

การศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอวัสดุใบตัดย่อยทางปาล์ม

**COMPARATIVE STUDY OF WEAR RESISTANCE
OF PALM FRONDS MILLING BLADE**

อัจฉราภา ดวงอัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอวัสดุใบตัดย่อยทางปาล์ม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอวัสดุใบตัดย่อยทางปาล์ม
Comparative Study of Wear Resistance of Palm Fronds Milling Blade
ชื่อ - นามสกุล นางสาวอัจฉราภา ดวงอัน
สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี, D.Eng.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์หัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 12 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอวัสดุใบตัดย่อยทางปาล์ม
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวอัจฉราภา ดวงอัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

ปัญหาอายุการใช้งานที่สั้นของใบตัดทางปาล์มส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องย่อยทางปาล์มลดลง การพัฒนาเพื่อหาใบมีดตัดที่มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานสูงจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนที่มีการปฏิบัติอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อ 1) การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของใบมีดตัดโลหะ 4 ชนิด ประกอบด้วยเหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 และ 2) การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม

วัสดุในการทดลองประกอบด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C เหล็กกล้าผสมต่ำเกรด SCM440 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 และเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 เหล็กกล้าทั้ง 4 ถูกขึ้นรูปและปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนด้วยวิธีการที่กำหนด หลังจากนั้นใบมีดตัดจะถูกนำไปทดสอบสมบัติของใบมีดประกอบด้วยความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ แรงกระแทก โครงสร้างจุลภาค และความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและเศรษฐศาสตร์ถูกทำการศึกษาเพื่อหาวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังต่อไปนี้ ใบมีดตัดเหล็กกล้า SKD11 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยสถานะที่กำหนด ให้ค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าใบมีดตัดเหล็กกล้า SUS304 S45C และ SCM440 ที่ค่าประมาณ 34 45 และ 60% ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า เหล็กกล้า S45C มีราคาต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยต่ำกว่าเหล็กกล้า SCM440 SKD11 และ SUS304 ประมาณ 6 42 และ 52% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเหมาะสมระหว่างความต้านทานการสึกหรอและต้นทุนในการผลิตพบว่า เหล็กกล้าคาร์ S45C มีต้นทุนค่าเหมาะสมในการผลิตเป็นใบมีดตัดย่อยทางปาล์มมากที่สุด

คำสำคัญ: ใบตัด การชุบแข็ง การอบคืนไฟ การสึกหรอ

Thesis Title	Comparative Study of Wear Resistance of Palm Fronds Milling Blade
Name - Surname	Miss Atcharapha Duang-un
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

Short time use of a palm chopper machine decreased palm milling blade's efficiency. Therefore, increasing its efficiency and long life service was an urgent issue needed to be done continuously. This research aimed to 1) investigate the influence of heat treatment processes for milling blades metals and 2) compare mechanical properties and microstructure of 4 milling blades metals.

Four types of steel comprising S45C, SCM440, SUS304, and SKD11 steel were employed as experimental materials. They were machined and heat treated before investigating for wear resistance, hardness, and microstructure, and the relationship between mechanical property and economics to find out proper materials for further use.

The results showed that the SKD11 steel milling blade harden at the given condition yielded higher wear resistance than that of SUS304, S45C and SCM440 steels milling blades for 34, 45 and 60%, respectively. It was also found that the S45C steel milling blade cost was lower than that of SCM440, SKD11 and SUS304 at 6 42 and 52%, respectively. When considering the relationship between the wear resistance and the manufacturing cost, carbon S45C steel had lower cost and was the most suitable in producing the milling blade.

Keywords: milling blade, hardening, tempering, wear

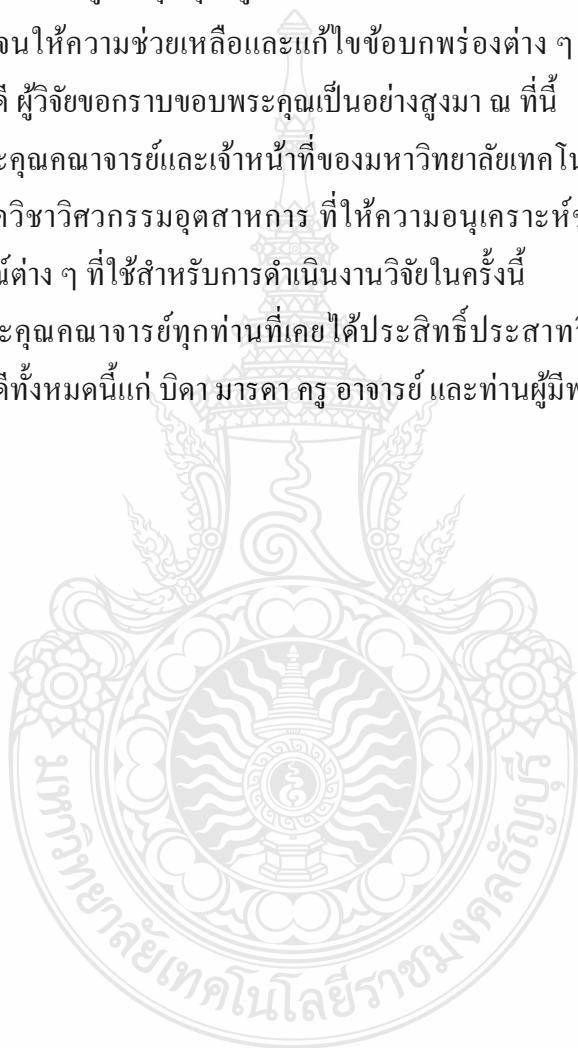
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก ท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี ที่กรุณาให้คำแนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เกี่ยวข้องได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านวิชาการ ผู้วิจัยจึงขอขอบความดีทั้งหมดนี้แก่ บิดา มารดา ครู อาจารย์ และท่านผู้มีพระคุณที่ยังมิได้กล่าวถึงทุก ท่าน

อัจฉราภา ดวงอัน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(9)
บทที่ 1 บทนำ	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	12
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.1 เครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็ก	16
2.2 ลักษณะพฤกษศาสตร์ของทางปาล์มน้ำมัน	20
2.3 ทฤษฎีของวัสดุ	21
2.4 ทฤษฎีการอบชุบ	31
2.5 ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	38
2.6 การทดสอบสมบัติทางกล	43
2.7 ต้นทุนการผลิต	46
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	51
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	51
3.2 กำหนดตัวแปรการทดลอง	53
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	54
3.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	55
3.5 การทดสอบสมบัติทางกล	57
3.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	60
4.1 การทดสอบสมบัติทางกล	60
4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	65
4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการวิจัย	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบความแข็ง.....	100
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ.....	104
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	113
ประวัติผู้เขียน	130

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME.....	24
ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051.....	24
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	27
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C (wt%).....	52
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 (wt%).....	52
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 (wt%).....	52
ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 (wt%).....	52
ตารางที่ 3.5 ค่ากำหนดอุณหภูมิ เวลา และสารอบชุบ.....	53
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C.....	67
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440.....	72
ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304.....	77
ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11.....	82
ตารางที่ 4.5 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และผลการทดสอบสมบัติทางกล	86



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องย่อยทางปาล์มที่ใช้ในการทดสอบ	16
รูปที่ 2.2 โครงฐานเครื่องย่อยทางปาล์ม	17
รูปที่ 2.3 การประกอบจานตัดกับเพลลา และการติดตั้งระยะเชิงกับใบตัดย่อย	18
รูปที่ 2.4 การประกอบเพลลากับชุดส่งกำลัง	18
รูปที่ 2.5 ชุดทิ้งเศษปาล์มและส่วนป้องกันความปลอดภัยของเครื่องย่อยทางปาล์ม	19
รูปที่ 2.6 ชุดกล่องควบคุมเครื่องย่อยทางปาล์ม	20
รูปที่ 2.7 ทางใบต้นปาล์มน้ำมัน	20
รูปที่ 2.8 (ก) แผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ (ข) แผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ ปฏิกริยาแยกตอย	21
รูปที่ 2.9 (ก) ผลของ โครเมียม 17% ต่อแผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ ที่มีปริมาณ คาร์บอนต่ำ เฟอร์ไรต์มีความเสถียรในช่วงอุณหภูมิ (ข) ส่วนของแผนภาพสมดุลเหล็ก โครเมียม นิกเกิล คาร์บอน ที่โครเมียม 18% และนิกเกิล 8% ที่ปริมาณคาร์บอนต่ำ ออสเทนไนต์ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง	26
รูปที่ 2.10 (ก) เหล็กกล้าไร้สนิมมาแทนชนิดที่ประกอบด้วยคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ที่มี ขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการอบคืนไฟ ภาพกำลังขยาย 350 เท่า (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนเนติก ภาพกำลังขยาย 500 เท่า	27
รูปที่ 2.11 แผนภาพการอบชุบ (ก) เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอย (ข) เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอย	32
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของคาร์บอนและการอบชุบต่อสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน	33
รูปที่ 2.13 โครงสร้างซีเมนไต์ที่กลมมนในพื้นที่หลักเฟอร์ไรต์ กำลังขยาย 850 เท่า	33
รูปที่ 2.14 การทำออสเทมเปอริงและการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ในเหล็กกล้า 1080	34
รูปที่ 2.15 แผนภูมิ TTT ของ (ก) เหล็กกล้า 1050 และ (ข) เหล็กกล้า 10110 (Y หมายถึง ออสเทน ไนต์ที่ไม่เสถียรและพร้อมในกรเปลี่ยนแปลง)	35
รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิการอบคืนไฟต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้า 1050	36

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 แผนภูมิ CCT (เส้นทึบ) ของเหล็กกล้า 1080 เปรียบเทียบกับแผนภูมิ TTT (เส้นประ) ..	36
รูปที่ 2.18 แผนภูมิ CCT ของเหล็กกล้าผสมต่ำ 0.2%C	37
รูปที่ 2.19 ทิศทางการหมุนปรับชิ้นงานในกระบวนการขัดเมื่อเปลี่ยนกระดาษทราย	39
รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบธรรมดา	40
รูปที่ 2.21 หลักการทำงานของเครื่อง SEM	41
รูปที่ 2.22 แสดงเครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Dry Sand/ Rubber Wheel	43
รูปที่ 2.23 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของการทดสอบแบบ Vickers Hardness Test	44
รูปที่ 2.24 การทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod.....	45
รูปที่ 3.1 แสดงใบตัดขึ้นรูปด้วยวิธีทางกล	51
รูปที่ 3.2 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และลำดับการทำงาน	53
รูปที่ 3.3 การออกแบบการตัดขึ้นงานทดสอบ.....	54
รูปที่ 3.4 เครื่องขัดงานหมุน	55
รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และตำแหน่งการทดสอบ	56
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และตำแหน่งการทดสอบ	56
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Dry Sand/ Rubber Wheel และตำแหน่ง การทดสอบ.....	57
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง และตำแหน่งการทดสอบ	58
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก และตำแหน่งการทดสอบ.....	59
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็ก การอบชุบ และการสูญเสียน้ำหนัก.....	61
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็ก การอบชุบ และค่าความแข็ง.....	63
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็ก การอบชุบ และค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด 300 Joules	65
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C สภาวะการจำหน่าย.....	68
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C สภาวะการชุบแข็ง.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ.....	70
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 สภาวะการจำหน่าย.....	73
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 สภาวะการชุบแข็ง.....	74
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ.....	75
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 สภาวะการจำหน่าย.....	78
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 สภาวะการชุบแข็ง.....	79
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ.....	80
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 สภาวะการจำหน่าย.....	83
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 สภาวะการชุบแข็ง.....	84
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ.....	85



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปาล์มเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจสำคัญที่ารายได้เข้าประเทศเป็นปริมาณสูง นอกจากนั้น เป็นพืชที่ทำให้เกิดการสร้างงานให้แก่เกษตรกรมากกว่าหนึ่งแสนครัวเรือน และมีพื้นที่เพาะปลูก ปาล์มและพื้นที่ให้ผลผลิตมากกว่า 3 ล้านไร่ และมีแนวโน้มความต้องการที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการในการใช้น้ำมันปาล์มเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกของโลก [1] ในการปลูกปาล์มเพื่อนำมาทำ เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น น้ำมันพืช สบู่ หรือไบโอดีเซลนั้น พบว่า ต้นปาล์มประกอบด้วยลำต้น กิ่ง ใบ ดอก และผล ซึ่งมีส่วนของผลปาล์มไม่กินร้อยละ 30 เท่านั้นที่ถูกนำมาทำการแปรรูป [2] ขณะที่ ส่วนอื่น ๆ เมื่อสิ้นอายุการให้ผลปาล์มของต้นปาล์ม เกษตรกรจะทำการย่อยให้มีขนาดเล็กลงเพื่อ นำไปใช้งานในรูปแบบอื่นต่อไป ด้วยเครื่องย่อยกิ่งไม้ทั่วไปซึ่งมีขนาดใหญ่และมีราคาสูง เกษตรกรที่ ปลูกต้นปาล์มจึงมีการคิดค้นเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กขึ้นมาใช้งาน โดยใช้ต้นกำลังจากรถไถ ขนาดเล็กในการทำให้ระบบการย่อยเศษเกิดขึ้น และด้วยข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรม ปัญหาด้านอายุ การใช้งานที่สั้นลงของใบตัดย่อยทางปาล์มที่มีความเหนียวกว่าเศษไม้ทั่วไปได้เกิดขึ้น ส่งผลทำให้ ประสิทธิภาพใบตัดย่อยของเครื่องย่อยกิ่งไม้ลดลง ปัญหาดังกล่าวเกษตรกรจึงได้ทำการทดลอง เลือกใช้วัสดุหลายชนิด และวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อหาข้อมูลการเลือกใช้โลหะที่ เหมาะสมในการผลิตใบตัดย่อยเครื่องย่อยทางปาล์ม ซึ่งมีการศึกษาอย่างเป็นระบบส่งผลให้เกิด ประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตปาล์มได้

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษเปรียบเทียบสมบัติของโลหะต่าง ๆ เพื่อเลือกใช้ในการตัด วัสดุ และมีการเปรียบเทียบผลการทดลองที่สำคัญดังต่อไปนี้ การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลของ ใบมีดตัดอ้อยที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน 2 ชนิด คือ SUPA และ SUP7 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยวิธีการ ต่าง ๆ พบว่าใบมีดตัดอ้อยที่อบชุบด้วยกระบวนการที่กำหนดและผ่านการอบคืนไฟ ทำให้ใบมีดมี ความแข็งในระดับเดียวกันกับมีดตัดอ้อยที่นำเข้าจากต่างประเทศได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.5 [3] หรือการศึกษาการออกแบบและสร้างชุดทดสอบใบมีดตัดอ้อยเพื่อจุดประสงค์ในเลือก ชนิดใบมีดตัดที่มีความเหมาะสมของกลุ่มใบมีด 2 แบบ ตามตัวแปรการตัดต่าง ๆ ผลการทดลองที่ได้ แสดงตัวแปรการออกแบบใบตัดอ้อยซึ่งเข้าที่สามารถย่อยต่ออ้อยได้มากที่สุดเท่ากับ 66% มีความ ยาวของอ้อยสูงสุดคือ 8.1 - 12 cm [4] หรือการเลือกใบกวนผสมอาหารสัตว์ที่ผลิตจากเหล็กกล้า คาร์บอนและมีการปรับปรุงสมบัติของใบกวน ด้วยการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนและการเคลือบ

ผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ พบว่า ผิวของใบมีดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีการที่กำหนดทั้ง 2 รูปแบบให้อัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าผิวของใบมีดที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน และใบมีดที่เคลือบผิวด้วยเซรามิกเป็น ใบมีดที่แสดงค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุด เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน [5] หรือการเลือกเหล็กกล้า 4 ชนิด ที่มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเพื่อตัดกระดาษแผ่นบางที่เรียงตัวเป็นชั้นหนา โดยทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้มีความแข็ง พบว่าประสิทธิภาพในการตัดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมและต่ำกว่าเหล็กกล้าดามัสกัส [6] หรือการศึกษาคุณลักษณะและกลไกการสึกกร่อนของใบมีดตัดที่มีความบางของใบมีดที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน 3 ชนิดที่มีปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกัน และผ่านการชุบแข็งและอบคืนไฟ การเลือกใบมีดที่เหมาะสมทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบอัตราการสึกหรอและการจำลองสถานการณ์ พบว่า อัตราการสึกหรอของใบมีดที่มีความบางมีผลเนื่องจากรูปร่างและความหนาของคมตัด [7] หรือการเลือกชนิดของใบมีดตัดที่เคลือบผิวด้วยเทคนิคต่าง ๆ สำหรับใช้ในการตัดไม้ พบว่า ใบมีดตัดที่เคลือบผิวด้วยพอลิเททราฟลูออโรเอธิลีนทำให้เกิดการออกแรงในการตัดน้อยกว่าใบมีดตัดแบบอื่น ๆ เหมาะสมต่อการออกแบบใช้สำหรับการตัดย่อยไม้ [8] หรือการหาสภาวะทิศทางการตัด จำนวนใบมีด และขนาดเกรนของวัสดุขัดผิวที่เหมาะสมในการตัดและเตรียมไม้ชีคาร์ ที่พบว่าทิศทางการตัดและเตรียมผิวมีผลต่อการเลือกใบมีดและผิวสำเร็จของเนื้อไม้ ความเรียบของผิวไม้ขึ้นอยู่กับมุมของการเติมไม้และความละเอียดของกระดาษทรายที่ใช้ขัด [9] นอกจากนี้การตัดย่อยไม้ป๊อปลาร์ที่มีความชื้นที่แตกต่างกันสามารถเลือกใช้ใบมีดรูปทรงกรวยที่ผ่านการชุบแข็ง ได้เศษไม้ที่มีขนาดความยาวของเศษไม้ลดลงเมื่อมุมเอียงการป้อนเพิ่มขึ้นได้ [10] เป็นต้น งานวิจัยเหล่านี้ได้นำเสนอแนวคิดที่เป็นได้ในการเลือกวัสดุที่ใช้ในการผลิตใบตัดย่อย และกระบวนการในการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของใบตัดที่มีความเหมาะสมในการตัดวัสดุแต่ละชนิด เพื่อให้อายุการใช้งานของใบตัดยาวนานขึ้นได้

ด้วยข้อมูลปัญหาการใช้งานเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กที่มีอายุการใช้งานของใบตัดย่อยทางปาล์มที่สั้น และข้อมูลการวิจัยในการพัฒนาใบตัดวัสดุต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาในข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาเลือกใช้วัสดุที่ใช้ผลิตใบตัดย่อยที่มีในประเทศไทย และใช้วิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อนที่เหมาะสมที่คาดว่าจะส่งผลทำให้เกิดการยืดอายุการใช้งาน เพิ่มประสิทธิภาพของใบตัดย่อยทางปาล์มของกลุ่มเกษตรกร เพื่อความคุ้มค่าในการลงทุน และสามารถรายงานผลการวิจัยนี้เข้าสู่กลุ่มผู้ใช้งาน กลุ่มช่างซ่อมบำรุง และผู้เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นข้อมูลทางเลือกของกลุ่มเกษตรกรและช่างซ่อมบำรุงเครื่องตัดย่อยทางปาล์ม และส่งผลต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรของประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงสมบัติโลหะด้วยความร้อนของใบตัดย่อยทางปาล์ม

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของใบตัดโลหะย่อยทางปาล์มทั้ง 4 ชนิด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใบตัดย่อยทางปาล์ม ผลิตจากวัสดุจำพวกโลหะจำนวน 4 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน S45C เหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

1.3.2 ลักษณะรูปร่างของใบตัดย่อยที่ใช้ในการทดลอง จะถูกออกแบบมาสำหรับใช้ในเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กที่มีต้นกำลังมาจากเครื่องยนต์ที่ให้แรงไม่เกิน 50 แรงม้า ปลายใบตัดเป็นแบบกึ่ง V ทำมุม 30°

1.3.3 ใบตัดย่อยที่ใช้ในการทดลอง ต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนก่อนการทดสอบสมบัติทางกล ประกอบด้วย การอบอ่อน การชุบแข็ง และการอบคืนไฟ

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางกลของใบตัด โดยนำไปทดสอบด้วยการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ การทดสอบความแข็ง การทดสอบความแข็งแรงกระแทก การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

1.3.5 ศึกษาต้นทุนรวมเฉลี่ยต่อผลผลิต 1 หน่วย ของใบตัดย่อยทางปาล์ม ที่ผลิตจากวัสดุหลายชนิด ในสถานะการจำหน่าย การชุบแข็ง และการอบคืนไฟ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แก้ไขปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย โดยการเพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมในการเลือกวัสดุในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.4.2 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยและพัฒนาการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของโลหะใบตัดย่อยทางปาล์มที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ ในอุตสาหกรรมการเกษตร

1.4.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจเพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการจัดเตรียมข้อมูล วิธีการ และผลการทดลองเบื้องต้น ที่สามารถนำเสนอให้แก่ภาคอุตสาหกรรมเกษตร ที่มีการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลเกษตร และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการซ่อมบำรุงได้ทันที

1.4.4 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยคาดว่าผลการทดลองที่ได้จะเป็นหนึ่งทางเลือกในการใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาเพิ่มศักยภาพการวิจัยและการพัฒนาเกี่ยวกับการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมในการเลือกวัสดุในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม ในการเลือกใช้และซ่อมบำรุงเพื่อลดเวลาการทำการทดลองหรือการเลือกใช้ตัวแปรการผลิตต่าง ๆ เพื่อให้ได้ตัวแปรที่มีความเหมาะสมต่อไป

1.4.5 เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย กล่าวคือ

1.4.5.1 กลุ่มผู้วิจัย พัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการเพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมในการเลือกวัสดุในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัยต่อไป และสามารถเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ หรือตีพิมพ์ในวารสารต่าง ๆ ได้อย่างน้อย 1 เรื่อง

1.4.5.2 กลุ่มบุคคลที่เกี่ยวข้องทางด้านการศึกษา ได้เรียนรู้เพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมในการเลือกวัสดุในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม และมีโอกาสในการประยุกต์ใช้ในอนาคตต่อไป

1.4.5.3 กลุ่มช่างซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลเกษตร ได้ข้อมูลในการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมในการเลือกวัสดุในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม ที่มีปริมาณการใช้งานและการซ่อมบำรุงสูงในแต่ละปีการเก็บเกี่ยวผลผลิต

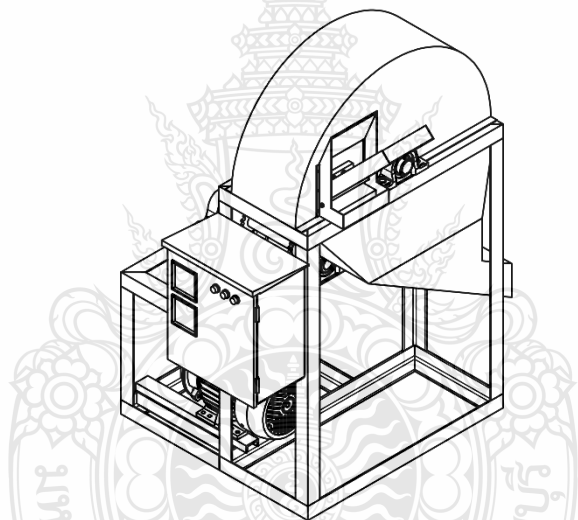
1.4.5.4 กลุ่มผู้ประกอบการเกี่ยวกับเครื่องจักรกลเกษตร ได้รับข้อมูลในการประกอบคำแนะนำแก่ผู้ที่ต้องการใช้ใบตัดย่อยทางปาล์มของหน่วยงานตัวเอง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็ก [11]

เครื่องย่อยทางปาล์ม เป็นเครื่องจักรที่ผลิตออกมาเป็นเครื่องต้นแบบ ซึ่งถูกนำมาใช้ในภาคเกษตรกรรม วัสดุที่นำมาทำการสร้างจะเป็นวัสดุที่หาได้โดยทั่วไป ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และการนำวัสดุและอุปกรณ์ที่เอามาใช้สร้างเครื่องต้นแบบนี้ จะต้องผ่านการวิเคราะห์หาส่วนที่เหมาะสมในการสร้าง โดยจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งานเป็นสำคัญ มีความแข็งแรงคงทนและสามารถใช้งานได้จริง ดังแสดงรูปที่ 2.1

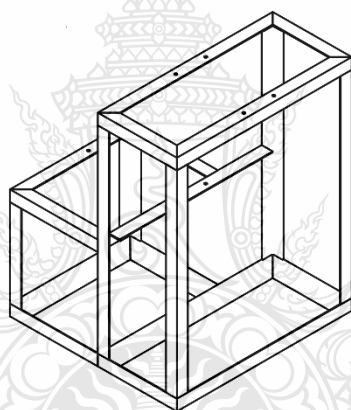


รูปที่ 2.1 เครื่องย่อยทางปาล์มที่ใช้ในการทดสอบ [11]

ส่วนประกอบของเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ จะมุ่งเน้นไปที่การเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด ซึ่งจะต้องมีความแข็งแรงทนทาน และมีความปลอดภัยในการทำงานสูง รวมไปถึงระบบในควบคุมการทำงานทางไฟฟ้าของเครื่องย่อยประกอบด้วย

2.1.1 โครงฐานเครื่อง

โครงฐานเครื่อง เป็นส่วนที่รับภาระน้ำหนักทั้งหมดของเครื่องจักร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีความแข็งแรงมากพอที่จะรับภาระงานที่เกิดจากน้ำหนักทั้งหมดของเครื่อง โดยไม่ทำให้โครงสร้างของเครื่องเสียรูปหรือบิดงอ และต้องสามารถรองรับแรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนในขณะที่เครื่องทำงานด้วยความเร็วรอบสูงสุด โครงฐานเครื่องจะต้องมีน้ำหนักไม่มากเกินไป เพื่อสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย วัสดุที่ใช้ในการสร้าง คือ เหล็กฉากขนาด 50 mm x 50 mm x 5 mm ทำการตัดโดยใช้เครื่องเลื่อยชัก (Power Hack Saw) ให้ได้ขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้ ขนาดของโครงฐานเครื่องย่อยทางปาล์มนี้มีขนาดประมาณ 1000 mm x 800 mm x 4000 mm ใช้วิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในการประกอบโครงฐานเครื่อง เพื่อความสะดวกและรวดเร็วต่อการดำเนินการ ซึ่งจะได้โครงฐานเครื่องดังแสดงในรูปที่ 2.2

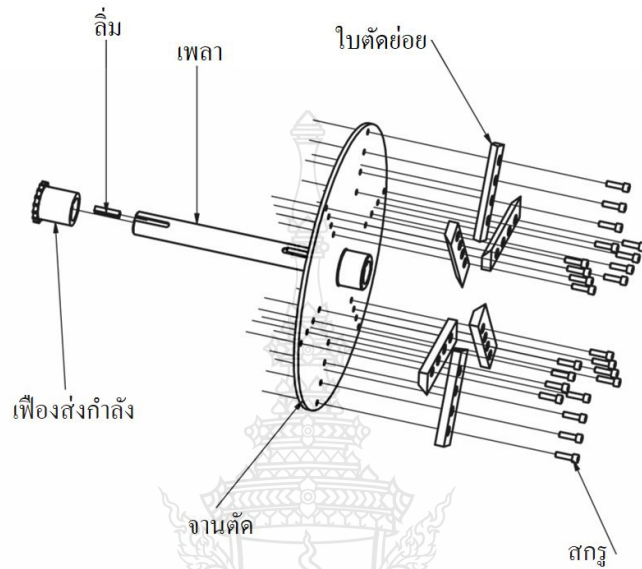


รูปที่ 2.2 โครงฐานเครื่องย่อยทางปาล์ม [11]

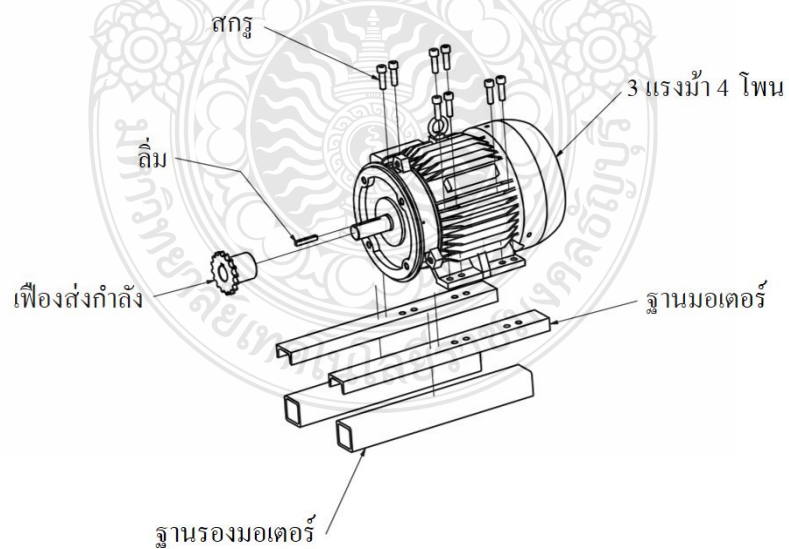
2.1.2 ชุดจานตัดและชุดส่งกำลัง

ชุดจานตัด ประกอบด้วย จานตัด สำหรับติดใบตัดเข้าไปเพื่อทำการตัด โดยการสวมเพลาลูกกลิ้งผ่านจานตัด เพลาจะร้อยผ่านชุดตลับลูกปืนวาย 2 ชุด และทำการติดตั้งเชิงคดให้ขนานกับใบตัด ซึ่งในการการติดตั้งเชิงคดทำให้เกิดช่องว่างน้อยที่สุด เพราะระยะของการตัดย่อยอาจมีผลต่อเศษตัดด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในชุดส่งกำลัง จะประกอบไปด้วย มอเตอร์เกียร์ขนาด 3 แรงม้า 380 V 2200 W ช่วงของการปรับรอบการหมุนของความเร็วรอบที่ 200 - 1000 rpm จำนวน 1 ตัว โซ่ จำนวน 2 เส้น เฟือง จำนวน 2 ตัว เพลาเพื่อทำการทอรอบและลดภาระของโหลดที่กระทำต่อมอเตอร์ โดยเริ่มจากการสวมเฟืองเข้าที่เพลาของจานตัด 1 ชั้น ชุดเพลาที่ทำการถ่ายกำลัง 2 ชั้น และเฟืองที่

มอเตอร์ 1 ชั้น ทำการร้อยโซ่ระหว่างเฟืองทั้งหมดและปรับระยะความตึงของโซ่ให้เหมาะสม และทำการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับความเร็วรอบ (Sensor Count Speed: RPM) 1 ชุด เข้าไปด้านท้ายของเพลลาที่ใช้จับงานตัดเพื่อตรวจสอบความเร็วรอบในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



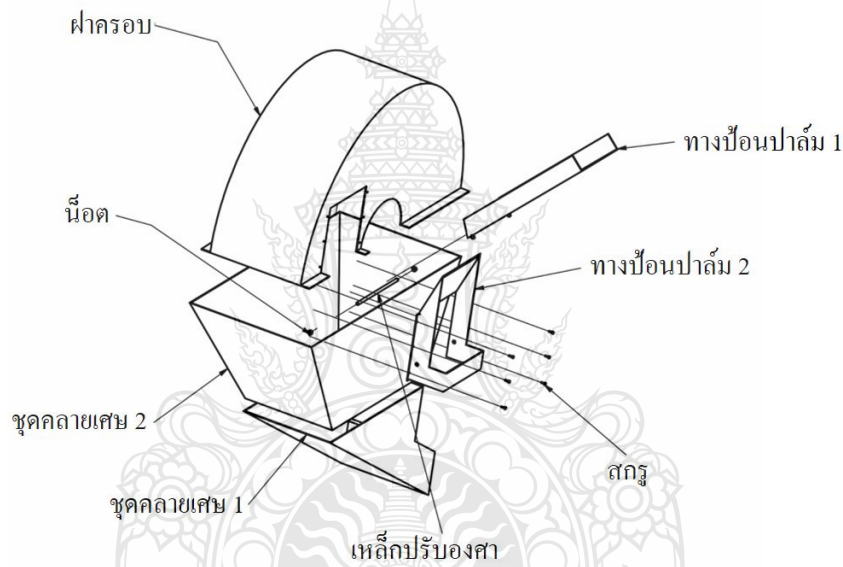
รูปที่ 2.3 การประกอบงานตัดกับเพลลา และการติดตั้งระยะเชิงกับใบตัดย่อย [11]



รูปที่ 2.4 การประกอบเพลลากับชุดส่งกำลัง [11]

2.1.3 ชุดทิ้งเศษปาล์มและฝาครอบเพื่อป้องกันความปลอดภัย

หลังจากที่ทำการเชื่อมแผ่นเหล็กที่ใช้ทำชุดทิ้งเศษปาล์มภายนอกเสร็จแล้ว นำมาเชื่อมประกอบเข้ากับโครงเครื่อง ต่อชุดป้อนทางปาล์มเข้าไปที่บริเวณเชิงตัดจัดแนวทางป้อน ให้ขนานกับเชิงตัดและใส่ฝาครอบเพื่อป้องกันความปลอดภัย (Safety Cover) ด้านบน โดยยึดกับบานพับ 2 ชั้น และในฝาครอบ เพื่อเวลาที่ต้องการเปลี่ยนใบตัดจะได้สะดวกต่อการใช้งาน และเพื่อป้องกันความปลอดภัย (Safety Cover) ได้ทำการติดชุดเซนเซอร์ฝาครอบป้องกันความปลอดภัย (Sensor Safety Cover) เข้าไป เพื่อป้องกันความปลอดภัย (Safety Cover) หากฝาครอบไม่อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด เครื่องก็จะไม่สามารถทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ชุดทิ้งเศษปาล์มและส่วนป้องกันความปลอดภัยของเครื่องย่อยทางปาล์ม [11]

2.1.4 ชุดควบคุม

ในชุดนี้จะประกอบไปด้วยสวิทช์ปุ่มกดเปิด - ปิดตัวเลขแบบดิจิทัลสำหรับบอกความเร็วรอบในการหมุนของจานตัด สวิทช์สี่เหลี่ยมใช้ปรับแรงดันทางไฟฟ้าของมอเตอร์ สวิทช์สี่ขาใช้ปรับกระแสไฟฟ้า โดยผู้ควบคุมนี้จะติดตั้งไว้กับโครงฐานเครื่อง หน้าจอแบบเข็มแสดงการใช้กระแสและแรงดันทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลัง ซึ่งภายในกล่องควบคุมจะประกอบด้วยไฟแสดงสถานะของการทำงานของเครื่องสี่เหลี่ยมเปิด (Start) สีแดงปิด (Stop) ปุ่มเปิด (Start) ปิด (Stop) ปุ่มกดหยุดฉุกเฉิน (Emergency Stop) และไฟแสดงสถานะของการทำงานของเครื่อง ไฟในแถวบนจะ

แสดงสถานะการจ่ายของไฟฟ้า ได้แก่ เฟสสีแดง(Fuse - L1) แสดงสถานะของแหล่งจ่ายของไฟฟ้าสามเฟสสายที่ 1 เฟสสีเหลือง (Fuse - L2) แสดงสถานะของแหล่งจ่ายของไฟฟ้าสามเฟสสายที่ 2 และเฟสสีแดง (Fuse - L3) แสดงสถานะของแหล่งจ่ายของไฟฟ้าสามเฟสสายที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ชุดกล่องควบคุมเครื่องย่อยทางปาล์ม [11]

2.2 ลักษณะพฤกษศาสตร์ของทางปาล์มน้ำมัน [12]

ใบของต้นปาล์มน้ำมันหรือทางใบ (Palm Frond) มีลักษณะเป็น ใบประกอบรูปร่างคล้ายขนนก ดังแสดงในรูปที่ 2.7

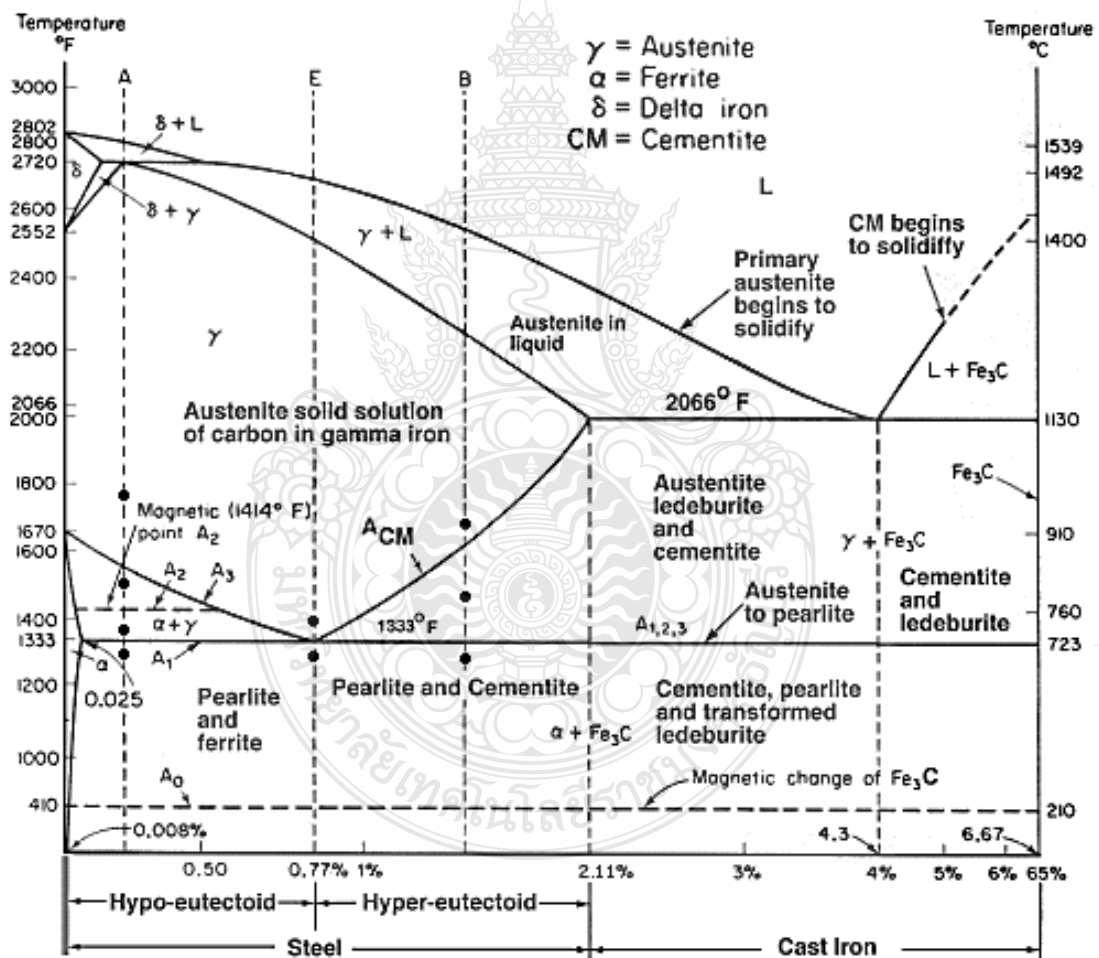


รูปที่ 2.7 ทางใบต้นปาล์มน้ำมัน [12]

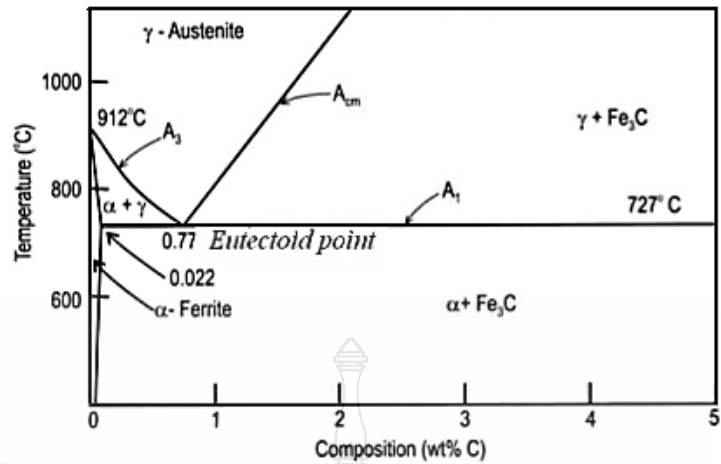
โดยทั่วไปเกษตรกรจะต้องตัดใบล่างที่รองรับทะเลาะปาล์มน้ำมันก่อนการเก็บเกี่ยวทะเลาะปาล์มน้ำมันทุกๆ 15 - 20 วัน เฉลี่ยแล้วทุกเดือนจะมีการตัดทางใบปาล์มน้ำมันออกอย่างน้อย 2 ทางใบ ต่อต้น หรือคิดเป็น 44 ทางใบต่อไร่ (อัตราปลูก 22 ต้นต่อไร่) ในหนึ่งปีเกษตรกรจะตัดทางใบปาล์ม น้ำมันประมาณ 18 ครั้ง โดยหนึ่งทางปาล์มน้ำมันจะมีน้ำหนัก 5 kg คิดคำนวณเป็นน้ำหนักสดของทาง ปาล์มน้ำมัน 3,960 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี [13]

2.3 ทฤษฎีของวัสดุ

2.3.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steels) [14]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 (ก) แผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ (ข) แผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์แสดงปฏิกิริยายูเทคตอย [14]

ในแผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ในรูปที่ 2.8 บอกได้ว่าเหล็กกล้า (Steel) คือ โลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 2.11% ขณะที่เหล็กหล่อ คือ โลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 2.11% ในเหล็กกล้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.77% เหล็กกล้ายูเทคตอยที่มีปริมาณคาร์บอน 0.77% และเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยที่มีปริมาณคาร์บอน 0.77 - 2.11% ในแผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ช่วงของเหล็กกล้านี้มีเส้นอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สำคัญ คือ

- เส้น A_0 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของซีเมนไตท์ จากพาราแมเนติก (Paramagnetic) เป็นเฟอร์โรแมเนติก (Ferromagnetic) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เกิดที่อุณหภูมิประมาณ 210°C

- เส้น A_1 คือ เส้นปฏิกิริยายูเทคตอย จุดตัดระหว่างเส้นปฏิกิริยายูเทคตอย และส่วนผสมยูเทคตอย คือ จุดยูเทคตอย ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.77%
- เส้น A_2 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของเฟอร์ไรท์ จากพาราแมเนติก (Paramagnetic) เป็นเฟอร์โรแมเนติก (Ferromagnetic) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เกิดที่อุณหภูมิประมาณ 760°C

- เส้น A_3 คือ เส้นอุณหภูมิช่วง 727 - 910°C คือ เส้นแสดงการเฟสระหว่างโครงสร้างออสเทนไนต์เป็นเฟอร์ไรต์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

- เส้น A_{cm} คือ เส้นอุณหภูมิช่วง 727 - 1146°C คือ เส้นแสดงการเฟสระหว่างออสเทนไนต์เป็นซีเมนไต์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตาม การแบ่งแยกชนิดของเหล็ก โดยใช้แผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์นั้น เป็นการแบ่งแยกโดยการยึดเอาโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก ซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างลำบากสำหรับวิศวกรในการนำไปใช้งานจริง ด้วยเหตุนี้สมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American Iron and Steel Institute: AISI) และ สมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งอเมริกา (American Society of Mechanical Engineering: ASME) จึงได้คิดค้นระบบในการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าในการนำไปใช้งาน โดยการกำหนดตัวเลขขึ้นมาใช้ในการเรียก 4 ตัว ให้ตัวเลขสองตัวแรกหมายถึงธาตุผสมหลักในเหล็กกล้า นั้น ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้ายหมายถึงปริมาณคาร์บอนในเหล็ก เช่น ตัวอย่าง เหล็กกล้า AISI4140 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.4% (ตัวเลข 40) เหล็กกล้า SAE10120 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.2% (ตัวเลข 120) เป็นต้น ตัวอย่างของเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1

นอกจากนั้น เหล็กกล้าสามารถแบ่งกลุ่มได้ตามส่วนผสมทางเคมี หรือรูปแบบการผลิตเหล็กกล้านั้น ๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้ เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลักมีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 2% และประกอบไปด้วยซิลิกอนไม่เกิน 0.6% และแมงกานีสไม่เกิน 1.65% หรือเหล็กกล้าดีคาบูไรซ์ (Decarburized Steel) ที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.05% เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษ (Ultra Low Carbon Steel) คือ เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณไม่เกิน 0.03% และซิลิกอนและแมงกานีสเล็กน้อย เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) คือ เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณ 0.04 - 0.15% เป็นวัสดุในการทำตัวถังและ โครงสร้างรถยนต์และการใช้งานอื่น ๆ มากมาย

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME [14]

AISI - SAE Number	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	Others
1020	0.18-0.23	0.30-0.50				
1040	0.37-0.44	0.60-0.90				
1060	0.55-0.65	0.60-0.90				
1080	0.75-0.88	0.60-0.90				
1095	0.90-1.03	0.30-0.50				
1140	0.37-0.44	0.70-1.00				0.08-0.13% S
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15-0.25% Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30% Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30% Mo
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30		1.30-1.60	
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25% Y
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20			

2.3.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy Steels)

เหล็กกล้าผสม คือ เหล็กกล้าที่ผสมธาตุหลักอื่น ๆ เข้ามาเพิ่มนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ในตารางที่ 2.2 เหล็กกล้าที่ตัวเลขขึ้นต้นด้วยเลข 4 ถึง 9 มีธาตุผสมหลักอื่น ๆ เช่น ซิลิกอน นิกเกิล หรือโครเมียมเพิ่มเข้ามา เพื่อปรับปรุงสมบัติตามต้องการ ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้ายเป็นตัวแสดงปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าผสมดังแสดงในเหล็กกล้าคาร์บอน

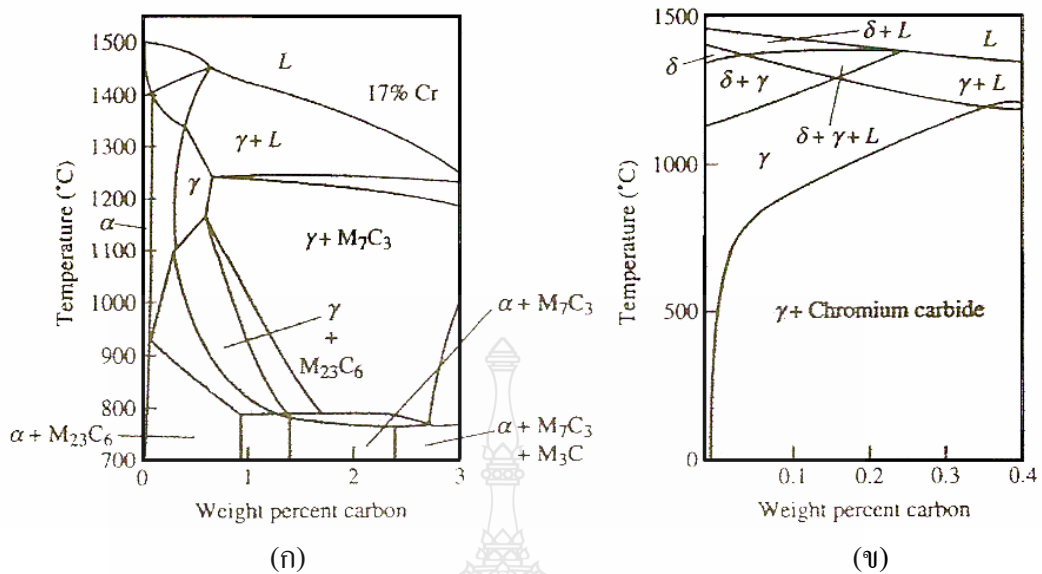
ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051 [15]

สัญลักษณ์	องค์ประกอบทางเคมี (%wt)				
	C	Si	Mn	P	S
S10C	0.08-0.13	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S12C	0.10-0.15	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S15C	0.13-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S17C	0.15-0.20	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.

สัญลักษณ์	องค์ประกอบทางเคมี (%wt)				
	C	Si	Mn	P	S
S20C	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S22C	0.20-0.25	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S25C	0.22-0.28	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S28C	0.25-0.31	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S30C	0.27-0.33	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S33C	0.30-0.36	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S35C	0.32-0.38	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S38C	0.35-0.41	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S40C	0.37-0.43	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S43C	0.40-0.46	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S48C	0.45-0.51	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S50C	0.47-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S53C	0.50-0.56	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S55C	0.52-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S58C	0.55-0.61	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 09C K	0.07-0.12	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 15C K	0.13-0.18	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 20C K	0.18-0.23	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.

2.3.3 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) [14]

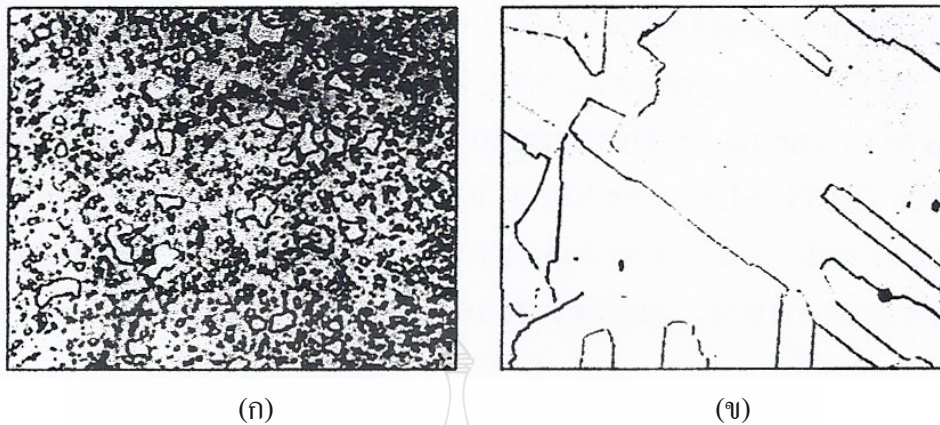
เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กกล้าที่มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนอย่างดีเยี่ยม มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ไม่ต่ำกว่า 11% โครเมียมนี้ทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์บาง ๆ ปกคลุมอยู่เหนือผิวชิ้นงาน นอกจากนั้นโครเมียมทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เฟอร์ไรท์เสถียร (Ferrite Stabilizing Element) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) โครเมียมทำให้พื้นที่ออสเทนไนต์ของแผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ลดขนาดลง และทำให้พื้นที่เฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.9 (ก) ผลของโครเมียม 17% ต่อแผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ ที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ เฟอร์ไรต์มีความเสถียรทุกช่วงอุณหภูมิ (ข) ส่วนของแผนภาพสมดุลเหล็ก โครเมียม นิกเกิล คาร์บอน ที่โครเมียม 18% และนิกเกิล 8% ที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ออสเทนไนต์มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง [14]

2.3.3.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) มีปริมาณโครเมียมสูงสุดไม่เกิน 30% และมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.12% เนื่องจากว่าเป็นโครงสร้าง BBC เหล็กกล้าชนิดนี้จึงมีความแข็งแรงและความเหนียวที่ดี มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก ไม่สามารถทำการอบชุบได้ มีความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม ความสามารถในการขึ้นรูปปานกลาง ราคาไม่แพง

2.3.3.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติก (Martensitic Stainless Steels) จากรูปที่ 2.9 (ก) พบว่า หากทำการให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของโครเมียม 17% และคาร์บอน 0.5% ที่อุณหภูมิ 1200°C เหล็กกล้าจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ 100% หากทำการจุ่มชุบในน้ำมัน เหล็กกล้าไร้สนิมจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ได้ เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการชุบแข็งแล้ว หากนำไปทำการอบคืนไฟจะทำให้ได้ค่าความแข็งและความแข็งแรงที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) หากปริมาณคาร์บอนมีค่าต่ำกว่า 17% จะทำให้พื้นที่ของออสเทนไนต์ค่อนข้างเล็ก ปริมาณโครเมียมที่ต่ำทำให้ปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 0.03 - 1.0% ทำให้ได้มาร์เทนไซต์ที่มีค่าความแข็งที่แตกต่างไปตามปริมาณการผสม เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติกใช้สำหรับทำใบมีดคุณภาพสูง ตลับลูกปืน และวาล์วต่าง ๆ



รูปที่ 2.10 (ก) เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิดิกที่ประกอบด้วยคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการอบคืนไฟ ภาพกำลังขยาย 350 เท่า (ข) เหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนเนติก ภาพกำลังขยาย 500 เท่า [14]

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม [14]

Steel	%C	%Cr	%Ni	Others	Tensile Strangth (psi)	Yield Strangth (psi)	%Elongation	Condition
Austenitic:								
201	0.15	17	5	6.5%Mn	95,000	45,000	40	Annealed
304	0.08	19	10		75,000	30,000	30	Annealed
					185,000	140,000	9	C-worked
304L	0.03	19	10		75,000	30,000	30	Annealed
316	0.08	17	12	2.5%Mo	75,000	30,000	300	Annealed
321	0.08	18	10	0.4%Ti	85,000	35,000	55	Annealed
347	0.08	18	11	0.8%Nb	90,000	35,000	50	Annealed
Ferritic:								
430	0.12	17			65,000	30,000	22	Annealed
442	0.12	20			75,000	40,000	20	Annealed

Steel	%C	%Cr	%Ni	Others	Tensile Strangth (psi)	Yield Strangth (psi)	%Elongation	Condition
Martensitic:								
416	0.15	13		0.6%Mo	180,000	140,000	18	Quenched & Temperd
431	0.20	16	2		200,000	150,000	16	Quenched & Temperd
440C	1.10	17		0.7%Mo	285,000	275,000	2	Quenched & Temperd
Precipitation hardening:								
17-4	0.07	17	4	0.4%Nb	190,000	170,000	10	A-hardened
17-7	0.09	17	7	1.0%Al	240,000	230,000	6	A-hardened

2.3.3.3 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steels) ชาติ
 นิกเกิลที่เติมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเป็นธาตุที่ทำให้ออสเทนไนต์มีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น
 พื้นที่ของออสเทนไนต์ในแผนภาพสมดุลเหล็ก - โครเมียม - คาร์บอนเพิ่มขึ้น และทำให้พื้นที่ของ
 เฟอไรต์เกือบหายไปจากแผนภาพสมดุลเหล็ก - โครเมียม - คาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) หาก
 ปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.03% คาร์ไบต์จะไม่ก่อตัวขึ้น ทำให้ที่อุณหภูมิห้องนั้น โครงสร้างของ
 เหล็กกล้าไร้สนิมประกอบไปด้วยออสเทนไนต์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม
 ออสเทนนิติก ที่มีโครงสร้าง FCC มีความสามารถในการยืดตัวเนื่องจากแรงดึง ความสามารถในการ
 ขึ้นรูปและความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม ความแข็งแรงของเหล็กกล้าชนิดนี้ได้มาจากการเพิ่ม
 ความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง และเมื่อนำไปทำการขึ้นรูปเย็นจะทำให้ได้ความแข็งแรงสูงกว่า
 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก แต่
 เนื่องจากการผสมโครเมียมและนิกเกิลซึ่งเป็นธาตุที่มีราคาแพงลงไป ดังนั้นราคาของเหล็กกล้าไร้
 สนิมชนิดนี้จึงมีราคาแพง เกรดที่นิยมใช้กันสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก คือ เกรด 304 ซึ่งมี
 ปริมาณโครเมียม 18% และนิกเกิล 8% บางครั้งเรียกว่าเกรด 18 - 8 ตามปริมาณของธาตุผสมทั้งสอง
 ปัญหาการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก คือ การเกิดเซนซิไทเซชัน (Sensitization) คือ
 เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกไปใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 480 - 860°C โครเมียมคาร์ไบด์จะ

ก่อตัวและตกผลึกมาที่ขอบเกรน ทำให้ปริมาณในส่วนของโครเมียมในเกรนมีปริมาณลดลงและทำให้ความต้านทานการสึกกร่อนลดลง ดังนั้นจึงควรระมัดระวังในการใช้งาน

2.3.3.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งเพื่อเกิดการตกผลึก (Precipitation Hardening Stainless Steel) มีธาตุผสมประกอบไปด้วยลูมิเนียม นีโอเบียม หรือแทนทาลัม ผลิตได้โดยการให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าให้เปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์แล้วชุบให้เกิดมาร์เทนไซต์ จากนั้นให้ความร้อนอีกครั้งเพื่อให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบ เช่น Ni_3Al จากมาร์เทนไซต์ ลักษณะการเกิดแบบนี้ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความแข็งแรงสูง

2.3.4 เหล็กกล้าเครื่องมือ [14]

เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีจุดมุ่งหมายหลัก เพื่อใช้เป็นวัสดุในการตัดโลหะด้วยความเร็วสูง เช่น ใบเลื่อย (Saw) ใบตัด (Milling Cutters) เป็นต้น สมบัติสำคัญของเหล็กกล้ากลุ่มนี้คือความสามารถในการรักษาความแข็งของคมตัดที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติไว้ได้ (ความแข็งของคมตัดยังคงสภาพเดิม แม้จะเกิดความร้อนจนร้อนจัดเป็นสีแดง) ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนจะรักษาความแข็งไว้ไม่ได้ เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีการใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.3.4.1 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีทั้งสแตนเป็นส่วนผสมหลัก ปริมาณทั้งสแตนที่สูงมาก (12 - 20%) จะเพิ่มสมบัติความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ปริมาณคาร์บอนกับธาตุผสมที่สูง มีผลทำให้ความสามารถในการชุบแข็งสูงและมีปริมาณคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง (ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งจะมีผลทำให้ต้านทานการสึกหรอดีเยี่ยม นอกจากนี้ส่วนผสมของวานาเดียมซึ่งฟอร์มตัวเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูงและกระจายตัว จะช่วยป้องกันการขยายตัวของเกรนได้ในช่วงที่อุณหภูมิสูง และทำให้เกรนมีความละเอียดซึ่งส่งผลถึงความเหนียวของเหล็กด้วย เกรดที่นิยมใช้งาน คือ T1

2.3.4.2 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมหลัก เป็นกลุ่มที่มีสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีทั้งสแตนเป็นส่วนผสมหลัก เนื่องจากโมลิบดีนัมส่งผลให้สมบัติคล้ายคลึงกับการผสมทั้งสแตน โดยพบว่าสมบัติที่สำคัญ เช่น ความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง การทนต่อการเสียดสี หรือความเหนียวจะใกล้เคียงกัน โดยโมลิบดีนัม 1% จะแทนทั้งสแตนประมาณ 1.6 - 2.0% สำหรับข้อแตกต่างมีเพียงเล็กน้อย คือ กลุ่มที่ผสมโมลิบดีนัมจะต้องระวังการสูญเสียคาร์บอนในการอบชุบ เนื่องจากทั้งสแตนมีราคาสูงกว่าโมลิบดีนัมมาก ปัจจุบันการใช้งานส่วนใหญ่จึงนิยมกลุ่มที่ผสมโมลิบดีนัมมากกว่า เกรดที่นิยมใช้งาน เช่น M2 M4 และ M42

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเติมธาตุโคบอลต์มากกว่า 10% เพื่อให้ได้สมบัติความสามารถรักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า 2 กลุ่มแรก ทำให้ได้เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงประเภทซูเปอร์ (Super High - Speed Tool Steels) แต่สิ่งที่ต้องระวัง คือ การสูญเสียคาร์บอนในระหว่างการอบชุบ และการสั่นและกระแทกแรง ๆ เนื่องจากเป็นเกรดที่เปราะมาก

2.3.5 มาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรมระบบญี่ปุ่น JIS (Japaness Industrial Standards) [16]

การจำแนกประเภทของเหล็กตามมาตรฐานญี่ปุ่น จัดวางระบบโดยสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japaness Industrial Standards, JIS) ซึ่งถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในแถบทวีปเอเชีย รวมถึงยังถูกใช้เป็นระบบมาตรฐานพื้นฐานจากชาติอื่น ๆ อีกด้วย ยกตัวอย่าง เช่น เกาหลี จีน และไต้หวัน

ประเภทของเหล็กตามมาตรฐานญี่ปุ่น สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของการใช้งาน โดยตัวอักษรชุดแรกจะมีคำว่า JIS หมายถึง Japaness Industrial Standards และตัวอักษรสัญลักษณ์ตัวถัดมาจะมีได้หลายตัว ซึ่งในแต่ละตัวอักษรจะหมายถึงการจัดกลุ่มในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่าง ๆ ยกตัวอย่าง เช่น

A	งานวิศวกรรมก่อสร้างและงานสถาปัตยกรรม
B	งานวิศวกรรมเครื่องกล
C	งานวิศวกรรมไฟฟ้า
D	งานวิศวกรรมรถยนต์
E	งานวิศวกรรมรถไฟ
F	งานก่อสร้างเรือ
G	โลหะประเภทเหล็กและโลหะวิทยา
H	โลหะที่มีโซ่เหล็ก
K	งานวิศวกรรมเคมี
L	งานวิศวกรรมสิ่งทอ
M	แร่
P	กระดาษและเยื่อกระดาษ
R	เซรามิค
S	สินค้าที่ใช้ภายในบ้าน
T	ยา
W	การบิน

ตัวเลขที่อยู่ถัดจากตัวอักษร ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 4 ตัว มีความหมายดังนี้ ตัวเลขตัวแรก หมายถึง กลุ่มประเภทของเหล็ก ยกตัวอย่าง เช่น

0	เรื่องทั่ว ๆ ไป การทดสอบและกฎต่าง ๆ
1	วิธีวิเคราะห์
2	วัตถุคืบ เหล็กคืบ ธาตุผสม
3	เหล็กคาร์บอน
4	เหล็กกล้าผสม

ตัวเลขตัวที่ 2 หมายถึง ประเภทของวัสดุในกลุ่มนั้น เช่น ถ้าเป็นในกรณีเหล็ก จะมีประเภทของวัสดุ ดังนี้

1	เหล็กกล้าผสมนิกเกิลและโครเมียม
2	เหล็กกล้าผสมอลูมิเนียมและโครเมียม
3	เหล็กไร้สนิม
4	เหล็กเครื่องมือ
8	เหล็กสปริง
9	เหล็กกล้าทนการกัดกร่อนและความร้อน

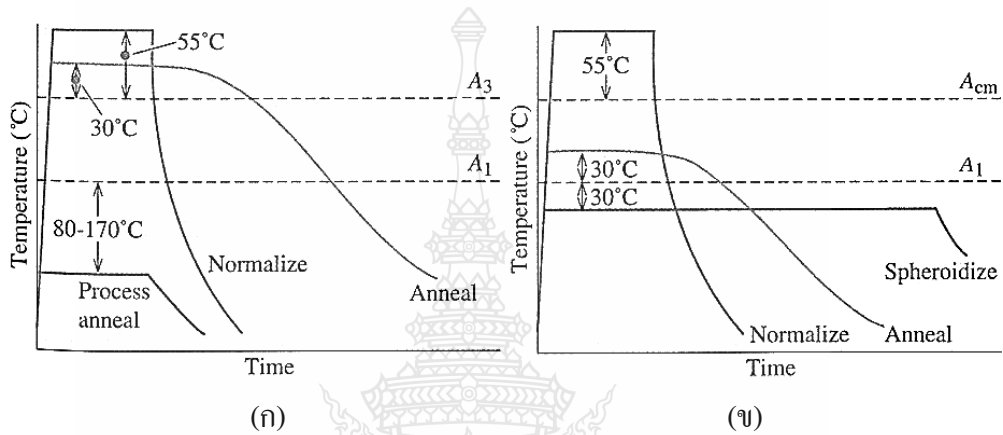
ตัวเลขที่เหลือ 2 หลักสุดท้าย หมายถึง ตัวแยกประเภทของส่วนผสมทางเคมีที่มีอยู่ในวัสดุนั้น ๆ เช่น ในเหล็ก ตัวเลข 2 หลักสุดท้ายจะเป็นตัวแยกประเภทของเหล็กตามส่วนผสมทางเคมีของธาตุที่มีอยู่ในเหล็กประเภทนั้น ๆ ยกตัวอย่าง เช่น

01	เหล็กเครื่องมือคาร์บอน
03	เหล็กไฮสปีด
04	เหล็กเครื่องมือผสม

2.4 ทฤษฎีการอบชุบ [14]

กระบวนการอบชุบเหล็กกล้า แสดงไว้ดังรูปที่ 2.11 ประกอบไปด้วยการอบอ่อนเพื่อคลายความเครียดจากการขึ้นรูป (Process Annealing) การอบอ่อน (Annealing) การอบให้เกรนสม่ำเสมอ (Normalizing) และการอบให้เกรนมีความกลมมน (Spheroidizing) กระบวนการเหล่านี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการคลายความเครียด ควบคุมและปรับการกระจายตัวของเฟส เพื่อให้สมบัติทางกลของเหล็กกล้าเปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

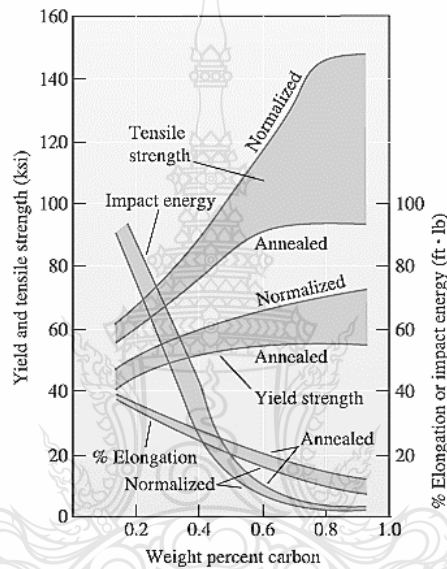
2.4.1 การอบอ่อนเพื่อคลายความเครียดจากการขึ้นรูป (Process Annealing) คือ การอบชุบเพื่อให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Heat Treatment) ในโครงสร้างเดิมของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.25% เพื่อกำจัดความเครียดที่เกิดจากการขึ้นรูปต่าง ๆ เช่น การรีดเย็น โดยทำการอบเหล็กกล้าไปที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นอุณหภูมิ A_1 ประมาณ 80 - 170°C อบแช่ที่ระยะเวลาที่กำหนดและปล่อยให้เย็นตัวในเตา



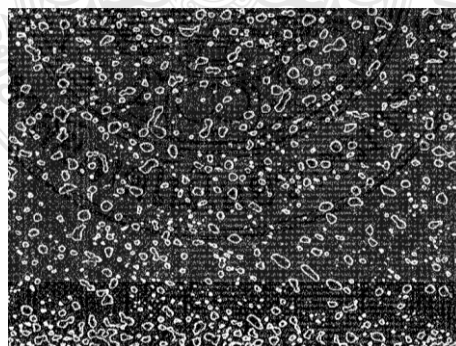
รูปที่ 2.11 แผนภาพการอบชุบ (ก) เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอย (ข) เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอย [14]

2.4.2 การอบอ่อน (Annealing) และการอบให้เกรนสม่ำเสมอ (Normalizing) มีขั้นตอน คือ นำเหล็กกล้าไปทำการอบให้ความร้อนเพื่อทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ (Austenizing) ทั้งหมด จากนั้นหากต้องการทำการอบอ่อนทำได้โดยการปล่อยให้เหล็กที่อบเป็นออสเทนไนต์แล้วเย็นตัวอย่างช้า ๆ ในเตา ผลของการเย็นตัวช้า ๆ ในเตานี้ ทำให้เฟลโลที่ที่ได้มีความหยาบหรือขนาดโต และส่งผลทำให้ง่ายต่อการนำไปขึ้นรูปทางกลต่อไป หรือถ้าต้องการอบให้เกรนสม่ำเสมอทำได้โดยนำเหล็กที่อบเป็นออสเทนไนต์มาทำให้เย็นตัวในอากาศนอกเตา อัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าจะทำให้เฟลโลที่มีความละเอียดและส่งผลทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนแตกต่างกันที่ผ่านการอบอ่อนและการอบให้เกรนสม่ำเสมอ แสดงไว้ในรูปที่ 8 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบอ่อน คือ อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_3 ประมาณ 30°C สำหรับการทำให้เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด แต่สำหรับเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอย อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเปลี่ยนเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมดอยู่ที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_1 ประมาณ 30°C เนื่องจากอุณหภูมินี้ป้องกันการเกิดการก่อตัวของซิเมนไตท์ที่มีความยาวต่อเนื่องและเปราะที่ขอบเกรนของเฟลโล ซึ่งโดยปกติเป็นเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อมี

การเย็นตัวอย่างช้า ในเตาหรือปล่อยให้เย็นในเตาจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาสู่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงต่ำ ยืดตัวได้ดี และง่ายต่อการนำไปขึ้นรูปทางกลต่อไป ขณะที่ในการอบให้เกรนสม่ำเสมอ อุณหภูมิทำให้เกิดออสเทนไนท์ทั้งหมดของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยอยู่ที่ประมาณ 55°C สูงกว่าเส้น A_3 และ A_{cm} ตามลำดับ ในการเย็นตัวของชิ้นงาน เหล็กกล้าถูกนำออกมาจากเตา และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ อัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าทำให้ได้เฟิลไลต์ที่มีความละเอียดและมีความแข็งแรงที่สูงกว่า

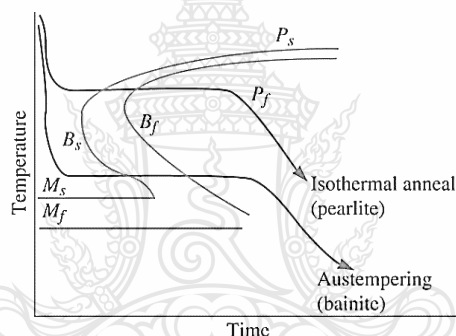


รูปที่ 2.12 อิทธิพลของคาร์บอนและการอบชุบต่อสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน [14]



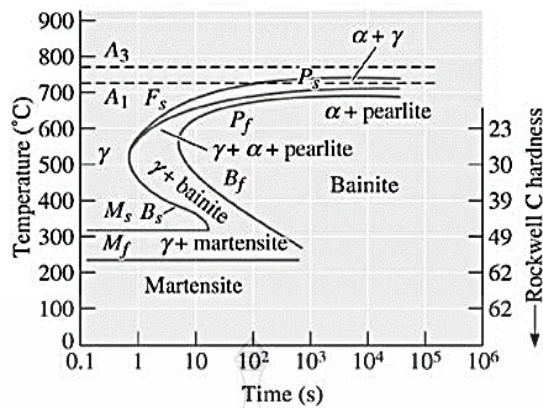
รูปที่ 2.13 โครงสร้างซีเมนไตท์กลมมนในพื้นที่เหล็กเฟอร์ไรท์ กำลังขยาย 850 เท่า [14]

2.4.3 การอบให้เกรนมีความกลมมน (Spheroidizing) เป็นการเพิ่มความสามารถในการแปรรูปทางกล (Machineability) เช่น การกลึง กัด ตัด ไส หรือขึ้นรูปของเหล็กกล้า เหล็กกล้าที่มีปริมาณเฟสของซีเมนไตต์สูงจะมีความสามารถในการแปรรูปต่ำ เนื่องจากโดยทั่วไปเฟสซีเมนไตต์เป็นเฟสที่มีการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างที่ไม่กลม ไม่สมมาตร และส่งผลทำให้มีความแข็งแรงสูง หากเฟสซีเมนไตต์นี้มีความกลมมนเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการแปรรูปของเหล็กกล้าเพิ่มขึ้น การทำให้เฟสที่กระจายตัวในเหล็กกล้ามีความกลมมนเพิ่มมากขึ้นทำได้โดยการอบให้ความร้อนขึ้นงานไปที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_1 ประมาณ 30°C ในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานเพียงพอ ทำให้ซีเมนไตต์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสให้มีความกลมมนเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างเฟสที่มีความกลมมนที่ได้นี้เรียกว่า “สเฟียรอยด์ (Spheroidite)” ความกลมมนของเฟสซีเมนไตต์ทำให้พื้นผิวของเหล็กกล้ามีความต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และส่งผลทำให้ง่ายในการแปรรูป

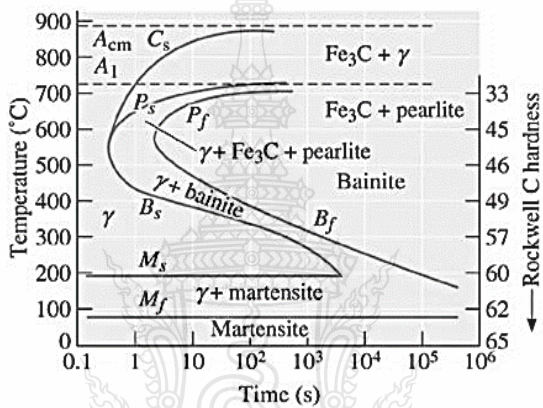


รูปที่ 2.14 การทำออสเทมเปอร์ริงและการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ในเหล็กกล้า 1080 [14]

2.4.4 การอบออสเทมเปอร์ริงหรือการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ (Austempering or Isothermal Annealing) คือการอบชุบเพื่อให้ได้โครงสร้างเบนไนท์ ทำได้โดยการอบเหล็กกล้าให้เปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด จากนั้นทำให้เหล็กกล้าเย็นตัวที่อัตราการเย็นตัวที่อัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าจุกของแผนภูมิ TTT ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จุ่มแช่ที่อุณหภูมินั้น เพื่อให้ออสเทนไนท์เกิดการเปลี่ยนแปลงผ่านเส้นเริ่มต้นเปลี่ยนเป็นเบนไนท์จนกระทั่งถึงเส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงเป็นเบนไนท์ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวสู่อุณหภูมิห้องขณะที่การอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ทำได้โดยการอบเหล็กกล้าให้เปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด และปล่อยให้เหล็กกล้าเย็นตัวที่อัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าจุกของแผนภูมิ TTT ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จุ่มแช่ที่อุณหภูมินั้นจนกระทั่งออสเทนไนท์สิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่เส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟลไลต์ ทำให้ได้โครงสร้างเฟลไลต์ที่มีขนาดใหญ่ หยิบและกลมมน มีสมบัติที่สม่ำเสมอมากขึ้น



(ก)

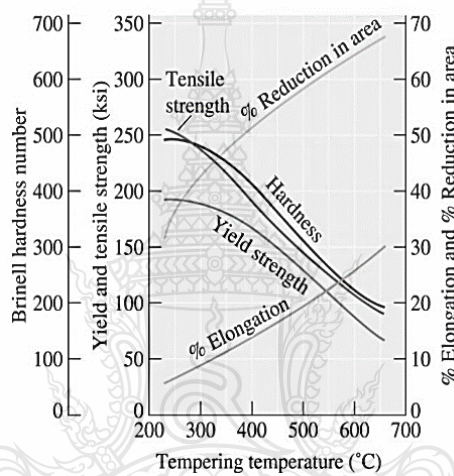


(ข)

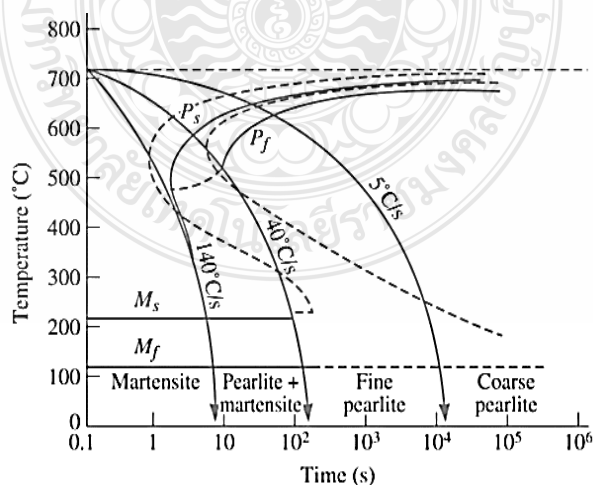
รูปที่ 2.15 แผนภูมิ TTT ของ (ก) เหล็กกล้า 1050 และ (ข) เหล็กกล้า 10110 (γ หมายถึง ออสเทนไนต์ที่ไม่เสถียรและพร้อมในกรเปลี่ยนแปลง) [14]

2.4.5 อิทธิพลของการรับต่อแผนภาพ TTT (Effect of Changes in Carbon Concentration on the TTT Diagram) รูปที่ 2.15 แสดงแผนภูมิ TTT ของเหล็กกล้า 1050 และเหล็กกล้า 10110 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำและสูงตามลำดับ ที่บริเวณอุณหภูมิสูงกว่าจุดของแผนภูมิ TTT มีเส้นการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น คือเส้น F_s และ C_s สำหรับเหล็กกล้า 1050 และเหล็กกล้า 10110 ตามลำดับ ใน 1050 เส้น F_s เป็นตัวบอกให้ทราบว่าหากเหล็กกล้า 1050 มีอัตราการเย็นตัวที่ช้าและลากผ่านเส้นนี้ เฟอไรต์จะก่อตัวขึ้นและเติบโตเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น เฟอไรต์ที่ก่อตัวนี้จะสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่เส้น P_s พื้นที่ระหว่างเส้น F_s และ P_s นี้จึงประกอบไปด้วยเฟอไรต์และออสเทนไนต์ เมื่อเหล็กกล้า 1050 เย็นตัวต่อผ่านไปที่เส้น P_s ออสเทนไนต์ที่หลงเหลืออยู่ก็จะเกิดการแตกตัวเป็นฟิลไลต์ต่อไป โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 1050 ที่เย็นตัวผ่านเส้น F_s , P_s และ P_f จึง

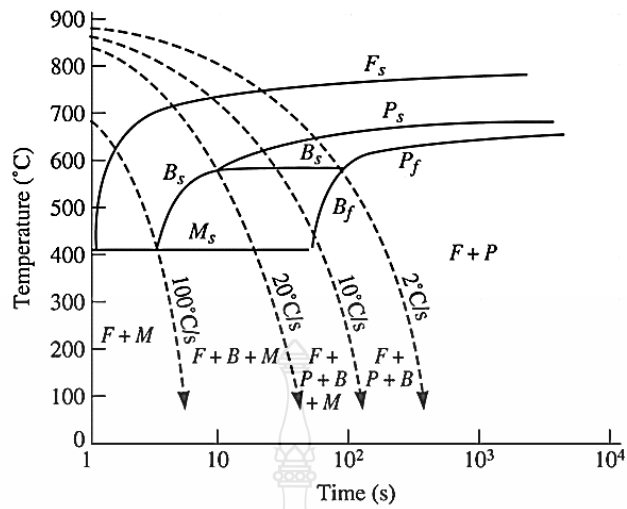
ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรท์และเฟอไรต์เช่นเดียวกับในเหล็กกล้า 10110 เส้น C_s คือเส้นที่ซีเมนไตท์ก่อตัวขึ้นและเติบโตเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซีเมนไตท์ที่ก่อตัวขึ้นนี้จะสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่เส้น P_s พื้นที่ระหว่างเส้น C_s และ P_s นี้จึงประกอบไปด้วยซีเมนไตท์และออสเทนไนท์ เมื่อเหล็กกล้าเย็นตัวต่อไปผ่านเส้น P_s ออสเทนไนท์ที่หลงเหลืออยู่ก็จะเกิดการแตกตัวเป็นเฟอไรต์ โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายจึงประกอบไปด้วยซีเมนไตท์และเฟอไรต์ ถ้าจุ่มชุบเหล็กกล้าที่อุณหภูมิต่ำกว่ามุมของแผนภูมิ TTT โครงสร้างที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้าทั้งสอง คือ เบนไนท์ และหากทำให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเส้น M_s โครงสร้างที่เกิดขึ้น คือ มาร์เทนไซต์



รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิการอบคืนไฟต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้า 1050 [14]



รูปที่ 2.17 แผนภูมิ CCT (เส้นทึบ) ของเหล็กกล้า 1080 เปรียบเทียบกับแผนภูมิ TTT (เส้นประ) [14]



รูปที่ 2.18 แผนภูมิ CCT ของเหล็กกล้าผสมคาร์บอน 0.2% C [14]

การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิคงที่แบบไม่ต่อเนื่อง (Effect of Changes in Carbon Concentration on the TTT Diagram) การอบชุบที่ทำให้อุณหภูมิไม่คงที่ทำได้โครงสร้างของเหล็กกล้าที่ซับซ้อน เช่น ตัวอย่างการอบชุบเหล็กกล้า 1050 ในรูปที่ 2.15 ที่ทำให้การอบให้ความร้อนแก่เหล็กที่อุณหภูมิ 800°C และจุ่มชุบมาที่อุณหภูมิ 650°C แช่ที่อุณหภูมินี้ 10 วินาที เพื่อให้เฟอร์ไรต์และเพิลไรท์ก่อตัวขึ้น หลังจากนั้นจุ่มชุบมาที่อุณหภูมิ 350°C จุ่มแช่ที่อุณหภูมินี้ 1 ชั่วโมง หรือ 3600 วินาที ด้วยวิธีการนี้ออสเทนไนท์ที่หลงเหลือก่อนการลดอุณหภูมิมาที่ 350°C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเบนไนท์ โครงสร้างสุดท้ายจึงประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ เพิลไลต์ และเบนไนท์ หรือหากต้องการทำให้เกิดมาร์เทนไซต์ก็สามารถทำได้โดยการจุ่มแช่ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นจุ่มชุบลงมาที่อุณหภูมิลดลงซึ่งจะทำให้โครงสร้างสุดท้ายประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ เพิลไลต์ และมาร์เทนไซต์

2.4.6 การชุบแข็งและการอบคืนไฟ (Quench and Temper Heat Treatment) การชุบแข็ง คือ การทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งเพิ่มขึ้น ขณะที่การอบคืนไฟ คือ การอบชุบเพื่อให้เหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งมีความเหนียว (Toughness) เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างของการชุบแข็งและการอบคืนไฟพบได้ในการทำเหล็กกล้าดามัสกัส (Damascus Steel) และการทำดาบซามูไร ซึ่งโครงสร้างหลังจากการอบชุบประกอบไปด้วยซีเมนไตท์ที่มีความเล็กละเอียดกระจายอยู่ในพื้นหลักเฟอร์ไรต์ (หรือเทมเปอร์มาร์เทนไซต์) โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้จากการอบชุบเมื่อทำการอบคืนไฟ จะทำให้ของผสม

ระหว่าง ซีเมนไตท์และเฟอร์ไรท์ก่อตัวขึ้นในมาร์เทนไซต์ และทำให้ความแข็งขึ้นงานลดลงแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 2.16

แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cooling Transformation: CCT) เป็นตัวบอกอัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าจากอุณหภูมิสูงสู่อุณหภูมิต่ำ เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคตามต้องการ เช่น กราฟ CCT ของเหล็กกล้า 1080 ในรูปที่ 2.17 ที่แสดงอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ถ้าเหล็กกล้า 1080 เย็นตัวด้วยอัตรา 5°C/s เหล็กกล้าจะเย็นตัวผ่านเส้น P_s และ P_f โครงสร้างสุดท้ายจะประกอบไปด้วยเฟลไลต์ที่มีความโตหยาบ (Coarse Pearlite) คล้ายการอบอ่อน หากเหล็กกล้า 1080 เย็นตัวด้วยอัตรา 40°C/s เหล็กกล้าจะเย็นตัวผ่านเส้น P_s และ P_f โครงสร้างสุดท้ายจะประกอบไปด้วยเฟลไลต์ที่มีความละเอียด (Fine Pearlite) และมีออสเทนไนต์บางส่วนที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง หากออสเทนไนต์นี้เย็นตัวที่อัตราเดิม ออสเทนไนต์จะเกิดการเย็นตัวผ่านเส้น M_s และ M_f และเกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ต่อไปที่อุณหภูมิห้อง หรือเหล็กกล้าเย็นตัวที่อัตราที่มากกว่า 140°C/s ซึ่งเร็วกว่าจุมุกของแผนภาพ TTT และลากตัดผ่านเส้น M_s และ M_f ออสเทนไนต์จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์โดยสมบูรณ์

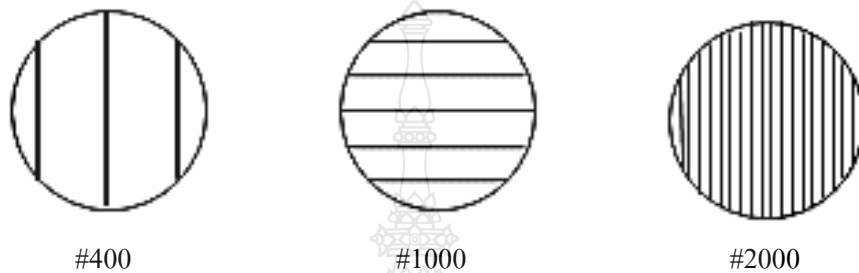
รูปที่ 2.18 แสดงแผนภูมิ CCT ของเหล็กกล้าผสมคาร์บอนประมาณ 0.2% ที่แสดงอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันและโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้ พิจารณาแผนภูมิ หากแผนภูมิ CCT ลากผ่านเส้นเริ่มต้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใด ๆ โครงสร้างนั้นจะก่อตัวขึ้น เช่น ที่อัตราการเย็นตัว 2°C/s จากอุณหภูมิประมาณ 880°C (เส้นประขามือ) การเย็นตัวของเหล็กกล้าเริ่มจากการเย็นตัวลากผ่านเส้นเริ่มเกิดเฟอร์ไรท์ (F_s) ผ่านเส้นการเกิดเฟลไลต์ (P_s) ผ่านเส้นการสิ้นสุดเฟลไลต์ (P_f) และสุดท้ายผ่านเส้นสิ้นสุดการเกิดเบนไนต์ (B_p) ทำให้ได้โครงสร้างสุดท้ายคือ เฟอร์ไรท์ เฟลไลต์ และเบนไนต์ เช่นเดียวกับการเกิดการเย็นตัวที่อัตรา 10 20 หรือ 100°C/s ที่ต้องพิจารณาว่าเส้นการเย็นตัวลากผ่านเส้นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ จะทำให้โครงสร้างนั้นก่อตัวขึ้นในเหล็กกล้า

2.5 ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

2.5.1 การเตรียมผิวชิ้นงาน เพื่อการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา [17] ประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

2.5.1.1 กระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน จะจัดผิวชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระดาษทราย (SiO_2) โดยเรียงลำดับตั้งแต่ระดับความหยาบไปจนถึงละเอียด ในระหว่างกระบวนการจัดจะต้องมีน้ำไหลผ่านบนกระดาษขัดตลอดเวลา เพื่อให้น้ำช่วยชะล้างเอาเศษโลหะที่ไม่ต้องการออกไป และยังช่วย

หล่อเย็นไม่ให้เกิดความร้อนบนผิวหน้าชิ้นงานอีกด้วย และทิศทางการขัดจะต้องมีการเปลี่ยน โดยการหมุนตัวอย่างชิ้นงานไป 90° จากแนวเดิมดังรูปที่ 2.19 เสมอเมื่อมีการเปลี่ยนเบอร์กระดาษทราย เพื่อเป็นการลบรอยกระดาษทรายเบอร์เดิม ขัดชิ้นงานจนรอยขูดขีดต่างๆ หายไป จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปขัดเงาด้วยผงอะลูมินาผสมน้ำ ซึ่งจะช่วยให้ผิวหน้าชิ้นงานมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และพร้อมสำหรับการกัดกรด/กัดขึ้นรอย เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาต่อไป



รูปที่ 2.19 ทิศทางการหมุนปรับชิ้นงานในกระบวนการขัดเมื่อเปลี่ยนกระดาษทราย [17]

2.5.1.2 การกัดกรด/ กัดขึ้นรอย (Etching) เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานได้ผ่านการขัดเงา และถูกนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดพร้อมกันเป่าให้แห้งด้วยลมเย็นแล้ว จะนำชิ้นงาน ไปกัดกรดด้วยกรดไนตริก (HNO_3) ผสมกรดไฮโดรคลอริก (HCL) แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งพร้อมกับเป่าลมให้แห้ง เพื่อเตรียมนำไปตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา

2.5.2 วิธีการตรวจสอบในระดับจุลภาค (Micro - Scopic Examination) เป็นการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นงานโลหะ โดยใช้กำลังในการขยายตั้งแต่ 10 เท่าเป็นต้นไป ซึ่งอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับจุลภาคในการทดลองนี้ได้แก่

2.5.2.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยเลนส์ 2 ชุด คือ [18]

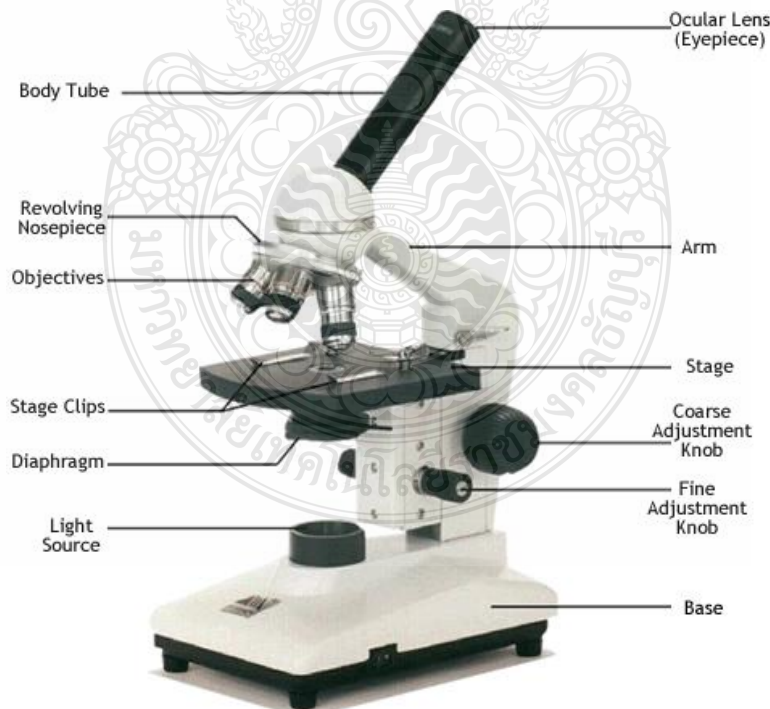
1) เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) เป็นเลนส์นูน ที่มีกำลังขยายขนาดต่าง ๆ กันคือ 4X 10X 40X และ 100X สำหรับเลนส์ 100X นั้นต้องใช้ใช้น้ำมันเป็นตัวกลางระหว่างสไลด์ที่วางวัตถุกับเลนส์ใกล้วัตถุ เลนส์เหล่านี้จะติดอยู่กับแป้นซึ่งสามารถหมุนได้โดยรอบ เพื่อใช้ในการปรับกำลังขยายที่ต้องการใช้ให้มาอยู่ตรงกับตำแหน่งวัตถุ ตามปกติการเพิ่มกำลังขยายของเลนส์ มักเริ่มจากการใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยายต่ำก่อนแล้วเปลี่ยนเป็นกำลังขยายกลางและสูงไปตามลำดับ

2) เลนส์ใกล้ตา (Eyepiece) เป็นเลนส์นูนกำลังขยายเป็น 10X 15X และ 25X เลนส์ใกล้ตาลำต้นี้สามารถเลือกได้ตามที่ต้องการ โดยการถอดขนาดที่ไม่ต้องการออกแล้วนำขนาดที่ต้องการมาสวมที่ส่วนบนของลำกล้อง

แหล่งกำเนิดแสง แสงที่ใช้กล้องแบบใช้แสงอาจเป็นแสงจากดวงอาทิตย์ตามธรรมชาติ กล้องแบบนี้จะมีกระจกเงา 2 ด้าน ช่วยรวบรวมแสงให้สะท้อนสู่ตรงกลางของแท่งวัตถุ กระจกเงาด้านเรียบใช้สำหรับรับแสงตามปกติ สำหรับวันที่มีแสงน้อยควรใช้กระจกเงาด้านโค้งเว้า เพื่อช่วยรวมแสง กระจกเงาข้างกล้องออกแบบมาให้ถอดออกได้ แล้วใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสงแทน ซึ่งสะดวกต่อการนำไปใช้ เพราะใช้ได้ทั้งกลางวันและกลางคืน รวมทั้งในห้องที่มีแสงน้อย

การปรับความเข้มของแสง ในกล้องบางรุ่นจะมีเลนส์รวมแสง (Condenser Lens) อยู่ใต้แท่งวางวัตถุ เพื่อช่วยเพิ่มความเข้มของแสงและคัดเลือกแสงที่มีคุณภาพมาใช้ นอกจากนี้ยังมีไดอะแฟรมที่ช่วยปรับความเข้มของแสงได้ตามที่ต้องการ เพื่อให้เห็นภาพของวัตถุที่มีความชัดขึ้น

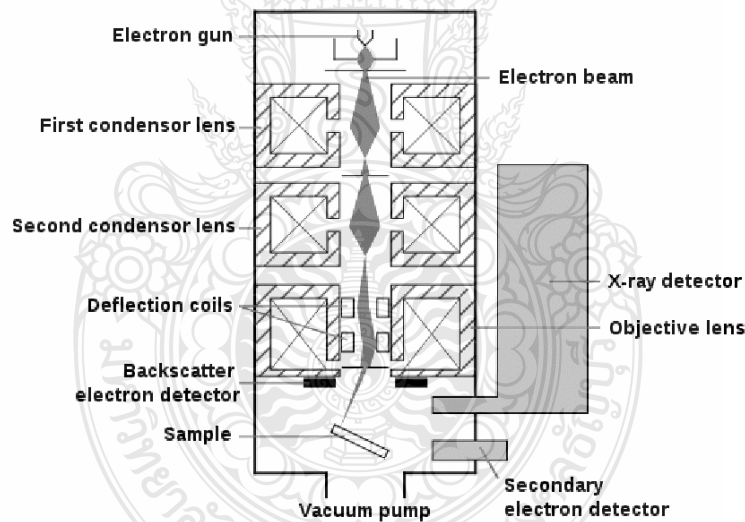
กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบธรรมดา เป็นกล้องชนิดเลนส์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยเลนส์ 2 ชุด คือ ใกล้วัดดูและเลนส์ใกล้ตา และมีส่วนประกอบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบธรรมดา [19]

2.5.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) [20] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่ง ที่ถ่ายภาพชิ้นงานโดยอาศัยหลักการกราดไปบนพื้นผิวตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด (Electron gun) เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับผิวชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมต่าง ๆ จะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ องค์ประกอบของพื้นผิว และสมบัติอื่น ๆ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น

ส่วนประกอบของ SEM ประกอบไปด้วยส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0 - 30 kV (บางเครื่องทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วย แอปเพเจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดที่มีลักษณะต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 2.21 หลักการทำงานของเครื่อง SEM [20]

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron

beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านี้ แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป

จุดเด่นของ SEM คือ มีระยะชัดลึกและมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูง เนื่องจาก SEM ใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้น ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 nm และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง

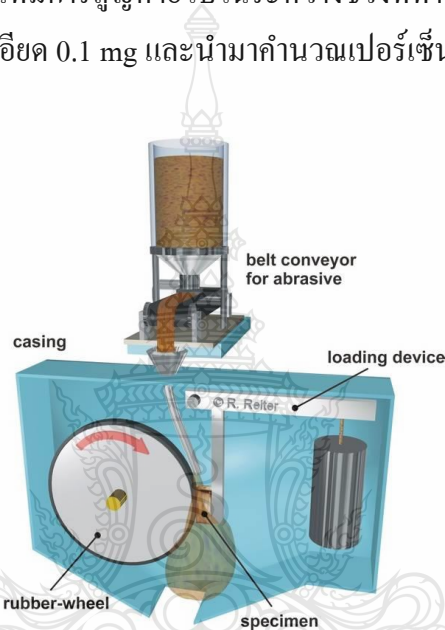
2.5.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X – ray Spectroscopy: EDS/ EDX) [21] โดยมีหลักการทำงานอยู่ที่การกระตุ้นวัตถุตัวอย่างโดยอนุภาคพลังงานสูง อันได้แก่อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X - ray tube) อนุภาคจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่มาอย่างรวดเร็วมีพลังงานจลน์สูง เมื่ออนุภาคนี้ผ่านเข้ามาในอะตอมของวัตถุตัวอย่าง บางส่วนก็จะมีโอกาสที่จะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม ในการชนนี้ก็จะถ่ายทอดพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและโดยทั่วไปมักจะสูงมากพอที่จะหลุดออกไปจากอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าก็จะตกลงมาอยู่แทนที่ ในการตกลงมาอยู่ชั้นต่ำกว่านี้ อิเล็กตรอนก็จะต้องปล่อยหรือคายพลังงานที่มีอยู่มากเกินระดับที่ต้องการออกไป พลังงานที่คายออกมานี้จะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะ (Characteristic X - ray) ซึ่งจะบอกได้ว่าวัตถุตัวอย่างมีองค์ประกอบของธาตุใดบ้าง เนื่องจากแต่ละธาตุมีรังสีเอกซ์เฉพาะที่ไม่เหมือนกัน

ข้อได้เปรียบในการใช้เทคนิค EDS คือ สามารถตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ในเวลาอันรวดเร็วและตรวจได้คราวละหลาย ๆ ธาตุพร้อมกัน นอกจากนี้ยังไม่ทำลายวัตถุตัวอย่างหรือทำให้วัตถุตัวอย่างสูญเสียสภาพเดิม และสามารถใช้วัตถุตัวอย่างในสภาพของแข็งได้ ดังนั้น เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS/ EDX (SEM - EDS/ EDX) ก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างได้อย่างละเอียดและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

2.6 การทดสอบสมบัติทางกล

2.6.1 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

การทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Dry Sand/ Rubber Wheel เป็นการทดสอบโดยใช้หลักของการขัดสี โดยมีทรายแก้วเกรดพิเศษที่ถูกปล่อยผ่านระหว่างผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกกดเข้าหาตัวอย่าง ซึ่งมีการหมุนอยู่ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 เพื่อทำการเปรียบเทียบมวลน้ำหนักของชิ้นงานที่มีการสูญหายไปในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบตามเวลาที่กำหนด ด้วยเครื่องซึ่งดิจิทัลความละเอียด 0.1 mg และนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์ความต้านทานการสึกหรอ



รูปที่ 2.22 แสดงเครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Dry Sand/ Rubber Wheel [22]

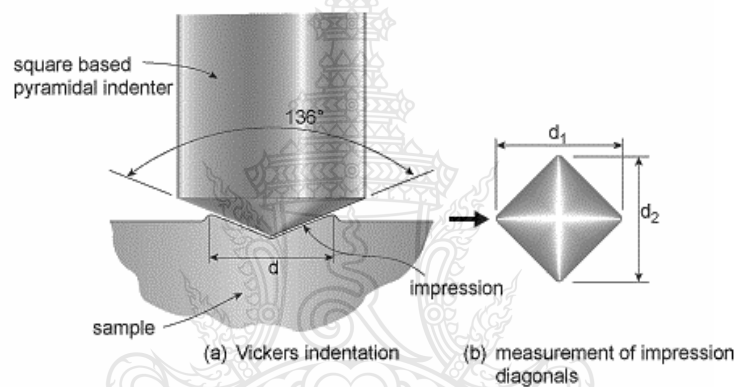
2.6.2 การทดสอบความแข็ง [23]

การทดสอบความแข็ง คือ การทดสอบความสามารถในการต้านทานของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำให้กับวัสดุ แล้ววัสดุเกิดการเสียรูปอย่างถาวร หรือความต้านทานต่อแรงกดคั้นทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย โดยสามารถทำการตรวจสอบโดยใช้วิธีในการทดสอบ คือ Vickers Hardness Test (HV) ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งโดยการใช้หัวกดเพชรเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมที่มีมุมของหัวกด 136° ทำการกดลงบนชิ้นงานทดสอบ ใช้แรงในการทดสอบตั้งแต่ 1 - 120 kgf เป็นเวลา 10 - 15 วินาที ค่าความแข็งที่ได้จะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสูตร ดังนี้

$$HV = \frac{1.854P}{d^2}$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm^2)
 P คือ แรงกด (kgf)
 d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (มิลลิเมตร)

จากหลักการสำหรับค่าความแข็งด้านบน ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ในการกดทดสอบต่อพื้นที่ผิวเอียงของรอยบุ๋มนั้น จะมีลักษณะของรอยกดซึ่งเกิดจากการทดสอบแบบ Vickers Hardness Test ดังแสดงในรูปที่ 2.23



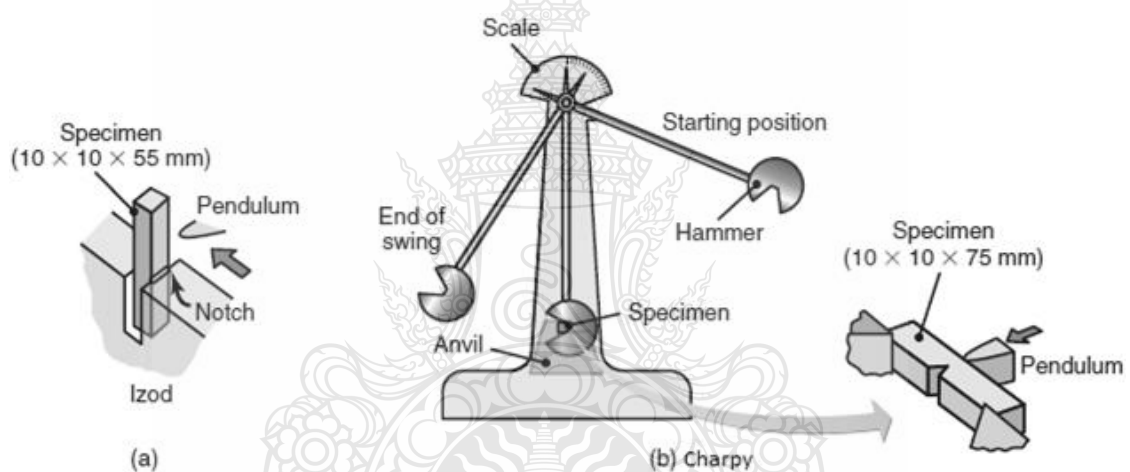
รูปที่ 2.23 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของการทดสอบความแข็งแบบ Vickers Hardness Test [24]

2.6.3 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก [25]

ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรา มักจะประเมินค่าความเหนียวจาก Modulus of Toughness ซึ่งกำหนดให้มีความเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น (σ) - ความเครียด (ϵ) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งค่า Modulus of Toughness นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย

วิธีการทดสอบความเหนียวที่นิยมใช้ คือ การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact Test) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อทำการวัดค่า Impact Energy, Impact Transition Temperature (ITT) และศึกษาผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของวัสดุ โดยการตีขึ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน จนเกิดการแตกหัก จุดประสงค์ในการทำการทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรับแรงกระแทก (Dynamic Load) ของวัสดุ

สำหรับค่าที่นิยมวัดมากที่สุดในการทดสอบความแข็งแรงกระแทก คือ ค่า Impact Energy ซึ่งเป็นพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงกระแทก (Dynamic Impact Force) จนเกิดการแตกหัก โดยมีวิธีการทดสอบมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test เครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้ แสดงไว้ในภาพที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod [26]

วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกัน คือ จะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของตุ้มน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้) พลังงานที่กระแทกขึ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบขึ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy นั่นเอง มีหน่วยเป็น ft.Pond หรือ Joules

ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod ก็คือ การวางชิ้นงานทดสอบ โดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ และให้ลูกตุ้มตกกระทบบนด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod Test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มกระทบบนด้านที่มีรอยบาก

ชิ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปรูกลุญแจ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้

อุณหภูมิมีผลต่อความเหนียวอย่างมาก วัสดุเหนียวอาจจะเปลี่ยนเป็นวัสดุเปราะได้ เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ถ้าเรานำค่า Impact Energy มาพลอตกับอุณหภูมิ เราจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าของ Impact Energy ลดลงอย่างรวดเร็วดังภาพที่ 3 ค่าอุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า Impact Transition Temperature (ITT) โดยค่า ITT นี้เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะ คือ เปลี่ยนจากวัสดุเหนียวที่มีค่าพลังงานสูงมาเป็นวัสดุเปราะซึ่งมีพลังงานต่ำ

2.7 ต้นทุนการผลิต

2.7.1 ความหมายของต้นทุนการผลิต

ต้นทุน (cost) หมายถึง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ

ต้นทุนการผลิต (Production Cost) หมายถึง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมทางการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ดี มีคุณภาพ ตามความต้องการของลูกค้า [27]

2.7.2 องค์ประกอบของต้นทุนการผลิต [28]

2.7.2.1 ต้นทุนการผลิต จะถูกจำแนกตามลักษณะของส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิตสินค้า ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนการผลิตและค่าใช้จ่ายในการขายและบริการ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

1) วัสดุดิบทางตรง (Direct materials) หมายถึง วัสดุหลักที่ใช้ในการผลิต และสามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าใช้ในการผลิตสินค้าประเภทใดประเภทหนึ่งในปริมาณและต้นทุนเท่าใดรวมทั้งจัดเป็นวัสดุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตสินค้าประเภทนั้น ๆ เช่น ไม้แปรรูปจัดเป็นวัสดุดิบทางตรงของการผลิตเฟอร์นิเจอร์

2) ค่าแรงงานทางตรง (Direct labor) หมายถึง ค่าแรงงานต่าง ๆ ที่จ่ายให้แก่คนงานหรือลูกจ้างที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการผลิตสินค้าสำเร็จรูปหรือกึ่งสำเร็จรูปโดยตรง รวมทั้งเป็นค่าแรงงานที่มีจำนวนมากเมื่อเทียบกับค่าแรงงานทางอ้อมในการผลิตสินค้าหน่วยหนึ่ง ๆ และจัดเป็น

ค่าแรงงานส่วนสำคัญในการแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นสินค้าสำเร็จรูป เช่น คนงานที่ทำงานเกี่ยวกับการควบคุมเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตก็ควรถือเป็นแรงงานทางตรง พนักงานในสายการประกอบ เป็นต้น

3) ค่าใช้จ่ายในการผลิต หมายถึง แหล่งรวบรวมค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสินค้าซึ่งนอกเหนือจากวัตถุดิบทางตรง ค่าแรงงานทางตรง ได้แก่

(1) วัตถุดิบทางอ้อม (Indirect Materials) หมายถึง วัสดุที่ใช้ในการผลิตสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ แต่ไม่สามารถนำมาคิดเป็นวัตถุดิบทางตรงได้เพราะไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ เพราะมีการใช้ในงานในปริมาณน้อย ทำให้การคำนวณต้นทุนต่อหน่วยของสินค้ามีความซับซ้อนและเสียเวลา ไม่คุ้มกับการคิดเป็นวัตถุดิบทางตรง

(2) ค่าแรงงานทางอ้อม (Indirect Labor) หมายถึง ค่าจ้างแรงงานที่ไม่สามารถจำแนกเป็นค่าแรงทางตรงได้ ไม่สามารถนำมาคำนวณต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง เนื่องจากค่าแรงงานนั้นไม่ก่อให้เกิดการผลิตสินค้า เช่น ค่าแรงฝ่ายธุรการในการผลิต เป็นต้น

(3) ค่าใช้จ่ายในการผลิตทางอ้อมอื่น ๆ ได้แก่ ค่าน้ำ ค่าไฟ ค่าเช่า ค่าเสื่อมราคา ค่าประกันภัย ค่าภาษี เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายเหล่านี้ก็ต้องเป็นค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการผลิตในโรงงานเท่านั้น ไม่รวมถึงเงินเดือน ค่าเช่า ค่าไฟฟ้า ค่าเสื่อมราคา ที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานในสำนักงาน ดังนั้น ค่าใช้จ่ายการผลิตจึงถือเป็นที่รวมของค่าใช้จ่ายในการผลิตทางอ้อมต่าง ๆ (Cost Pool of Indirect Manufacturing Costs) นอกจากนี้ ยังจะพบว่าในบางกรณีก็มีการเรียกค่าใช้จ่ายการผลิต ในชื่ออื่น ๆ เช่น ค่าใช้จ่ายโรงงาน (Factory Overhead) ค่าโซหุ้ยการผลิต (Manufacturing Burden) ค่าต้นทุนผลิตทางอ้อม (Indirect Costs) เป็นต้น

2.7.2.2 ต้นทุนการผลิตจะถูกจำแนกตามพฤติกรรมที่มีความสัมพันธ์กับลำดับกิจกรรม เป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนเมื่อลำดับกิจกรรมที่ทำเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะประกอบด้วย

1) ต้นทุนคงที่ (Fixed costs) หมายถึง ต้นทุนที่มีจำนวนต้นทุนรวมไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณหรือระดับกิจกรรม เช่น ค่าเช่า ค่าประกันภัย เป็นต้น

2) ต้นทุนผันแปร (Variable costs) หมายถึง ต้นทุนประเภทต่างๆ ที่มีจำนวนของต้นทุนรวมเปลี่ยนแปลงไปในสัดส่วนโดยตรงต่อปริมาณหรือระดับกิจกรรม เช่น วัตถุดิบทางตรง ค่าแรงทางตรง ค่าใช้จ่ายการผลิตผันแปร เป็นต้น

เพราะฉะนั้น การคิดคำนวณต้นทุนการผลิตจะเท่ากับ

$$\text{ต้นทุนการผลิต} = \text{วัตถุดิบทางตรงที่ใช้ไป} + \text{ค่าแรงงานทางตรง} + \text{ค่าใช้จ่ายในการผลิต.....(1)}$$

และ การคิดคำนวณสินค้านำต่อหน่วย

$$\text{ต้นทุนสินค้านำต่อหน่วย} = \text{ต้นทุนการผลิตทั้งหมด} / \text{ปริมาณการผลิตทั้งหมด.....(2)}$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.Schuldt, G. และคณะ [29] ทำการทดสอบความคมของใบมีดตัด โดยการทดสอบการตัดของใบมีดและการวิเคราะห์จากภาพ ซึ่งในการทดสอบค่าความต้านทานการสึกหรอของใบมีดตัดใช้กระบวนการทดสอบแบบ Time - Controlled Rotation เปรียบเทียบกับการกำหนดรูปแบบวิธีการทดสอบการสึกหรอ และทำการวิเคราะห์ผลที่บริเวณคมใบมีด โดยใช้การตรวจสอบภาพจากกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในทุกรูปแบบวิธีการทดสอบการสึกหรอ จะแสดงให้เห็นถึงบริเวณคมของใบมีดที่มีความลักษณะความคมที่ลดลงชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญ ขึ้นอยู่กับค่าการกำหนดรูปแบบวิธีการทดสอบการสึกหรอ โดยพบว่า ในรูปแบบของ Vertical Mount จะพบการสึกหรอมากที่สุด ตามด้วย Horizontal Mount และ Inclined Mount ตามลำดับ

Amit Kumar Tanwer [30] ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลของวัสดุที่มีความแตกต่างกันของ Mild steel และ Stainless steel ในการทดลองจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยเริ่มจากการนำแท่งโลหะมาทำการกลึงขึ้นรูปตามตัวอย่างที่ได้ออกแบบไว้ มาทดสอบกับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) จากนั้นกระบวนการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อนจะเริ่มต้นขึ้นโดยการเผาในเตาอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวลงตามกระบวนการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานตัวอย่างไปทำการทดสอบทางกล ซึ่งผลการทดลองที่ได้ พบว่า กระบวนการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อนจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุของ Mild steel และ Stainless steel ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

อภิรัฐ สุภวัฒน์ยืนยง และดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข [31] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ สรุปได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการ Tempering ที่ 425°C และ 650°C จะส่งผลต่อสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และเวลาที่ใช้ในการทำ Tempering จะทำให้ค่าความแข็งของเหล็กกล้าลดลง

ถนอม ลีตระกูล [3] ทำการศึกษากระบวนการในการอบชุบที่ใช้ในการทำมีดตัดอ้อย (Chopper Blade) ในรถตัดอ้อย โดยเปรียบเทียบเหล็กเกรด SUP9 กลุ่มเดียวกับ SUP7 ซึ่งเป็นกลุ่มเหล็กกล้าสปริงที่นำเข้าจากต่างประเทศ ผลการทดลอง พบว่า ชิ้นงานตัวอย่างมีดตัดอ้อยที่นำไปอบชุบและผ่านการอบคลายความเครียดที่อุณหภูมิ 400°C นาน 40 นาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 457 Hv ซึ่งไม่แตกต่างจากมีดตัดอ้อยที่นำเข้าจากต่างประเทศได้อย่างมีนัยทางสถิติที่ระดับสำคัญ 0.05

Atkins T. [32] ได้ทำการศึกษาการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของใบมีดสำหรับการตัดวัสดุ Soft Solid และได้รายงานไว้ว่า ในการตัดเฉือนผิวของวัสดุ Soft Solid แรงที่กระทำต่อมุมต่าง ๆ ของใบมีด สามารถหาได้จากค่าความเร็วของวัสดุที่ผ่านใบมีด หรืออัตราส่วนการตัดเฉือนต่อแรงกดอัด (Slice Push Ratio) ซึ่งค่าอัตราส่วนการตัดเฉือนต่อแรงกดอัดจะกระทำได้นี้ก็ต่อเมื่อวัสดุไม่เกิดการกีดขวาง ในการทดลองได้ทำการออกแบบใบมีดเป็นเกลียวรูปทรงกรวย ผลการทดลอง พบว่า ใบมีดที่ออกแบบนี้จะทำให้เกิดการใช้แรงตัดที่น้อยลง และทำให้ผิวใบมีดราบเรียบ

Fattah, M., และ Mahboubi, F. [33] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสม SCM440 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยพลาสมาในไตรคาร์บูไรซิง ที่อุณหภูมิระหว่าง 520 - 620°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ผลการวิจัยพบว่า ที่อุณหภูมิ 620°C ชิ้นงานจะเกิดชั้นของสารประกอบที่ผิวขึ้น แบ่งเป็น 2 แบบ คือ ส่วนที่มีรูพรุนและโครงสร้างรูปเสาเหลี่ยม จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่านั้นมีโครงสร้างเพียงแบบเดียว และค่าความแข็งบริเวณผิวของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อุณหภูมิการอบชุบที่ 545°C ชิ้นงานทดสอบจะมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุด

Verhoeven et al. [34] ทำการทดลองการสึกกร่อนของใบมีดเหล็กกล้า 4 ชนิด ประกอบด้วยเหล็กกล้า 52100 เหล็กกล้า 1086 เหล็กกล้าดามัสกัส และเหล็กกล้า AEB-L ในการตัดโลหะแผ่นบางที่เรียงตัวเป็นชั้นหนา เหล็กกล้าคาร์บอน 2 ชนิดแรก ถูกทำการชุบแข็งเพื่อทำให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างละเอียดของคาร์ไบด์ในพื้นที่หลักมาร์เทนไซต์ ผลการทดลอง พบว่า ใบมีดที่ทำการทดสอบให้ค่าความแข็งที่ 41 และ 61 สำหรับเหล็กกล้า 52100 เหล็กกล้า 1086 และที่ค่าความแข็ง HRC = 41 เหล็กกล้าดามัสกัสมีประสิทธิภาพการตัดเหนือกว่าเหล็กอื่น ๆ

ไพลิน กระจ่างพิภพ และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมได้เข้าโลหะจำนวน 5 ชิ้นส่วน โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหล่อฉีดโลหะการขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งเพื่อฟันฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัว เรียกว่า กระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือ GISS ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้มีการนำข้อมูลใช้ในการผลิตมาเข้าสู่แบบจำลองที่เรียกว่า Process-Based Cost Model ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ Process Model Operation Model และ Financial Model เพื่อทำการจำลองสถานการณ์กำลังการผลิตที่ 10,000 ชิ้น ผลการทดลองที่ได้ พบว่า ราคาต้นทุนการผลิตต่อชิ้น ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการผลิตเพื่อช่วยเหลือผู้พิการ ได้ใช้ขาเทียมที่มีความแข็งแรงทนทาน

ศุภฎี บุญธรรม [36] ได้ศึกษาด้านต้นทุนการผลิตแท่งชิ้นงานในอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง ซึ่งมีผลิตภัณฑ์อยู่ทั้งหมด 4 ประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะใช้กระบวนการผลิตและใช้ต้นทุนการผลิตที่แตกต่างกัน จึงมีการนำระบบการคิดต้นทุนกิจกรรมมาใช้หาต้นทุนการผลิตของแท่งชิ้นงานต่อหน่วย และจากการศึกษาสามารถวิเคราะห์หาราคาต้นทุนของแท่งชิ้นงานต่อหน่วย ได้ราคา 27.97, 29.30, 11.99 และ 13.7 บาทต่อชิ้น จะเห็นได้ว่า ในการคิดต้นทุนต่อหน่วยจะทำให้รู้ต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท ดังนั้น ข้อมูลดังกล่าวนี้จึงช่วยในด้านการกำหนดราคาในการขายให้เหมาะสมกับต้นทุนการผลิต

ทวีศักดิ์ ชัดดียววรรณ [37] ได้วิจัยเปรียบเทียบและปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ และจากชุมชนบางนาค อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส โดยแบ่งน้ำมันพืชออกเป็น 3 ส่วน คือ ของเหลว, ใบ, ของเหลวผสมใบ เพื่อผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล พบว่า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์มีปริมาณการได้คืนของน้ำมัน (%yield) ของทั้ง 3 ส่วน คิดเป็น 92.7, 84.9 และ 90.8% ซึ่งมีต้นทุนต่อหน่วย 26.34, 32.08 และ 30.03 บาทต่อลิตร ตามลำดับ และจากชุมชนบางนาค พบว่า มีปริมาณการได้คืนของน้ำมันไบโอดีเซล (%yield) ของทั้ง 3 ส่วน คิดเป็น 80, 60 และ 70% มีต้นทุนต่อหน่วยเป็นเงิน 32.64, 43.52 และ 37.36 บาทต่อลิตร ตามลำดับ

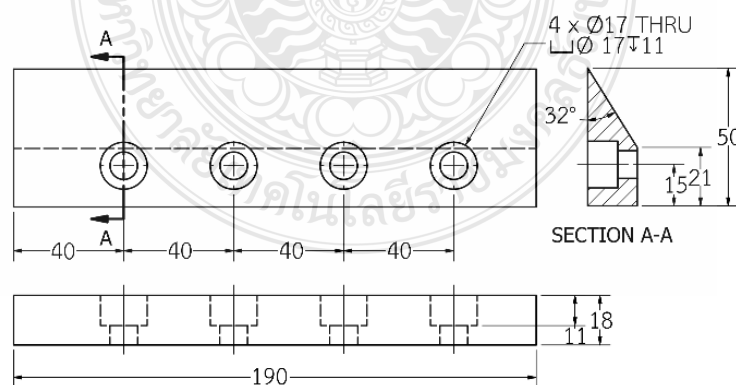
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิธีการดำเนินงานในบทนี้จะกล่าวถึงสาระสำคัญของวิธีการดำเนินการวิจัย โดยเริ่มต้นจากขั้นตอนการเลือกวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการผลิตเป็นใบตัดย่อยทางปาล์ม การเลือกกระบวนการและวิธีการกำหนดตัวแปรในกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อน การทดสอบสมบัติทางกลและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาใบตัดจากเดิมที่เกษตรกรใช้งานกันในปัจจุบัน ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลงานวิจัยต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องมาแล้วเป็นอย่างดี

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุในการผลิตเป็นใบตัดย่อยทางปาล์ม วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานในครั้งนี้ จะถูกนำมาขึ้นรูปโดยวิธีการขึ้นรูปทางกลเป็นใบตัดตามแบบมาตรฐานที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบไว้เพื่อใช้กับเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็ก โดยใบตัดย่อยที่ใช้ในการทดลอง มีขนาดกว้าง 50 mm ยาว 190 mm และหนา 18 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งวัสดุที่เลือกมาผลิตเป็นใบตัดในการทดลองครั้งนี้ เป็นการนำโลหะจำพวกเหล็กที่สามารถหาซื้อได้โดยทั่วไป และนิยมใช้กันเป็นส่วนมากในงานอุตสาหกรรมในไทยมาใช้ในการทดลอง ได้แก่



รูปที่ 3.1 แสดงใบตัดขึ้นรูปด้วยวิธีทางกล (หน่วย: mm) [11]

3.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน S45C เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง นิยมใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักร แม่พิมพ์ และอื่น ๆ มีส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยการจัดการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometer) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C (wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	W
97.38	0.42	0.23	0.67	0.02	0.02	0.04	0.98	0.17	0.01	0.02	0.04

3.1.2 เหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 เป็นเหล็กกล้าผสมที่มีส่วนผสมในการเพิ่มความแข็งแรงเหมาะสำหรับใช้ทำอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ มีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 (wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	W
97.49	0.38	0.23	0.65	0.02	0.02	0.04	0.96	0.15	0.01	0.02	0.03

3.1.3 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่อยู่ในกลุ่มออสเทนเนติก มีสมบัติที่สำคัญคือ ไม่สามารถเหนียวนำแม่เหล็กได้ นิยมใช้ในการผลิตเป็นอุปกรณ์สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร หรืออุปกรณ์สำหรับการบรรจุสารเคมี มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 (wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	W
72.43	0.02	0.45	1.70	0.02	0.03	7.70	17.41	0.24	-	-	-

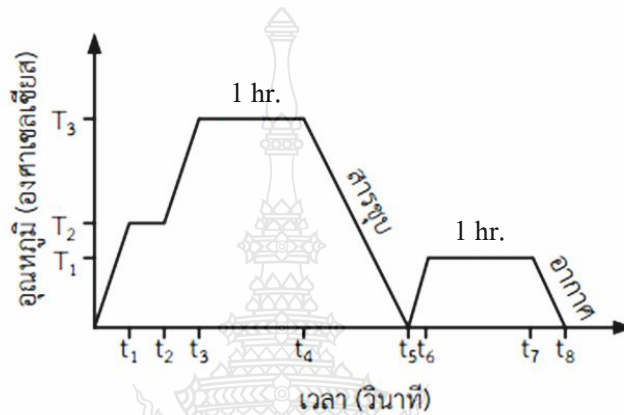
3.1.5 เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 กลุ่ม 5 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น ใช้สำหรับทำแม่พิมพ์ตัดโลหะทั่วไปและใบมีดตัดโลหะ มีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 (wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	W
83.00	1.07	0.97	0.45	0.04	0.02	0.14	12.35	1.86	0.04	0.01	0.05

3.2 กำหนดตัวแปรการทดลอง

ในการดำเนินงานครั้งนี้ ได้ศึกษาถึงวิธีการกำหนดตัวแปรของการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อนของวัสดุ คือ การชุบแข็ง และการชุบแข็งและอบคืนไฟ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และลำดับการการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อน



รูปที่ 3.2 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และลำดับการทำงาน

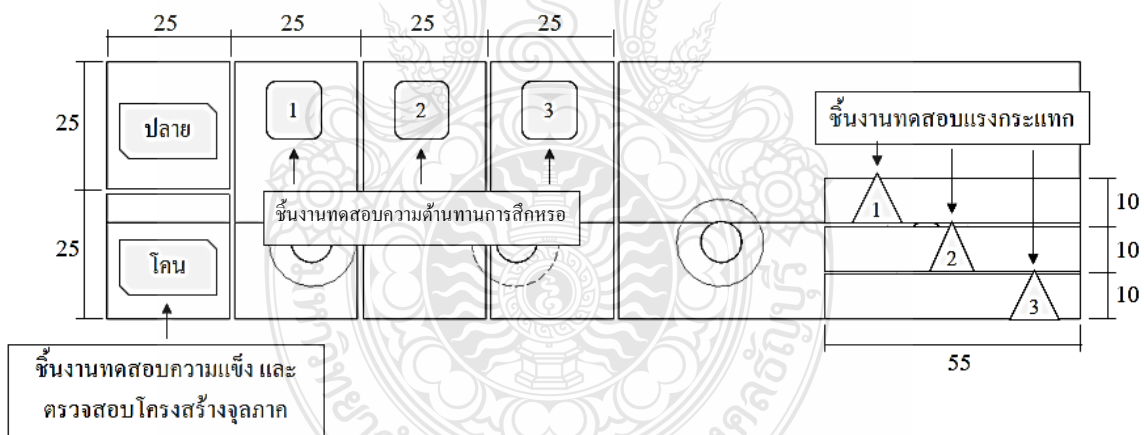
ตารางที่ 3.5 ค่ากำหนดอุณหภูมิ เวลา และสารอบชุบ

ค่ากำหนด		S45C	SCM440	SUS304	SKD11
อุณหภูมิ (C°)	T1	150	150	180	200
	T2	650	650	650	650
	T3	1050	1200	1090	1030
เวลา (วินาที)	0 - t ₁	130	130	130	130
	t ₁ - t ₂	10	10	10	10
	t ₂ - t ₃	80	80	80	80
	t ₃ - t ₄	60	60	60	60
	t ₄ - t ₅	α	α	α	α
	t ₅ - t ₆	30	30	30	30
	t ₆ - t ₇	α	α	α	α
สารอบชุบ		น้ำ	น้ำ	น้ำมัน	น้ำมัน

ตารางที่ 3.2 จะแสดงให้เห็นถึงค่ากำหนดของอุณหภูมิ เวลา และสารอบชุบ ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อนสำหรับใบตัดที่ผลิตจากวัสดุทั้ง 4 ชนิด จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและเปรียบเทียบสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ การทดสอบความแข็ง และการทดสอบความแข็งแรงกระแทก

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในการตรวจสอบชิ้นงานใบตัดแต่ละสภาวะ จะถูกนำมาตัดแบ่งเป็นชิ้นงานย่อยตามขนาดของมาตรฐานต่าง ๆ ที่เลือกใช้ ในการทดสอบชิ้นงานใบตัดที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อนตามหัวข้อที่ 3.2 จะถูกนำมาทำการออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบ โดยจะตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและชิ้นงานทดสอบความแข็ง โดยมีขนาดของชิ้นงาน คือ 25 mm x 25 mm จากบริเวณปลายใบตัด 1 ชิ้น และบริเวณ โคนใบตัด 1 ชิ้น ชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านทานการสึกหรอขนาด 25 mm x 50 mm จำนวน 3 ชิ้น และชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงกระแทก จำนวน 3 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบ

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

3.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

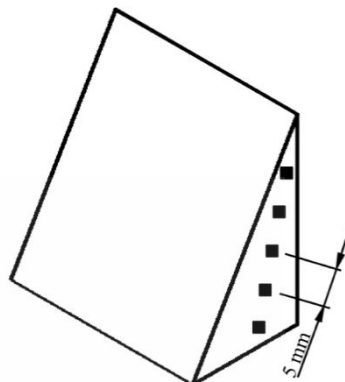
การเตรียมชิ้นงาน ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา จะเริ่มต้นจากการนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดบริเวณปลายใบตัด มาทำการเตรียมผิวหน้าด้านที่ได้ทำการเลือกไว้แล้ว โดยการนำชิ้นงานด้านที่เป็นภาคตัดขวางลงไปทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำที่วางอยู่บนเครื่องขัดจานหมุน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเริ่มต้นจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบไปยังกระดาษทรายเบอร์ละเอียดที่ 250, 400, 1000 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการขัดชิ้นงานกับผ้าสักหลาดพร้อมกับการใช้ผงขัด (Polishing) เพื่อช่วยให้ชิ้นงานมีความมันเงา และลดรอยขนแมวที่เกิดขึ้นจากการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เมื่อทำการขัดเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำสะอาด เป่าด้วยลมเย็นให้แห้ง



รูปที่ 3.4 เครื่องขัดจานหมุน

หลังการขัดเตรียมผิวแล้ว ชิ้นงานที่จะถูกนำไปทำการกัดกรดตามมาตรฐานของ ASTM E 407 [36] ซึ่งในกรดที่ใช้จะประกอบด้วย กรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในอัตราส่วน 1:1 ทำการป้ายกรดทิ้งไว้ที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานด้านที่เตรียมไว้ประมาณ 10 - 30 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปล้างน้ำกรดออกด้วยน้ำสะอาดและทำการเป่าลมเย็นให้แห้ง แล้วนำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบและบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น

ก) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ข) ตำแหน่งทดสอบ

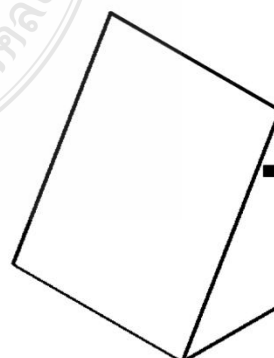


รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และตำแหน่งการทดสอบ

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานทดสอบเดิมจะถูกนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 อีกครั้ง เพื่อทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคในรูปแบบ 3 มิติ โดยจะมีการจับบันทึกภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นเพิ่มเติม

ก) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ข) ตำแหน่งทดสอบ



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และตำแหน่งการทดสอบ

3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X - ray Spectroscopy: EDS)

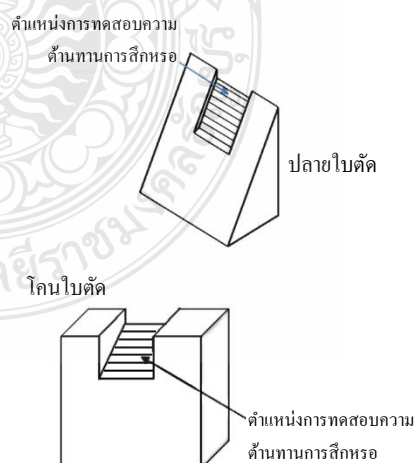
เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุ โดยการตรวจสอบวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ร่วมกับการใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิคการ EDS/ EDX เพื่อให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างได้อย่างละเอียดและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยใช้เครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อทำการตรวจสอบในพื้นที่เดียวกับการ SEM บนผิวชิ้นงานตัวอย่าง

3.5 การทดสอบสมบัติทางกล

3.5.1 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

ในการทดสอบอัตราการสึกหรอแบบขัดสี ด้วยเครื่อง Dry Sand/ Rubber Wheel ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้มาตรฐานการทดสอบแบบ ASTM G65 - 94 [37] โดยการเตรียมชิ้นงานทดสอบด้านคมตัดให้เป็นสี่เหลี่ยมขนาด 25 mm x 50 mm ความหนาตามขนาดของคมตัด นำไปแช่น้ำหนักชิ้นงานเริ่มต้น จากนั้นให้นำชิ้นงาน ไปยึดเข้ากับตัวเครื่องทดสอบ เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบบริเวณคมตัดถูกกดเข้ากับล้ออย่างที่เหมาะสมในเครื่องด้วยความเร็ว 200 rpm โดยมีทรายแก้วเกรดพิเศษไหลผ่านในระหว่างการทดสอบเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเมื่อครบเวลาที่กำหนด ให้นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน

ก) เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ข) ตำแหน่งทดสอบ



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Dry Sand/Rubber Wheel และตำแหน่งทดสอบ

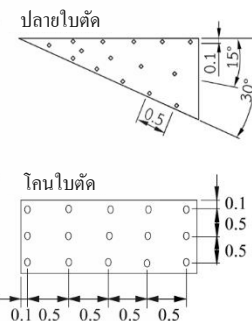
3.5.2 การทดสอบความแข็ง

ในการทดสอบความแข็ง ใช้ชิ้นงานเดิมที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ซึ่งจะทำกรทดสอบตามมาตรฐานแบบ JIS Z2244 [38] ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ใช้แรงในการกดทดสอบที่ 300 gf เป็นเวลา 10 วินาที ทำการทดสอบแบบสุ่มจำนวน 15 จุด ดังรูปที่ 3.8 โดยจุดทำการทดสอบห่างจากปลายใบตัดประมาณ 0.5 mm ทำการทดสอบห่างจากบริเวณขอบผิวด้านข้างเข้ามาประมาณ 0.1 mm ระยะห่างการทดสอบแต่ละจุด 0.5 cm

ก) เครื่องทดสอบความแข็ง



ข) ตำแหน่งทดสอบ



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง และตำแหน่งการทดสอบ

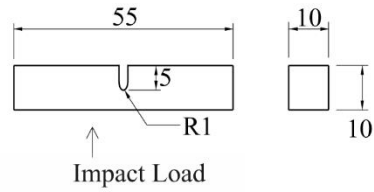
3.5.3 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทกของใบตัดย่อย เลือกใช้การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy ตามขั้นตอนมาตรฐานแบบ JIS Z2242 [39] ซึ่งมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z2202 [40] ที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาวขนาด 55 x 10 x 10 mm บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานบากร่องเป็นตัว U นำมาทำการทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงกระแทก โดยการถูกค้อนเหวี่ยงตีเข้าไปที่บริเวณรอยบากที่ถูกยึดไว้กับเครื่องจนชิ้นงานเกิดการแตกหัก เพื่อวัดค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานแรงกระแทกของวัสดุในชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ก) เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก



ข) ตำแหน่งทดสอบ



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก และตำแหน่งการทดสอบ

3.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต [39]

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้สูตร ดังนี้

ต้นทุนรวม (Total Cost: TC) หมายถึง ต้นทุนที่ประกอบด้วยต้นทุนคงที่รวม และต้นทุนแปรผันรวม

ต้นทุนรวมเฉลี่ยต่อผลผลิต 1 หน่วย (Average Total Cost: ATO) ได้แก่ ต้นทุนรวมหารด้วยจำนวนผลผลิต หรือเท่ากับผลรวมของต้นทุนคงที่เฉลี่ยและต้นทุนแปรผันเฉลี่ย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

การทดลองงานวิจัยนี้ เริ่มต้นจากการเลือกวัสดุใบตัดย่อยที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C เหล็กกล้าผสมต่ำเกรด SCM440 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 และ เหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 นำมาผ่านกรรมวิธีการอบชุบ โลหะด้วยวิธีทางความร้อน โดยใช้วิธีการชุบแข็ง และวิธีการอบคืนไฟ ตามตารางค่าที่กำหนด ซึ่งมีตัวแปรในการอบชุบ ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ เวลาที่ใช้ในการอบชุบ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนไฟ เวลาที่ใช้ในการอบคืนไฟ และสารที่ใช้ในการชุบแข็ง จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

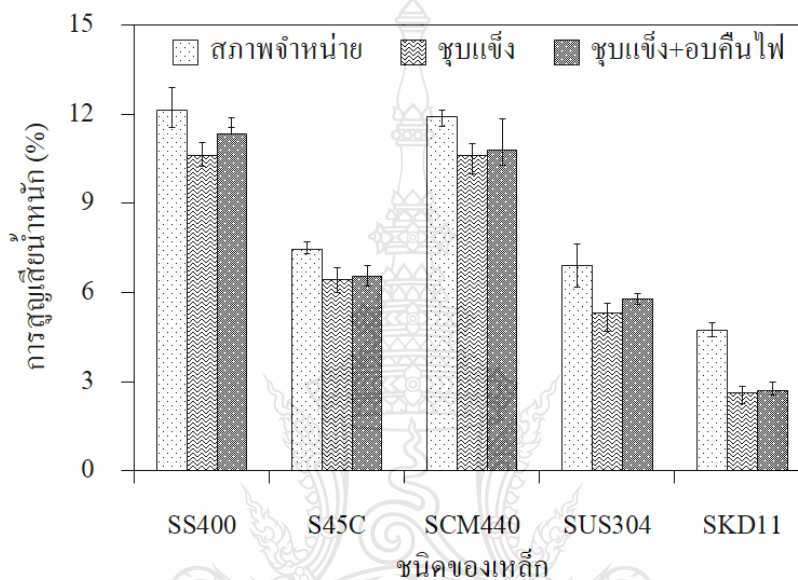
4.1 การทดสอบสมบัติทางกล

ผลการทดลองที่ได้การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของวัสดุและวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อน ในหัวข้อนี้ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองโดยนำวัสดุที่เลือกใช้ตามวัตถุประสงค์ทั้ง 4 ชนิด ไปเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมที่ใช้ในการผลิตเป็นใบตัดย่อยทางปาล์ม คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

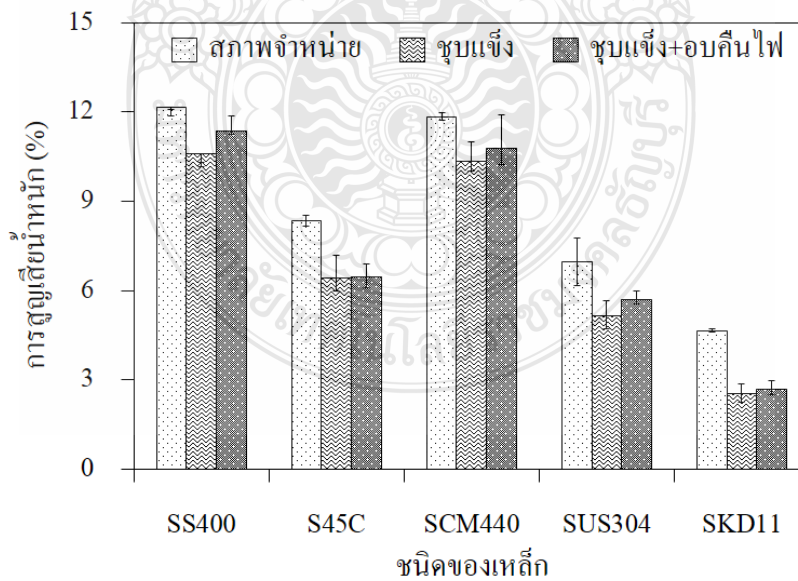
4.1.1 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

รูปที่ 4.1 จะแสดงให้เห็นถึงปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่ได้ผ่านกระบวนการทดสอบอัตราการสึกหรอมาแล้ว โดยชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักน้อยคือ ชิ้นงานทดสอบที่มีความต้านทานการสึกหรอสูง และชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักมากคือชิ้นงานทดสอบที่มีความต้านทานการสึกหรอต่ำ ซึ่งเหล็กกล้าแต่ละชนิดนั้นให้ค่าผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่แตกต่างกัน ในสภาวะการจำหน่าย พบว่า เหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าจะแสดงความต้านทานการสึกหรอได้สูงกว่า นอกจากนั้นในเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมอื่น ๆ นอกเหนือจากธาตุคาร์บอนจะส่งเสริมให้เหล็กกล้านั้น ๆ มีความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นได้ ดังเห็นได้จากค่าผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ซึ่งจะแสดงค่าความต้านทานสูงสุดในสภาวะการจำหน่ายที่ตำแหน่ง โคนใบตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) เมื่อทำการชุบแข็งเหล็กกล้าตามสภาวะการชุบแข็งที่กำหนด พบว่า การทดสอบความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด จะเพิ่มขึ้น 13% 14% 13% 26% และ 47% สำหรับเหล็กกล้า SS400 S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ และเมื่อทำการอบคืนไฟ เพื่อเพิ่มความเหนียวและคลายความเครียดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการชุบแข็งแล้ว พบว่า ค่าการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของ

เหล็กกล้าจะลดลง 10% 2% 5% 11% และ 7% สำหรับเหล็กกล้า SS400 S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการชุบแข็งและอบคืนไฟเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ จะส่งผลให้เหล็กกล้าเหล่านั้นมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยลง เนื่องจากกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนนั้น ส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบเกิดความต้านทานการสึกหรอสูงที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะเหล็กกล้าที่อยู่ในสภาวะการชุบแข็ง



(ก) โคนไบมิด



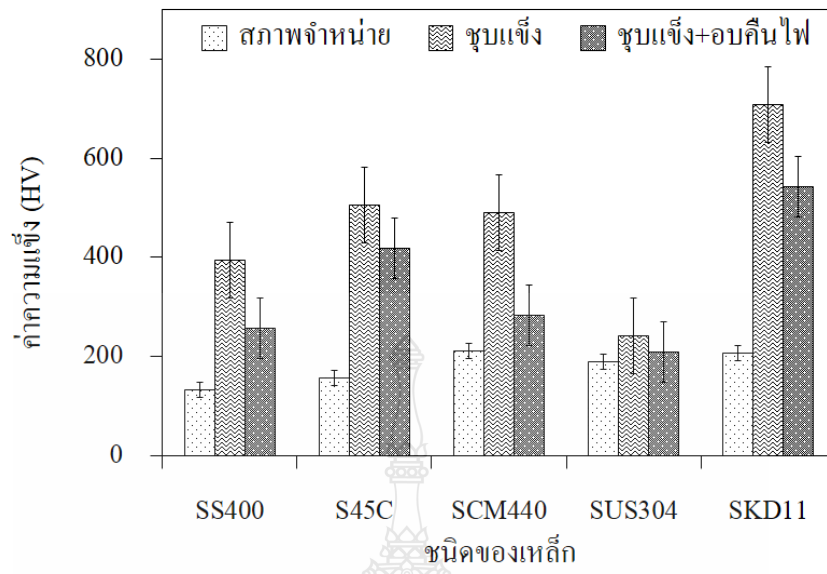
(ข) ปลายไบมิด

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็ก การอบชุบ และการสูญเสียน้ำหนัก

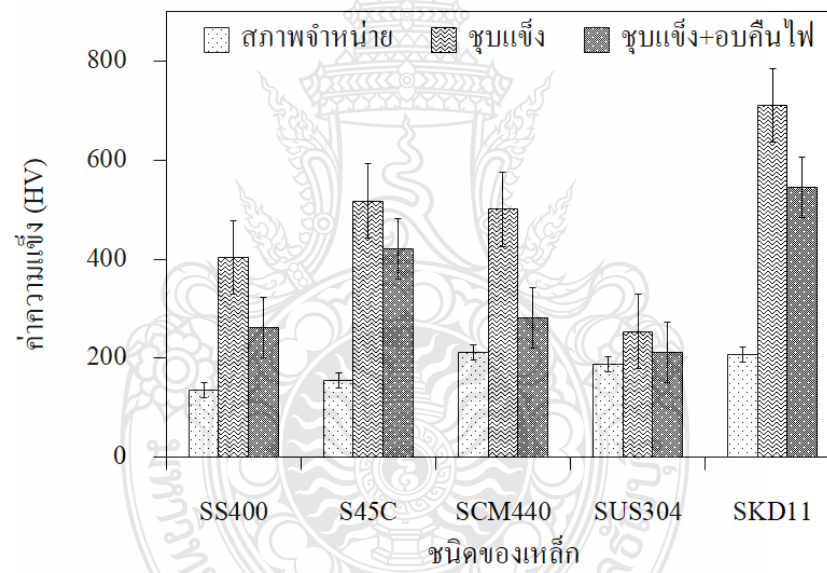
เมื่อเปรียบเทียบค่าการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่ตำแหน่งปลายและโคนไบต์ด้อย จะพบว่า ค่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่พบในตำแหน่งปลายไบต์จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับตำแหน่งโคนไบต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) อย่างไรก็ตาม พบว่า ที่ตำแหน่งปลายไบต์นั้นจะให้ค่าการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่สูงกว่าในตำแหน่งโคน 1% 2% 3% 3% และ 4% สำหรับเหล็กกล้า SS400 S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อทำการอบคืนไฟเหล็กกล้าเหล่านั้น พบว่า ค่าความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบจะลดลงเพียงเล็กน้อยที่ 1% 2% 1% 3% และ 7% สำหรับเหล็กกล้า SS400 S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ หากนำไปเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานการสึกหรอในสภาวะการชุบแข็ง

4.1.2 การทดสอบความแข็ง

รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทดสอบความต้านทานต่อการเสียดสีของวัสดุ ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่แปรผันตรงกับค่าความต้านทานการสึกหรอ โดยสังเกตได้จากค่าการทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ที่ให้ค่าผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอสูงสุดจากกลุ่มตัวอย่างเหล็กกล้าทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งในสภาวะการจำหน่าย สามารถตรวจสอบค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบได้ที่ 134 156 212 189 และ 207 HV สำหรับเหล็กกล้า SS400 S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ เมื่อทำการชุบแข็งเหล็กกล้าตามสภาวะที่กำหนด พบว่า ค่าการทดสอบความแข็งโดยเฉลี่ยในเหล็กกล้าแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้นถึง 396 506 489 242 และ 709 HV สำหรับเหล็กกล้า SS400 S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแล้วไปทำการอบคืนไฟ ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 45 นาที จะพบว่า ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของเหล็กกล้าแต่ละชนิดจะลดลงเหลือเพียง 259 419 284 209 และ 543 HV สำหรับในเหล็กกล้า SS400 S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบความแข็ง จะพบว่า เมื่อทำการชุบแข็งและอบคืนไฟเหล็กกล้าแต่ละชนิดจะส่งผลให้ค่าการทดสอบความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก นอกเหนือจากในเหล็กกล้า SUS304 ที่ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงภายในของโครงสร้างจุลภาค ภายหลังจากการได้รับความร้อนจากกรรมวิธีการอบชุบทางความร้อน อันได้แก่ การชุบแข็ง และการอบคืนไฟ



(ก) โคนใบมีด



(ข) ปลายใบมีด

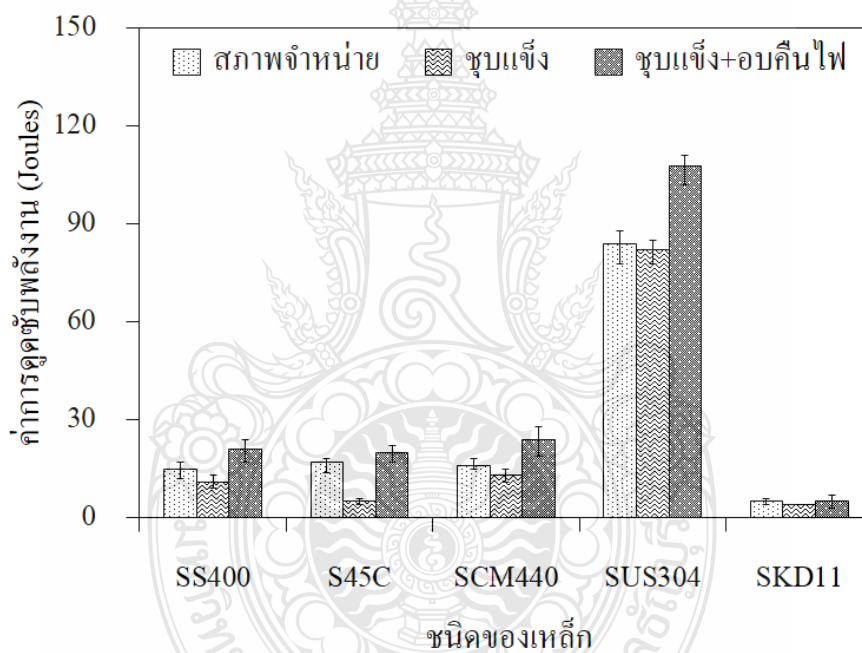
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็ก การอบชุบ และค่าความแข็ง

รูปที่ 4.2 (ข) เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งโดยเฉลี่ยระหว่างตำแหน่งโคนใบตัดย่อย และปลายใบตัดย่อย จะพบว่า ที่ตำแหน่งปลายใบตัดย่อยจะมีแนวโน้มของผลการทดสอบความแข็งที่มีทิศทางเช่นเดียวกับที่ได้ผลการทดสอบในตำแหน่งโคนใบตัด กล่าวคือ เหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิดนั้น จะมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันมากนักและอาจถือได้ว่าเป็นค่าความแข็งเฉลี่ยเดียวกัน โดยเฉพาะในการทดสอบชิ้นงานทดสอบที่อยู่ในสภาวะการจำหน้าย แต่อย่างไรก็ตาม ในสภาวะการชุบแข็งและสภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ พบว่า ตำแหน่งการทดสอบความแข็งบนชิ้นงานทดสอบที่เข้าใกล้กับบริเวณปลายคมมีคตัดหรือใกล้กับบริเวณขอบผิวของชิ้นงานทดสอบนั้น ค่าผลการทดสอบความแข็งที่ได้จะให้ค่าการทดสอบที่สูงกว่าตำแหน่งการทดสอบความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงานเพียงเล็กน้อย

4.1.3 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก โดยการนำชิ้นงานทดสอบ ที่อยู่ในสภาวะการจำหน้าย สภาวะการชุบแข็ง และสภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ ไปทำการทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบ Charpy กำหนดน้ำหนักในการกระแทกที่ 300 Joules เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุเมื่อผ่านกรรมวิธีการอบชุบด้วยความร้อนได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่มีค่ามากที่สุด คือ วัสดุที่อยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ทั้ง 3 สภาวะ ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่อยู่ในสภาวะการชุบแข็งและการอบคืนไฟ จะให้ค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกสูงสุดถึง 208 Joules เพิ่มขึ้นจากในสภาวะการจำหน้ายที่ให้ค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกเพียง 84 Joules และที่สภาวะการชุบแข็งซึ่งให้ค่าดูดซับพลังงานแรงกระแทกลดลงเหลือ 83 Joules จะสังเกตได้ว่า ค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 นั้น แปรผกผันกับค่าการทดสอบความแข็ง ซึ่งให้ค่าการทดสอบต่ำสุดจากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมจากค่าการทดสอบในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ ที่ให้ค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 24 Joules สภาวะการจำหน้ายให้ค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 16 Joules และสภาวะการชุบแข็งให้ค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 13 Joules ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟมีค่าดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 21 Joules สภาวะการจำหน้ายมีค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 15 Joules และสภาวะการชุบแข็งมีค่าดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 11 Joules ในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟมีค่าดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 20 Joules สภาวะการจำหน้ายมีค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 17 Joules และสภาวะการชุบแข็งมีค่าดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ 15 Joules และสุดท้ายในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟมีค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทก

ที่ 4 Joules และที่สภาวะการจำหน่ายและสภาวะการชุบแข็งที่มีค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่า จากผลการทดสอบดังที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น ค่าการทดสอบการดูดซับพลังงานแรงกระแทกจะมีค่าลดลงเมื่อนำเหล็กไปผ่านกระบวนการชุบแข็ง เนื่องจากกระบวนการชุบแข็งจะส่งผลทำให้เหล็กเกิดโครงสร้างภายในที่ทำให้เหล็กชนิดนั้นมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางเดียวกันก็จะส่งผลให้เหล็กนั้นเกิดความเปราะเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเหล็กที่ได้ผ่านกระบวนการชุบแข็งแล้วไปทำการอบคืนไฟ เพื่อให้เหล็กคลายความเครียดที่ขึ้นจากกระบวนการชุบแข็ง และเป็นการเพิ่มความเหนียวให้แก่ชิ้นงาน ซึ่งจากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าเหล็กทั้ง 4 ชนิด ที่อยู่ในสภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟนั้น จะมีค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นทั้งจากในสภาวะการชุบแข็งและสภาวะการจำหน่าย



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็ก การอบชุบ และค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด 300 Joules

4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

จากการทดสอบสมบัติทางกล ดังที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า วัสดุที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ทั้ง 4 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C เหล็กกล้าผสมต่ำเกรด SCM440 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 และเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 จะให้ค่าผลการทดสอบอัตราการสึกหรอและการทดสอบความแข็งที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นใบตัดย่อยเครื่องย่อยทางการเกษตรมากกว่าการใช้วัสดุเดิมที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 ซึ่งเป็นวัสดุที่เกษตรกรส่วน

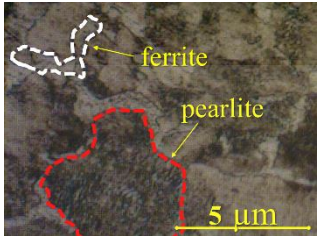
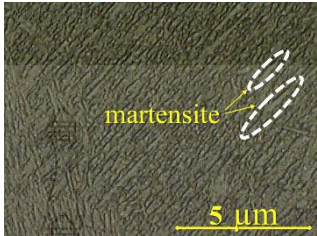
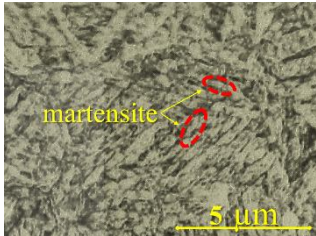
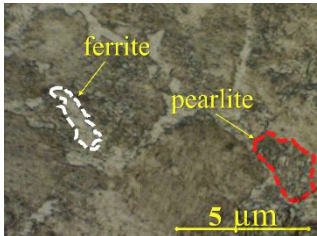
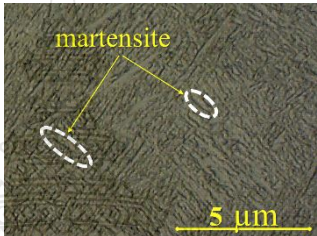
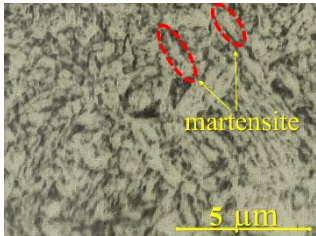
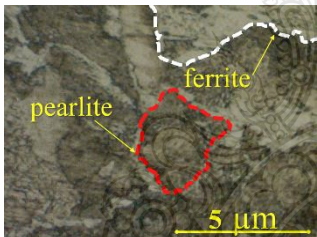
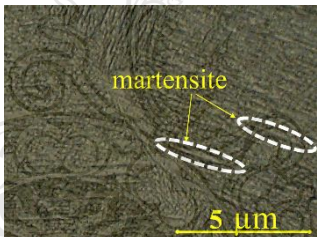
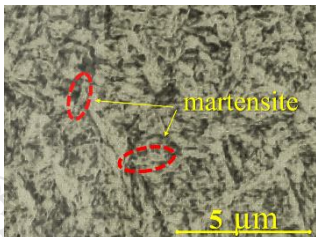
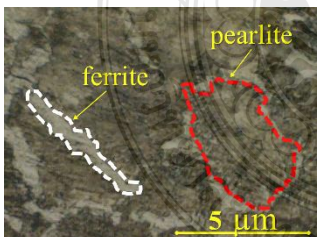
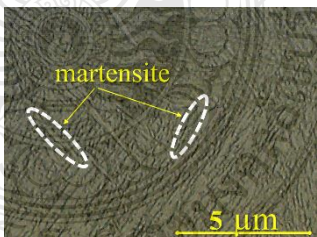
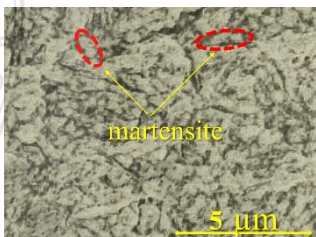
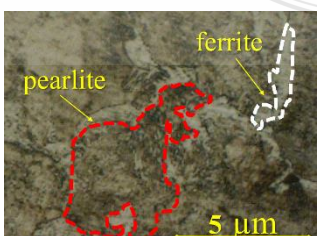
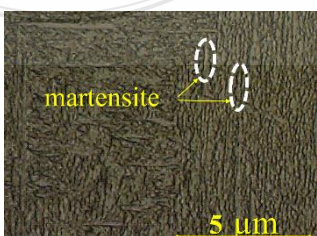
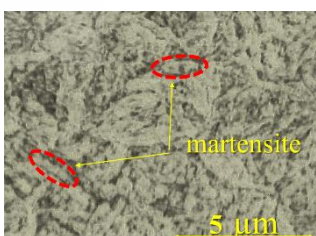
ใหญ่มักจะนำมาใช้งานกันอย่างมาก ในหัวข้อนี้ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพภายในเนื้อโลหะที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของวัสดุทั้ง 4 ชนิดเพิ่มเติม เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับสมบัติต่าง ๆ ของโลหะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อได้รับอิทธิพลจากกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน ได้ผลการตรวจสอบ ดังนี้

4.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน S45C

4.2.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

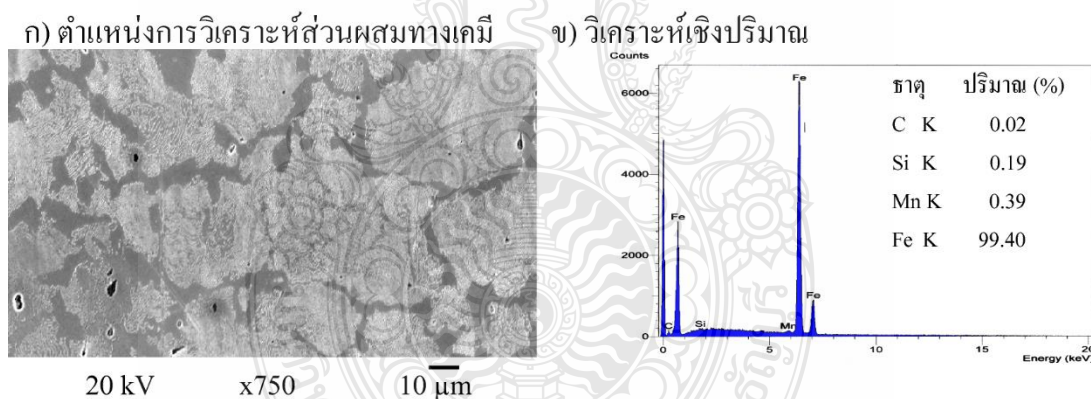
ตารางที่ 4.1 จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่า ในสภาวะการจำหน่าย ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่เป็นพื้นที่สีขาวโดยเฉลี่ยประมาณ 40% และโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นพื้นที่สีดำโดยเฉลี่ยประมาณ 60% กระจายตัวปะปนกันอยู่โดยทั่วทั้งผิวชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ [44] ในสภาวะการจำหน่ายจะพบว่าชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยในแต่ละจุดการทดสอบที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยอุณหภูมิที่กำหนด พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อโลหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ชิ้นงานได้รับความร้อนและถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว คาร์บอนที่อยู่ในเนื้อโลหะจะเกิดการละลายในออสเทนไนท์ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จะประกอบด้วยแท่งเสาคีมที่มีความเรียวยาวและมีปลายแหลมของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ มีการเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นทั่วทั้งบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ โดยเฉพาะการตรวจสอบในตำแหน่งที่เข้าใกล้กับด้านปลายแหลมของคมใบตัด แท่งเสาคีมเหล่านั้นจะมีการเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นมาก สามารถวัดขนาดความยาวโดยเฉลี่ยได้ 2.43 μm 2.93 μm 3.02 μm 3.40 μm และ 3.72 μm สำหรับระยะการตรวจสอบที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm จะเห็นได้ว่า โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะมีขนาดที่ละเอียดขึ้นเมื่อเข้าใกล้กับบริเวณคมใบตัด ส่งผลให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีความสามารถในการต้านทานต่อการสึกหรอและความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้น ในสภาวะการอบคืนไฟ พบว่า ลักษณะของแท่งเสาคีมที่ได้จากสภาวะนี้บริเวณปลายแท่งเสาคีมจะมีความกลมมนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ความร้อนในสภาวะการอบคืนไฟ ที่ส่งผลให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์บางส่วนนั้นเกิดการคืนสภาพกลับไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลต์ สามารถวัดขนาดความยาวของแท่งเสาคีมมาร์เทนไซต์โดยเฉลี่ยได้ 2.43 μm 2.95 μm 3.06 μm 3.49 μm และ 3.76 μm สำหรับระยะการตรวจสอบที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm และยังพบว่าในบริเวณปลายใบตัดย่อยนั้น ยังคงมีค่าความแข็งที่มากกว่าในบริเวณ โคน ใบตัดย่อยเช่นเดียวกับในสภาวะการชุบแข็ง ซึ่งเป็นไปตามปริมาณและขนาดของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ยังเหลืออยู่ภายในเนื้อโลหะ

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C

ระยะการ ตรวจสอบ	สภาวะการจำหน่าย	ชุบแข็ง	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ
0.5 cm			
1.0 cm			
1.5 cm			
2.0 cm			
2.5 cm			

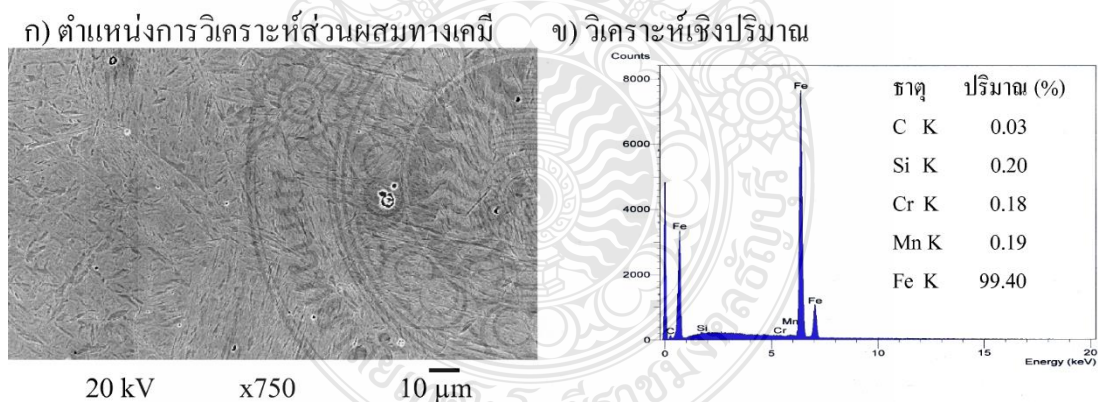
4.2.1.2 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM & EDS) ในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C

รูปที่ 4.3 (ก) แสดงภาพการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) บนพื้นผิวบริเวณปลายใบตัดย่อยเข้ามาในแนวตั้งกลางประมาณ 5 mm พบว่า โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่สภาวะการจำหน่าย จะประกอบด้วยเฟสที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (สีดำ) และเฟสที่เป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (สีเทา) เท่านั้น ค่าความแข็งที่ทดสอบได้อยู่ในระดับปานกลาง เมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) พบว่า ในสภาวะการจำหน่าย เหล็กกล้าคาร์บอน S45C จะประกอบไปด้วยธาตุหลักจำนวน 4 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) และ แมงกานีส (Mn) นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เพิ่มเติม พบว่า เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ในสภาวะการจำหน่าย จะประกอบด้วยปริมาณธาตุ เหล็ก (Fe) 99.40% คาร์บอน (C) 0.2% ซิลิกอน (Si) 0.19% และแมงกานีส (Mn) 0.39%



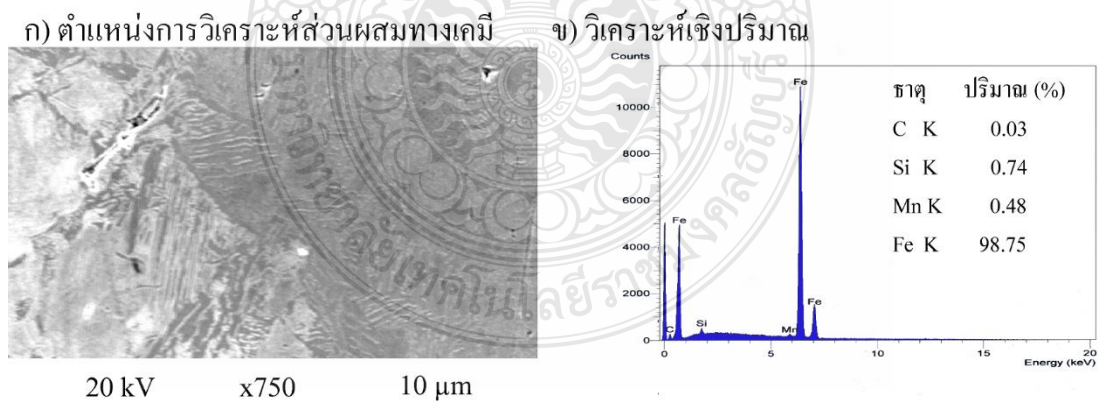
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C สภาวะการจำหน่าย

ในสภาวะการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน S45C จะได้ภาพการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ตำแหน่งถัดจากปลายใบตัดย่อยเข้ามาในแนวตั้งกลางประมาณ 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) พบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อเหล็กไปจากเดิมในสภาวะการจำหน่าย เกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ขึ้น หลังจากชิ้นงานทดสอบได้รับความร้อนที่เหมาะสมจากการเผาเหล็กในเตาโดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมและทำการชุบแข็งด้วยน้ำ เมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) พบว่า มีธาตุหลักที่ปรากฏขึ้นมาใหม่อีกจำนวน 1 ธาตุ คือ โครเมียม (Cr) ซึ่งเป็นส่วนผสมทางเคมีที่ทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลเหล็กกล้าคาร์บอน S45C นั้นให้ค่าการทดสอบความแข็งและให้ค่าการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับในสภาวะการจำหน่าย เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) จะพบว่า ปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ 99.40% ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) และซิลิกอน (Si) จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือ 0.03% และ 0.20% ตามลำดับ ปริมาณธาตุแมงกานีส (Mn) จะลดลงเหลือเพียง 0.19% และมีปริมาณธาตุโครเมียม (Cr) 0.18%



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C สภาวะการชุบแข็ง

เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งมาแล้ว เมื่อนำไปอบคืนไฟ จะได้ภาพการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) พบว่า ในสภาวะนี้ขนาดของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่พบในสภาวะการชุบแข็งนั้นได้เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์บางส่วนได้เกิดการสลายตัวกลับไปเป็นเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ ทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) พบว่า จำนวนธาตุหลักนั้นจะเหมือนกับเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ในสภาวะจำนำย คือ ประกอบด้วยธาตุหลักจำนวน 4 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน(C) ซิลิกอน (Si) และ แมงกานีส (Mn) ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของความร้อนจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนไฟ ส่งผลให้ธาตุโครเมียม (Cr) ที่เกิดขึ้นในสภาวะการชุบแข็งนั้นสลายตัวไป ส่งผลให้เหล็กในสภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟนี้ มีค่าความแข็งที่ลดลง และสามารถทนต่อการสึกหรอได้น้อยกว่าในสภาวะการชุบแข็ง เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เพิ่มเติม จะพบว่า แม้ปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) ที่ได้จากการตรวจสอบในสภาวะนี้จะลดลงเหลือเพียง 98.74% แต่ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) และแมงกานีส (Mn) นั้นเพิ่มขึ้นเป็น 0.3% 0.74 และ 0.48% ตามลำดับ ซึ่งจากระดับส่วนผสมทางเคมีข้างต้นนี้ จึงส่งผลให้เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ในสภาวะนี้ มีสมบัติทางด้านความแข็งและความสามารถในการทนต่อการสึกหรอที่น้อยกว่าสภาวะการชุบแข็ง แต่ยังคงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่าในสภาวะการจำนำย



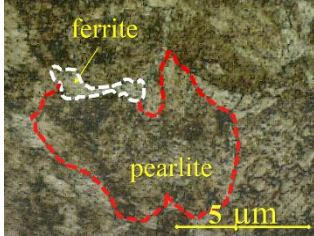
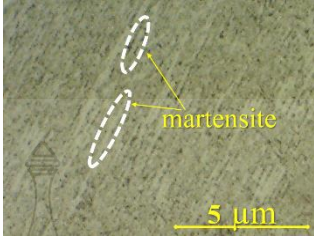

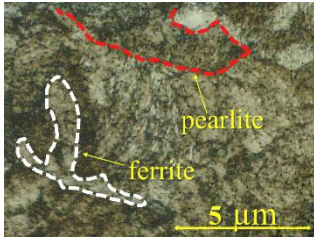
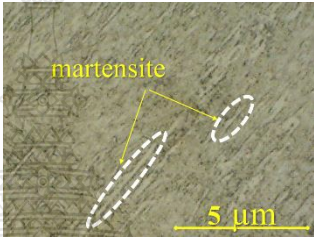
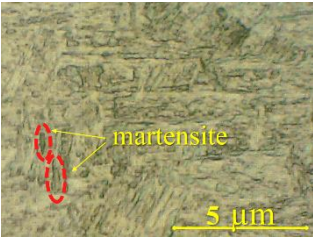
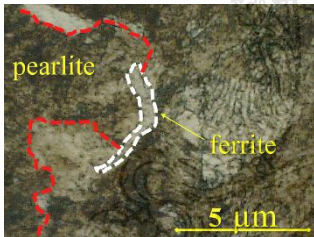
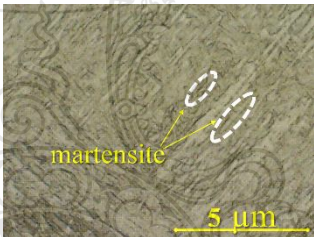
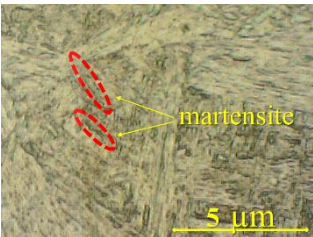
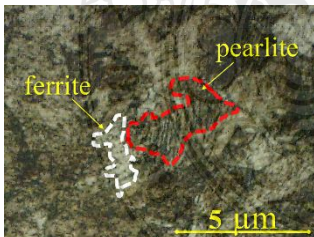
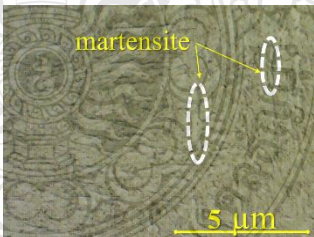
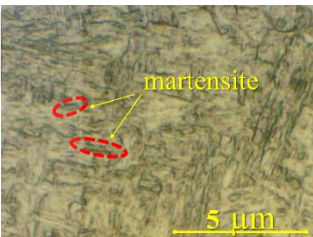
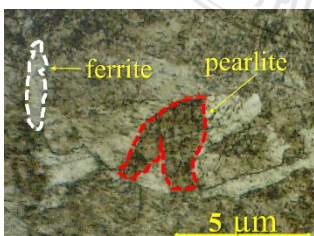
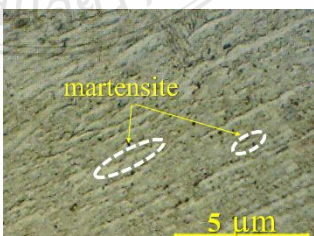
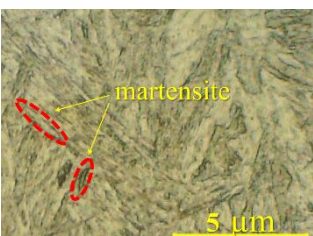
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ

4.2.2 เหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440

4.2.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

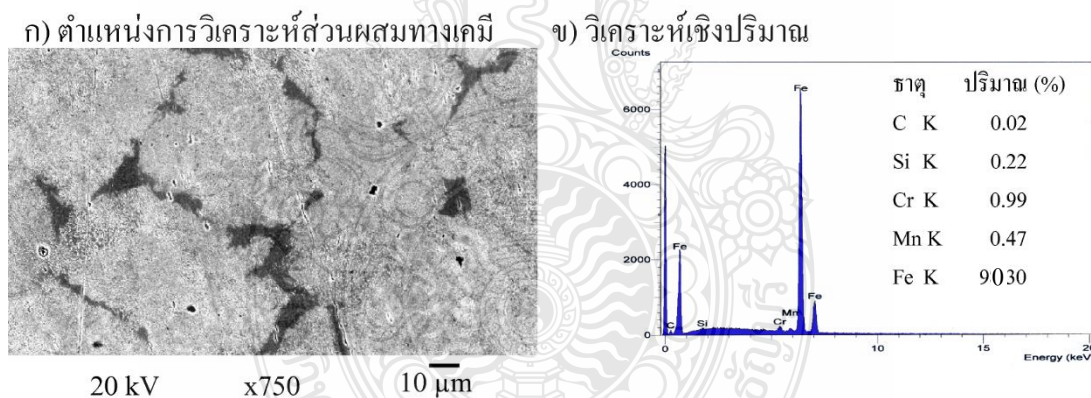
เมื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ลักษณะทางกายภาพของเหล็กชนิดนี้จะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกับที่พบในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C เป็นอย่างมาก กล่าวคือ ในสภาวะการจำหน่าย พบเพียงโครงสร้างเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพิร์ลไลท์ [45] เช่นเดียวกับเหล็กกล้าคาร์บอน S45C เท่านั้น โดยมีปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์โดยเฉลี่ยประมาณ 35% และโครงสร้างเพิร์ลไลท์โดยเฉลี่ยประมาณ 65% เมื่อนำชิ้นงานทดสอบไปให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมและผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยน้ำ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเนื้อโลหะเช่นเดียวกับที่พบในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C แต่ลักษณะโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์ที่พบในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 นั้น จะมีขนาดของแท่งเสาคาร์ไบด์ที่โตกว่า และปริมาณแท่งเสาคาร์ไบด์ที่พบค่อนข้างจะเบาบางกว่าที่พบในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C โดยสามารถวัดขนาดความยาวโดยเฉลี่ยได้ 5.92 μm 6.02 μm 7.70 μm 7.92 μm และ 8.23 μm สำหรับระยะการตรวจสอบที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm มีขนาดของโครงสร้างมาร์เทนไซต์โตขึ้นตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้มีความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะการจำหน่าย และในบริเวณปลายใบตัดจะมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณโคนใบตัด เมื่อนำชิ้นงานทดสอบไปทำการอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 250 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่า โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้จากกระบวนการชุบแข็งนั้นจะเกิดการสลายตัวจนเข้าใกล้ความเป็นเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลท์มากยิ่งขึ้น เช่นเดียวกับที่พบในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C สามารถวัดขนาดความยาวโดยเฉลี่ยได้ 4.28 μm 5.38 μm 6.74 μm 6.63 μm และ 6.20 μm สำหรับระยะการตรวจสอบที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm ซึ่งจะเห็นได้ว่า โครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้นจะมีขนาดที่โตขึ้น ๆ ตามลำดับระยะการตรวจสอบ บริเวณปลายใบตัดจะมีความแข็งมากกว่าโคน และค่าการทดสอบความแข็งที่ได้จากสภาวะนี้จะลดลงจากในสภาวะการชุบแข็ง

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440

ระยะการ ตรวจสอบ	จำหน่าย	ชุบแข็ง	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ
0.5 cm			
1.0 cm			
1.5 cm			
2.0 cm			
2.5 cm			

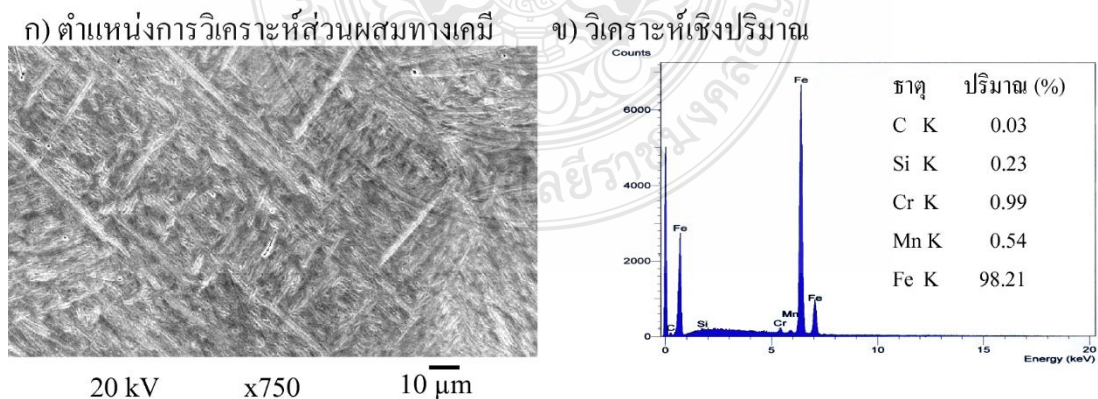
4.2.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM & EDS) ในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440

เหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่อยู่ในสถานะจำหน่ายจะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ในตำแหน่งที่อยู่ถัดจากด้านปลายใบตัดย่อยเข้ามาในแนวกึ่งกลางใบตัดประมาณ 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า โครงสร้างจุลภาคภายในเหล็กชนิดนี้ประกอบด้วยเฟสที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์สลับกับเฟสที่เป็นเพิร์ลไลต์ เมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) พบว่า ประกอบด้วยธาตุหลักจำนวน 5 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) และแมงกานีส (Mn) เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สถานะการจำหน่าย ปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่สามารถตรวจสอบได้ คือ เหล็ก (Fe) 98.31% คาร์บอน (C) 0.02% ซิลิกอน (Si) 0.22% โครเมียม (Cr) 0.99% และแมงกานีส (Mn) 0.47%



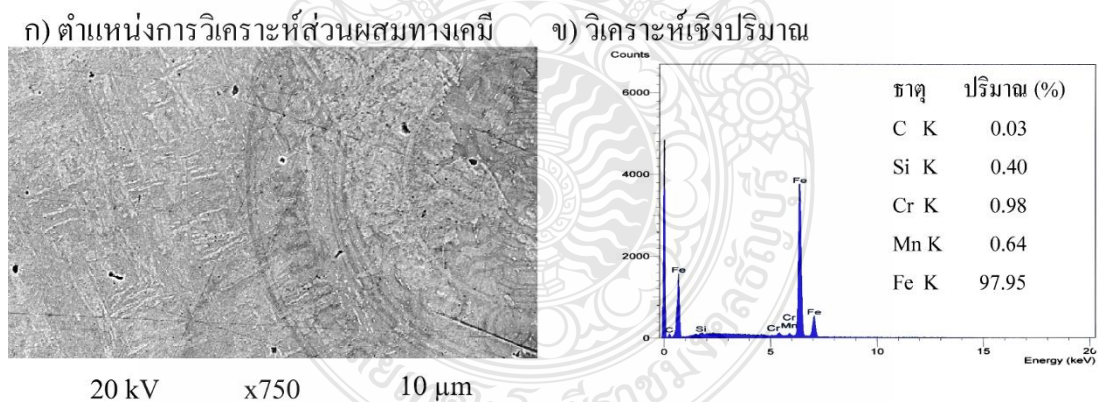
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 สถานะการจำหน่าย

รูปที่ 4.7 แสดงภาพการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สภาวะการชุบแข็ง จะได้ลักษณะ โครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) จะเห็นได้ว่า ภายหลังจากการชุบแข็งเหล็กชนิดนี้ ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกับที่เกิดในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ในช่วงของอุณหภูมิที่เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้โครงสร้างภายในเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ขึ้น ส่งผลให้เหล็กกล้าคาร์บอน SCM440 นี้มีค่าการทดสอบความต้านทานการสึกหรอและค่าการทดสอบความแข็งเพิ่มขึ้นกว่าเท่าตัว เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในสภาวะการชุบแข็งของเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 นี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงธาตุหลักเกิดขึ้น แต่หากเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีในการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7 (ข) ระหว่างเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สภาวะการชุบแข็งและสภาวะการจำหน่าย ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 (ข) พบว่า ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากภายหลังจากทำการชุบแข็ง โดยมีปริมาณธาตุที่ตรวจสอบได้ คือ 0.02% 0.23% และ 0.99% สำหรับธาตุคาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าในธาตุเหล็ก (Fe) จะมีปริมาณธาตุที่ลดลงจากในสภาวะการจำหน่ายเหลือเพียง 98.21% ในทางตรงข้ามจะเห็นได้ว่า ปริมาณธาตุแมงกานีสจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.55% ซึ่งจะส่งผลให้เหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สภาวะนี้ ได้ค่าผลการทดสอบความแข็งเพิ่มขึ้นจากค่าการทดสอบเดิมไม่มากนัก



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 สภาวะการชุบแข็ง

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่ผ่านการบวมการอบคืนไฟมาแล้ว จะแสดงลักษณะ โครงสร้างที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้เกิดการสลายตัวไปบางส่วนจากที่พบในสภาวะการชุบแข็ง เมื่อวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) โดยใช้การวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) จะพบธาตุต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) พบว่ายังคงมีธาตุหลักจำนวน 5 ธาตุ เท่าเดิม คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) และแมงกานีส (Mn) เช่นเดียวกับในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สภาวะการจำหน่ายและสภาวะการชุบแข็ง เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) พบว่า ภายหลังจากกรรมวิธีการอบคืนไฟ ปริมาณธาตุหลักแต่ละชนิดที่ตรวจสอบได้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป พบว่า มีปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ตรวจสอบได้ในสภาวะนี้ คือ เหล็ก (Fe) 97.95% คาร์บอน (C) 0.03% ซิลิกอน (Si) 0.40% โครเมียม (Cr) 0.98% และแมงกานีส (Mn) 0.64% จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุที่ไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการชุบแข็ง เหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ในสภาวะนี้จึงยังคงมีความแข็งแรงและความสามารถในการทนต่อการสึกหรอที่ลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าในสภาวะการจำหน่าย



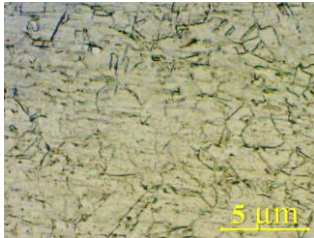
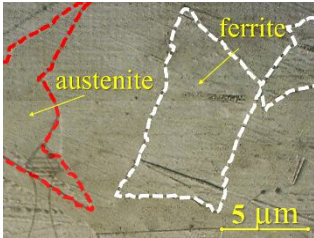
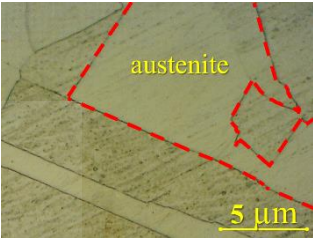
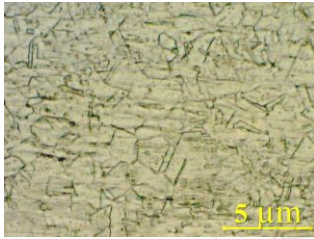
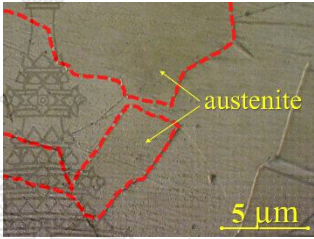
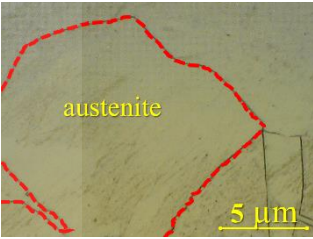
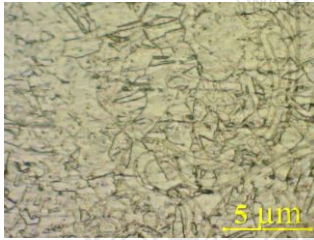
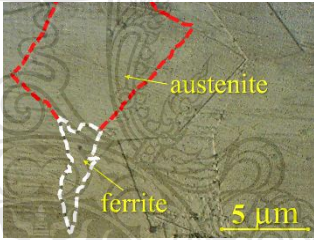
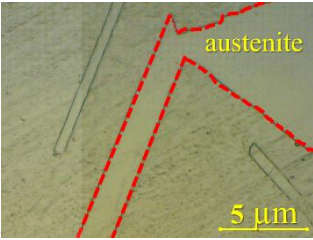
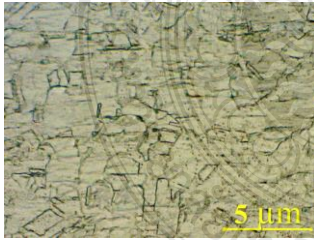
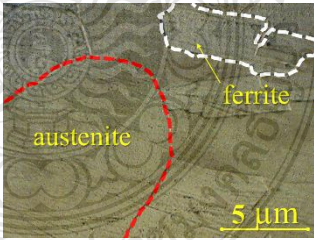
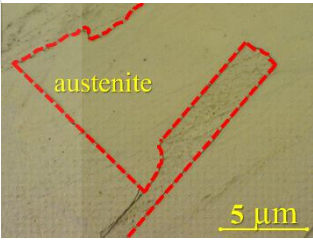
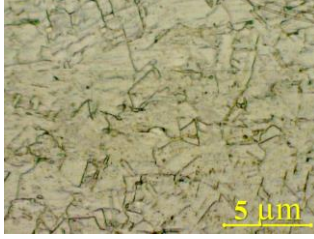
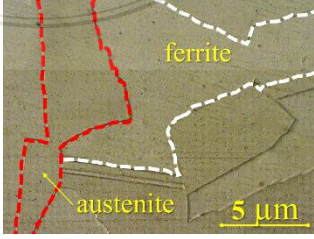
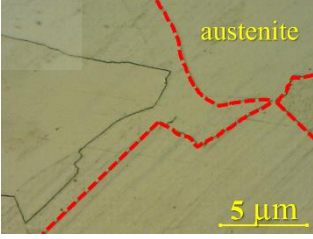
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ

4.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

4.2.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) [46]

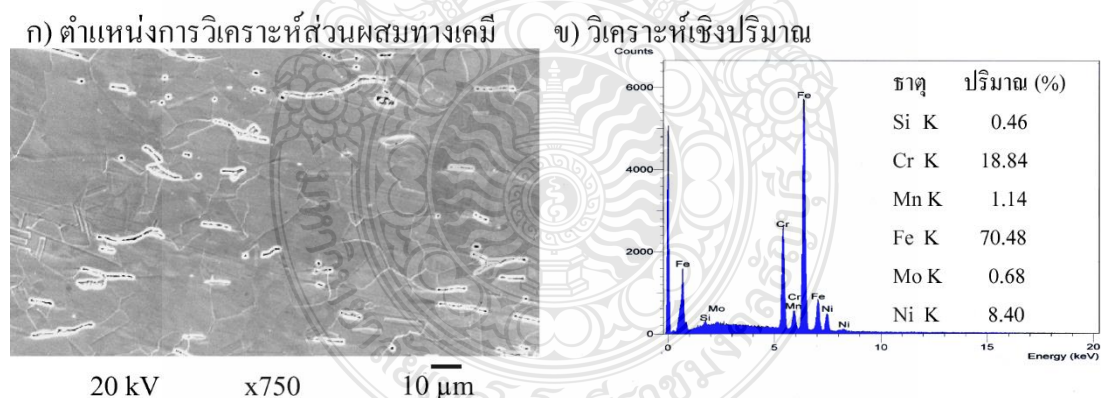
จากตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 นั้น เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ถูกจัดอยู่ในประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนเนติก ดังนั้น ในสภาวะการจำหน่าย จึงพบแค่เพียงโครงสร้างพื้นฐานที่มีลักษณะคล้ายโครงตาข่ายผลึกที่เรียกว่า โครงสร้างออสเทนไนท์ ที่กระจายตัวอยู่โดยทั่วทั้งบริเวณผิวชิ้นงานเท่านั้น มีความยาวโครงสร้างออสเทนไนท์เฉลี่ย 5.59 μm 5.11 μm 5.60 μm 4.56 μm และ 4.36 μm สำหรับระยะการตรวจสอบที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm ตามลำดับ เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการชุบแข็งและทำการตรวจสอบที่บริเวณผิวชิ้นงาน พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 จะเกิดการสะสมของคาร์บอนที่บริเวณขอบเกรน ลักษณะ โครงสร้างคล้ายแผ่นผลึก บริเวณขอบของผนังจะเป็นเส้นตรง ซึ่งคล้ายกับการนำแผ่นกระเบื้องแตกมาเรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นผลึกของโครงสร้างแบบออสเทนไนท์ขึ้นสลับในพื้นที่ที่เป็นเบสไน โครงสร้างแบบเฟอร์ไรท์ สามารถวัดขนาดโครงสร้างที่เกิดการสะสมของคาร์บอนที่บริเวณขอบเกรน โดยเฉลี่ยได้ 8.56 μm 7.00 μm 8.53 μm 8.88 μm และ 8.50 μm สำหรับระยะการตรวจสอบที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณปลายใบตัดจะมีความแข็งมากกว่าโคน และในสภาวะการอบคืนไฟของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 พบว่า ขนาดของเกรนผลึกที่ได้จะมีขนาดที่โตขึ้นจากในสภาวะการชุบแข็งเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อชิ้นงานได้รับกระตุ้นด้วยความร้อนอีกครั้งจากการอบคืนไฟแล้ว โครงสร้างเดิมก็จะเกิดการขยายตัวของเมทริกซ์ภายในเนื้อโลหะ ส่งผลให้เกรนที่ได้มีขนาดที่โตขึ้น และมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ลดลงจากในสภาวะการชุบแข็ง ซึ่งจากการทดสอบสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 นั้น เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ยังคงเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ ที่เกิดการสะสมของคาร์ไบด์ที่เปลี่ยนแปลงไปสะสมตามขอบเกรนเท่านั้น ดังนั้น ค่าผลการทดสอบที่ได้จึงมีความใกล้เคียงกันในทุก 3 สภาวะการทดสอบ ในสภาวะการชุบแข็งและสภาวะการอบคืนไฟจึงดีขึ้นจากเดิมในสภาวะจำหน่ายเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

ระยะการ ตรวจสอบ	จำหน่าย	ชุบแข็ง	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ
0.5 cm			
1.0 cm			
1.5 cm			
2.0 cm			
2.5 cm			

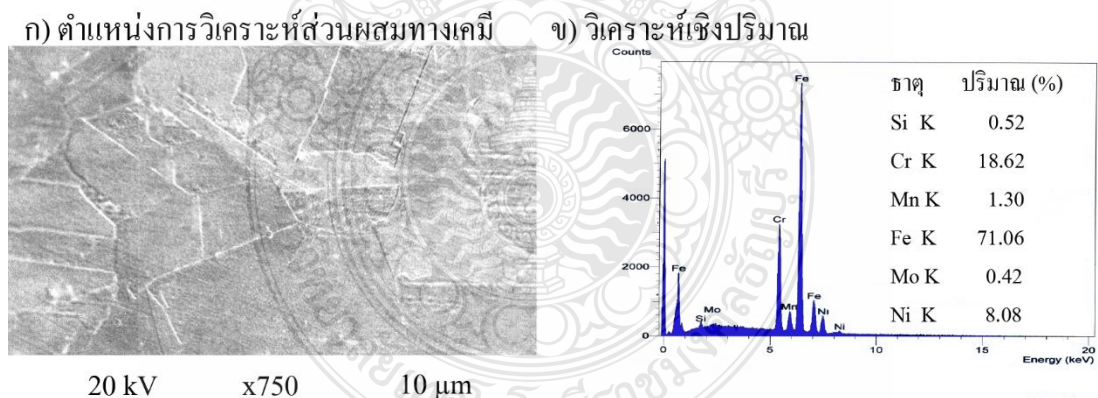
4.2.3.2 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM & EDS) ในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่อยู่ในสถานะจำนำย เมื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ในตำแหน่งจากด้านปลายใบตัดย่อยเข้ามาในแนวกึ่งกลางประมาณ 5 mm จะพบโครงสร้างจุลภาคที่เป็นโครงสร้างเฟสออสเทนไนท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) ทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) ในบริเวณเดียวกัน จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) ซึ่งจากผลที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงธาตุหลักที่เป็นส่วนผสมทางเคมีภายในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ทั้งหมดจำนวน 6 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และ โมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งจะเห็นได้ว่าแต่ละธาตุที่ถูกนำมาผสม (Alloying element) ในเหล็กชนิดนี้ จะช่วยเพิ่มสมบัติในด้านการทนต่อการสึกหรอ และมีความเหนียวสูง จึงทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เพิ่มเติม จะพบปริมาณธาตุแต่ละชนิด คือ เหล็ก (Fe) 70.48% นิกเกิล (Ni) 8.40% ซิลิกอน (Si) 0.46% โครเมียม (Cr) 18.84% แมงกานีส (Mn) 1.14% และ โมลิบดีนัม (Mo) 0.68%



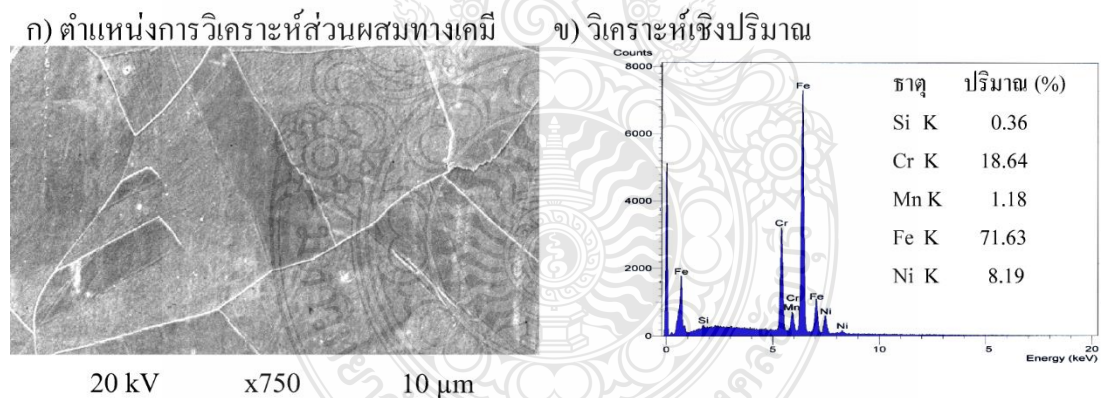
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 สถานะการจำนำย

รูปที่ 4.10 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 สภาวะการชุบแข็ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) พบลักษณะโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ แต่มีการสะสมของโครเมียมคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน ส่งผลให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีค่าการทดสอบความแข็งที่ได้ไม่นั้นไม่ต่างจากในสภาวะการจำหน่ายมากนัก เพราะยังคงเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์แบบเดิมอยู่ เห็นได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) ในบริเวณเดียวกันกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ได้ผลการตรวจสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักที่เป็นส่วนผสมทางเคมีจำนวน 6 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และ โมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งในสภาวะการชุบแข็งนี้ พบว่า ปริมาณธาตุที่ตรวจสอบได้ค่อนข้างที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับในสภาวะการจำหน่าย และเมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เพิ่มเติม พบว่า ปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) ซิลิกอน (Si) และแมงกานีส (Mn) จะสูงขึ้นจากเดิมในสภาวะการจำหน่ายเป็น 71.06% 0.52% และ 1.30% ตามลำดับ และปริมาณธาตุนิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) และ โมลิบดีนัม (Mo) ลดลงจากเดิมเหลือเพียง 8.08% 18.62% และ 0.42% ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 สภาวะการชุบแข็ง

เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่ผ่านกรรมวิธีการชุบแข็งแล้วมาทำการอบคืนไฟ การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) เช่นเดียวกับในสภาวะการจำหน่ายและสภาวะการชุบแข็ง จะได้ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) ซึ่งจะเห็นว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคในสภาวะนี้ได้เกิดการขยายตัวของขนาดเกรนที่โตขึ้นจากในสภาวะการชุบแข็ง ส่งผลให้ค่าความแข็งในสภาวะนี้ลดลง เมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) ในบริเวณที่แสดงในรูปที่ 4.11 (ก) ได้ผลการตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) จะพบว่า ธาตุหลักที่เป็นส่วนผสมทางเคมีที่ตรวจสอบพบในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่สภาวะจำหน่าย ในจำนวน 6 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และ โมลิบดีนัม (Mo) นั้น ธาตุโมลิบดีนัม (Mo) ได้เกิดการสลายตัวไปภายหลังจากการนำเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ในสภาวะการชุบแข็งไปผ่านกระบวนการอบคืนไฟ ซึ่งจากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เพิ่มเติม พบว่า ในสภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟนี้ จะมีปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) 71.63% ซิลิกอน (Si) 0.36% แมงกานีส (Mn) 1.18% ธาตุ นิกเกิล (Ni) 8.19% และ โครเมียม (Cr) 18.64%



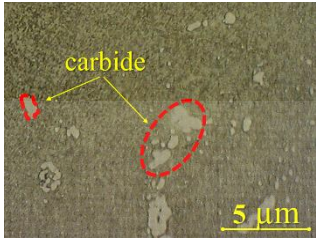
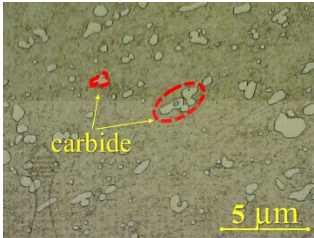
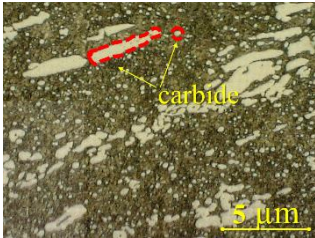
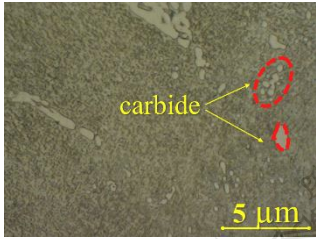
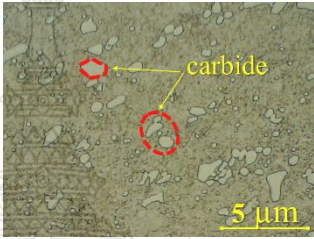
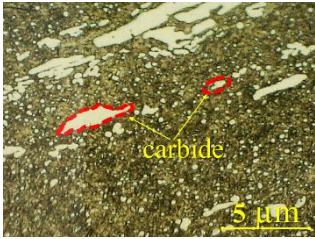
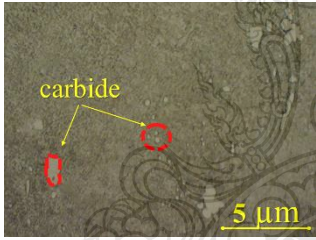
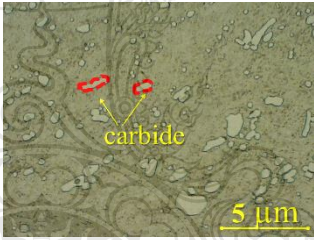
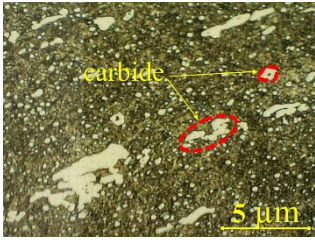
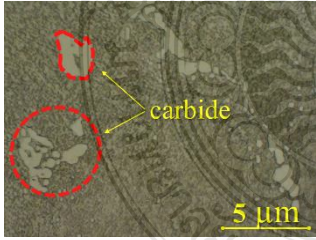
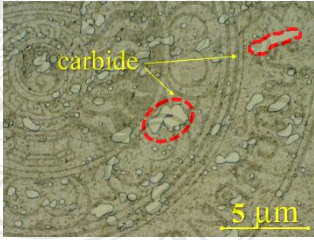
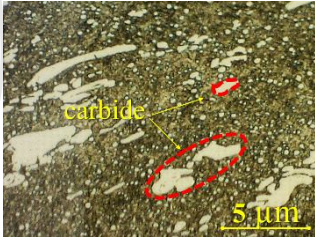
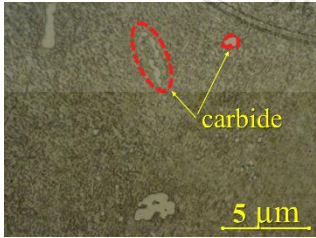
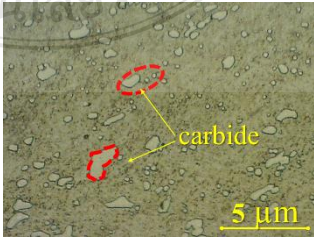
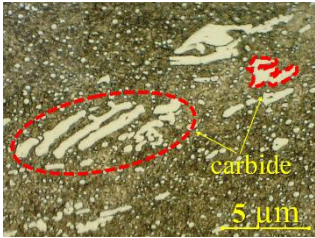
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ

4.2.4 เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

4.2.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) [47]

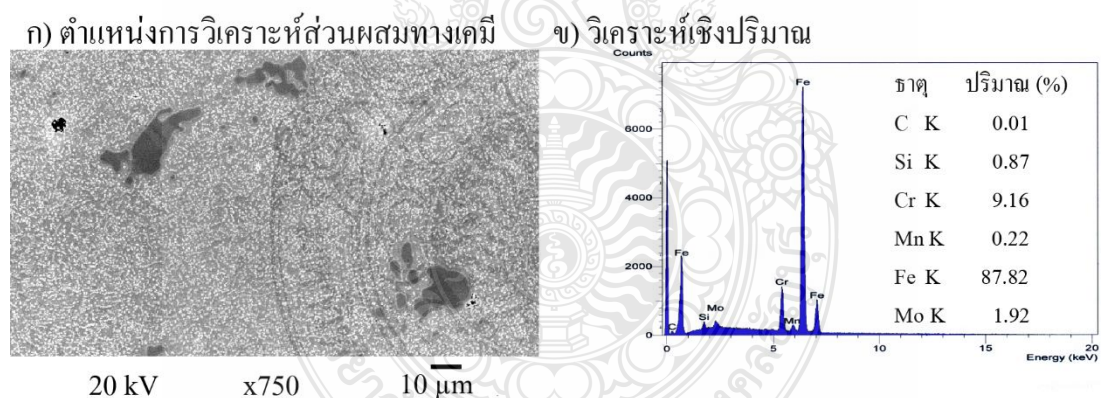
เมื่อทำการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคภายในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ทั้ง 3 สถานะนั้น ในสถานะการจำหน่าย พบว่า โครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อโลหะจะประกอบด้วยโครงสร้างผลึกที่เรียกว่า คาร์ไบด์ (สีขาว) อย่างง่ายในลักษณะที่เป็นรูปร่างต่าง ๆ จะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ โดยมีขนาดของคาร์ไบด์ที่วัดได้โดยเฉลี่ยที่ระยะ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm คือ $2.38 \mu\text{m}$ $2.49 \mu\text{m}$ $2.53 \mu\text{m}$ $2.67 \mu\text{m}$ และ $3.01 \mu\text{m}$ ตามลำดับ เมื่อนำชิ้นงานทดสอบไปผ่านกระบวนการชุบแข็ง พบว่า ภายในโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมในสถานะการจำหน่าย เกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีขนาดเล็กขึ้นกระจายอยู่ภายในเนื้อเหล็กโดยทั่ว โครงสร้างพื้นฐาน และคาร์ไบด์ที่ได้จากการตรวจสอบชิ้นงานในสถานะการชุบแข็งนั้น จะเห็นได้ว่าเม็ดคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่มีความกลมมนขึ้น และมีขนาดเม็ดที่เล็กลง โดยจะกระจายตัวอยู่โดยทั่วทั้งโครงสร้างพื้นฐานทั้งที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์และโครงสร้างเฟอร์ไรท์ โดยมีขนาดคาร์ไบด์ที่วัดได้โดยเฉลี่ย $3.06 \mu\text{m}$ $3.11 \mu\text{m}$ $3.35 \mu\text{m}$ $3.41 \mu\text{m}$ และ $3.67 \mu\text{m}$ สำหรับระยะการตรวจสอบที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์จะกระจายตัวน้อยลงเมื่อระยะการทดสอบลึกเข้าไปในชิ้นงานตามลำดับ และเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังจากการอบคืนไฟเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 แล้ว พบว่า ภายในโครงสร้างจะเกิดการรวมตัวกันของคาร์ไบด์เกิดขึ้นอีกครั้ง ส่งผลให้ได้เม็ดคาร์ไบด์ที่ได้นั้นมีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กสลับกันอยู่โดยทั่ว โดยมีปริมาณคาร์ไบด์ที่วัดได้โดยเฉลี่ย $2.84 \mu\text{m}$ $3.82 \mu\text{m}$ $4.20 \mu\text{m}$ $4.51 \mu\text{m}$ และ $4.46 \mu\text{m}$ สำหรับระยะการตรวจสอบที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 cm ตามลำดับ ซึ่งจะพบคาร์ไบด์ได้มากขึ้นที่บริเวณปลายมีด ส่งผลให้บริเวณปลายมีดจะมีความแข็งที่มากกว่าบริเวณโคนมีดด้วย

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

ระยะการ ตรวจสอบ	จำหน่าย	ชุบแข็ง	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ
0.5 cm			
1.0 cm			
1.5 cm			
2.0 cm			
2.5 มม			

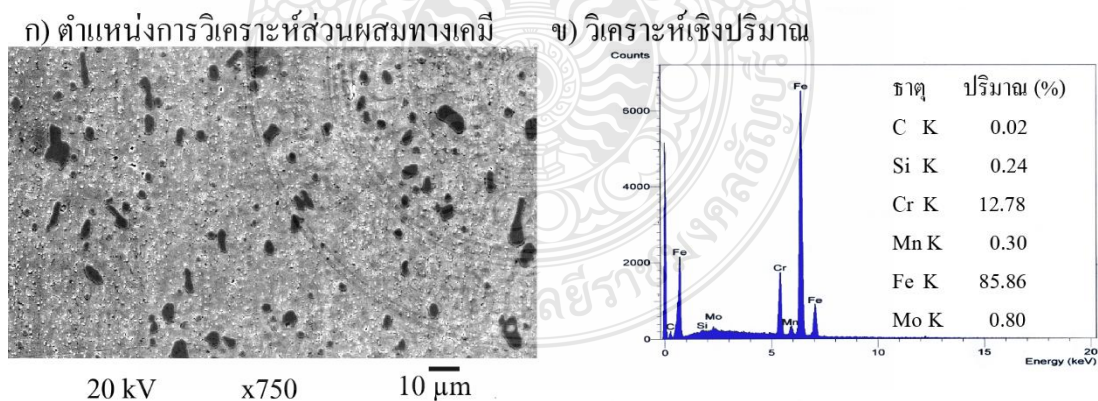
4.2.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM & EDS) ในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

รูปที่ 4.12 (ก) แสดงการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ในตำแหน่งด้านปลายใบตัดย่อยเข้ามาในแนวกึ่งกลางประมาณ 5 mm ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) พบว่า โครงสร้างจุลภาคจะประกอบไปด้วยบริเวณที่เป็นคาร์ไบด์ (สีดำ) ที่มีลักษณะเป็นรูปร่างต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดเล็ก กระจายตัวอยู่ในพื้นที่ที่เป็น โครงสร้างพื้นฐานในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุหลักจำนวน 6 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และ โมลิบดินัม (Mo) เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) จะพบว่ามีปริมาณธาตุที่เป็นส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเหล็กชนิดนี้ คือ เหล็ก (Fe) 87.82% คาร์บอน (C) 0.01% ซิลิกอน (Si) 0.87% โครเมียม (Cr) 9.16% แมงกานีส (Mn) 0.21% และ โมลิบดินัม (Mo) 1.92%



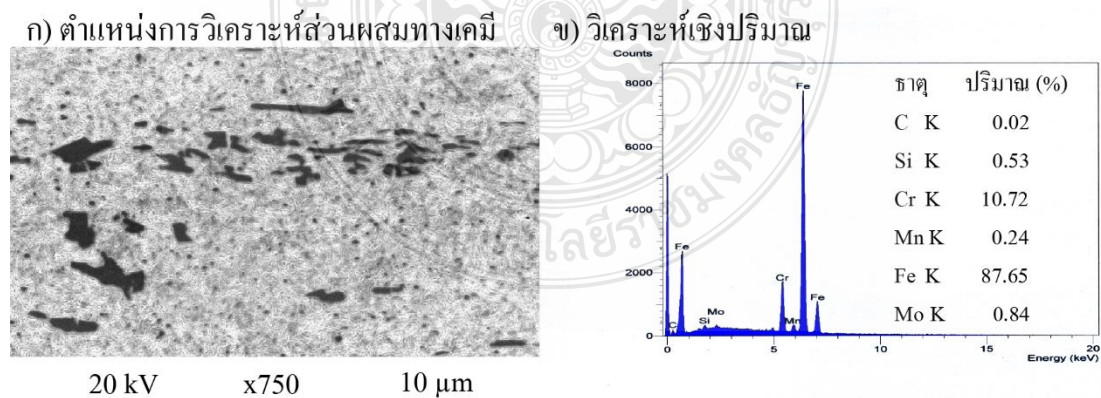
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 สภาวะการจำหน่าย

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ที่ผ่านกรรมวิธี การชุบแข็ง เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) จะพบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคาร์ไบด์ที่กระจายตัวอยู่ใน โครงสร้าง พื้นฐานของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ขึ้น กลายเป็นเม็ดคาร์ไบด์ที่มีขนาดเม็ดที่เล็กลงและจะกระจาย ตัวกันอย่างสม่ำเสมอภายใน โครงสร้างพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) ทำการวิเคราะห์ธาตุเชิง คุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ข) พบว่า ธาตุหลัก นั้นยังคงมีอยู่เช่นเดิมจากในสถานะการจำหน่ายครบทั้ง 6 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และ โมลิบดีนัม (Mo) เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เพิ่มเติม พบว่า ปริมาณธาตุ คาร์บอน (C) โครเมียม (Cr) และแมงกานีส (Mn) จะมีปริมาณที่สูงขึ้น เมื่อชิ้นงานทดสอบได้ผ่านกรรมวิธีการชุบแข็ง โดยมีปริมาณธาตุที่ตรวจสอบได้ ของธาตุคาร์บอน (C) 0.02% โครเมียม (Cr) 12.78% และแมงกานีส (Mn) 0.30% แต่ในส่วนของ ปริมาณธาตุที่มีค่าลดลง คือ ซิลิกอน (Si) เหล็ก (Fe) และ โมลิบดีนัม (Mo) ที่มีปริมาณธาตุอยู่ที่ 0.23% 85.86% และ 0.80% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในสถานะการชุบแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 นี้ ธาตุคาร์บอน (C) ได้เกิดการรวมตัวกับธาตุอื่น ๆ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก กระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงานทดสอบ ซึ่งส่งผลทำให้เหล็กในสถานะนี้มีค่าการทดสอบความแข็งและการ ทนต่อการสึกหรอที่ดีที่สุดจากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 สถานะการชุบแข็ง

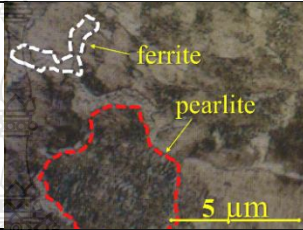
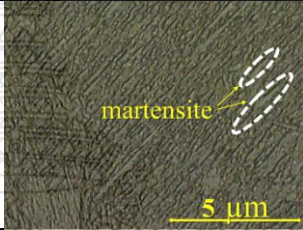
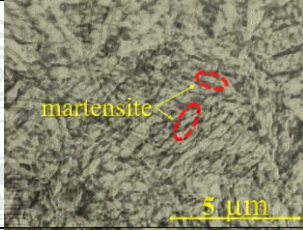
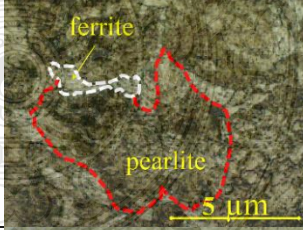

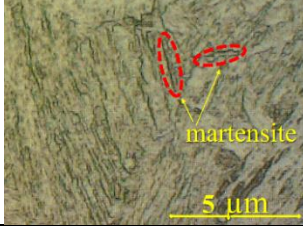
รูปที่ 4.14 แสดงการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ในสถานะที่ผ่านกรรมวิธีการชุบแข็งและนำไปอบคืนไฟ โดยทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) พบว่า ในสถานะนี้ ลักษณะของเม็ดกลมมนที่กระจายตัวอยู่ในพื้นที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ที่เกิดในสถานะการชุบแข็ง ได้มีการขยายขนาดของเม็ด มีความเร็วเพิ่มขึ้น และการกระจายในพื้นที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานค่อนข้างจะอยู่กันเป็นกลุ่มเล็ก-ใหญ่สลับกันไป ทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมทางเคมีในชิ้นงานทดสอบ ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) จะเห็นได้ว่าจำนวนธาตุหลักที่พบในการตรวจสอบโดยวิธีนี้ยังคงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมทั้งในสถานะการจำหน่ายและสถานะการชุบแข็ง ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุหลักจำนวน 6 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และ โมลิบดีนัม (Mo) เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) และเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ในสถานะการชุบแข็งเพิ่มเติม พบว่า ธาตุเหล็ก (Fe) จะเพิ่มปริมาณธาตุขึ้นเป็น 87.65% และ โครเมียม (Cr) จะลดลงเหลือเพียงแค่ 10.72% ส่วน (C) ซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) และ โมลิบดีนัม (Mo) จะมีปริมาณธาตุที่ไม่แตกต่างจากเดิมในสถานะการชุบแข็งมากนัก คือ 0.02% 0.52% 0.24% และ 0.84% ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ในสถานะนี้ยังคงมีความแข็ง ความเหนียวและความสามารถในการทนต่อการสึกหรอที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ในสถานะการชุบแข็ง

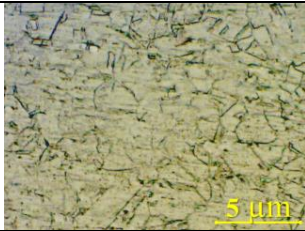
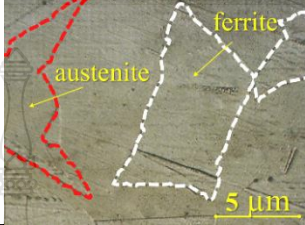

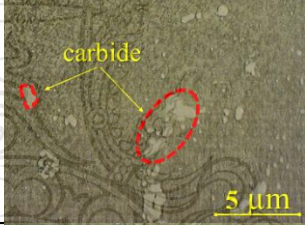

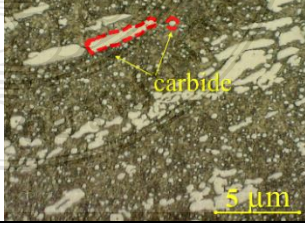


รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ

จากข้อมูลทั้งหมด ดังที่แสดงในข้างต้นนั้น สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิดที่อยู่ในสภาวะการจำหน่าย การชุบแข็ง และการอบคืนไฟ กับค่าผลการทดสอบความแข็งได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และผลการทดสอบสมบัติทางกล

วัสดุ	สภาวะ	โครงสร้างจุลภาค	ค่าความแข็งเฉลี่ย
S45C	จำหน่าย		154.6 Hv
	ชุบแข็ง		517.2 Hv
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ		421.6 Hv
SCM440	จำหน่าย		211.2 Hv
	ชุบแข็ง		500.4 Hv
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ		281.4 Hv

วัสดุ	สภาวะ	โครงสร้างจุลภาค	ค่าความแข็งเฉลี่ย
	จำหน่าย		187.4 Hv
SUS304	ชุบแข็ง		254.0 Hv
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ		211.1 Hv
	จำหน่าย		207.7 Hv
SKD11	ชุบแข็ง		710.3 Hv
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ		544.6 Hv

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

นอกเหนือจากการพิจารณาถึงความเหมาะสมจากค่าผลการทดสอบสมบัติทางกลแล้ว ยังคงมีหลักการอีกหนึ่งอย่างที่มีความสำคัญ ซึ่งมักถูกนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจเพื่อเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน นั่นคือ การพิจารณานำหลักในการลดต้นทุนโดยการเลือกใช้วัสดุที่ทำให้เกิดต้นทุนรวมน้อยที่สุด โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อคุณภาพเป็นสำคัญมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อความคุ้มค่าและเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตในงานวิจัยนี้ ได้จำแนกต้นทุนตามลักษณะส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (Cost of a Manufactured Product) มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย ค่าแรงงาน ค่าวัตถุดิบ และค่าใช้จ่ายในการผลิตอื่น ๆ โดยที่

ต้นทุนค่าแรงงาน มีรายละเอียดราคา ดังนี้

1. ค่าแรงงานในการขึ้นรูปวัสดุ S45C เพื่อผลิตเป็นไบตัด ราคาชิ้นละ 200 บาท
2. ค่าแรงงานในการขึ้นรูปวัสดุ SCM440 เพื่อผลิตเป็นไบตัด ราคาชิ้นละ 200 บาท
3. ค่าแรงงานในการขึ้นรูปวัสดุ SUS304 เพื่อผลิตเป็นไบตัด ราคาชิ้นละ 300 บาท
4. ค่าแรงงานในการขึ้นรูปวัสดุ SKD11 เพื่อผลิตเป็นไบตัด ราคาชิ้นละ 300 บาท
5. ค่าแรงงานในการขึ้นรูปวัสดุ SS400 เพื่อผลิตเป็นไบตัด ราคาชิ้นละ 200 บาท

ต้นทุนค่าวัตถุดิบ มีรายละเอียดราคา ดังนี้

1. ค่าวัสดุ S45C ขนาด 50 mm x 190 mm x 18 mm ราคาชิ้นละ 150 บาท
2. ค่าวัสดุ SCM440 ขนาด 50 mm x 190 mm x 18 mm ราคาชิ้นละ 200 บาท
3. ค่าวัสดุ SUS304 ขนาด 50 mm x 190 mm x 18 mm ราคาชิ้นละ 600 บาท
4. ค่าวัสดุ SKD11 ขนาด 50 mm x 190 mm x 18 mm ราคาชิ้นละ 300 บาท
5. ค่าวัสดุ SS400 ขนาด 50 mm x 190 mm x 18 mm ราคาชิ้นละ 150 บาท
6. ค่าน้ำกลั่น PTT ราคาลิตรละ 24 บาท ใช้ในการชุบแข็งทั้งหมด 40 ลิตร ต่อชิ้นงานไบตัดย่อย 6 ชิ้น คิดเป็นราคาต่อหน่วยเท่ากับ 160 บาท/ชิ้น

7. ค่าน้ำมันชุบแข็งเหล็ก PTT HIQUENCH 33 ราคาลิตรละ 84 บาท ใช้ในการชุบแข็งทั้งหมด 40 ลิตร ต่อชิ้นงานไบตัดย่อย 6 ชิ้น คิดเป็นราคาต่อหน่วยเท่ากับ 560 บาท/ชิ้น

ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตอื่น ๆ มีรายละเอียดราคา ดังนี้

1. ค่าไฟฟ้า (เตาเผาโลหะใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบโลหะ และจะใช้ไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิ 1300°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12kW) ในการชุบแข็ง ใช้เวลา 2.5 ชั่วโมง ต่อชิ้นงานไบตัดย่อย 2 ชิ้น คิดเป็นราคาต่อหน่วยเท่ากับ 65 บาท/ชิ้น

2. ค่าไฟฟ้า (เตาเผาโลหะใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบโลหะ

และจะใช้ไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิ 1300°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12kW) ในการชุบแข็งและอบคืนไฟ ใช้เวลา 3.25 ชั่วโมง ต่อชิ้นงานใบตัดย่อย 2 ชิ้น คิดเป็นราคาต่อหน่วยเท่ากับ 74 บาท/ ชิ้น

3. ค่าไสหุ้ย (ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้า/ ครั้ง รวมถึงค่าโทรศัพท์ และอื่นๆ คิดเป็นราคาต่อหน่วยเท่ากับ 250 บาท/ ชิ้น

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์มในงานวิจัยนี้ จะใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลจากต้นทุนรวมเฉลี่ยต่อผลผลิต 1 หน่วย สามารถหาได้จากต้นทุนรวมในการผลิต ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6 หากด้วยจำนวนผลผลิต ในที่นี้ คือ ระยะทางที่ได้ใช้ในการย่อยทางปาล์มซึ่งได้จากจากการทดสอบอัตราการสึกหรอ สามารถคำนวณได้จากขนาดของวงล้อที่ใช้ในการทดสอบอัตราการสึกหรอ คือ 0.1 m ที่ความเร็วรอบ 200 rpm และกำหนดอัตราการสึกหรอของใบตัดย่อยที่ 2% จะได้ระยะทางการสึกหรอของใบตัดย่อยที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม (บาท)

วัสดุ	สภาวะ	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าไฟฟ้า	สารชุบ	ไสหุ้ย	รวม
S45C	จำหน่าย	150	200	0	0	250	600
	ชุบแข็ง	150	200	65	160	250	825
	อบคืนไฟ	150	200	74	160	250	834
SCM440	จำหน่าย	200	200	0	0	250	650
	ชุบแข็ง	200	200	65	160	250	875
	อบคืนไฟ	200	200	74	160	250	884
SUS304	จำหน่าย	600	300	0	0	250	1150
	ชุบแข็ง	600	300	65	560	250	1775
	อบคืนไฟ	600	300	74	560	250	1784
SKD11	จำหน่าย	300	300	0	0	250	850
	ชุบแข็ง	300	300	65	560	250	1475
	อบคืนไฟ	300	300	74	560	250	1483
SS400	จำหน่าย	150	200	0	0	250	600
	ชุบแข็ง	150	200	65	160	250	825
	อบคืนไฟ	150	200	74	160	250	834

ตารางที่ 4.7 แสดงระยะทางที่ได้จากการทดสอบอัตราการสึกหรอ

วัสดุ	สภาวะ	ระยะทาง (m)
S45C	จำหน่าย	359.70
	ชุบแข็ง	1805.05
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ	1688.26
SCM440	จำหน่าย	405.24
	ชุบแข็ง	806.45
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ	592.49
SUS304	จำหน่าย	856.93
	ชุบแข็ง	1357.03
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ	1216.09
SKD11	จำหน่าย	1504.42
	ชุบแข็ง	3165.24
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ	2879.61
SS400	จำหน่าย	274.85
	ชุบแข็ง	402.24
	ชุบแข็ง + อบคืนไฟ	293.77

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 ในข้างต้น ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากราคาต้นทุนรวมเฉลี่ยในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์มต่อผลผลิต 1 หน่วยได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาตัดสินใจเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 4.8 แสดงต้นทุนรวมเฉลี่ยในการผลิตใบตัดย่อยเครื่องย่อยทางป่าล้มต่อผลผลิต 1 หน่วย

วัสดุ	สภาวะ	ต้นทุนรวมเฉลี่ย ต่อหน่วย (บาท)	ระยะทาง (m)	ต้นทุนรวมเฉลี่ย ต่อผลผลิต 1 หน่วย
S45C	จำหน่าย	600	359.70	1.668
	ซุบแข็ง	825	1805.05	0.457
	ซุบแข็ง + อบกิ้นไฟ	834	1688.26	0.494
SCM440	จำหน่าย	650	405.24	1.604
	ซุบแข็ง	875	806.45	1.085
	ซุบแข็ง + อบกิ้นไฟ	884	592.49	1.492
SUS304	จำหน่าย	1150	856.93	1.342
	ซุบแข็ง	1775	1357.03	1.308
	ซุบแข็ง + อบกิ้นไฟ	1784	1216.09	1.467
SKD11	จำหน่าย	850	1504.42	0.565
	ซุบแข็ง	1475	3165.24	0.466
	ซุบแข็ง + อบกิ้นไฟ	1483	2879.61	0.515
SS400	จำหน่าย	600	274.85	2.183
	ซุบแข็ง	825	402.24	2.051
	ซุบแข็ง + อบกิ้นไฟ	834	293.77	2.839

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกรรมวิธีการอบชุบด้วยความร้อน โดยการใช้ตัวแปรความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุ 4 ชนิด ที่ใช้ในกระบวนการชุบแข็งและการอบคืนไฟ ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและ โครงสร้างทางโลหะวิทยา มาเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิต สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 เหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติโลหะด้วยความร้อน ส่งผลต่อค่าการทดสอบสมบัติทางกลของใบตัดย่อยทางปาล์ม เนื่องจากความร้อนที่เหมาะสมในการอบชุบโลหะของวัสดุแต่ละชนิดจะทำให้โครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมในสภาวะการจำหน่าย

5.1.2 กรรมวิธีการอบชุบด้วยความร้อนที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลสำหรับการนำไปผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม คือ กรรมวิธีการชุบแข็ง

5.1.3 จากค่าผลการทดสอบสมบัติทางกล วัสดุที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปผลิตเป็นใบตัดย่อยทางปาล์ม คือ เหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 ในสภาวะการชุบแข็ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุในการผลิตเป็นใบตัดย่อยทางปาล์ม ได้เกิดปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ขึ้นในระหว่างที่ทำการทดลอง จึงเกิดเป็นข้อเสนอแนะเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม ดังนี้

5.2.1 ควรมีการทดลองกับวัสดุโลหะชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อเป็นข้อมูลของการศึกษาและแนวทางในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตเป็นใบตัดย่อยทางปาล์มในการวิจัยครั้งต่อไป

5.2.2 เนื่องจากในการขัดเงาผิวโลหะนั้น จะต้องทำการขัดด้วยกระดาษทรายผ่านน้ำตลอดเวลา จึงอาจทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยาออกไซด์จนทำให้เกิดสนิมได้ง่าย ดังนั้น ควรทำการเป่าชิ้นงานด้วยลมเย็นทุกครั้งทันทีหลังจากการขัดเสร็จสิ้นในแต่ละขั้นตอน

5.2.3 ควรใช้เทคนิคการวิเคราะห์ราคาดุลยภาพ (Equilibrium Price) ในการวิจัยครั้งต่อไป เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นเพียงราคาตลาด (Market Price) ที่ถูกกำหนดโดยความพอใจระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายที่ทำการตกลงกันได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของ Demand และ Supply



บรรณานุกรม

- [1] ศูนย์วิจัยธนาคารกสิกรไทย, **ธุรกิจปาล์มน้ำมันหลังก้าวเข้าสู่ AEC** (Online), 2559. Available: <http://www.ksmecare.com/Article/82/28155/ธุรกิจปาล์มน้ำมันหลังก้าวเข้าสู่-AEC> (12 มกราคม 2559).
- [2] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, **ปาล์ม** (Online), 2558. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ปาล์มน้ำมัน> (17 มิถุนายน 2558).
- [3] ถนอม ลีตระกูล, “การพัฒนาใบมีดตัดในรถตัดอ้อยเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง”, **การประชุมวิชาการงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555**, 17 - 19 ตุลาคม 2555, เพชรบุรี, 2555. หน้า 1666 - 1670.
- [4] กัญญา โกสุมภ์, “การศึกษาและออกแบบใบมีดสำหรับย่อยวัสดุเหลือใช้จากข้าว”, **การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ครั้งที่ 5**, 15 - 16 กรกฎาคม 2556, กรุงเทพมหานคร, 2556. หน้า 79 - 86.
- [5] P.Niranatlumpong, C.Sukhonket, and J.Nakgoenthong, “Wear resistant surface treatment of pulverizer blades”, **Wear**, Vol.302, 2013. pp.878 - 881.
- [6] J.D.Verhoeven and H.F.Clark, “Carbon Diffusion Between the Layers in Modern Pattern Welded Damascus Blades”, **Materials Characterization**, Vol.41, 1998. pp.183 - 191.
- [7] K.H.Lau, D.Mei, C.F.Yeung, and H.C.Man, “Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol.102, 2000. pp.203 - 207.
- [8] J.K.Wegener and T.Wegener, “Wood chipping with conical helical blades Theoretical deliberations and practical experiments concerning the adjustment of chip length with a set pitch of the blade”, **Biomass and Bioenergy**, Vol.66, 2014. pp.151 - 158.
- [9] K.Kimapong, P.Poonnayom, and V.Wattanaajitsiri, “Microstructure and Wear Resistance of Hardfacing Weld Metal on JIS - S50C Carbon Steel in Agricultural Machine Parts”, **Materials Science Forum**, Vol. 872, 2016. pp.55 - 61.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, สุรัตน์ ตริยวนพงศ์, สุริยา ประสมทอง และวราญา วัฒนจิตศิริ, “อิทธิพลของการรองพื้นและการพอกผิวแข็งต่อสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS - S50C”, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลชัยบุรี, Vol.14, 2559. pp.77 - 86.
- [11] ชัยวุฒิ บุญทันแสน, ตริรัตน์ หลีกคำ และวันชัย ทองแสน, ออกแบบและสร้างเครื่องย่อยทางปาล์ม, ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชัยบุรี, 2558.
- [12] ชีระพงษ์ จันทร์นิคม, ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน (Online), 2553. Available: <http://www.natres.psu.ac.th/researchcenter/Palm-Research/menu/pic-paper/53-teerapong-palm1.pdf> (12 มกราคม 2559).
- [13] ทางปาล์มอาหารสัตว์ (Online), Available: <http://www.thaiyon.com/ทางปาล์มกับอาหารสัตว์.html> (23 มกราคม 2559).
- [14] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศิริชัย ต่อสกุล, อนินท์ มีมนต์ และนรพร กลั่นประชา, วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: เซนเกจเอนนิ่ง, 2550.
- [15] Japanese Standards Association, JIS Handbook Ferrous Materials & Metallurgy I: JIS G 4051, **Japanese Standards Association, 1979.** pp.517 - 523.
- [16] Thanasarn, **มาตรฐานเหล็ก** (Online), Available: <http://www.thanasarn.co.th/มาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรม/> (25 มกราคม 2559).
- [17] C. A. Higgerson, **Experiments in materials technology**, Affiliated east - west press PVT., Ltd.: , 1973.
- [18] **กล้องจุลทรรศน์** (Online), Available: <http://www.vcharkarn.com/lesson/19> (25 มกราคม 2559).
- [19] **Using Microscope Parts** (Online), Available: <https://mrsmaine.wikispaces.com/Applesauce+with+a+lil+cinnamon> (25 มกราคม 2559).
- [20] ดนัย กิจชัยนุกูล, **เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด** (Online), 2547. Available: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf> (25 มกราคม 2559).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] สัมพันธ์ วงศ์นาวา, เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่, 2541, หน้า 18 - 19.
- [22] **Friction wheel test ASTM G65 - 16** (Online), Available: <https://www.isaf.tuclausthal.de/en/departments/wear-testing/friction-wheel-test-astm-g65-16-dry-sandrubber-wheel-test/.html>, (15 กุมภาพันธ์ 2559).
- [23] การทดสอบความแข็งของเหล็ก (Online), Available: <https://sites.google.com/site/iron1steel/home/kar-thdsxb-khwam-khaeng-hardness-test> (15 กุมภาพันธ์ 2559).
- [24] **Vickers Hardness Test** (Online), Available: <https://sites.google.com/site/gobanengineering/notes/materials-testing/hardness-testing/vickers-hardness-test>, (15 กุมภาพันธ์ 2559).
- [25] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, การวัดคุณสมบัติความเหนียว (**Toughness**) ของวัสดุด้วยการทดสอบแรงกระแทก (**Impact test**) (Online), Available: <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/45-toughness-impact-test> (15 กุมภาพันธ์ 2559).
- [26] Difference Between Izod and Charpy Test (Online), Available: <http://www.green-mechanic.com/2014/04/difference-between-izod-and-charpy.html> (15 กุมภาพันธ์ 2559).
- [27] ต้นทุนการผลิต (Online), Available: http://production-cost.blogspot.com/p/blog-page_2.html, (15 กุมภาพันธ์ 2559).
- [28] วันรักษ์ มิ่งมณีนาคนิ, เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2540.
- [29] S.Schuldt, G.Arnold, J.Roschy, Y.Schneider and H.Rohm, "Defined abrasion procedures for cutting blades and comparative mechanical and geometrical wear characterization", **Wear**, 2013. pp.38 - 43.
- [30] Amit Kumar Tanwer, "Mechanical Properties Testing of Uni - directional and Bi - directional Glass Fibre Reinforced Epoxy Based Composites", **International Journal of Research in Advent Technology**, Vol.2, 2014. pp.2321 - 9637.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] อภิรัฐ ศุภวัฒน์ยืนยง และดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข, “ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างโลหะวิทยาที่มีต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ”, **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2554**, 20 - 21 ตุลาคม 2554, ชลบุรี, 2554. หน้า 1210 - 1218.
- [32] Tony Atkins, “Optimum blade configurations for the cutting of soft solids”, **Engineering Fracture Mechanics**, Vol.73, 2006. pp.2523 - 2531.
- [33] N.Yasavol and F.Mahboubi, “The effect of duplex plasma nitriding - oxidizing treatment on the corrosion resistance of AISI 4130 steel”, **Materials & Design**, Vol.38, 2012. pp.59 - 63.
- [34] John D.Verhoeven, Alfred H.Pendray and Howard F.Clark, “Wear tests of steel knife blades”, **Wear**, Vol.265, 2008. pp.1093 - 1099.
- [35] ไพลิน กระจ่างพิภพ, เจษฎา วรรณสินธุ์ และนภิสพร มีมงคล, “การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตสำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมได้เข้าชิ้นส่วนโลหะโดยใช้แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ”, **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555**, 17 - 19 ตุลาคม 2555, เพชรบุรี, 2555. หน้า 2122 - 2127.
- [36] ดุษฎี บุญธรรม, “การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแท่งชิ้นงานในอุตสาหกรรมโดยใช้ระบบต้นทุนกิจกรรม”, **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**, ปีที่ 36(2), 2556. หน้า 203 - 213.
- [37] ทวีศักดิ์ ชัดดีวรรณ, “การเปรียบเทียบและปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (กรณีศึกษาชุมชนบางนา)”, **วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์**, ปีที่ 8(1), 2559. หน้า 70 - 78.
- [38] ASTM International., Standard Practice for Microteaching Metals and Alloys: E 407 - 99, **Annual Book of ASTM Standard**, 2007.
- [39] Japanese Standards Association, Method of impact test for metallic materials: JIS Z 2242, **Japanese Standards Association**, 1993.
- [40] Japanese Standards Association, Test pieces for impact test for metallic materials: JIS Z 2202, **Japanese Standards Association**, 1980.
- [41] ASTM International., Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/ rubber wheel apparatus: G65 - 94, **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.3.02, 1996.

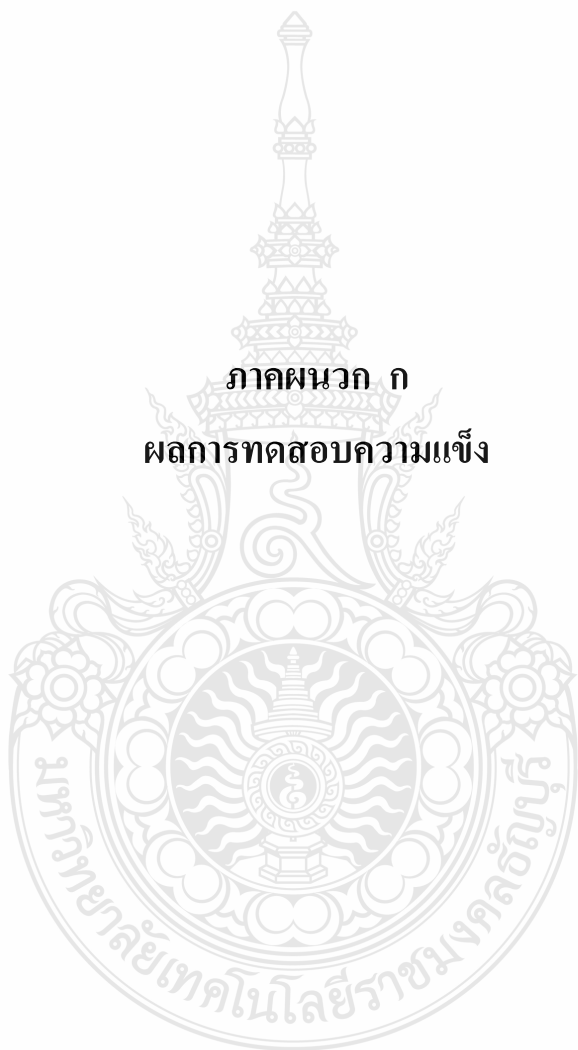
บรรณานุกรม (ต่อ)

- [42] Japanese Standards Association, Method of Vickers hardness: JIS Z2244, **Japanese Standards Association**, 1992.
- [43] อนรรักษ์ ทองสุโขวงศ์, **การบัญชีต้นทุน** (Online), Available: <https://home.kku.ac.th/anuton/cost%20accounting/cost%20split.htm>, (15 กุมภาพันธ์ 2559).
- [44] สุขอังคณา ลี, โขกุล วิริยธนะนาโชติ, วัชรินทร์ อระบุตร, จุฑารัตน์ สมสุข และเบญจมาศ เบญจบุญ, “การเปรียบเทียบความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางระหว่างการอบชุบและการเชื่อมพอกผิวสำหรับงานด้านทานการเสียดสี”, **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555**, 17 - 19 ตุลาคม 2555, เพชรบุรี, 2555. หน้า 1331 - 1336.
- [45] อรรถพล ไชยรา, **การศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำ ด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [46] S.A.Tukur, M.S Dambatta, A.Ahmed and N.M. Mu'az, “Effect of Heat Treatment Temperature on Mechanical Properties of the AISI 304 Stainless Steel”, **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, Vol.3, 2014. pp.9516 - 9520.
- [47] ฤทธิชัย เกาเนียม และธีรยุทธ กาญจนแสงทอง, “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติความแข็งเนื่องจากการเชื่อมซ่อมอาร์คไฟฟ้าในเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11”, **การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีการเชื่อมและการตรวจสอบ ประจำปี 2558**.

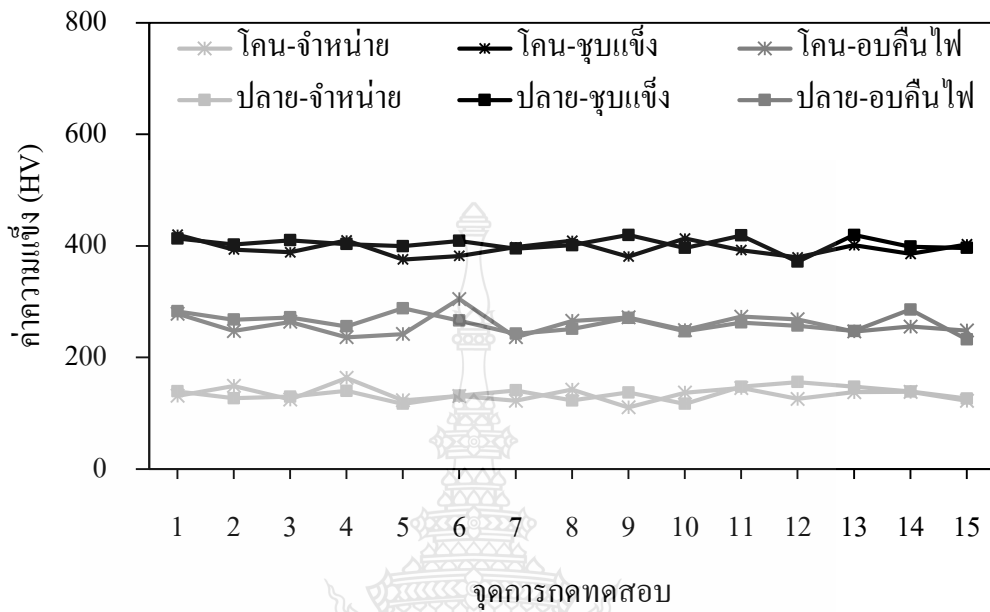
ภาคผนวก



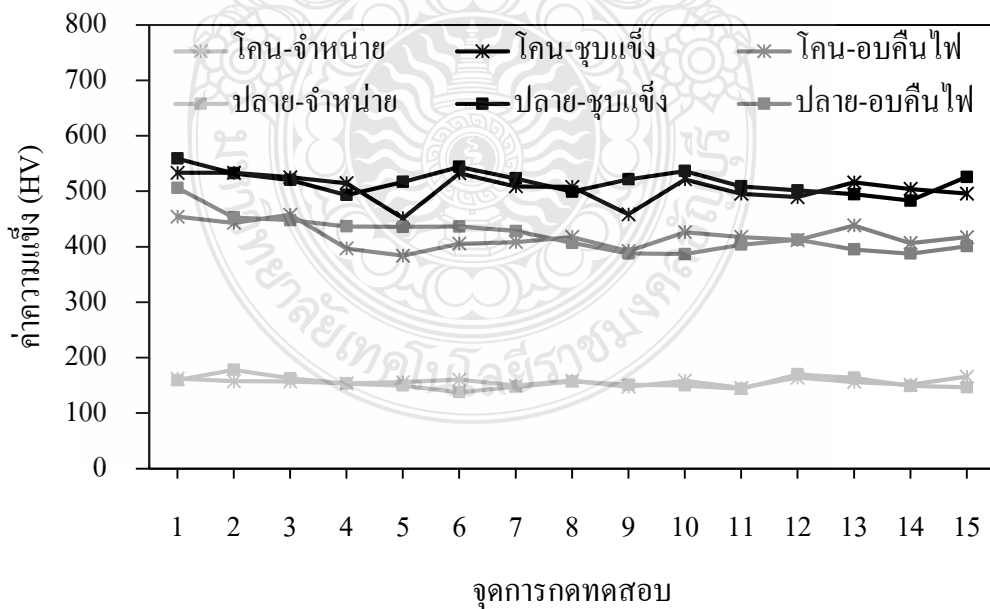
ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบความแข็ง



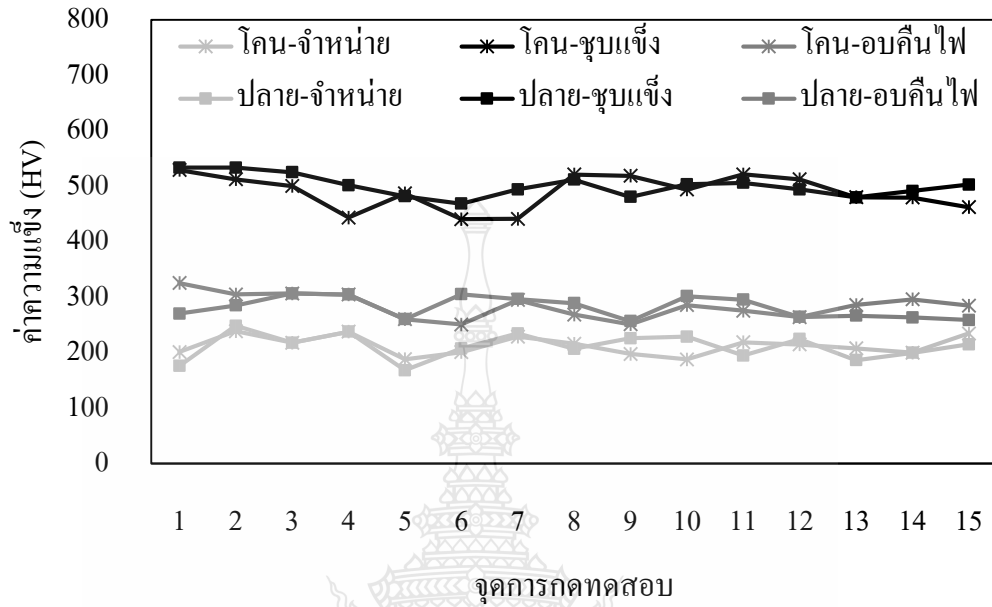
ก.1 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 เปรียบเทียบบริเวณ โคนและปลายใบมีดตัด



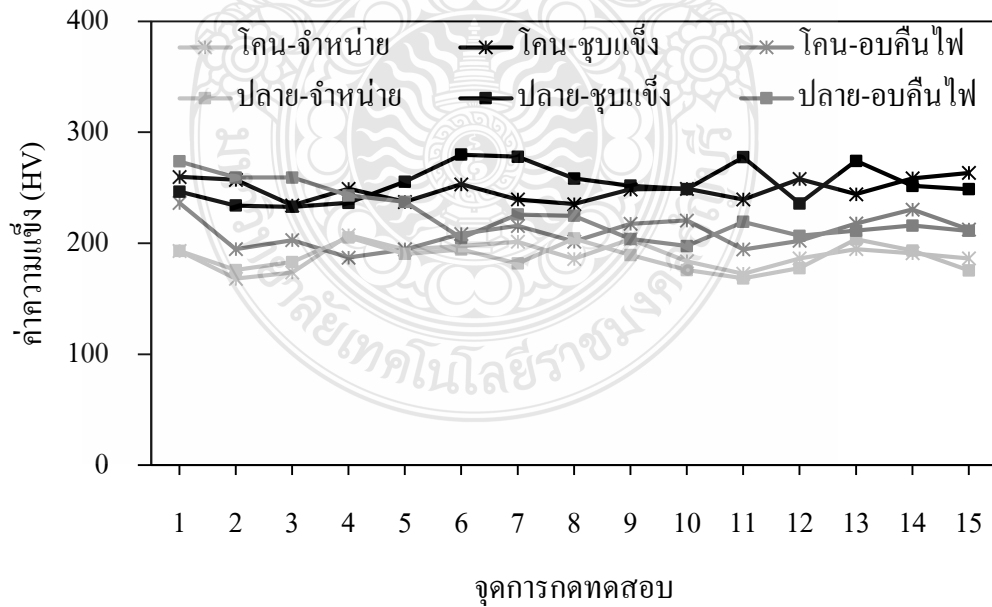
ก.2 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C เปรียบเทียบบริเวณ โคนและปลายใบมีดตัด



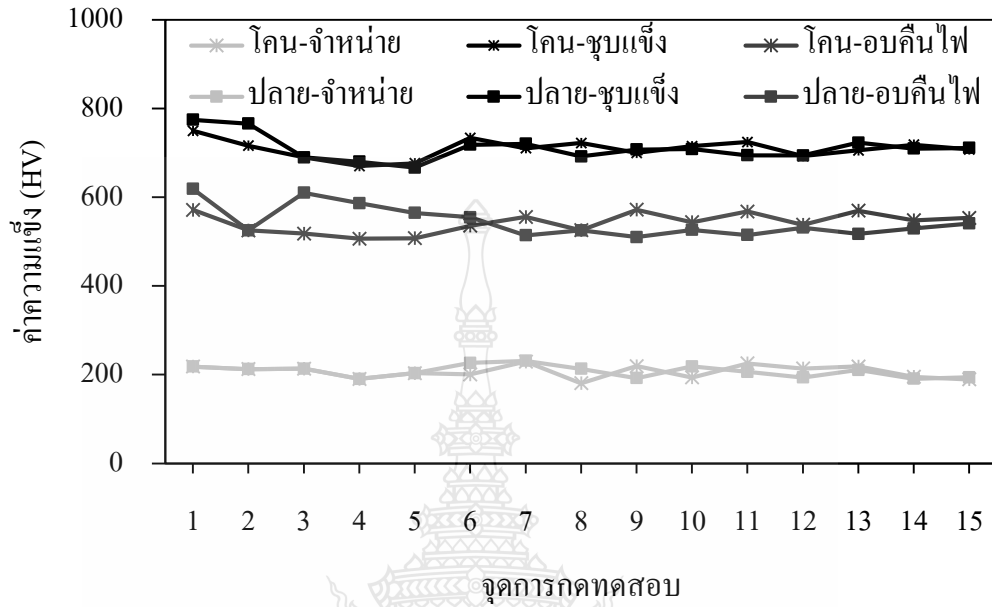
ก.3 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน SCM440 เปรียบเทียบบริเวณ โคนและปลายใบมีดตัด



ก.4 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน SUS304 เปรียบเทียบบริเวณ โคนและปลายใบมีดตัด



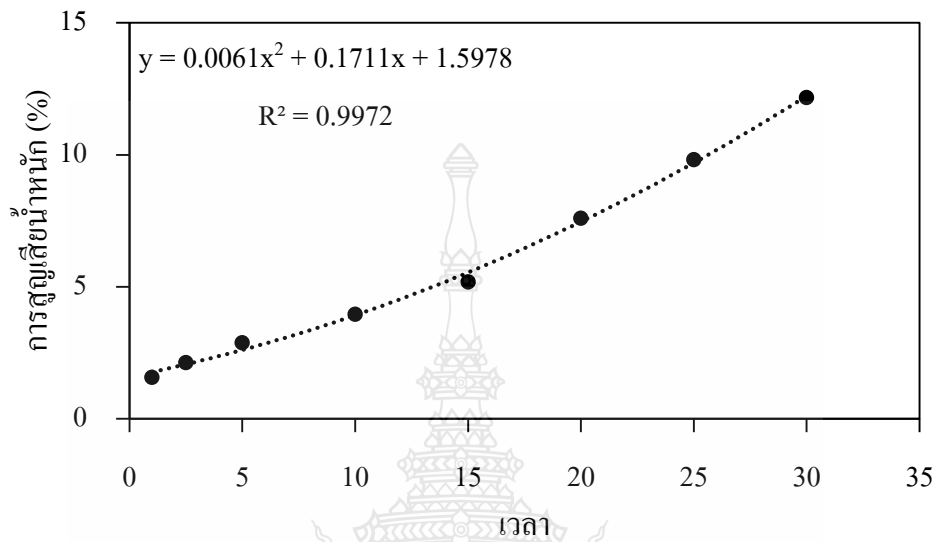
ก.5 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน SKD11 เปรียบเทียบบริเวณ โคนและปลายใบมีดตัด



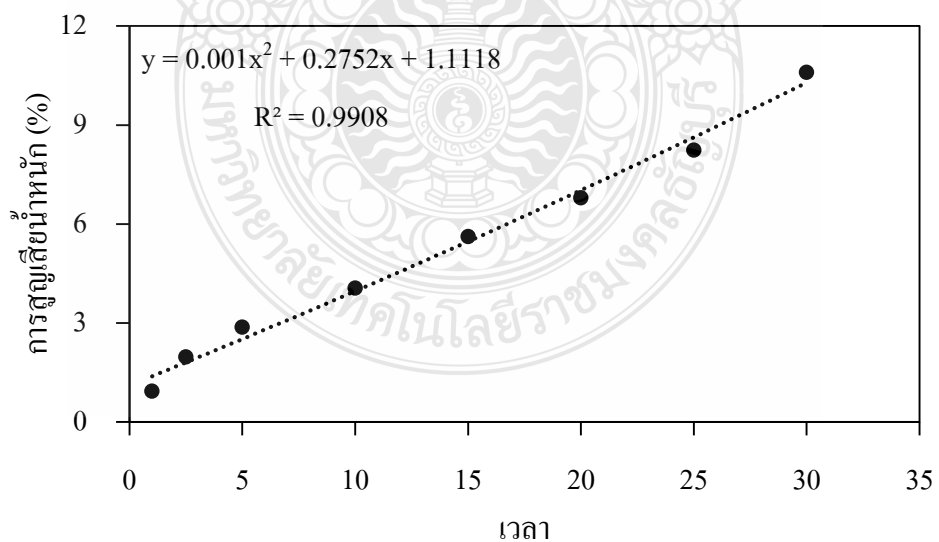
ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ



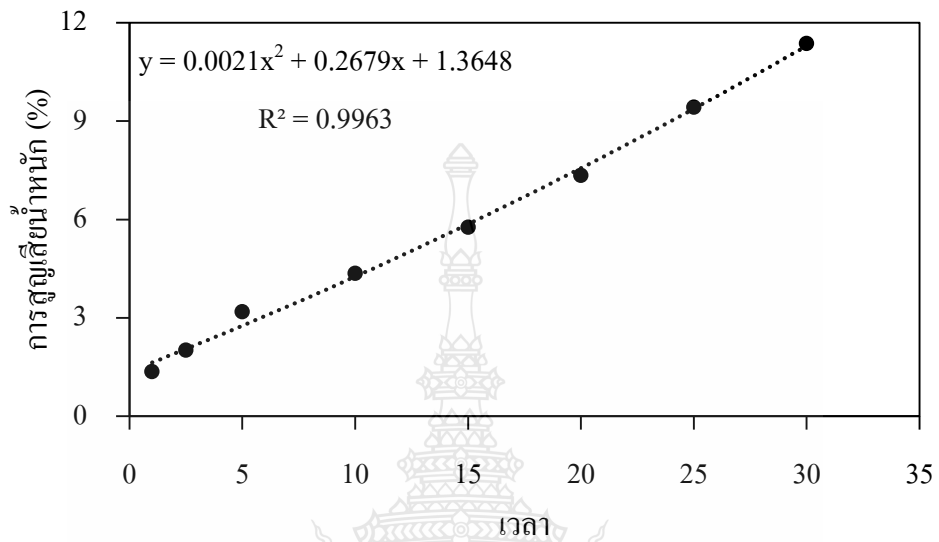
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ที่สภาวะการจุ่มน้ำ



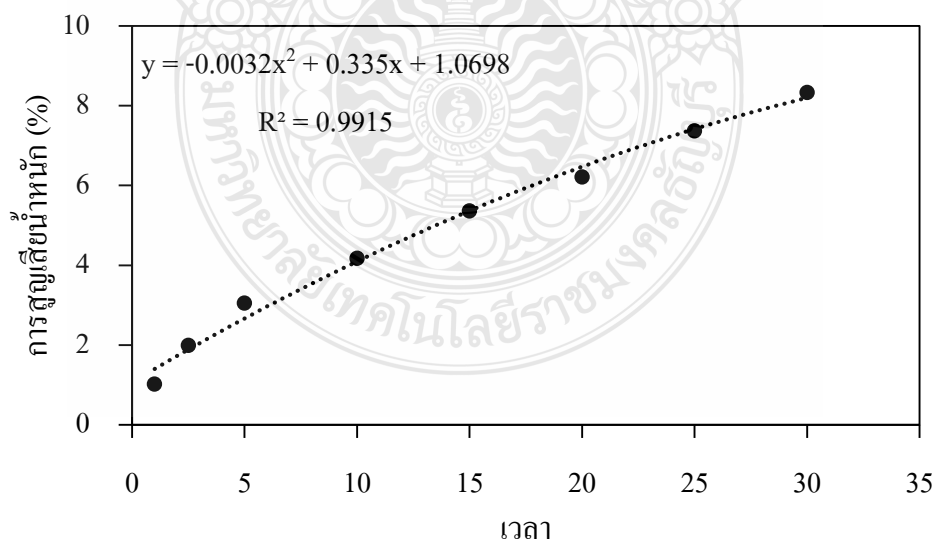
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ที่สภาวะการชุบแข็ง



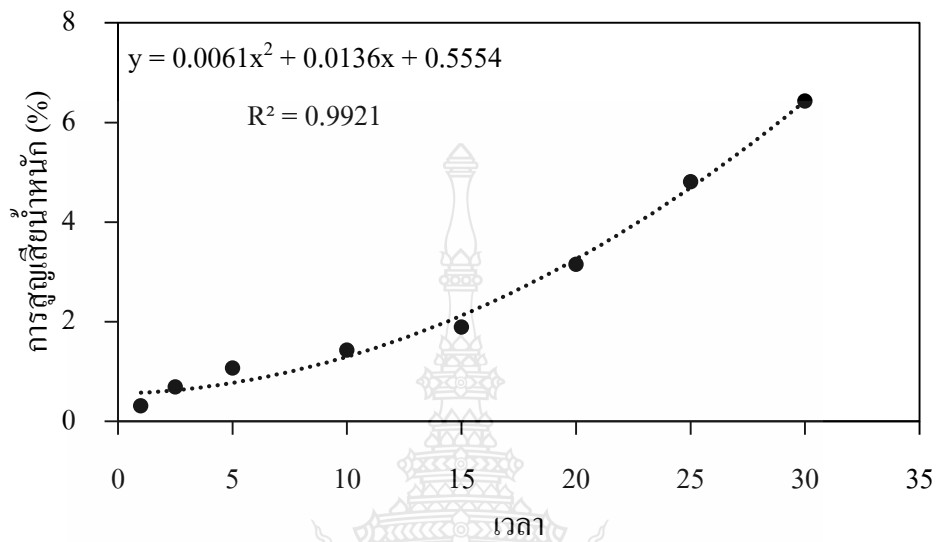
ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ



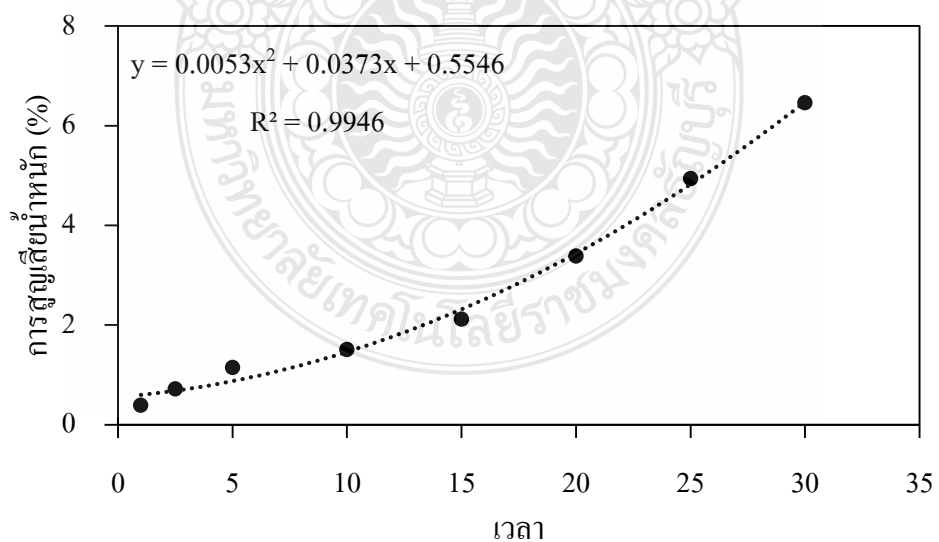
ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่สภาวะการจำหน่าย



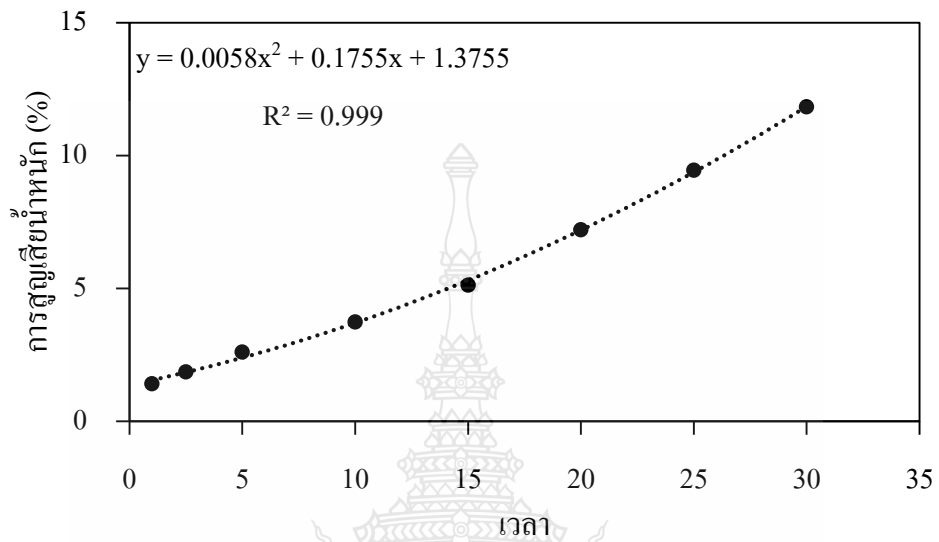
ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่สภาวะการชุบแข็ง



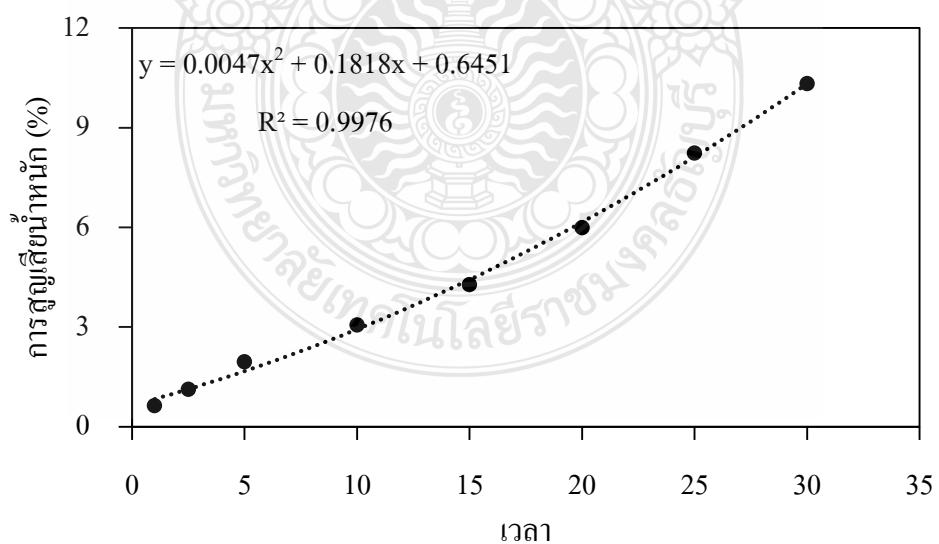
ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ



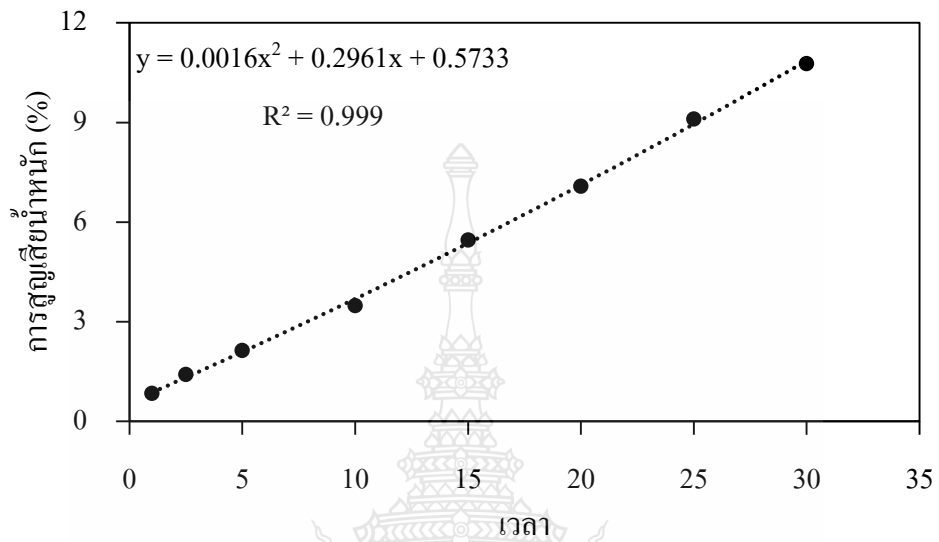
ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สภาวะการจำหน้าย



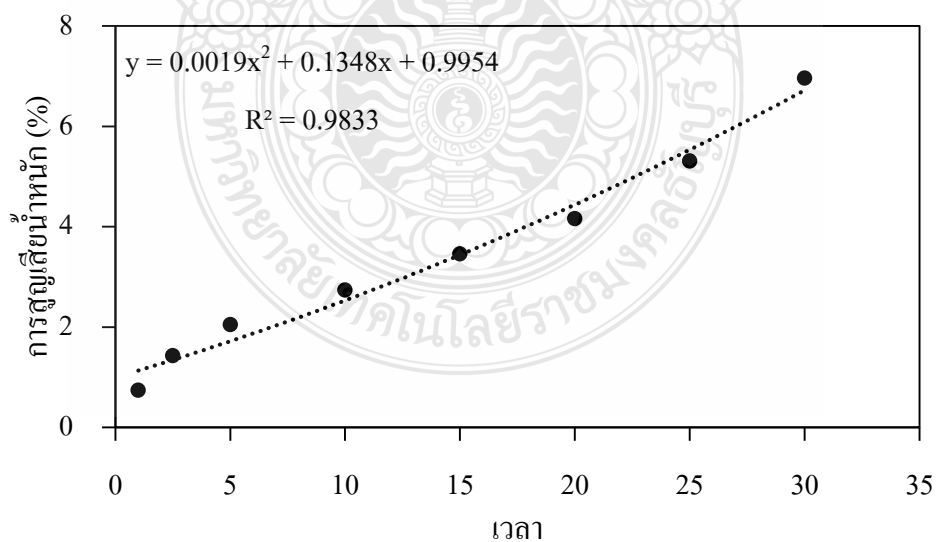
ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สภาวะการชุบแข็ง



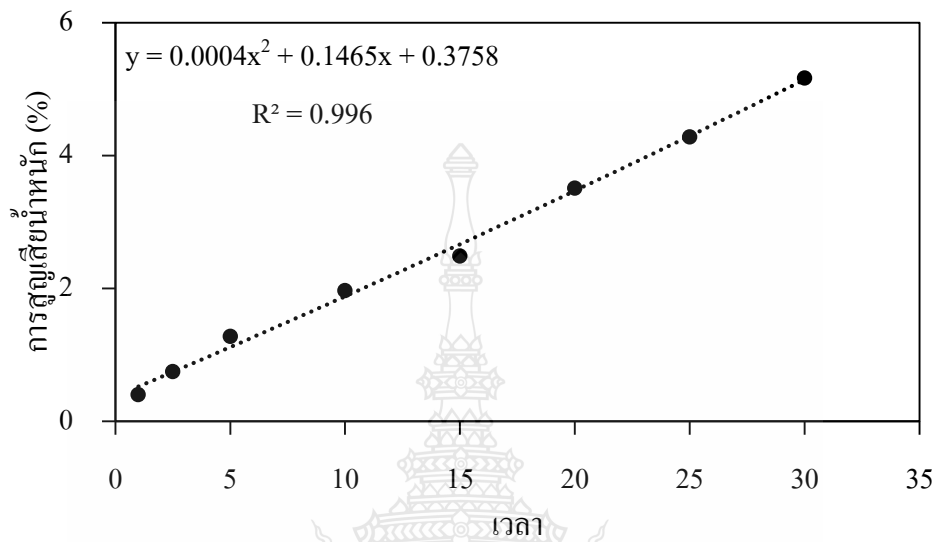
ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ



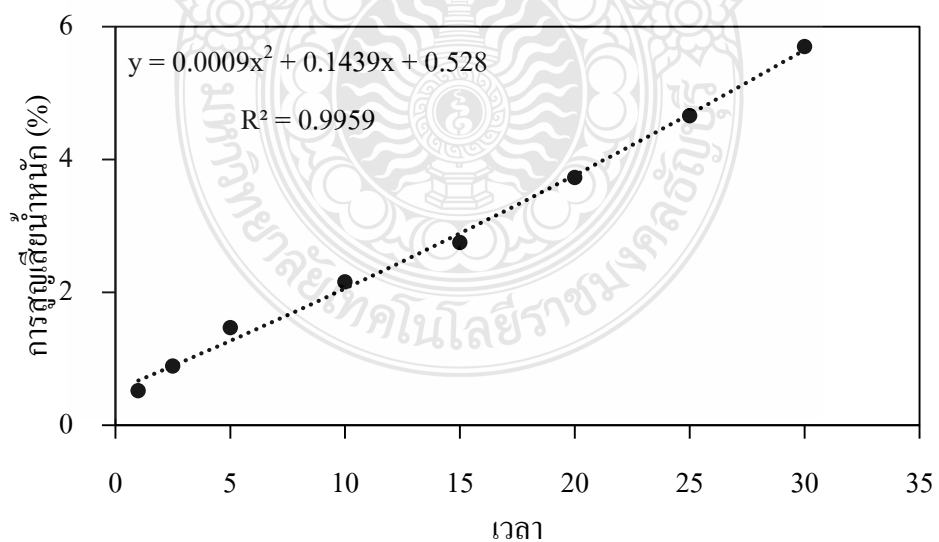
ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่สภาวะการจําหน่าย



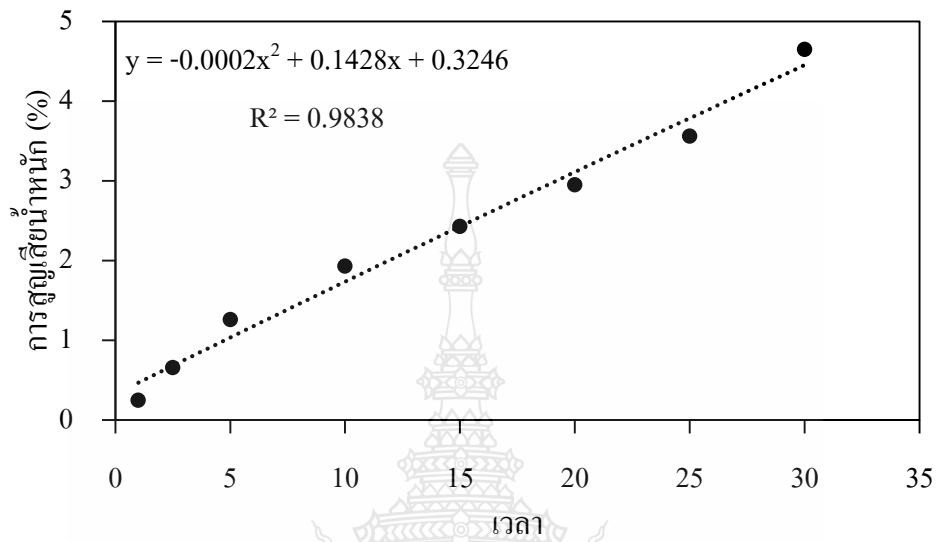
ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่สภาวะการชุบแข็ง



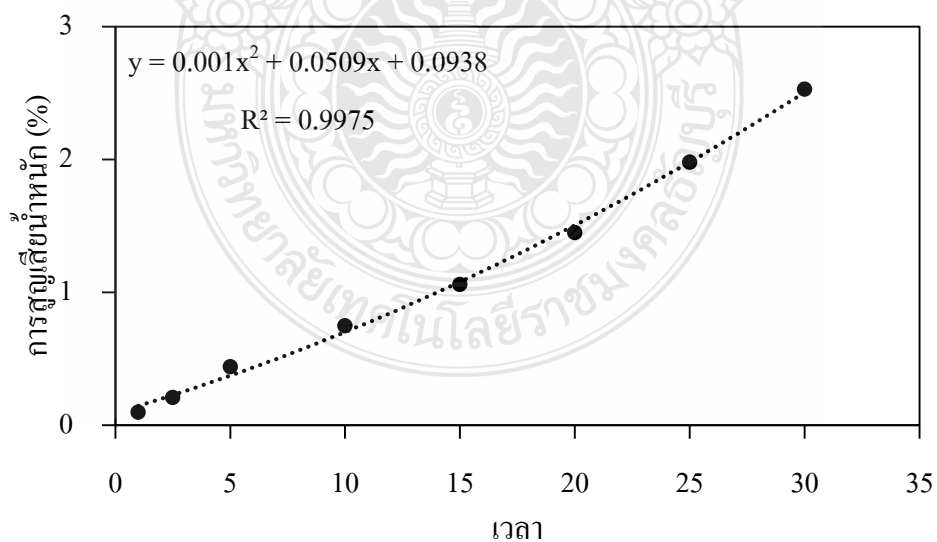
ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ



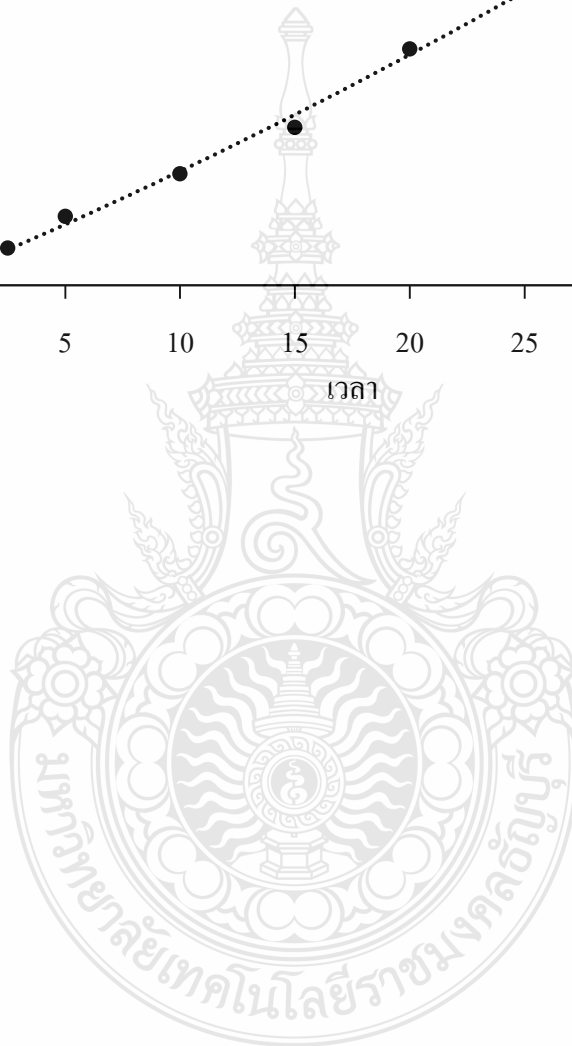
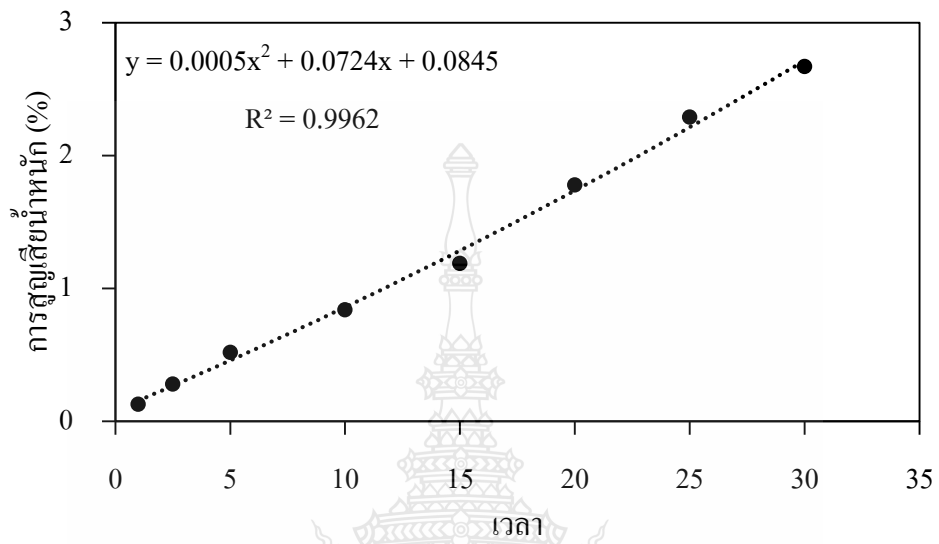
ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ที่สภาวะการจำหน่าย



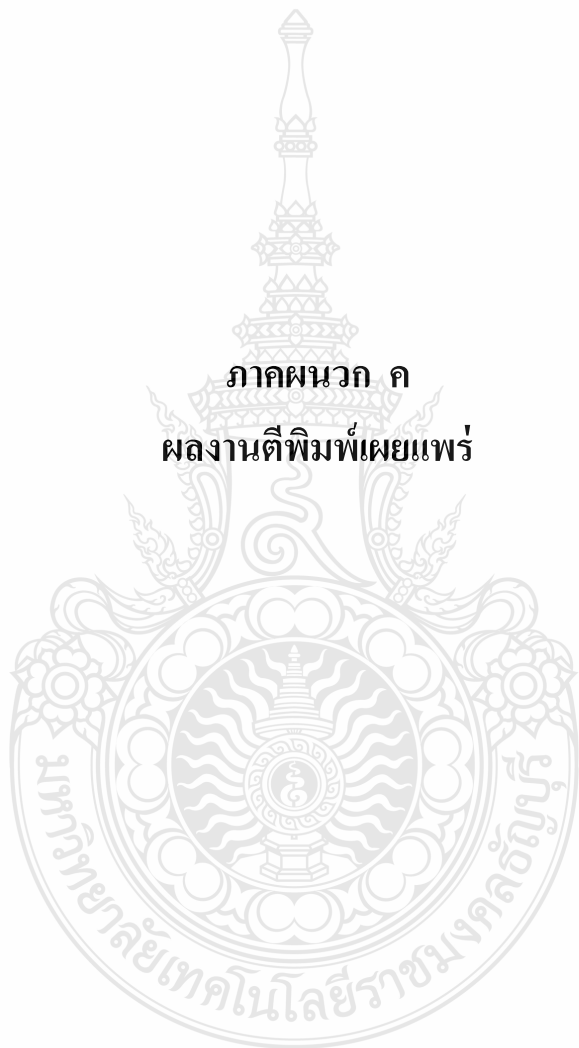
ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ที่สภาวะการชุบแข็ง



ข.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ที่สภาวะการชุบแข็งและอบคืนไฟ



ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



PROCEEDINGS IE Network Conference 2017

The Empress Hotel
Chiang Mai, July 12th-15th 2017.

INDUSTRY 4.0 CHALLENGES FOR THAILAND



Proceeding download link



IE Network
2017

รายชื่อคณะกรรมการจัดประชุม

1. รองศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ	โสภาดง	ประธานกรรมการจัดงาน
2. รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์เกษม	ระมิงค์วงศ์	ประธานกรรมการวิชาการ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ	ทิพยาวงค์	ประธานกรรมการฝ่ายพิธีการต้อนรับและสถานที่
4. รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์	สัมภัตตะกุล	ประธานกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์และสารสนเทศ
5. รองศาสตราจารย์ ดร.เสริมเกียรติ	จอมจันทร์ยอง	กรรมการ
6. รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	กรรมการ
7. รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย	ฉัตรทินวัฒน์	กรรมการ
8. รองศาสตราจารย์ ดร.วัสสนัย	วรรณัจฉริยา	กรรมการ
9. รองศาสตราจารย์ ดร.คมกฤต	เล็กสกุล	กรรมการ
10. รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลีน	เหล่าศิริถาวร	กรรมการ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรรุติชัย	ชีวิสุทธิศิลป์	กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล	สมุทคุปต์	กรรมการ
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์	เสรีรัฐ	กรรมการ
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร	ชมภูอินไหว	กรรมการ
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสวัชร	นาคเขียว	กรรมการ
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิรุท	ไชยจารุณิช	กรรมการ
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วริษา	วิสิทธิ์พานิช	กรรมการ
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท	เกษมเศรษฐ์	กรรมการ
19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญญาภาพ	อานันทนาะ	กรรมการ
20. อาจารย์ ดร.โปตี	เจ้า	กรรมการ
21. อาจารย์ ดร.สาลินี	สันติธีรากุล	กรรมการ
22. อาจารย์ ดร.อลงกต	ลิ้มเจริญ	กรรมการ
23. อาจารย์ ดร.ชนม์เจริญ	แสงรัตน์	กรรมการ
24. อาจารย์อรรถมพจน์	วงศ์พิงไชย	กรรมการ
25. อาจารย์ณรงค์	เพชรชาวี	กรรมการ

เลขานุการ ประสานงานและสนับสนุนการดำเนินงาน

1. นางสาวศศิธร ฉิมสวัสดิ์
2. นางสาวสุภารัตน์ แก้วแสงใจ
3. นางสาววิมูทิศา ปัญโญใหญ่
4. นางสาวนัยนา ยะสิงห์สาร
5. นางสาวพรพรรณ คำมัน
6. นางสาวสินีนุช พรหมมิจิตร
7. นางสาวปรียาภัทร ปาคำ
8. นางสาวณัฐนรี เชื้อนแก้ว
9. นายจิรวัดน์ ตียามคม
10. นายสนธยา สุขสามัคคี
11. นางวุฒินันท์ อินทยศ
12. นายณัฐวุฒิ รินโน
13. นายนรินทร์ จักรปั้น

รายชื่อผู้ประเมินบทความ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

(ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา)

1. ผศ. ดร. ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
2. ผศ. ดร. นัฐวิภา จันทศรี
3. ผศ. ดร. ศิริรัตน์ ชุตติชูเดช
4. ผศ.ดร. สิริรงค์ กลั่นคำสอน
5. ดร. เพ็ญสุตา พันฤทธิ์ดำ
6. ผศ.ดร. ฐิติกร พัฒนพิบูล
7. ดร. เขมฐา ชำนาญหล่
8. ดร. จิราภรณ์ ประดับวงษ์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

1. อ.จรงค์รัตน์ พันธุ์สุวรรณ
2. อ.จิตลดา หมายมัน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1. ดร.กิตติชัย อธิกุลรัตน์
2. อ.ปริญญา พัฒนสันต์พร
3. ดร.วราญา เนื่องมัจฉา
4. ดร.อธิวัฒน์ บุญมี
5. ดร.เลิศเลขา ศรีรัตนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

1. ผศ.ดร.สุรัตน์ วรรณศรี
2. รศ.ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ
3. ผศ.ดร.พีรเดช สุวิทยารักษ์
4. ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ ศรีศิลา

มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

1. รศ. ดร.ไพโรจน์ เนียมนาค
2. รศ.ดร.สฤษดิ์ พรหมสายใจ
3. ผศ. ดร.นพคุณ ชูทัน
4. ผศ.ดร.วิษณุ บัวเทศ
5. ดร.เทพ เกื้อทวีกุล
6. ดร.สุรเชษฐ์ ตุ่มมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. อาจารย์ พัฒนพงษ์ แสงหัตถ์วัฒนา | 4. อาจารย์ วรินทร์ เกียรติคุณกุล |
| 2. อาจารย์ อรณิชา อนุชิตชาญชัย | 5. ดร.ชนิภา สุนารักษ์ |
| 3. อาจารย์ ธนภุต โขติภาวริศ | 6. อาจารย์ ศุภพัฒน์ ปิงตา |

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| 1. ผศ.ดร.ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร | 3. อ.จุฑาทิพย์ สีลาธนาพิพัฒน์ |
| 2. อ.ชลิตา ชาญวิจิตร | 4. อ.สุคนธ์ทิพย์ เพิ่มศิลป์ |

มหาวิทยาลัยนานาชาติแสตมฟอร์ด

1. ดร.อัครินทร์ พงศธรวิวัฒน์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. ผศ.ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์ | 3. อ.ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม |
| 2. รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร | |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

- | | |
|---------------------------|------------------------|
| 1. ดร.บรรเจิด แสงจันทร์ | 3. ผศ.มนวิภา อารีพันธ์ |
| 2. ผศ.ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ | |

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1. ผศ.ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เลื่อน | 4. ผศ.ดร.สุวิษภรณ์ วิชกุล |
| 2. ผศ.ดร.วิสุทธิ สุพิทักษ์ | 5. ผศ.ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ |
| 3. อ.ดร.รมิตา อยู่สุข | |

มหาวิทยาลัยมหิดล

- | | |
|----------------------------|------------------------------------|
| 1. ผศ.ดร.สรนาถ ไกรภู | 5. อ.ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ |
| 2. ผศ.ดร.ศุภชัย ราษฎร์ศิริ | 6. อ.ดร.รณชัย ศิโรเวธกุล |
| 3. ผศ.ธนา สาดธา | 7. อ.ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย |
| 4. รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์ | |

กองวิชาวิศวกรรมสรรพาวุธ ส่วนการศึกษาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 1. พ.อ.หญิง อัญพัชร คงวัฒนานันทน์ | 2. พ.ต.เสกสรรค์ หมอยาดี |
|-----------------------------------|-------------------------|

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1. ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์ | 3. ดร.รวินกานต์ ศรีนนท์ |
| 2. รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา | |

มหาวิทยาลัยรังสิต

1. ดร.พิชญ มนต์ปิติ
2. ผศ.ดร. ธนวรรณ อัสวไพบูลย์
3. อาจารย์ พรรคพงษ์ แก่นณรงค์
4. อาจารย์ สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา
5. อาจารย์ ประพล จิระพรทิพย์
6. ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ โภฏจนาท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้านครเหนือ

1. รศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

1. ผศ.อริยพงษ์ พล้วพันธ์
2. ผศ.นราธิป ภาวะรี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1. ดร.จรวัยพร แสนทวีสุข
2. ผศ.ดร.ธารชุตดา พันธุ์นิกุล
3. ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
4. ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์
5. ดร.กิตติมา ศิลปะษา
6. ดร.กสิณ รังสิกรรพุม
7. ผศ.ดร.นลิน เพ็ชรทอง
8. รศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ
9. รศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
10. ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์
11. อาจารย์ ถนัดกิจ ศรีโชค

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1. ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เหล่านภากุล
2. อ.ดร.ปณิตศน์ สุรีย์ธนาภาส

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

1. ผศ.ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ
2. ผศ.ดร.สวัสดิ์ ภาชะราช
3. รศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุนธ์
4. รศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศน์เกียรติ
5. รศ.ดร.ศุภชัย สุรพันธ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
2. รศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
3. รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต
4. รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
5. ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย
6. ผศ.ดร.ชุมพล ยวงโย
7. ผศ.ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข
8. ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข
9. ดร.เชาวลิต หามนตรี
10. ดร.นิรันดร์ พิสุทธิอานนท์
11. ดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์
12. ดร.จรัสวรรณ โกยวานิช
13. ดร.นพดล สุกแสงปัญญา
14. อาจารย์รณณ เจียรตระกูล

มหาวิทยาลัยพะเยา

1. ผศ.จักรทอง ทองจัตู
2. ดร.อัจฉราวดี แก้ววรรณดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์
2. ผศ.ดร.อภิรักษ์นันทนา อุดมศักดิ์กุล
3. ผศ.พจมาน เตียวัฒนรัฐติกาล
4. ดร.ไพบุลย์ ช่างทอง
5. ดร.อุษณีย์ คำพูล
6. ดร.ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ
7. ดร.วิบูลย์ ตั้งวัชรธรรมานุ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

1. ผศ.ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ
2. อ.ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ
3. อ.ร.ท.ดร.รัฐวุฒิ วงษ์วิทย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ศ.ดร.ปารเมศ ชูติมา
2. รศ.ดร.จิตรา รุ้กกิจการพานิช
3. รศ.ดร.ปวีณา เขาวลิตวงศ์
4. ผศ.ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล
5. อ.ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

1. ผศ.ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร้ง
2. ผศ.รำพึง เจริญยศ
3. ผศ.จักรินทร์ น่วมทิม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1. รศ.ดร.ธเนศ รัตน์วิไล
2. ผศ.ดร.อรุณ สังกะพงศ์
3. ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล
4. ผศ.ดร.รัฐชนา สิ้นชาวลัย

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

1. น.อ. รศ.ปัญญารักษ์ โกศลวัฒน์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

1. ผศ.ดร.สุพัฒนตรา เกษราพงศ์
2. ผศ. พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์
3. อ.จักรพันธ์ กัฒหา

มหาวิทยาลัยสยาม

1. อ.ชานิดา พิทยานนท์
2. อ.ธนารักษ์ ทีบแก้ว
3. อ.ณัฐพล พุฒยางกูร
4. อ.อัมรินทร์ วงศ์เศรษฐี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1. ผศ. สุรัตน์ ตรีวัฒนพงศ์
2. ผศ. ดร. ศิริชัย ต่อสกุล
3. รศ. ดร. ณฐา คุปต์ชัยเยียร
4. ผศ.ประจักษ์ อ่างบุญตา
5. ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก
6. ผศ. ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงษ์
7. ผศ. ดร. ชัยยะ ประณีตพลกรัง
8. ดร. ประกช สิริสุวรรณ
9. ผศ. ดร. ระพี กาญจนะ
10. ดร. กุลชาติ จุลเพ็ญ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

1. ผศ.ดร.ภาณุ บุรณจารุกร
2. ผศ.ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ
3. ผศ.ดร.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์
4. ผศ.ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า
4. ผศ.ดร.โพธิ์งาม สมกุล
5. ดร.สุธนต์ย์ พุทธิพนม
6. รศ.ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1. รศ.ดร.เสริมเกียรติ จอมจันทร์ยอง
2. รศ.ดร.ชนนาค กฤตวรกาญจน์
3. รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ
4. รศ.ดร.อภิชาติ โสภานแดง
5. รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
6. รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
7. รศ.ดร.วิมลลิน เหล่าศิริถาวร
8. รศ.ดร.วัสสนัย วรธนัจฉริยา
9. รศ.ดร.ศักดิ์เกษม รมะมิ่งวงศ์
10. ผศ.ดร.สรรรุติชัย ชิวสุทธิศิลป์
11. ผศ.ดร.อรรณพล สมทศุบัติ
12. ผศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว
13. ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์
14. ผศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
15. ผศ.ดร.วรพจน์ เสรีรัฐ
16. ผศ.ดร.วสุวัชร นาคเขียว
17. ผศ.ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช
18. ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจาวุฒิช
19. อ.ดร.โปตี เจ้า
20. อ.ดร.ชนม์เจริญ แสงรัตน์
21. อ.ดร.อลงกต ลิ้มเจริญ
22. อ.ดร.สาลินี สันติธีรากุล
23. อาจารย์ณรงค์ เพชรชาวี

มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1. ผศ.ชานนท์ มุลวรรณ
2. รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย

Code	Title	Page
IM011	A New Design of One-handed Environmental-Friendly Lipstick Packaging using A Quick-Easy-Customer's Needs Quality Function Deployment (QECN-QFD) Method	216-216
IM013	Web Application to Support Construction Project Management	217-224
LC005	LCA of a Printing Toner Cartridge: Comparative Study for Three Different End of Life Scenarios	225-230
ME002	A Study of Al Alloy 6063 Aging Process Using Central Composite Design	231-237
ME003	Development and Improvement Process of Paper Petal Compression	238-246
ME004	Influence of Solution Treated, Welding Factors and Artificially Aged on Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Semi Solid Casting with Friction Stir Welded	247-256
ME005	Improving and Development Process of Compressed Bricks Synchronization	257-265
ME008	Improvement of a polyvinylchloride pipe extrusion process to reduce material cost	266-273
ME009	Influence of Copper and Tin onto Microstructure and Mechanical Properties of Silver Alloys 750	274-281
ME010	The Optimum Casting Condition of Manufacturing Jewelry Setting for Silver Alloys 750	282-288
ME012	Comparative Study of Materials Mechanical Properties for Manufacturing Palm Cutting blade	289-296
ME014	Relative Study of Cutting Edge Wear, Roughness and Chip Morphology in Hard-faced Weld metal Milling Process on Grey Cast Iron Surface	297-303
ME015	Effect of Gas Metal Arc Welding Parameter on Hard-faced Weld Metal on JIS-FC25 Grey Cast Iron Surface	304-310
ME018	Optimizing Condition of Soldering Temperature and Time on Wettability for SAC305 and SAC305-0.5In Solders on Copper Substrate	311-318
ME020	Development of the Wooden Plate Cutter for the Picture Frame Applying Reverse Engineering	319-325
ME021	Design for Computer Experiments to Determine the Optimal Condition in Stretch Blow Molding of Plastic Bottles	326-332
ME022	Effects of Cu and Ni on Microstructure and Mechanical Properties of Sn-Zn solder joints	333-338



การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลวัสดุสำหรับผลิตใบมีดตัดทางปาล์ม Comparative Study of Materials Mechanical Properties for Manufacturing Palm Cutting blade

อัจฉราภา ดวงอัน^{1*} และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: atcharapha_d@mail.rmutt.ac.th*

Atcharapha Duang un^{1*} and Kittipong Kimapong¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

E-mail: atcharapha_d@mail.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัญหาอายุการใช้งานที่สั้นของใบมีดตัดทางปาล์มส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องย่อยทางปาล์มลดลง การพัฒนาเพื่อหาใบมีดตัดที่มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานสูงจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนที่มีการปฏิบัติอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อ 1) การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของใบตัดโลหะ 4 ชนิด ประกอบด้วยเหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 และ 2) การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตใบตัดย่อยทางปาล์ม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังต่อไปนี้ ใบตัดเหล็กกล้า SKD11 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยสภาวะที่กำหนดให้ค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าใบตัดเหล็กกล้า SUS304 S45C และ SCM440 ที่ค่าประมาณ 34 45 และ 60% ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าเหล็กกล้า S45C มีราคาต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยต่ำกว่าเหล็กกล้า SCM440 SKD11 และ SUS304 ประมาณ 6 42 และ 52% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเหมาะสมระหว่างความต้านทานการสึกหรอและต้นทุนในการผลิต พบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C ที่มีความต้านทานการสึกหรอระดับปานกลางและต้นทุนต่ำเหมาะสมในการผลิตเป็นใบตัดย่อยทางปาล์มมากที่สุด

คำหลัก ใบตัด การชุบแข็ง การอบคืนไฟ การสึกหรอ

Abstract

Shorten tool life service problem of a palm chopper machine cutting blade affects to deteriorate a palm chopper machine efficiency. Development for optimizing the cutting blade that shows high efficiency and tool life service was an urgent issue that is continuously performed. This research aims to 1) study mechanical properties and microstructure of 4 cutting blades metals and 2) compare the manufacturing cost of palm chopper machine cutting blade. The summarized results are as follows. The SKD11 steel cutting blade that was harden at the given condition showed the higher wear resistance than that of SUS304, S45C and SCM440 steels cutting blades for 34, 45 and 60%, respectively. It was also found that the S45C steel cutting blade showed the lowered manufacturing cost than that of SCM440, SKD11 and SUS304 for 6 42 and 52%, respectively. When comparing the suitability between



the wear resistance and the manufacturing cost for application in the agricultural machine, it was found that medium carbon S45C steel that showed moderate wear resistance and lowest manufacturing cost was the optimized material for producing the cutting blade in this experiment.

Keywords: cutting blade, hardening, tempering, wear

1. บทนำ

ปาล์มเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจสำคัญที่ทำรายได้เข้าประเทศเป็นปริมาณสูง และเป็นพืชที่ทำให้เกิดการสร้างงานให้แก่เกษตรกรมากกว่าหนึ่งแสนครัวเรือนและมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการใช้น้ำมันปาล์มเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกของโลก [1] การปลูกปาล์มเพื่อนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำมันพืช สบู่ หรือไบโอดีเซลนั้นพบว่าต้นปาล์มจะมีส่วนประกอบของผลปาล์มไม่เกินร้อยละ 30 เท่านั้นถูกนำมาทำการแปรรูป [2] ขณะที่ส่วนอื่น ๆ เมื่อสิ้นอายุการให้ผลปาล์ม เกษตรกรจะทำการย่อยซากด้วยเครื่องย่อยกิ่งไม้ทั่วไปซึ่งมีขนาดใหญ่และมีราคาสูง เพื่อให้มีขนาดเล็กลงและสามารถนำไปใช้ในงานรูปแบบอื่นต่อไปด้วยเหตุนี้เกษตรกรที่ปลูกต้นปาล์มจึงได้คิดค้นเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กขึ้นมาใช้งาน โดยใช้ต้นก้างจากรถไถขนาดเล็กในการทำให้ระบบการย่อยเศษเกิดขึ้น แต่ด้วยข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรม ทำให้เกิดปัญหาอายุการใช้งานที่สั้นลงของใบมีดตัดด้วยทางปาล์มที่มีความเหนียวกว่าเศษไม้ทั่วไปได้เกิดขึ้น และส่งผลทำให้ประสิทธิภาพใบมีดของเครื่องย่อยไม้ลดลง ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกษตรกรได้ทำการทดลองเลือกใช้วัสดุหลายชนิดและวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการต่างๆ รวมถึงหาข้อมูลการเลือกใช้โลหะที่เหมาะสมในการผลิตใบมีดเครื่องย่อยทางปาล์ม โดยมีการศึกษาอย่างเป็นระบบที่อาจทำให้เกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตปาล์มได้

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษาร่วมกันเปรียบเทียบสมบัติของโลหะต่างๆ เพื่อเลือกวัสดุที่ใช้ในการตัดวัสดุและมีการเปรียบเทียบผลการทดลองที่สำคัญดังต่อไปนี้ การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลของใบมีดตัดอ้อยที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน 2 ชนิด คือ SUPA และ SUP7 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าใบมีดตัดอ้อยที่อบชุบด้วยกระบวนการที่กำหนดและผ่านการอบคืนไฟ ทำให้ใบมีดมี

ความแข็งในระดับเดียวกับกับมีดตัดอ้อยที่นำเข้าจากต่างประเทศได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.5 [3] หรือการศึกษาการออกแบบและสร้างชุดทดสอบใบมีดตัดอ้อยข้าวเพื่อจุดประสงค์ในเลือกชนิดใบมีดที่มีความเหมาะสมของกลุ่มใบมีด 2 แบบ และตัวแปรการตัดต่างๆ ผลการทดลองที่ได้แสดงตัวแปรการออกแบบใบมีดที่สามารถย่อยต่ออ้อยข้าวได้มากที่สุดเท่ากับ 66% ที่มีความยาวของอ้อยข้าวสูงสุดคือ 8.1-12 ซม. [4] หรือการเลือกเหล็กกล้า 4 ชนิด ที่มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเพื่อการตัดวัสดุกระดาษแผ่นบางที่เรียงตัวเป็นชั้นหนา โดยทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้มีความแข็งและกระจายตัว พบว่าประสิทธิภาพในการตัดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมและต่ำกว่าเหล็กกล้าดามัสกัส [5] หรือการศึกษาคุณลักษณะและกลไกการสึกหรอของใบมีดที่มีความบางของใบมีดที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน 3 ชนิด ที่มีปริมาณคาร์บอนแตกต่างกัน ผ่านการชุบแข็งและอบคืนไฟ การเลือกใบมีดที่เหมาะสมทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบการสึกหรอและการจำลองสถานการณ์ และพบว่าอัตราการสึกหรอของใบมีดที่มีความบางมีผลเนื่องจากรูปร่างและความหนาของคมตัด [6] เป็นต้น งานวิจัยเหล่านี้ได้นำเสนอแนวคิดที่เป็นไปได้ในการเลือกวัสดุและกระบวนการในการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของใบมีดที่มีความเหมาะสมในการตัดวัสดุแต่ละชนิด เพื่อยืดอายุการใช้งานของใบมีดให้ยาวนานขึ้น

ด้วยข้อมูลปัญหาในการใช้งานเครื่องย่อยปาล์มที่มีอายุการใช้งานของใบมีดที่สั้น และข้อมูลการวิจัยในการพัฒนาใบมีดตัดวัสดุต่างๆ ที่กล่าวมาในข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดศึกษาการเลือกใช้วัสดุในการผลิตใบมีดที่มีในประเทศไทย และใช้วิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อนที่เหมาะสม ที่คาดว่าจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มอายุการใช้งาน โดยเฉพาะสมบัติในด้านความแข็งและความต้านทานต่อการ



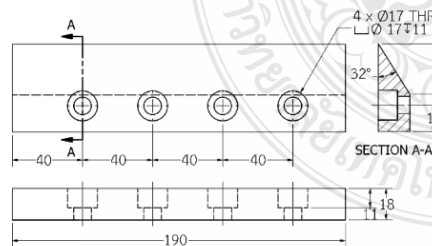
สึกหรอของใบตัด เพื่อก่อให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุนและสามารถรายงานผลการวิจัยนี้เข้าสู่กลุ่มผู้ใช้งาน กลุ่มช่างซ่อมบำรุงและผู้ที่เกี่ยวข้อง เป็นข้อมูลทางเลือกของเกษตรกร รวมถึงช่างซ่อมบำรุงเครื่องย้อยทางปาล์ม และเพื่อส่งผลกระทบต่อพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรของประเทศต่อไป

2. วิธีการทดลอง

วัสดุในการทดลองประกอบด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C เหล็กกล้าผสมต่ำเกรด SCM440 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 และเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง (%wt)

ธาตุ	S45C	SCM440	SUS304	SKD11
Fe	สมดุล	สมดุล	สมดุล	สมดุล
C	0.42	0.38	0.45	1.07
Si	0.23	0.23	1.70	0.97
Mn	0.67	0.65	0.02	0.45
P	0.02	0.02	0.03	0.04
S	0.02	0.02	7.70	0.02
Ni	0.04	0.04	17.41	0.14
Cr	0.98	0.96	0.24	12.35
Mo	0.17	0.15	-	1.86
Cu	0.01	0.01	-	0.04
Al	0.02	0.02	-	0.01
W	0.04	0.03	-	0.05



รูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบ (หน่วย: มม.)

เหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด ถูกนำมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการทางกลและมีการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็นขณะทำการขึ้นรูปให้มีรูปร่างเป็นใบตัดเครื่องย้อยทางปาล์มแนวตั้งขนาดเล็ก

ขนาดของใบตัดกว้าง 50 มม. ยาว 190 มม. และหนา 18 มม. ดังรูปที่ 1 เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานถูกนำไปทำการอบชุบด้วยกรรมวิธีการชุบแข็ง และการชุบแข็ง+การอบคืนไฟ ด้วยตัวแปรการอบชุบ ดังตารางที่ 2

ชิ้นงานใบตัดที่ผ่านการอบชุบจะถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ เพื่อทำการศึกษสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยา อันประกอบด้วย การทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี การทดสอบความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

การทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นไปตาม ASTM G65-94 กำหนดให้ชิ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 25 มม. ยาว 50 มม. หนา 18 มม. สำหรับโคนใบตัด และกว้าง 25 มม. ยาว 50 มม. หนาตามความลาดเอียงของคมตัดสำหรับปลายใบตัด ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยการขัดสีพื้นผิวด้วยล้อยาง ใช้สารขัดเป็นทรายแห้งขนาด 80 เมช ล้อยางหมุนด้วยอัตราเร็ว 200 รอบต่อวินาที เวลาในการทดสอบ 30 นาที และทำการเปรียบเทียบเทียบค่าน้ำหนักชิ้นงานที่สูญเสียไป [7]

ตารางที่ 2 สภาวะการอบชุบ

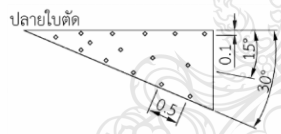
วัสดุ	สภาวะ	การชุบแข็ง	การอบคืนไฟ
S45C	อุณหภูมิ	1050 °C	650 °C
	เวลาอบแช่	60 นาที	45 นาที
	สารชุบ	น้ำ	อากาศ
SCM440	อุณหภูมิ	1200 °C	650 °C
	เวลาอบแช่	60 นาที	45 นาที
	สารชุบ	น้ำ	อากาศ
SUS304	อุณหภูมิ	1090 °C	650 °C
	เวลาอบแช่	60 นาที	45 นาที
	สารชุบ	น้ำมัน	อากาศ
SKD11	อุณหภูมิ	1030 °C	650 °C
	เวลาอบแช่	60 นาที	45 นาที
	สารชุบ	น้ำมัน	อากาศ

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ทำได้โดยการนำบริเวณคมตัดที่ถูกตัดแยกไปหล่อประคองด้วยเรซิน ทำการขัดเตรียมผิวชิ้นงานโดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150 400 1000 และ 2000 ในน้ำไหล แล้วขัดละเอียด



ด้วยผงเพชรขนาด 9 3 และ 1 ไมครอน บนผ้าสักหลาด จนกระทั่งได้ผิวที่มันวาวคล้ายกระจกเงา และกัดผิวหน้านั้นด้วยสารละลายกรด เพื่อให้ชิ้นงานสามารถแสดงรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นได้

ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแล้วจะถูกทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงไมโครวิกเกอร์สตาม JIS Z2244 กำหนดให้ใช้แรงในการกดทดสอบ 300 กรัมแรง เวลากดแช่ 10 วินาที [8] แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนประกอบ คือ การทดสอบความแข็งแรงที่โคนใบตัดและปลายใบตัด โดยทำการทดสอบความแข็งแรงบนพื้นผิวที่ถูกเตรียมไว้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การทดสอบความแข็งแรงบริเวณโคนใบตัดทำการทดสอบแบบสุ่มจำนวน 15 จุด แต่ละจุดห่างกันอย่างน้อย 0.5 มม. ขณะที่การทดสอบความแข็งแรงที่บริเวณปลายใบตัดกำหนดให้มีจุดทำการทดสอบดังรูปที่ 2 โดยจุดทำการทดสอบห่างจากปลายใบมีดประมาณ 0.5 มม. และทำการทดสอบห่างจากผิวด้านข้าง 0.1 มม. ระยะห่างการทดสอบแต่ละจุด 0.5 มม.



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดความแข็งแรงที่ปลายคมตัด (หน่วย: มม.)

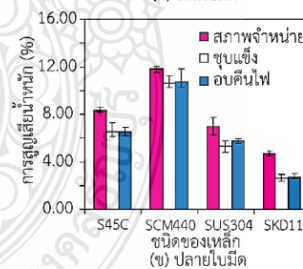
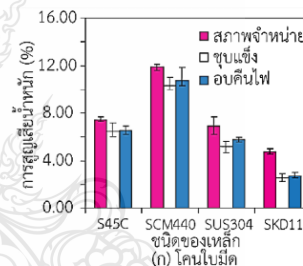
วิเคราะห์ข้อมูลต้นทุนการผลิตใบมีดตัดทางปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน โดยใช้สูตร ดังนี้

$$\text{ต้นทุนการผลิต} = \text{วัตถุดิบทางตรงที่ใช้ไป} + \text{ค่าแรงงานทางตรง} + \text{ค่าใช้จ่ายในการผลิต} \quad (1)$$

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

รูปที่ 4 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ โดยชิ้นงานที่มีการสูญเสีย น้ำหนักน้อยคือชิ้นงานที่มีความต้านทานการสึกหรอสูง และชิ้นงานที่มีการสูญเสียน้ำหนักมากคือชิ้นงานที่มีความต้านทานการสึกหรอต่ำ ซึ่งในเหล็กกล้าแต่ละชนิดจะให้ค่าความต้านทานการสึกหรอที่แตกต่างกัน ในสภาพจำหน่ายเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนที่สูงกว่าจะแสดงความ

ต้านทานการสึกหรอที่สูงกว่า นอกจากนั้นเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมอื่นๆ นอกเหนือจากธาตุคาร์บอนจะส่งเสริมให้มีความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นได้ ดังเห็นได้จากความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ซึ่งแสดงค่าความต้านทานสูงสุดในสภาพจำหน่ายของตำแหน่งโคนใบตัดดังรูปที่ 4 (ก) เมื่อทำการอบชุบแข็งเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิดด้วยสภาวะการอบชุบแข็งที่กำหนด พบว่าความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 14 13 26 47% สำหรับเหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ และเมื่อทำการอบคืนไฟเพื่อเพิ่มความเหนียวและคลายความเครียดจากกระบวนการอบชุบแข็ง พบว่าค่าความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าลดลงเป็น 2 5 11 7% สำหรับเหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 (ก)

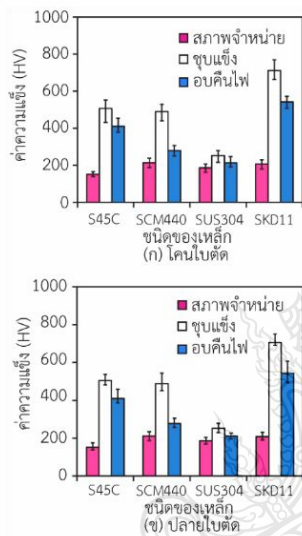


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็กการอบชุบ และการสูญเสียน้ำหนัก

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอในบริเวณปลายและโคนใบมีดตัด พบว่าความต้านทานการสึกหรอมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเกิดขึ้นที่โคนใบตัด ดังรูปที่ 4 (ข) อย่างไรก็ตาม พบค่าความต้านทานการสึกหรอมีค่าสูงกว่าโคนใบมีดประมาณ 2 3 3 และ 4% สำหรับ



เหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ
 นอกจากนั้นเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด เมื่อทำการอบคืนไฟ พบว่า
 ความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบมีค่าลดลงเพียง
 เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการชุบแข็งประมาณ 2 1
 3 และ 7% สำหรับเหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ
 SKD11 ตามลำดับ

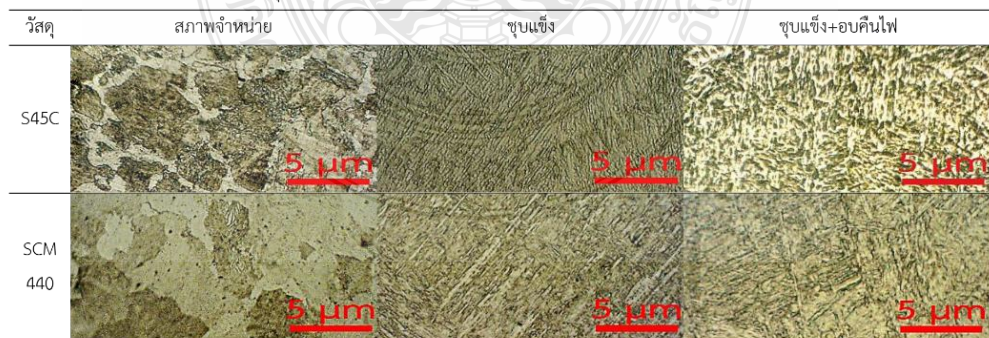


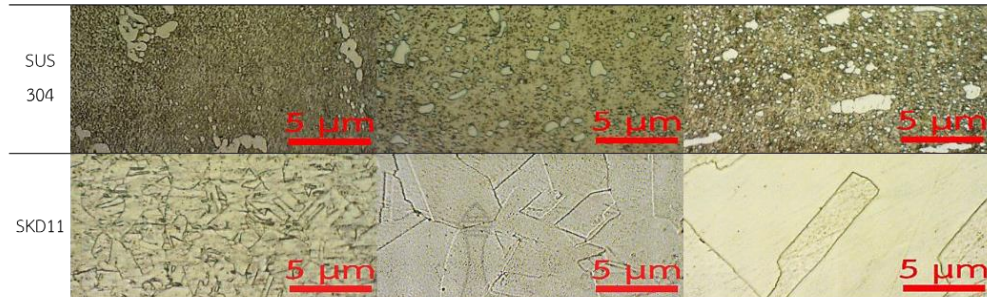
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็ก
 การอบชุบ และค่าความแข็ง

รูปที่ 5 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการ
 ทดสอบความต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุ จะเห็นได้ว่า
 ความแข็งของชิ้นงานทดสอบนั้นมีความสัมพันธ์ที่แปรผัน
 โดยตรงกับความต้านทานการสึกหรอ สังเกตได้จากผลการ
 ทดสอบของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ในสภาพชุบแข็ง ที่มี
 ค่าการทดสอบความต้านทานการสึกหรอดีที่สุดในกลุ่ม
 ตัวอย่างทั้งหมดนั้นมีการทดสอบความแข็งที่สูงมาก ดังรูป
 ที่ 5 (ก) และ (ข) ซึ่งหลังการชุบแข็งเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด ตาม
 สภาวะที่กำหนด พบว่าค่าความแข็งโดยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเป็น
 506 489 209 และ 709 HV สำหรับเหล็กกล้า S45C
 SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ และเมื่อทำการ
 อบคืนไฟชิ้นงานเหล็กกล้าเหล่านั้น พบว่าค่าความแข็งของ
 วัสดุโดยเฉลี่ยก็จะลดลงเหลือ 419 284 242 และ 543 HV
 สำหรับเหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ SKD11
 ตามลำดับ

รูปที่ 5 (ข) เป็นการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุ
 โดยเฉลี่ยระหว่างบริเวณโคนและปลายใบมีดตัด พบว่าที่
 บริเวณมุมปลายใบมีดตัดจะมีแนวโน้มของผลการทดสอบ
 เป็นไปในลักษณะเดียวกับบริเวณโคน กล่าวคือมีความแข็ง
 ของวัสดุโดยเฉลี่ยที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักและอาจถือได้
 ว่าเป็นค่าความแข็งเดียวกัน นอกเหนือไปจากในบริเวณที่จุด
 การกดทดสอบเข้าใกล้กับปลายคมตัดหรือผิวของชิ้นงาน
 ทดสอบเท่านั้นที่ค่าความแข็งของวัสดุจะให้ค่าความแข็งที่
 สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค





เมื่อนำเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อนจะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 3 ได้แก่เหล็กกล้าคาร์บอน S45C เมื่อทำการชุบแข็ง จะพบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายเสาเข็ม เรียกว่ามาร์เทนไซต์ ที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่โดยทั่วทั้งชิ้นงานอยู่ประมาณ 60% เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพจำหน่ายที่มีเพียงโครงสร้างเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลต์ และเมื่อทำการอบคืนไฟ พบว่าจำนวนโครงสร้างมาร์เทนไซต์จะลดลงแต่เฟอร์ไรท์จะเพิ่มขึ้น [7] เหล็กกล้าผสมต่ำ SCM440 จะมีโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานที่คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน S45C เมื่อนำไปชุบแข็ง พบว่ามีโครงสร้างมาร์เทนไซต์เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าคาร์บอน S45C แต่เนื่องจากในเหล็กกล้า SCM440 นั้นมีปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้อยกว่า จึงทำให้โอกาสในการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้นมีเพียง 56% ซึ่งน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้า S45C แต่ขนาดของโครงสร้างจะโตกว่า และการอบคืนไฟก็เช่นเดียวกันกับเหล็กกล้า S45C [9] โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 พบว่ามีโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายแผ่นกระเบื้องแตกถูกนำมาเรียงต่อกัน เรียกว่าออสเทนไนท์ [10] เมื่อทำการชุบแข็งจะเกิดการสะสมของโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้นที่บริเวณขอบเกรนซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง และในการอบคืนไฟเกรนจะมีขนาดที่โตขึ้นจากในสภาพชุบแข็ง และเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 เนื่องจากมีธาตุคาร์บอนและโครเมียมผสมอยู่ในปริมาณสูง เมื่อนำไปชุบแข็งโครงสร้างที่เกิดขึ้นจึงประกอบด้วยด้วยโครงสร้างพื้นฐานของมาร์เทนไซต์ และมีเมตคาร์ไบด์ประมาณ 5% กระจายอยู่โดยทั่ว เมื่อนำไปอบคืนไฟคาร์ไบด์

จะเกิดการรวมตัวกันและมีขนาดที่โตขึ้นตามลำดับ [11]

ตารางที่ 4 ต้นทุนการผลิตใบมีดตัดทางปาล์ม

วัสดุ	สถานะ	ค่าวัสดุ	ค่าแรง + โสหุ้ย	ค่าไฟฟ้า	ค่าสาร	รวม
S45C	จำหน่าย	150	450	0	0	600
	ชุบแข็ง	150	450	65	10	675
	อบคืนไฟ	150	450	73	10	683
SCM440	จำหน่าย	200	450	0	0	650
	ชุบแข็ง	200	450	65	10	725
	อบคืนไฟ	200	450	73	10	733
SUS304	จำหน่าย	600	550	0	0	1150
	ชุบแข็ง	600	550	65	34	1249
	อบคืนไฟ	600	550	73	34	1257
SKD11	จำหน่าย	300	550	0	0	850
	ชุบแข็ง	300	550	65	34	949
	อบคืนไฟ	300	550	73	34	957

ผลการทดสอบสมบัติทางกลของเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด พบว่า เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ทำใบมีดตัดทางปาล์ม เนื่องจาก สามารถทนการสึกหรอได้เป็นอย่างดีและมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าชนิดอื่น อย่างไรก็ตามยังมีหลักสำคัญที่ถูกลำบากใช้เพื่อตัดสินใจเลือกวัสดุ คือ การเลือกวัสดุที่ทำให้เกิดต้นทุนรวมน้อยที่สุด โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อคุณภาพเป็นสำคัญ ดังตารางที่ 4 ที่แสดงให้เห็นถึงต้นทุนรวมเฉลี่ยในกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด เมื่อนำมาวิเคราะห์จะพบว่าต้นทุนการผลิตใบมีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้า SKD11 และ SUS304 นั้นมีราคาต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าในเหล็กกล้า S45C และ



SCM440 อยู่มาก จึงได้นำเหล็กกล้า SKD11 และ S45C ซึ่งมีสมบัติทางกลที่มีความใกล้เคียงกันมาเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนการผลิต พบว่าเหล็กกล้า SKD11 นั้นมีราคาที่สูงกว่าเหล็กกล้า S45C ในสภาพชุบแข็งอยู่ถึง 29.5% แต่มีอัตราการสึกหรอต่างกันเพียง 4% และมีความแข็งต่างกัน 27.7%

4. สรุปผลการทดลอง

การเลือกวัสดุสำหรับนำไปผลิตเป็นใบมีดตัดทางปาล์มที่ตินั้น ควรจะต้องมีสมบัติทางกลที่สำคัญทั้งในด้านทนต่อการสึกหรอและมีความแข็งแรงสูง ซึ่งจะทำให้ใบมีดตัดมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้น จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ใบมีดตัดที่ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 ที่ผ่านการชุบแข็ง จะให้ค่าการทดสอบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้งาน โดยให้ผลการทดสอบอัตราการสึกหรอบริเวณปลายใบมีดตัดที่ 2.25% ภายในจะประกอบไปด้วยโครงสร้างคาร์ไบด์ความละเอียดเป็นจำนวนมากกระจายอยู่โดยทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้เหล็กกล้า SKD11 มีความแข็งเฉลี่ยถึง 710.3 HV

2. หากพิจารณาถึงต้นทุนของวัสดุแต่ละชนิดที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน พบว่า เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง จะมีต้นทุนการผลิตต่ำสุด โดยให้ค่าผลการทดสอบสมบัติทางกลในระดับปานกลาง ที่มีค่าผลการทดสอบอัตราการสึกหรอบริเวณปลายใบมีด 6.35% ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 513.6 HV และภายในโครงสร้างหลักจะประกอบด้วยโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] ศูนย์วิจัยธนาคารกสิกรไทย, ธุรกิจปาล์มน้ำมันหลังก้าวเข้าสู่ AEC, ข้อมูลจาก <http://www.ksmecare.com/Article/82/28155/ธุรกิจปาล์มน้ำมันหลังก้าวเข้าสู่ AEC> (วันที่สืบค้นข้อมูล 12 มกราคม 2559)

- [2] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี, ปาล์ม. ข้อมูลจาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ปาล์มน้ำมัน> (วันที่สืบค้นข้อมูล 17 มิถุนายน 2558)
- [3] ถนอม ลีตระกูล, การพัฒนาใบมีดในรถตัดอ้อยเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง, การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 17-19 ตุลาคม 2555
- [4] กัญญา โกสุมภ์, การศึกษาและออกแบบใบมีดสำหรับย่อยวัสดุเหลือใช้จากข้าว, การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5, 2556
- [5] J. D. Verhoeven and H. F. Clark, Carbon Diffusion Between the Layers in Modern Pattern Welded Damascus Blades, Materials Characterization, vol. 41, 1998
- [6] K. H. Lau, D. Mei, C. F. Yeung, and H. C. Man, Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade, Journal of Materials Processing Technology, vol. 102, 2000
- [7] K. Kimapong, P. Poonnayom, and V. Wattana-jitsiri, Microstructure and Wear Resistance of Hardfacing Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel in Agricultural Machine Parts, Materials Science Forum, vol. 872, 2016
- [8] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, อิทธิพลของการรองพื้นและการพอกผิวแข็งต่อสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, vol. 14, 2559
- [9] Yasar Totik, The Corrosion Behaviour of Manganese Phosphate Coatings Applied to AISI4140 Steel Subjected to Different Heat Treatments, Surface&Coatings Technology, 2006
- [10] S.A. Tukur, M.S. Dambatta, A. Ahmed and N.M. Mu'az, Effect of Heat Treatment Temperature on Mechanical Properties of the AISI304, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol. 3, 2014



การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2560
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
12-15 กรกฎาคม 2560 เชียงใหม่

[11] ฤทธิชัย เกาเนียม และ ชีรยุทธ กาญจนแสงทอง,
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติความแข็ง
เนื่องจากการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าในเหล็กกล้าเครื่องมืองาน
เย็นเกรด SKD11, การประชุมวิชาการด้านเทคโนโลยีการ
เชื่อมและการตรวจสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าธนบุรีร่วมกับมหาวิทยาลัยมหิดล, 2558



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นางสาวอัจฉราภา ดวงอัน
วัน เดือน ปีเกิด	23 มกราคม 2532
ที่อยู่	149/ 32 หมู่ 4 ซอย ศรีจันทร์ 29 ถนน ศรีจันทร์ ตำบล ในเมือง อำเภอ เมืองขอนแก่น จังหวัด ขอนแก่น 40000
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	นักวิชาการขนส่ง ฝ่ายตรวจการณ้ สำนักงานเจ้าท่าภูมิภาคที่ 7 สาขาขอนแก่น พ.ศ.2560 - ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08 - 6635 - 0157
อีเมลล์	atcharapha_d@mail.rmutt.ac.th

