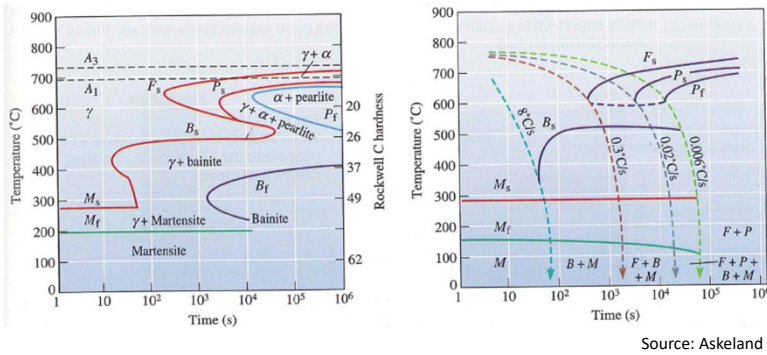
Because the cooling rate varies with position !!

- Note: cooling rates before reaching Austenite – Martensite transformation are in the range 1-50°C/s
- Measuring cooling rates at every point (e.g. by thermocouples) and finding rates correlations with the hardness one may develop quenching rate – hardness diagram





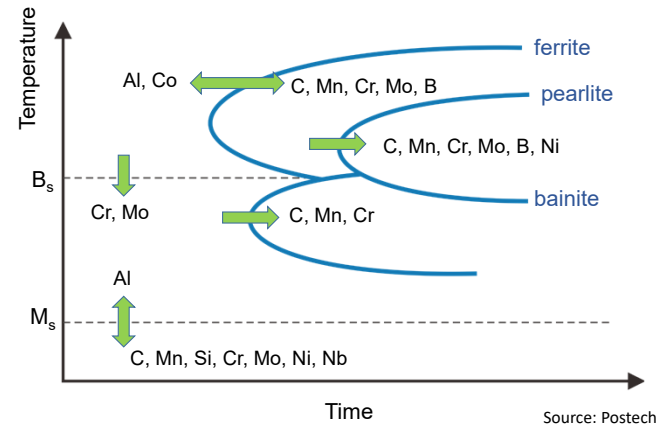
## TTT & CCT DIAGRAMS



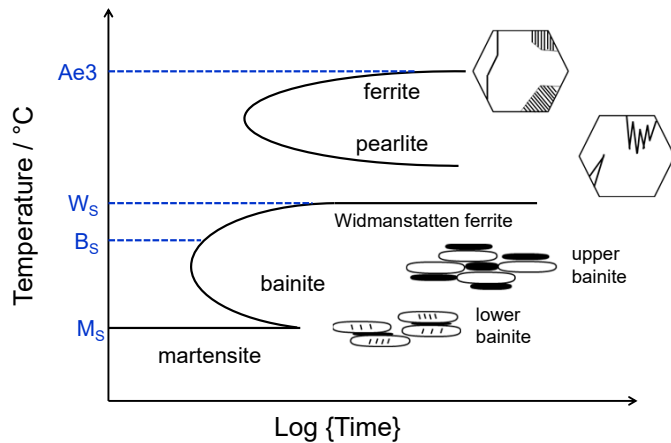
(a) TTT and (b) CCT curve for a 4340 steel

A – Austenite; F – Ferrite; P – Pearlite; B – Bainite; M – Martensite, s subscript denotes start temperature and f subscript denotes finish temperature.

## Role of Alloying Elements in Phase Transformation



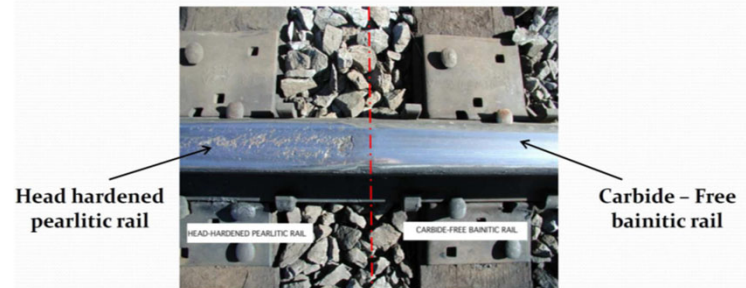
## CCT DIAGRAMS



## Pearlitic Rail vs Bainitic Rail

Tata Steel in Collaboration with Corus has come up with Innovative rail steel grades and proposed bainitic steel

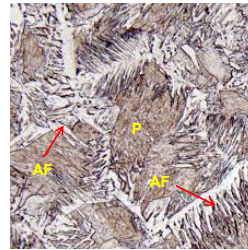
Corus B320 has been installed in Eurotunnel – Good performance in track tests



slide of Dr. Swati Sharma

## Struktur Widmanstätten dan Acicular Ferrite

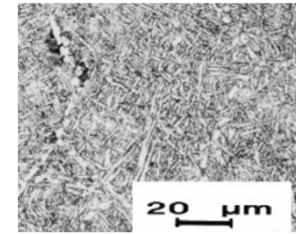
- **Widmanstätten ferrite** dapat terbentuk pada baja karbon dengan kadar C mendekati namun kurang dari komposisi eutektoid.
- Struktur ini adalah **ferrite berbentuk menjarum** didalam struktur pearlite.
- Struktur Widmanstätten ini terbentuk saat temperatur austenisasi yang cukup tinggi (over-heated) dan mengalami pendinginan cukup cepat.
- **Acicular ferrite** adalah struktur ferit dalam baja berbentuk menjarum (dilihat dalam dua dimensi), secara tiga dimensi berbentuk lenticular tipis.



Widmanstätten ferrite

## Acicular Ferrite

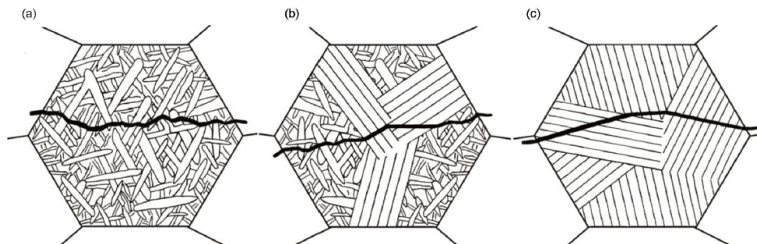
- **Acicular ferrite** merupakan komponen **Widmanstätten yang halus**, yang mengintinya melalui dispersi intergranular optimal dari partikel oksida / sulfida / silikat.
- Acicular ferrite memberikan keuntungan dibandingkan struktur lainnya karena ketidakteraturan orientasinya dapat meningkatkan **ketangguhan baja**.
- Ukuran dari acicular ferrite adalah 0,5 hingga 5  $\mu\text{m}$  dengan aspect ratio dari 3: 1 hingga 10: 1), sehingga memberikan **ketahanan yang maksimum terhadap perambatan retak melalui cleavage**.



Acicular ferrite

## Acicular Ferrite

**Acicular ferrite is formed in the interior of the original austenitic grains** by direct nucleation on the inclusions, resulting in randomly oriented short **ferrite needles with a 'basket weave' appearance**. **Acicular ferrite is also characterised by high angle boundaries between the ferrite grains.**

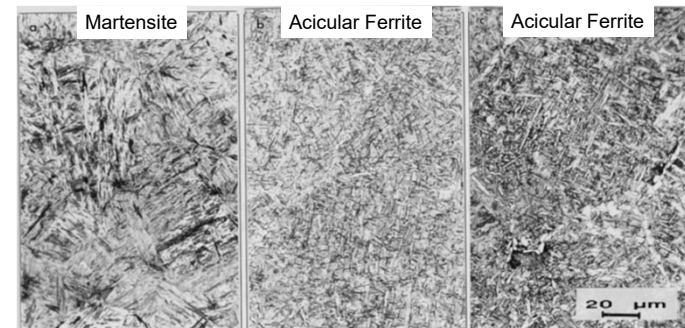


Schematics indicating cleavage crack propagation and deflection (a) AF (b) AF+BF (c) BF

After: Liming DONG et.al.

## Acicular Ferrite

| Chemical Composition of Microalloyed Steel (Weight Percent) |      |      |      |       |      |       |      |      |       |       |        |
|---|------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|--------|
| C   | Mn   | Si   | P    | S     | Cr   | Mo    | V    | Cu   | Al    | Ti    | N      |
| 0.37  | 1.45 | 0.56 | 0.01 | 0.043 | 0.04 | 0.025 | 0.11 | 0.14 | 0.024 | 0.015 | 0.0162 |



Microstructures obtained with continuous cooling to room temperature.  
a. 30°C/s. b. 10°C/s. c. 6°C/s.