



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์  
การปรับปรุงสมบัติเชิงกลใบเลื่อยสายพานสำหรับแปรรูปไม้ยางพาราด้วย  
กระบวนการชุบแข็งเปลวไฟ

คณะนักวิจัย

ดร.เจียรศักดิ์ ชูชีพ

ดร.นริศรา มหาธนิวงศ์

ดร.สมใจ จันทร์อุดม

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก เงินกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัย (เงินรายได้)

สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2558

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากเงินกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัย (เงินรายได้) ประจำปีงบประมาณ 2558 สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ SIT580877S

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยนี้ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ยุทธพงศ์ เพ็ญโรจน์ คณบดีคณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ผู้สนับสนุนส่งเสริมการทำวิจัย และ ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเครื่องมือกลาง ผู้ให้ใช้สถานที่ในการทำวิจัย ห้อง SD 304 – 306 ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจริญ เจตวิจิตร อดีตหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์ และ ครูอับดุลหะอ์คัฎี ยีละ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณูญ มาศนิยม หัวหน้าภาควิชากรรมเหมืองแร่และวัสดุ อาจารย์ชาญชัย แสวอู และ อาจารย์ปรีชา เพชรนุ้ย แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคสุราษฎร์ธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบในงานวิจัยนี้ รวมทั้ง นักศึกษาผู้ช่วยวิจัย นายกิตติพงษ์ มัฏฐารักษ์ นายพันธกานต์ ชมเชย นางสาวปวรรณรัตน์ นิตย์ฉาย และ นางสาวสุธาวี ไพจิตร นักศึกษาผู้ช่วยวิจัยระดับปริญญาตรี หลักสูตรเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะผู้ทรงคุณวุฒิที่ช่วยให้ข้อคิดเห็นตั้งแต่ขั้นตอนการเสนอโครงการตรวจทานรายงานการวิจัย และให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์

คณะนักวิจัย

กรกฎาคม 2559

## บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการชุบแข็งเปลวไฟออกซิเจน-อะเซทิลีน สำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแปรรูปไม่ยางพารา โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟแบบใช้คนควบคุมและใช้ระบบควบคุมความเร็ว

จากการศึกษาการชุบแข็งเหล็กเปลวไฟโดยใช้คนควบคุมที่ความดัน 4 psi พบว่าการเผาเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานด้วยเปลวไฟกลางของออกซิเจน-อะเซทิลีน จนกระทั่งอุณหภูมิ 660 °C (อุณหภูมิเริ่มต้น) แล้วเผาต่อไปอีกเป็นเวลา 8 s จะได้อุณหภูมิสูงสุด 773 °C (ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิสูงออสเทนไนต์ที่ 760 °C) และชุบด้วยน้ำ ทำให้ชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น การสึกหรอลดลง และโครงสร้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ แต่หากอุณหภูมิสูงสุดชิ้นงานสูงมากเกินไปที่ 876 °C จะทำให้ชิ้นงานแตกร้าว เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงส่งผลให้เกิดความเค้นในชิ้นงาน

เมื่อใช้ระบบควบคุมความเร็วในการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดชุบแข็งด้วยเปลวไฟสำหรับชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแทนการใช้คน พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ชุดชุบแข็งที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.42 cm/s และใช้สารชุบลมอัดร่วมกับน้ำ ทำให้เหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและการสึกหรอลดลง

จากการศึกษาการชุบแข็งด้วยเปลวไฟโดยใช้ระบบควบคุมความเร็วสำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานที่ได้รับจากโรงงาน A B และ C ผลการศึกษาพบว่าที่ความเร็วชุดชุบแข็งเปลวไฟ 0.42 cm/s โดยใช้น้ำเป็นสารชุบที่ปริมาณ 3.0 l/min เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟสำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 43.0-44.8 HRC เป็น 57.7-65.0 HRC และสามารถลดการสึกหรอจากปริมาณการสึกหรอช่วง 74.5-79.8 mg/cm<sup>2</sup> เหลือ 30.4-32.5 mg/cm<sup>2</sup>

## Abstract

This research investigated the flame hardening of steel band saw blades for wood processing. The optimum conditions of the manual and speed control system flame hardening were investigated.

The investigation of manual flame hardening at 4 psi pressure found that the neutral oxygen-acetylene flame heated up band saw blade specimens to a temperature of 660 °C (start temperature) and heated up further for 8 s, in which the specimens had a maximum temperature of 773 °C (above austenite temperature of 760 °C), and then quenched in water. These flame hardened specimens had an increased hardness and a decreased wear. Their microstructure transformed to martensite structure. However, the higher temperature of flame hardened specimens (at 876 °C) led to fracture due to the excessive cooling rate which generated the internal stress within the specimens.

According to the experiments using the speed control system, the optimum conditions were obtained at a speed of 0.42 cm/s and subsequently quenched by forced air-water mixing. The hardness of the flame hardened specimens was found to be increased, while the wear of these specimens decreased.

The flame hardening equipped with speed control system was applied to harden the as-received steel band saw from wood factory A, B and C. The results showed that the optimum condition of this flame hardening set was the speed of 0.42 cm/s and quenching with water quantity 3 l/min. leading to increase hardness from the 43.0-44.8 HRC to the range of 57.7-65.0 HRC. Further, the steel band saw worn decreased from the range of 74.5-79.8 mg/cm<sup>2</sup> to the range of 30.4-32.5 mg/cm<sup>2</sup>.

## สารบัญ

	หน้า
ปกใน	(ก)
กิตติกรรมประกาศ	(ข)
บทคัดย่อ	(ค)
Abstract	(ง)
สารบัญ	(จ)
รายการตาราง	(ช)
รายการรูป	(ฉ)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ไบเลื่อยสายพาน	3
2.2 การเพิ่มความแข็งแรงผิวเหล็กกล้า	5
2.3 โครงสร้างจุลภาค	8
2.4 TTT ไดอะแกรม	11
2.5 โครงสร้างของการชุบแข็งผิว	12
2.6 สารชุบ	14
2.7 หลักการทำเทมเปอร์สำหรับเหล็กกล้า	15
2.8 งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง	17
<b>บทที่ 3 การดำเนินโครงการ</b>	<b>21</b>
3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟแบบใช้คนควบคุม	21
3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟใช้ระบบควบคุม ความเร็ว	23
<b>บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล</b>	<b>41</b>
4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งเปลวไฟเหล็กกล้าไบเลื่อย สายพานแบบใช้คนควบคุม	41
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟใช้ระบบควบคุม ความเร็ว	47

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก ก บทความเสนอวารวิชาการ	68
ภาคผนวก ข ข้อเสนอโครงการที่เสนอต่อแหล่งทุน	77
ประวัติคณะผู้วิจัย	98

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อย	3
2.2	ปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเกรดต่างๆ	4
2.3	ค่าความแข็งของเหล็กกล้าจากกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟ	7
2.4	ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรขณะเปลี่ยนเฟส	10
3.1	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1	22
3.2	แผนการทดลองการชุบแข็งเปลวไฟเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแบบใช้คนควบคุมสำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1	22
3.3	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2	29
3.4	รายละเอียดสภาวะการทดลองเพื่อหาความเร็วชุดชุบแข็งสำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2	29
3.5	รายละเอียดสภาวะการทดลองเพื่อศึกษาความเร็วชุดเดินใบเลื่อยสำหรับการชุบแข็งฟันใบเลื่อย	30
3.6	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างใบเลื่อยสายพานจากโรงงาน A B และ C	32
3.7	แผนการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะเหมาะสมสำหรับใบเลื่อยสายพานจากโรงงาน A B และ C	33
4.1	การเทียบเกรดเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1	41
4.2	ค่าความแข็งเหล็กกล้าชิ้นงานใบเลื่อยตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชุบแข็งเปลวไฟที่สภาวะต่างๆ	42
4.3	การสึกหรอของชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชุบแข็งด้วยเปลวไฟแบบใช้คนควบคุมที่สภาวะต่างๆ	44
4.4	การเทียบเกรดเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2	47
4.5	ค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชุบแข็งที่สภาวะต่างๆ	48
4.6	ผลการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชุบแข็งสภาวะ 1 ตำแหน่ง P3	49
4.7	ค่าความแข็งชิ้นงานชุบแข็งฟันใบเลื่อย	52
4.8	ผลการทดสอบการสึกหรอของฟันใบเลื่อยก่อนและหลังการชุบแข็ง	53
4.9	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างใบเลื่อยสายพานตัวอย่างจากโรงงาน A B และ C	53
4.10	เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน ASTM A682	54
4.11	ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล	54

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.12	ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังการชุบแข็งที่สภาวะต่างๆ	55
4.13	ผลการทดสอบการสึกหรอเหล็กใบเลื่อยก่อนและหลังการชุบแข็ง	60



## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2 ก่อนการชุบแข็ง	50
4.8	โครงสร้างจุลภาคของใบเลื่อยหลังการชุบแข็งที่ความเร็ว 0.42 cm/s สารชุบ ลมอัด และน้ำ	51
4.9	โครงสร้างจุลภาคของใบเลื่อยหลังการชุบแข็งที่ความเร็ว 0.42 cm/s สารชุบ ลมอัด และน้ำ	51
4.10	ค่าความแข็งของชิ้นงานใบเลื่อยสายพานจากโรงงาน A B และ C ที่สภาวะการชุบแข็งต่างๆ	56
4.11	อัตราการเย็นตัวของสารชุบชนิดต่างๆ	58
4.12	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง	61
4.13	โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ ออสเตนไนต์	61
4.14	กราฟแสดงอุณหภูมิของชิ้นงานที่เปลี่ยนโครงสร้างออสเตนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์	62
4.15	โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟชิ้นงานเกิดจากการแตกหัก	63
4.16	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีค่าความแข็งลดลง	63

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผล

อุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูปและเฟอร์นิเจอร์เป็นอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง มูลค่าส่งออกและนำเข้าจากต่างประเทศภาคใต้ในปี 2555 มีมูลค่ากว่า 26,219 ล้านบาท (<http://www2.bot.or.th>, 2556) โดยอุตสาหกรรมดังกล่าวมีต้นน้ำที่สำคัญคือโรงเลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการแปรรูปจากไม้ท่อนเป็นไม้ขนาดต่างๆ เพื่อป้อนเข้าสู่อุตสาหกรรมในขั้นถัดไป

ใบเลื่อยแปรรูปไม้ยางพาราเป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่สำคัญสำหรับการแปรรูปที่มีผลต่อผลผลิต ทั้งด้านคุณภาพผิว ค่าเผื่อ ความสูญเสียจากขนาดคลองเลื่อย และอายุการใช้งาน (สุธี วิสุทธิเทพกุล และคณะ, 2546ก) การปรับปรุงใบเลื่อยให้ต้านทานการสึกหรอเป็นวิธีการช่วยยืดอายุการใช้งาน ลดการเสียเวลาในการถอดใบเลื่อยเพื่อลับ และการปรับตั้ง อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารายังไม่ได้ให้ความสำคัญกับกระบวนการลับ บำรุงรักษา และตกแต่งใบเลื่อยเท่าที่ควร (สุธี วิสุทธิเทพกุล และคณะ, 2546ข)

กรรมวิธีการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟเป็นกรรมวิธีที่มีต้นทุนที่ต่ำในการชุบแข็งผิวเพื่อลดการสึกหรอและการยืดอายุการใช้งานที่มีการเสียดสี โดยที่สามารถคงสมบัติด้านความเหนียวของวัสดุเดิมไว้ ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวต้องเลือกเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนเหมาะสมสำหรับกระบวนการชุบ เนื่องจากระหว่างกระบวนการชุบแข็งผิวไม่มีการเพิ่มธาตุเจือระหว่างกระบวนการชุบ (Davis, 2002) ถึงแม้ว่ากรรมวิธีการชุบแข็งผิวเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน แต่มีความยากในการควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอและคงที่ เพื่อให้ได้สมบัติความแข็งที่สม่ำเสมอทั้งชิ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาศึกษาการชุบแข็งผิวเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพานสำหรับแปรรูปไม้ยางพาราด้วยเปลวไฟ เพื่อศึกษากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับชุบแข็งผิวเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อย โดยเบื้องต้นทำการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพานที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา รวมถึงศึกษาศึกษากรรมวิธีการชุบแข็งใบเลื่อยสายพานดังกล่าวด้วยเปลวไฟ

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพาน
- (2) เพื่อศึกษากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพาน

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) ทราบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพาน
- (2) ทราบกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพาน

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาเกรดเหล็กใบเลื่อยที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราปัจจุบัน วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ศึกษาช่วงอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน ออกแบบระบบหัวแก๊สให้ความร้อนและการใช้ตัวกลางหล่อเย็น ทดลองกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงเนื้อหาเกี่ยวกับ ใบเลื่อยสายพาน การเพิ่มความแข็งแรงในการชุบผิว โครงสร้างจุลภาค TTT ไดอะแกรม การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของการชุบแข็งผิว สารชุบ หลักการทำเหมเปอร์เหล็กกล้า งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดดังนี้

#### 2.1 ใบเลื่อยสายพาน

สุธี และคณะ (2546ก) ระบุว่า การแปรรูปไม้ซุงท่อนด้วยเครื่องเลื่อยสายพานเป็นที่นิยมใช้ เพราะขนาดคลองเลื่อยที่เล็ก และผลผลิตที่สูง ซึ่งการเลือกใช้ใบเลื่อยที่มีคุณสมบัติถูกต้องและเหมาะสมกับการใช้งานจะทำให้ประหยัดและลดเวลาการทำงานของช่างแต่งเลื่อย (saw doctor) โดยระบุว่า ส่วนผสมทางเคมีสำหรับเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพานที่มีความหนา มากกว่า 1.00 มิลลิเมตร (19 BWG หรือ 0.04 นิ้ว) ควรมีส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อย

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.75	0.20	0.35	0.03	0.02	2.0

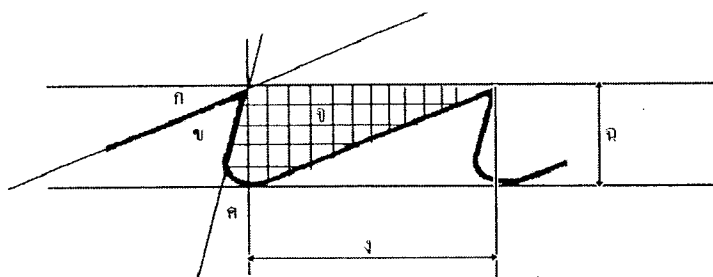
พร้อมทั้งระบุว่าปริมาณของนิเกิลมีผลต่อความเหนียวและทนทานต่อการใช้งาน โดยควรมีปริมาณของนิเกิลไม่น้อยกว่า 2.0% ส่วน อัมไพ เปี่ยมอรุณ (2549) กล่าวถึงสมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพาน ต้องมีความทนทานต่อแรงกระแทกจากสิ่งที่มีฝังในเนื้อไม้ ต้องทนทานต่อภาระงานซ้ำๆ การงอตัวและคลายตัวออกจากพูลเลย์ระหว่างการเลื่อย รวมทั้งความเรียบตรงและแบนราบ โดยระบุว่าเหล็กกล้าที่นิยมใช้ทำใบเลื่อยสายพานที่ นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ (1) เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอน 0.75% ตามมาตรฐาน AISI W1-8 และ W1-7 หรือตามมาตรฐาน JIS G4401 เกรด SK5 และ SK6 และเหล็กกล้าผสมที่มีปริมาณคาร์บอน 0.75-1.00% ตามมาตรฐาน AISI I-6 หรือ JIS G4404 เกรด SKS5 และ SKS51 โดยปริมาณธาตุเจือของเหล็กกล้าต่างๆ ดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเกรดต่างๆ

JIS	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Cu	other
4401 เกรด SK5	0.80-0.90	≤0.35	≤0.50	≤0.03	≤0.03	≤0.25	≤0.30	-	-	-	≤0.25	-
4401 เกรด SK6	0.70-0.90	≤0.35	≤0.50	≤0.03	≤0.03	-	≤0.30	-	-	-	-	-
4404 เกรด SKS5	0.75-0.85	≤0.35	≤0.50	≤0.03	≤0.03	0.70- 1.30	0.20- 0.50	-	-	-	≤0.25	-
4404 เกรด SKS51	0.75-0.85	≤0.35	≤0.50	≤0.03	≤0.03	1.30- 2.00	0.20- 0.50	-	-	-	-	-

ที่มา : วารุณี และ อรจิรา (2554)

สำหรับลักษณะใบเลื่อยและส่วนต่างๆ สู้ชี วิสุทธิเทพกุล และคณะ (2546ก) ระบุส่วนประกอบของใบเลื่อยแปรรูปไม้ยางพาราโดยทั่วไปว่าประกอบด้วย (ก) มุมหลังคม (clearance) (ข) มุมฟัน (tooth angle) (ค) มุมหน้าคม (hook angle) (ง) ระยะห่างระหว่างฟัน (pitch) (จ) พื้นที่ท้องฟัน (gullet area) (ฉ) ความสูงของฟัน (tooth height) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนต่างๆ ของใบเลื่อย

ที่มา : สู้ชี วิสุทธิเทพ และคณะ (2546ก)

สำหรับการใช้งานใบเลื่อยในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราในประเทศไทยนั้น สู้ชี วิสุทธิเทพกุล และคณะ (2546ก) ได้สำรวจคุณลักษณะใบเลื่อยและสรุปไว้ดังนี้

ภาคตะวันออกใช้ใบเลื่อยสายพานขนาดความกว้าง 5-8 นิ้ว ความยาว 6.20-8.30 เมตร/ปั่น ความหนาใบเลื่อย 17-18 BWG (1.47-1.24 มิลลิเมตร) การใช้งานเฉลี่ย 3-7 ชั่วโมง/ปั่น ลักษณะของฟันเลื่อยแบบหลังฟันตรงท้องฟันเป็นมุมแหลมตั้งระยะระหว่างฟัน 1 3/8-1 5/8 นิ้ว ความสูงของฟัน 3/8-5/16 นิ้ว พื้นที่ท้องฟัน 0.24-0.46 ตารางนิ้ว ขนาดคลองเลื่อย 2.44-2.65 มิลลิเมตร การจัดมุมฟันของใบเลื่อย มุมหน้าคม 15-26 องศา มุมฟัน 44-61 องศา และมุมหลังคม 13-21 องศา

ภาคใต้ใบเลื่อยสายพานกว้าง 4-6 นิ้ว ความยาว 6.40-7.60 เมตร/ปิ่น ความหนาใบเลื่อย 18 BWG (1.24 มิลลิเมตร) การต่อใบเลื่อยมี 2 ลักษณะ คือ เชื่อมด้วยแก๊สและเชื่อมด้วยไฟฟ้า (MIG) การใช้งานใบเลื่อยเฉลี่ย 2-4 ชั่วโมงต่อปิ่น ลักษณะฟันเลื่อยเหมือนภาคตะวันออกระยะห่างระหว่างฟัน  $1\frac{3}{8}$ - $1\frac{1}{12}$  นิ้ว ความสูงฟัน  $\frac{3}{8}$ - $\frac{7}{16}$  นิ้ว ฟันที่ท้องฟัน 0.29-0.35 ตารางนิ้ว คลองเลื่อย 2.50-2.93 มิลลิเมตร มีมุมหน้าคม 28-30 องศา มุมฟัน 39-52 องศา และมุมหลังคม 17-25 องศา

ต่อมา สุธี วิสุทธิเทพ และคณะ (2546ก) ได้พัฒนารูปแบบใบเลื่อยสายพานสำหรับโรงเลื่อยที่เป็นลักษณะ s-shape ที่เหมาะสำหรับใช้กับใบเลื่อยสายพานหน้ากล้าวแบบบีบปลายฟัน (swaged tooth) ด้านหลังฟันเลื่อยโค้งลดการเสียดสีในการแปรรูป ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบใบเลื่อยแบบ s-shape

ที่มา : สุธี วิสุทธิเทพ และคณะ (2546ข)

โดยรูปแบบใบเลื่อยดังกล่าวสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าแบบอื่นๆ โดยใช้พลังงานไฟฟ้า  $27.511 \text{ kWh/m}^3$

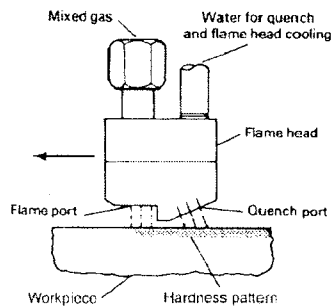
นอกจากนี้ในผลการสำรวจในกระบวนการลับและตกแต่งใบเลื่อย สุธี วิสุทธิเทพกุล และคณะ (2546ก) ได้เสนอแนะให้โรงเลื่อยปรับปรุงกระบวนการลับตกแต่งและบำรุงรักษาที่ถูกต้องเพื่อช่วยลดความสูญเสียจากการคัดคลองเลื่อยมากเกินไปจนความจำเป็น ยืดอายุการใช้งานใบเลื่อยหรือการเสียหายของใบเลื่อย รวมทั้งการนวดและรีดใบเลื่อยที่ถูกต้องจะทำให้การใช้นานขึ้น และไม่สายไปมาระหว่างการแปรรูปไม้

## 2.2 การเพิ่มความแข็งแรงผิวเหล็กกล้า

กรรมวิธีที่ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงผิวเหล็กกล้าเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านทานการสึกหรอโดยไม่ส่งผลต่อสมบัติด้านในชิ้นงานมี 3 กรรมวิธี คือ วิธีการแพร่ (diffusion methods) วิธีการให้พลังงาน (applied energy methods) และ วิธีการเคลือบและปรับเปลี่ยนผิว (coating and surface modification) (Davis, 2002) การเพิ่มความแข็งแรงผิวของผิวด้วยกรรมวิธีชุบแข็งเปลวไฟเป็นกรรมวิธีการให้ความร้อนเฉพาะจุดตำแหน่งที่ต้องการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน โดยลักษณะของการชุบแข็งเปลวไฟมีเปลวไฟจากหลากหลายแหล่งกำเนิดความร้อนระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิเจนโดยแก๊สที่มีใช้กันอยู่กันโดยทั่วไป คือ แก๊สอะเซทิลีน-ออกซิเจน ซึ่งสามารถให้ความร้อนเปลวไฟสูงสุดถึง 3,105 องศาเซลเซียส ที่สัดส่วนผสม 1:1 ให้ค่าความร้อน 26.7 เมกะจูลต่อ

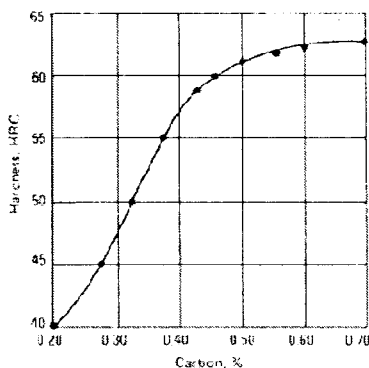
ลูกบาศก์เมตร (ASM Handbook Vol.4, 1990) นอกจากนี้ Gronegress (1964) ได้ระบุว่า การชุบแข็งด้วยเปลวไฟอะเซทิลีน-ออกซิเจน สามารถให้ความร้อนสูงสุด 3100 องศาเซลเซียส และนิยมใช้น้ำเป็นสารชุบ (quenching medium) ปริมาณที่ใช้ประมาณ 10 - 25% ของปริมาตรแก๊สออกซิเจน กรรมวิธีการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟเป็นการให้ความร้อนด้วยเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิเจน

สำหรับกรรมวิธีชุบแข็งเปลวไฟ มนัส (2543) แบ่งเป็น 4 แบบตามลักษณะการทำงาน คือ (1) การชุบแข็งแบบอย่างง่าย (manual hardening) เป็นการใช้หัวเผาแบบธรรมดาเผาที่ชิ้นงานโดยการเคลื่อนที่หัวเผาไปมาเพื่อให้ชิ้นงานได้รับความร้อนสม่ำเสมอ แล้วนำไปจุ่มน้ำหรือน้ำมัน (2) แบบวิธีหมุนชิ้นงาน (spin hardening) เหมาะกับชิ้นงานกลม โดยการจับชิ้นงานหมุนช้าๆ ประมาณ 30 รอบต่อนาที หัวเผาชิ้นงานจนได้รับความร้อนแล้วใช้น้ำฉีดหรือนำไปจุ่มในน้ำมัน เช่น การชุบแข็งล้อครน เป็นต้น (3) แบบต่อเนื่อง (progressive hardening) เหมาะสำหรับการชุบแข็งแนวราบ (flat surface) ที่มีความกว้างและความยาว การทำงานจะประกอบด้วยหัวเผาที่มีท่อฉีดเคลื่อนที่ช้าๆ ประมาณ 50-200 มิลลิเมตรต่อนาที และ (4) แบบหมุนชิ้นงานต่อเนื่อง (progressive spin hardening) เหมาะสำหรับการชุบแข็งเพลลาที่มีความยาวมาก สำหรับวิธีแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วยหัวเผาและชุดปล่อยสารชุบดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การชุบแข็งแบบต่อเนื่อง  
ที่มา : Davis (2002)

โดยกรรมวิธีชุบแข็งเปลวไฟเป็นกรรมวิธีที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมี ดังนั้นปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าที่เหมาะสม ซึ่งปริมาณคาร์บอนเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อระดับความแข็งของผิวชิ้นงาน ในทางปฏิบัติระดับความแข็งที่สูงที่สุดที่สามารถทำได้จากปริมาณคาร์บอนโดยวิธีการชุบแข็งเปลวไฟและแบบเหนียวน้ำ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ค่าความแข็งจากการชุบแข็งเปลวไฟหรือเหนียวนำกับปริมาณคาร์บอน  
ที่มา : Davis (2002)

กรรมวิธีในการเพิ่มสมบัติด้านด้านการสึกหรอที่มีต้นทุนต่ำโดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีใช้กันอยู่โดยทั่วไปคือการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟ ซึ่งเป็นการเพิ่มสมบัติความแข็งเฉพาะจุดเพื่อลดการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานที่มีการเสียดสี โดยที่สามารถคงสมบัติด้านความเหนียวของวัสดุเดิมในตำแหน่งอื่นๆไว้ ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวต้องเลือกเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนเหมาะสมสำหรับกระบวนการชุบเท่านั้น เนื่องจากระหว่างกระบวนการชุบแข็งผิวไม่มีการเพิ่มธาตุเจอร์ระหว่างกระบวนการชุบ (Davis, 2002) แต่มีจุดด้อยไม่ซับซ้อน แต่มีความยากในการควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอและคงที่ เพื่อให้ได้สมบัติความแข็งที่สม่ำเสมอทั้งชิ้น

โดยการชุบแข็งที่สามารถต้านความล้าได้มากที่สุดเมื่อชิ้นงานเกิดความเค้นตกค้างแบบกด (residual compressive stress) ที่ค่า 172 เมกะพาสคัล หากความแข็งผิวน้อยกว่า 1.75 มิลลิเมตร ความเค้นตกค้างเป็นแบบดึง (residual tensile stress) ดังนั้นควรชุบแข็งผิวให้มีระยะความแข็งลึก (hardening depth) ไม่น้อยกว่า 2.7 มิลลิเมตร และมีปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์ไม่น้อยกว่า 90% โดยไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่กำลังขยาย 500x (Davis, 2002)

โดย Davis (2002) สรุปค่าความแข็งของการชุบแข็งผิวด้วยสารชุบต่างๆ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำบางเกรด ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าจากกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟ

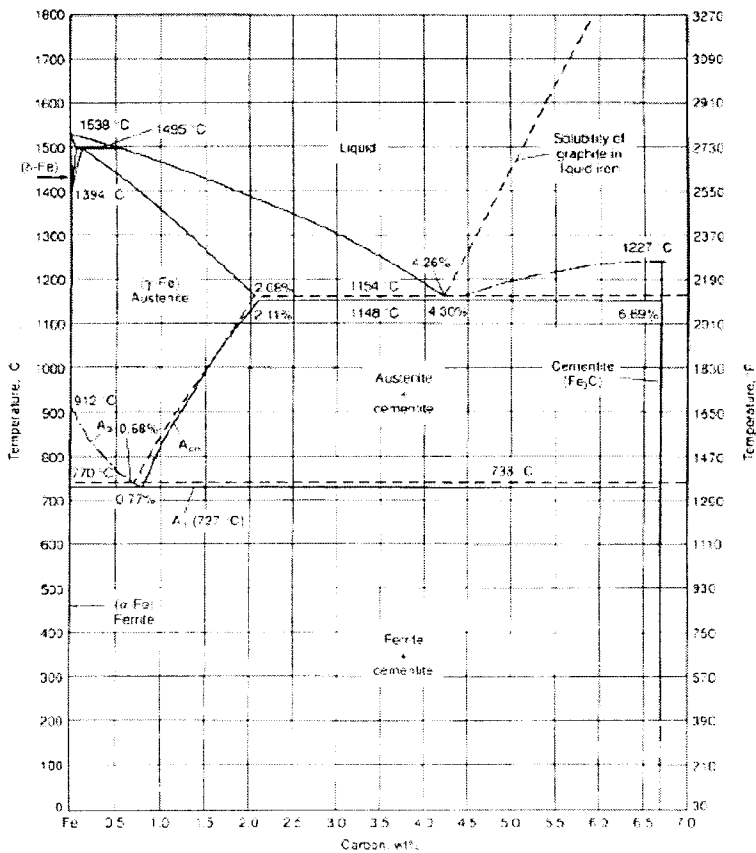
เหล็กกล้า	ค่าความแข็ง (HRC) จากสารชุบ		
	อากาศ	น้ำมัน	น้ำ
1040-1050	-	52-58	55-60
1055-1075	50-60	58-62	60-63
1080-1095	55-62	58-62	62-65
6150	-	52-60	55-60

ที่มา : Davis (2002)



## 2.3 โครงสร้างจุลภาค

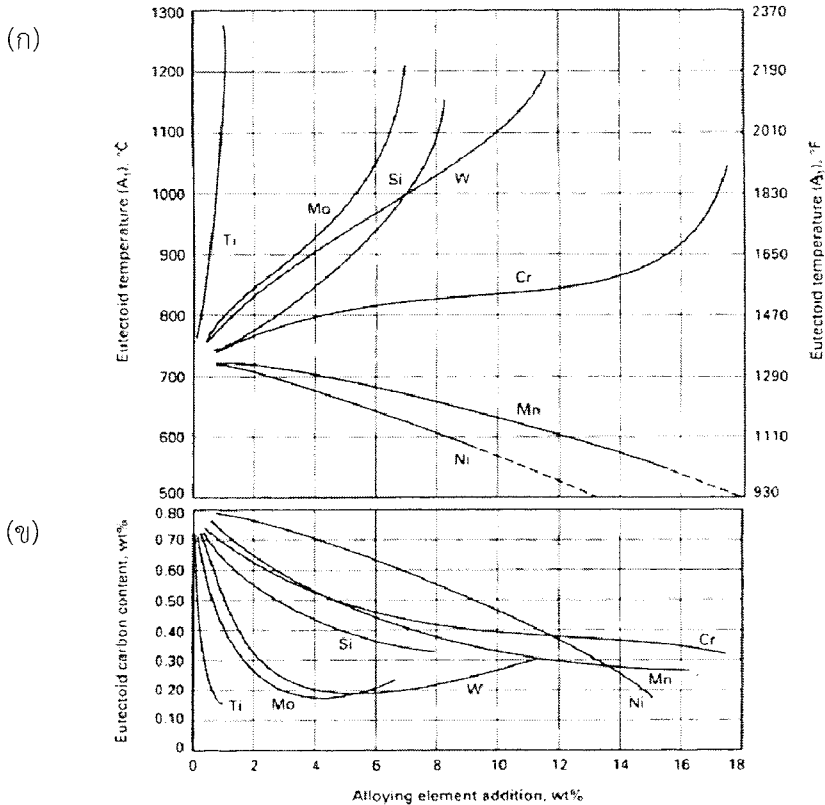
กลไกการเพิ่มความแข็งระหว่างกระบวนการชุบแข็งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตามอุณหภูมิของเหล็ก โดยที่อุณหภูมิห้องเหล็กโครงสร้าง BCC เรียกว่า “เหล็กแอลฟา” ( $\alpha$ -Fe) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ ( $T_{aus}$ ) โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น FCC เรียกว่า “เหล็กแกมมา” ( $\gamma$ -Fe) โดยเหล็กแอลฟามีปริมาณคาร์บอน (C) ที่สามารถละลายได้สูงสุด 0.022% ที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส และเหล็กแกมมามีปริมาณคาร์บอนที่สามารถละลายได้สูงสุด 2.11% ที่อุณหภูมิ 1148 องศาเซลเซียส ผลจากการความสามารถในการละลายของปริมาณคาร์บอนของเหล็กแกมมามากกว่าเหล็กแอลฟา เมื่อเหล็กที่มีโครงสร้างแกมมาเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (quenching) ในสภาวะไม่สมดุล และไม่เกิดการแพร่ (diffusion) ของคาร์บอน ทำให้เกิดสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (super saturated solid solution) ส่งผลให้โครงสร้างของเหล็กมีการบิดเบี้ยวกลายเป็นโครงสร้าง BCT (body center tetragonal) เกิดความเครียดในอะตอมส่งผลให้เพิ่มความแข็งเรียกโครงสร้างดังกล่าวว่ามาร์เทนไซต์ (โพลีน, 2555) รายละเอียดของเฟสต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เฟสไดอะแกรม Fe-C

ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

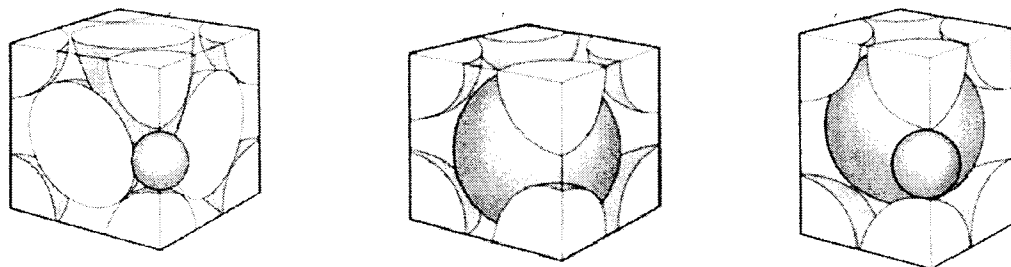
โดย ASM Handbook Vol.4 (1998) ระบุว่า การเติมธาตุเจือในเหล็กกล้ามีผลต่อเฟสไดอะแกรมระหว่าง Fe-C ทำให้ขอบเขตของ  $A_1$   $A_3$   $A_{CM}$  และ ส่วนผสมและอุณหภูมิยูเทคตอยด์เปลี่ยนไป โดยการเติมธาตุเจือ เช่น Ti Mo Si และ Cr มีผลทำให้อุณหภูมิยูเทคตอยด์เพิ่มขึ้น ส่วนการเติมธาตุเจือ Mn มีผลให้อุณหภูมิยูเทคตอยด์ต่ำลง รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) สำหรับผลของการเติมธาตุเจือมีผลทำให้ส่วนผสมยูเทคตอยด์ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนลดลงตามปริมาณของการเติม เช่น Mn Cr และ Si รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข)



รูปที่ 2.6 ผลของการเติมธาตุเจือต่อ (ก) อุณหภูมิยูเทคตอยด์ (ข) ปริมาณคาร์บอนที่ส่วนผสมยูเทคตอยด์

ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

ลักษณะของโครงสร้างผลึก FCC ของเฟสออสเทนไนต์ที่มีความสามารถในการละลายอะตอมคาร์บอน 2.11% ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างผลึก BCC เฟสเฟอร์ไรต์ ดังแสดงในรูป 2.7 (ข) และโครงสร้างผลึก BCT เฟสมาร์เทนไซต์เกิดสภาวะอิมิตัวยิ่งยวด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ค)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึก (ก) ออสเทนไนต์ (FCC) (ข) เฟอร์ไรต์ (BCC) (ค) มาร์เทนไซต์ (BCT)  
ที่มา : ASM Handbook Vol.9 (2004)

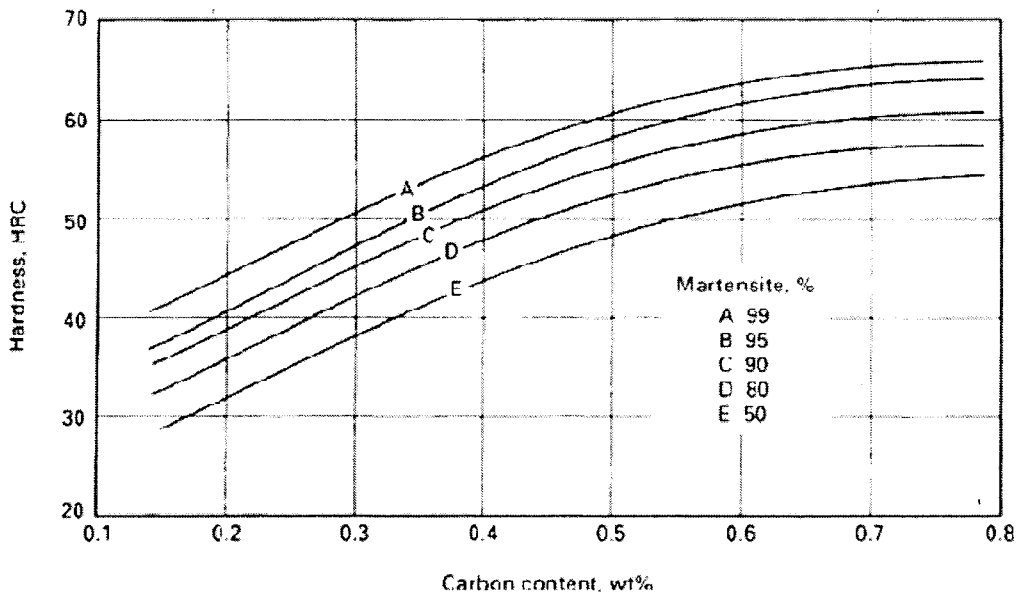
โดยการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเหล็กกล้า ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของโครงสร้างจากออสเทนไนต์ไปสู่ มาร์เทนไซต์เกิดการขยายตัวตามความสัมพันธ์  $4.64-0.53x(\%C)$  รายละเอียดดังในตารางที่ 2.4 ซึ่งการขยายตัวดังกล่าวส่งผลต่อการเกิดความเค้นตกค้างหากเกินขีดจำกัดของเหล็กกล้านั้นๆ จะเกิดการแตกร้าวระหว่างการเปลี่ยนเฟส

ตารางที่ 2.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรขณะเปลี่ยนเฟส

การเปลี่ยนเฟส	ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง (%)
Spheroidized pearlite $\rightarrow$ Austenite	$4.64-2.21x(\%C)$
Austenite $\rightarrow$ Martensite	$4.64-0.53x(\%C)$
Austenite $\rightarrow$ Lower bainite	$4.64-1.43x(\%C)$
Austenite $\rightarrow$ Upper bainite	$4.64-2.21x(\%C)$

ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

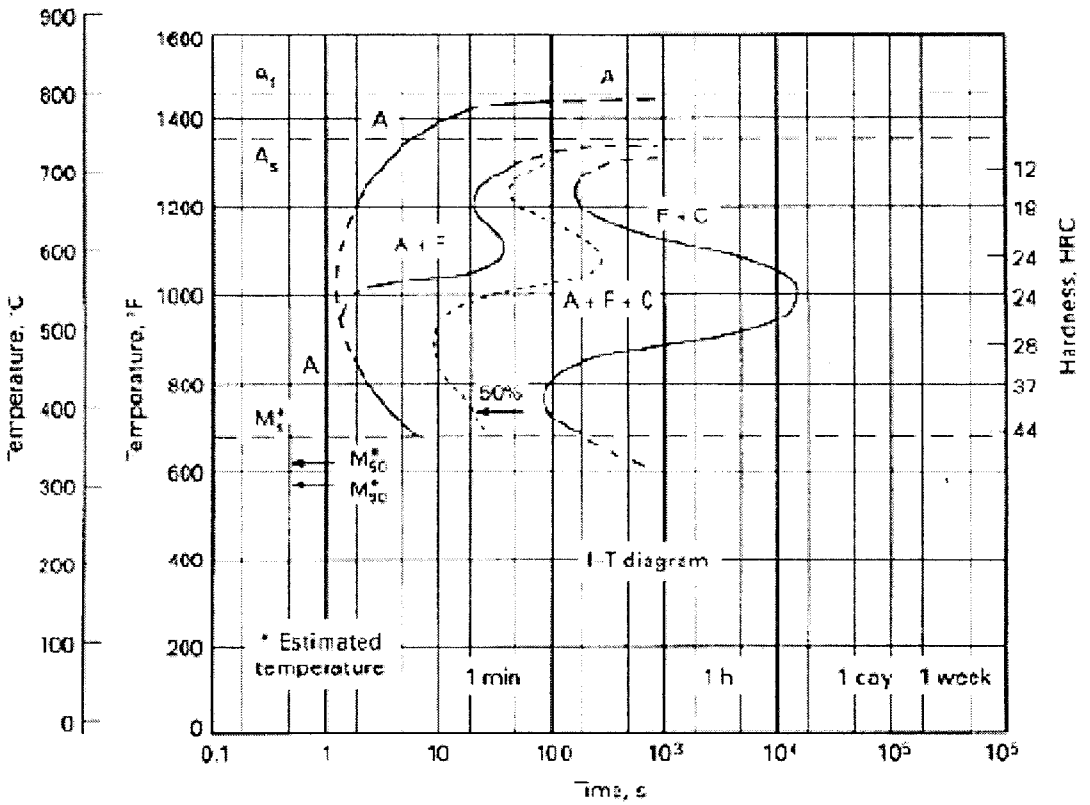
ซึ่งการเปลี่ยนจากเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ไปสู่ มาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งมากกว่าของเหล็กกล้า ภายหลังจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในสารชุบ ค่าความแข็ง (HRC) ขึ้นกับปริมาณคาร์บอนที่ผสมในเหล็กกล้าและขึ้นกับปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้า รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง ปริมาณคาร์บอน และปริมาณมาร์เทนไซต์  
ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

### 2.4 TTT ไดอะแกรม

อัตราการเพื่อให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่ต้องการสามารถแสดงได้ด้วย TTT ไดอะแกรม (time-temperature-transformation diagrams) โดยการสร้าง TTT ไดอะแกรมใช้การอบตัวอย่างเหล็กกล้าขนาดเล็กลงถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วทำให้ตัวอย่างเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอ่างตะกั่วหรือเกลือแช่จนตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ ตัวอย่างภายหลังจากเย็นตัวอย่างรวดเร็วถูกนำมาตรวจสอบหาเวลา ณ ที่เริ่มต้นเกิดการเปลี่ยนเป็นเฟสไรต์ เฟอร์ไรต์ และเบไนต์ ตัวอย่าง TTT ไดอะแกรมของเหล็กกล้า 4130 ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากต้องการให้เหล็กกล้า 4130 กลายเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ 100% เหล็กกล้าต้องเย็นตัวผ่าน 540 องศาเซลเซียส และเริ่มเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนซิติก ( $M_s$ ) ที่เวลาน้อยกว่า 1.5 วินาที หากต้องการให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ 50% ต้องเย็นตัวจากเฟสออสเทนไนต์ไปสู่จุดเริ่มต้นการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ( $M_s$ ) ในเวลาไม่เกิน 10 นาที



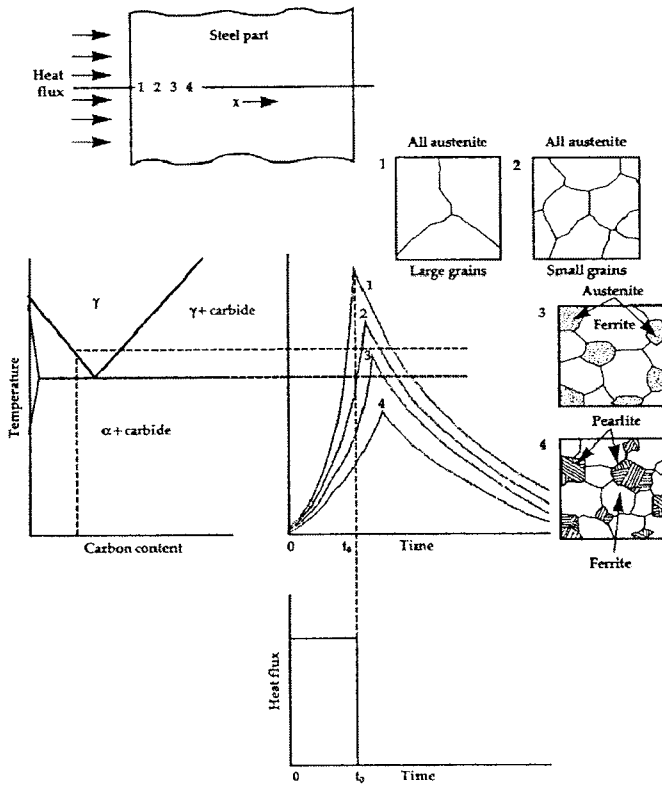
รูปที่ 2.9 TTT ไดอะแกรมเหล็กกล้า 4130  
ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

### 2.5 โครงสร้างของการชุบแข็งผิว

ASM Handbook Vol.4 (1998) ระบุถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระหว่างการให้ความร้อน (heating) และการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (quenching) ของการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟมีลักษณะการเปลี่ยนโครงสร้างระหว่างกระบวนการให้ความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.10 โดยในช่วงแรกเป็นช่วงการให้ความร้อนด้วยเปลวไฟบริเวณผิวชิ้นงานที่โดนเปลวไฟ (ตำแหน่งที่ 1) อุณหภูมิจะสูงกว่าบริเวณที่อยู่ลึกจากผิวชิ้นงาน (ตำแหน่งที่ 4) ส่งผลให้แต่ละตำแหน่งจากผิวชิ้นงานมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมพบว่า มีเฉพาะตำแหน่งที่ 1 และ ตำแหน่งที่ 2 ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิออสเทนไนต์ ส่วนตำแหน่งที่ 3 และ 4 อุณหภูมิไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์

เมื่อชิ้นงานสัมผัสกับสารชุบเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 อุณหภูมิชิ้นงานถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง และการดำนาการสึกหรอ ส่วนที่ตำแหน่ง 4 ซึ่งอยู่ลึกจากผิวชิ้นงานอุณหภูมิต่ำกว่าตำแหน่งดังกล่าวไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ จึงเกิดเฟสเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ส่งผลให้ความแข็งแรงจากกรรมวิธีการชุบแข็งด้วยเปลวไฟทำให้เกิด

ความแข็งที่แตกต่างกันไปตามระยะความลึกจากผิวซุบที่สัมผัสกับเปลวไฟ รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.10

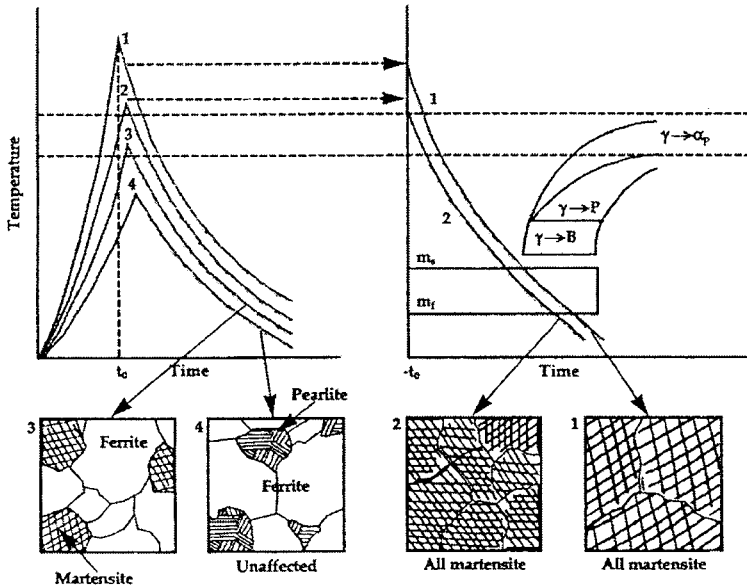


รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตามอุณหภูมิเทียบจากผิวชิ้นงานที่โดนเปลวไฟ  
ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

โดยการซุบแข็งเปลวไฟ Gronegress (1964) ระบุว่าเปลวไฟอะเซทิลีน-ออกซิเจน สามารถให้ความร้อนสูงสุดถึง 3100 องศาเซลเซียส ดังนั้นระยะให้ความร้อนชิ้นงานควรสั้น เพื่อป้องกันส่วนผิวที่สัมผัสเปลวไฟหลอมละลาย มนัส (2543) สรุปว่าเกณฑ์ที่สำคัญการซุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟประกอบด้วย 3 ประการ คือ ระดับความแข็งที่ต้องการ (level of hardness) ระยะแข็งลึก (hardening depth) และ ความเค้นตกค้าง (residual stress) ซึ่ง 2 ประการแรกเป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่สามารถควบคุมด้วยการออกแบบพารามิเตอร์ในกระบวนการซุบแข็งผิวให้สอดคล้องข้อกำหนด ส่วนประเด็นความเค้นตกค้างต้องมีความเข้าใจเรื่องอิทธิพลทางความร้อนและความเค้นดึงในระหว่างการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งต้องต้องไม่เกินค่าขีดจำกัดความเค้นของเหล็กที่นำมาซุบแข็ง หากความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเกินขีดจำกัดของวัสดุที่รับได้จะก่อให้เกิดการแตกร้าวที่ชิ้นงาน

สำหรับกระบวนการซุบแข็งนั้นการควบคุมที่สำคัญ คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ผิวสัมผัสกับเปลวไฟ ( $T_{(s, max)}$ ) ต้องไม่สูงจนกระทั่งเกิดปัญหาหลอมละลาย และเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากโครงสร้างเดิมไปเป็นเฟสออสเทนไนต์ และอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (มนัส, 2543)

จากรูปที่ 2.11 แสดงถึงอุณหภูมิ ณ ที่ระยะความลึกต่างๆ จากผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับเปลวไฟ ซึ่งตำแหน่งของชิ้นงานที่ได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ (ตำแหน่งที่ 1 และ 2) และอัตราการเย็นตัวรวดเร็วจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ส่วนตำแหน่งที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิออสเทนไนต์เล็กน้อย (ตำแหน่งที่ 3) จะมีการเกิดเฟสมาร์เทนไซต์บางส่วนในชิ้นงาน ส่วนตำแหน่งที่อุณหภูมิไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ (ตำแหน่งที่ 4) โครงสร้างจะไม่เปลี่ยนรายละเอียดการเปลี่ยนโครงสร้าง



รูปที่ 2.11 การเกิดโครงสร้างตามระดับอุณหภูมิของการชุบแข็งผิว  
ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

### 2.6 สารชุบ (quenching medium)

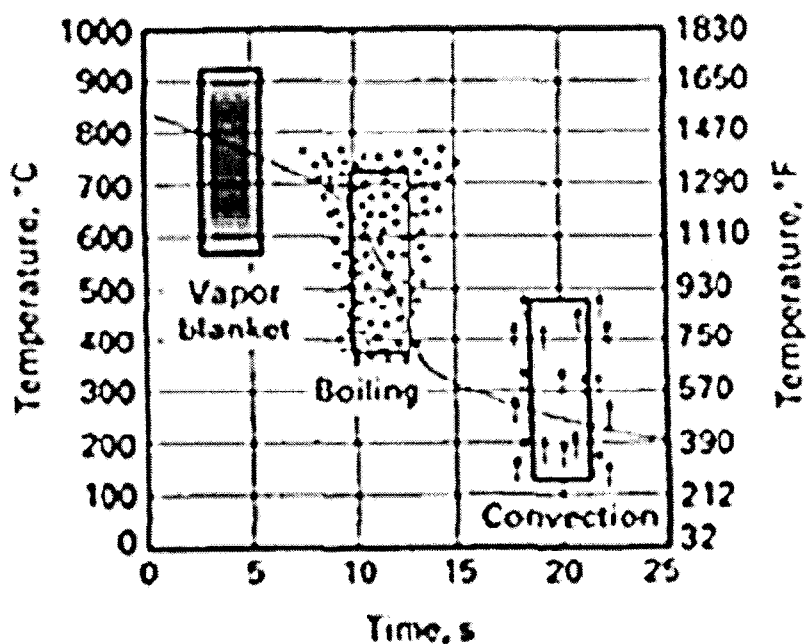
มันส์ (2543) ได้กล่าวถึงสมบัติที่ดีของสารชุบว่าต้องให้อัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤติ (critical cooling rate) และในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ควรจะมีอัตราการเย็นตัวช้าลงช่วงอุณหภูมิ 200 – 400 องศาเซลเซียส สำหรับสารชุบที่มีลักษณะเป็นของเหลวที่กลายเป็นไอได้ จะมีอยู่ 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 ของเหลวที่ได้รับการจุ่มแทงเหล็กร้อนบริเวณรอบๆ จะได้รับความร้อนสูงจนกลายเป็นไอหุ้มเหล็กไว้ในลักษณะฟิล์มบางๆ เป็นช่วงที่ถ่ายเทความร้อนช้าเพราะความร้อนต้องผ่านฟิล์มไฟที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำ แต่เป็นช่วงสั้นๆ เมื่อไอรวมตัวก็มากขึ้นจะลอยขึ้นไปหรือแตกออก

ขั้นตอนที่ 2 ภายหลังจากฟิล์มบางๆ ของไอที่หุ้มแทงเหล็กแตกออก ของเหลวที่อยู่รอบนอกจะเข้าสัมผัสแทงเหล็กช่วงนี้ แต่ของเหลวรอบๆ นี้ร้อนจากได้รับความร้อนอยู่แล้วในขั้นแรก จะเกิดการเดือดกลายเป็นไอที่หุ้มทำให้เกิดการกวน อัตราการเย็นตัวสูง

ขั้นตอนที่ 3 ชั้นอัตราการเย็นตัวช้าลง ความร้อนจากแทงเหล็กต่ำลงทำให้อุณหภูมิของเหลวเริ่มต่ำกว่าจุดเดือด ความร้อนจึงถ่ายเทออกไปด้วยการพาอย่างเดียว

รายละเอียดการเกิดขึ้นตอนต่างๆ ของสารชุบเหลวดังแสดงในรูป ที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนของสารชุบของเหลว  
ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

## 2.7 หลักการทำเทมเปอร์สำหรับเหล็กกล้า

ASM Handbook Vol.4 (1998) สรุปว่าเฟสมาร์เทนไซต์เป็นเฟสที่แข็งมากของเหล็กกล้า มีความแข็งแรงสูงเกิดภาวะสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวดของปริมาณคาร์บอนในโครงสร้างอะตอมเหล็ก รวมทั้งการมีผลึกที่บกพร่องจำนวนมาก โดยเฉพาะดิสโลเคชัน ขอบเขตมุมสูงและมุมต่ำ (high angle and low angle boundaries) ซึ่งโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความเหนียว (toughness) ไม่เพียงพอต่อการใช้งานหลายๆ ด้าน ดังนั้นจึงมีการทำเทมเปอร์เหล็กกล้า โครงสร้างมาร์เทนไซต์ โดยการให้ความร้อนที่ต่ำกว่าเส้น  $A_1$  เป็นการลดค่าความแข็งแรงเพื่อเพิ่มความเหนียว โดยการลดปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในสภาวะอิมตัวยิ่งยวด ด้วยเฟสที่มีเสถียรภาพมากกว่า นอกจากนี้สำหรับเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนเกิน 0.7% เฟสออสเทนไนต์ตกค้าง (retained austenite) สามารถแตกตัวระหว่างกระบวนการทำเทมเปอร์ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณธาตุเจือปนน้อย ระหว่างกระบวนการเทมเปอร์ จะเกิดขึ้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ช่วงอุณหภูมิ 20 - 100 องศาเซลเซียส เกิดการแพร่ช่วงสั้นของอะตอมคาร์บอนไปยังดิสโลเคชันและขอบเขตของมาร์เทนไซต์แบบแผ่น เกิดกลุ่มคาร์บอน (carbon cluster)

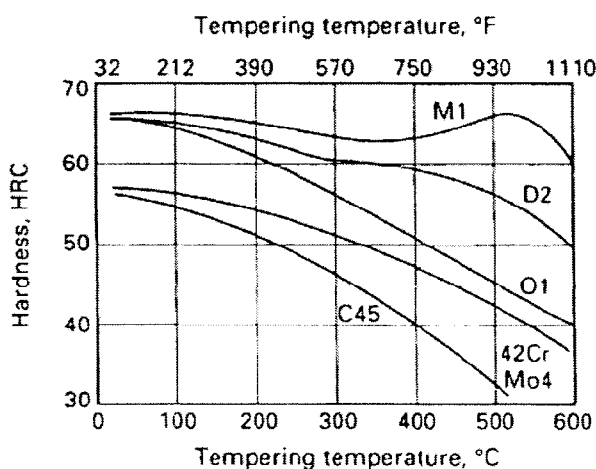


ขั้นตอนที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 100 – 200 องศาเซลเซียส ผลิตเฟอไรต์และซีเมนต์คาร์ไบด์ โดยเฉพาะ  $\epsilon$  คาร์ไบด์ ( $Fe_{2,4}C$ )

ขั้นตอนที่ 3 ช่วงอุณหภูมิ 200 – 350 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของเฟสออสเทนไนต์ตกค้างกลายเป็นเฟอร์ไรต์และซีเมนต์ไคต์

ขั้นตอนที่ 4 ช่วงอุณหภูมิ 250 – 700 องศาเซลเซียส เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์และซีเมนต์ไคต์ คาร์ไบด์กลม (spheroidized carbide) ในเมทริกซ์เกรนเฟอร์ไรต์ที่แกนเท่ากันของเหล็กกล้าที่ทำเทมเปอร์อย่างดี โดยการทำให้เทมเปอร์เป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

โดยในช่วงขั้นตอนที่ 1 ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ขั้นตอนที่ 2-4 ค่าความแข็งลดลง โดยในรูปที่ 2.13 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าบางชนิดที่ผ่านการทำให้เทมเปอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 2.13 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าที่ทำเทมเปอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเหล็กกล้า AISI 1045 และ AISI 4142

ที่มา : ASM Handbook Vol.4 (1998)

โดยสามารถพลอตค่าความแข็งตามเป็นฟังก์ชันของเทมเปอร์ริงพารามิเตอร์ (tempering parameter;  $P$ ) จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ( $T$ ) และเวลา ( $t$ ) ตามสมการที่ 2.1

$$P = T(k + \log t) \quad 2.1$$

โดย  $T$  = อุณหภูมิในหน่วย Kelvin

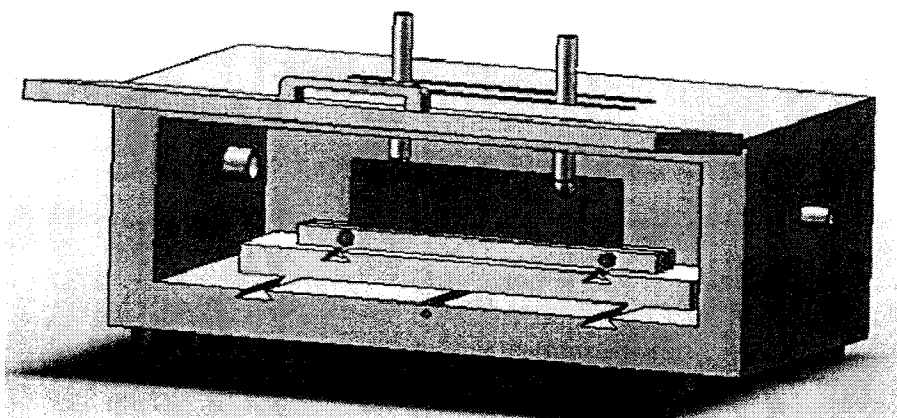
$k$  = ค่าคงที่ 20

$t$  = เวลาในหน่วยเป็นชั่วโมง

## 2.8 งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

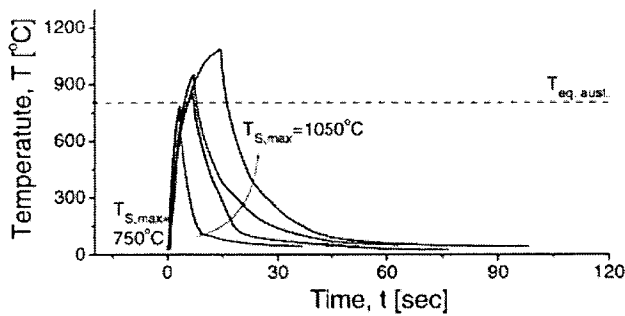
สำหรับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟได้มีการพัฒนากระบวนการชุบแข็งสำหรับคมมีดพริ้วของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยสรอายุรัตน์ อัครการ และ โกวิท พลหาญ (2552) พัฒนากระบวนการชุบแข็งมีดพริ้วที่ทำจากเหล็กเหน็บ SAE 9245 ด้วยแก๊สที่เวลาคงอุณหภูมิ 3 นาที ค่าความแข็งตำแหน่งต่างๆ ของคมมีด มีค่า 48.8 – 51.3 HRC ในขณะที่กระบวนการชุบด้วยเตาถ่าน ค่าความแข็ง 64.1 – 66.2 HRC และการใช้เตาชุบแข็ง ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 60.1 – 65.2 HRC ซึ่งคณะผู้วิจัยวิเคราะห์สาเหตุของความแข็งที่ต่ำกว่าของกระบวนการชุบแข็งว่าเกิดจากสาเหตุหลัก คือ การขาดความสามารถในการคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอของกระบวนการชุบแข็งด้วยแก๊ส ความหนาชิ้นงาน และประสบการณ์ผู้ทำการชุบแข็ง โดยคณะผู้วิจัยได้เสนอระบบเตาเพื่อปรับปรุงกระบวนการชุบแข็งด้วยแก๊ส ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งประกอบด้วยชุดจับยึดมีด หัวแก๊สด้านข้างด้านละชุดรวมเป็น 2 ชุด เพื่อให้ความร้อนและรักษาความร้อน และหัวแก๊สด้านบน 2 ชุดที่เป็นหัวตัดแก๊สเพื่อให้ความร้อนด้านบนตำแหน่งคม



รูปที่ 2.14 รูปแบบเตาชุบมีดพริ้วด้วยแก๊ส  
ที่มา สรอายุรัตน์ อัครการ และ โกวิท พลหาญ (2552)

Lee et al. (2004) ได้ทำการศึกษาเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 12Cr ที่ผ่านกระบวนการเทมเปอร์มาเทนไซด์ (Tempered-Martensite) ชิ้นงานขนาด 10 x 10 x 20 มิลลิเมตร โดยใช้เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่างออกซิเจน ( $O_2$ ) 99% และโพรเพน ( $C_3H_8$ ) 96.9% ที่มีอีเทน ( $C_2H_6$ ) 1.0% และบิวเทน ( $C_4H_{10}$ ) 1.9% โดยชิ้นงานจุ่มลงในน้ำที่ความลึกแตกต่างกันๆ เพื่อปรับอัตราการเย็นตัวจากน้ำ โดยรายงานผลจากการทดลองว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 12Cr เพิ่มขึ้นจากประมาณ 250  $HV_{0.2}$  ถึง 420-550  $HV_{0.2}$  โดยที่ค่าความแข็งลึกลงไปโดยตรงกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ณ อุณหภูมิออสเทนไนต์ ( $T_{austenite}$ ) อัตราการเย็นตัวที่สูงจะส่งผลให้ระยะแข็งลึกและค่าความแข็งผิว โดยสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากปัจจัยความเค้นตกค้างตามเกณฑ์

Siemens AG-KWU สำหรับชิ้นงานจุ่มน้ำ 2 มิลลิเมตร คือ อุณหภูมิต่ำกว่า 1200 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ไม่จุ่มน้ำ 1150 องศาเซลเซียส และหากพิจารณาตามเกณฑ์ความเค้นตกค้างของ GE Power Generation Engineering สำหรับชิ้นงานจุ่มน้ำ 10 มิลลิเมตร ช่วงอุณหภูมิ 944 – 1050 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจุ่มน้ำ 6 มิลลิเมตร ช่วงอุณหภูมิ 883 – 1150 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจุ่มน้ำ 2 มิลลิเมตร ช่วงอุณหภูมิ 833 – 1134 องศาเซลเซียส และชิ้นงานไม่จุ่มน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 785 – 1097 องศาเซลเซียส วงรอบอุณหภูมิสำหรับการชิ้นงานที่จุ่มน้ำ 10 มิลลิเมตร เปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวสูงสุด ณ ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.15

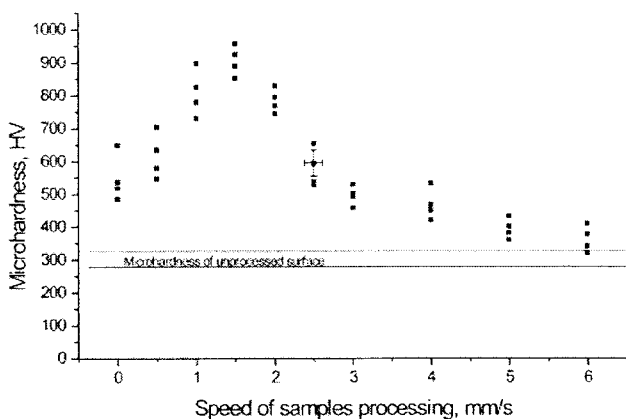


รูปที่ 2.15 วงรอบของอุณหภูมิที่ได้จากกระบวนการชุบด้วยเปลวไฟและชิ้นงานจุ่มน้ำ 10 มิลลิเมตร ที่มา Lee et al. (2004)

Suchanek and Kuklik (2009) ศึกษาผลของกระบวนการทางความร้อนและกรรมวิธีความร้อนเคมีที่ส่งผลต่อความต้านทานขัดสีของเหล็กกล้าโครงสร้างและเหล็กกล้าเครื่องมือ เหล็กกล้าที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วย เหล็กกล้าโครงสร้าง (C10) เหล็กกล้าเครื่องมือ (X185CrW12) และ X195CrVWMo5) และเหล็กกล้าความเร็วสูง (HS-11-0-4 และ HS-11-0-2) โดยกระบวนการทางความร้อนสำหรับเหล็กกล้าโครงสร้าง และเหล็กกล้าเครื่องมือผ่านกระบวนการอบอ่อน (annealing) กระบวนการชุบ (quenching) กระบวนการเทมเปอร์ (tempering) กระบวนการคาร์บูไรซิ่ง (carburizing) และกระบวนการไนไตรดิง (nitriding) ส่วนเหล็กกล้าเครื่องมือผ่านกระบวนการอบอ่อน กระบวนการชุบ และกระบวนการเทมเปอร์ และรายงานผลจากการทดลองว่า ความต้านทานต่อการขัดสีของเหล็กกล้าผสมต่ำที่ผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิ่งอยู่ในระดับเดียวกับเหล็กกล้าคาร์บอนสูง และเหล็กกล้าเครื่องมือ ความต้านทานการขัดสีจากอนุภาคแข็งของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการไนไตรดิงมีค่าต่ำกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำที่ผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง และความต้านทานขัดสีสัมพัทธ์ของเหล็กกล้าเลดดูเบอร์ติกโครเมียมและเหล็กกล้าความเร็วสูงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการชุบ สำหรับเหล็กกล้าเลดดูเบอร์ติกโครเมียม X185CrW12 ความต้านทานการขัดสีสูงสุดที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ในขณะที่เหล็กเลดดูเบอร์ติกโครเมียม-วานาเดียม อุณหภูมิชุบแข็งที่เหมาะสม 1150 องศาเซลเซียส ความต้านทานต่อการขัดสีสูงสุดของเหล็กกล้าไฮสปีด ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1270 องศาเซลเซียส

Ganeev (2002) ศึกษาการชุบแข็งเหล็กกล้าจากเลเซอร์กำลังงานต่ำ จากเลเซอร์ CW CO<sub>2</sub> และ เลเซอร์ Pulsed Nd:YAG ผลการทดลองพบว่าสำหรับเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอน 0.6%

การใช้เลเซอร์ CO<sub>2</sub> ช่วงกำลังงานที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงาน  $10^4 - 10^5$  W/cm<sup>2</sup> และค่าระยะความแข็งลึกประมาณ 170 ไมโครเมตร (um) อย่างไรก็ตามค่าความแข็งผิวขึ้นอยู่กับความเร็วในการเดินหัวเลเซอร์ที่เหมาะสม สำหรับเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอน 0.6% ความเร็วการเดินชิ้นงาน 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่าความแข็งประมาณ 900 HV ดังรูปที่ 2.16



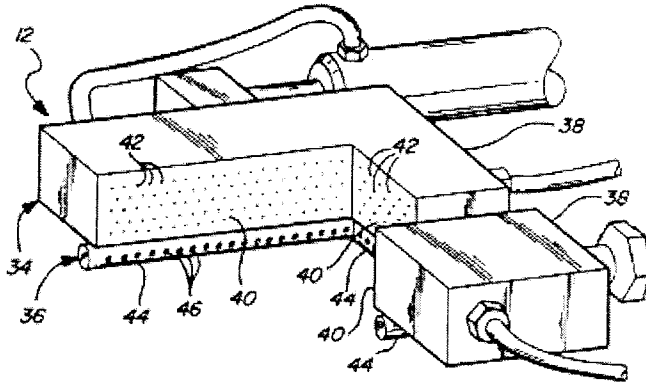
รูปที่ 2.16 ค่าความแข็งที่ได้จากการใช้แสงเลเซอร์กำลังงานต่ำที่ความเร็วการเดินชิ้นงานแตกต่างกัน  
ที่มา : Ganeev (2002)

ถึงแม้ว่าสามารถใช้เลเซอร์กำลังงานต่ำในการชุบแข็งผิว Ganeev (2002) แนะนำให้พิจารณาปัจจัยต่างๆ ในการชุบแข็ง คือ กำลังงานที่ใช้ ความเร็วการเดินชิ้นงาน ปริมาณคาร์บอน และรวมทั้งคุณภาพผิวของชิ้นงานภายหลังกระบวนการชุบแข็ง

### 2.8.2 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

โยชิยุกิ ทันโน และคณะ ยื่นคำขอสิทธิบัตรเกี่ยวกับการประดิษฐ์อุปกรณ์ชุบแข็งด้วยความร้อนเมื่อ 31 สิงหาคม 2548 ประกาศโฆษณาเมื่อ 23 มกราคม 2549 โดยมีกระบวนการให้ความร้อนเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจน มีการออกแบบเตาที่สามารถผลักชิ้นงานชุบแข็งเข้าโดยป้องกันอากาศภายนอกเข้า โดยระบบเปิด-ปิดประตูเตามีระบบกลไกขัดลำและหมด กลไกนำร่อง การเปิด-ปิดประตูเตาจะมีส่วนโค้งด้านล่างเพื่อให้อัดแน่นเข้าสู่ตัวเตาขณะปิด

Macheske ได้รับสิทธิบัตรการประดิษฐ์เครื่องมือและกระบวนการชุบแข็งผิวสำหรับชิ้นงานที่มีผิวหลายระดับในสหรัฐอเมริกาหมายเลข 5,256,217 เมื่อ 26 ตุลาคม 1993 โดยใช้แหล่งความร้อนที่เป็นแก๊สอะเซทิลีนออกซิเจนมีหัวเผา 4 ตำแหน่งเคลื่อนที่ได้ ลักษณะของหัวเผามีรูสำหรับเปลาไฟขนาดเล็กดังหมายเลข 42 ในรูปที่ 10 และมีระบบน้ำสำหรับพ่นสเปรย์ภายหลังจากชิ้นงานได้รับความร้อนลักษณะของรายละเอียดดังหมายเลขที่ 46 ในรูปที่ 2.17 โดยรูปแบบของการออกแบบสามารถชุบแข็งชิ้นงานที่มีผิวแตกต่างกันหลายระดับและมีความซับซ้อนของชิ้นงาน รวมทั้งการออกแบบโต๊ะงานให้สามารถหมุนชิ้นงานด้วยการจับยึดกับโต๊ะ



รูปที่ 2.17 ลักษณะการออกแบบหัวเผาและ การใช้ น้ำ ฟัน ชัน งาน

ที่มา : Macheske (1993)

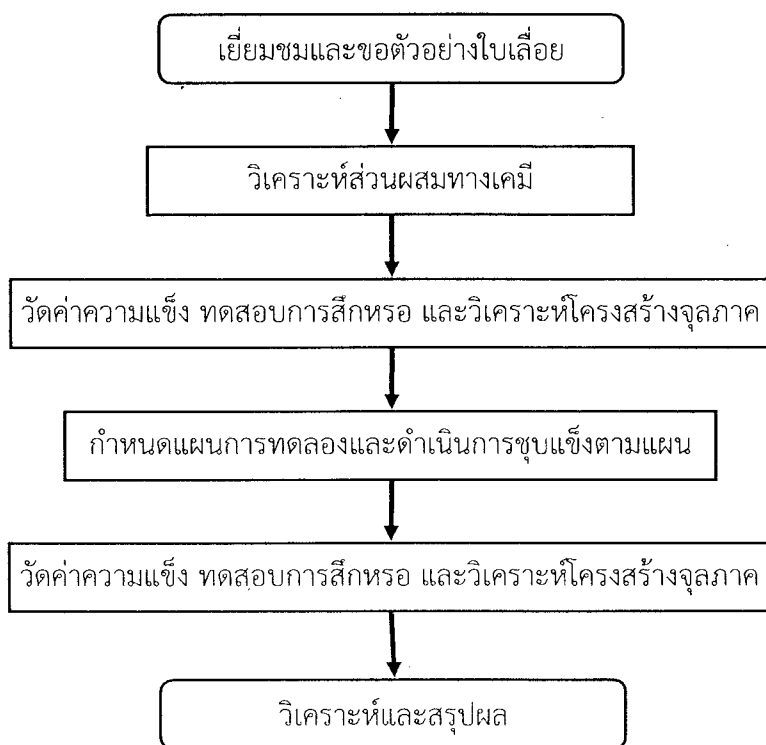
### บทที่ 3

#### การดำเนินโครงการ

การดำเนินงานการศึกษาการชุบแข็งด้วยเปลวไฟออกซิเจน-อะเซทิลีน สำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ (1) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟแบบใช้คนควบคุม และ (2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟใช้ระบบควบคุมความเร็ว รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

#### 3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟแบบใช้คนควบคุม

การชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานโดยใช้คนควบคุม ดำเนินการตั้งแต่ประสานงานโรงเลื่อยแปรรูปไม้ยางพารา วิเคราะห์ส่วนผสม กำหนดอุณหภูมิและดำเนินการชุบแข็งเปลวไฟ ทดสอบสมบัติวิเคราะห์และสรุปผล รายละเอียดขั้นตอนดำเนินงานโดยสรุป ดังแสดงในผังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผังแสดงขั้นตอนการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแบบใช้คนควบคุม

## (1) เหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน

เหล็กกล้าใบเลื่อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กกล้าใบเลื่อยใช้แล้วที่ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผู้แปรรูปไม้ยางพารา โดยมีส่วนผสมทางเคมีจากการวิเคราะห์ด้วย Optical Emission Spectroscopy (OES) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1

C	Si	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Co	Al	Zn	Fe
0.5157	0.2078	0.0124	0.8808	0.0715	0.9464	0.0287	0.1012	0.0388	0.0042	0.0061	0.0045	0.0035	Balance

## (2) แผนการทดลอง

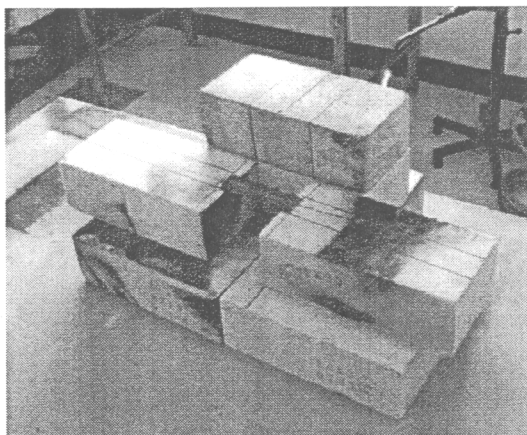
การทดลองนี้มีการกำหนด 5 ระดับ โดยการพิจารณาจากอุณหภูมิออสเทนไนต์ ( $T_{aust}$ ) จากเฟสไดอะแกรมที่ปริมาณคาร์บอน 0.52% ได้อุณหภูมิออสเทนไนต์ 760 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิเปลวไฟอะเซทิลีน-ออกซิเจนสูงสุดถึง 3100 Gronegress (1964) ดังนั้นเพื่อป้องกันส่วนผิวที่สัมผัสเปลวไฟเกิดการหลอมละลาย จึงกำหนดอุณหภูมิในการเริ่มต้น ( $T_{start}$ ) ที่ 5 ระดับอุณหภูมิ คือ 660 710 760 810 860 องศาเซลเซียส และใช้การหมุนวนเปลวไฟเป็นเวลา 8 วินาที และจุ่มลงน้ำ โดยการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัพเบิลชนิด K ที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางชิ้นงานประมาณ 2 เซนติเมตร พร้อมทั้งบันทึกค่าอุณหภูมิผิวสูงสุด ( $T_{s, max}$ ) รายละเอียดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองการชุบแข็งเปลวไฟเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแบบใช้คนควบคุมสำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1

การทดลอง	รหัส	$T_{start}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{(s, max)}$ ( $^{\circ}C$ )	สารชุบ
1	Flame Manual 1 (FM1)	660	773	น้ำ
2	Flame Manual 2 (FM2)	710	860	น้ำ
3	Flame Manual 3 (FM3)	760	876	น้ำ
4	Flame Manual 4 (FM4)	810	947	น้ำ
5	Flame Manual 5 (FM5)	860	984	น้ำ

### (3) การปรับตั้งการทดลอง

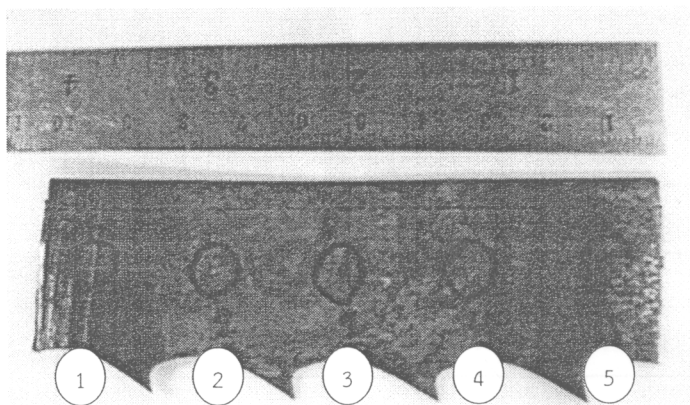
ใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจนโดยกำหนดความดันใช้งานที่ 4 psi เท่ากัน และใช้เปลวกลาง (neutral flame) โดยจัดเครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทดลองชุปแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1 แบบใช้คนควบคุม

### (4) การวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลเป็นการวิเคราะห์ในตำแหน่งต่างๆ จากระยะจากเปลวไฟ รายละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการวิเคราะห์ผลการชุปแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1 แบบใช้คนควบคุม

## 3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุปแข็งด้วยเปลวไฟใช้ระบบควบคุมความเร็ว

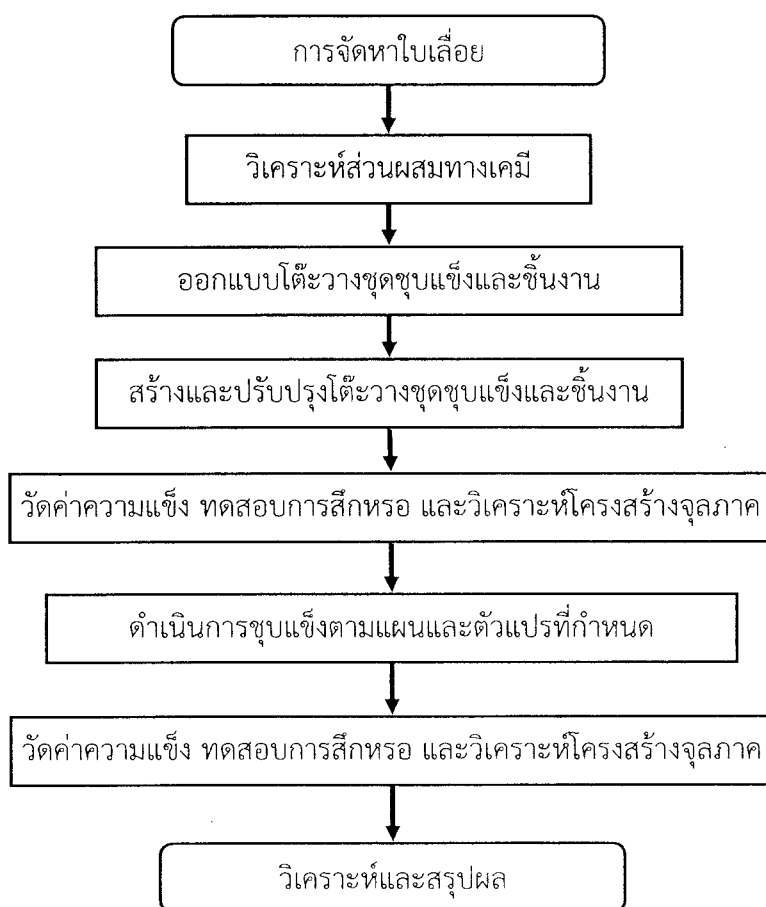
การศึกษาเพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมของการเดินเปลวไฟออกซิเจน-อะเซทิลีน ที่มีอุณหภูมิเปลวไฟที่ใช้ในการชุปแข็งสูงกว่าจุดหลอมละลายของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน โดยประกอบด้วย



การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมจาก 3 ลักษณะ คือ (1) การศึกษาสภาวะการชုပ်แข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยจากการติดตั้งชุดชုပ်แข็งเปลวไฟกับเครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติ (2) การศึกษาสภาวะการชုပ်แข็งฟันเลื่อยจากชุดเดินใบเลื่อยที่ได้จัดทำขึ้น และ (3) การศึกษาสภาวะการศึกษาสภาวะการชုပ်แข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยจากการติดตั้งชุดชုပ်แข็งเปลวไฟกับเครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติสำหรับตัวอย่างจากสถานประกอบการ

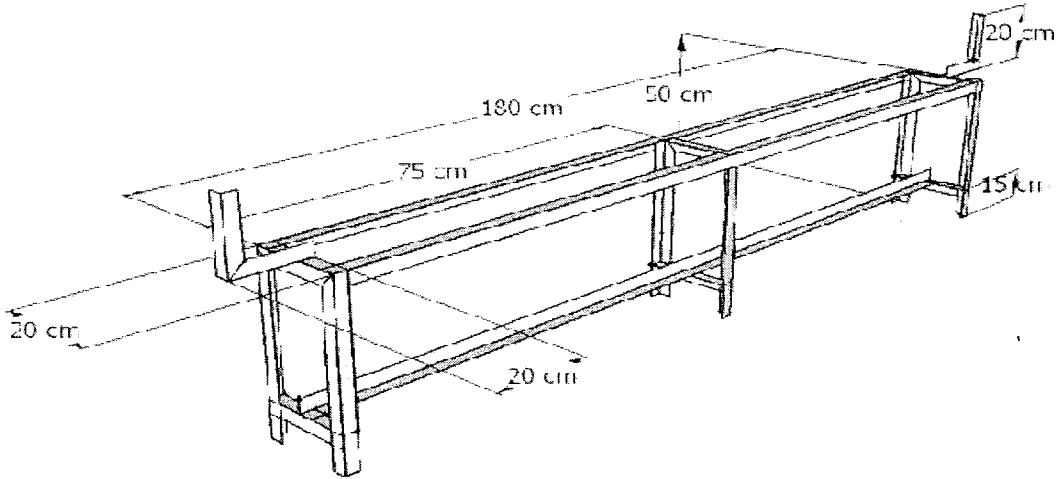
### 3.2.1 การศึกษาสภาวะการชုပ်แข็งเปลวไฟจากการติดตั้งชุดชုပ်แข็งเปลวไฟที่เครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติ

การทดลองเริ่มต้นจากจัดหาใบเลื่อย วิเคราะห์ส่วนผสม ออกแบบและสร้างโต๊ะวางชุดชုပ်แข็งและวางใบเลื่อย ออกแบบระบบการหล่อเย็น การติดตั้งชุดชုပ်แข็งกับเครื่องเดินตัด ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผล ลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 3.4

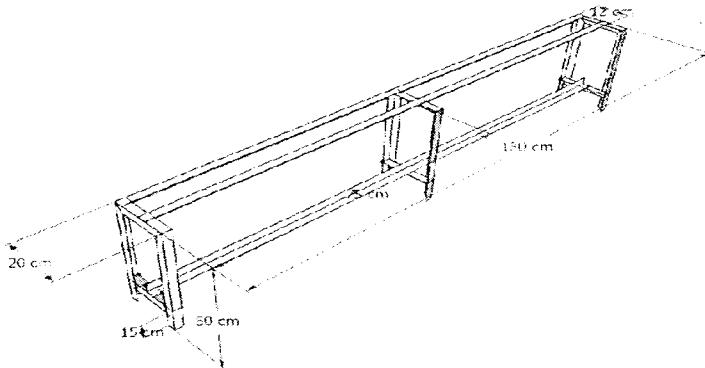


รูปที่ 3.4 ผังแสดงการศึกษาความเร็วที่เหมาะสมการชုပ်แข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานด้วยระบบควบคุมความเร็ว

สำหรับการออกแบบชุดทดลองเพื่อประยุกต์ใช้ชุดเดินตัดแก๊สอัตโนมัติต้องมีการออกแบบ โต๊ะวางชุดเดิน และ โต๊ะวางชิ้นงาน รายละเอียดการออกแบบโต๊ะสำหรับเครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และการออกแบบโต๊ะวางชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.6

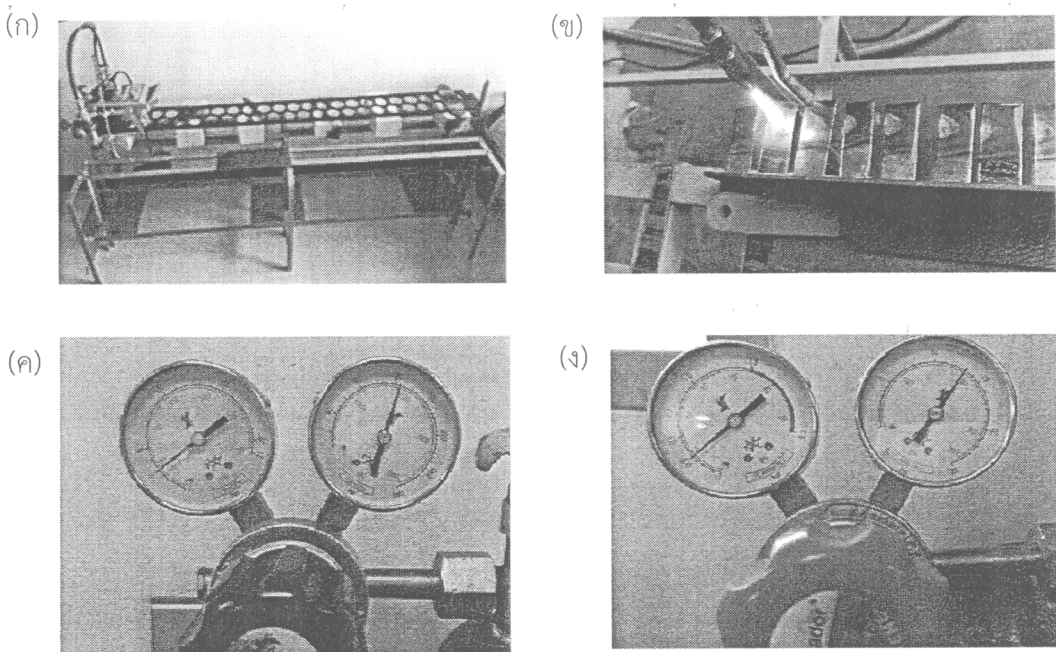


รูปที่ 3.5 การออกแบบโต๊ะวางเครื่องตัดแก๊สอัตโนมัติ



รูปที่ 3.6 การออกแบบโต๊ะวางใบเลื่อย

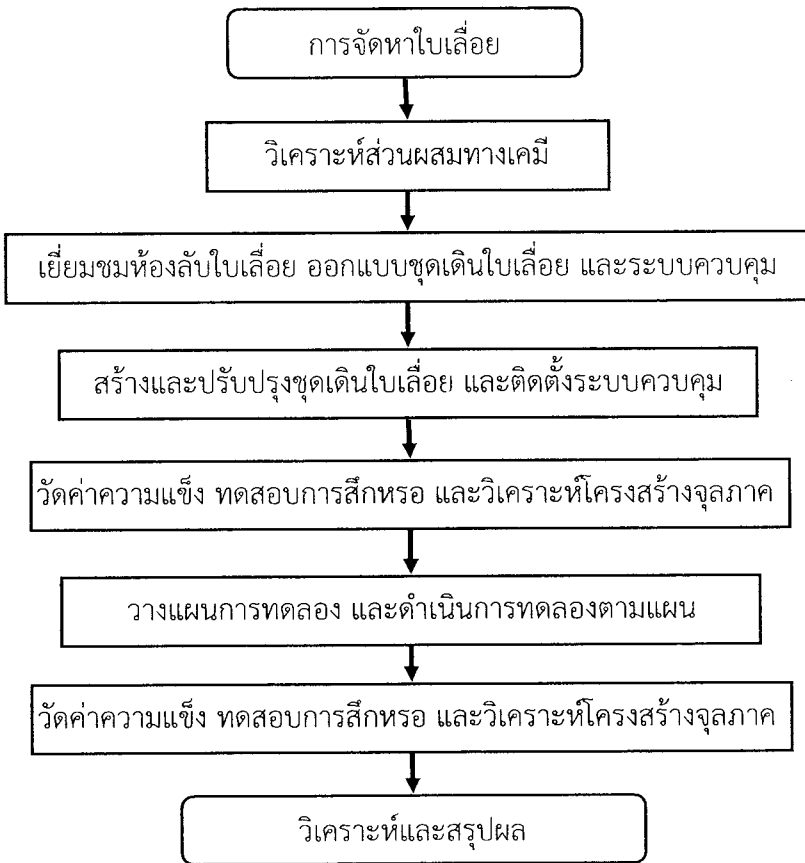
การปรับตั้งในการทดลองใช้เครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติมาประกอบชุดสารชุบ เตรียม ชิ้นงาน กำหนดระยะ และดำเนินการทดลองรายละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3.7



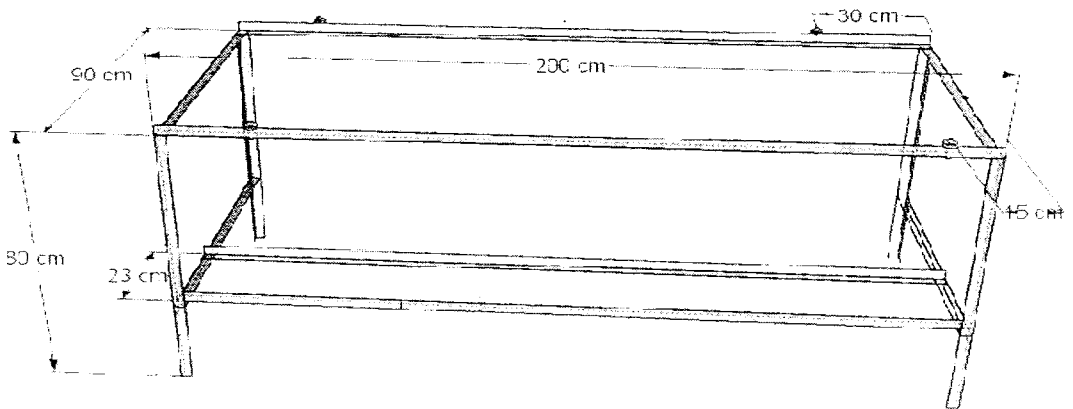
รูปที่ 3.7 การปรับตั้งในการทดลอง (ก) ชุดชุปแข็งเปลวไฟจากเครื่องเดินตัดอัตโนมัติ (ข) การทดลองชุบชิ้นงาน (ค) การปรับแก๊สออกซิเจน (ง) การปรับแก๊สอะเซทิลีน

### 3.2.2 การศึกษาสถานะการชุบแข็งพื้นใบเลื่อยจากชุดเดินใบเลื่อยที่ได้จัดทำขึ้น

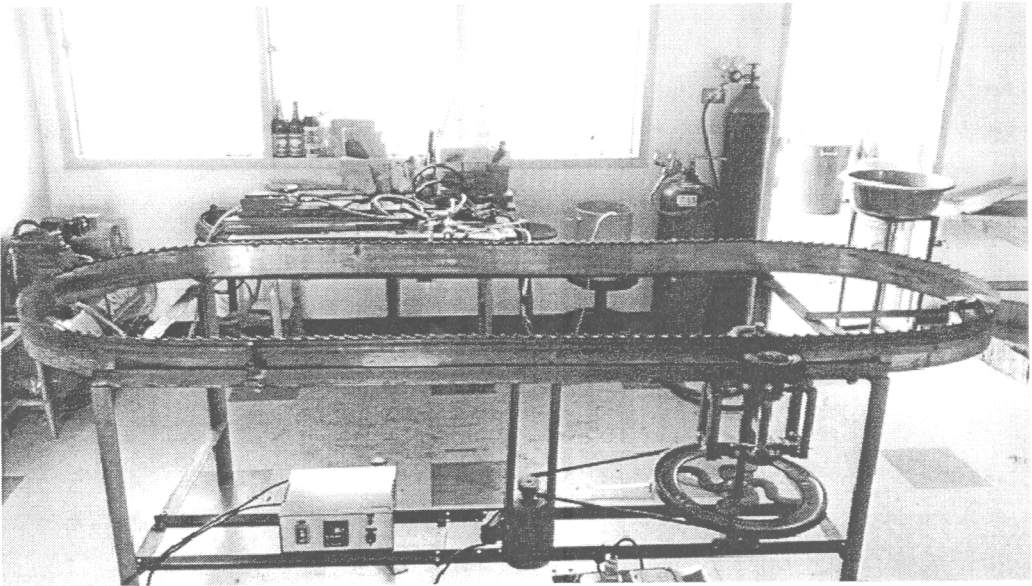
จากผลการศึกษาความเร็วของชุดชุบแข็งประยุกต์กับเครื่องเดินตัดอัตโนมัติ นำมาศึกษาและจัดทำชุดทดลองเพื่อหาความเร็วใบเลื่อยที่เหมาะสมจากชุดเดินใบเลื่อย รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินโดยสรุป ตั้งแต่การจัดหาใบเลื่อย วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี วัดค่าความแข็ง ทดสอบการสึกหรอ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ศึกษาเยี่ยมชมห้องลับใบเลื่อยเพื่อนำแนวคิดและข้อมูลมาประกอบการออกแบบและสร้างชุดเดินใบเลื่อย วางแผนการทดลองและทดลองชุบแข็งตามแผน วัดค่าความแข็ง ทดสอบการสึกหรอวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 3.8



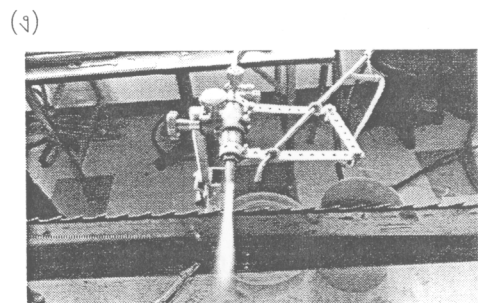
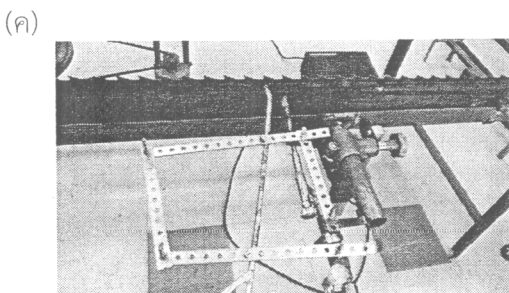
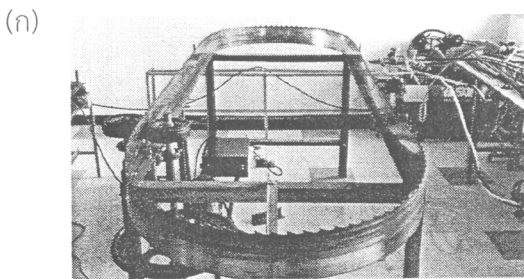
รูปที่ 3.8 ผังแสดงขั้นตอนหาความเร็วที่เหมาะสมชุดเดินใบเลื่อยสำหรับการชุปแข็งพื้น



รูปที่ 3.9 การออกแบบชุดเดินใบเลื่อย



รูปที่ 3.10 การจัดทำชุดเดินใบเลื่อย



รูปที่ 3.11 การปรับตั้งการทดลอง (ก) ชุดเดินใบเลื่อย (ข) ชุดควบคุมความเร็วรอบ (ค) การติดตั้งชุดซัพเซียงเปลวไฟ (ง) การทดลอง

(1) เหล็กกล้าใบเลื่อยที่ใช้สำหรับการชุบแข็งการประยุกต์เครื่องเดินตัดอัตโนมัติและชุดเดินใบเลื่อย

เหล็กกล้าใบเลื่อยที่ใช้ในการชุบแข็งมีผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2

C	Si	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	S	Al	Fe
0.6829	0.1742	0.0198	0.6575	0.0146	0.2436	0.0013	0.0139	0.0061	0.0040	98.1821

(2) แผนการทดลอง

แผนการทดลองการศึกษาความเร็วที่เหมาะสมจากเครื่องเดินตัดอัตโนมัติประกอบด้วย ตัวแปรความเร็วของชุดเดินตัดแก๊สอัตโนมัติที่สามารถปรับความเร็วได้ (0.42 และ 0.46 เซนติเมตรต่อนาที) สารชุบซึ่งประกอบด้วย ลมอัดร่วมกับน้ำ (ลมอัดที่แรงดัน 2 บาร์และน้ำที่อัตราการไหล 0.36 ลิตรต่อนาที) และลมอัดอย่างเดียว (แรงดันลมอัด 2 บาร์) รายละเอียดการทดลองตามตารางที่ 3.4 โดยศึกษาผลของกระบวนการชุบแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานใบเลื่อย รายละเอียดการชุบแข็งดังแสดงในตารางที่ 3.4 ส่วนรายละเอียดการวิเคราะห์ผลดังแสดงในรูป 3.12

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดสภาวะการทดลองเพื่อหาความเร็วชุดชุบแข็งสำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2

การทดลอง	รหัส	ความเร็วชุดชุบแข็ง (เซนติเมตรต่อนาที)	สารชุบ
1	Flam Gas Cutter 1 (FGC1)	0.42	ลมอัดและน้ำ
2	Flam Gas Cutter 2 (FGC2)	0.46	ลมอัดและน้ำ
3	Flam Gas Cutter 3 (FGC3)	0.42	ลมอัด

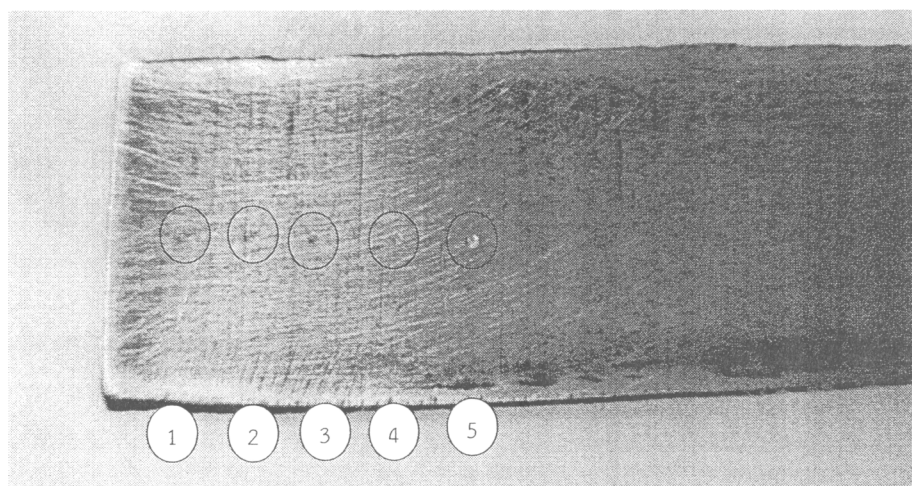
การทดลองนี้เพื่อหาความเร็วชุดเดินใบเลื่อยที่สามารถปรับปรุงสมบัติของฟันใบเลื่อย โดยการนำค่าความเร็วที่ได้จากการศึกษาความเร็วชุดชุบแข็งจากเครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติ มาใช้ในการเดินใบเลื่อย ติดตั้งชุดชุบแข็งกับชุดเดินใบเลื่อย โดยศึกษาที่ความเร็ว 0.42 เซนติเมตร สารชุบลมอัดและน้ำ (ลมอัดที่แรงดัน 2 บาร์และน้ำที่อัตราการไหล 0.36 ลิตรต่อนาที) และศึกษาผลของการชุบต่อสมบัติของฟันใบเลื่อย ซึ่งมีรูปร่างแตกต่างจากการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อย โดยวิเคราะห์สมบัติ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากเปลวไฟรายละเอียดของการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ส่วนรายละเอียดการวิเคราะห์ผลดังแสดงในรูป 3.13

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดสภาวะการทดลองเพื่อศึกษาความเร็วชุดเดินใบเลื่อยสำหรับการชุบแข็งฟันใบเลื่อย

การทดลอง	รหัส	ความเร็วชุดชุบแข็ง (เซนติเมตรต่อวินาที)	สารชุบ
1	Flame Machine (FMC)	0.42	น้ำและลมอัด

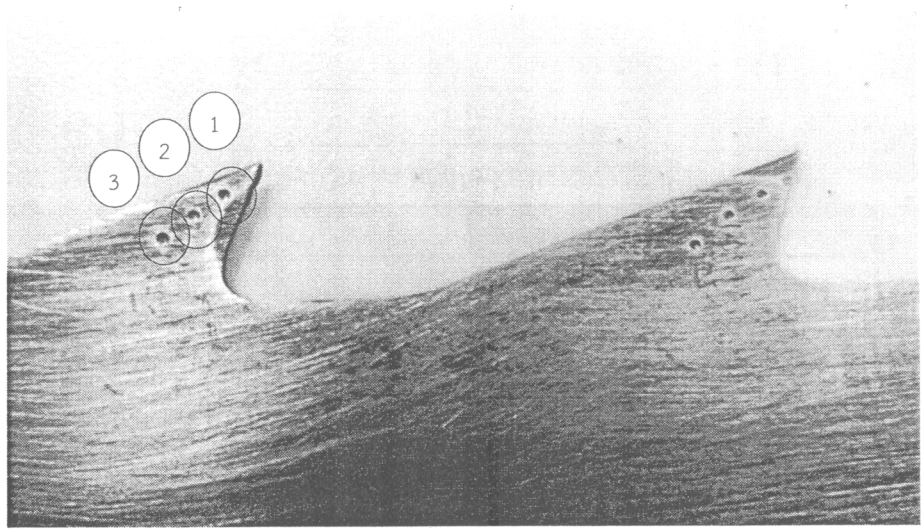
## (2) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งชิ้นงานจากการชุบแข็งเหล็กกล้าสายพานด้วยการติดตั้งชุดชุบแข็งกับเครื่องตัดอัตโนมัติ ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็ง

ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งชิ้นงานจากการชุบแข็งเหล็กกล้าสายพานจากการชุบฟันด้วยชุดเดินใบเลื่อย ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.13

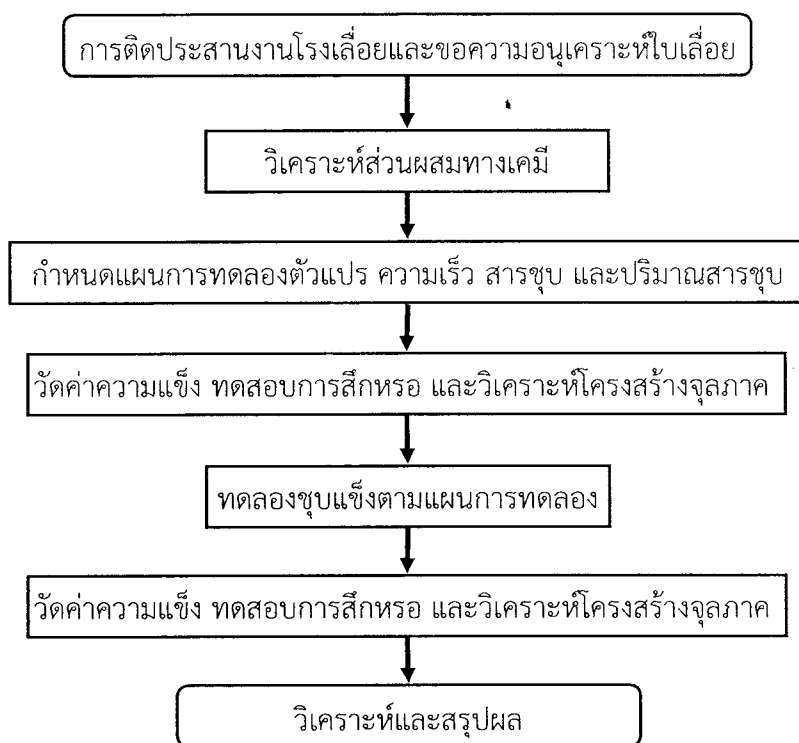


รูปที่ 3.13 ตำแหน่งวัดค่าความแข็งฟันใบเลื่อย

3.2.3 การศึกษาสภาวะการศึกษาสภาวะการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยจากการติดตั้งชุดชุบแข็ง  
เปลวไฟกับเครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติสำหรับตัวอย่างจากสถานประกอบการ

การศึกษาสภาวะเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน  
จากสถานประกอบการโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราในเขตจังหวัดสุราษฎร์ธานี จำนวน 3 โรงงาน โดยมี  
ขั้นตอนการดำเนินงาน ประกอบด้วย การขอความอนุเคราะห์ใบเลื่อยใช้แล้วจากโรงงานแปรรูปไม้  
ยางพารา วิเคราะห์ส่วนผสม การออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย ตัวแปรความเร็ว สารชุบ การ  
ทดลองตามแผน การวิเคราะห์และการสรุปผล ลำดับขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.14





รูปที่ 3.14 ผังแสดงขั้นตอนการศึกษาสภาวะการชุบแข็งที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานจากโรงงาน A B และ C

### (1) เหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน

ประกอบด้วยเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานของผู้ประกอบการในเขตจังหวัดสุราษฎร์ธานี จำนวน 3 โรงงาน คือ A B และ C ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และเมื่อเทียบการเทียบเกรดเหล็กกล้าจากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี พบว่าตัวอย่างจากโรงงาน A และ B ปริมาณคาร์บอน 0.645 และ 0.675 ตามลำดับ และไม่มีปริมาณธาตุเจืออื่นเกินเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM A682M (ตารางที่ 3.5) จึงจัดเป็นเหล็กกล้า 1065 หรือ 1070 ส่วนเหล็กกล้าจากโรงงาน C มีปริมาณ Mn 0.374 และ ปริมาณ Ni 1.816

ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างใบเลื่อยสายพานจากโรงงาน A B และ C

Sample	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	V	Ti	Co
A	0.6450	0.6991	-	0.0036	0.1942	0.0095	0.0126	0.1031	-	0.0148	-	-	0.0031
B	0.6754	0.9654	-	0.0056	0.2617	0.0341	0.0169	0.0437	0.0074	0.0097	0.0033	-	0.0084
C	0.6677	0.3747	-	0.0085	0.1997	0.0055	1.8159	0.0122	-	0.0202	-	-	0.0035

## (2) แผนการทดลอง

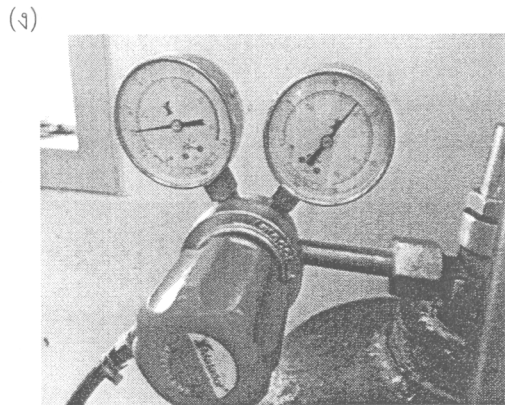
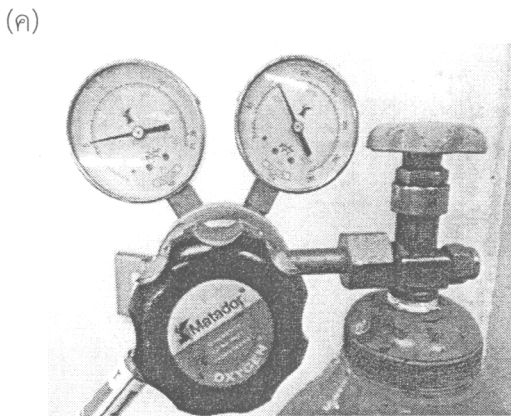
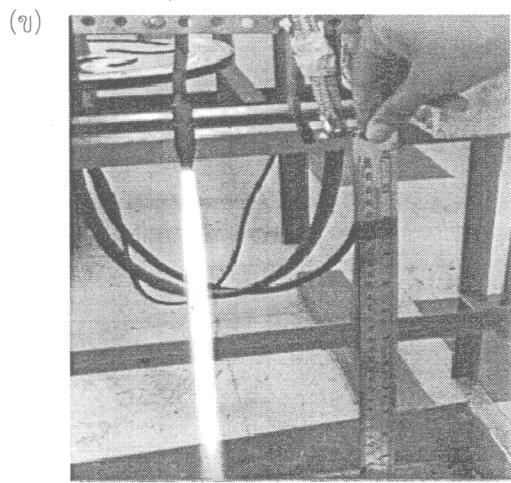
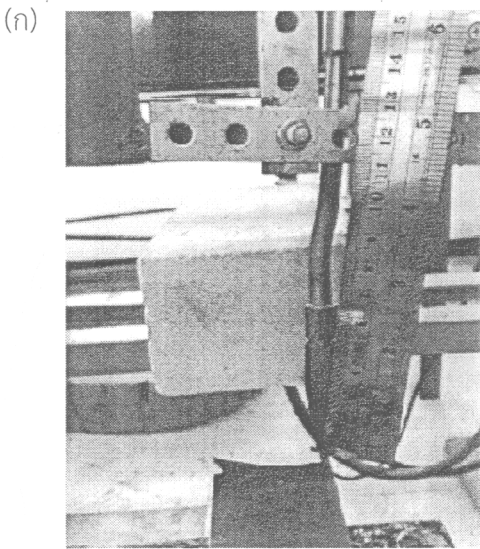
การทดลองนี้ประกอบ 8 การทดลองตัวแปรประกอบด้วย (1) ระดับความเร็ว (2) สารซัพ และ (3) ระดับสารซัพ โดยระดับความเร็วชุดซัพแข็งประกอบด้วย 2 ระดับ คือที่ระดับความเร็ว ปรับตั้งหมายเลข 3 ความเร็วชุดหัวซัพ 0.42 เซนติเมตรต่อวินาที อุณหภูมิสูงสุดสัมผัสนิวซ์งานอยู่ในช่วง 775 - 885 องศาเซลเซียส และที่ระดับความเร็ว 6 ความเร็วชุดหัวซัพ 0.83 เซนติเมตรต่อวินาที อุณหภูมิสูงสุดที่สัมผัสนิวซ์งาน 600 - 657 องศาเซลเซียส ส่วนสารซัพที่ใช้ประกอบด้วยน้ำ และน้ำเกลือ ปริมาณสารซัพที่ใช้มีอัตราการไหลที่ 5.6 และ 3.0 ลิตรต่อนาที ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แผนการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะเหมาะสมสำหรับใบเลี้ยงสายพานจากโรงงาน A B และ C

การทดลอง	รหัส	ความเร็ว เซนติเมตรต่อวินาที	ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สารซัพ	ระดับสารซัพ (ลิตรต่อนาที)
1	Flame Condition 1 (FC1)	0.42	775 - 885	น้ำ	5.6
2	Flame Condition 2 (FC2)	0.42		น้ำเกลือ	5.6
3	Flame Condition 3 (FC3)	0.42		น้ำ	3
4	Flame Condition 4 (FC3)	0.42		น้ำเกลือ	3
5	Flame Condition 5 (FC4)	0.83	600 - 657	น้ำ	5.6
6	Flame Condition 6 (FC5)	0.83		น้ำเกลือ	5.6
7	Flame Condition 7 (FC6)	0.83		น้ำ	3
8	Flame Condition 8 (FC7)	0.83		น้ำเกลือ	3

## (3) การปรับตั้งชุดทดลอง

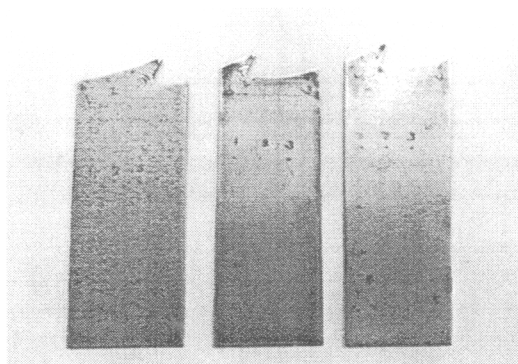
การทดลองใช้การปรับระดับความเร็วที่ชุดซัพแข็งเปลวไฟที่ประกอบด้วยหัวแก๊สอะเซทิลีนที่ปรับระดับความเร็วการเดินทาง พร้อมทั้งน้ำหล่อเย็นตามหลังดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การปรับตั้งการทดลอง (ก) การกำหนดระยะหัวแก๊ส (ข) การวัดระยะเปลวไฟ (ค) การเกจออกซิเจน (ง) การปรับเกจไนอะเซทิลีน

#### (4) การวิเคราะห์ผล

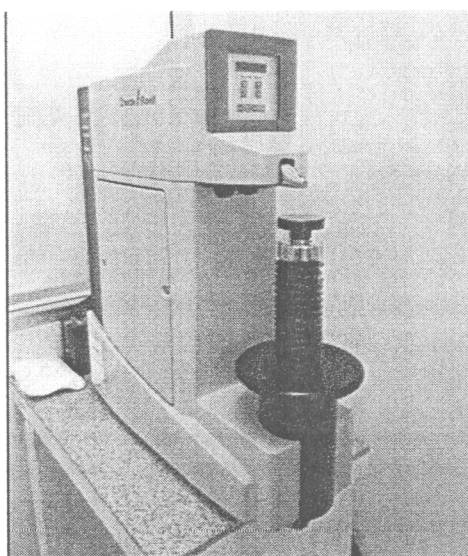
การวิเคราะห์ผลวิเคราะห์ในตำแหน่งดังรูปที่ 3.16



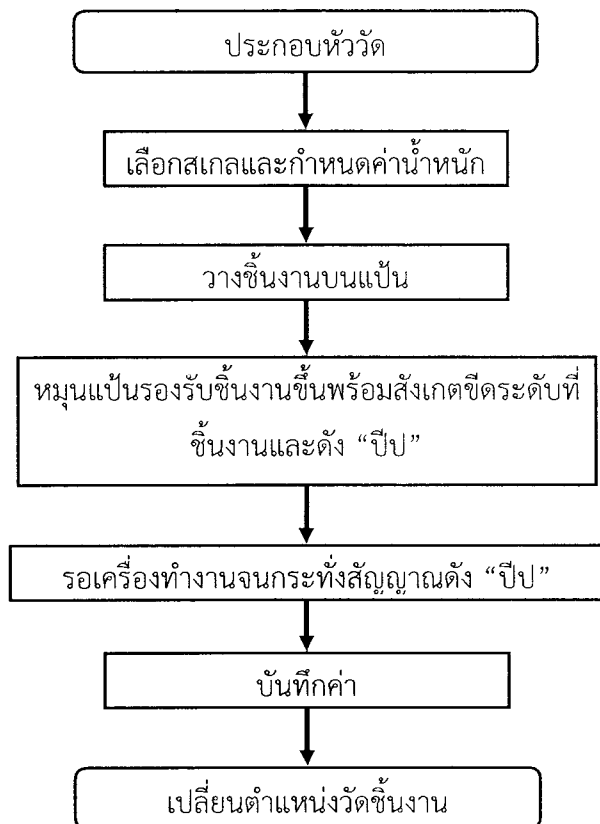
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งชิ้นงานวิเคราะห์ผล

### 3.3 การวัดค่าความแข็ง

การวัดค่าความแข็งโดยการนำชิ้นงานตัวอย่างมาวัดค่าความแข็งกับเครื่องวัด Indentec รุ่น ZHR4150LK เครื่องวัดดังรูป 3.17 โดยการวัดใช้หัววัดเพชร น้ำหนักกด 150 กิโลกรัม และสเกล HRC ขั้นตอนการวัดดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดความแข็ง Indentec  
ที่มา : เขียวศักดิ์ และ นริศรา (2559)



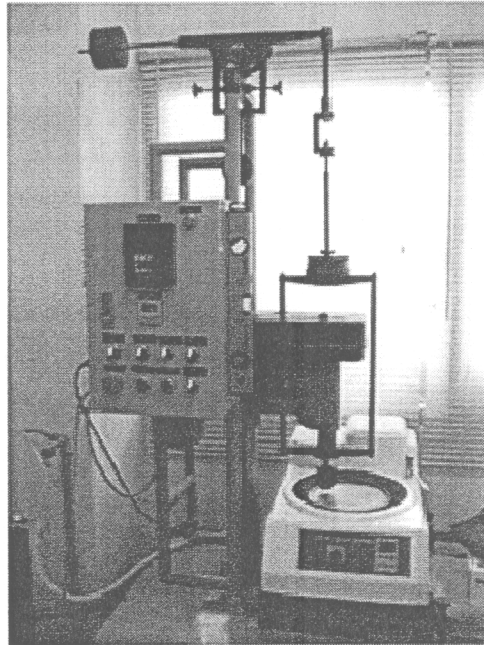
รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการวัดความแข็ง

ที่มา : เจียรศักดิ์ และ นริศรา (2559)

### 3.4 การทดสอบการสึกหรอ

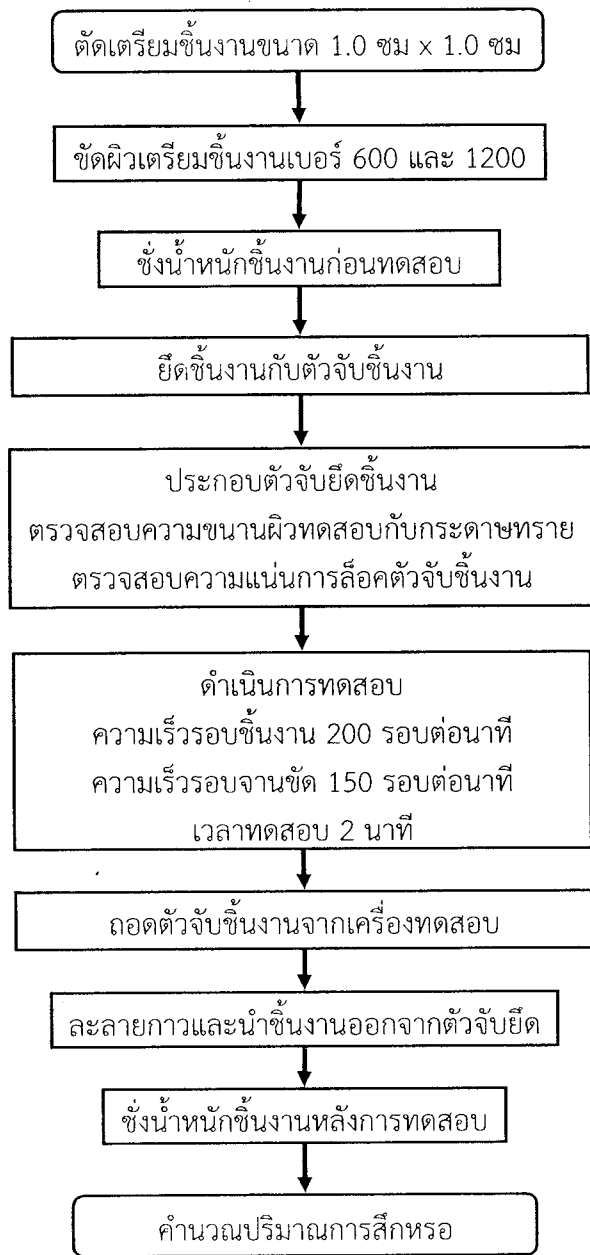
การทดสอบการสึกหรอเป็นการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีโดยเครื่องทดสอบการสึกหรอ ที่มีตัวจับยึดชิ้นงานขนาด 1.0 เซนติเมตร x 1.0 เซนติเมตร จับยึดกับแกนที่หมุนได้ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และจานขัดกระดาษทรายเบอร์ 120 ที่ความเร็วรอบ 200 นาที เป็นเวลา 2 นาที และคำนวณหาปริมาณการสูญเสียน้ำหนัก (loss weight) เทียบกับพื้นที่ทดสอบ (contact area) ตามสมการที่ 3.1 ลักษณะของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.19

$$loss\ weight = \frac{loss\ weight(mg)}{contact\ area(cm^2)} \quad 3.1$$



รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบการสีกหรอ  
ที่มา : เขียรศักดิ์ และ นริศรา (2559)

ขั้นตอนการทดสอบชิ้นงานประกอบด้วย การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานขนาด 1.0 เซนติเมตร x 1.0 เซนติเมตร เตรียมผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ ชั่งน้ำหนัก ยึดติดกับตัวจับชิ้นงาน ประกอบกับเครื่องทดสอบ ทดสอบเป็นเวลา 2 นาที นำชิ้นงานออกจากแท่งจับยึด ทำความสะอาดชั่งน้ำหนักที่หายไป คำนวณปริมาณการสีกหรอต่อพื้นที่รายละเอียดขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.20

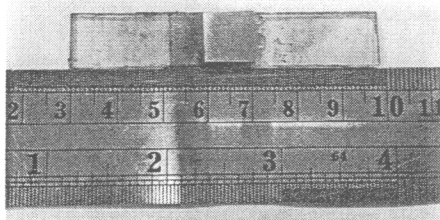


รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอ

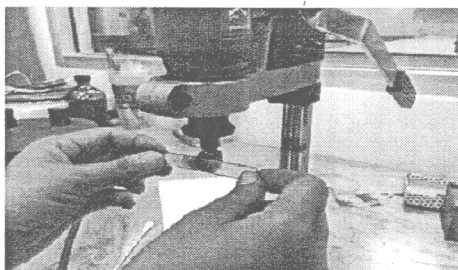
ที่มา : เสียรศักดิ์ และ นริศรา (2559)

รายละเอียดการทำงานแต่ละขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.21 (ก) การจับยึดเพื่อเตรียมผิวชิ้นงาน 3.21 (ข) การขัดเตรียมผิวชิ้นงาน 3.21 (ค) อะซิติโคนทำความสะอาดผิวชิ้นงาน 3.21 (ง) การชั่งน้ำหนัก 3.21 (จ) การยึดชิ้นงานบนตัวจับยึดและ 3.21 (ฉ) การทดสอบ

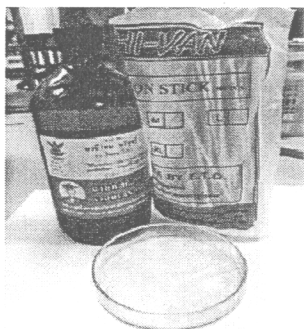
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

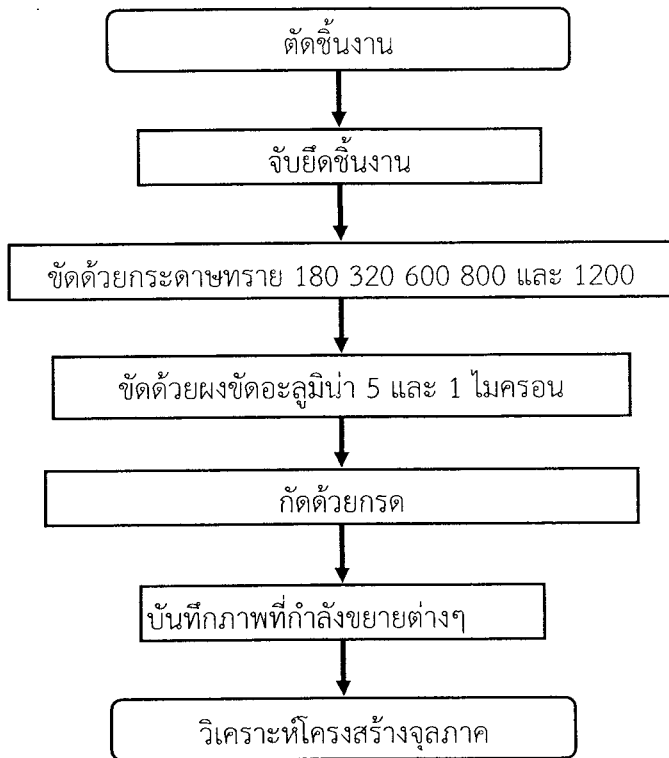


รูปที่ 3.21 รายละเอียดการเตรียมชิ้นงานทดสอบการสีกรอ  
ที่มา : เจียรศักดิ์ และ นริศรา (2559)

### 3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ตัดชิ้นงาน จับยึดชิ้นงานด้วยเรซิน (mounting) ชัดเตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ ชัดด้วยผงขัดอะลูมินา กัดกรดไนตริก 2% เป็นเวลา 3 วินาที ถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope) และวิเคราะห์โครงสร้าง รายละเอียดดังรูปที่ 3.22





รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค  
ที่มา : เขียวศักดิ์ และ นริศรา (2559)

## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยโครงการนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ (1) ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแบบใช้คนควบคุม (2) ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟใช้ระบบควบคุมความเร็ว รายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งเปลวไฟเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแบบใช้คนควบคุม

รายละเอียดการศึกษาการชุบแข็งเปลวไฟเหล็กกล้าใบเลื่อย โดยใช้คนควบคุมหัวเผาแก๊ส ออกซิเจน-อะเซทิลีน ตามสภาวะที่กำหนด และนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ก่อนการชุบแข็ง รายละเอียดดังนี้

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อยตัวอย่าง สามารถเทียบได้กับเหล็กกล้าผสมต่ำ 6150 ตาม ASM Handbook Vol.1 (1997) อย่างไรก็ตามปริมาณของ วานาเดียม (V) 0.01 น้อยกว่าเกณฑ์กำหนดของเหล็กกล้า 6150 ที่กำหนดไว้ต้องไม่น้อยกว่า 0.15 รายละเอียดการเทียบและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 6150 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

##### ตารางที่ 4.1 การเทียบเกรดเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1

ชิ้นงาน	C	Si	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Co	Al	Zn	Fe
ตัวอย่าง	0.5157	0.2078	0.0124	0.8808	0.0715	0.9464	0.0287	0.1012	0.0388	0.0042	0.0061	0.0045	0.0035	Balance
6150	0.48- 0.53	0.15- 0.30	0.040	0.70- 0.90	-	0.80- 1.10	-	0.15 (min)	-	-	-	-	-	-

##### 4.1.2 ค่าความแข็ง

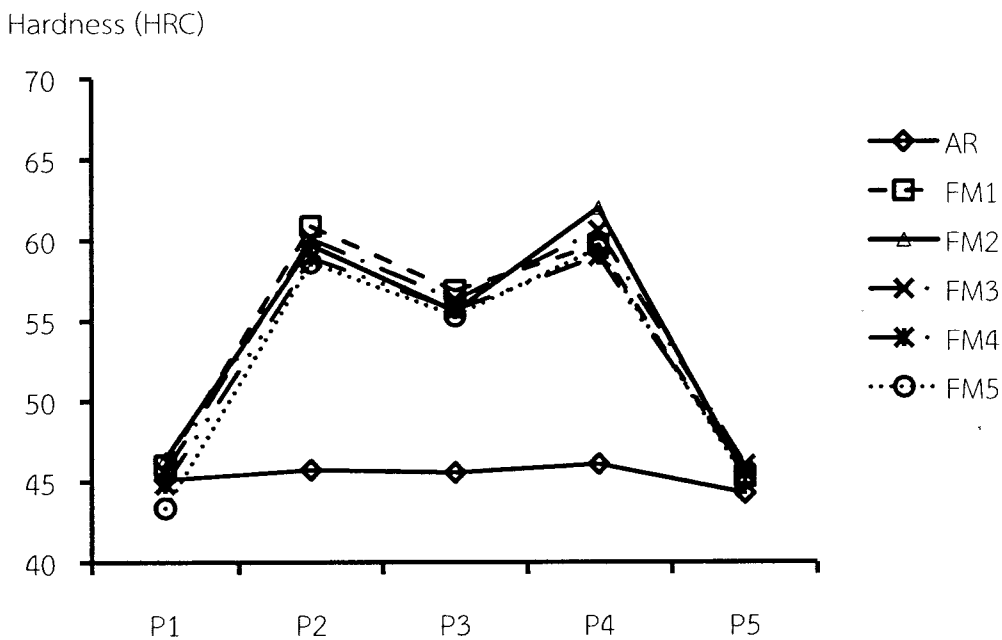
การวัดค่าความแข็งของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานที่ได้รับ (As Received; AR) ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 45.1 – 46.1 HRC สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งที่สภาวะการทดลองต่างๆ มีค่าอุณหภูมิผิวชิ้นงานสูงสุดดังนี้  $T_{(s, \max)}$  FM1 (773 °C) FM2 (860 °C) FM3 (876 °C) FM4 (947 °C) และ FM5 (984 °C) พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเฉพาะตำแหน่ง P2 P3 และ P4 อยู่ในช่วง 55.3 – 62.0 HRC รายละเอียดค่าความแข็งดังในตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งสอดคล้องกับค่าความแข็งสำหรับการชุบด้วยน้ำของเหล็กกล้า 6150 ที่ Davis (2002) ระบุอยู่ในช่วง 55 – 60 HRC

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งเหล็กกล้าชิ้นงานใบเลื่อยตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชุบแข็งเปลวไฟที่  
สภาวะต่างๆ

ชิ้นงาน	รหัส	สภาวะการชุบแข็ง			ค่าความแข็ง (HRC)				
		$T_{(start)}$ (°C)	$T_{(s, max)}$ (°C)	สารชุบ	P1	P2	P3	P4	P5
ก่อนการชุบแข็ง	AR	-	-	น้ำ	45.1	45.7	45.6	46.1	44.3
ชุบแข็งสภาวะ 1	FM1	660	773	น้ำ	46.0	60.9	56.9	59.7	45.3
ชุบแข็งสภาวะ 2	FM2	710	860	น้ำ	46.4	59.7	55.6	62.0	45.4
ชุบแข็งสภาวะ 3	FM3	760	876	น้ำ	45.6	60.1	56.3	60.6	46.0
ชุบแข็งสภาวะ 4	FM4	810	947	น้ำ	44.9	58.9	55.7	59.0	45.6
ชุบแข็งสภาวะ 5	FM5	860	984	น้ำ	43.4	58.6	55.3	59.5	45.1

สาเหตุที่ค่าความแข็งแตกต่างกัน ASM International Vol.1 (1997) ระบุว่าเกิดจากความแตกต่างของปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนเป็นเฟสมาร์เทนไซต์มากกว่าจะมีค่าความแข็งมากกว่า สอดคล้องกับการอธิบายความแข็งลึกที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่ระยะลึกจากผิวอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณผิวทำให้ความของชิ้นงานลดลงตามความลึกของชิ้นงาน Lee et al. (2004) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นผลจากกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟที่มีความยากในการควบคุมกระบวนการให้สม่ำเสมอ Davis (2002)

โดยที่ตำแหน่ง P1 และ P5 ความแข็งไม่เปลี่ยน ค่าความแข็งดังกราฟในรูปที่ 4.1 ผลจากสภาวะการเย็นตัวเหมือนกันทุกตำแหน่งแสดงว่า ณ ตำแหน่งที่ P1 และ P5 อุณหภูมิของชิ้นงานไม่ถึงอุณหภูมิมอสเทนไนต์ (760 องศาเซลเซียส) ส่วนตำแหน่ง P2 P3 และ P4 ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซต์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเฉพาะค่าความแข็งตำแหน่ง P2 และ P4 มีค่าความแข็งสูงกว่า ตำแหน่ง P3 ซึ่งเป็นตำแหน่งบริเวณกลางชิ้นงานซึ่งได้รับความร้อนจากเปลวไฟสูงที่สุดทำให้เกิดเฟสออสเทนไนต์ขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่ P2 และ P4 เมื่อ เกิดการเย็นตัวจากการจุ่มน้ำ (quenching) ทำให้เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่หยาบกว่าตำแหน่ง P2 และ P3 สอดคล้องกับการอธิบายการเปลี่ยนเฟสของกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟโดย Davis (2002)



รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชุบแข็งด้วยเปลวไฟแบบใช้คนควบคุมที่สภาวะต่างๆ

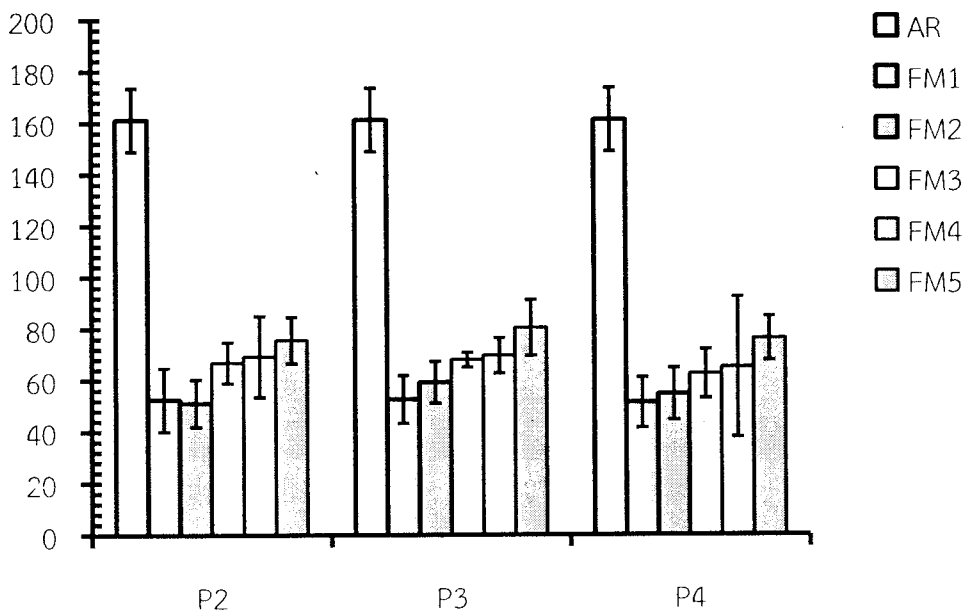
#### 4.1.3. ผลการทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานก่อนการชุบแข็งพบว่าชิ้นงานตัวอย่างมีการสึกหรอ 161.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนผลการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานชุบแข็งที่อุณหภูมิชุบแข็งผิวสูงสุด 773 860 876 947 และ 984 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่ง P2 P3 และ P4 มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ค่าการสึกหรอลดลงเหลือ 51.3-52.6 51.1-59.2 62.5-67.9 65.1-69.5 และ 75.6-80.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ รายละเอียดปริมาณการสึกหรอแสดงในตารางที่ 4.3 และรายละเอียดการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยชิ้นงานที่อุณหภูมิชุบแข็งผิว 773 และ 860 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับตำแหน่ง P2 P3 และ P4 และค่าการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิชุบแข็งผิวมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิชุบแข็งผิวที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานสูง ทำให้เกิดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานเปลี่ยนจากความเค้นแบบกดเป็นความเค้นแบบดึง ส่งผลให้สมบัติต้านทานการสึกหรอลดลง Lee et al. (2004) ซึ่งปริมาณความเค้นตกค้างที่เกิดจากการเฟสมาร์เทนไซต์ภายในชิ้นงานทำให้ขาดสมบัติความเหนียวและแทบจะไม่มีนำไปใช้งานโดยไม่มีการทำเทมเปอร์ Lee et al. (2004)

ตารางที่ 4.3 การสึกหรอของชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชุบแข็ง ด้วยเปลวไฟแบบใช้คนควบคุมที่สภาวะต่างๆ

ชิ้นงาน	รหัส	สภาวะการชุบแข็ง			การสึกหรอ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)		
		$T_{(start)}$ (°C)	$T_{(s,max)}$ (°C)	สารชุบ	P2	P3	P4
ก่อนการชุบแข็ง	AR	-	-	-	161.2	161.2	161.2
ชุบแข็งสภาวะ 1	FM1	660	773	น้ำ	52.4	52.6	51.3
ชุบแข็งสภาวะ 2	FM2	710	860	น้ำ	51.1	59.2	54.6
ชุบแข็งสภาวะ 3	FM3	760	876	น้ำ	66.8	67.9	62.5
ชุบแข็งสภาวะ 4	FM4	810	947	น้ำ	69.2	69.5	65.1
ชุบแข็งสภาวะ 5	FM5	860	984	น้ำ	75.6	80.4	76.2

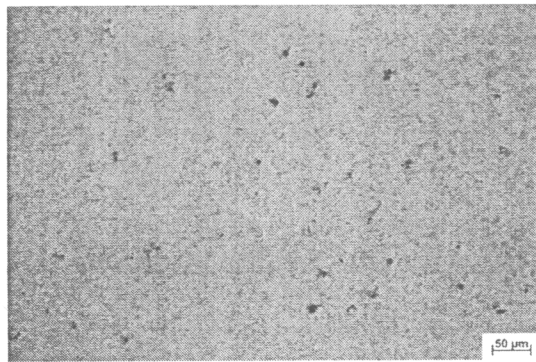
wear rate



รูปที่ 4.2 ค่าการสึกหรอชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชุบแข็งเปลวไฟแบบใช้คนควบคุมที่สภาวะต่างๆ

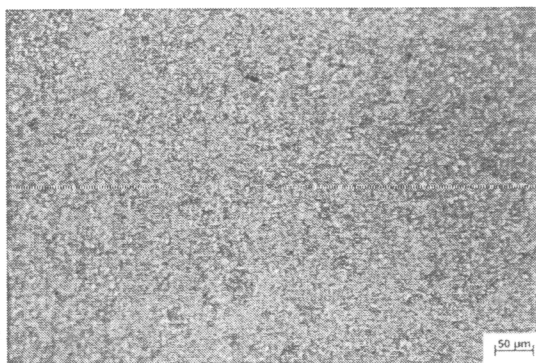
#### 4.1.4 ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่ได้รับประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เป็นสีขาวและโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นสีดำ ดังรูปที่ 4.3 โครงสร้างละเอียด และผลจากการเติมธาตุเจือ Cr และ V ทำให้มีเฟสสารประกอบเชิงโลหะ (intermetallic compound) กระจายตัว สอดคล้องกับ Li et al. (2013) ที่ระบุโครงสร้างเหล็กกล้า 6150 ว่ามีโครงสร้างละเอียด (fine grain) และต้านทานการสึกหรอสูงจากการเติมธาตุเจือ Cr และ V



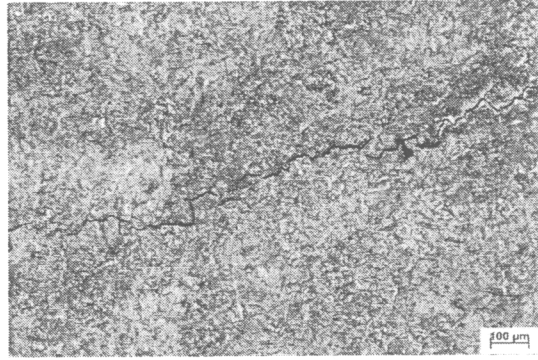
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 1 ก่อนการชุบแข็ง

ส่วนรูปโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าใบเลื่อยที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ ตำแหน่ง P2 P3 และ P4 ซึ่งมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นมีลักษณะโครงสร้างเปลี่ยนจากโครงสร้างเดิมเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ แสดงว่า ณ ตำแหน่งดังกล่าวอุณหภูมิผิวสูงสุด  $T_{(s, max)}$  มีค่าอุณหภูมิถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ (760 องศาเซลเซียส) และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์จากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานชุบแข็งเปลวไฟที่อุณหภูมิ 773 องศาเซลเซียส

ในขณะที่ชิ้นงานในตำแหน่ง P1 และ P5 มีลักษณะโครงสร้างเหมือนเดิมแสดงว่า ตำแหน่งดังกล่าวอุณหภูมิของชิ้นงานที่ได้รับจากเปลวไฟ ไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ ทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเหมือนเดิมภายหลังจากการ เย็นตัวภายในน้ำ (Gronegress, 1964) นอกจากนี้สำหรับ อุณหภูมิผิวสูงสุด 876 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีลักษณะการแตกร้าอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานชุบแข็งเปลวไฟที่อุณหภูมิ 876 องศาเซลเซียส

แสดงว่าที่อุณหภูมิชุบแข็งผิวสูงสุด 876 องศาเซลเซียส เมื่อชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดความเค้นเกินขีดจำกัดของเหล็กกล้าใบเลื่อยส่งผลให้เกิดการแตกร้า โดยความเค้นที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ ความเค้นจากการหดตัวที่เป็นผลจากอุณหภูมิลดลง (thermal contraction) และความเค้นจากการขยายตัวในขณะที่เปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์ไปสู่มาร์เทนไซต์ ตามความสัมพันธ์  $4.64 - 0.53x(\%C)$  ที่ระบุใน ASM Handbook Vol.4 (1998) จากปริมาณคาร์บอน 0.52% ส่งผลให้เกิดการขยายตัว 4.36% ซึ่งการแตกร้า ณ อุณหภูมิสูงสุดผิวดังกล่าว สอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Davis (2002) ที่ระบุว่า การชุบแข็งเหล็กกล้า 6150 สำหรับชิ้นงานที่บาง มีความไวต่อการแตกร้าขณะชุบสูง ส่วนความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในระหว่างการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว นั้น Lee et al. (2004) ระบุว่าความเค้นที่เกิดจากการหดตัวของอุณหภูมิเป็นความเค้นแบบกด และความเค้นจากการเปลี่ยนเฟสเป็นความเค้นแบบดึง และสรุปถึงลักษณะความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานระหว่างการเย็นตัวอย่างรวดเร็วสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 12Cr หากอัตราการเย็นตัวสูงถึง 103 องศาเซลเซียสต่อวินาที ความเค้นตกค้างจะเปลี่ยนเป็นความเค้นแบบดึงทำให้ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอต่ำ และหากอัตราการเย็นตัวไม่เกิน 102 องศาเซลเซียสต่อวินาที ความเค้นตกค้างจะไม่เปลี่ยนจากความเค้นแบบกดเป็นความเค้นแบบดึง

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบแข็งด้วยเปลวไฟใช้ระบบควบคุมความเร็ว

### 4.2.1 การศึกษาสภาวะการชุบแข็งเปลวไฟจากการติดตั้งชุดชุบแข็งเปลวไฟที่เครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติ

เป็นการศึกษาความเร็วที่เหมาะสมของการเคลื่อนที่ชุดชุบแข็งที่ติดตั้งกับเครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติ โดยการทดลองที่ตัวแปรการปรับความเร็วการเคลื่อนที่ และสารชุบ โดยเริ่มต้นที่การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อย ทดลองชุบแข็งชิ้นงาน นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสมบัติ ก่อนและหลังการชุบแข็ง รายละเอียดดังนี้

#### (1) การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานในการทดลองนี้ สามารถเทียบเกรดได้กับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1065 ตามมาตรฐาน ASTM A682 รายละเอียดดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเทียบเกรดเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2

	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Cu+Ni+Cr+Mo
ตัวอย่าง	0.6829	0.6575	0.0198	0.0061	0.1742	0.0139	0.0146	0.2436	0.0013	0.0040	0.2734
1065	0.60 to 0.70	0.60 to 0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.30	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.25	≤ 0.10	-	<0.80%

ตัวอย่างเหล็กกล้าใบเลื่อยมีปริมาณธาตุเจอร์คาร์บอน 0.6829 และ นิกเกิล 0.0146 ซึ่งปริมาณน้อยกว่าที่ สูธี และ คณะ (2546) แนะนำเพื่อให้ใบเลื่อยเหนียวและทนทานต่อการใช้งานปริมาณคาร์บอน 0.75% และ นิกเกิลไม่ควรน้อยกว่า 2.00%

#### (2) ค่าความแข็ง

ผลการวัดค่าความแข็งชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการชุบแข็งที่ควบคุมความเร็วด้วยเครื่องเดินตัดอัตโนมัติ ประกอบด้วย 5 ตำแหน่ง คือ P1 P2 P3 P4 และ P5 โดยตำแหน่ง P1 และ P5 เป็นตำแหน่งที่อยู่ส่วนนอกสุดในกระบวนการชุบแข็งที่ได้รับอิทธิพลจากเปลวไฟเพียงเล็กน้อย ตำแหน่ง P2 และ P4 เป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากเปลวไฟ และตำแหน่ง P3 เป็นตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลจากเปลวไฟโดยตรง สำหรับสารชุบประกอบด้วยสารชุบลมอัดและน้ำ (ลมอัดที่แรงดัน 2 บาร์และน้ำที่อัตราการไหล 0.36 ลิตรต่อนาที) และลมอัดที่ 2 บาร์

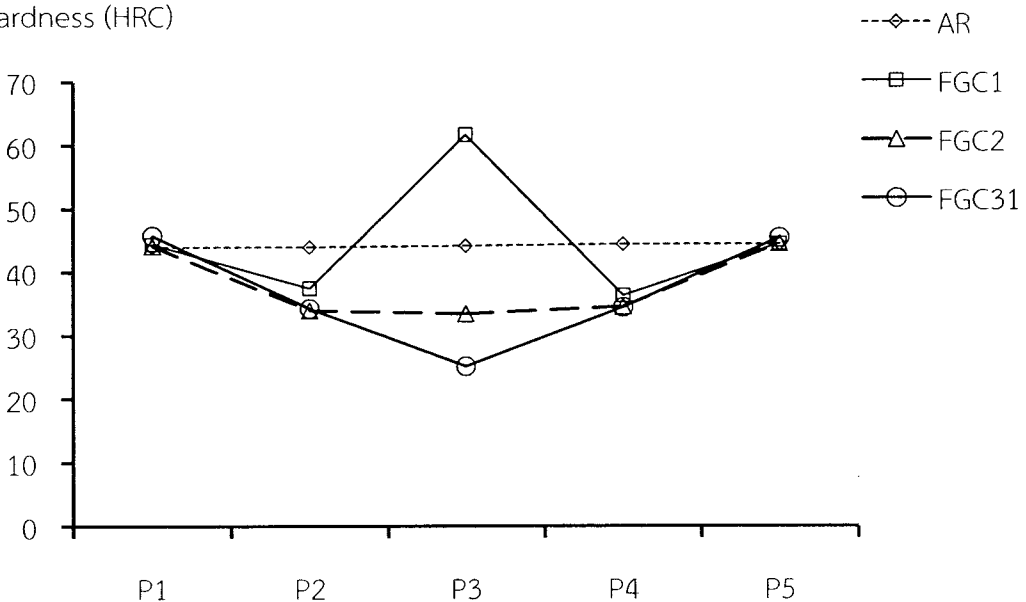
ผลค่าความแข็งชิ้นงานพบว่าชิ้นงานจากสภาวะการทดลองที่ 1 ที่ความเร็วชุดชุบแข็ง 0.42 เซนติเมตรต่อวินาที ใช้ลมอัดและน้ำเป็นสารชุบสามารถเพิ่มความแข็งเฉพาะตำแหน่ง P3 จากเดิม 44.3 HRC เป็น 61.7 HRC รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.5



ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชุบแข็งที่สภาวะต่างๆ

ชิ้นงาน	รหัส	ความเร็ว (cm/s)	สภาวะการชุบ	ค่าความแข็ง (HRC)				
				P1	P2	P3	P4	P5
ก่อนการชุบแข็ง	AR	-	-	44.0±0.6	44.0±1.0	44.3±0.8	44.5±0.6	44.5±0.6
ชุบแข็งสภาวะ 1	FGC1	0.42	ลมอัดและน้ำ	44.5±1.1	37.5±2.7	61.7±2.1	36.4±2.9	44.6±0.4
ชุบแข็งสภาวะ 2	FGC2	0.46	ลมอัดและน้ำ	44.2±0.6	34.0±1.6	33.5±1.8	34.6±1.5	44.6±0.4
ชุบแข็งสภาวะ 3	FGC3	0.42	ลมอัด	45.8±1.0	34.3±2.3	25.2±1.0	34.5± 2.0	45.5± 0.9

Hardness (HRC)



รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชุบแข็งที่สภาวะและตำแหน่งต่างๆ

ผลวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านสภาวะการทดลองที่ 1 (FGC1) จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งมีค่ามากกว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็งเฉพาะตำแหน่ง P3 แต่ในตำแหน่ง P2 และ P4 ความแข็งลดลงเนื่องจากได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากเปลวไฟที่ทำให้อุณหภูมิไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ ส่วนในตำแหน่ง P1 และ P5 ความแข็งยังคงเท่าเดิมเนื่องจากไม่รับผลกระทบจากความร้อน ในขณะที่ชิ้นงานจากการชุบแข็งตามสภาวะการทดลองที่ 2 (FGC2) และ 3 (FGC3) พบว่าค่าความแข็งลดลงแสดงว่า ณ ความเร็วในการเดิน 0.46

ผลการทดสอบความแข็งของชุดการทดสอบที่ 3 (FGC3) จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งของเหล็กเดิมเนื่องจากอุณหภูมิของเหล็กบริเวณนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิออสเทนไนต์ จึงไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นเฟสออสเทนไนต์ได้ ทำให้ความแข็งของเหล็กบริเวณนั้นลดลงจากความแข็งของเหล็กเดิม สำหรับค่าความแข็งตำแหน่งชิ้นงานที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่อุณหภูมิไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงตามขั้นตอนของการทำเทมเปอร์ (ASM Handbook Vol.4, 1998)

### (3) การสึกหรอ

จากการนำเหล็กใบเลื่อยที่ใช้ในการทดสอบที่ยังไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและผ่านกระบวนการชุบแข็งของตำแหน่ง P3 แล้วมาทำการทดสอบการสึกหรอจะได้ค่าการสึกหรอดังตารางที่ 4.6

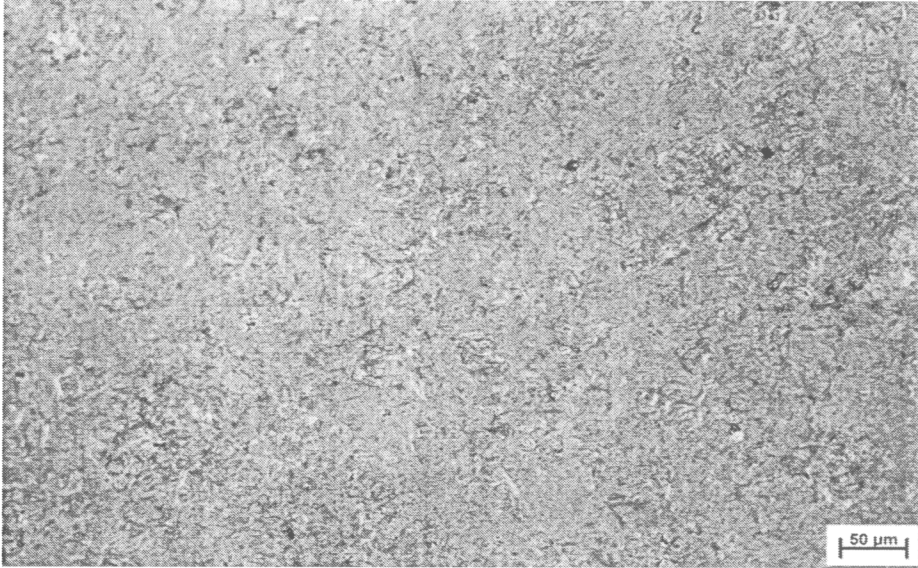
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชุบแข็ง สภาวะ 1 ตำแหน่ง P3

ชิ้นงาน	รหัส	ความเร็ว (cm/s)	สภาวะการชุบแข็ง	การสึกหรอ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ก่อนการชุบแข็ง	AR	-	-	$110.5 \pm 11.9$
ชุบแข็งสภาวะ 1 (ตำแหน่ง P3)	FGC1	0.42	ลมอัดและน้ำ	$29.5 \pm 15.8$

จากการทดสอบการสึกหรอของเหล็กใบเลื่อย แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานก่อนชุบแข็งมีอัตราการสูญเสีย 110.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และชิ้นงานหลังชุบแข็งมีอัตราการสูญเสีย 29.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแล้วมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่า สอดคล้องกับสมบัติชิ้นงานที่มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจะมีความต้านทานการสึกหรอมากขึ้น (ไพลิน, 2555)

### (4) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง

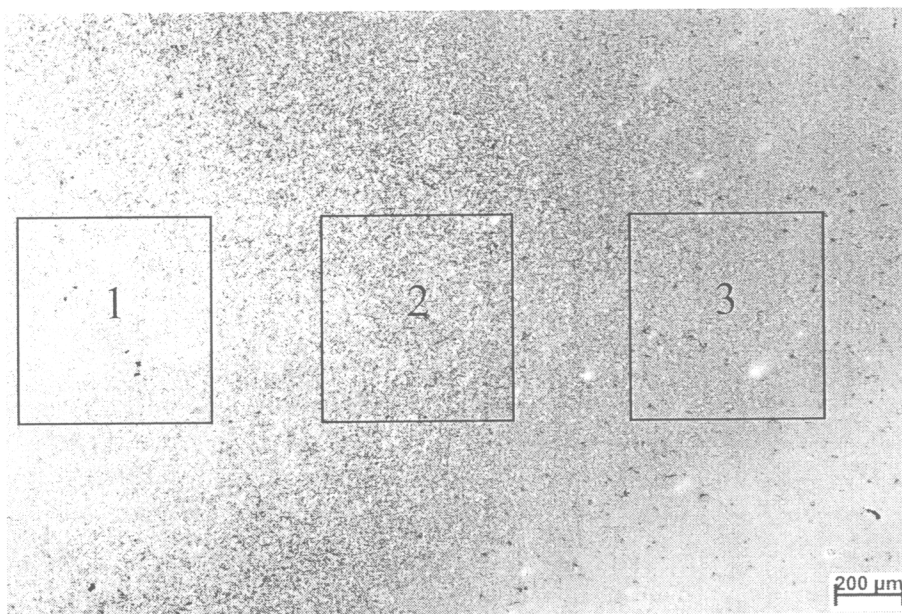
โครงสร้างทางจุลภาคของใบเลื่อยก่อนกระบวนการชุบแข็ง ดังรูปที่ 4.7 โดยโครงสร้างจุลภาคของใบเลื่อยก่อนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างที่ผ่านการชุบแข็ง และผ่านกระบวนการเทมเปอร์เพื่อเพิ่มความเหนียว



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานใบเลื่อยสายพานตัวอย่างที่ 2 ก่อนการชุบแข็ง

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กใบเลื่อยสายพานก่อนกระบวนการชุบแข็งซึ่งมีปริมาณของคาร์บอนประมาณ 0.68% ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์ ซึ่งจากการสังเกตพบลักษณะโครงสร้างคล้ายกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและทำเทมเปอร์เพื่อเพิ่มความเหนียว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nordstrom and Bergstrom (2001) ได้มีการศึกษาเหล็กกล้าใบเลื่อย UHB 15LM ที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนซิติค (martensitic saw steel) ที่ผ่านการชุบแข็งและทำเทมเปอร์

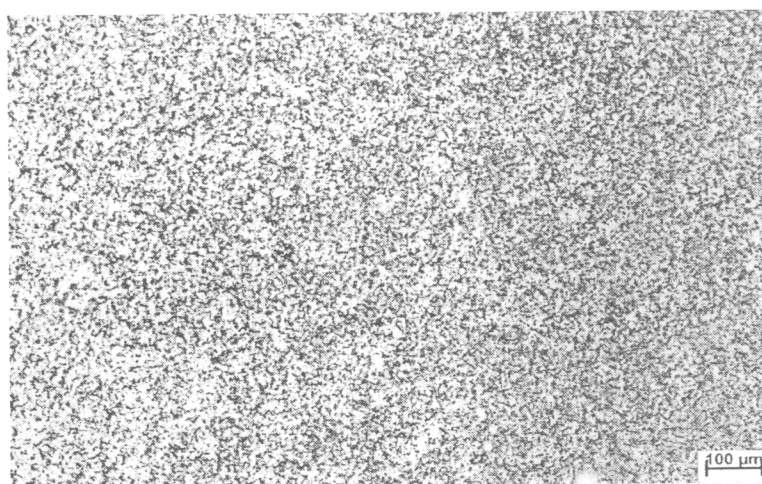
โครงสร้างทางจุลภาคของใบเลื่อยหลังกระบวนการชุบแข็งที่อัตราเร็วระดับ 0.42 เซนติเมตรต่อวินาที สารชุบน้ำและลม



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของใบเลื่อยหลังการชุปแข็งที่ความเร็ว 0.42 cm/s สารชุป ลมอัดและน้ำ

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะความไม่สม่ำเสมอจากตำแหน่งที่ใกล้เปลวไฟมากที่สุด (1) และ ตำแหน่งที่ไกลจากเปลวไฟ (3)

- ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งที่โดนเปลวไฟโดยตรงซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนไปจากโครงสร้างเดิมที่ชัดเจน
- ตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งที่โดนเปลวไฟในระดับหนึ่งซึ่งน้อยกว่าตำแหน่งที่ 1 จึงทำให้มีลักษณะโครงสร้างที่ยังคงเฟสโครงสร้างเดิมอยู่บ้าง
- ตำแหน่งที่ 3 เป็นตำแหน่งที่โดนเปลวไฟเพียงเล็กน้อยจึงทำให้โครงสร้างยังคงเป็นเฟสเดิมอยู่



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของใบเลื่อยหลังการชุปแข็งที่ความเร็ว 0.42 cm/s สารชุป ลมอัดและน้ำ

จากรูปโครงสร้างทางจุลภาคของใบเลื่อยหลังผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟมีลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนไปจากโครงสร้างเดิม แต่เนื่องจากมีลักษณะของเฟสที่ยังไม่สามารถสรุปได้

#### 4.2.2 ผลการศึกษาสภาวะการชุบแข็งฟันเลื่อยจากชุดเดินใบเลื่อยที่ได้จัดทำขึ้น

ตัวอย่างที่ใช้ในการชุบแข็งฟันเป็นตัวอย่างที่มีส่วนผสมทางเคมีเดียวกันกับตัวอย่างการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในข้อที่ 4.2.1 ข้างต้น

##### (1) ค่าความแข็งฟันใบเลื่อย

การทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานประกอบด้วย 3 ตำแหน่ง คือตำแหน่ง P1 P2 และ P3 โดยที่ตำแหน่ง P3 เป็นตำแหน่งที่อยู่ส่วนนอกสุดในกระบวนการชุบแข็งที่ได้รับอิทธิพลจากเปลวไฟเพียงเล็กน้อย ตำแหน่ง P2 เป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากเปลวไฟ และตำแหน่ง P1 เป็นตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลจากเปลวไฟโดยตรง ดังตารางที่ 4.8

การชุบแข็งฟันใบเลื่อยสำหรับเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการชุบแข็งแบบใบเลื่อยอยู่กับที่เป็นการนำตัวแปรที่ได้จากการชุบแข็งเหล็กใบเลื่อยคือ อัตราเร็ว สารชุบ และเปลวไฟมาใช้ในการชุบแข็งฟันของใบเลื่อย โดยตัวแปรที่เลือกนำมาใช้ในการทดลองชุบฟันใบเลื่อย คือ อัตราเร็ว 0.42 เซนติเมตรต่อวินาที สารชุบ น้ำกับลม รายละเอียด ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งชิ้นงานชุบแข็งฟันใบเลื่อย

ชิ้นงาน	รหัส	ความเร็ว (cm/s)	สภาวะการชุบ	ค่าความแข็ง (HRC)		
				P1	P2	P3
ชุบแข็งสภาวะ 1	FMC	0.42	ลมอัดและน้ำ	$64.7 \pm 2.2$	$39.9 \pm 1.5$	$45.2 \pm 1.2$

ผลการวัดค่าความแข็งของฟันใบเลื่อยจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งตำแหน่ง P1 มีค่าค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากความแข็งเดิม เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากเปลวไฟโดยตรงสามารถทำให้เหล็กเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเป็นเฟสออสเทนไนต์ได้ค่าความแข็งที่ได้จึงเพิ่มขึ้นจากความแข็งเดิมแต่ในตำแหน่ง P2 ความแข็งลดลงเนื่องจากได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากเปลวไฟที่ไม่ทั่วถึงทำให้อุณหภูมิของเหล็กบริเวณนั้นมีอุณหภูมิไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ จึงไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นเฟสออสเทนไนต์ได้ ทำให้ความแข็งของเหล็กบริเวณนั้นลดลงจากความแข็งของเหล็กเดิมตามหลักการทำให้เพอร์ไลท์ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนตำแหน่ง P3 ความแข็งยังคงเท่าเดิมเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากเปลวไฟเพียงเล็กน้อยจึงทำให้โครงสร้างยังคงเหมือนเดิมค่าความแข็งจึงไม่เปลี่ยน

##### (2) การสึกหรอฟันใบเลื่อย

จากการนำส่วนฟันของใบเลื่อยที่ใช้ในการทดสอบที่ยังไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและผ่านกระบวนการชุบแข็งแล้วมาทำการทดสอบความการสึกหรอจะได้ค่าดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการสึกหรอของพื้นใบเลื่อยก่อนและหลังการชุบแข็ง

ชิ้นงาน	รหัส	ความเร็ว (cm/s)	สภาวะการชุบแข็ง	การสึกหรอ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ก่อนการชุบแข็ง	AR	-	-	95.5±3.1
ชุบแข็งสภาวะ 1 (ตำแหน่ง P1)	FMC	0.42	ลมอัดและน้ำ	54.8±2.7

จากการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของเหล็กพื้นเลื่อย แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานก่อนชุบแข็งมีอัตราการสูญเสีย 95.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และชิ้นงานหลังชุบแข็งมีอัตราการสูญเสีย 54.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแล้วมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามตามชุดเดินใบเลื่อยในการทดลองนี้ยังขาดความสามารถในการเดินต่อเนื่อง และการเดินที่ความเร็วต่ำๆ ยังไม่ราบเรียบ ต้องพัฒนาต่อไป

#### 4.2.3 การศึกษาสภาวะการศึกษาสภาวะการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยจากการติดตั้งชุดชุบแข็ง เปลวไฟกับเครื่องเดินตัดแก๊สอัตโนมัติสำหรับตัวอย่างจากสถานประกอบการ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเป็นการศึกษาหาความเร็วชุดชุบแข็ง สารชุบ และปริมาณสารชุบที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานที่ได้รับจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราในเขตพื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จำนวน 3 ตัวอย่าง รายละเอียดส่วนผสมทางเคมี ความแข็ง การสึกหรอ ดังนี้

##### (1) การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

ประกอบด้วยเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานของผู้ประกอบการในเขตจังหวัดสุราษฎร์ธานี จำนวน 3 โรงงาน คือ A B และ C ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และเมื่อเทียบการเทียบเกรดเหล็กกล้าจากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี พบว่าตัวอย่างจากโรงงาน A และ B ปริมาณคาร์บอน 0.645 และ 0.675 ตามลำดับ และไม่มีปริมาณธาตุเจืออื่นเกินเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM A682M (ตารางที่ 4.10) จึงจัดเป็นเหล็กกล้า 1065 ส่วนเหล็กกล้าจากโรงงาน C มีปริมาณ Mn 0.374 และ ปริมาณ Ni 1.816

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างใบเลื่อยสายพานตัวอย่างจากโรงงาน A B และ C

Sample	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	V	Ti	Co
A	0.6450	0.6991	-	0.0036	0.1942	0.0095	0.0126	0.1031	-	0.0148	-	-	0.0031
B	0.6754	0.9654	-	0.0056	0.2617	0.0341	0.0169	0.0437	0.0074	0.0097	0.0033	-	0.0084
C	0.6677	0.3747	-	0.0085	0.1997	0.0055	1.8159	0.0122	-	0.0202	-	-	0.0035

ตารางที่ 4.10 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน ASTM A682

Steel	C	Mn	P (max)	S (max)	Si	Cu	Ni	Cr	Mo
1065	0.60-0.70	0.60-0.90	0.035	0.040	0.15-0.30	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.25	≤ 0.10

ปริมาณคาร์บอนของเหล็กกล้าทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าที่ปริมาณที่ สูธี และคณะ (2546) และ อำไพ 2549) ซึ่งแนะนำว่าปริมาณคาร์บอนไม่ควรต่ำกว่า 0.75% และเมื่อพิจารณาปริมาณนิเกิล พบว่าตัวอย่างจากโรงงาน C มีปริมาณ นิเกิลสูงที่สุด 1.81% แต่ยังไม่ตามปริมาณที่ สูธี และ คณะ (2546) แนะนำว่าไม่ควรต่ำกว่า 2.00% โดยในงานวิจัยของ Nordstrom and Bergstrom (2001) ได้ศึกษาเหล็กกล้าใช้ใบเลื่อยที่มีส่วนผสม 2 เกรดที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ คือ UHB 15LM และ UHB 15N20 รายละเอียดทั้งส่วนผสมทางเคมีและสมบัติดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล

Steel	C	Ni	Mn	Si	P (max)	S (max)	Hardness (HV <sub>0.025</sub> )	$\sigma_{ts}$ (MPa)
UHB 15LM	0.71	-	0.73	0.2	0.02	0.02	500	1370
UHB 15N20	0.75	2.0	0.40	0.2	0.02	0.02	540-580	1370,1450

ที่มา : Nordstrom and Bergstrom (2001)

จากส่วนผสมทางเคมีแสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยปริมาณคาร์บอนไม่น้อยกว่า 0.70% ส่วนปริมาณนิเกิลมีทั้งเกรดที่เติม 2.0% (UHB 15N20) และไม่เติม (UHB 15LM) โดยปริมาณนิเกิล

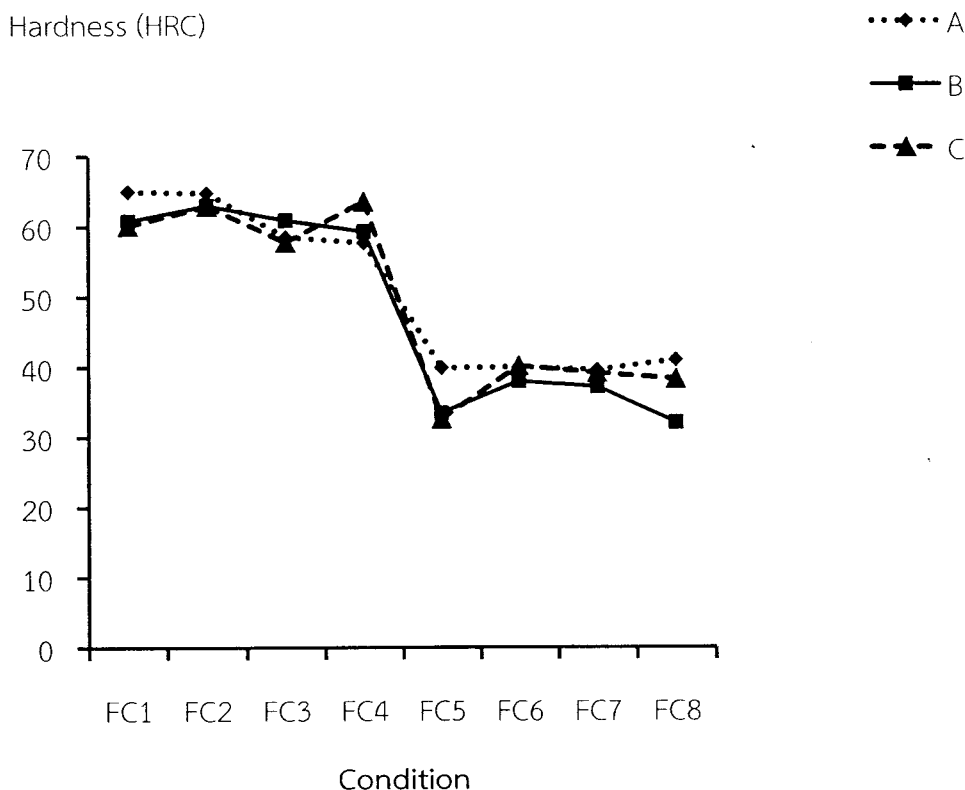
## (2) ค่าความแข็ง

การวัดค่าความแข็งชิ้นงานตัวอย่างใบเลื่อยที่ได้รับ (As Received; AR) จากโรงงาน A B และ C มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 43.0-44.8 HRC เปรียบเทียบกับค่าความแข็งชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งที่สภาวะต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าการทดลองที่ 1-4 (FC1-FC4) ค่าความแข็งของชิ้นงานจากโรงงาน A B และ C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งของโรงงาน A B และ C (44.8 43.0 และ 43.4 HRC) เพิ่มค่าความแข็งชิ้นงานจากโรงงาน A เป็น 57.7-65.0 HRC ชิ้นงานจากโรงงาน B เพิ่มเป็น 59.3-63.0 HRC และชิ้นงานจากโรงงาน C เพิ่มค่าความแข็งเป็น 57.8-63.5 HRC รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.12 สำหรับชิ้นงานจากทั้ง 3 โรงงาน (A B และ C) จากสภาวะการทดลองที่ 5-8 (FC5-FC8) พบว่ามีค่าความแข็งลดลง รายละเอียดดังแสดงในตาราง 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังการชุบแข็งที่สภาวะต่างๆ

ชิ้นงาน	รหัสย่อ	ความเร็ว (cm/s)	สารชุบ	ปริมาณ (l/min)	A	B	C
ก่อนการชุบแข็ง	AR	-	-	-	44.8±0.6	43.0±0.6	43.4±0.8
ชุบแข็งสภาวะ 1	FC1	0.42	น้ำ	5.6	65.0±1.3	60.8±2.1	60.1±2.3
ชุบแข็งสภาวะ 2	FC2	0.42	น้ำเกลือ	5.6	64.8±0.9	63.0±1.2	62.9±0.9
ชุบแข็งสภาวะ 3	FC3	0.42	น้ำ	3.0	58.5±2.5	60.9±3.0	57.8±1.0
ชุบแข็งสภาวะ 4	FC4	0.42	น้ำเกลือ	3.0	57.7±4.6	59.3±4.3	63.5±1.7
ชุบแข็งสภาวะ 5	FC5	0.83	น้ำ	5.6	39.9±2.3	33.5±4.8	32.6±3.4
ชุบแข็งสภาวะ 6	FC6	0.83	น้ำเกลือ	5.6	40.0±0.7	38.0±3.0	40.2±2.0
ชุบแข็งสภาวะ 7	FC7	0.83	น้ำ	3.0	39.6±1.2	37.2±2.0	39.2±0.6
ชุบแข็งสภาวะ 8	FC8	0.83	น้ำเกลือ	3.0	41.0±1.5	32.1±3.4	38.3±3.3





รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งของชิ้นงานใบเลื่อยสายพานจากโรงงาน A B และ C ที่สภาวะการชุบแข็งต่างๆ

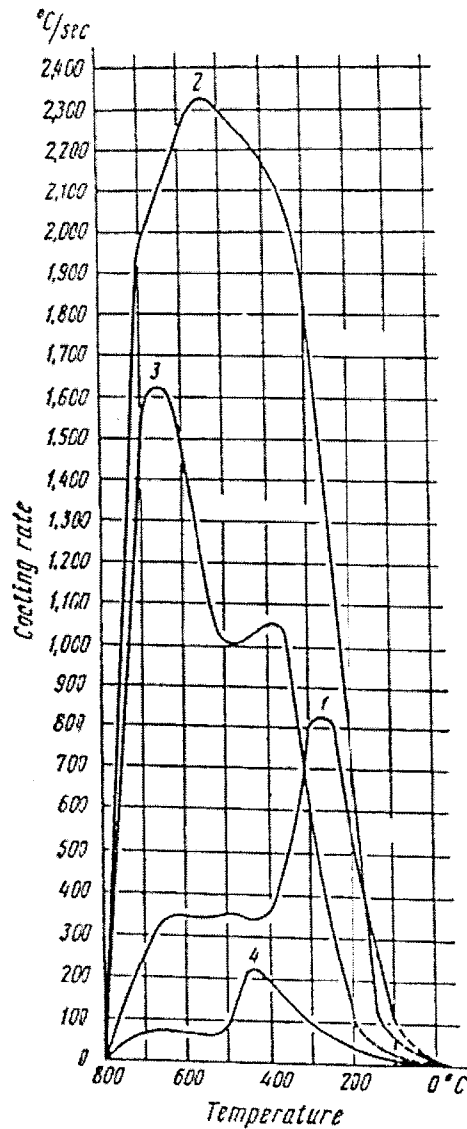
ผลจากค่าความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟที่สภาวะต่างๆ แสดงให้เห็นว่าตัวแปรความเร็วของชุดชุบแข็งเปลวไฟมีผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนโดยที่ความเร็ว 0.42 เซนติเมตรต่อวินาที ของสภาวะการทดลองที่ 1-4 ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนที่ความเร็ว 0.83 เซนติเมตรต่อวินาที ของสภาวะการทดลองที่ 5-8 ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง ซึ่งความเร็วของชุดทดลองหมายถึงตัวแปรอุณหภูมิที่ทำให้โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานกลายเป็นเฟสออสเทนไนต์ ที่ความเร็ว 0.42 เซนติเมตรต่อวินาที อุณหภูมิอยู่ในช่วง 775-885 องศาเซลเซียส ส่วนความเร็วชุดชุบแข็ง 0.83 เซนติเมตรต่อวินาที อุณหภูมิอยู่ในช่วง 600-657 องศาเซลเซียส

ชิ้นงานจากสภาวะการชุบแข็งจากสภาวะการทดลองที่ 1 ที่ระดับความเร็วชุดชุบแข็ง 0.42 เซนติเมตรต่อวินาที โดยใช้สารชุบน้ำ ที่ปริมาณการไหล 5.6 ลิตรต่อวินาที ผลปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเปราะแตกหักในขณะวัดความแข็งไม่สามารถใช้งานได้

ชิ้นงานจากสภาวะการชุบแข็งจากการสภาวะทดลองที่ 2 3 และ 4 ที่ระดับความเร็ว 0.42 เซนติเมตรต่อวินาที โดยใช้สารชุบน้ำเกลือ ที่ปริมาณการไหล 3.0 และ 5.6 ลิตรต่อนาที มีความแข็งเพิ่มขึ้นและไม่เปราะเหมือนกับชิ้นงานจากสภาวะการทดลองที่ 1

มนัส (2543) ได้กล่าวถึงสมบัติของสารชุบน้ำซึ่งมีอัตราการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมิ 400-200 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์เป็นเฟสมาร์เทนไซต์เกิดการขยายตัวของเฟสในขณะที่เปลี่ยนจากออสเทนไนต์ไปสู่มาร์เทนไซต์ อัตราการเย็นตัวของสารชุบน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.11 (1) การขยายเมื่อเกิดการเปลี่ยนเฟสนั้นขึ้นกับปริมาณคาร์บอนตามความสัมพันธ์  $4.64 - 0.53 \times (\%C)$  (ASM Handbook Vol.4, 1998)

สารชุบน้ำผสมน้ำเกลือ 10% มนัส (2543) ระบุว่าสมบัติในการถ่ายเทความร้อนดี และมีอัตราการเย็นตัวสูงถึง 2300 องศาเซลเซียส ช่วงการเย็นตัวสูงสุดอยู่ในช่วง 600-400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (2) ซึ่งไม่ได้อยู่ในช่วงของการเปลี่ยนเฟสลดความเสี่ยงจากความเค้นภายใน แต่มีความเสี่ยงต่อการชุบเหล็กกล้าคาร์บอนสูงเพราะอัตราการเย็นตัวในช่วง 400-200 องศาเซลเซียสยังสูง ซึ่งการแตกของชิ้นงานที่ใช้สารชุบน้ำทั้งการทดลองที่ 1 และ 3 ในขณะที่การใช้สารชุบน้ำเกลือไม่แตกสันนิษฐานได้จากอัตราการเย็นตัวช่วงเปลี่ยนเฟสที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.11 อัตราการเย็นตัวของสารชุบชนิดต่างๆ

ที่มา: มนัส (2543)

สำหรับชิ้นงานจากสภาวะการทดลองที่ 5 6 7 และ 8 ที่ระดับความเร็ว 0.83 เซนติเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งลดลงแสดงว่าอุณหภูมิชิ้นงาน (600-657 องศาเซลเซียส) ไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนโครงสร้างเหล็กกล้าใบเลื่อยให้กลายเป็นออสเทนไนต์ เมื่อชุบด้วยสารชุบทั้งน้ำและน้ำเกลือ ที่ปริมาณการไหล 3.0 และ 5.6 ลิตรต่อนาทีก็ไม่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ได้ โดย ASM Handbook Vol.4 (1998) ระบุถึงการทำให้เพอร์ไรต์ ซึ่งโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความเหนียว (toughness) ไม่เพียงพอต่อการใช้งานหลายๆ ด้าน ดังนั้นจึงมีการทำให้เพอร์ไรต์เหล็กกล้าโครงสร้างมาร์เทนซิติก โดยการให้ความร้อนที่ต่ำกว่าเส้น  $A_1$  เป็นการลดค่าความแข็งแรงเพื่อเพิ่ม

ความเหนียว โดยการลดปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในสภาวะอิมิตัวยิ่งยวด ด้วยเฟสที่มีเสถียรภาพมากกว่า โดยสามารถแบ่งเป็น

ขั้นตอนที่ 1 ช่วงอุณหภูมิ 20-100 องศาเซลเซียส เกิดการแพร่ช่วงสั้นของอะตอมคาร์บอนไปยังดิสโลเคชันและขอบเขตของมาร์เทนไซต์แบบแผ่น เกิดกลุ่มคาร์บอน (carbon cluster)

ขั้นตอนที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส พรีซิพิตเนชันเฟสคาร์ไบด์ โดยเฉพาะ  $\epsilon$  คาร์ไบด์ ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ )

ขั้นตอนที่ 3 ช่วงอุณหภูมิ 200-350 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของเฟสออสเทนไนต์ตกค้างกลายเป็นเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์

ขั้นตอนที่ 4 ช่วงอุณหภูมิ 250-700 องศาเซลเซียส เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ คาร์ไบด์กลม (spheroidized carbide) ในเมทริกซ์เกรนเฟอร์ไรต์ที่แกนเท่ากันของเหล็กกล้าที่ทำเทมเปอร์อย่างดี โดยการทำให้เทมเปอร์เป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

โดยในช่วงขั้นตอนที่ 1 ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ขั้นตอนที่ 2-4 เป็นขั้นตอนที่ทำให้ค่าความแข็งลดลง แสดงว่าอุณหภูมิที่เกิดจากความเร็ว 0.83 เซนติเมตรต่อวินาที ทำให้เกิดอุณหภูมิผิวสัมผัสสูงสุด 600-657 องศาเซลเซียสกลายเป็นการทำเทมเปอร์ไปเสีย

โดยสรุปจะเป็นได้ว่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือความเร็วชุบแข็ง ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิขึ้นงาน แต่สารชุบมีผลต่อการแตกโดยน้ำเกลือแสดงให้เห็นว่าสามารถลดการแตกของชิ้นงาน

### (3) การสึกหรอ

จากการนำตัวอย่างชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยของโรงงาน A B และ C มาทำการทดสอบการสึกหรอ โดยการทดสอบชิ้นงานใบเลื่อยตัวอย่างจากทั้ง 3 โรงงานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง มาทำการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบการสึกหรอกับชิ้นงานที่มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น (ชิ้นงานจากการทดลองที่ 3) และ ชิ้นงานตัวอย่างที่ค่าความแข็งไม่เพิ่มขึ้น (ชิ้นงานจากการทดลองที่ 7) ซึ่งผลการทดสอบการสึกหรอ พบว่าชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งจากโรงงาน A B และ C มีค่า 79.8 74.5 และ 77.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ใกล้เคียงกับชิ้นงานจากการชุบแข็งแล้วค่าความแข็งไม่เพิ่มขึ้น (การทดลองที่ 7) ที่มีค่าการสึกหรอของชิ้นงานจากโรงงาน A B และ C ที่ 71.6 74.1 และ 71.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งที่มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น (การทดลองที่ 7) พบว่าชิ้นงานจากทั้ง 3 โรงงานมีค่าการสึกหรอลดลงทั้ง A (32.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) B (30.67 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และ C (30.38 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) รายละเอียดแสดงดังในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการสึกหรอเหล็กไบเลื่อยก่อนและหลังการชุบแข็ง

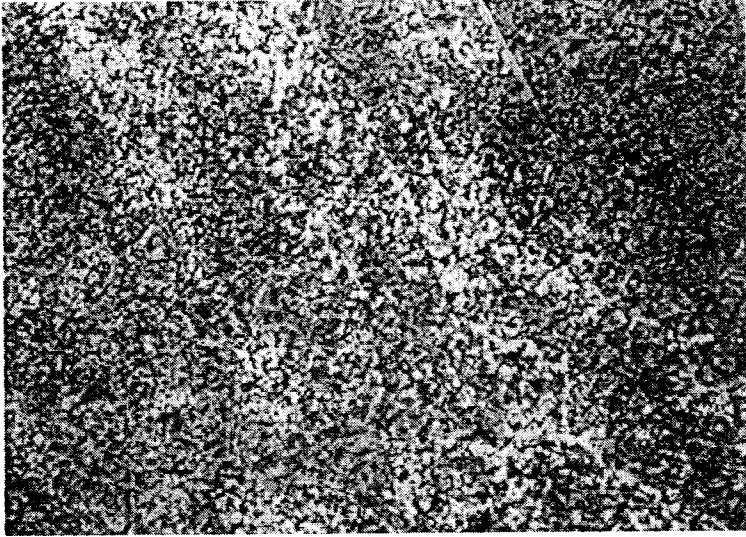
ชิ้นงาน	รหัส	ความเร็ว (cm/s)	สารชุบ	ปริมาณ (l/min)	การสึกหรอ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)		
					A	B	C
ก่อนการชุบแข็ง	AR	-	-	-	79.8±1.9	74.5±1.2	77.5±1.8
ชุบแข็งสภาวะ 3	FC3	0.42	น้ำ	3.0	32.5±10.3	30.7±0.4	30.4±0.5
ชุบแข็งสภาวะ 7	FC7	0.83	น้ำ	3.0	71.6±1.0	74.1±0.9	71.4±0.9

ผลการทดสอบการสึกหรอพบว่า ชิ้นงานโรงงาน A B และ C ก่อนการชุบแข็ง (AR) มีอัตราการสูญเสียร้อยละ 79.82 74.53 และ 77.50 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในกรณีที่สภาวะการชุบแข็งไม่เหมาะสมทำให้ค่าความแข็งชิ้นงานไม่ขึ้น เช่น ชิ้นงานตามสภาวะการทดลองที่ 7 (C-7) ปริมาณการสูญเสียมวลจากการทดสอบการสึกหรอใกล้เคียงกัน โดยชิ้นงานโรงงาน A B และ C มีค่าการสึกหรอ 71.60 74.13 และ 71.37 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในกรณีที่สภาวะการชุบแข็งไม่เหมาะสมทำให้ค่าความแข็งชิ้นงานไม่ขึ้น ส่วนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟที่เหมาะสม เช่น การทดลองที่ 3 (C-3) มีปริมาณการสูญเสียมวลระหว่างการทดสอบการสึกหรออย่างเห็นได้ชัด โดยชิ้นงานโรงงาน A B และ C มีปริมาณการสูญเสียมวล 32.51 30.68 และ 30.38 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟ ตามสภาวะการทดลองที่ 3 มีสมบัติในการต้านการสึกหรอที่ดีกว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟตามสภาวะการทดลองที่ 7

#### (4) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

##### (ก) ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็ง

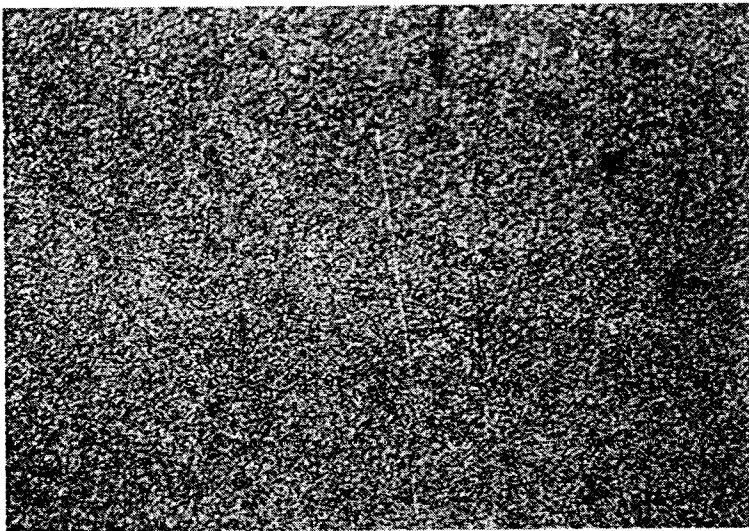
โดยทั่วไปโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมทางเคมีในช่วง 0.65-0.68 โครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ แต่เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างชิ้นงานพบว่า มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ ที่ประกอบด้วยอนุภาคซีเมนไตต์ขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่เฟอร์ไรต์ ที่มีลักษณะเกรนหรือแผ่น (plate) หรือรูปเข็ม ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเปลี่ยนมาร์เทนไซต์ (ไฟลีน, 2555) ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติที่ต้องการของเหล็กกล้าไบเลื่อยสายพานที่ต้องการสมบัติทนทานการงอตัวและคายตัวออกเมื่อวิ่งผ่านพูลเลย์ รายละเอียดดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง

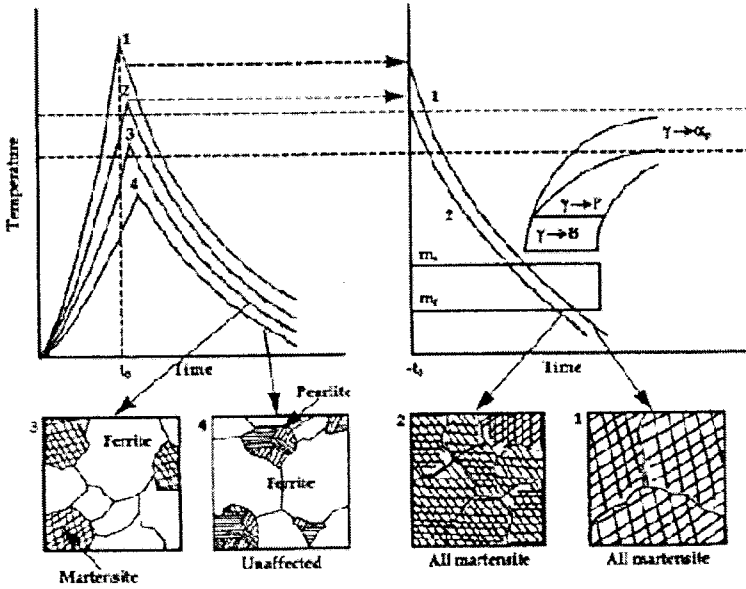
(ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ

ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของใบเลื่อยที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟจากการที่นำชิ้นงานตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจนทำให้โครงสร้างเดิมเปลี่ยนเป็นเฟสออสเทนไนต์และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว คือเมื่ออัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้ามีโครงสร้างเป็น ออสเทนไนต์สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต จะทำให้เหล็กออสเทนไนต์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นเหล็กที่เรียกว่า มาเทนไซต์ ซึ่งมีลักษณะสีขาวคล้ายกับเข็ม ดังรูปที่ 4.13

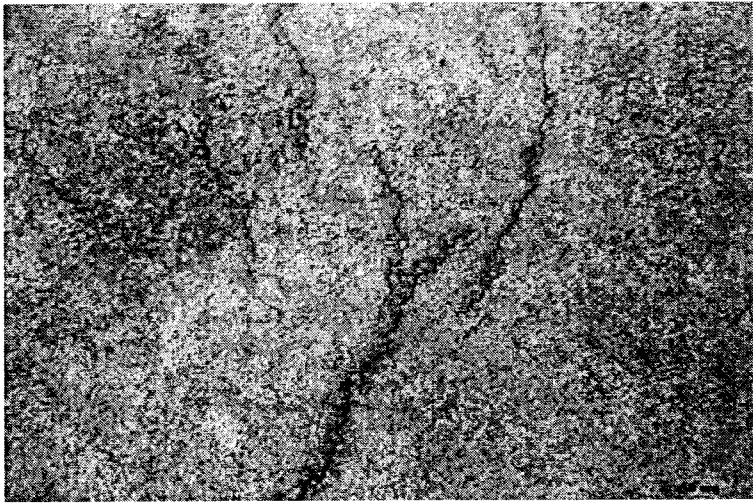


รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิออสเทนไนต์

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟที่อุณหภูมิสูงเหนือเส้น  $T_{(aust)}$  จะได้เป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่มีเกรนโตภายหลังการทำให้เหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจะได้เป็นมาร์เทนไซต์หยาบดังรูปที่ 4.14

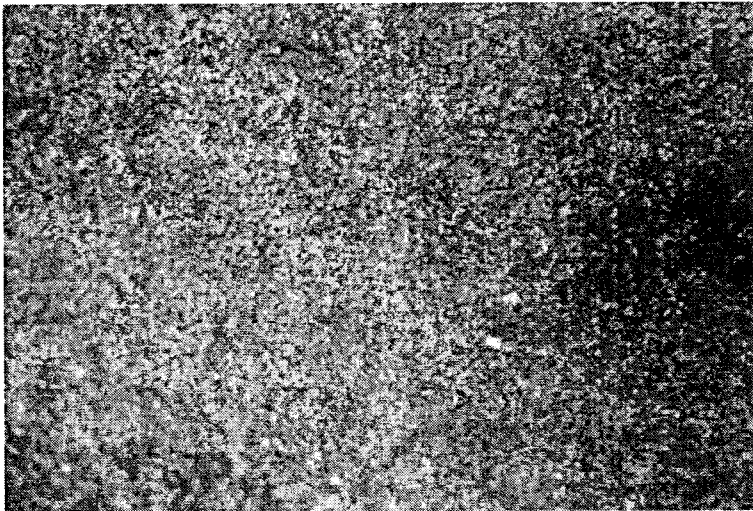


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอุณหภูมิของชิ้นงานที่เปลี่ยนโครงสร้างออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์  
ที่มา: Davis (2002)



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟชิ้นงานเกิดจากการแตกหัก

จากรูปที่ 4.15 ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกร้าวจากการชุบแข็งด้วยน้ำดังที่ได้กล่าวถึงความเค้นตกค้างไว้ในข้างต้น



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงลดลง

จากรูปที่ 4.16 อัตราการเย็นตัวเป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่ออสเทนไนต์ จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งจะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอ ซึ่งจะปรากฏค่าว่าอัตราการเย็นตัว



วิกฤติ (critical cooling rate) หมายถึงอัตราการเย็นตัวของวัสดุที่เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ ทำให้อัตราการเย็นตัวช้า ออสเทนไนท์จึงไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ แต่จะได้เป็นเฟิร์ลไลต์แทน

สำหรับโครงสร้างจุลภาคของใบเลื่อยใช้แล้วสันนิษฐานว่าเป็นใบเลื่อยที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและทำเทมเปอร์ดั่งในงานของ Nordstrom and Bergstrom (2001) นอกจากนี้ยังต้องผ่านกระบวนการเตรียมใบเลื่อยก่อนการใช้งาน โดยผ่านกระบวนการปรับเรียบ (leveling) นวดใบเลื่อย (tensioning) เพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานทำให้ยากต่อการระบุเฟสต่างๆ

ถึงแม้ว่าผลจากการวิจัยการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยด้วยเปลวไฟสามารถเพิ่มความแข็งและสามารถลดการสึกหรอได้ แต่ต้องมีการทดลองหาค่าความแข็งที่เหมาะสม เนื่องจากสมบัติด้านความเหนียวเป็นสมบัติที่สำคัญต่อการรับภาระงานไม่ให้เกิดการแตกหัก รวมทั้งอาจจะเกิดการกระทบกับตะปู ลูกปืน และที่ฝังในเนื้อไม้ (อำไพ, 2549) และควรดำเนินการชุบแข็งเฉพาะจุดที่รับภาระงานเท่านั้นเนื่องจากตัวใบเลื่อยต้องผ่านการงอตัวและคายตัวขณะวิ่งผ่านพูเลย์ ในขณะที่เดียวกับการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ การปรับตั้งเปลวไฟและการควบคุมอุณหภูมิจากเปลวไฟทำได้ยาก (Davis, 2002) ทำให้ควบคุมค่าความแข็ง และบริเวณที่เกิดผลกระทบทางความร้อน

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

5.1.1 ผลจากการศึกษาเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานพบว่า มีโครงสร้างเหมเปอร์มาเทนไซด์ มีความแข็งแรงในช่วง 43.0-44.8 HRC และค่าการสึกหรอในช่วง 74.5-79.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.2 ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานด้วยเปลวไฟแบบใช้คนควบคุมสามารถสรุปได้ว่า เหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานสามารถชุบแข็งได้ด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิออสเทนไนต์ และต้องไม่เกินอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเค้นระหว่างการเย็นตัวจนเกิดการแตกร้าวระหว่างการชุบ อุณหภูมิชุบแข็งที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความแข็งแรงและลดการสึกหรอ

5.1.3 ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานด้วยเปลวไฟใช้การระบบการควบคุมความเร็วสามารถสรุปได้ว่า

(1) ความเร็วชุดชุบแข็ง และสารชุบที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความแข็งแรง และลดอัตราการสึกหรอของชิ้นงานใบเลื่อยตัดหญ้า

(2) ความเร็วที่เหมาะสมของการเดินใบเลื่อยสามารถชุบแข็งฟันใบเลื่อยด้วยเปลวไฟ ค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นสามารถลดการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบได้

(3) ความเร็ว สารชุบ และอัตราการไหลสารชุบที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความแข็งแรงและลดอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าใบเลื่อยได้

(4) สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแปรรูปไม่ย่างพารา ความเร็วชุดชุบแข็ง 0.42 เซนติเมตรต่อนาที ใช้น้ำเป็นสารชุบที่ปริมาณ 3 ลิตรต่อนาที

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) การวัดอุณหภูมิผิวชุบแข็งต้องใช้เครื่องวัดอุณหภูมิที่มีช่วงการวัดครอบคลุมอุณหภูมิชุบแข็ง หรือวิธีการวัดอุณหภูมิชิ้นงานที่แม่นยำ เนื่องจากอุณหภูมิชิ้นงานมีผลต่อการดำเนินการสึกหรอ

(2) ควรออกแบบหัวเผา (burner) ที่ออกแบบเป็นการเฉพาะสามารถปรับช่วงได้ และลักษณะที่เหมาะสมกับการให้ความแข็งแรงเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการเพิ่มความแข็งแรง รวมทั้งระบบการฉีดสารชุบที่สามารถควบคุมทั้งอัตราการไหลที่แม่นยำ

(3) ควรออกแบบระบบการเดินใบเลื่อยให้เสถียรภาพในการเดินใบเลื่อยที่ความเร็วรอบต่ำ โดยเฉพาะมอเตอร์ที่มีทอร์คที่ความเร็วรอบต่ำๆ สูง

(4) ควรเปลี่ยนระบบการให้ความร้อนในการชุบแข็งที่สามารถควบคุมความแม่นยำเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการ เช่น การชุบแข็งด้วยขดลวดเหนียวน้ำ หรือ เลเซอร์ โดยต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านต้นทุนประกอบ

(5) ควรศึกษาค่าความแข็งที่เหมาะสมของฟันเลื่อยในการดูระหว่างค่าความแข็งที่สามารถลดการสึกหรอกับการปฏิบัติงานจริงที่ฟันใบเลื่อยอาจจะมีสิ่งการกระทบกับตาไม้ หรือเศษหินที่ฝังในเนื้อไม้

(6) ควรเพิ่มการทดสอบความเหนียวของใบเลื่อยสายพาน

## บรรณานุกรม

- เจียรศักดิ์ ชูชีพ และ นริศรา มหาธนิวงค์. 2559. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ การปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าใบตัดหญ้าสำหรับเครื่องตัดหญ้าสะพาย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ไพลิน ฤกษ์จิรสวัสดิ์. 2555. หลักการพื้นฐานของกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนัส สติรจินดา. 2543. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก (พิมพ์ครั้งที่ 7). กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- โยชิยุกิ ทั่นโน และคณะ. 2548. คำขอรับสิทธิบัตร เลขที่ 103793 สืบค้นออนไลน์ กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- วารุณี เปรมานนท์ และอรจิรา เต๋ยวณิชย์. 2554. งานขึ้นรูปโลหะเล่มที่ 2 วัสดุทำแม่พิมพ์และชิ้นงาน สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) กรุงเทพฯ.
- ศูนย์ข้อมูลยางพาราไทย(2555). การใช้ประโยชน์จากไม้ยางพารา (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.108wood.com/index.php?lay=show&ac=article&id=578804&Ntype=6> (21 ธันวาคม 2557)
- สรายุรัตน์ อัครการ และ โกวิท พลหาญ. 2552. การศึกษากระบวนการชุบแข็งมีดพริ้วด้วยแก๊สโครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สมาคมธุรกิจไม้ยางพาราไทย. 2558. สืบค้นจาก<http://www.thainr.com/th/index.php?detail=Statthai> (22 ธันวาคม 2558).
- สุธี วิสุทธิเทพกุล วรกิจ สุนทรบุระ ไพโรจน์ ศิริรัตน์ และสันต์ แสงกุล. 2546ก. โครงการปรับปรุงเทคนิคและประสิทธิภาพการใช้เลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพาราให้ได้ผลผลิตสูงขึ้น. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- สุธี วิสุทธิเทพกุล วรกิจ สุนทรบุระ ไพโรจน์ ศิริรัตน์ และสันต์ แสงกุล. 2546ข. การบำรุงรักษาใบเลื่อยสายพาน โครงการปรับปรุงเทคนิคและประสิทธิภาพการใช้เลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพาราให้ได้ผลผลิตสูงขึ้น. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- อำไพ เปี่ยมอรุณ. 2549. การแปรรูปไม้. ชุดความรู้ “การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ไม้”. กรุงเทพฯ : ศูนย์บริหารจัดการเทคโนโลยี, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- ASM International. 1997. ASM Handbook Volume 1 Properties and Selection : Irons Steels and High Performance Alloys. Ohio : ASM International.
- ASM International. 1998. ASM Handbook Volume 4 Heat Treating. Ohio : ASM International.
- ASTM International. 2002. ASTM A682 – 02 Standard Specification for Steel, Strip, High-Carbon, Cold-Rolled, General Requirements For.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Norstrom, J. and Bergstrom, J. 2001. Wear testing of saw teeth in timber cutting. *Wear* 250 (2001), 19-27.
- Davis, J.R. Editor. 2002. *Surface Hardening of Steels*. Ohio : ASM International.
- Ganeev, R.A. 2002. Low-power laser hardening of steels. *Journal of Materials Processing Technology* 121 (2002), 414-419.
- Gronegress, H.W. 1964. *Flame Hardening*. Gevelsberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- <http://www2.bot.or.th/statistics/ReportPage.aspx?reportID=597&language=th> (ออนไลน์) (สืบค้น 13 พ.ย. 2556)
- Lee, M.K., Kim, G.H., Kim, K.H., Kim, W.W. 2003. Control of surface hardnesses, hardening depths, and residual stresses of low carbon 12Cr steel by flame hardening. *Surface and Coatings technology* 184 (2004), 239-246.
- Macheske, R. I. 1993. US Patent No. 5,256,217.
- Suchanek, J. Kuklik, V. 2009. Influence of heat and thermochemical treatment on abrasion resistance of structural and tool steels, *Wear* 267 (2009) 2100-2108.
- [www.tpa-rubberwood.org/index.php?detail=listmember\\_2&membertype=1](http://www.tpa-rubberwood.org/index.php?detail=listmember_2&membertype=1) (ออนไลน์) (สืบค้น 27 พ.ค. 2556)

ภาคผนวก ก. บทความเสนอวารสารวิชาการ

## ผลของอุณหภูมิชุบแข็งเปลวไฟต่อสมบัติความแข็งและการสึกหรอของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน

### Effect of Flame Hardening Temperature on Hardness and Wear Properties of Band Saw Steel

เชิรศักดิ์ ชูชีพ<sup>1\*</sup>, นริศรา มหัทธนนิงวงศ์<sup>1</sup>, สมใจ จันทร์อุดม<sup>2</sup> และเจษฎา Wannasin<sup>3</sup>

Thiensak Chucheep<sup>1\*</sup>, Narissara Mahathaninwong<sup>1</sup>, Somjai Janudom<sup>2</sup>, and Jessada Wannasin<sup>3</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิชุบแข็งต่อสมบัติความแข็งและการสึกหรอของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแปรรูปไม้อย่างพาราควัยกรรมวิธีการชุบแข็งด้วยเปลวไฟแก๊สอะเซทิลีน-ออกซิเจน ที่อุณหภูมิผิวชิ้นงานสูงสุด 5 ระดับ 773 860 876 947 และ 984 องศาเซลเซียส และจุ่มน้ำ หลังชิ้นงานผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ นำชิ้นงานไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ตรวจสอบความแข็งชิ้นงานตำแหน่งต่างๆ และทดสอบการสึกหรอ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและทดสอบชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟพบว่าตำแหน่งที่อุณหภูมิผิวสูงสุดสูงกว่าอุณหภูมิออสเทนไนต์ โครงสร้างชิ้นงานเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นลดอัตราการสึกหรอ ชิ้นงานที่อุณหภูมิผิวสูงสุด 773 และ 860 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งใกล้เคียงกัน ส่วนการสึกหรอของชิ้นงานที่ได้รับจะสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิผิวสูงสุด 773 และ 860 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชิ้นงานชุบแข็งที่อุณหภูมิผิวสูงสุด 876 947 และ 984 องศาเซลเซียส จะเกิดรอยแตกหลังการชุบ

คำสำคัญ: การชุบแข็งเปลวไฟ เหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน ใบเลื่อยไม้อย่างพารา

#### Abstract

The objective of this work is to study the effect of quenching temperature on hardness and wear properties of rubber wood band saw steel by flame hardening. The flame hardening process use acetylene-oxygen gases. Samples were heated to five maximum surface temperatures of 773, 860, 876, 947 and 984 degree Celsius, and quenched in water. After flame hardening process, all samples were analyzed microstructure, hardness and wear resistance.

The results of microstructure, hardness and wear of the flame hardening samples showed that microstructures were transformed to martensite, hardness values increased and wear decreased at the maximum surface temperatures above an austenite temperature. At the maximum surface temperature of 773 and 860 degree Celsius, the sample hardness values were not different. Wear of as received sample was higher than that of flame hardening samples at maximum surface temperature of 773 and 860 degree Celsius. Samples were flamed at maximum surface temperature of 876, 947 and 984 degree Celsius leading to form cracks after quenching.

<sup>1</sup> อ.ดร., สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี 84000

<sup>2</sup> อ.ดร., ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สงขลา 90100

<sup>3</sup> รศ.ดร., ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สงขลา 90100

\*Corresponding author: e-mail: thiensak.c@psu.ac.th Tel./Fax. 084-0670766/077-355453

**Keywords:** Flame hardening, Band saw steel, Parawood band saw

## บทนำ

ใบเลื่อยแปรรูปไม้ยางพาราเป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมต้นน้ำในการแปรรูปไม้ท่อนเป็นไม้ขนาดต่างๆ ใบเลื่อยมีผลต่อคุณภาพผิว ค่าเผื่อ ความสูญเสียจากขนาดคล่องเลื่อย และอายุการใช้งาน [1] แต่อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราฯ ยังไม่ได้ให้ความสำคัญกับกระบวนการลับ บำรุงรักษา และตกแต่งใบเลื่อยเท่าที่ควร [2] ผลสำรวจของ สุธี วิสุทธิเทพกุล และคณะ [1] พบว่าใบเลื่อยที่นิยมใช้ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีขนาดความกว้าง 5-8 นิ้ว (12.7-20.32 ซม.) ความยาว 6.20-8.30 เมตร ความหนาใบเลื่อยเบอร์ 17-18 BWG. (1.47-1.24 มม.) โดยใช้การต่อใบเลื่อยเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีน อายุการใช้งานเฉลี่ย 3-7 ชั่วโมงต่อปี ส่วนใบเลื่อยที่ใช้ในภาคใต้มีความกว้าง 4-6 นิ้ว ความยาว 6.40-7.60 เมตร ความหนาใบเลื่อยเบอร์ 18 BWG (1.24 มม.) การต่อใบเลื่อยเชื่อมด้วยแก๊สและเชื่อมมิก (MIG) อายุการใช้งานของใบเลื่อย 2-4 ชั่วโมงต่อปี เกรดเหล็กที่นิยมนำมาใช้ทำใบเลื่อย คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) ตามมาตรฐาน AISI W 1-8 และ W 1-7 หรือตามมาตรฐาน JIS G4401 ชนิด SK 5 และ SK และ เหล็กกล้าผสม (Alloys Steel) ตามมาตรฐาน AISI 1-6 หรือตามมาตรฐาน JIS G4404 SKS 5 และ SKS 6 [3] โดยลักษณะการใช้งานใบเลื่อยจะใช้แปรรูปไม้ยางพาราจนกระทั่งเกิดการสึกหรอของคมฟันเลื่อยจนที่จะถูกถอดออกและส่งมายังห้องลับใบเลื่อย การสึกหรอของใบเลื่อยระหว่างการแปรรูปไม้ยางพาราส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานในการถอดและประกอบใบเลื่อยของอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราในประเทศไทยที่มีจำนวนถึง 580 โรงงาน [4] ดังนั้นการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอของใบเลื่อยจะช่วยยืดอายุการใช้งานของใบเลื่อย และส่งผลให้ลดการสูญเสียเวลาในการถอดประกอบใบเลื่อย

กรรมวิธีในการเพิ่มสมบัติด้านต้านการสึกหรอที่มีต้นทุนต่ำ คือ การชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟ ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิงกับออกซิเจนแก่ชิ้นงานช่วงเวลาสั้นๆ ก่อนที่จะจุ่มลงในน้ำ (Quenching) ทั้งนี้ชุดเชื่อมแก๊สอะเซทิลีน-ออกซิเจนเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา และพบว่า การชุบแข็งเปลวไฟนั้นเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอน 0.37-0.55% และเหล็กกล้าผสมบางเกรด เช่น 6150H [5] ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยสายพานและสามารถชุบแข็งได้ด้วยเปลวไฟ สำหรับกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟนั้นการควบคุมที่สำคัญ คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ผิวสัมผัสกับเปลวไฟ ( $T_s$ ) ต้องไม่สูงจนกระทั่งเกิดปัญหาหลอมละลาย และเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากโครงสร้างเดิม ไปเป็นเฟสออสเทนไนต์ และอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ [6,7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลอุณหภูมิผิวสูงสุด (Maximum Surface Temperature;  $T_{s,max}$ ) เพื่อเพิ่มสมบัติความแข็งและการสึกหรอของชิ้นงานเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานด้วยเปลวไฟแก๊สอะเซทิลีน-ออกซิเจน

## วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

### 1. วัสดุ

เหล็กกล้าใบเลื่อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กกล้าใบเลื่อยใช้แล้วที่ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผู้แปรรูปไม้ยางพารา โดยมีส่วนผสมทางเคมีจากการวิเคราะห์ด้วย Optical Emission Spectroscopy (OES) ซึ่งสามารถเทียบได้กับเหล็กกล้าผสมต่ำ 6150 [8] รายละเอียดดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของใบเลื่อยใช้แล้วและส่วนผสมของเหล็กกล้าผสมต่ำ 6150 [8]

ชิ้นงาน	C	Si	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Co	Al	Zn	Fe
BS	0.5157	0.2078	0.0124	0.8808	0.0715	0.9464	0.0287	0.1012	0.0388	0.0042	0.0061	0.0045	0.0035	Balance
6150[8]	0.48-	0.15-	0.040	0.70-	-	0.80-	-	0.15	-	-	-	-	-	-
	0.53	0.30		0.90		1.10		(min)						

## 2. กรรมวิธีการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ

### 2.1 อุณหภูมิและเวลาการชุบแข็ง

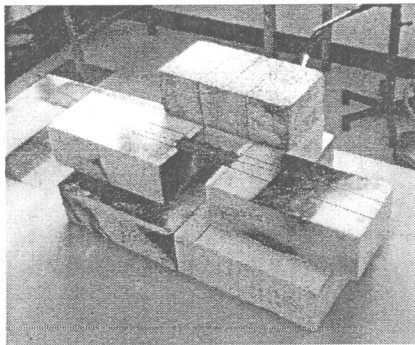
อุณหภูมิในการชุบแข็งพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมที่ปริมาณคาร์บอน 0.52% ได้อุณหภูมิออสเทนไนต์ ( $T_{\text{aust}}$ ) 760 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิเปลวไฟแก๊สอะเซทิลีน-ออกซิเจนสูงสุดถึง 3100 องศาเซลเซียส [9] ดังนั้นเพื่อป้องกันส่วนผิวที่สัมผัสเปลวไฟเกิดการหลอมละลาย จึงกำหนดอุณหภูมิในการเริ่มต้น ( $T_{\text{start}}$ ) ที่ 5 ระดับอุณหภูมิคือ 660 710 760 810 และ 860 องศาเซลเซียส และใช้การหมุนวนเปลวไฟเป็นเวลา 8 วินาที ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน เหล็กกล้าใบเลื่อย (ความยาว 10 เซนติเมตร) โดยวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลาง ชิ้นงานประมาณ 2 เซนติเมตร (ในแนวนอน) พร้อมทั้งบันทึกค่าอุณหภูมิผิวสูงสุด ( $T_{\text{s,max}}$ ) รายละเอียดดังตารางที่ 2 หลังจากนั้นนำชิ้นงานใบเลื่อยไปชุบในน้ำทั้งชิ้น

ตารางที่ 2 อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิผิวสูงสุด

$T_{\text{(start)}} (^{\circ}\text{C})$	660	710	760	810	860
$T_{\text{(s,max)}} (^{\circ}\text{C})$	773	860	876	947	984

### 2.2 การทดลอง

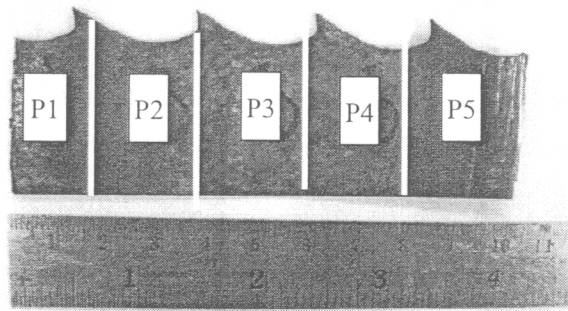
ใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจนโดยกำหนดความดันใช้งานที่ 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เท่ากัน และใช้เปลวกลาง (Neutral Flame) โดยจัดเครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การทดลอง

## 3. การวิเคราะห์และการทดสอบ

ชิ้นงานใบเลื่อยใช้แล้วขนาดความกว้าง 35.70 มิลลิเมตร ความสูงพื้น 6.0 มิลลิเมตร ความหนา 1.28 มิลลิเมตร ยาว 10 เซนติเมตร กำหนดตำแหน่งในการวิเคราะห์ จำนวน 5 ตำแหน่ง P1 P2 P3 P4 และ P5 รายละเอียดดังแสดงใน ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตำแหน่งการวิเคราะห์สมบัติชิ้นงาน

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคใบเลื่อยที่ผ่านการใช้งานที่ได้รับ (As Received) วัดค่าความแข็ง และทดสอบการสึกหรอ และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง วัดค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ และนำชิ้นงานในตำแหน่งที่มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นไปทดสอบการสึกหรอ

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) วัดค่าความแข็งในหน่วยร็อกเวลล์สเกลซี (HRC) และทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive) ที่ได้รับการพัฒนาขึ้น ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ตามรูปแบบการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องขัดอัตโนมัติ [10] ขนาดชิ้นงานทดสอบ 1.0x1.0 เซนติเมตร ใช้ความเร็วรอบจานขัดและหัวขัดจับชิ้นงาน 150 รอบต่อนาที น้ำหนักกดชิ้นงานขณะทดสอบ 19.6 – 20.0 นิวตัน ระยะเวลา 2 นาที และกระดาษทราย SiC P120 (ขนาดเม็ดสารขัด SiC 125 ไมโครเมตร) โดยคำนวณค่าการสึกหรอ (Wear) ตามสมการที่ (1)

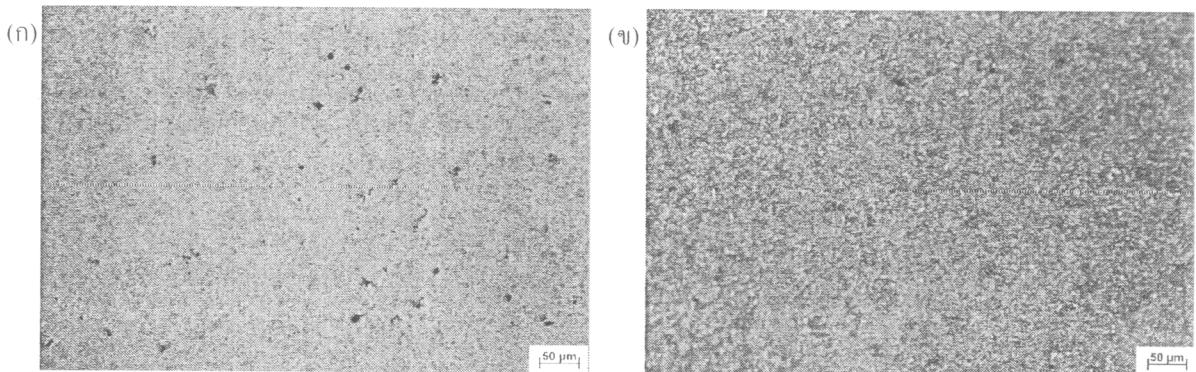
$$Wear = \frac{Weight\ Loss}{Contact\ Area} \frac{mg}{cm^2} \quad (1)$$

Weight Loss = ปริมาณการสูญเสียเนื้อชิ้นงานทดสอบ (mg)

Contact Area = พื้นที่ผิวสัมผัส ( $cm^2$ )

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 1. อธิพิผลของกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค



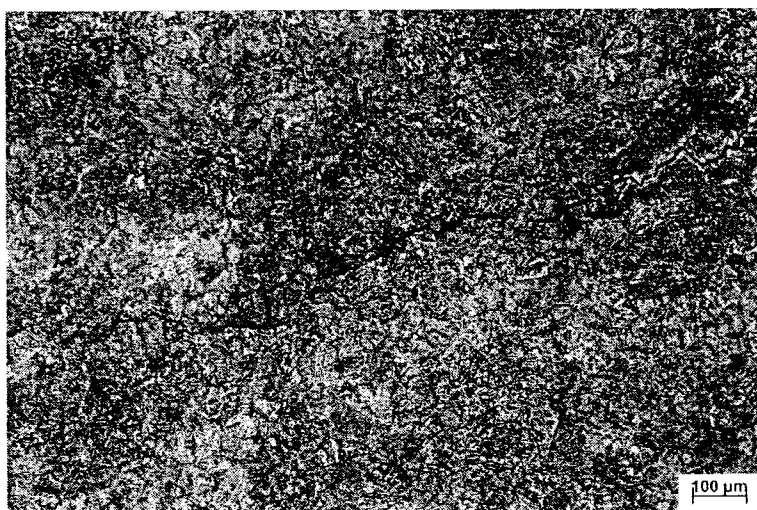
ภาพที่ 3 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าใบเลื่อยใช้แล้ว (ก) ก่อนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ (ข) หลังการชุบแข็งเปลวไฟที่อุณหภูมิ 773 องศาเซลเซียส (กัดผิวด้วยสารละลาย Nital 2%)

ในภาพที่ 3(ก) โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่ประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เป็นสีขาวและโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นสีดำ โครงสร้างละเอียด และผลจากการเติมธาตุเจือ Cr และ V ทำให้มีเฟสสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) กระจายตัว สอดคล้องกับ Li et al. [11] ที่ระบุโครงสร้างเหล็กกล้า 6150 ว่ามีโครงสร้างละเอียด (Fine Grain) และต้านทานการสึกหรอสูงจากการเติมธาตุเจือ Cr และ V

ส่วนภาพโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าใบเลื่อยที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟที่ตำแหน่ง P2 P3 และ P4 ซึ่งมีค่าความแข็งมากกว่า 50 HRC ประกอบโครงสร้างจุลภาคในภาพที่ 3(ข) ยืนยันได้ว่าเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ แสดงว่า ณ ตำแหน่งดังกล่าวอุณหภูมิผิวสูงสุด ( $T_{max}$ ) มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิออสเทนไนต์ 760 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์จากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำ

ในขณะที่ชิ้นงานในตำแหน่งที่ P1 และ P5 มีลักษณะโครงสร้างเหมือนเดิมแสดงว่า ณ ตำแหน่งดังกล่าวอุณหภูมิของชิ้นงานที่ได้รับจากเปลวไฟ ไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ ทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเหมือนเดิมหลังจากการเย็นตัวภายในน้ำ [9]

นอกจากนี้สำหรับอุณหภูมิผิวสูงสุด 876 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีลักษณะการแตกร้าวอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟที่อุณหภูมิผิวสูงสุด 876 องศาเซลเซียส

แสดงว่าที่อุณหภูมิชุบแข็งผิวสูงสุด 876 องศาเซลเซียส เมื่อชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดความเค้นเกินขีดจำกัดของเหล็กกล้าใบเลื่อยส่งผลให้เกิดการแตกร้าวโดยความเค้นที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ ความเค้นจากการหดตัวที่เป็นผลจากอุณหภูมิลดลง (Thermal Contraction) และความเค้นจากการขยายตัวในขณะที่เปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์ไปสู่มาร์เทนไซต์ ตามความสัมพันธ์  $4.64 - 0.53 \times (\%C)$  [12] จากปริมาณคาร์บอน 0.52% ส่งผลให้เกิดการขยายตัว 4.36% ซึ่งการแตกร้าว ณ อุณหภูมิสูงสุดดังกล่าวสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Davis [5] ที่ระบุว่า การชุบแข็งเหล็กกล้า 6150 สำหรับชิ้นงานที่บางมีความไวต่อการแตกร้าวขณะชุบสูง ส่วนความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในระหว่างการเย็นตัวอย่างรวดเร็วนั้น Lee et al. [13] ระบุว่าความเค้นที่เกิดจากการหดตัวของอุณหภูมิเป็นความเค้นแบบกด และความเค้นจากการเปลี่ยนเฟสเป็นความเค้นแบบดึง และสรุปถึงลักษณะความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานระหว่างการเย็น

ตัวอย่างรวดเร็วสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 12Cr หากอัตราการเย็นตัวสูงถึง  $\sim 10^3$  องศาเซลเซียสต่อวินาที ความเค้นตกค้างจะเปลี่ยนเป็นความเค้นแบบดึงทำให้ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอต่ำ และหากอัตราการเย็นตัวไม่  $< 10^3$  องศาเซลเซียสต่อวินาที ความเค้นตกค้างจะไม่เปลี่ยนจากความเค้นแบบกดเป็นความเค้นแบบดึง

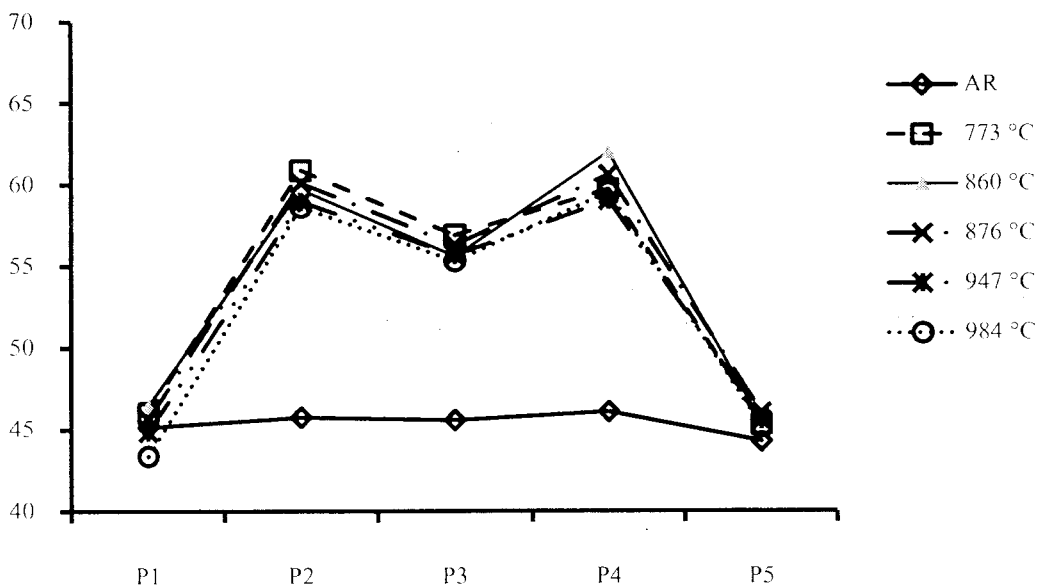
## 2. อิทธิพลทางความร้อนต่อค่าความแข็ง

การวัดค่าความแข็งของเหล็กกล้าไบเล็ยสายพานที่ผ่านการใช้งาน (AR) ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 45.1-46.1 HRC สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟที่อุณหภูมิผิวสูงสุด  $T_{(s,max)}$  773 860 876 947 และ 984 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเฉพาะตำแหน่ง P2 P3 และ P4 อยู่ในช่วง 55.3-62.0 HRC ค่าความแข็งสอดคล้องกับค่าความแข็งสำหรับการชุบด้วยน้ำของเหล็กกล้า 6150 ที่ Davis [5] ระบุอยู่ในช่วง 55-60 HRC

สาเหตุที่ค่าความแข็งแตกต่างกัน ASM International [8] ระบุว่าเกิดจากความแตกต่างของปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โดยโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนเป็นเฟสมาร์เทนไซต์มากกว่าจะมีค่าความแข็งมากกว่าสอดคล้องกับการอธิบายความแข็งลึกที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่ระยะลึกจากผิวอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณผิวทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลงตามความลึกของชิ้นงาน[13] แสดงว่าเป็นผลจากกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟที่มีความยากในการควบคุมกระบวนการให้สม่ำเสมอ [8]

โดยที่ตำแหน่ง P1 และ P5 ความแข็งไม่เปลี่ยน ค่าความแข็งดังกราฟในภาพที่ 5 ผลจากสภาวะการเย็นตัวเหมือนกันทุกตำแหน่งแสดงว่า ณ ตำแหน่งที่ P1 และ P5 อุณหภูมิของชิ้นงานไม่ถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ (760 องศาเซลเซียส) ส่วนตำแหน่ง P2 P3 และ P4 ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซต์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเฉพาะค่าความแข็งตำแหน่ง P2 และ P4 มีค่าความแข็งสูงกว่าตำแหน่ง P3 ซึ่งเป็นตำแหน่งบริเวณกลางชิ้นงานซึ่งได้รับความร้อนจากเปลวไฟสูงที่สุดทำให้เกิดเฟสออสเทนไนต์ขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่ P2 และ P4 เมื่อเกิดการเย็นตัวจากการจุ่มน้ำ (Quenching) ทำให้เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่หยาบกว่าตำแหน่ง P2 และ P3 สอดคล้องกับการอธิบายการเปลี่ยนเฟสของกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟโดย Davis [5]

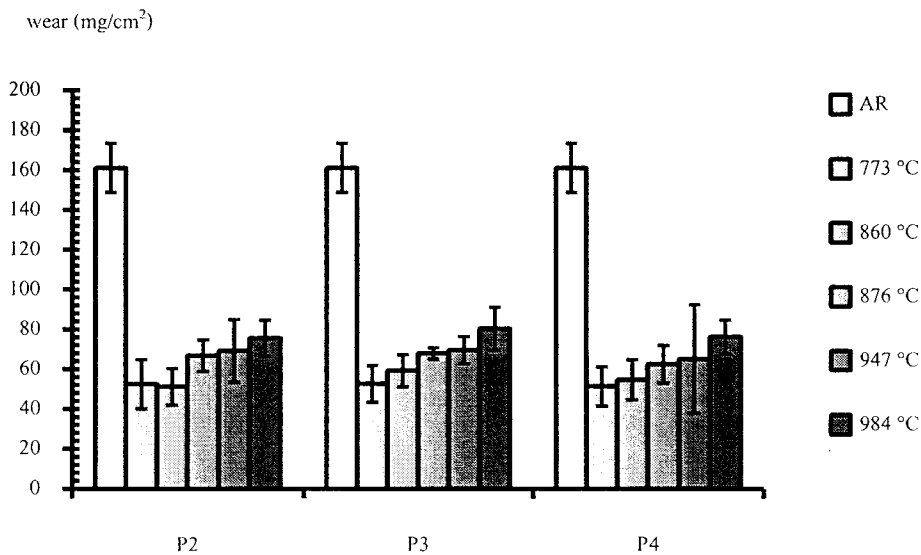
Hardness (HRC)



## ภาพที่ 5 ค่าความแข็ง

### 3. อิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนต่อการต้านทานการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานก่อนกระบวนการชุบแข็งพบว่าชิ้นงานตัวอย่างมีค่าการสึกหรอ 161 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนผลการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานที่อุณหภูมิชุบแข็งผิวสูงสุด 773 860 876 947 และ 984 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่ง P2 P3 และ P4 ที่มีความแข็งเพิ่มขึ้น ค่าการสึกหรอ 51-53 51-59 63-68 65-70 และ 76-80 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ รายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 6 โดยชิ้นงานที่อุณหภูมิชุบแข็งผิว 773 และ 860 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับตำแหน่ง P2 P3 และ P4 และค่าการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิชุบแข็งผิวมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิชุบแข็งผิวที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานสูง ทำให้เกิดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานเปลี่ยนจากความเค้นแบบกดเป็นความเค้นแบบดึงส่งผลให้สมบัติต้านทานการสึกหรอลดลง [13] ซึ่งปริมาณความเค้นตกค้างที่เกิดจากการเฟสมาร์เทนไซต์ตกภายในชิ้นงานทำให้ขาดสมบัติความเหนียวและแทบจะไม่มี การนำไปใช้งาน โดยไม่มีการทำเทมเปอร์ Li et. al. [11]



ภาพที่ 6 ค่าความต้านทานการสึกหรอ

### สรุปผลการวิจัย

ผลจากการการชุบแข็งเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพาราด้วยเปลวไฟแก๊สอะเซทิลีน-ออกซิเจน สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิผิวสูงสุดมีผลต่อการเพิ่มความแข็งและลดการสึกหรอของชิ้นงาน โดยอุณหภูมิผิวสูงสุดที่ 773 องศาเซลเซียส เพียงพอที่จะเพิ่มความแข็งและลดการสึกหรอ ในขณะที่อุณหภูมิผิวสูงสุด 876 947 และ 984 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นเกินขีดจำกัดทำให้เกิดการแตกร้าวหลังการชุบ ส่วนการสึกหรอของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งลดลง เนื่องจากเกิดเฟสมาร์เทนไซต์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง

### คำขอบคุณ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ SIT 580877S สัญญาเลขที่ SIT 5808695 ทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

ปีงบประมาณ 2559 และทุนอุดหนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทโครงการงานนักศึกษา จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี และสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ขอขอบขอบคุณนักศึกษาผู้ช่วยวิจัยระดับปริญญาตรี นายพุทธิพงษ์ เลอะชัยวรกุล นายกิตติพงษ์ มัญจรัรักษ์ นายพันธ์กานต์ ชมเชย นายคณัยกิตต์ ชุมหรัตน์ นายนนทศักดิ์ ชุมสวัสดิ์ และนายศักดิ์กรินทร์ คงศักดิ์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สุธี วิสุทธิเทพกุล วรกิจ สุนทรนุระ ไพโรจน์ ศิริรัตน์ และสันศักดิ์ แสงกุล. (2546). โครงการปรับปรุงเทคนิคและประสิทธิภาพการใช้เลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพาราให้ได้ผลผลิตสูงขึ้น. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [2] สุธี วิสุทธิเทพกุล วรกิจ สุนทรนุระ ไพโรจน์ ศิริรัตน์ และสันศักดิ์ แสงกุล. (2546). การบำรุงรักษาใบเลื่อยสายพานโครงการปรับปรุงเทคนิคและประสิทธิภาพการใช้เลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพาราให้ได้ผลผลิตสูงขึ้น. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [3] อำไพ เปี่ยมอรุณ. (2549). การแปรรูปไม้. ชุดความรู้ “การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ไม้”. กรุงเทพฯ : ศูนย์บริหารจัดการเทคโนโลยี, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [4] กรมการค้าต่างประเทศ. (2555). สถานการณ์ไม้ยางพาราแปรรูปของไทย. สืบค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2559, จาก <http://www.dft.go.th/Default.aspx?tabid=159&ctl=DetailUserContent&mid=660&contentID=4252>.
- [5] Davis, J.R. Editor. (2002). **Surface Hardening of Steels**. Ohio : ASM International.
- [6] มนต์ สติรจินดา. (2543). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก(พิมพ์ครั้งที่ 7). กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [7] ไพลิน ฤกษ์จิรสวัสดิ์. (2555). หลักการพื้นฐานของกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] ASM International. (1993). **ASM Handbook Volume 1 Properties and Selection : Irons Steels and High Performance Alloys**. Ohio : ASM International.
- [9] Gronergress, H.W. (1964). **Flame Hardening**. Gevelsberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- [10] ASM International. (2003). **ASM Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation**. Ohio : ASM International.
- [11] Li, Hong-Ying, Hu Ji-dong, Li Jun, Chen Guang, and Sun Xiong-jie. (2013). Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of AISI 6150 steel. **Journal Central South University**. 20, 866-870.
- [12] ASM International. (1990). **ASM Handbook Volume 4 Heat Treating**. Ohio : ASM International.
- [13] Lee, M.K., Kim, G.H., Kim, K.H., and Kim, W.W. (2004). Control of Surface Hardnesses, Hardening Depths, and Residual Stresses of Low Carbon 12Cr Steel by Flame Hardening. **Surface and Coatings Technology**. 184, 239-246.

ภาคผนวก ข. ข้อเสนอโครงการที่เสนอต่อแหล่งทุน



แบบข้อเสนอโครงการวิจัย

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

รหัสโครงการ.....

(สำหรับเจ้าหน้าที่)


1. ชื่อโครงการ (ไทย) ..... การออกแบบและพัฒนาเครื่องชุบแข็งใบเลื่อยแปรรูปไม้ยางพารา .....  
(อังกฤษ) ... Design and Development of Para-wood Band Saw Hardening  
Machine .....

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ (ไทย) ..... นายเธียรศักดิ์ ชูชีพ .....  
(อังกฤษ) .... Mr.Thiensak Chucheep .....

ตำแหน่ง ..... อาจารย์ .....

ที่ทำงาน ..... สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี .....

โทรศัพท์ ..... 084 067 0766 ... โทรสาร ... 077 355 453 .... e-mail ... thiensak.c@psu.ac.th ...

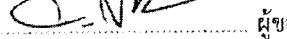
ลายมือชื่อ..... 

3. ชื่อหัวหน้าหน่วยงานสังกัด ..... รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญ นาคะสรรค์ .....

ตำแหน่ง ..... รองอธิการบดี วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี .....

หน่วยงาน ..... มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี .....

โทรศัพท์ ... 077 278 801 .... โทรสาร ... 077 355 041 .... e-mail ... charoen.na@psu.ac.th .....

ลายมือชื่อ ×  ผู้ขอรับทุน

(หัวหน้าหน่วยงาน)

4. ระยะเวลาของโครงการ ..... 2 ..... ปี ..... งบประมาณรวม ..... 991,850 ..... บาท

วันที่เสนอโครงการครั้งแรก ..... 22 กรกฎาคม 2559 .....

ครั้งที่ 1 (กรณีที่มีการปรับปรุง) .....

ครั้งที่ 2 (กรณีที่มีการปรับปรุง) .....

โครงการยื่นเสนอขอรับทุนจากหน่วยงานอื่น

ไม่  เสนอ ระบุหน่วยงาน .....

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)



5. คำเฉพาะสำหรับการค้นหา (key word) .....Band Saw, Hardening Machine .....

6. คณะผู้วิจัย/ผู้ร่วมโครงการ

6.1 ชื่อ (ชาย/นาง/นางสาว) ..... นริศรา มหาธนินวงศ์ .....

ตำแหน่ง ..... อาจารย์ ..... คุณวุฒิ ..... วศ.ด. (วิศวกรรมวัสดุ) .....

ความชำนาญ/ความสนใจพิเศษ ..... วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย .....

สถานที่ติดต่อ ..... สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี .....

โทรศัพท์/โทรสาร .... 081 787 8082 ... /... 077 355 453 .....

ความรับผิดชอบต่อโครงการที่เสนอ (ระบุส่วนงาน) ..... ทดลอง วิเคราะห์ผล และจัดบทความวิจัย .....

คิดเป็น ..... 30% .....

ความรับผิดชอบต่อโครงการอื่นๆ ซึ่งยังอยู่ระหว่างดำเนินการ (ถ้ามีโปรดระบุชื่อโครงการและแหล่งทุน  
สนับสนุน) ..... การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขีดสี่สำหรับใช้ร่วมกับเครื่องขีด  
ชิ้นงาน ..... ทุนวิจัยประเภททั่วไป ..... มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ .....

ลงชื่อ.....

(ดร.นริศรา มหาธนินวงศ์)

6.2 ชื่อ (นาย/นาง/นางสาว) ... สมใจ จันทร์อุดม .....

ตำแหน่ง ..... อาจารย์ ..... คุณวุฒิ ..... วศ.ด. (วิศวกรรมวัสดุ) .....

ความชำนาญ/ความสนใจพิเศษ ..... วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย.....

สถานที่ติดต่อ .... ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ .... คณะวิศวกรรมศาสตร์ ....  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ .....

โทรศัพท์/โทรสาร ..... 086 692 5479..... 074 558 834 .....

ความรับผิดชอบต่อโครงการที่เสนอ (ระบุส่วนงาน) .... ออกแบบและจัดทำชิ้นส่วน ออกแบบและจัดทำ  
ระบบควบคุม ประกอบเครื่อง.....

คิดเป็น ..... 20% .....

ความรับผิดชอบต่อโครงการอื่นๆ ซึ่งยังอยู่ระหว่างดำเนินการ (ถ้ามีโปรดระบุชื่อโครงการและแหล่งทุน  
สนับสนุน) .....การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขีดสี่สำหรับใช้ร่วมกับเครื่องขีด  
ชิ้นงาน ..... ทุนวิจัยประเภททั่วไป ..... มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ .....

ลงชื่อ.....

(สมใจ จันทร์อุดม)

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน)

## 7. วัตถุประสงค์

- (1) สร้างองค์ความรู้ด้านโลหะวิทยาเกี่ยวกับใบเลื่อยสายพาน
- (2) สร้างเครื่องชั่งใบเลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพารา

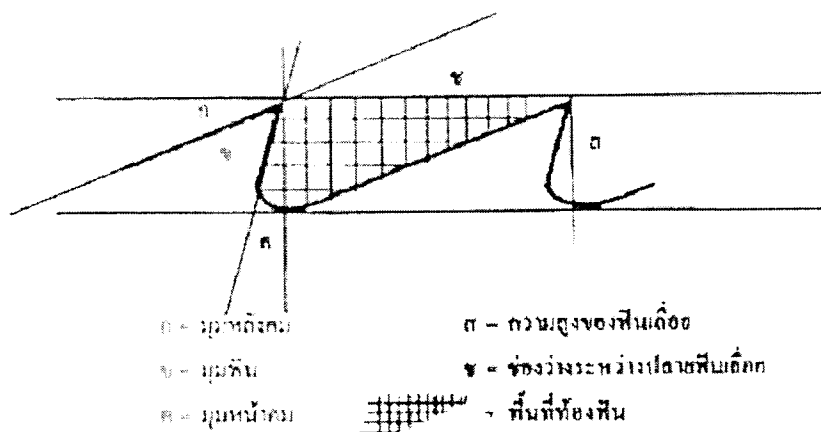
## 8. การพัฒนาเทคโนโลยี

- (1) เทคโนโลยีด้านวัสดุ ด้านการชุบแข็งเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยเพื่อลดการสึกหรอ ยืดอายุใบเลื่อย เพิ่มผลผลิต และลดการสูญเสียเวลาในการผลิตจากการถอดใบเลื่อยเก่า - ประกอบใบเลื่อยใหม่
- (2) เทคโนโลยีการออกแบบและสร้างเครื่องชั่งฟันใบเลื่อย โดยมีความง่าย และสะดวกต่อการทำงาน

## 9. หลักการ เหตุผลความจำเป็นและผลงานที่มีมาก่อน





การสึกหรอคมฟันเป็นปัจจัยหลักที่ส่งอายุการใช้งานใบเลื่อยแปรรูปไม้ยางพารา ส่งผลให้ต้องมีการถอดใบเลื่อย ลับ ตกแต่งใบเลื่อย และเปลี่ยนใบเลื่อยใหม่ ส่งผลต่อผลผลิตและต้นทุน แนวคิดในการยืดอายุการใช้งานใบเลื่อย เริ่มตั้งแต่ลักษณะการออกแบบฟันเลื่อย การเลือกใช้วัสดุ และการเพิ่มสมบัติความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธีการต่างๆ

ใบเลื่อยแปรรูปไม้ยางพารามีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ มุมของฟัน ขนาดฟัน ระยะระหว่างฟัน และพื้นที่ท้องฟัน รายละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยลักษณะการออกแบบฟันเลื่อยแบบ N-shape O-shape S-shape และ SB-shape แสดงรายละเอียดการออกแบบดังตารางที่ 1 (สุธี และ คณะ, 2546ก)



รูปที่ 1 ใบเลื่อยแปรรูปไม้ยางพารา  
ที่มา: สุธี และคณะ (2546ก)

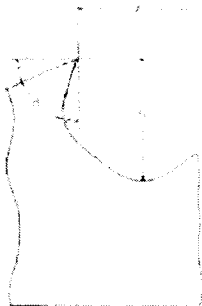
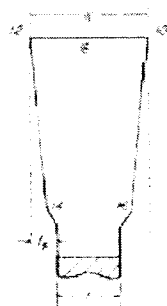
ตารางที่ 1 การออกแบบใบเลื่อย

ที่	ลักษณะการออกแบบ	รายละเอียด
1		(1) N-shape ใช้กับใบเลื่อยสายพานหน้าแคบความกว้างไม่เกิน 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) (2) เหมาะกับการแปรรูปไม้เนื้อแข็ง พื้นที่ต้องฟันน้อย
2		(1) O shape มีฐานฟันแบบเรียบและพื้นที่ท้องฟันใหญ่เหมาะสำหรับการแปรรูปไม้ประเภทใบแหลมหรือไม้จำพวกสน (2) ฐานฟันเรียบช่วยลดการแตกหักของฐานฟัน
3		(1) S-shape เหมาะสำหรับใช้กับใบเลื่อยสายพานหน้ากว้างแบบบีบปลายฟัน (swaged tooth) ด้านหลังฟันเลื่อยโค้งลดการเสียดสีในการแปรรูป
4		(1) SB-shape เหมาะสำหรับการแปรรูปไม้ที่มีความแข็งมากๆ ฟันมีความแข็งแรง และระบายชีเลื่อยออกได้รวดเร็วไม่สะสมอยู่ภายในฟันเลื่อย (2) ความสูงของฟัน (gullet depth) ประมาณ 30% ของระยะห่างปลายฟันเลื่อย (pitch)

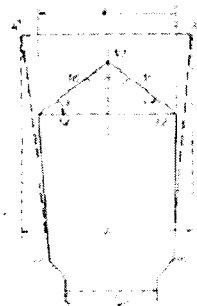
ที่มา: สุธี และคณะ (2546ก)

สำหรับการออกแบบและการผลิตใบเลื่อยมีสิทธิบัตรของประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่กรรมวิธีการผลิตตามสิทธิบัตร US patent หมายเลข USRE 26,676 Method of making band saw blade ปี ค.ศ. 1969 และสิทธิบัตรการออกแบบฟันใบเลื่อยที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบเดิม US patent หมายเลข 4,688,458 Bandsaw blades for milling timber ปี ค.ศ. 1987 ลักษณะคมฟันดังในรูปที่ 2

(ก)



(ข)



รูปที่ 2 การออกแบบฟันเลื่อย (ก) แบบเดิม (ข) แบบใหม่ที่เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน

ที่มา: US Patent 4,688,458

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน)

สำหรับใบเลื่อยที่ใช้ในการแปรรูปไม้ยางพาราในประเทศไทย สูซี่ และ คมละ (2546) ศึกษาลักษณะ ขนาด รูปแบบ พฤติกรรม การใช้งาน ของโรงเลื่อยแปรรูปไม้ยางพาราของโรงงานแปรรูปไม้ตั้งในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ สามารถสรุปรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะ และพฤติกรรมการใช้ใบเลื่อยแปรรูปไม้ยางพาราของโรงงานแปรรูปภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้

ที่	ลักษณะ/พฤติกรรมการใช้	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	ภาคใต้
1	ความกว้าง	5-8 นิ้ว	4 - 6 นิ้ว
2	ความยาวต่อนิ้ว	6.20 - 8.30 เมตรต่อนิ้ว	6.40 - 7.60 เมตรต่อนิ้ว
3	ความหนา	1.47 - 1.24 มิลลิเมตร (17 - 18 BWG)	1.24 มิลลิเมตร (เบอร์ 18 BWG)
4	การต่อใบเลื่อย	อะเซทิลีน	การเชื่อมแก๊สและเชื่อมมิก
5	อายุการใช้งานใบเลื่อย	3 - 7 ชั่วโมงต่อนิ้ว	2 - 4 ชั่วโมงต่อนิ้ว
6	ลักษณะใบเลื่อย	แบบหลังฟันตรง ท้องฟันเป็นมุมแหลมตัน	แบบหลังฟันตรง ท้องฟันเป็นมุมแหลมตัน
7	ระยะห่างระหว่างฟัน	1 3/8 - 1 5/8 นิ้ว	1 3/8 - 1 1/2 นิ้ว
8	ความสูงของฟัน	3/8 - 5/16	3/8 - 7/16 นิ้ว
9	พื้นที่ท้องฟัน	0.24 - 0.46 ตารางนิ้ว	0.29 - 0.35 ตารางนิ้ว
10	ขนาดคลองเลื่อย	2.44 - 2.65 มิลลิเมตร	2.50 - 2.93 มิลลิเมตร
11	ความเร็วใบเลื่อย	1,272 - 1,821 เมตร/นาที	1,328 - 2,157 เมตรต่อนาที
12	ขนาดชั้นซี่เลื่อย	0.25 - 1.2 มิลลิเมตร	0.25 - 1.20 มิลลิเมตร
13	มุมหน้าคม	15 - 26 องศา	20 - 28 องศา
14	มุมฟัน	44 - 61 องศา	39 - 52 องศา
15	มุมหลังคม	13-21 องศา	17 - 25 องศา

สำหรับวัสดุที่ใช้ทำใบเลื่อยเป็นหลักกล้า โดย สูซี่ และคมละ (2564) อ้างถึง Ed M. Williston ระบุเกรดเหล็กกล้าสำหรับใบเลื่อยสายพานที่มีความหนามากกว่า 0.04 นิ้ว (1.00 มิลลิเมตร 19 BWG) ดังตารางที่ 3 แถวที่ 1 ส่วนอ้าไฟ (2549) ระบุเหล็กกล้าที่นิยมนำมาใช้ทำใบเลื่อยมากที่สุดประกอบด้วย 2 กลุ่มคือเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel) และ เหล็กกล้าผสม (alloy steel) โดยเหล็กกล้าคาร์บอนมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.75% ระบุตามมาตรฐาน AISI W-8 และ W-7 หรือตามมาตรฐาน JIS 4401 เกรด SK5 และ SK สำหรับเหล็กกล้าผสมมีปริมาณคาร์บอน 0.75 - 1.0% ตามมาตรฐาน AISI I-6 และ I-7 หรือตามมาตรฐาน JIS G4404 (SKS5 และ SKS51) รายละเอียดดังตารางที่ 3 แถวที่ 2 และ 3 โดยวารุณี และ อรจิรา (2554) ได้ระบุปริมาณส่วนผสมของเหล็กกล้าเกรดต่างๆ ดังตารางที่ 3 แถวที่ 2 - 6 สำหรับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยของ Uddeholmstrip Co., Ltd. ได้ระบุส่วนผสมของเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อยตามเกรดทางการค้า 2 เกรด คือ UHB 15LM (ความหนา 0.50 - 1.10 มิลลิเมตร) และ UHB N15L 20 (ความหนา 1.20 - 3.05 มิลลิเมตร) รูปประกอบการประชาสัมพันธ์ของเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อย ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเกรดเหล็กกล้าของ Uddeholmstrip Co., Ltd. เป็นเกรดเดียวกับงานวิจัยของ Nordstrom and Bergstrom (2001) ในงานวิจัย Wear testing of saw teeth in timber cutting

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน)

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อย

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Cu	พิกัด
0.75	0.20	0.35	0.03	0.020	2.0						Ed M. Williston
0.80 - 0.90	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	≤0.25					≤0.030	JIS G4401 SK5
0.80 - 0.90	0.10 - 0.40	0.10 - 0.40	≤0.030	≤0.030	≤0.20	≤0.15	≤0.20	≤0.15	≤0.10	≤0.20	ASTM A682 W1A.8
0.70 - 0.90	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030		≤0.030					JIS G4401 SK6
0.75 - 0.85	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	0.70 - 1.30	0.20 - 0.50				≤0.25	JIS G4404 SKS6
0.75 - 0.85	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	1.30 - 2.00	0.50					JIS G4404 SKS51
0.75											uddeholm strip saw steel
0.75					2.0						uddeholm strip saw steel
0.6450	0.1942	0.6991		0.0036	0.0126	0.1031				0.0095	โรงงาน A เยียร์คักดี และ คณะ (2559)
0.6754	0.2617	0.9654		0.0056	0.0169	0.0437	0.0074		0.0033	0.0341	โรงงาน B เยียร์คักดี และ คณะ (2559)
0.6677	0.1997	0.3747		0.0085	1.8159	0.0122				0.0055	โรงงาน C เยียร์คักดี และ คณะ (2559)

อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าใบเลื่อยไม่ยางพาราของ เยียร์คักดี และ คณะ (2559) พบว่ามีปริมาณส่วนผสมทางเคมีอยู่เกรดเหล็กกล้าคาร์บอน 0.65 – 0.68 โดยตัวอย่างจาก โรงงาน A และ B สามารถเทียบเกรดจากส่วนผสมทางเคมีจากมาตรฐาน ASTM A682 เป็นเกรดเหล็กกล้า คาร์บอน 1065 ส่วนตัวอย่างใบเลื่อยสายพานจากโรงงาน C ที่มีปริมาณนิเกิล 1.82 สูงเกินกว่าปริมาณที่ระบุไว้ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.30 รายละเอียดปริมาณส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างทั้ง 3 โรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 3 แถวที่ 8 – 10

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน)

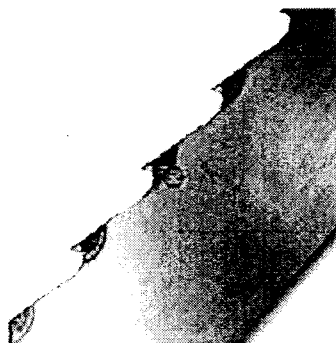


รูปที่ 3 เหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อย

ที่มา: <http://www.uddeholmstrip.com>

สำหรับเทคโนโลยีการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ การเพิ่มความแข็งเพื่อยืดอายุการใช้งาน อាំไฟ (2549) ได้กล่าวถึงการชุบแข็งปลายฟัน (tooth point hardening) จะทำให้สามารถใช้เลื่อยไม้ได้นานขึ้น โดยอาจใช้การชุบแข็งด้วยคลื่นความถี่สูง (high frequency hardening) หรือการชุบแข็งโดยการเหนี่ยวนำ (inductive hardening) ซึ่งอาจจะทำภายหลังการบีบ (บาน) ฟันเย็น (cold swaging) หรือทำการชุบแข็งพร้อมการบีบ (บาน) ฟันร้อน (hot swaging) การชุบแข็งจะทำให้ปลายมีความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ส่วนตำแหน่งล่างจากฟันจะเกิดก่อนอ่อนตัวจากผลทางความร้อนจากการคืนไฟ (temper) หากชุบแข็งเกินส่วนที่ต้องการจะทำให้การลับและการบีบฟันยากในภายหลัง แต่หากน้อยเกินไปจะสึกหรอเร็ว โดยมีสิทธิบัตรการชุบแข็งด้านการชุบแข็งใบเลื่อย US patent หมายเลข 1,852,140 Tempered Blade ปี ค.ศ. 1919 การประดิษฐ์เครื่องที่สามารถถอดคืนไฟใบคมตัด เช่น ใบเลื่อยให้สม่ำเสมอ และมีสิทธิบัตร US patent หมายเลข 2,829,684 Saw blade with hardened teeth ปี ค.ศ. 1958 การออกแบบฟันเลื่อยให้ง่ายต่อกระบวนการชุบแข็ง

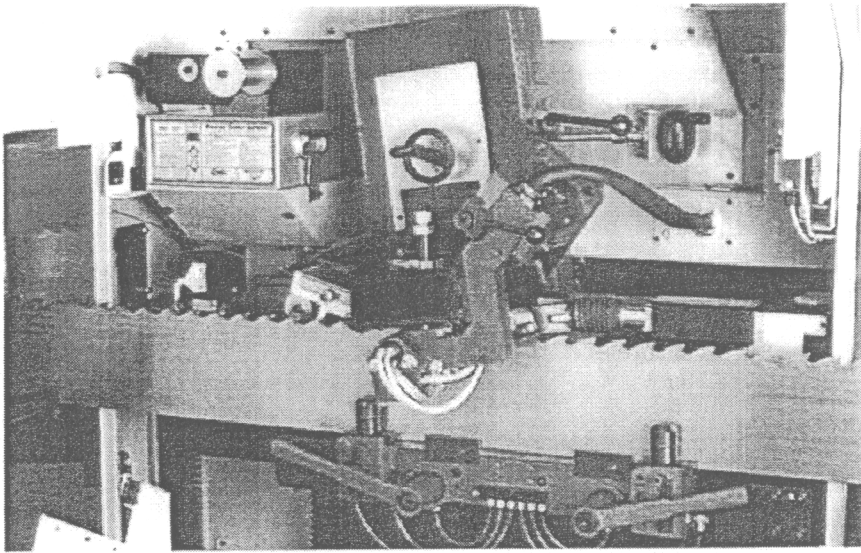
ส่วนเทคโนโลยีทางเลือกที่มีใช้ปัจจุบัน เช่น การเพิ่มความต้านทานการสึกหรอโดยการชุบแข็งด้วยวัสดุดีบุก ฟันเลื่อย เช่น สเตลโลด์ เป็นโลหะผสมโคบอลต์ (Co-Cr) ดังเช่นการโฆษณาขายสินค้าใบเลื่อยที่มีดีบุกดีเทลโลด์ที่ฟันของ <http://scosarg.com> ดังแสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ในปัจจุบันมีผู้ผลิตเครื่องจักรสำหรับการดีเทลโลด์กับปลายฟันเลื่อย ดังเช่น การโฆษณาขายเครื่องจักรดีเทลโลด์ ของ Vollmer ดังในรูปที่ 5



รูปที่ 4 การโฆษณาขายใบเลื่อยสายพานบานฟันที่ใช้สเตลโลด์

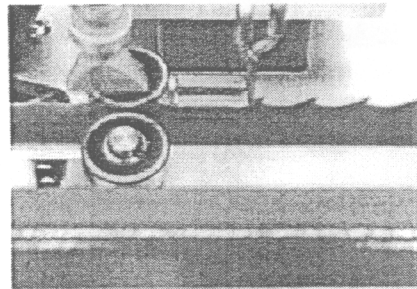
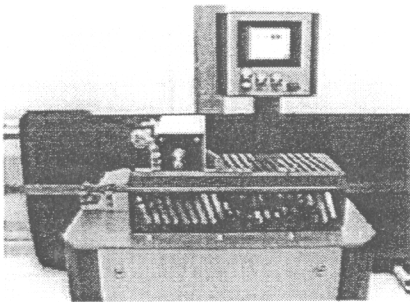
ที่มา: <http://scosarg.com>

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน)

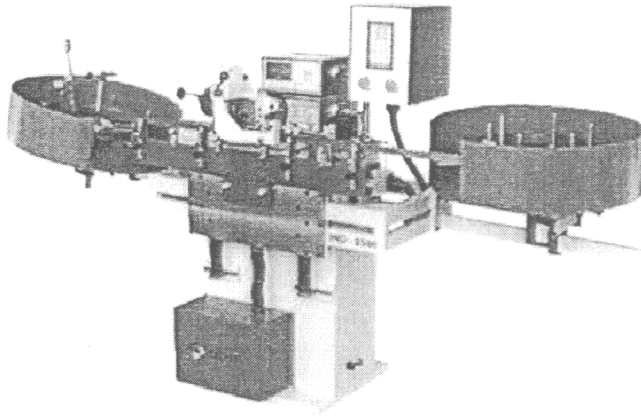


รูปที่ 5 เครื่อง GPA 200 - CNC Machine for automatic satellite tipping for band saw blades  
ที่มา: [www.vollmer-group.com](http://www.vollmer-group.com)

นอกจากนี้ยังมีบริษัทที่ผลิตเครื่องชุบแข็งฟันเลื่อยที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์ เช่น ของ Daventech ในประเทศสวีเดน ดังแสดงในรูปที่ 6 และ Mecoval ในประเทศสเปน ดังแสดงในรูปที่ 7 เป็นต้น

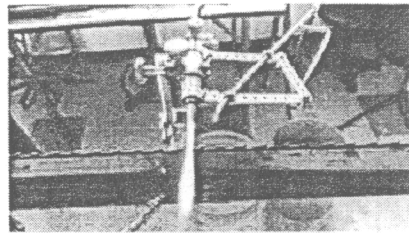
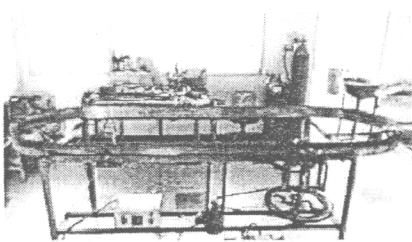


รูปที่ 6 BHM 220 – Band saw hardening machine  
ที่มา: [https://www.youtube.com/watch?v=v7DZoB\\_y-b4](https://www.youtube.com/watch?v=v7DZoB_y-b4)



รูปที่ 7 IND 3500 – Band saw tooth tip hardening machine  
ที่มา: <http://www.mecoval.com/>

โดยคณะผู้วิจัยได้ศึกษาถึงการชุบแข็งเปลวไฟใบเลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพารา โดยการสร้างชุดชุบแข็งดังรูปที่ 8 และ การชุบแข็งตำแหน่งที่ฟันดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งสามารถลดปริมาณการสึกหรอภายหลังการชุบแข็งลงได้

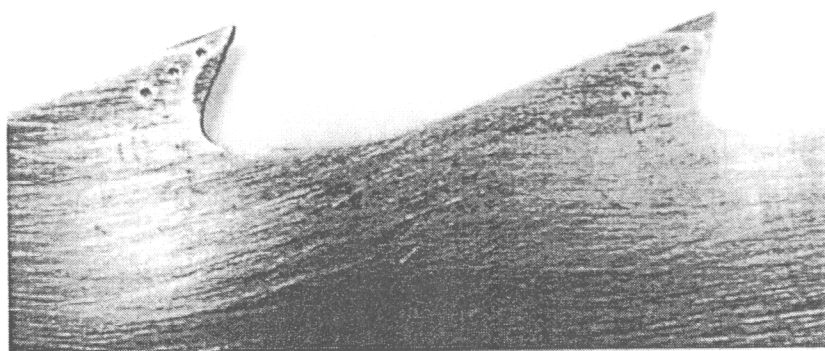


รูปที่ 8 การชุบแข็งฟันใบเลื่อย  
ที่มา: เขียรศักดิ์ และคณะ (2559)

แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้การควบคุมปลายเปลวไฟเฉพาะจุดตำแหน่งฟันควบคุมได้ยาก รวมทั้งเปลวไฟแก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีนที่สูงทำให้ยากต่อการควบคุมปริมาณความร้อนที่ให้กับใบเลื่อย

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน)





รูปที่ 9 การชุบแข็งฟันใบเลื่อย  
ที่มา: เรียร์คัทตี้ และคณะ (2559)

โดยจากผลการสำรวจของ สุธิ และคณะ (2546ข) พบว่าแต่ละโรงงานจะมีห้องลับและตกแต่งใบเลื่อย ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้ลับและตกแต่งใบเลื่อย คือ เครื่องเจียรนัยคมเลื่อย เครื่องรีด เครื่องนวด เครื่องบีบฟันและคบข้าง นอกจากนี้ ทั้ง สุธิ และคณะ (2546ข) และ อำไพ (2549) ระบุว่าช่างตกแต่งใบเลื่อย (saw doctor) ใช้ประสบการณ์การทำงานโดยการขาดความรู้เกี่ยวกับใบเลื่อยและการบำรุงรักษา ดังนั้นโครงการนี้ การศึกษามุ่งศึกษาในเชิงโลหะวิทยา การออกแบบและสร้างเครื่องชุบโดยใช้การเหนี่ยวนำสำหรับใบเลื่อยสายพาน โดยการสร้างองค์ความรู้ด้านโลหะวิทยาเกี่ยวกับใบเลื่อยสายพานและการสร้างเครื่องไม่ซับซ้อนเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับเครื่องเจียรนัยคมเลื่อยที่โรงงานมีอยู่และมีขั้นตอนในการชุบแข็งที่ไม่ยุ่งยาก เพื่อยืดอายุการใช้งานใบเลื่อยให้นานขึ้น ส่งผลให้ช่วยเพิ่มผลผลิตและความสามารถในการแข่งขันให้กับโรงงาน

## 10. วิธีดำเนินการวิจัย และแผนการดำเนินงานวิจัย

### 10.1 วิธีดำเนินการวิจัย (ระบุขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินการวิจัย ให้ชัดเจน)

#### (1) ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับใบเลื่อยปัจจุบัน

- การบำรุงรักษาใบเลื่อย การลับ การบีบฟัน การรีด และการเชื่อมต่อ
- ลักษณะของใบเลื่อย ขนาดต่างๆ และลักษณะของฟัน
- การศึกษาเกี่ยวกับเหล็กกล้าที่ใช้ทำใบเลื่อย ชื่อตัวอย่าง วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี และเทียบเกรดเหล็กกล้า
- วัดค่าความแข็ง ทดสอบการสึกหรอ และ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
- กำหนดระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็ง

#### (2) ออกแบบ ทดลอง และ ปรับปรุงชุดเดินใบเลื่อย

- เปลี่ยนมอเตอร์ ระบบส่งกำลัง
- เปลี่ยนระบบส่งกำลัง
- สั่งซื้ออุปกรณ์ และ จัดทำชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

- การซื้อ จัดทำ และรวบรวมชิ้นส่วน
  - ทดลองและปรับปรุงการควบคุมความเร็วชุดเดินใบเลื่อยตาม
- (3) ออกแบบเครื่องซบแข็งเหนียวน้ำ ชดลวด และระบบควบคุม
- ศึกษาระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการซบแข็ง ตามข้อมูลเกรดเหล็กกล้าและลักษณะพื้น
  - ออกแบบโครงสร้าง และสั่งทำชิ้นส่วนต่างๆ
  - ออกแบบชดลวดที่ใช้ และสั่งทำ
  - เลือกระบบควบคุมชดลวดเหนียวน้ำ และสั่งซื้อ
  - เลือกตำแหน่งวัดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิ้ลที่เหมาะสม และสั่งซื้อ
  - เลือกระบบสารซบ ออกแบบระบบจ่ายสารซบ สั่งซื้อบ่มลอมและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
- (4) ประกอบ ทดลอง ปรับปรุง และติดตั้งเครื่องซบแข็งเหนียวน้ำทำงานร่วมกับชุดเดินใบเลื่อยสายพาน
- ประกอบตัวเครื่อง
  - ประกอบชุดควบคุม
  - ทดลองเดินเครื่อง
  - ทดลองเครื่องซบแข็งเหนียวน้ำร่วมกับชุดเดินใบเลื่อย
  - ศึกษาค่าพารามิเตอร์ในการปรับตั้งเครื่องซบแข็งเหนียวน้ำที่ความเร็วการเดินใบเลื่อยต่างๆ
  - วัดค่าความแข็ง ทดสอบการสึกหรอ และ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
- (5) การทดลองซบแข็งหลังลับใบเลื่อย
- ศึกษา และสั่งซื้อเครื่องลับใบเลื่อย
  - ศึกษาการทำงาน และทดลองลับใบเลื่อย
  - ทดลองซบแข็งพื้นใบเลื่อยที่ผ่านกระบวนการลับ และบับพื้น
  - ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับซบพื้นเลื่อยที่ผ่านการลับใบเลื่อย
  - วัดค่าความแข็ง ทดสอบการสึกหรอ และ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
- (6) ทดสอบประสิทธิภาพใบเลื่อยผ่านการซบแข็ง
- ประสานงานโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา
  - ประเมินค่าใช้จ่ายในการจ้างทดสอบประสิทธิภาพใบเลื่อย
  - ศึกษาข้อมูลอายุการใช้งานใบเลื่อยต่อปี
  - ศึกษาเปรียบเทียบอายุการใช้งานต่อปีของใบเลื่อยมาซบแข็ง
  - วัดค่าความแข็ง ทดสอบการสึกหรอ และ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
- (7) วิเคราะห์ผล และสรุปผลการดำเนินโครงการ
- วิเคราะห์ค่าความแข็ง การสึกหรอ และโครงสร้างจุลภาค
  - วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการซบแข็งใบเลื่อยสายพาน
  - วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบอายุการใช้งาน
  - สรุปผลการดำเนินโครงการพร้อมข้อเสนอแนะ

## 10.2 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนปฏิบัติงานกิจกรรมในแต่ละช่วงระยะเวลาของโครงการ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แผนการดำเนินโครงการ

กิจกรรม	ปีที่ 1		ปีที่ 2		ผู้รับผิดชอบ
	เดือนที่ 1-6	เดือนที่ 7-12	เดือนที่ 1-6	เดือนที่ 7-12	
1. ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับใบเลี้ยงปัจจุบัน	←→				เจียรศักดิ์ และนริศรา
2. ออกแบบ ทดลอง และปรับปรุงชุดเดินใบเลี้ยง		←→			เจียรศักดิ์ และสมใจ
3. ออกแบบเครื่องสูบเชิงเหินยวน้ำ ขดลวด และระบบควบคุม		←→			เจียรศักดิ์ และสมใจ
4. ประกอบ ทดลอง ปรับปรุง และติดตั้งเครื่องสูบเชิงเหินยวน้ำทำงานร่วมกับชุดเดินใบเลี้ยงสายพาน			←→		เจียรศักดิ์ และสมใจ เจียรศักดิ์ และนริศรา
5. การทดลองสูบเชิงหลังลับใบเลี้ยง			←→		เจียรศักดิ์ และนริศรา
6. การทดสอบประสิทธิภาพใบเลี้ยงผ่านการสูบเชิง				←→	เจียรศักดิ์
7. วิเคราะห์ผล และสรุปผลการดำเนินโครงการ				←→	เจียรศักดิ์

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน)

สำหรับรายละเอียดผลงานที่ได้และช่วงเวลาตามแสดงในตารางที่ ๖

ตารางที่ 5 ผลงานในแต่ละช่วงเวลา

ปีที่	เดือนที่	ผลงานที่คาดว่าจะสำเร็จ
1	1-6	1. สรุปผลการศึกษาเกี่ยวกับใบเลี้ยงปัจจุบัน 2. ชุดเดินใบเลี้ยงที่สามารถควบคุมความเร็วการเดินใบเลี้ยง
	7-12	1. ตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครื่องชุปแข็ง 2. แบบเครื่องชุปแข็งพ่นเลี้ยงแบบเหนียวน้ำ
2	1-6	1. ต้นแบบเครื่องชุปแข็งพ่นเลี้ยงแบบเหนียวน้ำ
	7-12	1. เครื่องต้นแบบชุปแข็งพ่นเลี้ยงที่ผ่านการปรับปรุง 2. รายงานผลการทดลองประสิทธิภาพใบเลี้ยงสายพานที่ผ่านการชุปแข็งด้วยเครื่อง

#### 11. ประโยชน์ที่จะได้รับจากผลงานวิจัย

ปีที่ 1 บทความวิชาการ : การศึกษาใบเลี้ยงสายพาน

ปีที่ 2 (1) เครื่องชุปแข็งใบเลี้ยงสายพานแบบเหนียวน้ำ

(2) อนุสิทธิบัตร

#### 12. ผู้ที่จะได้ประโยชน์จากโครงการ

(1) โรงเลี้ยงแปรรูปไม้ยางพารา

#### 13. ประเมินผลกระทบด้านเศรษฐกิจ-สังคมและประโยชน์ที่ภาคเกษตรและเศรษฐกิจส่วนรวมจะได้รับทั้งระยะสั้นและระยะยาวตามความเป็นไปได้

(1) ภาคอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราลดต้นทุนการผลิตจากการยืดอายุการใช้งานและส่งผลให้เพิ่มผลผลิต ลดเวลาปรับตั้งเครื่องเลี้ยง

#### 14. ผลตอบแทนและวิธีการแบ่งปันผลประโยชน์ด้านการเงินต่อสำนักงาน

ทรัพย์สินทางปัญญาที่ได้จากการวิจัยภายใต้โครงการ ..... การออกแบบและพัฒนาเครื่องชุปแข็งใบเลี้ยงแปรรูปไม้ยางพารา .... ให้เป็นกรรมสิทธิ์ร่วมกันระหว่างสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และ ..... มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ..... หากโครงการสามารถขยายผลสู่เชิงพาณิชย์ การจัดสรรผลประโยชน์ให้หักค่าใช้จ่ายค่าบริหารจัดการทรัพย์สินทางปัญญาร้อยละ 15 ของผลประโยชน์ในแต่ละงวดก่อนจัดสรรผลประโยชน์ระหว่างผู้ให้ทุนกับผู้รับทุนในสัดส่วน 50 : 50 (ตามระเบียบคณะกรรมการบริหารสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร ว่าด้วยการรักษาสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากผลงานวิจัย พ.ศ. 2555)

#### 15. ความร่วมมือกับสถาบันอื่น

ไม่มี

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

16. ความชำนาญของคณะผู้วิจัยที่มีอยู่และที่ยังต้องพัฒนา

ความชำนาญของคณะผู้วิจัยที่มีอยู่

- (1) ข้อมูลพื้นฐานการชุบแข็ง ข้อมูลส่วนผสมทางเคมี และพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการ
- (2) การออกแบบระบบการทำงาน การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ความชำนาญที่ยังต้องพัฒนาด้านการแปรรูป

- o ความรู้เกี่ยวกับพื้นฐานการแปรรูปไม้ กระบวนการใช้งานใบเลื่อย การเตรียมใบเลื่อย เช่น การนวด ปรับแต่ง และการต่อใบเลื่อย

รายชื่อผู้เชี่ยวชาญด้านนี้

- (1) คุณสุธี วิสุทธิเทพกุล นักวิชาการป่าไม้ ระดับชำนาญการพิเศษ ผู้อำนวยการกลุ่มงานพัฒนาผลิตภัณฑ์ ป่าไม้ สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้
- (2) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อำไพ เบี้ยมอรุณ ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ความชำนาญที่ยังต้องพัฒนาด้านการชุบแข็งและกรดเหล็กกล้า

- o การออกแบบระบบการชุบเหล็กกล้าแบบต่างๆ โดยเฉพาะการชุบแข็งผิวแบบเหนียวน้ำ และเปลวไฟ สารชุบ อัตราการเย็นตัว การแก้ไขปัญหาในกระบวนการชุบแข็ง

รายชื่อผู้เชี่ยวชาญด้านนี้

- (1) รองศาสตราจารย์สมนึก วิฒนศรียกุล ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

17. อุปกรณ์ที่มีอยู่และสถานที่ที่ใช้ดำเนินการ  
เครื่องมืออุปกรณ์ที่ต้องมีการปรับปรุงคังแสดงรายการข้างล่าง

เครื่องมือและอุปกรณ์เกี่ยวกับการทดลองที่ต้องพัฒนาปรับปรุง

ชุดเดินใบเลื่อย	รายละเอียดที่ต้องปรับปรุง
	<p>ปรับเปลี่ยนชุดควบคุมสามารถควบคุมมอเตอร์ที่กำลัง มาสูงโดยการเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุม มอเตอร์ขึ้นโดยเฉพาะที่ความเร็วรอบต่ำ ต้องใช้ทอร์ค สูง</p>
	<p>เปลี่ยนมอเตอร์กำลังมาให้สูงขึ้น</p>
	<p>ชุดขับใบเลื่อยและระบบส่งกำลังให้สามารถขับใบ เลื่อยอย่างราบเรียบ</p>

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผล

1. เครื่องวัดความแข็ง (hardness tester)
2. เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบใช้ร่วมกับเครื่องขัด (wear test)  
(กำลังอยู่ระหว่างยื่นคำขอสิทธิบัตร)
3. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) อยู่ระหว่างการจัดซื้อ (ผ่านขั้นตอนการเปิดซอง – อยู่ระหว่างการทำสัญญา)

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน)

## 18. งบประมาณ

แบบข้อเสนอของงบประมาณโครงการวิจัย แผนการจ่ายเงินตลอดระยะเวลาโครงการ ดังแสดงในตารางข้างล่าง

**แบบข้อเสนอของงบประมาณโครงการวิจัย**  
**สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)**

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)	
	ปีที่ 1	ปีที่ 2
1. ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัยและเจ้าหน้าที่อื่นๆ	30,000	39,000
1.1 ชื่อ .... นาย นฤเบศร์ แดงวิเชียร ... เงินเดือน ..... 3,000..... บาท วุฒิ .... นักศึกษาระดับปริญญาตรี ... ประสบการณ์ในการทำงาน ..... วุฒิ .... ปริญญาตรี ... (จบการศึกษา) ... เงินเดือน ..... 9,000..... บาท	18,000	27,000
1.2 ชื่อ .... เจ้าหน้าที่การเงิน มอ. สฎ. ... เงินเดือน ... 1,000 ... บาท (พิเศษ) วุฒิ ... ปริญญาตรี..... ประสบการณ์ในการทำงาน ..... ปี.....	12,000	12,000
2. ค่าตอบแทนคณะผู้วิจัย (แสดงเป็นรายบุคคล)	108,000	108,000
2.1 ชื่อ .... ดร.เจียรศักดิ์ ชูชีพ ..... (4,000 บาท/เดือน).....	48,000	48,000
2.2 ชื่อ .... ดร.นริศรา มหาคณินวงศ์ ..... (3,000 บาท/เดือน).....	36,000	36,000
2.2 ชื่อ .... ดร.สมใจ จันทร์อุดม ..... (2,000 บาท/เดือน).....	24,000	24,000
3 ค่าใช้สอย	41,000	88,000
3.1 ค่าจ้างเตรียมชิ้นงานทดสอบการสึกหรอ	8,000	4,000
3.2 ค่าวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี	6,000	4,000
3.3 ค่าวิเคราะห์และถ่ายภาพโครงสร้าง	2,000	5,000
3.4 ค่าเดินทาง เช่น เดินทางไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ค่าเดินทางระหว่างวิทยาเขตของนักวิจัย ค่าเดินทางเข้าร่วมประชุมวิชาการ ค่าเดินทางไปประสานงานโรงงาน	10,000	20,000
3.5 ค่าจ้างทำชิ้นส่วนต่างๆ เช่น เหล็ก ชุดจับยึด ฝาครอบ เป็นต้น	15,000	15,000
3.6 ค่าจ้างประกอบชุดเดินใบเลื่อย ค่าประกอบเครื่องสูบเชิงเหนียวน้ำ	-	20,000
3.7 ค่าจ้างเหมาพิมพ์เลื่อยเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ	-	20,000
4. ค่าวัสดุ	132,000	87,500
4.1 วัสดุชุดเตรียมผิวชิ้นงาน กระดาษทรายเบอร์ต่างๆ	7,000	5,000
4.2 กระดาษทรายสำหรับทดสอบการสึกหรอ	7,000	3,500
4.3 เรซินจับยึดชิ้นงาน	3,000	-
4.4 ผงขัดอะลูมิเนียมขนาดต่างๆ	9,000	-
4.5 ค่าเทอร์โมคัปเปิล	6,000	3,000
4.5 สายลมนขนาดต่างๆ และ ข้อต่อ	12,000	2,000
4.6 เรกกูเลเตอร์	5,000	5,000
4.7 วาล์วควบคุม	6,000	3,000

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

4.8 ตู้ควบคุมสำหรับติดตั้งระบบควบคุม	4,000	3,000
4.9 อินเวอร์เตอร์	12,000	
4.10 ปุ่มควบคุมแบบต่างๆ	5,000	5,000
4.10 ตัวควบคุมอุณหภูมิ	8,000	3,000
4.11 ตัวควบคุมเวลา	8,000	3,000
4.12 เหล็กขนาดต่างๆ ชิ้นส่วนสำเร็จรูป เช่น เฟือง เกียร์ สายพาน และเพลลา เป็นต้น	15,000	10,000
4.13 วัสดุช่างสำหรับจัดทำและประกอบชุดทดสอบ เช่น ลวดเชื่อม ไขตัด ไขเลื่อย น็อต สกรู แหวนรอง ไขควง แปรง สี ทินเนอร์ ประแจต่างๆ คีมลือค ล้อ เป็นต้น	10,000	10,000
4.14 ไขเลื่อยแปรรูปไม้ยางพารา ทั้งไขเลื่อยใหม่ และใช้แล้ว	5,000	15,000
4.15 สารเคมีและอุปกรณ์เครื่องแก้ว	3,000	
4.16 อุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัย เช่น ถุงมือ แวนดา เป็นต้น	2,000	2,000
4.17 วัสดุสำนักงาน เช่น กระดาษ ปากกา หมึกพิมพ์ และชั้นวาง เป็นต้น	5,000	5,000
4.18 ค่าไม้สำหรับทดสอบการแปรรูป		10,000
5. ค่าครุภัณฑ์	295,000	-
5.1 อุปกรณ์บับพันไขเลื่อย	10,000	-
5.2 เครื่องลับไขเลื่อย	40,000	-
5.3 เทอร์โมคัมเบิ้ล	20,000	-
5.4 ปีมลุม	25,000	-
5.5 ชุดควบคุมชุดลวดเหนียวน้ำ	200,000	-
6. ค่าบริการวิชาการ (10% ไม่รวมครุภัณฑ์และเดินทางต่างประเทศ)	31,100	32,250
6.1 ค่าบริหารจัดการของมหาวิทยาลัยและคณะ	31,100	32,250
7. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ (แจกแจงรายการ)		
รวม	637,100	354,750

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน)



## แผนการใช้จ่ายเงินตลอดโครงการ

รายการค่าใช้จ่าย	ปีที่ 1		ปีที่ 2		รวม (บาท)
	งวดที่ 1 (เดือน/ พ.ศ.)	งวดที่ 2 (เดือน/ พ.ศ.)	งวดที่ 1 (เดือน/ พ.ศ.)	งวดที่ 2 (เดือน/ พ.ศ.)	
1. ค่าตอบแทนคณะผู้วิจัย	54,000	108,000	54,000	54,000	216,000
2. ค่าจ้างผู้ช่วยนักวิจัยและเจ้าหน้าที่	15,000	19,500	15,000	19,500	69,000
3. ค่าใช้สอย	20,500	20,500	44,000	44,000	129,000
4. ค่าวัสดุ	66,000	66,000	43,750	43,750	219,500
5. ค่าครุภัณฑ์	-	295,000	-	-	295,000
6. ค่าบริการวิชาการ	-	31,100	-	32,250	63,350
7. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	-	-	-	-	-
<b>รวมแต่ละงวด</b>	<b>101,500</b>	<b>540,100</b>	<b>156,750</b>	<b>193,500</b>	<b>991,850</b>
<b>รวมแต่ละปี</b>	<b>641,600</b>		<b>350,250</b>		<b>991,850</b>

## รายละเอียดชี้แจงเหตุผลความจำเป็นในการจัดซื้อครุภัณฑ์

รายการครุภัณฑ์ที่มีความจำเป็นต้องซื้อ

- (1) เครื่องลับใบเลื่อย
- (2) เครื่องวัดอุณหภูมิ
- (3) ปัมลมสำหรับระบบสารซูบ

ลักษณะการใช้และความจำเป็นต่อโครงการวิจัยที่ขอรับการสนับสนุน

- (1) ใช้สำหรับหัดลงลับใบเลื่อยเพื่อนำใบเลื่อยที่ผ่านการลับมาซูบแข็ง
- (2) ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิผิวชิ้นงานที่จำเป็นต่อการศึกษารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องซูบแข็งเหนียวน้ำ
- (3) ใช้สำหรับจ่ายสารซูบภายหลังจากชิ้นงานได้รับความร้อนจากขดลวด

ประโยชน์ของครุภัณฑ์นี้จะมีต่อไปหลังจากโครงการวิจัยเสร็จสิ้นลง

- (1) สามารถให้บริการวิชาการได้
- (2) สามารถใช้ในการต่อยอดเพื่อปรับปรุงกระบวนการ
- (3) สามารถใช้ในการต่อยอดเพื่อปรับปรุงกระบวนการ

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน)

สถานภาพของครุภัณฑ์ชิ้นนี้ในหน่วยงานของท่าน (กรุณาทำเครื่องหมายที่หน้าหัวข้อ)



ไม่มีครุภัณฑ์



ปัจจุบันมีอยู่แล้ว โดยมีสถานภาพและการใช้งานดังนี้

ครุภัณฑ์

สถานภาพและการใช้งานปัจจุบัน

---



---

## 19. เอกสารอ้างอิง

- เสียรศักดิ์ ชูชีพ นริศธรรมหารนิมวงศ์ และ สมใจ จันทร์อุดม. 2559. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ การปรับปรุงสมบัติเชิงกลใบเลื่อยสายพานสำหรับแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการชุบแข็งเลว ไฟ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- สุธี วิสุทธิเทพกุล วรกิจ สุนทรบุระ ไพโรจน์ ศิริรัตน์ และสันหัตต์ แสงกุล. 2546ก. รายงานวิจัยฉบับ สมบูรณ์ โครงการปรับปรุงเทคนิคและประสิทธิภาพการใช้เลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพาราให้ได้ ผลผลิตสูงขึ้น. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. กรุงเทพฯ.
- สุธี วิสุทธิเทพกุล วรกิจ สุนทรบุระ ไพโรจน์ ศิริรัตน์ และสันหัตต์ แสงกุล. 2546ข. การบำรุงรักษาใบเลื่อย สายพาน โครงการปรับปรุงเทคนิคและประสิทธิภาพการใช้เลื่อยสายพานแปรรูปไม้ยางพาราให้ได้ ผลผลิตสูงขึ้น. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. กรุงเทพฯ.
- อำไพ เปี่ยมอรุณ. 2549. การแปรรูปไม้ ชุดความรู้ “การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขัน ของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ไม้”. ศูนย์บริหารจัดการเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.
- วารุณี เปรมานนท์ และอรจิรา เตี้ยวณิชย์. 2554. งานชิ้นรูปโลหะเล่มที่ 2 วัสดุทำแม่พิมพ์และชิ้นงาน สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย ญี่ปุ่น) กรุงเทพฯ.
- ASTM International. 2002. ASTM A682 – 02 Standard Specification for Steel, Strip, High-Carbon, Cold-Rolled, General Requirements for. Pennsylvania: ASTM-International. 8 p.
- Nordstrom, J. and Bergstrom, J. 2001. Wear testing of saw teeth in timber cutting. Wear 250 (2001), 19-27.
- Uddeholmstrip Company Limited. 2016. WOOD Materializing Excellence. [Online] <http://scosarg.com/agazzani/r800-wide-bandsaw-blade-18-9-5-x3-swage>  
[http://www.uddeholmstrip.com/products\\_brands/uddeholmstrip/wood\\_band\\_saw\\_steel/timber\\_machining\\_to\\_perfection](http://www.uddeholmstrip.com/products_brands/uddeholmstrip/wood_band_saw_steel/timber_machining_to_perfection)  
<http://www.deventech.se/>  
[www.vollmer-group.com/uploads/tx.../GPA\\_200\\_GB\\_02.pdf](http://www.vollmer-group.com/uploads/tx.../GPA_200_GB_02.pdf) [Online]
- US Patent No. Re. 26,676. 1964. Method of Making saw blade
- US Patent No. 1,352,140. 1920. Tempered blade.
- US Patent No. 2,829,684. 1958. Saw blade with hardened teeth.
- US Patent No. 4,688,458. 1987. Bandsaw blades for milling timber.

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน)

## 20. ประวัติคณะผู้วิจัย

## (1) หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายเธียรศักดิ์ ชูชีพ  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Thiensak Chucheeop
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 31005 01118 47 4
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84000

โทรศัพท์ 084 067 0766 โทรสาร 077 355 453 e-mail : thiensak.c@psu.ac.th

## 5. ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ.	ระดับ	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ประเทศ
2555	วศ.ด.	วิศวกรรมวัสดุ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	ไทย
2544	วศ.ม.	วิศวกรรมการจัดการ อุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ	ไทย
2536	วศ.บ.	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	ไทย

## 6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

## 7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย :

ชื่อโครงการวิจัย : การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสม A356.2 ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบเต็ม และกระบวนการหล่อแบบโลหะกึ่งของแข็ง (ปิดโครงการ)

ชื่อโครงการวิจัย : การปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าใบตัดหญ้าสำหรับเครื่องตัดหญ้าสะพาย (อยู่ระหว่างการปิดโครงการ)

ชื่อโครงการวิจัย : การปรับปรุงสมบัติเชิงกลใบเลื่อยสายพานสำหรับแปรรูปไม้ยางพารา ด้วยกระบวนการชุบแข็งเปลวไฟ

7.3 งานวิจัยที่สำเร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

ข้อเสนอโครงการเสนอต่อแหล่งทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน)

## ประวัติคณะผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ

ดร.เจียรศักดิ์ ชูชีพ

คุณวุฒิ

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

สถานที่ปฏิบัติงาน

สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

### ประสบการณ์งานวิจัย

- นริศรา มหาวินวรงค์ เจียรศักดิ์ ชูชีพ นงเยาว์ เมืองดี ปิยนากู คงทิม เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์ สุธิดา หมายโต๊ะชะ และกนกรัตน์ สำอางกาย. 2559. พฤติกรรมการกรีดยางพารา พฤติกรรมการเลือกใช้มีดกรีดยางพารา และการประเมินแนวคิดเกี่ยวกับเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติของเกษตรกรชาวสวนยางพารา. วารสารวิชาการและส่งเสริมวิชาการเกษตร (TCI) Vol.33, ฉบับที่ 1, 2559.
- เจียรศักดิ์ ชูชีพ นริศรา มหาวินวรงค์ และสมใจ จันทร์อุดม. 2559. พฤติกรรมการซื้อและใช้ใบมีดตัดหญ้าของเกษตรกรในจังหวัดสุราษฎร์ธานีวารสารวิชาการและส่งเสริมวิชาการเกษตร (TCI) Vol.33, ฉบับที่ 2, 2559.
- นริศรา มหาวินวรงค์ เจียรศักดิ์ ชูชีพนงเยาว์ เมืองดี ภูริวัฒน์ เพ็ชรนิคมอนุพงษ์ สุวรรณมณี และเอกพัฒน์ ช่วยเมือง. ใบมีดกรีดยางสำหรับเครื่องกรีดยางอัตโนมัติ. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ (TCI) Accepted.
- Chuchee, T., Wannasin, J., Wisutmethangoon, S. 2014. Effect of semi-solid processing on solidified microstructure and mechanical properties of rheo-slurries A356 sand cast. Advanced Materials Research.
- Chuchee, T., Wannasin, J., Canyook, R., Rattanochaikul, T, Janudom, S., Wisutmethangoon, S., Flemings, M.C. 2013. Characterization of flow behavior of semi-solid slurries with low solid fractions. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science.
- Chuchee, T., Canyook, R., Rattanochaikul, T., Janudom, S., Wisutmethangoon, S., Wannasin, J. 2011. A fluidity study of semi-solid rheo-slurry of AC4C aluminum alloy in gravity sand casting. Advanced Materials Research.
- Wannasin, J., Janudom, S., Rattanochaikul, T., Canyook, R., Burapa, R., Chuchee, T., Thanabumrungrkul, S. 2010. Research and development of gas induced semi-solid process for industrial applications. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.

- Burapa, R., Janudom, S., Chucheep, T., Canyook, R., Wannasin, J. 2010. Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.
- Chucheep, T., Burapa, R., Janudom, S., Wisutmethangoon, S., Wannasin, J. 2010. Semi-solid gravity sand casting using gas induced semi-solid process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.

### ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ	ดร.นริศรา มหาธนิวงค์
คุณวุฒิ	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)
สถานที่ปฏิบัติงาน	สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
ประสบการณ์งานวิจัย	

- นริศรา มหาธนิวงค์ เขียรศักดิ์ ชูชีพ นางเยาว์ เมืองดี ปิยนากู คงทิม เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์ สุธิดา หมาดโตะชะ และกนกรัตน์ สำอังกาย. 2559. พฤติกรรมการกรีดยางพารา พฤติกรรม การเลือกใช้มีดกรีดยางพารา และการประเมินแนวคิดเกี่ยวกับเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติของ เกษตรกรชาวสวนยางพารา. วารสารวิชาการและส่งเสริมวิชาการเกษตร (TCI) Vol. 33, ฉบับที่ 1, 2559.
- นริศรา มหาธนิวงค์ เขียรศักดิ์ ชูชีพนางเยาว์ เมืองดี ภูริวัฒน์ เพ็ชรนิคม อุนพงษ์ สุวรรณมณี และเอกพัฒน์ ช่วยเมือง. 2559. ใบมีดกรีดยางสำหรับเครื่องกรีดยางอัตโนมัติ. วารสาร มหาวิทยาลัยทักษิณ (TCI) *Accepted*.
- เขียรศักดิ์ ชูชีพ นริศรา มหาธนิวงค์ และสมใจ จันทร์อุดม. 2559. พฤติกรรมการซื้อและใช้ ใบมีดตัดหญ้าของเกษตรกรในจังหวัดสุราษฎร์ธานีวารสารวิชาการและส่งเสริมวิชาการเกษตร (TCI) Vol. 33, ฉบับที่ 2, 2559.
- S. Janudom, J. Wannasin, N. Mahathaninwong, T. Chucheep, N. Umudee. Anodic Oxide Layer on Superheated Slurry Cast 7075 Aluminum Alloy. Surface and Coatings Technology (ISI impact factor :2.102) *submitted*.
- Narissara Mahathaninwong, Sirikul Wisutmethangoon, Thiensak Chucheep, Somjai Janudom, and Rungsinee Canyook. Precipitate coarsening for Semi-Solid Cast 7075-T6 Al alloy determined by SAXS measurements. Maejo International Journal of Science and Technology (ISI impact factor : 0.367) *submitted*
- Itsaree Lewkitthayakorn, Somjai Janudom, Narissara Mahathaninwong. Solution Heat Treatment of 7075 Aluminum Alloy affected on Anodic oxide layer. 4<sup>th</sup>

International Conference on Metallurgy Technology and Materials. 21-22th May 2016, Bayview Hotel, Singapore.

- Ekasit Anancharoenwong, SutidaMarthosa, NongyaMueangdee, Narissara Mahathaninwong, Piyanart Chotikawanid. 2015. The effect of s/3 d1 3d/4 tapping system using jeh-bong knife on latex yield of rubber and the bark consumption of rubber trees located in Muang District, Surat Thani province. The second Asia Pacific Rubber Conference(APRC) 2015. 15-16th October 2015, Phuket, Thailand.
- Narissara Mahathaninwong, SirikulWisutmethangoon, ThawatchaiPlookphol, JessadaWannasin, and Suchart Chantaramanee. 2014. Elevated Temperature Tensile Behavior of Rheo-Cast 7075-T6 Al Alloy Produced by GISS Technique. Advance Materials Research. 881-883 : 1597-1600.
- Mahathaninwong, N., Zhou, Y., Babcock, S.E., Plookphol, T., Wannasin, J., and Wisutmethangoon, S. 2012. Creep rupture behavior of semi-solid cast 7075-T6 Al alloy. Materials Science and Engineering A. 556 : 107-113
- Mahathaninwong, N., Plookphol, T., Wannasin, J., and Wisutmethangoon, S. 2012. T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy. Materials Science and Engineering A. 532 : 91-99.
- Wisutmethangoon, S., Thongjan, S., Mahathaninwong, N., Plookphol, T., and Wannasin, J. 2012. Precipitation Hardening of A356 Al Alloy produced by Gas Induced Semi-Solid Process. Materials Science and Engineering A. 532 : 610-615.
- Narissara Mahathaninwong, SirikulWisutmethangoon, Thawatchai Plookphol, and JessadaWannasin. 2011. Influence of Solution Heat Treatment on Microstructures of Semisolid Cast 7075 Aluminium Alloy. Advance Materials Research. 33 :371
- Sumanggay, N., Imlao, S., and Thaveeprungsriporn, V. 2002. The Effect of Grain Boundary Inclination on Creep Fracture of 304 Stainless steel. in The Second Thailand Materials Science and Technology Conference, Bangkok, August 6-7, 2002.
- Panmatarith, T., Bomli, P., Tummahunth, P. and Sumanggay, N. 2000. Preparation and Electrical Properties Testing of ZnO Ceramic Materials. Songklanakarin Journal of Science and Technology. 22 (1), Jan-Mar. 2000.

## ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ	ดร.สมใจ จันทร์อุดม
คุณวุฒิ	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)
สถานที่ปฏิบัติงาน	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาหาดใหญ่

## ประสบการณ์งานวิจัย

- เขียวศักดิ์ ชูชีพ นริศรา มหาวินวงศ์ และสมใจ จันทร์อุดม. 2559. พฤติกรรมการซื้อและใช้ไบโอดีดัดหญ้าของเกษตรกรในจังหวัดสุราษฎร์ธานีวารสารวิชาการและส่งเสริมวิชาการเกษตร (TCI) Vol.33, ฉบับที่ 2, 2559.
- Janudom, S., Wannasin, J., Basem, J. and Wisutmethangoon, S., (2013) "Characterization of Flow Behavior of Semi-Solid Slurries Containing Low Solid Fractions in High-Pressure Die Casting", Acta Materialia, Vol. 61, pp. 6227-6275.
- Janudom, S., Wannasin, J., Kapranos, P. and Wisutmethangoon, S., (2013), "The Effect of Hot Tearing in Semi Solid Casting of Aluminum A201 Alloy", Advanced Materials Research, Vol. 739, pp. 190-195.
- Chucheep, T., Wannasin, J., Canyook, R., Rattanochaikul, T., Janudom, S., Wisutmethangoon, S., Flemings, M.C. 2013. Characterization of flow behavior of semi-solid slurries with low solid fractions. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science.
- Chucheep, T., Canyook, R., Rattanochaikul, T., Janudom, S., Wisutmethangoon, S., Wannasin, J. 2011. A fluidity study of semi-solid rheo-slurry of AC4C aluminum alloy in gravity sand casting. Advanced Materials Research.
- Janudom, S., Rattanochaikul, T., Burapa, R., Wisutmethangoon, S. and Wannasin, J., (2010), "Feasibility of Semi-Solid Die Casting of ADC12 Aluminum Alloy", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, pp. s1756-s1762.
- Rattanochaikul, T., Janudom, S., Memongkol, N. and Wannasin, J., (2010). "Development of Aluminum Rheo-Extrusion Process Using Semi-Solid Slurry at Low Solid Fraction," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, pp. s1763-s1768.
- Thanabumrunikul, S., Janudom, S., Burapa, R., Dulyapraphant, P. and Wannasin, J., (2010), "Industrial Development of Gas Induced Semi-Solid Process," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, pp. s1016-s1021.
- Wannasin, J., Janudom, S., Rattanochaikul, T., Canyook, R., Burapa, R., Chucheep, T., Thanabumrunikul, S. 2010. Research and development of gas induced semi-solid process for industrial applications. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.

- Burapa, R., Janudom, S., Chucheeep, T., Canyook, R., Wannasin, J. 2010. Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.
- Wannasin, J., Junudom, S., Tattanochaikul, T., Fleming, M.C., (2008), "Development of the gas induced semi-solid metal process for aluminum die casting application," Solid State Phenomena, Vol. 141-143 , pp. 97-102.