

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำหลังการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง โดยใช้แบบจำลอง
เชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง



นาย วิศรุต พรหมทอง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1087-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NUMERICAL MODELING STUDY ON MICROSTRUCTURE OF LOW ALLOY STEELS AFTER
CONTINUOUS COOLING USING THE CCT DIAGRAM



Mr. Visaruth Promthong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1087-9

วิศรุต พรหมทอง : การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำหลังการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (NUMERICAL MODELING STUDY ON MICROSTRUCTURE OF LOW ALLOY STEELS AFTER CONTINUOUS COOLING USING THE CCT DIAGRAM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, 51 หน้า. ISBN 974-17-1087-9.

การทำนายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำหลังการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขหรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปมีชื่อว่า โปรแคส (Procast) ในการคำนวณหาเส้นโค้งการเย็นตัว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานทดสอบ 3 แห่ง แล้วใช้ร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (CCT Diagram) เปรียบเทียบกับการทดลองจริง ซึ่งใช้หวััดคู่ความร้อนในการหาเส้นโค้งการเย็นตัวของชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ 3 แห่งของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน

ผลการวิจัยพบว่าการทำนายโครงสร้างจุลภาคโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขให้ผลการทดลองใกล้เคียงกับการทดลองจริงโดยที่โครงสร้างเกือบทั้งหมดเป็นมาร์เทนไซต์ที่เหลือเป็นเบนไนต์และเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์ นอกจากนี้จากการทดสอบความแข็งยังยืนยันได้ว่าโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วยมาร์เทนไซต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170671821 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : FINITE ELEMENT MODELING / CONTINUOUS COOLING TEMPERATURE /
PROCAST

VISARUTH PROMTHONG: NUMERICAL MODELING STUDY ON MICROSTRUCTURE
OF LOW ALLOY STEELS AFTER CONTINUOUS COOLING USING THE CCT DIAGRAM.

THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SUMALEE VONGCHAN, Ph.D. THESIS CO-

ADVISOR : SUVANCHAI PONGSUGITWAT, 51 pp. ISBN 974-17-1087-9.

A finite element modeling code name Procast together with CCT Diagram were used to predict microstructure of low alloy steels. In the mean time, microstructures of alloys were also obtained from the experiment. Thermocouple were used to manipulate a cooling curve of thus various point of the alloys which were quenched in oil baths.

The results shown that the microstructure obtained from both methods were nearly similar. Most of the microstructures show martensite phase, the remaining were bainite, ferrite and carbide phase. Hardness measurements were made to confirm the existing of martensitic phase.



DepartmentMetallurgical Engineering..... Student's signature.....

Field of study.....Metallurgical Engineering... Advisor's signature.....

Academic year2002..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากการช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ และอาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจ วัฒนีย์ เป็นอย่างสูงสำหรับการอุทิศตน และสละเวลาอันมีค่าของพวกท่านในการอบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ตลอดจนให้กำลังใจ และคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งในด้านการเรียน และการทำงานด้วยความเมตตา ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล เตี้ยวณิชย์ ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ขอขอบคุณ คุณวันทนีย์ พุกกะคุปต์ คุณมานิดา ทองรุ่ง คุณปิยะ แก้วนพรัตน์ คุณสุดสาคร อินธิเดช ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่สละเวลาและแรงงานช่วยเหลือในการทำงานเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ คุณ เสนีย์ มณีเพชร คุณ วิภา ชลังธรรม เนียม ที่เสียสละเวลาในการให้ข้อมูลและช่วยในการทดลองอย่างเต็มที่ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ข้าพเจ้ามิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ครอบครัวและบุคคลอันเป็นที่รักที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนทางการศึกษาตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ปรีทรรคนั้ววรรณกรรม	3
2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	3
2.2 การชุบแข็ง (Hardening).....	10
2.2.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างการชุบแข็ง	10
2.2.2 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงขณะเกิดการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cooling Transformation Diagram)	10
2.2.3 สารชุบหรือตัวกลาง (Quenching Media)	12
3. การทดลอง	15
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	15
3.3 การทดสอบหาเส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง.....	17
3.4 การคำนวณหาเส้นโค้งการเย็นตัวโดยใช้โปรแกรม Procast.....	18
3.5 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์.....	18
3.6 วิธีการทำนายโครงสร้างจุลภาคโดยสังเขป	18
3.7 การทดสอบความแข็ง	19

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง	20
4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ	20
4.1.1 สภาพจำหน่าย	20
4.1.2 สภาพชุบแข็ง	20
4.2 อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความแข็ง.....	25
4.3 เส้นโค้งการเย็นตัวของเหล็กแต่ละชนิด	26
4.4 การทำนายโครงสร้างจุลภาค	31
5. สรุปผลการทดลอง	38
รายการอ้างอิง	39
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	41
ภาคผนวก ข ค่าต่างๆที่ได้จากฐานข้อมูลจากโปรแกรม Procast	45
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ.....	16
3.2	สภาพจำหน่ายของชิ้นงานทดสอบ	16
4.1	แสดงค่าความแข็งของเหล็กแต่ละเกรดในสภาวะก่อนชุบแข็งและหลัง ชุบแข็ง.....	26



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์	4
2.2	แสดงลักษณะของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า	9
2.3	ลักษณะแผนภูมิ CCT ของเหล็กที่มีคาร์บอนร้อยละ0.38แมงกานีสร้อยละ 0.70....	11
3.1	แสดงกรรมวิธีทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ.....	17
3.2	แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Thermocouple.....	17
3.3	ภาพแสดงแบบจำลองรูปครึ่งทรงกระบอก.....	18
4.1	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบในสภาพจำหน่าย	21
4.2	แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆของเหล็กเกรด 4140 ภายหลังจากชุบแข็ง....	22
4.3	แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆของเหล็กเกรด 4340 ภายหลังจากชุบแข็ง...	23
4.4	แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆของเหล็กเกรด 52100 ภายหลังจากชุบแข็ง..	24
4.5	แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองและแบบจำลองเชิงตัวเลข ของเหล็กเกรด 4140	28
4.6	แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองและแบบจำลองเชิงตัวเลข ของเหล็กเกรด 4340.....	29
4.7	แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองและแบบจำลองเชิงตัวเลข ของเหล็กเกรด 52100.....	30
4.8.1	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัว อย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4140.....	32
4.8.2	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัว อย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4140 โดยในรูปเป็นเส้นโค้งการเย็นตัวบริเวณระหว่าง แกนกลางชิ้นงานกับผิวชิ้นงาน ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่ แสดงในรูปที่4.2 (B) และ (C)	32
4.9	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากการทดลองร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อ เนื่องของเหล็กเกรด4140.....	33
4.10.1	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็น ตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4340.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.10.2	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4340 โดยในรูปเป็นเส้นโค้งการเย็นตัวบริเวณระหว่างแกนกลางชิ้นงานกับผิวชิ้นงาน ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 4.3 (B) และ (C).....	34
4.11	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากการทดลองร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4340.....	35
4.12.1	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 52100.....	36
4.12.2	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4340 โดยในรูปเป็นเส้นโค้งการเย็นตัวบริเวณระหว่างแกนกลางชิ้นงานกับผิวชิ้นงาน ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 4.3 (B) และ (C)	36
4.13	แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากการทดลองร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 52100.....	37
ก-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากการทดลองของเหล็กเกรด AISI 4140.....	41
ก-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากมาตรฐาน.....	41
ก-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากการทดลองของเหล็กเกรด AISI 4340.....	42
ก-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากมาตรฐาน.....	42
ก-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากการทดลองของเหล็กเกรด AISI 52100.....	43
ก-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากมาตรฐาน.....	43
ข-1	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของเหล็กเกรด 1040.....	45
ข-2	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของเหล็กเกรด 5132....	46
ข-3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับอุณหภูมิของเหล็กเกรด 1040.....	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข-4	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับคุณสมบัติของเหล็กเกรด 5132.....	48
ข-5	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับคุณสมบัติของเหล็กเกรด 1040.....	49
ข-6	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับคุณสมบัติของเหล็กเกรด 5132.....	50



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันวิทยาการทางด้านคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทเกือบทุกสาขาวิชา ในต่างประเทศ มีการนำความรู้ทางด้านกรคำนวณเชิงตัวเลขมาประกอบกับวิทยาการทางด้านคอมพิวเตอร์ สร้างเป็นแบบจำลองของกระบวนการต่าง ๆ ในหลายสาขาวิชา รวมทั้งทางด้าน โลหวิทยาด้วย เช่น โปรแกรมคำนวณด้านงานหล่อ การคำนวณอุณหภูมิ ภายในเตาหลอมโลหะ การขึ้นรูปต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้ทางด้านอุตสาหกรรมก็มีการนำโปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้ด้วย สำหรับประเทศไทย ความรู้เกี่ยวกับการคำนวณเชิงตัวเลข ยังจำกัดอยู่ในวงการศึกษา และในหน่วยงานเอกชนขนาดใหญ่เท่านั้น

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วิธีการหนึ่งที่ใช้ในปัจจุบัน คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีในการคำนวณที่ให้ผลในการคำนวณค่อนข้างแม่นยำ และได้มีการนำวิธีการนี้มาใช้สร้างเป็นโปรแกรมแบบจำลองทางตัวเลข ทางคอมพิวเตอร์ ดังจะเห็นได้จาก รายงานของงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้วิธีการนี้ ทางด้านงานวิจัยในอนาคตมีแนวโน้มที่จะใช้โปรแกรมการคำนวณทางด้านเชิงตัวเลขมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติที่เหมาะสมของวิธีการคำนวณ ประกอบกับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีมากขึ้นทุกวัน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของอุณหภูมิของเหล็กกล้าผสมต่ำเมื่อเวลาเปลี่ยนไปในระหว่างกระบวนการ Quenching

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ โครงสร้างที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทดลองจริงโดยวิธี Quenching

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สร้างแบบจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อหาการกระจายของอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ของเหล็กกล้าผสมต่ำ SAE 52100 steel, AISI 4140, AISI 4340

1.3.2 ทำนายโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นหลังจากการ Quench โดยใช้น้ำมันเป็นสารชุบ โดยใช้ข้อมูลเส้นโค้งการเย็นตัวที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (CCT-Diagram) ช่วยในการทำนาย

1.3.3 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากแบบจำลองกับโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทดลองจริง โดยกระบวนการ Quenching ที่ใช้น้ำมันเป็นสารชุบของเหล็กกล้าผสมต่ำ ทั้ง 3 เกรด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทำนายลักษณะโครงสร้างจุลภาค ของเหล็กกล้าผสมต่ำ รูปทรงต่างๆที่ผ่านการอบชุบทางความร้อนได้

1.4.2 สามารถดัดแปลง ปรับปรุงแบบจำลองนี้ ไปใช้ในการพิจารณาเลือกสารชุบที่เหมาะสม

1.4.3 เป็นงานวิจัยพื้นฐาน และเป็นตัวอย่างในการจำลองกระบวนการ Quenching ซึ่งสามารถนำไปปรับปรุงพัฒนา สร้างเป็นแบบจำลองในงานที่มีลักษณะคล้ายกันได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

ปัญหาทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ต่าง ๆ ที่สอดคล้องกัน สมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้ โดยปกติอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณหาลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลาบนชิ้นงานเหล็ก ที่ปล่อยให้มีการเย็นตัวในวิธีต่าง ๆ กัน การคำนวณในลักษณะนี้ ก็จำเป็นต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งอธิบายสมมูลของการถ่ายเทความร้อนตามตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงาน

โดยทั่วไปแล้ว สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้สามารถประดิษฐ์ขึ้นมาได้โดยไม่ยากนัก การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ ปกติแล้วจะทำโดย

(1) การใช้ระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง (Advanced Mathematics) เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง

(2) การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) แต่ผลเฉลยแม่นยำตรงที่ต้องการ และจำเป็นต้องหาจากสมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้ ทำได้โดยลำบากหรืออาจหาไม่ได้เลย โดยเฉพาะปัญหาทางปฏิบัติในปัจจุบันที่มีเงื่อนไข ขอบเขต และลักษณะรูปแบบของปัญหานั้น มีความซับซ้อน ความซับซ้อนในลักษณะรูปแบบของปัญหาดังกล่าว ประกอบกับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ทำให้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความนิยมและใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

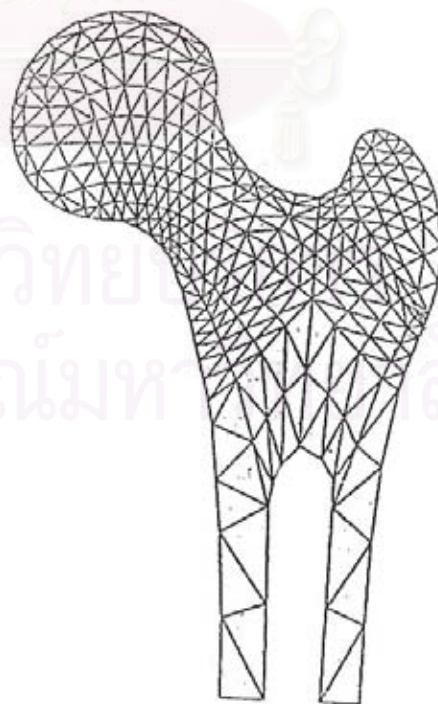
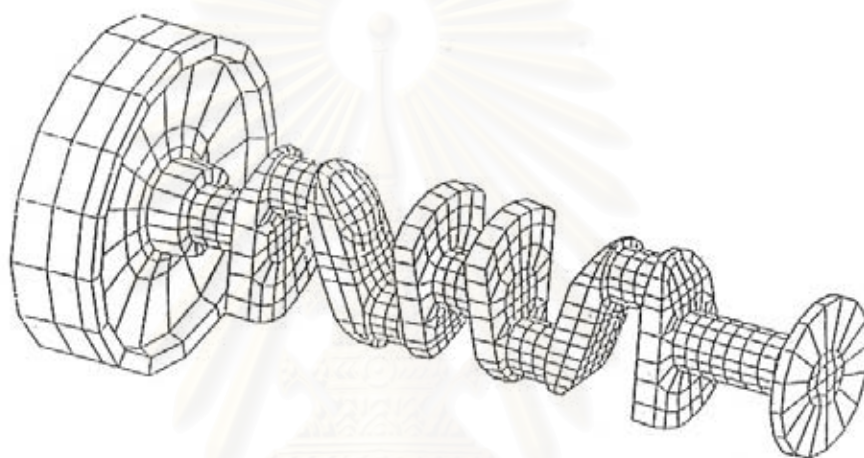
2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดมาให้ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่มีขนาดต่าง ๆ กัน และเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ของรูปร่างปัญหานั้น แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำ ซึ่งปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ก็จะเปลี่ยนค่าแม่นยำทั้งหมด ที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็น เอลิเมนต์ (element) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กันดังรูปที่ 2.1

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เป็นระเบียบวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximated Solution) ซึ่งมีลำดับขั้นตอน ดังนี้

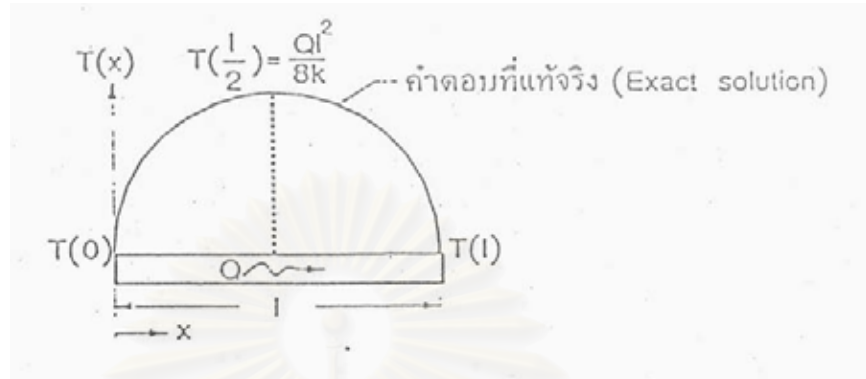
1. หาสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้นที่เหมาะสมกับปัญหา รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม

2. แบ่งรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ออกเป็นเอลิเมนต์
3. กำหนดลักษณะผลลัพธ์ในเอลิเมนต์ให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันโดยประมาณอย่างง่าย
4. ทำการพิจารณาทีละเอลิเมนต์ โดยการแทนฟังก์ชันนี้ในสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้น และอาศัยคณิตศาสตร์ขั้นสูงช่วยจัดการสมการให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์จนเป็นสมการสำหรับเอลิเมนต์ (Element equation) ขึ้นมา
5. รวมสมการต่าง ๆ เข้าด้วยกัน (Assemble) เป็นสมการระบบรวม (System of equations)



รูปที่ 2.1 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์

เช่น กรณีการเปลี่ยนความร้อนที่เข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อนใน 1 มิติ ของแท่งทรงกระบอก
ตันที่สามารถผลิตความร้อนได้เองตลอดเวลา (Internal heat generation, Q) และต้องการ
คำนวณอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรงกลาง

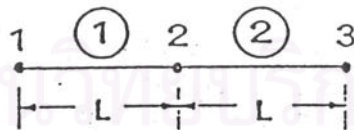


ปัญหาเช่นนี้จะมีสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้นที่เหมาะสม คือ

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = Q$$

และเงื่อนไขขอบเขต คือ $T(0) = T(l) = 0$

จากนั้นทำการแยกแยะผลผลิตกันออกเป็น 2 เอลิเมนต์ โดยแต่ละเอลิเมนต์ยาวเท่ากับ L ดังรูป



และกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการทราบค่า (อุณหภูมิ, $T(X)$) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันโดยประมาณอย่าง
ง่าย ๆ คือ

$$T(X) = N_1 T_1 + N_2 T_2$$

โดย

$$N_1 = 1 - \frac{x}{L}$$

$$N_2 = 1 - \frac{x}{L}$$

แทนฟังก์ชันดังกล่าวลงในสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้น จากนั้นทำการแก้สมการและจัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

สมการสำหรับเอลิเมนต์ที่ 1

$$\frac{k}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -k \frac{dT(0)}{dx} \\ k \frac{dT(L)}{dx} \end{Bmatrix} + QL \begin{Bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \end{Bmatrix}$$

สมการสำหรับเอลิเมนต์ที่ 2

$$\frac{k}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -k \frac{dT(0)}{dx} \\ k \frac{dT(L)}{dx} \end{Bmatrix} + QL \begin{Bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \end{Bmatrix}$$

เมื่อรวมสมการสำหรับเอลิเมนต์ทั้งหมดให้เป็นสมการระบบรวม จะได้ดังนี้

หรือ

$$\frac{k}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -k \frac{dT(0)}{dx} \\ 0 \\ k \frac{dT(L)}{dx} \end{Bmatrix} + QL \begin{Bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \end{Bmatrix}$$

$$[K_c] \{T\} = \{Q_c\} + \{Q_o\}$$

จากนั้นทำการพิจารณาเงื่อนไขต่างๆพร้อมกับการแก้สมการระบบรวมแล้วพบว่า

$$T_2 = \frac{QL^2}{2K} = \frac{Ql^2}{8k}$$

ซึ่งสำหรับปัญหานี้คำตอบที่ได้จะตรงกับคำตอบที่แท้จริง

การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขึ้นกับเวลา

1. สมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้น

สมการการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาของของแข็งใน 3 มิติ มีสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{xi} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นเชิงมวล, c คือความร้อนจำเพาะ, k_{xi} คือเทนเซอร์ (Tensor) ของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, Q คือ ความร้อนที่ผลิตได้เอง, T คือ อุณหภูมิที่แปรผันกับระยะในแกน x_i และเวลา t , x_i คือ ระยะในแนวแกนหลัก เช่น x, y, z ในระนาบคาร์ทีเซียนเป็นต้น

2. สมการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลลัพธ์ที่ต้องการทราบ คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถแทนอุณหภูมิด้วยฟังก์ชันโดยประมาณอย่างง่าย ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^m N_i T_i \\ &= [N]_{1 \times m} \{T(t)\}_{m \times 1} \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดย m เป็นจำนวนจุดต่อในแต่ละเอลิเมนต์, $[N]$ คือค่าฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) ในรูปเมตริกซ์ขนาด $1 \times m$ และ $\{T(t)\}$ เป็นค่าอุณหภูมิที่เวลาใดเวลาหนึ่งในรูปเมตริกซ์ขนาด $m \times 1$

จากนั้นนำวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residual, MWR) มาใช้ กล่าวคือนำสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการ 2.1 มาคูณด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (weighting function) แบบนับโนพกาเลอร์คิน (Bubnov-Galerkin) และทำการอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนและเอลิเมนต์ ซึ่งจะได้สมการออกมาดังนี้

$$\int_{\Omega^{(e)}} N \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{x_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - Q \right) d\Omega = 0 \quad (2.3)$$

เมื่อนำค่าคุณพหุมิซึ่งอยู่ฟังก์ชันโดยประมาณ แทนลงในสมการ 2.3 จะได้รูปแบบสมการออกมาใหม่ ดังนี้

$$\begin{array}{ccc} \text{เทอมที่ 1} & \text{เทอมที่ 2} & \text{เทอมที่ 3} \\ \int_{\Omega^{(e)}} \{N\} \rho c [N] \left\{ \dot{T} \right\} d\Omega - \int_{\Omega^{(e)}} \{N\} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{x_i} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \{T\} \right) d\Omega - \int_{\Omega^{(e)}} \{N\} Q d\Omega & & \\ & = 0 & (2.4) \end{array}$$

จากนั้นทำการอินทิเกรตบายพาทในเทอมที่ 2 ของสมการ และพิจารณาเงื่อนไขเริ่มต้น, เงื่อนไขขอบเขตที่พื้นผิวโครงสร้างไปพร้อมๆ กัน แล้วทำการจัดรูปแบบใหม่ได้ว่า

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\} + [K] \{T\} = \{R\} \quad (2.5)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad [C] = \int_{\Omega^{(e)}} \{N\} \rho c [N] d\Omega \quad (2.6)$$

$$[K] = \int_{\Omega^{(e)}} \left\{ \frac{\partial N}{\partial x_i} \right\} \left(k_{x_i} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \right) d\Omega + \int_{\Gamma^{(e)}} \{N\} h [N] d\Gamma \quad (2.7)$$

$$\{R\} = \int_{\Gamma^{(e)}} \{N\} \left(k_{x_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} n_i \right) d\Gamma + \int_{\Gamma^{(e)}} \{N\} h T_{\infty} d\Gamma + \int_{\Omega^{(e)}} \{N\} Q d\Omega + \int_{\Gamma^{(e)}} \{N\} q_s d\Gamma \quad (2.8)$$

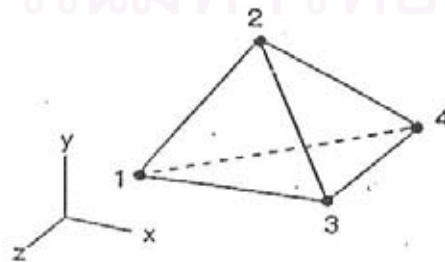
โดย k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, T_{∞} คืออุณหภูมิเฉลี่ยภายนอก, ตัวห้อย $\Gamma^{(e)}$ หมายถึง การพิจารณาที่ขอบเขตของแต่ละเอลิเมนต์, n คือ องค์กรประกอบเวกเตอร์ในแนวตั้งฉากกับผิว

3. ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สามมิติ

ในที่นี้จะกล่าวถึงในเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) ซึ่งมีค่าอุณหภูมิอยู่ในรูปฟังก์ชันโดยประมาณดังนี้

$$T \approx \sum_{i=1}^4 N_i T_i = N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 + N_4 T_4$$

$$= \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix}$$



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะในเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า

2.2 การชุบแข็ง (hardening)

เป็นกรรมวิธีทางความร้อนวิธีการหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการทำให้โลหะมีความแข็งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะว่า กรรมวิธีทางความร้อน มีวิธีการที่ไม่ยุ่งยากและโลหะที่ผ่านกรรมวิธีนี้จะไม่เสียรูป

การชุบแข็ง เป็นการนำโลหะที่ต้องการจะปรับปรุงพัฒนาโครงสร้าง ไปอบให้ร้อนในระดับความร้อนต่าง ๆ กันหลังจากนั้นก็นำโลหะที่อบจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วไปทำให้เกิดการเย็นตัวด้วยตัวกลางที่ให้อัตราการเย็นตัวแตกต่างกันตามความต้องการ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีที่เป็นการเป็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cooling) ในตัวกลางที่เป็นของเหลว เรียกว่า (quenching)

2.2.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างการชุบแข็ง

กระบวนการเย็นตัวระหว่างการ Quench เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน

1. เมื่อนำเหล็กที่ร้อนจุ่มในสารชุบ ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 25°C) สารชุบที่เป็นของเหลวที่สัมผัสกับเหล็กโดยตรง จะเดือดทันทีทำให้เกิดไอน้ำปกคลุมทั่วชิ้นงานเหล็ก ซึ่งจะทำให้อัตราการเย็นตัวของเหล็กลดลง เนื่องจากไอน้ำมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าน้ำ

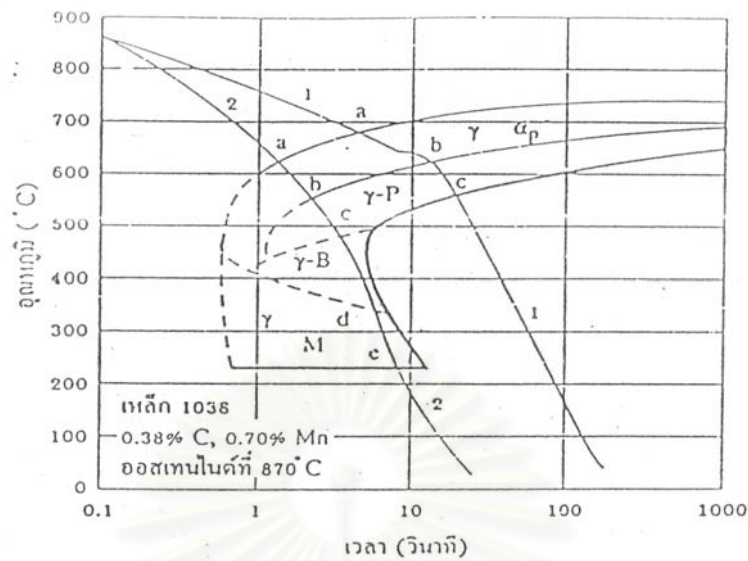
2. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ไอน้ำรวมกันเป็นฟอง และจะหลุดออกจากผิวชิ้นงานเหล็ก ซึ่งจะทำให้ของเหลวที่อยู่รอบข้างไหลเข้ามาแทนที่ ทำให้อัตราการเย็นตัวเร็วขึ้น ต่อจากนั้นก็เกิดเหตุการณ์ตามขั้นที่ 1 อีก แต่จะมีอัตราการเกิดเร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวในขั้นตอนนี้เร็วขึ้น

3. เป็นขั้นตอนที่เหล็กเย็นตัวลงจนไม่ทำให้ของเหลวที่ล้อมรอบเดือด การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นโดยการนำความร้อนและการพาความร้อนในของเหลว

อย่างไรก็ตาม สามารถแสดงปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในสารชุบ (ตัวกลาง) ได้โดยสมการ $q = h(T_s - T^\infty)$

2.2.2 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงขณะเกิดการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cooling Transformation Diagram)

เป็นแผนภูมิที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในขณะที่ยกเหล็กนั้นถูกทำให้เย็นตัวภายในเวลาที่กำหนด โครงสร้างต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในแผนภูมิ CCT จะถูกแบ่งขอบเขตโครงสร้างอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.3 ลักษณะแผนภูมิ CCT ของเหล็กที่มีคาร์บอนร้อยละ 0.38 แมงกานีสร้อยละ 0.70
โครงสร้างต่าง ๆ ในแผนภูมิ CCT

1. **เบนไนต์ (Bainite)** เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการสลายตัวของออสเทนไนต์ ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์ โครงสร้างเบนไนต์จะเกิดขึ้นได้นั้น จะต้องทำให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว จากแผนภูมิ TTT และ CCT จะเห็นได้ว่าเบนไนต์จะอยู่ระหว่างเฟิร์ลไลต์ กับมาร์เทนไซต์ การเกิดเบนไนต์จะมีลักษณะที่คล้ายกันกับการเกิดเฟิร์ลไลต์ เพียงแต่เบนไนต์จะเกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรต์ขึ้นก่อนเท่านั้น จากนั้นเฟอร์ไรต์จะขยายตัวขับไล่คาร์บอนออกไปอยู่รอบข้าง ทั้งนี้ก็เพราะว่าเฟอร์ไรต์ต้องการคาร์บอนเพียงร้อยละ 0.025 เท่านั้น ขณะเดียวกัน เมื่อปริมาณคาร์บอนที่ถูกขับไล่ออกมารวมตัวกันมากขึ้นจนกระทั่งมีปริมาณถึงร้อยละ 6.67 ซีเมนไทต์ หรือคาร์ไบด์ก็จะเกิดแถบบาง ๆ อย่างชัดเจน

อนึ่งโครงสร้างเบนไนต์บางชนิดเกิดขึ้นโดยการแทรกตัวอยู่กับโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เราเรียก โครงสร้างชนิดนี้ว่า โทรอสไตต์ (Troostite)

2. **มาร์เทนไซต์ (Martensite)** โครงสร้างมาร์เทนไซต์นี้ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อทำการเผาเหล็กจนโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด ซึ่งในขณะเดียวกันอะตอมของคาร์บอนจะแทรกตัวอยู่กับหน่วยเซลล์ของเหล็ก จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยชุบลงในตัวกลางใด ๆ ซึ่งความเร็วในการชุบเพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้นจะต้องเร็วกว่าการชุบเพื่อให้เกิดโครงสร้างอื่น ๆ ทั้งนี้ก็เพราะตำแหน่งที่เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้นจะอยู่ส่วนล่างของแผนภูมิ TTT และ CCT นอกจากนั้นตำแหน่งที่เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ยังอยู่ชิดกับอุณหภูมิของแผนภูมิอีกด้วย ดังนั้น การทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์จะต้องทำให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วมาก จึงส่งผลให้เกิดการบิดตัวของระนาบในหน่วยเซลล์ อันเนื่องมาจากมีอะตอมของคาร์บอนตกค้างอยู่ในระนาบ

ของหน่วยเซลล์นั้น การหดตัวกลับคืนสภาพของหน่วยเซลล์ที่มีคาร์บอนตกค้างอยู่ จึงไม่สามารถทำได้ ส่วนระนาบของหน่วยเซลล์อื่น ๆ ที่ไม่มีคาร์บอนตกค้างอยู่ ก็สามารถหดตัวกลับเข้าไปที่เดิมได้จากเหตุผลดังกล่าวความบิดเบี้ยวในแนวระนาบจึงเกิดขึ้นและด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความแข็งแรงสูงมาก โดยอาจมีความแข็งแรงสูงถึง 60 HRC

3. ออสเทนไนต์ (Austenite) หรือเหล็กแกมมา (γ) มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC โครงสร้างเกิดขึ้นจากการละลายของคาร์บอนในเหล็กแกมมา โดยที่ปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มสูงสุดประมาณร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิ 1,130 องศาเซลเซียส ออสเทนไนต์นั้นโดยทั่วไปจะไม่พบว่าเกิดที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าเป็นเหล็กเครื่องมือ (Tool Steel) จะพบออสเทนไนต์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องอยู่บ้าง

4. เฟอร์ไรต์ (Ferrite) หรือเหล็กแอลฟา (α) โครงสร้างเฟอร์ไรต์นี้จะมีระบบผลึกเป็นแบบ BCC โครงสร้างนี้จะประกอบด้วยเหล็กที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ คือจะมีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.025 ดังนั้น โครงสร้างนี้จึงไม่แข็ง แต่จะอ่อนและตีขึ้นรูปได้โดยง่าย

5. เฟอร์ไลต์ (Pearlite) โครงสร้างเฟอร์ไลต์นี้เกิดจากปฏิกิริยายูเทคตอยด์ที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส และมีส่วนผสมของคาร์บอนร้อยละ 0.83 โครงสร้างเฟอร์ไลต์นี้เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์กับซีเมนไทต์ จะเป็นโครงสร้างเฟอร์ไลต์ที่พบได้ง่ายที่สุด คือจะมีลักษณะเป็นแถบบาง ๆ ของซีเมนไทต์เกิดขึ้นสลับกับเฟอร์ไรต์

ในบางกรณีเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 0.83 ซึ่งเรียกว่า เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ ลักษณะการเกิดโครงสร้างเฟอร์ไลต์จะเกิดได้ดังนี้ คือ เมื่อเราเผาเหล็กให้โครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์ จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวลง นิวเคลียสของเฟอร์ไรต์จะเกิดขึ้นและเมื่ออุณหภูมิผ่านเส้น A_3 ลงมา ปริมาณของคาร์บอนในเฟอร์ไรต์จะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 0.025 จากนั้นคาร์บอนจะถูกผลักออกไปอยู่กับออสเทนไนต์จนทำให้ออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นถึงร้อยละ 0.83 ตามแนวเส้น A_3 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิถึงจุดยูเทคตอยด์ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะสิ้นสุดลง

ถ้าเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.83 ขึ้นไปแต่ไม่เกินร้อยละ 2 เรียกว่า เหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ซึ่งการเกิดโครงสร้างเฟอร์ไลต์จะเกิดขึ้นได้ดังนี้ เมื่อเผาเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนดังกล่าวที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_{cm} จนโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนต์ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงผ่านเส้น A_{cm} ซีเมนไทต์จะเกิดขึ้นก่อนที่ขอบเกรน โดยจะปรับให้คาร์บอนมีปริมาณร้อยละ 6.67 และในขณะเดียวกันโครงสร้างเฟอร์ไลต์ก็จะเกิดขึ้นด้วย

2.2.3 สารชุบ หรือตัวกลาง (Quenching Media)

กรรมวิธีทางความร้อนทุกกระบวนการ จะต้องอาศัยตัวกลางในการทำให้ชิ้นงานผ่าน

การอบเย็นตัวลงในอัตราการเย็นตัวต่าง ๆ กัน , จากแผนภูมิ TTT และ CCT จะเห็นได้ว่า เมื่อเหล็ก ถูกทำให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิช่วงออสเทนไนต์ด้วยอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันแล้ว โครงสร้าง ที่ได้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป

ดังนั้นตัวกลางก็คือ สารที่ช่วยให้เกิดขึ้นงานที่ผ่านกรอบได้ถ่ายเทความร้อน หรือควบคุม อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานให้เร็วหรือช้าได้ตามต้องการ ตัวกลางที่นิยมใช้ในกรรมวิธีทางความร้อนมี ดังนี้

1. **น้ำ** เป็นตัวกลางที่ให้อัตราการเย็นตัวสูงมาก เป็นของเหลวที่หาได้ง่าย และยังถูกบำบัด ให้ปราศจากของเสียได้โดยง่าย

การใช้ น้ำ เป็นตัวกลางจะให้ผลดีเมื่อน้ำนั้นมีอุณหภูมิ 15 – 25 องศาเซลเซียส คือจะทำให้ อัตราการเย็นตัวค่อนข้างคงที่ การชุบโดยใช้ น้ำ นั้นจำเป็นต้องกวนน้ำอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้ก็เพราะ ว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นขณะทำการชุบ หรือฟองอากาศนี้จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงไป

2. **น้ำเกลือ** ตัวกลางชนิดนี้จะประกอบไปด้วยน้ำผสมกับเกลือ ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน แต่ ที่นิยมใช้คือผสมเกลือร้อยละ 10 ตัวกลางนี้ให้อัตราเย็นตัวเร็วกว่าน้ำในช่วงอุณหภูมิ 600 – 400 องศาเซลเซียส แต่ในช่วงการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ น้ำเกลือให้อัตราการเย็นตัวไม่สูงมากนัก จึงทำให้เกิดความเครียดไม่มากนัก

แต่น้ำเกลือก็ยังมีข้อเสียอยู่บ้าง คือน้ำเกลือจะกัดกร่อนโลหะทั้งในสภาพที่เป็นไอและใน สภาพที่เป็นของเหลว นอกจากนั้นยังทำให้เกิดมลภาวะอีกด้วย

3. **น้ำมัน** ตัวกลางชนิดนี้แบ่งได้หลายประเภทตามส่วนผสม ประสิทธิภาพ และอุณหภูมิที่ ใช้ เช่น น้ำมันที่ใช้ในงานชุบทั่วไป น้ำมันชุบเร็ว น้ำมันชุบมาร์เทมเปอร์ริง ซึ่งส่วนใหญ่จะมักจะเป็น น้ำมันที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. น้ำมันชุบทั่วไป (Conventional Quenching Oil) เป็นน้ำมันจากแร่ บางครั้ง อาจผสมสารป้องกันการเกิดสนิมด้วยก็ได้
2. น้ำมันชุบเร็ว (Fast Quenching Oil) เป็นน้ำมันจากแร่ผสม น้ำมันชนิดนี้มีส่วนผสมพิเศษอื่น ๆ ลงไปด้วย เช่น สารกันสนิม สารช่วยลดความตึงผิว
3. น้ำมันชุบมาร์เทมเปอร์ริง (Hot Quenching Oil) เป็นน้ำมันแร่ประเภทพาราฟิน ที่ผสมสารป้องกันการสนิมและสารที่ช่วยในการชุบเร็ว ตัวกลางชนิดนี้มักจะใช้สำหรับการชุบแข็งแบบมาร์เทมเปอร์ริงของเหล็ก เพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไนต์
4. เกลือเหลว วิธีการใช้เกลือเหลวในการชุบนั้น เรียกว่าการทำ ซอลต์บัท (Salt Bath) เกลือสามารถทำให้หลอมละลายได้รวดเร็วและรักษาอุณหภูมิได้ดี เกลือ สามารถแบ่งตามระดับอุณหภูมิที่นำไปใช้งานได้ 3 ประเภท คือ

- (1) เกล็ดเหลืองอุณหภูมิต่ำ ใช้งานอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 250 – 600 องศาเซลเซียส
- (2) เกล็ดเหลืองอุณหภูมิปานกลาง ใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 750 – 950 องศา

เซลเซียส

- (3) เกล็ดเหลืองอุณหภูมิสูง ใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 1,000 – 1,150 องศาเซลเซียส

ดังนั้น การใช้เกล็ดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จึงต้องนำเกล็ดแต่ละชนิดผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งทำให้จุดหลอมละลายของเกล็ดแตกต่างกัน จึงเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสม

5. โลหะเหลว ตัวกลางชนิดนี้ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีกรรมวิธีการเตรียมที่ยุ่งยาก นอกจากนี้ยังมีอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ทั้งนี้ก็เพราะว่า เรายังมักจะใช้ตะกั่วและดีบุกเป็นโลหะเหลว ซึ่งตะกั่ว นั้นเป็นโลหะหนักที่มีอันตรายต่อร่างกายอย่างยิ่ง ดังนั้นจึงนิยมใช้เกล็ดแร่เหลวแทนโลหะเหลว

6. อากาศ ตัวกลางชนิดนี้มีทั้งที่อยู่นิ่งและเคลื่อนที่ ทั้งสองชนิดจะให้อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน โดยอากาศเคลื่อนที่จะให้อัตราเย็นตัวที่สูงกว่าอากาศนิ่ง แต่ก็ยังให้อัตราการเย็นตัวช้ากว่าน้ำมัน

สำหรับอัตราการเย็นตัวของตัวกลางนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานและความเร็วที่ตัวกลางเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน

ตัวกลางทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จะพบว่าทั้งที่อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวและแก๊สซึ่งตัวกลางที่มีสภาพเป็นของเหลวนั้น จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างการชุบชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงลงไปในตัวกลาง ดังนั้นเมื่อชุบชิ้นงานที่มีความร้อนลงไปในตัวกลางที่เป็นของเหลว ของเหลวที่สัมผัสด้วยความร้อนจะกลายเป็นไอ ปกคลุมชิ้นงานไว้ ทำให้การระบายความร้อนของชิ้นงานไม่ดีโดยให้อัตราการเย็นตัวที่ช้าลง ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการชุบ

ดังนั้น การชุบชิ้นงานลงในตัวกลางที่เป็นของเหลว จึงต้องทำการกวนเพื่อให้ตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นไม่สามารถปกคลุมชิ้นงานได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานเหล็ก 3 ชนิด
2. เครื่องตัดชิ้นงาน ที่ใช้ใบเลื่อยหนา 14 ฟันต่อ 1 นิ้ว
3. เครื่องกลึง
4. น้ำมันชุปแข็ง พร้อมเตาอบชิ้นงานเหล็ก
5. เครื่องตัดชิ้นงาน Discotom – 2
6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงาน
 - 6.1 กระจกทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1200
 - 6.2 เครื่องขัดผ้าสักหลาด
 - 6.3 ผงขัดอลูมินา
 - 6.4 กรด 2 % Nital
 - 6.5 Alcohol, ที่จับชิ้นงานและไดร์เป่า
 - 6.6 กล้องจุลทรรศน์ ติดกล้องถ่ายภาพ
7. Data logger (Recorder) รุ่น Yokogawa DA 100-13-1F ใช้อัตราการบันทึกตัวอย่างได้ละเอียดที่สุด 2 ครั้งต่อวินาที
8. Thermocouple (type K)

3.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมโดยนำชิ้นงานเหล็กทรงกระบอกจำนวน 3 ชนิดดังตารางที่ 3.1 ในสภาพที่รับมาจากผู้ผลิต โดยแต่ละชนิดในสภาพจำหน่ายแสดงดังตารางที่ 3.2 ชิ้นงานถูกตัดโดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานที่ใช้ใบเลื่อย 14 ฟันต่อ 1 นิ้ว ให้มีขนาดดังนี้

- | | |
|------------|--------------------------------------|
| AISI 52100 | เส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มม. ยาว 100 มม. |
| AISI 4340 | เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. ยาว 100 มม. |
| AISI 4140 | เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. ยาว 100 มม. |

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

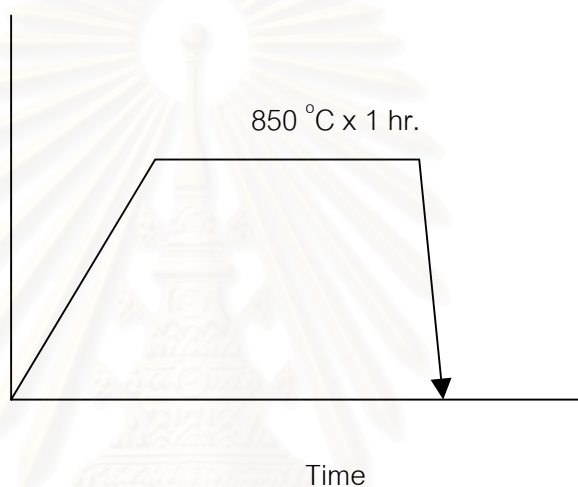
ชนิดชิ้นงาน	ธาตุผสม (%โดยน้ำหนัก)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
4140	0.42	0.3	0.7	1.1	-	0.2
4340	0.34	0.3	0.6	1.6	1.6	0.25
52100	1.0	0.25	0.35	1.5	-	-

ตารางที่ 3.2 สภาพจำหน่ายของชิ้นงานทดสอบ

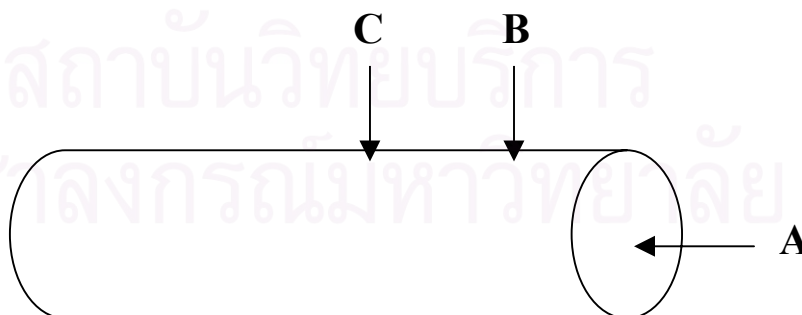
ชิ้นงาน	กรรมวิธีทางความร้อน
4140	อบที่ 650 °C 2 ชั่วโมง อบให้เป็นออสเทนไนต์ที่ 820-850 °C เย็นตัวในน้ำมันจนถึง 100 °C ทำการอบคืนตัว 2 ครั้ง ที่ 540-680 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4340	อบที่ 650 °C 2 ชั่วโมง อบให้เป็นออสเทนไนต์ที่ 820-850 °C เย็นตัวในน้ำมันจนถึง 100 °C ทำการอบคืนตัว 2 ครั้ง ที่ 540-680 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
52100	อบอ่อนที่ 150-200 °C เย็นตัวในเตา

3.3 การทดสอบหาเส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง

กรรมวิธีทางความร้อนแสดงดังรูปที่ 3.1 งานทดสอบจะถูกอบในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิออกสเทนไนต์ (อุณหภูมิ ประมาณ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$) โดยมีอัตราการให้ความร้อน 0.1 K/s จากนั้นจะคงอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการ Quench ด้วยน้ำมัน โดยชิ้นงานแต่ละชนิดจะถูกติดตั้ง Thermocouple (type K) 3 จุด คือ ปลายชิ้นงานตรง กลางชิ้นงาน และระหว่างปลายชิ้นงานกับกลางชิ้นงานขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 3.2 พร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์วัดการเย็นตัว (Data Logger)



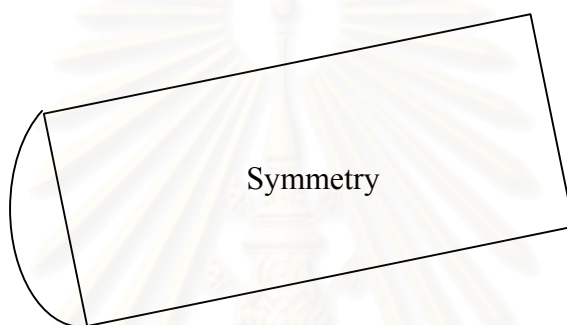
รูปที่ 3.1 แสดงกรรมวิธีทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Thermocouple: (A) ปลายชิ้นงาน (B) ระหว่างปลาย และกึ่งกลางชิ้นงาน และ (C) กึ่งกลางของชิ้นงาน

3.4 การคำนวณหาเส้นโค้งการเย็นตัวโดยใช้โปรแกรม Procast

สร้างแบบจำลองรูปครึ่งทรงกระบอกดังรูปที่ 3.2 จากโปรแกรม IDEAS หลังจากนั้นนำมาคำนวณในโปรแกรม Procast โดยเริ่มจากสร้าง mesh ที่ผิวและข้างในรูปครึ่งทรงกระบอก แล้วกำหนดพื้นผิวที่ผ่าเป็นรูปครึ่งทรงกระบอกให้เป็นพื้นที่สมมาตร จากนั้นนำข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของโลหะเข้าไปในโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณ ต่อจากนั้นกำหนดตำแหน่งที่ต้องการหาเส้นโค้งการเย็นตัว 4 จุดตามตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้หัววัดคู่ความร้อนและที่ตำแหน่งใจกลางพื้นผิว



รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองรูปครึ่งทรงกระบอก

3.5 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบความร้อน มาตัดด้วย เครื่อง Discotom - 2 ให้มีขนาดยาว 25 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง ปลายชิ้นงาน กลางชิ้นงาน และบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน ชัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบเท่ากับ # 80, 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ชั้น ตอนสุดท้ายจะขัดละเอียดโดยผงอลูมินาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตรบนผ้าสักหลาด ทำการกัดผิวหน้าด้วยน้ำยา 2% Nital เพื่อทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและทำการถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ

3.6 วิธีการทำนายโครงสร้างจุลภาคโดยสังเขป

ทำการสร้างและเปรียบเทียบเส้นโค้งการเย็นตัวโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณได้จากการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีทาง Finite Element และ จากผลการทดลองจริง โครงสร้างจุลภาคโดยสังเขปสามารถทำนายได้โดยการนำเส้นโค้งการเย็นตัวจากทั้งสองวิธีเปรียบเทียบ

กับ CCT-Diagram[7] ตามมาตรฐาน ASM จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โครงสร้างจุดภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

3.7 การทดสอบความแข็ง

ความแข็งของชิ้นงานทดสอบหาได้โดยการใช้วิธีการทดสอบโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ ร็อคเวลล์สเกลซี โดยใช้น้ำหนักกด Minor load 10 กิโลกรัม และ Major load 150 กิโลกรัมทำการ หาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 7 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ

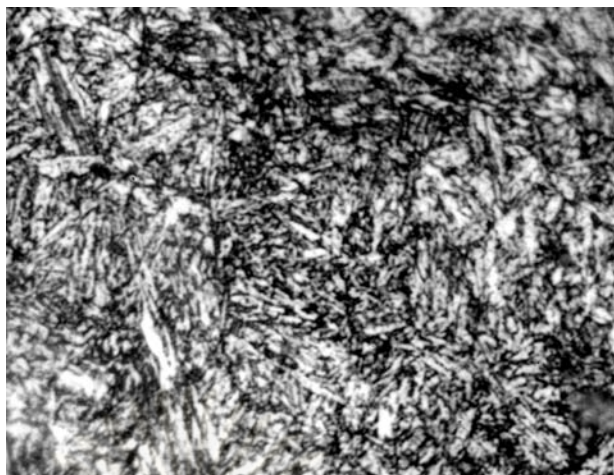
4.1.1 สภาพจำหน่าย (As received)

โครงสร้างจุลภาคของสภาพจำหน่ายของชิ้นงานทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย มาร์เทนไซต์และ เฟอร์ไรต์หรือ คาร์ไบด์ เนื่องจากผ่านการชุบแข็งและเย็นตัวในน้ำมัน และผ่านการอบคืนตัวสองครั้ง ทำให้มาร์เทนไซต์ที่ได้รับจากการชุบแข็งบางส่วนมีการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นเฟอร์ไรต์และคาร์ไบด์ ในขณะที่ในเหล็กเกรด 52100 โครงสร้างที่พบคือ คาร์ไบด์เม็ดกลมฝังอยู่ในเฟอร์ไรต์เมตริก คาร์ไบด์เม็ดกลมที่พบคือ ซีเมนไตท์ ลักษณะเม็ดกลมเกิดเนื่องมาจากการอบอ่อน (โดยการทำให้ Spheroidizing) พบว่าคาร์ไบด์เม็ดกลมที่เกิดขึ้นมีขนาดสม่ำเสมอ กระจายอยู่ทั่วเมตริก เมื่อทำการเปรียบเทียบเหล็กที่มีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกัน (เกรด 4140 และ 4340) ซึ่งผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเหมือนกันในสภาพจำหน่ายพบว่า โครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าในเหล็กเกรด 4340 จะมีการเติมธาตุผสมนิเกิลเพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง แต่เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน(ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าเมื่อมีอิทธิพลอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Ms temperature) และการเย็นตัวในน้ำมันซึ่งมีอัตราการเย็นตัวที่สูง ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้รับไม่แตกต่างกันมาก

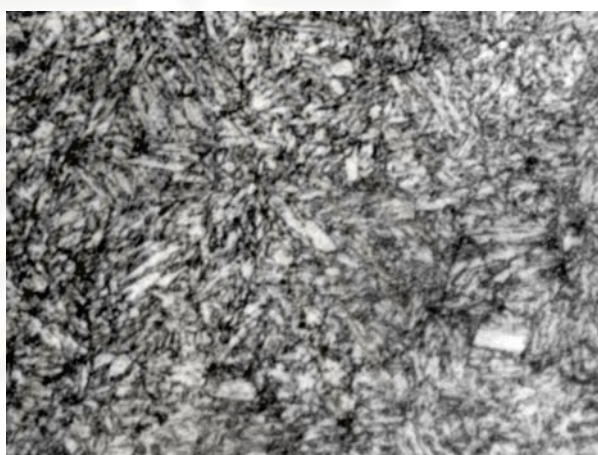
4.1.2 สภาพชุบแข็ง

เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากการชุบแข็ง ชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้นจะถูกอบให้เป็นออสเทนไนต์แล้วเย็นตัวในน้ำมันแล้วทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงาน ดังที่แสดงไว้ก่อนหน้านี้ (รูปที่ 3.2) รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเกรด 4140 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงาน รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเกรด 4340 และรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเกรด 52100

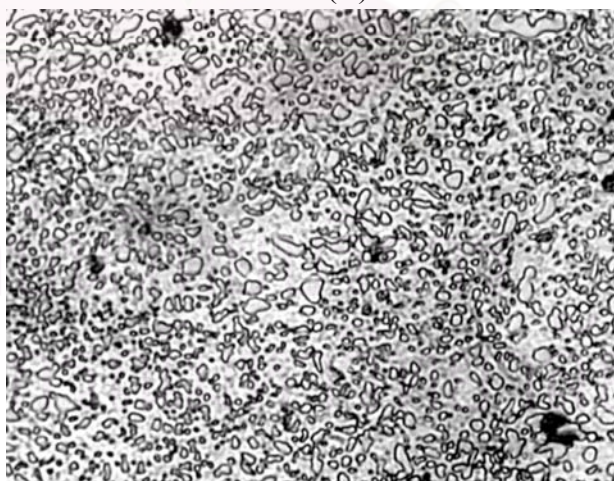
ในเหล็กเกรด 4140 พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ โดยมีปริมาณของเฟอร์ไรต์ และเบนไนต์ ปนอยู่ โดยที่ตำแหน่งตรงปลายชิ้นงาน (A) มีแนวโน้มที่จะพบปริมาณของมาร์เทนไซต์มากที่สุด และปริมาณของมาร์เทนไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างจากปลายชิ้นงาน โดยตรงบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน (C) มีปริมาณมาร์เทนไซด์น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น แม้กระนั้นก็ตามความแตกต่างทางโครงสร้างจุลภาคมีความแตกต่างกันน้อยมากอันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงโดยกราฟ



(A)



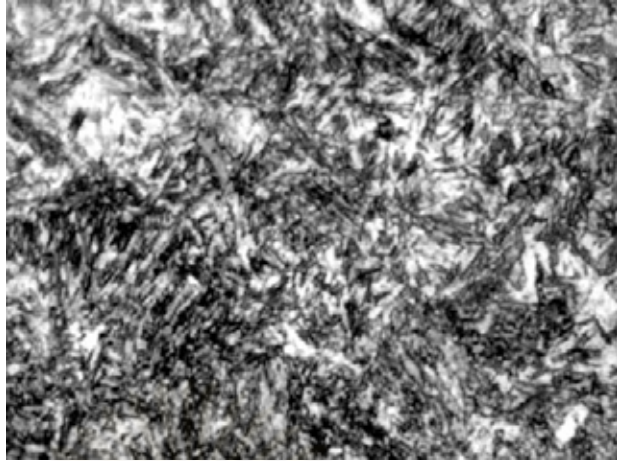
(B)



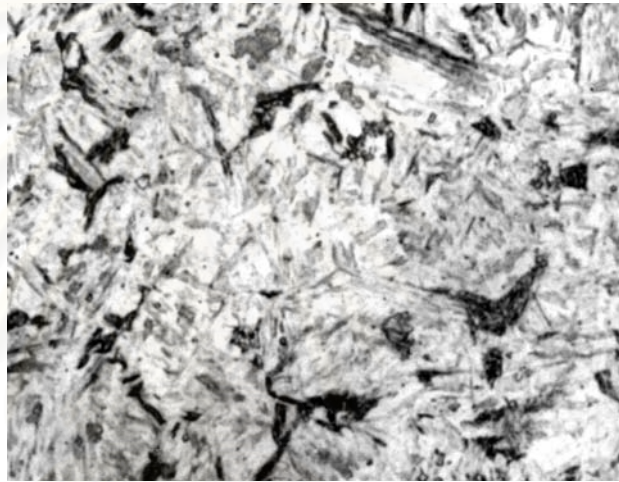
(C)

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบในสภาพจำหน่าย

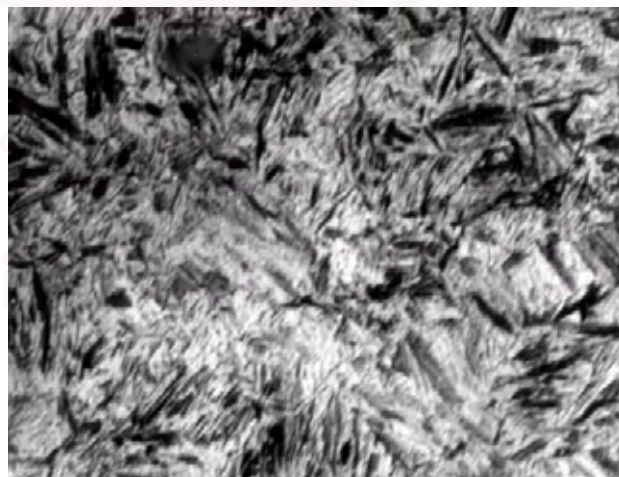
(A) เกรด4140 (B) เกรด4340 (C) เกรด 52100



(A)

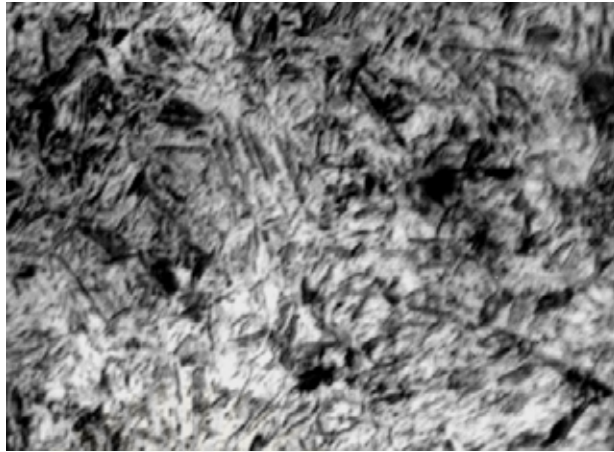


(B)

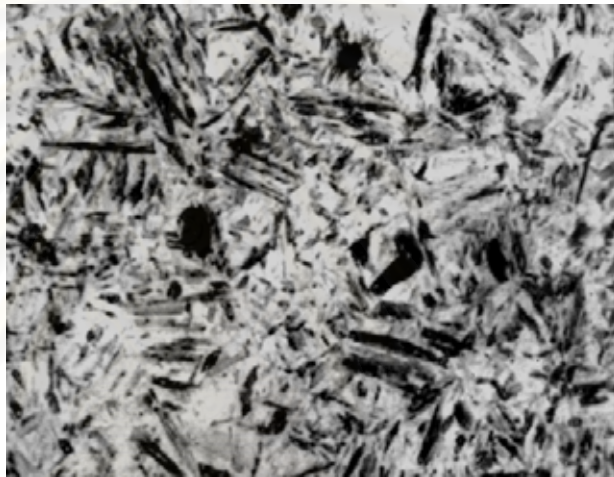


(C)

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆของเหล็กเกรด 4140 ภายหลังจากชุบแข็ง
(A) ปลายชิ้นงาน (B) ระหว่างปลายและกึ่งกลางชิ้นงาน และ(C) กลางชิ้นงาน



(A)

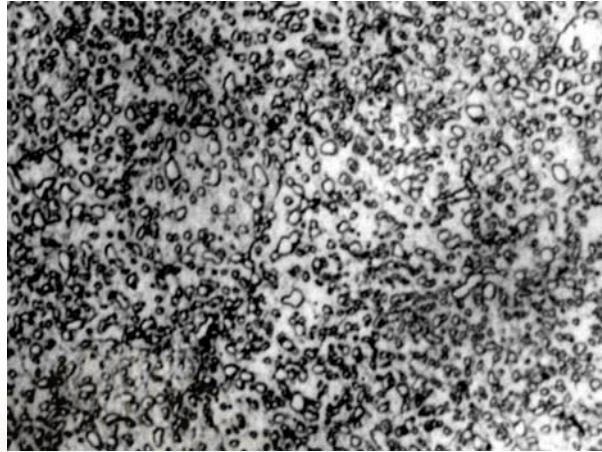


(B)

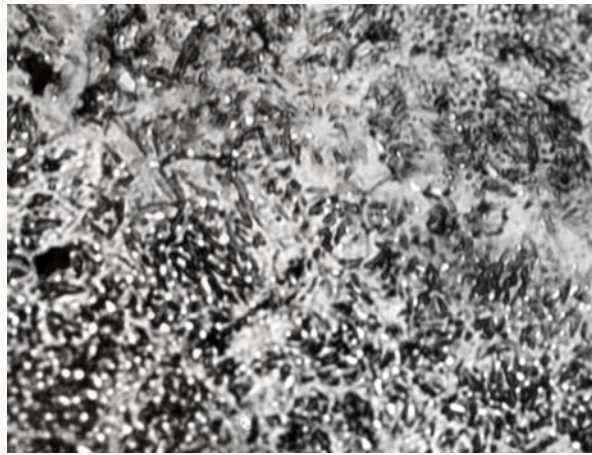


(C)

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆของเหล็กเกรด 4340 ภายหลังจากชุบแข็ง
(A) ปลายชิ้นงาน (B) ระหว่างปลายและกึ่งกลางชิ้นงาน และ(C) กลางชิ้นงาน



(A)



(B)



(C)

รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆของเหล็กเกรด 52100 ภายหลังจากชุบแข็ง
(A) ปลายชิ้นงาน (B) ระหว่างปลายและกึ่งกลางชิ้นงาน และ(C) กลางชิ้นงาน

การเย็นตัวอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากผลการทดลองสอดคล้องกับแผนภาพการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องตามมาตรฐานASM [7] ซึ่งทดสอบโดยวิธี Jominy method

ในเหล็กเกรด 4340 แสดงพฤติกรรมคล้ายกับเกรด 4140 กล่าวคือ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย มาร์เทนไซต์เกือบทั้งหมดและเฟอร์ไรต์ปนอยู่เล็กน้อย โดยที่ตำแหน่งปลายของชิ้นงาน (A) และตรงกึ่งกลางระหว่างชิ้นงาน (C) มีปริมาณของมาร์เทนไซต์ใกล้เคียงกันเนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเกรด 4140 และ 4340 พบว่า ปริมาณของมาร์เทนไซต์ ในเหล็กเกรด 4340 และ 4140 ใกล้เคียงกันมาก สาเหตุเนื่องจากว่าส่วนผสมทางเคมีอื่นของเหล็กทั้งสองเกรดมีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกันและเย็นตัวในตัวกลางเดียวกัน ยกเว้นมีการเติมธาตุผสมนิกเกิลลงในเหล็กเกรด 4340 ซึ่งเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งโดยทำให้ เส้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนต์ไปเป็นเฟสโลว์เคลื่อนไปทางขวามือ [4, 5] ทำให้ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กเกรด 4340 ดีกว่าเกรด 4140 เมื่อเย็นตัวในตัวกลางที่เป็นน้ำมัน

โครงสร้างจุลภาคในเหล็กเกรด 52100 มีความแตกต่างจากเหล็กทั้งสองเกรดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โครงสร้างเม็ดกลมของคาร์ไบด์จะไม่ละลายกลับเข้าไปในเมตริกขณะที่แช่ไว้ที่อุณหภูมิที่ทำให้เป็นออสเตนไนต์ เมื่อมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วยังคงพบว่ามีคาร์ไบด์เม็ดกลมกระจายอยู่ทั่วเมตริกที่เป็นมาร์เทนไซต์ โดยมีปริมาณของ เฟอร์ไรต์ปนอยู่เล็กน้อย การเกิดเฟสของคาร์ไบด์จะลดปริมาณของโครเมียมและคาร์บอนในเมตริก ทำให้เส้นการเปลี่ยนเฟส เลื่อนมาทางขวามือ และเส้น Ms เลื่อนสูงขึ้นเป็นผลให้โครงสร้างเมตริกที่ได้รับเป็น มาร์เทนไซต์ และบางส่วนมีการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นเฟสอื่นเมื่อเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง

4.2 อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อความแข็ง

ความแข็งของชิ้นงานทดสอบในสภาพขายและสภาพภายหลังการชุบแข็งแสดงดังตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่า ในสภาพขายความแข็งของเหล็กเกรด 52100 ต่ำที่สุดประมาณ 7 HRC เนื่องจากอยู่ในสภาพที่ผ่านการอบอ่อนมา มีเมตริกเป็นเฟอร์ไรต์ ในขณะที่เหล็กเกรด 4140 และเกรด 4340 มีความแข็งใกล้เคียงกันเนื่องจากมีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกัน ผ่านการอบชุบและอบอ่อนมาเหมือนกันโดยมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ที่ถูกอบคืนตัว (Tempered martensite) และบางส่วนเป็นเฟสโลว์ โดยมีความแข็งอยู่ในช่วง 37-38 HRC ความแข็งในสภาพชุบแข็งสูงกว่าในสภาพจำหน่าย เนื่องจากโครงสร้างของเมตริกเป็นมาร์เทนไซต์ ในเหล็กเกรด 4140 และ 4340 มีความแข็งใกล้เคียงกันคือ อยู่ในช่วง 55-59 HRC แต่ในเหล็ก เกรด 52100 ความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยมีค่าอยู่ในช่วง 64-66 HRC สาเหตุที่เหล็กเกรด 52100 มีความแข็งเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากและมากกว่า เกรด 4140 และ 4340 อันเนื่องมาจาก ในเหล็ก 52100 มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า

เหล็กเกรดอื่น โครงสร้างจุลภาคภายหลังการชุบแข็งประกอบด้วยคาร์ไบด์ที่ฝังอยู่ในเมตริกที่เป็นมาร์เทนไซต์ เป็นที่ทราบกันดีว่า คาร์ไบด์มีความแข็งสูงมาก(ประมาณ 900 HV) และความแข็งของมาร์เทนไซต์จะขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนในผลึกของมาร์เทนไซต์ ยิ่งมีคาร์บอนมาก ความแข็งก็ยิ่งมาก ดังนั้นไม่ใช่สิ่งที่น่าแปลกใจว่าทำไมเหล็กเกรด52100จึงมีความแข็งมากกว่าเหล็กเกรดอื่น เมื่อทำการเปรียบเทียบความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆของชิ้นงาน(A, B และ C) พบว่าความแข็งไม่แตกต่างกันมากเนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวที่ใกล้เคียงกันมากทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะเหมือนกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งของเหล็กแต่ละเกรดในสภาวะก่อนชุบแข็งและหลังชุบแข็ง

ชนิดชิ้นงาน	ความแข็ง (HRC) ที่ตำแหน่ง			
	As-receive	A	B	C
เกรด4140	38	59	57	56
เกรด4340	38	57	56	56
เกรด52100	7	66	64	65

4.3 เส้นโค้งการเย็นตัวของเหล็กแต่ละชนิด

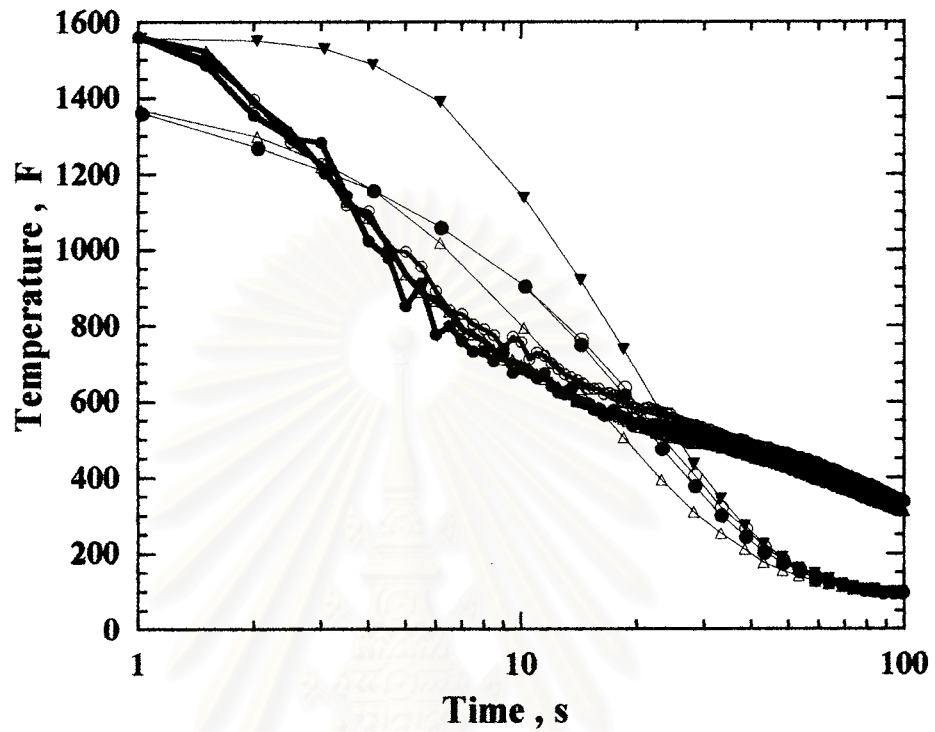
เป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราการเย็นตัวของเหล็กมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคที่ได้รับ ซึ่งมีผลต่อความแข็งของเหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเหล็ก (Heat transfer coefficient, (h)) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาเส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กแต่ละเกรด ทำการจำลองการเย็นตัวของเหล็กแต่ละเกรดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากผลการทดลองจริงของเหล็กเกรด 4140 ส่วนรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบของเหล็กเกรด 4340 และ 52100 ตามลำดับ ในการจำลองการเย็นตัวโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีการจำลองการเย็นตัวที่แกนกลางของชิ้นงานเพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งต่างๆภายในชิ้นงานมีการเย็นตัวไม่เท่ากัน โดยที่บริเวณผิวของชิ้นงานมีการเย็นตัวที่เร็วกว่าแกนกลาง เส้นโค้งจากการทดลองจะไม่ราบเรียบ อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนในการวัดอุณหภูมิด้วยหัววัดคู่ความร้อน (Thermocouple) และเนื่องจากอิทธิพลจากปัจจัยอื่นได้แก่ การไหลของตัวกลางในการชุบแข็ง หรือการเกิดออกไซด์ เป็นต้น

ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4140 ดังแสดงดังรูปที่ 4.5 ในการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เห็นว่าเส้นโค้งการเย็นตัวที่จุดปลายของชิ้นงานจะมีอัตราการเย็นตัวเร็วที่สุดในขณะที่ เส้นโค้งการเย็นตัวจากบริเวณกลางชิ้นงาน และบริเวณระหว่างกลางชิ้นงานกับปลายชิ้นงาน จะมีอัตราการเย็นตัวใกล้เคียงกัน จากการทดลองจริงพบว่าเส้นโค้งการเย็นตัวบริเวณระหว่างกลางกับปลายชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวเร็วที่สุด ส่วนบริเวณกลางชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวช้าที่สุด เส้นโค้งการเย็นตัวของทั้ง 3 จุดจะมีการแกว่งค่อนข้างมาก ในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 1500-600°F สาเหตุเนื่องจากว่าค่า h จะแปรผันตามอุณหภูมิ แต่ว่าในการจำลองการเย็นตัวโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ จะถือว่า ค่า h มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งการเย็นตัว พบว่า ในช่วงแรกของการเย็นตัวค่า h ในการทดลองจริงสูงกว่าการจำลอง และลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 600°F จะมีค่าเท่ากัน และจะมีค่าน้อยกว่าเมื่ออุณหภูมิลดลง

รูปที่ 4.6 เป็นเส้นโค้งการเย็นตัวที่จุดปลายของเหล็กเกรด 4340 การจำลองเส้นโค้งการเย็นตัวของเหล็กชนิดนี้จะใช้ข้อมูลเดียวกับเกรด 4140 เนื่องจากเหล็กทั้งสองมีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกันความหนาแน่นเกือบเท่ากัน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าเส้นโค้งการเย็นตัวแสดงพฤติกรรมคล้ายๆกันกับเกรด 4140 กล่าวคือ ในช่วงแรกของการเย็นตัว ในการทดลองจริงจะมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่า และอัตราการเย็นตัวลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยการเย็นตัวโดยการจำลองจะเร็วกว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 600°F เมื่อทำการเปรียบเทียบเส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของผลการทดลองจริงระหว่างเกรด 4140 และ 4340 พบว่ามีความใกล้เคียงกันมากที่จุด A และจุด B ของชิ้นงานและแตกต่างกันเล็กน้อยที่จุด C

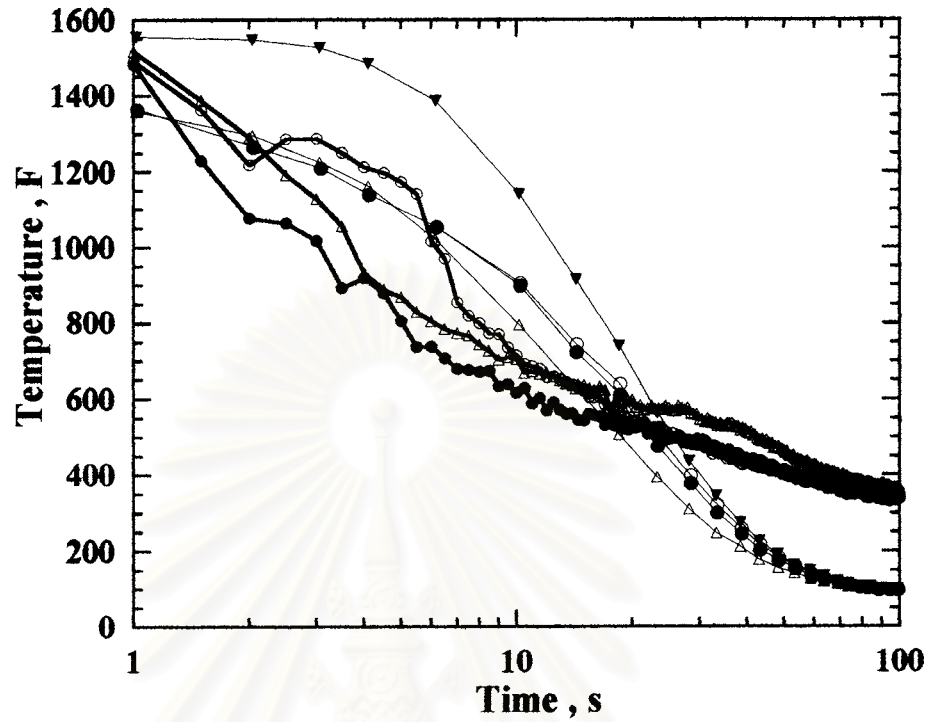
เส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 52100 แสดงดังรูปที่ 4.7 จากผลการจำลองการเย็นตัวโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าบริเวณกลางและระหว่างกลางกับจุดปลายชิ้นงานจะมีอัตราการเย็นตัวเท่าๆกันโดยบริเวณปลายของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวสูงสุดแต่ยังถือว่าความแตกต่างของอัตราการเย็นตัวมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าการเย็นตัวโดยใช้แบบจำลองช้ากว่าการทดลองจริงในช่วงที่อุณหภูมิมากกว่า 400°F อย่างไรก็ตามการเย็นตัวโดยใช้แบบจำลองจะเร็วกว่าเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

สามารถกล่าวได้ว่า เส้นโค้งการเย็นตัวโดยใช้แบบจำลองจะมีความใกล้เคียงกันกับการทดลองจริง ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า h ซึ่งแปรผันกับอุณหภูมิ การประมาณค่า h ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นสิ่งที่จำเป็นและน่าศึกษาต่อไป เพื่อให้จะมีความใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะสามารถทำนายโครงสร้างทางจุลภาค และคุณสมบัติทางกลของวัสดุได้แม่นยำยิ่งขึ้น

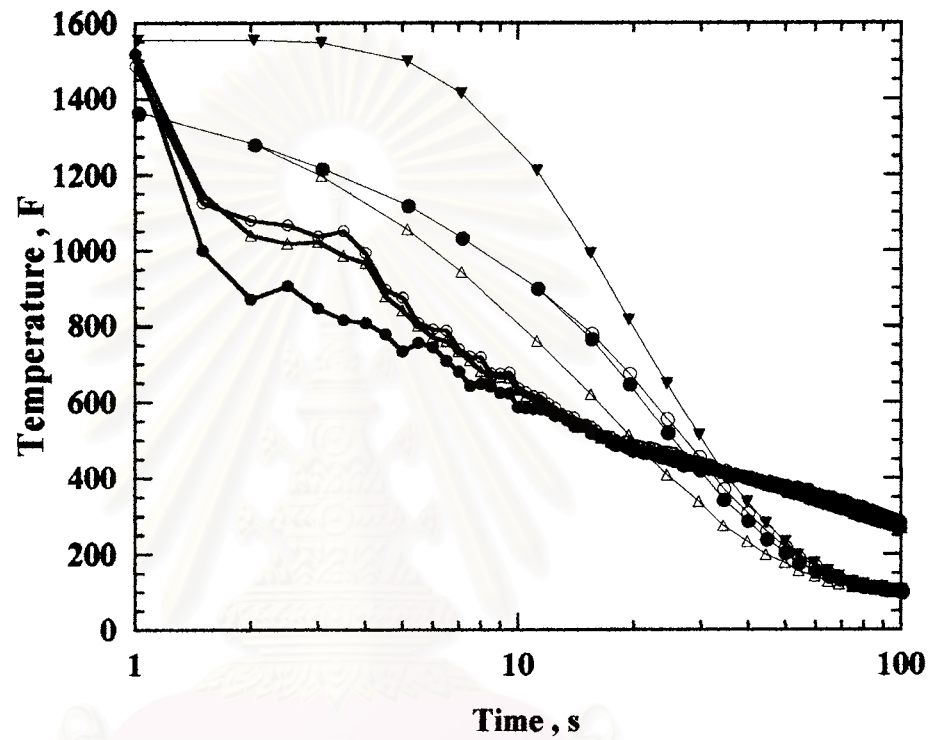


รูปที่ 4.5 แสดงเส้นโค้งของการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง จากการทดลอง(เส้นทึบ)และแบบจำลองเชิงตัวเลข(เส้นบาง)ของเหล็กเกรด 4140 สัญลักษณ์ ●:Intermediate of specimen, ▼ : Center of specimen, □ : End of specimen, ○ : Middle of specimen

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 แสดงเส้นโค้งของการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง จากการทดลอง(เส้นทึบ)และแบบจำลองเชิงตัวเลข(เส้นบาง)ของเหล็กเกรด 4340 สัญลักษณ์ ●:Intermediate of specimen, ▼ : Center of specimen, □ : End of specimen, ○ : Middle of specimen



รูปที่ 4.7 แสดงเส้นโค้งของการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง จากการทดลอง(เส้นทึบ)และ แบบจำลองเชิงตัวเลข(เส้นบาง)ของเหล็กเกรด 52100 สัญลักณ์ ●:Intermediate of specimen, ▼: Center of specimen, □: End of specimen, ○: Middle of specimen

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

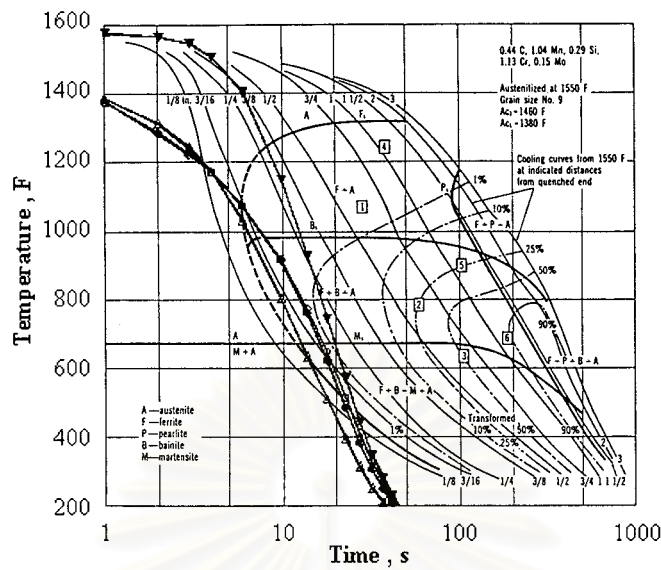
4.4 การทำนายโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางกล การเย็นตัวภายใต้สภาวะไม่สมดุลทำให้เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นอย่างมาก แผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องภายใต้การเย็นตัวแบบต่างๆจึงถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้เพื่อทำนายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ

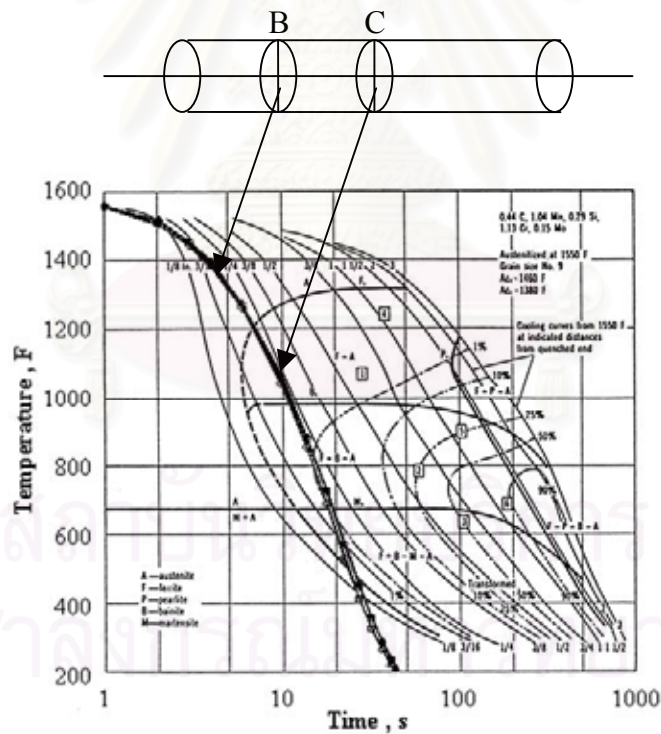
กราฟแสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4140 ตามมาตรฐาน ASM[7] แสดงดังรูปที่ 4.8 สำหรับแบบจำลอง และรูปที่ 4.9 สำหรับการทดลองจริง ในการจำลองพบว่า เส้นโค้งการเย็นตัวตัดกับเส้นการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์เล็กน้อย โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วย มาร์เทนไซต์เกือบสมบูรณ์ โดยมีปริมาณของเฟอร์ไรต์ปนอยู่เล็กน้อย ในขณะที่เส้นโค้งการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าเส้นโค้งจะตัดกับเส้น 1% เฟอร์ไรต์ และบางส่วนของเบนไนต์แต่โครงสร้างเมตริกยังคงเป็นมาร์เทนไซต์เกือบสมบูรณ์ ทำให้โครงสร้างที่ได้ประกอบด้วย มาร์เทนไซต์ เฟอร์ไรต์และ เบนไนต์ ซึ่งใกล้เคียงกับแบบจำลอง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.2 และจากข้อมูลความแข็งพบว่าความแข็งมีความใกล้เคียงกับความแข็งของมาร์เทนไซต์มาก (ประมาณ 55-60 HRC)

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงการทำนายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเกรด 4340 โดยการจำลองและการทดลองจริงตามลำดับ ในการจำลองพบว่า โครงสร้างที่ได้เป็นมาร์เทนไซต์โดยสมบูรณ์ เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานทุกจุดมากกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองจริงพบว่าสอดคล้องกัน กล่าวคือ ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นโครงสร้างอื่น ออสเทนไนต์เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่ได้เป็นมาร์เทนไซต์ทั้งหมด ซึ่งยืนยันได้จากรูปที่ 4.3 เป็นที่สังเกตว่าเหล็กประเภทนี้มีความสามารถในการชุบแข็งดีกว่าเหล็กเกรด 4140 เพราะว่าอิทธิพลของธาตุผสมนิเกิล ช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง ที่ปริมาณธาตุผสมอื่นๆเท่ากัน ทำให้เมตริกเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ง่าย ซึ่งจากค่าความแข็งของชิ้นงาน ประมาณ 55-60 HRC ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งของมาร์เทนไซต์

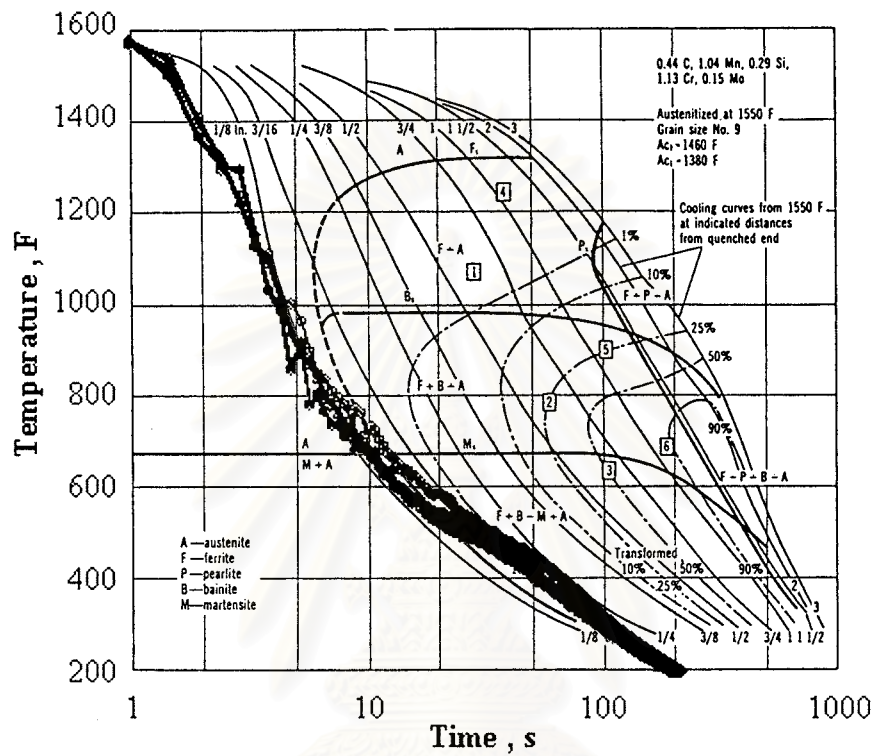
ในเหล็กเกรด 52100 แสดงการทำนายโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 สำหรับการจำลองและการทดลองจริงตามลำดับ จากการจำลองพบว่าออสเทนไนต์มีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็น เฟอร์ไรต์ คาร์ไบด์ และ เบนไนต์ประมาณ 1 % โดยที่เหลือเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ ในขณะที่การทดลองจริงมีการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นเฟอร์ไรต์น้อยกว่า 1% ทำให้โครงสร้างสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.4 และความแข็งที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงสุด เนื่องจากเมตริกที่เป็นมาร์เทนไซต์มีความความแข็งสูงรวมกับความแข็งของคาร์ไบด์ที่สูงมากทำให้เหล็กประเภทนี้มีความแข็งสูงที่สุด



รูปที่ 4.8.1 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4140 สัญลักษณ์ ●: Intermediate of specimen, ▼: Center of specimen, □: End of specimen, ○: Middle of specimen



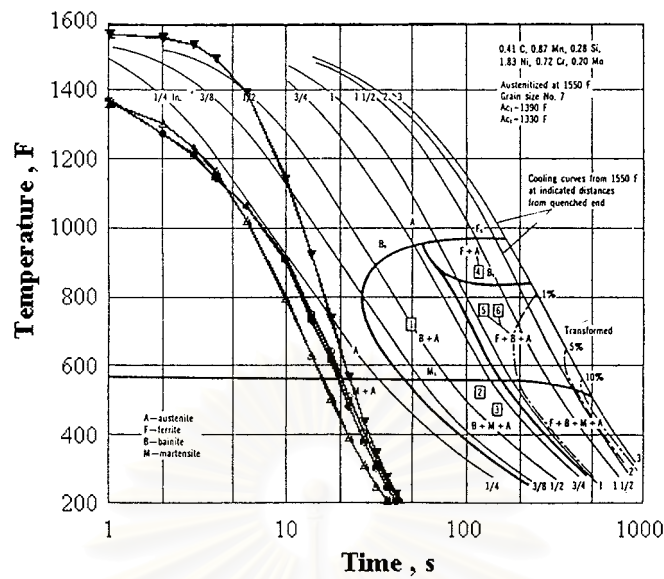
รูปที่ 4.8.2 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4140 โดยในรูปแบบเป็นเส้นโค้งการเย็นตัว บริเวณระหว่างแกนกลางชิ้นงาน กับผิวชิ้นงานซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 4.2 (B) และ (C)



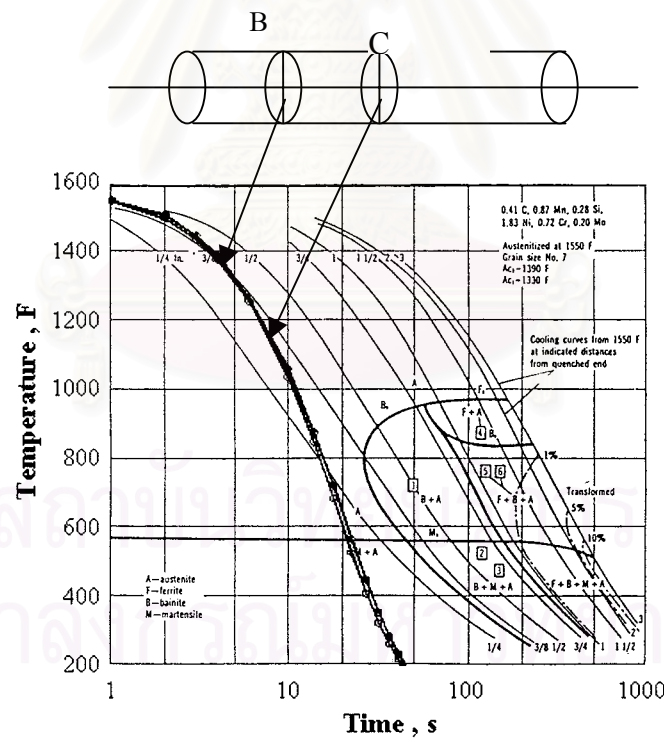
รูปที่ 4.9 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากการทดลองร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง
ของเหล็กเกรด 4140 สัญลักษณ์ ●: Intermediate of specimen,

□: End of specimen, ○: Middle of specimen

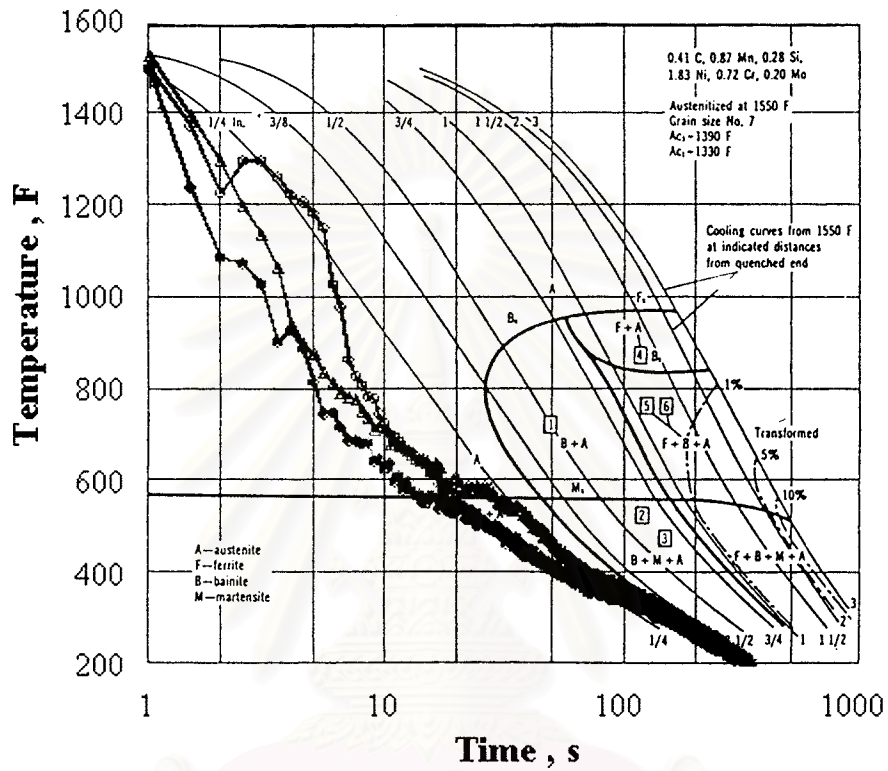
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10.1 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4340 สัญลักษณ์ ●: Intermediate of specimen, ▼: Center of specimen, □: End of specimen, ○: Middle of specimen



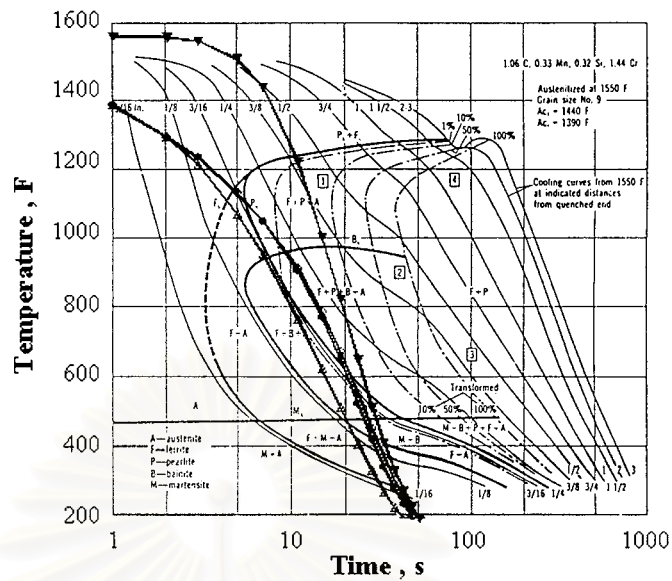
รูปที่ 4.10.2 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 4340 โดย ในรูปเป็นเส้นโค้งการเย็นตัวบริเวณระหว่างแกนกลางที่ทำงานกับผิวชิ้นงาน ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 4.3 (B) และ (C)



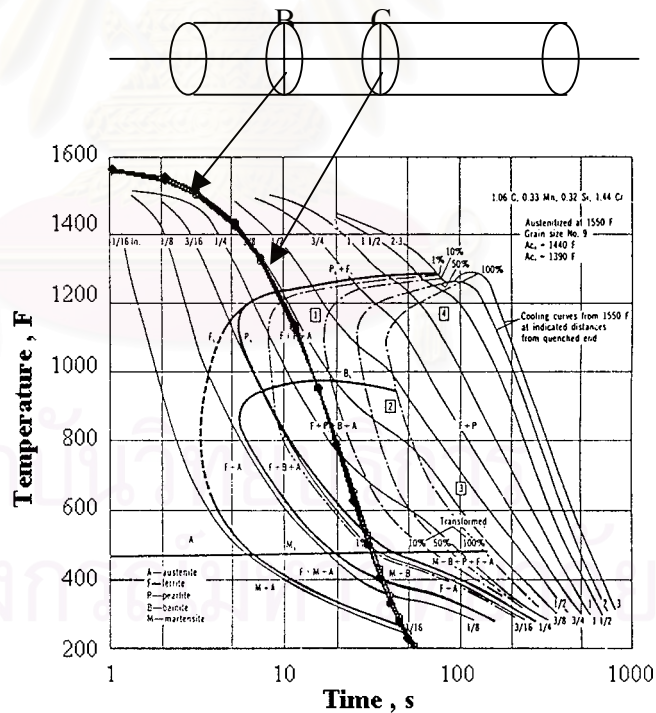
รูปที่ 4.11 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากการทดลองร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่าง ต่อ

เนื้อของเหล็กเกรด 4340 สัญลักษณ์ ●: Intermediate of specimen,

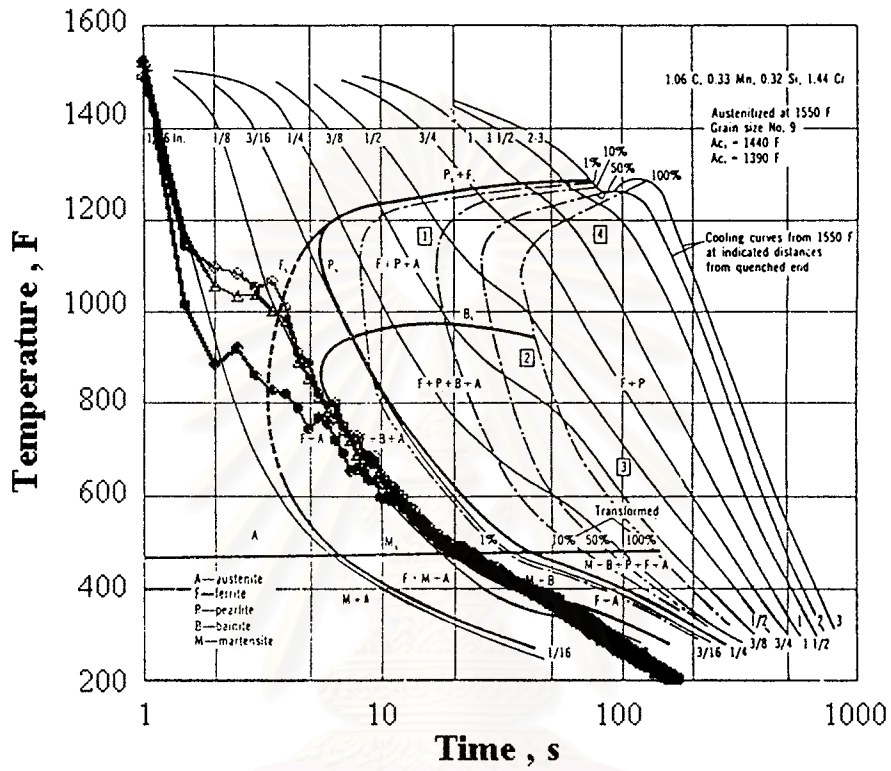
□: End of specimen, ○: Middle of specimen



รูปที่ 4.12.1 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัว อย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 52100 สัญลักษณ์ ●: Intermediate of specimen, ▼: Center of specimen, □: End of specimen, ○: Middle of specimen



รูปที่ 4.12.2 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากแบบจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของเหล็กเกรด 52100 โดย ในรูปเป็นเส้นโค้งการเย็นตัว บริเวณระหว่างแกนกลางขึ้นงานกับผิวขึ้นงานซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ถ่ายภาพ โครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 4.4 (B) และ (C)



รูปที่ 4.13 แสดงการใช้เส้นโค้งการเย็นตัวจากการทดลองร่วมกับแผนภูมิการเย็นตัวอย่าง

ต่อเนื่องของเหล็กเกรด 52100 สัญลักษณ์ ●:Intermediate of specimen,

□: End of specimen, ○: Middle of specimen

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. โครงสร้างจุลภาคในสภาพจำหน่ายของเหล็กเกรด 4140 และ 4340 ประกอบด้วย มาร์เทนไซต์และเฟอไรต์กับคาร์ไบด์ ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคในสภาพจำหน่ายของเหล็กเกรด 52100 จะประกอบด้วยคาร์ไบด์เม็ดกลมที่ฝังอยู่ในเนื้อเฟอไรต์ ส่วนโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเกรด 4140 และ 4340 ในสภาพชุบแข็งจะประกอบด้วยมาร์เทนไซต์เกือบทั้งหมด และจะมีเฟสเฟอไรต์ เบนไนต์ ปนอยู่เล็กน้อย สำหรับเหล็กเกรด 52100 จะประกอบด้วยมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์เม็ดกลมกระจายอยู่ทั่วเมตริก โดยมีปริมาณของเฟอไรต์ปนอยู่เล็กน้อย
2. ความแข็งของเหล็กที่ผ่านการอบชุบจะมากกว่าในสภาพจำหน่าย โดยในสภาพอบชุบ เกรด 4140 และ 4340 จะมีความแข็งอยู่ในช่วง 55-59 HRC เกรด 52100 จะมีความแข็งอยู่ในช่วง 64-66 HRC ในขณะที่สภาพจำหน่ายเกรด 4140 และ 4340 จะมีความแข็งอยู่ในช่วง 37-38 HRC เกรด 52100 จะมีความแข็งประมาณ 7 HRC
3. เส้นโค้งการเย็นตัวโดยใช้แบบจำลองจะมีความใกล้เคียงกับการทดลองจริง ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยอันเนื่องมาจากค่า h ซึ่งในการจำลองจะใช้ค่าคงที่ ในขณะที่การทดลองจริงค่า h จะแปรผันตามอุณหภูมิ
4. โครงสร้างจุลภาคที่ทำนายได้จากแบบจำลองและการทดลองจริงของเหล็กทั้ง 3 เกรดมีความใกล้เคียงกัน
5. แบบจำลองสามารถนำมาใช้งานได้จริง ถึงแม้ว่าการทำนายจะให้ผลไม่ถูกต้องทั้งหมด แต่ก็มีความใกล้เคียงกับการทดลองจริงค่อนข้างมาก

รายการอ้างอิง

1. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
2. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
3. ชวลิต เชียงกุล. โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)
4. มนต์ สติรจินดา. เหล็กกล้า. พิมพ์ครั้งที่ 4. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2538.
5. มนต์ สติรจินดา. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 3. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2537.
6. Vander, Voort., G.F. Atlas of Time-Temperature diagrams for irons and steel, ASM International, 1991.
7. William, Smith, F. Structure and properties of engineering alloys. 2nd ed. McGRAWHILL International Edition, 1993.
8. Charlie, Brooks, R. Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy steels, ASM International, 1996.
9. Totten , G.E., Dates, C.E., and Cliton, N.A. Handbook of quenchants and quenching technology, ASM International,1993.
10. Geiger , G.H., and Pourier , D.R. Transport phenomena in materials processing. United State of America : TMS , 1994.



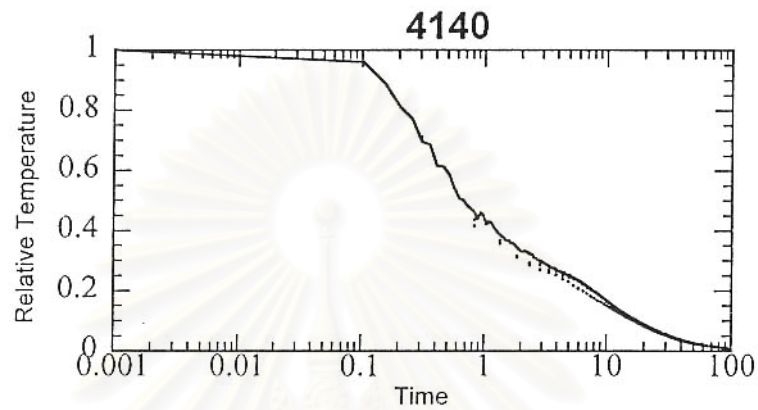
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

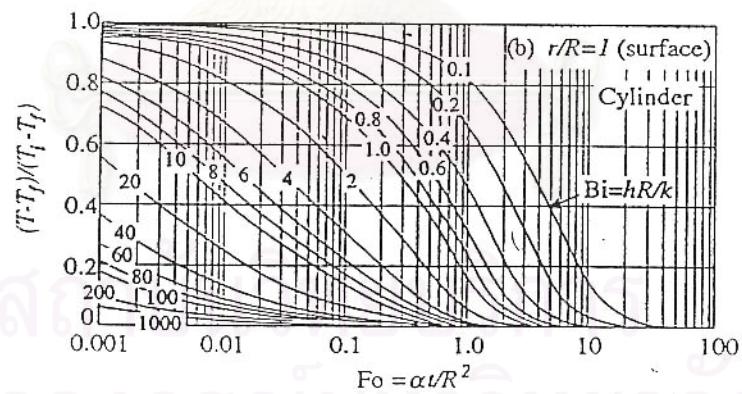
วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

- นำกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาที่ได้จากการทดลองของเหล็กแต่ละเกรดมาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

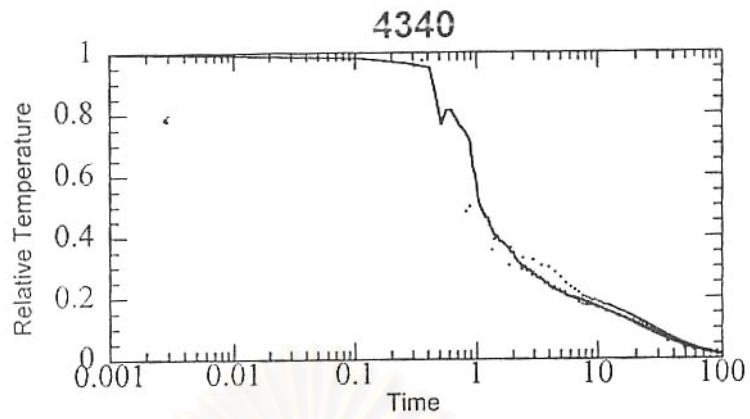


รูปที่ ก-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากการทดลองของเหล็ก

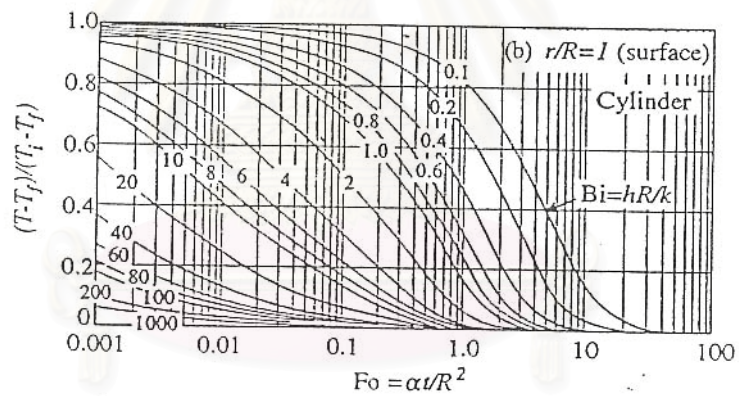
เกรด AISI 4140



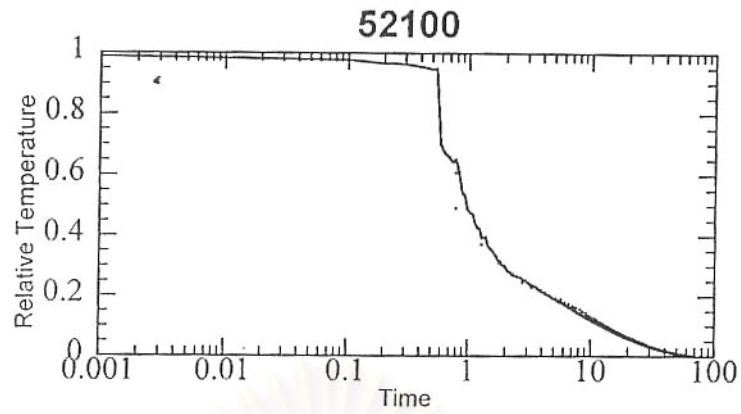
รูปที่ ก-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากมาตรฐาน



รูปที่ ก-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากการทดลองของเหล็กเกรด AISI 4340



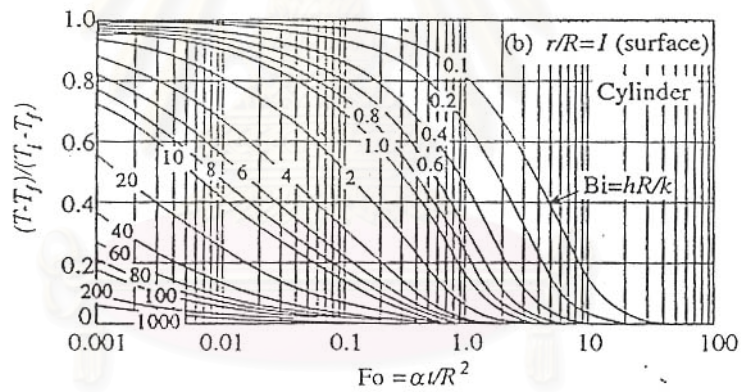
รูปที่ ก-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากมาตรฐาน



รูปที่ ก-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากการทดลองของเหล็ก

เกรด

AISI52100



รูปที่ ก-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ กับเวลาจากมาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- การเปรียบเทียบเพื่อหาค่า Bio Number แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ตามสมการ

$$Bi = hR/k$$

โดยที่ Bi คือ Bio Number
 H คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
 R คือ รัศมีรูปทรงกระบอก
 K คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

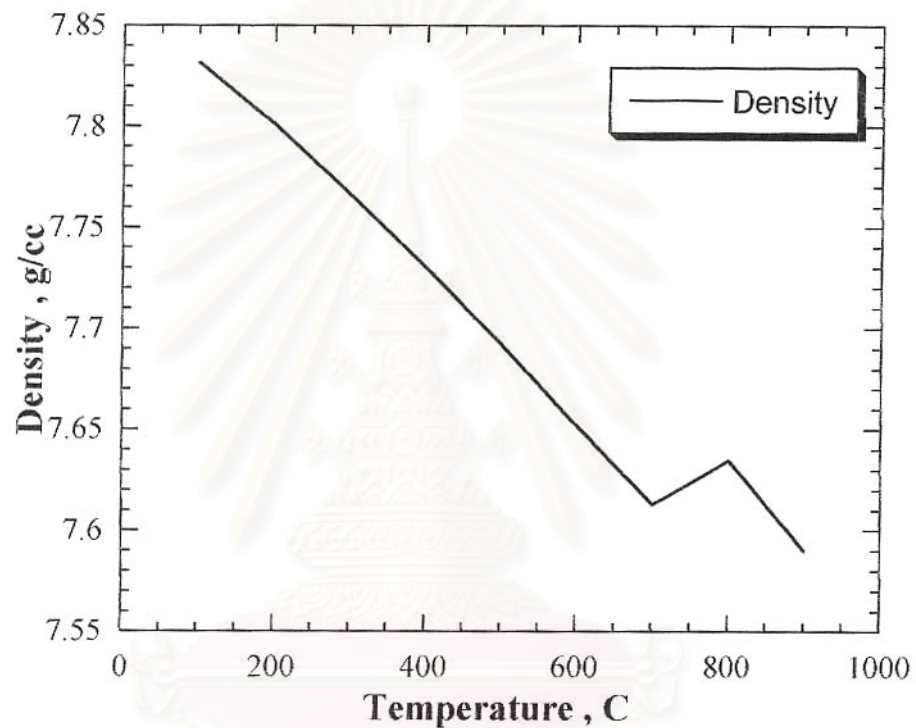
จากการคำนวณได้ค่า h ประมาณ $1500 \text{ W/m}^2 \text{ K}$



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

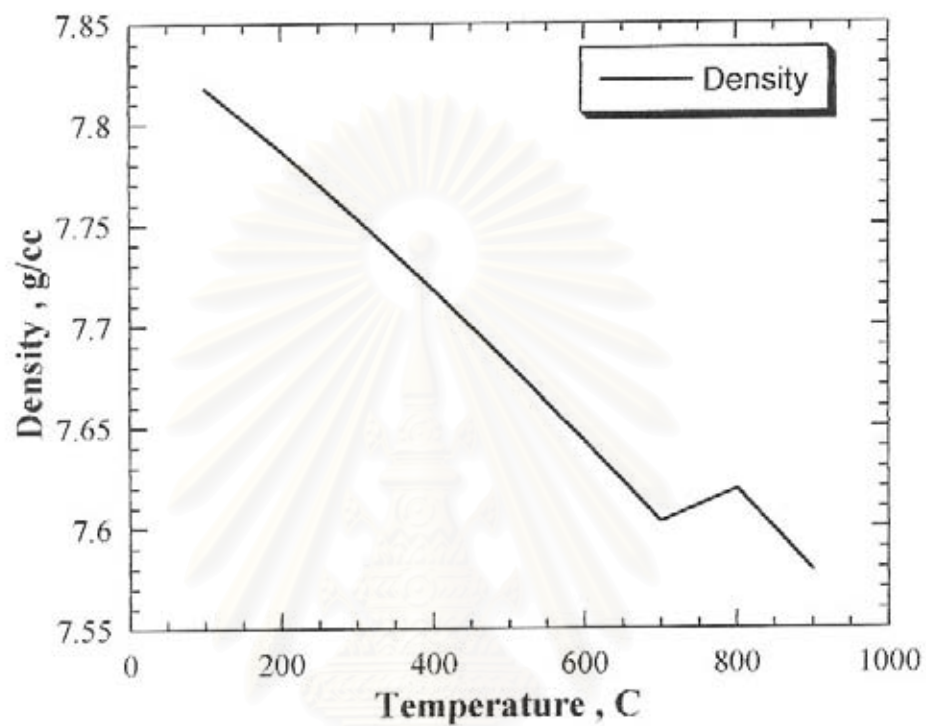
ภาคผนวก ข

ค่าต่างๆที่ได้จากฐานข้อมูลโปรแกรม Procast



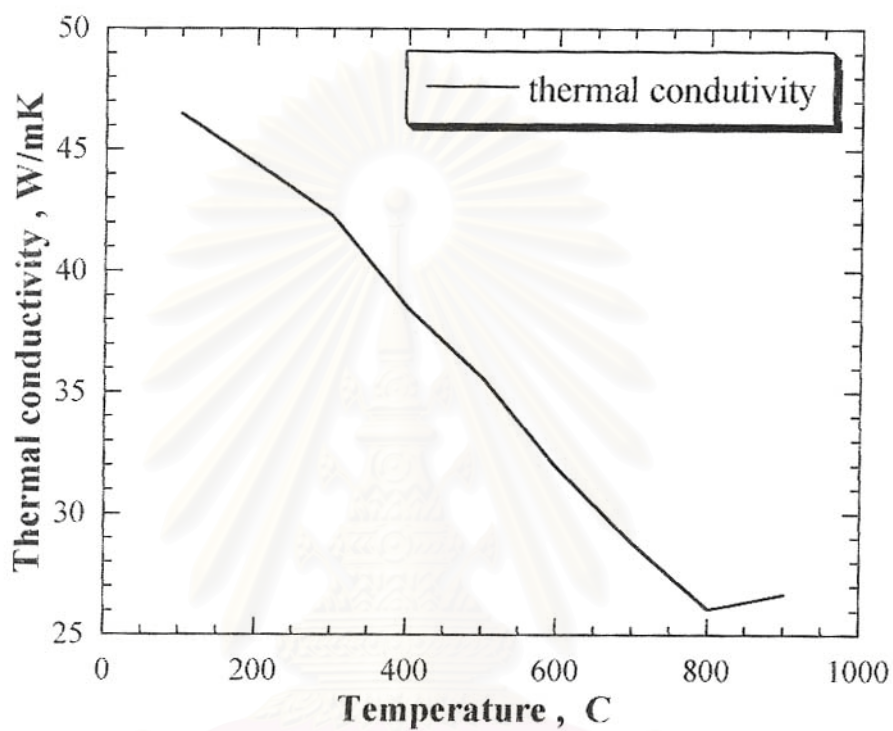
รูปที่ ข-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของเหล็กเกรด 1040

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของเหล็กเกรด 5132

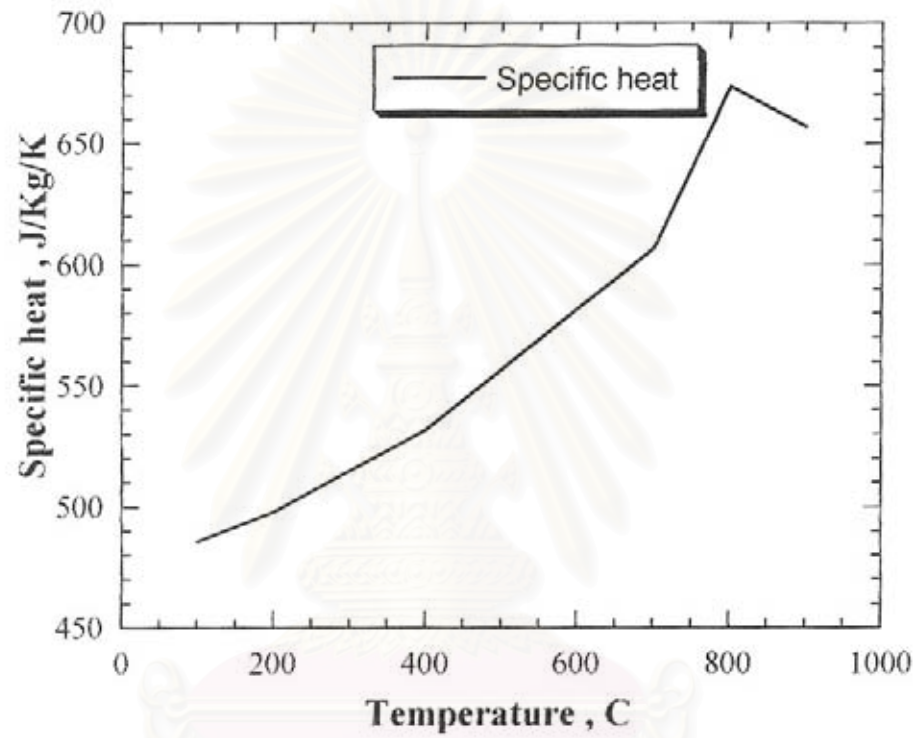
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับอุณหภูมิของเหล็กเกรด

1040

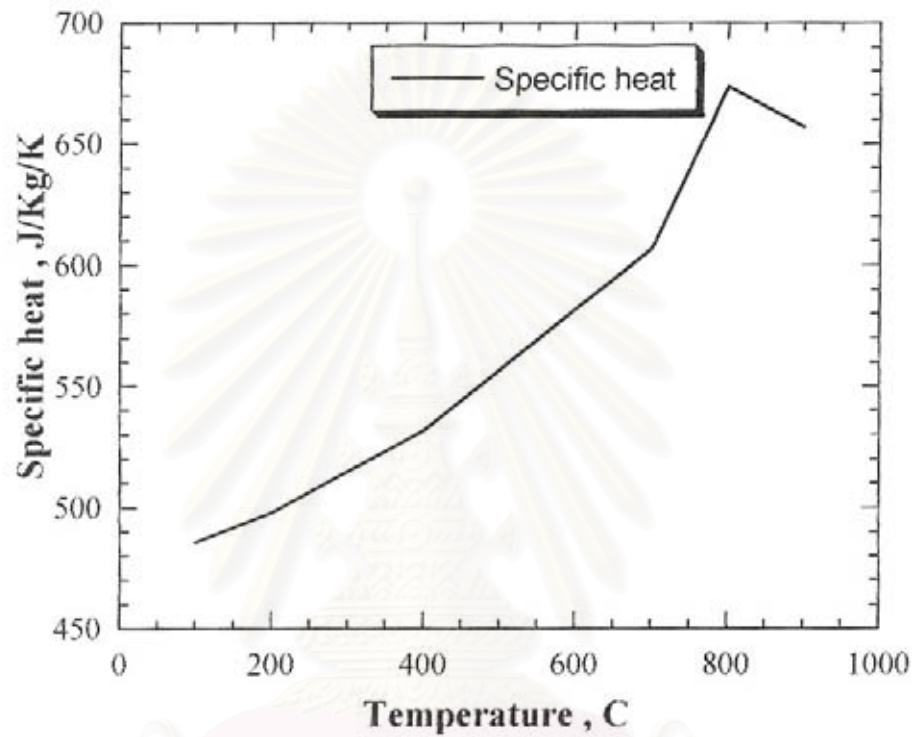
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับอุณหภูมิของเหล็กเกรด

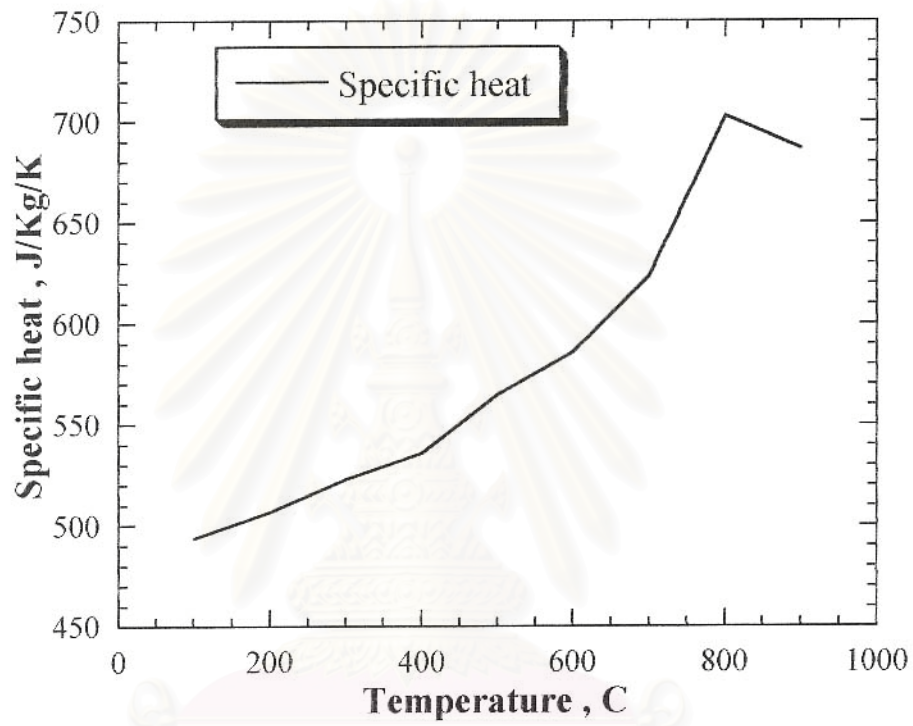
5132

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของฮีเลียมเกรด 1040

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของเหล็กเกรด 5132

สภามหาวิทยาลัยบูรพา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิศรุต พรหมทอง เกิดเมื่อวันที่ 24 เมษายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย