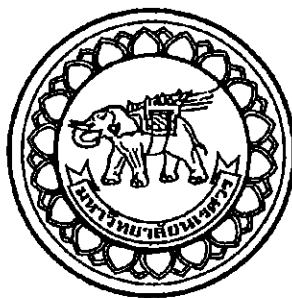


อธิบดีมหาวิทยาลัย



การทำแพ็คคาร์บูไรซิงของใบสกรูในกระบวนการผลิตถ่านไม้
PACKCARBURIZING OF SCREW BLADE IN CHARCOAL
MAKING PROCESS

นายภูมิพัฒน์ ชันติเจริญ รหัส 55361342
นายไตรรงค์ ม่วงสุข รหัส 55365357
นายอัศเรศ คำมา รหัส 55365685

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันลงทะเบียน 7. ก.พ. 2558

เลขทะเบียน 17224894

เลขเรียกหนังสือ ปร

ก ๒๒ ก

๒๕๕๘

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2558



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ	การทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งของใบสกรูในกระบวนการผลิตถ่านไม้		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายภูมิพัฒน์	ขันติเจริญ	รหัส 55361342
	นายไตรรงค์	ม่วงสุข	รหัส 55365357
	นายอัศเรศ	คำมา	รหัส 55365685
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ทศพล ตีร์จุริภาพงศ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2558		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ทศพล ตีร์จุริภาพงศ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุบลรัตน์ นาครักษ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์นฤมล สีพลไกร)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งของใบสกรูในกระบวนการผลิตถ่านไม้		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายภูมิพัฒน์	ขันติเจริญ	รหัส 55361342
	นายไตรรงค์	ม่วงสุข	รหัส 55365357
	นายอัศวิน	คำมา	รหัส 55365685
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2558		

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้เพื่อศึกษาการเพิ่มความแข็งที่ผิวให้กับสกรูอัดถ่านแท่งในกระบวนการผลิตของโรงงานอัดถ่านแท่งแห่งหนึ่งในจังหวัดพิษณุโลก โดยกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาอบ 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อศึกษาหาระยะเวลา และการแพร่ของคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด ภายหลังจากกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง สกรูจะถูกตรวจสอบธาตุคาร์บอนที่เปลี่ยนไปบริเวณผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Optical Emission Spectrometer) พร้อมกับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope) และวัดระยะการแพร่คาร์บอนที่ผิวของสกรู จากนั้นทดสอบความแข็งของผิวสกรูหลังจากกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Testing Method) สุดท้ายชิ้นงานสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งแล้วทั้งหมดจะถูกทำการชุบแข็งที่ผิว (Case Hardening) และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งด้วยวิธีเดิม

ผลการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการทำกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส คือ 4 ชั่วโมง โดยที่ใบสกรูมีระยะการแพร่คาร์บอน เท่ากับ 1.435 มิลลิเมตร และมีความแข็งเฉลี่ยหลังจากชุบแข็งแล้วเท่ากับ 49.7 HRC ในส่วนของแกนสกรูมีระยะการแพร่คาร์บอน เท่ากับ 1.230 มิลลิเมตร และความแข็งเฉลี่ยหลังจากชุบแข็ง เท่ากับ 56 HRC

Project title	Packcarburizing of Screw Blade in Charcoal Making Process		
Name	Mr. Phumiphat	Kuntichalearn	ID. 55361342
	Mr. Tririong	Moungsuk	ID. 55365357
	Mr. Akares	Kamma	ID. 55365685
Project advisor	Mr. Thotsaphon Threrujirapapong		
Major	Materials Engineering		
Department	Industrial Engineering		
Academic year	2015		

Abstract

The objective of this project is to study the increase of surface hardness of compression screw in the charcoal factory in Phitsanulok province. The pack carburizing process at 950°C with the holding times of 3, 4, 5 and 6 hours, respectively, was used to determine the suitable time and diffusion distance of carbon underneath surface. After the pack carburizing process, the increase of carbon content and microstructure of screw were determined by optical emission spectrometer and optical microscope, respectively, compared with the prior process. The diffusion distance of carbon was measured using the paronamic photos of microstructure from outer surface to inside. Rockwell hardness testing method was carried out at the screw surface both before and after the pack carburizing process. Finally, the case hardnening process was applied to the pack carburized screw spcimens. The microstructure and hardness of case hardnened spcimens were subsequently determined.

The experimental results showed that the suitable time for the pack carburizing process at 950 ° C is 4 hours. The carbon diffusion distance and average hardness after the case hardnening process of the screw blade are 1.435 mm. and 49.7 HRC. In the case of screw core, the carbon diffusion distance and average hardness after the case hardnening process were 1.230 mm and 56 HRC.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตีรจิราภาพงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และยังให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นคว้าข้อมูลในการวิเคราะห์ ตลอดจนวิธีการในการแก้ปัญหา แก้ไขข้อบกพร่องตลอดจนให้ความช่วยเหลือทางด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อุบลรัตน์ นาครักษ์ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ และอาจารย์ นฤมล สีพลไกร ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนในเรื่องกำลังใจ และค่าใช้จ่ายจนสามารถศึกษา และทำโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายภูมิพัฒน์ ขันติเจริญ

นายไตรรงค์ ม่วงสุข

นายอัศเรศ คำมา

พฤษภาคม 2559

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	4
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น	5
2.1 การชุบแข็งผิวด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง (Packcarburizing).....	5
2.2 การแพร่ของอะตอม	10
2.3 ความหนาผิวแข็ง (Case Depth).....	20
2.4 บทบาทของธาตุบางตัวในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง	21
2.5 โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	24
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินโครงการ	24
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์.....	25
3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การตรวจสอบ	26
3.5 ทำการแพ็คคาร์บูไรซ์ซึ่งสกรูอัดถ่าน	27
3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง	27
3.7 สรุปผลโครงการ และข้อเสนอแนะ	28
 บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์	 29
4.1 สกรูที่ใช้ในกระบวนการอัดถ่านแท่ง	29
4.2 กระบวนการแพ็คคาร์บูไรซ์	33
4.3 การชุบแข็งที่ผิว (Case Hardening)	38
 บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	 45
5.1 บทสรุป	45
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา	45
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไข	46
 เอกสารอ้างอิง	 47
 ภาคผนวก ก	 49
ภาคผนวก ข	52
ภาคผนวก ค	57
 ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	 62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ	4
2.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ของถ่านไม้.....	10
2.2 ข้อมูลการแพร่ของวัสดุต่าง ๆ.....	14
2.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของวัสดุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	18
2.4 ฟังก์ชันคลาดเคลื่อนสำหรับกฎข้อที่สองของฟิค	19
4.1 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของแกน และสกรูอัดถ่านก่อนการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง.....	30
4.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของแกน และใบสกรูหลังการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง	33



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การบรรจุชิ้นงานชุบแข็งผิวในหีบสำหรับการชุบ	6
2.2 การแพร่ซึมของคาร์บอนเข้าสู่ผิวของแท่งเหล็กกระหว่างการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง	7
2.3 กราฟอาร์เรเนียสระหว่าง $\ln(D)$ กับ $1/T$	11
2.4 กระบวนการแพร่ของทองแดง (Cu) สู่เหล็กนิเกิล (Ni)	12
2.5 กลไกการแพร่ n) แบบช่องว่าง x) แบบแทรกที่	13
2.6 พลังงานกระตุ้นให้อะตอมเกิดการแพร่	13
2.7 พลั๊กซ์ ขณะเกิดการแพร่หาจากจำนวนของอะตอม	16
2.8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมที่เกิดการแพร่ตามระยะทาง	16
2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของวัสดุต่าง ๆ	17
2.10 การแพร่ของอะตอมสู่ผิวของวัสดุ ตามกฎข้อที่สองของฟิค	19
2.11 ความแข็งจากผิวถึงภายใน	20
2.12 ความหนาของผิวแข็งสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิ	20
3.1 ลำดับขั้นตอนการทำงาน	24
3.2 สกรูที่ใช้ในกระบวนการอัดถ่าน	25
4.1 ชิ้นงานใบสกรู	29
4.2 ชิ้นงานแกนสกรู	30
4.3 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่กำลังขยาย 200 เท่า	31
4.4 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่กำลังขยาย 500 เท่า	31
4.5 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่กำลังขยาย 200 เท่า	32
4.6 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่กำลังขยาย 500 เท่า	32
4.7 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 3 ชั่วโมง	34
4.8 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 4 ชั่วโมง	34
4.9 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 5 ชั่วโมง	35
4.10 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 6 ชั่วโมง	35
4.11 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 3 ชั่วโมง	36
4.12 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 4 ชั่วโมง	36
4.13 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 5 ชั่วโมง	37
4.14 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 6 ชั่วโมง	37
4.15 ระยะการแพร่ของคาร์บอนในกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 950 องศาเซลเซียส	38
4.16 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 3 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง	39
4.17 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 4 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง	39
4.18 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 5 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง	40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

4.19	โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 6 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง	40
4.20	โครงสร้างจุลภาคของไบสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 3 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง.....	41
4.21	โครงสร้างจุลภาคของไบสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 4 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง.....	41
4.22	โครงสร้างจุลภาคของไบสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 5 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง.....	42
4.23	โครงสร้างจุลภาคของไบสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 6 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง.....	42
4.24	ค่าความแข็งของแกนสกรู ก่อน-หลังทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และหลังการชุบแข็งที่ผิว ที่เวลา 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง	43
4.25	ค่าความแข็งของไบสกรู ก่อน-หลังทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และหลังการชุบแข็งที่ผิว ที่เวลา 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง	43
4.26	โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของแกนสกรูที่ 3 ชั่วโมง	53
4.27	โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของแกนสกรูที่ 4 ชั่วโมง	53
4.28	โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของแกนสกรูที่ 5 ชั่วโมง	54
4.29	โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของแกนสกรูที่ 6 ชั่วโมง	54
4.30	โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของไบสกรูที่ 3 ชั่วโมง.....	55
4.31	โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของไบสกรูที่ 4 ชั่วโมง.....	55
4.32	โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของไบสกรูที่ 6 ชั่วโมง.....	56

สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

NaCl	=	Sodium Chloride
NaCN	=	Sodium Cyanide
Na ₂ CO ₃	=	Sodium Carbonate
HRC	=	Hardness Rockwell Scale C
BaCl ₂	=	Barium Chloride
C ₂ CaN ₂	=	Calcium Cyanide
HV	=	Hardness Vickers
Ar	=	Argon
C	=	Carbon
CO	=	Carbon Monoxide
CO ₂	=	Carbon Dioxide
BaCO ₃	=	Barium Carbonate
K ₂ CO ₃	=	Potassium Carbonate
K	=	Kelvin
FCC	=	Face Centered Cubic
BCC	=	Body Centered Cubic
HCP	=	Hexagonal Closed Packed
Al ₂ O ₃	=	Aluminium Oxide
MgO	=	Magnesium Oxide
exp	=	Exponential
APF	=	Atomic Packing Factor
CP	=	Carbon Potential
HB	=	Hardness Brinell
AISI	=	American Iron And Steel Institute
JIS	=	Japaness Industrial Standards
CaCO ₂	=	Calcium Carbonate
N/mm ²	=	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
m ² /sec	=	ตารางเมตรต่อวินาที
cal/mol	=	แคลลอรี่ต่อโมล
cm ² /sec	=	ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

โครงการนี้เกิดขึ้นจากการไปสำรวจกระบวนการผลิตของกิจการโรงงานอัดถ่านแท่งแห่งหนึ่งในจังหวัดพิษณุโลก และได้สังเกตว่าหัวใจสำคัญของการผลิตนี้อยู่ที่กระบวนการขึ้นรูป โดยจะใช้เครื่องอัดถ่านเพื่อขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ และพบว่าสกรูที่ใช้ในการอัดถ่านเพื่อทำการขึ้นรูปให้ได้ขนาดนั้น เกิดการสึกหรอส่งผลทำให้ถ่านที่อัดขึ้นรูปไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ ทางโรงงานจึงใช้วิธีการเชื่อมพอกในตรงส่วนที่สึกหรอ และทำการเจียรในผิวให้ได้ขนาดเหมือนเดิม จึงค่อยนำกลับไปใช้งานอีกครั้ง

จากการสอบถามทางโรงงานทราบว่า สกรูที่ผ่านการเชื่อมพอกแล้วนำไปใช้งาน สามารถใช้งานได้แค่ระยะเวลาสั้น ๆ สกรูก็มีการสึกหรออีก ถ่านที่ขึ้นรูปก็ไม่ได้ตามขนาดที่ต้องการ ทางโรงงานจึงนำสกรูที่สึกหรอนั้นมาทำการเชื่อมพอกตามแนวใบสกรูอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งขั้นตอนการแก้ปัญหาของโรงงานนี้จะเสียเวลาในการซ่อมแซมสกรูมาก เนื่องจากต้องถอดสกรูออกจากเครื่องอัดถ่านทุกครั้งที่น่าไปทำการซ่อม และยังเสียค่าใช้จ่ายในการเชื่อมพอกสกรูอีกด้วย

ในเบื้องต้น ทางผู้จัดทำจึงอยากที่จะแก้ไขปัญหาสกรูสึกหรอ โดยใช้วิธีการเพิ่มความแข็งที่ผิวของใบสกรูด้วยกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง วิธีนี้มีต้นทุนในการปรับปรุงต่ำ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน วัสดุอุปกรณ์สามารถหาได้ทั่วไป นอกจากนั้นทางโรงงานมีเศษถ่านเหลือใช้จากการผลิตอยู่แล้ว จึงมีความคิดที่จะเอาถ่านในส่วนนั้น มาใช้ทำการกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งให้กับสกรู เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับสกรู จนถึงระดับที่สามารถทำการชุบแข็งได้ วิธีนี้คาดว่าจะทำให้สกรูมีความแข็งเพิ่มขึ้น ทนต่อการสึกหรอ การเสียดสี สามารถใช้งานได้นานขึ้นกว่าเดิม และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในโรงงานได้อีกด้วย

ดังนั้นปริญญานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความแข็งของสกรูอัดถ่านในโรงงานแห่งนี้ด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่งและการชุบแข็ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อเพิ่มความแข็งที่ผิวให้กับสกรูอัดถ่าน

1.2.2 เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

1.2.3 เพื่อปรับปรุงกระบวนการอัดถ่านให้ดีขึ้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ผิวสกรูอัดถ่านมีความแข็งเพิ่มขึ้น
- 1.3.2 ใบสกรูอัดถ่านทนต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น
- 1.3.3 ได้ทราบถึงเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการแพร่คาร์บอนเข้าไปในใบสกรูอัดถ่าน

1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

- 1.4.1 ทำแท็คคาร์บูไรซิ่งให้กับสกรูอัดถ่าน
- 1.4.2 ขนาดผงบดถ่านไม่มีขนาดไม่เกิน 150 ไมโครเมตร
- 1.4.3 สกรูอัดถ่านมีขนาด กว้าง 9 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร
- 1.4.4 อุณหภูมิที่ใช้ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาอบ 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง
- 1.4.5 ตรวจสอบปริมาณคาร์บอนก่อน และหลังกระบวนการแท็คคาร์บูไรซิ่งด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Optical Emission Spectrometer)
- 1.4.6 ตรวจสอบระยะการแพร่ของคาร์บอนจากผิวชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- 1.4.7 วัดความแข็งของผิวสกรูหลังกระบวนการแท็คคาร์บูไรซิ่ง
- 1.4.8 ทำการชุบแข็งผิว (Case Hardening) กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแท็คคาร์บูไรซิ่ง
- 1.4.9 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งผิว
- 1.4.10 ทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งผิว

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษากรรมวิธีแท็คคาร์บูไรซิ่ง และการชุบแข็งผิว
- 1.5.2 กำหนดขั้นตอนการทดลองแท็คคาร์บูไรซิ่ง และการชุบแข็งผิว
- 1.5.3 ทำการทดลองแท็คคาร์บูไรซิ่งกับส่วนที่ตัดมาจากสกรู
- 1.5.4 ตรวจสอบปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแท็คคาร์บูไรซิ่ง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Optical Emission Spectrometer)
- 1.5.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และระยะการแพร่คาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- 1.5.6 วัดความแข็งที่ผิวสกรูก่อน และหลังกระบวนการแท็คคาร์บูไรซิ่ง
- 1.5.7 ทำการชุบแข็งผิวของชิ้นงานสกรูที่ผ่านแท็คคาร์บูไรซิ่ง
- 1.5.8 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และวัดความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งผิว
- 1.5.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.5.10 สรุปผลการดำเนินโครงการ และข้อเสนอแนะ

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

พฤษภาคม 2558 – พฤษภาคม 2559



1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงานโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงานโครงการ

การดำเนินโครงการ	ช่วงเวลา													
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
1.8.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบ	↕	↕												
1.8.2 เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์		↕	↕											
1.8.3 เตรียมสารแพ็คเกจรีบูต			↕	↕										
1.8.4 ทำการทดลองแพ็คเกจรีบูต				↕	↕									
1.8.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และวัดความแข็งของสกรู					↕	↕								
1.8.6 ทำการชุบแข็งผิว ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และวัดความแข็ง						↕	↕							
1.8.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง								↕	↕	↕				
1.8.8 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ										↕	↕		↕	

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

การชุบแข็งผิว (Surface Hardening) [1] เป็นการเพิ่มความแข็งให้กับชิ้นงานที่บริเวณเท่านั้น ส่วนบริเวณเนื้อภายในผิวที่ทำให้แข็งจนถึงใจกลางนั้น ยังคงมีความอ่อนนุ่ม และเหนียวอยู่ซึ่งทำให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานที่ต้องเจอกับแรงบิด [2] การเสียดสี [3] และแรงกระแทก [4] ได้ดี โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก ตัวอย่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่นิยมชุบแข็งผิว เช่น เพลาข้อเหวี่ยง เพลาขารวลิ้น เฟืองเกียร์ เป็นต้น ในกระบวนการชุบแข็งผิว จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับหลักการแพร่ของอะตอมที่ใช้ในการชุบแข็งเข้าไปผิวเนื้อของชิ้นงานโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

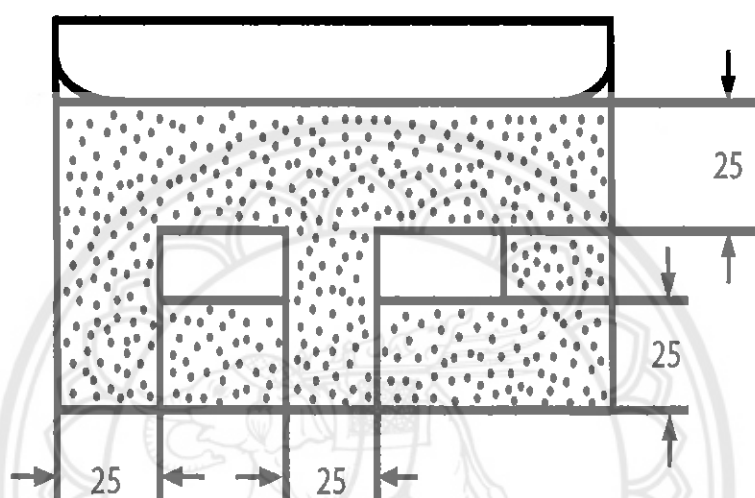
2.1 การชุบแข็งผิวด้วยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิง (Packcarburizing) [1]

เหล็กที่ทำการชุบแข็งที่ผิวด้วยกรรมวิธีนี้จะต้องเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำประมาณร้อยละ 0.1-0.2 และอาจมีธาตุบางตัว เช่น นิกเกิล โครเมียม หรือวาเนเดียมผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับเหล็ก ปกติเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำจะไม่สามารถทำการชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดา เพราะมีคาร์บอนน้อยจะไม่มีโอกาสได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่เหล็กชนิดนี้จะมีความเหนียวสูง ทนได้ดีต่อแรงบิด และแรงกระแทก หลักในการชุบด้วยวิธีนี้คือ ใช้หลักการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กได้สูงประมาณร้อยละ 0.8 ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอนที่มีสมบัติชุบแข็งดีที่สุด หลังจากนั้นจะนำเหล็กไปทำการชุบเพื่อให้ได้ความแข็ง และความเหนียวต่อไป การทำแพ็คคาร์บูไรซิงอาจแบ่งตามลักษณะของตัวกลางที่ให้คาร์บอนออกเป็น 3 กลุ่ม คือ สารเพิ่มคาร์บอนแบบของแข็ง สารเพิ่มคาร์บอนแบบของเหลว และสารเพิ่มคาร์บอนแบบก๊าซ

2.1.1 การเพิ่มโดยใช้สารเพิ่มคาร์บอนสภาพของแข็ง (Solid Carburizing)

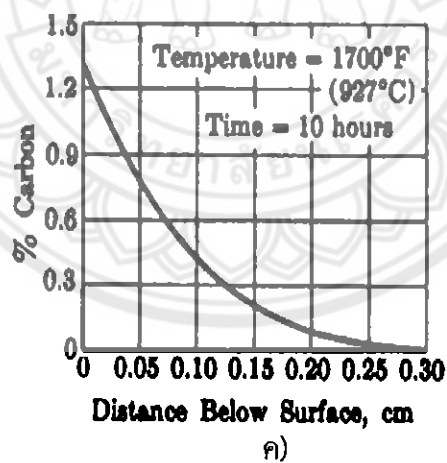
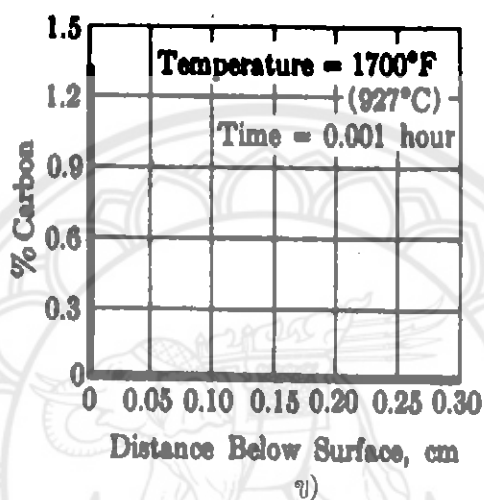
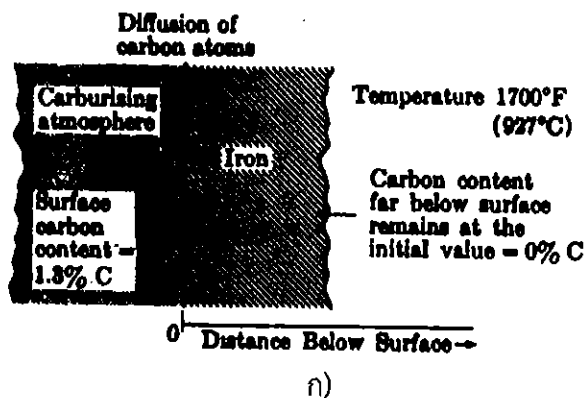
การชุบแข็งที่ผิวโดยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิง (Carburizing) วิธีการชุบแข็งที่ผิวแบบนี้มีจุดประสงค์ที่ต้องการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับผิวชิ้นงานที่ต้องการชุบแข็งที่ผิว สารเพิ่มคาร์บอนที่ใช้ได้แก่ ผงถ่านไม้ (Charcoal) ประมาณร้อยละ 70-80 โดยน้ำหนัก ผสมกับสารเร่งปฏิกิริยา (Energizer) ได้แก่ ผงแบเรียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนต และแคลเซียมคาร์บอเนต รวมกันอีกประมาณร้อยละ 20-30 ตัวอย่างเช่น ถ่านไม้ ร้อยละ 74-78, BaCO_3 ร้อยละ 12-15, Na_2CO_3 ร้อยละ 1-1.5 และ CaCO_3 ร้อยละ 3-5

การชุบแข็งที่ผิวโดยวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ทำโดยนำเอาแท่งเหล็กที่จะชุบผิวแข็งมาบรรจุในทึบเหล็ก หรือภาชนะเคลือบที่ทนความร้อน โดยอัดผงสารเพิ่มคาร์บอนให้รอบแท่งเหล็ก และอัดให้แน่น ถ้ามีแท่งเหล็กหลาย ๆ ชิ้นบรรจุในทึบเดียวกันจะต้องวางให้ห่างกันประมาณ 20–25 มิลลิเมตร [1] หรือจะมากกว่านี้ก็ไม่มีผลเสียเมื่อบรรจุ และอัดผงสารเพิ่มคาร์บอนจนแน่นดีแล้วจะต้องมีฝาปิดอย่างมิดชิด โดยใช้ดินทนไฟยาตามรอยให้สนิทเพื่อป้องกันมิให้อากาศแทรกเข้าไปทำการเผาไหม้กับคาร์บอนได้ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การบรรจุชิ้นงานชุบแข็งผิวในทึบสำหรับการชุบ [1]

จากนั้นนำเอาทึบเหล็กไปเผาในเตาจนถึงอุณหภูมิระหว่าง 950 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้เพิ่มปริมาณคาร์บอนจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของเหล็กที่จะชุบแข็งผิว และที่สำคัญก็คือความหนาของผิวแข็งที่ต้องการตามปกติถือหลักปฏิบัติง่าย ๆ คือจะเผานาน 1 ชั่วโมงต่อความหนาของผิวแข็ง 0.1 มิลลิเมตร แต่ปริมาณของคาร์บอนที่ผิว และได้ผิวจนถึงใจกลางจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแพร่ซึมของคาร์บอนเข้าสู่ผิวของแท่งเหล็กระหว่างการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง [1]

ก) แผนผังแสดงขั้นตอนที่ใช้ในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

ข) กราฟระยะการแพร่ของคาร์บอน

ค) กราฟระยะการแพร่ของคาร์บอนหลังจากเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง

การชุบแข็งที่ผิวโดยวิธีเคมีความร้อนเป็นการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของผิวเหล็กที่อุณหภูมิสูง ความแข็งที่ผิวอาจได้จากการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีโดยตรง ซึ่งไม่ต้องชุบแข็งก็ได้ หรือบางกรรมวิธีต้องมีการชุบแข็งภายหลัง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุผสมที่ได้จากสารเคมีนั้น ๆ การชุบแข็งด้วยวิธีนี้จำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1.1.1 การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของออสเทนไนต์

ประกอบไปด้วยคาร์บูไรซิ่ง คาร์บูไนไตรต์ และไซยาไนต์ วิธีการนี้คาร์บอน และไนโตรเจนจะแพร่ซึมเข้าไปในเฟสออสเทนไนต์

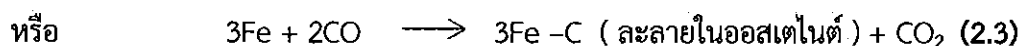
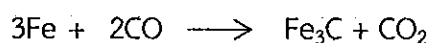
2.1.1.2 การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของเฟอร์ไรต์

ได้แก่ ไนไตรต์ ไนโตรคาร์บูไรซิ่ง วิธีไนโตรเจน และคาร์บอนจะแพร่ซึมเข้าไปในเฟสเฟอร์ไรต์สารที่เป็นตัวให้คาร์บอนประกอบไปด้วย ถ่านไม้ หรือถ่านโค้ก ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกคาร์บอนเนต เช่น แบเรียมคาร์บอนเนต แคลเซียมคาร์บอนเนต โซเดียมคาร์บอนเนต เป็นต้น จากนั้น ใส่น้ำมัน หรือโมลาส เพื่อช่วยให้เกิดการอัดตัวที่แน่นขึ้น สารเพิ่มคาร์บอนโดยทั่วไป เป็นสารเพิ่มคาร์บอนสำเร็จรูปมีส่วนผสมของถ่านโค้กร้อยละ 25 แบเรียมคาร์บอนเนตร้อยละ 12-18 โซเดียมคาร์บอนเนตร้อยละ 2 กำมะถันร้อยละ 0.5 อาจมีสารออร์แกนิกส์คาร์บอนเนตอื่น ๆ อีก ร้อยละ 8 และผสมถ่านไม้เข้าไปเพื่อช่วยเพิ่มคาร์บอนที่ผิวได้ดีขึ้น

ปฏิกิริยาแผ่คาร์บูไรซิ่งที่เกิดขึ้นภายในกล่องที่บรรจุชิ้นงานก๊าซออกซิเจนที่แทรกอยู่ตามช่องว่างของผงถ่าน และชิ้นงานเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิด CO_2 ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยาต่อเนื่องแล้วให้ CO ดังสมการ 2.1

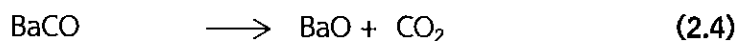


จากนั้น CO ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับผิวเหล็ก และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องดังสมการ 2.2 และสมการ 2.3



ซีเมนไทต์เกิดขึ้นที่ผิวนอกสุดของเหล็ก จากนั้นคาร์บอนในซีเมนไทต์สลายตัวเข้าไปในออสเทนไนต์ และแพร่เข้าสู่ภายในสารที่ช่วยกระตุ้นทำให้เกิดปฏิกิริยา ได้แก่

$\text{BaCO}_3, \text{Na}_2\text{CO}_3, \text{K}_2\text{CO}_3$ และ CaCO_3 จะแตกตัวให้ CO_2 และโลหะออกไซด์ ซึ่ง CO_2 ที่ได้เป็นตัวทำปฏิกิริยากับผงถ่านทำให้ได้ CO ดังสมการ 2.4 และ 2.5



ข้อดีของกรรมวิธีแพ้คาร์บูไรซ์ซึ่งสามารถใช้ได้กับเตาหลายแบบ ประหยัดและให้ประสิทธิภาพสูงทั้งการผลิตปริมาณมาก และปริมาณน้อย ผงถ่านที่อัดแน่นรอบชิ้นงานในกล่องเป็นตัวป้องกันการโค้งงอของชิ้นงานได้ดี ส่วนข้อเสียคือ ทำการชุบโดยตรงได้ประสิทธิภาพไม่ดี การควบคุมระยะการซึมลึกของชั้นผิวแข็งทำได้ค่อนข้างยากโดยเฉพาะบริเวณที่ต้องการให้ผิวแข็งมีพื้นที่เล็ก และแคบ

2.1.2 ถ่านไม้

ถ่านไม้ (Charcoal) โดยทั่วไปแล้วถ่านสีดำจะนุ่ม และมีเปลือกไม้ติดอยู่จะมีสมบัติที่ ติดไฟง่าย และมีพลังงานความร้อนเพียงพอที่จะหลอมละลายโลหะ และเหล็กได้ ถ่านเกือบทั้งหมดที่มีการผลิตทั่วโลกจะมีความคล้ายคลึงกับถ่านชนิดนี้เผาที่อุณหภูมิระหว่าง 500–700 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบของเนื้อไม้ทุกชนิด ประกอบไปด้วยแร่ธาตุ และสารต่าง ๆ เมื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิงทั้งในรูปของฟืน และถ่านขณะเผาไหม้ ส่วนประกอบของแร่ธาตุ และสารต่าง ๆ จะระเหยออกมาในรูปของไอร้อน และกลิ่น ซึ่งสำคัญที่สุดคือ คาร์บอน ส่วนประกอบ และสารต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีสารตัวหนึ่งคือ สารทาร์ (Tar) ถูกสกัดออกมาด้วยซึ่งวงการแพทย์ยอมรับว่า สารทาร์ คือ สารก่อมะเร็งตัวหนึ่ง ถ่านที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงในการหุงหาอาหาร หรือใช้ถ่าน บั๊ ย่าง อาหาร จึงควรใช้ถ่านที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตที่ทำให้ไม่กลายเป็นถ่านสมบูรณ์ที่สุด ค่าคงตัวปริมาณคาร์บอน ถ่านไม้ต่ำกว่าร้อยละ 85 จะมีสารระเหยปะปนออกมาในขณะติดไฟน้อยที่สุด การประเมินคุณภาพ และสมบัติทางเชื้อเพลิงสามารถวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM (American Society For Testing And Materials) ด้วยค่าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความร้อน (Heating Value) ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (Volatile Matters) ค่าคงตัวปริมาณคาร์บอน (Fixed Carbon) ปริมาณเถ้า (Ash Content) และปริมาณความชื้น (Moisture Content) [16] โดยถ่านไม้ต่าง ๆ มีองค์ประกอบที่สำคัญดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ของถ่านไม้ [16]

ชื่อตัวอย่าง	Proximate Analysis (As Received)				ค่าความร้อน แคลอรีต่อ กรัม
	ร้อยละ ความชื้น	ร้อยละ เถ้า	ร้อยละ สารระเหย	ร้อยละ คาร์บอน คงตัว	
ถ่านไม้ยูคาลิปตัส	3.92	1.12	25.97	68.99	7,689.50
ถ่านจากการเผาถ่านไม้เบงกอล	11.92	5.56	6.49	76.76	7,601.00
ถ่านไม้สะเดา	7.6	4.23	9.64	76.14	7,511.10
ถ่านไม้มะขามเทศ	3.61	4	21.05	71.35	7,391.53
ถ่านไม้กระถินยักษ์	5	3.2	16.3	75.5	7,138.50
ถ่านไม้หนาม	5.97	4.09	9.51	80.43	7,132.09

2.2 การแพร่ของอะตอม

การแพร่ของอะตอม (Diffusion of Atom) เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาพของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การแพร่ในสภาพของเหลว และก๊าซ นั้นเกิดขึ้นได้ง่าย แต่การแพร่ในสภาพของแข็งนั้นจะต้องอาศัยตัวช่วยกระตุ้นให้เกิดการแพร่ อันได้แก่ ความร้อน ยิ่งมีพลังงานความร้อนมากก็จะช่วยให้เกิดการแพร่ได้ดีขึ้น อัตราการเคลื่อนที่ของอะตอมมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิหรือพลังงานความร้อน ดังสมการสมการ 2.6 ของอาร์เรเนียส (Arrhenius)

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.6)$$

เมื่อ D_0 คือ ค่าคงที่

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($1.987 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$)

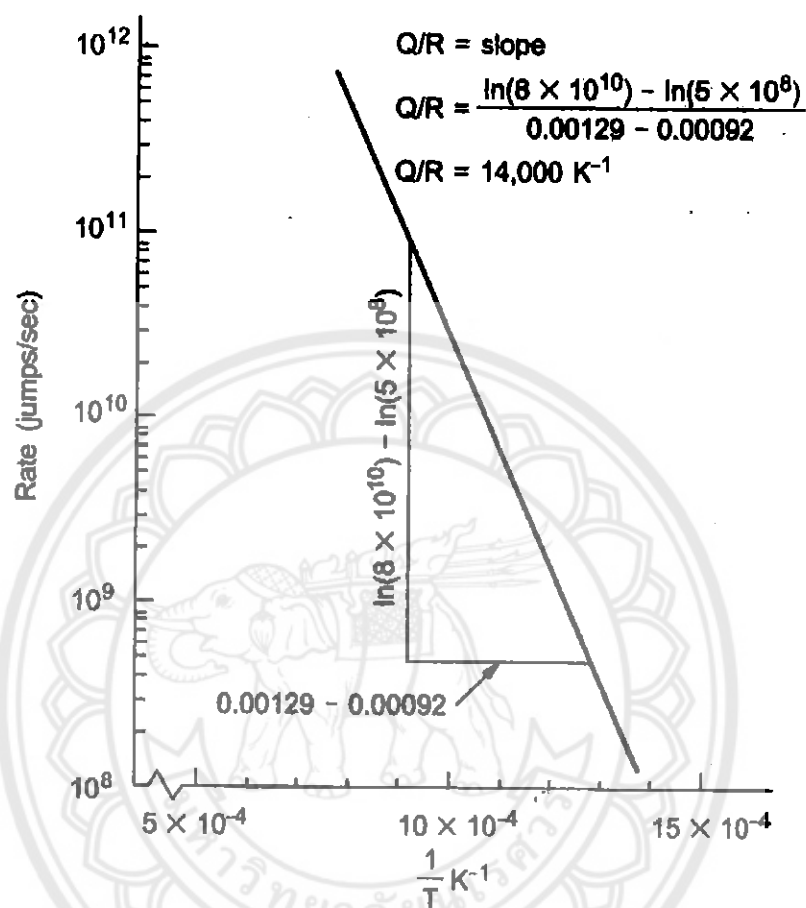
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

Q คือ พลังงานกระตุ้น (cal/mol)

สมการของอาร์เรเนียสสามารถเขียนในรูปของลอการิทึมธรรมชาติได้ดังสมการ 2.7

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \frac{Q}{RT} \quad (2.7)$$

เราสามารถพล็อตกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D)$ กับ $1/T$ (ดังแสดงในรูป ที่ 2.3) โดยความชันของเส้นกราฟจะเป็นค่า $-Q/R$ เราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (Q) ของกระบวนการได้จากความชันของเส้นกราฟดังกล่าว



รูปที่ 2.3 กราฟอาร์เรเนียสระหว่าง $\ln(D)$ กับ $1/T$ [20]

2.2.1 กลไกการแพร่ (Diffusion Mechanisms)

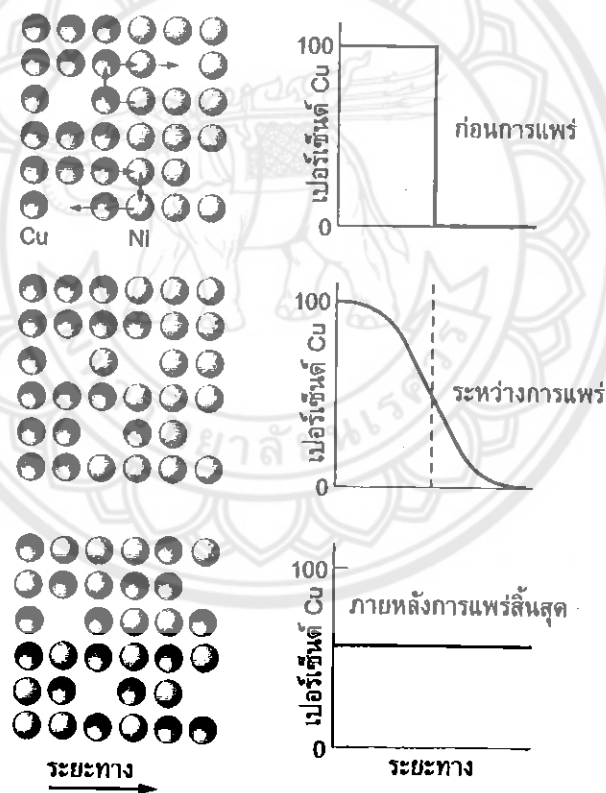
การแพร่ของอะตอมของโลหะบริสุทธิ์เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมของตัวเองจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง กระบวนการแพร่แบบนี้ เราเรียกว่าการแพร่โดยอะตอมของตัวเอง (Self-Diffusion) แต่กระบวนการการแพร่โดยอะตอมที่ต่างชนิดกันหรืออะตอมของวัสดุที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นการแพร่เข้าหากันระหว่างอะตอมของทองแดง (Cu) และนิกเกิล (Ni) [14] นั้นมีกลไกการแพร่อยู่ 2 อย่างคือ

2.2.1.1 การแพร่แบบช่องว่าง (Vacancy Diffusion)

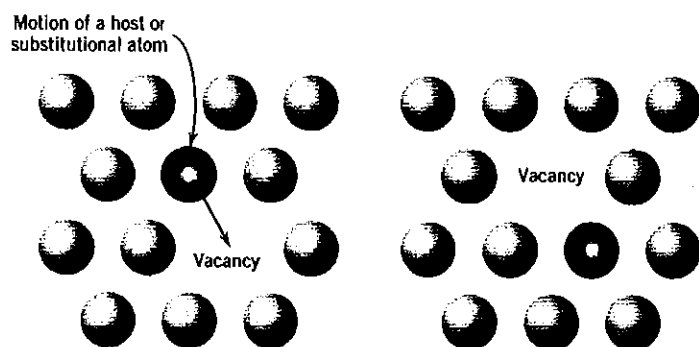
การแพร่แบบช่องว่างนี้จะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอะตอมจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เมื่อมีพลังงานกระตุ้นทำให้อะตอมสั่นสะเทือน และเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งโดยการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งสู่ที่ว่างอีกตำแหน่งหนึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างเกิดขึ้นจึงเรียกว่าการเคลื่อนที่แบบช่องว่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก)

2.2.1.2 การแพร่แบบแทรกที่ (Interstitial Diffusion)

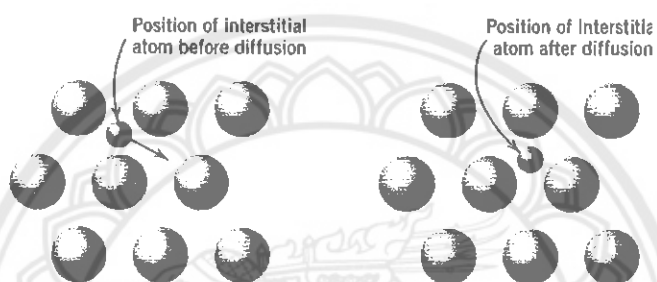
เป็นการแพร่ที่เกิดกับอะตอมที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ไปแทรกอยู่ตามช่องระหว่างอะตอมที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ข) พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่เป็นพลังงานที่ใช้ในการทำให้อะตอมเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 พลังงานที่ใช้ทำให้อะตอมเคลื่อนที่จะต้องสูงกว่าพลังงานแบร์รี (Energy Barriers) ซึ่งเรียกพลังงานนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (Activate Energy ; Q) โดยพลังงานนี้จะได้จากการให้ความร้อนแก่อะตอม



รูปที่ 2.4 กระบวนการแพร่ของทองแดง (Cu) สู่ นิกเกิล (Ni)
โดยกระบวนการแพร่เกิดขึ้นแบบสุ่ม (Random) [16]



ก)

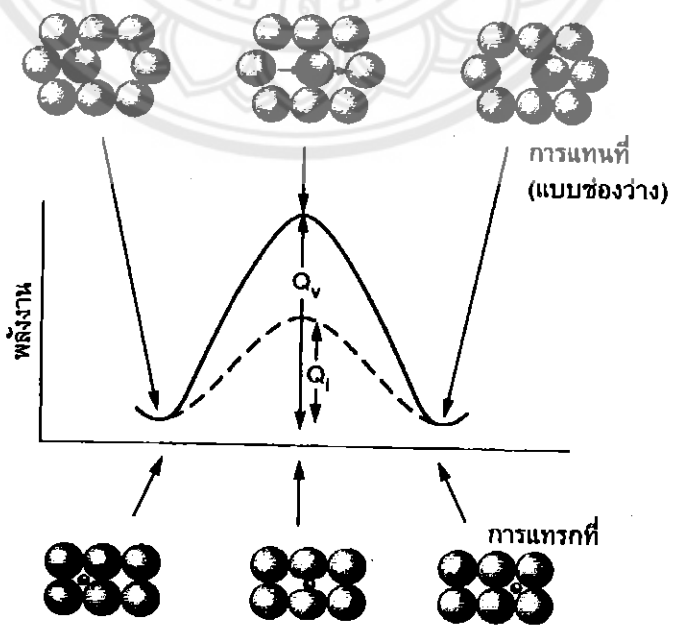


ข)

รูปที่ 2.5 กลไกการแพร่ [5]

ก) แบบช่องว่าง

ข) แบบแทรกที่



รูปที่ 2.6 พลังงานกระตุ้นให้อะตอมเกิดการแพร่ [6]

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลการแพร่ของวัสดุต่าง ๆ [6]

คู่การแพร่	Q (cal/mol)	D_0 (cm ² /sec)
การแพร่แบบแทรกที่		
คาร์บอนในเหล็กโครงสร้างผลึกแบบ FCC	32,900	0.23
คาร์บอนในเหล็กโครงสร้างผลึกแบบ BCC	20,900	0.011
ไนโตรเจนในเหล็กโครงสร้างผลึกแบบ FCC	34,600	0.0034
ไนโตรเจนในเหล็กโครงสร้างผลึกแบบ BCC	18,300	0.0047
ไฮโดรเจนในเหล็กโครงสร้างผลึกแบบ FCC	10,300	0.0063
ไฮโดรเจนในเหล็กโครงสร้างผลึกแบบ FCC	3,600	0.0012
การแพร่โดยตัวเอง (การแพร่แบบช่องว่าง)		
ตะกั่วในตะกั่วโครงสร้างผลึกแบบ FCC	25,900	1.27
อะลูมิเนียมในอะลูมิเนียมโครงสร้างผลึกแบบ FCC	32,200	0.1
ทองแดงในทองแดงโครงสร้างผลึกแบบ FCC	49,300	0.36
เหล็กในเหล็กโครงสร้างผลึกแบบ FCC	66,700	0.65
สังกะสีในสังกะสีโครงสร้างผลึกแบบ HCP	21,800	0.1
แมกนีเซียมในแมกนีเซียมโครงสร้างผลึกแบบ HCP	32,200	1
เหล็กในเหล็กโครงสร้างผลึกแบบ BCC	58,900	4.1
ทังสเตนในทังสเตนโครงสร้างผลึกแบบ BCC	143,300	1.88
ซิลิคอนในซิลิคอน (โคเวเลนต์)	110,000	1,800.00
คาร์บอนในคาร์บอน (โคเวเลนต์)	163,000	5
การแพร่โดยอะตอมต่างชนิด (การแพร่แบบช่องว่าง)		
นิกเกิลในทองแดง	57,900	2.3
ทองแดงในนิกเกิล	61,500	0.65
สังกะสีในทองแดง	43,900	0.78
นิกเกิลในเหล็ก FCC	64,000	4.1

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ข้อมูลการแพร่ของวัสดุต่าง ๆ [6]

คู่การแพร่	Q (cal/mol)	D_0 (cm ² /sec)
ทองในเงิน	45,500	0.26
เงินในทอง	40,200	0.072
อะลูมิเนียมในทองแดง	39,500	0.045
อะลูมิเนียมใน Al ₂ O ₃	114,000	28
ออกซิเจนใน Al ₂ O ₃	152,000	1,900.00
แมกนีเซียมใน MgO	79,000	0.249
ออกซิเจนใน MgO	82,100	0.000043

2.2.2 อัตราการแพร่ (Rate of Diffusion)

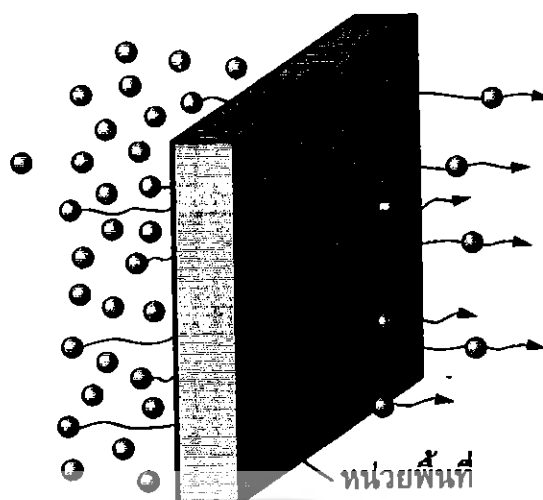
อัตราการแพร่ของอะตอมสามารถวัดเป็น ฟลักซ์ (Flux ; J) ซึ่งหมายถึง อัตราการถ่ายโอนของอะตอมจากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยหาออกมาเป็นจำนวนอะตอมที่แพร่ผ่านระบบเป็นหน่วยพื้นที่ตามกฎข้อแรกของฟิค (Fick's first law) คือ

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (2.8)$$

เมื่อ J คือ ฟลักซ์ (อะตอม/cm²·sec)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm²/sec)

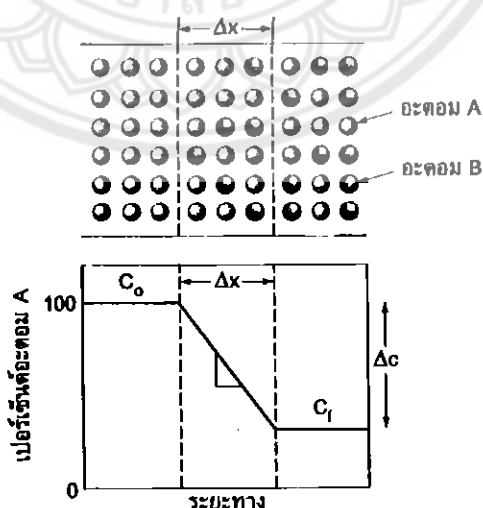
$\frac{\Delta c}{\Delta x}$ คือ เกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration Gradient) (อะตอม/cm²·sec)



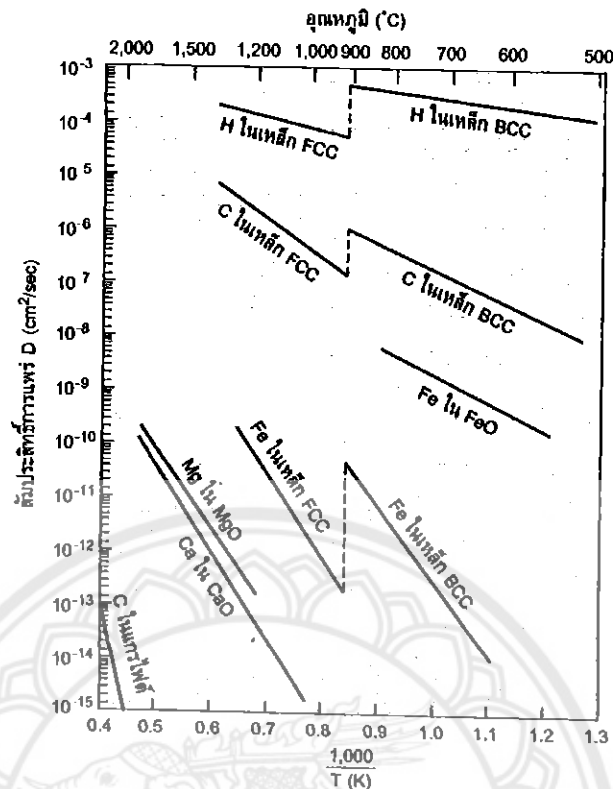
รูปที่ 2.7 ฟลักซ์ ขณะเกิดการแพร่หาจากจำนวนของอะตอม
ที่ซึมผ่านต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา [6]

2.2.2.1 ความเข้มข้นหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง

บางครั้งเรียกว่าเกรเดียนต์ของความเข้มข้นเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของอะตอม (Δc) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง (Δx) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุ 2 ชนิดที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันมาสัมผัสกัน หรือเกิดจากก๊าซหรือของเหลวที่มีความเข้มข้นมาก ๆ อยู่ล้อมรอบวัสดุแข็ง แล้วเกิดการแพร่หรือถ่ายเทอะตอมจากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมที่เกิดการแพร่ตามระยะทาง [17]



รูปที่ 2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของวัสดุต่าง ๆ [6]

เมื่ออุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และฟลักซ์ของอะตอมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นที่อุณหภูมิสูง ๆ อัตราการแพร่จะเกิดสูงขึ้น เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นที่สูง ด้วยเหตุนี้กระบวนการแพร่ที่กระทำกับโลหะหรือเซรามิกจึงกระทำค่อนข้างสูง

2.2.2.2 ชนิดของโครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกัน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนในเหล็กที่มีโครงสร้างแบบ BCC จะมีค่าเท่ากับ 10-12 ตารางเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนเหล็กที่มีโครงสร้างแบบ FCC ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ (5×10^{-15}) ตารางเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (ดูตารางที่ 2.3) ที่เป็นเช่นนี้ เพราะโครงสร้างผลึกแบบ FCC จะมีค่า APF (0.74) มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบ BCC (0.68)

2.2.2.3 ชนิดของกลไกในการแพร่

กลไกการแพร่แบบแทรกที่หรือแบบช่องว่างจะส่งผลต่อสภาพของการแพร่เป็นอย่างมาก หากอะตอมที่มีขนาดเล็กจะสามารถทำให้เกิดการแพร่แบบแทรกที่ในโครงสร้างของผลึกที่มีขนาดใหญ่ได้ค่อนข้างง่าย เช่น อะตอมของคาร์บอนในโครงสร้าง BCC หรือ FCC ของเหล็กกล้า ส่วนทองแดงจะแพร่เข้าไปในโครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมแบบกลไกช่องว่าง ทั้งนี้ก็เพราะอะตอมทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกัน

2.2.2.4 เวลาในการแพร่

กลไกการเกิดการแพร่ต้องอาศัยเวลา เพราะหน่วยของฟลักซ์เป็นจำนวน $\text{atom}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$ ดังนั้นหากมีอะตอมจำนวนมากก็จะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเวลาในการแพร่สามารถลดลงไปได้หากเราเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของวัสดุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 1000 องศาเซลเซียส [15]

ตัวถูกละลาย	ตัวทำละลาย (โครงสร้างหลัก)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity), m^2/sec	
		500°C (930°F)	1000°C (1830°F)
คาร์บอน	เหล็ก FCC	5×10^{-15}	3×10^{-11}
คาร์บอน	เหล็ก BCC	10^{-12}	2×10^{-15}
เหล็ก	เหล็ก FCC	2×10^{-15}	2×10^{-16}
เหล็ก	เหล็ก BCC	10^{-20}	3×10^{-14}
นิกเกิล	เหล็ก FCC	10^{-23}	2×10^{-16}
แมงกานีส	เหล็ก FCC	3×10^{-24}	10^{-16}
สังกะสี	ทองแดง	4×10^{-18}	5×10^{-13}
ทองแดง	อะลูมิเนียม	4×10^{-14}	10^{-10}
ทองแดง	ทองแดง	10^{-18}	2×10^{-13}
เงิน	เงิน (ผลึก)	10^{-17}	10^{-12}
เงิน	เงิน (ขอบเกรน)	10^{-11}	-
คาร์บอน	ไทเทเนียม HCP	3×10^{-16}	2×10^{-11}

2.2.3 การแพร่ในสถานะไม่คงตัว (Non-Steady State)

การแพร่ในสถานะไม่คงตัวจะเป็นกระบวนการแพร่ที่ความเข้มข้นของอะตอมจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น เหล็กที่มีอะตอมของคาร์บอนแพร่เข้าไปบริเวณผิว เมื่อเวลาผ่านไปนาน ความเข้มข้นของอะตอมที่ผิวเหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการแพร่ในสถานะไม่คงตัวนี้จะปฏิบัติตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังนี้

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.10)$$

เมื่อ C_s คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่ผิวของวัสดุ

C_0 คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่อยู่ในเนื้อของวัสดุก่อนเกิดการแพร่

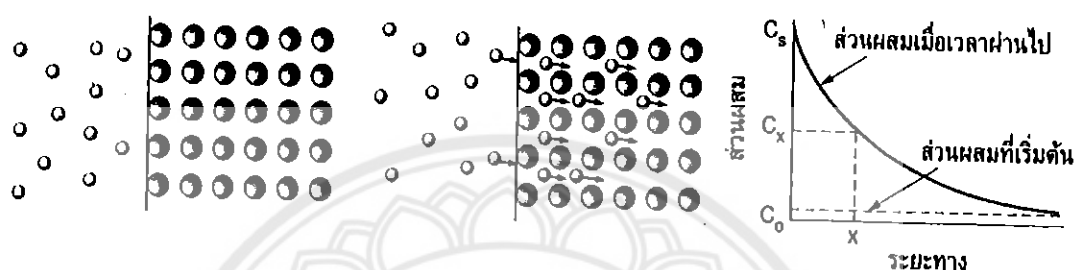
C_x คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่ระยะห่างจากผิว (x) ที่เวลา (t)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอม

X คือ ระยะทางจากผิว

t คือ เวลา

erf คือฟังก์ชันคลาดเคลื่อน (Error Function) ทางคณิตศาสตร์ ความเข้มข้นของอะตอมเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 และค่าฟังก์ชันคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จากตารางที่ 2.4



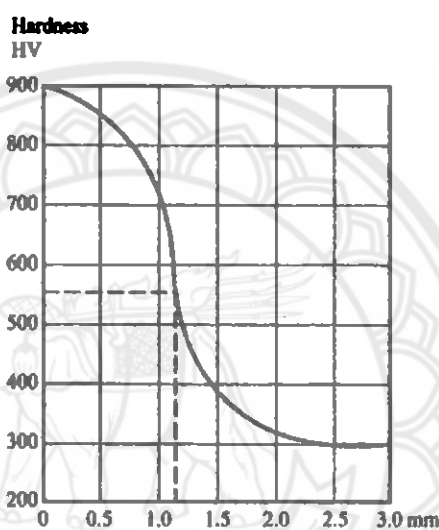
รูปที่ 2.10 การแพร่ของอะตอมสู่ผิวของวัสดุ ตามกฎข้อที่สองของฟิค [6]

ตารางที่ 2.4 ฟังก์ชันคลาดเคลื่อนสำหรับกฎข้อที่สองของฟิค [6]

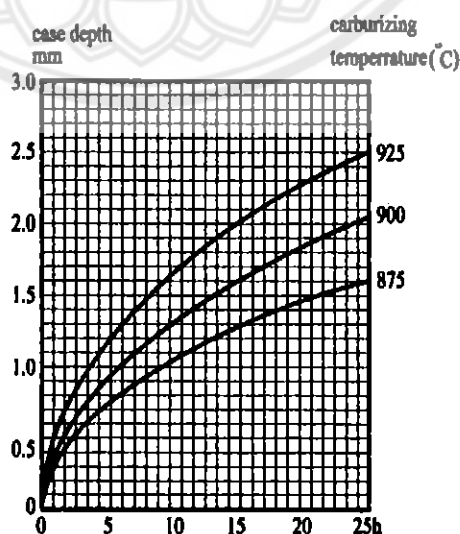
$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	$\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$
0	0
0.1	0.1125
0.2	0.2227
0.3	0.3286
0.4	0.4284
0.5	0.5205
0.6	0.6039
0.7	0.6778
0.8	0.7421
0.9	0.797
1	0.8427
1.5	0.9661
2	0.9953

2.3 ความหนาผิวแข็ง (Case Depth) [1]

คือความหนาหรือความลึกของผิวแข็งที่มีความแข็งที่สูงกว่า 550 HV หรือประมาณ 500 HB การวัดความหนาผิวแข็งนี้จะวัดจากแท่งเหล็กตัวอย่าง หลังจากทำการชุบผิวแข็งแล้วจะตัด หรือตีหัก แล้วขัดให้เรียบเพื่อสะดวกต่อการวัดความแข็งจากผิวลึกเข้ามาภายใน จากนั้นจึงไปพล็อตกราฟระหว่างความแข็งกับระยะที่ห่างจากผิวระยะผิวลึกเข้ามาจนถึงระดับความแข็ง 550 HV คือ ค่าความหนาของผิวแข็ง (Case Depth) ซึ่งค่าความหนาผิวแข็งนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความแข็งจากผิวถึงภายใน [1]



รูปที่ 2.12 ความหนาของผิวแข็งสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิ [1]

2.4 บทบาทของธาตุบางตัวในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง [7]

2.4.1 แมงกานีส มีบทบาทในการทำคาร์บูไรซิ่ง โดยทำให้คาร์บอนสามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อเหล็กได้ง่ายขึ้น และช่วยความหนาของผิวแข็ง แต่ไม่ควรจะมีแมงกานีสในเหล็กมากเกินไปกว่าร้อยละ 0.9 เพราะจะมีส่วนทำให้เกิดออสเตนไนท์เหลืตกค้างตามบริเวณผิว มีส่วนทำให้เกิดรอบแตกได้ง่ายในขณะทำการชุบ

2.4.2 ซิลิกอน ไม่มีบทบาทในการทำคาร์บูไรซิ่ง เพราะจะทำให้เกิดกราฟไฟต์ในขณะทำคาร์บูไรซิ่ง เป็นการต้านการแพร่ของคาร์บอนเข้าสู่เนื้อเหล็กให้ช้าลง เหล็กที่จะทำการชุบแข็งด้วยวิธีนี้จะต้องมีปริมาณซิลิกอนไม่เกินร้อยละ 0.3

2.4.3 นิกเกิล มีส่วนช่วยเพิ่มความเหนียวและเพิ่ม Hardenability ให้กับเหล็ก แต่มีนิกเกิลมีส่วนทำให้เกิดกราฟไฟต์คล้ายคลึงกับซิลิกอนเป็นการต้านการแพร่ซึมของคาร์บอนให้ช้าลง ให้เหล็กชุบแข็งผิวอาจผสมนิกเกิลได้สูงถึงร้อยละ 5 ทำให้ไม่ต้องชุบแข็งเหล็กในน้ำ ชุบน้ำมันก็จะได้มาร์เทนไซต์ การทำ Normalizing อาจตัดออกได้เพราะเหล็กมีความเหนียว และความแข็งแรงสูงอยู่แล้ว

2.4.4 โครเมียม มีส่วนช่วยเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงให้กับเหล็ก และช่วยเพิ่มความหนาของ ผิวแข็งให้กับเหล็กแต่จะมีข้อเสียตรงที่ความเหนียวจะลดลง เพราะโครเมียมมีส่วนทำให้เกรนของเหล็กขยายตัวได้มากในขณะทำคาร์บูไรซิ่งซึ่งจึงควรผสมโครเมียมไม่เกินร้อยละ 1

2.4.5 โมลิบดีนัมและวาเนเดียม ทั้งสองธาตุนี้มีบทบาทเพิ่มทั้งความแข็งผิว และความหนาของผิวแข็ง ด้านทานการขยายตัวของเกรนในขณะทำคาร์บูไรซิ่ง แต่ถ้าผสมเกินกว่าร้อยละ 0.2 จะทำให้ Hardenability ของเหล็กลดลง และธาตุสองตัวนี้มีราคาค่อนข้างแพง จึงไม่สมควรผสมในเหล็ก สำหรับทำคาร์บูไรซิ่ง

2.5 โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ทำให้ทราบถึงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งนั้นมีผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของเหล็กให้มีความแข็งมากขึ้นโดยเฉพาะที่ผิวของชิ้นงาน และเนื้อภายในของชิ้นงานจะคงความเหนียวไว้

กันยาทิพย์ ดันติคมน์ [8] ทำการอบคาร์บูไรซิ่งของเหล็ก AISI 1015 และเหล็ก AISI 4115 และเพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมระหว่างถ่านไม้กับสารเร่งปฏิกิริยาแบบรีมคาร์บอนेट และเวลาการอบคาร์บูไรซิ่งต่อค่าความลึกผิวเหล็กทั้ง 2 ชนิด โดยในการทดลองได้ปรับเปลี่ยนเวลาการอบคาร์บูไรซิ่งเป็น 3 6 9 และ 12 ชั่วโมง ส่วนผสมถ่านไม้กับแบบรีมคาร์บอนेट เป็นร้อยละ 95:5 90:10 85:15 และ 80:20 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลอง เวลาการอบชุบคาร์บูไรซิ่งมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งและความลึกผิวแข็งมากกว่าอัตราส่วนผสมของถ่านไม้แบบรีมคาร์บอนेट ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อใช้เวลาอบ 9 และ 12 ชั่วโมง จากการทดลองนี้พบว่าส่วนผสมระหว่างถ่าน

ไม้กับแบบเรียบคาร์บอนเนตที่มีผลต่อความลึกลงผิวแข็งมากที่สุดคือร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนัก จากค่าความลึกลงผิวแข็งที่ 550 HV

มูฮัมหมัด เจละ และคณะ [9] ทำการศึกษาการชุบผิวแข็งเหล็กกล้า 5115 ซึ่งใช้ทำอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักร ที่ต้องได้รับการกระกรรม ความล้า และมีการเสียดสีระหว่างการใช้งานสูง เช่น ชุดเฟืองเครื่องยนต์ เฟืองท้าย เพลาลงกำลังอุปกรณ์ชิ้นส่วนของเครื่องจักรต่าง ๆ และลูกปืน ทนการเสียดสี และการกระแทกต่าง ๆ เมื่อทำการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 850 องศาเซลเซียส 950 องศาเซลเซียส และ 1050 องศาเซลเซียส ตามลำดับในแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลาต่างกันคือ 2 4 และ 6 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้คาร์บอนแทรกตัวไปในผิวมากขึ้นเช่นกัน ก่อนการชุบผิวแข็งแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เหล็ก 5115 มีโครงสร้างเป็น เฟอร์ไรต์ และ เพอร์ไรต์ หลังจากการทำ แพ็คคาร์บูไรซิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะได้โครงสร้างเป็น มาร์เทนไซต์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 2 4 ชั่วโมง จะได้โครงสร้างเป็น ออสเตนไนต์ตกค้างและเบนไนต์ล่าง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง ได้โครงสร้างเป็น มาร์เทนไซต์ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ได้โครงสร้างเป็น ออสเตนไนต์ และ เบนไนต์ สรุปลักษณะที่เหมาะสมในการชุบผิวแข็งแพ็คคาร์บูไรซิ่ง คือ 950 องศาเซลเซียส และเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง ได้ความแข็ง 670 HV ระยะซึมลึก 1.7 มิลลิเมตร

ชลธิชา บุญสะอาด และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลในการทำ แพ็คคาร์บูไรซิ่ง ของเหล็ก AISI 1010 โดยทำการทดสอบวัสดุ และวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่ผ่านกระบวนการ แพ็คคาร์บูไรซิ่ง ผลลัพธ์ของการศึกษาตัวแปรในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง พบว่าก่อนการชุบผิวแข็งชิ้นงานมีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ทั้งหมด หลังจากการชุบผิวแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง และ 950 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ที่ขอบชิ้นงานจะมีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ (สีดำ) ทดสอบความแข็งก่อนการชุบผิวแข็ง ค่าความแข็งของชิ้นงานจะมีความแข็ง (HB) เฉลี่ย 144.24 หลังจากการชุบผิวแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ 950 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง จะมีความแข็ง (HB) เฉลี่ย 177.44 184.25 194.49 และ 254.71 ตามลำดับ การทดสอบค่าแรงดึง ก่อนการชุบผิวแข็งผิวชิ้นงานจะมีความทนต่อแรงดึงเฉลี่ย 250 (N/mm²) หลังการชุบผิวแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ 950 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง จะมีความทนต่อแรงดึงเฉลี่ย 353.84 (N/mm²) 375.78 (N/mm²) 376.40 (N/mm²) และ 440.0 (N/mm²) ตามลำดับ การทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ก่อนการชุบผิวแข็งชิ้นงานจะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ย 0.097 หลังการชุบผิวแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว เฉลี่ย 0.090 0.075 0.065 และ 0.025 ตามลำดับ การทดสอบโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น ก่อนการชุบผิวแข็งชิ้นงานจะมีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเฉลี่ย 12.97

หลังการชุบผิวแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ 950 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง จะมีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเฉลี่ย 19.24 25.14 30.58 และ 83.36 ตามลำดับ

ณรงค์เดช พัฒนไพบุลย์ และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาระบวนการชุบผิวแข็งโดยวิธีแก๊สคาร์บูไรซิ่งที่ใช้ช่วงเวลาแพร่ที่สั้นลงจนกระทั่งถึงศูนย์ และแก้ปัญหาออสเตไนต์ตกค้างหลังชุบแข็ง ด้วยวิธีบำบัดเย็น ที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ถ้าใช้เวลาคาร์บูไรซิ่ง 270 นาที ค่า C_p ร้อยละ 1.25 หลังจากชุบแข็ง และบำบัดเย็น จะได้ชั้นแข็งลึกประมาณ 1.3 มิลลิเมตร ในขณะที่ถ้าใช้กระบวนการ ทัวไปจะใช้เวลารวมถึง 480 นาที ที่ชั้นแข็งลึกใกล้เคียงกัน ซึ่งจะพบว่าสามารถลดเวลาลงจากกระบวนการทัวไปถึงร้อยละ 43 เพียงแต่กระบวนการที่ศึกษาต้องเพิ่มกรรมวิธีบำบัดเย็นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบค่าความต้านการล้าของทั้งสองกระบวนการ พบว่ามีผลลัพธ์ออกมาใกล้เคียงกัน ดังนั้นวิธีการที่ศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในกรณีที่ต้องการลดเวลาของกระบวนการชุบแข็งสามารถลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้

พิบูลย์ เครือคำอ้าย [12] ได้ทำการศึกษาระบวนการอบชุบเครื่องมือทำการเกษตร จอบดายหญ้า จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการเปรียบเทียบอุณหภูมิ และสารชุบที่มีผลต่อความแข็ง และความต้านทานต่อการสึกหรอจากกระบวนการอบชุบทางความร้อน ในการดำเนินงานวิจัยจะใช้จอบดายหญ้าที่ทำจากเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนร้อยละ 0.09 มาทำการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้ได้ร้อยละ 0.35 จากกระบวนการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศหนึ่ง นำไปอบอีกครั้ง เปลวไฟที่อุณหภูมิ 850 890 และ 930 องศาเซลเซียส แล้วทำการชุบแข็งให้เย็นด้วยน้ำมัน และอากาศหนึ่ง นำไปทดสอบความแข็ง และความต้านทานต่อการสึกหรอ ผลจากการวิจัยพบว่าจอบดายหญ้าที่ผ่านการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ไม่ชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟมีความแข็ง และความต้านทานต่อการสึกหรอสูงกว่าที่ 58 ร็อคเวลสเกลซี และร้อยละ 19.37 โดยน้ำหนักตามลำดับ

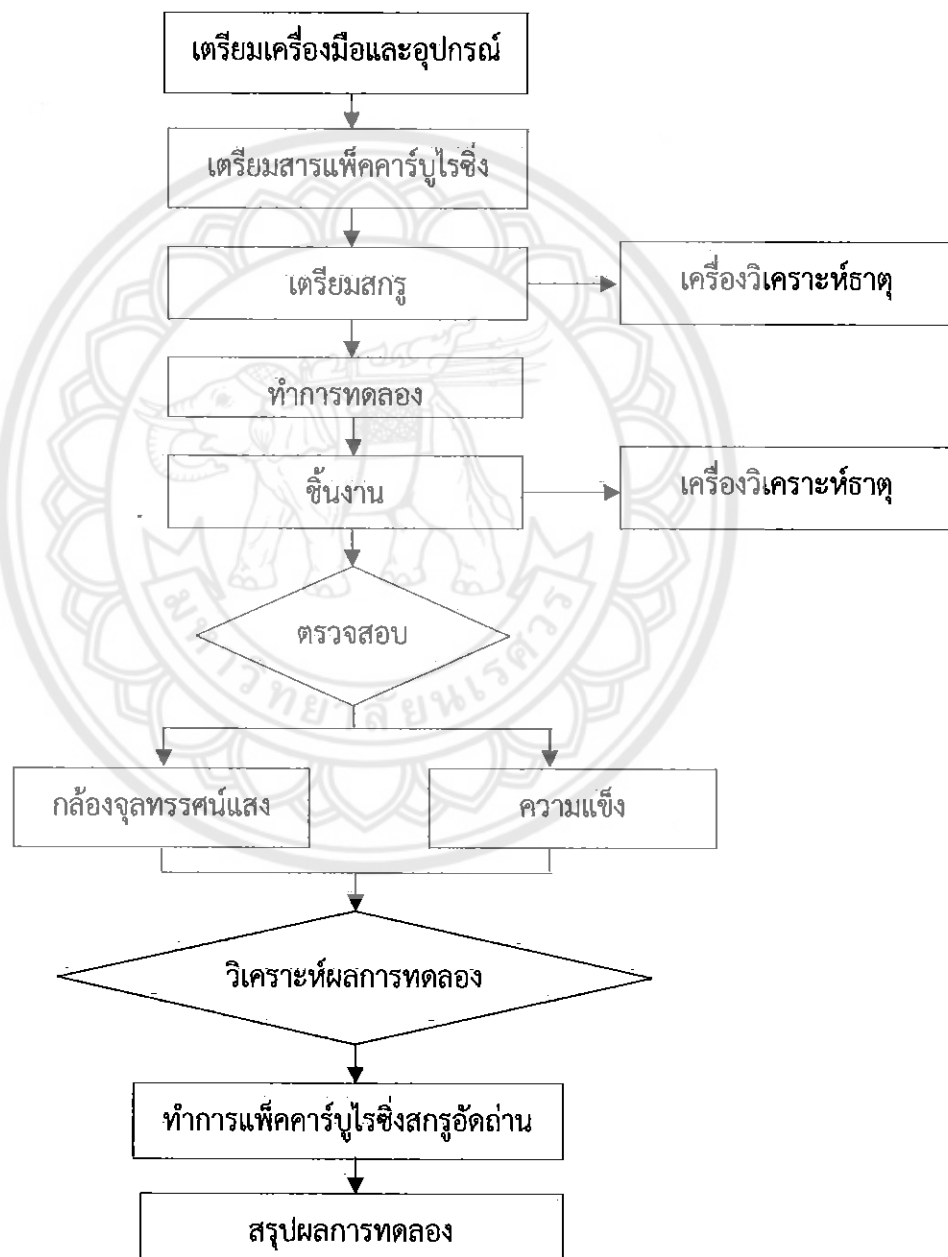
ปราโมทย์ ปูนขุนทด และอนิรุทธิ์ มีคา [13] กล่าวว่า ประสิทธิภาพของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ถ่านกลบ ถ่านไม้ไผ่ ถ่านกะลามะพร้าว และถ่านไม้มะขาม ที่มีผลต่อการชุบแข็งที่ผิวเหล็กกล้าคาร์บอน ด้วยกรรมวิธีแพ็คคาร์เบอร์ไรซิ่ง ดำเนินการโดยทำการแพ็คคาร์เบอร์ไรซิ่งให้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (JIS S15C) อบที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส อบแช่ 5 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศหลังจากนั้นนำไปชุบแข็งที่อุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส อบแช่ 55 นาที และนำเหล็กมาทำให้เย็นตัวในน้ำผลการทดลองหลังทำการแพ็คคาร์เบอร์ไรซิ่งที่บริเวณผิวของเหล็ก มีโครงสร้าง ซีเมนไทต์รูปดาข่าย และหลังจากนำไปชุบแข็งเกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และเบนไนต์ ส่วนแกนกลางเหล็กมีโครงสร้างปกติ คือ โครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส สามารถซึมลึกเข้าที่ผิว 1.05 มิลลิเมตร ความแข็งที่ผิว 731 HV ถ่านกลบสามารถซึมลึกเข้าที่ผิว 0.95 มิลลิเมตร ความแข็งที่ผิว 910 HV ถ่านไม้ไผ่สามารถซึมลึกเข้าที่ผิว 0.15 มิลลิเมตร ความแข็งที่ผิว 593 HV ถ่านกะลามะพร้าวสามารถซึมลึกเข้าที่ผิว 1.05 มิลลิเมตร ความแข็งที่ผิว 685 HV ถ่านไม้มะขามสามารถซึมลึกเข้าที่ผิว 1.25 มิลลิเมตร ความแข็งที่ผิว 977 HV

บทที่ 3

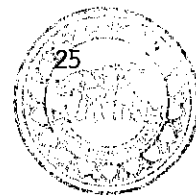
วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

ขั้นตอนการทดลองกระบวนการชุบแข็งที่ผิวด้วยกรรมวิธีแพ็คคาร์บูไรซิ่ง แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็นขั้นตอนต่างๆ แสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ



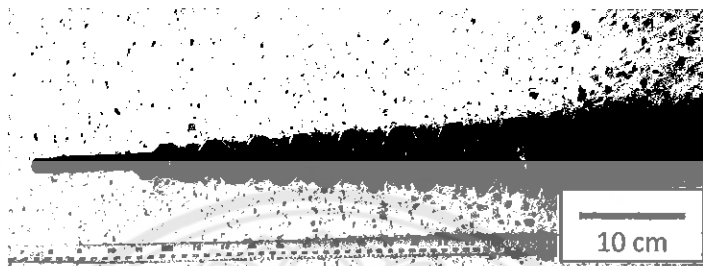
17224874

สำนักหอสมุด

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

ชิ้นงานที่นำมาศึกษาเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ด้วยกรรมวิธีแปรรูปโรตารี โดยทำการตัดเหล็ก และเจียรผิวชิ้นงานให้เรียบร้อย แล้วนำชิ้นงานมาทำรหัสไว้บนผิวชิ้นงาน เพื่อให้ง่ายต่อการทดลอง และการจดจำ ตัวอย่าง ชิ้นงานที่จะทำการศึกษา แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สกรูที่ใช้ในกระบวนการอัดถ่าน

3.2.2 เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.2.1 ตะแกรงกรองถ่าน

3.2.2.2 เครื่องซังดิจิตอล

3.2.2.3 กล้องบรรจุชิ้นงานคาร์บูไรซิ่ง

3.2.2.4 เตาอบชุบความร้อน

3.2.2.5 ถุงมือ คีมคีบเหล็ก

3.2.2.6 เครื่องจักรตัดเหล็ก

3.2.2.7 เครื่องตัดไฟเบอร์

3.2.2.8 ถุงมือ คีมคีบเหล็ก เป็นอุปกรณ์ในการปฏิบัติงาน และป้องกันอันตราย

จาก ความร้อนในการปฏิบัติงาน

3.2.3 สารเคมี

3.2.3.1 สาร Na_2CO_3	ร้อยละ	5	โดยน้ำหนัก
3.2.3.2 สาร BaCO_3	ร้อยละ	10	โดยน้ำหนัก
3.2.3.3 สาร CaCO_3	ร้อยละ	10	โดยน้ำหนัก
3.2.3.4 ถ่านไม้	ร้อยละ	70	โดยน้ำหนัก
3.2.3.5 ถ่านกัมมันต์	ร้อยละ	5	โดยน้ำหนัก
3.2.3.6 น้ำ	ร้อยละ	3	โดยน้ำหนักของปริมาณสารเคมีรวม

3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

นำชิ้นงาน และสารเคมีที่ผสมตามสัดส่วนที่กำหนดไว้บรรจุลงในหีบเหล็กแล้วปิดฝาพร้อมทั้งใช้ดินเหนียวเคลือบฝาให้สนิทเพื่อป้องกันอากาศแทรกเข้าไปทำการเผาไหม้กับคาร์บอน แล้วนำเข้าเตาอบที่ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เพื่อให้คาร์บอนซึมสู่ผิวเหล็ก ตามระยะเวลาที่กำหนด ปลอ่ยให้เย็นในเตา นำหีบเหล็กออกจากเตา หลังจากนั้น นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิงมาทำการชุบแข็งต่อไป ดังแสดงเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 เติมน้ำมันที่เตรียมแพ็คคาร์บูไรซิงไว้ในหีบเหล็ก

3.4.2 วางชิ้นงานบนสารแพ็คคาร์บูไรซิง

3.4.3 เติมน้ำมันแพ็คคาร์บูไรซิง โดยรอบชิ้นงานให้เต็ม

3.4.4 ปิดฝาด้วยเหล็กแผ่นที่ตัดไว้ และใช้ดินเหนียวเคลือบฝาให้แน่นสนิทเพื่อไม่ให้อากาศภายนอกเข้าได้

3.4.5 นำหีบเหล็กเข้าเตาอบ และปิดฝาให้เรียบร้อยเปิดสวิตซ์ไฟฟ้าตั้งอุณหภูมิอบ 950 องศาเซลเซียส รอจนอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จึงเริ่มจับเวลาอบ 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง

3.4.6 เมื่ออบชิ้นงานตามเวลาที่กำหนดแล้วปลอ่ยให้หีบเหล็กเย็นตัวในเตา จากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากหีบเหล็ก

3.4.7 ทำการอบชิ้นงานในข้อ 3.4.6 อีกครั้งที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยเมื่ออุณหภูมิภายในเตาถึงค่าที่กำหนดแล้วจึงนำชิ้นงานเข้าไปอบ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4.8 นำชิ้นงานออกจากเตาพร้อมทั้งชุบลงในน้ำเย็นทันที

3.4 การตรวจสอบ

3.4.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

3.4.1.1 นำใบสกรู และแกนสกรูที่ตัดเรียบร้อยแล้วมาขัดด้วยกระดาษทราย จากเบอร์หยาบไปหาเบอร์ละเอียด ดังนี้ 180 320 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.4.1.2 นำใบสกรู และแกนสกรูที่ผ่านการขัดในขั้นต้นมาขัดเงา (Polishing) ด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน

3.4.1.3 นำใบสกรู และแกนสกรูที่ผ่านการขัดเงามากัดกรด (Etching) ในตรอส้อยละ 3 โดยการชุบชิ้นงานลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด เช็ดด้วยสำลี และเป่าให้แห้ง

3.4.1.4 นำใบสกรู และแกนสกรูที่ผ่านการกัดกรดเรียบร้อยแล้วมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

3.4.2 ทำการตรวจสอบระยะการซึมลึกของคาร์บอน ที่แพร่เข้าไปที่บริเวณขอบของชิ้นงาน โดยวิธีการทดสอบจะใช้กล้องจุลทรรศน์แสงถ่ายภาพแบบต่อเนื่อง

3.4.3 ทดสอบความแข็ง

3.4.3.1 ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล หัวกดเพชรทรงกรวย ใช้น้ำหนัก 150 กิโลกรัมแรง

3.4.3.2 นำใบสกรู และแกนสกรูมาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 เพื่อปรับชิ้นงานให้ได้ระนาบ

3.4.3.3 วางชิ้นงานที่นำมาทดสอบลงบนฐานรองชิ้นงานของเครื่องทดสอบความแข็ง โดยให้ด้านที่ขัดกระดาษทรายหงายอยู่ด้านบน ตรวจสอบว่าผิวชิ้นงานด้านล่างสัมผัสกับฐานรองชิ้นงานแนบสนิทดี หากไม่แนบสนิทค่าความแข็งที่ได้จะผิดพลาด

3.4.3.4 เลือกตำแหน่งการทดสอบ ไม่ควรทดสอบบริเวณริมขอบชิ้นงาน เพราะอาจทำให้ชิ้นงานล้มได้

3.4.3.5 ทำการทดสอบความแข็ง ตามวิธีการใช้เครื่องทดสอบความแข็ง แบบรีอคเวล

3.4.3.6 หนึ่งชิ้นงานทำการทดสอบ 5 ค่า โดยการทดสอบแต่ละครั้งรอยกดใหม่จะต้องห่างจากรอยเดิมไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดรอยกดเดิม

3.4.3.7 บันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบ

3.4.4 วัดปริมาณของคาร์บอนใบสกรู และแกนสกรู ก่อน-หลังผ่านกระบวนการแปรรูปโรซิง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Optical Emission Spectrometer)

3.4.5 ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง ตามหัวข้อ 3.4.1 และ 3.4.3 กับชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง

3.5 ทำการแปรรูปโรซิงสกรูอัดถ่าน

3.5.1 สร้างเตาอบ

3.5.2 นำชิ้นงานสกรูใส่กล่องเหล็กที่ได้เตรียมไว้

3.5.3 อบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ณ เวลาที่ดีที่สุดที่ได้จากการตรวจสอบในหัวข้อ 3.4

3.5.4 เมื่อครบกำหนดในข้อ 3.5.3 ทำการชุบลงในน้ำเย็นทันที

3.5.5 วัดความแข็งของชิ้นงานจริงภายหลังกระบวนการคาร์บูไรซิง และชุบแข็ง

3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลอง และบันทึกผลการทดลองลงในตารางบันทึกผลการทดลองแล้ว นำข้อมูลไปเปรียบเทียบ โดยนำข้อมูลจากผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับระยะสัมผัสของช่วงเวลาต่าง ๆ แต่ละช่วงในการเพิ่มคาร์บอน และความแข็งของชิ้นงาน

3.7 สรุปผลโครงการ และข้อเสนอแนะ

หลังจากได้ทำการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองจึงสรุปผลการดำเนินโครงการ และข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงเพื่อให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

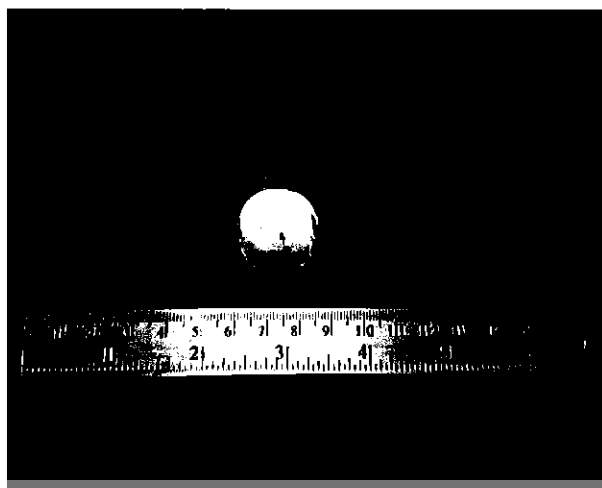
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลที่ได้ในการทำกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง และชุบแข็งของใบ และแกนสกรูธรรมดาที่ได้จากโรงงาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 สกรูที่ใช้ในกระบวนการอัดถ่านแท่ง

สภาพโดยทั่วไปของสกรูที่ใช้ในกระบวนการอัดถ่านแท่ง แสดงดังรูปที่ 4.1 มีขนาดประมาณ กว้าง 9 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร แกนทำมาจากเหล็กเพลาลูกกลิ้งให้มีลักษณะรูปโคน ปลายเรียว ในขณะที่ใบสกรูทำมาจากเหล็กแผ่นชนิดเดียวกันกับแกน ตัดให้เป็นแผ่นตามรัศมีวงกลม ที่เพิ่มขึ้นแล้วทำการดัดให้ยืดอกออก จะไปเป็นแผ่นเกลียวพร้อมกับนำแกนสกรูสอดเข้าไปในแผ่นเกลียว ทำการเชื่อมประสานใบสกรู และแกนให้แน่น ตกแต่งผิว และทาสีป้องกันสนิม นำสกรูที่ได้จากโรงงาน อัดถ่านมาทำการตัดแยกใบ และแกนสกรูออกจากกัน เพื่อให้ง่ายต่อการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานใบสกรู



รูปที่ 4.2 ชิ้นงานแกนสกรู

4.1.1 ส่วนผสมทางเคมีของสกรูอัดถ่าน

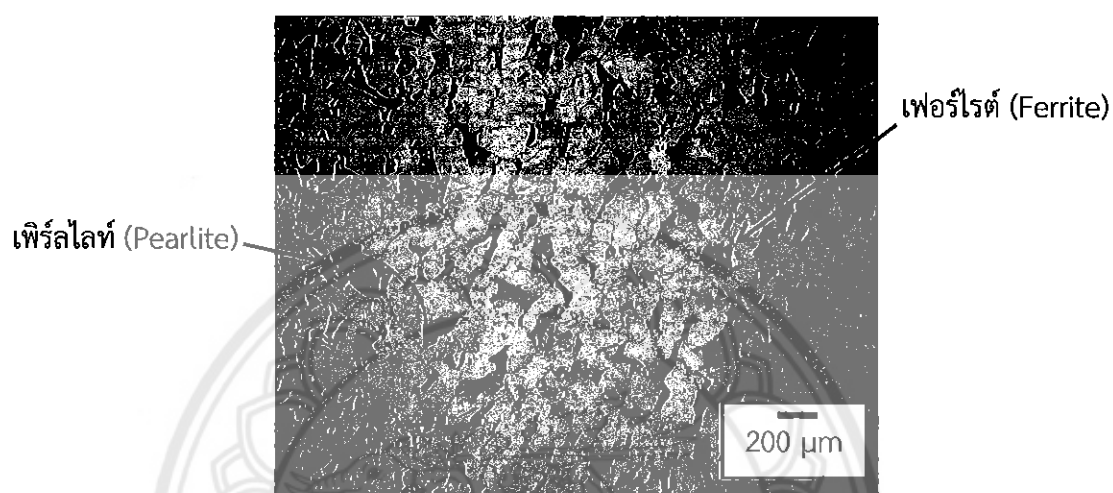
เมื่อเรานำใบสกรู และแกนสกรูก่อนผ่านกระบวนการแป็คคาร์บูไรซิ่งไปวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Optical Emission Spectrometer) พบว่าสกรูนี้ปริมาณคาร์บอนต่ำมากอยู่ที่ร้อยละ 0.0661 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยทั่วไปแล้วถ้าปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 0.2 จะไม่สามารถทำการชุบแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งให้กับชิ้นงานได้ ดังนั้นสกรูชิ้นนี้จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณคาร์บอนในเนื้อก่อนแล้วค่อยทำการชุบแข็งในลำดับถัดไป และส่วนผสมทางเคมีจะส่งผลต่อกระบวนการ แป็คคาร์บูไรซิ่ง ซึ่งจะสอดคล้องกับทฤษฎีข้อ 2.4

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของแกน และสกรูอัดถ่านก่อนการทำแป็คคาร์บูไรซิ่ง

ธาตุ	ร้อยละส่วนผสมทางเคมีของสกรู
คาร์บอน (Carbon)	0.0661
ซิลิคอน (Silicon)	0.0172
แมงกานีส (Manganese)	0.7195
ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	0.0186
กำมะถัน (Sulfur)	0.0060
โครเมียม (Chromium)	0.1362
โมลิบดีนัม (Molybdenum)	0.0273
นิกเกิล (Nickel)	0.0961
ทองแดง (Copper)	0.2879
วานาเดียม (Vanadium)	0.0004
เหล็ก (ferrum)	Balance

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของสกรู

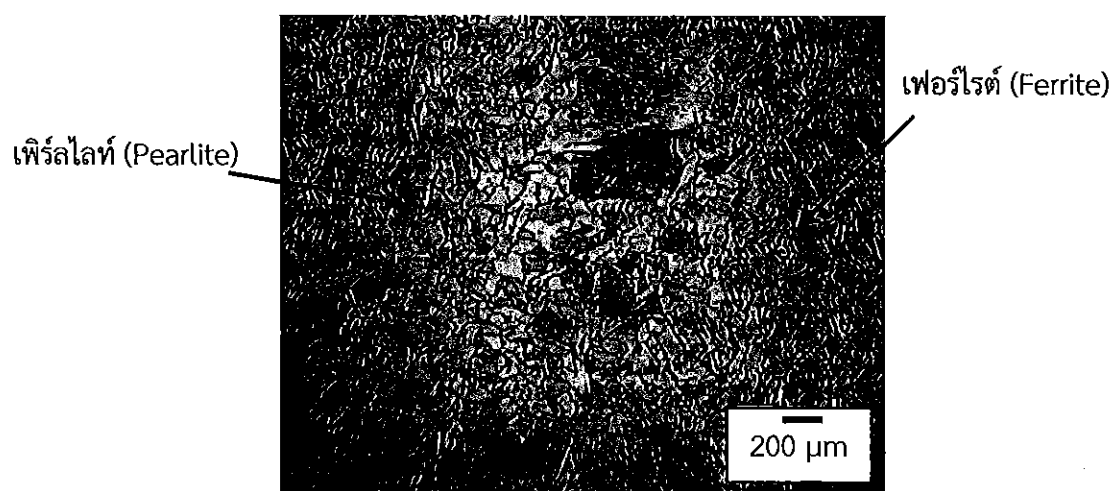
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของสกรูอัดถ่าน ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง พบว่าโครงสร้างจุลภาคของทั้งแกนสกรู และใบสกรู ประกอบไปด้วย เฟสเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ แต่ลักษณะเกรนของใบสกรูจะมีขนาดเล็กกว่าแกนสกรูทำให้สันนิษฐานได้ว่าใบสกรูนั้นผ่านกระบวนการรีดมา ดังแสดงในรูป 4.3 – 4.6 ตามลำดับ



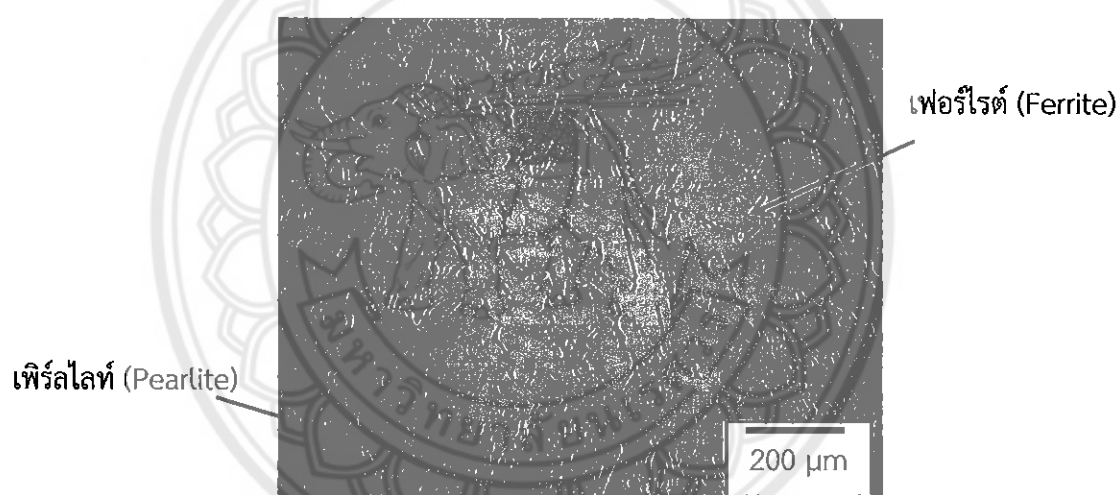
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่กำลังขยาย 500 เท่า

4.1.3 ค่าความแข็ง

เมื่อทำการทดสอบความแข็งของแกนสกรู และใบสกรูก่อนทำกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล หัวกดเพชรทรงกรวย ใช้น้ำหนัก 150 กิโลกรัมแรง โดยจะทำการวัดแบบสุ่มเป็นจำนวนชิ้นงานละ 5 ครั้ง โดยแต่ละครั้งรอยกดจะต้องห่างจากรอยเดิมไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดรอยกดเดิม

4.2 กระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

ชิ้นงานสกรูอัดถ่านที่ผ่านการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และความแข็งในเบื้องต้นมาแล้วนั้น จะนำมาเข้าสู่กระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งทั้งใบสกรู และแกนสกรู โดยใช้อุณหภูมิที่ 950 องศาเซลเซียส และเวลานาน 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจสอบผลการทดลอง โดยการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และวัดค่าความแข็ง

4.2.1 ส่วนผสมทางเคมีหลังการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

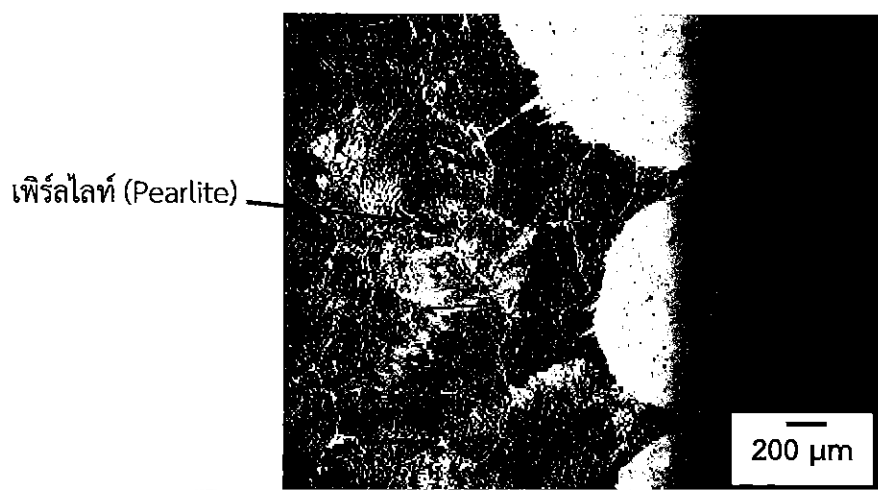
เมื่อเรานำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Optical Emission Spectrometer) ได้ผลดังตารางที่ 4.4 และส่วนผสมทางเคมีจะส่งผลต่อกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ซึ่งจะสอดคล้องกับทฤษฎีข้อ 2.4

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของแกน และใบสกรูหลังการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

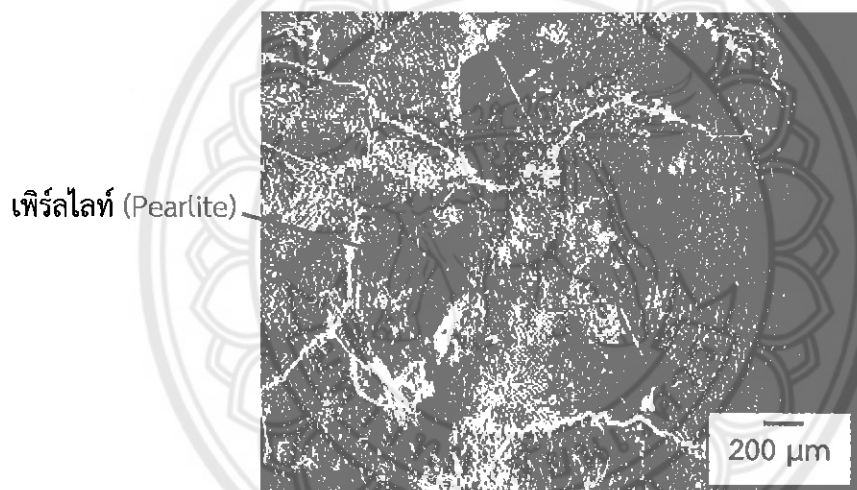
คาร์บูไรซิ่ง	ร้อยละส่วนผสมทางเคมีของใบสกรู										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
3 ชั่วโมง	0.237	0.230	0.661	0.012	0.024	0.154	0.029	0.084	0.145	0.003	Balance
4 ชั่วโมง	0.252	0.262	0.683	0.013	0.024	0.157	0.027	0.083	0.143	0.002	Balance
5 ชั่วโมง	0.193	0.216	0.639	0.013	0.020	0.154	0.028	0.085	0.146	0.002	Balance
6 ชั่วโมง	0.290	0.281	0.702	0.009	0.026	0.155	0.026	0.081	0.140	0.002	Balance

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของสกรูอัดถ่านหลังการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วย เฟอไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไรต์ (Pearlite) ทั้งของแกนสกรู และใบสกรู แสดงในรูปที่ 4.7 - 4.14 โดยปริมาณของเฟอไรต์เพิ่มมากขึ้นเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคเข้าสู่ใจกลางชิ้นงานดังภาคผนวก ข และปริมาณคาร์บอนจากผิวเข้าสู่ภายในชิ้นงานเมื่อวิเคราะห์แล้วสามารถแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์คาร์บอนดังตารางที่ 4.2

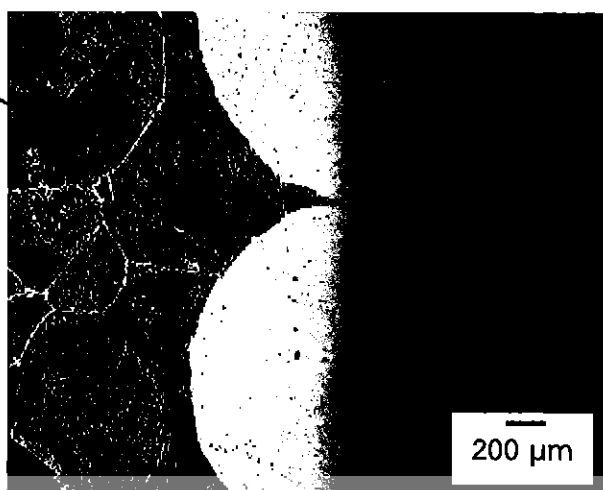


รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 3 ชั่วโมง



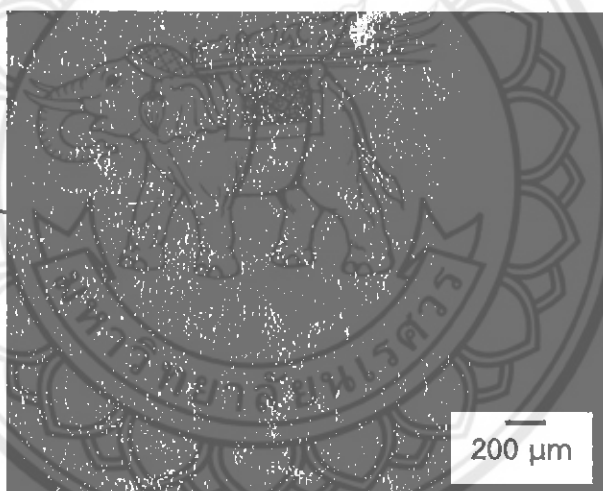
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 4 ชั่วโมง

เพิร์ลไลต์ (Pearlite)

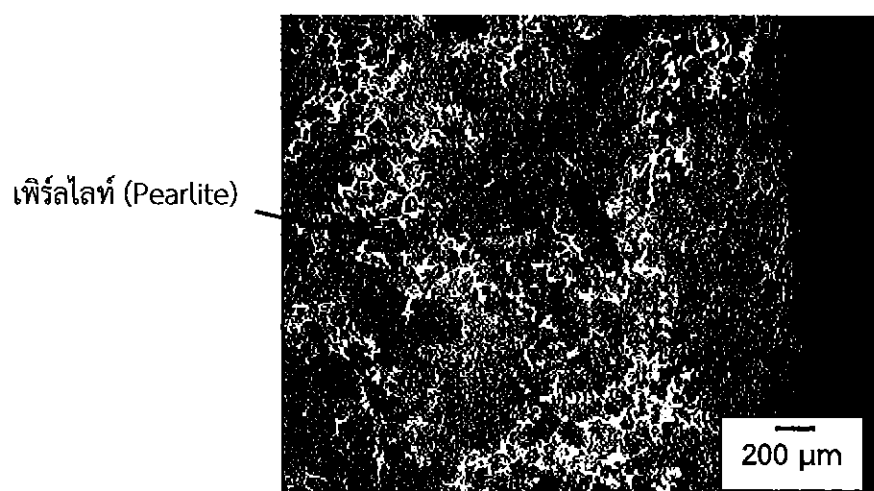


รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 5 ชั่วโมง

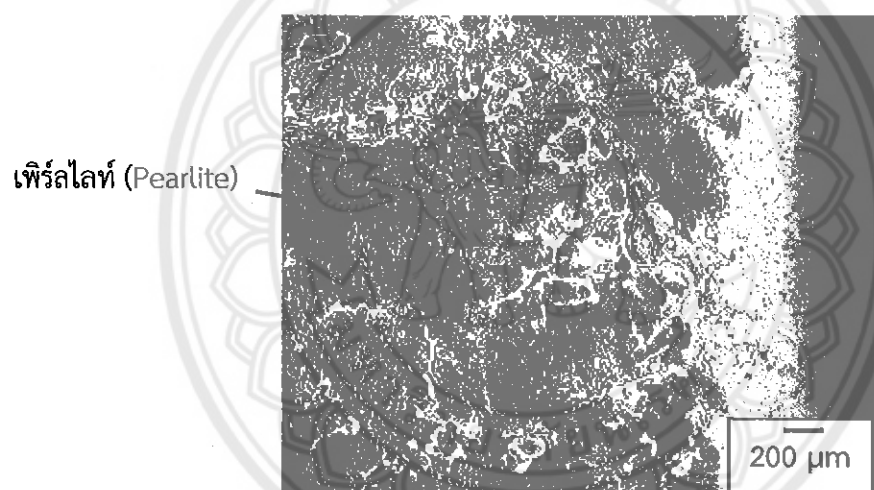
เพิร์ลไลต์ (Pearlite)



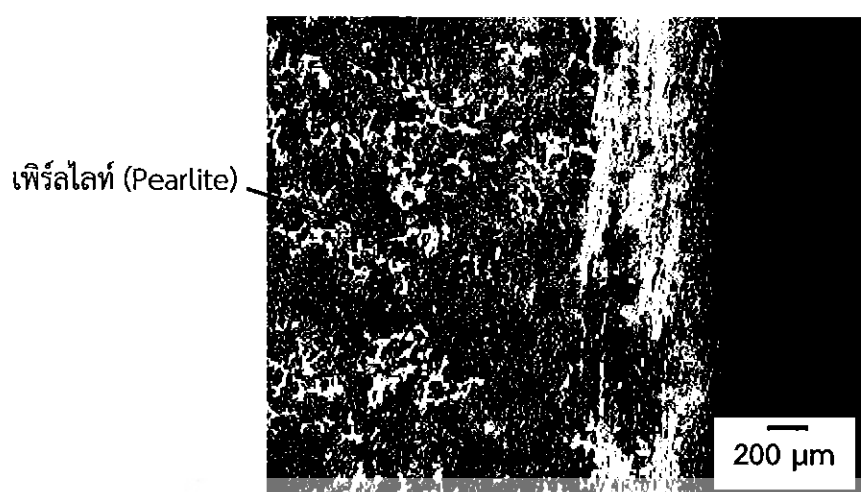
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 6 ชั่วโมง



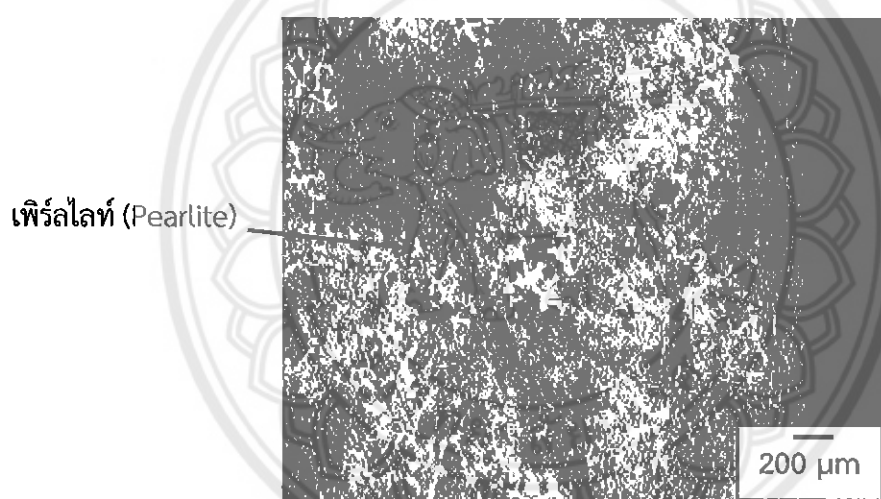
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของไบสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของไบสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 4 ชั่วโมง



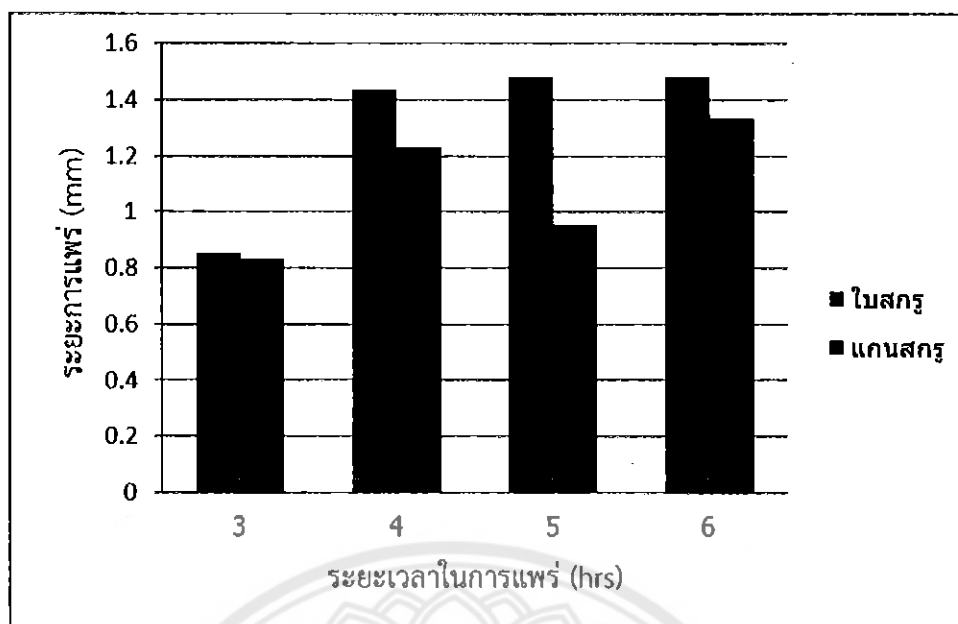
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของไบสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของไบสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง 6 ชั่วโมง

4.2.3 ระยะการแพร่

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสกรูที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เมื่อทำการถ่ายภาพแบบต่อเนื่องกันจากผิวเข้าเข้าไปสู่เนื้อด้านใน จะสามารถวัดระยะการแพร่ของคาร์บอนในกระบวนการได้ดังแสดงในภาคผนวก ข สำหรับการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่เวลา 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มเวลาในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งจะส่งผลทำให้ระยะการแพร่ของคาร์บอนเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ระยะการแพร่ของคาร์บอนในกระบวนการแพร่คาร์บูไรซิ่งที่ 950 องศาเซลเซียส

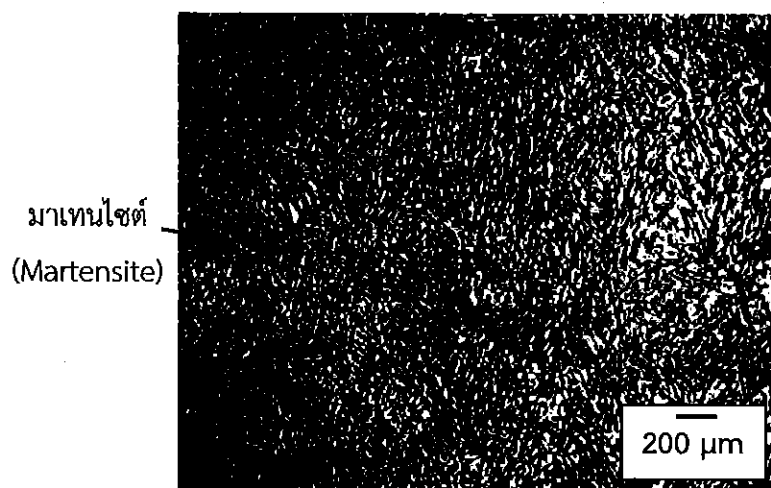
4.2.4 ความแข็งหลังกระบวนการทำเพ็คคาร์บูไรซิ่ง

ภายหลังกระบวนการเพ็คคาร์บูไรซิ่ง ชิ้นงานสกรจะถูกวัดความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ หัวกดเพชรทรงกรวย ใช้น้ำหนัก 150 กิโลกรัมแรง โดยจะทำการวัดแบบสุ่มเป็นจำนวนชิ้นงานละ 5 ครั้ง โดยแต่ละครั้งรอยกดจะต้องห่างจากรอยเดิมไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดรอยกดเดิม

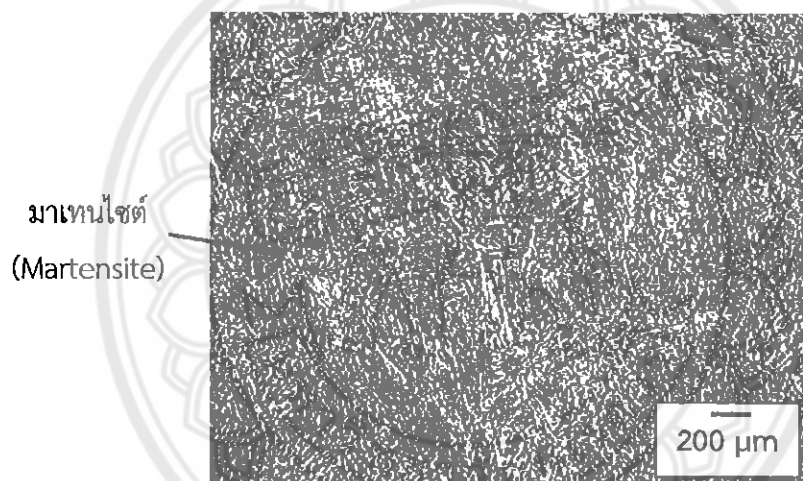
ผลการทดลองจากรูปที่ 14.15 ชี้ให้เห็นว่าเมื่อทำการเพ็คคาร์บูไรซิ่งกับสกรจะทำให้ค่าความแข็งของสกรเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของสกรเริ่มต้น ความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการแทรกตัวเข้าไปของอะตอมคาร์บอนในโครงผลึกของเหล็กแบบแทรกที่ (Interstitial atom) นั่นเอง

4.3 การชุบแข็งที่ผิว (Case Hardening)

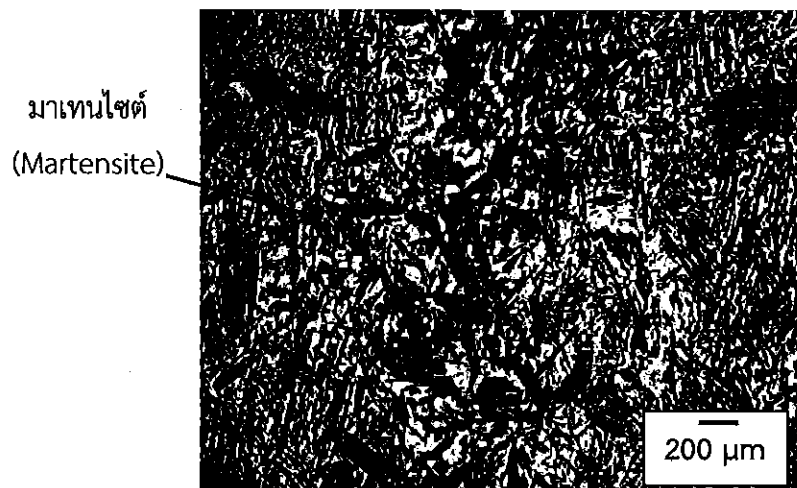
การชุบแข็งที่ผิวเป็นกระบวนการที่ทำภายหลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการเพ็คคาร์บูไรซิ่งมาแล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โครงสร้างที่ผิวของเหล็กนี้เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซด์ โดยจะนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเพ็คคาร์บูไรซิ่ง มาอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แต่จะนำชิ้นงานเข้าเตาอบเมื่ออุณหภูมิเตามีค่าเท่ากับ 950 องศาเซลเซียสเสียก่อน หลังครบเวลาที่กำหนด นำชิ้นงานมาจุ่มชุบในน้ำเย็นทันที ผลการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรและไบสกร หลังกระบวนการชุบแข็งที่ผิว จะได้โครงสร้าง มาร์เทนไซด์ โดยมีลักษณะคล้ายกับเข็ม ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



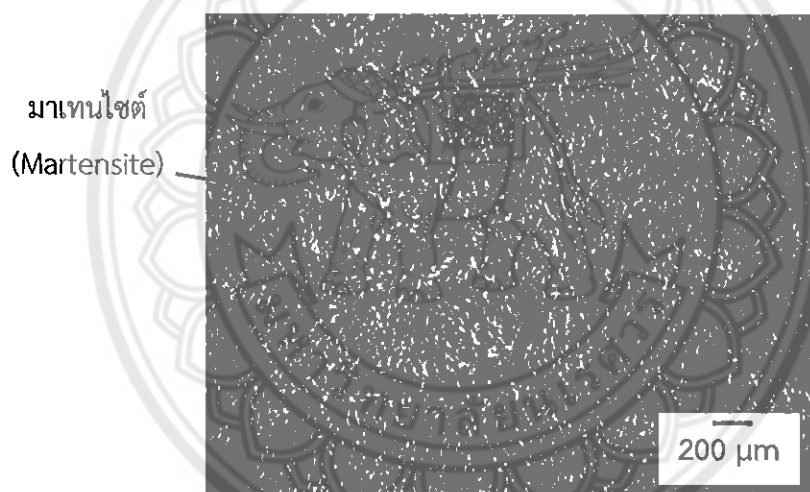
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ทำเหล็กคาร์บูไรซิ่งที่ 3 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง



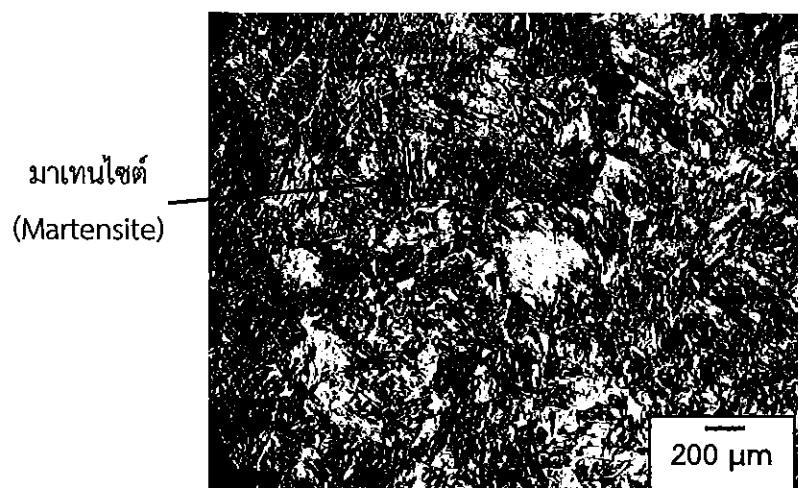
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ทำเหล็กคาร์บูไรซิ่งที่ 4 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ทำเหล็กคาร์บอนไร้ซึ่งที่ 5 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง



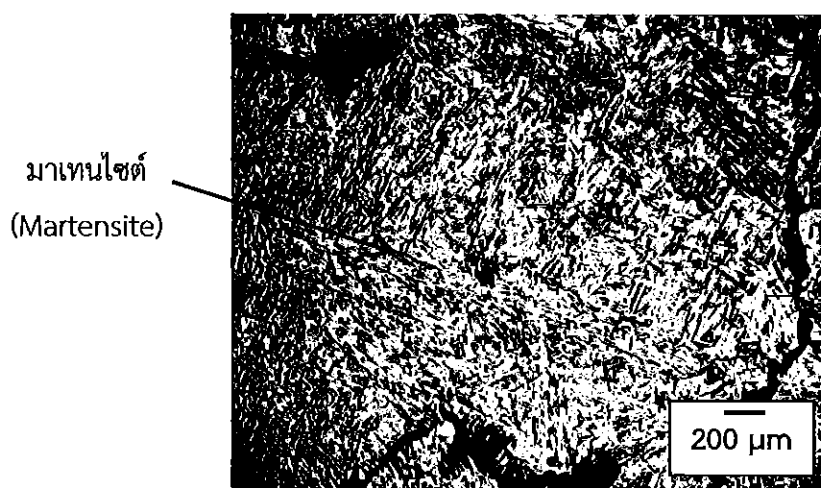
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรูที่ทำเหล็กคาร์บอนไร้ซึ่งที่ 6 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง



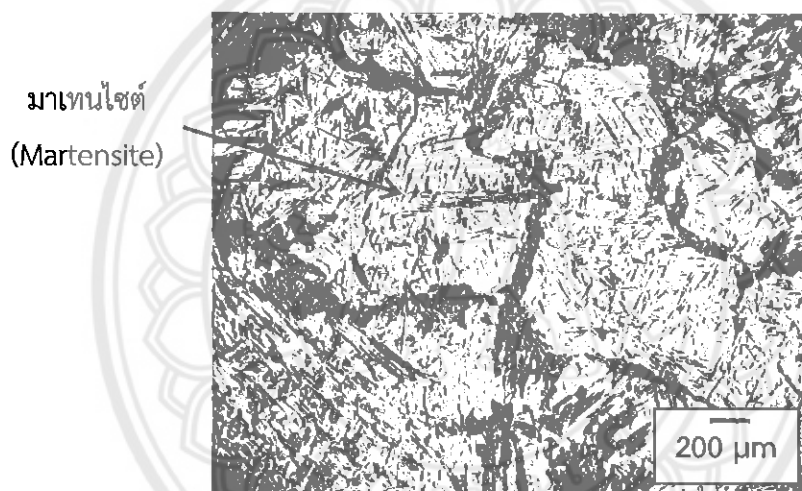
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่ทำเหล็กคาร์บูไรซิ่งที่ 3 ชั่วโมง ภายหลังจากชุบแข็ง



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่ทำเหล็กคาร์บูไรซิ่งที่ 4 ชั่วโมง ภายหลังจากชุบแข็ง



รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 5 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง

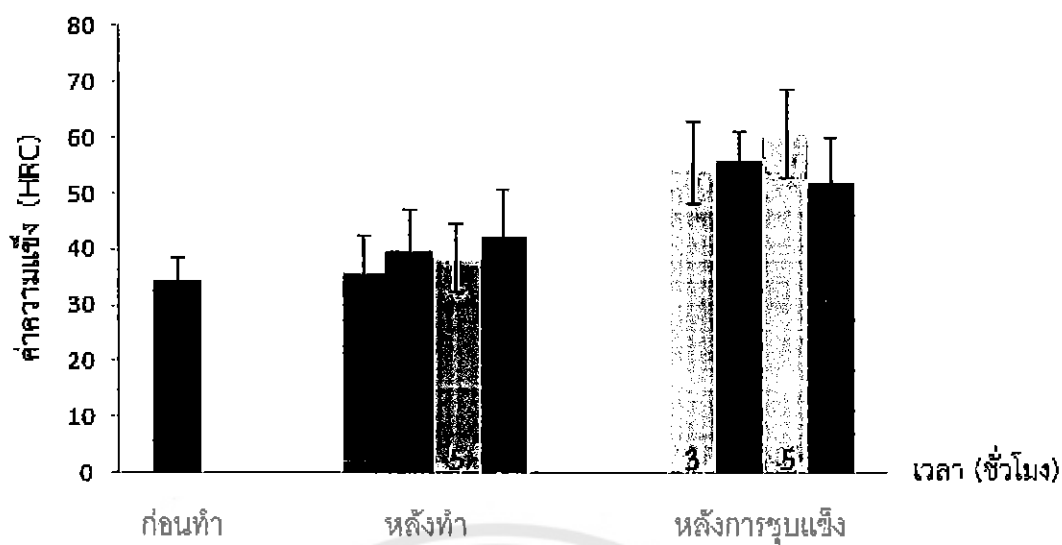


รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของใบสกรูที่ทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่ 6 ชั่วโมง ภายหลังการชุบแข็ง

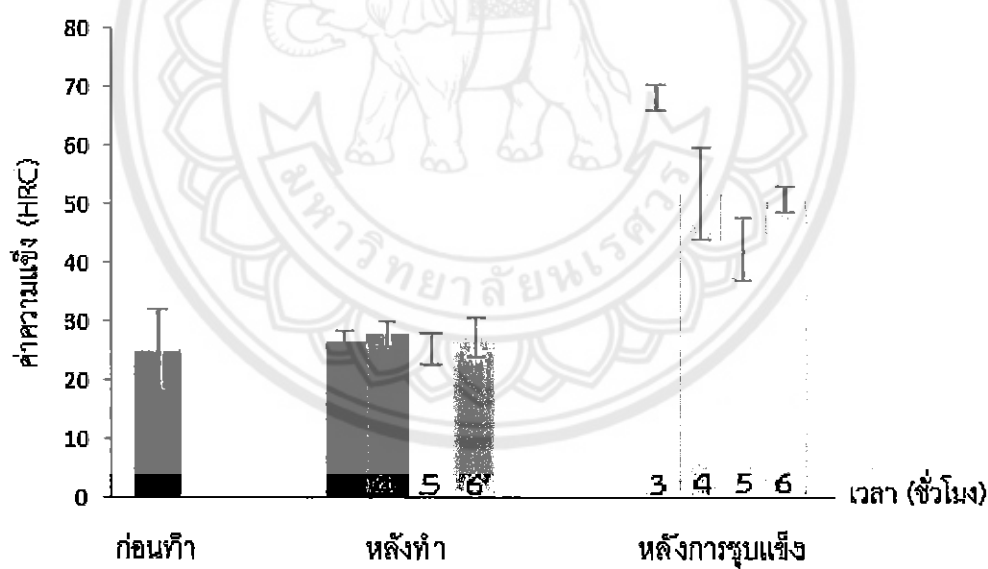
4.3.1 ความแข็งหลังทำการชุบแข็งที่ผิว

ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการชุบแข็ง โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล หัวกดเพชรทรงกรวย ใช้น้ำหนัก 150 กิโลกรัมแรง โดยจะทำการวัดแบบสุ่มเป็นจำนวนชิ้นงานละ 5 ครั้ง โดยแต่ละครั้งรอยกดจะต้องห่างจากรอยเดิมไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดรอยกดเดิม ได้ค่าความแข็งแสดงดังรูปที่ 4.24 และ 4.25

ค่าความแข็งของแกนสกรูในทุกชั่วโมงของการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ภายหลังการชุบแข็ง มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าความแข็งก่อนทำการชุบแข็ง จากในช่วง 38.95 HRC สอดคล้องกับโครงสร้างเฟิร์ลโลห์ และเฟอร์ไรต์ ขึ้นมาอยู่ในระดับความแข็ง 56 HRC ที่มีโครงสร้างเป็นมาเทนไซด์ เช่นเดียวกันกับค่าความแข็งของใบสกรูที่เพิ่มขึ้นมาจากช่วง 26.55 HRC ขึ้นมาเป็น ประมาณ 51 HRC



รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งของแกนสกรู ก่อน-หลังทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และหลังการชุบแข็งที่ผิว ที่เวลา 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งของใบสกรู ก่อน-หลังทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และหลังการชุบแข็งที่ผิว ที่เวลา 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง

4.3.2 การทดลองกับชิ้นงานจริง

หลังจากที่ได้ทำการทดลองกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง พบว่าที่เวลา 4 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เพราะเมื่อนำระยะการแพร่ของคาร์บอนมาเปรียบเทียบกับพบว่ามีระยะการแพร่ที่ต่างกันเล็กน้อยซึ่งถ้าเลือกที่ 5 และ 6 ชั่วโมงจะทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และถ้าเลือกที่ 3 ชั่วโมงซึ่งมีระยะการแพร่ที่น้อยเกินไปจะส่งผลทำให้สกรูไม่มีประสิทธิภาพทนทานต่อการสึกหรอ ดังนั้นจึงเลือกที่ 4 ชั่วโมงในการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่ง หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลองแล้ว จึงทำการทดลองกับชิ้นงานจริง โดยมีรายละเอียดในภาคผนวก ค



บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา รวมทั้งปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขของโครงการ มีรายละเอียดดังนี้

5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวให้กับสกรูอัดถ่านแท่ง จากกระบวนการผลิตของกิจการโรงงานอัดถ่านแท่งแห่งหนึ่งในจังหวัดพิษณุโลก เพื่อศึกษาเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการทำกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาอบที่อุณหภูมิ 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งก่อน-หลังการทำกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่งพบว่า

5.1.1 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรู และใบสกรู ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงพบโครงสร้างเป็น เฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์

5.1.2 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรู และใบสกรู หลังผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงพบโครงสร้าง เฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ และที่บริเวณใต้ผิวโครงสร้างเป็นเฟิร์ลไลต์เพียงอย่างเดียว

5.1.3 โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรู และใบสกรู ที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง ทุกระยะเวลาอบ หลังจากทำการชุบแข็งจะได้โครงสร้าง มาเทนไซด์ที่บริเวณใต้

5.1.3 สกรูอัดถ่านที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บูไรซิ่ง และวิธีชุบแข็งด้วยน้ำ มีความแข็งแรงที่ผิวเพิ่มจาก 25 HRC เป็น 58 HRC

5.1.4 การทดลองการทำแพ็คคาร์บูไรซิ่งที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ พบว่าระยะเวลาอบที่ 4 ชั่วโมง เป็นเวลาเหมาะสมที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

ควรพัฒนาองค์ความรู้เรื่องการสร้างเตาอบสกรูให้มีความสามารถพร้อมที่จะควบคุมอุณหภูมิ ในขณะที่ทำการอบให้ดีขึ้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ และสร้างเตาอบสกรูขึ้นได้เอง โดยเตาอบสกรูที่ได้สร้างนั้นสามารถอบเหล็ก และสกรูที่มีขนาดยาวได้ อีกทั้งยังประหยัดเวลา และใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไข

5.3.1 ก่อนตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ต้องทำการตัดชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูปใดซึ่งในทิศทางตั้งฉากกับผิวที่ทำ มิฉะนั้นจะไม่สามารถเห็นโครงสร้างที่มีปริมาณของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นได้

5.3.2 ในการดำเนินโครงการไม่มีเตาอบที่เหมาะสมสำหรับการทำแปรรูปใดซึ่ง กับสกรูอัดถ่าน จึงต้องสร้างเตาอบขึ้นเองทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินโครงการมากขึ้น

5.3.3 เตาที่สร้างขึ้นนั้นในการปฏิบัติจริงจะต้องมีการเติมถ่านเป็นช่วง ๆ ซึ่งเตาบางช่วงมีอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100 องศาเซลเซียส จึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ



เอกสารอ้างอิง

- [1] มนัส สิริจินดา. (2537). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. กรุงเทพฯ ฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- [2] มงคล จิรวรรณเดช. (2548). กลศาสตร์วัสดุ. กรุงเทพฯ ฯ : ส.แมคกรอ-ฮิลอินเตอร์เนชั่นเนลเอนเตอร์ไพรส์.
- [3] มานพ ตันตระกูล. (2546). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ ฯ : ส.สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.
- [4] ชาตรี หลักทองและคณะ. (2540). วัสดุวิศวกรรมเบื้องต้น เล่ม1. ส.แมคกรอ-ฮิลอินเตอร์เนชั่นเนลเอนเตอร์ไพรส์.
- [5] Callister, Jr. William D. (2015). Materials Science and Engineering. (9th ED). New York: & Sons.
- [6] Askeland, Donald R. (1994). The Science and Engineering of Materlas. (3rd ED). USA: PwsPublishing Company.
- [7] อนันต์ วงศ์กระจ่าง. (2533). ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- [8] นางสาวกันยาทิพย์ ตันติคมน์ และคณะ. (2540). กรรมวิธีเติมคาร์บอนที่ผิวเหล็กกล้าโดยการแพ็คคาร์บูไรซิง. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [9] มุฮัมหมัด เจาะและคณะ. (2547). การชุบผิวแข็งเหล็กกล้า 5115 โดยวิธี Pack carburizing. มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต วิทยาเขตพัฒนาการและวิทยาเขตร่มเกล้า.
- [10] นางสาวชลธิชา บุญสะอาดและคณะ. (2551). ตัวแปรในการทำคาร์บูไรซิงชนิดของแข็งที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [11] นายณรงค์เดช พัฒนไพบูลย์ และคณะ. การลดเวลากระบวนการชุบผิวแข็งแบบแก๊สคาร์บูไรซิงโดยการลดเวลาแพร่และการบำบัดเย็น. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [12] พิบูลย์ เครือคำอ้าย และวัฒน์ กำน้อย. ศึกษากระบวนการอบชุบเครื่องมือทางการเกษตรจอบดาบหญา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.
- [13] ปราโมทย์ ปูนขุนทด และคณะ. (2548). ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการชุบแข็งที่ผิวเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยวิธีแพ็คคาร์เบอร์ไรซิง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- [14] บุญมา ป้านประดิษฐ์และคณะองค์. การผลิตถ่านอัดแท่งคุณภาพสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [15] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2549). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ ฯ : ส.เอเชียเพลส.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. องค์ประกอบของถ่านไม้ชนิดต่างๆ.
- [17] Askeland, Donald R. (2003). *The Science and Engineering of Materials*. (4th ED).
USA: Thomson Learning.

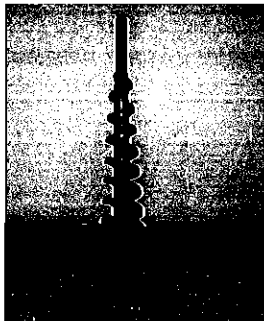
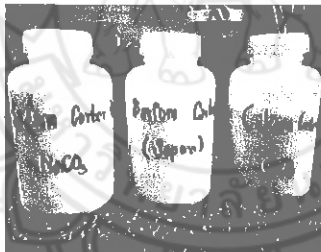
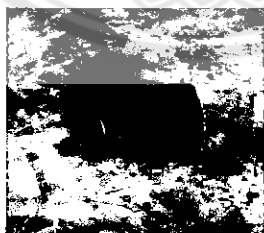


ภาคผนวก ก

เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีในการทำกระบวนการแปรรูปไรซิง
ของสกรูอัดถ่าน

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ ก.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปไรซิงค์ของสกรูอัดถ่าน

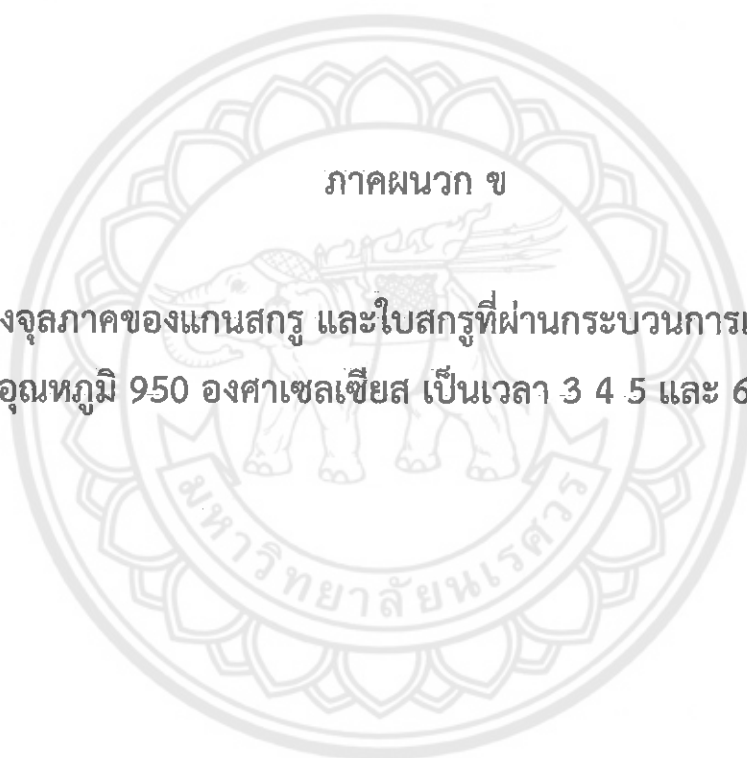
ชื่ออุปกรณ์	รูป	การใช้งาน
สกรูอัดถ่าน		ขึ้นงานสกรูอัดถ่านที่นำมาทำกระบวนการแปรรูปไรซิงค์
กล่องบรรจุชิ้นงานคาร์บูไรซิงค์		ใช้สำหรับใส่สกรูอัดถ่าน
สาร Na_2CO_3 , BaCO_3 และ CaCO_3		ใช้สาร Na_2CO_3 , BaCO_3 และ CaCO_3 ในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการแปรรูปไรซิงค์
ผงถ่านไม้		ทำหน้าที่เป็นคาร์บอนที่แทรกซึมเข้าไปในผิวของสกรูอัดถ่าน
ถ่านกัมมันต์		ช่วยเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการแปรรูปไรซิงค์

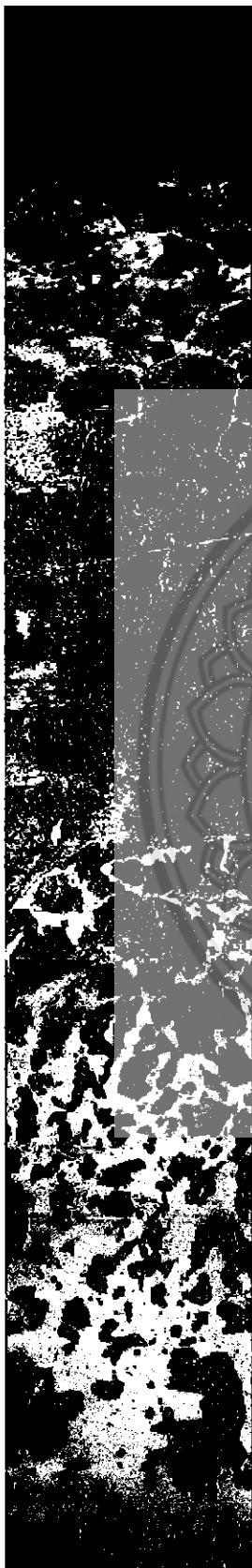
ตารางที่ ก.1 (ต่อ) อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการแก้คดีบุโรซึ่งค้ของสกรูอัดถ่าน

ชื่ออุปกรณ์	รูป	การใช้งาน
เตาอบ		ใช้ในการอบสกรูอัดถ่าน
มัลติมิเตอร์		วัดอุณหภูมิความร้อน

ภาคผนวก ข

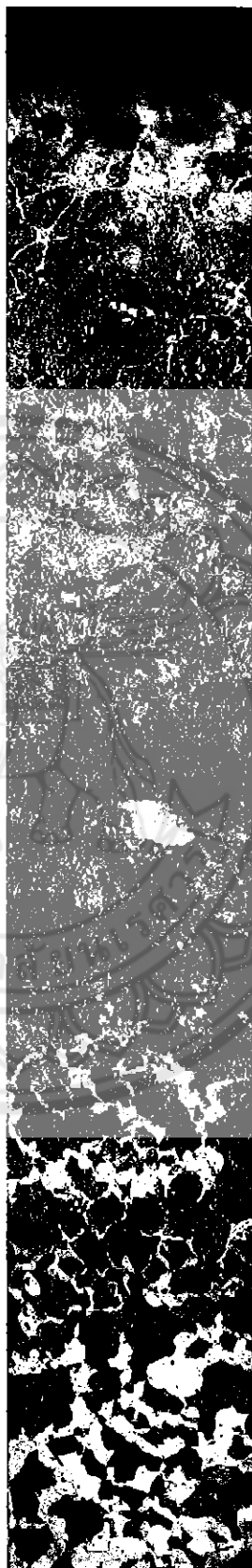
โครงสร้างจุลภาคของแกนสกรู และใบสกรูที่ผ่านกระบวนการเผื่อคาร์บูไรซิ่ง
ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง





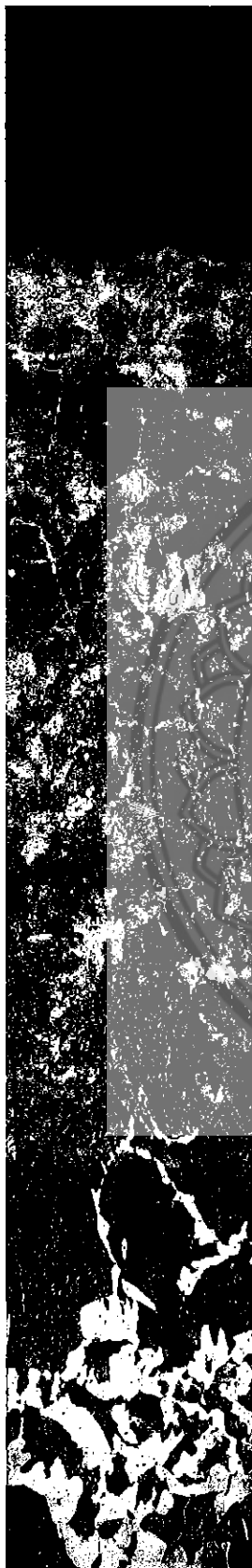
20 μm

รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของแกนสกรูที่ 3 ชั่วโมง



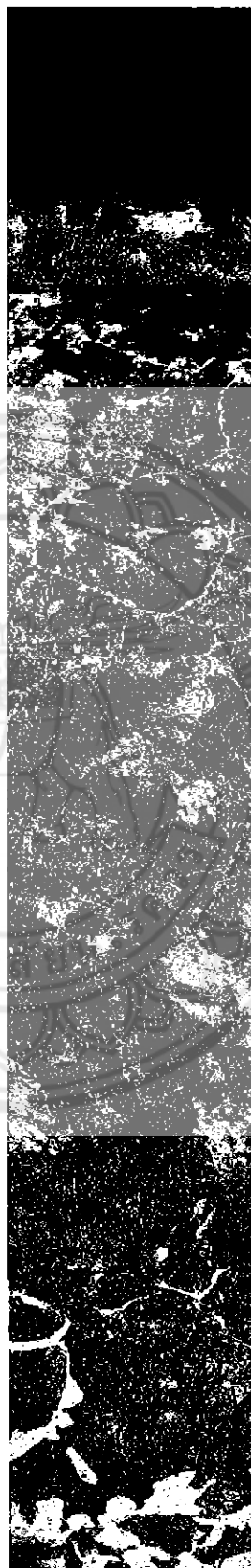
20 μm

รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของแกนสกรูที่ 4 ชั่วโมง



20 μm

รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของแกนสกรูที่ 5 ชั่วโมง

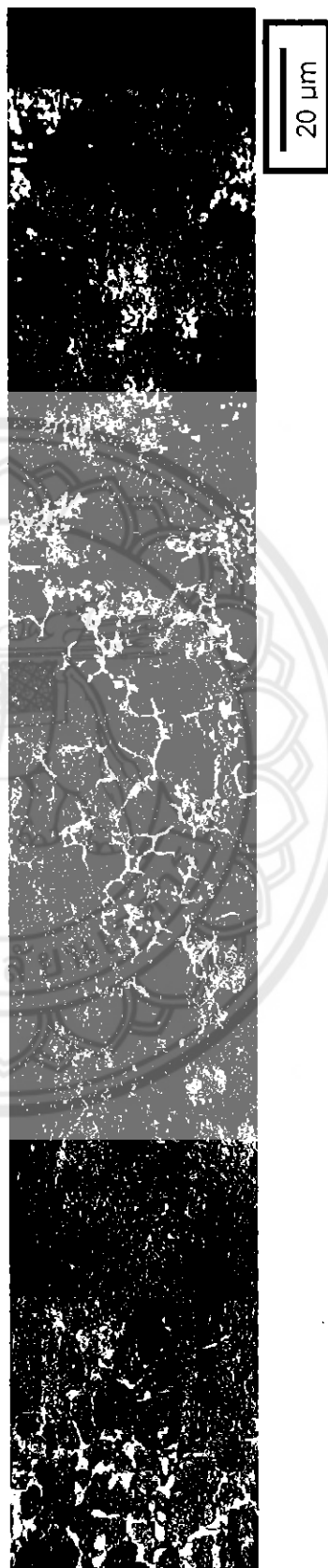


20 μm

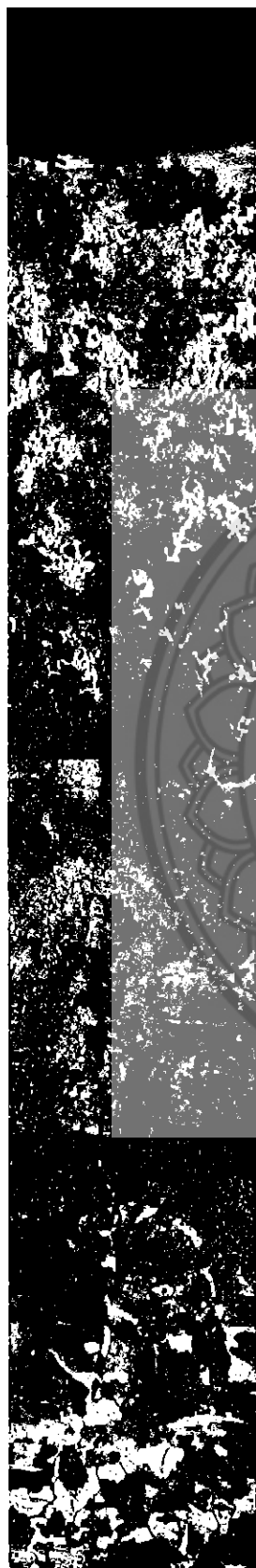
รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของแกนสกรูที่ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของไบสกรูที่ 3 ชั่วโมง

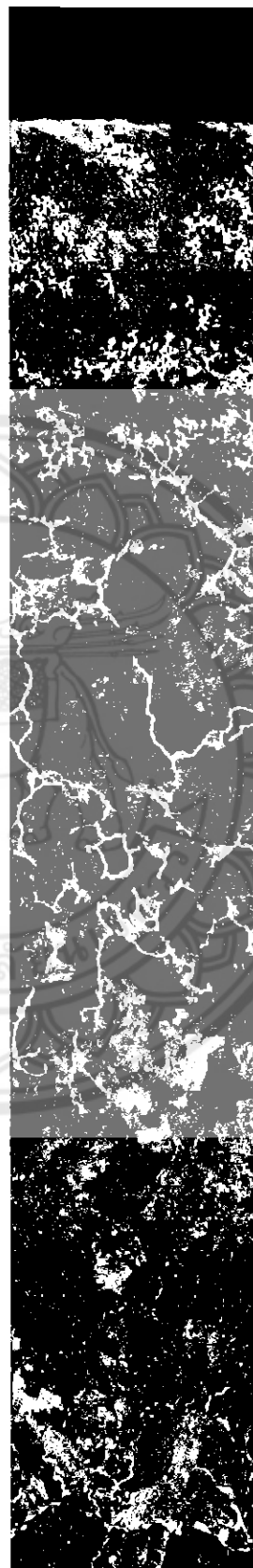


รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของไบสกรูที่ 4 ชั่วโมง



20 μm

รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของใบสกรูที่ 5 ชั่วโมง

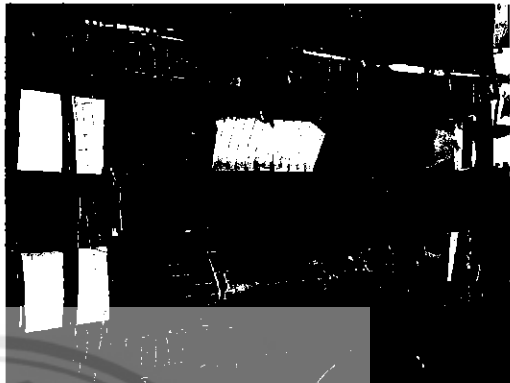
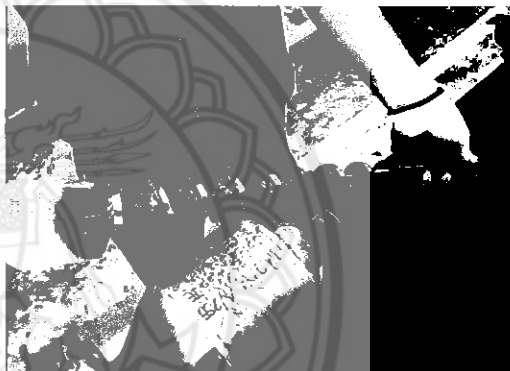
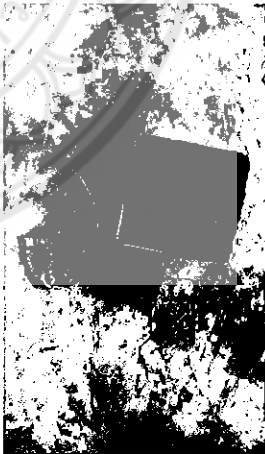


20 μm

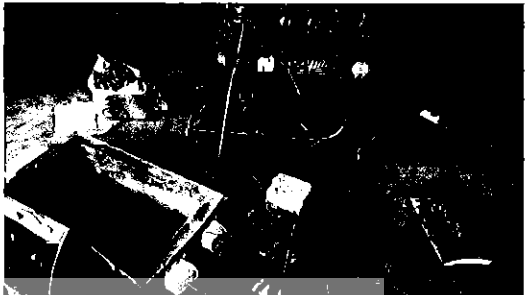
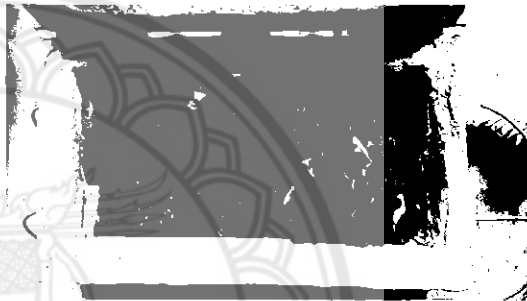
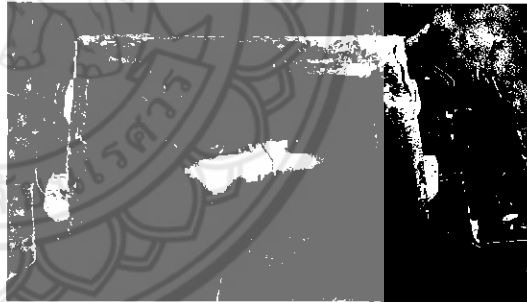
รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคแบบต่อเนื่องของใบสกรูที่ 6 ชั่วโมง



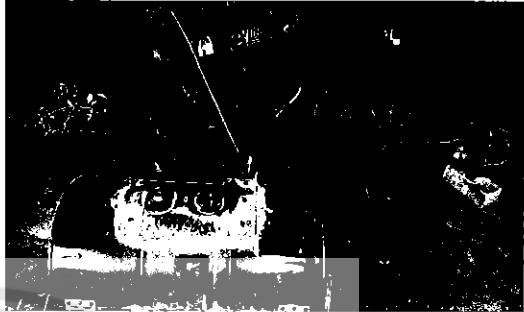
ตารางที่ ค.1 ขั้นตอนการทดลองกับชิ้นงานจริง

ขั้นตอนการปฏิบัติงานจริง	รูปภาพประกอบ
1. สร้างเตาที่ใช้เผาสกรู โดยใช้ถังน้ำมัน 200 ลิตร อิฐมวลเบา และปูนทนความร้อน	
2. ทำการขัดสีเคลือบผิวออก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแพร่คาร์บอน	
3. นำสกรูทั้งแท่งใส่เข้าไปในทึบเหล็กพร้อม กับใส่สารเคมีที่เตรียมไว้	

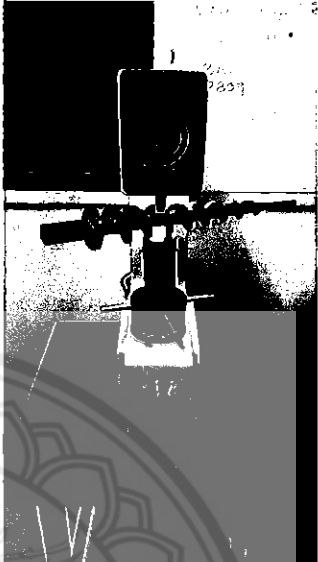
ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ขั้นตอนการทดลองกับชิ้นงานจริง

ขั้นตอนการปฏิบัติงานจริง	รูปภาพประกอบ
4. ปิดฝาหีบเหล็ก และใช้ดินเหนียวปิดตามรอยขอบกล่อง	
5. ใส่ถ่านลงในเตาเผา	
6. จุดไฟเผาถ่าน โดยใช้แก๊สเป็นตัวช่วยในการควบคุมอุณหภูมิ	
7. ปิดฝาเตาให้สนิท	

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ขั้นตอนการทดลองกับชิ้นงานจริง

ขั้นตอนการปฏิบัติงานจริง	รูปภาพประกอบ
9. เผาสกรูที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ปั๊มลมเป็นตัวเพิ่มออกซิเจนทำให้ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์	
10. ระหว่างการเผาสกรูจะต้องเติมถ่านเป็นช่วงๆ เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่	
11. ใช้เทอร์โมคัปเปิล วัดอุณหภูมิ	

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ขั้นตอนการทดลองกับชิ้นงานจริง

ขั้นตอนการปฏิบัติงานจริง	รูปภาพประกอบ
15. วัดความแข็งของสกรูด้วยเครื่องทดสอบความแข็งรีอคเวล โดยค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 58 HRC	

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายภูมิพัฒน์ ชันติเจริญ
ภูมิลำเนา 119/1 หมู่ที่ 1 ต.ท่าเสา อ.โพทะเล จ.พิจิตร
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากนวมินทรราชูทิศ มัชฌิม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: mr.phumiphat@hotmail.com



ชื่อ นายไตรรงค์ ม่วงสุข
ภูมิลำเนา 66 หมู่ 2 ต.ท่าช้าง อ.พรหมพิราม จ.พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาภาคเหนือ
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: oaktrirong@hotmail.com



ชื่อ นายอัศเรศ คำมา
ภูมิลำเนา 81 หมู่ 5 ต.บ้านกลาง อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเมืองกลางวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Akares_o@hotmail.com