

การศึกษาพารามิเตอร์ดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการบิดเบี้ยวของเหล็กกล้าภายหลังการชุบแข็ง

นางสาวรุจิรา อินทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2832-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF OPERATING PARAMETERS INVOLVED IN IRON STEEL DISTORTION AFTER  
HEAT TREATMENT

Miss Rujira Intha

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2832-4

**481608**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาพารามิเตอร์ดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการบิดเบี้ยวของ  
เหล็กกล้าภายหลังการชุบแข็ง

โดย

นางสาวรุจิรา อินทา

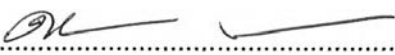
สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

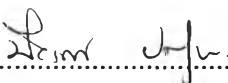
อาจารย์ที่ปรึกษา

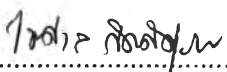
รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศิริ)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี)

รุจิรา อินทา : การศึกษาพารามิเตอร์ดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการบิดเบี้ยวของเหล็กกล้า  
 ภายหลังจากชุบแข็ง (STUDY OF OPERATING PARAMETERS INVOLVED IN IRON  
 STEEL DISTORTION AFTER HEAT TREATMENT) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ไพศาล  
 กิตติศุภกร, 91 หน้า. ISBN 974-53-2832-4

กระบวนการอบชุบแข็งเหล็กกล้าเป็นกระบวนการควบคุมคุณสมบัติของวัสดุเพื่อปรับปรุง  
 โครงสร้างและความแข็ง กระบวนการอบชุบแข็งประกอบไปด้วยสามขั้นตอนที่สำคัญได้แก่ การให้  
 ความร้อนแก่เหล็กกล้า(ออสเตไนท์) การชุบชิ้นงานลงในของเหลวและการอบคืนตัว ภายหลังจาก  
 อบชุบชิ้นงานเราจะพบปัญหา การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ความแข็งของชิ้นงานไม่ได้ตรงตาม  
 ข้อกำหนด และการแตกร้าวของชิ้นงาน การบิดเบี้ยวเกิดจากการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอและ  
 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระหว่างการแปลงรูปจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไปเป็นมาร์เทนไซด์  
 ดังนั้นงานวิจัยจึงได้ทำการศึกษาถึงการลดปริมาณชิ้นงานที่บิดเบี้ยว โดยทำการศึกษาสภาวะ  
 ดำเนินการในสองขั้นตอนคือการให้ความร้อนแก่เหล็กกล้า(ออสเตไนท์) และขั้นตอนการชุบแข็ง  
 โดยศึกษาการจัดเรียงตัวของชิ้นงานในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนแก่เหล็กกล้า(ออสเตไนท์)  
 และเวลาที่ใช้ในการชุบแข็งในระหว่างขั้นตอนการชุบแข็ง จากผลการศึกษาพบว่าการจัดเรียง  
 ชิ้นงานอย่างเป็นระเบียบในขั้นตอนการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทำให้การบิดเบี้ยวของชิ้นงานลดลง  
 9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดวางชิ้นงานแบบปกติ ส่วนผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการ  
 ชุบแข็งเป็น 5 นาทีทำให้การบิดเบี้ยวของชิ้นงานลดลง 7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้  
 ในการชุบแข็งที่ 3 นาที และจากการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองเพื่อหาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ  
 ในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนและการชุบแข็งชิ้นงาน สามารถสรุปได้ว่าเกรเดียนต์ของ  
 อุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนภายในเตาเป็นผลมาจากตัวชิ้นงานแต่ละชิ้นทำหน้าที่เป็น  
 เสมือนฉนวนกันความร้อน ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนเป็นผลมาจาก  
 ตำแหน่งในแต่ละชั้นของเตาเผา ส่วนการเพิ่มเวลาในการชุบแข็งจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของชิ้นงาน  
 ลดลง ดังกรณีที่ชุบแข็งชิ้นงานนาน 5 นาทีพบว่าอุณหภูมิของชิ้นงานจะลดอุณหภูมิไปจนถึง  
 81.4 °C (โครงสร้างมาร์เทนไซด์ประมาณ 95 % ) ในขณะที่การชุบแข็งชิ้นงานนาน 3 นาที  
 อุณหภูมิของชิ้นงานคือ 97.3 °C (โครงสร้างมาร์เทนไซด์ประมาณ 90 % )

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

สาขาวิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต .....รุจิรา อินทา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....ไพศาล กิตติศุภกร.....

## 4571452221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : HEAT TREATMENT / QUENCHING / DISTORTION / STEEL / MARTENSITE / AUSTENITE

RUJIRA INTHA : STUDY OF OPERATING PARAMETERS INVOLVED IN IRON STEEL DISTORTION AFTER HEAT TREATMENT. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D., 91 pp. ISBN 974-53-2832-4

Heat treatment is a manufacturing process used to control material properties and improve microstructures and hardness. Heat treatment consists of three different steps: austenitizing, quenching and tempering. The process can be accompanied by unwanted effect such as component distortion, hardness out of specifications and part broken. The distortion usually occur when non-uniform heat transfer and volume changes on transformation from ferrite to martensite present. This thesis is focused on the reduction of component distortion by studying operating conditions in both austenitizing and quenching steps which are the arrangement of parts in the austenitizing step and quenching dwell time in the quenching step. Experimental studies have shown that the well arrangement of parts in the austenitizing step has less part distortion of 9 percentages in comparison with the random or disorder arrangement of parts. The more quenching dwell time at 5 minutes also results in less part distortion of 7 percentages compared with the less quenching dwell time at 3 minutes. Simulation studied has been carried to determine the temperature gradient of the austenitizing and quenching steps. These results can lead to the conclusions that the temperature gradient in the oven is due to the fact that each layer of the parts exhibits heat insulation. Then the heat transfer by radiation is subject to the position/ layer of parts in the oven. The higher dwell time results in the lower part temperature; with the dwell time of 5 minutes, the part temperature is of 81.4 °C (95% martensite) while with the dwell time of 3 minutes, the part temperature is of 97.3 °C (90 % martensite) .

Department of chemical engineering

Field of chemical engineering

Academic year 2005

Student's signature..... *Rujira I.*

Advisor's signature..... *Paisan Kittisupakorn*

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานผลการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากคุณครรชิต สันติวัฒนกุล ที่ได้ให้โอกาสนำข้อมูลที่เป็นประโยชน์เพื่อนำมาประกอบการศึกษา งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาตลอดจนช่วยให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนร่วมงานและพนักงานแผนกอบชุบแข็ง ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหา พร้อมทั้งคำแนะนำรายละเอียดในกระบวนการผลิต

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยสนับสนุนให้โอกาสในการศึกษา รวมถึงการให้ความรัก ความอบอุ่นแก่ข้าพเจ้าตลอดมา และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำงาน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฌ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 แผนงานวิจัย.....	5
<b>บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....</b>	<b>9</b>
2.1 การจัดวางชิ้นงานระหว่างทำการอบชุบ.....	9
2.2 ของเหลวที่ใช้ในการชุบแข็ง.....	10
2.3 การอบอ่อนเพื่อคลายความเครียด.....	12
2.4 อิทธิพลของค่าความแข็งที่มีผลต่อความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน.....	12
2.5 บทบาทของธาตุผสมที่มีผลต่อความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน.....	13
2.6 การใช้คอมพิวเตอร์ในการวางแผนการทำการอบชุบ.....	15

	หน้า
<b>บทที่ 3 การอบชุบความร้อน</b> .....	<b>18</b>
3.1 ขั้นตอนในการชุบแข็ง.....	19
3.2 อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสม.....	23
3.3 ของเหลวสำหรับการชุบแข็ง.....	24
3.4 ความรุนแรงของการชุบ.....	28
3.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในขณะที่ได้รับความร้อน.....	30
3.6 การอบอ่อน.....	32
3.7 การควบคุมบรรยากาศภายในเตา.....	32
3.8 ความแข็งและการทดสอบความแข็ง.....	33
3.9 บทบาทของธาตุผสมที่สำคัญ.....	34
3.10 สาเหตุของการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน.....	36
<b>บทที่ 4 แบบจำลองสำหรับการหาอุณหภูมิของชิ้นงาน</b> .....	<b>39</b>
4.1 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิของชิ้นงานในระหว่างขั้นตอนการเผา.....	39
4.2 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิของชิ้นงานในขั้นตอนการชุบชิ้นงานลงในของเหลว.....	40
<b>บทที่ 5 ผลการทดลอง</b> .....	<b>42</b>
5.1 ผลการวัดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา.....	42
5.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิของชิ้นงานในระหว่างขั้นตอนการอบชิ้นงาน.....	60
5.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิของชิ้นงานหลังการชุบชิ้นงานลงในน้ำมัน.....	50
5.4 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์การบิดเบี้ยวของชิ้นงานในแต่ละการทดลอง.....	66



5.5 ค่าความแข็ง (หน่วยการวัด HRC) ของชิ้นงานในแต่ละการทดลอง.....	67
<b>บทที่ 6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>	<b>71</b>
6.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณชิ้นงานที่บิดเบี้ยว.....	71
6.2 ตำแหน่งของชิ้นงานที่มีผลต่อความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน.....	76
6.3 ค่าความแข็งของชิ้นงาน.....	79
<b>บทที่ 7 บทสรุป.....</b>	<b>80</b>
7.1 บทสรุปงานวิจัย.....	80
7.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย.....	81
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	85
ภาคผนวก ก รายละเอียดโปรแกรมจำลองอุณหภูมิของชิ้นงาน.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ส่วนประกอบของธาตุผสมทำการศึกษา.....	3
ตารางที่ 1.2 สภาวะการทำงานของการอบชุบ.....	6
ตารางที่ 3.1 ค่าความรุนแรงของการชุบในลักษณะการกวาดต่างๆกัน.....	29
ตารางที่ 5.1 ผลการวัดค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาในช่วงให้ความร้อนก่อน ( 680 °C).....	44
ตารางที่ 5.2 ผลการวัดค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงให้ความร้อนสูงสุด ( 840 °C).....	48
ตารางที่ 5.3 ผลการวัดค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาในช่วงให้ความร้อนก่อน ( 680 °C).....	51
ตารางที่ 5.4 ผลการวัดค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงให้ความร้อนสูงสุด ( 840 °C).....	55
ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณอุณหภูมิของชิ้นงานและน้ำมัน.....	65
ตารางที่ 5.6 เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่บิดเบี้ยวในแต่ละการทดลอง.....	67
ตารางที่ 5.7 ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีการจัดวางชิ้นงานอย่างเป็นระเบียบในขณะทำการ อบชุบสำหรับการทดลองครั้งที่ 1.....	68
ตารางที่ 5.8 ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีการจัดวางชิ้นงานอย่างเป็นระเบียบในขณะทำการ อบชุบสำหรับการทดลองครั้งที่ 2.....	68
ตารางที่ 5.9 ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีการจัดวางชิ้นงานอย่างเป็นระเบียบในขณะทำการ อบชุบสำหรับการทดลองครั้งที่ 3.....	69
ตารางที่ 5.10 ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีปรับรอบการกวาดของเหลวเท่ากับ 480 RPM ใน ขณะทำการชุบสำหรับการทดลองครั้งที่ 1.....	69
ตารางที่ 5.11 ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีปรับรอบการกวาดของเหลวเท่ากับ 480 RPM ใน ขณะทำการชุบสำหรับการทดลองครั้งที่ 2.....	69
ตารางที่ 5.12 ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีปรับรอบการกวาดของเหลวเท่ากับ 480 RPM ใน ขณะทำการชุบสำหรับการทดลองครั้งที่ 3.....	70

ตารางที่ 5.13	ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีปรับให้มีการจุ่มชิ้นงานในของเหลวให้นานขึ้น สำหรับการทดลองครั้งที่ 1 .....	70
ตารางที่ 5.14	ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีปรับให้มีการจุ่มชิ้นงานในของเหลวให้นานขึ้น สำหรับการทดลองครั้งที่ 2 .....	71
ตารางที่ 5.15	ค่าความแข็งของชิ้นงานกรณีปรับให้มีการจุ่มชิ้นงานในของเหลวให้นานขึ้น สำหรับการทดลองครั้งที่ 3 .....	71
ตารางที่ 6.1	ผลการเปรียบเทียบปริมาณของเสียในแต่ละการทดลอง .....	72
ตารางที่ 6.2	แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของชิ้นงานกับปริมาณ โครงสร้างมาร์เทน ไซต์ .....	73
ตารางที่ 6.3	ผลการคำนวณเปรียบเทียบอุณหภูมิในแต่ละชั้น โดยการถ่ายเทความร้อน .....	75

5.5	ค่าความแข็ง (หน่วยการวัด HRC) ของชิ้นงานในแต่ละการทดลอง.....	67
<b>บทที่ 6</b>	<b>ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>	<b>71</b>
6.1	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณชิ้นงานที่บิดเบี้ยว.....	71
6.2	ตำแหน่งของชิ้นงานที่มีผลต่อความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน.....	76
6.3	ค่าความแข็งของชิ้นงาน.....	79
<b>บทที่ 7</b>	<b>บทสรุป.....</b>	<b>80</b>
7.1	บทสรุปงานวิจัย.....	80
7.2	ข้อเสนอแนะในการวิจัย.....	81
	รายการอ้างอิง.....	83
	ภาคผนวก.....	85
	ภาคผนวก ก รายละเอียดโปรแกรมจำลองอุณหภูมิของชิ้นงาน.....	86
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92

## สารบัญรูป

			หน้า
รูปที่ 1.1	วงแหวนนอกที่มีการบิดเบี้ยว.....		2
รูปที่ 1.2	วงแหวนนอกที่ไม่มีมีการบิดเบี้ยว.....		2
รูปที่ 1.3	แสดงลักษณะการจัดวางชิ้นงานกรณีจัดแบบวางปกติ.....		5
รูปที่ 1.4	ภาพถ่ายแสดงการจัดวางชิ้นงานแบบปกติ.....		5
รูปที่ 1.5	แสดงลักษณะการจัดวางชิ้นงานกรณีจัดวางอย่างเป็นระเบียบ.....		6
รูปที่ 1.6	ภาพถ่ายแสดงการจัดวางชิ้นงานแบบปกติ.....		7
รูปที่ 2.1	แผนภูมิแสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนไปเมื่อทำควมน้ำมันที่ r.p.m ต่างกัน.....		11
รูปที่ 2.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน.....		12
รูปที่ 2.3	ขั้นตอนทดสอบ เพื่อใช้วัดค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน.....		14
รูปที่ 2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอุณหภูมิเนื้อมกับความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน.....		14
รูปที่ 3.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอบชุบ.....		21
รูปที่ 3.2	แสดงลักษณะของเตาเผาและห้องอบชุบชิ้นงาน.....		21
รูปที่ 3.3	กราฟแสดงการระบายความร้อน.....		28
รูปที่ 3.4	กราฟแสดงการปริมาณ โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอน 1% ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....		30
รูปที่ 3.5	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็ก.....		31
รูปที่ 3.6	กราฟกราฟแสดงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบชุบแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน.....		31

	หน้า
รูปที่ 5.1	แสดงลักษณะการจัดวางเทอร์โมคัปเปิล..... 42
รูปที่ 5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนก่อนที่อุณหภูมิ 680 °C กรณีการจัดวางชิ้นงานปกติ 6 ชั้น..... 58
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 840 °C กรณีการจัดวางชิ้นงานปกติ 6 ชั้น..... 58
รูปที่ 5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนก่อนที่อุณหภูมิ 680 °C กรณีการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ 5 ชั้น..... 59
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 840 °C กรณีการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ 5 ชั้น..... 59
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาขณะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ได้จากการวัดและคำนวณ..... 60
รูปที่ 5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนก่อนที่อุณหภูมิ 680 °C กรณีการจัดวางชิ้นงานปกติ 6 ชั้น..... 61
รูปที่ 5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิเตากับอุณหภูมิของชิ้นงานกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนก่อนที่ 680 °C กรณีการจัดวางแบบปกติ 6 ชั้น..... 61
รูปที่ 5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 840 °C กรณีการจัดวางแบบปกติ 6 ชั้น..... 62
รูปที่ 5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิเตากับอุณหภูมิชิ้นงานกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 840 °C กรณีการจัดวางแบบปกติ 6 ชั้น... 62
รูปที่ 5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนก่อนที่อุณหภูมิ 680 °C กรณีการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ 5 ชั้น..... 63

รูปที่ 5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิของเตากับอุณหภูมิของชิ้นงานกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนก่อนที่อุณหภูมิ 680 °C กรณีการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ 5 ชั้น .....	63
รูปที่ 5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 840 °C กรณีการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ 5 ชั้น .....	64
รูปที่ 5.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิของเตากับอุณหภูมิของชิ้นงานกับเวลาในช่วงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 840 °C กรณีการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ 5 ชั้น .....	64
รูปที่ 5.15	กราฟแสดงอุณหภูมิกับเวลาในระหว่างขั้นตอนการชุบชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบที่การจัดวางอย่างเป็นระเบียบ(5 ชั้น) กับการจัดวางแบบปกติ(6 ชั้น) และที่อุณหภูมิ 80 กับ 150 °C .....	65
รูปที่ 5.16	กราฟแสดงอุณหภูมิกับเวลาในระหว่างขั้นตอนการชุบชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ ในกรณี การจัดวางอย่างเป็นระเบียบ (5 ชั้น) .....	66
รูปที่ 5.17	กราฟแสดงอุณหภูมิกับเวลาในระหว่างขั้นตอนการชุบชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ ในกรณีการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ (5 ชั้น) .....	66
รูปที่ 6.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในขั้นตอนการชุบแข็ง .....	75
รูปที่ 6.2	แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณชิ้นงานที่บดเบี้ยวของการจัดวางชิ้นงานอย่างเป็นระเบียบ .....	77
รูปที่ 6.3	แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณชิ้นงานที่บดเบี้ยวของการจุ่มชิ้นงานนาน 5 นาที ...	77
รูปที่ 6.4	แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณชิ้นงานที่บดเบี้ยวของการจัดวางชิ้นงานแบบปกติ .....	78
รูปที่ 6.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่สภาวะการทดลองต่างๆ .....	79

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	=	พื้นที่ผิวของชิ้นงานที่ได้รับความร้อน ( $m^2$ )
$C_p$	=	ความจุความร้อนจำเพาะ ( $J / Kg^{\circ}K$ )
$F$	=	อัตราส่วนการเปล่งรังสีจากผนังของเตาไปยังอีกผิวของชิ้นงาน (View factor)
$h$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $kW / m^2^{\circ}C$ )
$Q^k_i$	=	ปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ (Watt)
$V$	=	ปริมาตรของชิ้นงาน ( $m^3$ )
$T_{fur}$	=	อุณหภูมิภายในเตา ( $^{\circ}C$ )
$T_i$	=	อุณหภูมิของชิ้นงานในแต่ละชั้น ที่ $i = 1,2,3,4,5,6$ ( $^{\circ}C$ )
$T_{\alpha}$	=	อุณหภูมิของของเหลว ( $^{\circ}C$ )
$\Delta t$	=	ช่วงเวลาที่วัดค่าอุณหภูมิ

### ตัวอักษรกรีก

$\varepsilon$	=	อัตราค่าเปล่งรังสี
$\rho$	=	ความหนาแน่น ( $kg / m^3$ )
$\sigma$	=	$5.670 \times 10^{-8} W / m^2 k^4$