



248094

พหุคูณกรรมเบเกอรี่วิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า AISI 52100

นายณัฏฐ์ ใจอารีย์กุลเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2551  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

600253295

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



พฤติกรรมเชิงกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า AISI 52100

นายเผ่าพันธุ์ เอื้ออารีย์กุลเลิศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





# HEAT TREATMENT BEHAVIOR OF AISI 52100 STEEL

Mr. Phaophan Eourarekullart

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมเชิงกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า AISI  
52100

โดย

นายเผ่าพันธุ์ เอื้ออารีย์กุลเลิศ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คนบตีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยู่ธยา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... กรรมการ  
(ดร. กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์)

เผ่าพันธุ์ เอื้ออารีย์กุลเลิศ : พฤติกรรมการเชิงกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า AISI 52100. (HEAT TREATMENT BEHAVIOR OF AISI 52100 STEEL)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย, 61 หน้า.

248094

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้าง

จุลภาค ความแข็งและปริมาณออสเทนไนต์ของเหล็กกล้า AISI 52100 ชิ้นงานมีขนาด 25x25x25 มม. แปรผันอุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ในช่วง 800-900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเย็นตัวเร็วด้วยน้ำมันและอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง วัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์และหาปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างด้วยเครื่องรังสีเอ็กซ์แบบเลี้ยวเบน

การเพิ่มอุณหภูมิอบชิ้นงานให้สูงขึ้นจาก 800°C ถึง 900°C ทำให้ปริมาณซีเมนไตต์ที่ไม่ละลายลดลงจาก 8.5% เป็น 2.8% และปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างเพิ่มขึ้นจาก 5.3% เป็น 20.1% อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์สูงขึ้นทำให้ซีเมนไตต์ละลายมากขึ้น ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์เพิ่มขึ้นทำให้ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างจึงมากขึ้นหลังการเย็นตัวเร็วแล้วอบคืนตัว เมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์เพิ่มจาก 800°C เป็น 845°C ความแข็งเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรงจาก 61.3 HRC เป็น 64.3 HRC ซึ่งเป็นค่าสูงสุด เนื่องจากการละลายอิมิตัวที่ยังยวดยของคาร์บอนในมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์เพิ่มจาก 845°C เป็น 900°C ความแข็งลดลงจาก 64.3 HRC เป็น 59.9 HRC ความแข็งลดลงตามการเพิ่มขึ้นของออสเทนไนต์เหลือค้างที่ความแข็งต่ำ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิติศ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2551.....

# # 5070355721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD : AISI 52100 STEEL / HEAT TREATMENT

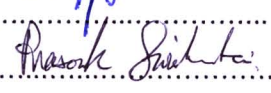
PHAOPHAN EOURAREKULLART: HEAT TREATMENT BEHAVIOR OF AISI  
52100 STEEL. ADVISOR: ASSOC.PROF. PRASONK SRICHAROENCHAI,  
D.Eng., 61 pp.

248094

The object of this thesis is to study effects of heat treatment on microstructure, hardness and amount of retained austenite of AISI 52100 steel. The dimension of specimens is 25x25x25 mm. Austenitizing temperature is varied in range of 800-900°C for 1 hour, then oil quenched and tempered at temperature of 150°C for 1 hour. Microstructure is observed by an optical microscope. Hardness is measured by Rockwell hardness tester and the amount of retained austenite is measured by x-ray diffractometer.

The increase in austenitizing temperature from 800°C to 900°C results in the decrease of undissolved cementite from 8.5% to 2.8% and the increase of retained austenite from 5.3% to 20.1%. Higher austenitizing temperature causes more cementite dissolved, then more carbon content is dissolved in austenite and austenite becomes more stable. Consequently, retained austenite content is more after quenching and tempering. When austenitizing temperature increases from 800°C to 845°C, the hardness increases linearly from 61.3 HRC to 64.5 HRC which is the maximum hardness because the supersaturation of carbon in martensite increases. When austenitizing temperature increases from 845°C to 900°C, the hardness decreases from 64.3 HRC to 59.9 HRC. Hardness decreases due to the increase of low-hardness retained austenite.

Department: ....Metallurgical Engineering... Student's Signature:.....

Field of study:....Metallurgical Engineering....Advisor's Signature:.....

Academic year: .....2008.....



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย เป็นอย่างสูงสำหรับการอุทิศงานและเวลาอันมีค่าในการถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน และคำแนะนำต่างๆ ทั้งในด้านการเรียน แนวความคิดการแก้ปัญหาและวิธีการทำงาน ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้และคำแนะนำจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทมาขั้นต้นได้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้คำแนะนำข้าพเจ้าในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณบริษัท ไทยปาร์คเกอร์โรตึง จำกัด ที่อนุเคราะห์การวิเคราะห์ด้วยเครื่องรังสีเอกซ์แบบเลี้ยวเบนที่มีโครเมียมเป็นเป้าจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี ขอขอบพระคุณบริษัท โอเรียนทอลสเปเชียลตีล จำกัด ที่อนุเคราะห์เหล็กกล้า AISI 52100 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้และขอขอบพระคุณบริษัท สหวิยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) สำหรับทุนการศึกษาเพื่อการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมาขั้นต้นตลอดช่วงการศึกษา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และรุ่นพี่ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำในการทำงาน อีกทั้งการสนับสนุนในด้านข้อมูลการศึกษา รวมทั้งเพื่อน ๆ สมาชิกที่ร่วมศึกษาในระดับปริญญาโทมาขั้นต้นที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

## สารบัญ

|                                                        | หน้า |
|--------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                   | ฉ    |
| สารบัญ.....                                            | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                       | ณ    |
| สารบัญภาพ.....                                         | ญ    |
| บทที่                                                  |      |
| 1 บทนำ.....                                            | 1    |
| 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....                          | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....                                  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....                             | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....                    | 3    |
| 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4    |
| 2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....                                | 4    |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                        | 11   |
| 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง .....                   | 12   |
| 3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย.....              | 12   |
| 3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย .....                          | 19   |
| 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....                     | 19   |
| 3.2.2 ขั้นตอนการอบให้เป็นออสเทนไนต์.....               | 20   |
| 3.2.3 ขั้นตอนสำหรับชุบแข็ง.....                        | 21   |
| 3.2.4 ขั้นตอนการอบคืนตัว.....                          | 21   |
| 3.2.5 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง.....                     | 22   |
| 3.2.6 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....            | 22   |
| 3.2.7 ขั้นตอนการหาซีเมนไตต์.....                       | 24   |
| 3.2.8 ขั้นตอนการหาปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้าง.....       | 24   |



บทที่

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 4 ผลการทดลองและการอภิปราย .....                 | 26 |
| 4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค .....             | 26 |
| 4.2 การหาปริมาณซีเมนต์ที่ละลาย.....             | 32 |
| 4.3 การหาปริมาณออกซิเจนในตัวอย่าง.....          | 34 |
| 4.4 ความแข็งแรงหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน..... | 40 |
| 5 บทสรุป.....                                   | 42 |
| รายการอ้างอิง.....                              | 43 |
| ภาคผนวก.....                                    | 44 |
| ภาคผนวก ก.....                                  | 45 |
| ภาคผนวก ข.....                                  | 48 |
| ภาคผนวก ค.....                                  | 54 |
| ภาคผนวก ง.....                                  | 56 |
| ภาคผนวก จ.....                                  | 58 |
| ภาคผนวก ฉ.....                                  | 60 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....                 | 61 |

## สารบัญตาราง

หน้า

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 52100 (%โดยน้ำหนัก) .....                           | 4  |
| ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ เหล็กกล้าเครื่องมือพิเศษ เกรด L2 (%โดยน้ำหนัก).....          | 4  |
| ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของ เหล็กกล้า AISI 52100 (%โดยน้ำหนัก).....                        | 19 |
| ตารางที่ 3.2 สมบัติของน้ำมันชุบแข็ง.....                                                         | 19 |
| ตารางที่ 4.1 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800°C<br>และอบคืนตัว.....     | 34 |
| ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800°C<br>และอบคืนตัว.....        | 34 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 815°C<br>และอบคืนตัว.....     | 35 |
| ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 815°C<br>และอบคืนตัว.....        | 35 |
| ตารางที่ 4.5 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845°C<br>และอบคืนตัว.....     | 36 |
| ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845°C<br>และอบคืนตัว.....        | 36 |
| ตารางที่ 4.7 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 860°C<br>และอบคืนตัว.....     | 37 |
| ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 860°C<br>และอบคืนตัว.....        | 37 |
| ตารางที่ 4.9 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C<br>และอบคืนตัว.....     | 38 |
| ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C<br>และอบคืนตัว.....       | 38 |
| ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นของคาร์บอนและปริมาณมาร์เทนไซด์ต่อความแข็ง<br>โดย M คือ มาร์เทนไซด์..... | 41 |
| ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณค่า theoretical integrate intensity เมื่อใช้เป้าโครเมียม.....             | 57 |

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางที่ จ.1 ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของปริมาณซีเมนตัส<br>ของชิ้นงานให้อุณหภูมิอบให้เป็นอสเทนไนต์ต่างๆและอบคืนตัว..... | 60 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## สารบัญภาพ

หน้า

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุขของเหล็กกล้า AISI 52100ที่เปลี่ยนแปลงไป<br>จากแผนภูมิสมดุขเหล็ก- คาร์บอนเดิม.....                                                                               | 5  |
| รูปที่ 2.2 ช่วงอุณหภูมิการเกิด มาร์เทนไซต์ ในเหล็กกล้า 14 ชนิด.....                                                                                                                    | 7  |
| รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิการอบให้เป็นออสเทนไนต์และอุณหภูมิM <sub>s</sub> .....                                                                                           | 8  |
| รูปที่ 2.4 แผนภูมิ T.T.T. ส่วนประกอบทางเคมี 1.02%C, 0.36 %Mn, 0.20%Ni,1.41%Cr<br>อุณหภูมิการอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845°C .....                                                            | 9  |
| รูปที่ 2.5 การลดลงของความแข็งกับอุณหภูมิการอบคืนตัว.....                                                                                                                               | 10 |
| รูปที่ 2.6 โครงสร้าง ซีเมนไตต์ กลมภายหลังผ่านกระบวนการทำให้ได้ซีเมนไตต์กลม<br>(a) โครเมียม0.5% (b) โครเมียม1.5% กัดผิวด้วยสารละลาย Klemm's reagent.....                                | 11 |
| รูปที่ 2.7 ผลของปริมาณโครเมียมต่อความแข็ง □ แสดงถึงโครงสร้างเม็ดกลม<br>● แสดงถึงโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ .....                                                                              | 12 |
| รูปที่ 2.8 ผลของเวลาแช่ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ ซีเมนไตต์<br>ข้อมูลมาจาก Dilatometry, โครงสร้างจุลภาคและมาจากการคำนวณ.....                                                              | 13 |
| รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิการอบให้เป็นออสเทนไนต์ ต่อความแข็ง<br>Series A โครงสร้างเริ่มต้นเป็น เฟิร์ลไลต์ และ โปรยูเทกตอยด์ซีเมนไตต์<br>Series B โครงสร้างเริ่มต้นเป็น เฟิร์ลไลต์.....   | 14 |
| รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิการอบให้เป็นออสเทนไนต์ ต่อขนาดเกรนออสเทนไนต์<br>โครงสร้างเริ่มต้นเป็น เฟิร์ลไลต์ และ โปรยูเทกตอยด์ซีเมนไตต์<br>Series B โครงสร้างเริ่มต้นเป็น เฟิร์ลไลต์..... | 14 |
| รูปที่ 2.11 รูปร่างของ ซีเมนไตต์ ในชิ้นงานที่มีปริมาณ 0.009% ฟอสฟอรัส,<br>ภาพจาก TEM เตรียมชิ้นงานด้วยเทคนิค Replica extract .....                                                     | 15 |
| รูปที่ 2.12 รูปร่างของ ซีเมนไตต์ ในชิ้นงานที่มีปริมาณ 0.023% ฟอสฟอรัส,<br>ภาพจาก TEM เตรียมชิ้นงานด้วยเทคนิค Replica extract .....                                                     | 15 |
| รูปที่ 2.13 อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 840°C เวลา 30 นาที<br>เย็นตัวเร็วด้วยน้ำมันและอบคืนตัว 175°C กัดผิวด้วยสารละลาย natal 2%<br>(n) 190x (ข) 1250x .....                           | 16 |
| รูปที่ 2.14 ความแข็ง (H) และปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้าง (RA)<br>ที่อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ต่างๆ.....                                                                                 | 17 |

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 3.1 ชิ้นงานขนาด 25x25x25 มม. ที่นำมาเจาะรู ขัดผิวและลบคมแล้ว.....                                                                                                                | 20 |
| รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ผูกมัดทนความร้อน สำหรับแขวนชิ้นงาน<br>ขณะผ่านกรรมวิธีทางความร้อน.....                                                                                              | 20 |
| รูปที่ 3.3 การแขวนชิ้นงานภายในเตา Muffle โดยแขวนชิ้นงานไว้ที่กึ่งกลางเตา.....                                                                                                           | 21 |
| รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของการแขวนชิ้นงานและเทอร์โมมิเตอร์ขณะทำการชุบชิ้นงาน<br>ด้วยตัวกลางชุบแข็งสำหรับน้ำมันชุบแข็งจะใช้ Hot plate 1 ตัวในการให้ความร้อน<br>(n) side view (ข) top view..... | 23 |
| รูปที่ 3.5 กราฟแสดงผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์แบบเลี้ยวเบนภายหลังลบ background แล้ว.....                                                                                                    | 25 |
| รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคเริ่มต้นของชิ้นงานซีเมนไตต์กลมบนเนื้อพื้นเฟอร์ไรต์ (200x)<br>(ก) กัดผิวด้วยสารละลาย nital 2% (ข) กัดผิวด้วยสารละลาย Klemm.....                                | 27 |
| รูปที่ 4.2 อุดหนุมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ต่างๆและอบคืนตัวกัดผิวของชิ้นงาน<br>ด้วยสารละลาย nital 2%, 200x (ก) 800°C (ข) 815°C (ค) 845°C (ง) 860°C.....                                      | 29 |
| รูปที่ 4.2 (ต่อ) อุดหนุมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ต่างๆและอบคืนตัวกัดผิวของชิ้นงาน<br>ด้วยสารละลาย nital 2%, 200x (ก) 800°C (ข) 815°C (ค) 845°C (ง) 860°C.....                                | 30 |
| รูปที่ 4.3 อุดหนุมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัว<br>(n) กัดผิวของชิ้นงานด้วยสารละลาย nital 2%, 200x (ข) รอยแตกที่ผิวชิ้นงาน.....                                                | 31 |
| รูปที่ 4.4 ปริมาณซีเมนไตต์กลมที่ไม่ละลายเมื่ออบให้เป็นออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....                                                                                                   | 32 |
| รูปที่ 4.5 ชิ้นงานที่ถูกชุบแข็งและอบคืนตัว (200x)<br>(n) กัดด้วยสารละลาย nital 2%(ข) กัดด้วยสารละลาย Klemm .....                                                                        | 33 |
| รูปที่ 4.6 ผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์หลังลบ background แล้วของชิ้นงาน<br>ใช้อุดหนุมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800°C และอบคืนตัว.....                                                             | 34 |
| รูปที่ 4.7 ผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์หลังลบ background แล้วของชิ้นงาน<br>ใช้อุดหนุมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 815°C และอบคืนตัว.....                                                             | 35 |
| รูปที่ 4.8 ผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์หลังลบ background แล้วของชิ้นงาน<br>ใช้อุดหนุมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845°C และอบคืนตัว.....                                                             | 36 |
| รูปที่ 4.9 ผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์หลังลบ background แล้วของชิ้นงาน<br>ใช้อุดหนุมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 860°C และอบคืนตัว.....                                                             | 37 |
| รูปที่ 4.10 ผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์หลังลบ background แล้วของชิ้นงาน<br>ใช้อุดหนุมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัว.....                                                            | 38 |



|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณหาปริมาณออกสเทนไนต์เหลือค้าง                               |    |
| เมื่ออบให้เป็นออกสเทนไนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....                                   | 39 |
| รูปที่ 4.11 ความแข็งเมื่ออบให้เป็นออกสเทนไนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....               | 40 |
| รูปที่ ก.1 ชิ้นงานโครงสร้างจุลภาค ซีเมนไตต์บนเนื้อพื้นเฟอร์ไรต์กัดผิว            |    |
| ด้วยสารละลายต่างกัน 200x (ก) สารละลาย Beraha (ข) สารละลาย Klemm .....            | 45 |
| รูปที่ ก.2 ชิ้นงานโครงสร้างจุลภาค ซีเมนไตต์บนเนื้อพื้นเฟอร์ไรต์กัดผิว            |    |
| ด้วยสารละลาย Klemm ใช้เวลาต่างกัน 200x (ก) 1 นาที (ข) 1.5 นาที.....              | 46 |
| รูปที่ ก.3 MnS ขนาดต่างกันในชิ้นงานที่ยังไม่ชุบแข็ง 500x                         |    |
| (ก) ขนาดใหญ่ (ข) ขนาดเล็ก.....                                                   | 47 |
| รูปที่ ข.1 ‘โครงสร้างจุลภาคเริ่มต้นของชิ้นงานซีเมนไตต์กลมบนเนื้อพื้นเฟอร์ไรต์    |    |
| กัดผิวด้วย สารละลาย nital % (ก) 100x (ข) 200x.....                               | 48 |
| รูปที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคเมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออกสเทนไนต์ที่ 800°C และอบคืนตัว |    |
| กัดผิวด้วยสารละลาย nital % (ก) 100x (ข) 200x.....                                | 49 |
| รูปที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคเมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออกสเทนไนต์ที่ 815°C และอบคืนตัว |    |
| กัดผิวด้วยสารละลาย nital % (ก) 100x (ข) 200x.....                                | 50 |
| รูปที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาคเมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออกสเทนไนต์ที่ 845°C และอบคืนตัว |    |
| กัดผิวด้วยสารละลาย nital % (ก) 100x (ข) 200x.....                                | 51 |
| รูปที่ ข.5 โครงสร้างจุลภาคเมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออกสเทนไนต์ที่ 860°C และอบคืนตัว |    |
| กัดผิวด้วยสารละลาย nital % (ก) 100x (ข) 200x.....                                | 52 |
| รูปที่ ข.6 โครงสร้างจุลภาคเมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออกสเทนไนต์ที่ 900°C และอบคืนตัว |    |
| กัดผิวด้วย สารละลาย nital %(ก) 100x (ข) 200x.....                                | 53 |
| รูปที่ ค.1 โครงสร้างจุลภาคหลังชุบแข็งและอบคืนตัวกัดผิวด้วยสารละลายต่างกัน 200x   |    |
| (ก) nital 2% (ข) natal 2%+picral (ค) สารละลาย Klemm (ง) สารละลาย Beraha....      | 54 |
| รูปที่ ง.1 กราฟแสดงผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์แบบเลี้ยวเบนของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบ    |    |
| ให้เป็นออกสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัวใช้ความเร็วในการ scan 2°/นาที.....           | 56 |
| รูปที่ ง.2 กราฟแสดงผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์แบบเลี้ยวเบนของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบ    |    |
| ให้เป็นออกสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัวใช้ความเร็วในการ scan 2°/นาที.....           | 56 |
| รูปที่ จ.1 ระนาบสมมุติที่ตัดในรูปลูกบาศก์ พื้นที่แรเงาคือพื้นที่ของเฟส.....      | 58 |