



รายงานการวิจัย

อิทธิพลของทองแดงในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์
Effects of Copper on Austempered Ductile Cast Iron

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยนี้เป็นความลับที่ขอขอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

อิทธิพลของทองแดงในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์
Effects of Copper on Austempered Ductile Cast Iron

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์อุษณีย์ กิตกำธร

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวชุลีพร ป่าไร่

นายรัฐภูมิ พิธิพรม

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2545

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤศจิกายน 2547

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับทุนสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณ พ.ศ. 2545 คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์มนัส สติรจินดา ซึ่งคอยให้คำปรึกษาโดยตลอด นอกจากนี้ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อิทธิพล เคียววณิชย์ ที่ช่วยให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ เช่นเดียวกันขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ 6 ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิค

บทคัดย่อ

เหล็กหล่อเหนียวที่ผสมธาตุทองแดงแตกต่างกัน 2 ส่วนผสม คือ 0.6%Cu และ 1.4%Cu นำมาผ่านกระบวนการผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอริ่งซึ่งประกอบด้วยสองชั้นตอนคือ ออสเทนไนท์ซึ่งที่ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และออสเทนเปอริ่งโดยการทำใหเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากการชุบลงอ่างเกลือที่อุณหภูมิ 300 และ 340 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิออสเทนเปอริ่งนี้เป็นเวลาต่างๆ กัน ในช่วง 60-6000 วินาที จากการตรวจสอบเชิงคุณภาพของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอริ่งทั้งสองส่วนผสมแสดงให้เห็นว่า ปริมาณเบนนิติกเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์เหลือค้างเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำออสเทนเปอริ่ง ขนาดของช่องเบนนิติกเฟอร์ไรท์เป็นเข็มละเอียดกว่าเมื่ออุณหภูมิออสเทนเปอริ่งต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอริ่ง A และ B พบว่า ในเหล็ก B ซึ่งมีปริมาณทองแดงสูงกว่านั้น อัตราการเกิดเบนนิติกเฟอร์ไรท์ในเนื้อที่ที่ห่างออกมาจากกราฟไฟฟ้ช้าลงอย่างเห็นได้ชัด ผลการทดสอบความแข็งและการทดสอบแรงดึงชี้ให้เห็นว่า เหล็กหล่อเหนียวที่ผสมธาตุทองแดงทดแทนนิกเกิล สามารถนำมาผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอริ่งที่มีคุณภาพตามมาตรฐานเหล็กหล่อออสเทนเปอริ่งเกรดความแข็งแรงสูง ในขณะที่ไม่สามารถให้คุณภาพตามมาตรฐานสำหรับเกรดความเหนียวสูง

Abstract

Microstructure and mechanical properties of copper alloyed austempered ductile iron were investigated. The standard tensile specimens were austenitized at 900°C for 60 minute and then austempered at 300°C and 340°C for a range of times 60-6000 second. Results showed that amount of bainitic ferrite and retained austenite increase with increasing austempering time. At lower transformation temperature, the bainitic ferrite structure is finer. The transformation of the higher content of copper alloyed iron shows significant in the difference of microstructure between eutectic cell and intercellular boundary. The yield stress and ultimate tensile stress and %elongation increase with increasing austempering time. The high strength austempered ductile iron was satisfied the standard ASTM A897M:1990. by austempering at 300°C but austempering at 340°C can not produce the more ductile grade of ASTM standard The Microstructure revealed that the amounts of bainitic ferrite, martensite and retained austenite are in good agreement with the tensile properties.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	3
1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการออสเทมเปอร์ริงเหล็กหล่อเหนียว.....	4
2.2 ผลของเวลาต่อการเปลี่ยนเฟสระหว่างการทำออสเทมเปอร์ริง.....	5
2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนเฟสระหว่างการทำออสเทมเปอร์ริง.....	6
2.4 อิทธิพลของธาตุผสมต่อการเปลี่ยนเฟสระหว่างการทำออสเทมเปอร์ริง.....	7
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	9
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	13
4.1. โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังจากานหล่อและภายหลังจากการทำ เพิร์ลลิตไทซ์.....	13
4.2. โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการทำ ออสเทมเปอร์ริง.....	17
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการทำออสเทมเปอร์ริงเทียบกับ.....	17
เวลาที่ใช้ในการทำออสเทมเปอร์ริง	
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการทำออสเทมเปอร์ริงเทียบกับ.....	20
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำออสเทมเปอร์ริง	
4.2.3 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการทำออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียว.....	20
ที่มีปริมาณธาตุทองแดงผสมอยู่แตกต่างกัน	
4.3 สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อที่มีปริมาณธาตุทองแดงผสมอยู่ภายหลังจาก.....	21
ออสเทมเปอร์ริง	
4.3.1 ความแข็ง.....	21
4.3.2 คุณสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง.....	22
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	25

	หน้า
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	25
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	26
บรรณานุกรม.....	27
ประวัตินักวิจัย.....	29

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวตามมาตรฐาน ASTM (A897M-90).....	2
ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเหล็กหล่อเหนียวร้อยละ โดยน้ำหนัก	9
ตารางที่ 3 ค่าความแข็งของเหล็กหล่อภายหลังการทำเพิร์ลไลไทซิง	14

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1	แผนภาพสมมูลแสดงที่มาของเส้น T_0 ซึ่งบอกถึงความเข้มข้นของคาร์บอนเทียบเท่าสูงสุด ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ออสเทนไนท์สามารถเกิดปฏิกิริยาชั้นที่ 1 ได้	5
ภาพที่ 2	แสดงสัดส่วนของเฟสที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการออสเทมเปอร์ริง	6
ภาพที่ 3	ลักษณะของการทำออสเทมเปอร์ริงซ้อนทับลงบนแผนภูมิการเปลี่ยนเฟสระหว่างการเย็นตัวต่อเนื่อง (CCT-Diagram)	8
ภาพที่ 4	รูปทรงและขนาดของงานหล่อรูปตัว Y	9
ภาพที่ 5	แผนภาพแสดงการทำออสเทมเปอร์ริง	10
ภาพที่ 6	รูปทรงและขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง	11
ภาพที่ 7	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว A ภายหลังจากหล่อ	13
ภาพที่ 8	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว A ภายหลังจากทำเพิร์ลไลไทซิง 30 นาที	14
ภาพที่ 9	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุตามแนวระหว่างเม็ดกราฟไฟท์ในเหล็กหล่อเหนียว ภายหลังจากหล่อด้วยการวิเคราะห์ Energy Disperse X-ray Spectroscopy (ก) secondary electron map (ข)-(จ) ปริมาณธาตุ Si, Cu, Mn และ Mo ตามลำดับตามแนวระหว่างกราฟไฟท์ในภาพ (ก)	16
ภาพที่ 10	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ A ที่ผ่านการออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสด้วยเวลาต่างๆ กัน	18
ภาพที่ 11	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ A ที่ผ่านการออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสด้วยเวลาต่างๆ กัน	18
ภาพที่ 12	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ B ที่ผ่านการออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสด้วยเวลาต่างๆ กัน	19
ภาพที่ 13	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ B ที่ผ่านการออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสด้วยเวลาต่างๆ กัน	19
ภาพที่ 14	สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ (ก) ความแข็ง (ข) ความเค้นจุดคราก (ค) ความเค้นแรงดึงสูงสุด และ (ง) เปอร์เซนต์การยืดตัว	22
ภาพที่ 15	▼ ความเค้นจุดคราก และ ∇ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ของเหล็กหล่อจากการทดลอง (ก)-(ข) เหล็กหล่อ A ออสเทมเปอร์ริงที่ 300 และ	24

340 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ค)-(ง) เหล็กหล่อ B ออสเทมเปอร์ที่
300 และ 340 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เทียบกับ • ความเค้นจุดคราก
○ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดตามมาตรฐาน ASTM A897M-90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน เหล็กหล่อ (Cast Iron) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากในการนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลต่างๆ เนื่องจากสามารถที่จะทำการขึ้นรูปเป็นรูปทรงซับซ้อนได้ง่ายกว่าเหล็กเหนียวโดยอาศัยวิธีการหล่อหลอม ทั้งยังสามารถที่จะทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นอีกได้ง่ายด้วยกระบวนการอบชุบทางความร้อน ด้วยเหตุนี้ราคาต้นทุนของเหล็กหล่อจึงค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเหล็กเหนียวหรือเหล็กกล้า เหล็กหล่อสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการแข็งตัวออกได้เป็น 1) เหล็กหล่อสีขาว 2) เหล็กหล่อเทา และ 3) เหล็กหล่อกราไฟต์กลมหรือเหล็กหล่อเหนียว ในวงการอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลนั้นเหล็กหล่อเหนียวเป็นที่นิยมนำมาใช้ซึ่งอาจมีชื่อเรียกภาษาอังกฤษต่างๆ กันไป เช่น Nodular cast iron , Spheroidal graphite cast iron (S.G. cast iron) หรือ Ductile cast iron เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลและความเหนียวที่ดีกว่าเหล็กหล่อชนิดอื่นๆ (มนัส สติรจินดา, 1993)

เหล็กหล่อเหนียวยังถูกแบ่งประเภทตามโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะพื้น (Matrix) ซึ่งเป็นผลมาจากชนิดและปริมาณธาตุผสมต่างๆ และอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ประเภทของเหล็กหล่อเหนียวแบ่งตามเนื้อโลหะพื้น (Matrix) ได้แก่

1. เหล็กหล่อเหนียวที่มีเนื้อพื้นเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferritic Ductile Cast Iron)
2. เหล็กหล่อเหนียวที่มีเนื้อพื้นเป็นเฟอร์ไรต์ผสมกับเพิลไลต์ (Ferrite-Pearlitic Ductile Cast Iron)
3. เหล็กหล่อเหนียวที่มีเนื้อพื้นเป็นเพิลไลต์ (Pearlitic Ductile Cast Iron)

เหล็กหล่อเหนียวที่มีเนื้อพื้นเป็นเฟอร์ไรต์ปกติจะมีความแข็งแรงต่ำแต่มีความเหนียวสูง ส่วนเหล็กหล่อเหนียวที่มีเนื้อพื้นเป็นเพิลไลต์จะมีความแข็งแรงสูงขึ้นเล็กน้อยและยังคงความเหนียวปานกลาง หากต้องการใช้งานเหล็กหล่อเหนียวที่ต้องการความแข็งแรงสูงมากๆ จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างส่วนที่เป็นเนื้อพื้น (Matrix) โดยอาศัยกระบวนการอบชุบทางความร้อนเพื่อให้ได้โครงสร้างเนื้อพื้นที่มีความแข็งแรงสูงๆ และไม่มีผลหรือมีผลน้อยต่อความเหนียว (Ductility) และความแกร่ง (Toughness) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างเนื้อพื้นที่ได้จากการอบชุบความร้อนที่เรียกว่า “ออส

เทมเปอร์ริง” ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์ที่มีรูปร่างแหลม (Acicular Ferrite) ที่เรียกว่าเบนนิติกเฟอร์ไรต์หรือออสเฟอร์ไรต์ และออสเทนไนท์เหลือค้าง (Retained Austenite) โครงสร้างดังกล่าวนี้สามารถให้ทั้งความแข็งแรง (Strength), ความเหนียว (Ductility), ความแกร่ง (Toughness) สูงเป็นพิเศษ ดังแสดงในตารางที่ 1 และเราเรียกเหล็กหล่อเหนียวที่โครงสร้างเนื้อพื้นมีลักษณะแบบนี้ว่า “เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ Austempering Ductile Cast Iron หรือ ADI” (E. Dorazil, 1991)

ตารางที่ 1 : สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวตามมาตรฐาน ASTM A897M-90 (M. F. Burditt, 1999)

Grade	Minimum yield strength N mm ⁻²	Minimum Tensile strength N mm ⁻²	Minimum elongation %	Minimum Unnotched Charpy value J	Typical Brinell Hardness
1	550	850	10	100	269-321
2	700	1050	7	80	302-363
3	850	1200	4	60	341-444
4	1100	1400	1	35	388-477
5	1300	1600	-	-	444-555

เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนผสมของธาตุ निकเกิดอยู่ด้วย ประมาณ 0.2-2.0% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณธาตุผสมอื่นด้วย บทบาทของธาตุ निकเกิดก็เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งเราทราบดีว่านอกจากธาตุ निकเกิดแล้ว ทองแดง เป็นอีกธาตุหนึ่ง que แสดงบทบาทเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กหล่อได้เป็นอย่างดีและมีราคาถูกกว่า निकเกิด ดังนั้นหากเราสามารถเติมธาตุทองแดงทดแทน निकเกิดแล้วสามารถอบชุบเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ได้คุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ก็จะช่วยลดต้นทุนราคาของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ได้ (J. Liu & R. Elliott, 1999)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเติมธาตุทองแดงทดแทนธาตุ निकเกิดในเหล็กหล่อเหนียวสำหรับนำมาผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ Austempered Ductile Cast iron (ADI)

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมทองแดงต่อการเปลี่ยนเฟสและคุณสมบัติเชิงกลหลังการอบชุบออสเทมเปอร์ของเหล็กหล่อเหนียว

1.2.3 เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับงานวิจัยให้กับนักวิจัยที่เกี่ยวข้องรวมทั้งเป็นข้อมูลความรู้ให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องกับการผลิตเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปถึงการใช้ธาตุผสมได้แก่ ธาตุทองแดง ทดแทนการผสมธาตุนิกเกิลที่มีราคาแพงลงในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติต่างๆของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผสมธาตุทดแทนมีความทัดเทียมกับของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผสมธาตุนิกเกิล หรือมีคุณสมบัติเทียบเคียงตามมาตรฐานของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

1.3.2 ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ผลของปริมาณธาตุทองแดง อุณหภูมิ และเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริง ต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำส่วนผสมทางเคมีใหม่ของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการอบชุบด้วยวิธีออสเทมเปอร์มาใช้แทนเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกรดคุณภาพเดิม โดยที่คุณสมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลงหรือดีขึ้นในบางคุณสมบัติ ซึ่งส่วนผสมทางเคมีใหม่นี้เป็นส่วนผสมที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกรดคุณภาพเดิม

ดังนั้นหากนำความรู้ในส่วนนี้ไปเผยแพร่สู่หน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหการและวัสดุศาสตร์และโรงงานหล่อ จะช่วยเป็นข้อมูลพื้นฐานสนับสนุนงานวิจัยต่อไปหรือนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เพื่อลดต้นทุนให้ต่ำกว่าเดิม

1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหการและวัสดุศาสตร์
ผู้ประกอบการประเภทงานหล่อ

บทที่ 2

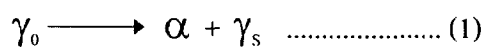
ทฤษฎีและการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการออสเทมเปอร์ริงเหล็กหล่อเหนียว

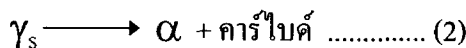
สำหรับการผลิตเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์นั้น สามารถทำได้โดยการนำเหล็กหล่อเหนียวที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอไรต์หรือ เฟอไรต์ผสมกับเฟลไลต์ มาผ่านกรรมวิธีการอบชุบความร้อนที่เรียกว่า ออสเตนไนไทซิ่ง (Austenitizing) โดยการอบที่อุณหภูมิช่วงประมาณ 850-950 องศาเซลเซียส เพื่อให้คาร์บอนในกราฟไฟท์เกิดการแพร่เข้าไปละลายอยู่อย่างอิมิตัวในออสเตนไนท์ซึ่งเป็นเฟสที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูงและความสามารถในการละลาย (solubility) ของคาร์บอนในออสเตนไนท์สูง ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent) ภายในออสเตนไนท์ที่จำเป็นสำหรับการทำออสเทมเปอร์มีค่าเท่ากับ 4.3-4.60 เมื่อปริมาณคาร์บอนในออสเตนไนท์ทั่วทั้งหมควัดเพียงพอก็จะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิการออสเตนไนไทซิ่ง (Austenitizing Temperature) ลงมาที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริง (Austempering Temperature) และคงอุณหภูมิไว้ด้วยเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเบนนิติกเฟอร์ไรต์และออสเตนไนท์เหลือค้าง (Retained Austenite)

จากการศึกษาที่ผ่านมา (*J. Achary and D. Venugopalan, 2000, J.Mallia, M.Grech and R.E.Smallman, 1998, C.H.Chang and T.S.Shih 1994*) พบว่าปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างการทำออสเทมเปอร์ริงนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชั้น คือ

ชั้นที่ 1 ออสเตนไนท์เริ่มต้น (γ_0) เปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal transformation) ไปเป็น เบนนิติกเฟอร์ไรต์ซึ่งก็คือเฟสเฟอไรต์ (α) ที่มีรูปร่างแหลม กับเฟสออสเตนไนท์ที่มีเสถียรภาพสูงขึ้นเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนละลายอยู่สูง (γ_s)

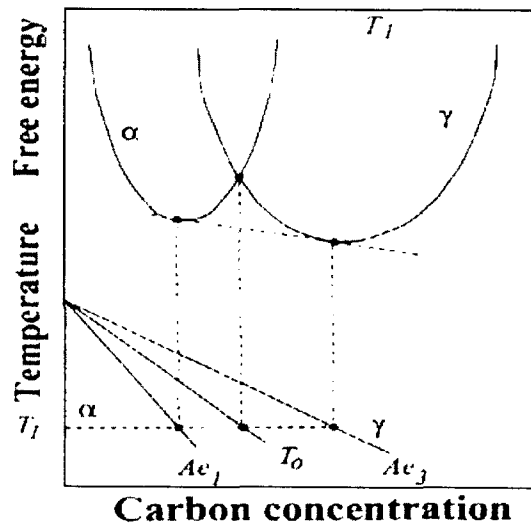


ชั้นที่ 2 ออสเตนไนท์ (γ_s) ที่มีเสถียรภาพแตกตัวให้เฟสเฟอไรต์กับคาร์ไบด์ซึ่งเรียกรวมว่าเบนไนท์นั่นเอง (*M.A. Yescas et al. 2001*)

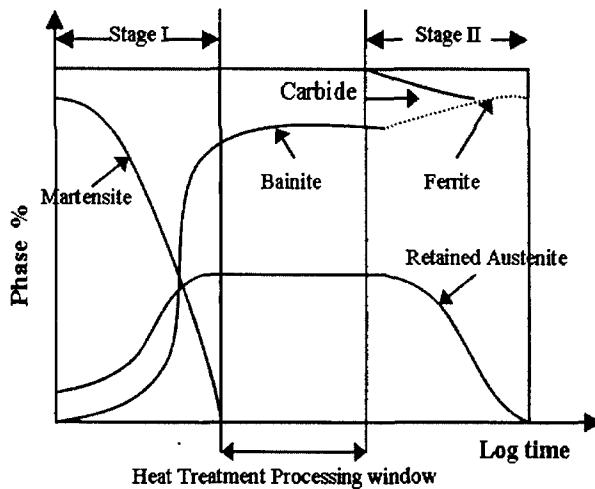


2.2 ผลของเวลาต่อการเปลี่ยนเฟสระหว่างการทำออสเทมเปอร์ริง

ในขั้นที่ 1 ของการเปลี่ยนเฟสนั้นคาร์บอนจะถูกผลักออกจากออสเตนไนท์เพื่อเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเบนนิติกเฟอร์ไรท์ที่มีคาร์บอนต่ำ ถ้าหากเราใช้เวลาในการออสเทมเปอร์ริงเพียงช่วงสั้นๆ การเปลี่ยนเฟสในขั้นที่ 1 นี้ยังเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อชิ้นงานเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง ออสเตนไนท์ส่วนที่เหลือที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 1 รวมทั้งออสเตนไนท์ที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นที่หนึ่งแต่ยังคงมีปริมาณคาร์บอนละลายอยู่ไม่สูงมากนักก็จะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์เนื่องจากยังไม่มีเสถียรภาพเพียงพอ ดังนั้นโครงสร้างสุดท้ายก็จะประกอบไปด้วย เบนนิติกเฟอร์ไรท์เล็กน้อย ออสเตนไนท์เหลือค้างเพียงเล็กน้อย และมาร์เทนไซต์จำนวนมาก หากเราใช้เวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงนานมากขึ้นปริมาณเฟสเบนนิติกเฟอร์ไรท์ก็จะมากขึ้น ปริมาณคาร์บอนที่ถูกผลักออกจากออสเตนไนท์ส่วนที่กลายเป็นเบนนิติกเฟอร์ไรท์ก็จะละลายอยู่ในออสเตนไนท์ส่วนที่เหลือสูงมากขึ้น ซึ่งเมื่อออสเตนไนท์ส่วนที่เหลือมีปริมาณคาร์บอนสูงเกินค่า T_0 ก็จะส่งผลทำให้เสถียรภาพของออสเตนไนท์สูงขึ้นและไม่สามารถเปลี่ยนเฟสให้เบนนิติกเฟอร์ไรท์ได้เนื่องจากพลังงานอิสระของเฟสออสเตนไนท์ต่ำกว่า ตามที่แสดงในแผนภูมิสมดุลภาพที่ 1 เมื่อชิ้นงานเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้องออสเตนไนท์เหล่านี้ก็จะยังคงสภาพเป็นอยู่ที่เราเรียกว่า ออสเตนไนท์เหลือค้าง ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งแสดงภาพรวมสัดส่วนของเฟสที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลาต่างๆ กัน



ภาพที่ 1 แผนภาพสมดุลแสดงที่มาของเส้น T_0 ซึ่งบอกถึงความเข้มข้นของคาร์บอนเทียบเท่า สูงสุด ณอุณหภูมิต่างๆ ที่ออสเตนไนท์สามารถเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ได้ (N. Darwish and R. Elliott, 1993)



ภาพที่ 2 แสดงสัดส่วนของเฟสที่เปลี่ยนแปลงในขณะทำการอบสเทมเปอร์ (N. Darwish and R. Elliott, 1993)

สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์ (ADI) ที่ได้จากระบวนการอบสเทมเปอร์นี้ จะให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดี คือมีทั้งความแข็งแรงสูง ความแกร่งสูงและความเหนียวดี ก็ต่อเมื่อมีปริมาณเฟสต่างๆ ได้แก่ เบนนิติกเฟอร์ไรท์ ออสเทนไนท์เหลือค้าง ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ในปริมาณที่เหมาะสมตามคุณสมบัติเชิงกลที่เราต้องการ เบนนิติกเฟอร์ไรท์ให้คุณสมบัติที่ดีด้านความแข็งแรงและความแกร่ง ในขณะที่ออสเทนไนท์เหลือค้างนี้ให้คุณสมบัติที่ดีในเรื่องของความเหนียวและช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแกร่ง ทำให้ไม่เปราะและแตกหักง่าย ส่วนปฏิกิริยาขั้นที่ 2 นั้น มักจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กับช่วงท้ายของการเปลี่ยนเฟสตามปฏิกิริยาในขั้นที่ 1 ผลของการเปลี่ยนเฟสในขั้นที่ 2 นี้ จะทำให้เกิดเป็นเฟสเฟอร์ไรท์ปกติ กับคาร์ไบด์ ซึ่งจะมีผลทำให้เหล็กหล่อเปราะ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาปริมาณเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำอบสเทมเปอร์เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลตามต้องการ

2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนเฟสระหว่างการทำอบสเทมเปอร์

ช่วงอุณหภูมิการทำอบสเทมเปอร์จะมีผลต่อความละเอียดของเบนนิติกเฟอร์ไรท์ กล่าวคือที่อุณหภูมิการทำอบสเทมเปอร์ต่ำ ปริมาณนิวเคลียสของเฟสเบนนิติกเฟอร์ไรท์จะมีจำนวนมาก และในขณะเดียวกันความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำก็จะต่ำไปด้วยดังนั้นลักษณะของเบนนิติกเฟอร์ไรท์ที่ได้ก็จะเล็กละเอียด ส่วนที่อุณหภูมิสูงปริมาณนิวเคลียสของเฟสเบนนิติกเฟอร์ไรท์มีจำนวนน้อยและเนื่องจากคาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปอยู่ในออสเทนไนท์ได้ดีที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นลักษณะของเบนนิติกเฟอร์ไรท์ที่ได้จะหยาบกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

ลักษณะที่แตกต่างกันของเบนนิติกเฟอร์ไรท์จะส่งผลไปถึงคุณสมบัติเชิงกล คือ หากโครงสร้างเต็มไปด้วยเบนนิติกเฟอร์ไรท์ที่เล็กละเอียดก็จะมีความแข็งแรงสูง ความต้านทานแรงดึงสูง แต่ความเหนียวต่ำ และหากโครงสร้างเต็มไปด้วยเบนนิติกเฟอร์ไรท์ที่ใหญ่และหยาบ ความแข็งและความต้านทานแรงดึงจะต่ำกว่าแต่ความเหนียวสูงขึ้น

2.4 อิทธิพลของธาตุผสมต่อการเปลี่ยนเฟสระหว่างการทำออสเทมเปอร์

อย่างไรก็ตามเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ (ADI) เป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมมีเฉพาะช่วงเท่านั้นที่จะสามารถนำมาผ่านกระบวนการออสเทมเปอร์แล้วได้โครงสร้างเป็นเบนนิติกเฟอร์ไรท์และออสเตนไนท์เหลือค้าง ดังที่กล่าวไว้ว่า ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าต้องอยู่ในช่วง 4.30-3.60 และจากภาพที่ 3 ซึ่งแสดงลักษณะของการทำออสเทมเปอร์ขึ้นที่บดบนแผนภูมิการเปลี่ยนเฟสระหว่างการเย็นตัวต่อเนื่อง(CCT-Diagram) จะเห็นได้ว่าจะต้องควบคุมให้อัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิออสเตนไนท์ซึ่งลงมาที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์เร็วพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์ซึ่งจะเป็นไปได้ยาก แต่พบว่า การเติมธาตุผสมบางธาตุลงไปจะส่งผลช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) คือช่วยให้อัตราการเย็นตัวที่เกิดเฟอร์ไรต์ในแผนภูมิการเปลี่ยนเฟสตามความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาเลื่อนออกไปทางขวานั้นหมายถึงช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเฟสออสเตนไนท์ และช่วยป้องกันการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์ระหว่างการทำให้โลหะเย็นตัวจากอุณหภูมิออสเตนไนท์ซึ่งลงมาที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ (*M. F. Burditt, 1999*) ธาตุผสมที่ใช้กันอยู่ได้แก่ ธาตุนิเกิล (Ni) และ โมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งเป็นกลุ่มธาตุที่มีราคาแพง ส่งผลให้ราคาเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีราคาสูง ดังนั้นเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์จึงยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก ทั้งนี้มีคุณสมบัติเชิงกลหลายประการที่เด่นกว่าเหล็กหล่อและเหล็กกล้าบางเกรด ดังนั้นในโครงการวิจัยโครงการนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาถึงการปรับปรุงส่วนผสมของเหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast Iron) ใหม่ โดยจะทำการผสมธาตุทองแดง (Cu) ลงไปแทนธาตุนิเกิล (Ni) ซึ่งทองแดงเป็นธาตุที่มีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับธาตุนิเกิล อันจะช่วยลดต้นทุนการผลิตเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ให้ต่ำลงได้ โดยธาตุทองแดงมีคุณสมบัติหลายประการที่ส่งผลต่อเหล็กหล่อเหนียวเหมือนกับธาตุนิเกิล (*M. F. Burditt, 1999, S.Yazdani & R.Elliott, 1999 และ มนัส สติริจินดา, 2536*) เช่น

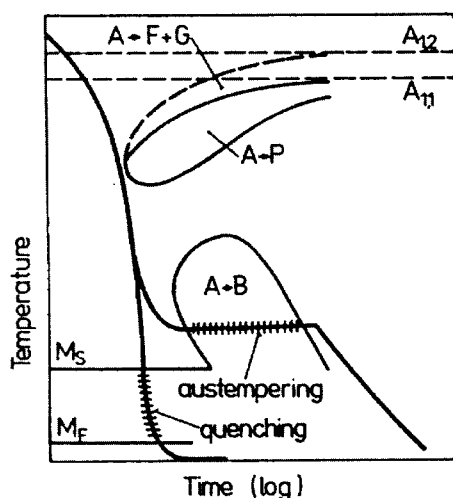
1. ช่วยให้เกิดกราไฟต์ (Graphitizer) และมีอิทธิพลเทียบเท่ากับธาตุนิเกิลคือประมาณ +0.3 เท่าของธาตุ Si

2. ถ้าผสมธาตุทองแดงลงไปจะมีผลช่วยลดการเกิดคาร์ไบด์ (Carbide) ขนาดใหญ่ซึ่งโดยทั่วไปงานหล่อมักจะเกิดคาร์ไบด์ในบริเวณที่มีความหนาหลายๆ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำ แต่หากผสมธาตุทองแดง ลงไปประมาณ 2 % จะพบว่าไม่เกิด Carbide ในบริเวณที่มีความหนาหลายๆ

3. หากผสมธาตุทองแดงลงในเหล็กหล่อแล้วจะส่งผลทำให้เฟิลไลท์มีเสถียรภาพ และไม่เกิดเฟอไรต์เหล็กหล่อจึงมีโครงสร้างที่เป็นเนื้อพื้น (Matrix) ที่สม่ำเสมอ แต่ธาตุ निकิลมีผลช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนท์ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำแต่ความเหนียวสูง ดังนั้นเมื่อทำออสเทมเปอร์จึงมีโอกาสไม่ได้โครงสร้างเนื้อพื้นเฟอไรท์รูปทรงแหลมและเบนไนท์ที่มีทั้งความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวดี

4. ทองแดงเป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกับธาตุ निकิลเกิดดังนั้นเมื่อผสม ธาตุทองแดงจะทำให้คุณสมบัติความเค้นแรงดึงและความแข็งเพิ่มมากขึ้นแต่จะต้องผสม ธาตุทองแดง ในปริมาณไม่มากกว่า 2.5% เพราะจะกลับทำให้คุณสมบัติความเค้นแรงดึง และความแข็งลดลงเนื่องจากธาตุทองแดงสามารถละลายในเหล็กได้มากที่สุดประมาณ 3-3.5% ถ้าผสมธาตุทองแดงมากกว่าความสามารถในการละลาย ธาตุทองแดงส่วนเกินจะไปจับตัวรวมกันที่ขอบเกรน (Segregation) อย่างไรก็ตามหากต้องการผสมธาตุทองแดงมากๆ จะต้องผสมร่วมกับธาตุ निकิลซึ่งการผสม निकิล 1% จะทำให้ความสามารถในการละลายของธาตุทองแดงเพิ่มขึ้น 0.4%(แต่โดยรวมแล้วผลของ Ni ที่มีต่อค่าความเค้นแรงดึง และความแข็งจะมีน้อยกว่าในธาตุทองแดง)

5. ธาตุทองแดง ช่วยเพิ่มความสามารถในการกลึง-ไส (Machine ability) ให้ดีขึ้น



ภาพที่ 3 ลักษณะของการทำออสเทมเปอร์ซึ่งขึ้นกับลงบนแผนภูมิการเปลี่ยนเฟสระหว่างการเย็นตัวต่อเนื่อง
CCT-Diagram (E. Dorazil, 1991)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

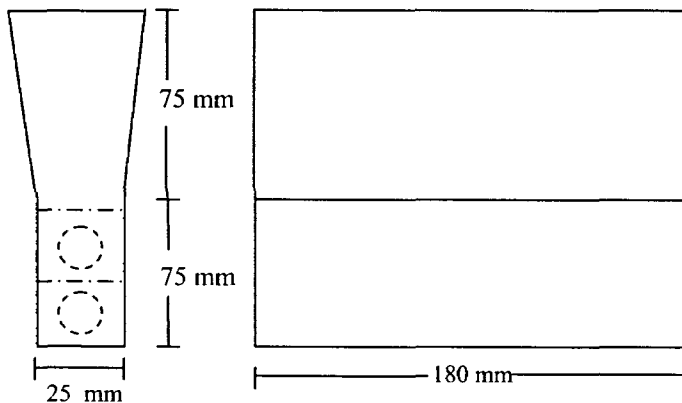
งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนคือ

1. การหล่อหลอมเหล็กหล่อเหนียว(Casting)

หล่อเหล็กหล่อเหนียวลงในแบบรูปตัว Y ดังในภาพที่ 4 แล้วนำโลหะเฉพาะด้านล่างมาทำการทดลอง ทั้งนี้เพื่อกำจัดปัญหาผลการทดสอบคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากโพรงที่เกิดจากการหดตัวของโลหะที่แข็งตัวที่ช้ากว่า ซึ่งโพรงเหล่านี้ก็จะเกิดขึ้นที่ส่วนบนของแท่งเหล็กรูปตัว Y เหล็กหล่อเหนียวที่ใช้มีส่วนผสมของธาตุต่างๆ ตามตารางที่ 2 ซึ่งในแต่ละส่วนผสมจะไม่มีคาร์บอนเกินขีดจำกัด และจะมีปริมาณทองแดงที่แตกต่างกันคือ 0.75% และ 1.37% โดยน้ำหนัก การตรวจสอบธาตุผสมต่างๆ ในเหล็กหล่อนั้นได้จากตรวจสอบโดยเครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี Spark Emission Spectrometer

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเหล็กหล่อเหนียวร้อยละโดยน้ำหนัก

Alloy	C	Si	Cu	Mn	Mo	Ni	Cr	P	S	Bal.
A	3.17	2.67	0.75	0.55	0.14	0.017	0.04	0.016	0.025	Fe
B	3.14	2.71	1.37	0.59	0.14	0.018	0.04	0.017	0.018	Fe



ภาพที่ 4 รูปทรงและขนาดของงานหล่อรูปตัว Y

2. การตรวจสอบชิ้นงานเหล็กหล่อ

ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคเพื่อที่จะประมาณเวลาในการทำอสเทมเปอร์ิ่ง โดยคร่าวๆ และวิเคราะห์การแยกตัว(Segregation) ของธาตุผสมที่เกิดขึ้นจากการแข็งตัวของน้ำโลหะ ด้วย Energy Disperse X-ray Spectroscopy (EDX)

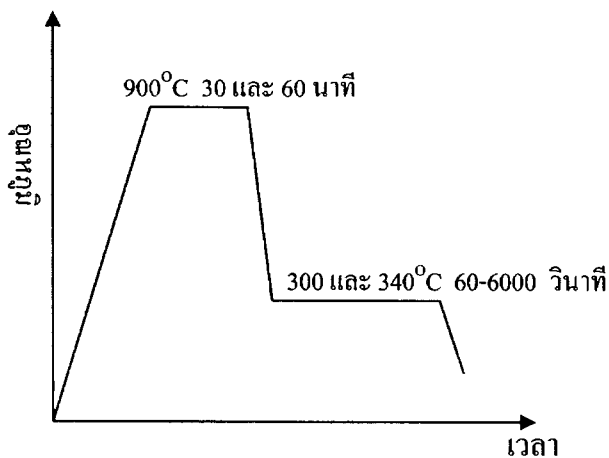
3. การทำอสเทมเปอร์ิ่ง

นำเหล็กหล่อเหนียวรูป Y ส่วนบนออก แล้วนำส่วนล่างมาแบ่งตามแนวยาวเป็น 2 แท่ง ที่ระดับความสูงประมาณ 25 มิลลิเมตร จากนั้นนำแต่ละแท่งไปตัดแบ่งย่อยเป็นตัวอย่างหนาประมาณ 15 มิลลิเมตร แล้วนำไปทำอสเทมเปอร์ิ่ง ซึ่งขั้นตอนนี้สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนย่อยคือ

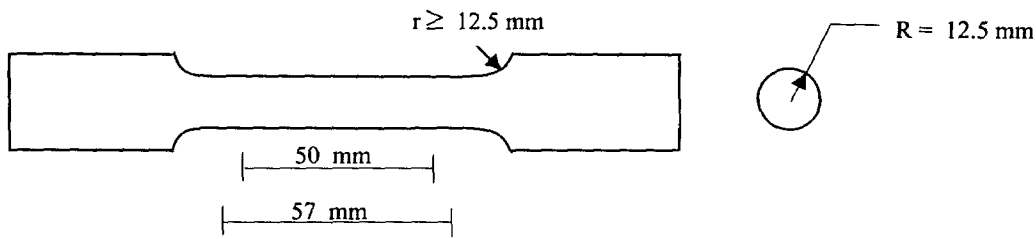
3.1 ขั้นตอนการทำอสเตนนีไทต์ซึ่งเป็นการอบชิ้นงานในเตาไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน และใช้เวลาในการอบประมาณ 30 นาที และ 60 นาที เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ได้ออสเตนนีท์ที่คาร์บอนเข้าไปละลายอยู่ใน ปริมาณที่เหมาะสม

3.2 ขั้นตอนการทำอสเทมเปอร์ิ่งเป็นการลดอุณหภูมิของชิ้นงานที่ผ่านการทำอสเตนนีไทต์ซึ่งลงมาอยู่ที่อุณหภูมิอสเทมเปอร์ิ่ง ซึ่งกำหนดไว้ในการทดลองนี้คือ 300°C และ 340°C และรักษาอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 60-6000 วินาที ดังแสดงในแผนภาพที่ 5

นอกจากนี้ก็เตรียมเหล็กหล่อเหนียวนี้เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 ซึ่งมีขนาดดังในภาพที่ 6 เพื่อนำมาทำอสเทมเปอร์ิ่งและนำไปทดสอบแรงดึงต่อไปเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5 แผนภาพแสดงการทำอสเทมเปอร์ิ่ง



ภาพที่ 6 รูปทรงและขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

4. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภายหลังการทำออสเทมเปอร์

ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทำออสเตนไนท์ซึ่งและออสเทมเปอร์ด้วยอุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน จะนำมาผ่านการขัดหยาบตั้งแต่กระดาษทรายเบอร์ 180 ถึง เบอร์ 1200 และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.5 ไมครอน แล้วกัดกรดด้วยกรดไนตริก 2% โดยปริมาตร จากนั้นจึงตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (optical microscope) ทำการถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคของแต่ละชิ้นงานและวัดความแข็งแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

5. การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบจะทำการทดสอบโดยการวัดความแข็ง ตัวอย่างละ 3 จุด และทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความเค้นจุดคราก (Yield strength), ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) โดยหากจากค่าเฉลี่ยการทดสอบ 3 ตัวอย่าง แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกรดที่มีนิกเกิลผสมอยู่ว่าจะมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าหรือไม่ หรือเปรียบเทียบกับค่าในมาตรฐานเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

6. การวิเคราะห์ผล

นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล และข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำออสเทมเปอร์อันได้แก่ ปริมาณทองแดงในเหล็กหล่อ อุณหภูมิและเวลาในการทำออสเทมเปอร์

วิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการทำออสเทมเปอริงสำหรับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่มีส่วนผสมของธาตุทองแดงที่ใช้ทดแทนนิกเกิลตามการทดลอง และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำการทดลอง รวมทั้งหาแนวทางการแก้ไขปัญหานั้นๆ ไว้

7. สรุปผล เขียนรายงาน และเผยแพร่

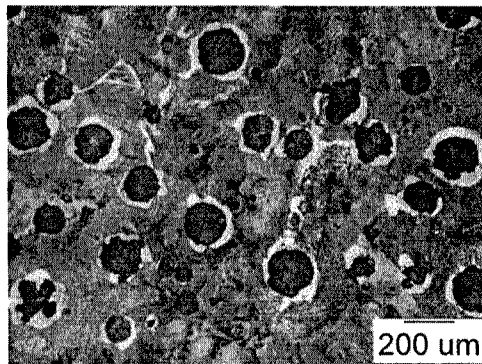
สรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ นอกจากนี้ได้เผยแพร่งานวิจัยในงานประชุมเทคโนโลยีการหล่อแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1 และ 8th Asian Foundry Congress

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1. โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังงานหล่อและภายหลังการทำ เฟอร์ลิตไทซิ่ง

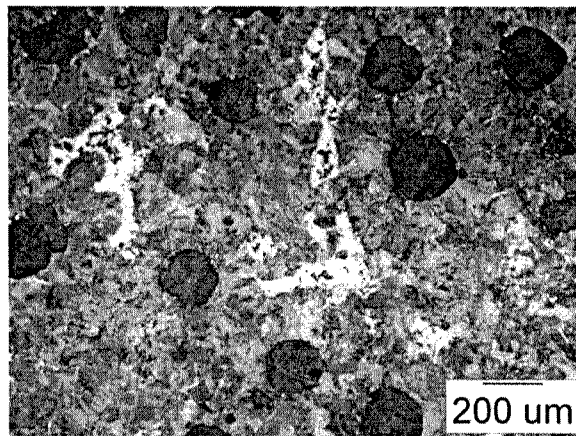
จากการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้จากงานหล่อที่มีส่วนผสมของธาตุทองแดงแตกต่างกันพบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปภายหลังงานหล่อทั้งหมดมีเฟสเฟอร์ลิตไลท์เป็นเฟสหลัก และมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เล็กน้อยที่ล้อมรอบกราฟไฟท์เม็ดกลมอยู่ในลักษณะที่เรียกว่า โครงสร้างดาวัว ดังในภาพที่ 7 โดยถ้าเปรียบเทียบความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผสมธาตุทองแดงปริมาณต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณทองแดงมากขึ้น ปรากฏมีโครงสร้างเฟอร์ลิตไลท์มากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กหล่อที่มีทองแดงน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากทองแดงช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง หากไม่มีทองแดงผสมอยู่หรือมีน้อยมาก ก็จะเกิดเฟสเฟอร์ไรต์มากขึ้น



ภาพที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว A ภายหลังการหล่อ

จากลักษณะโครงสร้างภายหลังงานหล่อซึ่งมีปริมาณเฟอร์ลิตไลท์มากและมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เล็กน้อยในลักษณะของโครงสร้างดาวัว ดังนั้นจึงพอที่จะประมาณเวลาโดยคร่าวๆ สำหรับการทำออสเทนไนท์ซิ่ง คือประมาณ 30-60 นาที เพื่อให้คาร์บอนในกราฟไฟท์แพร่ออกมาละลายอยู่ในออสเตนไนท์รอบๆ ในปริมาณที่พอเหมาะ คือ 0.8%คาร์บอน ซึ่งออสเตนไนท์ที่ปริมาณคาร์บอน 0.8%โดยน้ำหนักนี้ จะมีความสามารถในการชุบแข็งดีที่สุด วิธีการตรวจสอบง่ายๆ ว่าปริมาณคาร์บอนในออสเตนไนท์ทั่วทั้งชิ้นงานใกล้เคียง 0.8%โดยน้ำหนักหรือไม่ ทำได้โดยการปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงในอากาศนิ่งจากอุณหภูมิออสเตนไนท์ซิ่งลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งหากปริมาณคาร์บอนในออสเตนไนท์ทั่วทั้งชิ้นงานใกล้เคียง 0.8%โดยน้ำหนัก ก็จะได้โครงสร้างเฟอร์ลิตไลท์ทั้งหมด เราเรียกวิธีการที่ประกอบไปด้วยการอบออสเตนไนท์ซิ่ง

แล้วปล่อยให้เย็นในอากาศนี้ว่า “เพิร์ลไลไทซิ่ง” และจากการทดลองพบว่า ด้วยเวลาทำออสเตนนไนท์ซึ่งเท่ากับ 30 นาที โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเพิร์ลไลต์เกือบทั้งหมด แต่จะมีโครงสร้างเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ซึ่งเห็นเป็นสีขาวอยู่ตามบริเวณ intercellular boundary ซึ่งโดยปกติแล้วจะไม่พบในเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการทำเพิร์ลไลไทซิ่ง แต่กลับพบในการทดลองนี้ดังแสดงในภาพที่ 8 เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60 นาที โครงสร้างจุลภาคก็ประกอบไปด้วยเพิร์ลไลต์เกือบทั้งหมด โดยยังพบลักษณะเฟสมาร์เทนไซต์สีขาวตาม intercellular boundary แต่มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับที่ 30 นาที และจากผลการทดสอบความแข็งก็มีผลที่สอดคล้องกันคือ พบว่าเหล็กหล่อเหนียวทั้งสองส่วนผสม เมื่อผ่านการทำเพิร์ลไลไทซิ่งด้วยเวลา 30 นาที มีค่าความแข็งสูงกว่าที่ 60 นาที อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว A ภายหลังจากการทำเพิร์ลไลไทซิ่ง 30 นาที

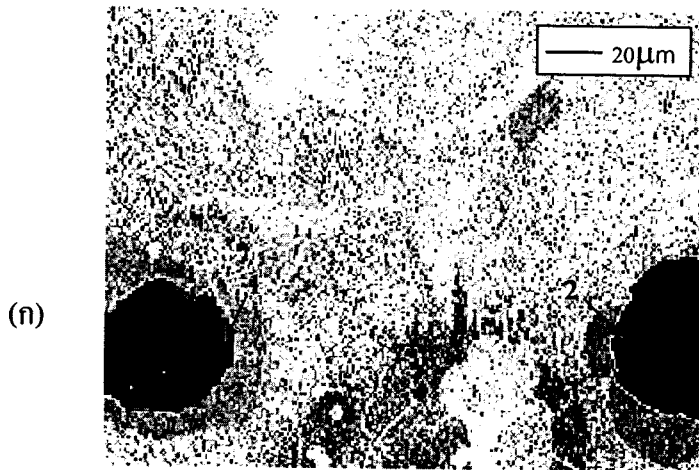
ตารางที่ 3 ค่าความแข็งของเหล็กหล่อภายหลังจากการทำเพิร์ลไลไทซิ่ง

ตัวอย่างเหล็กหล่อ	ความแข็งหลังเพิร์ลไลไทซิ่ง 30 นาที (HRc)	ความแข็งหลังเพิร์ลไลไทซิ่ง 60 นาที (HRc)
A	37	30
B	38	32

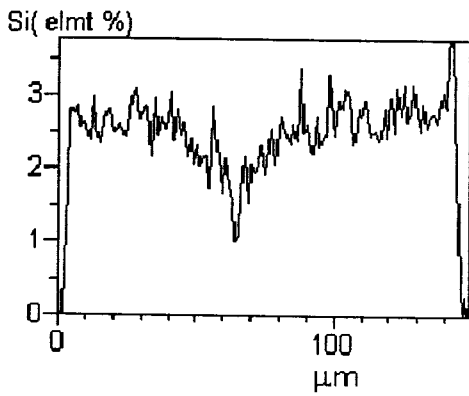
เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุตามแนวระหว่งเม็ดกราฟไฟท์ในเหล็กหล่อเหนียวภายหลังการหล่อที่นำไปใช้ในการทดลองนี้ด้วยการวิเคราะห์ Energy Disperse X-ray Spectroscopy (EDX) พบว่ามีการแยกตัวของธาตุผสมอันเนื่องมาจากการแข็งตัวดังแสดงในภาพที่ 9 โดยธาตุซิลิกอน และทองแดงจะเกิดการ

แยกตัวเชิงลบ (Negative Segregation) คือมีปริมาณอยู่ค่อนข้างมากในบริเวณใกล้กับกราฟไฟท์ ส่วนแมงกานีสเกิดการแยกตัวแบบเชิงบวก (Negative Segregation) คือแยกตัวออกมาอยู่ตามบริเวณ intercellular boundary ส่วนโมลิบดีนัมนั้นมีแนวโน้มของการแยกตัวเชิงบวกเช่นกันแต่ไม่เห็นชัดเจนนัก เมื่อพิจารณากลับไปถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็ง ก็แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างมาร์เทนไซต์ตามแนว intercellular boundary น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากมีปริมาณธาตุผสมโดยเฉพาะธาตุแมงกานีส ซึ่งส่งผลทำให้ความสามารถในการชุบแข็งสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการเย็นตัวโดยการปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ก็สามารถทำให้บริเวณที่มีธาตุผสมสูงเปลี่ยนเฟสไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้ แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการอบที่ 900 องศาเซลเซียส นานมากขึ้น เป็น 60 นาที กลับพบว่า มีเฟสมาร์เทนไซต์สีขาวน้อยลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเราอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อะตอมของธาตุผสมเกิดการแพร่เพื่อปรับปริมาณธาตุให้เท่ากันโดยทั่ว ดังนั้นถ้าใช้เวลาในการอบมากขึ้นปริมาณธาตุผสมตาม intercellular boundary ก็จะลดลง ความสามารถในการชุบแข็งก็จะลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามการแพร่ก็ไม่สามารถทำให้ส่วนผสมเท่ากันได้โดยทั่วอย่างสมบูรณ์และยังคงพบปริมาณธาตุแมงกานีสค่อนข้างมากในบริเวณ intercellular boundary ดังแสดงในผลการวิเคราะห์ธาตุผสมตามแนว ของชิ้นงาน ส่วนผสม 0.75%ทองแดง และผ่านเพิร์ลลิตไชง ที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม.

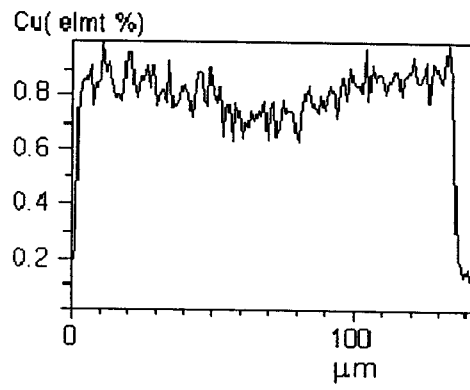
จากผลการทำเพิร์ลลิตไชงจึงเลือกเวลาสำหรับการทำออสเทนไนท์ซึ่งเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนที่จะชุบลงอ่างเกลืออย่างรวดเร็วเพื่อทำออสเทมเปอร์ต่อไป เนื่องจากให้โครงสร้างเนื้อพื้นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ



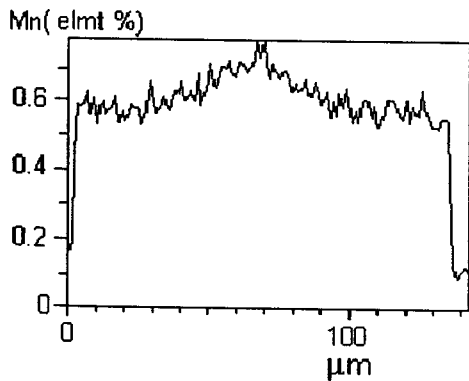
Line Scan Length 142 μm.



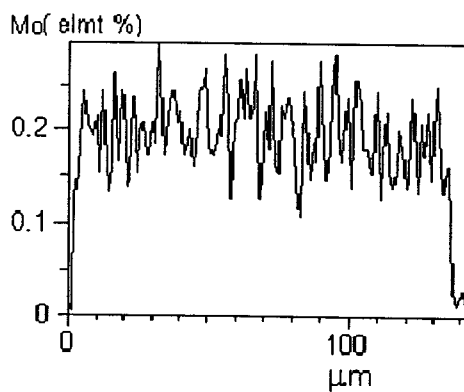
(ข)



(ค)



(ง)



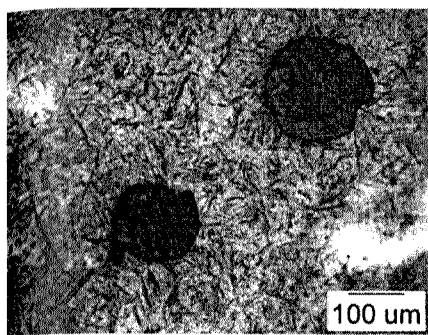
(จ)

ภาพที่ 9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุตามแนวระหว่างเม็ดกราฟไฟท์ในเหล็กหล่อเหนียวภายใต้การวิเคราะห์ Energy Disperse X-ray Spectroscopy (ก) secondary electron map (ข)-(จ) ปริมาณธาตุ Si, cu, Mn และ Mo ตามลำดับ ตามแนวระหว่างกราฟไฟท์ในภาพ (ก)

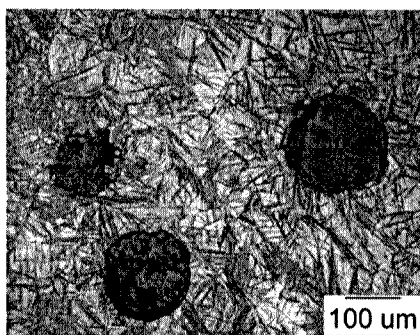
4.2 โครงสร้างจุลภาคภายหลังการทำ ออสเทมเปอร์ริง

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคภายหลังการทำออสเทมเปอร์ริงเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทำออสเทมเปอร์ริง

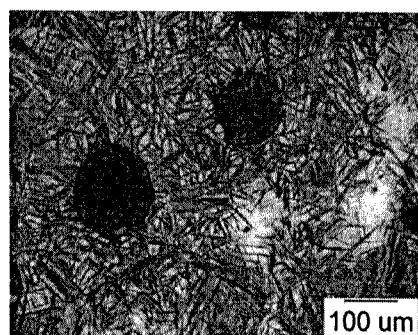
จากภาพที่ 10(ก) และ 11(ก) จะสังเกตเห็นได้ว่าเหล็กหล่อทั้งสองส่วนผสมในการทดลองนี้เมื่อนำมาทำออสเทมเปอร์ริงด้วย อุณหภูมิเท่ากับ 300 และ 340 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงเท่ากับ 60 วินาที โครงสร้างพื้นฐานส่วนใหญ่เป็นเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีลักษณะเป็นเข็มเล็กละเอียดและพบเฟสเบนนิติกเฟอร์ไรท์ปริมาณเล็กน้อยซึ่งมองเห็นเป็นลักษณะเข็ม สีเข้ม อยู่รอบ ๆ กราฟไฟท์ นอกจากนี้ยังพบพื้นที่สีขาวตรงบริเวณที่เป็นระยะกึ่งกลางระหว่างกราฟไฟท์เม็ดกลม โดยภายในพื้นที่สีขาวนี้มองเห็นลักษณะเข็มจางๆ นั่นคือบริเวณที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นจากออสเตนไนท์ที่ไม่มีเสถียรภาพนั่นเอง กล่าวคือ ปฏิริยาขั้นที่ 1 ในการทำออสเทมเปอร์ริงนั้น ออสเตนไนท์ที่คาร์บอนอยู่ใกล้เคียง 0.8% จะเกิดการเปลี่ยนเฟสให้เป็นเบนนิติกเฟอร์ไรท์กับออสเตนไนท์ที่มีคาร์บอนสูงขึ้น (เนื่องจากการเกิดเป็นเบนนิติกเฟอร์ไรท์จะต้องผลักคาร์บอนออกมาอยู่ในออสเตนไนท์ส่วนที่เกิดจากปฏิริยา) และเมื่อปริมาณคาร์บอนในออสเตนไนท์สูงขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์จะลดต่ำลงเรื่อยๆ กระทั่งต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นเมื่อออสเตนไนท์คาร์บอนสูงมากพอ เย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ก็ยังคงสภาพเป็นออสเตนไนท์เหลือค้างอยู่ แต่จากการใช้เวลาเพียง 60 วินาที ปฏิริยาขั้นที่ 1 เกิดเพียงเล็กน้อย ดังนั้นออสเตนไนท์ยังมีปริมาณคาร์บอนไม่สูงมากนัก อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์จึงสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นเมื่อตัวอย่างถูกนำขึ้นจากอ่างเกลือแล้วปล่อยให้เย็นในอากาศ ออสเตนไนท์เหล่านี้ก็จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ เมื่อให้เวลาการทำออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นเป็น 360 600 2400 4800 และ 6000 วินาที ดังในภาพที่ 10(ข)-(จ) ตามลำดับปริมาณเบนนิติกเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นตามเวลาในขณะที่ปริมาณมาร์เทนไซต์ลดน้อยลง โดยเมื่อเวลาเป็น 2400 วินาที เกือบจะไม่พบมาร์เทนไซต์แล้ว นอกจากนี้พบบริเวณที่เป็นสีขาวอยู่ระหว่างเข็มของเบนนิติกเฟอร์ไรท์ซึ่งคือเฟสออสเตนไนท์เหลือค้างที่มีคาร์บอนสูงจากกาเกิดปฏิริยาขั้นที่ 1 และก็พบเฟสสีขาวปริมาณเล็กน้อยอยู่บริเวณที่เป็นระยะกึ่งกลางระหว่างกราฟไฟท์เม็ดกลมซึ่งก็คือเฟสออสเตนไนท์เช่นกัน แต่เป็นออสเตนไนท์ที่ไม่เกิดปฏิริยา ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณดังกล่าวมีปริมาณธาตุผสมอยู่สูงและยังมีคาร์บอนส่วนที่ถูกผลักออกจากเบนนิติกเฟอร์ไรท์แพร่เข้ามาละลายอยู่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เสถียรภาพของออสเตนไนท์สูง ดังที่จะสังเกตเห็นลักษณะดังกล่าวนี้ได้ชัดเจนกว่าในเหล็กหล่อ B ซึ่งมีปริมาณธาตุผสมสูงกว่า (ภาพที่ 12 และ 13) นอกจากนี้แล้วลักษณะโครงสร้างที่ผ่านการทำออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลาสั้นๆ แสดงให้เห็นว่า เบนนิติกเฟอร์ไรท์เริ่มเกิดขึ้นในบริเวณรอบๆ กราฟไฟท์ก่อน แล้วจึงค่อยๆ เพิ่มการเปลี่ยนเฟสออกไปเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น นั่นหมายถึงการเปลี่ยนเฟสเป็นเบนนิติกเฟอร์ไรท์จะเกิดในบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าและมีธาตุผสมน้อย ก่อนที่จะค่อยๆ ไล่ออกมาเรื่อยๆ eutectic cells



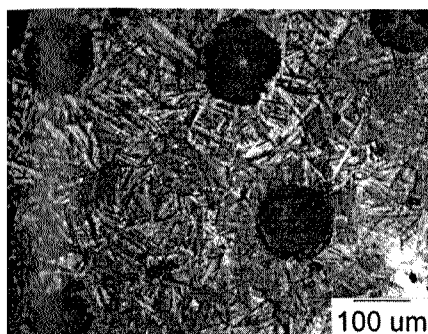
(ก) 60 วินาที



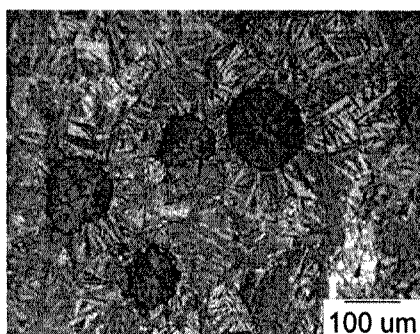
(ข) 360 วินาที



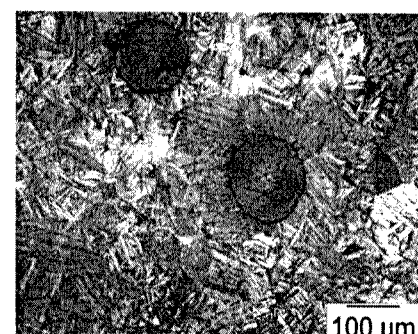
(ค) 600 วินาที



(ง) 2400 วินาที

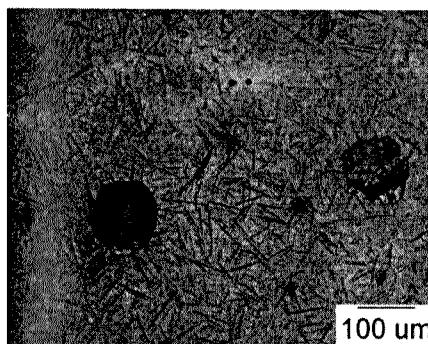


(จ) 4800 วินาที

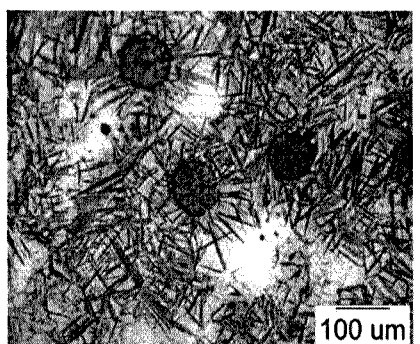


(ฉ) 6000 วินาที

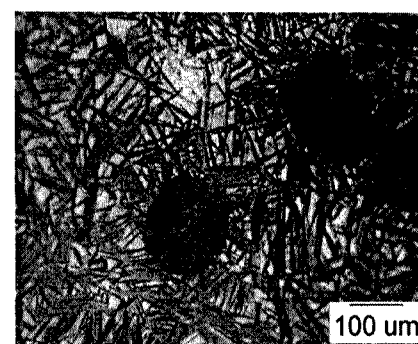
ภาพที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ A ที่ผ่านการอบสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสด้วยเวลาต่างๆ กัน



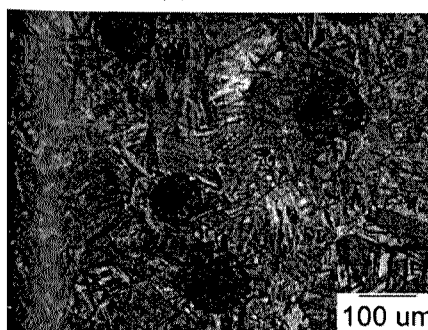
(ก) 60 วินาที



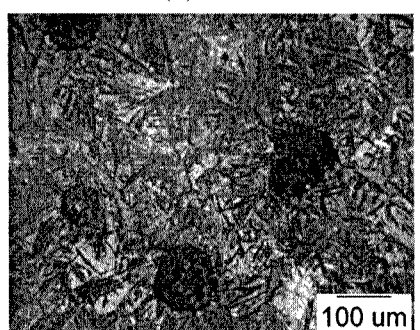
(ข) 360 วินาที



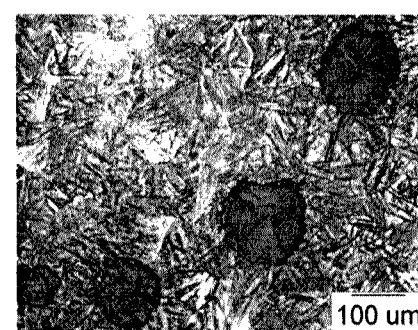
(ค) 600 วินาที



(ง) 2400 วินาที

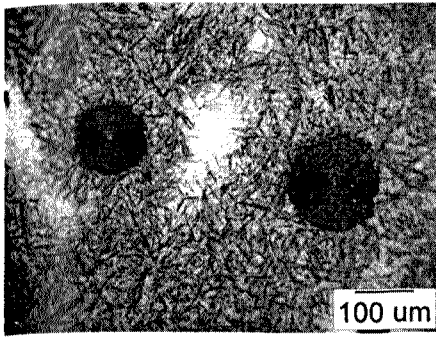


(จ) 4800 วินาที

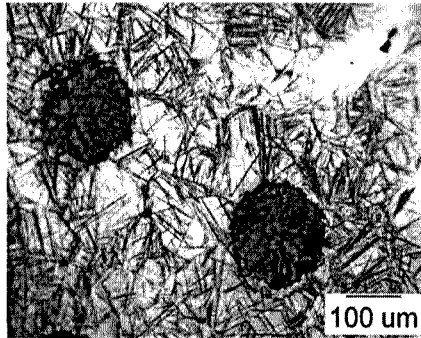


(ฉ) 6000 วินาที

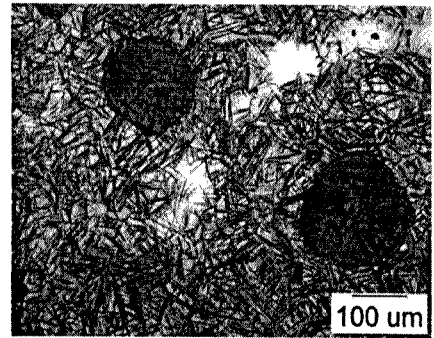
ภาพที่ 11 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ A ที่ผ่านการอบสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสด้วยเวลาต่างๆ กัน



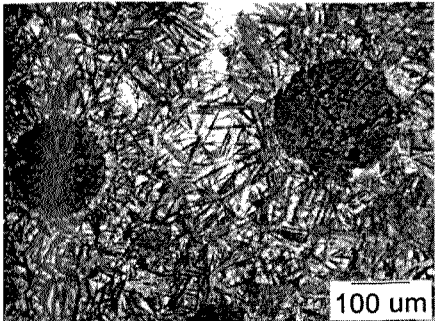
(ก) 60 วินาที



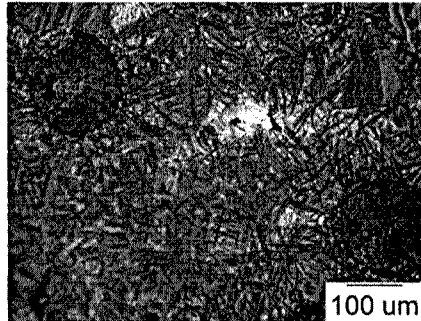
(ข) 360 วินาที



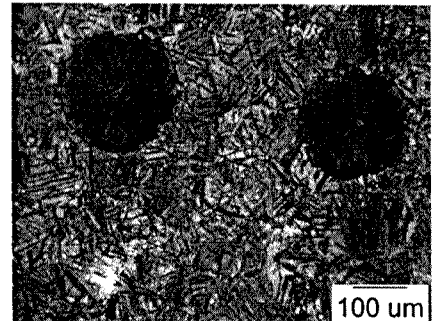
(ค) 600 วินาที



(ง) 2400 วินาที

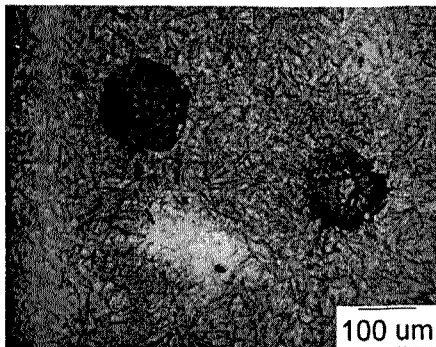


(จ) 4800 วินาที

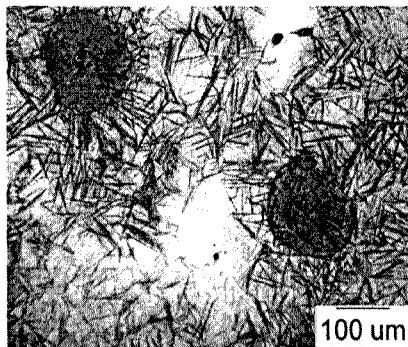


(ฉ) 6000 วินาที

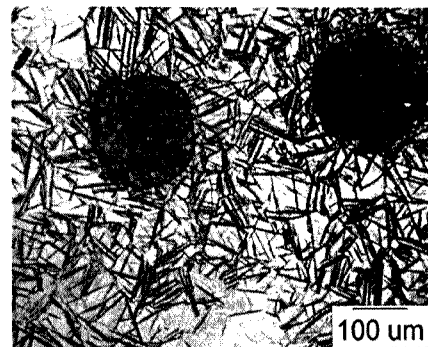
ภาพที่ 12. โครงสร้างจุลภาคของเปลือกห่อ B ที่ผ่านการอบสเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสด้วยเวลาต่างๆ กัน



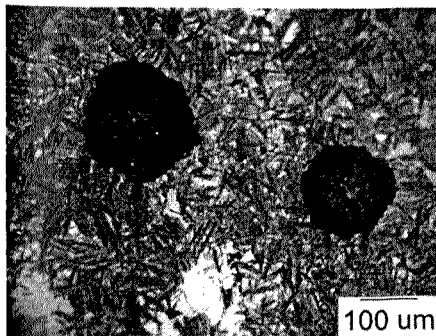
(ก) 60 วินาที



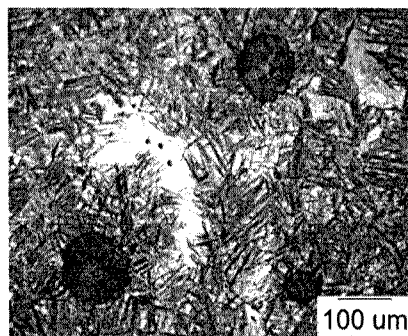
(ข) 360 วินาที



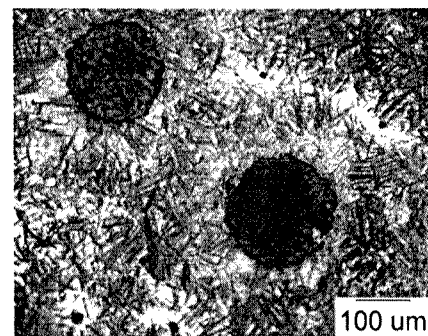
(ค) 600 วินาที



(ง) 2400 วินาที



(จ) 4800 วินาที



(ฉ) 6000 วินาที

ภาพที่ 13. โครงสร้างจุลภาคของเปลือกห่อ B ที่ผ่านการอบสเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสด้วยเวลาต่างๆ กัน

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากทำออสเทมเปอร์ริงเทียบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำออสเทมเปอร์ริง

สำหรับเหล็กหล่อ A นั้น เมื่อเวลาที่ใช้สำหรับการทำออสเทมเปอร์ริงเท่ากันแต่อุณหภูมิต่างกันจะสังเกตได้ว่า โครงสร้างจุลภาคมีความแตกต่างกันคือ ที่อุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์ริงต่ำกว่า (ภาพที่ 10) ลักษณะโครงสร้างเบนนิติกเฟอร์ไรท์จะเล็กและละเอียดกว่าที่อุณหภูมิสูง (ภาพที่ 11) และปริมาณของออสเตนไนท์เหลือค้างจะมีน้อยกว่า ในขณะที่มีมาร์เทนไซต์มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์ริงต่ำกว่านั้น ความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนในออสเตนไนท์ต่ำดังนั้นปริมาณคาร์บอนส่วนหนึ่งอาจคงอยู่ในเบนนิติกเฟอร์ไรท์และปริมาณคาร์บอนทั้งในออสเตนไนท์ที่เกิดจากการเปลี่ยนเฟสในขั้นที่ 1 และในออสเตนไนท์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสจะมีปริมาณคาร์บอนไม่สูงมากนัก ทำให้ไม่มีเสถียรภาพสูงพอ จึงเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ระหว่างเย็นตัวจากอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงลงมาสู่อุณหภูมิห้อง ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 10(ก)-(ค) เปรียบเทียบกับ ภาพ 11(ก)-(ค)

เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นกว่า 2400 วินาที โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง A ที่ผ่านการทำออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลาเท่าๆ กัน แต่อุณหภูมิแตกต่างกัน แสดงให้เห็นเบนนิติกเฟอร์ไรท์โดยทั่วเนื้อพื้น ซึ่งให้เห็นว่าปฏิกิริยาขั้นที่ 1 เกิดขึ้นโดยทั่วเนื้อพื้น ในกรณีของเหล็กหล่อ B นั้น ที่อุณหภูมิต่ำกว่าก็ให้โครงสร้างเบนนิติกเฟอร์ไรท์จะเล็กและละเอียดกว่าเช่นกัน นอกจากนี้จากภาพ 12(ก-ค) เปรียบเทียบกับ 13(ก-ค) จะสังเกตเห็นได้ว่า ที่ช่วงเวลาสั้นๆ นั้น ปริมาณมาร์เทนไซต์ในตัวอย่างที่ทำออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิสูงกว่ามีปริมาณมากกว่าและแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ในตัวอย่าง B ซึ่งมีปริมาณธาตุผสมทองแดงสูงนั้น ปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ถูกเลื่อนออกไป และผลของการแยกตัวของธาตุผสมนั้นส่งผลให้ปฏิกิริยาขั้นที่ 1 เกิดขึ้นช้าในบริเวณห่างออกไปจากกราฟไฟท์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 2400 วินาที ยังคงเห็นเฟสสีขาวตามบริเวณ intercellular boundary และมีปริมาณลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 4800-6000 วินาที เฟสสีขาวนี้คือออสเตนไนท์ส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยานั้นเอง

4.2.3 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากทำออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณธาตุทองแดงผสมอยู่แตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่างเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ A และ B ที่มีธาตุทองแดงผสมอยู่ 0.75% กับ 1.37% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และผ่านการทำออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเท่ากับ 300 และ 340 องศาเซลเซียสด้วยเวลาเท่ากัน ดังในภาพ 10 เปรียบเทียบกับภาพ 12 และ ภาพ 11 เปรียบเทียบกับภาพ 13 จะพบว่าปริมาณเบนนิติกเฟอร์ไรท์ของตัวอย่าง A มีมากกว่าของตัวอย่าง B แสดงให้เห็นว่า การเกิดเบนนิติกเฟอร์ไรท์ (ปฏิกิริยาขั้นที่ 1) ของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณธาตุทองแดงผสมอยู่มากกว่านั้นช้า

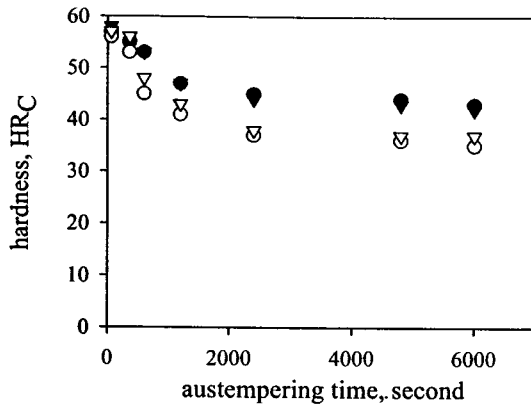
กว่า และเมื่อพิจารณาปริมาณมาร์เทนไซต์จากภาพโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง A และ B ที่เวลาการทำ ออสเทมเปอร์ิ่งเท่ากันคือ 600 วินาที ณ อุณหภูมิทั้งสอง ปริมาณมาร์เทนไซต์ในตัวอย่าง B มีมากกว่า ตัวอย่าง A และลักษณะของโครงสร้างจุลภาคในตัวอย่าง B แสดงให้เห็นชัดเจนว่า ปฏิบัติการเกิดเบนนิติก เฟอร์ไรท์เริ่มขึ้นที่บริเวณรอบๆ ใกล้กับกราฟไฟท์ ในขณะที่บริเวณรอบๆ ห่างออกมาจากกราฟไฟท์ยังไม่เกิด การเปลี่ยนเฟส เมื่อพิจารณาตัวอย่างเหล็กหล่อทั้งสองชนิดที่ผ่านการทำออสเทมเปอร์ิ่งที่ 340 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2400 วินาที ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่พบในตัวอย่างทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ปริมาณเบน นิติกเฟอร์ไรท์ในตัวอย่าง B ยังคงน้อยกว่าในตัวอย่าง A ผลการทดลองทั้งหมดนี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อปริมาณธาตุ ทองแดงในเนื้อพื้นเหล็กหล่อเพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกริยาขั้นที่ 1 ถูกเลื่อนออกไป จึงพบว่าที่อุณหภูมิเท่ากันและ ช่วงเวลาการทำออสเทมเปอร์ิ่งเท่าๆ กันในช่วง 60-2400 วินาที ปริมาณเบนนิติกเฟอร์ไรท์ในตัวอย่าง A มากกว่าตัวอย่าง B และเห็นลักษณะความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคเนื้อพื้นที่เกิดปฏิกริยาและยังไม่ เกิดปฏิกริยาอย่างชัดเจนในตัวอย่าง B ในขณะเดียวกันเมื่อช่วงเวลาเพิ่มขึ้นกว่า 2400 วินาทีพบว่าปริมาณ ออสเตนไนท์เหลือค้างในตัวอย่าง B มากกว่า A ทั้งๆ ที่ปริมาณเบนนิติกเฟอร์ไรท์น้อยกว่า ทั้งนี้เป็นผล เนื่องมาจากปริมาณธาตุทองแดงและธาตุผสมอื่น ได้แก่ แมงกานีส ในเนื้อพื้นรอบๆ ห่างออกมาจากกราฟ ไฟท์ของตัวอย่าง B มีสูงกว่า ส่งผลช่วยให้เสถียรภาพของออสเตนไนท์สูงขึ้น(H. Bayati and R. Elliott, 2000)

4.3 สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อที่มีปริมาณธาตุทองแดงผสมอยู่ภายหลังทำออสเทมเปอร์ิ่ง

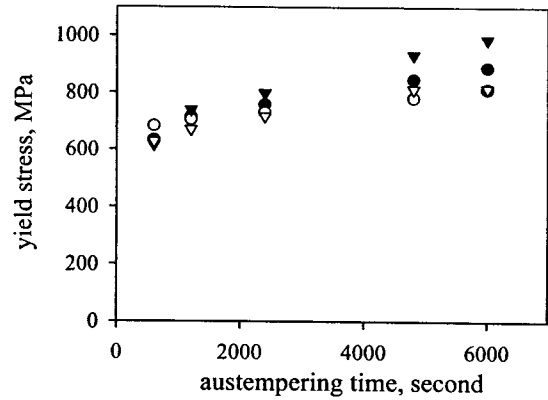
4.3.1 ความแข็ง

ค่าความแข็งของตัวอย่างที่ผ่านการทำออสเทมเปอร์ิ่งด้วยเวลาและอุณหภูมิต่างๆ แสดงดัง ในภาพที่ 14(ก) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการทำออสเทมเปอร์ิ่งเพิ่มขึ้น ในช่วงแรกความแข็งลดลงอย่าง รวดเร็ว จนเมื่อเวลาการทำออสเทมเปอร์ิ่งมีค่าประมาณ 2400 วินาที ค่าความแข็งค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นช่วงเวลาที่การเปลี่ยนเฟสในขั้นที่ 1 เกิดขึ้นไปมากพอสมควรแล้ว

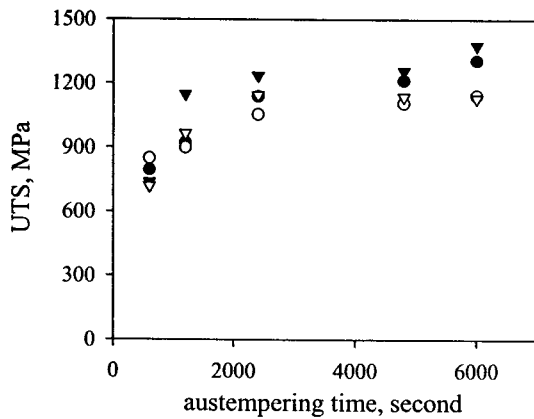
หากเปรียบเทียบค่าความแข็งของตัวอย่าง ที่ผ่านการทำออสเทมเปอร์ิ่งด้วยเวลาเท่ากัน จะ พบว่าที่อุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์ิ่งต่ำกว่าจะมีค่าความแข็งสูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาค นั้นคือ เบนนิติกเฟอร์ไรท์เล็กและละเอียดกว่า ปริมาณของออสเตนไนท์เหลือค้างก็มีน้อยกว่าในขณะที่มี ปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่าด้วย



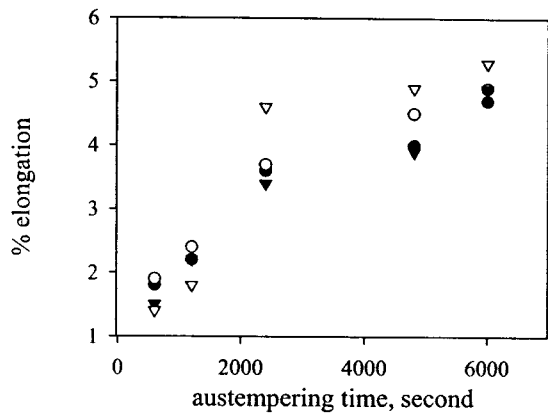
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 14 สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอริ่ง (ก) ความแข็ง (ข) ความเค้นจุดคราก (ค) ความเค้นแรงดึงสูงสุด และ (ง) เปอร์เซนต์การยืดตัว (● เหล็กหล่อ A ออสเทนเปอริ่งที่ 300 องศาเซลเซียส ○ เหล็กหล่อ A ออสเทนเปอริ่งที่ 340 องศาเซลเซียส ▼ เหล็กหล่อ B ออสเทนเปอริ่งที่ 300 องศาเซลเซียส ▽ เหล็กหล่อ B ออสเทนเปอริ่งที่ 340 องศาเซลเซียส)

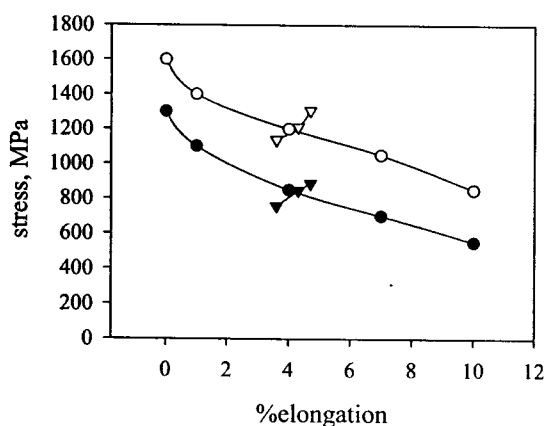
4.3.2 คุณสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง

จากลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งของตัวอย่างที่ผ่านการทำออสเทนเปอริ่ง สามารถที่จะประมาณคร่าวๆ ถึงสถานะในการทำออสเทนเปอริ่งที่เหมาะสมซึ่งจะให้ทั้งความแข็งแรงและความเหนียวได้ กล่าวคือ การทำออสเทนเปอริ่งด้วยเวลาสั้นๆ เท่ากับ 60 วินาที โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเบนนิติกเฟอร์ไรต์เล็กน้อยและยังมีมาร์เทนไซต์อยู่มาก ค่าความแข็งสูง ดังนั้นเหล็กหล่อ

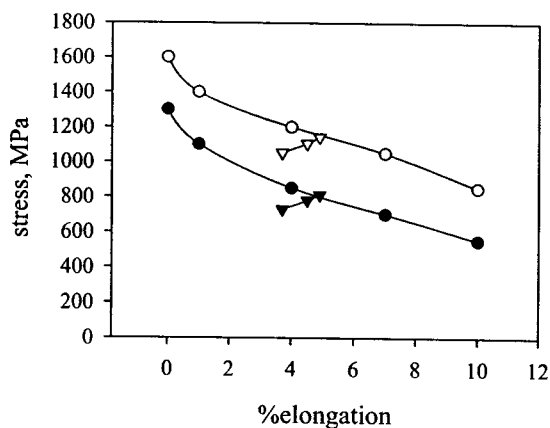
เหนียวที่ผ่านการออสเทมเปอร์ด้วยความเร็วเวลาสั้นๆ ก็ย่อมจะมีค่าความเหนียวต่ำ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณ เบนนิติกเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น ปริมาณออสเตนไนท์เหลือค้างเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง ค่าความแข็งแรงจึงลดลง ดังนั้นความเหนียวก็ควรจะเพิ่มขึ้น จากค่าความแข็งแรงเทียบกับเวลา ซึ่งพบว่าความแข็งแรงลดลงและเริ่มจะคงที่ที่เวลาในการทำออสเทมเปอร์เท่ากับ 2400 วินาที จึงเลือกที่จะทำการทดสอบแรงดึง ตัวอย่างที่ผ่านการทำออสเทมเปอร์ด้วยความเร็วเท่ากับ 600-6000 วินาที ผลการทดสอบพบว่า ค่าความเค้นจุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิเท่ากันมีค่าสูงขึ้นตามเวลาและค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาเป็น 4800-6000 วินาที ดังในภาพที่ 14(ข)-(ค) จากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวอย่าง A และ B ที่ทำออสเทมเปอร์ที่ 340 องศาเซลเซียส ในภาพ 14(ง) จะสังเกตเห็นชัดเจนว่า ที่เวลาการทำออสเทมเปอร์สั้นๆ ความเหนียวของเหล็กหล่อ A สูง กว่า B ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า การเปลี่ยนเฟสเป็นเบนนิติกเฟอร์ไรต์โดยปฏิกิริยาที่ 1 ในตัวอย่าง B นั้นเลื่อนออกไปอันเนื่องมาจากผลของธาตุผสมทองแดง ดังนั้นภายหลังจากออสเทมเปอร์ด้วยความเร็วสั้นๆ เนื้อพื้นเหล็กหล่อจะมีมาร์เทนไซต์มาก เมื่อเวลาการทำออสเทมเปอร์เพิ่มขึ้นกว่า 2400 วินาที ซึ่งเบนนิติกเฟอร์ไรท์เกิดขึ้นเกือบจะโดยทั่วเนื้อพื้น และในกรณีตัวอย่าง B นั้น ปริมาณออสเตนไนท์เหลือค้างมีมากกว่า A เนื่องจากธาตุทองแดงเพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเตนไนท์ ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวอย่าง B จึงเท่ากับหรือมากกว่า A

เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ ในตารางที่ 1 จะพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ A และ B ที่ผ่านออสเทมเปอร์ที่ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4800-6000 วินาที ให้สมบัติเชิงกลอยู่ในมาตรฐานเหล็กหล่อออสเทมเปอร์ความแข็งแรงสูงปานกลางคือ เกรด 3 ตามมาตรฐาน ASTM และใกล้เคียงเกรด 4 ในขณะที่เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งสองที่ผ่านออสเทมเปอร์ที่ 340 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6000 วินาที ให้สมบัติเชิงกลตามมาตรฐานเกรด 3 เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลนี้ชี้ให้เห็นว่าเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมของทองแดงค่อนข้างสูง คือประมาณ 0.7-1.4% โดยน้ำหนัก สามารถนำมาผลิตเป็นเหล็กหล่อออสเทมเปอร์เกรดความแข็งแรงสูง เช่น เกรด 3 และ 4 แต่ไม่สามารถให้สมบัติเชิงกลตามมาตรฐานเกรดความเหนียวสูง คือ 1 และ 2 ดังแสดงด้วยเส้นกราฟในภาพที่ 15 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการแยกตัวของธาตุผสมในเนื้อโลหะพื้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 1 เริ่มเกิด ณ เวลาต่างกัน บริเวณที่ห่างออกมาจากกราฟไฟท์และบริเวณ intercellular boundary เริ่มเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าบริเวณใกล้ๆ กราฟไฟท์ ดังนั้นเมื่อเวลาการทำออสเทมเปอร์นานขึ้นจนกระทั่ง ปฏิกิริยาขั้นที่ 1 เกิดขึ้นสมบูรณ์ในบริเวณที่ห่างออกมาจากกราฟไฟท์และบริเวณ intercellular boundary ปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ซึ่งให้เฟสเฟอร์ไรท์ปกติและคาร์ไบด์ย่อมเกิดขึ้นในเนื้อพื้นบริเวณใกล้ๆ กราฟไฟท์ ส่งผลทำให้ความเหนียวลดลง

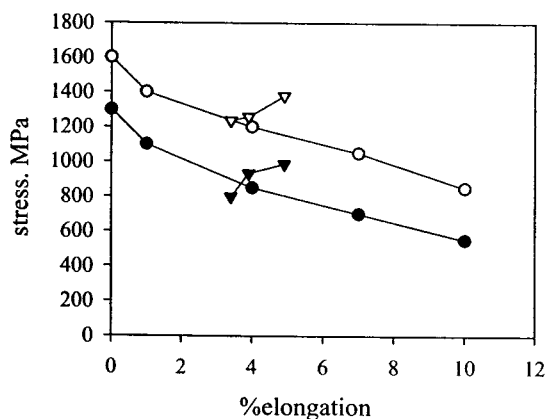
โดยปกติแล้วหากต้องการเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกรดความเหนียวสูง จำเป็นที่จะต้องใช้เหล็กหล่อเหนียวที่มีธาตุผสมคาร์บอนและควมคุมน้ำโลหะให้มีความสะอาดสูง และแน่นอนว่าต้นทุนการผลิตย่อมสูงขึ้นไปมาก



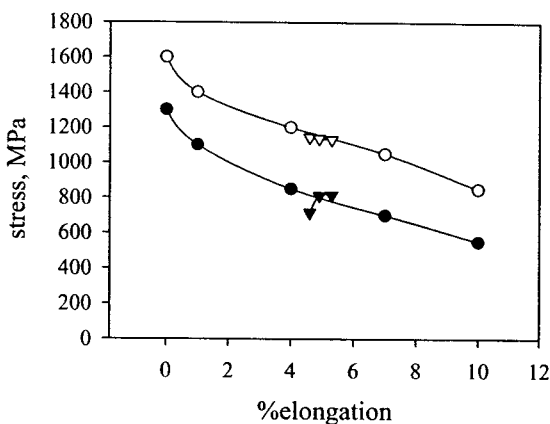
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 15 ▼ ความเค้นจุดคราก และ ▽ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ของเหล็กหล่อจากการทดลอง (ก)-(ข) เหล็กหล่อ A ออสเทมเปอร์ที่ 300 และ 340 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ค)-(ง) เหล็กหล่อ B ออสเทมเปอร์ที่ 300 และ 340 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เทียบกับ ● ความเค้นจุดคราก ○ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดตามมาตรฐาน ASTM A897M-90

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 เหล็กหล่อเหนียวผสมธาตุทองแดงประมาณ 0.75-1.35% โดยน้ำหนักทดแทนธาตุ निकเกิล ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีความเป็นไปได้สูงที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกรดความแข็งแรงสูง ทดแทนการใช้เหล็กหล่อเหนียวผสมธาตุ निकเกิล

5.1.2 เหล็กหล่อเหนียวผสมธาตุทองแดงสามารถนำมาผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกรดความแข็งแรงสูงได้ แต่ไม่สามารถนำมาใช้ผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกรดความเหนียวสูง

5.1.3 เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำออสเทมเปอร์สูงขึ้น ปริมาณเบนนิติกเฟอร์ไรท์และออสเตนไนท์เพิ่มขึ้น ในขณะที่มาร์เทนไซต์ลดลง โดยคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงชี้ให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ 300 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมในการทำออสเทมเปอร์เหล็กหล่อเหนียวที่มีทองแดงผสมอยู่สูงประมาณ 0.75-1.35% คือเป็น 4800-6000 วินาที ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเป็น 340 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสม คือ 6000 วินาที

5.1.4 ปริมาณธาตุทองแดงโดยรวมที่เพิ่มขึ้นในเหล็กหล่อเหนียว ส่งผลให้การเกิดเบนนิติกเฟอร์ไรท์ในเนื้อพื้นไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณไกลจากกราฟไฟท์และ intercellular boundary จะเกิดซ้ำกว่าบริเวณใกล้กับกราฟไฟท์

5.1.5 ปริมาณธาตุทองแดงโดยรวมที่เพิ่มขึ้นในเหล็กหล่อเหนียว เพิ่มเสถียรภาพของออสเตนไนท์ ส่งผลให้ในช่วงเวลาการทำออสเทมเปอร์สั้นๆ คือประมาณ 60-1200 วินาที ปริมาณเบนนิติกเฟอร์ไรท์และ ออสเตนไนท์ในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ B น้อยกว่า A อันเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณธาตุทองแดงที่สูงกว่า ชะงักให้การเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ช้าลง แต่เมื่อเวลาการทำออสเทมเปอร์เพิ่มขึ้นกว่า 2400 ปริมาณออสเตนไนท์เหลือค้างในตัวอย่าง B มากกว่าใน A โดยเฉพาะในกรณีอุณหภูมิออสเทมเปอร์ 340 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณธาตุทองแดงใน B ที่สูงกว่าใน A เพิ่มเสถียรภาพให้ออสเตนไนท์ ขณะเดียวกันปริมาณคาร์บอนที่ถูกผลักออกจากเบนนิติกเฟอร์ไรท์ก็ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้ออสเตนไนท์ขึ้นอีก ดังนั้นจึงส่งผลให้มีออสเตนไนท์ที่มีเสถียรภาพสูงและอุณหภูมิ m_s ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องในตัวอย่าง B มากกว่าในตัวอย่าง A

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองที่ชี้ให้เห็นได้ว่า เหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ โดยเฉพาะเกรดความแข็งแรงสูง อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปได้แน่นอนว่าไม่สามารถนำมาผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์เกรดความเหนียวสูง ทั้งนี้เนื่องจากจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเพิ่ม เช่น ทำอสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเพิ่มเวลานอกจากนี้แล้วปริมาณธาตุแมงกานีสในเหล็กหล่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ค่อนข้างสูงเล็กน้อยซึ่งอาจจะมีผลต่อการเลื่อนปฏิกิริยาที่ 1 ออกไปส่งผลทำให้เกิดการเกิดปฏิกิริยาที่ 2 ในบริเวณใกล้กราฟไฟท์เหลี่ยมล้ากับปฏิกิริยาที่ 1 ที่เพ็งจะหรือกำลังเกิดขึ้นในบริเวณห่างออกมา โดยผลของการเกิดปฏิกิริยาชั้นที่ 2 นั้น ทำให้ความเหนียวลดลง ดังนั้นจึงควรควบคุมแมงกานีสให้มีปริมาณน้อยกว่านี้ เช่น ไม่เกิน 0.3% เป็นต้น

เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้นั้น มีความจำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มที่หลายๆสถานะเพื่อสร้างเป็นหน้าต่างการผลิต (processing window) ที่สามารถใช้บอกสถานะที่ควรใช้ในการผลิตตามความต้องการคุณสมบัติเชิงกล

บรรณานุกรม

มนัส สติรจินดา, เหล็กหล่อ (Cast Iron), พิมพ์ครั้งที่ 3 กุมภาพันธ์ 2536, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E. Dorazil, High Strength Austempered Ductile Cast Iron, Ellis Horwood Limited, England, 1991

M. F. Burditt, Ductile Iron Handbook, American Foundrymen's Society, Inc., USA, 1999

J. Liu & R. Elliott, The influence of cast structure on the austempering of ductile iron, Int.J.Cast Metals Res., 1999, 11, pp. 407-412,

J. Achary & D. Venugopalan, Microstructural Development and Austempering Kinetics of Ductile iron during Thermomechanical Processing, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 31A. October, 2000, p.p 2575-2585

J.Mallia, M.Grech and R.E.Smallman, Effect of silicon content on transformation kinetics of austempered ductile iron, Materials Science and Technology, vol.14, May 1998, pp. 452-460

C.H.Chang & T.S.Shih, Ausferite Transformation in Austempered Alloyed Ductile Irons, AFS Transaction, 1994 pp. 56-63

S.Yazdani & R.Elliott, Influence of molybdenum on austempering behaviour of ductile iron (part 1 – Austempering kinetics and mechanical properties of ductile iron containing 0-13%Mo, Materials Science and Technology, vol 15, May 1999, pp. 531-540

T. S. Shih and Z-C. Yang , Effect of Nickel and processing variables on the mechanical properties of Austempered ductile irons , Int.J.Cast Metals Res., vol. 10, 1998 , pp. 335-344

H. Bayati and R. Elliott, Effect of Microstructure Features on the Austempering Heat Treatment Processing Window, Materials Science Forum, vol. 329-330, 2000, pp. 73-78

ประวัตินักวิจัย

ชื่อ	อุษณีย์ กิตกำธร Usanee KITKAMTHORN
วัน เดือน ปี เกิด	27 ตุลาคม 2520
ที่อยู่	2 ถนนเศรษฐสุมบูรณ์ ตำบลหนองแค อำเภอหนองแค จังหวัดสระบุรี 18140
สถานที่ทำงาน	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 224487, 224481 โทรสาร (044) 224220
การศึกษา	2540 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโลหการ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2544 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโลหการ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
การทำงาน	2541-2543 ผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2543-2544 ผู้ช่วยวิจัย โครงการเพิ่มขีดความสามารถ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนโลหะและยานยนต์ ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี
ผลงานวิจัย	1) อุษณีย์ กิตกำธร และ อธิธิพล เตียววนิชย์ “โลหะผสม อะลูมิเนียม-ลิเทียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งผลิตโดย

กระบวนการ Mechanical Milling and Spark Plasma Sintering”
การประชุมวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่ง
ประเทศไทยครั้งที่ 1, 19-20 กรกฎาคม 2543

2) U. Kitkamthorn, I. Diewwanit, and Y. Murakoshi. “Fabrication of Al-Li/SiC_p Preform Processed via Mechanical Milling and Spark Plasma Sintering” 1st International Symposium of Spark Plasma Sintering System, Singapore, 6-8 September, 2001.

3) P. Suwanpinij, U. Kitkamthorn, I. Diewwanit, and T. Umeda “Solidification Characteristics of 380, 356 and 390 Aluminum Alloys” The 7th Asian Foundry Congress, Taiwan, 12-14 October 2001.

4) ชุติพร ป่าไร่ รัฐภูมิ พิธีพรหม อุษณีย์ กิตกัาธร รัตน์ บริสุทธิกุลและ มนัส สกริจินดา “การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ทองแดงทดแทนนิกเกิลในการผลิตเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์” งานประชุมเทคโนโลยีการหล่อแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1, 14 กันยายน 2545

5) P. Suwanpinij, U. Kitkamthorn, I. Diewwanit, and T. Umeda “Influence of Copper and Iron on the Solidification Characteristics of 356 and 380-type Aluminum Alloys” *Materials Transaction*, vol. 45 (5) 2003.

รางวัล

ชนะเลิศงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 5 (Thainox Metallurgy Award 2002)

งานวิจัยที่สนใจ

การแข็งตัวของโลหะ
การเปลี่ยนเฟสในโลหะ

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

ชวลีพร ป่าไร่, รัฐภูมิ พิธีพรหม, อุษณีย์ กิตติคำธร, รัตน บริสุทธิกุล และ มนัส สติรจินดา “ การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้โลหะทองแดงทดแทนนิกเกิลในการผลิตเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์” งานประชุมเทคโนโลยีการหล่อแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ 2545

Usanee. Kitkamthorn, Ittipon Diewwanit, and Manas Sathirajinda. “Microstructure and Mechanical Properties of Copper Alloyed Ductile Iron” The 8th Asian Foundry Congress, 18-19 October 2003, Bangkok, Thailand.