

บทที่ 7

เหล็กและเหล็กกล้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่อง โครงสร้างของเหล็กตามเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนซึ่งทำให้เกิดเหล็กประเภทต่าง ๆ เช่น เหล็กธรรมดา(Iron) เหล็กกล้า(Steel) และเหล็กหล่อ(Cast Iron) ตลอดจนเฟสของเหล็กจากแผนภูมิเฟสของเหล็ก นอกจากนี้การเย็นตัวของเหล็กในสภาวะไม่สมดุลย์ทำให้ได้โครงสร้างของเหล็กคือ เฟอร์ไรต์ (Pearlite) ไบไนท์(Bainite) และมาเทนไซต์ (Martensite)

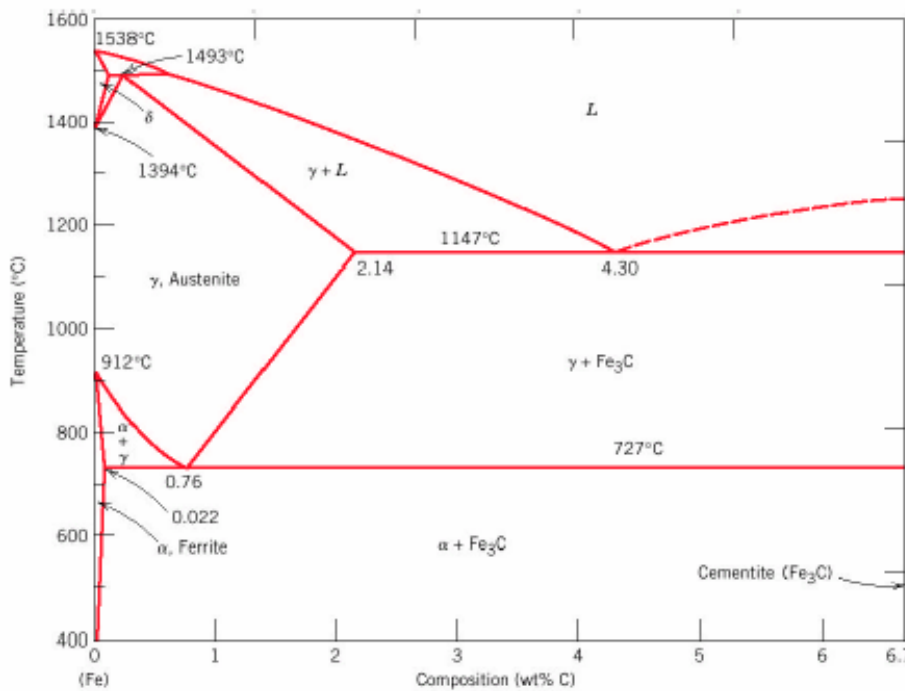
7.1 กล่าวนำ

เหล็กเป็นวัสดุซึ่งมีขอบเขตการใช้งานกว้างขวางมากในชีวิตประจำวันและวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลได้มากมายตามชนิด และจำนวนของธาตุผสม (Alloying Elements)ธาตุผสมที่มีความสำคัญที่สุดคือ Carbon ซึ่งจะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไป

เหล็กผลิตได้จากการนำสินแร่เหล็ก (Iron Ore) ไปถลุงในเตาหลอม (Blast Furnace) ที่ใช้ถ่านโค้ก (Coke) เป็นเชื้อเพลิงและ CaCO_3 เป็น Flux ถ่านโค้กจะทำหน้าที่เผาไหม้ให้ความร้อนและทำหน้าที่เป็น Reducer ที่จะลด O_2 จากสินแร่จนสินแร่ (Iron Oxide) ปราศจาก O_2 ซึ่งจะเป็นเหล็กบริสุทธิ์ และเมื่อความร้อนสูงขึ้นเหล็กบริสุทธิ์นี้ก็จะหลอมละลาย โดยจะมีสารมลทิน (Impurities) เช่น S , C , Si , Mn, P ที่ติดมาจากสินแร่และถ่าน Coke ละลายปะปนมาด้วย ซึ่งน้ำเหล็กที่ได้นี้เรียกว่า Pig Iron เนื่องจาก Pig Iron มีปริมาณของ Impurities สูง จึงไม่เหมาะสมนำไปใช้งานได้ ดังนั้นจะต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์ ยิ่งขึ้น (Refined) โดยกรรมวิธีเหล่านี้คือ Open Hearth, Bessemer Converter หรือ Electric Furnace ซึ่งกรรมวิธีเหล่านี้จะใช้ Flux และ O_2 หรือ Flux อย่างเดียว ผ่านเข้าไปในน้ำเหล็กทำให้ Impurities เกิด Oxidation เป็น Oxide และรวมตัวกันเป็น Slag ลอยตัวขึ้นมา ขบวนการ Refining นี้ น้ำเหล็กที่ได้จะเดือดเนื่องจากมี O_2 หลงเหลืออยู่ในภาพของ FeO หมดยังน้ำเหล็กนี้ด้วยการ Killing โดยผสม Ferrosilicon ตามจำนวนที่ต้องการจนน้ำเหล็กมีส่วนผสมทางเคมีตามต้องการแล้วจึงนำไป Elements ตามจำนวนที่ต้องการ จนน้ำเหล็กมีส่วนผสมทางเคมีตามต้องการแล้วจึงนำไป

ผ่านกรรมวิธีการผลิตต่างๆ เช่น หล่อ (Casting) ให้มีภาพร่างตามต้องการ หรือหล่อเป็น Ingot เพื่อนำไปรีด (Rolling) ให้มีขนาดและภาพร่างตามต้องการ

7.2 Iron Carbon Equilibrium Diagram



ภาพที่ 7.1 Fe – C Equilibrium Diagram

7.2.1 Carbon ที่ผสมในเหล็กในจำนวนที่แตกต่างกันจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) กล่าวคือ

1. ถ้ามี Carbon ผสมไม่เกิน 0.008% ที่ Room Temp carbon จะสามารถละลายในเหล็กเป็น α - Solid (Ferrite) เหล็กที่ได้จะมี Ductility สูง Strength และ Hardness ต่ำ

2. ถ้ามี Carbon ผสมไม่เกิน 0.008% ที่ Room Temp carbon จะสามารถละลายในภาพของ α - Solid Solution ส่วน Carbon ที่เกิน 0.008% จะรวมตัวกับเหล็กในภาพของ Intermetallic Compound, Fe₃C เรียกว่า Cementite และ Micro Structure ของเหล็กที่มี carbon ผสมในช่วงนี้ จะเป็น α อีสาระและ α ที่เป็นแผ่นบางๆ สลับกันกับแผ่นบางๆ ของ Fe₃C (Lamellar Layer) เรียกว่า Pearlite (α + Fe₃C) ซึ่ง Pearlite จะมี

Mechanical Properties สูงกว่า Ferrite ดังนั้น ถ้า Micro Structure มี Pearlite มาก (มี Carbon มาก) Mechanical Properties ก็สูง ถ้ามีปริมาณของ Ferrite มาก (Carbon ต่ำ) ก็จะมี Mechanical Properties ต่ำ

3. ถ้ามี Carbon ผสมอยู่ 0.8% Micro Structure จะได้ปริมาณของ $\alpha = 88.11\%$ โดยมี Carbon ละลายอยู่ 0.008% ซึ่ง Fe_3C 11.89% ซึ่ง Carbon ใน Fe_3C จะมีอยู่ $0.8 - 0.008 = 7.92\%$ ซึ่ง α และ Fe_3C จะอยู่ในภาพของ $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ทั้งหมดกล่าวคือ ไม่มี α อิสระหรือ Fe_3C อิสระอยู่ใน Micro Structure เลยหรือเรียกว่าเกิด Pearlite 100%

4. ปริมาณของ Carbon ผสมอยู่เกิน 0.8% - 2.0% Micro Structure จะเป็น Pearlite + Cementite, ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) + Fe_3C ปริมาณของ Fe_3C อิสระขึ้นอยู่กับปริมาณของ Carbon กล่าวคือถ้ามี Carbon ผสมอยู่มากก็จะเกิด Fe_3C อิสระมาก ซึ่งจะทำให้เหล็กที่ได้มี Mechanical Properties สูง

5. ปริมาณ Carbon 2.0% - 4.3% เหล็กที่ได้นี้เรียกว่าเหล็กหล่อ Cast Iron ซึ่ง Micro Structure ที่ได้คือ ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) + Fe_3C ซึ่งปริมาณของ Cementite อิสระมีมากจนทำให้เปราะ (Brittle) ดังนั้นจึงไม่สามารถนำเหล็กหล่อดังกล่าวนี้ไปใช้งานที่รับ Tensile Load ซึ่งเหล็กหล่อเหล่านี้สามารถที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีปริมาณของ Fe_3C อิสระน้อยลงโดยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatments) ซึ่ง Fe_3C จะถูก $\alpha + \text{Graphite}$ ซึ่งจะได้ศึกษาโดยละเอียดต่อไป

7.2.2 Phases ซึ่งมีลักษณะต่างๆ ดังนี้ คือ

1. Ferrite (α - Iron) มีโครงสร้างเป็นชนิด Body - Centered Cubic (BCC)

Stable ที่ Temp ระหว่าง $1400\text{ C}^0 - 723\text{ C}^0$ และที่ Room Temp. Carbon จะละลายได้ไม่เกิน 0.008%

2. Austenite (γ - Iron) มีโครงสร้างเป็นแบบ Face - Centered Cubic จะ Stable ที่ Temp ระหว่าง $1400\text{ C}^0 - 723\text{ C}^0$ สามารถละลาย Carbon ได้สูงถึง 2.0% ที่ 1130 C^0 โดยทั่วไปจะมี Ductility สูง เหมาะที่จะทำการผลิตในการขึ้นรูป (Hot Working) แต่ถ้าหาก Steel ถูกเผาแช่ไว้ที่ Austenitic Temp นานๆ จะทำให้ Grains โตขึ้น (Grain Growth) นอกจากนั้นจะทำให้เกิด Oxidation รวมทั้งสูญเสีย Carbon (Decarburized) อีกด้วย ดังนั้น การทำ Hot Working จะต้องพิจารณาถึงข้อเสียดังกล่าวด้วย

สำหรับโครงสร้างของ Steels บางชนิดอาจเกิด Austenite ที่ Temp ต่ำกว่า 723 C° เนื่องจากสาเหตุของอัตราการเย็นตัว

อัตราการเย็นตัว (Rate of Cooling) ของ Steels ที่ถูกลดจาก Austenitic Temp ลงมาเร็วเกินไป (Rate of Cooling สูง) จะทำให้ Austenite บางส่วนเปลี่ยนเป็น Martensite ไม่ทัน Austenite เหล่านี้จะไม่คงตัว (Unstable) เรียกว่า “Retained Austenite” ซึ่งเป็นตัวการทำให้ Steel แตกกร้าวภายหลังการชุบแข็ง (Hardening) ซึ่งจะต้องแก้ไขโดยกรรมวิธีให้ความร้อน (Heat Treatments) ซึ่งจะกล่าวต่อไป

3. Cementite (Fe_3C) เป็นโครงสร้างของ Steel ที่เกิดจากการรวมตัวแบบ Intermetallic compound ของ Ferrite และ Carbon ในสัดส่วน 3 : 1 โดยมี Carbon ผสมอยู่ 6.67 % Fe_3C จะมีผลต่อ Mechanical Properties ของ Steel มาก คือถ้ามี Fe_3C ใน Micro Structure มาก Steel ก็จะมี Mechanical Properties สูง แต่ถ้ามี Fe_3C มากเกินไปเช่นในเหล็กหล่อสีขาว (White Cast Iron) ก็เปราะ (Brittle) คือมี Mechanical Properties ลดลง

4. Pearlite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) เป็น Lamellar layer สลับกับระหว่าง α และ Fe_3C ปริมาณ Pearlite จะมีมากขึ้นอยู่กับปริมาณ Carbon ถ้ามี Carbon 0.8% (Eutectoid Steel) ก็จะมีปริมาณของ Pearlite 100% ใน Micro Structure กล่าวคือ จะไม่มี Ferrite อิสระ หรือ Fe_3C อิสระอยู่เลย

5. Delta Iron ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) มีโครงสร้างแบบ BCC จะ Stable ที่ Temp $1400\text{ C}^{\circ} - 1539\text{ C}^{\circ}$ δ - Iron นี้เปราะมาก ดังนั้นการ Hot Working จะต้องระวัง Working Temp ไม่ให้สูงจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็น δ - Iron (สีฟ้าขาว) มิฉะนั้น Product ที่ได้จะเกิดการแตกกร้าว (Failure)

6. Ledeburite ($\gamma + \text{G}$) เป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อ (Carbon) 2.0 % - 4.5%) Stable ที่ Temp ระหว่าง $723\text{ C}^{\circ} - 1135\text{ C}^{\circ}$ เมื่อ Temp ต่ำกว่า 723 C° γ จะทำให้เกิด Eutectoid Reaction ได้ Pearlite ซึ่ง Phases ที่ได้ก็คือ Pearlite + Graphite

7.2.3 Critical Curve หมายถึงเส้นที่เมื่อให้ Temp เปลี่ยนแปลงไป สูงขึ้นหรือต่ำลง จากเส้นนี้ Phases ก็เปลี่ยนแปลงโดยสถานะ (Metallic State) ยังเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ

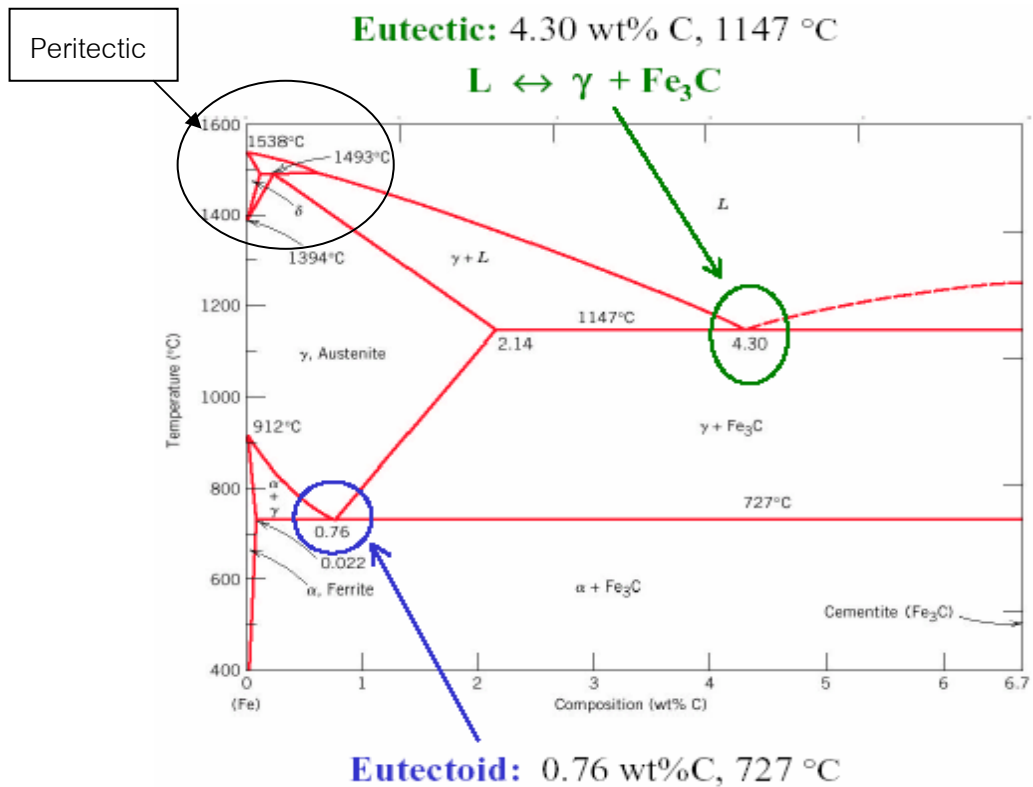
7.2.3.1 Upper Critical Temperature curve แบ่งออกเป็น

1. Ferrite Started Curve (เส้น A) คือเมื่อให้ Temp ลดลงต่ำกว่า A_{r3} α ก็ จะเริ่มตกผลึก (Precipitate) ที่ Grain Boundary ของ γ ซึ่ง Phases ที่ได้ก็คือ $\alpha + \gamma$ แต่ถ้า ให้ Temp สูงกว่า A_{c3} Phases ก็ จะเปลี่ยนเป็น γ เพียง Phase เดียว โดยยังคงเป็น Solid State

2. Cementite Started Curve (A_{cm}) เมื่อให้ Temp ลดลงจากเส้น A_{cm} ก็ จะ เกิด Fe_3C ขึ้นที่บริเวณ Grain Boundary ของ γ ซึ่ง Phases ที่ได้ก็คือ $\gamma + Fe_3C$ แต่เมื่อ Temp สูงเกินกว่า A_{cm} Phases ก็ จะเปลี่ยนแปลงเป็น γ Phase เดียว โดยสถานะยังคง เป็น Solid เหมือนเดิม

7.2.3.2 Lower Critical Temperature (A) เมื่อให้ Temp ลดลงต่ำกว่า A_{r1} γ จะไม่สามารถคงตัวอยู่ได้ จะเกิด Eutectoid Reaction ได้ Pearlite ($\alpha + Fe_3C$) และเมื่อให้ Temp สูงขึ้น A_{c1} Phase ก็ จะเปลี่ยนแปลงเป็น γ Phase เดียว โดยสถานะยังคงเป็น Solid เหมือนเดิม

7.2.4 Binary System ใน Fe – C Equilibrium diagram จะมีระบบการละลาย ตัว อยู่ 3 ระบบ คือ



ภาพที่ 7.2 แสดง Binary System ใน Fe – C Equilibrium diagram

7.2.4.1 Peritectic System เกิดใน Steel ที่มี Carbon ผสม 0 – 0.50% ในช่วง Temp 1400 – 1539 C⁰ การพิจารณา Diagram ทำได้ 3 ช่วง ส่วนผสมคือ

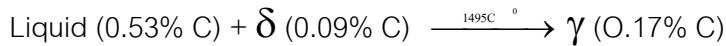
1. Peritectic Steel (0.18%C)
2. Hypo Peritectic Steels (0 – 1.8%C)
3. Hypo Peritectic Steels (0.18 – 0.5%C)

1. Peritectic Steel (0.18%C) เมื่อให้ 0.18% C Steel หลอมละลายไปที่ Liquidus + 50 C⁰ จนหลอมละลายทั้งชิ้น ณ Temp ดังกล่าวแล้วจึงลด Temp ลงภายใต้สภาวะสมดุลย์ (Equilibrium) จน Temp พบ Liquidus ที่ t1 จากนั้น Liquid Solution ก็จะมีแข็งตัวได้ δ + L และเมื่อ Temp ลดลงมาถึง 1492 C⁰ δ จะเกิดมากขึ้น L จะลดน้อยลงซึ่งสามารถหาปริมาณของ δ และ L จาก Lever's Rule ดังนี้

$$\delta = \frac{0.5 - 0.18}{0.5 - 0.1} \times 100\% = 80\%$$

$$L = \frac{0.18 - 0.1}{0.5 - 0.1} \times 100\% = 20\%$$

ซึ่ง Liquid 20% นี้จะล้อมรอบ (Peri) δ - grain โดยที่ 1492C⁰ นี้ Liquid จะซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับ δ ได้ γ ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Peritectic Reaction ดังสมการ



ซึ่งเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาคือ Temp ต่ำกว่า 1492 C⁰ Phase ที่ได้อาจเป็น γ Phase เดียว หรือ δ + γ หรือ L + γ ขึ้นอยู่กับปริมาณของ L หรือ γ จำนวน 20% โดยน้ำหนักจะเท่ากันในเชิงปฏิกิริยากับ Peritectic Reaction 80% ดังนั้น Peritectic Steel เมื่อ Temp ลดลงต่ำกว่า 1492 C⁰ จะแข็งตัวทั่วทั้งก้อน (Solidified) ได้ Phase เดียวของ γ

2. Hypo Peritectic Peritectic Steel (0 – 0.8%C) แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- ก. ชนิดที่ไม่เกิด Peritectic Reaction
- ข. ชนิดที่เกิด Peritectic Reaction

ชนิดที่ไม่เกิด Peritectic Reaction ซึ่งมีส่วนผสมระหว่าง 0 – 0.1 % Carbon จะเห็นว่า Alloys เหล่านี้จะ Solidified ก่อน 1492 C⁰ ดังนั้นจึงไม่มี Liquid ที่จะมาทำ Peritectic Reaction

ชนิดที่เกิด Peritectic Reaction (0.1 – 0.18%) การพิจารณาที่เช่นเดียวกับ Peritectic Alloy แต่เนื่องจากปริมาณของ L ที่ 1492 C⁰ มีน้อยกว่า 20% ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าเชิงปฏิกิริยา และ δ ที่เกิดขึ้นมีมากกว่า 80% ซึ่งมากกว่าเชิงปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา (Temp ต่ำกว่า 1492 C⁰) Liquid จะหมดไป δ บางส่วนจะทำปฏิกิริยากับ L ได้ γ ส่วน δ ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาก็จะคงมี Phase ของ δ เหมือนเดิม ดังนั้น Phase ที่ได้เมื่อ Temp ต่ำกว่า 1492 C⁰ คือ $\delta + \gamma$ ซึ่ง δ จะเปลี่ยน Phase เป็น γ เมื่อ Temp ลดลงต่ำกว่า Solubility Curve BE

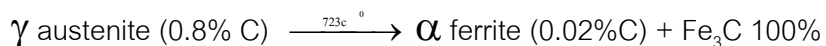
3. Hyper Peritectic Steel (0.18 – 0.5%) การพิจารณาที่เช่นเดียวกับ Peritectic Steel แต่เมื่อ Temp ลดลงมาถึง 1492 C⁰ ปริมาณ Liquid Solution จะมีมากกว่า 20% คือมากกว่าในเชิงปฏิกิริยา และ δ - grain จะเกิดน้อยกว่า 80 % คือน้อยกว่าในเชิงปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุด (Temp ต่ำกว่า 1492 C⁰) Hyper Peritectic Steel จะยังไม่แข็งตัว Phases ที่ได้ คือ $\gamma + L$ เมื่อ Temp ลดลงต่ำกว่า Solidus BF ก็ จะ Solidified ได้ Phase เดียวของ γ

Austenite เหล่านี้เมื่อ Temp ลดต่ำลงก็จะไม่สามารถคงตัวอยู่ได้จะต้องมีการเปลี่ยน Phase ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปนี้

7.2.4.2 Eutectoid System เป็นปฏิกิริยาที่เกิดในขณะที่ Steel อยู่ในสภาวะของแข็ง ณ Temp 723 C⁰ การพิจารณาแบ่งเป็น

1. Eutectoid Steel (0.8% C Steel)
2. Hypo Eutectoid (0 – 0.8% C)
3. Hypo Eutectoid (0 – 2.0% C)

1. Eutectoid Steel (0.8% Carbon Steel) เมื่อเผา 0.8% Carbon Steel ไปที่เหนือ Ac₁ ประมาณ 50 C⁰ โครงสร้างก็จะเปลี่ยนเป็น γ โดยสถานะยังคงเป็น Solid อยู่ เมื่อ Temp ถูกลดลงในสภาวะ Equilibrium มาที่ Ar₁ (723 C⁰) ก็ จะเกิด Pearlite ($\alpha + Fe_3C$) ที่ Grain Boundaries ของ γ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Eutectoid Reaction ดังสมการ



ซึ่งเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลง (Temp ต่ำกว่า 723C⁰) ก็ จะหมดไปได้ $\alpha + Fe_3C$ 100% ซึ่งปริมาณของ α และ Fe₃C จะมีปริมาณดังนี้

$$\delta = \frac{6.67 - 0.08}{6.67 - 0.02} \times 100\% = 88.3\%$$

$$\text{Fe}_3\text{C} = \frac{0.80 - 0.02}{6.67 - 0.02} \times 100\% = 11.7\%$$

เมื่อ Temp ลดต่ำลง α จะละลาย Carbon ได้น้อยลง จนกระทั่ง Temp ลดต่ำมาถึง Room Temp α จะละลาย Carbon ได้เพียง 0.008% ดังนั้น Carbon ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ α บางส่วนเป็น Fe_3C ซึ่งจะทำให้ปริมาณ α ลดลงเหลือ 88.18 % โดย Fe_3C จะเพิ่มขึ้นเป็น 11.82 %

3. Hypo Eutectoid steels แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

ชนิดที่ไม่เกิด Eutectoid Reaction

ชนิดที่เกิด Eutectoid Reaction

ชนิดที่ไม่เกิด Eutectoid Reaction จะเป็น Steel ที่มี Carbon ต่ำกว่า 0.025% ซึ่งเมื่อให้ Temp ลดลงในสภาวะ Equilibrium จะมีการเปลี่ยน Phase ของ γ เป็น α จนหมดสิ้นที่ Temp สูงกว่า Eutectoid Temp A_{r1} ดังนั้นเมื่อ Temp ถูกลดมาถึง 723 C^0 จะไม่มี γ หลงเหลืออยู่จึงไม่เกิด Eutectoid Reaction

ชนิดที่เกิด Eutectoid Reaction เป็น Steel ที่มีส่วนผสมของ Carbon 0.025 – 0.8% ซึ่งการพิจารณาทำได้ดังนี้ คือ เมื่อเผา Steel ที่มีส่วนผสมระหว่าง 0.002 – 0.8% ส่วนผสมใดส่วนผสมหนึ่งไปที่เหนือ A_{c3} ประมาณ 50 C^0 เพื่อให้ Steel เปลี่ยน Phase เป็น γ ทั้งหมดก่อนแล้วจึงลด Temp ลงภายใต้สภาวะ Equilibrium มาพบ A_{r3} (Ferrite Started Curve) ก็จะมี α ขึ้นที่ Grain Boundaries เมื่อ Temp ลดลงถึง 723 C^0 จะหาปริมาณของ α และ γ ได้ดังนี้ ส่วนผสมที่พิจารณาคือ 0.50 % ดังนั้นจะมีปริมาณ

$$\delta = \frac{0.08 - 0.50}{0.08 - 0.025} \times 100\% = 38.71\%$$

$$\gamma = \frac{0.05 - 0.025}{0.8 - 0.025} \times 100\% = 61.29\%$$

ซึ่งเมื่อ Temp ลดต่ำกว่า 723 C^0 จะทำ Eutectoid Reaction ได้ $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (Pearlite) ดังนั้น Pearlite ที่ Temp ต่ำกว่า 723 C^0 จะมีปริมาณเท่ากับ 61.29% ใน Micro Structure ส่วน α เมื่อ Temp ต่ำกว่า 723 C^0 ก็จะเป็น α เช่นเดิม เรียกว่า Proeutectoid

Ferrite และมีจำนวนเท่าเดิม คือ 38.71% แต่เมื่อ Temp ลดลงปริมาณของ α จะน้อยลง เพราะ Carbon ละลายได้น้อยลงเช่นเดียวกับ Eutectoid Steel

3. Hyper Eutectoid Steel การพิจารณาคล้ายกับ Hypo Eutectoid Steel ต่างกันตรงที่เมื่อ Temp ถูกลดลงจาก Austenitic Temp มาพบ Upper Critical Curve (A_{cm}) จะเกิด Cementite (Fe_3C) ขึ้นที่ Grain Boundaries และเมื่อ Temp ถูกลดมาที่ A_{r1} Austenite ที่เหลืออยู่ก็จะทำ Eutectoid Reaction ได้ Pearlite เช่นกัน ดังนั้น Phases ของ Hyper Eutectoid Steel ที่ Room Temp คือ Proeutectoid Cementite + Pearlite

7.2.4.3 Eutectic System การพิจารณาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. Eutectic cast Iron (4.3%)
2. Hypo Eutectic Cast Irons (2.0 – 4.3 %C)
3. Hypo Eutectic Cast Irons(4.3% C ขึ้นไป)

1. Eutectic Cast Iron (4.3%) เมื่อ Eutectic Cast Iron ถูกลด Temp ลงจาก Liquid Solution ($1130 + 50C^0$) ในสภาวะ Equilibrium จน Temp มาถึง $1130 C^0$ Liquid Solution ที่จะทำให้ Eutectic Reaction ดังสมการ



เมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลง Eutectic Cast Iron ก็จะทำให้ Eutectic Reaction ได้อย่างสมบูรณ์กล่าวคือ จะ Solidify ทั้งหมดก่อน Phases ที่ได้ก็คือ $\gamma + Fe_3C$ (Ledeburite) ซึ่งเมื่อ Temp ลดต่ำลง γ ก็จะเกิด Eutectic Reaction ที่ $723 C^0$ ได้ Pearlite ดังนั้นที่ Room Temp Eutectic Cast Iron เมื่อเย็นตัวในสภาวะ Equilibrium จะมี Phase ของ Pearlite + Cementite แต่ถ้าต้องการไม่เกิด Fe_3C เลยจะต้องเผาแช่ (Soaking) ที่ Temp ประมาณ $700 C^0$ เป็นเวลาหลายสิบชั่วโมงเพื่อให้ Carbon แยกตัวออกมาจาก Fe_3C ดังนั้นที่ Room Temp จะได้ Phases ของ $\alpha + G$ ซึ่งเรียกว่า Ferritic Cast Iron

Hypo Eutectic Cast Irons การพิจารณาคล้ายกับ Eutectic Cast Iron ต่างกันเล็กน้อยตรงที่เมื่อ Temp ลดลงภายใต้สภาวะ Equilibrium มาพบ Liquidus ก็จะเริ่มเกิด Solid Austenite ขึ้นใน Liquid Solution และเมื่อ Temp ต่ำลงก็จะสร้าง Dendrite ขยายตัวออกไปซึ่ง Liquid ก็จะมีจำนวนลดลงซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณได้จาก Tie - Line Concept เมื่อ Temp ลดลงถึง $1130 C^0$ Liquid ที่มีอยู่ก็จะทำ Eutectic Reaction ได้ $\gamma + Fe_3C$ เมื่อ Temp ลดลงต่ำกว่า $1130 C^0$ Phases ที่ได้คือ $\gamma + (\gamma + Fe_3C)$ γ อีสาระจะมี

จำนวนเท่ากับ γ ที่ 1130 C^0 ส่วนการเปลี่ยนแปลงของ γ ก็เช่นเดียวกับ Eutectic Cast Iron

Hyper Eutectic Cast Iron การพิจารณาคัดคล้ายกับ Hypo Eutectic Cast Iron ต่างกันตรงที่จะเกิด Fe_3C ใน Liquid Solution เมื่อ Temp ถูกลดลงมาถึง Liquidus ดังนั้น Phases ที่ได้เมื่อ Solidify ก็คือ $\text{Fe}_3\text{C} + (\gamma + \text{Fe}_3\text{C})$ ส่วนการเปลี่ยน Phase ของ γ ก็มีลักษณะเดียวกันกับ Eutectic Cast Iron (Fe_3C อีสาระคือ Proeutectic Cementite)

7.2.5 Allotropic Materials หมายถึงการที่วัสดุจะมี Phase เปลี่ยนแปลงไปเมื่อ Temp เปลี่ยนแปลงไปเช่น Pure Iron เมื่ออยู่ที่ Room Temp จะมีโครงสร้างเป็น B.C.C (Body Centered Cubic) ซึ่งเรียกว่า Ferrite (α) เมื่อ Temp ถูกเพิ่มขึ้นจนสูงกว่า 910 C^0 โครงสร้างก็จะเปลี่ยนจาก B.C.C. เป็น F.C.C. (Face Centered Cubic) ซึ่งเรียกว่า Austenite (γ) และเมื่อ Temp สูงกว่า 1400 C^0 โครงสร้างจะกลับมาเรียงตัวแบบ B.C.C. อีก แต่จะเปราะกว่า B.C.C. ที่ Temp ต่ำ ซึ่งการที่ Micro Structure ของ Steel สามารถเปลี่ยนแปลงได้ดังกล่าว จึงทำให้สามารถเปลี่ยนแปลง Micro Structure ของ Steel ได้มากมาย ผลก็คือจะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลง Micro Structure ของ Steel ให้เป็นไปตามต้องการ แม้จะไม่ได้เปลี่ยนแปลง Chemical Composition เลยก็ตาม ดังจะได้กล่าวในเรื่อง Heat treatment ต่อไป

7.3 Time Thermal Transformation Curve (T.T.T)

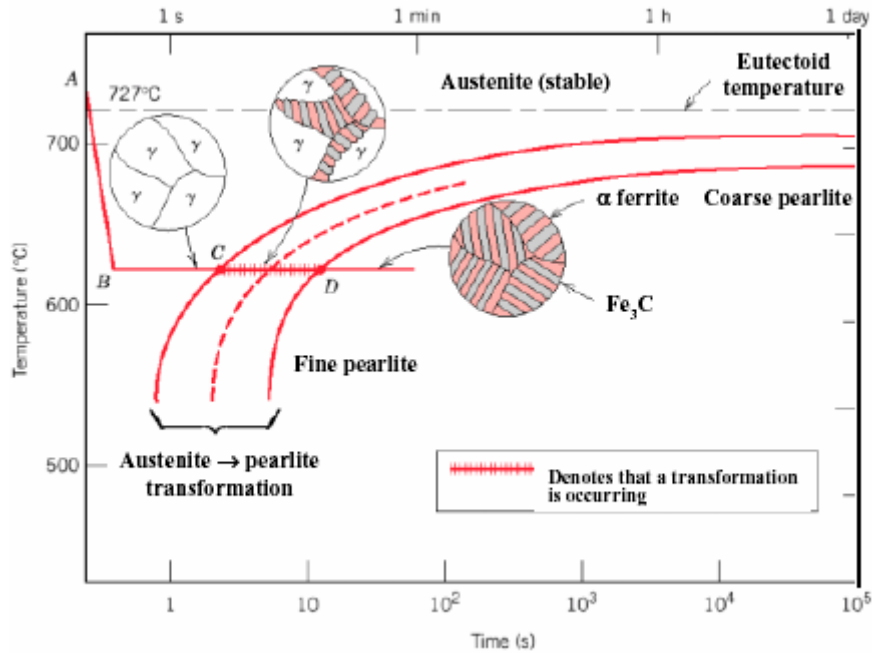
เนื่องจาก Steel เป็น Allotropic Material ซึ่งเมื่อ γ เย็นตัวลงในสภาวะ Equilibrium จะเปลี่ยน Phase เป็น Pearlite ดังกล่าวมาแล้ว ถ้าต้องการเย็นตัวของ Austenite เป็นไปแบบ Non Equilibrium ณ Temp คงที่ Austenite จะมีการเปลี่ยนแปลง Phase ได้ 3 ลักษณะ คือ

7.3.1 Pearlite

7.3.2 Bainite

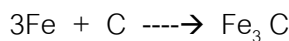
7.3.3 Martensite

7.3.1 Pearlite เป็น Lamellar Layer ของ α และ Fe_3C เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ Austenite ที่ Quench มาถึง Temp ระหว่าง Temp ต่ำกว่า 723 C^0 – สูงกว่า 500 C^0 ซึ่งมีลักษณะการเกิดดังนี้



ภาพที่ 7.6 แสดงการเกิด Pearlite และระยะเวลาของการเกิด

จากภาพเมื่อ γ ถูกลด Temp ลงมาต่ำกว่า A_{r1} ในสภาวะ Non Equilibrium (การเย็นตัวในสภาวะ Non Equilibrium A_1 จะอยู่ที่ $723\text{ }^{\circ}\text{C}$) γ จะยังไม่สามารถเปลี่ยน Phase ได้ ยังคงเป็น Austenite แต่ไม่คงตัวเรียกว่า "Retained Austenite" ซึ่งเมื่อใช้เวลาที่ Temp ต่ำกว่า $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ นานเข้าบริเวณ Grain Boundaries จะเริ่มมีการตกผลึกของ Fe_3C ซึ่ง Fe_3C จะขยายตัวใหญ่ขึ้นโดยการดึงเอาอะตอมของ Carbon ที่อยู่ที่บริเวณติดกันมารวมตัวกับ Fe ที่เปลี่ยน Phase จาก Retained Austenite เกิดเป็น Fe_3C ดังสมการ



สาเหตุของการเกิด Fe_3C ก็เนื่องจาก Retained γ ที่ถูกลด Temp ลงมาที่ $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ พยายามที่จะเปลี่ยน Phase ให้เป็น α แต่เนื่องจากปริมาณของ Carbon ละลายปนอยู่มาก Carbon ก็จะถูกผลักดันออกมาผสมตัวกับเหล็กเป็น Fe_3C แผ่นบางๆ (Lamellar) ขณะเดียวกัน Retained γ ที่คาย C ออกแล้วก็จะเปลี่ยน Phase เป็น α แผ่นบางๆ ติดกับ Fe_3C ทั้ง 2 ข้าง Retained γ ที่เหลืออยู่ก็จะเปลี่ยนแปลงเป็น Fe_3C และ α ดังกล่าว จนในที่สุด Retained γ จะหมดสิ้นไปเกิดเป็นชั้นบางๆ สลับกันระหว่าง α และ Fe_3C ทั่วทั้ง Grain

การสร้าง T.T.T. Curve ในช่วงการเกิด Pearlite ทำได้โดยการนำ Specimens ที่ทำด้วย 0.8% Carbon Steel ขนาด $1 \times 1 \times 1\text{ cm}^3$ มาเผาที่ $723 + 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ จำนวน 20 – 30 อัน แล้วจึงนำมา Quench ใน Lead Bath ที่ Temp ใด Temp หนึ่งระหว่าง $550\text{ }^{\circ}\text{C} - 723\text{ }^{\circ}\text{C}$

(Temp คงที่) ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน แล้วนำมา Quench ในน้ำที่ Room Temp ผลก็คือ ถ้า Retained γ ที่ยังไม่เปลี่ยนเป็น Pearlite ก็เปลี่ยนเป็น Martensite ส่วนที่เปลี่ยนเป็น Pearlite แล้วก็จะยังคงเป็น Pearlite เหมือนเดิม ดังนั้น Micro Structure ที่ได้หลังจาก Quench ในน้ำ ถ้าเป็น Martenite 100% ก็แสดงว่า γ ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากใช้เวลาใน Lead Bath น้อยไป ระยะเวลาจากเริ่ม Quench ใน Lead Bath จนเริ่มเกิด Pearlite เรียกว่าระยะเวลาในการพักตัว (Incubation Time) Specimens ที่แช่ (Soaking) ใน Lead Bath นานเข้าก็จะเกิด Pearlite มากขึ้น ดังนั้น Specimens ที่ Soaking ใน Lead Bath นานๆเมื่อนำมา Quench จะได้ Pearlite มาก Martensite น้อย จนในที่สุดจะได้ Pearlite 100 % เมื่อ Soaking จนได้ Pearlite 100% แล้วและยังคง Soaking ต่อไป Pearlite ที่ได้ก็จะเกิด Grain Growth ทำให้เสีย Mechanical Properties ดังนั้นเมื่อ Soaking จนได้ 100% Pearlite แล้วจะต้องลด Temp ลงทันที

นำเอาผลของปริมาณ Pearlite ที่ได้จากการ Soaking ใน Lead Bath ณ Temp หนึ่ง มา Plots แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ Soaking กับปริมาณของ Pearlite จะได้ Diagram ดังนี้

จาก Diagram การเกิด Pearlite จะเห็นว่า t_1 คือ Incubation Time คือกำลังจะเริ่มเกิด Pearlite เมื่อทำการ Soaking Specimens ใน Lead Bath ที่ 560 C^0 ในระยะเวลา 12 ก็จะได้ 50 % ในระยะเวลา t_2 ก็จะได้ 50% Pearlite และถ้าใช้เวลาในการ Soaking ถึง t_3 ก็จะได้ 100% Pearlite ระยะเวลาจาก $t_1 - t_3$ คือระยะเวลาจากเริ่มเกิด Pearlite จนได้ 100%

การ Quench Austenite Specimens มายัง Temp ต่ำกว่า $723\text{ C}^0 -$ สูงกว่า 550 C^0 นั้นจะมีผลต่อระยะเวลาของการเปลี่ยนแปลงจาก Retained Austenite กล่าวคือถ้า Lead Bath มี Temp สูงการเปลี่ยนแปลงจะช้า ถ้า Lead Bath มี Temp ใกล้เคียง 550 C^0 ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น Pearlite ง่ายขึ้นหรือเร็วขึ้น ดัง Diagram

เมื่อนำเอาผลของการเปลี่ยนแปลงของการ Quench Austenite Specimens ณ Temp ต่างๆ มา Plots โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Temp ก็จะได้ T.T.T. Curve ในช่วงของ Pearlite ดังนี้

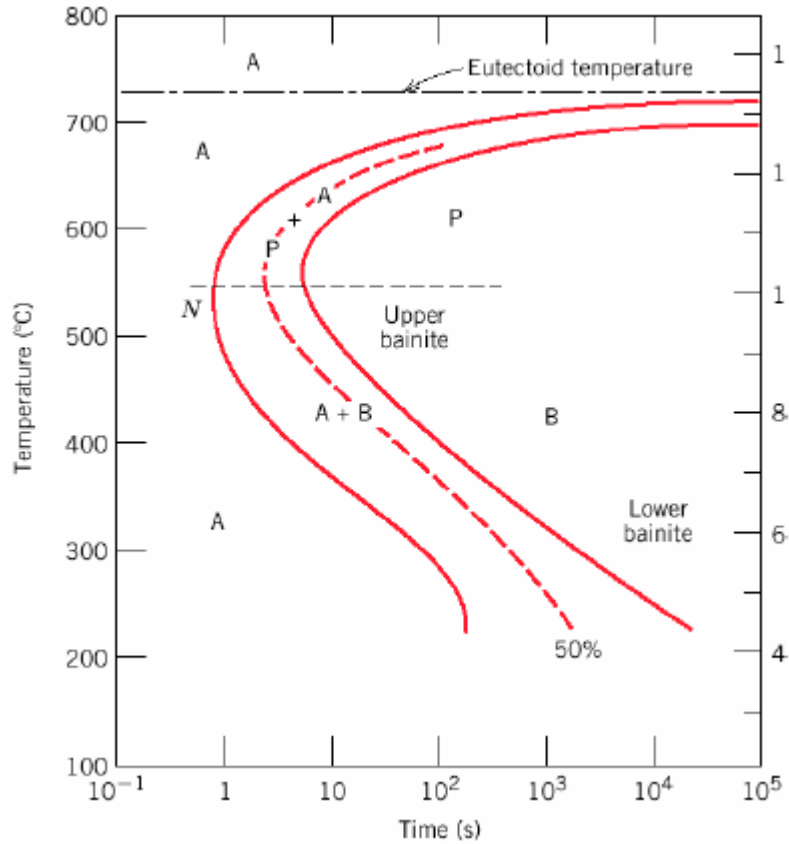
จาก Diagram ที่ 550 C^0 ลากเส้น ab ขนานกับแกน X Project Pearlite ($t_{s_{550}}$) และ Pearlite Finish ($t_{f_{550}}$) จาก Diagram แสดงการเกิด Pearlite ที่ Temp ต่างๆ ไปตัดกับเส้น ab ที่ M และ N ตามลำดับ ก็จะได้จุด Pearlite Start และ Finish

เมื่อ Quench Austenite Specimens มาที่ 550 C° ที่จุด M และ N ตามลำดับ จุด Pearlite Start และ Finish ที่ Temp 650 C° หรือ 750 C° หรือ Temp ต่างระหว่าง $550 - 723\text{ C}^{\circ}$ ก็สามารถหาตำแหน่งได้เช่นกัน จากนั้นก็โยง Curve MOQ ก็จะได้ Curve ที่เรียกว่า Pearlite Started Curve และเมื่อโยง NPR ก็จะได้ Pearlite Finished Curve ดังนั้นก็จะได้ Phases ต่างๆ ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ Austenitic Eutectoid Steel เมื่อถูก Quench มาใน Lead Bath ในช่วง Temp ระหว่างต่ำกว่า 723 C° – สูงกว่า 550 C°

สรุปผลการเกิด Pearlite

1. เกิดจาก Austenitic Steel Quench มาใน Lead Bath ที่ Temp ระหว่างต่ำกว่า 723 C° – สูงกว่า 550 C°
2. ต้องใช้ระยะพักตัว (Incubation Time)
3. ต้องใช้ระยะเวลาจากเริ่มเกิดจนได้ 100%
4. Pearlite ที่เกิดที่ Temp ต่ำจะใช้ระยะเวลาพักตัวและระยะเวลาเริ่มเกิดจนได้ 100% สั้น
5. Pearlite ที่เกิดที่ Temp สูง จะใช้ระยะเวลาพักตัวและระยะเวลาเริ่มเกิดจนได้ 100% ยาว
6. Pearlite ที่เกิดที่ Temp ต่ำจะมี Mechanical Properties สูง

7.2.3 Bainite เป็นโครงสร้างที่เกิดจาก Austenite ถูก Quench มาที่ Temp ต่ำกว่า 550 C° – สูงกว่า 230 C° Bainite จะประกอบด้วย $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ จะมีลักษณะคล้าย Pearlite เฉพาะ Bainite ที่เกิดที่ Temp สูง (ใกล้ 550 C°) เรียกว่า “Upper Bainite” ส่วน Bainite ที่เกิดที่ Temp ต่ำ (ใกล้ 230 C°) จะมีลักษณะคล้าย Martensite เรียกว่า “Lower Bainite” ลักษณะการเกิด Bainite จะเกิดการ Form ตัวของ α ก่อน เนื่องจาก Rate Cooling สูงกว่า Pearlite ซึ่งมีลักษณะดังนี้



ภาพที่ 7.10 ลักษณะการเกิด Bainite

จากภาพเมื่อ Quench γ มายังช่วง Temp ระหว่าง Temp ที่ต่ำกว่า $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Temp สูงกว่า $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะเกิด Ferrite ขึ้นที่ Grain Boundaries และ Ferrite จะขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยดึง Carbon ออกทางด้านข้างทำให้ด้านข้างๆ จะเป็น Retained γ ที่มี Carbon ผสมอยู่มากเกินพอ เมื่อบริเวณนี้ใช้เวลาในการ Soaking นานเข้า Retained γ ก็จะเปลี่ยนเป็น Ferrite (Fe) โดย Fe ก็จะรวมตัวกับ C ได้ Fe_3C ซึ่งการขยายตัวของ α ที่พุ่งเข้าสู่ใจกลางของ γ - Grains ก็จะทำให้เกิดการรวมตัวเป็น Fe_3C อีก ซึ่งจะกระทำเช่นนี้ต่อไปจน Retained γ เปลี่ยนเป็น Bainite จนหมดสิ้น

การสร้าง T.T.T. Curve ในช่วงของ Bainite มีลักษณะคล้ายๆกับ Pearlite เพียงแต่ Temp ที่ทำการ Quench Austenitic Specimens จะอยู่ในช่วง Temp ต่ำกว่า $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ - สูงกว่า $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งถ้าต้องการวิเคราะห์ Lower Bainite จะต้องใช้ Salt Bath เป็น Quenching Media แทน Lead Bath ซึ่งมีจะได้ลักษณะ Diagram ดังนี้

สรุปผลของการเกิด Bainite

1. เกิดจาก Austenitic Steel Quench มาใน Salt Bath ในช่วง Temp ต่ำกว่า 550 C^0 - สูงกว่า 230 C^0
2. ต้องใช้ Incubation Time
3. ต้องใช้ เวลาเริ่มเกิดจนได้ 100%
4. Bainite ที่เกิดที่ Temp สูง (ใกล้ 550 C^0) จะใช้ Incubation Time และระยะเวลาเริ่มเกิดจนได้ Bainite 100 % สั้น
5. Bainite ที่เกิดที่ Temp ต่ำ (ใกล้ 230 C^0) จะใช้ Incubation Time และระยะเวลาเริ่มเกิดจนได้ Bainite 100 % ยาว
6. Bainite ที่เกิดที่ Temp ต่ำจะมี Mechanical properties สูงกว่า Bainite ที่เกิดที่ Temp สูง

7.3.3 Martensite (M.S) เกิดจากการ Quench Austenite Steel มาที่ Temp ที่ต่ำกว่า 230 C^0 ด้วยอัตราการเย็นตัว (Rate of Cooling) ที่สูง ๆ การเกิด Martensite จะมากหรือน้อยใน Micro Structure ขึ้นอยู่กับ

7.3.1 เปอร์เซนต์ Carbon เนื่องจาก Martensite เป็นโครงสร้าง Interstitial Solid Solution ในภาพของ Base – centered Tetragonal โดยมี Carbon แทรกอยู่ระหว่างอะตอมของ Fe ซึ่งถ้าหากมี Carbon ผสมในเหล็กน้อยจะทำให้เกิด MS น้อยหรือไม่เกิดเลย

7.2.2 อัตราการเย็นตัว (Rate of Cooling) ถ้า Austenitic Steel ถูก Quench มาที่ Room Temp โดยใช้อากาศเย็น Quenching Media จะไม่เกิด M.S ขึ้นได้เลยเพราะอากาศดูดความร้อนออกจาก Austenitic Steel ได้ช้า หรือเป็นตัวกลางที่ทำให้ Rate of Cooling ต่ำ แต่ถ้านำเอา Austenitic Steel Quench ใน Brine Solution (Liq. NaCl) ที่ Room Temp เช่นกัน ก็จะทำให้เกิด M.S ขึ้น 100% เพราะ Brine Solution ดูดความร้อนออกจาก Austenitic Steel ได้อย่างรวดเร็ว กล่าวคือใช้เวลาเพียงเสี้ยววินาทีที่ Austenitic Steel ก็จะลด Temp จาก $723\text{ C}^0 + 50\text{ C}^0$ มาต่ำกว่า 150 C^0 จึงไม่สามารถเปลี่ยนเป็น Pearlite หรือ Bainite ได้ ปกติการที่เราจะให้วัสดุมีอัตราเย็นตัวสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ Quenching Media ดังต่อไปนี้ ซึ่งเรียงจาก Rate of Cooling ต่ำไปสูงไปตามลำดับ อากาศ, น้ำมัน, น้ำ 10% NaCl Solution และ 5% NaOH Solution

7.3.3 พื้นที่หน้าตัด (Cross – Sectional Area) ชิ้น Specimen ที่มีขนาดโตเมื่อถูก Quench จะทำให้ภายในมี Rate of Cooling ต่ำ จึงมีเวลาพอที่จะทำให้เกิด Pearlite หรือ Bainite ได้ ส่วนภายนอกมี Rate of Cooling สูง ก็จะเกิด M.S ดังนั้นชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่จะ

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

