

	แผนการสอน	รหัสรายวิชา 01-440-308	
		บทเรียนที่	53
	แผนภาพ TTT	เวลา	150 นาที

- จุดประสงค์** 531 อ่านความหมายที่ปรากฏบนแผนภาพ TTT ได้
 532 จำแนกประเภทของเส้นโค้งบนแผนภาพ TTT
 533 เลือกใช้แผนภาพวิเคราะห์การอบชุบโลหะด้วยความร้อน

แผนภาพการเปลี่ยนเฟสที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิ

(Time-Temperature Transformation diagram, TTT-curve)

การที่เหล็กกล้าเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถใช้เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์บรรยายลักษณะโครงสร้างของผลึกได้ การเปลี่ยนรูปโครงสร้างของออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์หรือเพิร์ลไลต์ หรือโครงสร้างใหม่เช่น มาร์เทนไซต์, เบนไนต์ (Bainite - เพิร์ลไลต์ที่ละเอียด) หรือซอร์ไบต์ (Sorbite - เพิร์ลไลต์ที่ละเอียดมาก) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา การที่ออสเทนไนต์จะเปลี่ยนโครงสร้างที่อุณหภูมิและเวลาใดนั้น สามารถอ่านได้จาก TTT curve

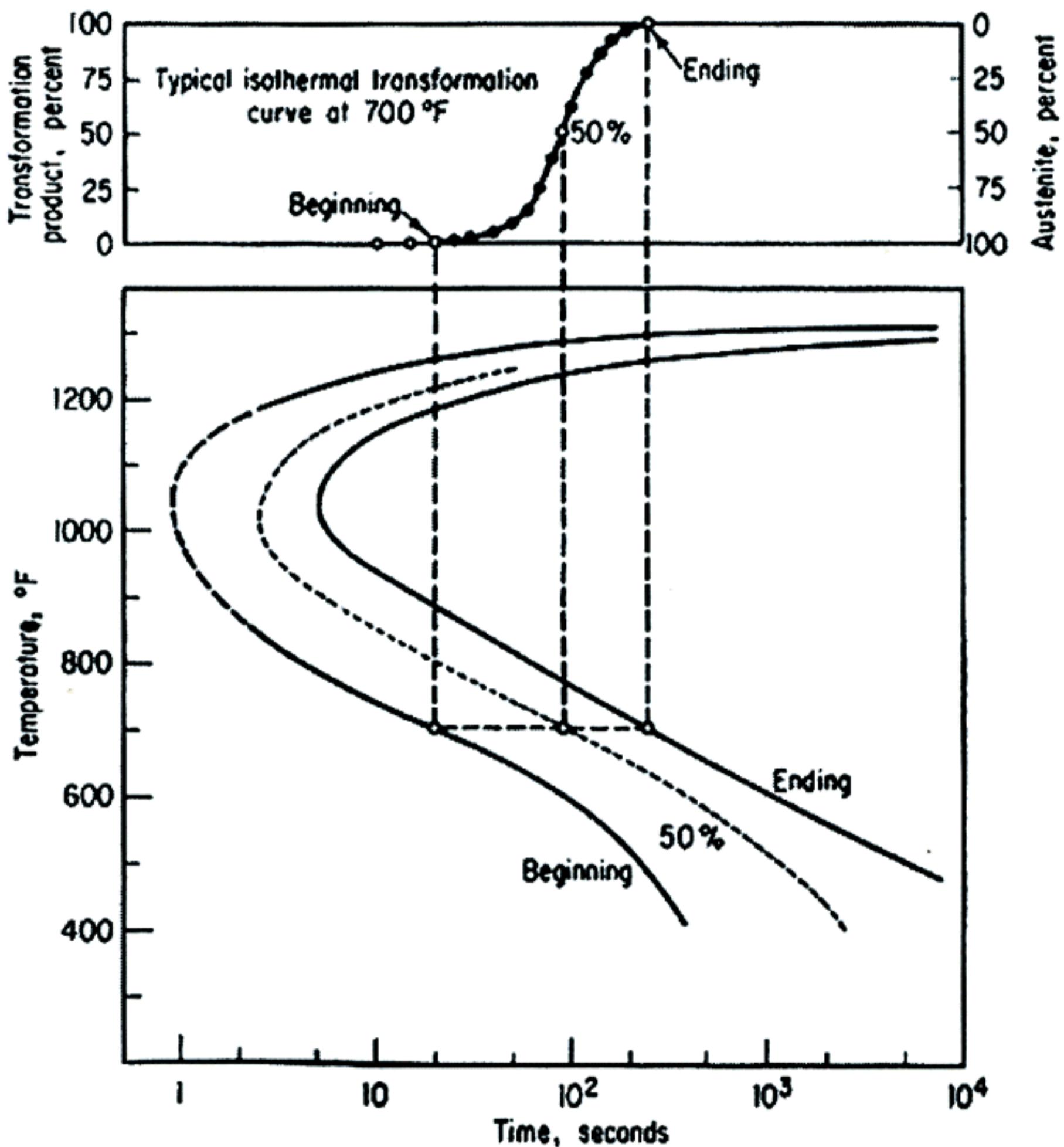
วิธีสร้าง TTT curve

1. นำเหล็กกล้าที่ต้องการหา TTT curve มาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ จำนวนหลาย ๆ ชิ้น เผาอบในเตาจนมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์
2. นำเหล็กกล้าทุกชิ้นออกจากเตาไปใส่ในเตาที่ 2 มีอุณหภูมิกงที่หรือใส่ลงในอ่างโลหะหลอมเหลว (Metal bath) ที่อุณหภูมิกงที่ T_1
3. ปล่อยให้เหล็กแต่ละชิ้นอยู่ที่อุณหภูมินี้โดยใช้เวลาแตกต่างกัน
4. จากนั้นเอาเหล็กกล้าแต่ละชิ้นออกจากเตาหรืออ่างโลหะจุ่มลงไปใต้น้ำ หรือน้ำเกลือแช่เย็น หรือให้เย็นในอากาศ
5. เมื่อเหล็กเย็นตัวดีแล้ว ทดสอบความแข็งของแต่ละชิ้น และตรวจดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์หรือตรวจดูด้วยวิธี x-ray diffraction ดูว่าเปอร์เซ็นต์ของออสเทนไนต์เปลี่ยนไปมากน้อยเพียงใด

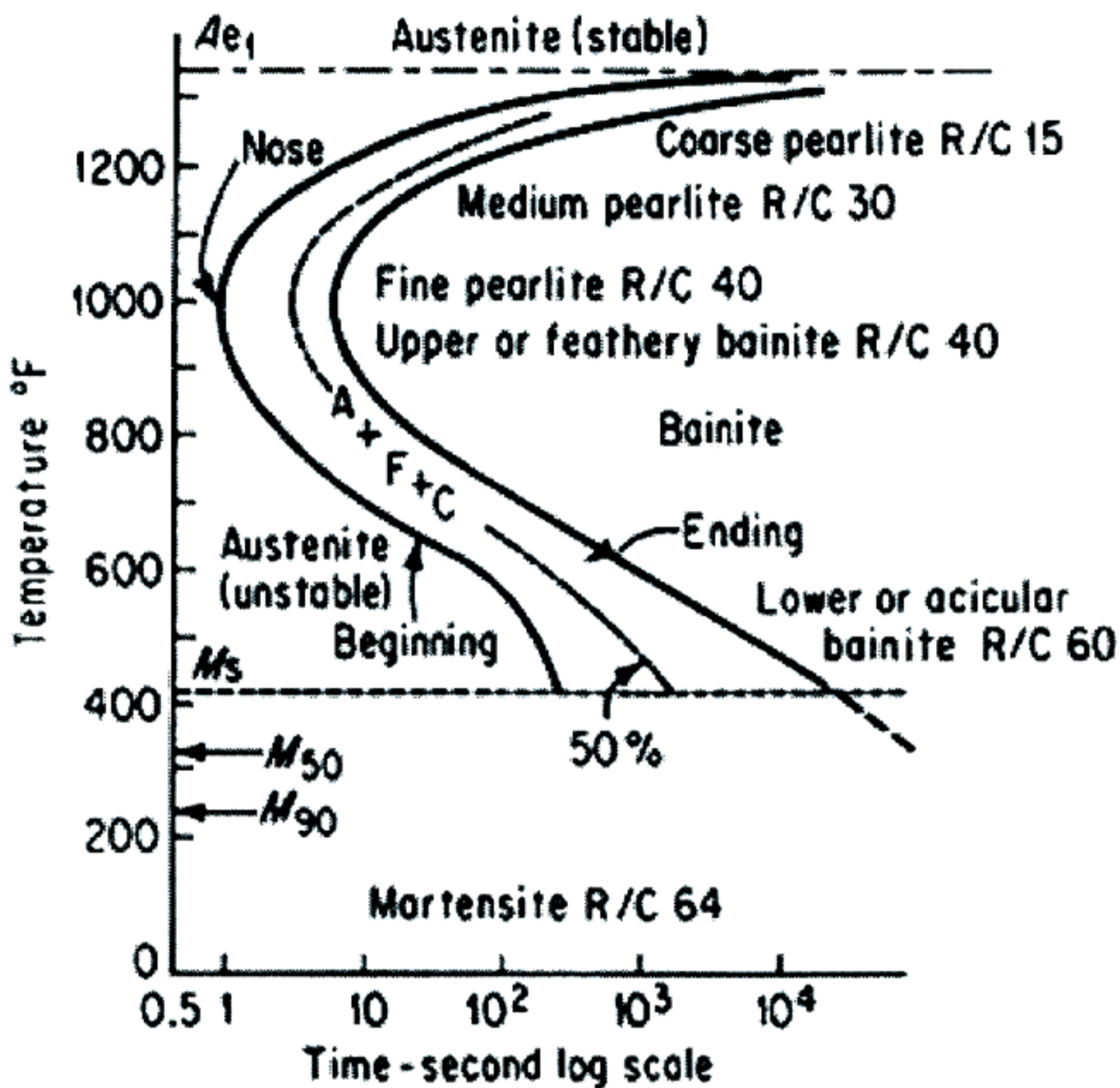
สมมติว่าที่อุณหภูมิ T_1 ชิ้นเหล็กกล้าแต่ละชิ้นใช้เวลาต่างกันและการเปลี่ยนปริมาณของออสเทนไนต์เป็นดังนี้

เวลา	% ออสเทนไนท์ที่เปลี่ยนไป
t_0	0
t_1	y_1
t_2	y_2
...	...
...	...
t_n	y_n

นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟจะได้ค่าเวลาที่เริ่มมี การเปลี่ยนโครงสร้างออสเทนไนท์ t_s และเวลาที่ออสเทนไนท์เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจนหมด t_f เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะคล้ายตัว S จึงเรียกว่า S curve ทำการทดลองเช่นนี้ซ้ำกันแต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่คงที่เป็นค่าอื่น ๆ จะได้ค่า t_s และ t_f ของแต่ละอุณหภูมิ นำค่า t_s และ t_f ไปเขียนกราฟอีกชุดหนึ่ง เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างออสเทนไนท์ที่สัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิ



ภาพ การเปลี่ยนแปลงแบบอุณหภูมิคงที่บนเส้นกราฟ TTT ของเหล็กกล้า



ภาพ ไดอะแกรมการเปลี่ยนโครงสร้างแบบอุณหภูมิคงที่ ของเหล็กกล้าหมายเลข 1080

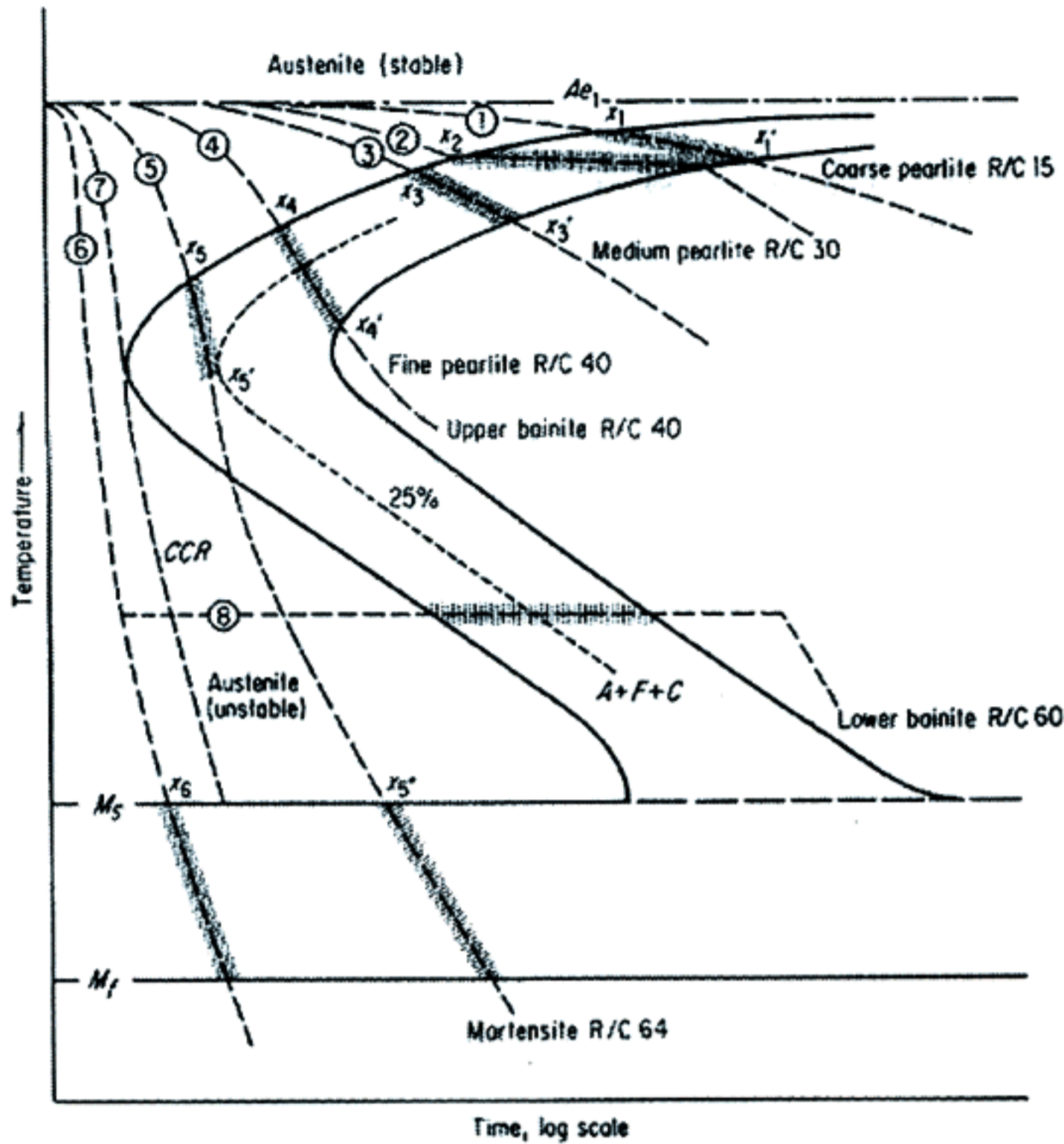
บริเวณเหนือเส้น A_{e1} เป็นออสเทนไนท์ที่เสถียร ทางซ้ายมือของเส้นที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นส่วนที่เกิดออสเทนไนท์ที่ไม่เสถียร บริเวณทางขวามือเป็นเส้นแสดงสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงและเกิดโครงสร้างใหม่ ส่วนที่ยื่นไปทางซ้ายมือสุดของไดอะแกรม เรียกว่า จมูก (Nose) ของไดอะแกรม

เส้น M_s ซึ่งเป็นเส้นในแนวระดับและมีลูกศรชี้ที่อุณหภูมิ หมายความว่า ตรงจุดออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์(เมื่อถูกชุบแล้ว) คิดปริมาณ 50 % และ 90% ของออสเทนไนท์ทั้งหมด เส้น M_s นี้เป็นเส้นขนานตรงกับแกน x แสดงว่า การเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ไม่ขึ้นกับเวลา

การนำแผนภาพ TTT ไปใช้งาน

โลหะที่ถูกกระทำ heat treatment จะมีโครงสร้างลักษณะใดนั้น กระทำได้โดยลากเส้นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (cooling curve) แล้วตรวจดูว่าเส้นกราฟ cooling curve ผ่าน TTT curve ตรงบริเวณใด ก็จะได้โครงสร้างออกมาตรงบริเวณนั้น

ตัวอย่างการนำ cooling curve ที่เกิดจาก heat treatment มาหาโครงสร้างของโลหะ โดยอาศัย TTT curve



ภาพ แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวหลายเส้นที่เขียนขึ้นบน TTT ไดอะแกรมของเหล็กกล้าผสมยูเทคตอย บริเวณแรเงาคือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

กราฟเส้นที่ 1 เป็น cooling curve ที่ได้จากการ full annealing ทำได้โดยเผาเหล็กกล้าให้มีอุณหภูมิสูงกว่า A_1 เล็กน้อย เพื่อให้คาร์บอนละลายในเหล็กหมดแล้วเปลี่ยนรูปเป็นออสเทนไนท์ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ประมาณ $18 - 36^\circ \text{F} / \text{ชั่วโมง}$ ($30 - 20^\circ \text{C} / \text{ชม}$) จนกระทั่งอุณหภูมิของเหล็กเหลือประมาณ $1150 - 1050^\circ \text{F}$ จึงปล่อยให้เย็นในอากาศ จากเส้นกราฟจะเห็นว่าอัตราการเย็นตัวช้ามาก เวลาที่ใช้ยาวมาก การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจะเกิดขึ้นเมื่อผ่านจุด x_1 โครงสร้างจะเป็นเพอร์ไลต์อย่างหยาบ (coarse pearlite) การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุด x_1' จะเห็นว่าอุณหภูมิที่เกิดระหว่างเส้นเริ่มต้นกับเส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงนั้นต่างกันเล็กน้อย ผลของความแตกต่างของเพอร์ไลต์คอนเริ่มเกิดและคอนสิ้นสุดจะไม่ต่างกัน โครงสร้างทั้งหมดจึงเป็นเพอร์ไลต์อย่างหยาบที่มีความแข็งต่ำมาก ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุด x_1' การเย็นตัวจะไม่มีผลต่อโครงสร้างหรือสมบัติเชิงกลอีก ซึ่งเป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติจะไม่ต้องเสียเวลากับการปล่อยให้เหล็กอยู่ในเตาไฟ

กราฟเส้นที่ 2 เป็น cooling curve ที่ได้จากการ isothermal annealing วิธีการคือทำให้เหล็กร้อนเหนือเส้นอุณหภูมิวิกฤติบน แล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนถึงจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (x_2) แล้วให้อุณหภูมิคงที่ในช่วงนี้ (isothermal) จนการเปลี่ยนโครงสร้างเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จึงปล่อยให้เย็นตัวอีกครั้งหนึ่ง กรณีนี้จะได้โครงสร้างเพอร์ไลต์ที่มีความแข็งสูงกว่าการอบอ่อนเต็มที่ เล็กน้อย

กราฟเส้นที่ 3 เป็น cooling curve ที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าการ annealing ซึ่งพบได้ในการอบคลายคืนสภาพ (Normalizing) โดยการปล่อยเหล็กกล้าให้เย็นในอากาศภายหลังที่ให้ความร้อนจนอุณหภูมิเท่ากันหมดทั้งก้อนแล้ว จะเห็นว่าเส้นกราฟผ่านช่วงที่เป็นเพอร์ไลต์ที่ค่อนข้างละเอียด เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนโครงสร้างจะน้อยกว่าเส้นที่ 1 และ 2

กราฟเส้นที่ 4 วิธีการเหมือนเส้นที่ 3 แต่จุ่มโลหะให้เย็นตัวในน้ำมัน จะได้โครงสร้างเป็นเพอร์ไลต์ขนาดกลางและอย่างละเอียดผสมกัน

กราฟเส้นที่ 5 ที่จุด x_5 โครงสร้างจะเป็นเพอร์ไลต์ที่ละเอียดและเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ และเพอร์ไลต์ละเอียดจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง cooling curve สัมผัสกับเส้นที่เปลี่ยนโครงสร้างตรงกลางคือ 25 % ที่จุด x'_5 หมายความว่าเกิดการเกิดเพอร์ไลต์จะสิ้นสุดลง นั่นคือจะมีเพอร์ไลต์ละเอียดเพียง 25 % มีลักษณะเป็นก้อนถูกล้อมรอบโดยออสเทนไนต์ เมื่อ cooling curve เย็นตัวมาถึงเส้น M_s ที่จุด x''_5 ออสเทนไนต์ที่เหลือจะกลายเป็นมาร์เทนไซต์

กราฟเส้นที่ 6 เป็นการ quenching อย่างรวดเร็ว cooling curve จะตัดที่จุด M_s ที่ x_6 หมายถึง ออสเทนไนต์เริ่มเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ และสิ้นสุดการเป็นมาร์เทนไซต์ที่ M_f โครงสร้างจะเป็นมาร์เทนไซต์ทั้งหมด มีความแข็งแรงสูงมาก

กราฟเส้นที่ 7 เส้นกราฟสัมผัสกับ nose แล้วผ่านที่ M_s และ M_f เลย เส้นกราฟเส้นนี้เป็นเส้นแรกที่ทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ทั้งหมด เรียกกราฟเส้นนี้ว่า มีอัตราการเย็นตัววิกฤต (critical cooling Rate, CCR)

จะเห็นว่าถ้าเราต้องการให้เหล็กมีโครงสร้างชนิดใด ก็สามารถทำได้โดยควบคุม cooling curve ให้ผ่านส่วนต่าง ๆ ของ TTT curve

วิธีสอนและกิจกรรม	บรรยาย ชักถาม และคำนวณ	
สื่อการสอน	หนังสืออ้างอิง	18
	เอกสารประกอบ	เอกสาร โรเนียว
	วัสดุโสตทัศน	แผ่นใส และแผนภาพ TTT
งานที่มอบหมาย	ทดสอบการสร้างแผนภาพ TTT	
การวัดผล	ตรวจสอบความถูกต้อง	

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	ตารางธาตุ)ไทย1) 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	

