

ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอ์ผสมทองแดง

ว่าที่ร้อยตรีหญิง ประภาพร ศิววงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

**ABRASION RESISTANCE OF COPPER-ALLOYED
AUSTEMPERED DUCTILE CAST IRON**

Acting Sub. Lt. Prapaporn Silawong WRTA

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอร์ผสมทองแดง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ฐาปนีย์ อุดมผล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.อุษณีย์ กิตติคำธร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุคนธ์ อธิเดช)

กรรมการ

(อ. ดร.รัตน บิริสุทธิกุล)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ คำนาคิตกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราพงษ์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ประภาพร ศิลาวงศ์ : ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์
ผสมทองแดง (ABRASION RESISTANCE OF COPPER-ALLOYED AUSTEMPERED
DUCTILE CAST IRON) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตคำธร, 123 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผสมทองแดงและไม่ผสมธาตุทองแดง ซึ่งผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้นที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์เริ่มต้น 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 60 90 และ 120 นาที ซึ่งงานทดสอบการเสียดสีถูกตัดให้มีขนาดสุดท้ายเป็น 25 x 60 x 5 มิลลิเมตร และเตรียมผิวจนมีความเรียบผิวไม่เกิน 3 ไมโครเมตร จากนั้นทดสอบการเสียดสีด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน ยี่ห้อ Suga โดยใช้แรงกด 1 นิวตัน แล้วตรวจสอบน้ำหนักชิ้นงานที่สูญเสียไป และตรวจสอบผิวชิ้นงานภายหลังทดสอบการเสียดสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ได้ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลทั่วไป ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานแรงดึงจุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และพลังงานดูดซับการกระแทก ผลการศึกษาพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอสูงกว่าที่ไม่ผสมทองแดงและมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าด้วย เนื่องจากทองแดงส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อพื้นออสเฟอไรต์หยาบกว่า ลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลของทองแดงที่หน่วงเวลาในการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเฟอไรต์ นอกจากนี้ยังพบว่า การชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นช่วยให้อัตราการสึกหรอลดลง โดยเฉพาะที่สภาวะการชุบช่วงอุณหภูมิต่ำคือ 280 องศาเซลเซียส เหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 120 นาที มีค่าอัตราการสึกหรอ คือ 0.0582 มิลลิกรัมต่อเมตร แต่ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 120 นาที มีค่าอัตราการสึกหรอ คือ 0.1091 มิลลิกรัมต่อเมตร ส่วนการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นด้วยอุณหภูมิเริ่มต้นสูง คือที่ 320 องศาเซลเซียส ไม่ได้ช่วยให้อัตราการสึกหรอลดลงมากนัก แม้พบว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 60 นาที ให้ค่าอัตราการสึกหรอต่ำที่สุดก็ตาม แต่นั่นเป็นผลจากการมีมาร์เทนไซต์ในเนื้อพื้นอยู่มาก ส่วนลักษณะความเสียหายบนพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านการทดสอบการเสียดสีพบว่า มีลักษณะเป็นร่อง รอยฉีก รอยขีดข่วน และ รูเข็ม ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันทุกชิ้นงานทดสอบ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

PRAPAPORN SILAWONG : ABRASION RESISTANCE OF

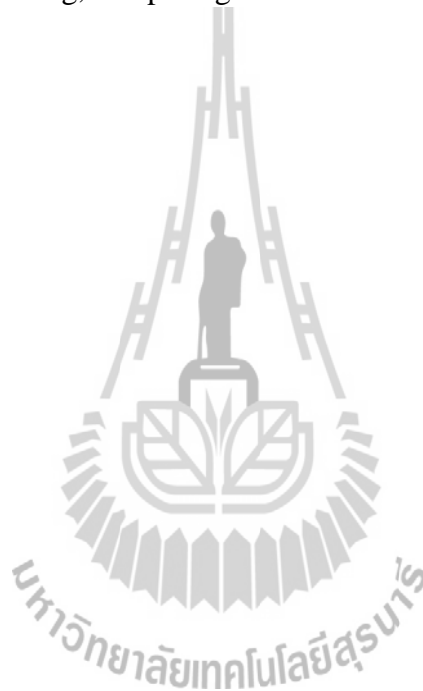
COPPER-ALLOYED AUSTEMPERED DUCTILE CAST IRON.

THESIS ADVISOR : USANEE KITKAMTHORN, Ph.D., 123 PP.

AUSTEMPERING/SINGLE-STEP/TWO-STEP/AUSFERRITE/ABRASION
WEAR/ WEIGHT LOSS/WEAR RATE

This research studied the abrasion resistances of Cu-alloyed and unalloyed austempered ductile cast irons. The irons were subjected to single-step and two-step austempering processes at the temperature of 280, 300, and 320 degree celsius for the total times of 60, 90, and 120 minutes. The specimens were cut into the final size of 25 x 60 x 5 mm and the surfaces were polished to ensure that the surface roughness was less than 3 microns. Abrasion wear testing was carried out on two-body Suga abrasion tester using 1 newton for apply load. Specimen weight losses were measured and worn surfaces were observed by scanning electron microscope. In addition, the microstructures and mechanical properties i.e. hardness, yield strength, tensile strength and impact energy were investigated. Results showed that wear rates of Cu-alloyed austempered ductile cast iron were higher than those of unalloyed austempered ductile cast iron and their mechanical properties were lower. These were due to the addition of Cu which delayed the phase transformation from austenite into ausferrite during austempering treatment and thus resulted in coarser ausferrite matrix microstructure. It was also found that two-step austempering process reduced the wear rate especially for low temperatures treatment such as 280 degree celsius. Wear rate of Cu-alloyed ductile cast iron austempered by two-step process at 280 degree celsius for 120 minutes was 0.0582 milligrams per meter, whereas that

austempered by single-step was 0.1091 milligrams per meter. The two-step austempering process at higher temperature such as 320 degree celsius did not reduce wear rate. Although the lowest wear rate was found in the unalloyed ductile cast iron treated by two-step process at initial temperature of 320 degree celsius for a total time of 60 minutes, this was due to the presence of martensite in the matrix. The worn surfaces of all austempered ductile cast iron were found to exhibit features which are grooving, tearing, scratching, and pitting.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

Co-Advisor's Signaturre_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย

อาจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตติอักษร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมและกรรมการ ผู้ให้ความรู้ทางวิชาการ ให้แนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.ฐาปนีย์ อุดมผล อาจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้ความรู้ทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุศุสาคร อินธิเดช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำ ด้านการทดสอบความต้านทานต่อการเสียดสี ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างมาก

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ เจ้าหน้าที่สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือและเทคโนโลยี (อาคารเครื่องมือ 1 และ อาคารเครื่องมือ 6) ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณ ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาและให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา

ประภาพร ศีลางค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฑ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 กระบวนการอุปชบออสเทมเปอร์ริงและการเปลี่ยนเฟสระหว่างอุปชบ	5
2.2.1 กระบวนการชบออสเทมเปอร์ริง	5
2.2.2 ปฏิกริยาการเปลี่ยนเฟสขณะออสเทมเปอร์ริง	7
2.3 ผลของธาตุผสมที่มีต่อเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ริง	13
2.4 การเกิดนิวเคลียสและการโตต่อของเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นระหว่าง การชบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น	24
2.4.1 การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยกระบวนการเกิดนิวเคลียส และการโตต่อในสถานะของแข็งในออสเฟอร์ไรต์	24
2.4.2 การชบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นเพื่อให้ได้ โครงสร้างออสเฟอร์ไรต์	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเฟอไรต์.....	36
2.5.1 ความต้านทานการสึกหรอแบบเสียดสี	36
2.5.2 ลักษณะของตัวขัดสีของอนุภาค	37
2.5.3 กลไกการสึกหรอแบบเสียดสีชนิดสองวัตถุ	37
2.5.4 พฤติกรรมการสึกหรอภายใต้การเสียดสีแบบสองวัตถุ ด้วยเครื่อง Two-body Suga abrasion tester.....	41
2.5.5 สมบัติด้านความต้านทานการเสียดสีของ เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	45
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.1 บทนำ	52
3.2 วัตถุประสงค์	53
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	54
3.3.1 ชิ้นงานทดสอบการเสียดสี	54
3.3.2 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก	54
3.3.3 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง	55
3.4 การอบชุบชิ้นงานทดสอบ.....	56
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการทดสอบความแข็ง	58
3.6 การทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงกระแทก	59
3.7 การทดสอบทดสอบการเสียดสีแบบล้อยหมุน	59
3.8 การตรวจสอบพื้นผิวภายหลังการทดสอบการเสียดสี.....	61
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	62
4.1 บทนำ	62
4.2 โครงสร้างจุลภาค	62
4.3 ผลค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์.....	66
4.4 ความทนต่อแรงกระแทก.....	74
4.5 ความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์.....	79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6	ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	83
4.6.1	ค่าอัตราการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น	85
4.6.2	อภิปรายผลการทดสอบความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น	90
4.6.3	ตรวจสอบพื้นผิวความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น	98
5	บทสรุป	102
5.1	สรุปผลงานวิจัย	102
5.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป	103
	รายการอ้างอิง	104
	ภาคผนวก	107
	ภาคผนวก ก. ตารางบันทึกผลการทดลอง ค่าความแข็งค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าอัตราการสึกหรอ	107
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	114
	ประวัติผู้เขียน	123

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการชุบอสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว.....	6
2.2	กระบวนการชุบอสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น.....	7
2.3	การเกิดเฟอร์ไรต์รูปเข็ม.....	8
2.4	การเปลี่ยนเฟสในระหว่างชุบอสเทมเปอร์ริง.....	9
2.5	แผนภาพพลังงานอิสระของเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ เทียบกับแผนภาพแสดงส่วนขยายต่อของเส้น Ae_1 , Ae_3 และ T_0 เหล็กกับคาร์ไบด์.....	10
2.6	วิวัฒนาการเกิดโครงสร้างเกิดโครงสร้างออสเฟอร์ไรต์ ขณะชุบอสเทมเปอร์ริง.....	11
2.7	ส่วนต่อขยายของแผนภูมิสมดุล Fe-2Si-C.....	12
2.8	แผนภาพ CCT แสดงอิทธิพลของธาตุผสมโมลิบดีนัม.....	14
2.9	อิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่ออัตราส่วนระหว่างเฟอร์ไรต์ กับออสเทนไนต์ในโครงสร้างออสเฟอร์ไรต์.....	15
2.10	อัตราส่วนระหว่างเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ที่เทียบกับ ปริมาณของออสเฟอร์ไรต์.....	15
2.11	ค่าความแข็งเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียว ที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น.....	17
2.12	ค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริง ของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น.....	18
2.13	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริง ของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น.....	19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14	ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น..... 20
2.15	ค่าพลังงานการดูดซับแรงกระแทกเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น..... 21
2.16	สัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์เทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น..... 22
2.17	ค่าพลังงานอิสระและรัศมีวิกฤต..... 27
2.18	สัดส่วนโดยปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา..... 28
2.19	สัดส่วนโดยปริมาตรถูกเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา..... 30
2.20	การเปลี่ยนเฟสเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างกัน..... 32
2.21	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิต่างกันเป็นเวลา 120 นาที..... 34
2.22	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ที่เวลารวม 120 นาที..... 34
2.23	รูปแบบการสึกหรอแบบเสียดสี..... 36
2.24	แผนภาพจำลองการสึกหรอแบบเสียดสีระหว่างอนุภาคและเนื้อวัสดุ..... 38
2.25	แผนภาพของเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน..... 41
2.26	ภาพ SEM แสดงพื้นผิวความเสียหายของเหล็กหล่อโครเมียมสูง ที่ผ่านการทดสอบการเสียดสีด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน..... 42
2.27	แสดงค่าคงที่การสึกหรอ (K) เทียบกับแรงกดที่ใช้ในการทดสอบ..... 44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.28	แผนภาพเครื่องทดสอบการเสียดสีตามมาตรฐาน ASTM standard G132-96 (2001).....	45
2.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียเทียบกับสัดส่วนโดยปริมาตร ของออสเทนไนต์ (X_γ) ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ (C_γ) และ ออสเทนไนต์เหลือค้ำคาร์บอนสูง ($X_\gamma C_\gamma$).....	48
2.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียเฉลี่ย จากการเสียดสีเทียบกับแรงกดที่ใช้ทดสอบการเสียดสี.....	50
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.2	ชิ้นงาน Y-block ของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลม.....	53
3.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลม.....	53
3.4	แสดงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบการเสียดสี.....	54
3.5	ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไม่บากร่อง.....	55
3.6	ขนาดชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง.....	55
3.7	กระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว.....	56
3.8	กระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น.....	57
3.9	เครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน และแผนภาพจำลองของเครื่องทดสอบ.....	60
3.10	เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม.....	61
4.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลารวม 120 นาที ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส.....	63
4.2	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นด้วยเวลารวม 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	64
4.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นด้วยเวลารวม 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	65
4.4	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวด้วยเวลา 120 นาที.....	66

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	ค่าความแข็งแรงเทียบกับเวลาในการชုပ်ออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ <u>ไม่</u> ผสมทองแดง..... 68
4.6	ค่าความแข็งแรงเทียบกับเวลาในการชုပ်ออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ <u>ผสม</u> ทองแดง..... 69
4.7	ค่าความแข็งแรงเทียบกับเวลาในการชုပ်ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ <u>ไม่</u> ผสมทองแดง..... 70
4.8	ค่าความแข็งแรงเทียบกับเวลาในการชုပ်ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ <u>ผสม</u> ทองแดง..... 71
4.9	แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟอร์ไรต์ เทียบกับเวลาออสเทมเปอร์ริง..... 73
4.10	ค่าการดูดซับพลังงานทดสอบแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียว <u>ไม่</u> ผสมทองแดงที่ผ่านการชုပ်ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น..... 76
4.11	ค่าการดูดซับพลังงานทดสอบแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียว <u>ผสม</u> ทองแดงที่ผ่านการชုပ်ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น..... 77
4.12	พื้นผิวการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชုပ်ออสเทมเปอร์ริง ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 120 นาที ที่ก้ำลึงขยาย 1500 เท่า..... 78
4.13	พื้นผิวการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชုပ်ออสเทมเปอร์ริง ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 120 นาที ที่ก้ำลึงขยาย 450 เท่า..... 78
4.14	ค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากของเหล็กหล่อเหนียวที่ <u>ไม่</u> ผสมทองแดง และ <u>ผสม</u> ทองแดงที่ผ่านการชုပ်ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น..... 80
4.15	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเหล็กหล่อเหนียวที่ <u>ไม่</u> ผสมทองแดง และ <u>ผสม</u> ทองแดงที่ผ่านการชုပ်ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น..... 81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 สมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อเหนียว ที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นเทียบกับชั้นคุณภาพ ตามมาตรฐาน ASTM A 897M-90	82
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียจากการสึกหรอ กับระยะทางที่ถูกทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียว ที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส	84
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็ง ของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว	87
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็ง ของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว	88
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็ง ของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น	89
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็ง ของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น	90
4.22 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6500 เท่า ของเหล็กหล่อเหนียว ไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว ที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริง 300 องศาเซลเซียส	94
4.23 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6500 เท่า ของเหล็กหล่อเหนียว ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว ที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริง 300 องศาเซลเซียส	95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็ง ของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ <u>ไม่</u> ผสมทองแดงและ <u>ผสม</u> ทองแดงที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์รีงแบบชั้นเดียว และสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส.....	96
4.25 ภาพถ่าย SEM ใต้พื้นผิวที่ถูการเสียดสีที่กำลังขยาย 6000 เท่า ของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ผ่านการชุบ อสเทมเปอร์รีงแบบสองชั้น	96
4.26 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค SEM ที่กำลังขยาย 4000 เท่า ของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ผ่านการชุบ อสเทมเปอร์รีงแบบสองชั้น	97
4.27 พื้นผิวความเสียหายภายหลังการทดสอบการเสียดสี ของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ อสเทมเปอร์รีงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที	99
4.28 พื้นผิวความเสียหายภายหลังการทดสอบการเสียดสี ของเหล็กหล่อเหนียว <u>ผสม</u> ทองแดงที่ผ่านการชุบ อสเทมเปอร์รีงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที	100
4.29 รอยแตกภายหลังการทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียว <u>ผสม</u> ทองแดงที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์รีงที่อุณหภูมิ อสเทมเปอร์รีงเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ชั้นคุณภาพและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ (ASTM A 897M-90)..... 1
2.1	เลขชี้กำลังที่ใช้ในสมการ 2.15 โดยพิจารณาจากรูปแบบของการโต้ตอบ..... 31
2.2	แสดงค่าคงที่การสึกหรอ (K) ที่ใช้สำหรับการสึกหรอแบบเสียดสี..... 40
2.3	แสดงน้ำหนักที่สูญเสียภายหลังการทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์..... 46
2.4	แสดงค่าความแข็งก่อนและหลังทดสอบการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์..... 47
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลม..... 54
3.2	สภาวะในการอบชุบอสเทมเปอร์จริงที่ใช้ในการทดสอบ..... 58
4.1	ค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดง..... 72
4.2	ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดง..... 81
ก.1	ค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดง..... 108
ก.2	ค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ผสมทองแดง..... 109
ก.3	ค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์จริงแบบสองชั้น..... 110
ก.4	ค่าความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์จริงแบบสองชั้น..... 111
ก.5	ค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดง..... 112
ก.6	ค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ผสมทองแดง..... 113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ (Austempering Ductile Iron หรือ ADI) เป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวที่ดีกว่าเหล็กหล่อทั่วไปมาก อีกทั้งยังสามารถทนต่อแรงกระแทกและการเสียดสีสูง จึงได้ถูกนำมาใช้มากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และจักรกลการเกษตร อาทิเช่น เฟืองท้ายรถยนต์ เฟืองเกียร์ ตัวชุดดินในรถไถและล้อเฟืองของรถเกี่ยวข้าว-นวดข้าว เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการแบ่งชั้นคุณภาพของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ออกเป็น 5 ชั้นคุณภาพ ตามมาตรฐาน ASTM A 897M-90 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1.1 ชั้นคุณภาพและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ (ASTM A 897M-90)

Grade	Minimum yield strength (MPa)	Minimum tensile strength (MPa)	Minimum elongation (%)	Minimum unnotched Charpy (J)	Typical Brinell hardness (HB)
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

หมายเหตุ : “Wear resistance properties of austempered ductile iron,” Lerner and Kingsbury, 1997 , ASM International, February 1998, Volume 7(1) 48-52.

สำหรับการผลิตเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์นั้นผู้ผลิตอาศัยการพิจารณาจากลักษณะรูปทรงของชิ้นส่วนและสมบัติเชิงกลตามชั้นคุณภาพที่ต้องการ จากนั้นก็นำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ประกอบการเลือกส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ สภาวะการอบออสเทนไนท์ซิงและสภาวะการชุบออสเทมเปอร์ริงที่เหมาะสม เพื่อให้ภายหลังการชุบออสเทมเปอร์ริงแล้วได้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ตามชั้นคุณภาพที่ต้องการ ซึ่งการชุบออสเทมเปอร์ริงนั้นสามารถทำได้โดยนำเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลมมาอบออสเทนไนท์ซิง (austenitizing) ที่อุณหภูมิ 850-950

องศาเซลเซียส ทั้งไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลานานพอที่จะทำให้คาร์บอนแพร่ออกจากเกรไฟต์เข้าไปละลายในออสเทนไนต์ได้เพียงพอ จากนั้นชุบออสเทมเปอร์ริงโดยการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วลงมาที่อุณหภูมิเหนือเส้นการเปลี่ยนเฟสเป็นมาเทนไซต์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วชุบที่อุณหภูมิดังกล่าวในช่วงประมาณ 240-450 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ชิ้นงานให้อยู่ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ขึ้นกับอุณหภูมิที่ชุบและส่วนผสมทางเคมีของออสเทนไนต์ก่อนชุบลงมาระหว่างการชุบออสเทมเปอร์ริงนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออสเทนไนต์เริ่มต้น (γ_0) ไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็ม (α) สลับกับออสเทนไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) เรียกโครงสร้างนี้ว่า "ออสเฟอร์ไรต์" (ausferrite) ซึ่งโครงสร้างออสเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างจุลภาคที่ทำให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ริงมีสมบัติเชิงกลที่ดี ในระหว่างการชุบออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลมจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟส 2 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 ออสเทนไนต์เริ่มต้น (γ_0) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็ม (bainitic ferrite) กับออสเทนไนต์ที่มีคาร์บอนสูง (γ_{HC}) สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาได้ดังนี้



ซึ่งโครงสร้างของ $\alpha + \gamma_{HC}$ คือ ออสเฟอร์ไรต์ (ausferrite) เป็นโครงสร้างที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดี ให้ความต้านทานแรงดึงสูงและมีความเหนียวที่ดี

ช่วงที่ 2 ออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์ (เบนไนท์ในเหล็กกล้า)



ปฏิกิริยาช่วงที่ 2 จะเกิดขึ้นในกรณีที่ชุบออสเทมเปอร์ริงนานเกินไปทั้งนี้ขึ้นกับธาตุผสมรองด้วย (Wu, Chen, and Shih, 2002) คาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นส่งผลให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น (มนัส สธิกรจินดา, 2543); (Yang and Putatunda, 2004) ปัจจัยที่มีผลต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ ได้แก่

1.1.1 สัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์คาร์บอนสูง (X_γ)

1.1.2 ปริมาณคาร์บอนของออสเทนไนต์ (C_γ) ต้องมีในปริมาณสูงเพียงพอที่ทำให้ ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้อง

1.1.3 รูปร่างของเฟอร์ไรต์รูปเข็มและปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้าง

ในเชิงของการออกแบบกระบวนการอบชุบ เพื่อให้ได้ทั้งความแข็งแรงและความเหนียวสูง ลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดและการมีออสเทนไนต์คาร์บอนสูงในปริมาณที่มากขึ้นเป็นที่ต้องการที่สุด จึงได้มีแนวคิดการอบชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นขึ้น (Yang and Putatunda, 2004) ซึ่งกระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นนี้มีวิธีการอบออสเทนไนท์ซึ่งเหมือนกับวิธีการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบขั้นเดียว จะต่างกันก็ช่วงที่ชุบออสเทมเปอร์ริง โดยจะชุบเหล็กหล่อเหนียวลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานานพอเพื่อให้นิวเคลียสของเฟอร์ไรต์เกิดขึ้น

โดยทั่วไปแล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกเล็กน้อย เพื่อส่งเสริมให้คาร์บอนแพร่เข้าไปละลายในเฟส ออสเทนไนต์ได้ดีขึ้น ภายหลังจากชุบออสเทนเปอรรีจึงได้โครงสร้างที่มีลักษณะเฟอไรต์รูปเข็ม ที่ละเอียดและออสเทนไนต์เหลือค้างจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอรรีมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง

นอกจากนี้การเลือกส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวที่จะนำมาชุบออสเทนเปอรรีจึง เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการให้ได้มาซึ่ง โครงสร้างตามชั้นคุณภาพที่ต้องการ ในกรณีที่ชิ้นงาน เหล็กหล่อเหนียวที่นำมาชุบออสเทนเปอรรีมีขนาดของชิ้นงานหนามากกว่า 1 นิ้ว ได้มีการนำ ธาตุผสมอื่นเข้ามาเติมเพื่อป้องกันการก่อตัวของ โครงสร้างเฟิร์ลไลต์ในเหล็กหล่อเหนียว ออสเทนเปอรรี เช่น ธาตุโมลิบดีนัมและธาตุ निकิล เป็นต้น เนื่องจากธาตุ निकิล นั้นมีราคาแพงมาก จึงได้นำธาตุทองแดงเข้ามาใช้แทนซึ่งธาตุทองแดงนั้นมีราคาถูกกว่า สามารถป้องกันการเกิด โครงสร้างเฟิร์ลไลต์ขณะชุบออสเทนเปอรรีและมีส่วนช่วยเพิ่มความเหนียวได้เช่นเดียวกับ ธาตุ निकิล

เหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอรรีมีการใช้เป็นชิ้นส่วนสำหรับจักรกลการเกษตรและชิ้นส่วน ยานยนต์มากขึ้น โดยเฉพาะ ชิ้นส่วนที่ต้องทนต่อการเสียดสี เนื่องจากเหล็กหล่อเหนียว ออสเทนเปอรรีมีโครงสร้างออสเฟอไรต์และออสเทนไนต์เหลือค้างที่ช่วยให้สามารถทนต่อการ เสียดสีได้ดีกว่าเหล็กหล่อเหนียวทั่วไป เพราะระหว่างที่ชิ้นงานถูกเสียดสีจากการใช้งานจะทำให้เกิด ความเครียดสะสมขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงานที่ถูกเสียดสีและส่งผลให้ออสเทนไนต์เหลือค้างใน เหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอรรีเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ได้ การศึกษาสมบัติด้านความ ต้านทานต่อการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอรรีเริ่มเป็นที่สนใจมากขึ้นในปัจจุบัน งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและเปรียบเทียบความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบ ออสเทนเปอรรี (austempering) แบบชั้นเดียวและสองชั้น โดยใช้เหล็กหล่อเหนียวที่ไม่ผสมธาตุ ทองแดงและผสมธาตุทองแดงประมาณ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นเกรดเดียวกับ ทางการค้า โดยนำชิ้นงานมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน (Two-body type Suga abrasion wear tester) รุ่น NUS-ISO 3 Japan ใช้แรงกดชิ้นงานในการทดสอบ ที่ 1 นิวตัน ซึ่งการทดสอบความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอรรีแบบชั้น เดียวและแบบสองชั้นด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีดังกล่าวยังไม่ค่อยมีผู้ศึกษา ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือก ศึกษาความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอรรีด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสี ชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน โดยเลือกใช้เหล็กหล่อเหนียวเกรดไฟต์กลมที่มีธาตุผสมทองแดง 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีการผลิตจริงในภาคอุตสาหกรรมและนิยมใช้กันอย่าง แพร่หลาย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาสมบัติการต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้น

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของธาตุทองแดงในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ต่อความต้านทานการเสียดสี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้น โดยมีขอบเขตดังนี้

1.3.1 อุณหภูมิการอบออสเทนไนท์ซึ่งคือ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

1.3.2 อุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์เริ่มต้นเป็น 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (กรณีการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นจะเพิ่มอุณหภูมิอีก 30 องศาเซลเซียส เมื่อชุบขึ้นงานลงในอ่างเกลือหลอมเหลวไปแล้วเป็นระยะเวลา 6 นาที โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที)

1.3.3 เวลาในการชุบออสเทมเปอร์ทั้งรวมในแต่ละอุณหภูมิเป็น 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

1.3.4 ทดสอบความต้านทานการเสียดสีด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน (Two-body Suga tester abrasion) รวมทั้งทดสอบหาสมบัติเชิงกลทั่วไป ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานแรงดึงจุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

1.4 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงความสามารถการทนต่อการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดง 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้น

1.4.2 ทราบถึงอิทธิพลของธาตุทองแดงในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่มีต่อความต้านทานการเสียดสี

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

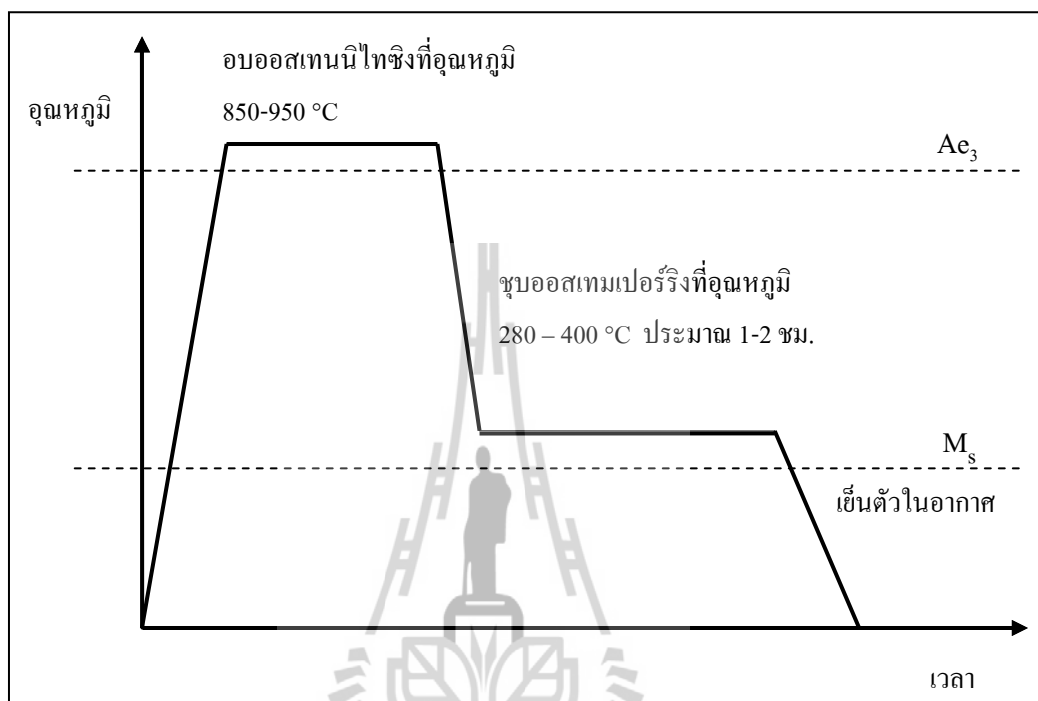
เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ (Austempering Ductile Iron หรือ ADI) มีสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรงและความเหนียวสูง สามารถต้านทานการเสียดสีได้ดี อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ จึงได้รับความสนใจมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนจักรกลการเกษตรที่ต้องการสมบัติการทนต่อแรงกระแทกและการเสียดสีสูง ซึ่งเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ได้ถูกพัฒนาจากเหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลม โดยผ่านกระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงเพื่อให้ได้โครงสร้างสุดท้ายเป็น “ออสเฟอไรต์ (ausferrite)” ที่ประกอบไปด้วยเฟอไรต์รูปเข็มและออสเทนไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ปัจจุบันกระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงได้แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการหลัก ๆ คือ กระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและกระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2 กระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงและการเปลี่ยนเฟสระหว่างการอบชุบ

2.2.1 กระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริง

เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ได้จากการอบชุบด้วยกระบวนการที่เรียกว่า ออสเทมเปอร์ริง (austempering) โดยนำเหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลมที่มีโครงสร้างพื้นฐานเดิมเป็นเฟอไรต์หรือเฟอไรต์ผสมกับเพิร์ลไลต์ มาผ่านกระบวนการอบออสเทนไนท์ซิง (austenitizing) ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 850–950 องศาเซลเซียส ซึ่งในช่วงของอุณหภูมินี้บริเวณที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานนั้นจะเป็นเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นเฟสของเหล็กที่มีเสถียรภาพ อุณหภูมิสูงและมีความสามารถในการละลายของคาร์บอนสูง (มันส์ สติร์จินดา, 2543) ในระหว่างที่อบออสเทนไนท์ซิงนี้คาร์บอนจากแกรไฟต์จะแพร่ซึมเข้าไปในโครงสร้างของออสเทนไนต์ที่อยู่บริเวณรอบ ๆ เม็ดแกรไฟต์ ซึ่งจะทำได้เฟสของออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น (γ_0) จากนั้นเมื่อครบกำหนดเวลาในการอบออสเทนไนท์ซิงแล้ว ชิ้นงานจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 280–400 องศาเซลเซียส โดยแช่ทิ้งไว้ในอ่างเกลือประมาณ 1–2 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิคงที่ เพื่อให้โครงสร้างของออสเทนไนต์เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอไรต์และออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงพอ

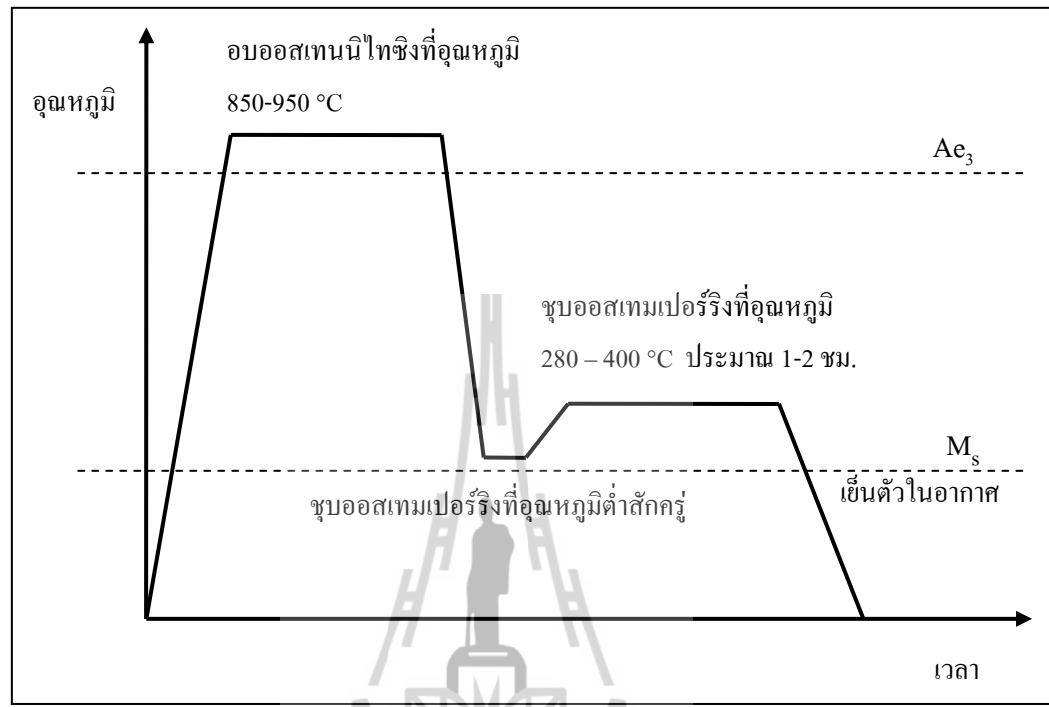
ที่จะมีเสถียรภาพหลังจากปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง (มนัส สติรจินดา, 2543) ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่าการชุบอบสเทมเปอร์ริง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบขั้นเดียว



รูปที่ 2.1 กระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบขั้นเดียว

สำหรับกระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงในปัจจุบันนี้มีอยู่สองแบบหลัก ๆ คือ กระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบขั้นเดียวและแบบสองขั้น โดยกระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบขั้นเดียวจะใช้อุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนการชุบแบบสองขั้นนั้นต่างกับกระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบขั้นเดียวที่ช่วงการชุบอบสเทมเปอร์ริงในอ่างเกลือหลอมเหลวเท่านั้น (ทั้งนี้แนวคิดของการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นมาจากหลักการเรื่องการเพิ่มจำนวนนิวเคลียส โดยใช้หลักอันเดอร์คูลิ่ง (undercooling) และการแพร่ของคาร์บอนเข้ามาช่วยในกระบวนการนี้) ซึ่งในขั้นตอนการชุบอบสเทมเปอร์ริงได้นำชิ้นงานชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำก่อนในช่วงแรก เพื่อทำให้เกิดอันเดอร์คูลิ่งมาก ๆ และทิ้งไว้ที่ช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นดังกล่าวสักครู่หนึ่งเพื่อให้เกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรต์จำนวนมาก จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อส่งเสริมการแพร่ของคาร์บอนไปยังเฟสของออสเทนไนต์ได้ดีขึ้น แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวจนครบเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริง ทำให้ภายหลังจากชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นได้โครงสร้างที่มีเฟอร์ไรต์ละเอียดและออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าการชุบ

ออสเทมเปอร์ริงแบบขั้นเดียว โดยมีแผนภาพกระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.2 กระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น

2.2.2 ปฏิกริยาการเปลี่ยนเฟสขณะชุบออสเทมเปอร์ริง

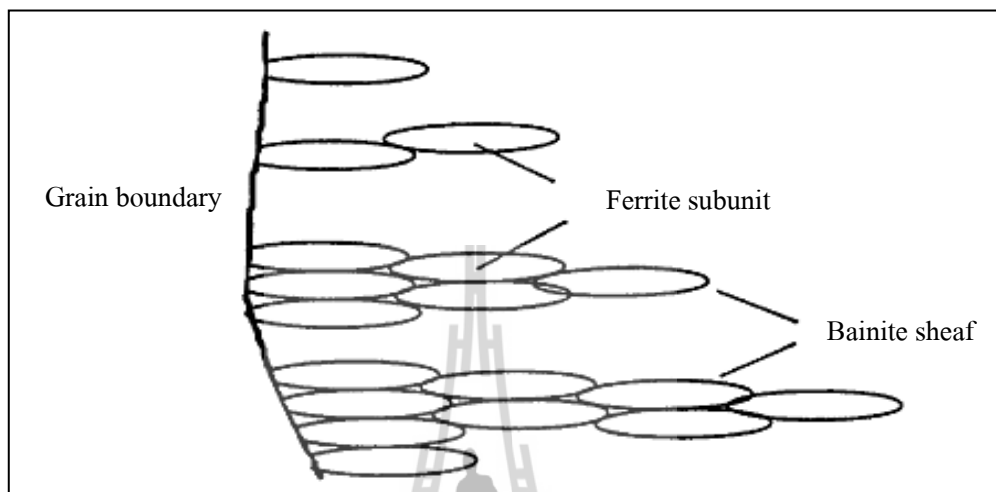
ในระหว่างการเปลี่ยนเฟสที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal transformation) สำหรับการชุบออสเทมเปอร์ริง จะเกิดปฏิกริยาการเปลี่ยนเฟสดังนี้

ช่วงที่ 1 ออสเทนไนต์เริ่มต้น (γ_0) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็ม (acicular ferrite) กับออสเทนไนต์ที่มีคาร์บอนสูง (γ_{HC}) ที่ยังอยู่ในสภาวะกึ่งสมดุล (meta-stable) โดยเขียนปฏิกริยาการเปลี่ยนเฟสได้ดังนี้ (Wu, Chen, and Shih, 2002); (Eric, Sidjanin, Miskovic, Zec, and Jovanovic, 2004)



ตามปกติแล้วคาร์บอนสามารถละลายในเฟอร์ไรต์ได้น้อยกว่าในออสเทนไนต์ ดังนั้นระหว่างที่ชิ้นงานอยู่ในอ่างเกลือหลอมเหลวคาร์บอนจะถูกผลักออกจากเฟอร์ไรต์ที่กำลังโตต่อ จึงทำให้ออสเทนไนต์ที่เหลืออยู่ระหว่างเฟอร์ไรต์รูปเข็มมีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) โดยโครงสร้างของ $\alpha + \gamma_{HC}$ ถูกเรียกว่าออสเฟอร์ไรต์ (ausferrite) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็น

เบนไนต์ไร้คาร์ไบด์ (carbide free bainite) ซึ่งพบได้ในการชุบอบสเทมเปอร์ริงของเหล็กกล้าที่เติมธาตุซิลิคอนสูง (Li and Chen, 2001); (De Cooman, 2004) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดี คือ ให้ความแข็งแรงและความเหนียวสูง (Yang and Putatunda, 2004)



รูปที่ 2.3 การเกิดเฟอร์ไรต์รูปเข็ม (Tszeng, 2000)

ลักษณะการเกิดออสเฟอร์ไรต์ในเหล็กหล่อคล้ายกับการเกิดเบนไนต์ในเหล็กกล้า เพียงแต่จะไม่เกิดคาร์ไบด์ในเฟอร์ไรต์รูปเข็ม โดยเบนไนต์จะเกิดในลักษณะเป็นช่อ (sheaves) ของเฟอร์ไรต์ที่มีชั้นออสเทนไนต์กั้นอยู่ระหว่างหน่วยย่อย (subunit) ของเฟอร์ไรต์แต่ละหน่วยย่อย โดยเฟอร์ไรต์ในช่อเดียวกันเกิดขึ้นแบบ auto catalysis ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเห็นได้ว่า ช่อเบนไนต์ (bainite sheaf) ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์รูปเข็มจำนวนมาก ซึ่งช่อเบนไนต์จะเริ่มเกิดขึ้นตามบริเวณขอบเกรนและโตขึ้นไปสู่ภายในเกรนของออสเทนไนต์ด้วยกลไกการเกิดนิวเคลียสและการโตต่อบนพื้นผิวของเฟอร์ไรต์รูปเข็มที่เกิดขึ้นก่อน (Tszeng, 2000); (Matsuda and Bhadeshia, 2004)

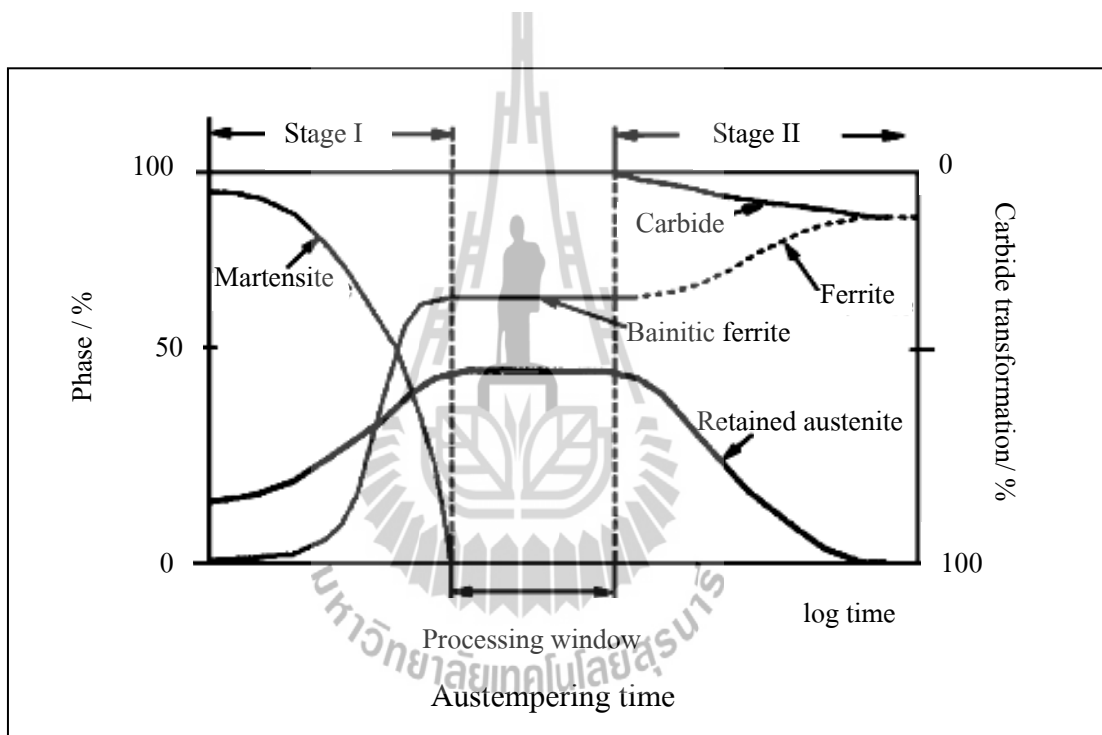
ช่วงที่ 2 ออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์ (เบนไนต์ในเหล็กกล้า) (มนัส สติรจินดา, 2543)



ปฏิกิริยาในช่วงที่ 2 นี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริงเป็นระยะเวลานาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธาตุผสมรองด้วย (Wu et al., 2002) โดยคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กกระจายอยู่ภายในเกรนออสเฟอร์ไรต์ (มนัส สติรจินดา, 2543) ซึ่งปฏิกิริยาในช่วงที่ 2 นี้ควรหลีกเลี่ยงเพราะจะส่งผลให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ได้มีโครงสร้างที่

เพราะและมีสมบัติเชิงกลต่ำลง ดังนั้นการทำเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดี ต้องควบคุมอุณหภูมิและเวลาให้เหมาะสมหรือให้อยู่ในช่วงกรอบการชุบออสเทมเปอร์ริง (austempering processing window) เพื่อให้ได้โครงสร้างออสเฟอไรต์ที่มีเสถียรภาพนั่นเอง

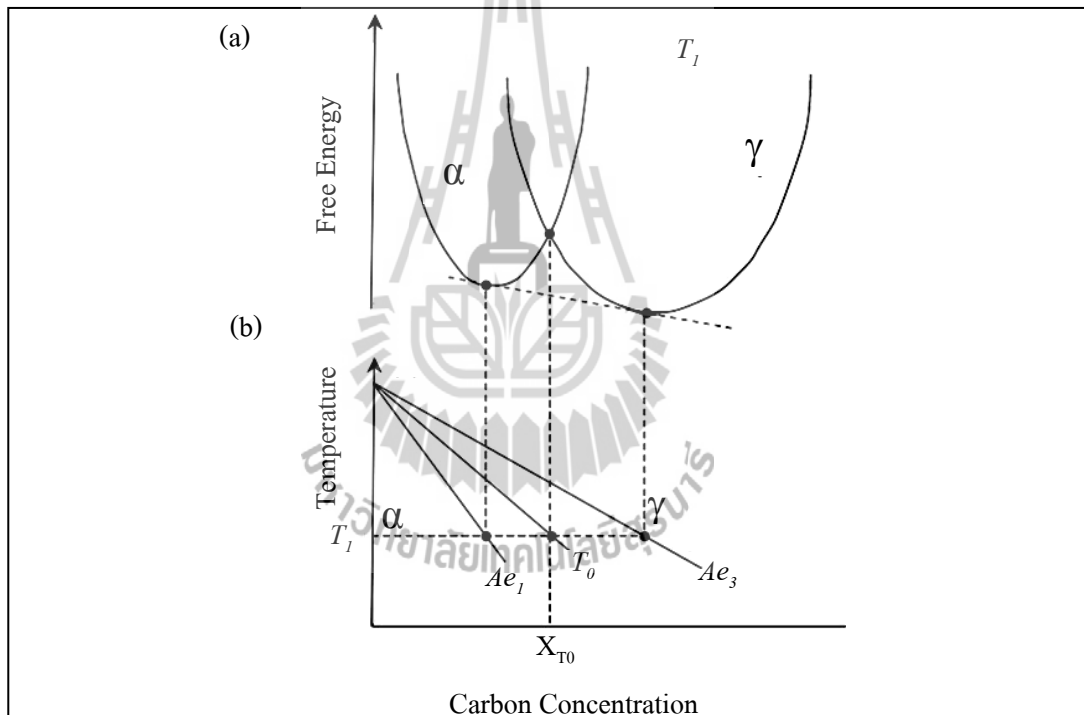
กรอบการชุบออสเทมเปอร์ริง คือ ช่วงที่โครงสร้างออสเฟอไรต์ ($\alpha + \gamma_{HC}$) มีเสถียรภาพ (ปฏิกิริยาช่วงที่ 1 เกิดขึ้นใกล้สิ้นสุด) ซึ่งไม่ว่าจะเลือกเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริง นานเท่าไร หากยังอยู่ในช่วงกรอบการชุบออสเทมเปอร์ริงนี้โครงสร้างสุดท้ายที่ได้จะเป็น ออสเฟอไรต์ที่มีเสถียรภาพและยังไม่เกิดการไพบ์ (ยังไม่เกิดปฏิกิริยาช่วงที่ 2) (Ramadan, Nofal, Elmahalawi, and Abdel-Karim, 2006); (Gazda, 2010)



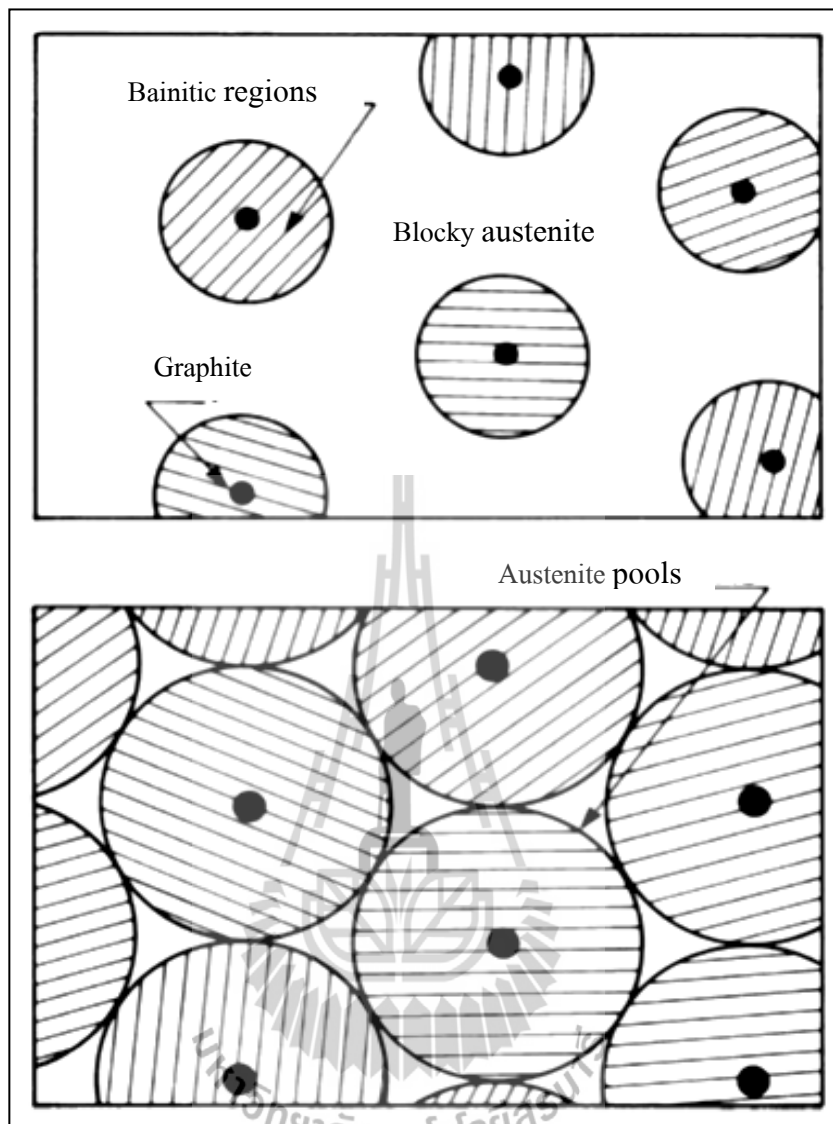
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนเฟสในระหว่างชุบออสเทมเปอร์ริง (Wu, Chen, and Shih, 2002)

การเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์ไปเป็นเฟอไรต์ที่เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ในช่วง อุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์ริง สามารถอธิบายได้ด้วยหลักเทอร์โมไดนามิกส์ตามแนวคิด T_0 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อพิจารณาแผนภาพพลังงานอิสระของเฟอไรต์ (α) กับออสเทนไนต์ (γ) และส่วนขยายต่อของเส้นขอบเขตแสดงสมดุลระหว่างเฟอไรต์ Ae_1 และออสเทนไนต์ Ae_3 จะเห็นได้ว่าเส้น Ae_1 และ Ae_3 คือส่วนผสม ณ จุดสมดุลร่วมของเฟสเฟอไรต์ (α) และออสเทนไนต์ (γ)

ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าพลังงานอิสระรวมของระบบต่ำสุด ส่วนจุดที่กราฟตัดกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 (a) ให้เป็นจุดบนเส้นที่เรียกว่า T_0 และที่จุดนี้มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ X_{T_0} ซึ่งจุดบนเส้น T_0 นี้คือจุดที่เฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์มีค่าพลังงานอิสระเท่ากัน ตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์แล้วการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์เกิดได้ต่อเมื่อออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าจุด X_{T_0} เท่านั้น เพราะค่าพลังงานอิสระของออสเทนไนต์สูงกว่าค่าพลังงานอิสระของเฟอร์ไรต์ทำให้เฟสออสเทนไนต์สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์ เมื่อปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์สูงกว่าจุด X_{T_0} พลังงานอิสระของเฟอร์ไรต์มีค่ามากกว่าของออสเทนไนต์ ดังนั้นออสเทนไนต์จึงไม่สามารถเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์ได้ (Amran, Katsman, Schaaf, and Bamberger, 2010 quoted in Yescac-Gonzalez, Ph.D Dissertation, Univesity of Cambridge, 2001)



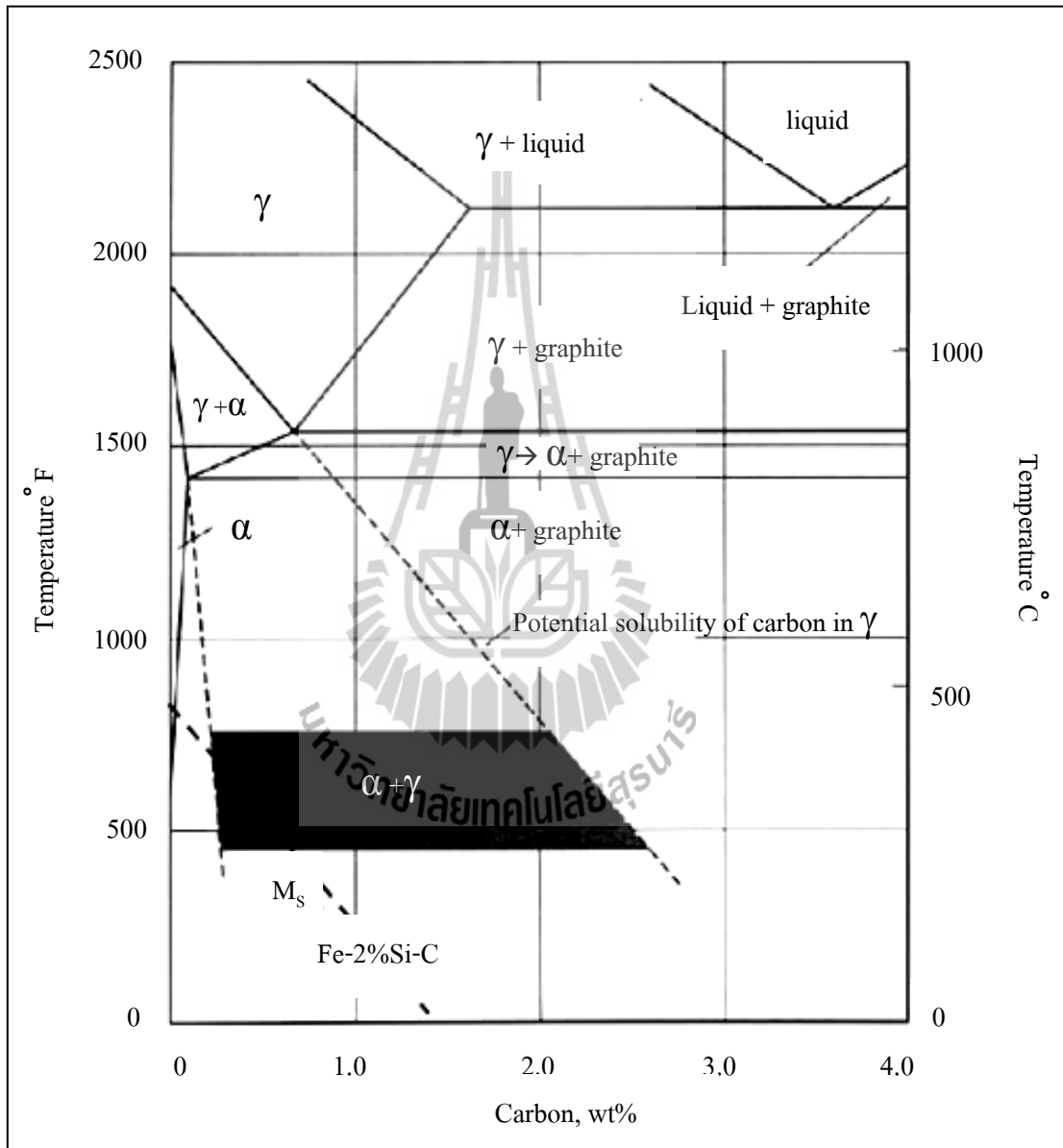
รูปที่ 2.5 แผนภาพพลังงานอิสระของเฟอร์ไรต์ (α) กับออสเทนไนต์ (γ) ภาพ (a) เทียบกับแผนภาพแสดงส่วนขยายต่อของเส้น Ae_1 Ae_3 และ T_0 เหล็กกับคาร์ไบด์ ภาพ (b) (Amran, Katsman, Schaaf, and Bamberger, 2010)



รูปที่ 2.6 วิวัฒนาการเกิดโครงสร้างเกิดโครงสร้างอสเฟอไรต์
 ขณะชุบอสเทมเปอร์ริง(Aranzabal, Gutierrez,
 Rodriguez-Ibabe, and Urcola, 1997)

จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าการเกิดโครงสร้างอสเฟอไรต์ในขณะที่ชุบอสเทมเปอร์ริงนั้นมีผลต่อรูปร่างของอสเทนไนต์ที่ยังไม่เปลี่ยนเฟส โดยชั้นต้นเฟอไรต์จะเกิดรอบ ๆ แกรไฟต์กลมเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีคาร์บอนน้อยที่สุดและมีซิลิคอนสูง ออสเฟอไรต์นี้จะโตต่อไปในเนื้อพื้นอสเทนไนต์ หากการเปลี่ยนเฟสเป็นอสเฟอไรต์ถูกทำให้หยุดก่อนที่การเปลี่ยนเฟสสิ้นสุด (เวลาอสเทมเปอร์ริงน้อย) ออสเทนไนต์ที่เหลืออยู่จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากปริมาณคาร์บอนในอสเทนไนต์ไม่เพียงพอในการทำให้

ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องได้ แต่ถ้าเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงนานพอที่ทำให้การเปลี่ยนเฟสเป็นออสเฟอไรต์เกิดได้ใกล้สิ้นสุด ก็จะได้โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบไปด้วยเฟอไรต์ ฟิล์มออสเทนไนต์ระหว่างหน่วยย่อยของเฟอไรต์ และบริเวณของออสเทนไนต์ระหว่างช่องออสเฟอไรต์ (หรือ Blocky austenite) (Aranzabal et al., 1997)



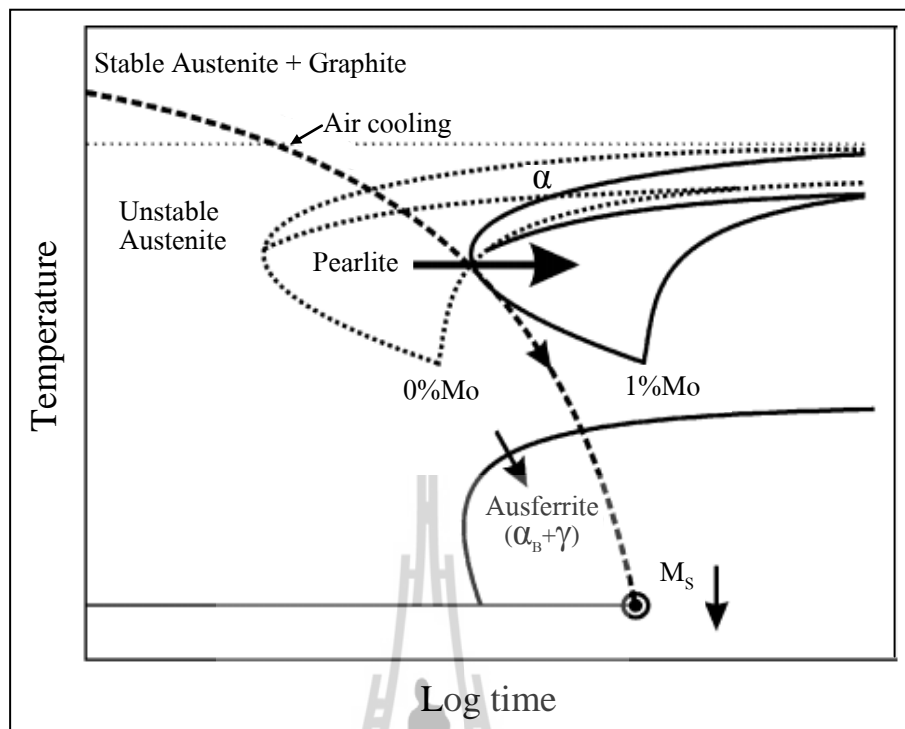
รูปที่ 2.7 ส่วนต่อขยายของแผนภูมิสมมูล Fe-2Si-C (Amran et al., 2010)

(Amran et al., 2010) ได้ใช้แผนภูมิสมดุลของ Fe-2Si-C อธิบายการเปลี่ยนเฟสจาก ออสเทนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์ระหว่างการชุบอบสเทมเปอร์ริงสำหรับกรณีเหล็กหล่อเหนียว แกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอธิบายในสภาวะกึ่งสมดุลของ บริเวณ $\alpha+\gamma$ ที่ถูกวาดส่วนขยายออกมาได้เส้นปฏิกิริยายูเทคตอยด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยพิจารณาว่าถ้านำเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลมดังกล่าวมาอบออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เป็นออสเทนไนต์เริ่มต้นที่มีปริมาณคาร์บอน 0.75 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และแกรไฟต์กลม จากนั้นชุบอบสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิประมาณ 250–450 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์ที่มีคาร์บอนอิ่มตัวยิ่งยวดและ ออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอน 2–2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยออสเทนไนต์ที่ได้จะไม่ เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ภายหลังการเย็นตัวเพราะว่าปริมาณคาร์บอนที่สูงนั้นส่งผลให้เส้นอุณหภูมิ เริ่มต้นการเกิดมาร์เทนไซต์ลดต่ำกว่าที่อุณหภูมิห้อง การโตต่อของเฟอร์ไรต์รูปเข็มที่มีคาร์บอน อิ่มตัวยิ่งยวด (carbon supersaturated ferrite needles) นั้นเป็นไปตามหลักการแพร่ของคาร์บอน โดยคาร์บอนจะแพร่ออกจากเฟอร์ไรต์ไปยังบริเวณออสเทนไนต์รอบ ๆ เฟอร์ไรต์ ซึ่งทำให้ปริมาณ คาร์บอนในออสเทนไนต์บริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น การเกิดนิวเคลียสใหม่ของเฟอร์ไรต์จะเกิดได้ ต่อเมื่อออสเทนไนต์ในบริเวณนั้นมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าที่จุด X_{T_0} ตลอดระยะเวลาการพักตัว

2.3 ผลของธาตุผสมที่มีต่อเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

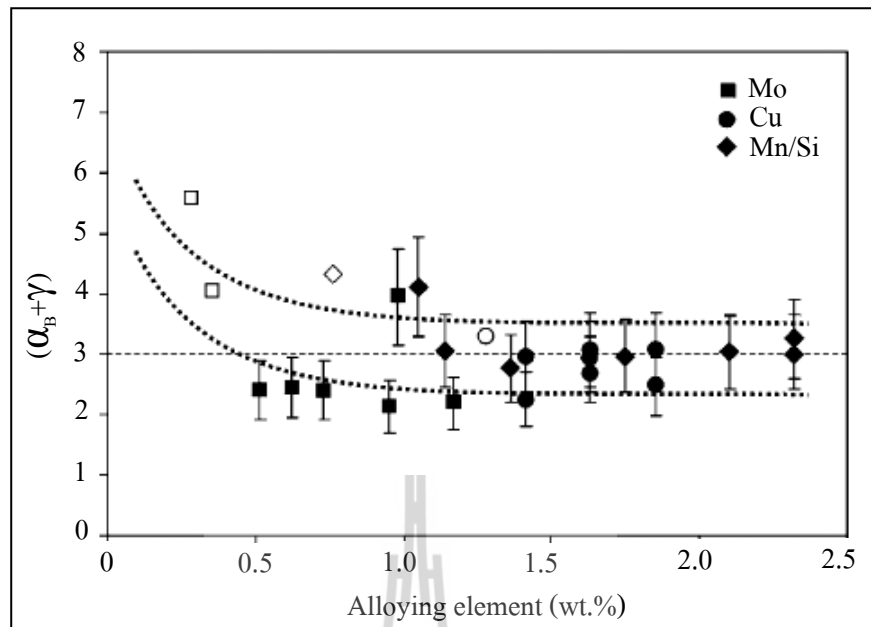
บางกรณีของการชุบอบสเทมเปอร์ริงได้มีการเติมธาตุผสมที่ส่งผลให้เฟสออสเทนไนต์ มีเสถียรภาพ เช่น นิกเกิล โมลิบดีนัม และทองแดง เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบอบสเทมเปอร์ริง ให้ได้โครงสร้างสุดท้ายที่เป็นออสเฟอร์ไรต์และป้องกันการเกิดโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ขณะชุบ ออสเทมเปอร์ริง (Eric et al., 2004)

จากรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงอิทธิพลของธาตุผสมโมลิบดีนัม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติม ลงไปในเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์แผ่น พบว่ากราฟ CCT (Continuous Cooling Transformation Diagrams) ในช่วงบริเวณของการเกิดเฟิร์ลไลต์ได้เลื่อนออกไปทางด้านขวามือ ดังนั้นโมลิบดีนัม ที่เติมลงไปจะช่วยยับยั้งการเปลี่ยนเฟสเป็นโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ การเติมธาตุผสมนี้ไม่ได้ส่งผล กระทบต่อบริเวณการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเฟอร์ไรต์ตามที่แสดงในแผนภาพ CCT แต่อาจมีผลให้ หน่วงเวลาการเปลี่ยนเฟสในปฏิกิริยาช่วงที่ 1 หรือมีการแยกตัวของธาตุผสมรองตามบริเวณ ขอบเกรนของออสเทนไนต์ ทำให้สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟอร์ไรต์ในออสเทนไนต์เหลือค้าง (α_p/γ) ลดลงเล็กน้อย

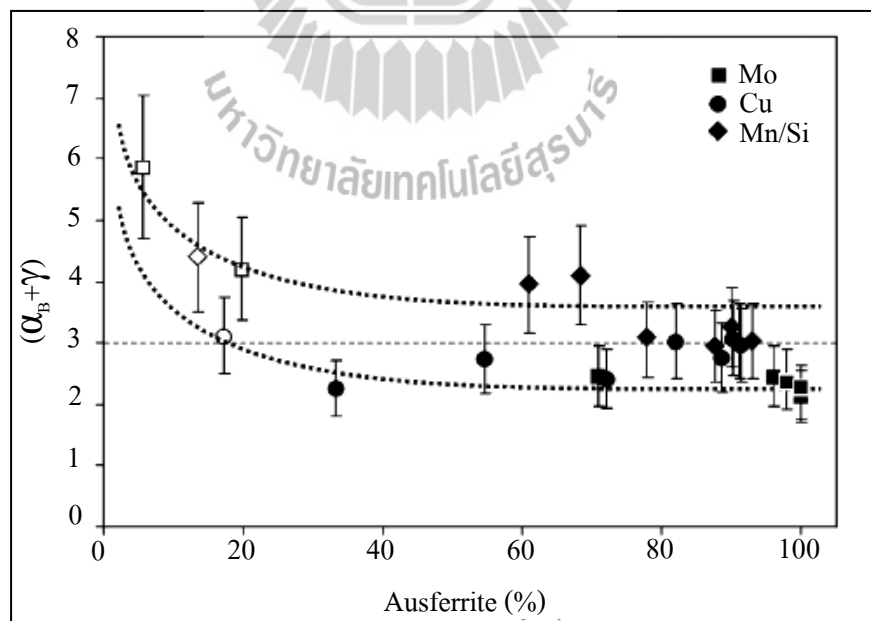


รูปที่ 2.8 แผนภาพ CCT แสดงอิทธิพลของธาตุผสม โมลิบดินัม (Mo)
(Ferry and Xu, 2004)

อัตราส่วนระหว่าง α_B/γ ดังกล่าวจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อธาตุผสมที่เติมลงไปเพิ่มขึ้นเป็นเส้นแนวโน้มดังแสดงในรูปที่ 2.9 จุดข้อมูลที่แรกเงาคือตัวอย่างชิ้นงานที่พบปริมาณออสเฟอไรต์จำนวนมากในโครงสร้างจุลภาคและมีสัดส่วนโดยปริมาตรมากกว่า 0.1 ($V_f > 0.1$) ส่วนจุดข้อมูลที่ไม่แรกเงาจะแสดงถึงตัวอย่างชิ้นงานที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของออสเฟอไรต์ต่ำความน่าเชื่อถือจึงน้อยและเป็นข้อจำกัด เนื่องจากเมื่อเติมธาตุผสมน้อยและให้อัตราการเย็นตัวในอากาศทำให้ใกล้จะผ่านช่วงการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอไรต์ไลต์ในแผนภาพ CCT จึงได้ออสเฟอไรต์น้อย ซึ่งสำหรับชุดข้อมูลที่น่าเสนอนี้จะพบว่าอัตราส่วนระหว่าง α_B/γ นั้นจะอยู่ในช่วง 2-4 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 และยังแสดงถึงอิทธิพลของธาตุผสมรอง เช่น โมลิบดินัม ทองแดง และแมงกานีสกับซิลิคอน ที่มีผลต่ออัตราส่วนระหว่าง α_B/γ ส่วนในรูปที่ 2.10 แสดงถึงอัตราส่วนระหว่าง α_B/γ ที่เทียบกับปริมาณของออสเฟอไรต์ จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีปริมาณออสเฟอไรต์ 10-40 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วน α_B/γ ลดลงจนเข้าสู่ค่าที่อยู่ในช่วง 2-3 เมื่อปริมาณออสเฟอไรต์เพิ่มขึ้นสูงกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนระหว่าง α_B/γ ยังคงเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 2-3 (Ferry and Xu, 2004)

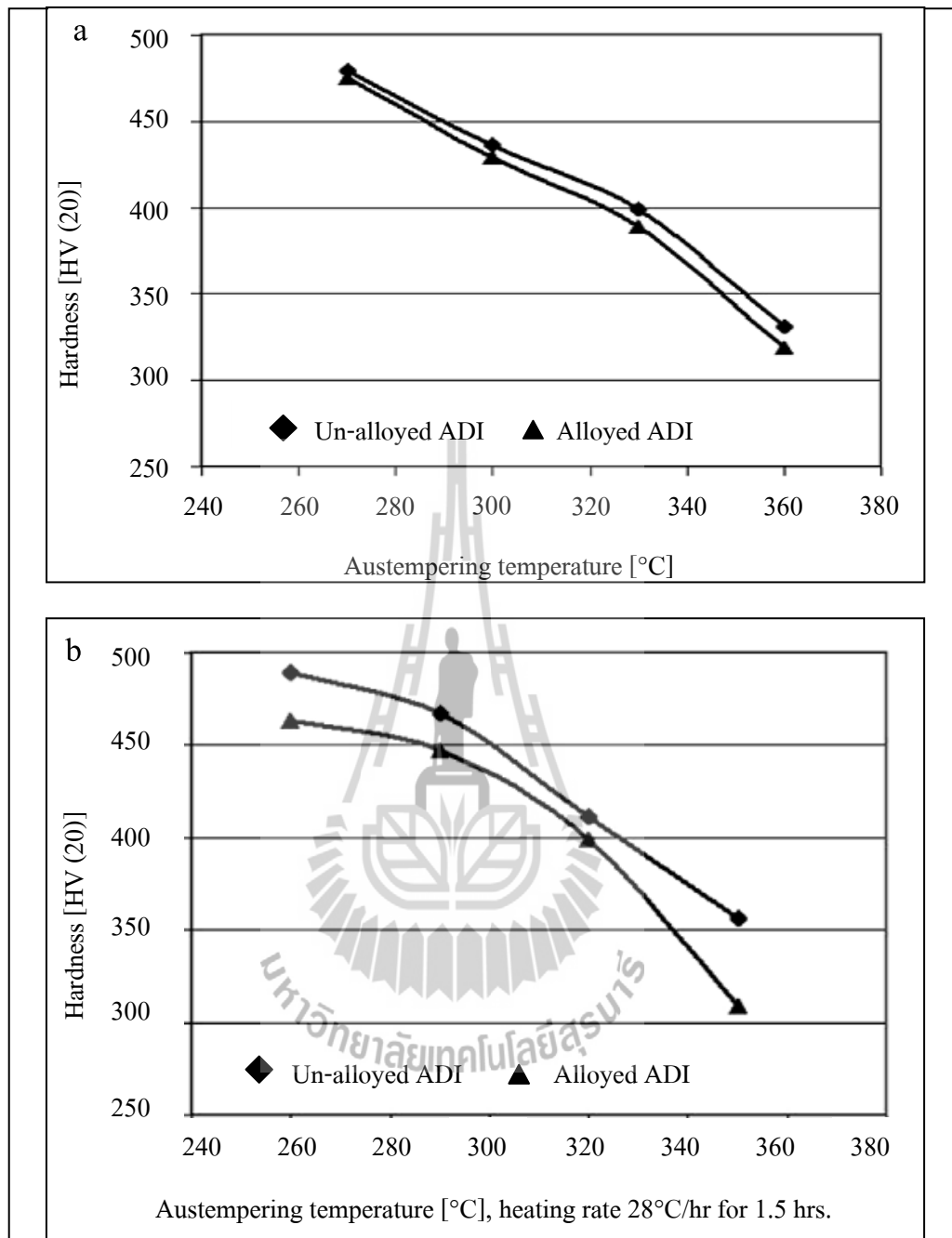


รูปที่ 2.9 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่ออัตราส่วนระหว่างเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ในโครงสร้างออสเฟอร์ไรต์ (Ferry and Xu, 2004)

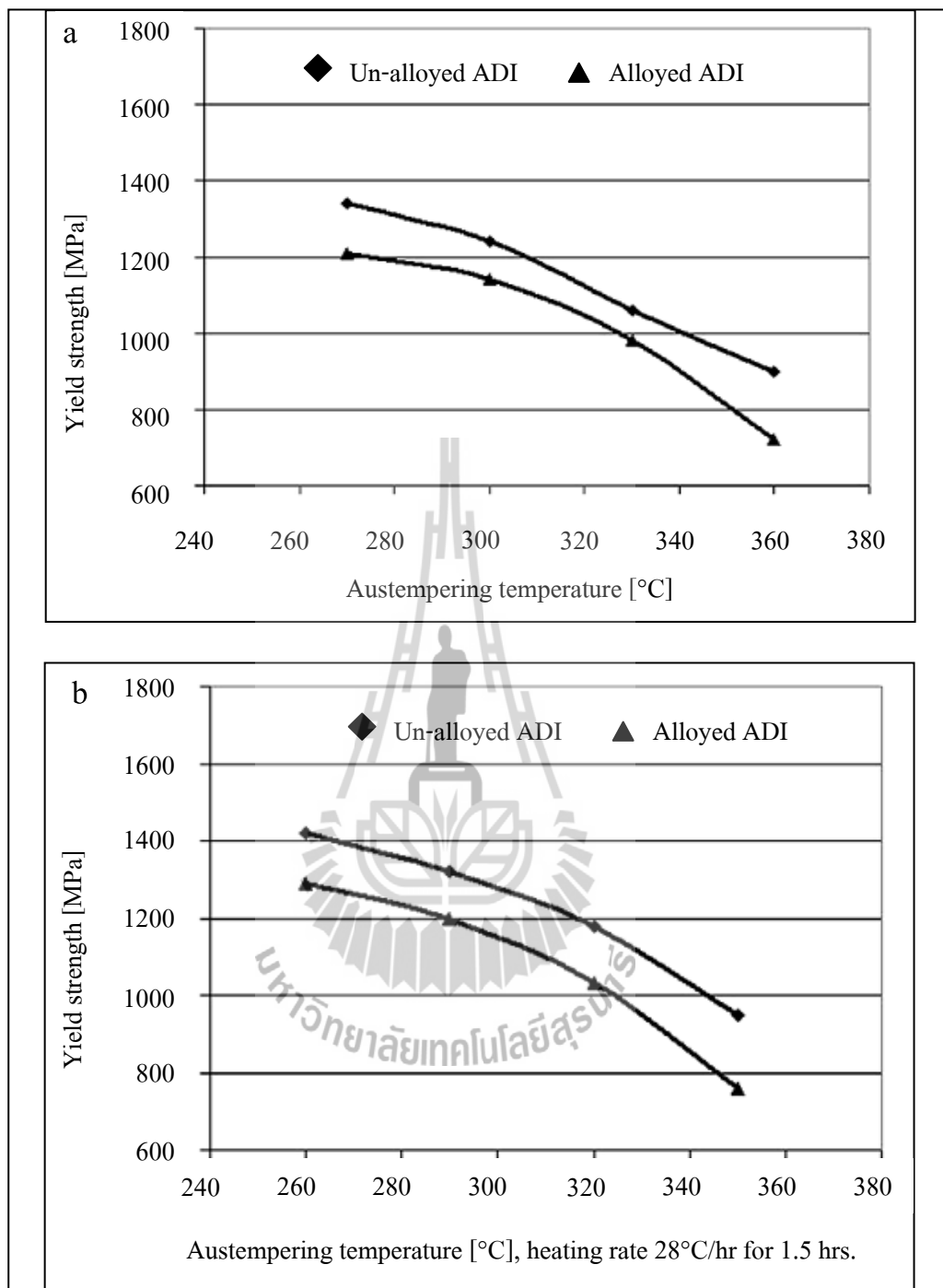


รูปที่ 2.10 อัตราส่วนระหว่างเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ที่เทียบกับปริมาณของออสเฟอร์ไรต์ (Ferry and Xu, 2004)

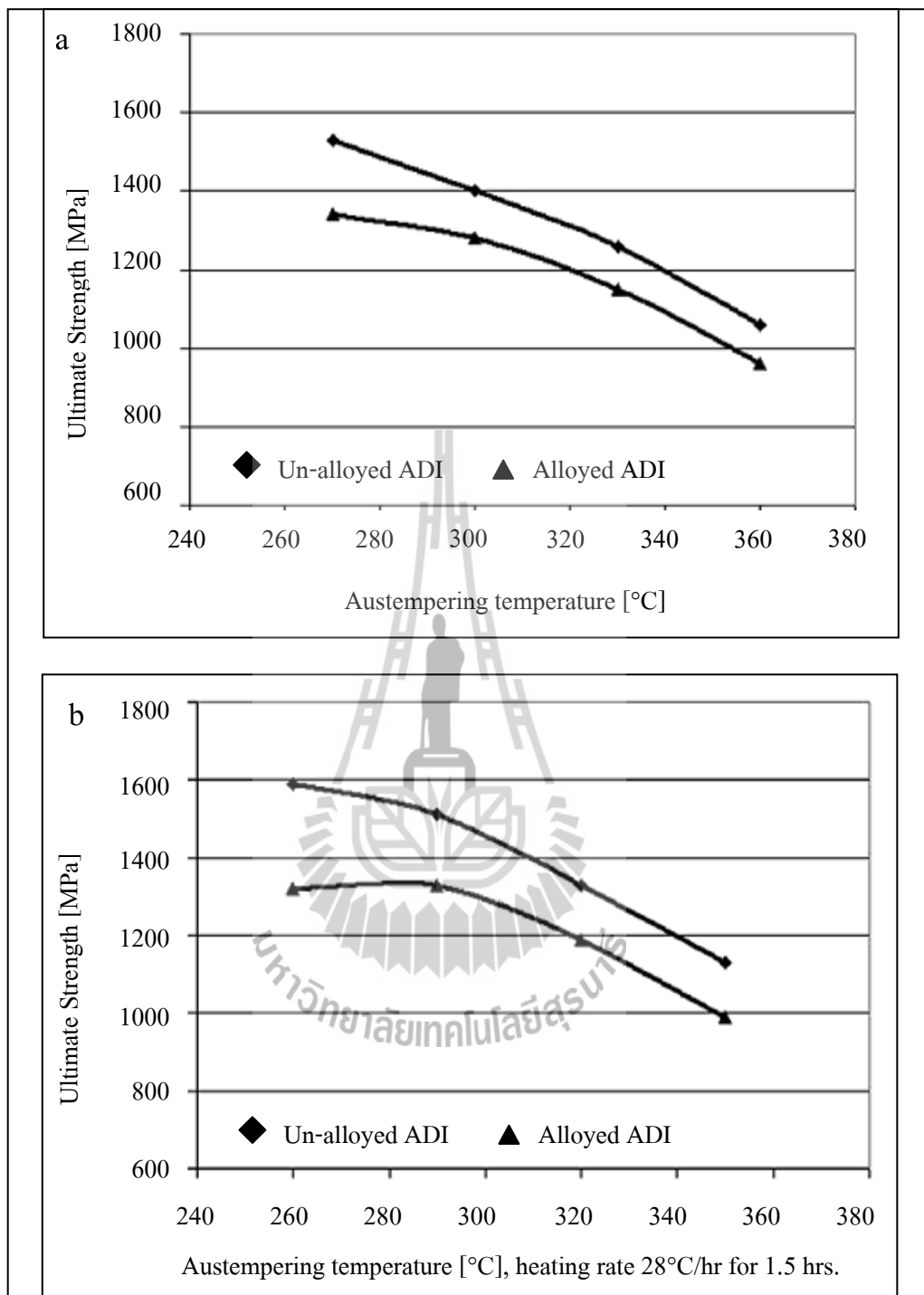
กรณีที่ชิ้นงานมีความหนาเกิน 1 นิ้ว ชาติุนิกเกิล โมลิบดีนัม และทองแดงจัดเป็นธาตุที่เติมเข้าไปมีส่วนช่วยยับยั้งการเกิดโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ในขณะที่ชุบออสเทมเปอร์ริง ส่วนธาตุแมงกานีสที่เติมในปริมาณสูงก็เพื่อช่วยเลื่อนเส้นอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดมาร์เทนไซต์ให้ต่ำลง ซึ่ง (Elsayed, Megahed, Sadek, and Abouelela, 2009) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น โดยนำเหล็กหล่อเหนียวเกรดไฟต์กลมที่มีธาตุผสมนิกเกิลและโมลิบดีนัมกับเหล็กหล่อเหนียวเกรดไฟต์กลมไม่มีธาตุผสมมาอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นชุบลงในอ่างเกลือที่อุณหภูมิ 270 300 330 และ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงสำหรับการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว ส่วนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นได้นำไปชุบลงในอ่างเกลือที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 260 290 320 และ 350 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 302 332 362 และ 392 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง (อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ คือ 28 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง) แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ภายหลังจากทดสอบพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่มีธาตุผสมนิกเกิล 1.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกที่ดีขึ้น แต่มีผลให้ค่าความแข็งค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.11-2.13 โดยกระบวนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นให้แนวโน้มค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว เนื่องจากกรณีการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นมีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำกว่าจึงทำได้โครงสร้างออสเฟอไรต์ที่ละเอียด สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกที่สูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงก็สูงขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 อาจเป็นผลมาจากสัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์เหลือค้างเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เนื่องจากธาตุนิกเกิลที่เติมลงไป 1.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องมากขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ดังนั้นเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ริงจึงมีค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดต่ำลง แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงขึ้น ผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผสมนิกเกิล 1.57 เปอร์เซ็นต์ มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่มีธาตุผสมหรืออาจกล่าวได้ว่าธาตุนิกเกิลไม่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ให้ดีขึ้น



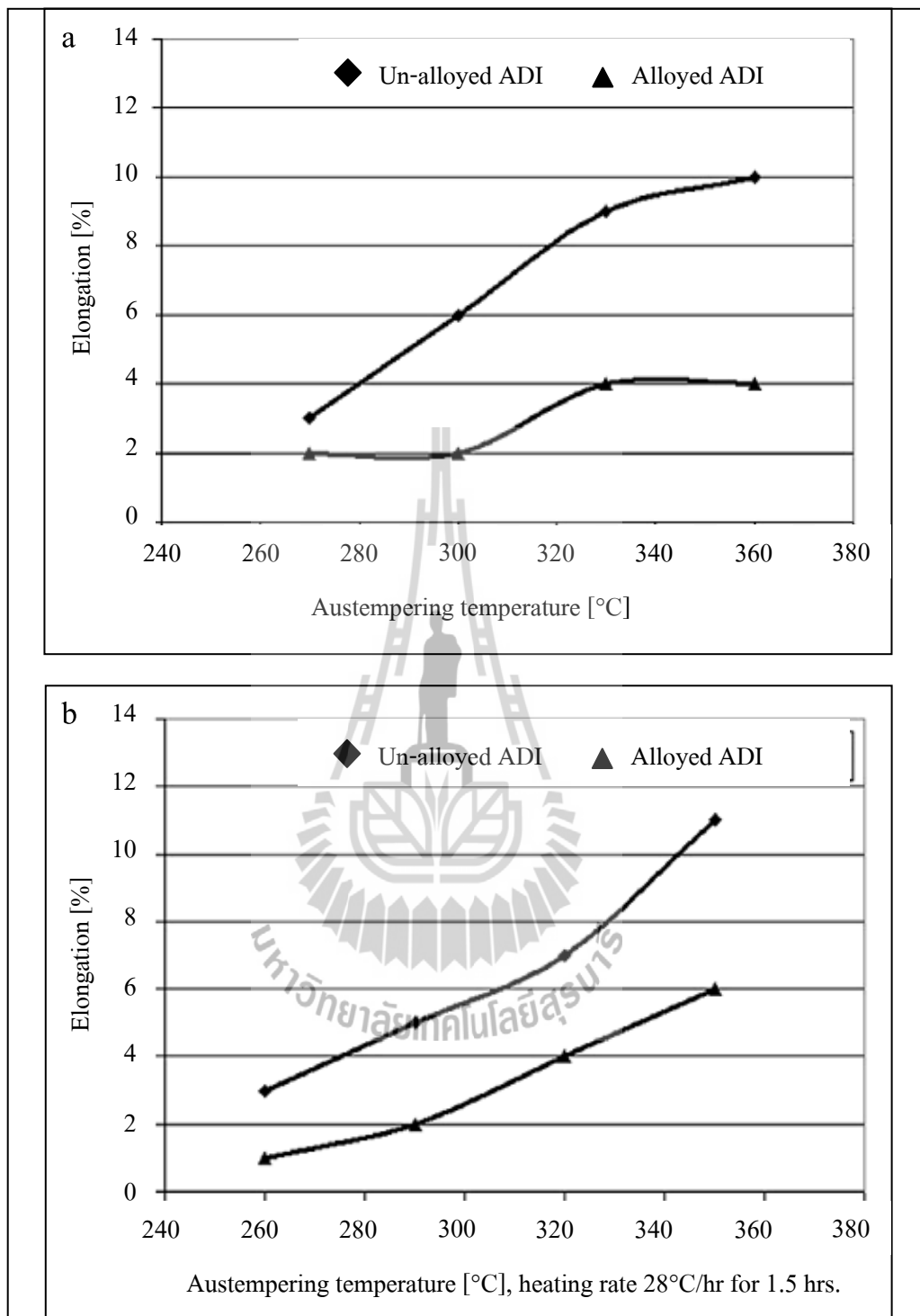
รูปที่ 2.11 ค่าความแข็งเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น (Elsayed et al., 2009)



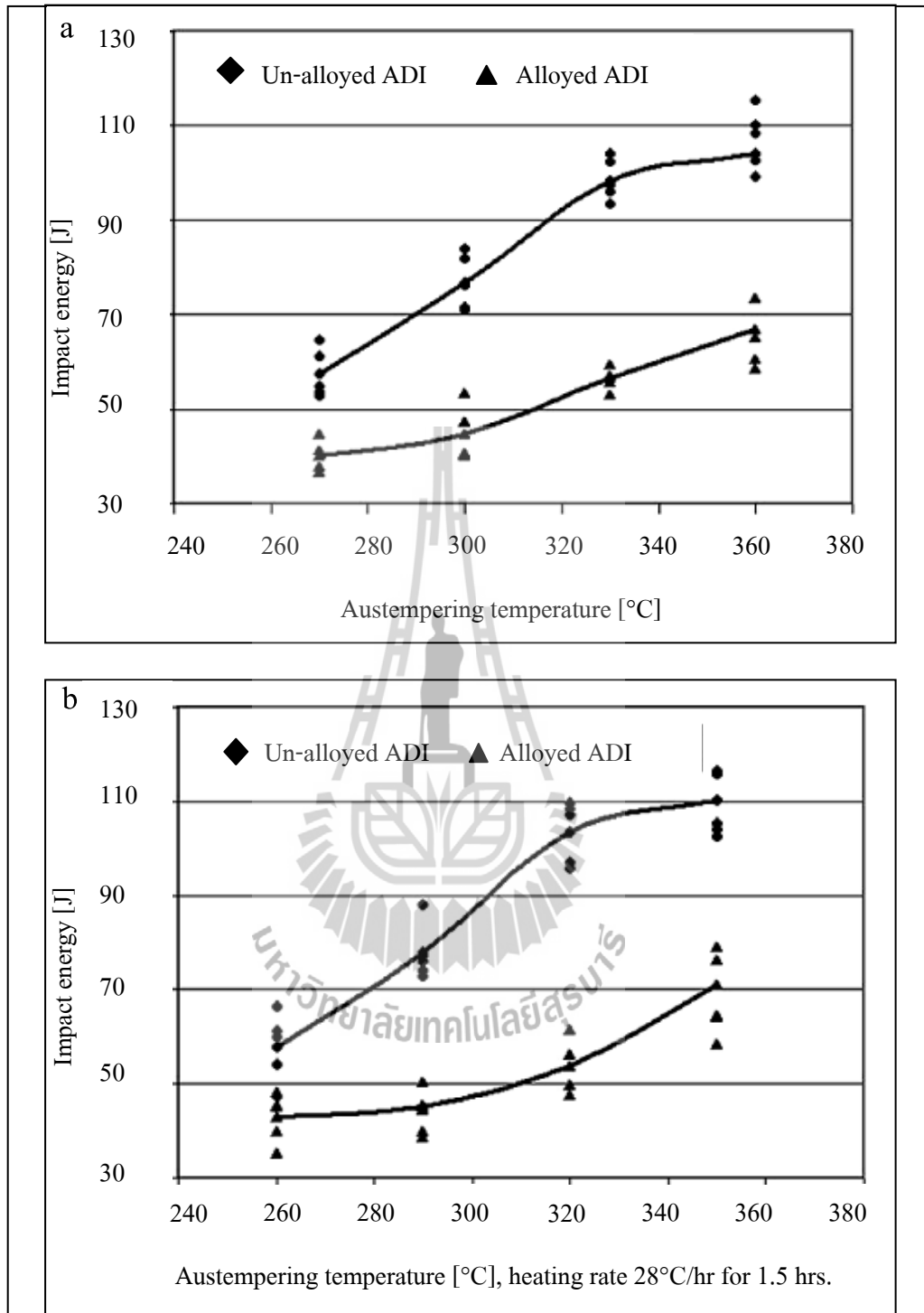
รูปที่ 2.12 ค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบขึ้นเดียวและสองชั้น (Elsayed et al., 2009)



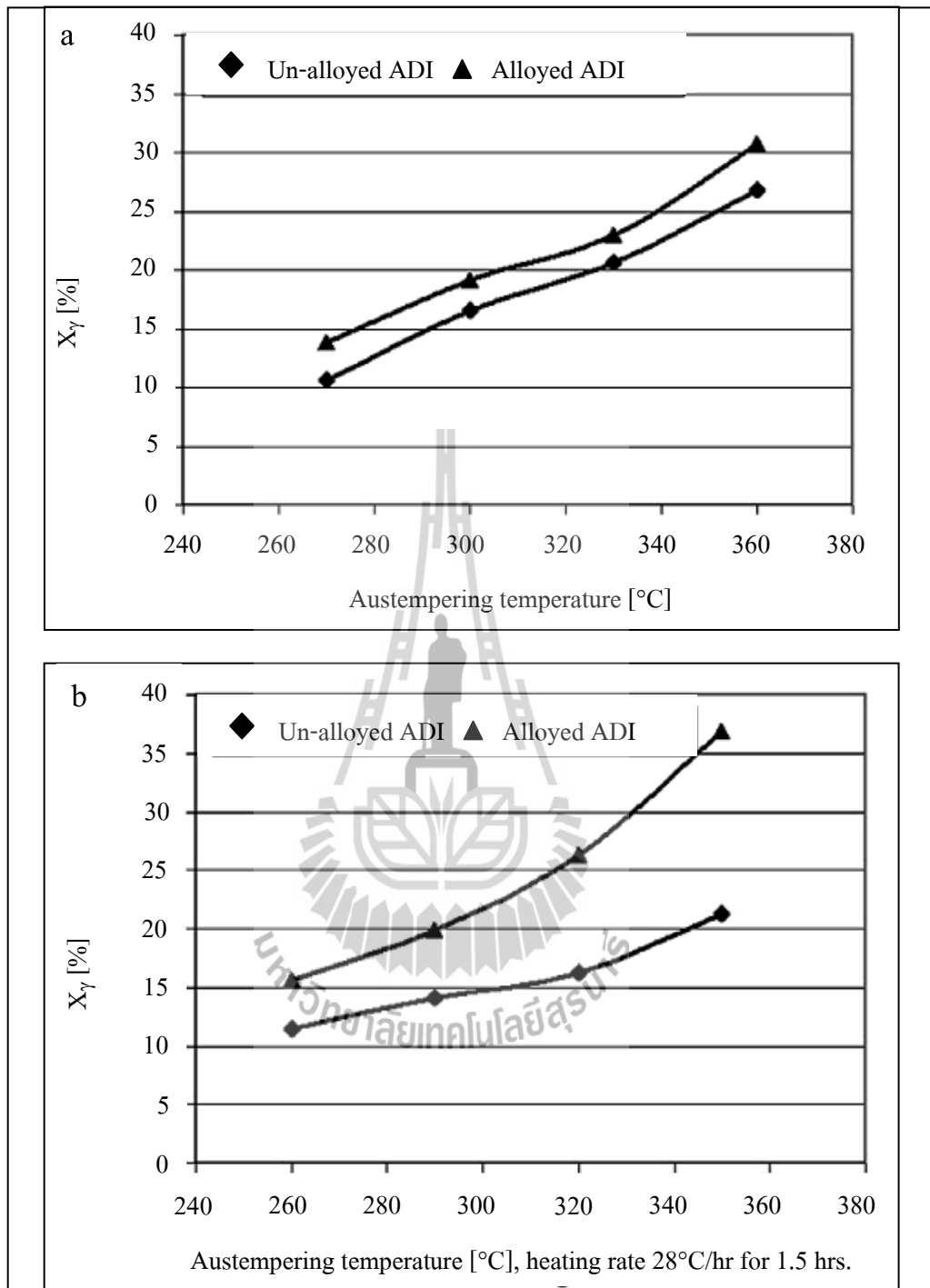
รูปที่ 2.13 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น (Elsayed et al., 2009)



รูปที่ 2.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของ เหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น (Elsayed et al., 2009)



รูปที่ 2.15 ค่าพลังงานการดูดซับแรงกระแทกเทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น (Elsayed et al., 2009)



รูปที่ 2.16 สัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์เทียบกับอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีธาตุผสมและมีธาตุผสม 1.57%Ni ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น (Elsayed et al., 2009)

(Shelton and A.A.Bonner, 2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของธาตุทองแดงที่มีต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile testing) และการดัดงอ (Bending testing) โดยศึกษาเหล็กหล่อเหนียวที่มีธาตุผสมทองแดง 0.8 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วศึกษาโครงสร้างจุลภาคเพื่อสังเกตการกระจายของธาตุทองแดงพบว่าไม่เกิดการตกผลึกรอบ ๆ ผิวของแกรไฟต์ แต่ธาตุทองแดงส่งผลให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีค่าความแข็งและคุณสมบัติเชิงกลทางด้านแรงดึงต่ำลง ซึ่งอิทธิพลของธาตุทองแดงที่มีผลต่อเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทางด้านความแข็งและสมบัติเชิงกลสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Amran et al., 2010) โดยได้สรุปผลไว้ว่าธาตุทองแดงช่วยให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีส่วนของออสเทนไนต์มากขึ้นภายหลังจากการชุบออสเทมเปอร์ จึงทำให้ค่าความแข็งและสมบัติเชิงกลที่ได้ต่ำลง

จากงานวิจัยของ (Kitkamthorn and Diewwanit, 2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดง 0.75 และ 1.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 300 และ 340 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60-6000 วินาที พบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่มีเวลาการชุบออสเทมเปอร์นาน 60 วินาที โครงสร้างพื้นฐานที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเฟสมาร์เทนไซต์และมีเฟอร์ไรต์รูปเข็มเกิดขึ้นเล็กน้อยตามบริเวณแกรไฟต์กลม เมื่อเวลาในการชุบออสเทมเปอร์นานขึ้นเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งสองส่วนผสมมีปริมาณเฟอร์ไรต์รูปเข็มและออสเทนไนต์เหลือค้างเพิ่มขึ้น ซึ่งการชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิสูงยังมีผลให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีเฟอร์ไรต์รูปเข็มที่หยาบด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าที่เวลาในการชุบออสเทมเปอร์เป็นเวลา 360 วินาที โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดง 1.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณเฟอร์ไรต์รูปเข็มน้อยและมีลักษณะหยาบกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดง 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างเห็นได้ชัดและเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดง 1.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6000 วินาที ยังคงมีเฟสออสเทนไนต์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเหลืออยู่ในโครงสร้างจุลภาค ซึ่ง (Kitkamthorn and Diewwanit, 2009) ได้ให้เหตุผลว่าเป็นอิทธิพลของธาตุทองแดงที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาในช่วงที่ 1 เกิดได้ช้าลงตามปริมาณของธาตุทองแดงที่ผสมมากขึ้นในเหล็กหล่อเหนียว จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งสองส่วนผสม พบว่าการชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิต่ำทำให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าการชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิต่ำทำให้ได้ลักษณะเฟอร์ไรต์รูปเข็มที่เล็กละเอียดกว่า

2.4 การเกิดนิวเคลียสและการโตต่อของเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นระหว่างการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น

จากปฏิกิริยาช่วงที่ 1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์ จัดเป็นกระบวนการประเภทการเกิดนิวเคลียสและการโตต่อ (nucleation & growth process) โดยการเกิดนิวเคลียสขึ้นกับอันเดอร์คูลลิ่ง (undercooling) และการโตต่อจะขึ้นความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนออกจากเฟอร์ไรต์ไปยังออสเทนไนต์ที่บริเวณด้านข้าง (Putatunda, 2001); (Yang and Putatunda, 2004) ดังนั้นหากต้องการให้เฟอร์ไรต์มีความละเอียดและออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนสูงจึงต้องให้อันเดอร์คูลลิ่งมาก เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรต์ แล้วเพิ่มอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงให้สูงขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนออกจากเฟสเฟอร์ไรต์ไปยังออสเทนไนต์ วิธีการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นสามารถทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะดังกล่าวได้ เนื่องจากภายหลังจากการอบออสเทนไนท์ซึ่งก็จะชุบออสเทมเปอร์ริงลงในอ่างเกลือหลอมเหลวเพื่อให้อันเดอร์คูลลิ่งมากที่เวลาไว้สักครู่เพื่อให้เกิดนิวเคลียสกระจายไปทั่ว จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิในอ่างเกลือให้สูงขึ้นเพื่อส่งเสริมให้เกิดการแพร่ของคาร์บอนออกจากเฟอร์ไรต์ที่มีคาร์บอนอิ่มตัวไปยังออสเทนไนต์ ซึ่งส่งผลให้ออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นและเฟอร์ไรต์สามารถโตต่อไปได้ (Putatunda, 2001); (Yang and Putatunda, 2004); (Esayed et al., 2009)

2.4.1 การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยกระบวนการเกิดนิวเคลียสและการโตต่อ ในสถานะของแข็งในออสเฟอร์ไรต์ (Nucleation and Growth Transformation of ferrite)

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นแล้วว่าการเกิดเฟสเฟอร์ไรต์รูปเข็มนั้นอยู่ในปฏิกิริยาช่วงที่ 1 ของการชุบออสเทมเปอร์ริง ซึ่งจัดได้ว่าเป็นการเปลี่ยนเฟสที่อาศัยการเกิดนิวเคลียสและการโตต่อ โดยการทำให้เกิดอันเดอร์คูลลิ่งมากเพื่อส่งเสริมการเกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรต์รูปเข็ม ซึ่งในทฤษฎีเบื้องต้นได้สมมุติให้ส่วนผสมทางเคมีของนิวเคลียสคงที่และต่างกันในเรื่องของขนาดเท่านั้น (Borg and Dienes, 1992) เมื่อภายหลังจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอ่างเกลือหลอมเหลวจะเกิดนิวเคลียสเฟอร์ไรต์รูปเข็มในสภาวะกึ่งสมดุล และเนื่องจากพลังงานในการสร้างพื้นผิวในช่วงเริ่มต้นมีขนาดใหญ่กว่าพลังงานที่ลดลงจากการเกิดเฟสใหม่ทำให้พลังงานอิสระสุทธิของการเกิดนิวเคลียสมีค่ามากกว่าศูนย์ พลังงานอิสระรัศมี r ของนิวเคลียสที่สมมุติให้เป็นทรงกลม คือ

$$\Delta G = -V\Delta G_v + A\gamma + V\Delta G_s \quad (2.1)$$

จะได้ว่า

$$\Delta G_{\text{hom}} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma_{\alpha/\gamma} + \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_s \quad (2.2)$$

หากการเกิดนิวเคลียสเป็นการเกิดของแข็งในของแข็ง แล้วมีพลังงานความเครียดก่อกับการเกิดนิวเคลียส ดังนั้น

$$\Delta G_{\text{hom}} = -\frac{4}{3}\pi r^3 (\Delta G_v - \Delta G_s) + 4\pi r^2 \gamma_{\alpha/\gamma} \quad (2.3)$$

เมื่อ	ΔG	คือ	พลังงานอิสระรวม (total free energy)
	ΔG_v	คือ	พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (surface free energy)
	ΔG_s	คือ	พลังงานความเครียด (elastic strain energy)
	A	คือ	พื้นที่บริเวณรอยต่อ (area of interface)
	V	คือ	ปริมาตรของนิวเคลียส (volume of nucleus)
	$\gamma_{\alpha/\gamma}$	คือ	พลังงานอิสระที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟอไรต์กับออสเทนไนต์ (the interfacial free energy)
	ΔT	คือ	อันเดอร์คูลดิ่ง
	T_0	คือ	อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส
	r	คือ	ขนาดรัศมีของนิวเคลียส

จากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงผลของพลังงานความเครียดที่ส่งผลต่อพลังงานกระตุ้นระหว่างการเปลี่ยนเฟส ($\Delta G_v - \Delta G_s$) ซึ่ง ΔG_s จะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้เกิดการเปลี่ยนเฟสได้ง่าย โดยปกติแล้วพจน์ของพื้นผิวจะเป็นค่าบวก แต่ ΔG_v จะมีค่าติดลบมากขึ้นตามอุณหภูมิลดลง เมื่อให้อุณหภูมิคงที่แล้ว $V\Delta G_v$ และ $A\gamma$ เปลี่ยนแปลงตามรัศมี r โดย $V\Delta G_v$ ลดลงอย่างรวดเร็วตามรัศมี r ที่เพิ่มขึ้น (Borg and Dienes, 1992) ดังนั้นสามารถหารัศมีวิกฤต r^* ได้จากการหาจุดที่พลังงานอิสระสูงสุดและสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{d\Delta G_{\text{hom}}}{dr} = -\frac{4}{3}\pi r^3 (\Delta G_v - \Delta G_s) + 4\pi r^2 \gamma_{\alpha/\gamma} = 0 \quad (2.4)$$

$$r^* = \frac{2\gamma_{\alpha/\gamma}}{\Delta G_v - \Delta G_s} \quad (2.5)$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi r_{\alpha/\gamma}^3}{3(\Delta G_v - \Delta G_s)^2} \quad (2.6)$$

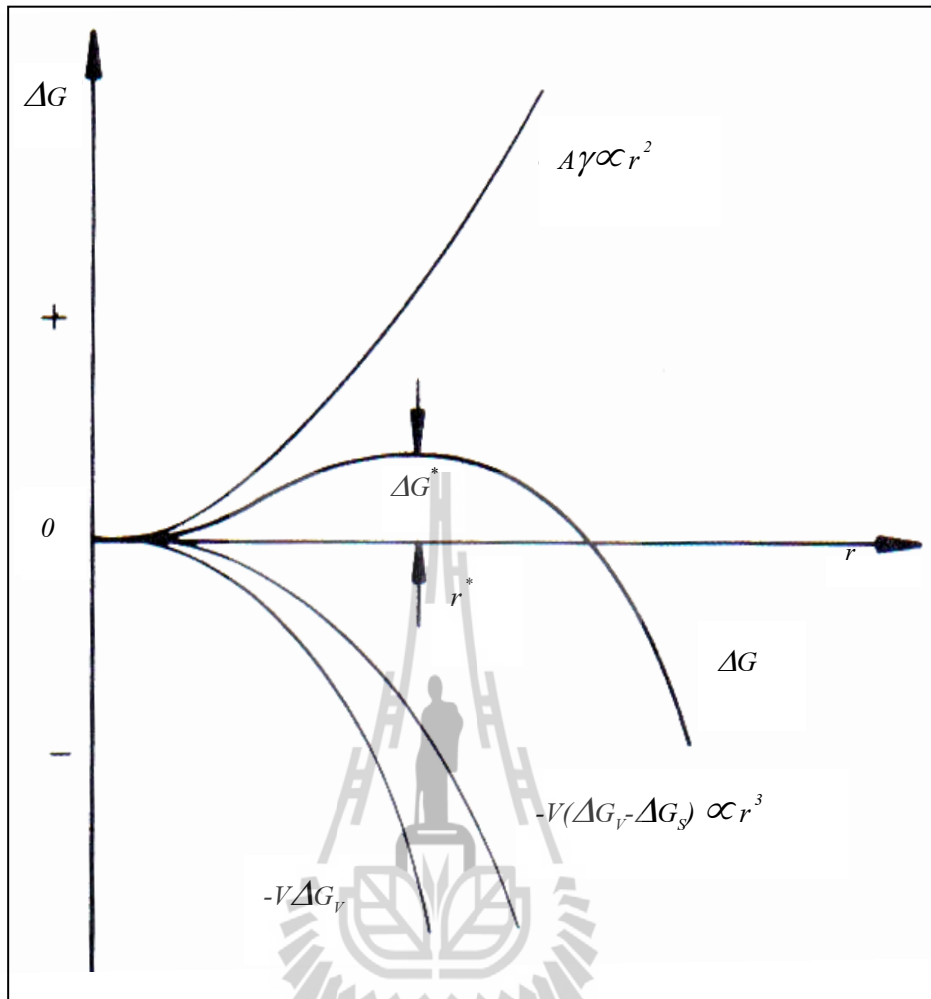
ถ้า $\Delta G_v \approx \Delta G_s \rightarrow r^*$ เข้าสู่ค่าอนันต์ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส โดยค่า ΔG_v หาได้จาก

$$\Delta G_v = \frac{(L_v \Delta T)}{T_0} \quad (2.7)$$

แทนค่า $\Delta G_v = \frac{L_v \Delta T}{T_0} = \Delta G_s$ จะได้

$$\Delta T = \frac{\Delta G_s T_0}{L_v} \quad (2.8)$$

โดยที่ L_v คือ ความร้อนแฝงของการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสต่อปริมาตร จะเห็นได้ว่าค่าอันเดอร์คูลิ่งน้อยสุดที่ต้องการเพื่อการเปลี่ยนเฟสในสภาวะของแข็งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8)



รูปที่ 2.17 ค่าพลังงานอิสระและรัศมีวิกฤต (Porter and Easterling, 1992)

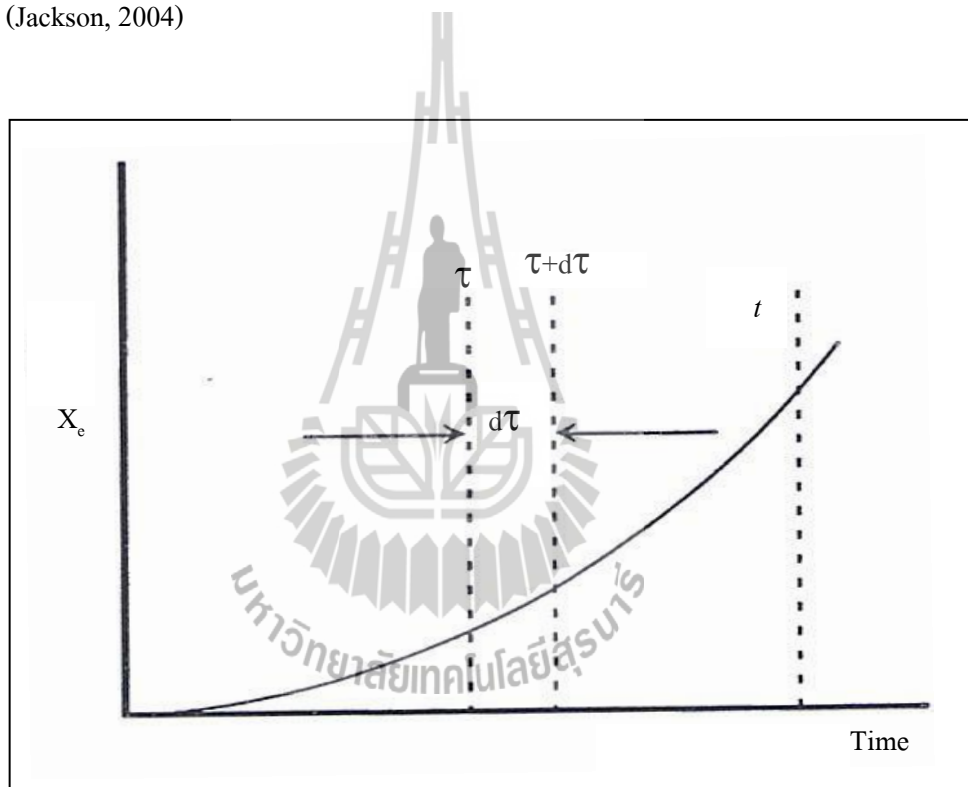
จาก (2.5) และ (2.6) การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระรวมซึ่งลดลงเมื่อ $r > r^*$ ดังนั้น นิวเคลียสเฟอร์ไรต์จะโตต่อไปได้ก็ต่อเมื่อ $r > r^*$ ส่วนอัตราการเกิดนิวเคลียสต่อปริมาตร คือ

$$I = N_0 v \exp\left(\frac{\Delta G_f + Q}{kT}\right) \quad (2.9)$$

โดยที่ I คือ อัตราการเกิดนิวเคลียสต่อปริมาตร
 N_0 คือ ความหนาแน่นของตำแหน่งที่เกิดนิวเคลียส
 (density of nucleation sites)

- ν คือ ความถี่ในการพยายาม (the attempt frequency)
โดยที่ $\nu = kT/h$
- k คือ Boltzmann constant
- h คือ Plank's constant
- Q คือ พลังงานกระตุ้น
- ΔG_f คือ พลังงานอิสระของนิวเคลียส

ภายหลังจากการเกิดนิวเคลียสที่มีขนาดรัศมีมากกว่ารัศมีวิกฤติ ($r > r^*$) การโตต่อของนิวเคลียสสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของ Johnson-Mehl-Avrami (Borg and Dienes, 1992); (Jackson, 2004)



รูปที่ 2.18 สัดส่วนโดยปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Jackson, 2004)

จากรูปที่ 2.18 (Jackson, 2004) ได้อธิบายไว้โดยกำหนดให้ X_c คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสใหม่ dX_c คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสใหม่ที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลานาน $d\tau$

สมมติให้ I คือ อัตราการเกิดนิวเคลียส ณ เวลา t และ r คือ ขนาดรัศมีของอนุภาค ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเทียบกับเวลาด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ ν จะได้ว่า

$$r = (t - \tau)V \quad (2.10)$$

และ

$$dX_e = \frac{4}{3}\pi[(t - \tau)V]^3 Id\tau \quad (2.11)$$

จากนั้นอินทิเกรตทั้งสองข้างจะได้

$$X_e = \frac{4}{3}\pi V^3 I \int_0^t (t - \tau)^3 d\tau \quad (2.12)$$

$$X_e = \frac{\pi}{3} V^3 I t^4 \quad (2.13)$$

สมการ (2.13) นี้ใช้ประมาณสัดส่วนโดยปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟสซึ่งยังไม่ได้หักส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสไปแล้วออกไป นิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่ย่อมไม่สามารถเกิดซ้อนทับกับส่วนที่เปลี่ยนเฟสไปแล้วได้ ดังนั้นสัดส่วนโดยปริมาตรของการเปลี่ยนเฟส หาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงดังนี้ (Jackson, 2004)

$$dX = (1 - X) dX_e \quad (2.14)$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง

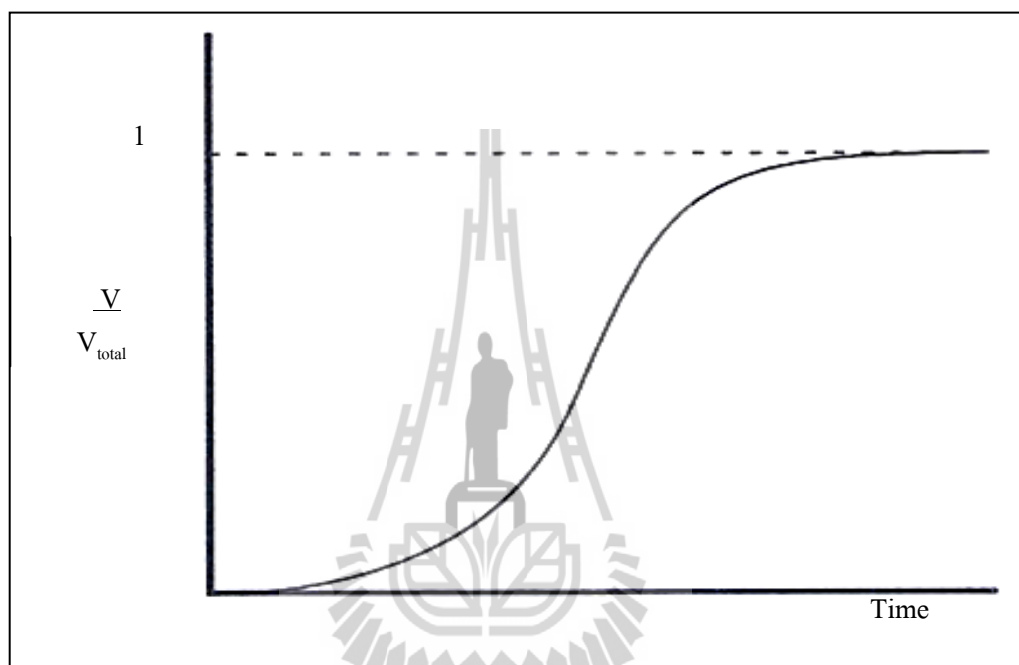
$$X = 1 - \exp(-X_e) \quad (2.15)$$

แทน $X_e = \frac{\pi}{3} V^3 I t^4$ ในสมการ (2.14) ดังนั้น จะได้ว่า

$$X_e = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{3} V^3 I t^4\right) \quad (2.16)$$

โดย X คือ สัดส่วนโดยปริมาตรที่เปลี่ยนไปเมื่อคำนึงถึงเฉพาะส่วน
ที่เปลี่ยนเฟสได้

จากสมการ (2.16) เป็นสมการที่ดัดแปลงจากสมการ (2.13) เมื่อนิวเคลียสถูกรบกวนจากนิวเคลียสตัวอื่น เช่น การโตมาชนกัน เป็นต้น ส่วนที่เวลานาน ๆ จนเข้าสู่ช่วงระยะ
อนันต์จะทำให้สัดส่วนโดยปริมาตรถูกเปลี่ยนแปลงจนมีค่า $x = 1$ ดังรูปที่ 2.19 (Jackson, 2004)



รูปที่ 2.19 สัดส่วนโดยปริมาตรถูกเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา (Jackson, 2004)

จากสมการ (2.16) คือ Johnson-Mehl-Avrami equation สำหรับการโตต่อ
โดยสามารถเขียนเป็นรูปสมการทั่วไปได้เป็น (Borg and Dienes, 1992); (Jackson, 2004)

$$X = 1 - \exp(-kt^n) \quad (2.17)$$

เมื่อ n คือ เลขชี้กำลังโดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1-4 ซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิแต่
ขึ้นกับรูปแบบของการโตต่อ ส่วน k นั้นขึ้นกับการเกิดนิวเคลียสและอัตราการโตต่อซึ่งไวต่อ
อุณหภูมิมาก

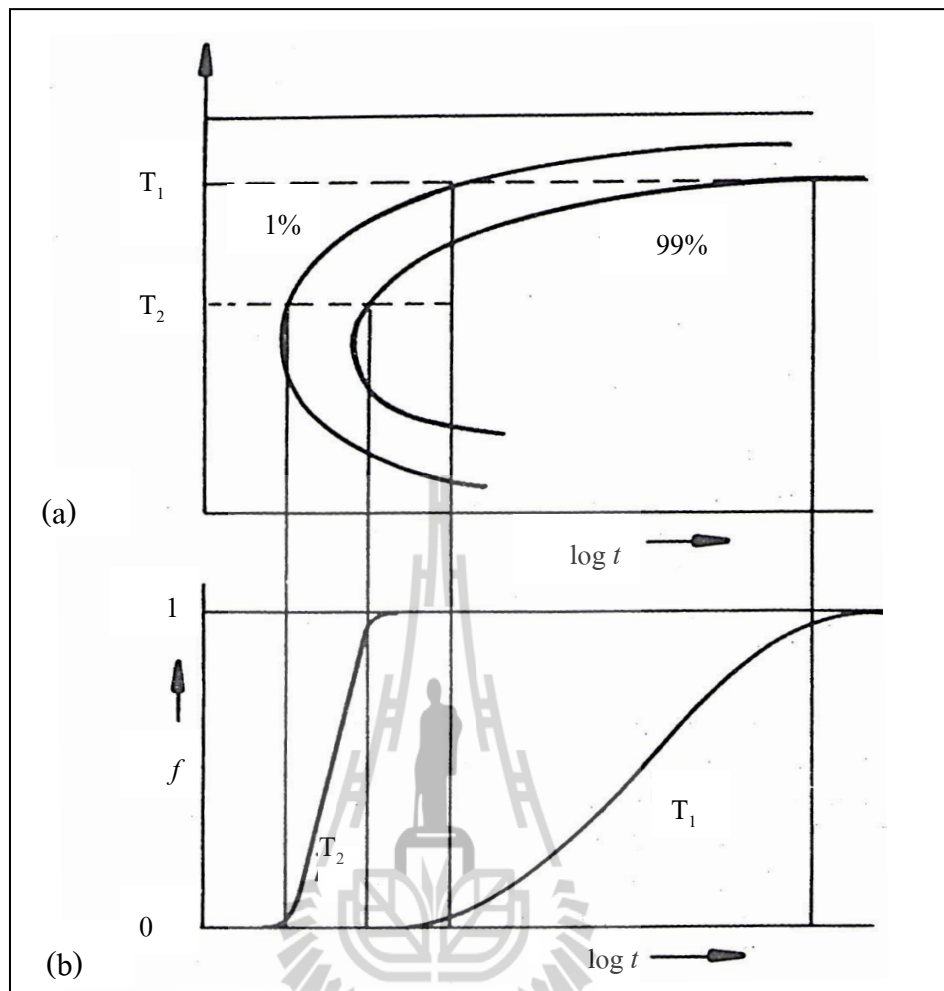
ตารางที่ 2.1 เลขชี้กำลังที่ใช้ในสมการ 2.15 โดยพิจารณาจากรูปแบบของการโตต่อ

<i>Model</i>	<i>n</i>
Diffusion – controlled growth of a fixed number of particles	3/2
Growth of a fixed number of particles limited by the interface process	3
Diffusion – controlled growth of cylinders in axial direction only	1
Diffusion – controlled growth of discs of constant thickness	2
Growth on dislocations	2/3
Nucleation at a constant rate and diffusion – controlled growth	5/2
Growth of a fixed number of eutectoid cells	3
Nucleation at a constant rate and growth of a eutectoid	4

หมายเหตุ : “The Physical Chemistry of Solids,” Borg and Dienes, 1992,

Academic Press Inc Limited, p. 525.

จากแผนภาพ TTT (Transformation Time Temperature Diagrams) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยปริมาตรของการเปลี่ยนเฟสเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ T_1 จะเกิดได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิ T_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.20(a) จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ T_1 สัดส่วนโดยปริมาตรของการเปลี่ยนเฟสค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งการเปลี่ยนเฟสเกิดได้สิ้นสุด โดยมีระยะเวลาในการเปลี่ยนเฟสนานกว่าที่อุณหภูมิ T_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.20(b) จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริงมีผลต่อการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เริ่มต้นไปเป็นออสเฟอไรต์อย่างมาก ดังนั้นหากต้องการชุบอบสเทมเปอร์ริงให้ได้โครงสร้างออสเฟอไรต์โดยที่ยังไม่เกิดเฟิร์ลไลต์หรือคาร์ไบด์ในเนื้อพื้น จึงควรเลือกอุณหภูมิและเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริงที่เหมาะสม (Porter and Easterling, 1992)



รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนเฟสเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างกัน
(Porter and Easterling, 1992)

2.4.2 การชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นเพื่อให้ได้โครงสร้างอสเฟอไรต์

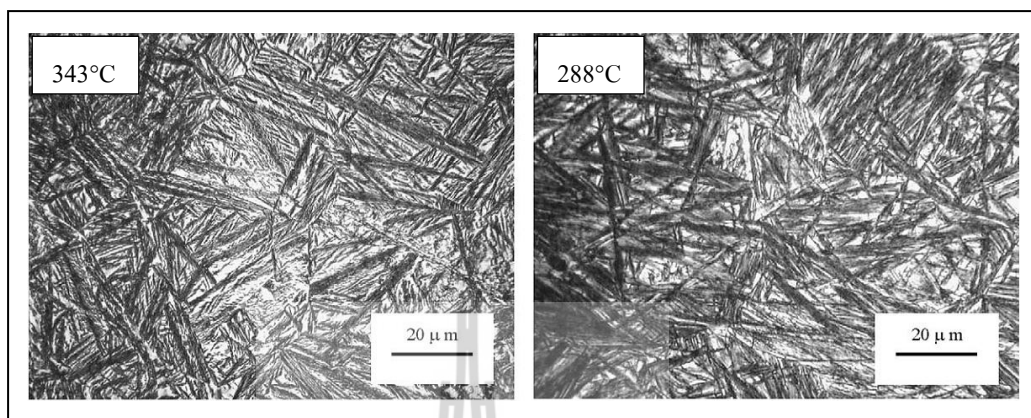
สำหรับวิธีการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 โดยการชุบอบสเทมเปอร์ริงวิธีนี้เป็นการปรับปรุงกระบวนการโดยอาศัยหลักการเกิดนิวเคลียสและการโตต่อ ซึ่งภายหลังการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นจะได้เหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่เป็นโครงสร้างอสเฟอไรต์ที่มีเฟอไรต์รูปเข็มเล็กละเอียดและมีปริมาณคาร์บอนสูง เนื่องจากเมื่อชิ้นงานถูกชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำในช่วงแรกของการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นสักครู่หนึ่ง จะส่งผลให้เกิดอันเดอร์คูลลิ่งมากและในขณะนั้นเองก็จะเกิดนิวเคลียสของเฟอไรต์จำนวนมาก ซึ่งถ้าอุณหภูมิของอ่างเกลือหลอมเหลวในช่วงแรกต่ำจะทำให้มีจำนวนนิวเคลียสของเฟอไรต์ที่มีเสถียรภาพและสามารถโตต่อได้จำนวนมาก (Ferry and Xu, 2004)

จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อช่วยให้ การแพร่ของคาร์บอนไปยังเฟสของออสเทนไนต์แพร่ได้ดี โดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวจนครบเวลาของการชุบออสเทนเปอร์ริ่ง ภายหลังจากชุบออสเทนเปอร์ริ่งแบบสองชั้นจึงทำได้โครงสร้างที่มีเฟอร์ไรต์ละเอียดและออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่ง (Putatunda, 2001); (Yang and Putatunda, 2004) ได้ทดลองชุบออสเทนเปอร์ริ่งทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้น ซึ่งแบบชั้นเดียวได้ออสเทนไนต์ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 927 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบลงในเตาเกลือที่อุณหภูมิประมาณ 260–400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอร์ริ่งที่ให้มีสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรงดึงและความเหนียวที่ดีที่สุด คือ ในปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสช่วงที่ 1 ที่ออสเทนไนต์เริ่มต้น (γ_0) เปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มกับออสเทนไนต์ที่มีคาร์บอนสูง (γ_{HC}) อย่างสมบูรณ์แต่ไม่เข้าไปในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาช่วงที่ 2 ในระหว่างการชุบออสเทนเปอร์ริ่งคือ อยู่ในช่วงการอบการชุบออสเทนเปอร์ริ่ง ซึ่งจากการศึกษาได้พบว่าสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีในเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอร์ริ่ง คือ

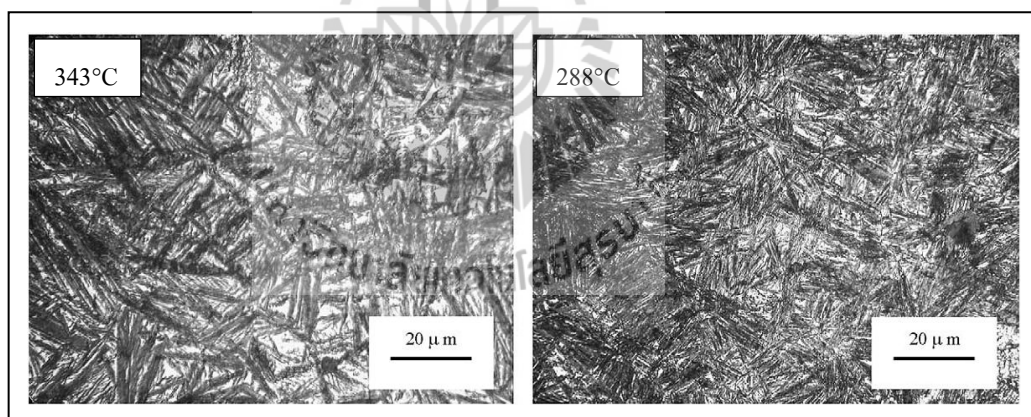
- 1) สัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์เหลือค้าง (X_γ)
- 2) ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ (C_γ)
- 3) ลักษณะของเฟอร์ไรต์รูปเข็มและออสเทนไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง

สำหรับการชุบออสเทนเปอร์ริ่งแบบสองชั้นในงานวิจัยของ (Yang and Putatunda, 2004) จะชุบที่อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากันที่ 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงเท่ากับอุณหภูมิออสเทนเปอร์ริ่ง เมื่อสังเกตที่อุณหภูมิการชุบออสเทนเปอร์ริ่งแบบชั้นเดียวและสองชั้นที่อุณหภูมิ 288 และ 343 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าลักษณะเฟอร์ไรต์รูปเข็มในโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทนเปอร์ริ่งแบบชั้นเดียว มีลักษณะเฟอร์ไรต์รูปเข็มหยาบกว่าเฟอร์ไรต์รูปเข็มของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอร์ริ่งที่ได้จากการชุบออสเทนเปอร์ริ่งแบบสองชั้น สำหรับงานวิจัยของ (Yang and Putatunda, 2004) เมื่อสังเกตที่อุณหภูมิการชุบออสเทนเปอร์ริ่งแบบชั้นเดียวและสองชั้นที่อุณหภูมิ 343 องศาเซลเซียส เฟอร์ไรต์รูปเข็มหยาบขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดจากโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทนเปอร์ริ่งแบบสองชั้นดังแสดงในรูปที่ 2.21–2.22 สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอร์ริ่งทางด้านความต้านทานแรงดึงจุดคราก (Yield Strength) นั้นขึ้นกับความละเอียดของเฟอร์ไรต์ ส่วนความแกร่งต่อการแตกหัก (Fracture Toughness) จะขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์เหลือค้าง (X_γ) และปริมาณคาร์บอนของออสเทนไนต์ (C_γ) ดังนั้นเพื่อให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอร์ริ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น มีความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวที่ดีจึงควรทำให้เฟอร์ไรต์มีขนาดเล็กละเอียดและทำให้ออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนสูง

ซึ่งการชุบอบสเทมเปอร์รีงแบบสองชั้นสามารถทำให้ได้โครงสร้างดังกล่าวได้ (Yang and Putatunda, 2004)



รูปที่ 2.21 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอบสเทมเปอร์รีงที่อุณหภูมิต่างกันเป็นเวลา 120 นาที (Yang and Putatunda, 2004)



รูปที่ 2.22 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอบสเทมเปอร์รีงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ที่เวลารวม 120 นาที (Yang and Putatunda, 2004)

สำหรับการชุบอบสเทมเปอร์รีงปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์ก็คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับการชุบอบสเทมเปอร์รีง ตามที่ (Kim, Shin, Park, and Lim, 2008) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของ

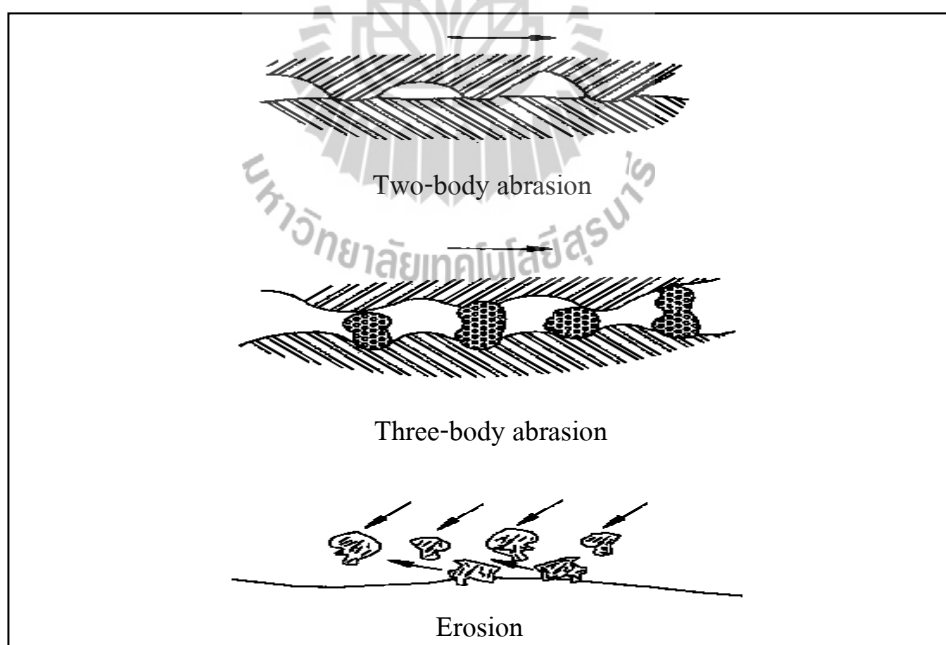
เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ โดยนำเหล็กหล่อเหนียวที่มีธาตุผสมทองแดงและ โมลิบดีนัมมาอบ ออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 910 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที แล้วชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลว ที่ช่วงอุณหภูมิ 350–410 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นได้ทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานแรงดึงสูงสุด การยืดตัว และการทนต่อแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ อุณหภูมิในการชุบออสเทมเปอร์ต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์สูงขึ้นส่งผลให้ เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีความเหนียวเพิ่มขึ้นซึ่งมีความเหนียวสูงที่สุดที่อุณหภูมิการชุบออส เทมเปอร์ที่ 410 องศาเซลเซียส ส่วนเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส นั้นให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดสำหรับการทดลองนี้และเมื่อ พิจารณาสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM พบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 390 และ 410 องศาเซลเซียส เทียบเท่ากับชั้นคุณภาพเกรด 1 ในขณะที่ เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 350 และ 370 องศาเซลเซียส เทียบเท่ากับชั้นคุณภาพเกรด 2 นอกจากนี้ ยังได้กล่าวถึงธาตุทองแดงและ โมลิบดีนัมที่เติมเข้าไป มีส่วนช่วยยับยั้งการเกิด โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไคต์ระหว่างการชุบออสเทมเปอร์

ส่วน (Eric, Sidjanin, Miskovic, Zec, and Jovanovic, 2004) ได้ศึกษาผลกระทบ ของการชุบออสเทมเปอร์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแกร่งของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ที่มีธาตุผสม โมลิบดีนัม ทองแดง นิกเกิล และ แมงกานีส ซึ่งผ่านการอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 320 และ 400 องศา เซลเซียส ณ เวลาต่างๆ กัน จากนั้นชุบลงในน้ำแข็งแห้ง ภายหลังจากทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่ชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง มีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์รูปเข็มกับคาร์ไบด์และเฟสของออสเทนไนต์ ที่มีคาร์บอนสูง ซึ่ง โครงสร้างนี้ได้เกิดการแตกหักแบบเหนียวภายหลังการทดสอบแรงกระแทก การชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานขึ้นปริมาณคาร์ไบด์ก็ยิ่ง เพิ่มขึ้นด้วยและทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะ ดังนั้นจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาจึงทำให้ทราบ เบื้องต้นว่าถ้าหากต้องการชุบออสเทมเปอร์เพื่อให้ได้โครงสร้างของออสเฟอร์ไรต์และหลีกเลี่ยง การเกิดคาร์ไบด์ ควรเลือกการชุบออสเทมเปอร์แบบสองขั้นเพราะกระบวนการนี้ได้ให้สมบัติเชิงกล ที่ดีกว่าการชุบออสเทมเปอร์แบบขั้นเดียวตามที่ได้ศึกษามาข้างต้น

2.5 ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

2.5.1 การสึกกร่อนแบบเสียดสี (Abrasion wear)

เป็นการสึกกร่อนที่เกิดจากเศษอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กมาเสียดสีบริเวณผิวของชิ้นงานซึ่งก่อให้เกิดการสึกกร่อนขึ้นกับเนื้อวัสดุ การพิจารณารูปแบบการสึกกร่อนแบบเสียดสีนั้นจะแบ่งตามลักษณะที่เนื้อวัสดุสัมผัสกันซึ่งรูปแบบการสึกกร่อนแบบเสียดสี ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยจะเห็นได้ว่าการสึกกร่อนแบบเสียดสีชนิดสองวัตถุเกิดจากการที่มีวัสดุสองชนิดมาสัมผัสกันจนเกิดการเลื่อนแล้วเกิดการสึกกร่อน ส่วนการสึกกร่อนแบบเสียดสีชนิดสามวัตถุจะมีลักษณะคล้ายกับชนิดสองวัตถุ ต่างกันที่จะมีอนุภาคแข็งมาอยู่ระหว่างวัสดุสองชนิดขณะเสียดสีกันซึ่งวัสดุที่นำมาทดสอบจะถูกอนุภาคแข็งที่อยู่ระหว่างวัสดุทั้งสองเสียดสีและสึกกร่อนในที่สุด ส่วนการสึกกร่อนแบบการสึกกร่อนจะมีอนุภาคแข็งวิ่งชนเนื้อวัสดุแล้วทำให้สึกกร่อน ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดจากการสึกกร่อนในรูปแบบนี้ เช่น ท่อลำเลียงทรายหรือสารละลาย ปิ๊ม และอุปกรณ์ฟันทราย เป็นต้น สำหรับกลไกการสึกกร่อนแบบเสียดสีโดยทั่วไปจะพิจารณาจากอนุภาคแข็งหรือเศษวัสดุแข็งที่สร้างความเสียหายให้กับชิ้นงาน โดยตรง ซึ่งมีสองชนิดหลัก ๆ คือ การเปลี่ยนรูป และการรวมกันของอนุภาคที่หลุดออกมา โดยอนุภาคหรือเศษวัสดุจะเสียดสีกับพื้นผิวสัมผัสต่อไป



รูปที่ 2.23 รูปแบบการสึกกร่อนแบบเสียดสี (“Mechanical wear prediction and prevention,” Bayer, 1994, Marcel Dekker, INC, p. 21)

2.5.2 ลักษณะของตัวขัดสี (Abrasive) ของอนุภาค

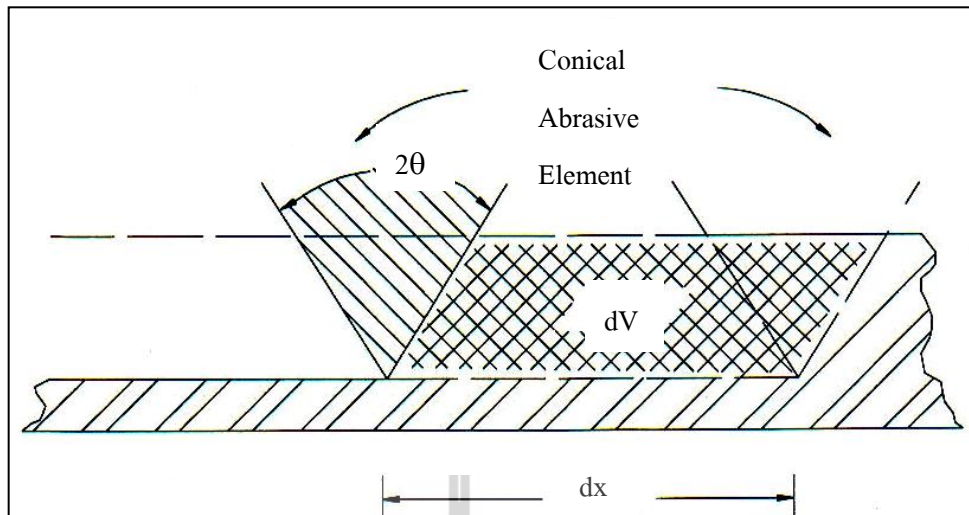
ความสามารถในการขัดสีของอนุภาคเป็นตัวชี้วัดที่จะทำให้เกิดการสึกหรอแก้วสคูที่อ่อนกว่าซึ่งขึ้นอยู่กับ

- 1) ความแข็งของอนุภาค
- 2) ความแข็งแรงหรือความทนต่อการบดอัด
- 3) สมบัติทางกลของอนุภาคในการปะทะหรือชน เช่น ความเหนียว เป็นต้น
- 4) รูปร่างและขนาดของอนุภาค
- 5) ตัวกลางของไหล เช่น มีอนุภาคแขวนลอยปนอยู่ในของเหลว เป็นต้น

ในการทดสอบการสึกหรอของอนุภาคที่มีความแข็งสูงจะทำให้เกิดการสึกหรอบนผิวโลหะได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีความแข็งต่ำซึ่งจะทำให้อัตราการสึกหรอลดลง แต่กรณีที่เปรียบเทียบกันระหว่างโลหะกลุ่มเหล็กพบว่าอัตราการสึกหรอของผิวโลหะไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งความแข็งของอนุภาคมีผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ถ้าความแข็งของอนุภาคเปลี่ยนก็จะทำให้อัตราการสึกหรอเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ลักษณะความเป็นตัวขัดสีของอนุภาคจะขึ้นกับรูปร่างและความแข็งแบบแรงกดซึ่งถ้ามีรูปร่างที่เป็นมุมเหลี่ยมและมีความแข็งแรงแบบกดสูงจะไม่แตกง่ายและมีอัตราการสึกหรอของพื้นผิวที่ถูกอนุภาคแข็งเสียดสีสูง นอกจากนี้เมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง อัตราการสึกหรอก็จะลดลงด้วย เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะไหลตัวได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสบริเวณผิวของชิ้นงานมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมของการสึกหรอ คุณสมบัติ และสภาพผิวของชิ้นงานประกอบด้วย ดังนั้นถ้าต้องการเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอจะต้องทำที่ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน เช่น ควบคุมให้มีขนาดของอนุภาค แรงกด ความเร็วรอบ เท่ากันสำหรับการทดสอบการเสียดสี เป็นต้น (ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ, 2547); (De Pellegrin, Torrance, and Haran, 2009)

2.5.3 กลไกการสึกหรอแบบเสียดสีชนิดสองวัตถุ

สมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการสึกหรอแบบเสียดสีชนิดสองวัตถุพิจารณาจากวัสดุที่ทำให้เกิดการสึกหรอโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่เกิดการเสียดสีที่พิจารณา โดยแสดงถึงรูปร่างของอนุภาคแข็งที่กดลงบนเนื้อวัสดุที่อ่อนกว่า ซึ่งปริมาตร (dV) คือ พื้นที่หน้าตัดที่ถูกกดและเลื่อนไป สมมุติว่ารูปกรวย คือ แรงกดที่สามารถทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าเปลี่ยนรูปได้ และ L' คือ แรงกดที่ให้แก่ชิ้นงาน ดังนั้นจะได้ว่า



รูปที่ 2.24 แผนภาพจำลองการสึกหรอแบบเสียดสีระหว่างอนุภาคและเนื้อวัสดุ
 (“Mechanical wear prediction and prevention,” Bayer, 1994,
 Marcel Dekker, INC, p. 24)

$$L' = p \frac{\pi r^2}{2} \quad (2.16)$$

เมื่อ p คือ ความแข็งรอยกด (indentation hardness) ของวัสดุที่อ่อนกว่า
 $1/2$ คือ ครึ่งหนึ่งของรูปกรวยที่สัมผัสกับพื้นผิวที่มีการเสียดสี
 สมมุติให้รูปกรวยที่เป็นตัวสัมผัส คือ แรงกดที่ทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าเกิดการเปลี่ยน
 รูปถาวร โดยพิจารณารูปทรงของตัวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.22 พื้นที่หน้าตัดของร่อง คือ
 $r^2 \tan \theta$ ส่วนปริมาตรของการสึกหรอ คือ dV ที่มีระยะทางเท่ากับ dx จะได้ว่า

$$dV = r^2 \tan \theta dx \quad (2.17)$$

รวมสมการ (2.16) และ (2.17) แล้วอินทิเกรตทั้งสองข้าง จะได้

$$V = 2 \tan \theta \frac{L'}{\pi p} x \quad (2.18)$$

สมการข้างบนนี้ คือ การสีกหรือที่เกิดขึ้น โดยอนุภาคที่ขัดสีเพียงครั้งเดียว ในการเลื่อนทั้งหมดเป็นระยะทาง x สำหรับกรณีที่เกิดขึ้นจริงของการเลื่อนเป็นไปได้ว่าอาจมีอนุภาคจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการสีกหรือโดยการส่งต่อแรงกดดันระหว่างสองพื้นผิว ซึ่งสมการ (2.19) นี้สามารถอธิบายปัญหานี้ได้โดยสมมุติว่ามีการรวมอนุภาคทั้งหมดและให้อนุภาคทั้งหมดเป็นรูปกรวยแบบเดียวกัน m คือ จำนวนอนุภาคที่ขัดสีกับพื้นผิวทั้งหมด ซึ่งเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\sum r_i^2 \tan \theta_i \equiv mr^2 \tan \theta \quad (2.19)$$

โดย $\tan \theta$ สามารถใช้กับรูปร่างเฉลี่ยของอนุภาคแข็งได้

สำหรับการทดสอบจริงอาจเป็นไปได้ว่ามีอนุภาคของแข็งมาชนกันทำให้บริเวณที่สัมผัสกับวัสดุอ่อนมีแรงกดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะมีผลต่อบริเวณพื้นผิวที่เกิดการเสียดสี ดังนั้นเขียนสมการได้ใหม่ว่า

$$mL'' = kL' \quad (2.20)$$

เมื่อ L'' คือ แรงกดเทียบเท่าของแต่ละอนุภาคที่มีลักษณะเดียวกัน และ k_L คือ สัดส่วนของแรงกดรวม L' จากอนุภาคเหล่านั้น แทน r' และ $\tan \theta'$ ใน r และ $\tan \theta$ ตามสมการ (2.18) จะได้เป็น

$$V = \frac{2k_L (\tan \theta / \pi) L'}{p} x \quad (2.21)$$

อีกกรณีที่ต้องพิจารณาในรูปแบบการสีกหรือแบบเสียดสี คือ รูปร่างของอนุภาคที่ตัดเนื่องเนื้อวัสดุ ดังนั้นจะได้ว่า

$$V = \frac{2\epsilon k_L (\tan \theta / \pi) L'}{p} x \quad (2.22)$$

โดยที่ ϵ คือ อัตราส่วนของพื้นที่รอยความเสียดกับพื้นที่รอยกด

จัดรูปให้อยู่ในสมการอย่างง่ายจะได้ว่า

$$V = K \frac{L'}{p} x \quad (2.23)$$

ซึ่ง K คือ ค่าคงที่การสึกหรอ ซึ่งรวมปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอแบบเสียดสีทั้งหมด โดยค่า K ได้แสดงไว้ดังตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงที่การสึกหรอ (K) ที่ใช้สำหรับการสึกหรอแบบเสียดสี

Condition	K	
	Dry	Lubricated
<i>Two – body</i>		
File	5×10^{-2}	10^{-1}
New abrasive paper	10^{-2}	2×10^{-2}
Used abrasive paper	10^{-3}	2×10^{-3}
Coarse polishing	10^{-4}	2×10^{-4}
< 100 μm particles	10^{-2}	
> 100 μm particles	10^{-1}	
Nominal range, dry and lubricated	< 1 to > 10^{-4}	
<i>Three – body</i>		
Coarse particles	10^{-3}	5×10^{-3}
Fine particles	10^{-4}	5×10^{-4}
Nominal range, dry and lubricated	< 10^{-2} to > 10^{-6}	

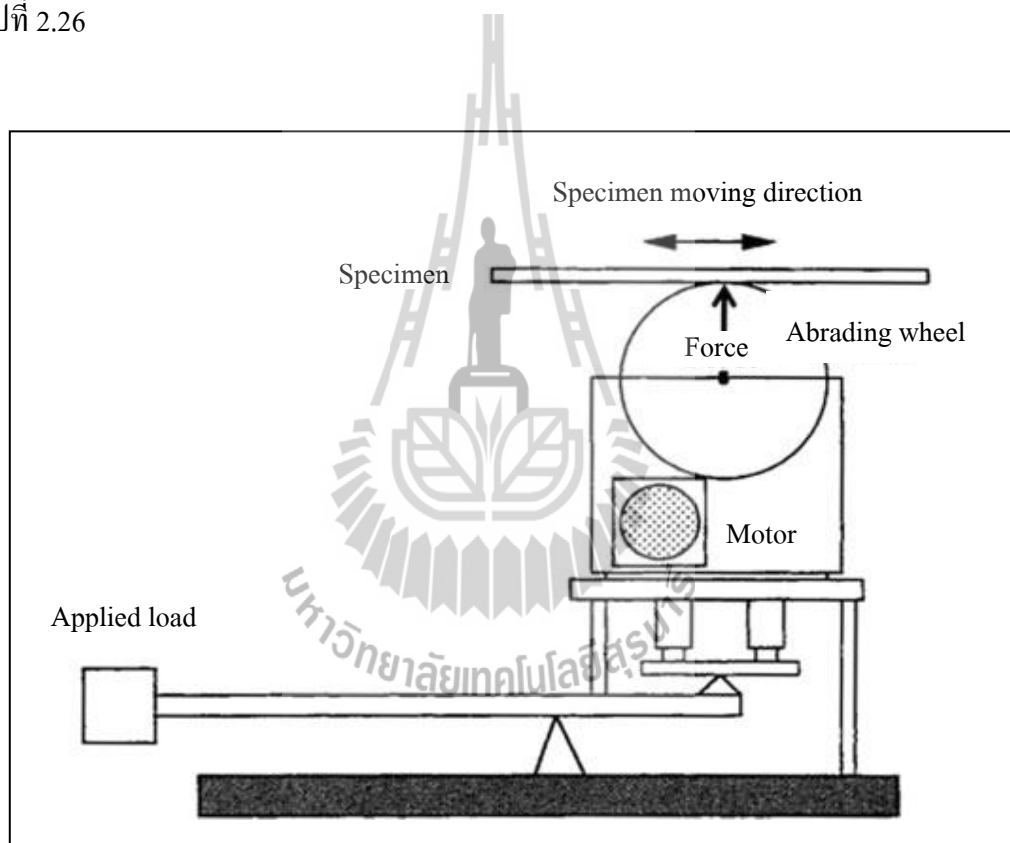
หมายเหตุ : อ้างอิงมาจาก “Mechanical wear prediction and prevention,” Bayer, 1994,

Marcel Dekker, INC, p. 26.

2.5.4 พฤติกรรมการสึกหรอภายใต้การเสียดสีแบบสองวัตถุด้วยเครื่อง

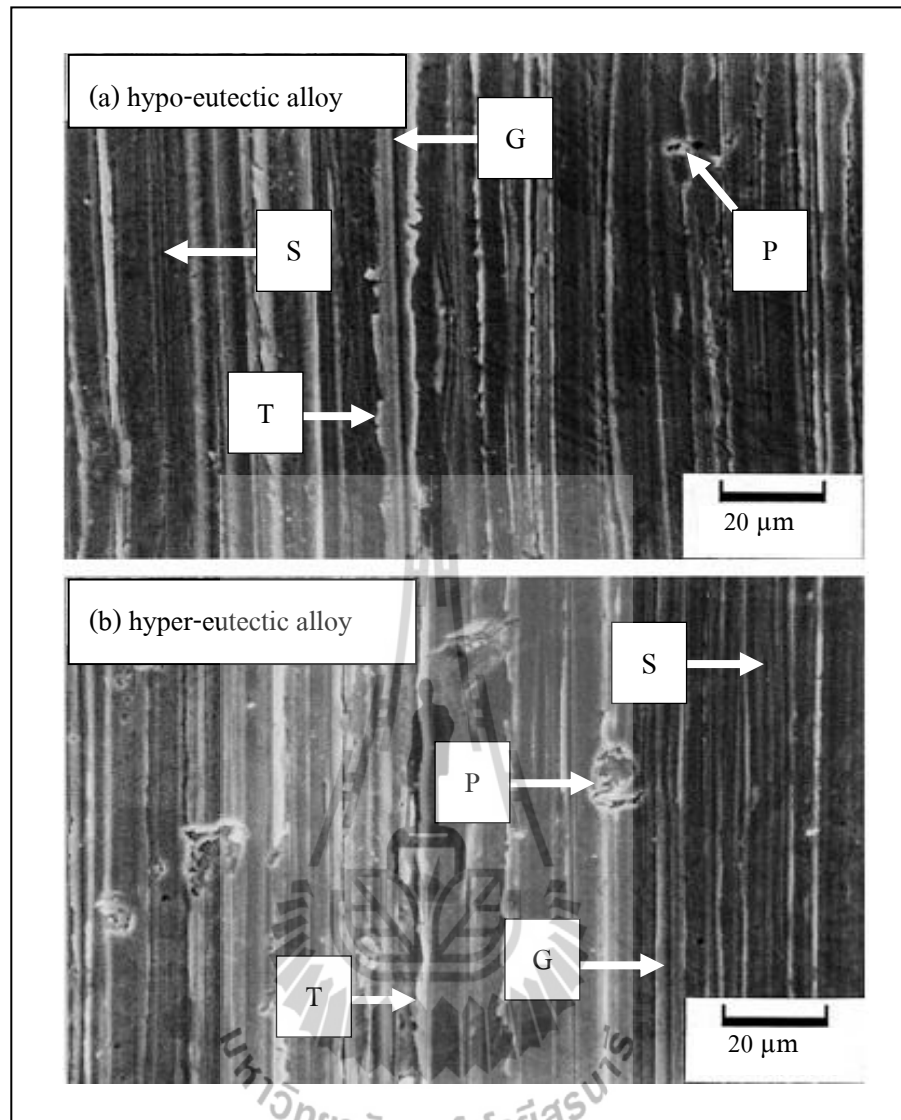
Two-body Suga abrasion tester

เครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบ Two-body Suga abrasion tester จัดเป็นเครื่องทดสอบที่ทำให้เกิดการสึกหรอในสภาวะความเค้นสูง (high stress) ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบดังกล่าว มีลักษณะเป็นร่อง (Grooving) รอยฉีก (Tearing) รอยขีดข่วน (Scratching) และรูเข็ม (Pitting) ซึ่งงานวิจัยของ (Kumar, Mondal, Khaira, and Jha, 1999) ได้เสนอไว้ โดยในการทดสอบได้ให้แรงกดแก่ชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 และพื้นผิวความเสียหายจากการสึกหรอแบบเสียดสีชนิดสองวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 แผนภาพของเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน

(จาก “Two-body type abrasion wear behaviour in hypoeutectic 16%Cr cast irons with Mo,” Inthidech, Aungsupaitoon, Sricharoenchai, and Matsubara, 2009, International Journal of Cast Metals Research, 2010, VOL 23 : 164-172)



รูปที่ 2.26 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวความเสียหายของเหล็กหล่อโครเมียมสูง ที่ผ่านการทดสอบการเสียดสีด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสี ชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน (จาก “Tribological stability of Al_2O_3 short fiber reinforced high Cr cast irons,” Sakamoto, Liu, Nomura, and Ogic, 2001, Wear 251 : 1414-1420)

จากกฎพื้นฐานการสึกหรอดังสมการที่ (2.3) (Sakamoto, Liu, Nomura, and Ogi, 2001) ได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับการคำนวณปริมาตรที่สูญเสียของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบการเสียดสีด้วยเครื่องชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน (Two-body Suga abrasion tester) กำหนดให้ V_l คือ ปริมาตรที่สูญเสียของวัสดุ (Volume loss) ระหว่างกระบวนการสึกหรอ x คือ ระยะทางที่เลื่อนในหน่วยเมตร L' คือ น้ำหนักที่ใช้กดชิ้นงานทดสอบและ H_v คือ ค่าความแข็งของวัสดุที่ถูกเสียดสีในหน่วยวิกเกอร์ส (HV) ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$V_l \propto \frac{xL'}{H_v} \quad (2.24)$$

ดังนั้น

$$V_l = K \frac{xL'}{H_v} \quad (2.25)$$

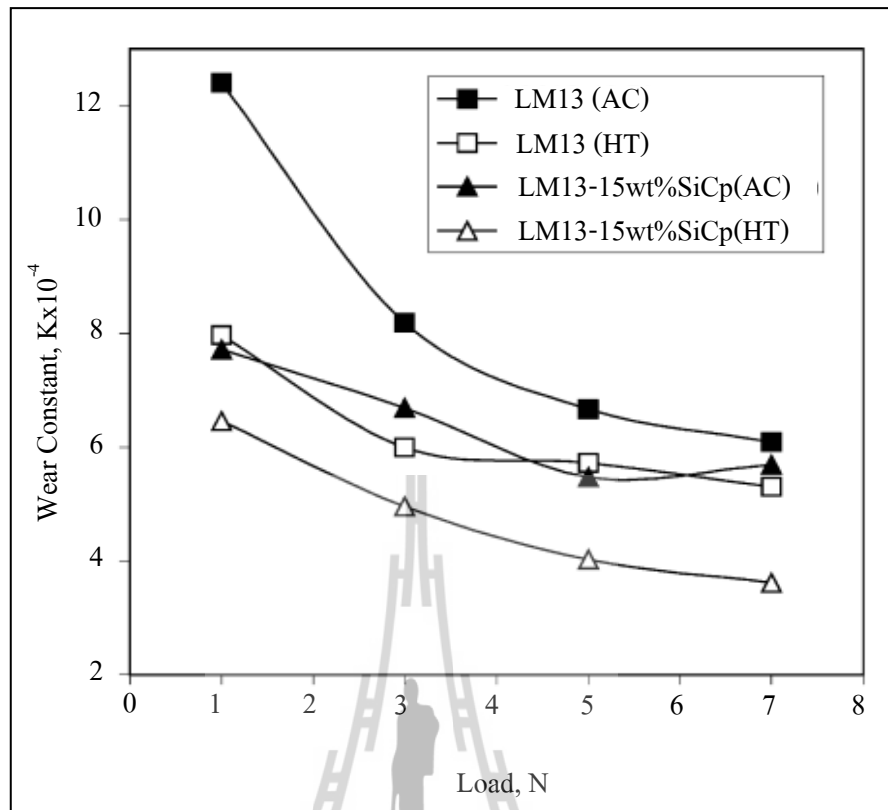
เมื่อ K คือ ค่าคงที่การสึกหรอที่ขึ้นกับอนุภาคที่ทำให้เกิดการสึกหรอ

$$K = \frac{V_l}{xL'} H_v \quad (2.26)$$

เมื่อ $\frac{V_l}{x} = W$ (wear rate) แทนค่าใน (2.26) จะได้ว่า

$$K = \frac{W}{L'} H_v \quad (2.27)$$

ซึ่งค่า K หมายถึง อัตราการสึกหรอต่อหน่วยแรงกดด้วยค่าความแข็งของวัสดุ ตัวอย่างเช่นในงาน (Sawla and Das, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงค่าคงที่การสึกหรอ (K) เทียบกับแรงกดที่ใช้ในการทดสอบ (Sawla and Das, 2004)

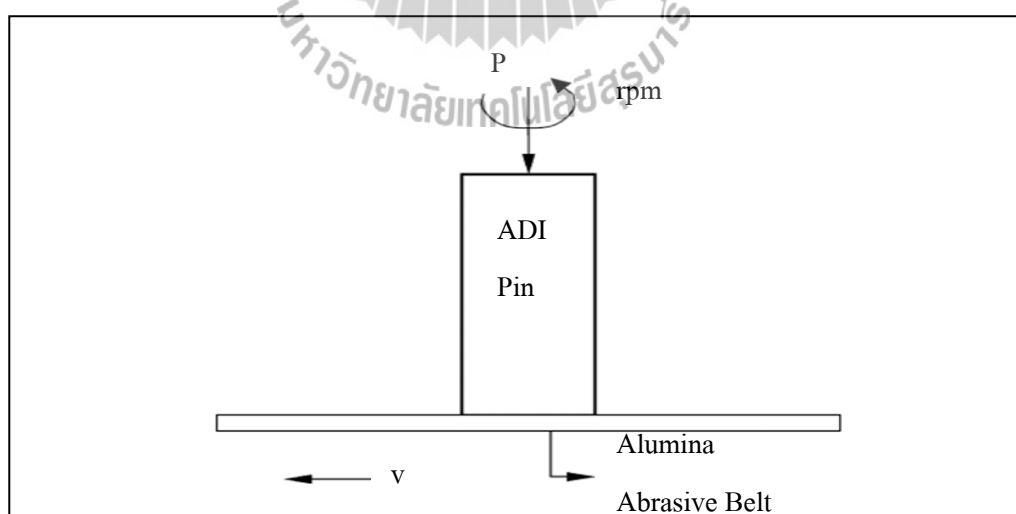
การหาค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อยหมุน (Two-body Suga abrasion tester) สามารถคำนวณจากค่าเฉลี่ยของมวลที่สูญเสียนำไปเทียบกับระยะทางที่ทดสอบ (Sakamoto, Liu, Nomura, and Ogi, 2001); (Sawla and Das, 2004) โดยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบในแต่ละรอบของการทดสอบการเสียดสี

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนัก (ในหน่วยมิลลิกรัม)} = \text{น้ำหนักก่อนทดสอบ} - \text{น้ำหนักหลังทดสอบ}$$

จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักในแต่ละรอบของการทดสอบการเสียดสีไปพล็อตกราฟเทียบกับระยะทางในหน่วยเมตร เพื่อหาค่าอัตราการสึกหรอจากความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบเส้นตรง ซึ่งค่าความชันที่ได้จากกราฟ คือ ค่าอัตราการสึกหรอในหน่วยมิลลิกรัมต่อเมตร

2.5.5 สมบัติด้านความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์

(Yang and Putatunda, 2005) ได้ศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ 3.45%C 2.45%Si 0.40%Mn 1.5%Ni 0.3%Mo และ 0.064%Mg ที่ผ่านกระบวนการชุบอสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น โดยอบอสเทนไนไทซิ่งที่อุณหภูมิ 927 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิ 288 316 343 371 และ 385 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนกระบวนการชุบอสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นจะชุบเหล็กหล่อเหนียวที่อุณหภูมิเริ่มต้น 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิอสเทมเปอร์ริงที่ 288 316 343 371 และ 385 องศาเซลเซียส โดยชุบเหล็กหล่อเหนียวที่อุณหภูมิอสเทมเปอร์ริงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เท่ากัน และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานไปขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดเซาะด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง (Electrical Discharge Machining) ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 มิลลิเมตร แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสี ตามมาตรฐาน ASTM G132-91 (2001) ด้วยแรงกด 66.7 นิวตัน ภายหลังจากทดสอบการเสียดสีเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 288 องศาเซลเซียส จนถึง 343 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ส่วนน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นงานที่ถูกทดสอบมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิการชุบอสเทมเปอร์ริงที่สูงขึ้น ซึ่งเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นจะมีน้ำหนักที่สูญเสีย น้อยกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านกระบวนการชุบแบบชั้นเดียว ดังแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.28 แผนภาพเครื่องทดสอบการเสียดสีตามมาตรฐาน ASTM standard G132-96 (2001) (Yang and Putatunda, 2005)

ตารางที่ 2.3 แสดงน้ำหนักที่สูญเสียภายหลังการทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียว ออสเทมเปอร์

<i>Austempering temperature, T_A, °C (°F)</i>	<i>Weight loss (mg)</i>	
	<i>Single - step</i>	<i>Two - step</i>
288 (550)	74.1	70.2
316 (600)	76.9	75.4
343 (650)	78.8	78.2
371 (700)	79.1	78.6
385 (725)	79.2	78.7

หมายเหตุ : “Effect of microstructure on abrasion wear behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process,” Yang and Putatunda, 2005, *Materials Science and Engineering A* 406 (2005), p. 222

จากรูปที่ 2.29 ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของ (Yang and Putatunda, 2005) ซึ่งแสดงถึงน้ำหนักที่สูญเสียเทียบกับค่าความแข็งพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียลดลงเมื่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แสดงว่าค่าความแข็งมีผลต่อความต้านทานการเสียดสี โดยเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการชุบแบบสองขั้นให้ค่าความแข็งสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการชุบแบบขั้นเดียว (Yang and Putatunda, 2005) ยังได้กล่าวอีกว่าโครงสร้างจุลภาคมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์และปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์ (X_γ) ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ (C_γ) และออสเทนไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ($X_\gamma C_\gamma$) รูปที่ 2.29 แสดงให้เห็นอีกว่าเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกิดการสึกหรอมากขึ้น (การสึกหรอเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักที่สูญเสีย) โดยให้เหตุผลว่าออสเทนไนต์มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC และมีความเหนียวมากกว่าเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC จึงทำให้ต้านทานการสึกหรอได้น้อยลง แต่เนื่องจากออสเทนไนต์เป็นเฟสที่มีความสามารถในการเกิดกลไกเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียดสูง จึงทำให้ออสเทนไนต์สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ได้เมื่อมีความเครียดสะสมเพียงพอที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส จากรูปที่ 2.29 พบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการชุบแบบสองขั้นมีสัดส่วนโดยปริมาตรและปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์สูงกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการชุบแบบขั้นเดียว แต่มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่า ซึ่ง (Yang and Putatunda, 2005) อธิบายว่าอาจเป็นผลมาจากการเกิดกลไกเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด เนื่องจากออสเทนไนต์มีโครงสร้างผลึก

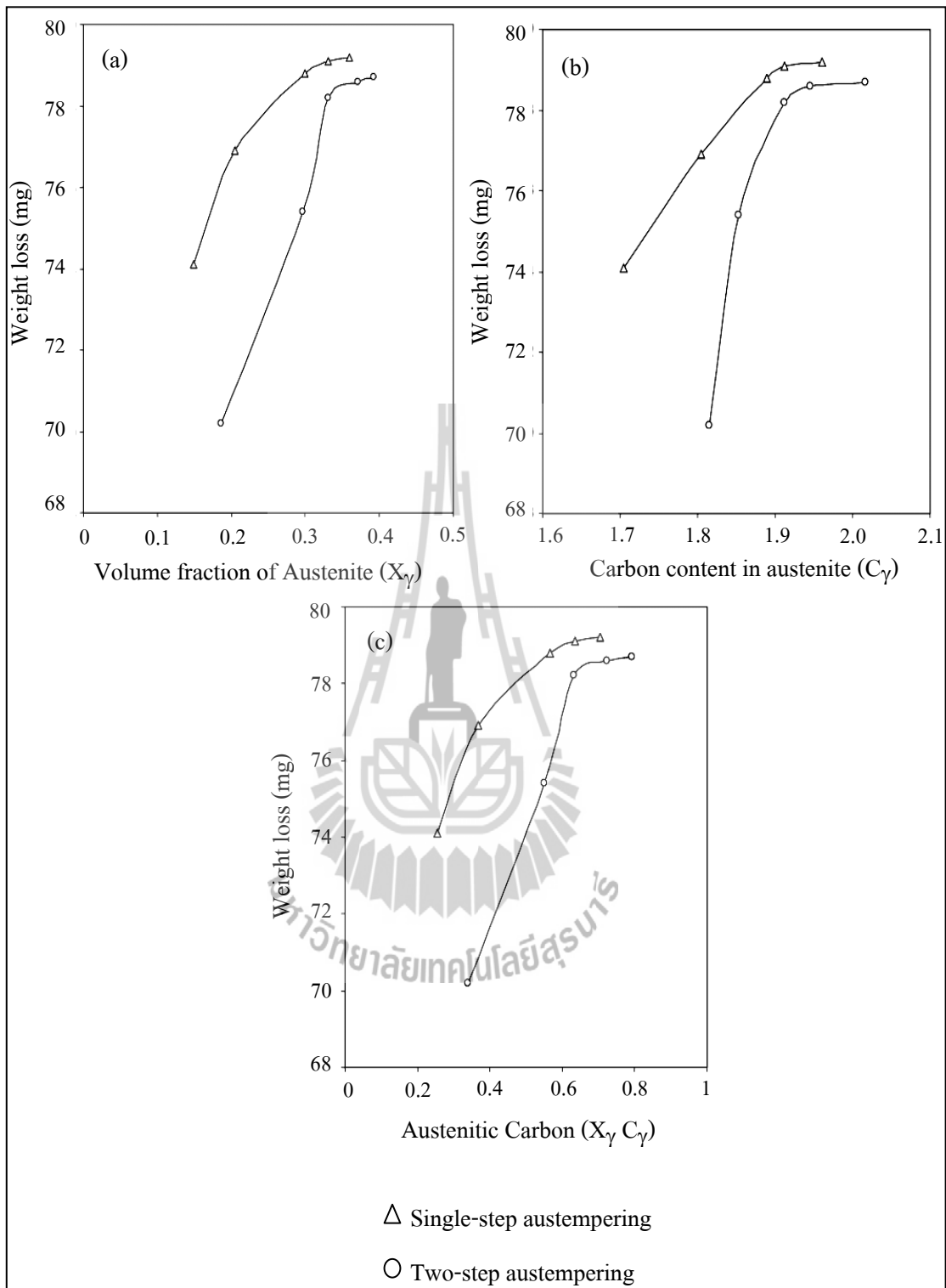
แบบ FCC จึงทำให้ออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ ซึ่งภายหลังการทดสอบการเสียดสีได้ตรวจสอบหาเฟสมาร์เทนไซต์บริเวณพื้นผิวความเสียหาย แต่เนื่องจากแรงกดที่ใช้ทดสอบการเสียดสีน้อยเกินไป (66.7 นิวตัน) จึงทำให้ไม่พบเฟสมาร์เทนไซต์ที่บริเวณใต้พื้นผิวที่ถูกเสียดสี แต่ (Yang and Putatunda, 2005 quoted in Gundlach and Janowak, 1983, pp. 377-388) ที่รายงานว่าค่าความแข็งบริเวณพื้นผิวที่ถูกการเสียดสีมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการทดสอบการสึกหรอ เพราะออสเทนไนต์เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์อันเนื่องมาจากความเครียดสะสม ดังนั้น (Yang and Putatunda, 2005) จึงได้วัดค่าความแข็งก่อนและหลังการทดสอบโดยมีผลดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความแข็งก่อนและหลังทดสอบการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียว

ออสเทมเปอร์

Austempering temperature, T_A , °C (°F)	Hardness before wear test (HRC)		Worn surface hardness (HRC)	
	Single – step	Two – step	Single – step	Two – step
288 (550)	39.5	44.6	45.0	45.4
316 (600)	35.4	44.1	45.2	44.7
343 (650)	29.1	42.7	36.4	43.5
371 (700)	26.5	39.5	33.4	42.3
385 (725)	22.8	34.8	30.4	36.5

หมายเหตุ : “Effect of microstructure on abrasion wear behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process,” Yang and Putatunda, 2005, *Materials Science and Engineering A* 406 (2005), p. 223



รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียเทียบกับ (a) สัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์ (X_γ) (b) ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ (C_γ) และ (c) ออสเทนไนต์เหลือค้ำคาร์บอนสูง ($X_\gamma C_\gamma$) (Yang and Putatunda, 2005)

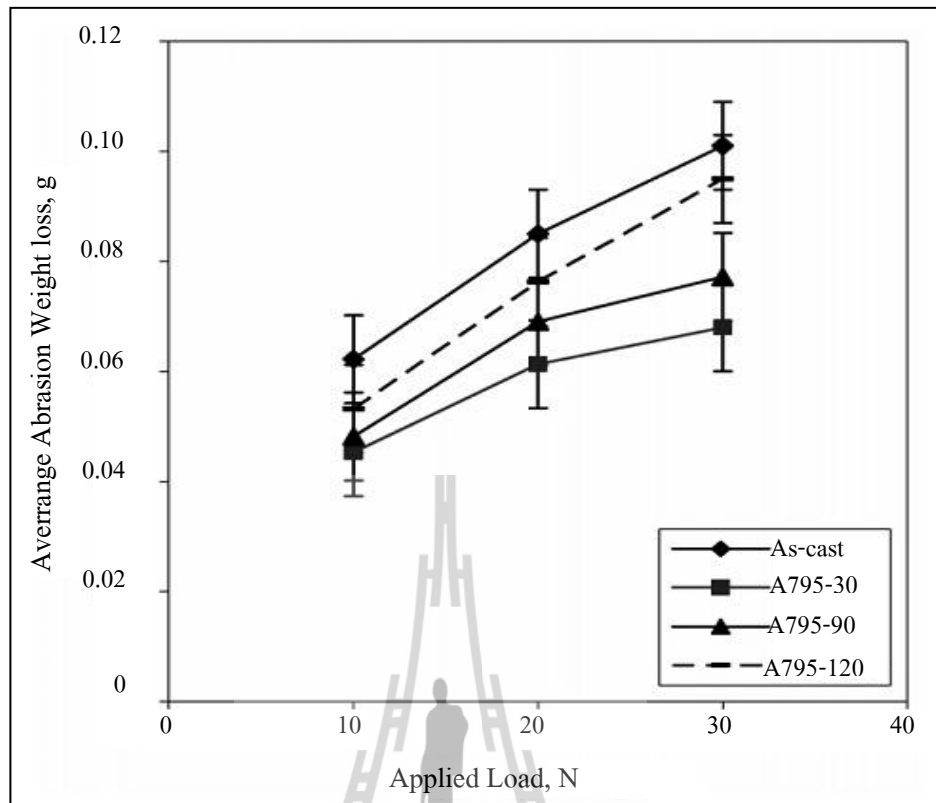
สำหรับพื้นผิวความเสียหายที่พบในงานวิจัยดังกล่าวมีลักษณะเป็นร่องและรอยขีดข่วน นอกจากนี้ยังพบลักษณะรูเข็มที่บริเวณพื้นผิวความเสียหายด้วย ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าเกิดจากแกรไฟต์ที่หลุดออกไประหว่างถูกการเสียดสี โดย (Yang and Putatunda, 2005) ได้แบ่งประเภทของกลไกการสึกหรอบแบบเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอร์ดังนี้

1) การเปลี่ยนรูปถาวรและรอยแตกขนาดเล็ก ในบริเวณพื้นผิวที่ถูกเสียดสี (plastic deformation and micro-fracture)

2) การทำให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดเล็กละเอียด (microstructural refinement)

3) ผลกระทบจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด (strain hardening effect)

(Sahin, Erdogan, and Kilicli, 2007) ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวที่มีส่วนผสมเป็น 3.42% C 2.63% Si และ 0.318% Mn ที่ผ่านการอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิวิกฤตที่อยู่ในช่วงเฟอร์ไรต์และออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 795 และ 815 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที และอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งเหล็กหล่อเหนียวทั้งสองส่วนผสมจะชุบออสเทนเปอร์ดิ่งที่อุณหภูมิ 365 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 30 90 และ 120 นาที ตามลำดับ แล้วทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Pin-on-disk ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที ที่แรงกด 10 20 และ 30 นิวตัน โดยใช้กระดาษเบอร์ 800 เป็นตัวขัดสีซึ่งถูกติดกับ disk ขณะทดสอบ ซึ่งภายหลังการทดสอบการสึกหรอ (Sahin et al., 2007) ได้พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียเฉลี่ยจากการเสียดสีเทียบกับแรงกดที่ใช้ทดสอบการเสียดสี ดังแสดงในรูปที่ 2.30 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักที่สูญเสียเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อแรงกดที่ใช้ในการทดสอบการเสียดสีมากขึ้นและเมื่อเทียบน้ำหนักที่สูญเสียกับเวลาออสเทนเปอร์ดิ่งพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียเพิ่มขึ้นตามเวลาออสเทนเปอร์ดิ่งที่สูงขึ้น ซึ่งงานวิจัยของ (Sahin et al., 2007) พบว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ให้ความต้านทานการเสียดสีดีที่สุดสำหรับงานนี้ โดย (Sahin et al., 2007) ได้กล่าวว่าความต้านทานการเสียดสีขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐานและค่าความแข็ง ซึ่งถ้ามีส่วนโดยปริมาตรของออสเฟอร์ไรต์มากและค่าความแข็งสูงจะสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด



รูปที่ 2.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียเฉลี่ยจากการเสียดสีเทียบกับแรงกดที่ใช้ทดสอบการเสียดสี (Sahin et al., 2007)

(Perez, Cisneros, and Lopez, 2006) ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวผสม 0.66%Cu 1.02%Ni และ 0.26%Mo ซึ่งผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 315 และ 370 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5–240 นาที และหลังจากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอด้วยเครื่อง block-on-ring ซึ่งชิ้นงานจะถูกทดสอบภายใต้แรงกด 45 นิวตัน และความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแกนหมุนของเครื่องทดสอบคือ 2.4 เมตรต่อวินาที ผลลัพธ์ของการทดสอบแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างจุลภาคมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานที่มีสมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีที่สุด คือ ชิ้นงานที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 370 และ 315 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

(Francucci, Sikora, and Dommarco, 2008) ได้ศึกษาความต้านทานการเสียดสีแบบ Dry sand/rubber Wheel ของเหล็กหล่อเหนียวที่มีส่วนผสม 3.0%Si 1.0%Cu 0.3%Ni และ 0.17%Mo ที่ชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้นตามสภาวะการทดลองของ (Yang and Putatunda, 2005) โดยอบอบสเทมไนท์ซิงที่อุณหภูมิ 920 องศาเซลเซียส แล้วชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 260 280 และ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนแบบสองชั้นชิ้นงานถูกชุบลงในเตาเกลือที่อุณหภูมิประมาณ 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นแช่ไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 280 320 และ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าการทดสอบการเสียดสีในสภาวะที่มีความเค้นต่ำเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นสามารถต้านทานการเสียดสีได้ดีกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว โดยวัสดุที่มีความแข็งสูงจะสามารถต้านทานการเสียดสีได้ดีกว่าวัสดุที่มีความแข็งต่ำ แต่เมื่อนำไปทดสอบการใช้งานจริงของตัวชุดดิน (bucket tip) ซึ่งมีสภาวะที่มีความเค้นสูงกลับพบว่าวัสดุที่มีความเหนียวมากจะสามารถทนต่อการเสียดสีได้ดีกว่าวัสดุที่มีความแข็งสูง

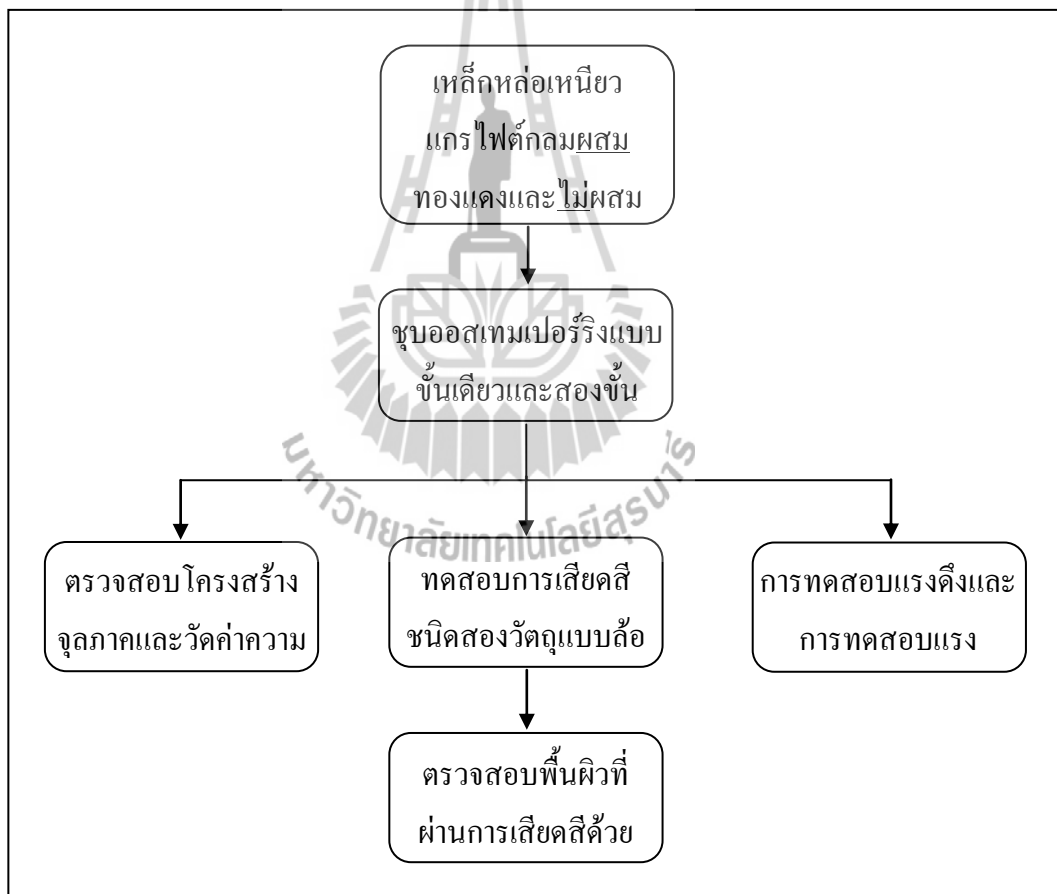
เนื่องจากเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์มีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องทนต่อการเสียดสีเพราะมีออสเทนไนต์เหลือค้าง ซึ่งการชุบอบสเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์เพื่อให้ได้โครงสร้างออสเฟอไรต์และออสเทนไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง เพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานในลักษณะที่มีการเสียดสี กรณีที่ชิ้นงานหล่อมีความหนาเกิน 1 นิ้ว ในทางปฏิบัติจะเติมธาตุผสมรอง เช่น นิกเกิล โมลิบดีนัม และทองแดง เป็นต้น เพื่อป้องกันการเกิดโครงสร้างเฟอไรต์ไลต์ขณะชุบอบสเทมเปอร์ริง เนื่องจากธาตุนิกเกิลมีราคาแพงซึ่งมีผลให้เหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์มีต้นทุนสูงไปด้วย ดังนั้นจึงได้มีการนำธาตุทองแดงมาใช้แทนนิกเกิล ซึ่งธาตุทองแดงก็ช่วยในการยับยั้งการเกิดโครงสร้างเฟอไรต์ไลต์ในขณะที่ชุบอบสเทมเปอร์ริงเช่นเดียวกับธาตุนิกเกิลและยังมีราคาถูกกว่า ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลง ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์ที่ผ่านการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น โดยใช้เหล็กหล่อเหนียวเกรดไฟด์กลมที่มีธาตุผสมทองแดงประมาณ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไม่มีธาตุผสมทองแดงมาอบชุบอบสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส (กรณีแบบสองชั้นจะเพิ่มอุณหภูมิอีก 30 องศาเซลเซียส ภายหลังจากอบชุบชิ้นงานไปแล้วเป็นเวลา 6 นาที ในอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที) โดยให้มีเวลารวมในเตาเกลือเป็น 60 90 และ 120 นาที เพื่อเปรียบเทียบและหาอิทธิพลของธาตุทองแดงว่าสามารถช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานต่อการเสียดสีได้หรือไม่ ตลอดจนสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้สำหรับการปรับปรุงหรือพัฒนาสมบัติด้านความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์ในอนาคตต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

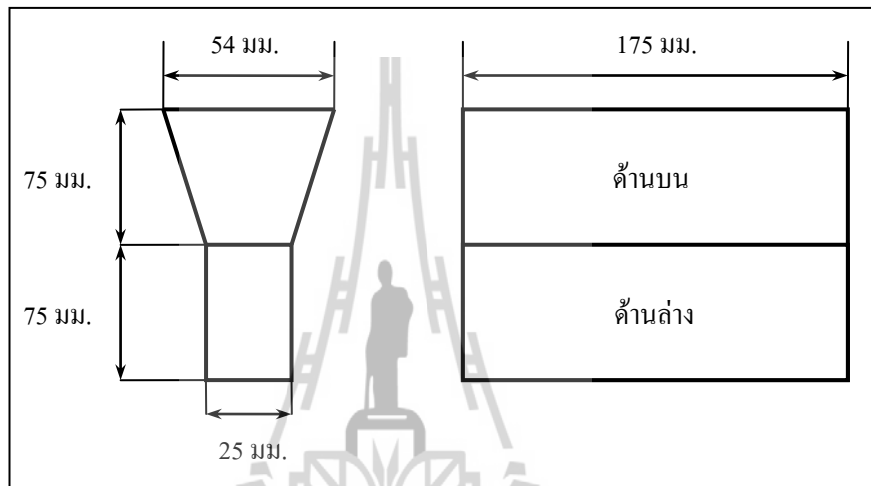
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวที่ผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตามแผนภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



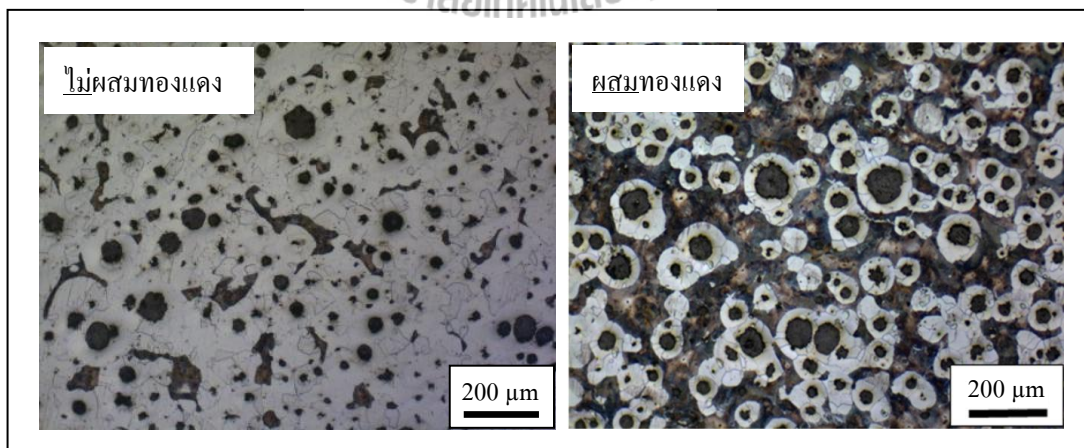
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุดิบ

วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลมที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างกัน 2 ส่วนผสม คือ มีธาตุทองแดงเจือและไม่มีธาตุทองแดงเจือซึ่งมีเนื้อพื้นเป็นเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ โดยหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน Y-blocks ขนาด 1 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งเหล็กหล่อที่ได้มีจำนวนแกรไฟต์ประมาณ 120 เม็ดกลมต่อตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 ชิ้นงาน Y-block ของเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลม



รูปที่ 3.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลม

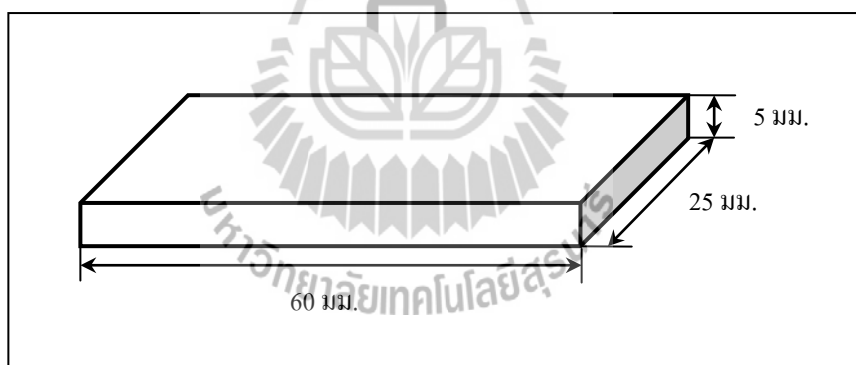
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวเกรดไฟต์กลม

Type	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mg
ผสมทองแดง	3.52	2.61	0.32	0.015	<0.004	0.75	-	0.041
ไม่ผสมทองแดง	3.58	2.65	0.32	0.018	<0.006	-	0.02	0.042

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.3.1 ชิ้นงานทดสอบการเสียดสี

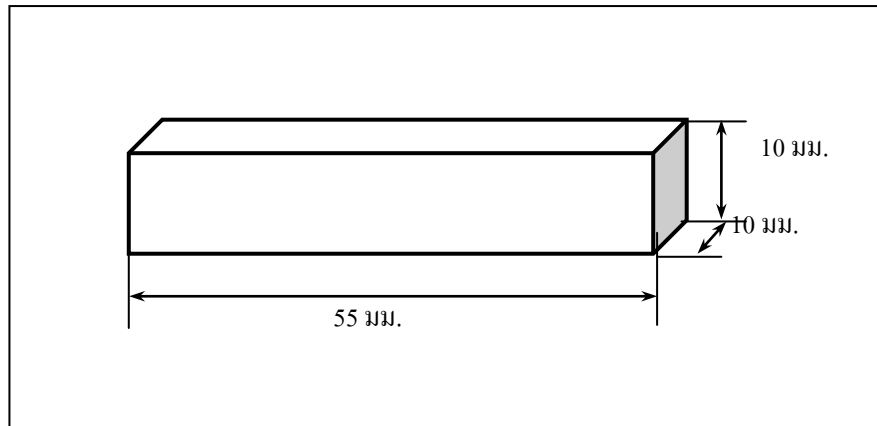
ตัดชิ้นงานหล่อด้านล่างของ Y-block ให้มีขนาด 25 x 75 x 17 มิลลิเมตร แล้วนำไปชุบออกสเทมเปอร์ริงตามสภาวะการอบชุบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ภายหลังจากชุบออกสเทมเปอร์ริง นำชิ้นงานไปตัดโดยการตัดด้วยลวด (wire cut) ให้ได้ขนาด 25 x 60 x 5.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปเจียรนัยและขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 1000 และ 2000 แล้วขัดละเอียดด้วยอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร โดยให้ชิ้นงานมีขนาดสุดท้ายเป็น 25 x 60 x 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และมีความเรียบผิวไม่เกิน 3 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.4 แสดงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบการเสียดสี

3.3.2 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

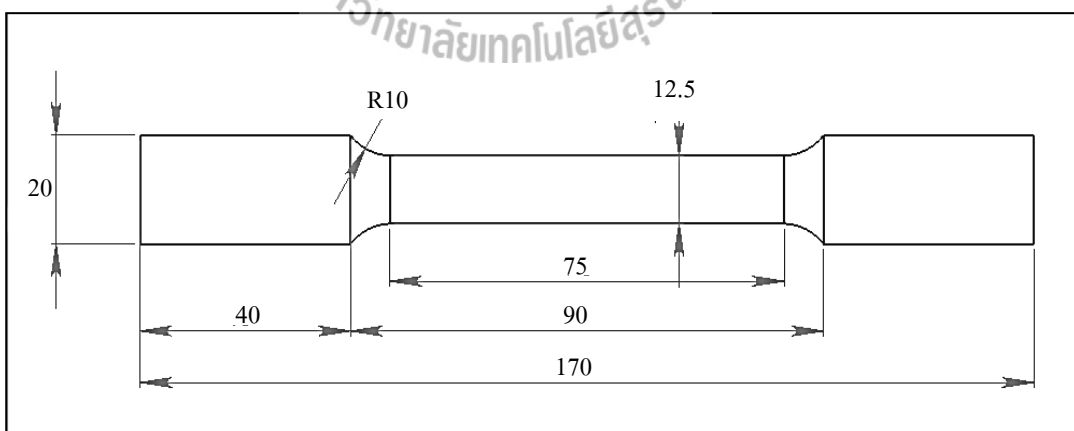
ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกในงานวิจัยนี้เป็นชนิดแบบไม่บากร่อง (unnotched Charpy specimens) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A327-91 (Reapproved 2006) โดยตัดชิ้นงานหล่อด้านล่างของ Y-block ให้มีขนาด 12 x 12 x 58 มิลลิเมตร แล้วนำไปชุบออกสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ จากนั้นไสให้ชิ้นงานมีขนาด 10 x 10 x 55 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไม่บ่ากร่อง

3.3.3 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง

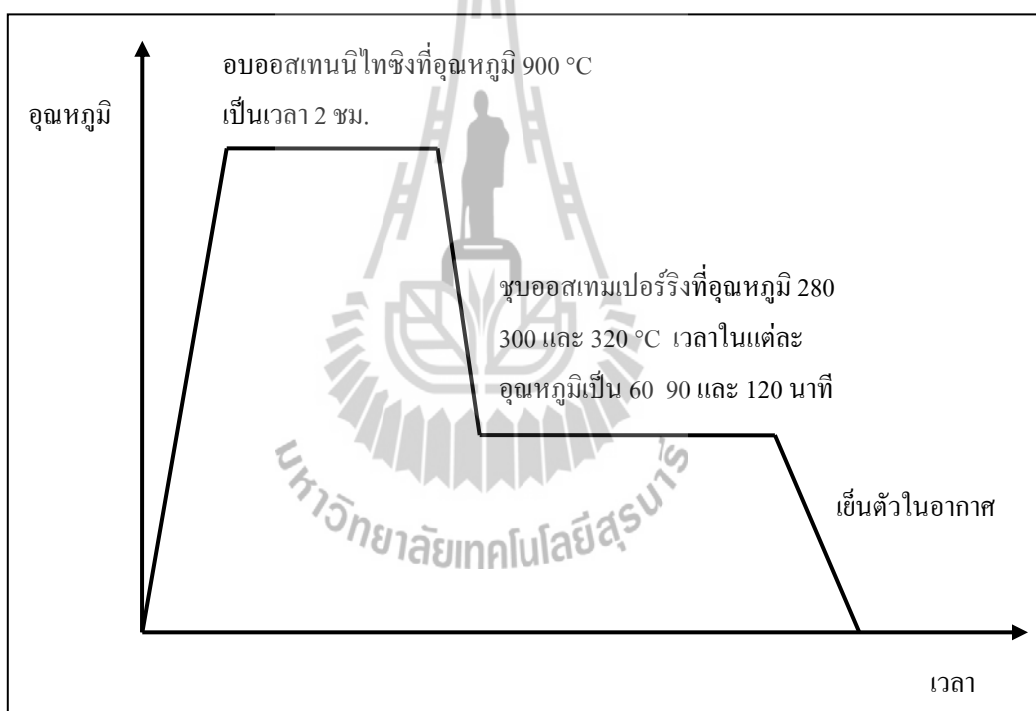
ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A370-10 โดยตัดชิ้นงานหล่อด้านล่างของ Y-block ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 22 และยาว 170 มิลลิเมตร แล้วขึ้นรูปชิ้นงานโดยการกลึงชิ้นงานให้มีขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากนั้นนำชิ้นงานไปชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ ภายหลังจากอบชุบเสร็จสิ้นแล้ว จึงนำชิ้นงานไปขัดทำความสะอาดผิว เพื่อจัดคราบออกไซด์บาง ๆ ที่ผิวของชิ้นงาน



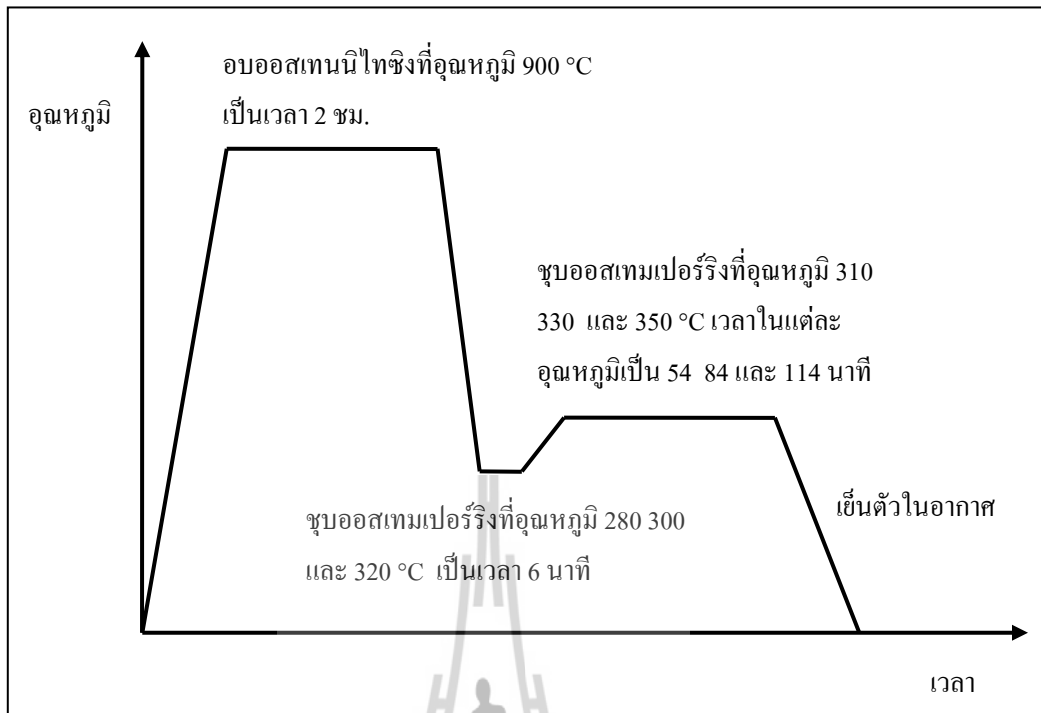
รูปที่ 3.6 ขนาดชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง (หน่วยมิลลิเมตร)

3.4 การอบชุบชิ้นงานทดสอบ

สำหรับกระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้ทั้งการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้น โดยเริ่มจากการอบอสเทนไนไทซิง (austenitizing) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบอบสเทมเปอร์ริง (austempering) ในอ่างเกลือไหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส (กรณีการชุบแบบสองชั้นจะเพิ่มอุณหภูมิอีก 30 องศาเซลเซียส เมื่อชุบชิ้นงานไปแล้วเป็นเวลา 6 นาที ด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที) โดยให้มีเวลารวมในเตาเกลือเป็น 60 90 และ 120 นาที แผนภาพการอบชุบแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้นนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ส่วนสภาวะการอบชุบอบสเทมเปอร์ริงสำหรับการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ได้เสนอไว้ ดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.7 กระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว



รูปที่ 3.8 กระบวนการชุบอสเทนเปอร์ริ่งแบบสองขั้น



ตารางที่ 3.2 สภาวะในการอบชุบออสเทมเปอร์ริง (austempering) ที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อตัวอย่างชิ้นงาน		กระบวนการ ชุบ ออสเทม เปอร์ริง	อุณหภูมิการ อบออสเทนไนท์ ไทซิง (°C)	อุณหภูมิ (°C) / เวลา (min)			
ผสมทองแดง	ไม่ผสมทองแดง			ชั้นเดียว	สองชั้น		
A280-60m	U280-60m	ชั้นเดียว	900	-	280/60		
A280-90m	U280-90m			-	280/90		
A280-120m	U 280-120m			-	280/120		
A300-60m	U 300-60m			-	300/60		
A300-90m	U 300-90m			-	300/90		
A300-120m	U 300-120m			-	300/120		
A320-60m	U 320-60m			-	320/60		
A320-90m	U 320-90m			-	320/90		
A230-120m	U 230-120m			-	320/120		
A280+30-60m	U 280+30-60m			สองชั้น	900	280/6	310/54
A280+30-90m	U 280+30-90m					280/6	310/84
A280+30-120m	U 280+30-120m					280/6	310/114
A300+30-60m	U 300+30-60m					300/6	330/54
A300+30-90m	U 300+30-90m					300/6	330/84
A300+30-120m	U 300+30-120m					300/6	330/114
A320+30-60m	U 320+30-60m					320/6	350/54
A320+30-90m	U 320+30-90m	320/6	350/84				
A230+30-120m	U 230+30-120m	320/6	350/114				

หมายเหตุ : อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ คือ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการทดสอบความแข็ง

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยี่ห้อ Carl Zeiss ในการเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคเริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 320 600 800 1000 และ 1200 และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ แล้วกัดกรดด้วยไนทริค 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 4-8 วินาที ส่วนการวัดค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness) ยี่ห้อ Wilson รุ่น 450 SVD โดยใช้น้ำหนักกดชิ้นงานที่ 30 กิโลกรัม (kgf) และมีเวลาที่ใช้กดชิ้นงาน (Dwell) คือ 10 วินาที

3.6 การทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงกระแทก

สำหรับการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงได้ทดสอบด้วยเครื่อง Instron universal testing machine รุ่น 8802 ด้วยอัตราการยืดตัว 1 มิลลิเมตรต่อนาที และวัดระยะการยืดตัวด้วยเครื่อง Extensometer ส่วนการทดสอบแรงกระแทกได้ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (Charpy Impact testing) ยี่ห้อ Denison Mayes Group โดยมีความเร็วในการเหวี่ยงที่ 5.2 เมตรต่อวินาที สำหรับการทดสอบแรงดึงและแรงกระแทกจะใช้ชิ้นงานทดสอบ 2 ชิ้นต่อสภาวะการอบชุบ

3.7 การทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน

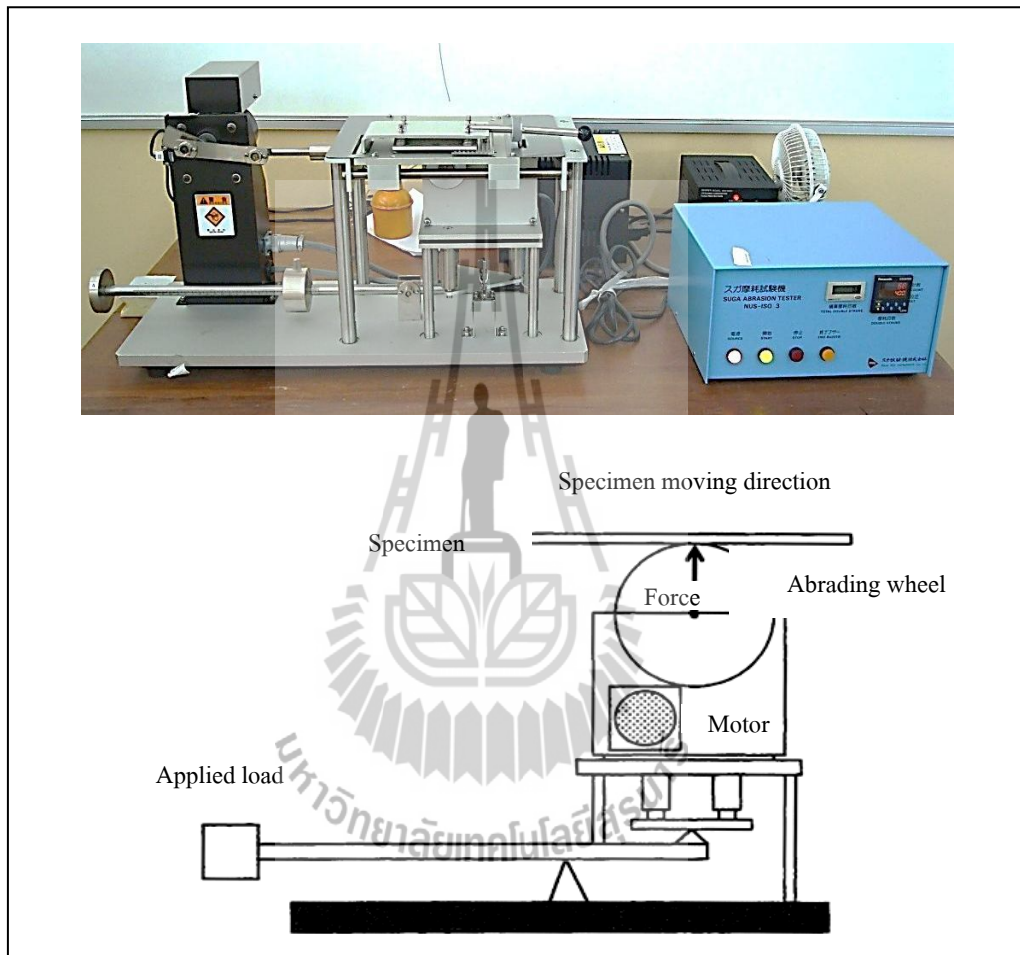
สำหรับการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ได้ทดสอบการเสียดสีด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน (Two-body type Suga abrasion wear tester) รุ่น NUS-ISO 3 Japan ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ทั้งนี้ใช้แรงกดชิ้นงานที่ 1 นิวตัน (N) ล้อหมุนทำจากอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร และหนา 12 มิลลิเมตร ซึ่งจะติดตัวขัดสีเพื่อให้เกิดการสัมผัสกับชิ้นงานตัวขัดสีที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ คือ ทรายทรายเบอร์ 180 โดยตัดให้มีขนาดพอดีกับเส้นรอบวงและความหนาของล้อหมุน ระหว่างการทดสอบล้ออะลูมิเนียมจะหมุนที่ละ 0.9 องศาต่อจังหวะการเคลื่อนที่ (stroke) และมีความเร็วในการหมุนเป็น 0.345 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยจะหมุนเคลื่อนที่ลักษณะไปแล้วกลับเพื่อสัมผัสกับทรายทรายบริเวณใหม่อยู่เสมอไปจนครบ 360 องศา ดังนั้นจำนวนรอบที่ล้อหมุนเคลื่อนที่ทั้งหมด คือ 400 รอบต่อการทดสอบ 1 ครั้ง ซึ่งล้อจะหมุนเคลื่อนที่ช้า ๆ กันที่บริเวณเดิมโดยมีความยาวเป็น 30 มิลลิเมตร ทำให้ได้รอยที่เกิดจากการเสียดสีมีขนาดเป็น 12 x 30 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงมีพื้นที่รวมในการทดสอบการเสียดสีทั้งหมดเป็น 12 x 2 x 400 มิลลิเมตร และมีระยะทางการเสียดสีทั้งหมด คือ 30 x 2 x 400 มิลลิเมตร ซึ่งการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้จะทดสอบซ้ำทั้งหมด 4 ครั้งต่อชิ้นงาน และสภาวะการทดสอบเป็นแบบแห้ง โดยมีวิธีการปฏิบัติขณะทดสอบดังนี้

1) ล้างชิ้นงานทดสอบด้วยสารอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องอุลตราโซนิก เป็นเวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์แล้วปล่อยให้แห้ง

2) ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบในเครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม เป็นจำนวน 4 ครั้ง แล้วบันทึกค่าไว้

3) นำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน แล้วรอจนกว่าจะครบ 400 รอบ

4) ทำซ้ำข้อ 1-3 จนทดสอบครบทั้ง 4 ครั้ง และก่อนการทดสอบทุกครั้งต้องเปลี่ยนกระดาษทรายเสมอ



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุนและแผนภาพจำลองของเครื่องทดสอบ จาก “Two body type abrasion wear behaviour in hypoeutectic 16%Cr cast irons with Mo,” Inthidech, Aungsupaitoon, Sricharoenchai, and Matsubara, 2009, International Journal of Cast Metals Research, 2010, VOL 23 : 164-172



รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม

3.8 การตรวจสอบพื้นผิวภายหลังการทดสอบการเสียดสี

ภายหลังการทดสอบการเสียดสีได้ตรวจสอบรอยความเสียหาย (worn surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope รุ่น JEOL 5400) โดยได้มีการตรวจสอบบริเวณบนพื้นผิวของรอยที่ผ่านการเสียดสีและบริเวณด้านใต้ผิวรอยการเสียดสีของชิ้นงานที่มีค่าอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

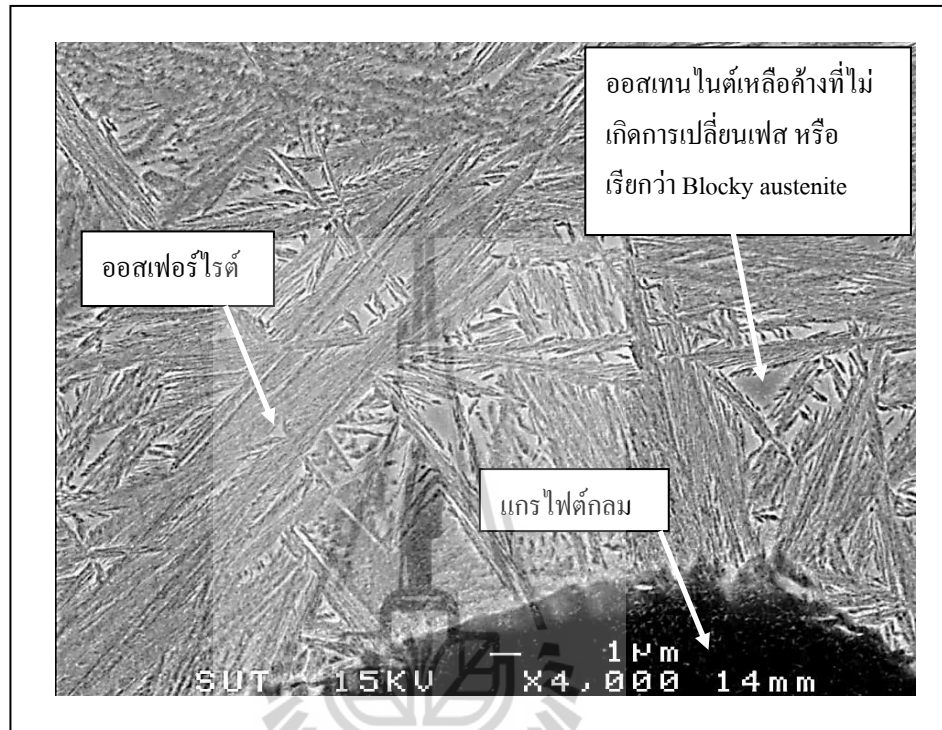
4.1 บทนำ

ภายหลังจากการอบชุบเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งที่ผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดง ได้นำเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลทั่วไป ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานแรงดึงจุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว จากนั้นได้ศึกษาความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวทั้งสองส่วนผสมที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้น ด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบ ถูหมุน (Two-body type Suga abrasion wear tester) แล้วตรวจสอบพื้นผิวที่ผ่านการเสียดสีด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ซึ่งผลการทดลองที่ได้มี ดังนี้

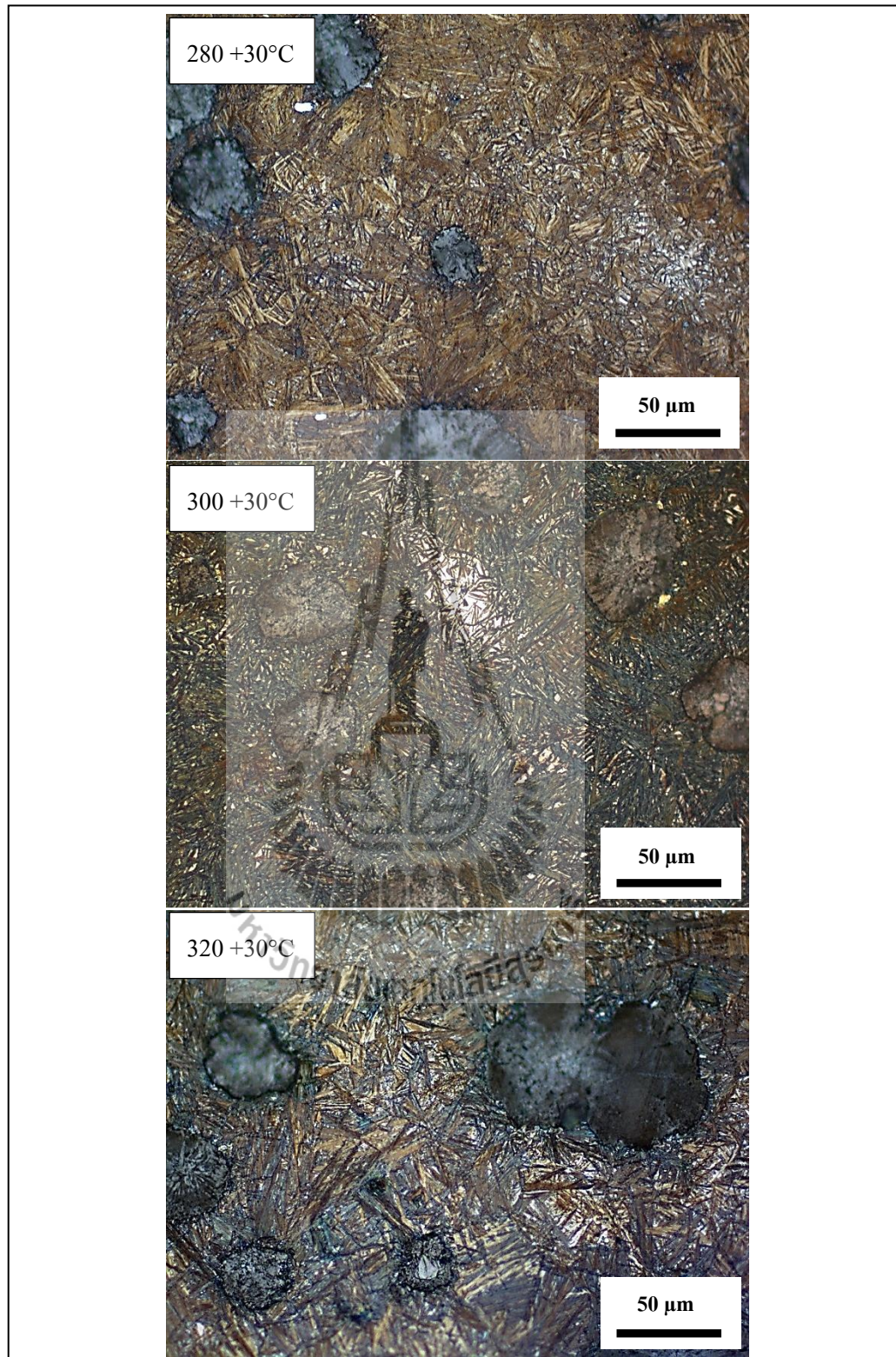
4.2 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้นของ เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดง คือ เกรไฟต์กลมและเนื้อพื้น ที่เป็นออสเฟอไรต์ ซึ่งประกอบไปด้วยเฟอไรต์รูปเข็มและออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และมีออสเทนไนต์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสหรือเรียกว่า Blocky austenite ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากผลการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นด้วยอุณหภูมิเริ่มต้นเดียวกันแต่ใช้เวลารวมในการชุบ ออสเทมเปอร์ต่างกัน คือ 60 90 และ 120 นาทีนั้น เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ แสงสะท้อนพบว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากชุบมีลักษณะคล้ายกัน แต่เมื่อ พิจารณาเปรียบเทียบชิ้นงานที่ชุบด้วยเวลารวมเท่า ๆ กัน แต่อุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์เริ่มต้น ต่างกันคือ 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส เฟอไรต์รูปเข็มมีลักษณะหยาบมากขึ้นเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิออสเทมเปอร์เริ่มต้นสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยเห็นได้ชัดว่าที่อุณหภูมิ การชุบออสเทมเปอร์เริ่มต้นที่ 320 องศาเซลเซียส เฟอไรต์รูปเข็มมีลักษณะหยาบมากที่สุด ซึ่งเป็นเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นชนิดไม่ผสมและผสมทองแดง ตามลำดับ โดยเฟอไรต์รูปเข็มซึ่งมีลักษณะหยาบขึ้นเมื่ออุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์เพิ่มสูงขึ้นนี้ พบใน การชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นตัวอย่างภาพถ่ายโครงสร้าง จุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียว

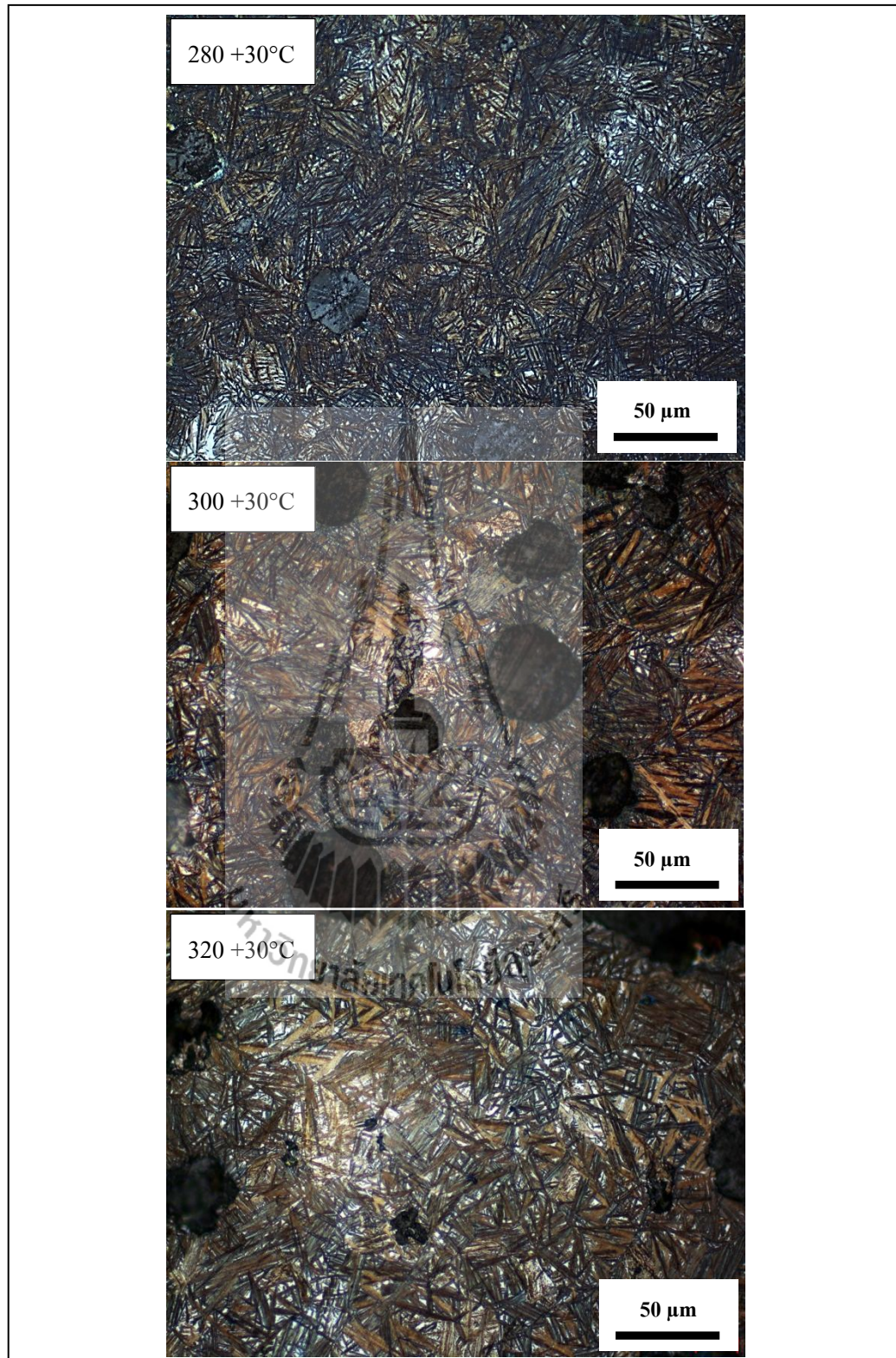
ด้วยอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 280 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสังเกตได้อีกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดงนั้นมีลักษณะเฟอร์ไรต์รูปเข็มที่ละเอียดกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดง



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์จริง ด้วยเวลารวม 120 นาที ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส



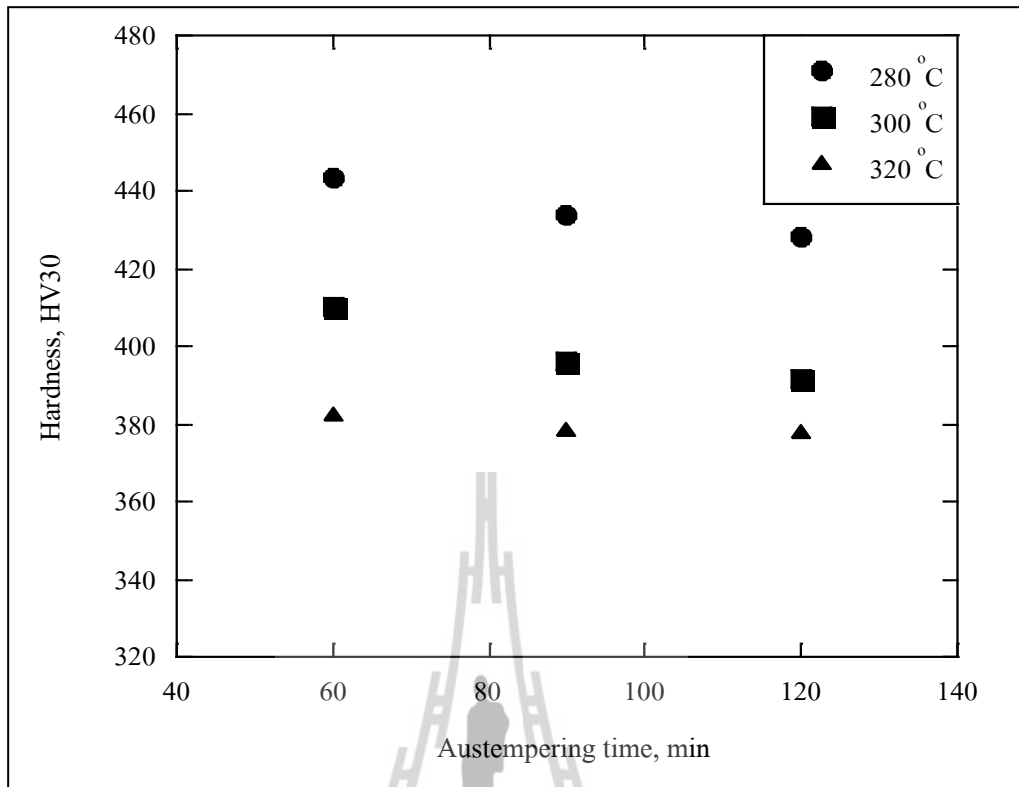
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ
ออสเทนเปอร์ริ่งแบบสองขั้นด้วยเวลารวม 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน



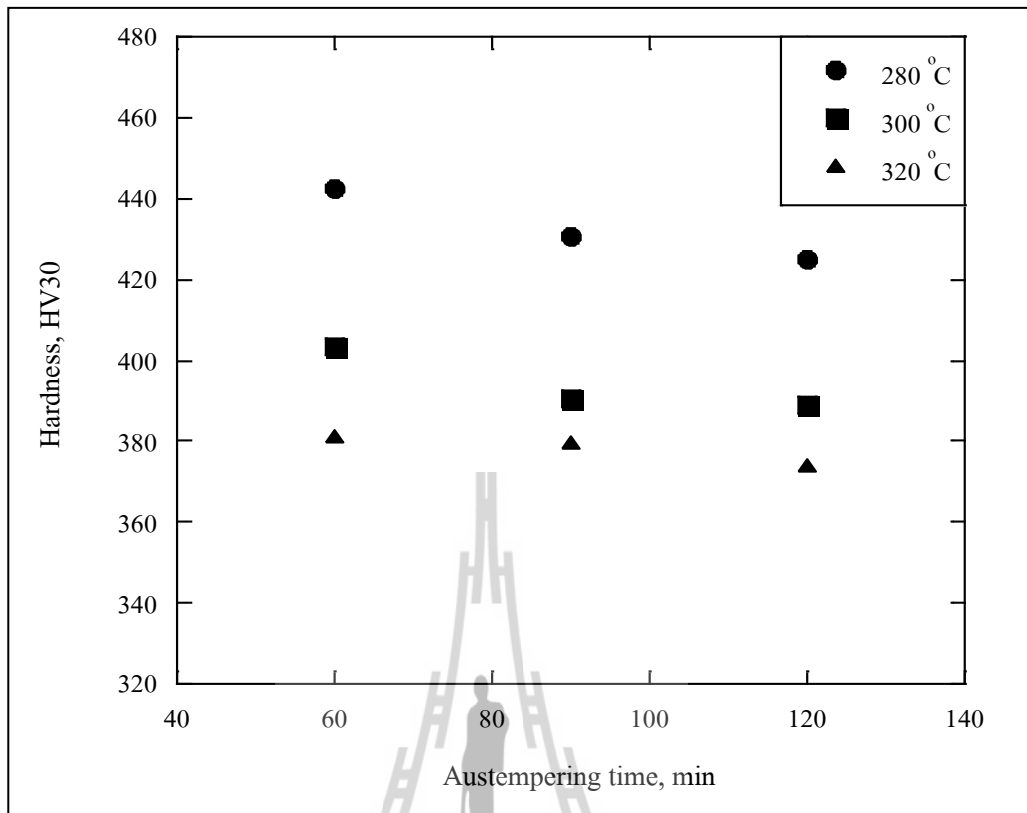
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ
ออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นด้วยเวลารวม 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน

หุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวที่ 300 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเวลาออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 90 นาที และเริ่มคงที่เมื่อเวลาออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 90 เป็น 120 นาที ส่วนที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงค่อนข้างคงที่แม้เวลาออสเทมเปอร์ริงเพิ่มจาก 60 เป็น 90 นาที จากนั้นค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการหุบออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 90 เป็น 120 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.6 นอกจากนี้ถ้าเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ริงชั้นเดียว พบว่าชุดที่ผสมทองแดงมีค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่าที่ไม่ผสมทองแดงเล็กน้อย

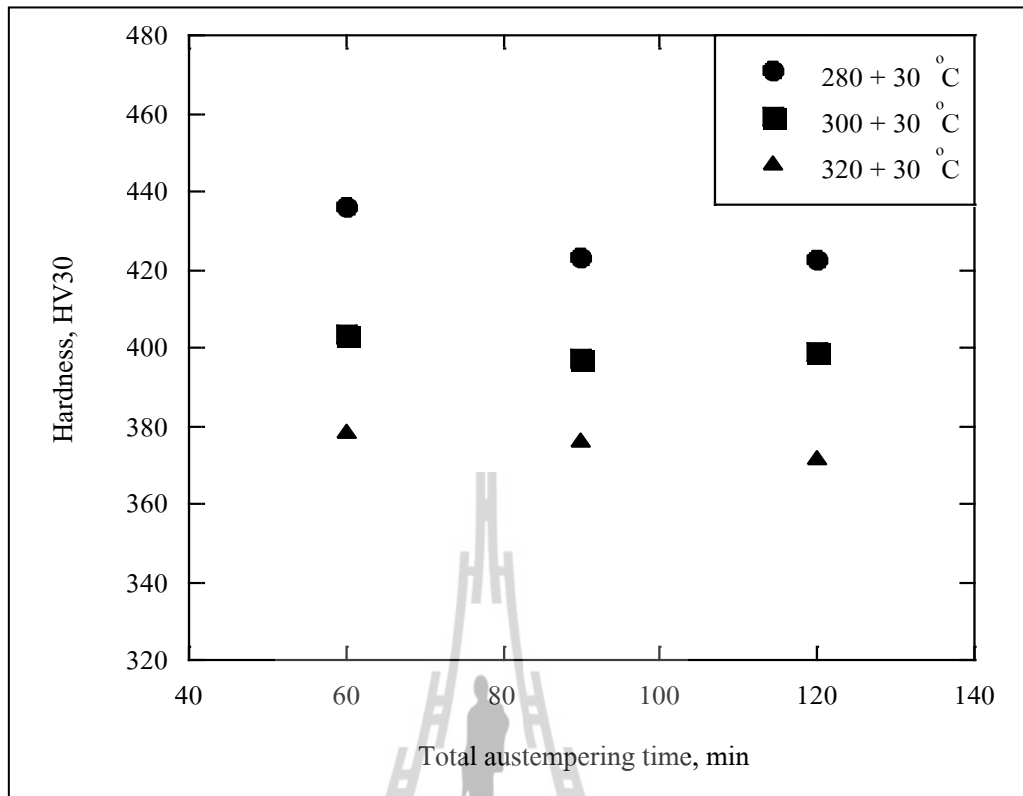
สำหรับเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการหุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาหุบออสเทมเปอร์ริง 60 นาที มีค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ 436.2 Hv ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้นการหุบออสเทมเปอร์ริง 280 และ 300 องศาเซลเซียส เมื่อเวลารวมในการหุบออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นเป็น 90 นาที และจาก 90 เป็น 120 นาที ค่าความแข็งแรงที่ได้มีแนวโน้มลดลงแล้วคงที่ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาการหุบออสเทมเปอร์ริงระหว่าง 60 และ 90 นาที จากนั้นค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 90 เป็น 120 นาที ส่วนกรณีของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการหุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นด้วยอุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 60 นาที มีค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ที่ 429.1 Hv ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และพบว่าด้วยอุณหภูมิการหุบออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 280 และ 300 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจาก 60 เป็น 90 นาที ส่วนค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นเป็นเวลา 120 นาที ส่วนการหุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส แนวโน้มของค่าความแข็งแรงค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 90 นาที จากนั้นค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการหุบออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 90 ไปเป็น 120 นาที นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ริงผสมทองแดงมีค่าต่ำกว่าที่ไม่ผสมทองแดงอย่างชัดเจน



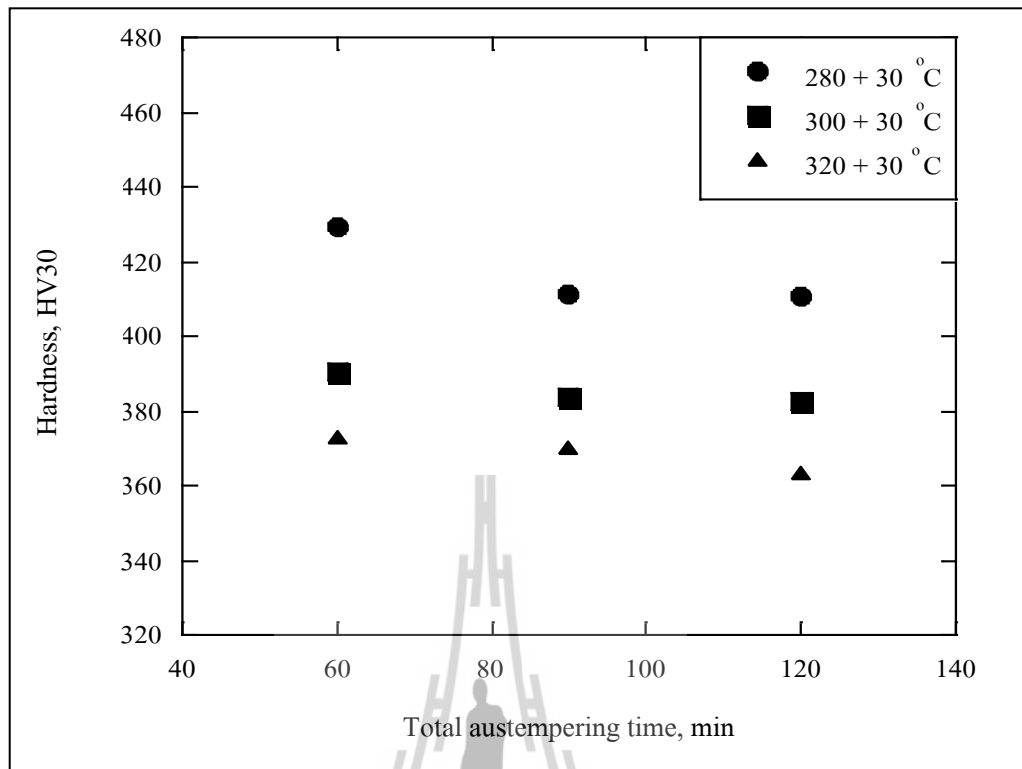
รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งเทียบกับเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว
ของเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดง



รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งเทียบกับเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว
ของเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์ผสมทองแดง



รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งเทียบกับเวลาในการชุบออสเทนเปอริ่งแบบสองขั้น
ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอริ่งที่ไม่ผสมทองแดง



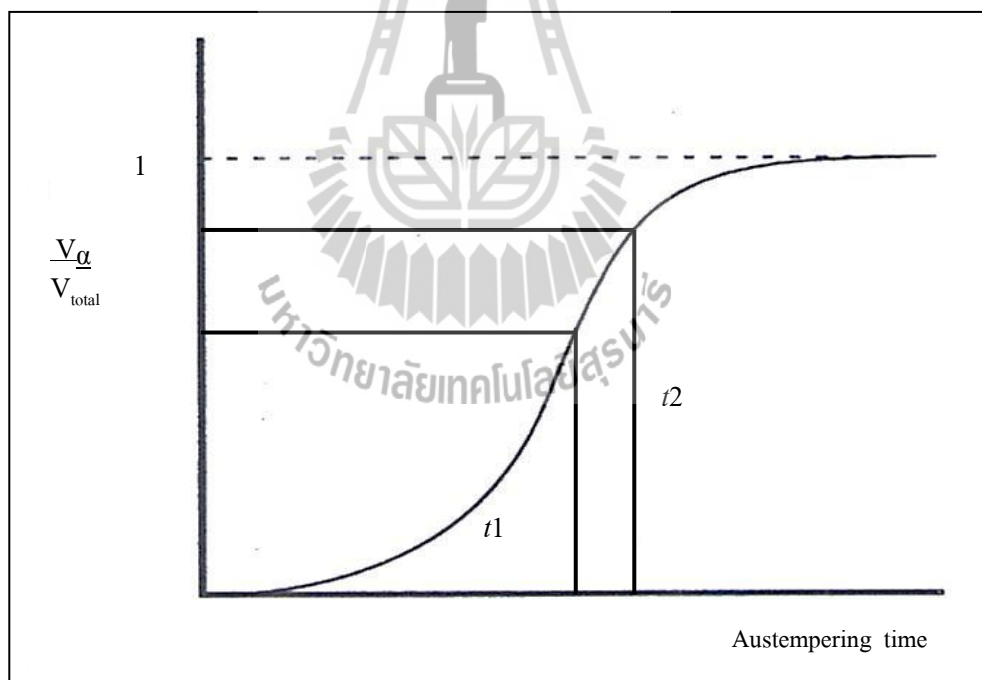
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งเทียบกับเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น
ของเหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์ผสมทองแดง

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดง และผสมทองแดง

สภาวะการชุบออสเทมเปอร์ริง		ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (H_v)	
อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	เวลารวม (นาที)	ไม่ผสมทองแดง	ผสมทองแดง
280	60	443.3	442.7
	90	433.8	430.4
	120	428.3	425.1
300	60	410.3	403.4
	90	396.3	390.7
	120	391.6	389.1
320	60	382.8	381.4
	90	378.7	379.7
	120	377.8	374.0
280 + 30	6 + 54	436.2	429.1
	6 + 84	422.9	411.5
	6 + 114	422.7	410.7
300 + 30	6 + 54	403.6	390.3
	6 + 84	397.5	383.9
	6 + 114	399.1	382.6
320 + 30	6 + 54	378.5	372.9
	6 + 84	376.3	370.1
	6 + 114	371.8	363.3

จากผลการทดลองอาจเป็นไปได้ว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 280 และ 300 องศาเซลเซียส โดยมีเวลารวม 60 นาทีนั้น การเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เริ่มต้นเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มและออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงยังไม่ใกล้สิ้นสุด เนื่องจากคาร์บอนยังแพร่ออกจากเฟสเฟอร์ไรต์เข้าไปในเฟสออสเทนไนต์ที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ใต้น้อย ส่งผลให้ออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนสูงไม่พอ จึงไม่มีเสถียรภาพและเปลี่ยนเฟสเป็นโครงสร้างของมาร์เทนไซต์เมื่อเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง (Perez et al., 2006) ซึ่งผลของเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโดย

ปริมาตรของเฟอร์ไรต์รูปเข็มต่อปริมาตรโดยรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งเห็นได้ว่าที่เวลา ออสเทมเปอร์ริง t_1 จะมีสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟอร์ไรต์น้อยกว่าที่เวลาออสเทมเปอร์ริงที่ t_2 ซึ่งถ้าเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงไม่นานพอที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ที่มี คาร์บอนสูงลิ้นสุด นั้นหมายถึงคาร์บอนจะแพร่ออกจากเฟสเฟอร์ไรต์ไปอยู่ในเฟสออสเทนไนต์ได้ ไม่มากพอและออสเทนไนต์ดังกล่าวเปลี่ยนเฟสไปเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อปล่อยเย็นตัวลง เมื่อเพิ่มเวลา ออสเทมเปอร์ริงให้นานขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที ปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลงค่าความแข็งจึงลดลง อย่างเห็นได้ชัด กรณีนี้พบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดงมีค่าความแข็งมากกว่า เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดง โดยเฉพาะด้วยการชุบออสเทมเปอร์ริง แบบสองชั้น อาจเป็นเพราะอิทธิพลของธาตุทองแดงที่ผสมในเหล็กหล่อเหนียวเพื่อป้องกันการเกิด เฟอร์ไรต์ขณะชุบออสเทมเปอร์ริงและยับยั้งการเกิดเฟอร์ไรต์ทำให้ได้เฟอร์ไรต์ที่หยาบกว่า ดังนั้น ค่าความแข็งที่ได้จึงต่ำกว่าในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดง ดังที่ได้กล่าวมา ข้างต้น (Shelton and Bonner, 2005); (Kitkamthom and Diewwanit, 2009)



รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟอร์ไรต์ เทียบกับเวลาออสเทมเปอร์ริง “คัดแปลงจาก (Jackson, 2004)”

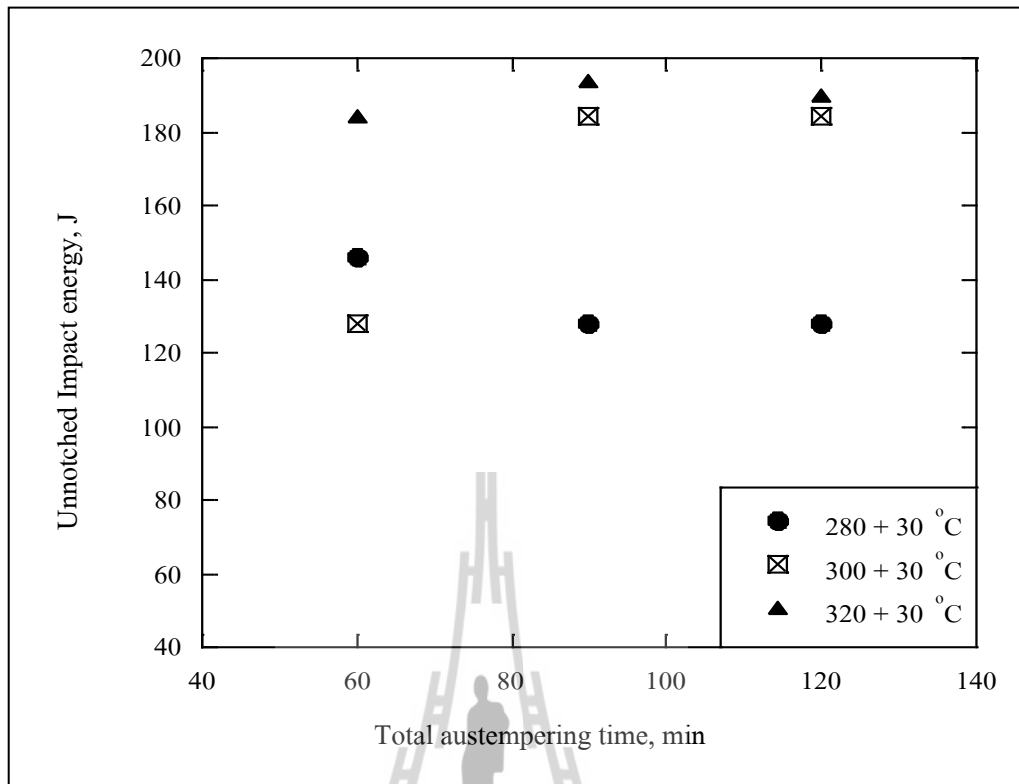
4.4 ความทนต่อแรงกระแทก

จากผลการทดสอบแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 90 นาที ให้ค่า การดูดซับพลังงานการกระแทกสูงที่สุด คือ 194 จูล ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาแนวโน้ม ค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกเทียบกับเวลารวม ในการชุบออสเทมเปอร์ริง พบว่ากรณีของ เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับพลังงาน การกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเวลารวมการชุบเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 90 นาที จากนั้นมีแนวโน้มคงที่ แม้ว่า เวลาการชุบเพิ่มเป็น 120 นาที ต่อมาเมื่อพิจารณากรณีเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่ 300 และ 320 องศาเซลเซียส ลักษณะแนวโน้มของค่าการดูดซับพลังงาน การกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงที่เพิ่มขึ้นจาก 60 นาที ไปสูงสุดที่ เวลา 90 นาที และลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลารวมในการชุบออสเทมเปอร์ริงเพิ่มเป็น 120 นาที เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม เท่ากันที่ 90 และ 120 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงขึ้นตาม อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากลักษณะความละเอียดของ โครงสร้าง ออสเฟอไรต์ ปริมาณของออสเทนไนต์และปริมาณของคาร์บอนในออสเทนไนต์ที่แตกต่างกัน นั้นเอง ส่วนผลการทดสอบแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 และ 300 องศา เซลเซียส มีลักษณะแนวโน้มของค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกลดลงเมื่อเวลาการชุบออสเทม เปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 90 นาที และมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาการชุบออสเทมเปอร์ริงเพิ่ม ขึ้น จาก 90 เป็น 120 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่วนที่อุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 300 องศา เซลเซียส มีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงที่สุดคือ 194 จูล ที่เวลาการชุบออสเทมเปอร์ริง เป็น 120 นาที ส่วนที่อุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส แนวโน้มของค่า การดูดซับพลังงานการกระแทกค่อนข้างคงที่ และค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกมีแนวโน้ม ลดลงเมื่อเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 90 เป็น 120 นาที ซึ่งอาจเป็นเพราะการชุบ ออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 120 นาที เป็นช่วงเริ่มต้นของ การเข้าสู่ช่วงปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ของการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิดังกล่าว จึงทำให้ออสเทนไนต์ที่มี ปริมาณคาร์บอนสูงอาจเริ่มมีการเปลี่ยนไปเป็นเฟอไรต์กับคาร์ไบด์ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานดังกล่าว เปราะและมีความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำลงได้โดย (Eric et al., 2004); (Elsayed et al., 2009) ได้ สนับสนุนแนวคิดนี้ในงานวิจัยว่าในกรณีของออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงเปลี่ยนไปเป็นเฟส

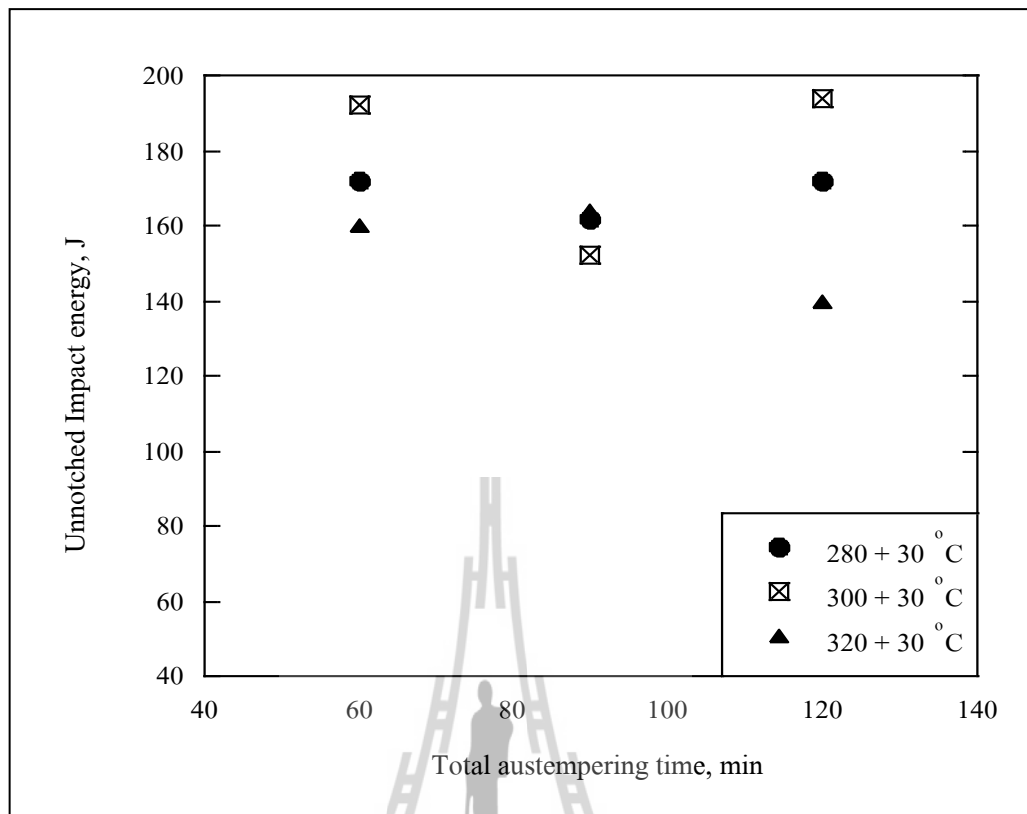
เฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์ จะส่งผลให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีโครงสร้างจุลภาคที่เปราะและมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำลงได้

จากนั้นเมื่อตรวจพื้นผิวการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ารอยแตกมีลักษณะการแตกหักแบบกิ่งเหนียวกิ่งเปราะ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยสังเกตได้จากลักษณะที่เป็นหลุมกลมเล็ก ๆ (dimple) ที่บริเวณเนื้อพื้นของโลหะลักษณะดังกล่าวแสดงถึงพฤติกรรมการแตกแบบเหนียวและบางบริเวณที่เห็นเป็นลักษณะการแตกแบบผ่าเกรนที่มีผิวเรียบเป็นชั้น ๆ เรียกกันว่า แบบเสมือนคลีเวจ (quasi-cleavage) โดยมีจุดเริ่มต้นของทิศทางการแตกมาจากเกรนไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากการสังเกตพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานทั้ง 3 อุณหภูมิเริ่มต้น พบว่ารอยแตกมีลักษณะคล้าย ๆ กัน แต่ที่อุณหภูมิในการชุบออสเทมเปอร์จริงสูงกว่าจะสามารถสังเกตลักษณะเสมือนคลีเวจได้อย่างชัดเจนตามตัวอย่างหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.12 ลักษณะที่พบนี้สอดคล้องกันกับที่พบโดย (Prasad, Rao, and Putatunda, 2003) ทั้งนี้มีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าขนาดของเข็มหรือแผ่นเฟอร์ไรต์ที่หยาบมากขึ้นอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานที่ชุบออสเทมเปอร์จริงที่อุณหภูมิสูงแสดงลักษณะเสมือนคลีเวจ เนื่องจากเฟอร์ไรต์มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC (body center cubic)

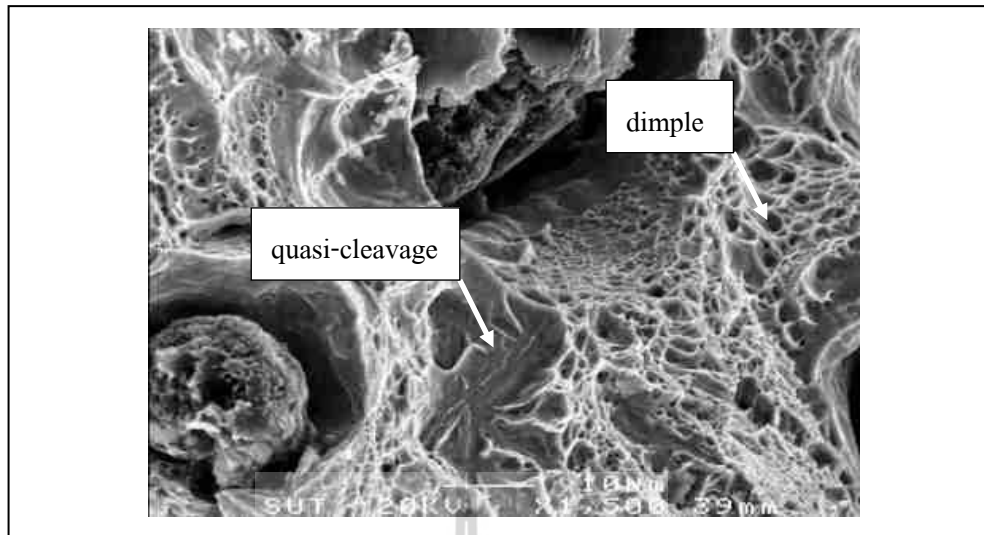




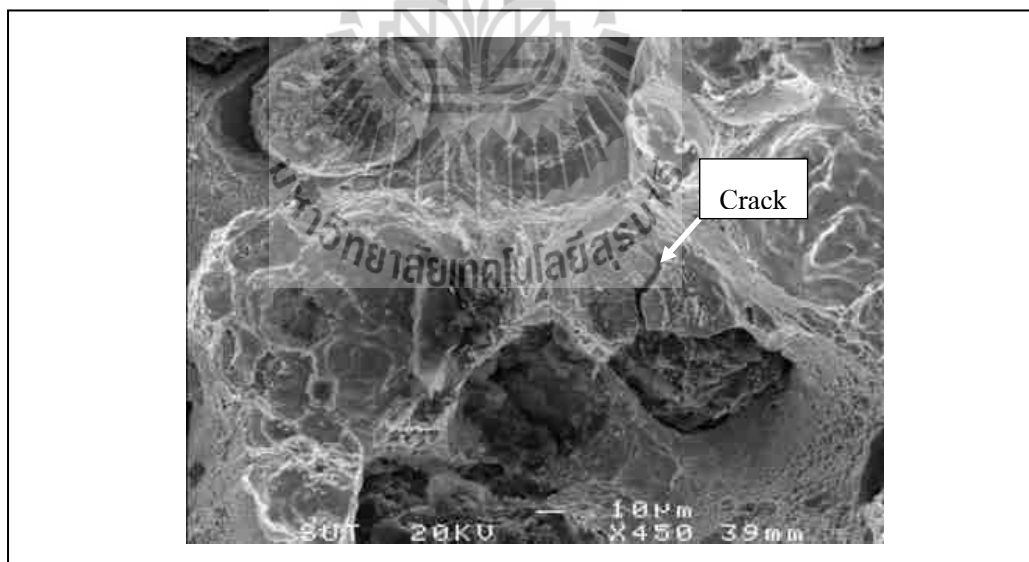
รูปที่ 4.10 ค่าการดูดซับพลังงานทดสอบแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียว
ไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบอบสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น



รูปที่ 4.11 ค่าการดูดซับพลังงานทดสอบแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียว ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น



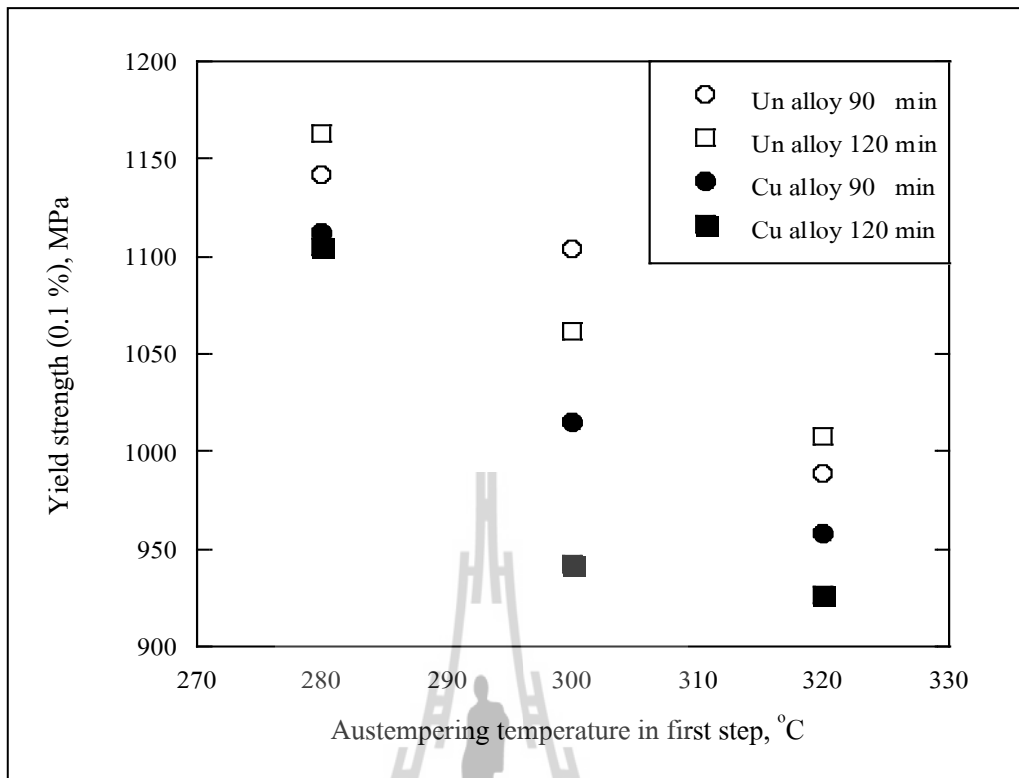
รูปที่ 4.12 พื้นผิวการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอสเทนเปอ์ริง
ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 120 นาที
ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



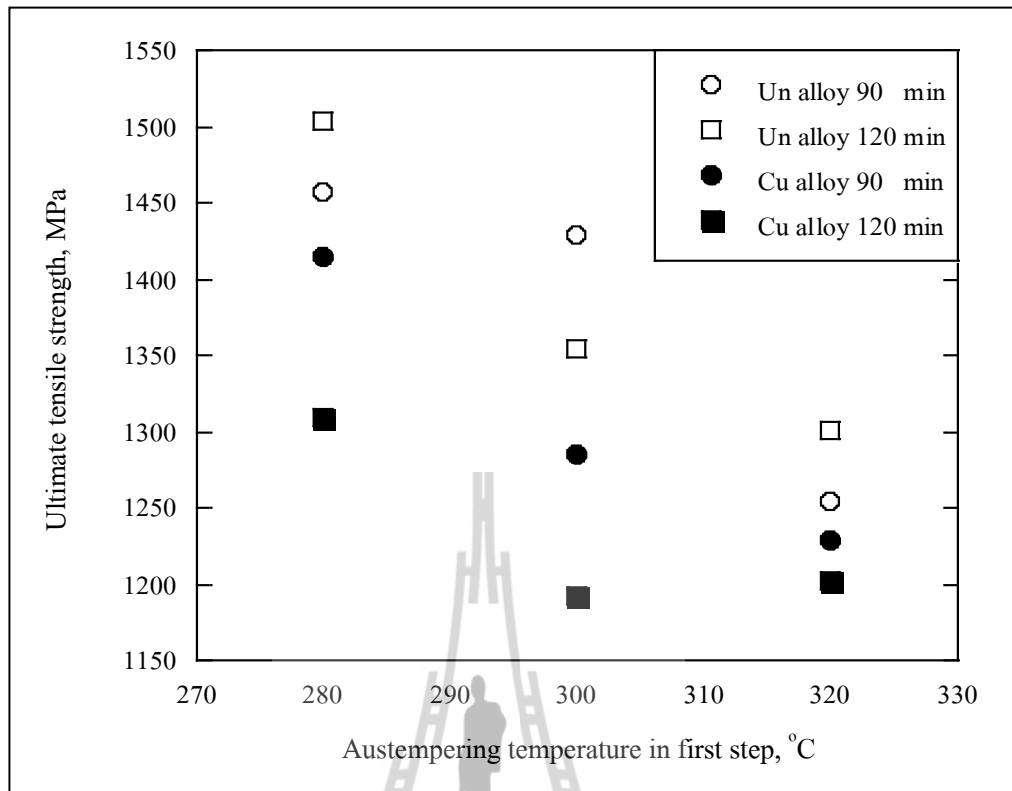
รูปที่ 4.13 พื้นผิวการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบอสเทนเปอ์ริง
ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 120 นาที
ที่กำลังขยาย 450 เท่า

4.5 ความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้ทดสอบแรงดึงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นด้วยเวลาการชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 90 และ 120 นาที เท่านั้น ซึ่งจากผลการทดสอบแรงดึงพบว่าเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส โดยมีเวลารวมเป็น 120 นาที มีค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่มีค่ามากที่สุด คือ 1163 MPa และ 1503 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นสูงขึ้นเป็น 300 และ 320 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yang and Putatunda, 2004); (Elsayed et al., 2009) โดยได้กล่าวไว้ว่า “เมื่ออุณหภูมิในการชุบออสเทมเปอร์ริงสูงขึ้นจะมีผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง” ซึ่งทั้งในงานของ (Yang and Putatunda, 2004); (Elsayed et al., 2009) ได้ให้เหตุผลไว้ว่า “เฟอร์ไรต์รูปเข็มมีลักษณะหยาบขึ้นเมื่ออุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงสูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติด้านความต้านทานแรงดึงต่ำลง” ผลการทดลองในครั้งนี้ยังพบอีกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดงให้ค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมากกว่าของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผสมทองแดง เนื่องจากธาตุผสมทองแดงมีผลทำให้ได้เฟอร์ไรต์รูปเข็มที่หยาบกว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ได้ภายหลังการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าส่วนใหญ่แล้วเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดงมีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดง เมื่อมองในภาพรวมของสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงพบว่าการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นนั้นสามารถทำให้ได้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดงที่เทียบเท่าชั้นคุณภาพในเกรด 3 และ 4 ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM A 897M-90 (Lerner and Kingsbury, 1997) ดังแสดงในรูปที่ 4.16



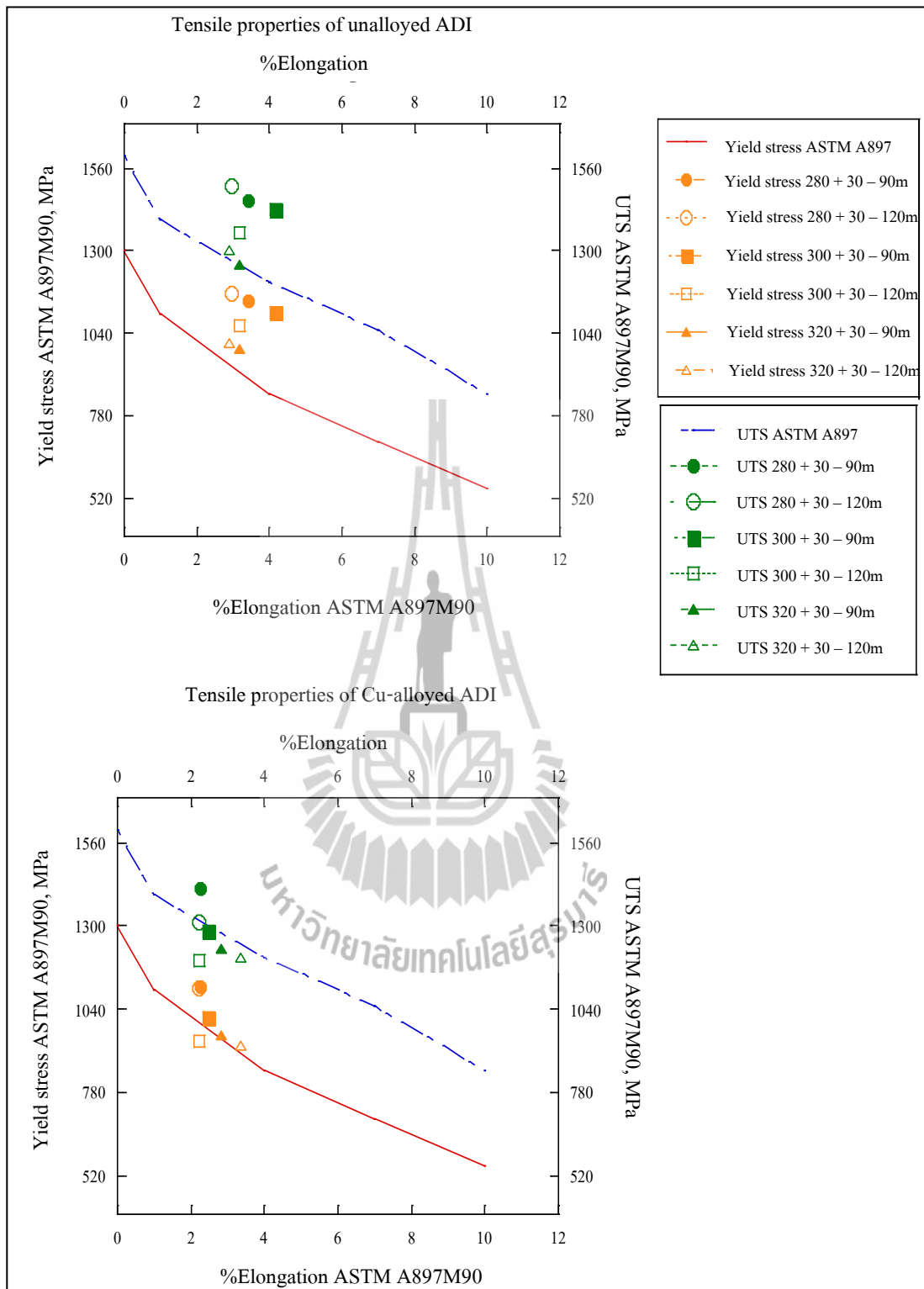
รูปที่ 4.14 ค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่ผสมทองแดง และผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์จริงแบบสองขั้น



รูปที่ 4.15 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่ผสมทองแดง และผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น

ตารางที่ 4.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ริงที่ไม่ผสมทองแดง และผสมทองแดง

สภาวะการชุบออสเทมเปอร์ริง		% การยึดตัว	
อุณหภูมิ (°C)	เวลารวม (นาที)	ไม่ผสมทองแดง	ผสมทองแดง
280 + 30	6 + 84	3.41	2.26
	6 + 114	2.95	2.22
300 + 30	6 + 84	<u>4.16</u>	2.46
	6 + 114	3.19	2.24
320 + 30	6 + 84	3.17	2.81
	6 + 114	2.88	<u>3.37</u>



รูปที่ 4.16 สมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่ผสมทองแดง และผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทนเปอร์ริ่งแบบสองชั้นเทียบกับ ชั้นคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM A 897M-90

4.6 ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์

ในการทดสอบการเสียดสีนั้นผลข้อมูลดิบได้จากการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss) โดยวัดเทียบกันก่อนและหลังการทดสอบ การได้มาของอัตราการสึกหรอนั้นต้องมีการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังการทดสอบของชิ้นงานกับระยะทางที่ทดสอบในแต่ละรอบการทดสอบ เพื่อหาค่าของอัตราการสึกหรอและเป็นการตรวจสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ด้วยวิธีการหาความสัมพันธ์ของเส้นตรงจากสมการ

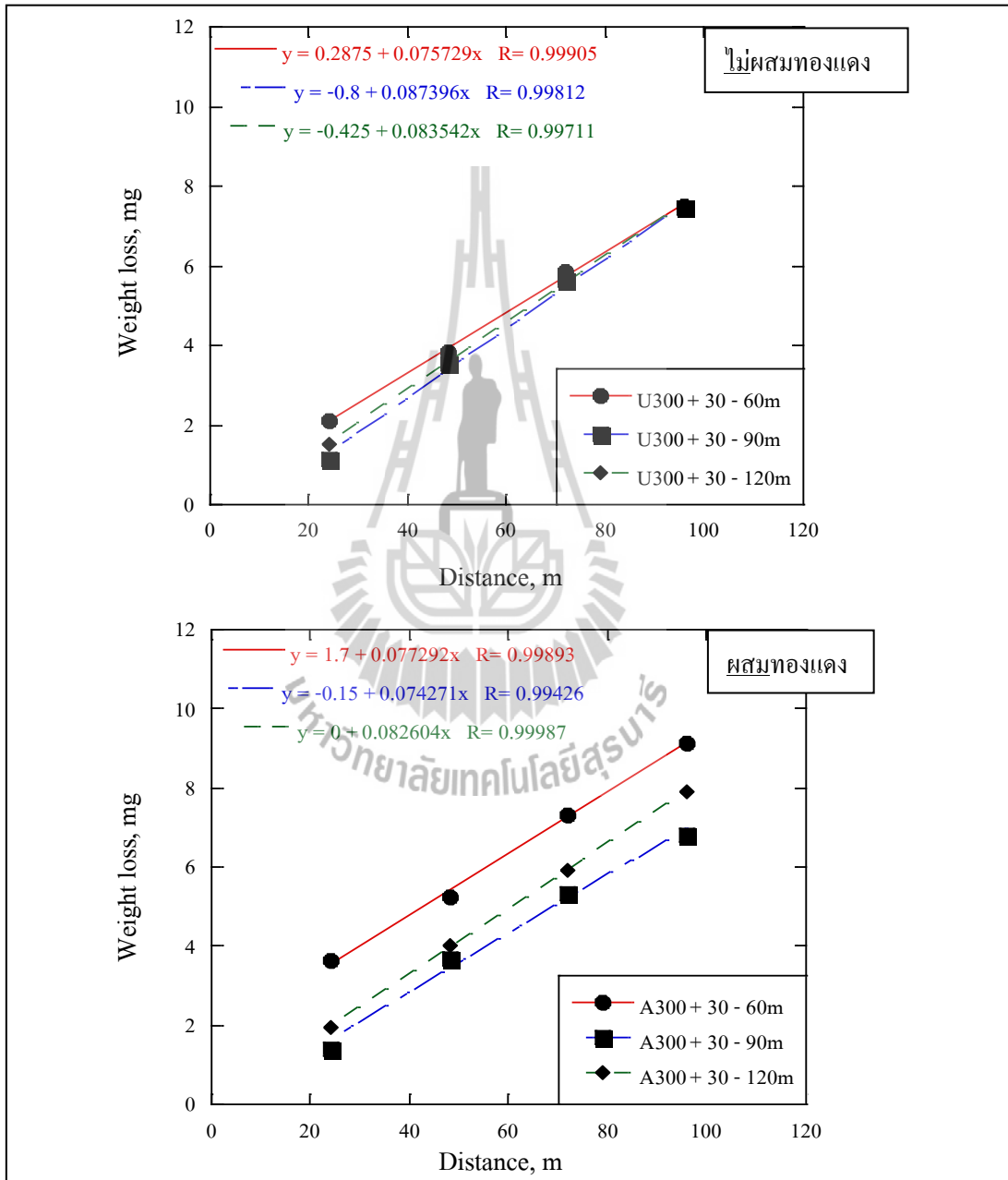
$$W_l = w_r x + C \quad (4.1)$$

โดย	W_l	คือ	น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่สูญเสียหลังการทดสอบ ในหน่วยมิลลิกรัม (weight loss)
	x	คือ	ระยะทางทั้งหมดที่ทดสอบการเสียดสีในหน่วยเมตร (distance)
	w_r	คือ	อัตราการสึกหรอในหน่วยมิลลิกรัมต่อเมตร (wear rate)
	C	คือ	ค่าคงที่สมการเส้นตรง

จากสมการจะเห็นได้ว่าความชัน (w_r) ที่ได้ก็คือ ค่าอัตราการสึกหรอในหน่วยมิลลิกรัมต่อเมตร (mg/m) นั่นเอง ซึ่งอัตราการสึกหรอที่ได้จากกราฟนี้ได้นำไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็งต่อไป

จากรูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานทดสอบกับระยะทางที่เหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ถูกทดสอบของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์รีงแบบสองชั้นด้วยอุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส และเวลารวม 60 90 และ 120 นาที ซึ่งเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการพล็อตกราฟเป็นเส้นตรง ดังนั้นเมื่อหาความสัมพันธ์ของเส้นตรงแต่ละเส้นก็จะได้อัตราการสึกหรอในหน่วยมิลลิกรัมต่อเมตร ของแต่ละชิ้นงานทดสอบ (Inthidech, Aungsupaitoon, Sricharoenchai, and Matsubara, 2010) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ภาพตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ของเส้นตรงโดยใช้โปรแกรม Kaleida Graph version 3.5b ในการช่วยคำนวณค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์รีงแบบสองชั้น โดยค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์รีงแบบสองชั้นมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 300 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 60 90 และ 120 นาที ที่ได้จากการคำนวณ คือ 0.0757 มิลลิกรัมต่อเมตร (R=0.9991) 0.0874 มิลลิกรัมต่อเมตร (R=0.9981) และ 0.0835 มิลลิกรัมต่อเมตร (R=0.9971) ตามลำดับ และค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ชุบ

ออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น ณ อุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 60 90 และ 120 นาที ที่ได้จากการคำนวณ คือ 0.0773 มิลลิกรัมต่อเมตร (R=0.9989) 0.0743 มิลลิกรัมต่อเมตร (R=0.9943) และ 0.0826 มิลลิกรัมต่อเมตร (R=0.9999) ตามลำดับ ซึ่งค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์จากการทดสอบที่ศึกษาครั้งนี้ทั้งหมด ได้แสดงไว้ในภาพผนวก ก.



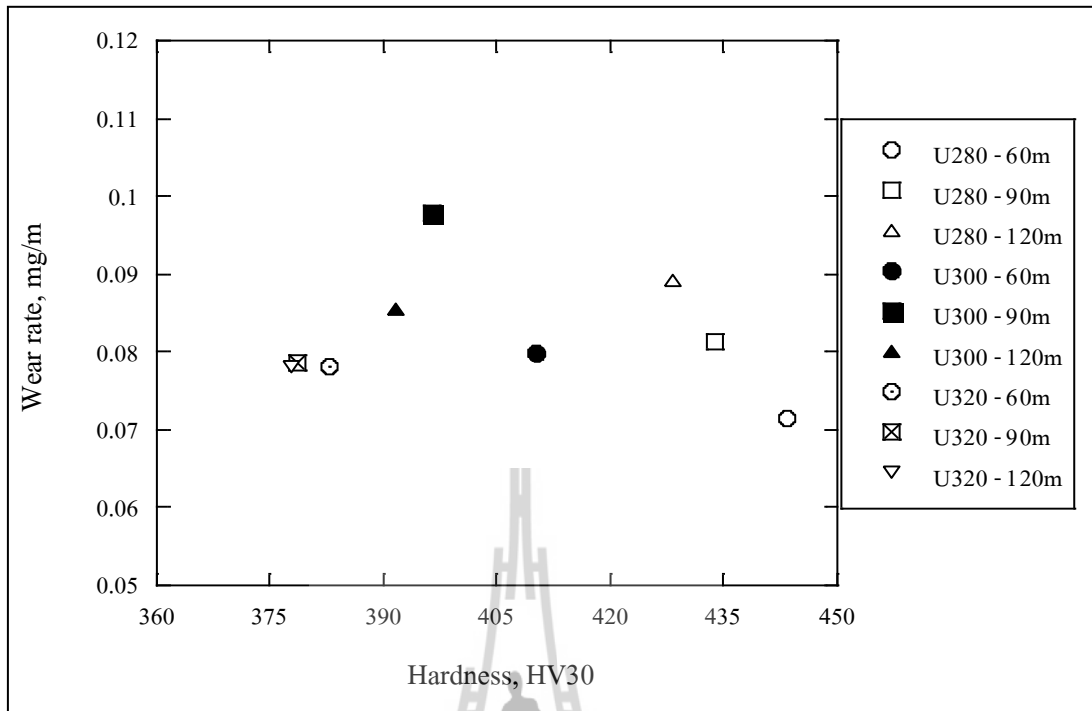
รูปที่ 4.17 น้ำหนักที่สูญเสียจากการสึกหรอเทียบกับระยะทางที่ถูกทดสอบการเสียดสีที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส

4.6.1 ค่าอัตราการสีกหรือเทียบกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น

จากผลทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดง ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (โดยตัวอย่างรหัสชิ้นงาน U280-60m มีความหมายดังนี้ คือ U=ไม่ผสมทองแดง 280 = อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส 60 = เวลาในการชุบ และ m = หน่วยเวลาเป็นนาทื) พบว่าเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงอุณหภูมิที่ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที มีค่าอัตราการสีกหรือต่ำที่สุดคือ 0.0716 มิลลิกรัมต่อเมตร ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีค่าความแข็งมากที่สุดคือ 443.3 Hv และค่าอัตราการสีกหรือมีค่ามากขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลง เมื่อพิจารณาเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาต่าง ๆ พบว่าค่าอัตราการสีกหรือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่าความแข็งที่ต่ำลง ซึ่งมีค่าอัตราการสีกหรือมากที่สุดคือ 0.0979 มิลลิกรัมต่อเมตร ส่วนกรณีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาชุบออสเทมเปอร์ริง 60 90 และ 120 นาที ค่าอัตราการสีกหรือไม่ลดลงตามค่าความแข็งและมีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.0782 0.0787 และ 0.0781 มิลลิกรัมต่อเมตร ตามลำดับ

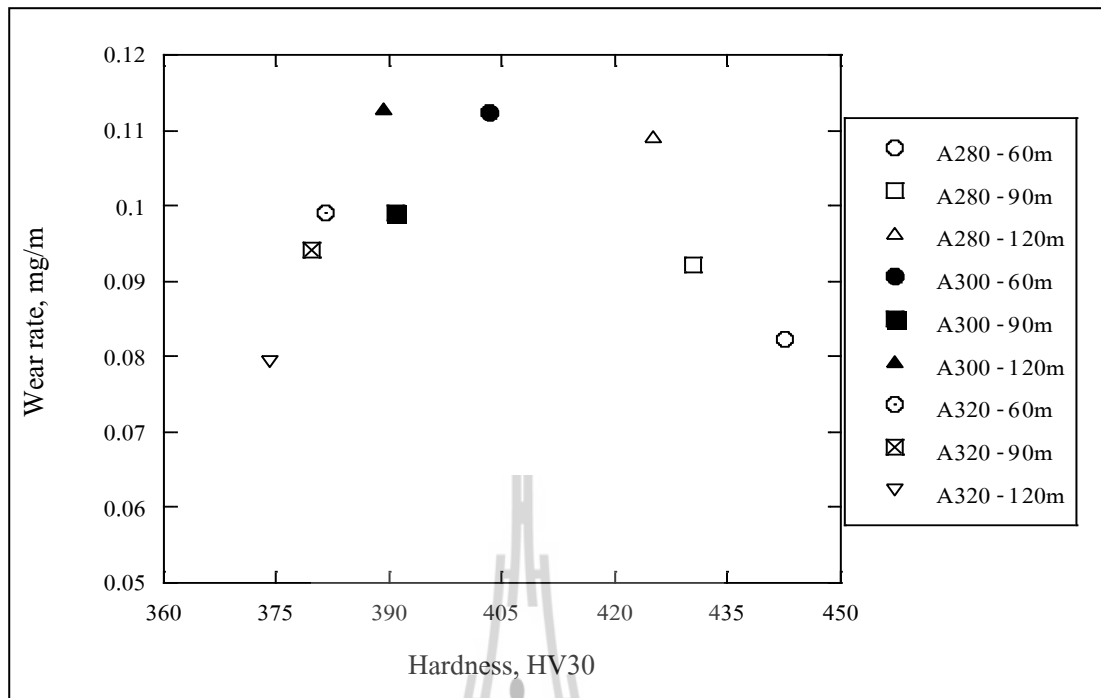
จากผลทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (โดยตัวอย่างรหัสชิ้นงาน A280-60m มีความหมายดังนี้ คือ A=ผสมทองแดง 280 = อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส 60 = เวลาการชุบ และ m = หน่วยเวลาเป็นนาทื) พบว่าเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราการสีกหรือมีค่าลดลงตามค่าความแข็งที่ต่ำลงหรือเมื่อเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นจาก 60 ไปเป็น 90 นาที และจากเวลา 90 ไปเป็น 120 นาที และที่เวลาในการชุบ 120 นาที มีค่าอัตราการสีกหรือต่ำที่สุดคือ 0.0794 มิลลิกรัมต่อเมตร และมีค่าความแข็งน้อยสุด คือ 374.0 Hv แนวโน้มนี้ต่างกับเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเดียวกันซึ่งค่าอัตราการสีกหรือมีแนวโน้มคงที่ จากนั้นเมื่อพิจารณาเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาต่าง ๆ กัน ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราการสีกหรือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ต่ำลง เช่นเดียวกับที่พบในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดง โดยเหล็กหล่อเหนียวที่ชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที มีค่าอัตราการสีกหรือมากที่สุดคือ 0.1091 มิลลิกรัมต่อเมตร ส่วนเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 90 และ 120 นาที ค่าอัตราการสีกหรือมีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ต่ำลง

เมื่อพิจารณาผลทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวที่ผสมทองแดงและไม้ผสมทองแดงภายหลังจากการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่าการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งสองส่วนผสมกลับมีแนวโน้มลดลงตามค่าความแข็งต่ำลง (หรือเมื่อเวลารวมออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้น) โดยเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 120 นาที มีค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดคือ 0.0581 มิลลิกรัมต่อเมตร และมีค่าความแข็งอยู่ที่ 410.7 Hv ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ในขณะที่สภาวะการชุบออสเทมเปอร์ริงเดียวกันนี้ เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอเป็น 0.0644 มิลลิกรัมต่อเมตร และมีค่าความแข็งอยู่ที่ 422.7 Hv ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอมากกว่าแม้ว่ามีค่าความแข็งสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดง ต่อมาเมื่อพิจารณาค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งสองส่วนผสมที่มีอุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส พบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดงมีแนวโน้มค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเล็กน้อยตามค่าความแข็งที่ลดลง ส่วนกรณีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดงมีแนวโน้มค่าอัตราการสึกหรอลดลงและเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ต่ำลง จากนั้นเมื่อพิจารณาค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งสองส่วนผสมที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส พบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดคือ 0.0578 มิลลิกรัมต่อเมตร โดยมีค่าความแข็งอยู่ที่ 378.5 Hv ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีเวลารวมในการชุบออสเทมเปอร์ริง 60 นาที และมีค่าความแข็งสูงสุดในกลุ่ม โดยค่าอัตราการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วค่าลดลงเล็กน้อยตามค่าความแข็งที่ต่ำลง ในขณะที่เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดงกลับมีแนวโน้มของค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ต่ำลงเมื่อเวลารวมออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นจาก 60 เป็น 90 นาที และจาก 90 เป็น 120 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

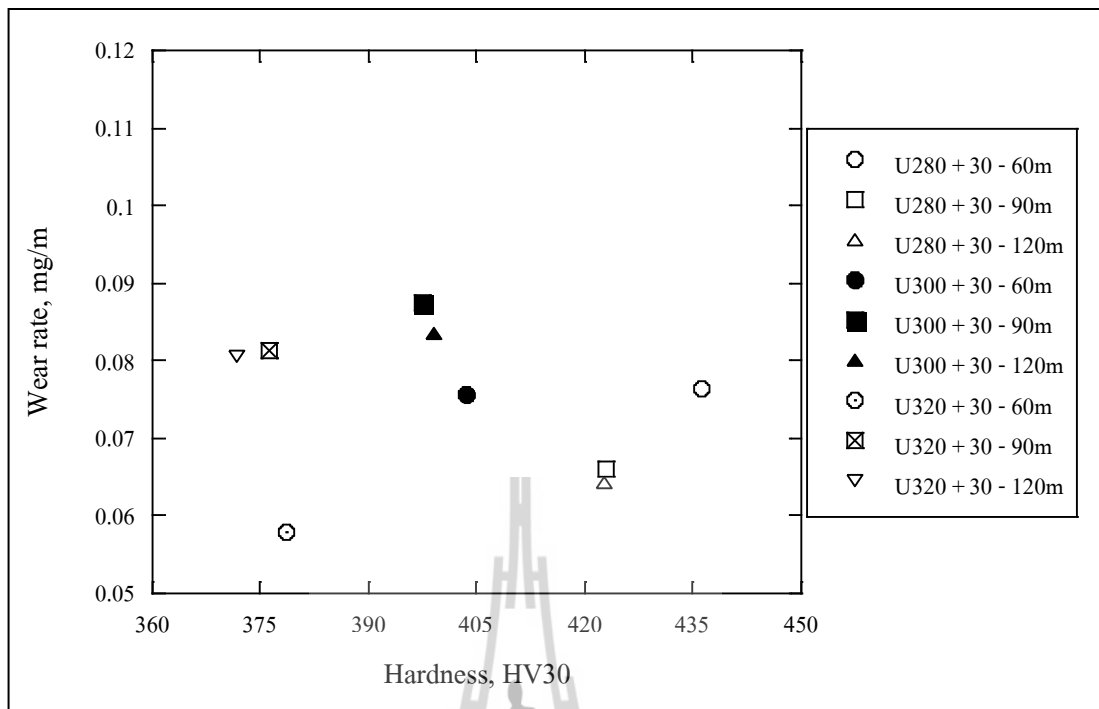


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียว
ไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว



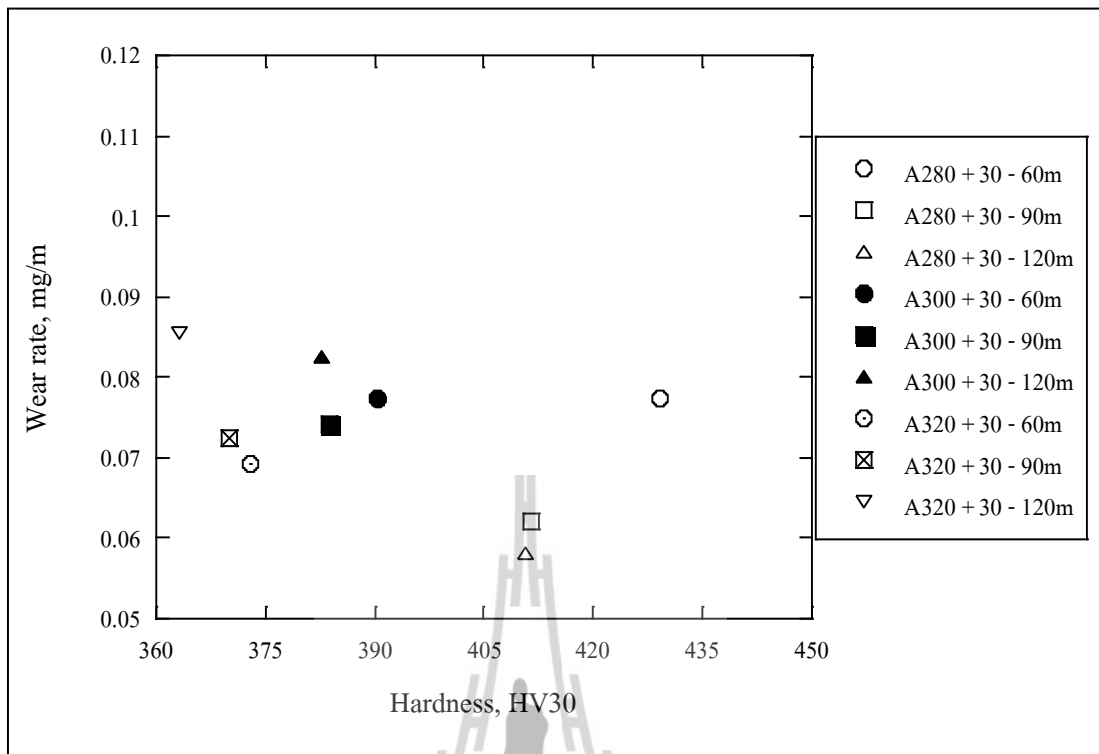


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียว
ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอ์ริงแบบชั้นเดียว



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียว
ไม่ผสมทองแดง ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น





รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบสองชั้น

4.6.2 อภิปรายผลการทดสอบความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอ์ริงที่ผ่านการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น

จากค่าอัตราการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอ์ริงที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.6.1 พบว่าการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้นของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอ์ริงที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดง ให้ลักษณะแนวโน้มของค่าอัตราการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งชัดเจนเมื่ออุณหภูมิการชุบออสเทนเปอ์ริงเริ่มต้นเป็น 280 และ 320 องศาเซลเซียส ส่วนกรณีอุณหภูมิการชุบออสเทนเปอ์ริงเริ่มต้นที่ 300 องศาเซลเซียสนั้น ให้ลักษณะแนวโน้มของค่าอัตราการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งไม่ชัดเจนเท่าไรนัก

เหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอ์ริงที่ผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิชุบออสเทนเปอ์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส ได้ให้ลักษณะแนวโน้มของค่าอัตราการสึกหรอแข็งเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ต่ำลงหรือเมื่อเวลาในการชุบออสเทนเปอ์ริงนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 อาจเป็นไปได้ว่าการชุบออสเทนเปอ์ริงที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ยังมีเฟสมาร์เทนไซต์จำนวนมากเนื่องจากคาร์บอนที่แพร่ออกจากเฟอร์ไรต์นั้นแพร่ไปยังออสเทนไนต์ได้ไม่มากพอที่จะทำให้ออสเทนไนต์มี

เสถียรภาพภายหลังการเย็นตัว และเมื่อเวลาการชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที ค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามความแข็งที่ต่ำลง อาจเป็นผลมาจากมาร์เทนไซต์ที่มีปริมาณลดลงและมีออสเทนไนต์เหลือค้างมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Perez et al., 2006) ที่ได้ศึกษาความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบ block on ring ของเหล็กหล่อเหนียวที่มีส่วนผสมเป็น 0.66%Cu 1.02%Ni และ 0.26%Mo โดยผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิ 315 และ 370 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 5 15 30 60 90 120 และ 240 นาที แล้วเย็นตัวในน้ำ พบว่าเมื่อเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สัดส่วนโดยปริมาตรของมาร์เทนไซต์ลดลงและสัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาในช่วงที่ 1 คือ ออสเทนไนต์เริ่มต้นเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มกับออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง

จากนั้นเมื่อพิจารณาการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวของเหล็กหล่อเหนียว ออสเทมเปอร์ทั้งสองส่วนผสมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่าแนวโน้มของค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดงเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อค่าความแข็งต่ำลง (เวลาออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น) ซึ่งคาดว่า การชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีนั้น อาจมีเฟสมาร์เทนไซต์อยู่ภายในเนื้อพื้นของชิ้นงาน ต่อมาเมื่อพิจารณาที่เวลาชุบออสเทมเปอร์ริงจาก 60 ไป 90 นาที ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลง (เวลาออสเทมเปอร์ริงที่ 60 ไป 90 นาที) ซึ่งอาจเป็นเพราะเฟสมาร์เทนไซต์ลดลงและออสเทนไนต์เหลือค้างมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามที่ได้กล่าวมาแต่ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ยังไม่มากพอที่จะช่วยเพิ่มความต้านทานการเสียดสีได้ดี จากนั้นเมื่อเวลาออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นจาก 90 ไปเป็น 120 นาที ค่าอัตราการสึกหรอลดลงตามค่าความแข็งอาจเป็นเพราะปริมาณเฟอร์ไรต์ที่เพิ่มขึ้นและปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างก็เพิ่มขึ้น โดยออสเทนไนต์เหลือค้างมีคาร์บอนสูงและช่วยเพิ่มความต้านทานการเสียดสีอันเนื่องมาจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงเมื่อได้รับความเครียดจะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงเป็นเวลา 60 นาที มีมาร์เทนไซต์ในเนื้อพื้นระหว่างช่องของออสเฟอร์ไรต์แต่เมื่อเวลาการชุบออสเทมเปอร์เพิ่มขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที ตามลำดับ ไม่พบมาร์เทนไซต์ เมื่อพิจารณาเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่าค่าอัตราการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งมีแนวโน้มตรงข้ามกับของเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบด้วยอุณหภูมิเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าอัตราการสึกหรอลดลงแล้วเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ต่ำลง (เวลาการชุบออสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้น) จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 6500 เท่า ดังในรูปที่ 4.23 พบว่าที่เวลาการชุบออสเทมเปอร์ริงเป็น 60 และ 90 นาที มีเฟสมาร์เทนไซต์ปรากฏในเนื้อพื้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนที่เวลา 120 นาที ไม่พบ

เฟสมาร์เทนไซต์ ซึ่งจากลักษณะ โครงสร้างที่ตรวจพบดังกล่าวสอดคล้องกับค่าอัตราการสึกหรอที่ได้จากการทดสอบความต้านทานการเสียดสี โดยที่เวลาการชุบ 90 นาทีนั้น ยังคงปรากฏมาร์เทนไซต์อยู่มากในขณะที่การเปลี่ยนเป็นออสเฟอไรต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย การตรวจพบมาร์เทนไซต์ในชิ้นงานที่มีเวลาในการชุบ 90 นาที ยังเป็นการยืนยันว่าทองแดงนั้นหน่วงเวลาในการเปลี่ยนเฟสช่วงที่ 1

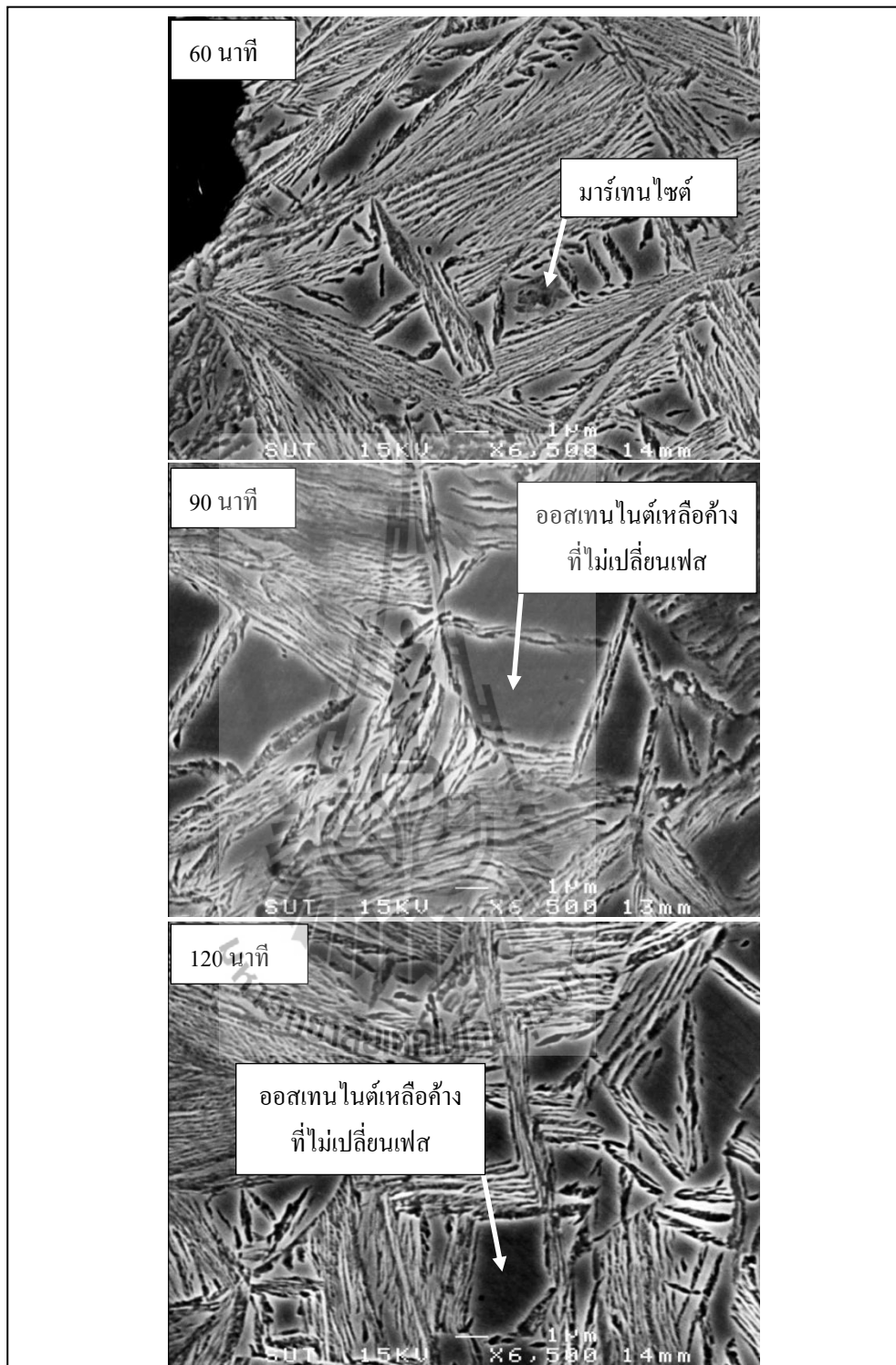
เมื่อพิจารณาการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวของเหล็กหล่อเหนียว ออสเทมเปอร์ทั้งสองส่วนผสมที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส พบว่าแนวโน้มของค่าอัตราการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดงคงที่ แต่กรณีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดง พบว่าค่าอัตราการสึกหรอลดลงตามค่าความแข็งที่ต่ำลง ซึ่งอาจเป็นเพราะมีปริมาณเฟสออสเทนไนต์เหลือค้างที่มีคาร์บอนสูงเกิดขึ้นจำนวนมาก เมื่อเวลาออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น ดังนั้นเมื่อชิ้นงานทดสอบได้รับแรงเค้นมากกระทำที่ผิวชิ้นงานขณะทดสอบการเสียดสีจึงอาจทำให้ออสเทนไนต์เหลือค้างเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์และสามารถต้านทานการเสียดสีต่อไปได้ นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นอีกครั้งหนึ่งว่าทองแดงนั้นหน่วงเวลาในการเปลี่ยนเฟสช่วงที่ 1

ส่วนกรณีการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นด้วยอุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดง พบว่าค่าอัตราการสึกหรอลดลงตามค่าความแข็งที่ต่ำลง ส่วนการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นด้วยอุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส มีลักษณะแนวโน้มของค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลง ส่วนกรณีการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 300 องศาเซลเซียส ของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดง พบว่าค่าอัตราการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งมีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

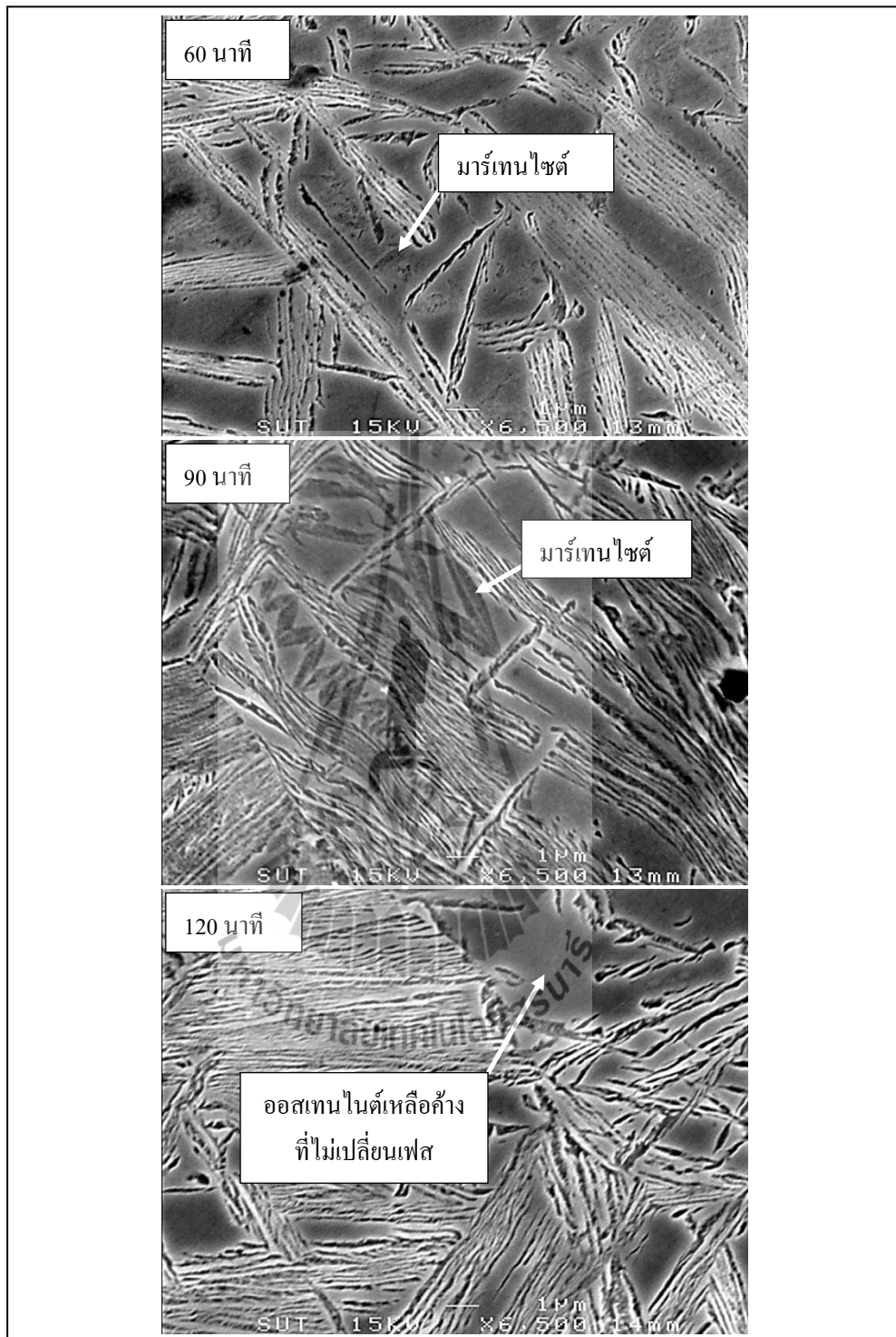
การชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นก็เพื่อให้ได้โครงสร้างออสเฟอไรต์ที่มีเฟอไรต์รูปเข็มที่ละเอียดและออสเทนไนต์ที่มีคาร์บอนสูง ซึ่งส่งผลให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น อาทิเช่น ความแข็งสูง ความต้านทานแรงดึงจุดครากสูง รวมทั้งมีความต้านทานต่อการเสียดสีสูงด้วย (Yang and Putatunda, 2005) และจากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวทั้งสองส่วนผสมที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น จะมีค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวเป็นส่วนใหญ่ โดยเห็นได้ชัดว่าเหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาการชุบ 60 นาที มีค่าอัตราการสึกหรอ ต่ำที่สุดสำหรับการทดสอบครั้งนี้ ส่วนเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบ

สองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที มีค่าอัตราการสึกหรอต่ำรองลงมา ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yang and Putatunda, 2005) โดยได้ศึกษาผลกระทบจากโครงสร้างจุลภาคที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น โดยทดลองด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีตามมาตรฐาน (ASTM standard G132-96, 2001) พบว่าเมื่อเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีสัดส่วนโดยปริมาตรของออสเทนไนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้น้ำหนักที่สูญเสียจากการสึกหรอมากขึ้นตาม (Yang and Putatunda, 2005) ได้ให้เหตุผลว่าออสเทนไนต์มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC และมีความเหนียวมากกว่าเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC จึงทำให้ต้านทานการสึกหรอได้น้อยลง แต่เนื่องจากออสเทนไนต์เป็นเฟสที่มีความสามารถในการเกิดกลไกเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียดสูง จึงทำให้ออสเทนไนต์สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ได้เมื่อมีความเครียดสะสมเพียงพอที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส ส่งผลให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีขึ้น ซึ่งเหตุผลนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ (Francucci et al., 2008); (Perez et al., 2006)

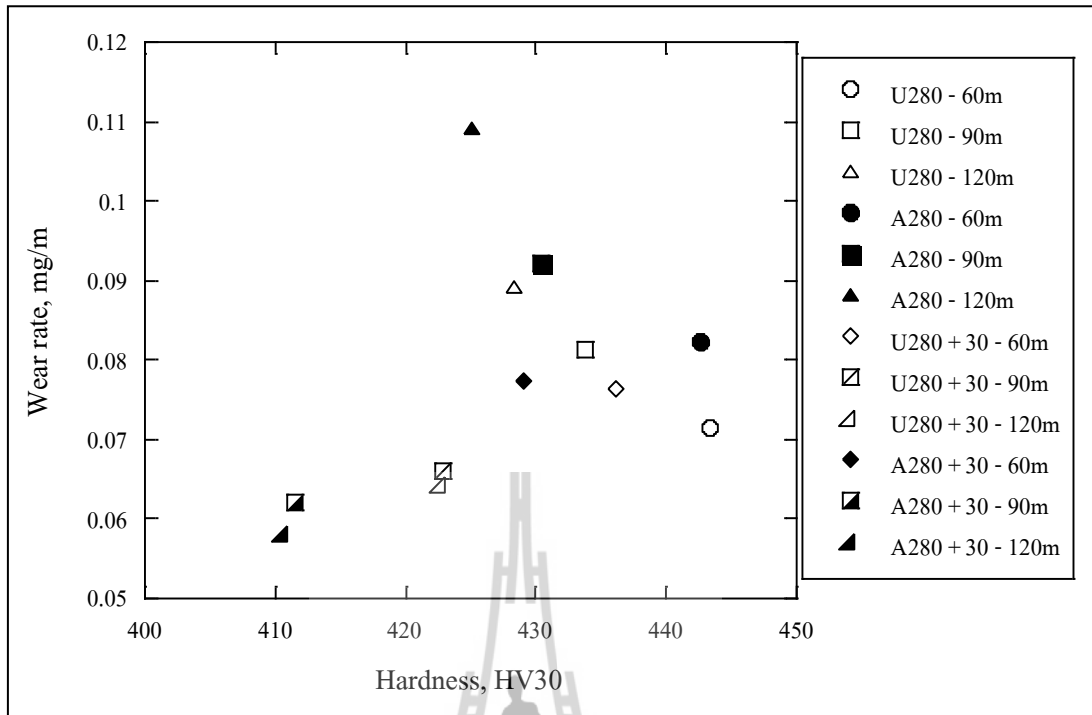
เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณใต้พื้นผิวที่ทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ทั้งสองส่วนผสมที่ได้จากการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นในสถานะที่ให้ค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุด คือ เหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 60 นาที และเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลารวม 120 นาที ไม่สามารถตรวจพบเฟสมาร์เทนไซต์ตรงบริเวณใต้พื้นผิวที่ถูกการเสียดสี ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แต่เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวดังกล่าวที่บริเวณภายในชิ้นงาน พบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดงมีเฟสมาร์เทนไซต์ปรากฏภายในเนื้อพื้นค่อนข้างมาก เพราะใช้เวลาชุบออสเทมเปอร์ริงเป็น 60 นาที แต่สำหรับเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดงนั้น ไม่พบมาร์เทนไซต์แล้ว เนื่องจากเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงเป็น 120 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.26



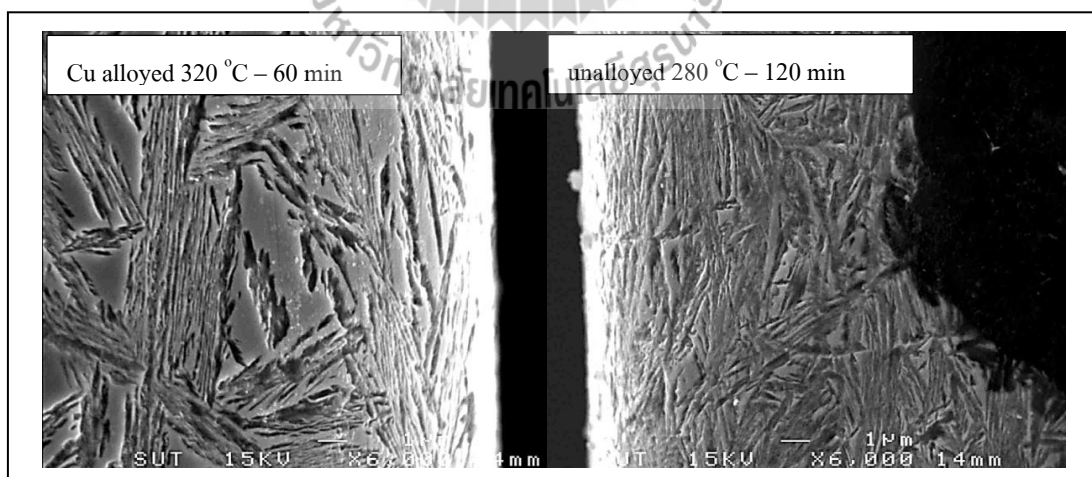
รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6500 เท่า ของเหล็กหล่อเหนียว
ไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียว
ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



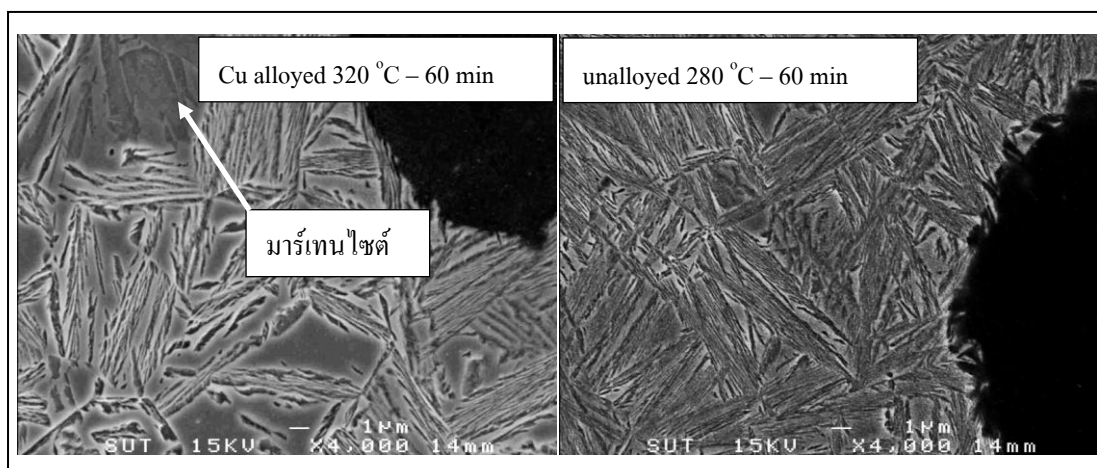
รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6500 เท่า ของเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียว ออสเทนเปอไรต์ที่ไม่ผสมทองแดงและผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทนเปอไรต์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.25 ภาพถ่าย SEM ได้พื้นผิวที่ถูกการเสียดสีที่กำลังขยาย 6000 เท่า ของเหล็กหล่อเหนียว ออสเทนเปอไรต์ที่ผ่านการชุบออสเทนเปอไรต์ริงแบบสองชั้น



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค SEM ที่กำลังขยาย 4000 เท่า ของเหล็กหล่อเหนียว ออสเทนเปอ์ที่ผ่านการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบสองชั้น

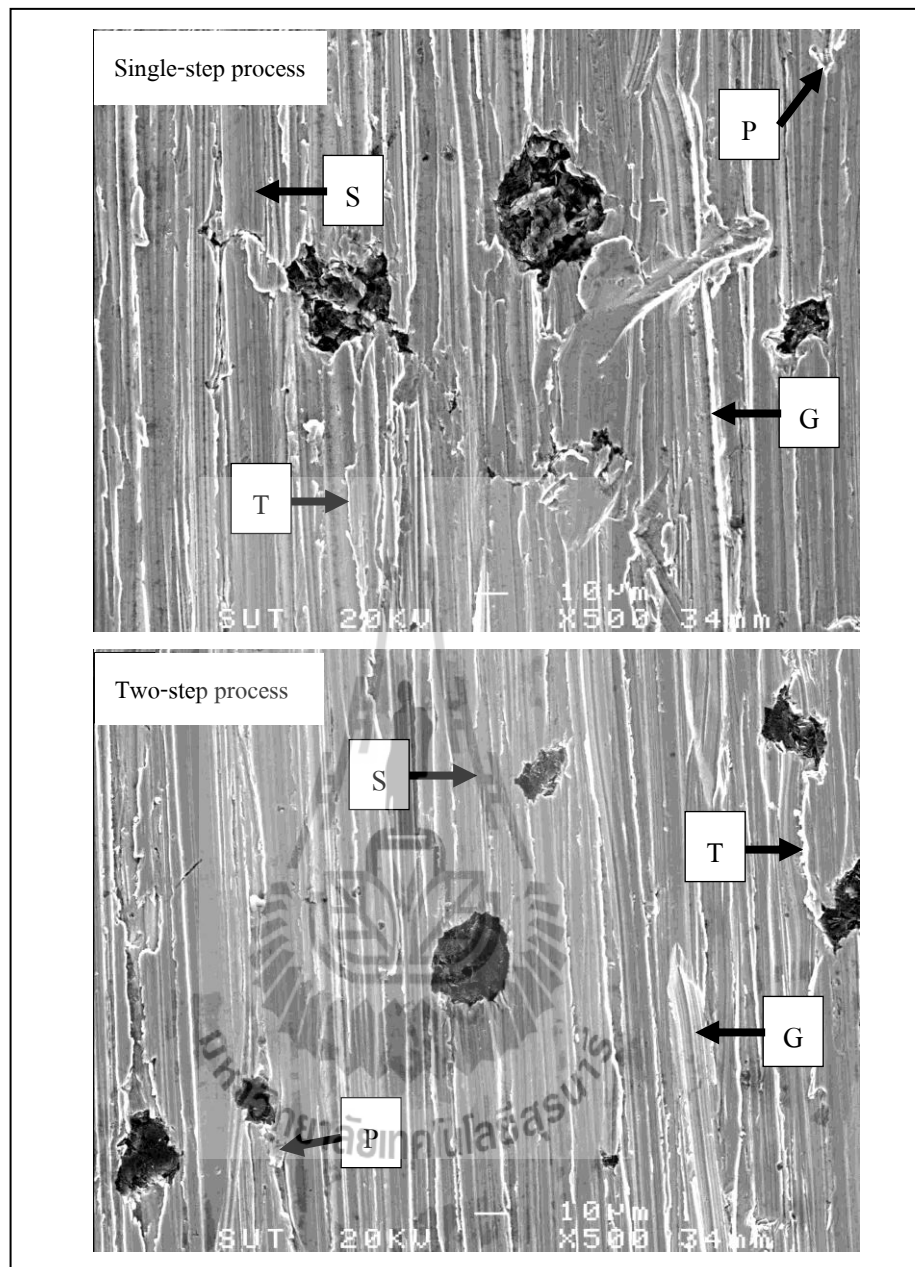
เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวทั้งที่ผสมทองแดง และไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น พบว่าเหล็กหล่อเหนียว ออสเทนเปอ์ที่ไม่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าเหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงเสมอ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าธาตุทองแดงที่เติมเข้าไปในเหล็กหล่อเหนียว 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ได้มีส่วนช่วยเพิ่มความต้านทานการเสียดสีให้แก่เหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอ์แต่อย่างใด และค่าอัตราการสึกหรอที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปเป็นแนวโน้มได้สองลักษณะคือ

1. ค่าอัตราการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ต่ำลง ซึ่งได้แก่เหล็กหล่อเหนียวทั้งสองส่วนผสมที่ผ่านการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส
2. ค่าอัตราการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงตามค่าความแข็งที่ต่ำลง ซึ่งได้แก่เหล็กหล่อเหนียวทั้งสองส่วนผสมที่ผ่านการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบสองชั้นที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอ์ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทนเปอ์ริงแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส
3. ค่าอัตราการสึกหรอที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ต่ำลงน่าจะเป็นผลจากการมีเฟสมาร์เทนไซต์ในเนื้อพื้่นน้อยลง และมีออสเทนไนต์เหลือค้างเพิ่มขึ้นตามเวลาในการชุบที่นานขึ้น แต่ออสเทนไนต์เหลือค้างที่เพิ่มขึ้นยังไม่มีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มความต้านทานการเสียดสี

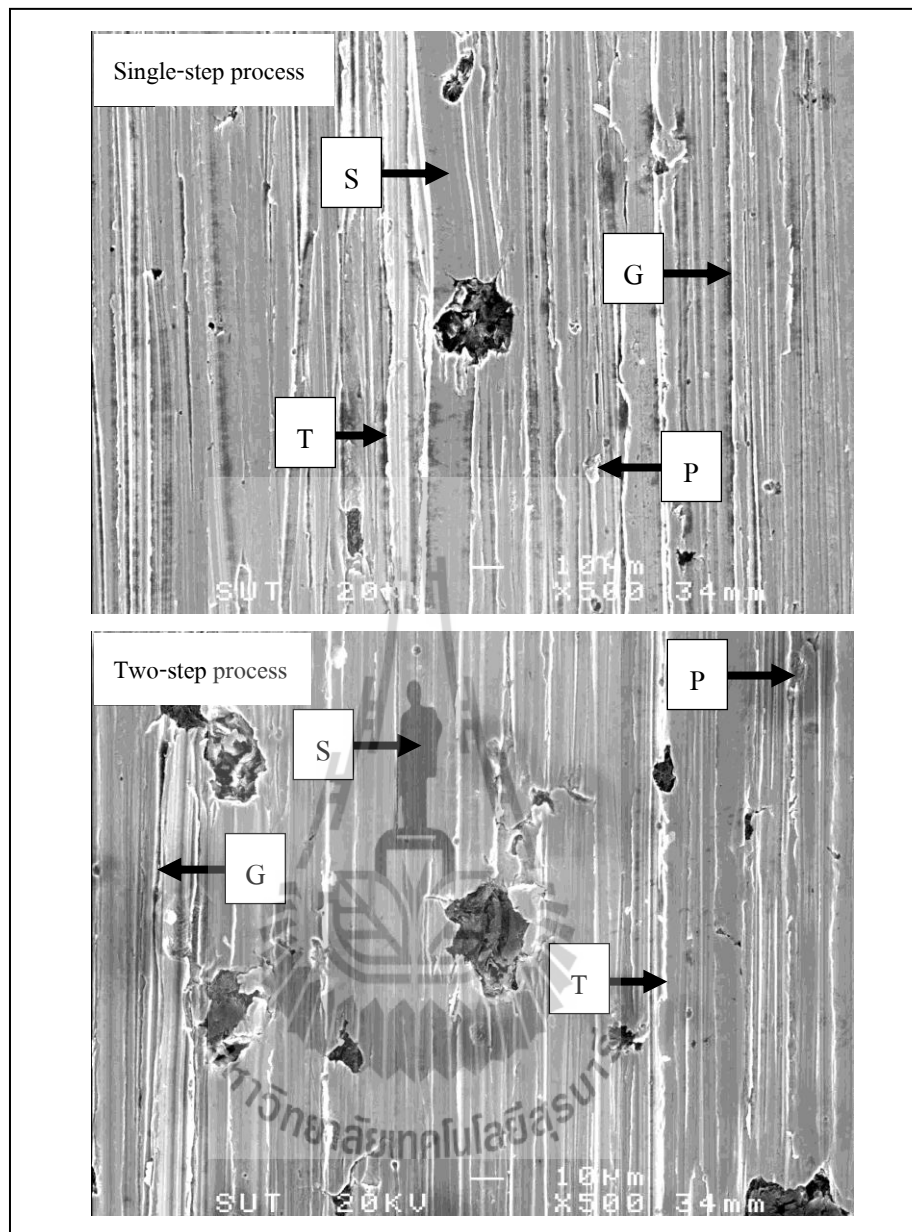
ส่วนกรณีค่าอัตราการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงตามค่าความแข็งที่ต่ำลงน่าจะเป็นผลจากการมีเฟสมาร์เทนไซต์ลดลงและมีออสเทนไนต์เหลือค้างเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยออสเทนไนต์ที่เกิดขึ้นในเนื้อพื้นมีคาร์บอนสูง จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มความต้านทานการเสียดสีได้ดีขึ้น

4.6.3 ตรวจสอบพื้นผิวความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปเปอร์ที่ผ่านการชุบออสเทนเปเปอร์จริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น

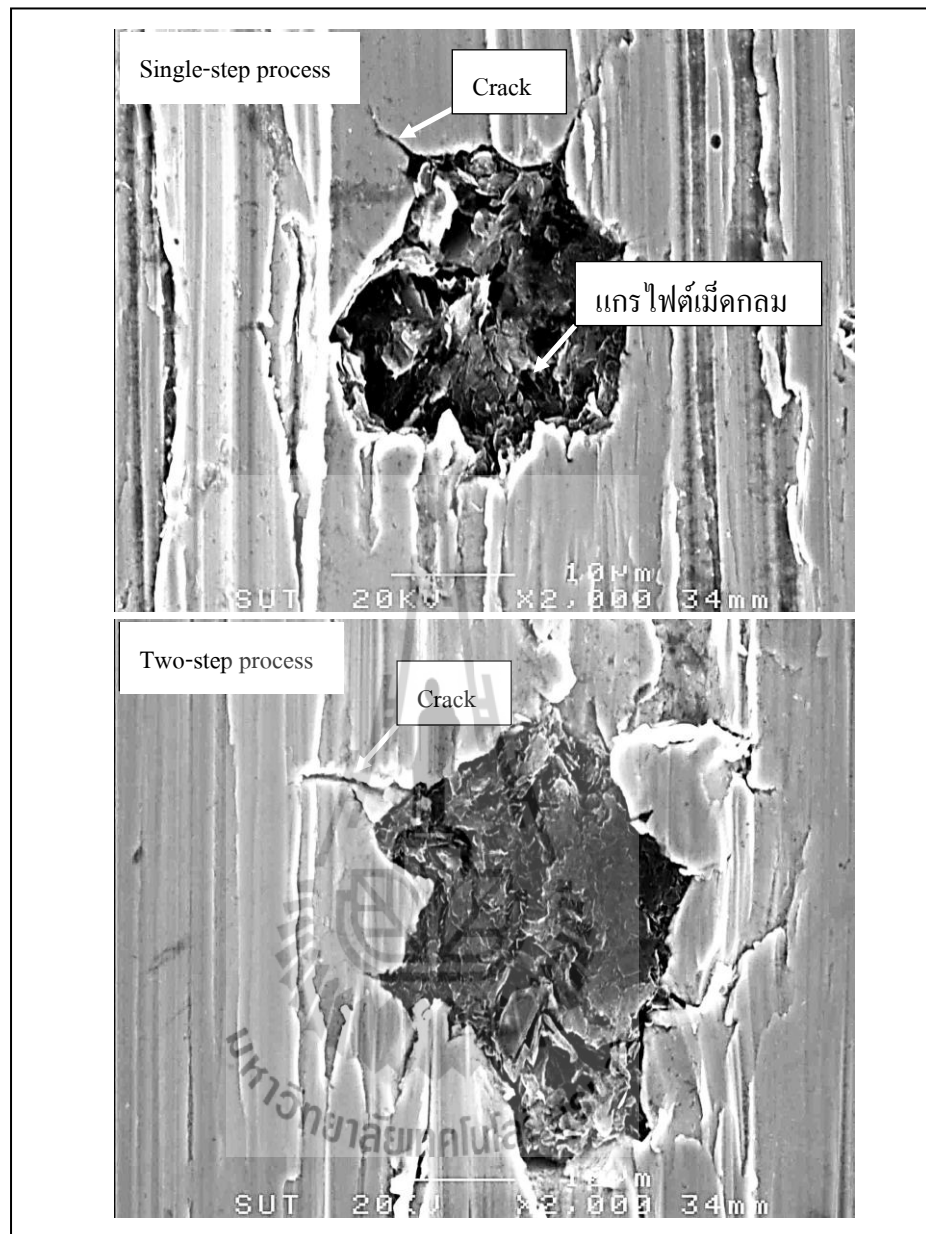
จากผลการทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปเปอร์ทั้งสองส่วนผสมที่ผ่านการชุบออสเทนเปเปอร์จริงแบบชั้นเดียวและสองชั้น พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการเสียดสีด้วยเครื่อง Suga tester abrasion wear มีลักษณะความเสียหายที่คล้ายกันทั้งหมดทุกชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ซึ่งเป็นภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยจะเห็นได้ว่าการทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัสดุด้วยเครื่อง Suga tester abrasion wear ทำให้เกิดลักษณะความเสียหายบนพื้นผิวของชิ้นงานในรูปแบบเป็นร่อง (Grooving) รอยฉีก (Tearing) รอยขีดข่วน (Scratching) และ รูเข็ม (Pitting) ซึ่งลักษณะความเสียหายในแบบต่างๆ ที่กล่าวมาส่วนใหญ่เกิดขึ้นตามบริเวณเนื้อพื้นซึ่งประกอบไปด้วยเฟอไรต์รูเข็มและออสเทนไนต์เหลือค้างของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปเปอร์ทั้งสองส่วนผสม ซึ่งจากภาพถ่าย SEM ได้แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดความเสียหายจากการทดสอบการเสียดสีมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างฉฉาวเนื่องจากการเสียดสีกันระหว่างอนุภาคของ SiC ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความแข็งสูงกับเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปเปอร์ระหว่างที่ทดสอบ ดังนั้นเมื่ออนุภาคของ SiC เสียดสีกับเนื้อพื้นของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปเปอร์จึงทำให้เกิดการตัดเฉือนเนื้อวัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่าหลุดออกไป ในขณะที่ชิ้นงานถูกตัดเฉือนเนื้อวัสดุออกไปอนุภาคของ SiC ก็จะมีขนาดเล็กลงและมีเศษอนุภาคหลุดออกมาเช่นกัน ซึ่งเศษอนุภาคที่หลุดออกมาทั้งของเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือนและอนุภาคของ SiC จะรวมตัวกันและเกิดการเสียดสีต่อในบริเวณถัดไป (De Pellegrin, Torrance, and Haran, 2009) เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.27 และ 4.28 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวชิ้นงานทดสอบเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปเปอร์ภายหลังการทดสอบมีรอยแตกเกิดขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ แกรไฟต์ และเมื่อถ่ายภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (SE-SEM) ที่กำลังขยายสูงขึ้นเป็น 2,000 เท่า พบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมาจากแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งสอดคล้องกับ (Perez et al, 2006) ที่กล่าวว่า “รอยต่อระหว่างแกรไฟต์กับเนื้อพื้นของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปเปอร์มีผลต่อจุดที่เริ่มเกิดการสึกหรอ” เพราะเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปร่างที่บริเวณระหว่างรอยต่อจะส่งผลให้เกิดรอยแตกขึ้นที่บริเวณนี้ โดยรอยแตกจะเกิดขึ้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคแกรไฟต์เมื่อได้รับภาระแรงจากการถูกเสียดสี ซึ่งรอยแตกนี้จะโตต่อไปยังพื้นผิวที่เกิดการสึกหรอและให้เศษอนุภาคที่หลุดออกมาจากชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.27 พื้นผิวความเสียหายภายหลังการทดสอบการเสียดสีของ
เหล็กหล่อเหนียวไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริง
ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.28 พื้นผิวความเสียหายภายหลังการทดสอบการเสียดสีของ
 เหล็กหล่อเหนียวผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออกสเตมเปอร์ริง
 ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที



รูปที่ 4.29 รอยแตกภายหลังการทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียว
ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบอสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ
อสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 320 องศาเซลเซียส
ด้วยเวลา 120 นาที

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาความต้านการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวที่ผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้น ซึ่งได้ทดลองด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน (Two-body type Suga abrasion wear tester) แล้วตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงดึงจุดคราก ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทก สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

5.1.1 เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดงมีอัตราการสึกหรอสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ไม่ผสมทองแดง ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงจุดคราก ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกมีค่าต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคของเนื้อพื้นออสเฟอไรต์ที่หยาบกว่าเล็กน้อย

5.1.2 เหล็กหล่อเหนียวทั้งที่ผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดงที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นส่วนใหญ่ค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียว โดยเฉพาะเมื่อชุบที่อุณหภูมิต่ำ คือ 280 องศาเซลเซียส

5.1.3 เหล็กหล่อเหนียวที่ผสมทองแดงและไม่ผสมทองแดงเมื่อผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวที่ 280 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงซึ่งเทียบเป็นเวลาการชุบที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อชุบแบบสองชั้นค่าอัตราการสึกหรอลดลงตามค่าความแข็งที่ลดลงซึ่งเทียบเป็นเวลาการชุบที่เพิ่มขึ้น และการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสนี้ ให้ค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวอย่างชัดเจน

5.1.4 เหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวที่ 300 องศาเซลเซียส ถ้าไม่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นแล้วลดลงตามค่าความแข็งที่ลดลงซึ่งเทียบเป็นเวลาการชุบที่เพิ่มขึ้น ถ้าผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอลดลงแล้วเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงซึ่งเทียบเป็นเวลาการชุบที่เพิ่มขึ้น และถ้าชุบแบบสองชั้นก็ให้แนวโน้มลักษณะเดียวกัน นอกจากนี้การชุบแบบสองชั้นที่ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าแบบชั้นเดียว โดยเฉพาะในกรณีเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดงให้ค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจน

5.1.5 เหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวที่ 320 องศาเซลเซียส ถ้าไม่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอคงที่ตามค่าความแข็งที่ลดลงเล็กน้อย ส่วนที่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอลดลงตามค่าความแข็งที่ลดลงซึ่งเทียบเป็นเวลาการชุบที่เพิ่มขึ้น และถ้าชุบแบบสองชั้นกรณีที่ไม่ผสมทองแดงมีค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงเล็กน้อย โดยค่าอัตราการสึกหรอที่เวลารวม 60 นาทีนั้นต่ำที่สุด ซึ่งเป็นเพราะมีมาร์เทนไซต์อยู่มาก ส่วนที่ผสมทองแดงก็ให้ค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงเช่นกัน

5.1.6 ธาตุทองแดงที่ผสมในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึงจุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความแข็งและความต้านทานการเสียดสี ซึ่งเป็นผลมาจากการหน่วงปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟส ชั้นที่ 1 โดยสังเกตได้ชัดว่าเนื้อพื้นออสเฟอไรต์หยาบขึ้นเมื่อผสมทองแดง

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

5.2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

กรณีที่ต้องการศึกษาอิทธิพลของธาตุทองแดง ควรควบคุมธาตุผสมรองชนิดอื่นในเหล็กหล่อเหนียวกราไฟต์กลมให้มีปริมาณเท่ากัน เพื่อป้องกันผลกระทบจากธาตุผสมอื่นที่ไม่ต้องการจะศึกษา

5.2.2 การเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

ต้องควบคุมความเรียบผิวของชิ้นงานทดสอบให้มีความเรียบผิวเท่ากันทุกชิ้นและมีความเรียบสม่ำเสมอกันตลอดพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นงานในขณะเริ่มต้นทดสอบการเสียดสี

รายการอ้างอิง

- ปนัดดา นิรนาทลำพองศ์ และคณะ. 2547. การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม. ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- มนัส สติรจินดา. 2543. เหล็กหล่อ. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- Bayer, R.G. (1994). Mechanical wear prediction and prevention. **Marcel Dekker. INC.** pp. 21-26.
- Borg, R.J, and Dienes, G.J. (1992). The Physical Chemistry of Solids. **Academic Press Inc. Limited.** Boston. pp. 521-525.
- Jackson, K.A. (2004). Kinetic Process. **WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim.** pp. 175-199.
- Porter, D.A., and Easterling, K.E. (1992). Phase transformations in metals and alloys. **Chapman & Hall.** 2nd ed. London. pp. 186-290.
- Amran, Y., Katsman, A., Schaaf, P., and Bamberger, M. (2010). Influence of Copper Addition and Temperature on the Kinetics of Austempering in Ductile Iron. **Metallurgical and materials transactions B.** Volume B(41): 1052-1058.
- Aranzabal, J., Gutierrez, I., Rodriguez-ibabe, J.M., and Urcola, J.J. (1997). Influence of the Amount and Morphology of Retained Austenite on the Mechanical Properties of an Austempered Ductile Iron. **Metallurgical and materials transactions A.** Volume A(28): 1143-1156.
- Batra, U. (2005). Fracture Behavior and Mechanism in Austempered Ductile Iron. **Journal of Failure Analysis and Prevention.** (5): 75-81.
- Cho, G.S., Choe, K.H., Lee, K.W., and Ikenaga, A. (2007). Effects of Alloying Elements on the Microstructures and Mechanical Properties of Heavy Section Ductile Cast Iron. **J. Mater. Sci. Technol.** Vol. (23): 97-101.
- De Cooman, B.C. (2004) . Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. **Current Opinion in Solid State and Materials Science.** (8): 285-303.
- De Pellegrin, D.V., Torrance, A.A., and Haran, E. (2009). Wear mechanisms and scale effects in two-body abrasion. **Wear.** (266): 13-20.

- Elsayed, A.H., Megahed, M.M., Sadek, A.A., and Abouelela, K.M. (2009). Fracture toughness characterization of austempered ductile iron produced using both conventional and two-step austempering processes. **Materials and Design**. (30): 1866-1877.
- Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B. (2009). Transformation characteristics of ductile iron austempered from intercritical austenitizing temperature ranges. **J Mater Sci**. (44): 1394-1403.
- Eric, O., Sidjanin, L., Miskovic, Z., Zec, S., and Jovanovic, M.T. (2004). Microstructure and toughness of Cunimo austempered ductile iron. **Materials Letters**. (58): 2707-2711.
- Francucci, G., Sikora, J., and Dommarco, R. (2008). Abrasion resistance of ductile iron austempered by the two-step process. **Materials Science and Engineering**. A(485): 46-54.
- Ferry, M., and Xu, W. (2004). Microstructural and crystallographic features of ausferrite in as-cast gray iron. **Materials Characterization**. (53): 43-49.
- Gazda, A. (2010) Analysis of decomposition processes of ausferrite in copper-nickel austempered ductile iron. **J Therm Anal Calorim**. (102): 923-930.
- Inthidech, S., Aungsupaitoon, P., Sricharoenchai, P., and Matsubara, Y. (2010). Two body type abrasion wear behaviour in hypoeutectic 16% Cr cast irons with Mo. **International Journal of Cast Metals Research**. Vol. (23): 164-172.
- Kim, Y-J., Shin, H., Park, H., and Lim, J.D. (2008). Investigation into mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI) in accordance with austempering temperature. **Materials Letters**. (62): 357-360.
- Kitkamthorn, U., and Diewwanit, I. (2009). Microstructure and mechanical properties of copper alloyed austempered ductile iron. **TMS Annual Meeting**. pp. 803-810.
- Kumar, S., Mondal, D.P., Khaira, H.K., and Jha, A.K. (1999). Improvement in High Stress Abrasive Wear Property of Steel by Hardfacing. **JMEPEG**. (8): 711-715.
- Lerner, Y.S., and Kingsbury, G.R., (1997). Wear resistance properties of austempered ductile iron. ASM International. February 1998. Volume 7(1): 48-52.
- Li, Y., and Chen, X. (2001). Microstructure and mechanical properties of austempered high silicon cast steel. **Materials Science and Engineering**. (A)308: 277-282.
- Matsuda, H., and Bhadeshia, H.K.D.H. (2004). Kinetics of the bainite transformation. **Proc. R. Soc. Lond**. A(460): 1707-1722.

- Perez, M.J., Cisneros, M.M., and Lopez, H.F. (2006). Wear resistance of Cu-Ni-Mo austempered ductile iron. **Wear**. (260): 879-885.
- Putatunda, S.K. (2001). Development of austempered ductile cast iron (ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process. **Materials Science and Engineering**. (A)315: 70-80.
- Ramadan, M., Nofal, A.A., Elmahalawi, I., and Abdel-Karim, R. (2006). Influence of graphite nodularity on microstructure and processing window of 1.5% Ni-0.3% Mo austempered cast iron. **Materials Science and Engineering**. A(435-436): 564-572.
- Sahin, Y., Erdogan, M., and Kilicli, V. (2007). Wear behavior of austempered ductile irons with dual matrix structures. **Materials Science and Engineering**. A (444): 31-38.
- Sakamoto, M., Liu, H-N., Nomura, M., and Ogi, K. (2001). Tribological stability of Al₂O₃ short fiber reinforced high Cr cast irons. **Wear**. (251): 1414-1420.
- Sawla, S., and Das, S. (2004). Combined effect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of aluminum alloy and aluminum particle composites. **Wear**. (257): 555-561.
- Shelton, P.W., and Bonner, A.A. (2006). The Effect of copper additions to the mechanical properties of austempered ductile iron (ADI). **Journal of Materials Processing Technology**. (173): 269-274.
- Tszeng, T.C. (2000). Autocatalysis in bainite transformations. **Materials Science and Engineering**. A(293): 185-190.
- Wu, C.Z., Chen, Y.J., and Shih, T.S. (2002). Phase transformation in austempered ductile iron by microjet impact. **Materials Characterization**. (48): 43-54.
- Yang, J., and Putatunda, S.K. (2004). Improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process. **Materials and Design**. (25): 219-230.
- Yang, J., and Putatunda, S.K. (2005). Effect of microstructure on abrasion wear behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process. **Materials Science and Engineering**. A (406): 217-228.
- Yescas, M.A., and Bhadeshia, H.K.D.H. (2002). Model for the maximum fraction of retained austenite in austempered ductile cast iron. **Materials Science and Engineering**. A(333): 60-66.



ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ค่าความแข็ง ค่าการดูดซับพลังงานการกระแทก

ค่าความต้านทานแรงดึงจุดคราก ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

และค่าอัตราการตีกรอ

ตารางที่ ก.1 ค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ไม่ผสมทองแดง

ชนิดของชิ้นงาน	สภาวะการชุบอสเทมเปอร์		ค่าความแข็ง (Hv)			
	อุณหภูมิ (°C)	เวลารวม (นาที)	1	2	3	เฉลี่ย
ไม่ผสมทองแดง	280	60	446.5	440.7	442.8	443.3
		90	431.2	437.0	433.1	433.8
		120	429.5	428.8	426.5	428.3
	300	60	407.5	412.6	410.9	410.3
		90	396.2	401.9	390.8	396.3
		120	389.6	397.2	387.9	391.6
	320	60	387.2	385.0	376.1	382.8
		90	382.3	377.2	376.5	378.7
		120	380.3	378.0	375.1	377.8
	280 + 30	6 + 54	443.9	432.6	432.1	436.2
		6 + 84	425.2	423.3	420.1	422.9
		6 + 114	426.2	422.7	419.2	422.7
	300 + 30	6 + 54	409.6	403.8	397.3	403.6
		6 + 84	401.6	393.7	397.3	397.5
		6 + 114	400.1	399.7	397.6	399.1
	320 + 30	6 + 54	382.8	375.1	377.7	378.5
		6 + 84	379.8	374.4	374.8	376.3
		6 + 114	374.6	372.0	368.8	371.8

ตารางที่ ก.2 ค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ผสมทองแดง

ชนิดของชิ้นงาน	สภาวะการชุบอสเทมเปอร์ริง		ค่าความแข็ง (Hv)			
	อุณหภูมิ (°C)	เวลารวม (นาที)	1	2	3	เฉลี่ย
ผสมทองแดง	280	60	441.7	442.2	444.3	442.7
		90	432.4	428.9	429.8	430.4
		120	428.6	423.3	423.3	425.1
	300	60	402.7	404.5	403.0	403.4
		90	390.3	388.5	393.3	390.7
		120	387.9	389.4	390.1	389.1
	320	60	382.7	381.1	380.5	381.4
		90	379.3	379.8	379.9	379.7
		120	374.4	375.5	372.2	374.0
	280 + 30	6 + 54	431.3	428.9	427.1	429.1
		6 + 84	411.0	413.5	410.0	411.5
		6 + 114	411.7	410.1	410.4	410.7
	300 + 30	6 + 54	388.6	392.7	389.7	390.3
		6 + 84	381.9	387.7	382.2	383.9
		6 + 114	382.0	384.4	381.4	382.6
	320 + 30	6 + 54	372.1	375.7	370.8	372.9
		6 + 84	371.5	370.5	368.3	370.1
		6 + 114	366.7	362.0	361.1	363.3

ตารางที่ ก.3 ค่าการดูดซับพลังงานการแตกของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่
ผ่านการชุบอสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น

ชนิดของชิ้นงาน	สภาวะการชุบอสเทมเปอร์ริง		ค่าการดูดซับพลังงานการ แตก (J)
	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	เวลารวม (นาที)	
<u>ไม่ผสมทองแดง</u>	280 + 30	6 + 54	146
		6 + 84	128
		6 + 114	128
	300 + 30	6 + 54	128
		6 + 84	184
		6 + 114	184
	320 + 30	6 + 54	184
		6 + 84	194
		6 + 114	190
<u>ผสมทองแดง</u>	280 + 30	6 + 54	172
		6 + 84	162
		6 + 114	172
	300 + 30	6 + 54	192
		6 + 84	152
		6 + 114	194
	320 + 30	6 + 54	160
		6 + 84	164
		6 + 114	140

ตารางที่ ก.4 ค่าความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอริ์ที่ผ่านการชุบ
ออสเทนเปอริ์ริงแบบสองชั้น

ชนิดของ ชิ้นงาน	สภาวะการชุบออสเทนเปอริ์ริง		ค่าความต้านทานแรงดึง		
	อุณหภูมิ (°C)	เวลารวม (นาที)	จุดคราก 0.1% (MPa)	แรงดึงสูงสุด (MPa)	% การยืดตัว
ไม้ผสม ทองแดง	280 + 30	6 + 84	1142	1457	3.41
		6 + 114	1163	1503	2.95
	300 + 30	6 + 84	1104	1429	4.16
		6 + 114	1062	1355	3.19
	320 + 30	6 + 84	989	1255	3.17
		6 + 114	1008	1301	2.88
ผสม ทองแดง	280 + 30	6 + 84	1112	1415	2.26
		6 + 114	1105	1309	2.22
	300 + 30	6 + 84	1015	1286	2.46
		6 + 114	942	1193	2.24
	320 + 30	6 + 84	958	1229	2.81
		6 + 114	927	1202	3.37

ตารางที่ ก.5 ค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียว

ออสเทนเปอร์ไรต์ผสมทองแดง

ชนิดของ ชิ้นงาน	สภาวะการชุบออสเทนเปอร์ไรต์		ค่าความแข็ง (Hv) เฉลี่ย	ค่าอัตราการสึกหรอ (mg/m)
	อุณหภูมิ (°C)	เวลารวม (นาที)		
ไม่ผสม ทองแดง	280	60	443.3	0.0716
		90	433.8	0.0814
		120	428.3	0.0893
	300	60	410.3	0.0798
		90	396.3	0.0979
		120	391.6	0.0854
	320	60	382.8	0.0782
		90	378.7	0.0787
		120	377.8	0.0781
	280 + 30	6 + 54	436.2	0.0765
		6 + 84	422.9	0.0660
		6 + 114	422.7	0.0644
	300 + 30	6 + 54	403.6	0.0757
		6 + 84	397.5	0.0874
		6 + 114	399.1	0.0835
	320 + 30	6 + 54	378.5	0.0578
		6 + 84	376.3	0.0813
		6 + 114	371.8	0.0805

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับค่าอัตราการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียว

ออสเทนเปออร์ผสมทองแดง

ชนิดของ ชิ้นงาน	สภาวะการชุบออสเทนเปออร์ริง		ค่าความแข็ง (HV) เฉลี่ย	ค่าอัตราการสึกหรอ (mg/m)
	อุณหภูมิ (°C)	เวลารวม (นาที)		
ผสมทองแดง	280	60	442.7	0.0823
		90	430.4	0.0921
		120	425.1	0.1091
	300	60	403.4	0.1125
		90	390.7	0.0991
		120	389.1	0.1129
	320	60	381.4	0.0992
		90	379.7	0.0941
		120	374.0	0.0794
	280 + 30	6 + 54	429.1	0.0773
		6 + 84	411.5	0.0622
		6 + 114	410.7	0.0581
	300 + 30	6 + 54	390.3	0.0773
		6 + 84	383.9	0.0743
		6 + 114	382.6	0.0826
	320 + 30	6 + 54	372.9	0.0692
		6 + 84	370.1	0.0724
		6 + 114	363.3	0.0854



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ประภาพร ศีลาวงศ์ อุษณีย์ กิตกัมภร และ ณรงค์ อัครพัฒนากุล. (2553). การทนต่อแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการอบออสเทมเปอร์รีงแบบสองขั้น. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 8 (PEC 8). 808-813. วันที่ 22-23 เมษายน 2553. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา ประเทศไทย.

ประภาพร ศีลาวงศ์ อุษณีย์ กิตกัมภร และ ณรงค์ อัครพัฒนากุล. (2553). ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการอบออสเทมเปอร์รีงแบบสองขั้น. การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. (นำเสนอผลงานทางวิชาการ). วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2553. เขาใหญ่ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย.

ประภาพร ศีลาวงศ์ สุตสาคร อินธิเดช, ณรงค์ อัครพัฒนากุล และ อุษณีย์ กิตกัมภร (2554). การปรับปรุงความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการชุบออสเทมเปอร์รีงแบบสองขั้น. (อยู่ในระหว่างดำเนินการส่งไปตีพิมพ์ที่วิศวกรรมสถานฯ)

การทนต่อแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการอบ ออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น

Impact Toughness of Austempered Ductile Cast Iron by Two-Step Austempering process

ประภาพร ศิลาวงค์^{1*}, อุษณีย์ กิตกำธร¹ และ ณรงค์ อัครพัฒน์ากูล¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: m5141265@g.sut.ac.th*

Prapaporn Silawong^{1*}, Usanee Kitkamthorn¹, and Narong Akkarapattanagoon¹

¹School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon
Ratchasima 30000

E-mail: m5141265@g.sut.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ โดยนำเหล็กหล่อเหนียวออสเทมไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วอบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น โดยชุบในอ่างเกลือที่อุณหภูมิ 280 300 และ 320 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก 30 °C ด้วยอัตรา 3 °C ต่อนาที ที่ังไว้ให้เวลารวมเป็น 60 นาที 90 นาที 120 นาที และ 150 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบการกระแทกด้วยเครื่อง Charpy impact testing ผลการทดลองพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการอบออสเทมเปอร์ริงด้วยอุณหภูมิเริ่มต้น 320 °C และเวลารวมในอ่างเกลือทั้งหมด 90 นาที จะมีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกมากที่สุดคือ 194 จูล จากนั้นตรวจสอบสภาพพื้นผิวการแตกหัก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

คำหลัก ออสเทมไนท์ซึ่ง ออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น ค่าการดูดซับพลังงาน ออสเฟอไรท์

Abstract

This research studies impact toughness of unalloyed austempered ductile iron. The samples were austenitized at 900°C for 2 hours followed by two-step austempering. The first step was quenching in a salt bath at 280, 300 and 320°C for 6 minutes. Then, the salt bath temperature was increased 30°C at a rate of 3°C/minute. The total times in the salt bath were 60, 90, 120 and 150 minutes. Impact toughness of all

austempered samples was measured by Charpy impact testing. It was found that, the austempered ductile iron obtained from the two-step austempering starting at 320°C for 6 minutes and holding in salt bath for 90 minutes exhibited maximum impact energy at 194 J. The fracture surface was observed using Scanning Electron Microscope (SEM).

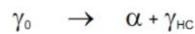
Keywords: two-step austempering, impact energy, ausferrite.

1. บทนำ

ปัจจุบันเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ (Austempering Ductile Iron หรือ ADI) ได้ถูกนำมาใช้มากขึ้นในภาคอุตสาหกรรม การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และจักรกลการเกษตร เนื่องจากมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกและการเสียดสีสูง อีกทั้งยังมีศักยภาพสำหรับทดแทนในชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าหรือเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างจุลภาค มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ โดยโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรงแรงดึง และความเหนียวของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ต้องประกอบไปด้วย เฟอไรท์ที่มีความละเอียดและออสเทมไนท์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง หรือเป็นที่รู้จักกันว่า ออสเฟอไรท์ (ausferrite) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสจากออสเทมไนท์เริ่มต้น (γ_0) ไปเป็นเฟอไรท์รูปเข็มกับออสเทมไนท์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) ในระหว่างการทำออสเทมเปอร์ริง [1,2] คุณสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength) ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์จะ

ขึ้นกับความละเอียดของเฟอร์ไรท์ ส่วนความแกร่งต่อการแตกหัก (Fracture Toughness) จะขึ้นกับปริมาณของออสเทนไนท์ (X_γ) และปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนท์ (C_γ) [1,3] ในระหว่างการทำออสเทนเปอริ่งจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสอยู่ 2 ขั้นตอน ดังนี้ [1,3,4]

ขั้นที่ 1 ออสเทนไนท์เริ่มต้น (γ_0) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรท์รูปเข็ม (Bainitic ferrite) กับออสเทนไนท์ที่มีคาร์บอนสูง (γ_{HC})



ซึ่งโครงสร้างของ $\alpha + \gamma_{HC}$ ก็คือ ออสเฟอร์ไรท์ (Ausferrite) เป็นโครงสร้างที่ให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดี คือให้ความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวที่ดี [1,3,4]

ขั้นที่ 2 ออสเทนไนท์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรท์กับคาร์ไบด์ (เบนไนท์ในเหล็กกล้า) [1,4]



ปฏิกิริยาขั้นที่ 2 จะเกิดขึ้นในกรณีที่ทำออสเทนเปอริ่งนานเกินไป ซึ่งคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นส่งผลให้เนื้อวัสดุมีความเปราะมากขึ้น [1,3,4]

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ได้ให้ความสนใจไปที่สมบัติการทนต่อแรงกระแทกของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอริ์ โดยวัดจากค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทก

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

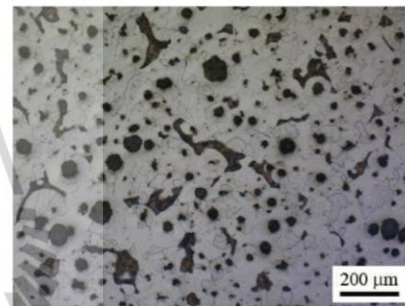
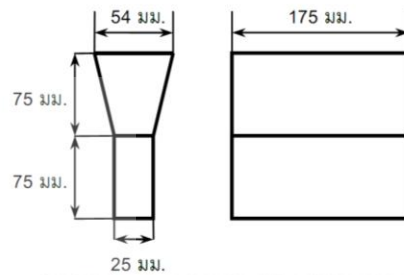
การทดลองนี้ใช้เหล็กหล่อเหนียวกราไฟต์กลมที่มีเนื้อพื้นเป็นเฟสเฟอร์ไรท์และเฟอไรต์ โดยหล่อเป็นชิ้นงาน Y-blocks ขนาด 1 นิ้ว ซึ่งมีมิติดังรูปที่ 1 และส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 1 เหล็กหล่อที่ได้มีจำนวนกราไฟต์ประมาณ 120 เม็ดกลมต่อตารางมิลลิเมตร

2.2 การอบชุบ

ตัดชิ้นงานขนาดเล็กจากส่วนล่างของ Y-blocks เพื่อเตรียมขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไม่บากร่อง โดยให้มีขนาดเริ่มต้น 12 x 12 x 75 มม. เพื่อนำไปอบชุบก่อนที่จะกลึงใสจนได้ขนาดสุดท้ายเป็น 10 x 10 x 55 มม. ดังรูปที่ 2 การอบชุบประกอบด้วยการอบออสเทนไนท์ที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นอบออสเทนเปอริ่งแบบสองชั้นในอ่างเกลือที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 280 300 และ 320 °C เวลาประมาณ 6 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก 30 °C ในอัตรา 3 °C ต่อนาที ทั้งไว้ให้เวลารวมเป็น 60 90 120 และ 150 นาที ดังรูปที่ 3

2.3 การทดสอบค่าความแข็งและแรงกระแทก

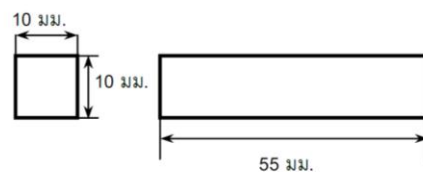
ภายหลังจากอบออสเทนเปอริ่งได้ นำชิ้นงานมาวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell) ด้วยน้ำหนักกด 3000 กิโลกรัม แล้วทดสอบการกระแทกด้วยเครื่อง Charpy impact testing จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และตรวจสอบสภาพพื้นผิวการแตกหัก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



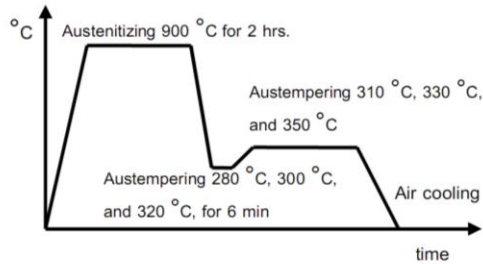
รูปที่ 1 ขนาดของชิ้นงาน Y-blocks (บน) และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวกราไฟต์กลม (ล่าง)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

ส่วนผสมทางเคมี	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr
โดยน้ำหนัก	3.58	2.65	0.32	0.018	<0.005	0.042	0.02



รูปที่ 2 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไม่บากร่อง



รูปที่ 3 แผนภาพกระบวนการอบอสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

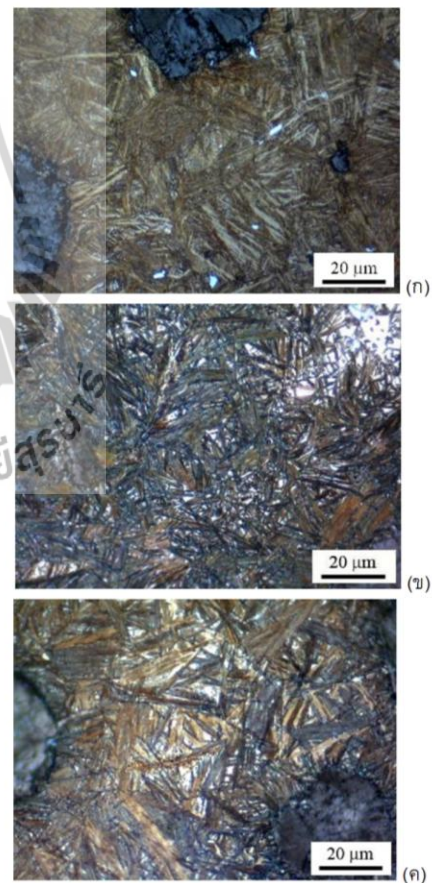
3.1 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ได้ออกจากการอบอบอสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นเดียวกัน แต่มีเวลารวมเป็น 60 90 120 และ 150 นาทีนั้น พบว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชิ้นงานที่อุณหภูมิการอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่ต่างกัน เฟอร์ไรต์มีลักษณะหยาบมากขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิการอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่ 320 °C เฟอร์ไรต์มีลักษณะหยาบมากที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากช่วงปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์นั้นเป็นการเปลี่ยนเฟสแบบการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) และการโตต่อ (Growth) ซึ่งขึ้นอยู่กับอันเดอร์คูลลิ่ง (Undercooling) และความสามารถในการแพร่ของคาร์บอน [1] ดังนั้นหากต้องการให้เฟอร์ไรต์มีลักษณะละเอียดและออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงต้องให้อันเดอร์คูลลิ่งมากเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรต์แล้วเพิ่มอุณหภูมิอบอสเทมเปอร์ริงให้สูงขึ้นภายหลังเพื่อเพิ่มความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนในออสเทนไนต์ กรณีที่ใช้เวลาอบอสเทมเปอร์ริงนานเกินไป อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนเฟสในช่วงปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ซึ่งจะเกิดเฟสของคาร์ไบด์ในเนื้อพื้น ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความเหนียวต่ำลง [1,2]

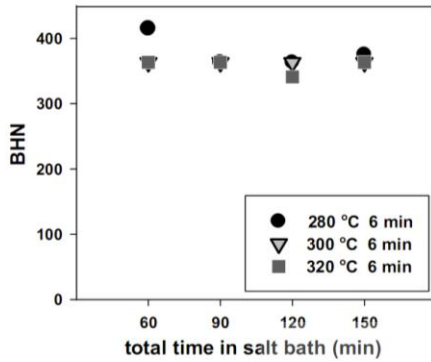
3.2 ความแข็ง

จากผลการทดสอบค่าความแข็งแบบบริเนล โดยใช้น้ำหนักในการกดชิ้นงานที่ 3000 กิโลกรัม พบว่าเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ได้จากการอบอบอสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 °C มีค่าความแข็งสูงสุด คือ 415 BHN เมื่อเวลาอบอบอสเทมเปอร์ริงรวม 60 นาที ดังรูปที่ 5 และเมื่อเวลาของการอบอบอสเทมเปอร์ริงเพิ่มขึ้นเป็น 90 นาที หรือนานกว่า ค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มลดลงแล้วคงที่ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการอบอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่ 280 °C และเพิ่มอุณหภูมิอีก 30 °C โดยเวลารวม 60 นาทีนั้น คาร์บอนยังแพร่เข้าไปในเฟสออสเทนไนต์ได้น้อยส่งผลให้ออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงไม่พอ จึงไม่มีเสถียรภาพ และเปลี่ยนเฟสเป็นโครงสร้างของมาร์เทนไซต์เมื่อเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ส่วนที่อุณหภูมิการอบอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น

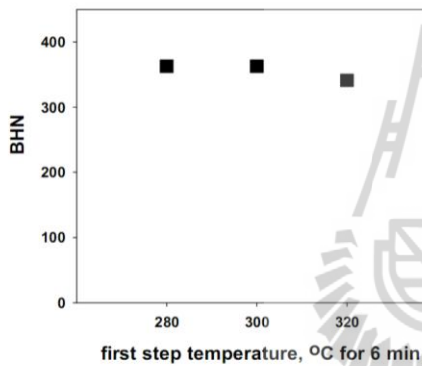
ที่ 300 และ 320 °C ค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มคงที่ แม้ว่าเวลารวมในการอบอบอสเทมเปอร์ริงนานขึ้น จาก 60 นาที เป็น 150 นาที อาจเป็นเพราะอุณหภูมิการอบอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่สูงขึ้น ทำให้การแพร่ของคาร์บอนเกิดได้เร็วขึ้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอบอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่ 280 300 และ 320 °C และใช้เวลารวม 120 นาที พบว่าเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 280 - 300 °C มีค่าความแข็งเท่ากัน แต่เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 320 °C ค่าความแข็งที่ได้ลดลง ดังรูปที่ 6 เมื่อสังเกตจากโครงสร้างจุลภาคในแต่ละอุณหภูมิจะเห็นได้ว่า การอบอบอสเทมเปอร์ริง ณ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 280 °C มีลักษณะเฟอร์ไรต์ละเอียดกว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 320 °C อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งลักษณะของเฟอร์ไรต์จะมีผลต่อค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์อย่างมาก อาจกล่าวได้ว่าเฟอร์ไรต์ที่ละเอียดจะมีค่าความแข็งสูงกว่าเฟอร์ไรต์ที่หยาบหรืออีกนัยหนึ่งคือ อุณหภูมิการอบอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นยิ่งสูง ค่าความแข็งที่ได้จะยิ่งต่ำลง



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ผ่านการอบอบอสเทมเปอร์ริงที่เวลารวม 120 นาที ณ อุณหภูมิเริ่มต้น (ก) 280 °C (ข) 300 °C และ (ค) 320 °C

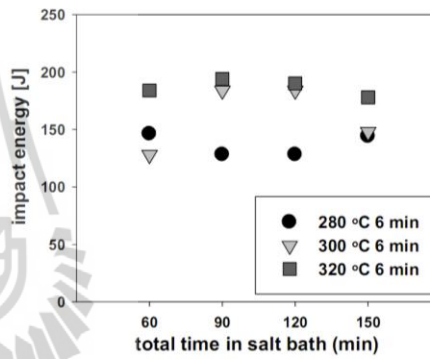


รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าความแข็งกับเวลารวมที่ใช้ในการอบออสเทมเปอร์ริงในขั้นแรกที่อุณหภูมิ 280 300 และ 320 °C



รูปที่ 6 ค่าความแข็งกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นที่เวลารวม 120 นาที

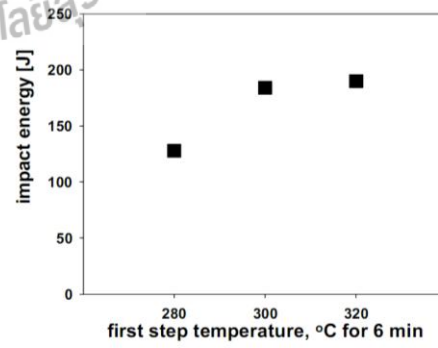
แนวโน้มของค่าที่เทียบกับเวลาในการอบออสเทมเปอร์ริงแสดงการเพิ่มขึ้นจาก 60 นาที ไปสูงสุดที่ 90 นาทีและลดลงชัดเจนเมื่อเวลารวมการอบออสเทมเปอร์ริงนานเป็น 150 นาที ซึ่งคาดว่า การอบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น ที่อุณหภูมิเริ่มต้นสูงขึ้นเป็น 300 และ 320 °C นั้น คาร์บอนสามารถแพร่ได้ดีทำให้ได้ออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและมีเสถียรภาพภายในเวลา 90 นาที จากนั้นเมื่อเวลานานมากเกินไป เช่น 150 นาที ออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงอาจเปลี่ยนไปเป็นเฟอไรไรท์กับคาร์ไบด์ ซึ่งส่งผลให้เปราะและมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำลงได้ [1,3,4] หากพิจารณาค่าการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่ผ่านการอบออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลารวม 120 นาทีเท่ากัน แต่อุณหภูมิการอบต่างกัน ดังรูปที่ 8 พบว่าค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากลักษณะความละเอียดของออสเฟอไรท์ที่แตกต่างกันและปริมาณของออสเทนไนต์และปริมาณของคาร์บอนในออสเทนไนต์นั่นเอง



รูปที่ 7 ค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกเทียบกับเวลารวมต่างๆ

3.3 ค่าการดูดซับพลังงานการกระแทก

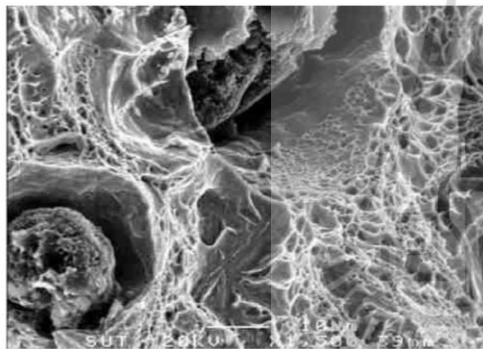
จากผลการทดสอบแรงกระแทก ชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากการอบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 °C เวลาอบออสเทมเปอร์ริงรวม 90 นาที มีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงสุดคือ 194 จูล ดังรูปที่ 7 ลักษณะแนวโน้มกราฟของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 °C ลดลงในช่วง 60 - 90 นาที ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับค่าความแข็ง หลังจากนั้นค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงขึ้นอีกในช่วงหลัง ซึ่งอาจเป็นเพราะคาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปละลายในโครงสร้างของออสเทนไนต์ได้มากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดเฟสของออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงในออสเฟอไรท์เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์จะขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ออบออสเทมเปอร์ริง [2,3] ต่อมาเมื่อพิจารณากรณีอุณหภูมิในการอบออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 300 และ 320 °C ลักษณะแนวโน้มของค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกโดยรวมจะสูงกว่าที่อุณหภูมิการอบออสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 280 °C ในขณะที่



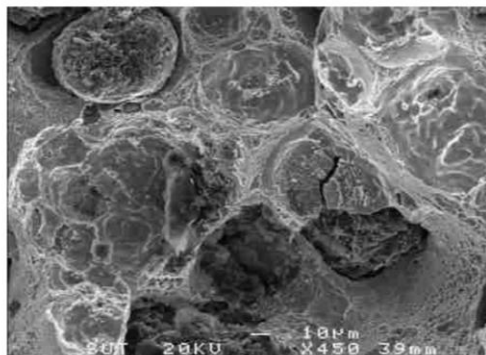
รูปที่ 8 ค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกเทียบกับอุณหภูมิการอบออสเทมเปอร์ริงในขั้นแรกที่ 280 300 และ 320 °C โดยมีเวลารวม 120 นาที เท่าๆ กัน

เมื่อตรวจพื้นผิวการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า

รอยแตกมีลักษณะการแตกหักแบบกึ่งเหนียวกึ่งเปราะ ดังรูปที่ 9 โดยสังเกตได้จากลักษณะที่เป็นหลุมกลมเล็ก ๆ (dimple) ที่บริเวณเนื้อพื้นของโลหะ จะแสดงถึงพฤติกรรมการแตกแบบเหนียว และบางบริเวณที่เห็นเป็นลักษณะการแตกแบบผ่ากรนที่มีผิวเรียบเป็นชั้นๆ เรียกกันว่า แบบเสมือนคลีเวจ (quasi-cleavage) จุดเริ่มต้นของทิศทางการแตกมาจากกราฟิต์ ดังแสดงในรูปที่ 10 จากการสังเกตพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานทั้ง 3 อุณหภูมิเริ่มต้น พบว่ารอยแตกมีลักษณะคล้ายๆ กัน แต่ที่อุณหภูมิอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้น 320 °C สามารถสังเกตลักษณะเสมือนคลีเวจได้อย่างชัดเจน ดังตัวอย่างหนึ่งซึ่งแสดงในรูปที่ 9 ลักษณะที่พบนี้สอดคล้องกันกับที่พบโดย Prasad Rao, P. *et al.* [5] ทั้งนี้มีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า ขนาดของเข็มหรือแผ่นเฟอร์ไรท์ที่หยาบมากขึ้น อาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานที่อบอสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิสูงแสดงลักษณะเสมือนคลีเวจ เนื่องจากเฟอร์ไรท์มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC



รูปที่ 9 พื้นผิวการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียวอบอสเทมเปอร์ริงที่ผ่านการอบอสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 320 °C เวลาอบ 120 นาที ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



รูปที่ 10 พื้นผิวการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียวอบอสเทมเปอร์ริงที่ผ่านการอบอสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิเริ่มต้น 280 °C เวลาอบ 120 นาที ที่กำลังขยาย 450 เท่า

จากผลการทดสอบค่าความแข็งและการทดสอบการกระแทก ดังข้างต้น จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคมีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กหล่อเหนียวอบอสเทมเปอร์ริง [1-4] เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการอบอสเทมเปอร์ริง [1-4] ซึ่งในการทำอบอสเทมเปอร์ริงโครงสร้างที่ต้องการภายหลังการอบชุบก็ คือ ออสเฟอไรท์ [1-4] โดยวิธีการอบอสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้นก็จะทำให้โครงสร้างสุดท้ายที่ได้เป็นเฟอไรท์ละเอียดและออสเทนไนท์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง [1,3] ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

4. สรุปผลการทดลอง

1. อุณหภูมิการอบอสเทมเปอร์ริงสูงขึ้น มีผลให้เฟอร์ไรท์มีลักษณะหยาบมากขึ้น
2. เหล็กหล่อเหนียวอบอสเทมเปอร์ริงที่ผ่านการอบอสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้น 280 300 และ 320 °C และเวลารวม 120 นาทีเท่า ๆ กัน พบว่าค่าความแข็งมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นเพิ่มขึ้น
3. เหล็กหล่อเหนียวอบอสเทมเปอร์ริงมีการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงสุด เมื่ออุณหภูมิอบอสเทมเปอร์ริงเริ่มต้นที่ 320 °C เวลาอบ 90 นาที คือ 194 จูล
4. พื้นผิวรอยแตกส่วนที่เป็นเนื้อพื้นมีลักษณะการแตกเป็นหลุมกลมและบางบริเวณมีลักษณะเสมือนคลีเวจ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัย คุณณรงค์ จิตอุดม ที่ช่วยตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบแรงกระแทก ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้อำนวยความสะดวกให้ในการใช้เครื่องมือ และขอขอบคุณการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jianghuai Yang and Susil K. Putatunda, L. 2004. Improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process. *Materials and Design*, 25: 219–230.
- [2] Yoon-Jun Kim, Hocheol Shin, Hyounsoo Park and Jong Dae Lim, L. 2008. Investigation into mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI) in accordance with austempering temperature. *Materials Letters*, 62: 357–360.
- [3] Ayman H. Elsayed, M.M. Megahed, A.A. Sadek and K.M. Abouelela, L. 2009. Fracture toughness characterization of austempered ductile iron produced using both

conventional and two-step austempering processes. *Materials and Design*, 30: 1866–1877.

- [4] O. Eric, L. Sidjanin, Z. Miskovic, S. Zec and M.T. Jovanovic, L. 2004. Microstructure and toughness of CuNiMo austempered ductile iron. *Materials Letters*, 58: 2707– 2711.
- [5] P. Prasad Rao and Susil K. Putatunda, L. 2003. Investigations on the fracture toughness of austempered ductile iron alloyed with chromium. *Materials Science and Engineering*, A346: 254– 265.



ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการอบ อสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น

ประภาพร ศิลาวงศ์* อุษณีย์ กิตกำธร* ณรงค์ อัครพัฒนากุล*

*สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

อีเมล m5141265@g.su.ac.th โทรศัพท์ 044-224488 โทรสาร 044-224482

Oral Session

ปัจจุบันเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์มีบทบาทมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนจักรกลการเกษตร เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลและการทนต่อแรงกระแทกที่ตีรวมทั้งสามารถทนต่อการเสียดสีได้ดีอีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นกับลักษณะของเฟอไรต์รูปเข็มที่ละเอียดและมีสัดส่วนโดยปริมาตรของอสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ดังนั้นกระบวนการอบอสเทมเปอร์ริงจึงได้ถูกศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากกระบวนการอบอสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวเป็นแบบสองชั้น เพื่อให้ได้ลักษณะโครงสร้างสุดท้ายเป็นไปตามที่กล่าวมา สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการอบอสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้น โดยนำเหล็กหล่อเหนียวอบอสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วอบอสเทมเปอร์ริงแบบสองชั้นโดยชุบในอ่างเกลือที่อุณหภูมิ 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก 30 องศาเซลเซียสด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียส ต่อนาที (สำหรับกรอบอบอสเทมเปอร์ริงแบบชั้นเดียวจะไม่เพิ่มอุณหภูมิขึ้น) ทั้งไว้ให้เวลารวมทั้งหมดเป็น 6090 และ 120 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความต้านทานการเสียดสีด้วยเครื่องทดสอบการเสียดสีชนิดสองวัตถุแบบล้อหมุน (Two-body type Suga abrasion wear tester) จากนั้นตรวจสอบสภาพพื้นผิวที่เสียหายหลังการทดสอบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ประวัติผู้เขียน

ว่าที่ร้อยตรีหญิงประภาพร ศีลาวังศ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ.2526 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร บิดาชื่อ นายประดิษฐ์ ศีลาวังศ์ มารดาชื่อนางจรรยาพร ศรีวิสัย สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนเทศบาล ๑ (เยี่ยมเกษสุวรรณ) ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ในปีการศึกษา 2538 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสมุทรปราการ ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ในปีการศึกษา 2544 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2549 ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรีได้ไปปฏิบัติงานในโครงการสหกิจศึกษาที่บริษัท ไทยปาร์คเกอร์โรซิง จำกัด ตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกรฝ่ายผลิต (เมษายน-สิงหาคม พ.ศ. 2548) เมื่อสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรควบคุมคุณภาพที่บริษัท ไทยปาร์คเกอร์โรซิง จำกัด (เมษายน พ.ศ. 2549-เมษายน พ.ศ. 2551) จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2551 ระหว่างการศึกษาได้ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการโลหการกายภาพ 1 สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ณ สถาบันการศึกษาเดิม (ปีการศึกษา 2551-2553) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้รับรางวัล ได้แก่ บทความวิจัยดีเด่นประเภทพื้นฐาน สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ จากบทความวิจัยเรื่อง “การทนต่อแรงกระทำของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการอบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น” ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 8 (PEC 8) และ Thai Parkerizing Best Paper Award 2010 ในระดับนักศึกษา จากบทความวิจัยเรื่อง “ความต้านทานการเสียดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการอบออสเทมเปอร์ริงแบบสองขั้น” ในการประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 (โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ข.)