



รายงานการวิจัย  
การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพในงานชุปผิวแข็ง  
แบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งของเหล็กคาร์บอนต่ำ

นายเดช	เหมือนขาว
นายสมพัฒน์	นาเลา
นายยงยุทธ	ตุลยกุล
นายวิทยา	ศิริคุณ

หอสมุดวิทยาเขตภาคใต้ (36)  
รับเมื่อ 22 ส.ค. 2550 เลขทะเบียน 052138  
เลขเรียกหนังสือ ๐. 669.1  
๑8๓/  
2545  
๘3

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้

ประจำปีงบประมาณผลประโยชน์ 2545

## บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งของเหล็กคาร์บอนต่ำ การออกแบบเพื่อใช้ในการทดลองกำหนดแบบแพ็คทอเรียล ตัวแปรในการชุบผิวแข็งประกอบด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เวลาที่ใช้ในการเผาแช่และส่วนผสมระหว่างคาร์บอนและสารกระตุ้นในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งและอบชุบแล้วนั้น ได้ทำการทดสอบความแข็ง ความลึกของผิวแข็ง และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติ

การวิจัยครั้งนี้พบว่าตัวแปรต่างๆ ส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวที่แตกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เท่ากับ  $925^{\circ}\text{C}$  เวลาที่ใช้ในการเผาแช่เท่ากับ 15 ชั่วโมง และส่วนผสมระหว่างคาร์บอนและสารกระตุ้นในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เท่ากับ 85% ถ่านไม้ 15%  $\text{BaCO}_3$  ให้ผลของความแข็งผิวสูงสุด และตัวแปรเหล่านี้ ส่งผลกระทบต่อความลึกผิวแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนนี้ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เท่ากับ  $925^{\circ}\text{C}$  เวลาที่ใช้ในการเผาแช่ เท่ากับ 15 ชั่วโมง ใช้ส่วนผสมระหว่างคาร์บอนและสารกระตุ้นในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เท่ากับ 79.5% ถ่านไม้ 15%  $\text{BaCO}_3$ , 5%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ 5%  $\text{CaCO}_3$  ให้ผลของความแข็งผิวสูงสุด



## Abstract

This objectives of this study is to study the Optimization of factors in Case Hardening by Pack Carburizing of Carbon Steel. The experimental design estimates for factorial designs. The experimental factors consists of the carburizing time, carburizing temperatur and carburizing compound. The specimens which are obtained by heat treatment have tested of hardnrss, case depth, and analyzed by statistic.

The results of this were follow ; there is no relationship among the factors attainment with the value of hardness conservation at 0.05 level while the hardness is increased and concludes the factors at level to increase at the carburizing time equal to 15 hours, the carburizing temperatures equal to 925 °C, and carburizing compound are consists 85%charcoal, 15%BaCo<sub>3</sub>. Also there is significant relationship among the factors attainment with the value of case depth conservation at 0.05 level while the case depth is increased and concludes the factors at level to increase at the carburizing time equal to 15 hours, the carburizing temperatures equal to 925 °C, and carburizing compound are consists 79.5%charcoal, 15%BaCo<sub>3</sub>, 1.5%Na<sub>2</sub>Co<sub>3</sub> and 5%CaCo<sub>3</sub>.

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2. ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นสำหรับเหล็กกล้า	4
2.2 พื้นฐานทางโลหะวิทยาสำหรับเหล็กกับคาร์บอน	8
2.3 อัญรูปของเหล็ก (Allotropic Forms of Iron)	14
2.4 หลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการอบชุบด้วยวิธีเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมี	16
2.5 กระบวนการการแพร่ซึมของคาร์บอน (Carbon Diffusion)	17
2.6 กระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง	17
2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness)	19
2.8 การหาความลึกของผิวแข็งโดยประมาณ	21
2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3. การดำเนินการและวิธีการวิจัย	24
3.1 การดำเนินการและวิธีการวิจัย	24
บทที่ 4. ผลการวิจัย	29
4.1 ผลการวิจัย	29
4.2 การวิเคราะห์ความแข็งผิว	29
4.3 การวิเคราะห์ความลึกผิวแข็ง	33
บทที่ 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	38
5.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	38
5.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย	38



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การดำเนินการและวิธีการวิจัย	38
5.4 สรุปผลการวิจัย	40
5.5 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง	42



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 แสดงส่วนผสมของคาร์บอนและสารกระตุ้น	2
2-1 แสดงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอันรูปของเหล็กบริสุทธิ์รวมทั้งเส้นที่ระบุ การเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏในแผนภูมิสมมูลของเหล็ก-คาร์บอน	15
2-2 แสดงตัวอย่างค่าเปรียบเทียบความแข็งที่วัดโดยวิธีต่างๆ	21
3-1 แสดงส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง (โดยน้ำหนัก)	24
3-2 แสดงจำนวนของงานที่ใช้ในการทดลอง	26
4-1 แสดงผลการตรวจสอบความแข็งผิวของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและกระบวนการอบชุบ	29
4-2 แสดงค่าต่างๆ ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน	31
4-3 แสดงระดับอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความแข็งผิวชิ้นงาน	32
4-4 แสดงระยะเวลาในการเผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความแข็งผิวชิ้นงาน	32
4-5 แสดงส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และค่าเฉลี่ยความแข็งผิวชิ้นงาน	33
4-6 แสดงผลการตรวจสอบคว เวมล็กผิวแข็งของชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิ่งและกระบวนการอบชุบแพ็ค	33
4-7 แสดงค่าต่างๆ ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความล็กผิวแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและอบชุบ	35
4-8 แสดงระดับอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความล็กผิวแข็งชิ้นงาน	36
4-9 แสดงระยะเวลาในการอบแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยคว เวมล็กผิวแข็งของชิ้นงาน	36
4-10 แสดงส่วนผสมสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความล็กผิวแข็งของชิ้นงาน	37



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่าง ๆ	5
2-2 แสดงตัวอย่างชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะในกลุ่มเหล็กโดยตัวเลขระบุถึงเปอร์เซ็นต์ คาร์บอนของเหล็กนั้นๆ	6
2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเหล็กกับปริมาณโครงสร้างจุลภาค (เฟอร์ไรท์, เฟอร์ไรต์ และซีเมนไตต์) ที่จะปรากฏในเหล็กนั้นรวมทั้งสมบัติเชิงกลและตัวอย่างผลิตภัณฑ์ผลิตจากเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนนั้นๆ	7
2-4 โครงสร้างจุลภาคของ Stainless Steel 304 กำลังขยาย 250 เท่า	8
2-5 แผนภูมิสมดุลเหล็ก-คาร์บอน	10
2-6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่มีส่วนผสมเป็น 0.4% C (Hypoeutectoid) 0.77% C (Eutectoid) และ 1.2% C (Hypereutectoid) ที่อุณหภูมิต่างๆ	12
2-7 แสดงโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าส่วนผสม 0.75% C กำลังขยาย 500 เท่า	13
2-8 Unit Cells ของโครงสร้างผลึกแบบ Body Centered Cubic และ Face Centered Cubic ในเหล็ก	15
2-9 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างเวลากับอุณหภูมิ (Cooling Curves) ของเหล็กบริสุทธิ์ที่เย็นตัวจากสภาพหลอมเหลว แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะและอันตรูปร่างต่างๆ	16
3-1 แสดงกล่องเหล็กสำหรับการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง	25
3-2 แสดงลักษณะการบรรจุชิ้นงานชุบผิวแข็งในกล่องเหล็กสำหรับการอบชุบ	25
3-3 กระบวนการชุบผิวแข็งชิ้นงานแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง	26
3-4 แสดงกระบวนการชุบแข็งชิ้นหลังการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง	27

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การอบชุบโลหะด้วยความร้อนเป็นวิธีการที่รู้จักกันดีในผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับเหล็ก ซึ่งมีคนไทยสามารถชุบมีด พร้า ขวาน และเครื่องมือต่างๆ ได้มาเป็นเวลานานแล้ว โดยเครื่องมือของช่างเหล่านั้นมีเพียงเตาถ่าน ถังน้ำ น้ำมัน หรือน้ำเกลือ ซึ่งการชุบแต่ละครั้งต้องใช้ความชำนาญมากในการดูความร้อนของเหล็กที่เผาถึงแม้จะมีผู้ชำนาญมาช้านาน อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมทางด้านเหล็กก็ไม่ได้พัฒนาให้ดีขึ้นเท่าที่ควร จะเห็นว่าโรงงานอบชุบโลหะด้วยความร้อนส่วนมากจะประสบปัญหาอยู่เสมอว่าชิ้นงานหลังการอบชุบโลหะด้วยความร้อนแล้วได้เหล็กที่ไม่ดี ไม่มีความแข็ง เปราะ หักง่าย ในบางครั้งมีความเข้าใจกันว่าการอบชุบโลหะด้วยความร้อนเป็นวิธีง่ายๆ เพียงเผาให้ร้อนแดงแล้วจุ่มน้ำ ก็จะมีคุณสมบัติใช้งานได้ โดยไม่คำนึงว่าเหล็กนั้นเป็นเหล็กชนิดใด และต้องการนำไปใช้งานอะไร ด้วยเหตุนี้จึงนิยมสั่งซื้อชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรจากต่างประเทศเพื่อลดปัญหาดังกล่าวในขณะเดียวกันก็ยังมีผู้พยายามที่จะลดต้นทุนในการผลิต โดยการทำการอบชุบโลหะด้วยความร้อนเองแม้ว่าคุณภาพไม่ดีนัก แต่คุณสมบัติใกล้เคียงตามที่ต้องการเพราะชิ้นส่วนเครื่องมือเครื่องจักรดังกล่าวที่ทำการผลิตขึ้นมานั้นในแต่ละชิ้นส่วนมีการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งบางชิ้นต้องรับแรงมากหรือบางชิ้นรับแรงเพียงเล็กน้อย หรือให้มีความแข็งแรงมากเพื่อทนต่อแรงอัด หรือบางชิ้นต้องการความเหนียวเพราะรับแรงกระแทก ด้วยเหตุนี้เหล็กที่จะนำมาอบชุบด้วยความร้อนจึงต้องมีคุณสมบัติและวิธีการอบชุบด้วยความร้อนที่แตกต่างกันไป และจำเป็นที่ต้องทราบถึงวิธีการอบชุบด้วยความร้อนอย่างถูกต้อง

กระบวนการอบชุบด้วยความร้อนโดยวิธีการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เป็นกระบวนการที่ใช้ในการอบชุบชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ใช้ในอุตสาหกรรมในประเทศไทย โดยมากจะเป็นการนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น ออสเตรเลีย, เยอรมัน และสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งประเทศไทยเองยังไม่มีการผลิตและจำหน่ายภายในประเทศ จะมีบ้างก็เพื่อใช้เองซึ่งขาดหลักการและข้อมูลที่แน่นอนจึงส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ไม่แน่นอน และทำให้เกิดการเสียดุลทางการค้ากับต่างประเทศ

ดังนั้นเพื่อประโยชน์ของผู้ที่ต้องการผลิต และผู้ประกอบการที่ต้องการผลิตเพื่อจำหน่ายในประเทศเพื่อประกอบพิจารณา อีกทั้งช่วยลดการค้าของประเทศ จึงได้เล็งเห็นความสำคัญในเรื่องดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพในงานชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งของเหล็กคาร์บอนต่ำ



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานในการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง
- 1.2.2 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารที่ใช้ในการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของชิ้นงานหลังทำการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง
- 1.2.4 เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการวิจัย ในเรื่องของการอบชุบโลหะด้วยความร้อนต่อไป

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

### 1.3.1 ขอบเขตของเนื้อหา

การศึกษาวิจัยครั้งนี้มุ่งที่จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรร่วมต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพในการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง คือ ค่าความแข็งที่ผิวและค่าความลึกของผิวแข็ง

### 1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นเหล็กเติมคาร์บอน (Carburizing Steel) : AISI 4115 ซึ่งเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีความสามารถในการชุบแข็งปานกลาง การอบชุบต้องเติมคาร์บอนก่อน หลังจากการชุบแข็งแล้วที่ผิวจะมีความแข็งสูง ใจกลางมีความเหนียวดี

### 1.3.3 ขอบเขตของการทดลอง

1.3.3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง โดยกำหนด 3 ระดับคือที่ระดับ 825, 875 และ 925 °C

1.3.3.2 เวลาที่ใช้ในการเผาแซ่โดยกำหนด 3 ช่วงเวลา คือ 5, 10 และ 15 ชั่วโมง

1.3.3.3 การใช้ส่วนผสมระหว่างคาร์บอนและสารกระตุ้นในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง โดยมีส่วนผสมดังแสดงตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 แสดงส่วนผสมของคาร์บอนและสารกระตุ้น

ส่วนผสมที่	ถ่านไม้/ถ่านโค้ก	BaCo <sub>3</sub>	Naco <sub>3</sub>	Caco <sub>3</sub>
1	100			
2	85	15		
3	83.5	15	1.5	
4	79.5	15	1.5	5

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถลดการนำเข้าของชิ้นส่วนเครื่องจักรจากต่างประเทศ
- 1.4.2 สร้างความเชื่อมั่นต่อสถานประกอบการที่จะนำข้อมูลจากการวิจัยไปพิจารณา กำหนดเพื่อให้ได้คุณภาพของชิ้นงานที่เหมาะสม

1.4.3 เป็นการกระตุ้นให้อุตสาหกรรมเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งให้ดียิ่งขึ้น





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจากตำรา เอกสาร และผลงานวิจัย เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการวิจัยและทำให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้โดยศึกษาดังนี้

- ก) ความรู้เบื้องต้นสำหรับเหล็กกล้า
- ข) พื้นฐานทางโลหะวิทยาสำหรับเหล็กกล้ากับคาร์บอน
- ค) อันยรูปของเหล็ก
- ง) หลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการอบชุบด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมี
- จ) กระบวนการการแพร่ซึมของคาร์บอน
- ฉ) กระบวนการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง
- ช) การทดสอบความแข็ง
- ซ) การหาค่าความลึกลับ
- ฌ) ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นสำหรับเหล็กกล้า

เนื่องจากเหล็กบริสุทธิ์มีกำลังต่ำเกินกว่าที่จะนำไปใช้งานวิศวกรรมได้ จึงมีการเติมธาตุผสม (Alloying Elements) เข้าไปในเนื้อเหล็ก เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ตามนิยามนั้นสามารถแบ่งเหล็กออกเป็นเหล็กกล้า เหล็กหล่อ โดยอาศัยปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ เหล็กกล้าคือ เหล็กที่มีคาร์บอนไม่เกิน 2.0% ถ้ามีคาร์บอนมากกว่านั้นจะเป็นเหล็กหล่อ โดยทั่วไปแล้วเหล็กกล้าจะอยู่ในรูปของ เหล็ก คาร์บอน ธาตุผสม และ สารมลทิน ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนในเหล็กกล้านั้นจะมีตั้งแต่ 0.05 ถึง 1.40% โดยน้ำหนัก เมื่อเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนสูงขึ้น กำลังวัสดุ (Strength) และความแข็ง (Hardness) ของเหล็กกล้าจะเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียว (Ductility) ของเหล็กกล้านั้นจะลดลง สำหรับเหล็กกล้าสามารถจำแนกเหล็กกล้าออกไปเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon Steels) และเหล็กกล้าผสม (Alloy Steels)

2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon Steels) เหล็กกล้าคาร์บอน คือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลัก และมีปริมาณธาตุผสมอื่นๆ อยู่ในปริมาณน้อย ตามนิยามของ AISI (American Iron and Steel Institute) จำกัดปริมาณธาตุผสมไว้ดังนี้ แมงกานีสไม่เกิน 1.65%

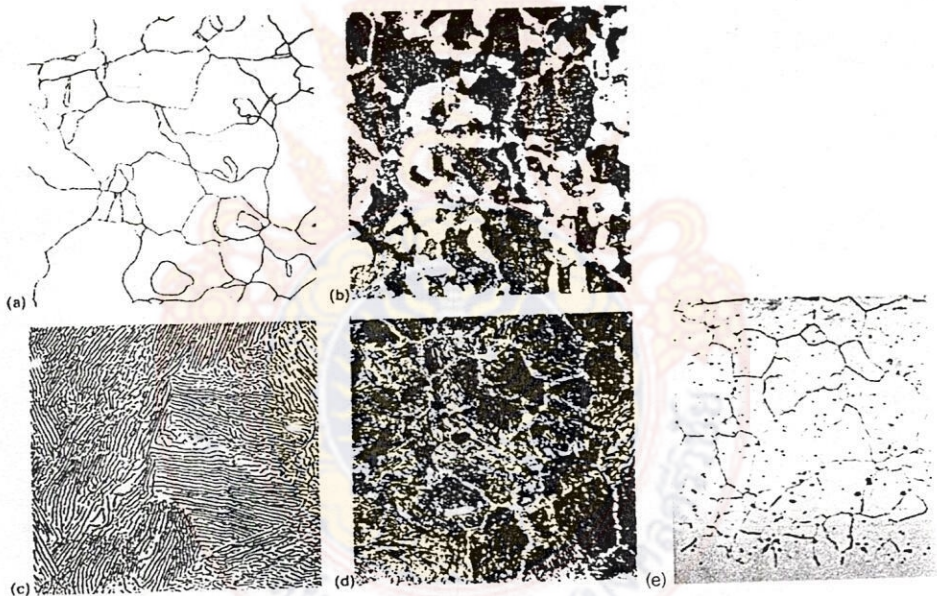
ซิลิคอนไม่เกิน 0.60% ทองแดงไม่เกิน 0.60% และปริมาณของฟอสฟอรัสรวมกับกำมะถันไม่เกิน 0.05% เราถือได้ว่า เฉพาะธาตุคาร์บอนเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้าชนิดนี้ ธาตุผสมในเหล็กกล้าประเภทนี้ นอกจากคาร์บอนแล้วจะมี ซิลิคอนและแมงกานีส ส่วนกำมะถันและฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของสารมลทิน เราแบ่งชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนตามเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กดังนี้คือ

2.1.1.1 เหล็กกล้าละมุนหรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild Steel หรือ Low Carbon Steel)

2.1.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

2.1.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่เป็นหลัก และสามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างๆ

(a) เฟอไรต์ 0.0% C 500x

(b) เฟอไรต์ + เพิร์ลไลท์ 0.40% C 500x

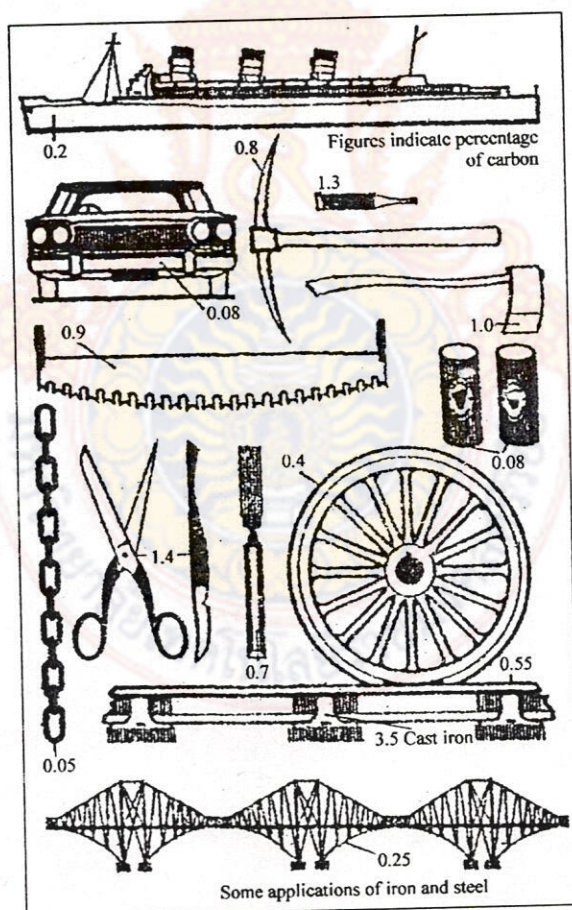
(c) เพิร์ลไลท์ 0.77% C 1000x

(d) เพิร์ลไลท์ + ซีเมนไตท์ที่ขอบเกรน 1.4% C 500x

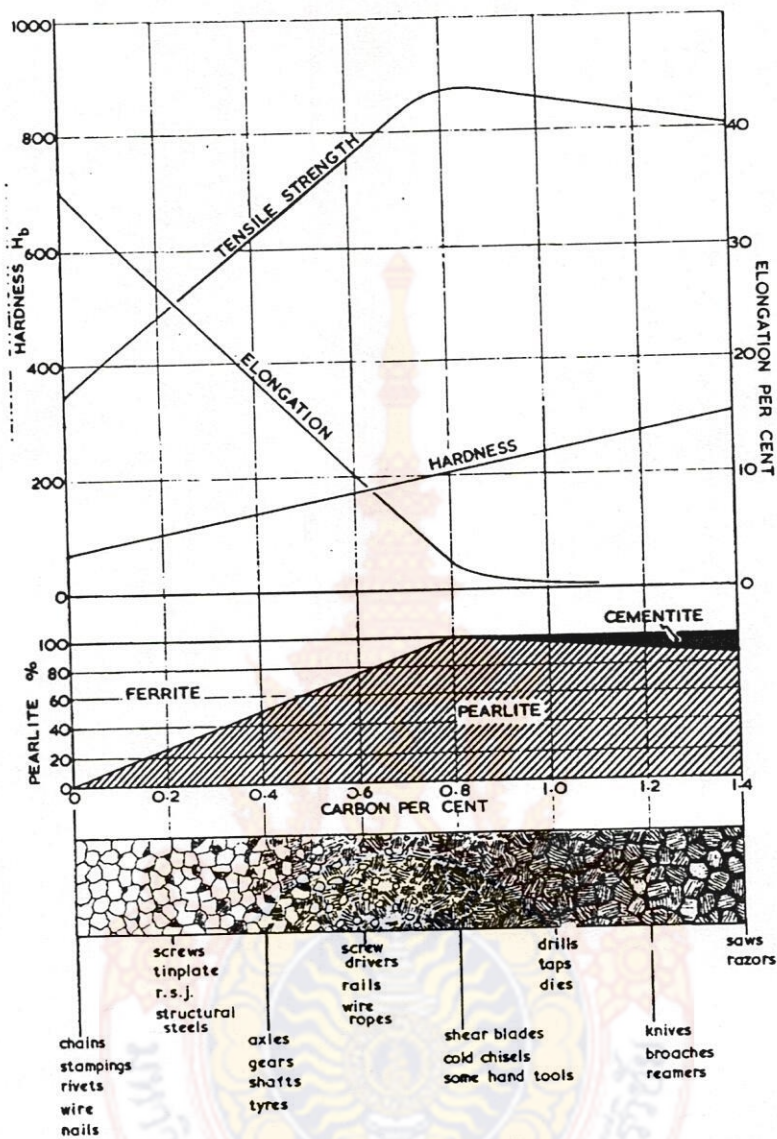
(e) ออสเทนไนท์ 500x



นอกจากนี้สามารถแบ่งประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนโดยอาศัยลักษณะโครงสร้างจุลภาคก็ได้ คือ เหล็กกล้าที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.77% จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอไรต์อย่างเดียว เราเรียกเหล็กประเภทนี้ว่า Eutectoid Steels สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.77% เราเรียกว่า Hypoeutectoid Steels หรือโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยโปรยูเทคตอยด์เฟอไรท์กับเฟอไรต์ และเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.77% เราเรียกว่า Hypereutectoid Steels หรือโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตท์กับเฟอไรต์ สำหรับคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนจะขึ้นตรงกับประเภทและปริมาณของโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อเหล็กนั้นๆ เฟอไรท์มีกำลังวัสดุและความแข็งไม่สูงนักแต่มีความเหนียว ซีเมนไตท์มีความแข็งสูงแต่เปราะ เฟอไรต์มีกำลังวัสดุสูงและสามารถยึดตัวได้ดีภายใต้แรงดึง และท้ายสุดออกสแตนไนท์มีกำลังวัสดุต่ำ นิ่ม สามารถรีดให้เข้ารูปได้ง่าย เป็นต้น ส่วนประเภทและปริมาณของโครงสร้างจุลภาคจะขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้านั้นๆ



ภาพที่ 2-2 แสดงตัวอย่างชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะในกลุ่มเหล็ก โดยตัวเลขระบุถึงเปอร์เซ็นต์ คาร์บอนของเหล็กนั้นๆ



ภาพที่ 2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเหล็กกับปริมาณโครงสร้างจุลภาค (เฟอไรต์, เพิร์ลไลท์ และซีเมนไตต์) ที่จะปรากฏในเหล็กนั้น รวมทั้งสมบัติเชิงกลและตัวอย่างผลิตภัณฑ์ผลิตจากเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนนั้นๆ

2.1.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy Steels) เหล็กกล้าที่ไม่จัดเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน จะจัดเป็นเหล็กกล้าผสมทั้งหมด ซึ่งนอกจากซิลิคอนและแมงกานีสแล้ว ธาตุผสมในเหล็กกล้าประเภทนี้ยังมีทองแดง นิกเกิล โครเมียมและโมลิบดีนัม เป็นต้น อีกด้วย คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสมนอกจากจะขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนเหมือนดังเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุผสมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้า ตลอดจนกระบวนการอบชุบ (Heat Treatment)



ที่ให้กับเหล็กกล้าเหล่านั้น เราจะใช้เหล็กกล้าผสมแทนที่เหล็กกล้าคาร์บอน เมื่อเราต้องการชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลหรือคุณสมบัติด้านอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติด้านการทนทานต่อความร้อน ความทนทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งเหล็กกล้าคาร์บอนไม่สามารถให้คุณสมบัติที่เราต้องการนั้นได้

2.1.3 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) เหล็กกล้าประเภทนี้จัดได้ว่าอยู่ในขอบเขตของเหล็กกล้าผสม ธาตุตัวสำคัญคือ โครเมียม ซึ่งจะผสมตั้งแต่ 13% ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ฟิล์มอันนี้จะมีความเงางาม และป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชัน กับเหล็กซึ่งอยู่ภายใน เป็นผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและมีความเงา



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างจุลภาคของ Stainless Steel 304 กำลังขยาย 250 เท่า

## 2.2 พื้นฐานทางโลหะวิทยาสำหรับเหล็กกับคาร์บอน

2.2.1 การศึกษาแผนภูมิสมมูลของเหล็กกับคาร์บอน มีความสำคัญมากเพราะคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้อยู่ในงานวิศวกรรมเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก และการที่จะเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กได้ดี ย่อมต้องเข้าใจเรื่องของแผนภูมิสมมูลของเหล็กกับคาร์บอนเป็นหลัก ในการศึกษาแผนภูมินี้จะต้องทำความเข้าใจความหมายของศัพท์ที่เกี่ยวข้องเสียก่อนดังต่อไปนี้

เฟอร์ไรท์ (Ferrite) บางทีเรียกเหล็กอัลฟา ( $\alpha$ ) คือสารละลายของแข็งของเหล็กอเนกรูป  $\alpha$  (และหรือ  $\beta$ ) กับคาร์บอนซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุด 0.0218% ที่อุณหภูมิ  $727^{\circ}C$  มีระบบผลึกเป็น BCC (Body Centered Cubic)

ออสเทนไนท์ (Austenite) บางทีเรียกเหล็กแกมมา ( $\gamma$ ) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กอเนกรูป  $\gamma$  กับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนละลายในเหล็กแกมมานี้ได้มากที่สุด 2.11% ที่อุณหภูมิ  $1148^{\circ}C$  มีระบบผลึกเป็น FCC (Face Centered Cubic) สังเกตว่าคาร์บอนเป็นตัวที่ช่วยให้

ออสเตนไนท์มีเสถียรภาพมากขึ้น เหล็กบริสุทธิ์มีช่วงเป็นออสเตนไนท์เพียง  $912-1394^{\circ}\text{C}$  แต่ขอบเขตนี้จะกว้างขึ้นเมื่อมีคาร์บอนละลายอยู่

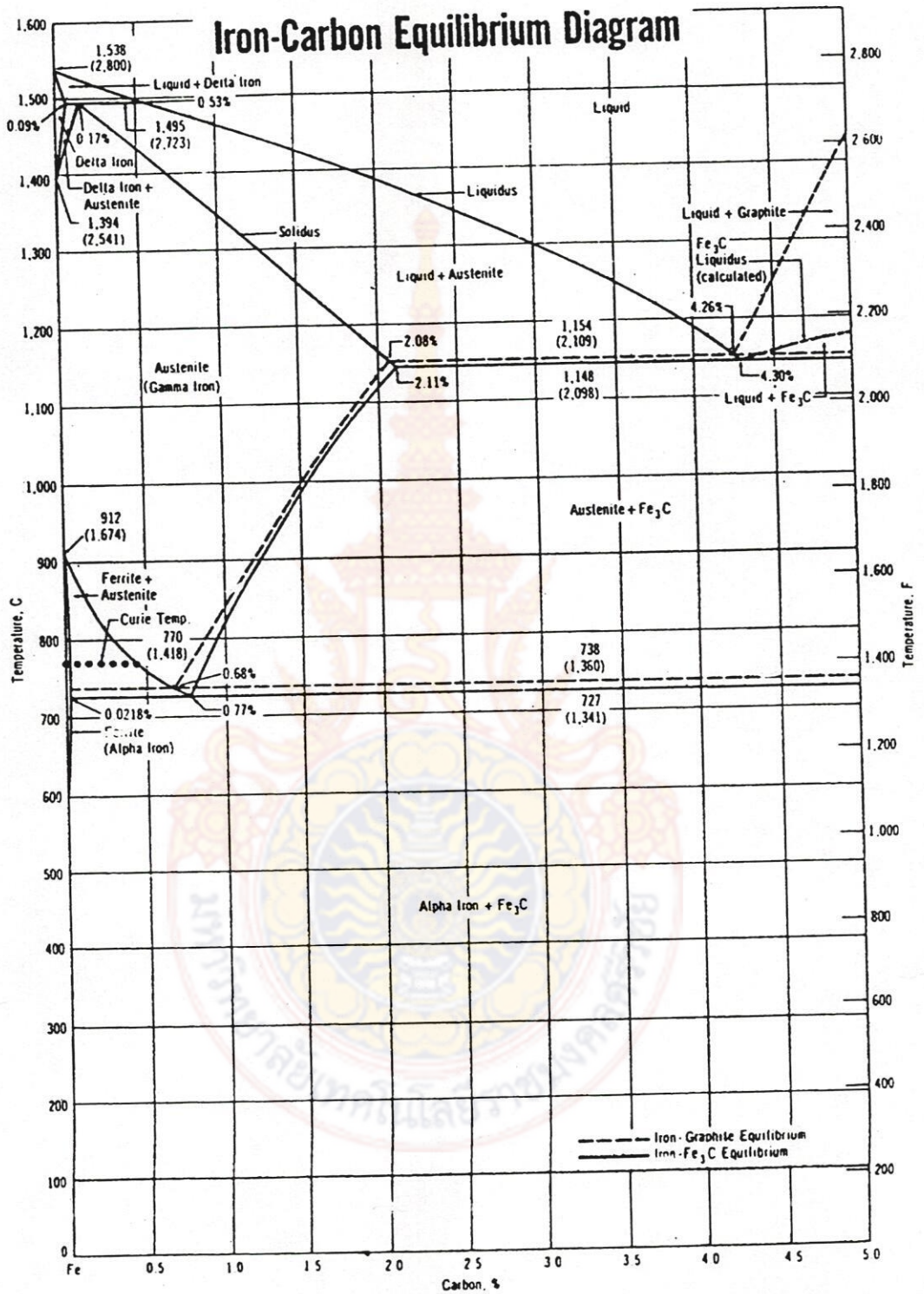
เฟอร์ไรต์เดลต้า ( $\delta$ ) คือสารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิใกล้จุดหลอมตัวของเหล็ก ( $1394^{\circ}\text{C} - 1538^{\circ}\text{C}$ ) คาร์บอนสามารถละลายได้สูงสุด  $0.09\%$  ที่อุณหภูมิ  $1495^{\circ}\text{C}$  มีระบบผลึกเป็น bcc (Body Centered Cubic) เช่นเดียวกับ เฟอร์ไรต์หรือเหล็กอัลฟา

ซีเมนไตต์ (Cementite หรือ Iron Carbide) เมื่อปริมาณคาร์บอนในระบบเหล็ก-คาร์บอนมีมากเกินไปกว่าที่มันจะละลายในเฟอร์ไรต์หรือออสเตนไนท์ได้หมด คาร์บอนที่เหลือจะจับตัวกับเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนโดยมีคาร์บอนผสมอยู่  $6.67\%$  มีสูตร  $\text{Fe}_3\text{C}$  มีความแข็งสูงแต่จะเปราะแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก

เพิร์ลไลท์ (Pearlite) คือ ผลึกที่เกิดร่วมกันระหว่างเฟอร์ไรต์ ( $0.0218\% \text{C}$ ) กับซีเมนไตต์ ( $6.67\% \text{C}$ ) เกิดจากปฏิกิริยา Eutectoid ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็นช้าๆ ตรงอุณหภูมิ  $727^{\circ}\text{C}$  การเกิดเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ จะเกิดพร้อมกันที่อุณหภูมิต่ำที่เกิดผลึกเป็นแถบยาวๆ สลับกันระหว่างเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า Lamellar Structure ดังนั้น เพิร์ลไลท์จึงไม่ใช่เฟสเดี่ยวแต่เป็นโครงสร้างที่เกิดจากสองเฟสประกอบกัน

แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนเป็นแผนภูมิประเภทที่เกิดการละลายเข้ากันเป็นเฟสเดียวในสภาพของเหลวแต่มีการแยกเป็นหลายเฟสในสภาพของแข็ง กล่าวคือ ในสภาพของแข็งคาร์บอนจะรวมตัวกับเหล็กทั้งในสภาพสารละลายของแข็ง (Ferrite  $\alpha$  Austenite  $\gamma$  และ Ferrite  $\delta$ ) และสารประกอบเชิงโลหะ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

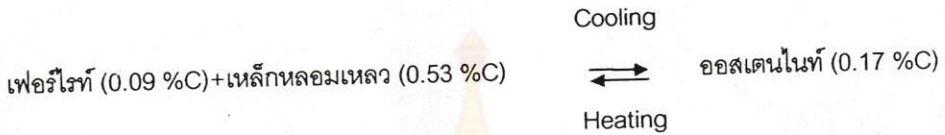




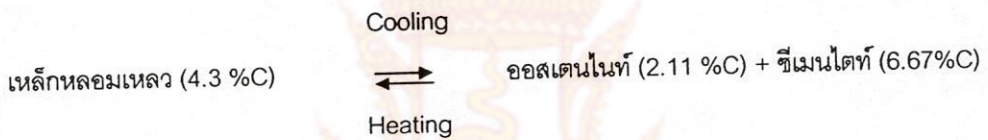
ภาพที่ 2-5 แผนภูมิสมดุลเหล็ก-คาร์บอน

2.2.1.1 ปฏิกริยาที่เกิดจากแผนภูมิสมดุลจะปรากฏปฏิกริยาสามปฏิกริยาคือ

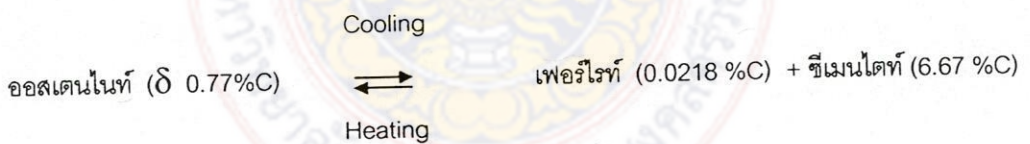
2.2.1.1.1 ที่อุณหภูมิ  $1495^{\circ}\text{C}$  จะให้ปฏิกริยา Peritectic โดยมีเฟอร์ไรต์ (0.09 %C) รวมตัวกับเหล็กหลอมเหลว (0.53 %C) ให้ออสเทนไนต์ (0.17 %C)



2.2.1.1.2 ที่อุณหภูมิ  $1148^{\circ}\text{C}$  ให้ปฏิกริยา Eutectic โดยเหล็กหลอมเหลว (4.3 %C) เกิดการแข็งตัวให้สารละลายของแข็งออสเทนไนต์ (2.11 %C) ร่วมกับซีเมนไตต์ (6.67 %C)



2.2.1.1.3 ที่อุณหภูมิ  $727^{\circ}\text{C}$  ให้ปฏิกริยา Eutectoid โดยออสเทนไนต์ (0.77 %C) แตกตัวให้เฟอร์ไรต์  $\alpha$  (0.0218 %C) กับซีเมนไตต์ (6.57 %C) จะได้โครงสร้างสุดท้ายเป็นเฟิร์ลไลต์



2.2.1.2 เส้นแบ่งอาณาเขตต่างๆ ที่ปรากฏบนแผนภูมิสมดุลที่ควรทราบมีดังนี้

A<sub>1</sub> คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกริยา Eutectoid คือ ที่อุณหภูมิ  $727^{\circ}\text{C}$

A<sub>2</sub> คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะแม่เหล็กของเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะอยู่ที่อุณหภูมิ  $770^{\circ}\text{C}$  เมื่อเหล็กร้อนเกินกว่าอุณหภูมินี้แม่เหล็กจะไม่ดูด เส้น A<sub>2</sub> ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้าง ดังนั้นจึงมักไม่ค่อยปรากฏในแผนภูมิสมดุล

A<sub>3</sub> คือ เส้นอุณหภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์  $\alpha$

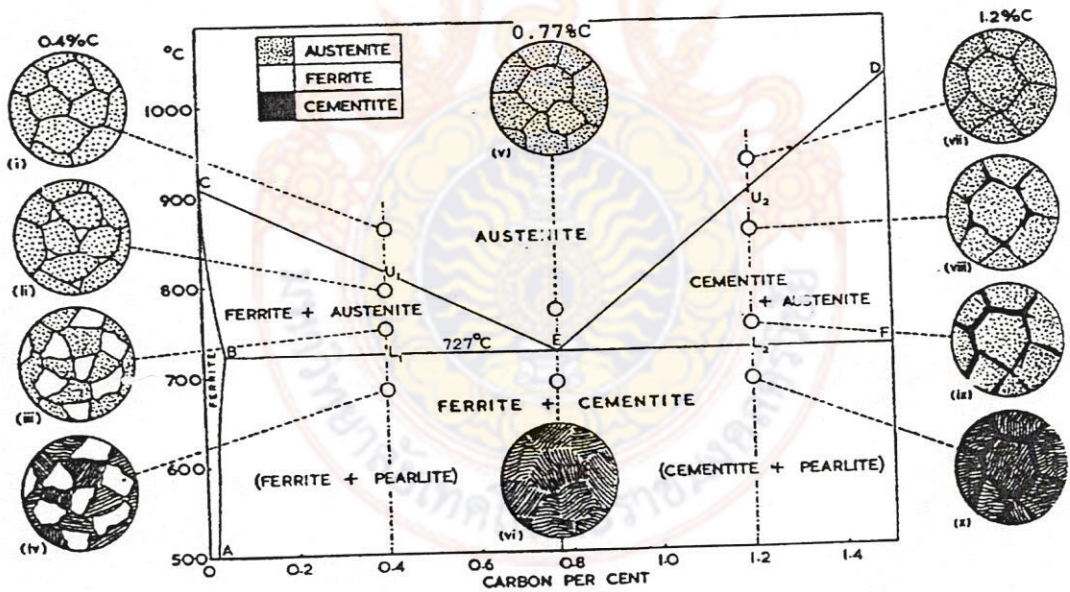
A<sub>4</sub> คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์  $\delta$

A<sub>cm</sub> คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเทนไนต์กับซีเมนไตต์

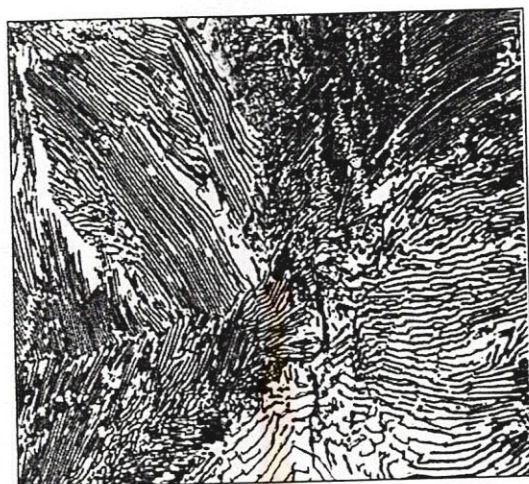


2.2.2 ตัวอย่างการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กขณะเย็นตัว ขอยกตัวอย่างเหล็กที่มีคาร์บอน 0.4% จากแผนภูมิสมดุลพิจารณาเหล็กที่มีคาร์บอน 0.4% ที่อุณหภูมิ 1538°C เหล็กจะอยู่ในสภาพหลอมละลายที่อุณหภูมิ 1510°C เหล็กจะเริ่มแข็งตัว ให้กำเนิดนิวเคลียสของเหล็ก δ (delta) ที่มีธาตุคาร์บอน 0.075% ที่อุณหภูมิเหนือ 1495°C เล็กน้อย เหล็กจะประกอบด้วยเนื้อเหล็ก δ ที่มีคาร์บอน 0.09% กับเหล็กหลอมเหลวที่มีธาตุคาร์บอน 0.53% ที่อุณหภูมิ 1495°C เป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา Peritectic กล่าวคือเหล็กที่มีธาตุคาร์บอน 0.09% จะรวมกับเหล็กหลอมเหลว (0.53 %C) บางส่วนแล้วให้เหล็ก γ (Gamma) ที่มีธาตุคาร์บอน 0.17% เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยานี้ จะได้เหล็ก γ กับเหล็กหลอมเหลวที่เหลือจากปฏิกิริยา

เมื่ออุณหภูมิลดลงจะปรากฏเหล็ก γ เพิ่มปริมาณมากขึ้น ส่วนปริมาณของเหล็กหลอมเหลวจะลดลงตามลำดับ แต่ทั้งเหล็ก γ และเหล็กหลอมเหลวจะประกอบด้วยธาตุคาร์บอนมากขึ้น



ภาพที่ 2-6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่มีส่วนผสมเป็น 0.4% C (Hypoeutectoid) 0.77% C (Eutectoid) และ 1.2% C (Hypereutectoid) ที่อุณหภูมิต่างๆ



052138

669-1  
 ๑๗๘๓ /  
 ๖๕๔๕  
 ๖-๖

ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างเฟอไรต์ไลต์ในเหล็กกล้าส่วนผสม 0.75%C กำลังขยาย 500 เท่า

ที่อุณหภูมิ 1450°C จะเป็นจุดที่เหล็กหลอมที่เหลือนแข็งตัวหมดกลายเป็นเหล็ก 0.4% คาร์บอน จนถึงอุณหภูมิ 800°C จึงจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีบริเวณรอบๆ เม็ดเกรนของเหล็ก  $\gamma$  จะให้กำเนิดนิเคิลีสของเหล็ก  $\alpha$  0.02% คาร์บอน และเมื่ออุณหภูมิลดลง ปริมาณของเหล็ก  $\alpha$  จะเพิ่มมากขึ้น ส่วนเหล็ก  $\gamma$  จะกลับมีปริมาณลดลง แต่ทั้งเหล็ก  $\alpha$  และ  $\gamma$  จะมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนเพิ่มขึ้นด้วย

ที่อุณหภูมิเหนือ 727°C เล็กน้อย จะปรากฏมีเหล็ก  $\alpha$  0.0218%C กับเหล็ก  $\gamma$  0.77%C อย่างละประมาณ 50%

ที่อุณหภูมิ 727°C เป็นอุณหภูมิที่ให้ปฏิกิริยา Eutectoid ซึ่งเหล็ก  $\gamma$  0.77% คาร์บอนจะแตกตัวให้เหล็ก  $\alpha$  0.0218% กับซีเมนไตท์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 6.67% คาร์บอนพร้อมๆ กัน โดยมีปริมาณเหล็ก  $\alpha$  0.0218% มากกว่าซีเมนไตท์ประมาณ 8 เท่า

$$\frac{\text{ปริมาณเหล็ก } \alpha}{\text{ปริมาณ Fe}_3\text{C}} = \frac{6.67 - 0.77}{0.77 - 0.0218} \approx \frac{8}{1}$$

ลักษณะการแตกตัวของเหล็ก  $\gamma$  จะให้แถบยาวๆ ของเหล็ก  $\alpha$  0.0218% คาร์บอนกับซีเมนไตท์สลับกันไป เราเรียกโครงสร้างนี้ว่าเฟอไรต์ไลต์ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงอีก จะปรากฏว่าเหล็ก 0.4% คาร์บอนจะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเหล็ก  $\alpha$  0.0218% กับเฟอไรต์ไลต์ (ซึ่งในตัวเองประกอบด้วยสองเฟสคือเฟอไรท์กับซีเมนไตท์ แต่ถ้าหาส่วนผสมเฉลี่ยของส่วนที่เป็นเฟอไรต์ไลต์จะได้ว่าส่วนผสมเฉลี่ยเป็น 0.77%C) ถ้าอุณหภูมิลดต่ำลงอีกจะปรากฏการเปลี่ยน



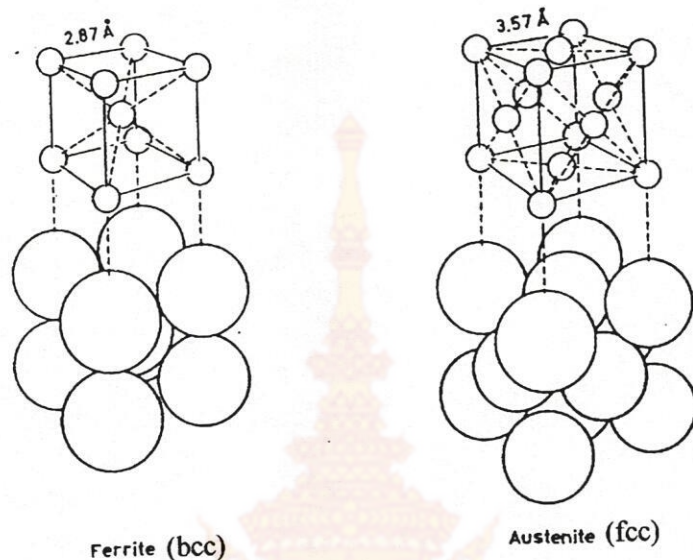
แปลงอีกเล็กน้อย โดยเหล็ก  $\alpha$  0.0218% จะแยกตัวให้เหล็ก  $\alpha$  ที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 0.0218% กับซีเมนไต์ที่ 6.67% แต่ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงจะน้อยมาก การเปลี่ยนแปลงที่อธิบายนี้จะเกิดเฉพาะเมื่ออัตราการเย็นตัว (Rate of Cooling) เป็นไปอย่างช้าๆ เพื่อเปิดโอกาสให้อะตอมของคาร์บอนสามารถเคลื่อนไหวได้ทัน ทำให้เกิดเฟสต่างๆ แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็ว จะไม่ปรากฏเฟสต่างๆ ที่อธิบายมาแต่กลับจะได้โครงสร้างของเหล็กต่างออกไป

ในการคำนวณหาปริมาณของเฟสที่เกิด ณ อุณหภูมิต่างๆ อาศัยกฎของ Lever-Arm ดังเช่นเหล็ก 0.4% C ที่  $750^{\circ}\text{C}$  จะมีปริมาณของเหล็ก  $\alpha$  เท่ากับ 34% และเหล็ก  $\gamma$  เท่ากับ 66% สำหรับเหล็กที่ประกอบด้วยคาร์บอน 0.77% โครงสร้างจะปรากฏเป็นเฟิร์ลไลต์ทั้งหมด (100%) เพราะที่ 0.77% C จะเป็นจุด Eutectoid พอดี แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $727^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างจะเป็นออสเตนไนท์ที่ 0.77% C และเมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึง  $727^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างออสเตนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรท์ (0.0218% C) กับซีเมนไต์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$  6.67% C) ซึ่งทั้งเฟอร์ไรท์และซีเมนไต์จะปรากฏเป็นแถบบางๆ (lamellar) สลับกันทำให้ได้ชื่อว่าเป็นเฟิร์ลไลต์ ซึ่งมาจากคำว่า เฟิร์ล ซึ่งแปลว่าหอยมุกชนิดหนึ่ง สำหรับเหล็กที่ประกอบด้วยคาร์บอนมากกว่า 0.77% ถึง 2% C โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟิร์ลไลต์ (สีดำ) กับ Pro-Eutectoid ซีเมนไต์ (สีขาว) ซึ่งจะอยู่รอบๆ เกรน ลักษณะโดยทั่วไป จะมีเกรนโตกว่าเหล็กที่มีคาร์บอน 0.4% ปริมาณของ Pro-Eutectoid ซีเมนไต์ จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนในเหล็ก ยิ่งปริมาณคาร์บอนใกล้ 2% เข้าไป Pro-Eutectoid ซีเมนไต์จะปรากฏจะปรากฏมากยิ่งขึ้นและจะปรากฏตามเส้นรอบเกรนของเหล็ก ข้อควรสังเกตประการหนึ่ง คือ ขนาดเกรน (Grain Size) ในเนื้อเหล็กกลับมีความสำคัญต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเป็นอย่างมาก ชิ้นงานสองชิ้นที่มีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกันมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรท์ เฟิร์ลไลต์ เหมือนกัน แต่เมื่อขนาดของเกรนต่างกันแล้ว ชิ้นงานที่มีเกรนเล็กกว่ามาก ๆ จะมีทั้งกำลังวัสดุและความเหนียวสูงกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนใหญ่

### 2.3 อันยรูปของเหล็ก (Allotropic Forms of Iron)

สภาพอันยรูป (Allotropy) หมายถึงสภาพที่ธาตุหนึ่งสามารถมีโครงสร้างผลึกได้หลายแบบ แต่ละแบบเรียกว่า อันยรูป (Allotrope) คุณสมบัติทางกายภาพของอันยรูปหนึ่งจะแตกต่างจากของอีกอันยรูปหนึ่งอย่างเห็นได้ชัด แต่ว่าคุณสมบัติทางเคมีจะเหมือนกัน สภาพอันยรูปนั้นจะขึ้นอยู่กับการเรียงตัวของอะตอม ซึ่งจะมีการเรียงตัวแตกต่างกันไปตามระดับของอุณหภูมิต่างๆ เหล็กบริสุทธิ์ มีการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์ม 4 ลักษณะที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ทำให้เกิดฟอร์มที่เรียกว่า เหล็กอัลฟา ( $\alpha$ ) เหล็กเบต้า ( $\beta$ ) เหล็กแกมมา ( $\gamma$ ) และเหล็กเดลต้า ( $\delta$ ) ใน 4 ฟอร์มนี้  $\alpha$   $\beta$  และ  $\delta$  มีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกันคือ Body Centered Cubic (bcc) ส่วนฟอร์ม  $\gamma$  จะมีโครงสร้างผลึกเป็น Face Centered Cubic (fcc) ดังนั้นจึง

กล่าวได้ว่าเหล็กบริสุทธิ์มีอันตรูรูปอยู่ 2 แบบ คือ BCC และ FCC เหล็กอัลฟาบ้างที่เรียกเหล็กเฟอร์ไรท์ และเหล็กแกมมาบ้างที่ก็เรียกว่าเหล็กออสเทนไนท์



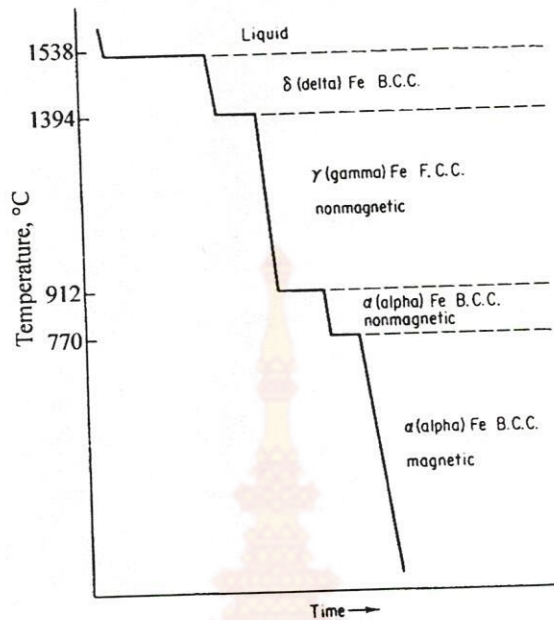
ภาพที่ 2-8 Unit Cells ของโครงสร้างผลึกแบบ Body Centered Cubic และ Face Centered Cubic ในเหล็ก

ตารางที่ 2-1 แสดงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอันตรูรูปของเหล็กบริสุทธิ์รวมทั้งเส้นที่ระบุ การเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏในแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน

การเปลี่ยนแปลง	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	เส้นหรือขอบเขตการเปลี่ยนแปลง	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
$\alpha \rightarrow \beta$	770	$A_2$	ภายในอะตอม
$\beta \rightarrow \gamma$	912	$A_3$	BCC $\rightarrow$ FCC
$\gamma \rightarrow \delta$	1394	$A_4$	FCC $\rightarrow$ BCC

การเปลี่ยนแปลง  $\alpha \rightarrow \beta$  ที่  $770^{\circ}\text{C}$  นั้นไม่ได้เปลี่ยนโครงสร้างผลึก แต่เป็นการเปลี่ยนจากเหล็ก  $\alpha$  ที่แม่เหล็กดูดติดมาเป็นเหล็ก  $\beta$  ที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กเท่านั้น ในบางกรณีเราจะเรียกรวมทั้งสองอันตรูรูปนี้เป็นเหล็กอัลฟา หรือเฟอร์ไรท์อัลฟา ( $\alpha$ -Ferrite) เมื่อมุ่งพิจารณาเฉพาะสมบัติทางกลเท่านั้น





ภาพที่ 2-9 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างเวลากับอุณหภูมิ (Cooling Curves) ของเหล็กบริสุทธิ์ที่เย็นตัวจากสภาพหลอมเหลว แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะและอัญรูปต่างๆ

## 2.4 หลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการอบชุบด้วยวิธีเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมี

การชุบผิวแข็งโดยเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมี (Chemical Heat Treatment หรือ Case Hardening) เป็นการเพิ่มธาตุบางชนิดให้แก่ผิววัสดุงานโดยการแพร่ (Diffusion) ที่อุณหภูมิสูง แล้วจึงนำไปชุบผิวแข็ง การแพร่ในผลึกของแข็งเกิดขึ้นได้เนื่องจากอะตอม สามารถเปลี่ยนตำแหน่งภายในโครงสร้างผลึกได้ พลังงานของอะตอมแต่ละตัวจะไม่เท่ากัน และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอะตอมแต่ละตัวจะมีพลังงานเพิ่มขึ้น อะตอมบางตัวจะมีพลังงานเท่ากับค่าเฉลี่ยอะตอมที่มีพลังงานสูงพอที่จะพยายามกระโดดออกจากตำแหน่งปกติ (Lattice Point) ไปแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างอะตอมตัวอื่นทำให้เกิดช่องว่าง (Vacancies) ขึ้นซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่อะตอมธาตุอื่นๆ จะเข้าไปแทรกตัวอยู่ต่อไป

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จำนวนอะตอมแทรกตัวและที่ว่างจะเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงทำให้อัตราการแพร่ซึมสูงขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการแพร่จะสามารถเกิดขึ้นได้กับโลหะผสมต่างๆ ได้เพียงแต่อะตอมธาตุที่แพร่เข้าไป สามารถก่อตัวร่วมกับโลหะที่เป็นหลักกลายเป็นสารละลายของแข็งได้ การแพร่ในสารละลายของแข็งแบบแทนที่จะเกิดขึ้นได้ต้องทำให้อะตอมเดิมหนีออกจากตำแหน่งเดิม (Lattice Point) ก่อนแล้วอะตอมของธาตุที่จะแพร่เข้าไปจะเข้าไปแทนที่ตำแหน่งอะตอมนั้น ซึ่งการแพร่ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นได้ช้ามาก จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลานาน

## 2.5 กระบวนการการแพร่ซึมของคาร์บอน (Carbon Diffusion)

กระบวนการการแพร่ซึมของคาร์บอน (Carbon Diffusion) ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมี (Case Hardening) ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการ คือ

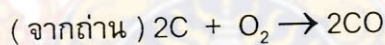
2.5.1 ขบวนการที่เกิดขึ้นในสารตัวกลางที่เป็นตัวเพิ่มธาตุภายนอกชั้นงาน ทำให้ธาตุที่จะแพร่เข้าไปแตกตัวอยู่ในสภาวะไอออน (Ionic) เช่น แอมโมเนียแตกตัวเป็นไนโตรเจน และไฮโดรเจน ( $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$ ) หรือในกรณีคาร์บอนมอนนอกไซด์ แตกตัวเป็นอะตอมธาตุคาร์บอน ( $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ ) เป็นต้น

2.5.2 ธาตุที่แตกตัวออกมาเป็นไอออนจะสัมผัสกับผิวชั้นงานและเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีและอะตอมของโลหะหลัก

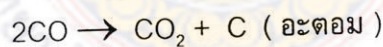
2.5.3 ธาตุที่ยึดเหนี่ยวกับโลหะหลักจะแทรกตัวเข้าไปภายในโครงสร้างผลึกของโลหะหลัก

## 2.6 กระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง

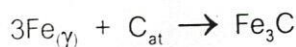
เมื่อบรรจุชิ้นงานพร้อมกับสารแป็คคาร์บูไรซิ่งลงในกล่อง นำเข้าเตาเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละน้อย จนอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $850 - 950^\circ\text{C}$  ที่อุณหภูมินี้ ออกซิเจนในบรรยากาศจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อยู่ในสารแป็คคาร์บูไรซิ่งเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ตามสมการ



จากนั้นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะแตกตัวเป็นอะตอมของคาร์บอนออกมาตามสมการ



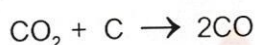
อะตอมของธาตุคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่เนื้อเหล็กโดยปฏิกิริยา



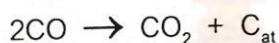
คาร์บอนจะละลายอยู่ในออสเทนไนท์เฟสของเหล็ก การเพิ่มปริมาณคาร์บอนจะทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้น และเพื่อเป็นการทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นสัมผัสกับชิ้นงานอย่างทั่วถึงจึงควรบรรจุชิ้นงานและสารแป็คคาร์บูไรซิ่งลงในภาชนะ (กล่องเหล็ก) ที่ปิดสนิท เพื่อไม่ให้ก๊าซหนีออกไปได้



จากสมการ  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  ที่อุณหภูมิต่ำออกซิเจนที่มีอยู่จะทำปฏิกิริยากับถ่านที่อยู่ใน  
 ถังคาร์บูไรซ์ซึ่งเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก๊าซคาร์บอนได  
 ออกไซด์ ( $CO_2$ ) จะทำปฏิกิริยากับถ่าน (C) ที่อยู่ในถังคาร์บูไรซ์ซึ่งตามสมการ

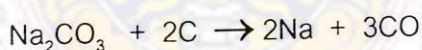


ทำให้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) มากขึ้น และคาร์บอนมอนนอกไซด์จะ  
 แตกตัวที่ผิวชั้นงานให้คาร์บอนมอนนอกไซด์ ( $CO_2$ ) กับอะตอมของคาร์บอน ตามสมการ

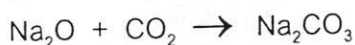


อะตอมของธาตุคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่โครงสร้างอสเทนไนท์ของเหล็ก ซึมเข้าไปในผิวของ  
 ชั้นงานวนเวียนซ้ำกันเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

ในถังคาร์บูไรซ์ซึ่งปริมาณออกซิเจนมีอยู่จำนวนจำกัดเมื่อผิวนแปรไปอาจไม่พอเพียงต่อ  
 การผลิตก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) จึงมีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต  
 หรือแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปก็เพื่อเป็นตัว  
 ช่วยเร่งปฏิกิริยามีผลให้เกิดคาร์บูไรซ์ได้เร็วขึ้น การเติมโซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) ลง  
 ไป โซเดียมคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยากับถ่านเกิดเป็นไอของธาตุโซเดียม ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อ  
 ไปเกิดเป็นโซเดียมออกไซด์ และคาร์บอนมอนนอกไซด์อีก ตามสมการ



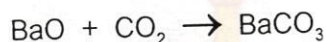
และโซเดียมออกไซด์ ( $Na_2O$ ) ที่เกิดขึ้นก็ดูดกลืนเอา ( $CO_2$ ) เข้าไปอีกกลับกลายเป็น  
 โซเดียมคาร์บอเนต ตามสมการ



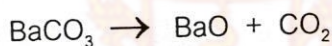
โซเดียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ก็พร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอีก เกิดเป็นวงจร  
 เช่นนี้ไปเรื่อยๆ การเติมแบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) ลงไป จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



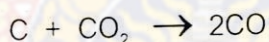
คาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดขึ้น จะเร่งการทำคาร์บูไรซ์ด้วยเหตุเดียวกับที่ได้อธิบายมาแล้วเหมือนกับโซเดียมคาร์บอเนต คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลืนไปอย่างรวดเร็ว เกิดเป็น  $\text{BaCO}_3$  เพราะว่าแบเรียมคาร์บอเนตมีความดันแตกตัวต่ำ (low dissociation pressure) ดังสมการ



นอกจากนี้ แบเรียมคาร์บอเนตยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ อยู่เฉยๆ ก็แตกตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังสมการ



และคาร์บอนไดออกไซด์จะรวมกับถ่านเกิดเป็น CO ดังสมการ



หลังจากนั้น CO ก็แตกตัวให้คาร์บอนตามสมการ  $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$  คาร์บอนก็จะซึมเข้าไปในโครงสร้างออสเทนไนท์ของเหล็ก ดังสมการที่กล่าวมาแล้ว การเกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ทำปฏิกิริยากับผิวถ่าน ซึ่งหมายถึงก๊าซทำปฏิกิริยากับของแข็งจะเกิดปฏิกิริยาอย่างง่ายกว่าสมการ  $\text{BaCO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{BaO} + 2\text{CO}$  ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็ง

การเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ลงไป แคลเซียมคาร์บอเนตค่อนข้างเฉื่อยชากับปฏิกิริยาเคมี อาจเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นได้  $\text{CaCO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{CaO} + 2\text{CO}$  แต่ยากที่จะดูดกลืน  $\text{CO}_2$  กลับมา กล่าวคือ ปฏิกิริยา  $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$  เกิดขึ้นได้ยาก

## 2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration) หรือการเสียดสี (Abrasion) ของวัสดุ ความแข็งของวัสดุเกี่ยวพันกับการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่น



เดียวกันกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั้นคือพวกโลหะและเซรามิคจะแข็งกว่าพวกโพลีเมอร์ การทดสอบความแข็ง มีอยู่หลายวิธี แต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

2.7.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 kg สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 kg สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) ค่าความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness Number) จะใช้สูตรคำนวณดังนี้คือ

$$Bhn = \frac{\text{แรงที่ใช้กด}}{\text{พื้นที่ของรอยบุ๋ม}} = \frac{P}{(\pi D/2) \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

เมื่อ  $Bhn$  = Brinell Hardness Number มีหน่วยเป็นแรง/หน่วยพื้นที่  
 $P$  = แรงที่ใช้กด  
 $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล (Indenter)  
 $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม

2.7.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้และชนิดหรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อคเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 kg จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 kg ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อคเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

2.7.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 kg ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ การคำนวณค่า Vickers Hardness Number (VHN) หรือ Diamond-Pyramid Hardness (DPH) ใช้สูตร

$$DPH = \frac{1.8544F}{D^2}$$

โดยที่  $F$  = น้ำหนักที่กด (kg)  
 $D$  = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (mm)  
 เมื่อ 1.8544 เป็นค่า  $2 \sin(\theta/2)$

เมื่อ  $\theta$  = มุมระหว่างหน้าตรงข้ามของเพชร ซึ่ง เท่ากับ 136 การทดสอบแบบนี้เหมาะกับตัวอย่างที่บางและแข็งมากๆ

ตารางที่ 2-2 แสดงตัวอย่างค่าเปรียบเทียบความแข็งที่วัดโดยวิธีต่างๆ

Material	Brinell		Vickers	Rockwell		Shore
	Impression	BHN	Pyramid	Scale		
	Dia (mm)		Number	C	B	
Soft brass	-	60	61	-	-	-
Mild Steel	5.2	131	131	-	74	20
Soft Chisel Steel	3.95	235	235	22	99	34
White Cast Iron	3.00	415	437	44	144	57
Nitride Surface	2.25	745	1050	65	-	100

## 2.8 การหาความลึกของผิวแข็งโดยประมาณ

สมาคมมาตรฐานประเทศญี่ปุ่น ได้กำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรมแห่งชาติญี่ปุ่น (JIS) เกี่ยวกับชั้นความหนา หรือความลึกของผิวแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบผิวแข็ง ด้วยค่าความแข็งตั้งแต่ 550 Hv ขึ้นไป การวัดชั้นความหนาของผิวแข็งจะวัดจากเหล็กที่ผ่านการชุบผิวแข็ง โดยนำเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งแล้วนำมาตัดและขัดให้เรียบ แล้ววัดความแข็งจากผิวนอกเข้ามาด้านในแกนกลาง โดยความแข็งของเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งจะมีความแข็งสูงที่ผิวนอก และค่าความแข็งจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อตำแหน่งวัดความแข็งเข้าไปใกล้เข้าสู่แกนกลาง



ชั้นความแข็งที่ผิวนอกสุดลึกเข้ามาด้านในแกนกลางจนถึงระดับความแข็ง 550 Hv คือ ค่าชั้นความหนาของผิวแข็ง

ในการอบชุบแข็งด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่งให้กับเหล็กคาร์บอนต่ำ สามารถคำนวณหาค่าความลึกของผิวแข็งโดยประมาณ ได้จากสมการ

$$x = K\sqrt{t}$$

เมื่อ  $x$  คือ ความลึกของผิวแข็งเป็นมิลลิเมตร

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการอบชุบเพิ่มคาร์บอนเป็นชั่วโมง

$k$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงค่า  $k$  จะสูงตามไปด้วย

## 2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บัณฑิต (2524) ความเข้มข้นของธาตุที่จะแพร่เข้าไปในผิวชั้นโลหะหลักขึ้นอยู่กับสารตัวกลางที่เป็นตัวเพิ่มธาตุแก่ผิวโลหะหลักดังกล่าว และขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของธาตุที่จะแทรกเข้าไปภายในผิวโลหะหลัก ส่วนความลึกที่ธาตุดังกล่าวจะแทรกซึมเข้าไปได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของขบวนการและความเข้มข้นของธาตุที่จะแพร่เข้าไปในผิวงาน

Breitbrat (1945) สาเหตุที่คาร์บอนจะแทรกซึมเข้าไปในเหล็กได้มากที่สุดในการทำคาร์บูไรซิ่งนั้น เกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน Breitbrat ได้ทำการทดลองทำคาร์บูไรซิ่งกับชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่เหมือนกัน 2 ชิ้น โดยวางชิ้นงานทดสอบสองชิ้นติดกัน แล้วทำขบวนการคาร์บูไรซิ่ง ผลปรากฏว่าชิ้นงานทดสอบด้านที่ติดกัน มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่าด้านที่สัมผัสกับสารเพิ่มธาตุคาร์บอนโดยตรง ดังนั้นในการวางชิ้นงานในการทำคาร์บูไรซิ่งจะต้องให้ด้านที่ต้องการเพิ่มความแข็งสัมผัสกับสารเพิ่มคาร์บอนโดยตรง นอกจากนี้เขายังพบว่าเหล็กที่มีธาตุโครเมียม (Cr) โมลิบดีนัม (Mo) หรือ วาเนเดียม (V) ผสมอยู่มากเกินไป ความสามารถในการแพร่ซึมของคาร์บอนจะต่ำ เพราะธาตุเหล่านี้จะขัดขวางการเพิ่มคาร์บอนที่ผิวเหล็ก อีกอย่างที่มีผลต่อการแพร่ซึมของคาร์บอนได้มาก คือ อุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงการแพร่ซึมก็จะสูงไปด้วย ซึ่งอุณหภูมิควรอยู่ประมาณ 1700 - 1725°F

จากหลักการของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่กล่าวมา การศึกษาทดลองครั้งนี้ จะนำวิธีการของกระบวนการชุบผิวแข็งด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ตัวแปรที่สำคัญในการการชุบผิวแข็งด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่งคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง โดยกำหนด 3 ระดับคือ ที่ระดับ 825, 875 และ 925 °C เวลาที่ใช้ในการเผาแช่ โดยกำหนด 3 ช่วงเวลา คือ 5, 10 และ 15 ชั่วโมง การใช้คาร์บอนและสารกระตุ้นในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง โดยนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง วัดความแข็งที่ผิว และการวัดชั้น

ความลึกของผิวแข็ง เพื่อวิเคราะห์การทดลอง และเปรียบเทียบตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพใน  
งานชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งของเหล็กคาร์บอนต่ำ





## บทที่ 3

### การดำเนินการและวิธีการวิจัย

ในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพในงานชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งของเหล็กคาร์บอนต่ำ

#### 3.1 การดำเนินการและวิธีการวิจัย

##### 3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

3.1.1.1 นำถ่านไม้หรือถ่านโค้กมาบดเพื่อลดขนาดให้มีขนาด 5-10 mm สำหรับถ่านไม้และขนาด 1-2 mm สำหรับถ่านโค้ก

3.1.1.2 จัดเตรียมผงแบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ) ให้มีลักษณะเป็นผงละเอียด

3.1.1.3 นำถ่านไม้หรือถ่านโค้กและผงแบเรียมคาร์บอเนต แคลเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนตผสมตามสัดส่วน ดังแสดงตารางที่ 3-1 แล้วโดยนำส่วนต่างๆ มาผสมเข้าด้วยกัน และใช้น้ำเหลืองน้ำตาลผสมในสัดส่วนที่คงที่ในทุกส่วนผสม

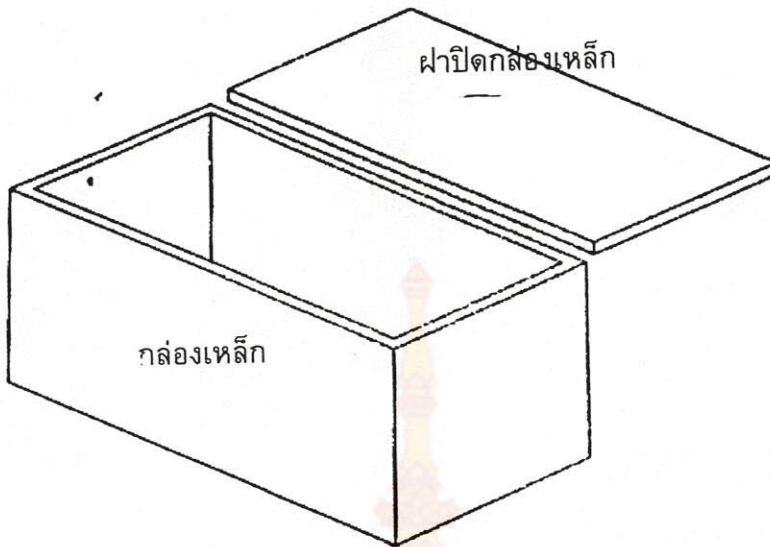
ตารางที่ 3-1 แสดงส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง (โดยน้ำหนัก)

ส่วนผสมที่	ถ่านไม้/ถ่านโค้ก	$\text{BaCO}_3$	$\text{NaCO}_3$	$\text{CaCO}_3$
1	100	15		
2	85	15		
3	83.5	15	1.5	
4	79.5	15	1.5	5

3.1.1.4 จัดเก็บส่วนผสมแล้วในกล่องและผสมให้เพียงพอสำหรับการทดลองทั้งหมด

##### 3.1.2 ขั้นตอนการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

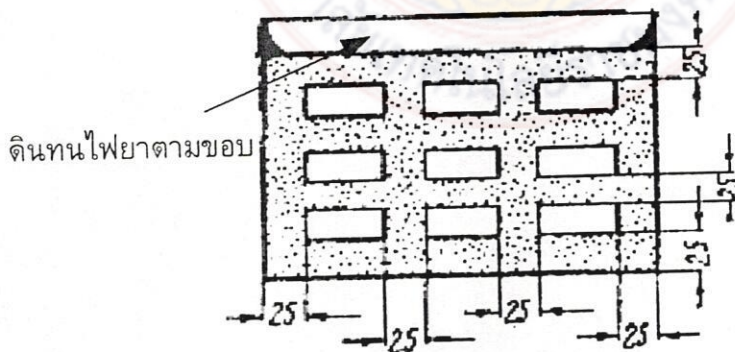
3.1.2.1 เตรียมกล่องเหล็ก โดยใช้แผ่นเหล็กหนา 4 mm และมีความกว้าง 100X 150 X100 mm พร้อมมีฝาปิดเปิดได้สะดวก หรือขนาดของกล่องอาจมีขนาดเล็ก ขึ้นอยู่กับปริมาณของชิ้นงานดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แสดงกล่องเหล็กสำหรับการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

3.1.2.2 เตรียมชิ้นทดสอบ ในการเตรียมชิ้นทดสอบนั้น เป็นเหล็กเต็มคาร์บอน AISI 4115 โดยมีส่วนผสมของธาตุต่างๆ คือ 0.12-0.18%C, 0.15-0.35%Si, 0.030%P, 0.030%S, 0.85-1.25%Cr และ 0.15-0.35%Mn ซึ่งในการตัดชิ้นงานจะตัดชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 50 mm โดยทุกชิ้นทดสอบจะต้องทำเครื่องหมาย

3.1.2.3 การบรรจุเหล็กที่จะชุบผิวแข็งบรรจุในกล่องเหล็กโดยวางให้ห่างกัน ประมาณ 20-25 mm หรือมากกว่า เมื่อบรรจุและอัดผงสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง จนแน่นและปิดมิดชิด โดยใช้ดินทนไฟยาตามขอบให้สนิทเพื่อป้องกันอากาศเข้าไปเผาไหม้กับผงสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ดังรูปที่ 3-2



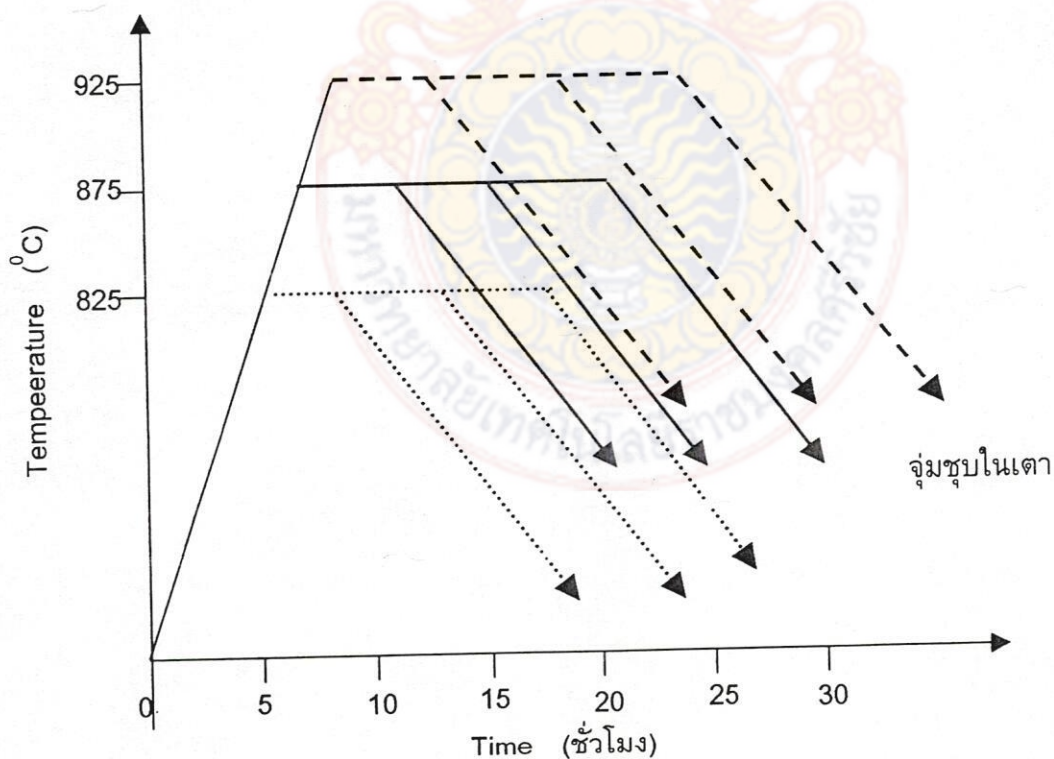
ภาพที่ 3-2 แสดงลักษณะการบรรจุชิ้นงานชุบผิวแข็งในกล่องเหล็กสำหรับการอบชุบ



3.1.2.4 การอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงผิว เป็นการนำกล่องที่บรรจุชิ้นงานและผงแพ็คคาร์บูไรซิ่ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 825 875 925 °C และที่อุณหภูมิต่างจะใช้เวลาในการอบเผาแซ่เวลาเท่ากับ 5 10 และ 15 ชั่วโมง โดยทำการอบที่ผงแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ส่วนผสมต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5 และให้เย็นตัวภายในเตาอบ

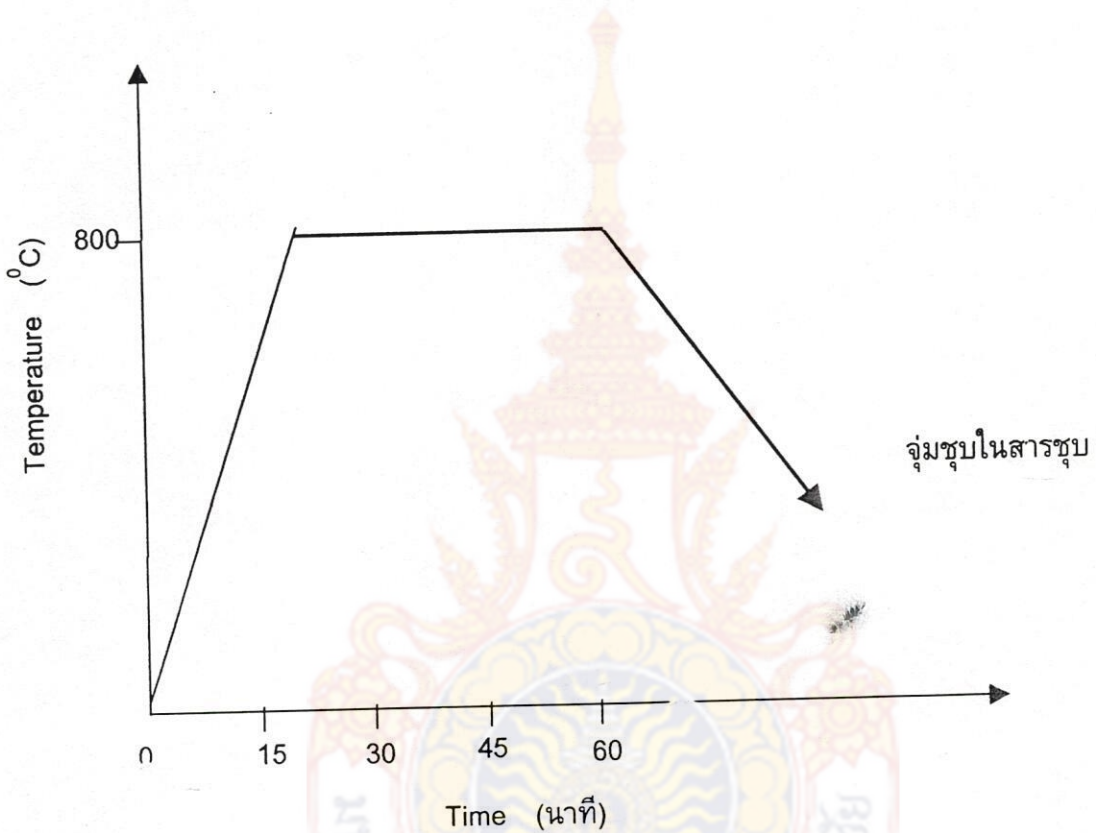
ตารางที่ 3-2 แสดงจำนวนของงานที่ใช้ในการทดลอง

	อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ (จำนวนชิ้นทดสอบ : ชิ้น)								
	825 °C			875 °C			925 °C		
	เวลาในการเผาแซ่ (ชม.)			เวลาในการเผาแซ่ (ชม.)			เวลาในการเผาแซ่ (ชม.)		
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
ส่วนผสมที่ 1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ส่วนผสมที่ 2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ส่วนผสมที่ 3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ส่วนผสมที่ 4	3	3	3	3	3	3	3	3	3



ภาพที่ 3-3 แสดงกระบวนการชุบผิวแข็งชิ้นงานแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

3.1.2.5 กระบวนการชุบแข็ง หลังจากขึ้นงานได้ผ่านกระบวนการอบเพื่อเพิ่มความแข็งผิวด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่งแล้วนั้น ชิ้นงานที่ได้จะมีผิวที่ไม่แข็งตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเตรียมชิ้นงานเพื่อชุบแข็งและทำการชุบแข็ง โดยอบที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด แล้วนำชิ้นงานดังกล่าวจุ่มเพื่อให้เย็นตัวในสารชุบ ดังแสดงภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 แสดงกระบวนการชุบแข็งชิ้นหลังการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

### 3.1.3 การทดสอบความแข็งผิวและความลึกผิวแข็ง

ขั้นตอนที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและแพ็คคาร์บูไรซิ่งแล้วนั้น เพื่อตรวจสอบถึงความแข็งผิวและความลึกผิวแข็งจึงได้ทำการทดสอบและเตรียมชิ้นงานดังนี้

3.1.3.1 นำชิ้นงานตัดเพื่อทำการปรับผิวหน้าให้มีความเรียบและ ขนาน

3.1.3.2 ทำการทดสอบผิวแข็ง โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน

3.1.3.3 ทำการทดสอบความลึกผิวแข็ง โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งหัวกดที่ใช้เป็นเพชรปริสมิต (Diamond Pyramid Hardness) โดยกำหนดตำแหน่งห่างจากผิวของชิ้นงาน ทดสอบเข้าสู่แกนกลางของชิ้นงานระยะ 0.1 mm และทำการทดสอบตำแหน่งต่อ



ไปโดยห่างจากตำแหน่งแรกหรือตำแหน่งเดิม ระยะ 0.1 mm จนถึงอีกตำแหน่งของแกนกลางของชิ้นงานทดสอบ

### 3.1.4 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ดังนี้

3.1.4.1 นำชิ้นงานทดสอบตัด แล้วทำการปรับผิวหน้าให้มีความเรียบและขนาน หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบความแข็งผิว โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน และทดสอบความลึกผิวแข็ง โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งหัตถ์ที่ใช้เป็นเพชรปิระมิด (Diamond Pyramid Hardness) โดยกำหนดตำแหน่งห่างจากผิวของชิ้นงาน ทดสอบเข้าสู่แกนกลางของชิ้นงานระยะ 0.1 mm และ ทดสอบตำแหน่งต่อไปโดยห่างจากตำแหน่งแรกหรือตำแหน่งเดิม ระยะ 0.1 mm จนถึงอีกตำแหน่งของแกนกลางของชิ้นงานทดสอบ

3.1.4.2 สร้างรหัสข้อมูลของค่าความแข็งผิว และค่าความลึกผิวแข็ง

3.1.4.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรร่วมต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพในการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง โดยใช้วัสดุในการชุบผิวแข็งแบบคาร์บูไรซิ่ง คือ เหล็กเติมคาร์บอน (Carburizing Steel : AISI 4115) ซึ่งเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำมีความสามารถในการชุบแข็งปานกลาง ในกระบวนการอบชุบนั้นจะอบชุบได้หลังจากผ่านกระบวนการอบชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งแล้ว ดังนั้นจึงได้เสนอผลการวิจัยดังต่อไปนี้

#### 4.2 การวิเคราะห์ความแข็งผิว

ผลการตรวจสอบค่าความแข็งผิว หลังจากชิ้นงานได้ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งและกระบวนการอบชุบแล้วนั้น ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกทำการทดสอบความแข็งที่บริเวณผิวของชิ้นงานและนำค่าความแข็งผิวที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของชิ้นงาน ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการตรวจสอบความแข็งผิวของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและกระบวนการอบชุบ

หมายเลขตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Hr)	ส่วนผสมที่	ค่าเฉลี่ยความแข็ง(Hv)
1	825	5	1	723.5000
2	825	5	2	768.8667
3	825	5	3	784.4000
4	825	5	4	768.8667
5	825	10	1	736.7333
6	825	10	2	852.4000
7	825	10	3	794.7000
8	825	10	4	815.2333
9	825	15	1	790.4667
10	825	15	2	848.3000
11	825	15	3	747.8667



ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	เวลา (Hr)	ส่วนผสม	ค่าเฉลี่ยความแข็ง(Hv)
12	825	15	4	827.1333
13	875	5	1	809.2667
14	875	5	2	844.9333
15	875	5	3	686.0667
16	875	5	4	823.0667
17	875	10	1	686.4667
18	875	10	2	872.5333
19	875	10	3	753.6000
20	875	10	4	805.3000
21	875	15	1	823.7333
22	875	15	2	812.8333
23	875	15	3	816.3667
24	875	15	4	792.1000
25	925	5	1	788.2667
26	925	5	2	821.3000
27	925	5	3	772.0333
28	925	5	4	801.9000
29	925	10	1	755.7333
30	925	10	2	783.9333
31	925	10	3	823.9333
32	925	10	4	765.3000
33	925	15	1	784.6333
34	925	15	2	823.6667
35	925	15	3	794.5000
36	925	15	4	830.0333

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งและกระบวนการอบชุบ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน สามารถจำแนกได้สามประเด็นหลักที่ส่งผลต่อความแตกต่างของความแข็งผิวของชิ้นงานโดยจำแนกตามตัวแปรดังนี้ อุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง เวลาในการ

เผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ซึ่งตัวแปรต่างๆ จะส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งผิวของชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงค่าต่างๆ ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน หลังผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและอบชุบ

Source of Variation	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
อุณหภูมิ	1040.419	2	520.210	0.180	0.835
เวลา	12729.459	2	6364.730	2.208	0.117
ส่วนผสม	58993.539	3	19664.513	6.822	0.000*
อุณหภูมิ x เวลา	10556.974	4	2639.244	0.916	0.460
อุณหภูมิ x ส่วนผสม	17115.552	6	2852.592	0.990	0.439
เวลา x ส่วนผสม	27529.172	6	4588.195	1.592	0.162
อุณหภูมิ x เวลา x ส่วนผสม	61044.653	12	5058.053	1.765	0.071
Error	207528.06072	72	2882.334		
Total	68226454.310	108			

\* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 4-2 ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่มีผลต่อค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน คือ ส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่มีผลต่อค่าความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับเวลาในการเผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับตัวแปรร่วมต่างๆ ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงาน คือ ตัวแปรร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับเวลาในการเผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งเฉลี่ยที่ผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับตัวแปรร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และตัวแปรระหว่างเวลาในการเผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับตัวแปรรวมทั้งหมดในการทดลอง คือ ตัวแปรระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เวลาในการเผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



จากผลการทดสอบความแข็งผิวของชิ้นงาน แล้วนำค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบความแข็งที่ผิวของชิ้นงานทั้งหมดหาค่าเฉลี่ยของความแข็งผิว โดยพิจารณาที่ระดับอุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งที่ระดับต่างกันเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของความแข็งผิวของชิ้นงานดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 แสดงระดับอุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความแข็งผิวชิ้นงาน

อุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง ( °C )	ค่าเฉลี่ยความแข็งผิว(Hv)
825	788.2056
875	793.8556
928	795.4316

จากตารางที่ 4-3 ที่ระดับอุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งที่ระดับแตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความแข็งของผิวชิ้นงาน และค่าเฉลี่ยความแข็งของผิวชิ้นงานที่ระดับอุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง 925<sup>o</sup>C จะให้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวสูงสุด เท่ากับ 795.4316 Hv เมื่อพิจารณาจากเวลาในการเผาแซ้ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง แล้วนำค่าความแข็งผิวที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย แล้วเปรียบเทียบที่ระดับเวลาในการเผาแซ้ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงระยะเวลาในการเผาแซ้ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความแข็งผิวชิ้นงาน

เวลาอบแซ้ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง ( Hr)	ค่าเฉลี่ยความแข็งผิว(Hv)
5	728.7056
10	788.1556
15	807.6361

จากตารางที่ 4-4 แสดงว่าค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของชิ้นงานที่ระยะเวลาในการเผาแซ้ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งที่ระยะเวลา 15 ชั่วโมงจะให้ค่าความแข็งผิวสูงสุดเท่ากับ 807.6361 Hv และเมื่อพิจารณาจากส่วนผสมของสารแป็คคาร์บูไรซิ่ง ความแข็งผิวที่ได้จากการทดลอง จะได้ค่าเฉลี่ยผิวแข็งดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 แสดงส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และค่าเฉลี่ยความแข็งผิวชิ้นงาน

ส่วนผสมสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ( น้ำหนัก )	ค่าเฉลี่ยความแข็งผิว (Hv)
100% ถ่านไม้	766.5333
85%ถ่านไม้ 15%BaCo <sub>3</sub>	825.4185
83.5%ถ่านไม้ 15%BaCo <sub>3</sub> 1.5%Na <sub>2</sub> Co <sub>3</sub>	774.8296
79.5%ถ่านไม้ 15%BaCo <sub>3</sub> 1.5%Na <sub>2</sub> Co <sub>3</sub> 5%CaCo <sub>3</sub>	803.2148

จากตารางที่ 4-5 แสดงว่าค่าเฉลี่ยความแข็งผิวที่ชิ้นงานที่ระดับของส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของ 79.5% ถ่านไม้ 15 %BaCo<sub>3</sub>, 1.5% Na<sub>2</sub>Co<sub>3</sub> และ 5% CaCo<sub>3</sub> ให้ค่าความแข็งผิวของชิ้นงานที่สูงสุด เท่ากับ 803.2148 Hv

### 4.3 การวิเคราะห์ความลึกผิวแข็ง

ผลการตรวจสอบค่าความลึกผิวแข็ง หลังจากชิ้นงานได้ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งและกระบวนการอบชุบแล้วนั้น ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกทำการทดสอบความลึกผิวแข็งที่บริเวณผิวหน้าตัดของชิ้นงาน และนำค่าความแข็งที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยความลึกผิวแข็งของชิ้นงานดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 แสดงผลการตรวจสอบความลึกผิวแข็งของชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและกระบวนการอบชุบ

หมายเลขตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Hr)	ส่วนผสม	ค่าเฉลี่ยความลึกผิวแข็ง(Hv)
1	825	5	1	0.7000
2	825	5	2	0.7000
3	825	5	3	0.6667
4	825	5	4	0.6000
5	825	10	1	0.8000
6	825	10	2	0.8000
7	825	10	3	0.7000
8	825	10	4	0.7000
9	825	15	1	0.9000
10	825	15	2	0.9000
11	825	15	3	0.8000
12	825	15	4	0.9333



ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Hr)	ส่วนผสมที่	ค่าเฉลี่ยความลึกผิวแข็ง(Hv)
13	875	5	1	0.9333
14	875	5	2	0.9677
15	875	5	3	0.7667
16	875	5	4	0.8333
17	875	10	1	1.0670
18	875	10	2	1.1000
19	875	10	3	1.0333
20	875	10	4	1.2000
21	875	15	1	1.3670
22	875	15	2	1.3000
23	875	15	3	1.3333
24	875	15	4	1.1333
25	925	5	1	1.2667
26	925	5	2	1.2333
27	925	5	3	1.200
28	925	5	4	1.2667
29	925	10	1	1.5333
30	925	10	2	1.5667
31	925	10	3	1.5000
32	925	10	4	1.5333
33	925	15	1	1.6333
34	925	15	2	1.7667
35	925	15	3	1.7000
36	925	15	4	1.8000

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความลึกผิวแข็งของชิ้นงานหลังจากกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งและกระบวนการอบชุบ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความลึกผิวแข็งสามารถจำแนกได้สามประเด็นหลัก ที่ส่งผลต่อความแตกต่างระหว่างความลึกผิวแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน โดยจำแนกตามตัวแปรดังนี้ อุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง

เวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง และส่วนผสมของสารแป็คคาร์บูไรซิ่ง ซึ่งตัวแปรต่างๆ ส่งผลกระทบต่อค่าความลึกผิวแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 แสดงค่าต่างๆ ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความลึกผิวแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งและอบชุบ

Source of Variation	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
อุณหภูมิ	9.9650	2	4.9820	1098.143	0.000*
เวลา	2.3500	2	1.1750	259.000	0.000*
ส่วนผสม	0.0544	3	0.0181	4.000	0.011*
อุณหภูมิ x เวลา	0.2120	4	0.0530	11.684	0.000*
อุณหภูมิ x ส่วนผสม	0.0516	6	0.0086	1.898	0.093
เวลา x ส่วนผสม	0.0216	6	0.0036	0.796	0.576
อุณหภูมิ x เวลา x ส่วนผสม	0.2340	12	1.9490	4.296	0.000*
Error	0.3270	72	0.0050		
Total	148.780	108			

\* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 .

จากตารางที่ 4-7 ตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแป็คคาร์บูไรซิ่งที่มีผลต่อค่าความลึกผิวแข็งของชิ้นงาน คือ ส่วนผสมของสารแป็คคาร์บูไรซิ่ง เวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง และอุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความลึกผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับตัวแปรร่วมต่าง ๆ ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแป็คคาร์บูไรซิ่งที่ส่งกระทบต่อความลึกผิวแข็งของชิ้นงาน คือ ตัวแปรร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งกับเวลาในการอบแซ่ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความลึกผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับตัวแปรร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของสารแป็คคาร์บูไรซิ่ง ส่งผลกระทบต่อความลึกผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และตัวแปรระหว่างเวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของสารแป็คคาร์บูไรซิ่ง ส่งผลกระทบต่อความลึกผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับตัวแปรร่วมทั้งหมดในการทดลอง คือ ตัวแปรระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง เวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่ง และส่วนผสมของสารแป็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความลึกผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



จากผลการทดสอบความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงาน แล้วนำค่าความลึกลับผิวแข็งที่ได้จากการทดสอบความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานทั้งหมดหาค่าเฉลี่ยของความลึกลับผิวแข็ง โดยพิจารณาที่ระดับอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ระดับต่างกัน เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงาน ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 แสดงระดับอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงาน

อุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ( °C )	ค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็ง(mm)
825	0.7667
875	1.0861
928	1.5083

จากตารางที่ 4-8 ที่ระดับอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ระดับแตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงาน และค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่ระดับอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ๙25<sup>0</sup>C จะให้ค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็งสูงสุด เท่ากับ 1.5083 mm เมื่อพิจารณาจากเวลาในการอบแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง แล้วนำค่าความลึกลับผิวแข็งที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย แล้วเปรียบเทียบกับระดับเวลาเผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1-1

ตารางที่ 4-9 แสดงระยะเวลาในการอบแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงาน

เวลาเผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ( Hr)	ค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็ง(mm)
5	0.9361
10	1.1278
15	1.2972

จากตารางที่ 4-9 แสดงว่าค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่ระยะเวลาในการเผาแช่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ระยะเวลา 15 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็งที่ผิวสูงสุด เท่ากับ 1.2972 mm และเมื่อพิจารณาจากส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง แล้วนำค่าความลึกลับผิวแข็งที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าเฉลี่ยความลึกลับผิวแข็งดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 แสดงส่วนผสมสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งและค่าเฉลี่ยความลึกผิวแข็งของชิ้นงาน

ส่วนผสมสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง (น้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยความลึกผิวแข็ง(mm)
100% ถ่านไม้	1.1333
85%ถ่านไม้ 15%BaCo <sub>3</sub>	1.1481
83.5%ถ่านไม้ 15%BaCo <sub>3</sub> 1.5%Na <sub>2</sub> Co <sub>3</sub>	1.0889
79.5%ถ่านไม้ 15%BaCo <sub>3</sub> 1.5%Na <sub>2</sub> Co <sub>3</sub> 5%CaCo <sub>3</sub>	1.1111

จากตารางที่ 4-10 แสดงว่าค่าเฉลี่ยความลึกผิวแข็งของชิ้นงานที่ระดับของส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของ 85% ถ่านไม้ และ 15 %BaCo<sub>3</sub> ให้ค่าเฉลี่ยความลึกผิวแข็งของชิ้นงานที่สูงสุด เท่ากับ 1.1481 mm





## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 5.1.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพในชิ้นงานชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง
- 5.1.2 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารที่ใช้ในการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง
- 5.1.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของชิ้นงานหลังทำการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่ง
- 5.1.4 เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการวิจัย ในเรื่องการอบชุบโลหะด้วยความร้อนต่อไป

#### 5.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

5.2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นเหล็กเติมคาร์บอน (Carburizing Steel) : AISI 4115 ซึ่งเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีความสามารถในการชุบแข็งปานกลาง การอบชุบต้องเติมคาร์บอนก่อน หลังจากการชุบแข็งแล้วที่ผิวจะมีความแข็งสูง ใจกลางมีความเหนียวดี

##### 5.2.2 ขอบเขตของการทดลอง

- 5.2.2.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง โดยกำหนด 3 ระดับคือที่ระดับ 825, 875 และ 925 °C
- 5.2.2.2 เวลาที่ใช้ในการเผาแซ่โดยกำหนด 3 ช่วงเวลา คือ 5, 10 และ 15 ชั่วโมง
- 5.2.2.3 การใช้ส่วนผสมระหว่างคาร์บอนและสารกระตุ้นในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง (โดยน้ำหนัก)

#### 5.3 การดำเนินการและวิธีการวิจัย

##### 5.3.1 ขั้นตอนการเตรียมการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

นำถ่านไม้หรือถ่านโค้กมาบดเพื่อลดขนาดให้มีขนาด 5-10 mm สำหรับถ่านไม้และขนาด 1-2 mm สำหรับถ่านโค้ก จัดเตรียมผงแบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ) ให้มีลักษณะเป็นผงละเอียด นำถ่านไม้หรือถ่านโค้กและผงแบเรียมคาร์บอเนต แคลเซียมคาร์บอเนตโซเดียมคาร์บอเนตผสมตามสัดส่วนมาผสมเข้าด้วยกัน และใช้น้ำเหล็องน้ำ ตาลผสมในสัดส่วนที่คงที่ในทุกส่วนผสม

### 5.3.2 ขั้นตอนการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

5.3.2.1 เตรียมกล่องเหล็กโดยใช้แผ่นเหล็กหนา 4 mm และมีความกว้าง 100 mm ยาว 150 mm สูง 100 mm พร้อมฝาปิดเปิดได้สะดวก หรือขนาดของกล่องอาจมีขนาดเล็ก ขึ้นอยู่กับปริมาณของชิ้นงาน และเตรียมชั้นทดสอบ ในการเตรียมชั้นทดสอบนั้น เป็นเหล็กเติมคาร์บอน AISI 4115 โดยมีส่วนผสมของธาตุต่างๆ คือ 0.12-0.18%C, 0.15-0.35%Si, 0.030 %P, 0.030%S, 0.85-1.25%Cr และ 0.15-0.35Mo ซึ่งในการตัดชิ้นงานจะตัดชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 50 mm โดยทุกชิ้นทดสอบจะต้องทำเครื่องหมาย นำชิ้นงานบรรจุเหล็กที่จะชุบผิวแข็ง โดยวางให้ห่างกันประมาณ 20-25 mm หรือมากกว่า เมื่อบรรจุและอัดผงสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง จนแน่นและปิดมิดชิด โดยใช้ดินทนไฟยาตามขอบให้สนิทเพื่อป้องกันอากาศเข้าไปเผาไหม้กับผงสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

5.3.2.2 การอบเพื่อเพิ่มความแข็งผิว เป็นการนำกล่องที่บรรจุชิ้นทดสอบและผงแพ็คคาร์บูไรซิ่ง นำไปอบชุบที่อุณหภูมิ 825, 875 และ 925°C อุณหภูมิต่างจะใช้เวลาในการอบชุบหรืออบแช่เวลาเท่ากับ 5, 10 และ 15 ชั่วโมง โดยทำการอบชุบที่ผงแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ส่วนผสมต่างๆ และให้เย็นตัวภายในเตาอบชุบ

5.3.2.3 กระบวนการชุบแข็งหลังจากชิ้นงานได้ผ่านกระบวนการอบเพื่อเพิ่มความแข็งผิว ด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่งแล้วนั้น ชิ้นงานที่ได้จะมีผิวที่ไม่แข็งตามที่ต้องการ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องเตรียมชิ้นงานเพื่อชุบแข็งและทำการชุบแข็ง

### 5.3.3 การทดสอบผิวแข็งและความลึกผิวแข็ง

ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและแพ็คคาร์บูไรซิ่งแล้วนั้น เพื่อตรวจสอบถึงความแข็งผิวและความลึกผิวแข็งจึงได้ทำการทดสอบและเตรียมชิ้นงานดังนี้

5.3.3.1 นำชิ้นงานตัดเพื่อทำการปรับผิวหน้าให้มีความเรียบและขนาน

5.3.3.2 ทำการทดสอบผิวแข็ง โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ บริเวณผิวของชิ้นงาน

5.3.3.3 ทำการทดสอบความลึกผิวแข็ง โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งหัวกดที่ใช้เป็นเพชรปริสมิด (Diamond Pyramid Hardness) โดยกำหนดตำแหน่งห่างจากผิวของชิ้นงาน ทดสอบเข้าสู่แกนกลางของชิ้นงานระยะ 0.1 mm และทำการทดสอบตำแหน่งต่อไปโดยห่างจากตำแหน่งแรกหรือตำแหน่งเดิมระยะ 0.1 mm จนถึงอีกตำแหน่งของแกนกลางของชิ้นงานทดสอบ

### 5.3.4 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

5.3.4.1 นำชิ้นงานทดสอบตัด แล้วนำชิ้นทดสอบไปทำการปรับผิวหน้าให้มีความเรียบและขนาน แล้วทำการทดสอบผิวแข็ง โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นทำการทดสอบความลึกผิวแข็ง โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์



ซึ่งหัตถ์ที่ใช้เป็นเพชรปริสมิต (Diamond Pyramid Hardness) โดยกำหนดตำแหน่งห่างจากผิวของชิ้นงาน ทดสอบเข้าสู่แกนกลางของชิ้นงานระยะ 0.1 mm และทดสอบตำแหน่งต่อไปโดยห่างจากตำแหน่งแรกหรือตำแหน่งเดิมระยะ 0.1 mm จนถึงอีกตำแหน่งของแกนกลางของชิ้นงาน ทดสอบ

5.3.4.2 สร้างรหัสข้อมูลของค่าความแข็งที่ผิว และค่าความลึกผิวแข็ง

5.3.4.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

## 5.4 สรุปผลการวิจัย

5.4.1 จากการวิเคราะห์ความแข็งผิวชิ้นงานพบว่า ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวของชิ้นงานดังนี้

5.4.1.1 ส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ส่วนผสมต่างกันส่งผลต่อค่าความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.1.2 เวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.1.3 อุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.2 จากการวิเคราะห์ความแข็งผิวชิ้นงาน พบว่า ตัวแปรพร้อมต่างๆ ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ส่งกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานดังนี้

5.4.2.1 ตัวแปรพร้อมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับเวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งเฉลี่ยที่ผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.2.2 ตัวแปรพร้อมระหว่าง อุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.2.3 ตัวแปรพร้อมระหว่างเวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง กับส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.3 ตัวแปรพร้อมทั้งหมดในการทดลอง คือ ตัวแปรพร้อมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.4 จากการวิเคราะห์ความลึกผิวแข็งของชิ้นงานพบว่า ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่มีผลต่อค่าความลึกผิวแข็งของชิ้นงานดังนี้

5.4.4.1 ส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.4.2 เวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.4.3 อุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.5 สำหรับตัวแปรร่วมต่างๆ ในกระบวนการชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ส่งผลกระทบต่อความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงาน ดังนี้

5.4.5.1 ตัวแปรร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับเวลาในการอบแซ่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.5.2 ตัวแปรร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ส่งผลกระทบต่อความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.5.3 ตัวแปรระหว่างเวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ส่งผลกระทบต่อความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.4.6 ตัวแปรร่วมทั้งหมดในการทดลอง คือ ตัวแปรระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เวลาในการเผาแซ่ในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งส่งผลกระทบต่อความลึกลับผิวแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

## 5.5 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองของผู้วิจัยได้การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพในงานชุบผิวแข็งแบบแพ็คคาร์บูไรซิ่งของเหล็กคาร์บอนต่ำ มีข้อเสนอแนะดังนี้

5.5.1 ควรมีการทดลองชิ้นงานที่เป็นในการทดลองที่แตกต่างกัน

5.5.2 ควรมีการศึกษาทดลองหาระยะการวางชิ้นงานที่เหมาะสม

5.5.3 ควรมีการทดลองเพื่อศึกษาการผสมระหว่างตัวประสานในการผสมสารแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

ซึ่ง



## เอกสารอ้างอิง

1. บัณฑิต ใจชื่น. การอบชุบโลหะด้วยความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2526.
2. ประกอบ จันท์ธมา. การศึกษาและทดลองการทำคาร์บูไรซิ่ง. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล และโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
3. มนัส สติรจินดา. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2535.
4. สุรพล อุปติสสกุล. สถิติการวางแผนการทดลอง. กรุงเทพมหานคร : สหมิตรออฟเซท, 2536.
5. ASM Committee on Gas Carburizing. "Carburizing and Carbonitriding". American Society for Metals : 1977.
6. Des Plaines. "Metallurgical and Chemical Consideration in Jewelry Casting." The Santa Fe Symposium on Jewelry (1987) : 223-244.
7. Douglas C. Montgomery. Design and Analysis of Experiment. Third Edition. New York : John Willey and Sons, 1991.
8. Timo J. Santala. "An Overview of Casting Technologies Currently used in Industry and Emerging Technologies. The Santa Fe Symposium on Jewelry (1995) : 213-227.
9. Lawrence H. Van Vlack, "Elements of Materials Science and Engineering", 5th edition Addison-Wesley Publishing Company 1985.
10. I. Kamenichy, "Heat Treatment: A Handbook", Peace Publisher, Moscow 1968  
American Society for Metals, "Metal Handbook", 9th edition , Vol. 4.
11. K. H. Prabhudev, "Handbook of Heat Treatment of Steels" , Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
12. Thelning , Karl-Erik "Steel and its heat treatment" 2nd edition. London Butterworth 1984.
13. William D. Callister, Jr., "Materials Science and Engineering An Introduction" 2nd edition John Wiley & Sons, Inc 1991.
14. Donald R. Askeland, "The Science and Engineering of Materials" 2nd edition Chapman & Hall 1990.