



การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง
โดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

**Mechanical Properties Improvement of Cast Semi-Solid Metal (SSM)
Aluminum Alloys by Friction Stir Processing**

ศุภชัย ชัยณรงค์
Suppachai Chainarong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Industrial and Systems Engineering
Prince of Songkla University**

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง โดยกรรมวิธี เสียดทานแบบกวน
ผู้เขียน	นายศุภชัย ชัยณรงค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ มีมงคล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาส เมืองจันทร์บุรี) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาส เมืองจันทร์บุรี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล)

.....กรรมการ
(ดร.กนิษฐ ตะปะสา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้ับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
อุตสาหกรรมและระบบ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง โดยกรรมวิธี เสียดทานแบบกวน
ผู้เขียน	นายศุภชัย ชัยณรงค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบกิ่งของแข็ง โดยใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคอยู่ในสถานะของแข็งโดยการใช้ความร้อนจากการเสียดทานและการกวน ตัวแปรของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ใช้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการหล่อกิ่งของแข็งเกรด 356 ที่ความเร็วในการเดินแนวกวน คือ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที ภายได้ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที พบว่ากรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสามารถเพิ่มค่าความแข็งและความแข็งแรงดึง โดยที่ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมีค่าเฉลี่ยประมาณ 64.55 Hv มีค่ามากกว่าเนื้อโลหะเดิมซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 40.58 Hv ส่วนค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 11.8% เมื่อนำมาเทียบกับเนื้อโลหะเดิม โดยสถานะที่ดีที่สุดคือ ความเร็วเดินแนวกวน 160 มิลลิเมตร/นาที ภายได้ความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่ากรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อแบบกิ่งของแข็งได้

Thesis Title	Mechanical Properties Improvement of Cast Semi-Solid Metal (SSM) Aluminum Alloys by Friction Stir Processing
Author	Mr. Suppachai Chainarong
Major Program	Industrial and Systems Engineering
Academic Year	2011

ABSTRACT

The aim of this experiment was to improve the mechanical properties of cast semi-solid metal (SSM) aluminum alloys by friction stir processing. The friction stir processing is a solid-state microstructural modification technique using a frictional heat and stirring action. The parameters of friction stir processing for semi-solid metal (SSM) aluminum alloys of 356 grade were three different travel speeds: 80 mm/min, 120 mm/min and 160 mm/min under three different rotation speeds 1,320 rpm, 1,480 rpm and 1,750 rpm. The hardness and tensile strength properties were increased by friction stir processing. The hardness of friction stir processing was 64.55 Hv which was higher than the base metal (40.58 Hv). The tensile strengths of friction stir processing were increased about 11.8% compared to the base metal. The optimum processing parameter was rotation speed at 1,750 rpm with the travel speed at 160 mm/min. Consequently, the application of the friction stir processing is a very effective method for the mechanical improvement of semi-solid metal aluminum alloys.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์ ประธานกรรมการ
ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี กรรมการที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้
คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์และติดตามความก้าวหน้าอยู่เสมอ ตลอดจนกรุณา
ตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.
ชเนศ รัตนวิไล และ ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาเป็นอาจารย์กรรมการ
สอบ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และบุคลากรภาควิชา
วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รวมทั้งสาขาวิชา
วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ทุก ๆ ท่านที่
ให้ความช่วยเหลือจนการดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความสะดวกในการดำเนินการวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวชัยณรงค์ และทีมงาน Welding and Joining
Laboratory ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้
ที่มีส่วนช่วยเป็นกำลังใจในการทำวิจัยและให้คำปรึกษาให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ศุภชัย ชัยณรงค์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 การสำรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	6
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม	8
2.2 ทฤษฎีกลไกการเกิดโลหะกิ่งของแข็งในการหล่ออะลูมิเนียม	10
2.3 กรรมวิธีเสียตทานแบบกวน	15
2.4 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา	18
2.5 การทดสอบความขรุขระของพื้นผิว	18
2.6 การทดสอบความแข็ง	21
2.7 การทดสอบความแข็งแรงดึง	22
2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	22
3. วิธีการวิจัย	28
3.1 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัย	28
3.2 การออกแบบการทดลอง	29
3.3 การหล่อโลหะกิ่งของแข็ง	29
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	32
3.5 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางโลหวิทยาและสมบัติเชิงกลของรอยกวน	37
3.6 การวิเคราะห์ผล	44
4. การวิเคราะห์ผลการวิจัย	45
4.1 โครงสร้างทางกายภาพของลักษณะผิวด้านบนรอยกวน	45
4.2 โครงสร้างมหภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	50
4.3 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	54
4.4 การทดสอบความแข็งหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	69
4.5 การทดสอบความแข็งแรงดึงหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	79
4.6 อภิปรายผลการทดลอง	96
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	98
5.1 บทสรุป	98
5.2 ข้อเสนอแนะ	99
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก	104
ก ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติทางโลหวิทยาและสมบัติทางกล	105
ข ค่าความแข็งแรงดึงหลังจากทำกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	107
ประวัติผู้เขียน	113

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม	9
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม 356 (wt.%)	29
4.1	ค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที	80
4.2	ANOVA ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบและความเร็วเดินกวน	85
4.3	ANOVA ของความเร็วรอบที่ 1,320 รอบ/นาที	88
4.4	ANOVA ของความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที	89
4.5	ANOVA ของความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที	91
4.6	ANOVA ของความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที	92
4.7	ANOVA ของความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที	93
4.8	ANOVA ของความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที	94
ข.1	ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเนื้อโลหะเดิม	108
ข.2	แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรอยกวนที่ความเร็วรอบของพิน 1,320 รอบ/นาทีและความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที	109
ข.3	แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรอยกวนที่ความเร็วรอบของพิน 1,480 รอบ/นาทีและความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที	110
ข.4	แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรอยกวนที่ความเร็วรอบของพิน 1,750 รอบ/นาทีและความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที	111
ข.5	แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรอยกวนที่ความเร็วรอบของพิน 1,750 รอบ/นาทีและความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที โดยการตัดชิ้นทดสอบตามขวางกับแนวกวน	112

รายการภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า	
2.1	การแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ ทำให้มีอนุภาคหรือเกรนเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ	10
2.2	เส้นทางการเติบโต (growth) และการ coarsening ของอนุภาคของแข็ง	12
2.3	ขั้นตอนการผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-Solid Rheocasting (SSR)	13
2.4	การผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว	15
2.5	การหมุนของตัวกวนบนชิ้นงานด้วยการเสียดทานแบบกวน	16
2.6	ทิศทางและการกวนของตัวกวน	17
2.7	การหาค่าความขรุขระแบบค่าเฉลี่ยเลขคณิต	19
2.8	การหาค่าความขรุขระแบบค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด	20
2.9	แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์	21
3.1	วิธีดำเนินงานวิจัย	28
3.2	กราฟค่าความแข็งแรงดึงของการซ้อนทับกันของป่าในการกวน	29
3.3	Mold ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	30
3.4	ขั้นตอนทดสอบของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356	30
3.5	โครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ได้จากการหล่อแบบกิ่งของแข็ง	31
3.6	เครื่องกัดแนวตั้ง	31
3.7	การกัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อกิ่งของแข็ง	32
3.8	ขั้นตอนทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 ที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน	32
3.9	ลักษณะของตัวกวน (tool pin profile)	33
3.10	การปรับมุมเอียง 3 องศา ของเครื่องกัดแนวตั้ง	33
3.11	การปรับความเร็วรอบของเครื่องกัดแนวตั้ง	34
3.12	การปรับความเร็วเดินกวนของเครื่องกัดแนวตั้ง	34
3.13	อุปกรณ์ที่ใช้ในกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	35
3.14	การจับยึดในกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	35
3.15	กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน	36
3.16	การร่างแบบชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและเชิงกล	37
3.17	เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน	37

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3.18	รอยกวนจากการเสียดทานแบบกวนที่มีความสมบูรณ์	38
3.19	รอยกวนจากการเสียดทานแบบกวนที่ไม่สมบูรณ์	38
3.20	ชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยา Epoxy	39
3.21	การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา	39
3.22	รูปจำลองบริเวณที่เกิดจากการกวน	40
3.23	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	41
3.24	รูปจำลองบริเวณที่ใช้ดูโครงสร้างทางโลหะวิทยา	41
3.25	การขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงดึงของบริเวณรอยกวน	42
3.26	การเตรียมชิ้นทดสอบของรอยกวนเสียดทานแบบกวน	42
3.27	การทดสอบแรงดึง	42
3.28	รูปจำลองบริเวณที่เกิดความแข็ง	43
3.29	การวัดค่าความแข็ง	43
4.1	ผิวของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน	46
4.2	ผิวของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน	48
4.3	ผิวของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน	49
4.4	โครงสร้างมหภาคของบริเวณรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน	51
4.5	โครงสร้างมหภาคของบริเวณรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน	52
4.6	โครงสร้างมหภาคของบริเวณรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน	53
4.7	โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที	56
4.8	โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที	57

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.22	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที	76
4.23	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที	77
4.24	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที	78
4.25	ค่าความแข็งเฉลี่ยของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที ความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที	79
4.26	การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง	82
4.27	ลักษณะการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล	83
4.28	การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน	84
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับความเร็วรอบและความเร็วเดินกวน	86
4.30	อันตรกิริยาระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับความเร็วเดินกวน	87
4.31	การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที	89
4.32	การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที	90
4.33	การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที	91
4.34	การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที	92
4.35	การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที	93
4.36	การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที	95
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที ส่วนความเร็วเดินกวนที่ระดับ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที	96
ก.2	ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุตสาหกรรมในประเทศไทยมีความต้องการชิ้นส่วนอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นทุกปี ตามการเติบโตของอุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากการที่ผู้ประกอบการในประเทศไทยเป็นเพียงผู้ใช้เทคโนโลยีของประเทศอื่น จึงขาดองค์ความรู้ในการผลิตและขาดเทคโนโลยีที่สามารถพัฒนาไปใช้ในการแข่งขันได้ ปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจได้เปิดเสรีทั่วโลก ดังนั้นผู้ประกอบการไทยกำลังประสบปัญหาในการแข่งขันจากประเทศต่างๆ เช่น จีน อินเดีย และเวียดนาม ที่สามารถผลิตชิ้นส่วนต่างๆได้ในราคาที่ถูกลงกว่า และประเทศอุตสาหกรรมหลายประเทศ เช่น ญี่ปุ่น ไต้หวัน เกาหลี ยุโรป และ อเมริกา ที่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีคุณภาพสูง เพื่อการอยู่รอดในตลาดเสรี ผู้ประกอบการไทยจึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ในการผลิต เพื่อลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในการผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมส่วนใหญ่ใช้กระบวนการหล่อฉีด (Die casting) ซึ่งสามารถผลิตได้จำนวนมาก แต่ก็มีข้อเสียหลายอย่างเช่น ชิ้นงานมีโพรงอากาศ ทำให้มีสมบัติเชิงกลต่ำ นอกจากนี้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สั้นจึงทำให้มีต้นทุนสูง เทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ คือ เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง ในปัจจุบันการหล่อวิธีนี้ยังเป็นเทคโนโลยีใหม่มาก ทั้งนี้เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมของประเทศ เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในขณะนี้ คือ เทคโนโลยีการพ่นฟองแก๊สในน้ำโลหะ (Gas Induced Semi-Solid; GISS) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็ง โดยการปล่อยแก๊สเฉื่อย (แก๊สอาร์กอน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์ในปริมาณที่น้อยมาก ทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่แข็งตัวและได้โครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม [1] อย่างไรก็ตามการหล่ออะลูมิเนียมยังมีส่วนบกพร่องบางอย่างที่เกิดจากการหล่อ คือ การเกิดรูพรุน ซึ่งการเกิดรูพรุนมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมีค่าลดลง เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว และสมบัติด้านทานความล้า

กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน เป็นเทคนิคใหม่ที่ใช้สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคในสภาวะของแข็ง โดยใช้ความร้อนจากแรงเสียดทานเพื่อทำให้อะลูมิเนียมผสมหล่อมี

สมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น [2-6] ซึ่งกรรมวิธีนี้เกิดมาจากหลักการพื้นฐานของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [7] โดยมีหลักการทำงาน คือ จะเกิดการหมุนของตัวกวน ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นหัวพินและบ่า มีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นระหว่างตัวกวนกับชิ้นงาน ก่อให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความอ่อนตัวและหลอมเข้าด้วยกัน ซึ่งกรรมวิธีนี้จะทำให้เกิดเกรนที่มีความละเอียดขึ้น เกิดความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างทางจุลภาคของเฟสอะลูมิเนียมผสมขึ้น [8-11]

จากที่กล่าวมากรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมีผลสำหรับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อผสม โดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสามารถลดรูพรุนที่เกิดจากการหล่อ และปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน โดยจะทำการศึกษาตัวแปรในการกวนซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของบริเวณที่ถูกกวน และนำผลมาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมทั้งในแง่งานวิจัยและขยายผลสู่ภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 การสำรวจเอกสาร

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตวัสดุแบบกึ่งของแข็ง

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น ล้อรถยนต์ โครงของรถบรรทุก ชิ้นส่วนเครื่องยนต์เพื่อลดน้ำหนักของรถซึ่งเป็นผลดีต่อการประหยัดเชื้อเพลิง และในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม วัสดุที่ใช้งานจำเป็นต้องมีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นน้อย และมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูง กรรมวิธีการหล่อวัสดุช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

จากงานวิจัยของ เจษฎา วรรณสินธุ์ [1] ได้ทำการศึกษาการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งเป็นการขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน ส่วนที่แข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม สมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์ ทำให้ไม่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมาก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้า และลดการเกิดโพรง อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ด้วย กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งมีหลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะใช้เทคนิคต่าง ๆ กันในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง เช่น การกวนโดยใช้ใบพัดหรือแท่งเย็น การกวนโดยใช้แรง

แม่เหล็กไฟฟ้า การสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic หรือการเทผ่านรางลงในเบ้า แต่กระบวนการเหล่านี้มีความซับซ้อน ควบคุมยาก และเครื่องจักรมีราคาที่สูงมาก ทางผู้วิจัยจึงได้คิดกระบวนการใหม่ขึ้น มีชื่อเรียกว่า กระบวนการพ่นฟองแก๊สในน้ำโลหะ ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการปล่อยฟองแก๊สที่ละเอียดมากผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนในน้ำโลหะขณะที่มีการแข็งตัวบางส่วน และได้โครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม ซึ่งทำให้กระบวนการใหม่นี้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ง่ายและผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีคุณภาพสูงได้อย่างดี

1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนเป็นเทคนิคเหมือนกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แต่มีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน โดยที่กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนเป็นเทคนิคที่ใช้ปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคในสถานะของแข็ง (solid state) โดยจะเกิดการหมุนของหัวพินในชิ้นงาน ขณะเดียวกันจะมีการเคลื่อนที่ของหัวพินหรือชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความร้อนในขณะที่กวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโลหะในสถานะพลาสติก (plastic deformation) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนนั้น เหมือนกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เช่น ความเร็วรอบ ความเร็วเดินกวน แรงกด และมุมเอียงของตัวกวน

จากงานวิจัยของ Lakshminarayanan and Balasubramanian [8] พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง ซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ แรงกด ความเร็วรอบในการหมุนของหัวเชื่อม อัตราเร็วของการเดินเชื่อม และมุมเอียงของหัวเชื่อม ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Amirizad *et al.* [12] ได้กล่าวถึงผลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม ได้แก่ แรงกด (downforce) ความเร็วในการหมุนของตัวกวน (รอบ/นาที) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (welding speed) และมุมเอียงของตัวกวน (Tilt angle) ได้ข้อสรุปว่าตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม เช่น โครงสร้างเกรนและอนุภาคซิลิกอนเล็กกระจายอย่างสม่ำเสมอในบริเวณที่ถูกกวนรวมถึงค่าความแข็งและความแข็งแรงดึงมากกว่าบริเวณโลหะเดิม ดังนั้นได้มีการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อผสมมีขนาดเกรนที่เล็กและกระจายอย่างสม่ำเสมอ บริเวณที่ถูกกวน ซึ่งตัวแปรทั้งหมดได้นำมาใช้กับกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

จากรายงานของ Sklad [5] ได้สรุปว่า กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อที่จะทำให้สมบัติต่างๆ ที่ผิวดีขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล

นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงการปรับปรุงผิวโดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสำหรับอะลูมิเนียมหล่อเกรด A319 ใช้กับระบบรองรับน้ำหนัก (suspension) และระบบขับเคลื่อน (drive line) ของชิ้นส่วนรถยนต์ โครงสร้างหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนจะมีความละเอียดยิ่งขึ้น และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้รูพรุนบริเวณผิวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Karthikeyan *et al.* [3] ที่ใช้วัสดุเดียวกัน ใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนโดยทำการกวน 1 แนวในอะลูมิเนียม พบว่าสามารถลดขนาดเกรนและระดับความพรุน และปรับปรุงสมบัติเชิงกล ซึ่งมีตัวแปรในการเดินกวน และความเร็วในการเดินกวน ถูกนำมาทดสอบ ทำให้แน่ใจได้ว่าสมบัติรวมที่ได้จากการทดลองจะเพิ่มค่าความแข็งแรงถึง 50% และเพิ่มค่าความแข็ง 20% เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมหล่อแบบเดิม ความเหนียวของกระบวนการถูกเพิ่มโดยใช้ค่า factor อยู่ประมาณ 1.5-5 จากการศึกษาโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical Microscope (OM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ากรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสามารถลดขนาดอนุภาคของเฟสที่ 2 ซึ่งมีส่วนทำให้มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ยังพบว่ามีกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมาใช้ทดลองกับอะลูมิเนียมหล่อผสมชนิดต่างๆ

งานวิจัยของ Morisada *et al.* [11] ศึกษาอนุภาค SiC ถูกทำให้กระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อของ AZ31 ด้วยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน อนุภาค SiC จะมีขนาดที่ละเอียดในเมตริกซ์ AZ31 หลังผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคบริเวณที่ถูกกวนของ SiC จะเล็กกว่าในบริเวณที่ไม่ถูกกวน ความแข็งบริเวณที่ถูกกวน (stir zone) มีค่าตั้งแต่ 80 Hv ขึ้นไป อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 400 องศา ขนาดของอนุภาค SiC ใน AZ31 มีการเติบโตที่ผิดปกติ จึงส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ต่อมาได้นำกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนไปทดลองกับ อะลูมิเนียม ADC12 โดย Nakata *et al.* [9] พบว่ากรรมวิธีเสียดทานแบบกวนเป็นเทคนิคในการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคในสถานะของแข็ง โดยการใช้ความร้อนจากแรงเสียดทานและแรงกวน กระบวนการนี้เกิดมาจากหลักการพื้นฐานของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อผสมถูกปรับปรุงขึ้น ค่าความแข็งของการใช้เทคนิคกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าความแข็งของโลหะเดิมประมาณ 20 Hv ส่วนค่าความแข็งแรงดึงของเทคนิคกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.7 เท่าเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเดิมไม่เพียงแต่การหายไปของ cold flake ในเนื้อโลหะเดิมซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้มีค่าสมบัติเชิงกลเพิ่มแล้ว ยังพบว่าเกรนมีขนาดละเอียดขึ้นทำให้มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนอย่างสม่ำเสมอ ยังมีงานวิจัยของ Karthikeyan *et al.* [2] วิเคราะห์กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนเป็นเทคโนโลยีทางวิศวกรรม สามารถกำจัดสิ่งบกพร่องโดยทำให้โครงสร้างจุลภาคมีเนื้อละเอียดขึ้น โดยการพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุ การวิจัยนี้แสดงผลกระทบของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้าง

จุลภาคและสมบัติเชิงกล ของอะลูมิเนียมหล่อ A2285 ที่มีความเร็วเดินกวนแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 10 มิลลิเมตร/นาที่ 12 มิลลิเมตร/นาที่ และ 15 มิลลิเมตร/นาที่ ภายใต้ความเร็วรอบของการหมุนของตัวกวนที่แตกต่างกัน 2 ค่า 1400 รอบ/นาที่ และ 1800 รอบ/นาที่ จากการทดลองพบว่า มีการเพิ่มความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงคราก และสมบัติความเหนียว เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม

ได้มีการนำอะลูมิเนียมหล่อ A356 มาทดลองใช้กับกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน โดยงานวิจัยของ MA *et al.* [13] ศึกษาผลของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อ A356 ผลการวิจัยพบว่า กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสามารถที่จะทำให้เนื้อของอะลูมิเนียมหล่อเป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น และยังสามารถกำจัดรูพรุน รวมทั้งยังทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคเล็กๆของ Si ในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคในกระบวนการกวนแบบเสียดทาน เช่น ความเร็วของตัวกวนที่ใช้ในการกวนเสียดทาน ยังมีงานวิจัยที่นำอะลูมิเนียม 2 ชนิดมาใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน เพื่อที่จะเปรียบเทียบหาสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดว่าอะลูมิเนียมเกรดใดดีกว่า ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Santella *et al.* [4] ได้มีการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลในอะลูมิเนียมหล่อผสม A319 และ A356 ที่ได้จากการกระบวนการหล่อแบบธรรมดา หลังจากนั้นนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน หัวพินที่ใช้เป็นแบบทรงกระบอก จากการศึกษาพบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อผ่านการกวน และโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกวนจะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนและยังมีความสัมพันธ์กับรูปร่างอนุภาคซิลิกอนอีกด้วย นอกจากนี้รูพรุนที่สามารถมองเห็นได้รวมทั้งโครงสร้างแบบเดนไดรต์ก็หมดไปเช่นกัน การกระจายตัวของความแข็งแรงในระดับจุลภาคจะมีรูปแบบเดียวกันมากขึ้น จากการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าอะลูมิเนียม A319 มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเนื้อโลหะเดิมแต่ในขณะเดียวกัน ค่าความแข็งแรงดึงจากอะลูมิเนียม A356 มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเนื้อโลหะเดิม ความสามารถที่โลหะผสมทั้ง 2 ชนิดจะทนความล้าได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าจากเนื้อโลหะเดิม

ยังมีงานวิจัยที่ใช้วัสดุจากการหล่อ โดยกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง เกรด 356 และศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง แต่ผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยงานวิจัยของ อับดุล บินระหีม [14] ทำการศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 356 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยการศึกษาความเร็วในการหมุนของตัวกวน และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม พบว่าโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมเป็นโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา (Al) ผสมกับเฟส Eutectic (Al+Si) ส่วนบริเวณที่ถูกกวนของความเร็วในการหมุน

ของตัวกวนสูงจะมีโครงสร้างใหม่เกิดขึ้น เกิดการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม ค่าความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม และค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมที่เชื่อมมีค่ามากกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไป โดยที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที ของความเร็วเชื่อม 160 มิลลิเมตร/นาที ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงสุด มีงานวิจัยที่ศึกษาลักษณะของตัวกวน เป็นงานวิจัยของ ชงชัย เครือฝื่อ [15] ได้ทดลองเปลี่ยนลักษณะของรูปแบบหัวพินระหว่างทรงกระบอกกับทรงสี่เหลี่ยม ใช้ความเร็วในการหมุนของตัวกวน คือ 1,750 รอบ/นาที ความเร็วในการเดินเชื่อม คือ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที พบว่าเกรนบริเวณที่ถูกกวนจะมีความละเอียด ค่าความแข็งแรงดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอกจะสูงกว่ารูปทรงสี่เหลี่ยม

จากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ากรรมวิธีเสียดทานแบบกวนทำให้อนุภาคของซิลิกอนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และขนาดเกรนของซิลิกอนในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียมมีความละเอียดขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมาปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น เพิ่มค่าความแข็ง และค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ได้จากการบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง ซึ่งอนุภาคมีลักษณะเป็นเกรนก้อนกลมขนาดใหญ่ได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความเร็วรอบของการหมุนตัวกวน และความเร็วเดินกวนของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน โดยใช้กับอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็ง และใช้หัวพินแบบทรงกระบอกเป็นตัวกวน

1.3 วัตถุประสงค์

ศึกษาตัวแปรเพื่อปรับปรุงค่าความแข็ง ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษาการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ได้จากการบวนการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน โดยกำหนดตัวแปรในการทดลอง คือ

- ความเร็วรอบการหมุนตัวกวน คือ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที

- ความเร็วเดินกวน คือ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที
- ใช้หัวพินแบบทรงกระบอก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างองค์ความรู้ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสม
2. ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้เบื้องต้นของการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะผสมที่ได้จากการหล่อทิ้งของแข็ง
3. ทำให้ทราบถึงตัวแปรในการกวนเสียดทานที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกล
4. ทำให้ทราบค่าความแข็งและความแข็งแรงดึงหลังจากการกวนแบบเสียดทานเพื่อนำไปใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง โดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน จะทำการศึกษาในเรื่องของความแข็ง และความแข็งแรงดึงหลังจากการใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน เพื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกล ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (light metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติที่เด่นหลายประการ ดังนี้

ประการที่ 1 มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูง จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่าง ในเครื่องบิน จรวด จีปนาอวกาศและอุปกรณ์ในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของยานพาหนะให้น้อยลงทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ตลอดจนชิ้นส่วนอากาศยาน เป็นต้น

ประการที่ 2 มีความเหนียว สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก มีจุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็น 64.94% IACS (International Association of Classification Societies) ซึ่งไม่สูงนัก และเนื่องจากมีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในกรณีที่คำนึงถึงเรื่องน้ำหนักเป็นสำคัญ

ประการที่ 3 เป็นโลหะที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย และมีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหารและห่อรองรับอาหาร

ประการที่ 4 ผิวหน้าของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีดัชนีการสะท้อนแสงสูงมาก จึงใช้ทำแผ่นสะท้อน ในแฟลชถ่ายรูป งานสะท้อนแสงในคอมไฟ และไฟหน้ารถยนต์ทนทานต่อการผุกร่อน ในบรรยากาศที่ใช้งานทั่วไปได้ดี แต่ไม่ทนทาน ต่อการกัดกร่อนของกรดเข้มข้น และด่างต่างๆไป ซึ่หาได้ง่าย ในท้องตลาด และราคาไม่แพงนัก

2.1.1 อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมเกรด A356 เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญมากในงานหล่อและถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โลหะผสมชนิดนี้เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีซิลิกอนผสมอยู่ในช่วง 6.5-7.5% โดยน้ำหนัก โดยมีธาตุแมกนีเซียม ทองแดง เหล็ก และแมงกานีส เป็นธาตุผสมรอง คุณสมบัติเด่นของโลหะกลุ่มนี้ได้แก่ (1) สมบัติการหล่อที่ดี (castability) (2) ความแข็งแรง (strength) สูง (3) ความเหนียว (ductility) สูงด้วยคุณลักษณะที่ดีดังกล่าวโลหะผสม A356 จึงถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น ล้อรถยนต์ โครงของรถบรรทุก และชิ้นส่วนเครื่องยนต์เพื่อลดน้ำหนักของรถซึ่งเป็นผลดีต่อการประหยัดเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม อะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด 356 ที่ใช้โดยส่วนใหญ่นั้นเกิดจากกรรมวิธีการหล่อด้วยแบบหล่อทราย (sand casting) แต่ปัญหาที่มักเจอกันโดยส่วนใหญ่ที่เกิดจากการหล่อด้วยแบบหล่อทราย คือ ปัญหารูพรุน แม้พิมพ์เกิดการโก่งตัวจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และตัวของแบบหล่อทรายเกิดการไหม้หรือเกิดการแตกร้าวของแบบหล่อ ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการหล่อด้วยแบบหล่อถาวร (die casting) โดยการหล่อแบบหล่อถาวร เป็นการหล่อที่สามารถลดการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อได้

2.1.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียมเป็นค่าสมบัติเฉพาะเพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาสมบัติทางโลหะวิทยาหรือเชิงกลในการนำไปใช้งานของอะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ มีสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

ลำดับ	สมบัติทางฟิสิกส์	ค่า	หน่วย
1.	หมายเลขอะตอม	13	
2.	น้ำหนักอะตอม	26.97	
3.	วาเลนซ์	3	
4.	โครงสร้างผลึก	F.C.C	
5.	มิติของแลตทิส	4.049	Å

ตาราง 2.1(ต่อ) สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

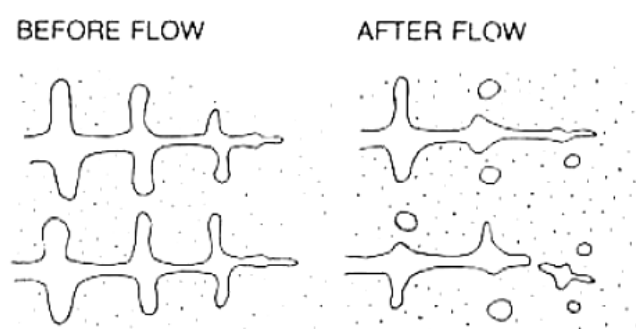
6.	ความหนาแน่นที่ 20 ⁰ C	2.6989	g/mm ³
7.	จุดหลอมเหลว	660.2	⁰ C
8.	จุดเดือด	2450	⁰ C
9.	การหดขณะแข็งตัว	6.6	%
10.	ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	94.5	cal/g
11.	ความร้อนจำเพาะที่ 100 ⁰ C	0.224	cal/g

2.2 ทฤษฎีกลไกการเกิดโลหะกิ่งของแข็งในการหล่ออะลูมิเนียม

แม้ว่าจะมีผู้พยายามอธิบายถึงกลไกในการเกิดโลหะกิ่งของแข็ง แต่จนกระทั่งปัจจุบันก็ยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่ชัดเจนเกี่ยวกับกลไกการเกิดโลหะกิ่งของแข็งได้ โดยทฤษฎีการเกิดโลหะกิ่งของแข็งที่สำคัญมีดังต่อไปนี้คือ

2.2.1 การแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ (dendrite fragmentation)

ทฤษฎีนี้ได้อธิบายว่าการเกิดขึ้นของโครงสร้างโลหะกิ่งของแข็ง เกิดจากการแตกตัวของกิ่งเดนไดรต์ทำให้อนุภาคที่แตกออกมามีปริมาณเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ (grain multiplication) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ ทำให้อนุภาคหรือเกรนเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ

ที่มา : Flemings *et al.*[16]

จากรายงานของ Flemings *et al.*[16] ได้เสนอถึงความเป็นไปได้ของสาเหตุที่กึ่งของเดนไดรต์เกิดการแตกตัว โดยแบ่งออกเป็นสามสาเหตุหลัก คือ

1. แขนของเดนไดรต์หักออกจากบริเวณโคน (roots) เนื่องจากแรงเฉือน (shear forces) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะซึ่งเป็นการยากที่จะประมาณค่าของแรงที่ทำให้แขนของเดนไดรต์เกิดการหักออก และด้วยข้อจำกัดหลายประการ กล่าวคือ เดนไดรต์เริ่มต้นจะต้องเป็นผลึกที่สมบูรณ์ปราศจากข้อบกพร่อง เช่น ช่องว่าง (void) หรือ ดิสโลเคชัน (dislocation) เป็นต้น ซึ่งหากเดนไดรต์เริ่มต้นมีข้อบกพร่องดังกล่าวจะทำให้ยากแก่การหักออกจึงทำให้ทฤษฎีนี้เกิดข้อโต้แย้งมากมายและไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควร

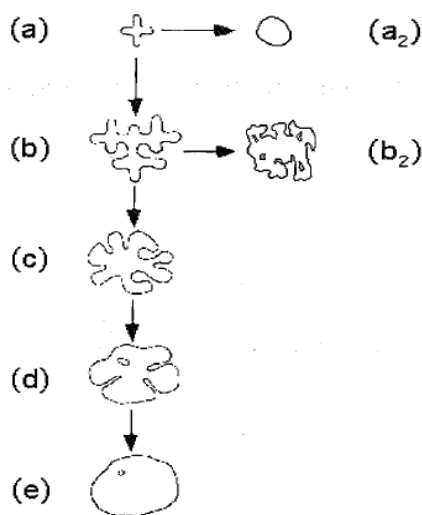
2. แขนของเดนไดรต์หลอมออกจากบริเวณโคนเนื่องจากกระบวนการ Ripening ทำให้ปริมาณตัวถูกละลาย (solute) บริเวณโคนมีความเข้มข้นมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้จุดหลอมเหลวบริเวณนั้นลดต่ำลง จึงเป็นสาเหตุให้เกิดแขนของเดนไดรต์ถูกหลอมออกจากบริเวณโคนและหลุดออกมา

3. อีกกลไกที่นำเสนอโดย Vogel *et al.* [17] ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมโดย Doherty *et al.* [18] พวกเขาได้นำเสนอกลไกที่แตกต่างออกไป คือ พวกเขาเชื่อว่าแขนของเดนไดรต์จะเกิดการบิด (bend) และมีการเสียรูปแบบพลาสติกด้วยแรงเค้น (stress) ซึ่งความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain) ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของดิสโลเคชัน โดยที่อุณหภูมิหลอมเหลว ดิสโลเคชันสามารถปีน (climb) และรวมกันจนเกิดเป็นขอบเขตของเกรน โดยเมื่อมุมที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า 20 องศา จะทำให้พลังงานตรงขอบของเกรนมีค่ามากกว่าพลังงานบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างของแข็งและของเหลว 2 เท่า ซึ่งจะทำให้ขอบของเกรนเกิดการเปื่อยด้วยน้ำโลหะทำให้แขนหรือกึ่งของเดนไดรต์หลุดออกมา

2.2.2 กลไกการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Rheocasting

แม้ว่าในขั้นตอนการเกิดอนุภาคกึ่งของแข็งยังไม่เป็นที่สรุปแน่นอน แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าการสร้างจำนวน “นิวเคลียส” เริ่มต้นที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก จะใช้ระยะเวลาในการเกิดเกรนแบบก่อนกลมที่สั้นเพราะการเกิดจะเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบ Equiaxed ซึ่งแสดงตามเส้นทาง (a)-(a₂) ในภาพที่ 2.2 ในทางตรงกันข้ามหากขนาด “นิวเคลียส” เริ่มต้นที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่ช้าจะทำให้เกิดโครงสร้างแบบก่อนกลมที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงตามเส้นทาง (a) ไปยัง (c) โดยเส้นทางนี้จะใช้เวลาในการเกิดที่

ยาวนานกว่าและหากจำนวน “นิวเคลียส” ที่เกิดขึ้นมีจำนวนไม่เพียงพอโครงสร้างที่ได้ก็จะไม่เป็นก้อนกลมแม้จะใช้เวลานานก็ตาม ดังแสดงตามเส้นทาง (a) ไปยัง (b₂)



ภาพที่ 2.2 เส้นทาง การเติบโต (growth) และการ coarsening ของอนุภาคของแข็ง
ที่มา : Flemings and Johnson [19]

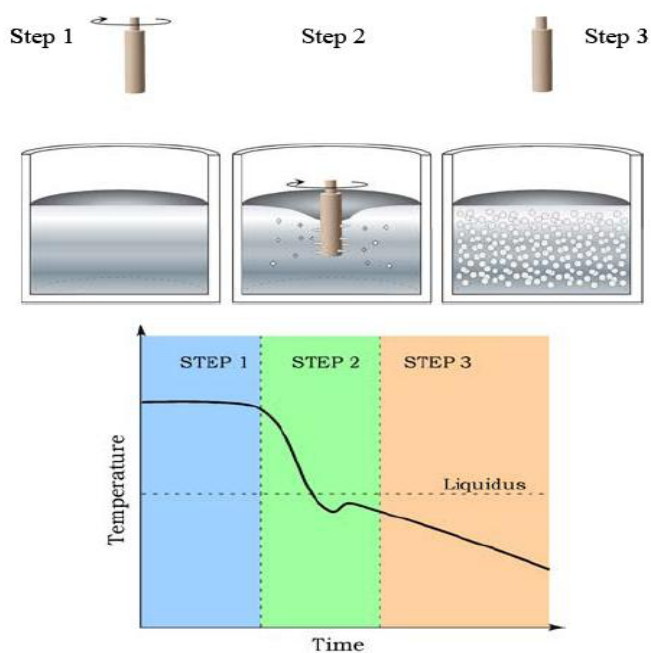
2.2.3 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการหล่อแบบรีโอคาสติง (Rheocasting)

เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal; SSM) ได้มีการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ก็ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายทำให้ข้อได้เปรียบและประโยชน์ของการหล่อโลหะกึ่งของแข็งไม่ได้นำมาใช้อย่างเต็มที่ การพัฒนากระบวนการผลิตแบบ Rheocasting เป็นการลดต้นทุนในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง และเพื่อให้เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในการหล่อ Die casting ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้นอกจากการเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ โดยการลดต้นทุนการผลิตได้มาจากปัจจัยต่างๆ เช่นการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (cycle time) การลดของเสีย (reject) การเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และการลดต้นทุนในการอบชุบ เป็นต้น

ในปัจจุบันกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างสุดท้ายมีลักษณะเป็น โครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เช่น กรรมวิธีการกวนทางกล (mechanical stirring) การกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic stirring) การสั่นด้วยอัลตราโซนิค (ultrasonic vibrations) ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวล้วนต้องอาศัยตัวกลางเพื่อให้เกิดการไหลวน (agitation) ทั้งสิ้นโดยในกรรมวิธีการกวนทางกลจะ

ใช้ใบพัดหรือแท่งทรงกระบอกเพื่อให้เกิดการไหลวน กรรมวิธีการกวนด้วยแม่เหล็ก ไฟฟ้าอาศัยแรงทางไฟฟ้าเป็นตัวพาให้เกิดการไหลวนของของเหลว ส่วนการสั่นก็เป็นวิธีการทำให้เกิดการไหลวนด้วยเช่นกันแต่กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นก็มีข้อเสียหลายประการ เช่น ราคาที่สูงและการเกิดไมโครเซกกริเกรชันเนื่องจากการกวนที่สัดส่วนของแข็งสูงๆ หากมองย้อนไปดูหลักการเกิดโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เป็นที่ชัดเจนว่าหากต้องการให้เกิดการแตกตัวของกิ่งเดนไดรต์จะต้องทำให้เกิดการไหลวนในช่วงก่อนที่จะมีการแข็งตัวเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่กิ่งของเดนไดรต์มีขนาดเล็กมากและอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าสูง

ด้วยหลักการดังกล่าวทำให้ Flemings [19] และ Martinez [20] ได้แสดงให้เห็นว่า หากจุ่มและหมุนแท่งโลหะเย็นลงในน้ำโลหะที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว โดยใช้เวลาในการหมุนแท่งโลหะเพียงเล็กน้อยจนเริ่มมีสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงยกแท่งโลหะขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.3 จะพบว่าโครงสร้างของโลหะภายหลังการเย็นตัวจะมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลม โดยพวกเขาเรียกกระบวนการผลิตนี้ว่า Semi-Solid Rheocasting (SSR)



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-Solid Rheocasting (SSR)

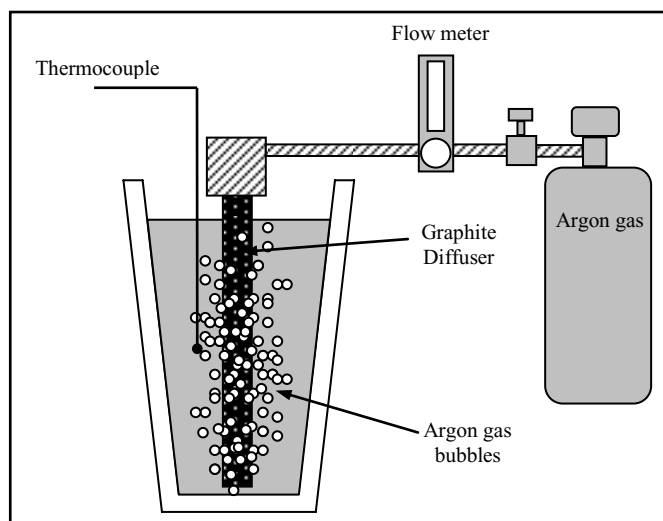
ที่มา : Martinez [20]

ซึ่งต่อมา Martinez [20] ได้แสดงให้เห็นว่าการสร้างโลหะกิ่งของแข็งสามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพจากการกวนน้ำโลหะเฉพาะจุดและเกิดจากการระบายความร้อนจากน้ำโลหะเฉพาะจุดอย่างรวดเร็ว (rapid localized heat extraction)

แม้ว่ากระบวนการผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีดังกล่าวจะสามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ประสบปัญหาหลายประการในขั้นตอนของการผลิต เช่น การต่อระบบให้ความเย็นด้วยน้ำและระบบเซ็นเซอร์เข้ากับแท่งที่หมุนซึ่งเป็นวิธีที่สลับซับซ้อนและยากต่อการติดตั้ง นอกจากนี้ระหว่างที่วัตถุหมุนจะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะ ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นได้ในขั้นตอนนี้

2.2.4 การผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว

กระบวนการหล่อโลหะกิ่งของแข็งด้วยเทคนิคการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัวโดย เจษฎา วรรณสินธุ์ [1] เป็นกระบวนการสร้างโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน (แก๊สอาร์กอน) ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกิ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (spheroidal grain) คุณสมบัติของโลหะกิ่งของแข็งมีหลายประการเช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว
ที่มา : เจษฎา วรรณสินธุ์ [1]

2.3 กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

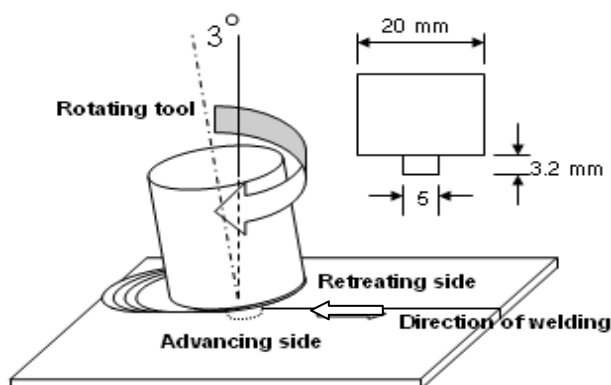
กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนเป็นการดัดแปลงมาจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และตามคุณลักษณะเฉพาะของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถนำมาพัฒนากรรมวิธีใหม่ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุ ซึ่งมีคุณลักษณะดังนี้ [21]

- ขนาดของเกรนมีความละเอียดในบริเวณที่ทำการกวน
- แก้ไขจุดบกพร่องและรูพรุนที่เกิดจากการหล่อ
- โครงสร้างของเกรนกระจายสม่ำเสมอในบริเวณที่ทำการกวน
- ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างบริเวณผิวด้านบนและผิวบริเวณที่ถูกกวนของชิ้นงาน โดยใช้วิธีทางกล

- ความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำ
- มีการไหลวนเชิงพลาสติกบนวัสดุ

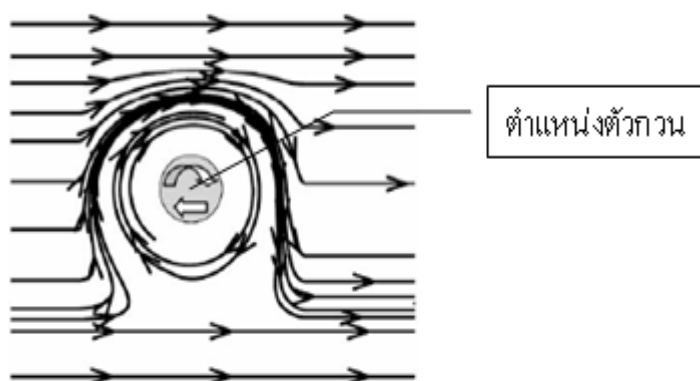
ดังนั้นกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนเป็นกระบวนการที่สามารถนำมาใช้ปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคและทำให้เกรนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในบริเวณที่ทำการกวน นอกจากนี้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนยังสามารถแก้ไขรูพรุนที่เกิดจากการหล่อโลหะ ซึ่งกรรมวิธีเสียดทาน

แบบกวนเป็นเทคนิคที่ใช้ในสถานะของแข็ง มีหลักการทำงาน คือ ใช้ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียด ทำให้เนื้อโลหะเป็นเนื้อเดียวกันด้วยวิธีการกวน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากการที่บ่าของตัวกวนสัมผัสกับแผ่นชิ้นงานที่จะทำการกวน และหมุนด้วยความเร็วรอบตามที่กำหนดพร้อมกับความเร็วเดินกวน และแรงกดในขณะที่กวน กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการกวนคือ แรงกด ความเร็วรอบของตัวกวน ความเร็วเดินกวน และมุมเอียงของตัวกวน ส่วนการออกแบบตัวกวนที่จะนำมาใช้สามารถนำมาประยุกต์ใช้จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ ตามรายงานวิจัยของ Elangovan and Blasubramanian [22] พบว่าตัวกวนถูกออกแบบเป็นพิเศษ โดยบ่าของตัวกวนหมุนสัมผัสแผ่นงานที่ทำการเชื่อม ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้ชิ้นงานอยู่ในสถานะของแข็ง เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ทำให้อนุภาคอะลูมิเนียมผสมที่ได้ ถูกกวนจนแตกหักเป็นอนุภาคที่ละเอียดในบริเวณที่ถูกกวน โดยมีพารามิเตอร์ในการเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม แรงกดและมุมเอียงของตัวกวน ในการเชื่อมตัวกวนหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ในการออกแบบตัวกวนเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่า 20 มิลลิเมตร หัวพินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาว 3.2 มิลลิเมตร ความยาวของหัวพิน จะมีค่าน้อยกว่าความหนาของแผ่นงาน ในการเชื่อมชิ้นงานจะถูกยึดด้วยอุปกรณ์จับยึด มุมของตัวกวนเอียง 3 องศา จากแนวตั้ง และหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังภาพที่ 2.5 บริเวณรอยกวนประกอบไปด้วย บริเวณที่ถูกกวน และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนซึ่งประกอบด้วยด้าน advancing side และด้าน retreating side ซึ่งด้าน advancing side คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนมีทิศทางเดียวกับทิศทางการเดินของแนวกวน ส่วนทางด้าน retreating side คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนมีทิศทางสวนทางกับทิศทางการเดินของแนวกวน



ภาพที่ 2.5 การหมุนของตัวกวนบนชิ้นงานด้วยการเสียดทานแบบกวน

ที่มา : Elangovan and Blasubramanian [22]



ภาพที่ 2.6 ทิศทางและการกวนของตัวกวน

ที่มา : Nandan *et al.* [23]

Kim *et al.* [24] กล่าวว่า เมื่อปาสัมผัสแผ่นงาน เกิดการเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนและเนื้อโลหะอยู่ในสภาวะอ่อนตัว การไหลวนของโลหะกึ่งของแข็งรอบตัวกวน ขณะที่ตัวกวนหมุนด้วยความเร็วรอบ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดินกวน ทำให้เนื้อโลหะประสานติดกันด้วยการกวน ดังภาพที่ 2.6

2.3.1 ความร้อนจากกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

Kim *et al.* [24] พบว่าความสัมพันธ์ของความเร็วรอบการหมุนของตัวกวน ความเร็วเดินกวน รัศมีของบ่าที่ใช้ และแรงกด ก่อให้เกิดความร้อนในงานกวน ผลจากความร้อนที่มากหรือน้อยเกินไป ความเร็วรอบของการหมุนของตัวกวนกวน และความเร็วเดินกวน เป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบนและส่วนที่ถูกกวน ทำให้เกิดช่องว่างในรอยกวน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะการกวนสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.1

สมการความร้อนที่เกิดขึ้นกับกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนดังนี้

$$Q = \frac{4}{3} \phi^2 \frac{\zeta \sigma PNR^3}{V} \quad (2.1)$$

เมื่อกำหนดให้

Q	คือ ปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ (จูล/มิลลิเมตร)
σ	คือ สัมประสิทธิ์ของการเสียดทานทางกล
α	คือ ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายความร้อน
P	คือ แรงกด (นิวตัน)
N	คือ ความเร็วรอบการหมุนของตัวกวน (รอบ/วินาที)
R	คือ รัศมีของบ่า (มิลลิเมตร)
V	คือ ความเร็วเดินกวน (มิลลิเมตร/นาที)

2.4 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา

เป็นการตรวจสอบ โครงสร้างทางกายภาพ ลักษณะ และขนาดของเกรน ที่เกิดจากการกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน รวมทั้งบริเวณเขตอิทธิพลของความร้อนด้าน retreating Side and advancing Side กัดผิวชิ้นทดสอบด้วยสารละลาย Keller's Reagent และนำไปตรวจสอบ โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ การตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยามีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ดังนี้

1. ตรวจสอบความสมบูรณ์ของการกวน
2. การตรวจสอบการกระจายตัวและลักษณะของเกรน
3. ตรวจสอบโครงสร้างบริเวณที่ถูกกวน เขตอิทธิพลความร้อน และเนื้อโลหะ

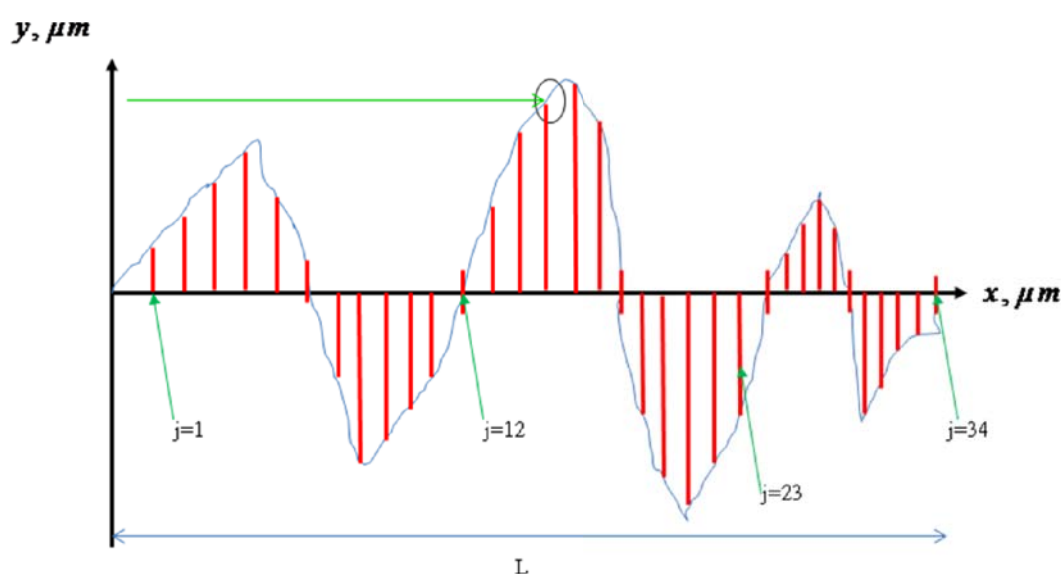
เดิม

2.5 การทดสอบความขรุขระของพื้นผิว

เครื่องวัดความเรียบที่มีการใช้งานอยู่แพร่หลายเป็นเครื่องมือเชิงกล ที่ใช้หลักการของหัวลาก (stylus profile instrument) โดยที่หัวลากนี้จะมีขนาดเล็กและมีให้เล็กละเอียดขึ้นอยู่กับความละเอียด ในขณะที่ทำการวัดหัววัดจะถูกลากไปบนผิวของชิ้นงาน และหัวลากก็จะสัมผัสเลื่อนตามลักษณะของพื้นผิวซึ่งก็จะส่งสัญญาณออกไปยังส่วนประมวลผลและแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟและค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของแอมพลิจูดสูงสุด ความกว้างของลูกคลื่น ค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูด มีวิธีการหาค่าความขรุขระ ดังนี้

(1) ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic average; R_a)

ถ้าลากเส้นในแนวนอนผ่านเส้นกึ่งกลางของเส้นรอบรูปที่ตัดค่าความเป็นคลื่นออกจนเหลือแต่ค่าความขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 เส้นนี้เรียกว่าเส้นกึ่งกลาง โดยแบ่งพื้นที่ระหว่างเส้นขอบรูปกับเส้นกึ่งกลางเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ค่าในแนวตั้งวัดจากเส้นกึ่งกลางจะเรียกว่าค่า y และค่าเฉลี่ยเลขคณิต จะนำมาใช้เป็นค่าความขรุขระ



ภาพที่ 2.7 การหาค่าความขรุขระแบบค่าเฉลี่ยเลขคณิต

นั่นคือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต = ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของพื้นที่ใต้กราฟเส้นขอบรูป/ระยะทางในการวัดตามแนวนอน ดังสมการที่ 2.2

$$R_a \mid \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.2)$$

หรือถ้าแบ่งระยะทาง ออกเป็น n ส่วน โดยที่ n มีค่าสูงพอ ดังสมการที่ 2.3 ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต เป็นค่าที่นิยมใช้ระบุความขรุขระของพื้นผิว เพราะมีการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็น ส่วนย่อยๆ ทำให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

$$R_a \mid \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j| \quad (2.3)$$

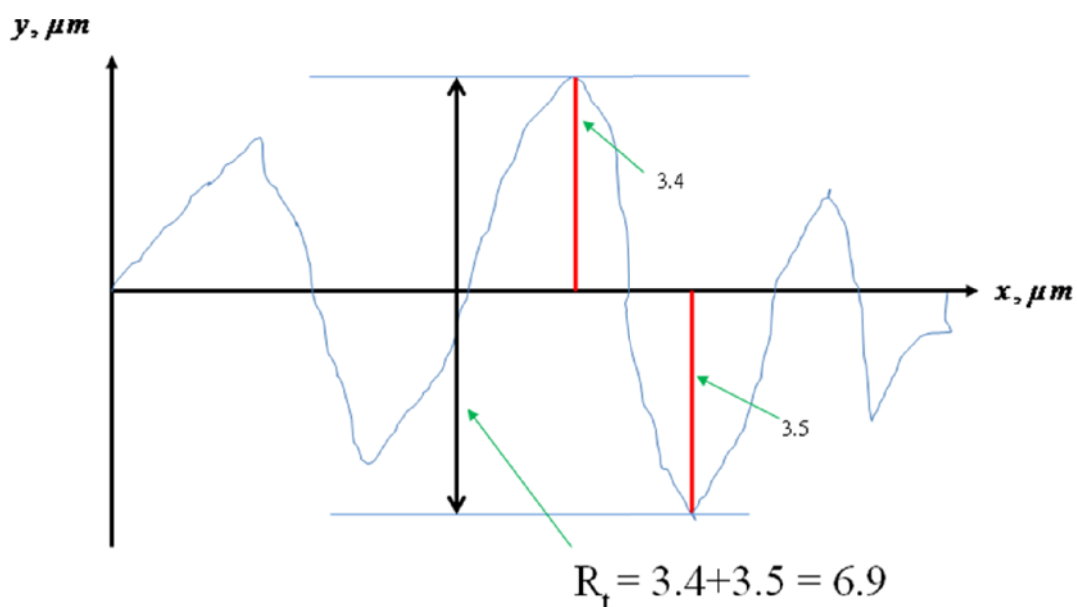
(2) ค่าเฉลี่ยรูทมีนสแควร์ (root mean square average; R_q หรือ R_{rms})

การคำนวณหาค่าความขรุขระตามวิธีรูทมีนสแควร์ เป็นความพยายามที่จะนำเอาหลักการทางสถิติมาใช้ในการวัดค่าความขรุขระ โดยใช้สูตรการคำนวณโดยอาศัยการยกกำลังสองของ y เพื่อให้ค่า y ที่มีค่าลบ กลายเป็นค่าบวกของ y^2 จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของ y^2 แล้วจึงถอดรูทฐานสองเพื่อให้หน่วยของการวัดเป็นหน่วยยกกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 2.4

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2} \quad (2.4)$$

(3) ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด (maximum distance between peak to valley; R_t)

ค่า R_t เป็นค่าผลรวมของยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด เท่าที่วัดได้จากความยาวหรือที่วัดจากพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 2.8

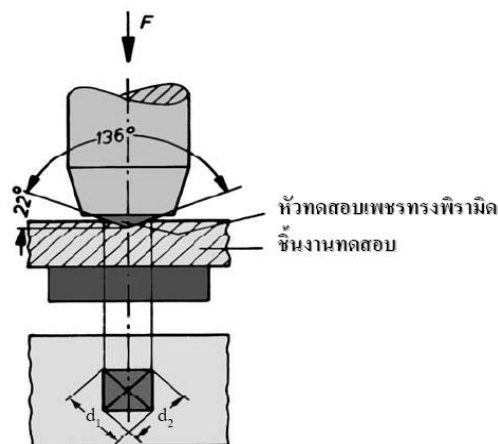


ภาพที่ 2.8 การหาค่าความขรุขระแบบค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด

ค่า R_c มีความหมายในการปฏิบัติงาน คือ เป็นค่าที่บอกได้ว่า ในการจะจัดเนื้อผิว ตัวอย่างนี้ จะต้องจัดเนื้อผิวออกเป็นความลึก ไม่น้อยกว่าค่า R_c จึงจะทำลายผิวเดิมได้หมด แต่เนื่องจากค่า R_c วัดค่าได้ไม่แน่นอนเพราะเป็นค่าสูงสุดเพียงค่าเดียวซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของผิวที่วัด จึงไม่นิยมมาใช้ในการวัดค่าความขรุขระ

2.6 การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นทดสอบ การทดสอบความแข็งที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ บริเนลล์ ร็อกเวลล์ และวิกเกอร์ส สำหรับในงานวิจัย ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ส เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส จะเหมาะสำหรับการวัดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวทวน โดยในการวัดความแข็งจะใช้หัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา ดังภาพที่ 2.9 โดยเวลาที่ใช้ในการกด 10 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมากค่าความแข็งประมาณ 5 kgf/mm² จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ ประมาณค่าความแข็งประมาณ 1,500 kgf/mm² โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีค่าระหว่าง 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะ



ภาพที่ 2.9 แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์

การวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ บริเวณภาคตัดตามยาวรอยกวน เพื่อหาว่าในแต่ละบริเวณของชิ้นทดสอบกวนมีค่าความแข็งภายในเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันมากน้อยเพียงใด จากการคำนวณโดยใช้สมการ 2.5

$$Hv = \frac{1.854P}{d^2} \quad (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้

Hv	คือ ค่าความแข็งแบบ Vickers (kgf/mm ²)
P	คือ แรงกด (kgf)
d	คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d ₁ และ d ₂ เฉลี่ย (mm)

2.7 การทดสอบความแข็งแรงดึง

เป็นการทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงของกรรมวิธีเสียคทานแบบกวน โดยการทดสอบแรงดึงของรอยกวน ใช้ชิ้นทดสอบแบบลดขนาด นำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบแรงดึง โดยตัดตามยาวกับแนวกวน นำไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} มิลลิเมตร/วินาที โดยใช้มาตรฐาน ASTM (E8)

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

เป็นการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบบันทึกผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าทดสอบของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย คือสถิติเชิงพรรณนา (descriptive Statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด สถิติเชิงอนุมาน (inferential Statistic) เพื่อหาค่าความแปรปรวน และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดอยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล คือ ในแต่ละซ้ำของการทดลองประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $a \cdot b$ การทดลอง โดยปกติ จะมีจำนวนทำซ้ำทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ y_{ijk} คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับซ้ำที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง $a \cdot b \cdot n$ ครั้ง เลือกมาอย่างสุ่ม ส่วนแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (linear statistical model) สมการ (2.6)

$$y_{ijk} = \mu + \sigma \epsilon_{ijk} + \eta_i + \tau_j + \lambda_{ij} + \kappa_{ijk} \quad \begin{matrix} [i | 1, 2, \dots, a \\ [j | 1, 2, \dots, b \\ [k | 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (2.6)$$

โดยที่ σ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด ϵ_{ijk} หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถวของปัจจัย A η_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลัมน์ของปัจจัย B λ_{ij} หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง ϵ_{ijk} กับ η_j และ κ_{ijk} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (fixed) และผลจากการทดลอง (treatment effect) หมายถึงส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดดังนั้น $\sum_{i=1}^a \epsilon_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \eta_j = 0$ ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัวและกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a \lambda_{ij} = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \lambda_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนทำซ้ำ n ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ $a \cdot b \cdot n$

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจากความเร็วรอบ (A) และความเร็วเดินกวน (B) มีความสำคัญเท่ากัน

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากความเร็วรอบ

ϵ คือ ความเร็วรอบของกรรมวิธีเสียคทานแบบกวน

$\Gamma_0: \epsilon_1 = \epsilon_2 = \dots = \epsilon_a = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วนรอบไม่แตกต่างกัน

$\Gamma_1 : \psi_1 \neq \psi_2 \neq \dots \neq \psi_k \neq \psi_0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากความเร็วเดินกวน

η คือ ความเร็วเดินกวน

$\Gamma_0 : \eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_b = 0$ สำหรับทุกระดับอิทธิพลของความเร็วเดินกวนไม่แตกต่างกัน

$\Gamma_1 : \eta_1 \neq \eta_2 \neq \dots \neq \eta_j \neq \eta_0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินกวนแตกต่างกัน

ผลของอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างความเร็วรอบและความเร็วเดินกวน

$\Gamma_0 : \psi_{ij} = 0$ ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของ Interaction $/i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 0$

$\Gamma_1 : \psi_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของ Interaction $/i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 0$

2.8.2 สมมติฐานในการทดลอง

เป็นการทดสอบตัวแปรที่ถูกกำหนดในการทดลองว่ามีอิทธิพลต่อการทดลองหรือไม่โดยตั้งสมมติฐานหลักและความสัมพันธ์ของตัวแปร ตรวจสอบผลด้วยค่าทางสถิติดังนี้

พิจารณา Main Effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วรอบ

ψ_1, ψ_2, ψ_3 คือ ความเร็วรอบของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

$H_0 : \psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \psi_1 \neq \psi_2 \neq \psi_3 \neq \psi_0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วเดินกวน

η_1, η_2, η_3 คือ ความเร็วเดินกวน

$H_0 : \eta_1 | \eta_2 | \eta_3 | 0$ สำหรับทุกระดับอิทธิพลของความเร็วเดินกวนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \eta_1 \Pi \eta_2 \Pi \eta_3 \Pi 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินกวนแตกต่างกัน

พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยา ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วเดินกวน

$H_0 : \eta_{ij} | 0$ ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของ Interaction $|i| 1,2; |j| 1,2,3,0$

$H_1 : \eta_{ij} \Pi 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของ Interaction $|i| 1,2; |j| 1,2,3,0$

2.8.3 การเปรียบเทียบพหุคูณ (multiple comparisons)

ในการทดสอบ F-Test จะเห็นว่าเป็นการทดสอบโดยรวม (over all test) ซึ่งเป็นการทดสอบว่าจะมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (significant) ก็จะบอกเพียงว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกันแต่จะไม่บอกว่าเป็นคู่ใด ซึ่งเราจะต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณจะอธิบายการเปรียบเทียบพหุคูณเฉพาะมีเงื่อนไขความเท่ากันของความแปรปรวนและบางวิธีที่นิยมใช้กัน

(1) Least - Significant Difference (LSD)

วิธีการเปรียบเทียบพหุคูณแบบ LSD หรือ Fisher's Least – Significant Difference เป็นเทคนิคที่ R.A. Fisher ได้พัฒนาขึ้นหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประชากรครั้งละหลายคู่ โดยใช้สูตร ดังสมการ 2.7

$$LSD | t_{\zeta/2, N-4a} \sqrt{\frac{2MS_E}{n}} \quad (2.7)$$

ค่า MS_E ได้จากการคำนวณหาค่าความแปรปรวน One Way ANOVA โดยมี
ขั้นตอนดังนี้

- 1) คำนวณค่า LSD
- 2) คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย \bar{X}_i และ \bar{X}_j
- 3) นำค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ เปรียบเทียบกับ ค่า LSD
 - 3.1 ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > \text{ค่า LSD}$ แสดงว่า $\sigma_i \neq \sigma_j$
 - 3.2 ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq \text{ค่า LSD}$ แสดงว่า $\sigma_i = \sigma_j$

(2) Turkey's Test

เป็นวิธีการเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขที่ว่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีขนาด
เท่ากัน $n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n_K = n$ โดยมีสูตรดังนี้ ดังสมการ 2.8

$$T_\zeta = q_\zeta(a, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (2.8)$$

ค่า MS_E ได้จากการคำนวณหาค่าความแปรปรวน One Way ANOVA โดยมี
ขั้นตอนดังนี้

- 1) คำนวณค่า T_ζ
- 2) คำนวณค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$
- 3) เปรียบเทียบค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ กับค่า T_ζ โดย
 - 3.1 ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > T_\zeta$ แสดงว่า $\sigma_i \neq \sigma_j$
 - 3.2 ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq T_\zeta$ แสดงว่า $\sigma_i = \sigma_j$

(3) The Scheffe's Method

การเปรียบเทียบพหุคูณโดยวิธี Scheffe นั้นสามารถใช้ได้กับกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาด
เท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ โดยใช้สูตร ดังสมการ 2.9

$$CV_d = \sqrt{(a-1)(F^*)(MS_E)\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)} \quad (2.9)$$

F^* คือ ค่า F ที่เปิดจากตารางค่าวิกฤตของ F โดยมี $df_1 = a-1, df_2 = N-a$
 MS_E คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณความแปรปรวนภายในกลุ่มซึ่งได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ขั้นตอนการเปรียบเทียบพหุคูณ โดยวิธีของ Scheffe มีดังนี้

- 1) คำนวณค่า CV_d
- 2) คำนวณค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$
- 3) เปรียบเทียบ $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ กับค่า CV_d โดย
 - 3.1 ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > CV_d$ แสดงว่า $\sigma_i \neq \sigma_j$
 - 3.2 ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq CV_d$ แสดงว่า $\sigma_i = \sigma_j$

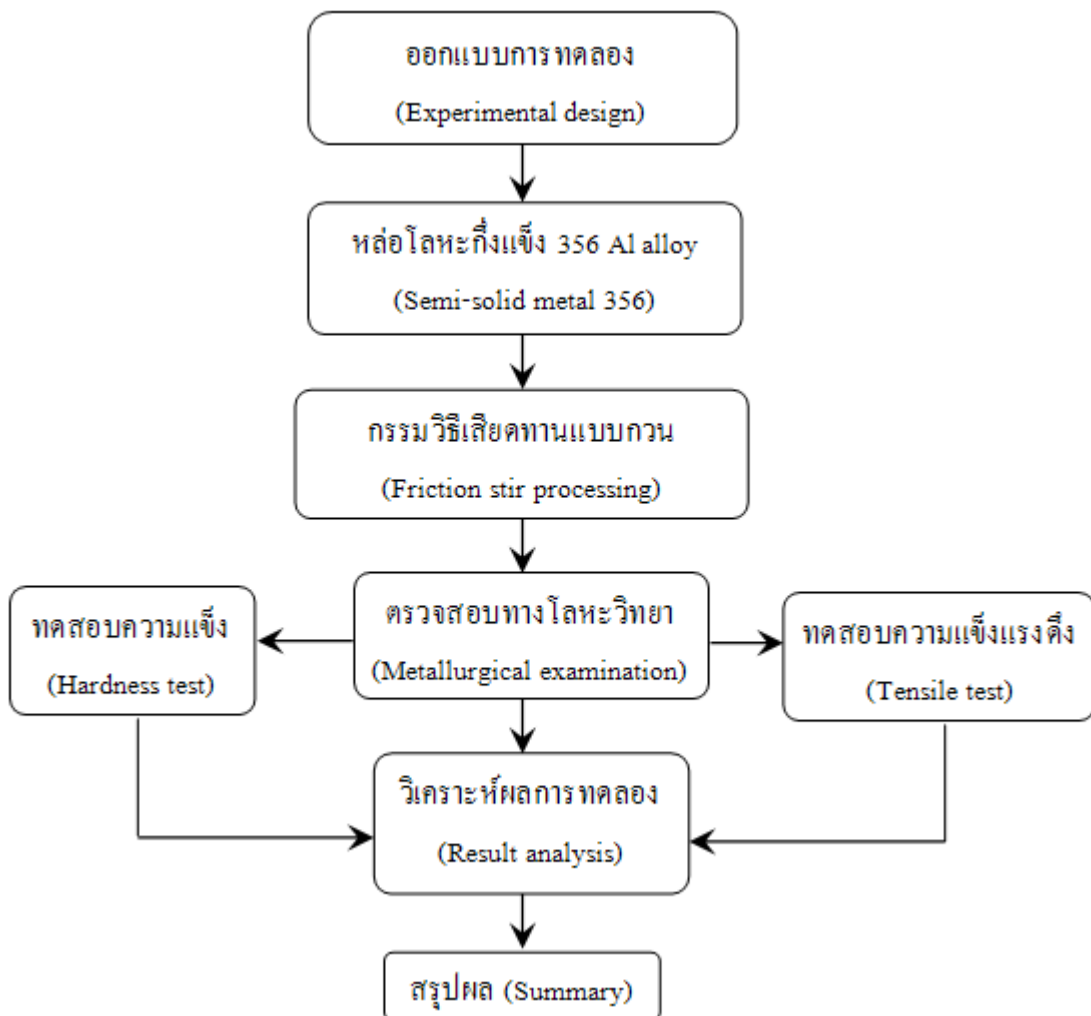
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ และขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติเชิงกล

3.1 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัย

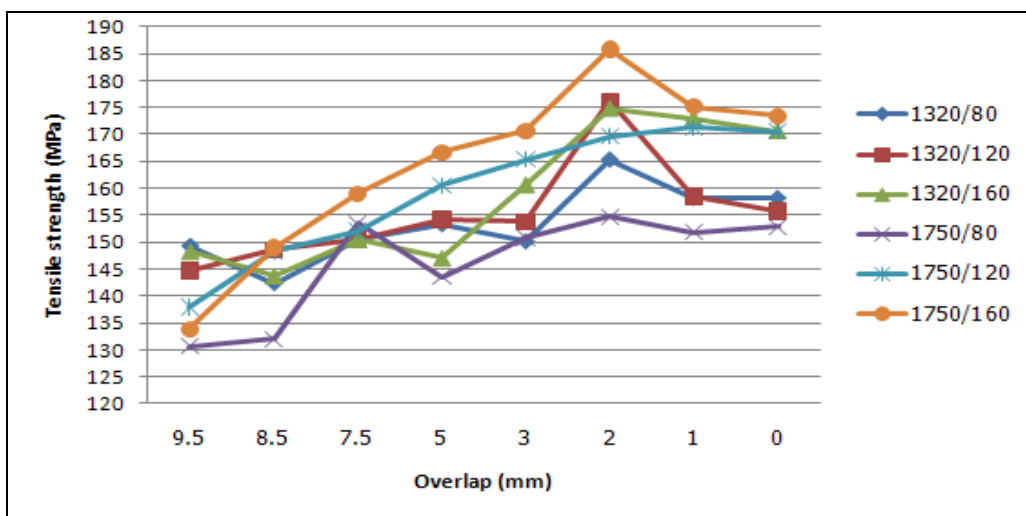
ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินการ ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2 การออกแบบการทดลอง

การทดลองเบื้องต้น (Preliminary experiment) ทำการทดลองโดยใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุด โดยทำการทดลองที่ระยะซ้อนทับกันของบ่า คือ 9.5, 8.5, 7.5, 5, 3, 2, 1 และ 0 มิลลิเมตร พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงที่ระยะซ้อนทับกันของบ่า 2 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 กราฟค่าความแข็งแรงดึงของการซ้อนทับกันของบ่าในการกวน

3.3 การหล่อโลหะกึ่งของแข็ง

3.3.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม 356 (wt.%)

วัสดุ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
356	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Bal.

อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งด้วยเทคนิคการพ่นฟองแก๊สในน้ำโลหะ จะทำการหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 620 องศา

เซลเซียส จะใช้แก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พูน (แก๊สอาร์กอน หรือ ไนโตรเจน) เพื่อให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะเกิดการแตกตัวของโครงสร้างเดนไดรต์ เป็นเวลา 20 วินาที จากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปเทลงใน Mold แบบทรงกลมแล้วอัด (squeeze) ดังแสดงในภาพที่ 3.3 (ก) และ (ข)



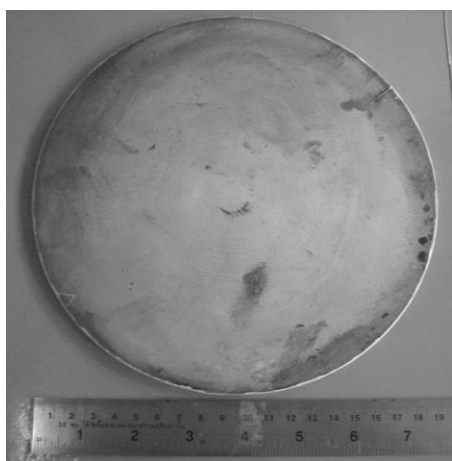
(ก) lower die



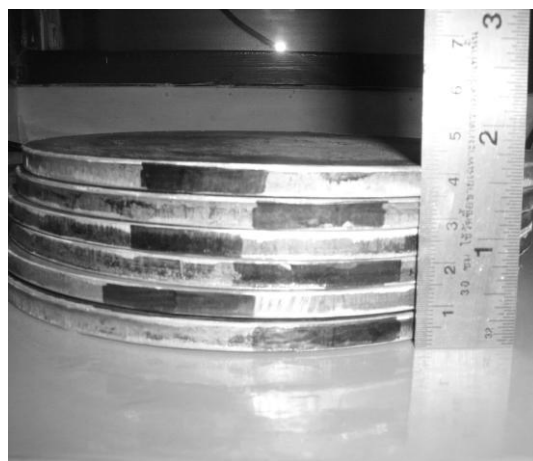
(ข) upper die

ภาพที่ 3.3 Mold ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

โดยใช้ความดันในการอัดไม่น้อยกว่า 2,000 psi ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 6-8 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.4 (ก) และ (ข)



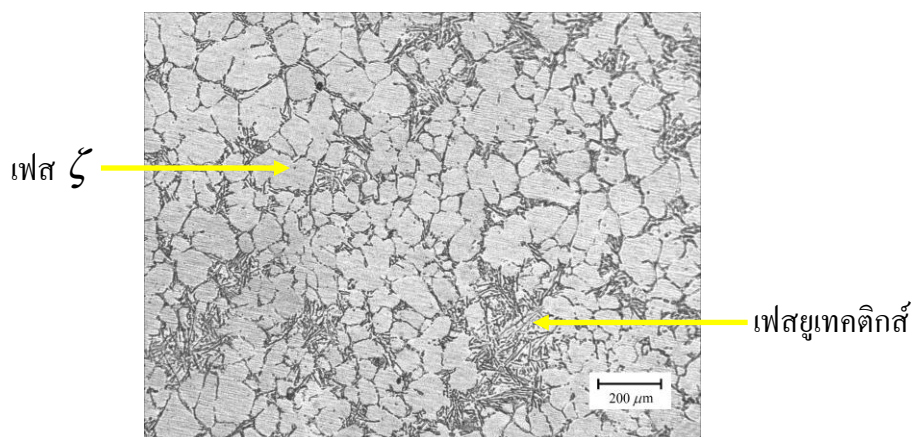
(ก) ชิ้นงานแผ่นกลมที่มีขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร



(ข) ชิ้นงานแผ่นกลมที่มีความหนา
ประมาณ 6-8 มิลลิเมตร

ภาพที่ 3.4 ชิ้นทดสอบของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 356

โครงสร้างที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็งซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (ก้อนสีขาว) เป็นเฟสอะลูมิเนียม (ζ) และบริเวณเฟสยูเทคติกส์ ประกอบด้วยเฟสอะลูมิเนียมผสมกับเฟสซิลิกอน (สีดำสลับขาว) ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างของอะลูมิเนียม เกรด 356 ที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง

3.3.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 356 ที่ผ่านการหล่อแบบอัด (squeeze casting) นำไปทำการปรับขนาดผิวชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (milling) ยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องกัดแนวตั้ง

โดยกััดให้มีขนาดความหนา 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.7 (ก) และ (ข) แล้ว ตัดชิ้นงานด้วยเครื่องเลื่อยสายพานให้มีขนาด ความกว้าง x ความยาว x ความหนา (70 x 140 x 4 มิลลิเมตร) จะได้ชิ้นทดสอบจำนวน 2 ชิ้นต่อหนึ่งแผ่นที่หล่อ ดังแสดงในภาพที่ 3.8

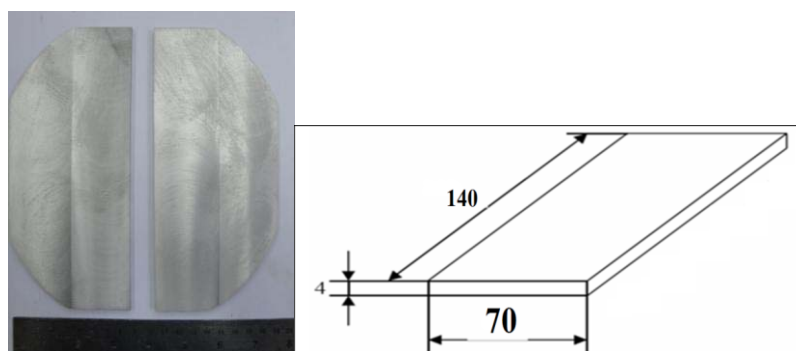


(ก) กััดชิ้นงานได้ขนาด 4 มิลลิเมตร



(ข) lay out แบ่งชิ้นงานทดสอบ

ภาพที่ 3.7 การกััดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อกิ่งของแข็ง

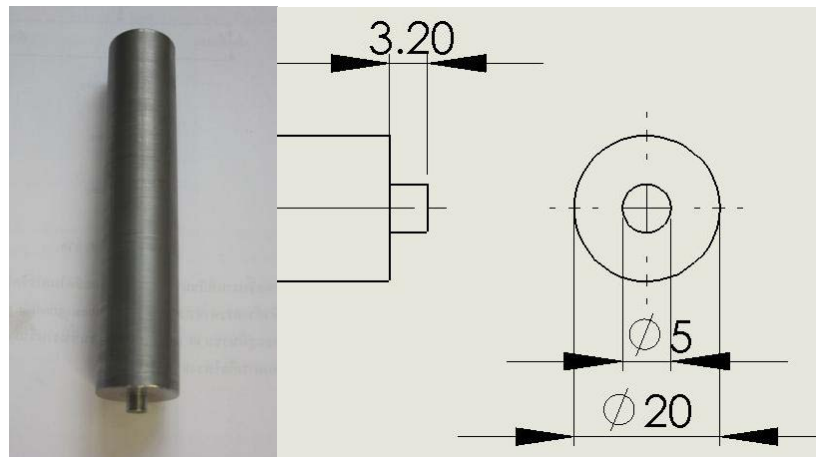


ภาพที่ 3.8 ชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 ที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน

3.4 กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

3.4.1 ลักษณะของตัวกวนที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ แบบทรงกระบอกขนาดของบ่า เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หัวพินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาว 3.2

มิลลิเมตร ทำจากเหล็กเครื่องมือความเร็วสูงมาตรฐาน JIS วัสดุ SKH 57 ความยาวของตัวกวนจะมีค่าน้อยกว่าความหนาของแผ่นงานประมาณ 80% ดังแสดงในภาพที่ 3.9



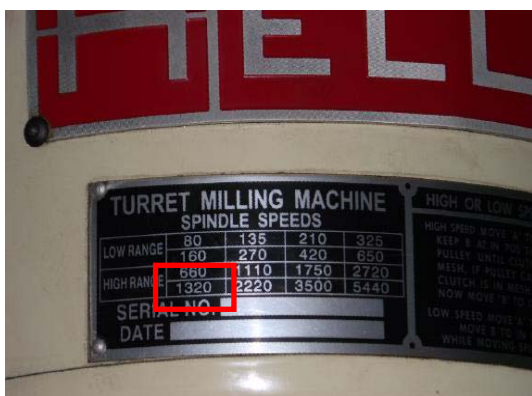
ภาพที่ 3.9 ลักษณะของตัวกวน (tool pin profile)

3.4.2 การปรับมุมเอียงของเครื่องมือ การปรับมุมเอียงของตัวกวนโดยการประยุกต์เอาเครื่องกัดแนวตั้งมาเป็นเครื่องกวนเสียดทานแบบกวน ซึ่งจะต้องปรับให้เครื่องมือเอียงทำมุม 3 องศา กับผิวหน้าชิ้นทดสอบ และปรับระดับอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบให้ได้ระดับคงที่ตลอดความยาวของชิ้นทดสอบงานกวนด้วยการกวนเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อผสม ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การปรับมุมเอียง 3 องศา ของเครื่องกัดแนวตั้ง

3.4.3 การปรับความเร็วรอบของตัวกวน เป็นการปรับความเร็วรอบของตัวกวนที่สภาพตามการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.11 (ก) และ (ข)



(ก) ความเร็วรอบที่ 1,320 รอบ/นาที



(ข) สายพานอยู่ตำแหน่งช่องที่ 1

ภาพที่ 3.11 การปรับความเร็วรอบของเครื่องกัดแนวตั้ง

3.4.4 การปรับความเร็วเดินกวนของตัวกวน เป็นการปรับความเร็วเดินกวนของตัวกวนที่สภาพตามการทดลองคือ 120 มิลลิเมตร/นาที โดยการหมุนปรับที่อุปกรณ์เดินอัตโนมัติ พร้อมกับทดลองเดินอัตโนมัติ และจับเวลาโดยใช้นาฬิกาจับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 3.12 (ก) จนกว่าค่าบนแกน X จะเป็น 120 มิลลิเมตร/นาที ดังแสดงในภาพที่ 3.12 (ข)



(ก) หมุนปรับความเร็วเดินแนวกวน



(ข) ความเร็วเดินกวนที่ต้องการ

ภาพที่ 3.12 การปรับความเร็วเดินกวนของเครื่องกัดแนวตั้ง

3.4.5 อุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงานของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.13 แสดงส่วนชุดของหัวกวนที่ใช้จับยึดหัวกวน และชุดจับยึดชิ้นงานในการกวน โดยจะวางยึดติดกับแท่นรองเลื่อน



ภาพที่ 3.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

ในการเซ็ตอุปกรณ์จับยึดและการจับยึดเครื่องมือ ดังแสดงในภาพที่ 3.14 ของการกวนเสียดทานแบบกวนจะทำการจับยึดชิ้นงานติดกับแท่นรองชิ้นงาน โดยใช้ตัวล็อคชิ้นงานด้านล่างชิ้นงานรองด้วยแผ่นเหล็กหนาสองชั้น โดยมีแผ่นประเก็นรองอยู่ตรงกลางแผ่นเหล็กทั้งสองชั้น และ ตัวกวนยึดติดกับเพลาแกนหมุน จากการทดลองจะกำหนดให้ ตัวกวนหมุนอยู่กับที่ และชิ้นงานเคลื่อนที่ขณะเดินแนวกวน



ภาพที่ 3.14 การจับยึดในกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

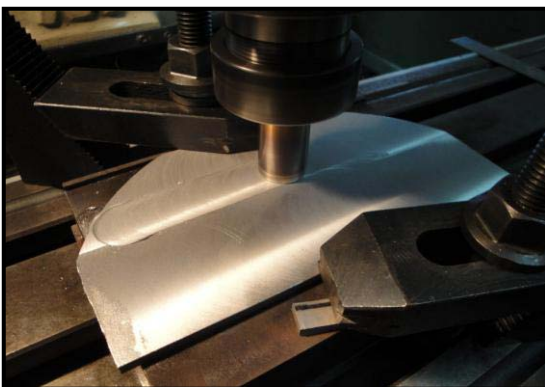
3.4.6 หลังจากการเตรียมวัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นจะทำการ กวนแบบเสียดทาน โดยใช้หัวพินแบบทรงกระบอก ที่ความเร็วในการหมุนของตัวกวนที่ระดับ ต่างๆตามที่ได้กำหนดไว้ คือ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที ส่วนความเร็วเดินกวน คือ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที จับยึดชิ้นทดสอบให้แน่นกับแท่นรองชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.15 (ก) และ (ข) เริ่มต้นการกวนโดยการเพิ่มแรงกดด้วยอัตราป้อนคงที่อย่างสม่ำเสมอจนบ่าของตัวกวน สัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน กำหนดให้การเสียดทานคงที่ ณ จุดเริ่มต้นค้างไว้ประมาณ 25-30 วินาที หลังจากนั้นก็เริ่มป้อนเดินแนวกวนอัตโนมัติ ตามเงื่อนไขของแต่ละตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้ในการ ทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.15 (ค) และ (ง) เมื่อสิ้นสุดการกวนก่อนยกตัวกวนออกจากรอยกวน ให้การเสียดทานคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการกวน 10 วินาที ทำตามวิธีการเดิมโดยให้มีแนวการ กวน 3 แนว



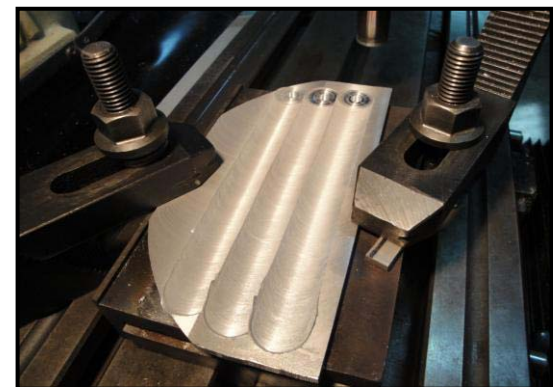
(ก) จับชิ้นทดสอบให้แน่นกับแท่นรองชิ้นงาน



(ข) เริ่มเพิ่มแรงกดจนบ่าของตัวกวน สัมผัสผิวหน้าชิ้นงาน



(ค) เดินแนวกวนอัตโนมัติ

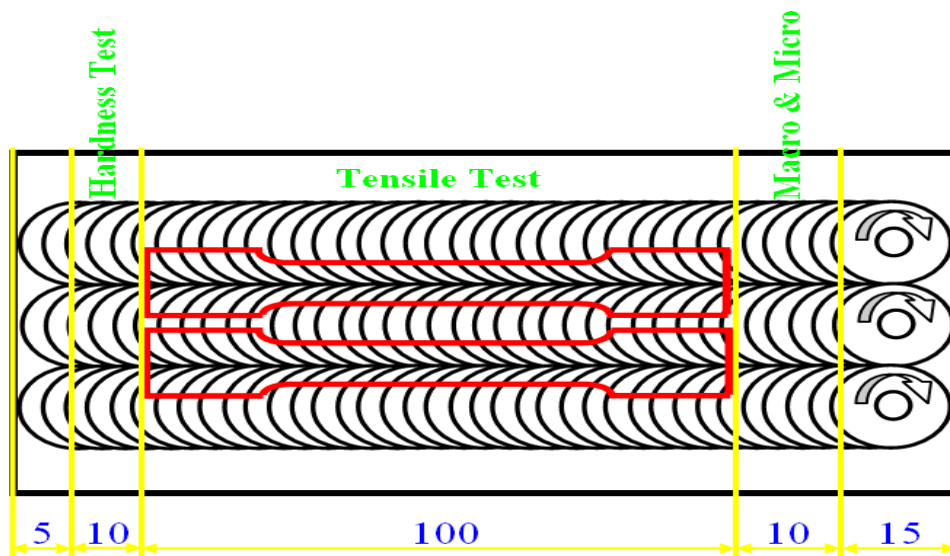


(ง) สิ้นสุดการเดินแนวกวน 3 แนว

ภาพที่ 3.15 กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

3.5 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกลของรอยกวน

3.5.1 การร่างแบบ (lay out) ตัดชิ้นงานที่ได้จากการกวน หลังจากทำการกวนชิ้นงาน 3 แนว เสร็จแล้วนำชิ้นงานที่กวนไปร่างแบบ ดังแสดงในภาพที่ 3.16 โดยการตัดชิ้นงานใช้เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน รุ่น UE-712A ในการตัดแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดความกว้างและความยาวใกล้เคียงขนาดจริง ดังแสดงในภาพที่ 3.17 เพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบทางโลหะวิทยาและทดสอบเชิงกล

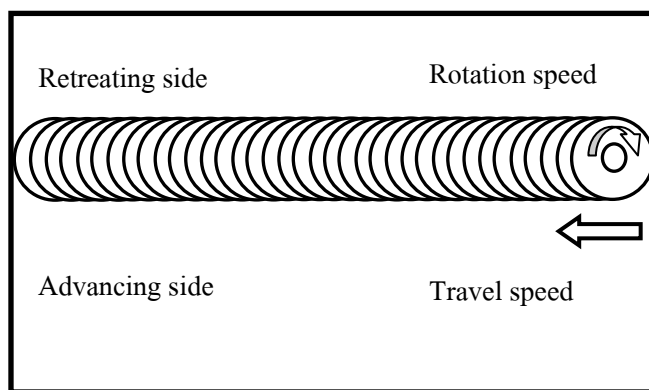


ภาพที่ 3.16 การร่างแบบชิ้นงานทดสอบทาง โลหะวิทยาและเชิงกล

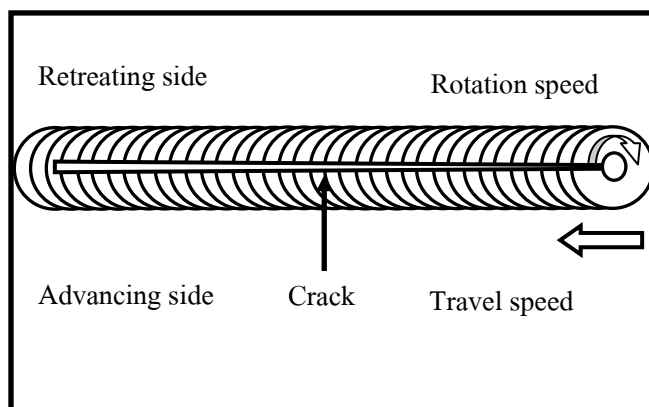


ภาพที่ 3.17 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน

3.5.2 การตรวจสอบผิวหน้ารอยกวนด้วยสายตา การตรวจสอบผิวหน้าของรอยกวนจากภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลกำลังขยายต่ำในแต่ละตัวแปรของการกวน เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และความสมบูรณ์ของรอยกวน ลักษณะของรอยกวนที่เกิดจากบ่าของตัวกวน ตรวจสอบการซึมลึกของรอยกวน หลังจากการกวนจะทำการตรวจสอบรอยกวนบริเวณด้านบนและด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 3.18 มีการประสานกันที่ดีของชิ้นงานกวน หรือกรณีนี้ที่เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วหากพบว่ารอยกวนไม่ประสานกันหลังจากการกวนแสดงว่ารอยกวนนั้นไม่สามารถใช้งานได้ จะต้องทำการศึกษาและปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 3.19



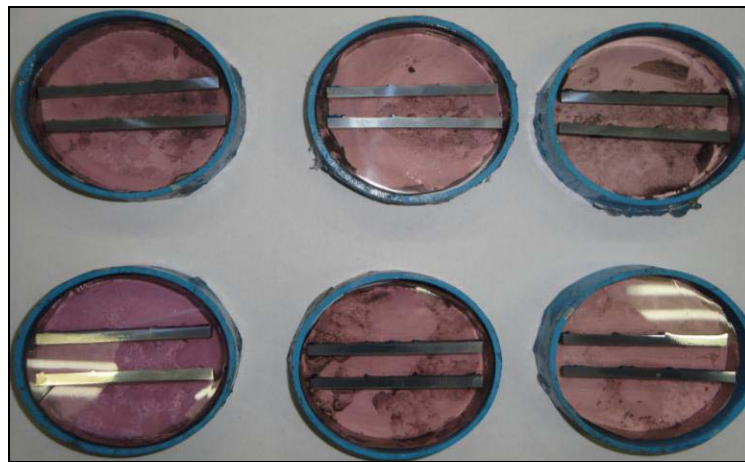
ภาพที่ 3.18 รอยกวนจากการเสียดทานแบบกวนที่มีความสมบูรณ์



ภาพที่ 3.19 รอยกวนจากการเสียดทานแบบกวนที่ไม่สมบูรณ์

3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค หลังจากการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ของรอยกวน ก็นำชิ้นงานไปร่างแบบและตัด จากนั้นนำไปเคลือบด้วยน้ำยา

Epoxy ดังภาพที่ 3.20 และตัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 150, 320, 400, 600, 800, 1,000 ถึงเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดจะวางกระดาษทรายลงบนแผ่นงานขัดหน้าเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะที่ขัดจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะรวมถึงซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดขึ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิมจนกว่าจะถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงในภาพที่ 3.21

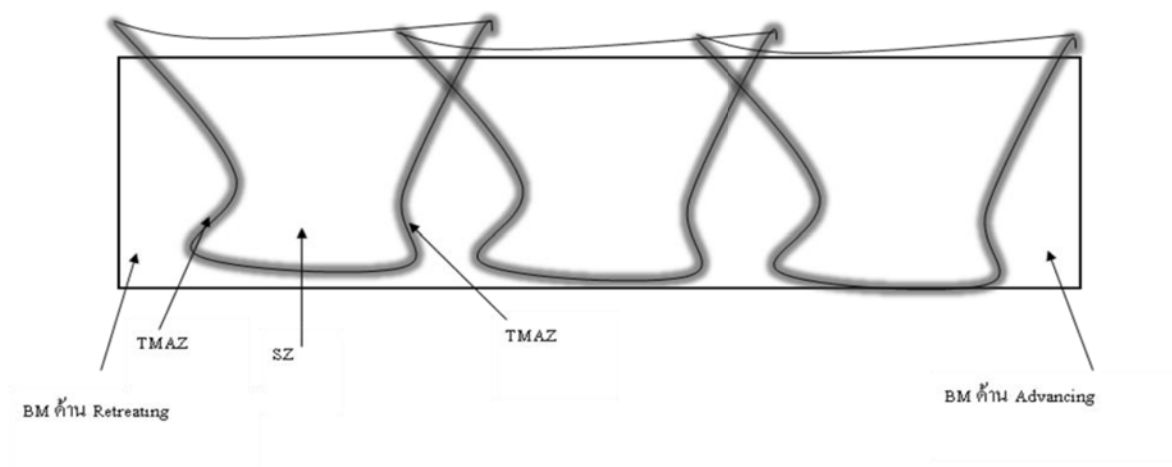


ภาพที่ 3.20 ชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยา Epoxy



ภาพที่ 3.21 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา

จากนั้นนำไปขัดผิวด้วยผงขัด (polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากอะลูมินา (alumina oxide) และแมกนีเซียม (magnesium oxide) ที่มีขนาดตั้งแต่ 5 ไมครอน 1 ไมครอน และ 0.3 ไมครอนตามลำดับ กัดผิวชิ้นทดสอบด้วยสารละลายเจือจาง Keller's reagent ส่วนผสมแสดงดังภาคผนวก ก หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องกำลังขยาย 2-10 เท่า เพื่อดูลักษณะการไหลวนของเกรนภายในรอยกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.22

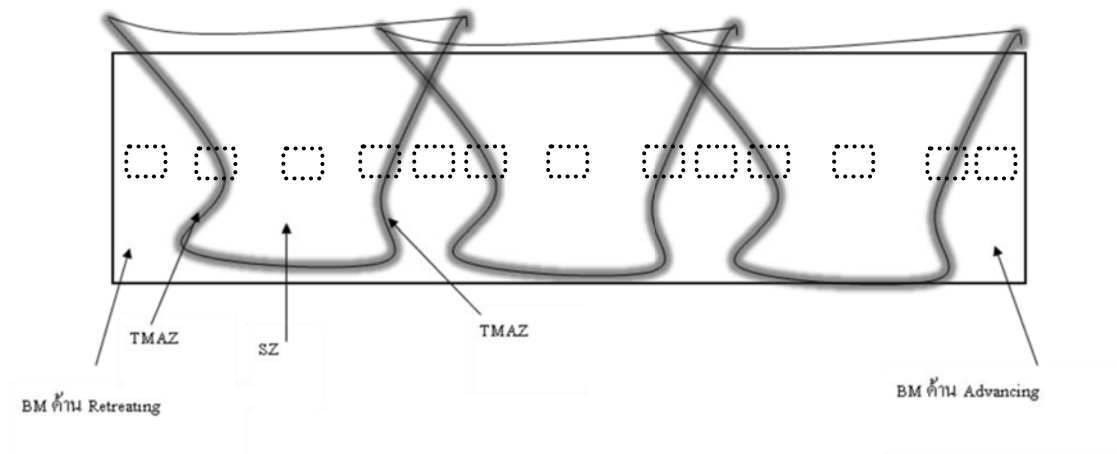


ภาพที่ 3.22 รูปจำลองบริเวณที่เกิดจากการกวน

3.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เป็นชิ้นงานทดสอบเดียวกันกับชิ้นงานทดสอบโครงสร้างมหภาค ซึ่งหลังจากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคแล้วก็นำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (micro-specimen) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 50 ถึง 200 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 3.23 เพื่อตรวจสอบโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนเชิงกลด้าน retreating กับ advancing และบริเวณที่ถูกกวนของรอยกวน ตรวจสอบข้อบกพร่องและความสมบูรณ์ของรอยกวนแต่ละตัวแปรของการกวน อีกทั้งดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเกรนหลังจากการกวนเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.23 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



ภาพที่ 3.24 รูปจำลองบริเวณที่ใช้ดูโครงสร้างทางโลหะวิทยา

3.5.5 การทดสอบความแข็งแรงดึงจากกรรมวิธีเสียคทานแบบกวน โดยการเตรียมชิ้นทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียคทานแบบกวน เพื่อนำค่าจากการทดสอบความแข็งแรงดึงหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียคทานแบบกวนไปเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อโลหะเดิม โดยการนำไปลดขนาดด้วยเครื่องกัดแนวตั้งและตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อที่จะนำไปกัดขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 3.25 การขึ้นรูปยึดตามมาตรฐาน ASTM (E8) ดังแสดงภาคผนวก ก โดยเตรียมชิ้นทดสอบตัดตามยาวกับรอยกวน แสดงดังภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.25 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงดึงของบริเวณรอยกวน



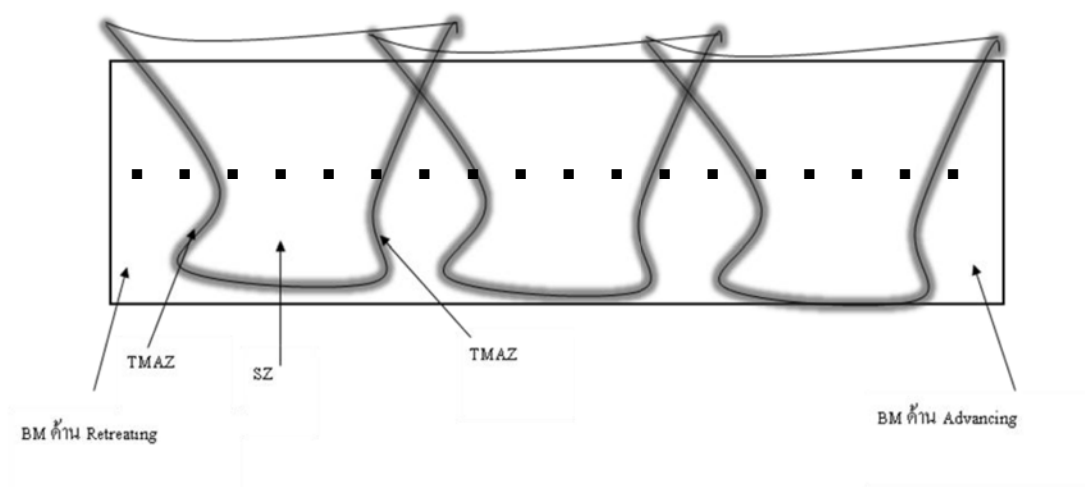
ภาพที่ 3.26 การเตรียมชิ้นทดสอบของรอยกวนเสียดทานแบบกวน

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง โดยการทดสอบแรงดึงโดยใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1.67×10^{-42} มิลลิเมตร/นาที แสดงดังภาพที่ 3.27

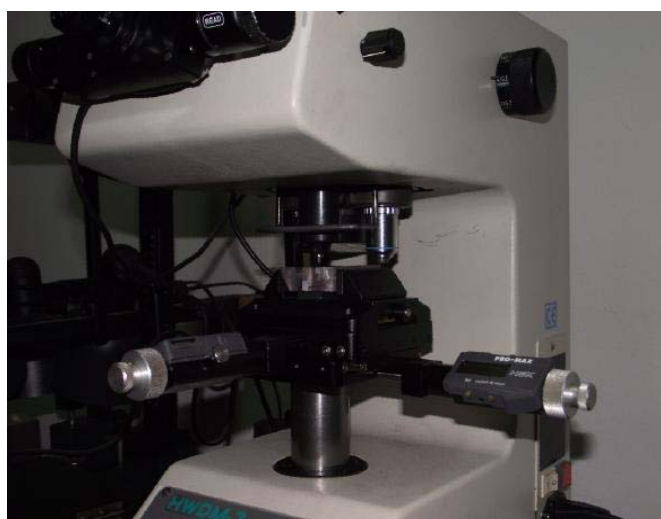


ภาพที่ 3.27 การทดสอบแรงดึง

3.5.6 การทดสอบความแข็งแรงจากกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน โดยชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงเป็นชิ้นงานเดียวกันกับชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างซึ่งหลังจากการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาคเสร็จสิ้นแล้ว ก็นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงเพื่อหาความสามารถในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดกระทำลงบนชิ้นทดสอบ โดยใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยกวน ระยะห่างระหว่างรอยกด $400\ \mu\text{m}$ หรือประมาณ 0.4 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.28 และ 3.29 แรงกดที่ใช้ในการกดวัดค่าความแข็งแรง คือ 50 gf ซึ่งใช้เวลาในการกดนาน 10 วินาที/ครั้ง



ภาพที่ 3.28 รูปจำลองบริเวณที่กดความแข็งแรง



ภาพที่ 3.29 การวัดค่าความแข็งแรง

3.6 การวิเคราะห์ผล

นำค่าความแข็งแรงดึงที่ทดสอบมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติประกอบด้วย ความเป็นอิสระของข้อมูล ความเป็นปกติของข้อมูล และ ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งได้แก่ผลการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และผลการทดสอบความแข็งและความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนแล้วตามขั้นตอนการทดลอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 โครงสร้างทางกายภาพของลักษณะผิวด้านบนรอยกวน

จากกรรมวิธีการกวนแบบเสียดทาน ลักษณะผิวรอยกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที ความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที มีลักษณะดังนี้

4.1.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

ผลจากกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ดังภาพที่ 4.1 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าผิวหน้าด้านบนของรอยกวนที่ความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที เกิดการประสานกันที่ดีในรอยกวน และบริเวณด้านล่างของรอยกวนมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยกวน แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยกวนอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน ลักษณะผิวหน้ารอยกวนที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของตัวกวน อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อยของด้าน retreating side อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยกวนมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุได้สะดวกขึ้นออกจากบ่าของตัวกวน เกิดเป็นครีบด้าน retreating side เนื่องจากด้าน retreating side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเดินแนวกวน โดยสามารถวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้เครื่องวัดค่าความขรุขระ ที่ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $9.21 \mu\text{m}$ ส่วนที่ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $10.03 \mu\text{m}$ และที่ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $10.15 \mu\text{m}$ ซึ่งพบว่าที่ความเร็วเดินกวนต่ำมีค่าความขรุขระน้อยที่สุด



(ก) ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที



(ข) ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที



(ค) ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

ภาพที่ 4.1 ผิวของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

4.1.2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

ผลจากกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ดังภาพที่ 4.2 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าผิวหน้าด้านบนของรอยกวนที่ความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที เกิดการประสานกันที่ดีในรอยกวน และบริเวณด้านล่างของรอยกวนมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยกวน แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยกวนอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน ลักษณะผิวหน้ารอยกวนที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของตัวกวน อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อยของด้าน retreating side อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยกวนมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุได้สะดวกลื่นออกจากบ่าของตัวกวน เกิดเป็นครีบด้าน retreating side เพราะว่าด้าน retreating side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเดินแนวกวน โดยสามารถวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้เครื่องวัดค่าความขรุขระ ที่ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $8.90 \mu\text{m}$ ส่วนที่ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $9.59 \mu\text{m}$ และที่ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $10.10 \mu\text{m}$ ซึ่งพบว่าที่ความเร็วเดินกวนต่ำมีค่าความขรุขระน้อยที่สุด

4.1.3 ลักษณะผิวด้านบนของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

ผลจากกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ดังภาพที่ 4.3 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าผิวหน้าด้านบนของรอยกวนที่ความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที เกิดการประสานกันที่ดีในรอยกวน และบริเวณด้านล่างของรอยกวนมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยกวน แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยกวนอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน ลักษณะผิวหน้ารอยกวนที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของตัวกวน อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อยของด้าน retreating side อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยกวนมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุได้สะดวกลื่นออกจากบ่าของตัวกวน เกิดเป็นครีบด้าน retreating side เพราะว่าด้าน retreating side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเดินแนวกวน โดยสามารถวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้เครื่องวัดค่าความขรุขระ ที่ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $8.85 \mu\text{m}$ ส่วนที่ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $9.25 \mu\text{m}$ และที่ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความขรุขระ $10.16 \mu\text{m}$ ซึ่งพบว่าที่ความเร็วเดินกวนต่ำมีค่าความขรุขระน้อยที่สุด



(ก) ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที



(ข) ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที



(ค) ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

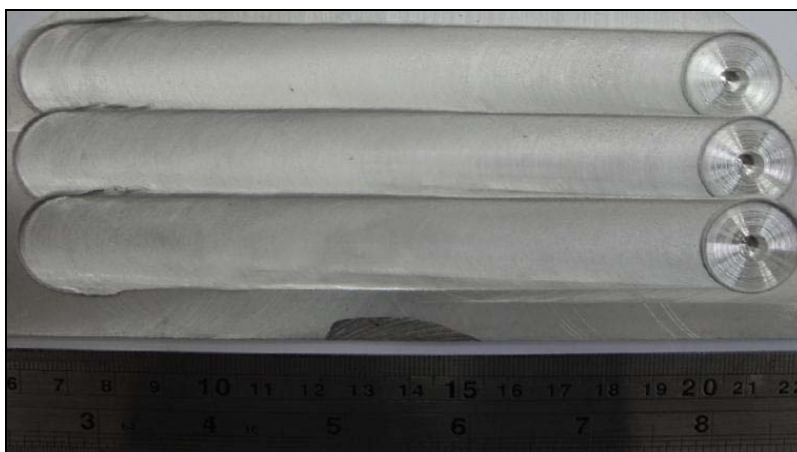
ภาพที่ 4.2 ผิวของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน



(ก) ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที



(ข) ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที



(ค) ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

ภาพที่ 4.3 ผิวของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

4.1.4 วิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าบนรอยกวนของความเร็วรอบและความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

จากการวิเคราะห์ผิวหน้าด้านบนของรอยกวนหลังผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนของความเร็วรอบและความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน ดังภาพที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 พบว่าบริเวณผิวหน้ารอยกวนของความเร็วรอบและความเร็วเดินกวนทั้งสามแบบเกิดการประสานกันที่ดีของรอยกวนรวมทั้งบริเวณด้านล่างของรอยกวนมีการเชื่อมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยกวน แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยกวนอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน ผิวหน้ารอยกวนที่ขรุขระเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการกวน ความร้อนระหว่างการกวนนั้นเกิดจากความเร็วยรอบกับความเร็วเดินกวน พบว่าการลดความเร็วเดินกวนจาก 160 มิลลิเมตร/นาที่ มาจนถึง 80 มิลลิเมตร/นาที่ จะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการกวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกสูง ความต้านทานภายในเนื้อวัสดุน้อยเนื่องจากการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุบริเวณที่ถูกกวน ส่งผลทำให้ผิวหน้าบริเวณรอยกวนมีความขรุขระน้อยลง [25] ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วรอบ การเพิ่มความเร็วรอบจาก 1,320 รอบ/นาที่ ไปเป็น 1,750 รอบ/นาที่ จะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการกวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกสูง ความต้านทานภายในเนื้อวัสดุน้อย ส่งผลทำให้ผิวหน้าบริเวณรอยกวนมีความขรุขระน้อยลง แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นจากกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนนั้นเกิดจากทั้งความเร็วรอบและความเร็วในการกวน พบว่าความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที่ ความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที่ มีค่าความขรุขระน้อยที่สุด คือ 8.85 μm และพบว่าเกิดครีปของด้าน retreating side เนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยกวนมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุได้สะดวกจนล้นออกจากปากของตัวกวนเกิดเป็นครีปด้าน retreating side เพราะว่าด้าน retreating side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเดินแนวกวน [24]

4.2 โครงสร้างมหภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยกวนอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 โดยการตัดชิ้นทดสอบตามยาวกับแนวกวน ขัดตามขั้นตอนของการเตรียมชิ้นทดสอบกัดกรด (etching) ด้วยสารละลายเจือจาง Keller's Reagent เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคของรอยกวนต่อไป

4.2.1 โครงสร้างมหภาคของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

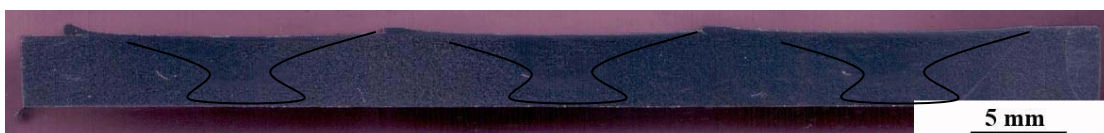
จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 แสดงในภาพที่ 4.4 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าบริเวณที่ถูกกวนของหัวพินทั้งสามความเร็วเดินกวนไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยกวน ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอยกวนอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบๆ ตัวกวน ขณะเดียวกันความเร็วเดินกวนต่ำ (80 มิลลิเมตร/นาที) จะแสดงลักษณะรูปร่างรอยกวนที่ปรากฏเด่นชัดกว่าที่ความเร็วเดินกวนสูง (160 มิลลิเมตร/นาที) อันเนื่องมาจากที่ความเร็วเดินกวนต่ำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในรอยกวนมีมากกว่าจึงทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุเกิดการไหลวนหลายครั้งรอบๆ ตัวกวน



(ก) ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที



(ข) ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที



(ค) ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

ภาพที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของบริเวณรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

จากการสังเกตในบริเวณที่ถูกกวนจะมีลักษณะของโครงสร้างที่ละเอียดกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม อีกทั้งในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่แคบกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side อันเนื่องมาจากด้าน retreating side เป็นทิศทางที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินสวนทางกับทิศ

ทางการเดินแนวทวน จึงทำให้โครงสร้างเกิดการไหลวนสวนทางกันคล้ายกับถูกอัด และด้าน advancing side มีโครงสร้างที่คล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากเป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของหัวพินกับทิศทางการเดินแนวทวนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

4.2.2 โครงสร้างมหภาคของรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 แสดงในภาพที่ 4.5 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าบริเวณที่ถูกกวนของหัวพินทั้งสามความเร็วเดินกวนไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยกวน ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอยกวนอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบๆ ตัวกวน ขณะเดียวกันความเร็วเดินกวนต่ำ (80 มิลลิเมตร/นาที) จะแสดงลักษณะรูปร่างรอยกวนที่ปรากฏเด่นชัดกว่าที่ความเร็วเดินกวนสูง (160 มิลลิเมตร/นาที) อันเนื่องมาจากที่ความเร็วเดินกวนต่ำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในรอยกวนมีมากกว่าจึงทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุเกิดการไหลวนหลายครั้งรอบๆ ตัวกวน



(ก) ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที



(ข) ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที



(ค) ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

ภาพที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคของบริเวณรอยกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

จากการสังเกตในบริเวณที่ถูกกวานจะมีลักษณะของโครงสร้างที่ละเอียดกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม อีกทั้งในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่แคบกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side อันเนื่องมาจากด้าน retreating side เป็นทิศทางที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินสวนทางกับทิศทางการเดินแนวกวาน จึงทำให้โครงสร้างเกิดการไหลวนสวนทางกันคล้ายกับถูกอัด และด้าน advancing side มีโครงสร้างที่คล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากเป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของหัวพินกับทิศทางการเดินแนวกวานเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

4.2.3 โครงสร้างมหภาคของรอยกวานที่ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวานที่ต่างกัน

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวานของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 แสดงในภาพที่ 4.6 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าบริเวณที่ถูกกวานของหัวพินทั้งสามความเร็วเดินกวานไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยกวาน ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอยกวานอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบๆ ตัวกวาน ขณะเดียวกันความเร็วเดินกวานต่ำ (80 มิลลิเมตร/นาที) จะแสดงลักษณะรูปร่างรอยกวานที่ปรากฏเด่นชัดกว่าที่ความเร็วเดินกวานสูง (160 มิลลิเมตร/นาที) อันเนื่องมาจากที่ความเร็วเดินกวานต่ำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในรอยกวานมีมากกว่าจึงทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุเกิดการไหลวนหลายครั้งรอบๆ ตัวกวาน



(ก) ความเร็วเดินกวาน 80 มิลลิเมตร/นาที



(ข) ความเร็วเดินกวาน 120 มิลลิเมตร/นาที



(ค) ความเร็วเดินกวาน 160 มิลลิเมตร/นาที

ภาพที่ 4.6 โครงสร้างมหภาคของบริเวณรอยกวานที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวานที่ต่างกัน

จากการสังเกตในบริเวณที่ถูกกวนจะมีลักษณะของโครงสร้างที่ละเอียดกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม อีกทั้งในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่แคบกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side อันเนื่องมาจากด้าน retreating side เป็นทิศทางที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินสวนทางกับทิศทางการเดินแนวกวน จึงทำให้โครงสร้างเกิดการไหลวนสวนทางกันคล้ายกับถูกอัด และด้าน advancing side มีโครงสร้างที่คล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากเป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของหัวพินกับทิศทางการเดินแนวกวนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

4.2.4 วิเคราะห์โครงสร้างมหภาคบริเวณรอยกวนของความเร็วรอบและความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

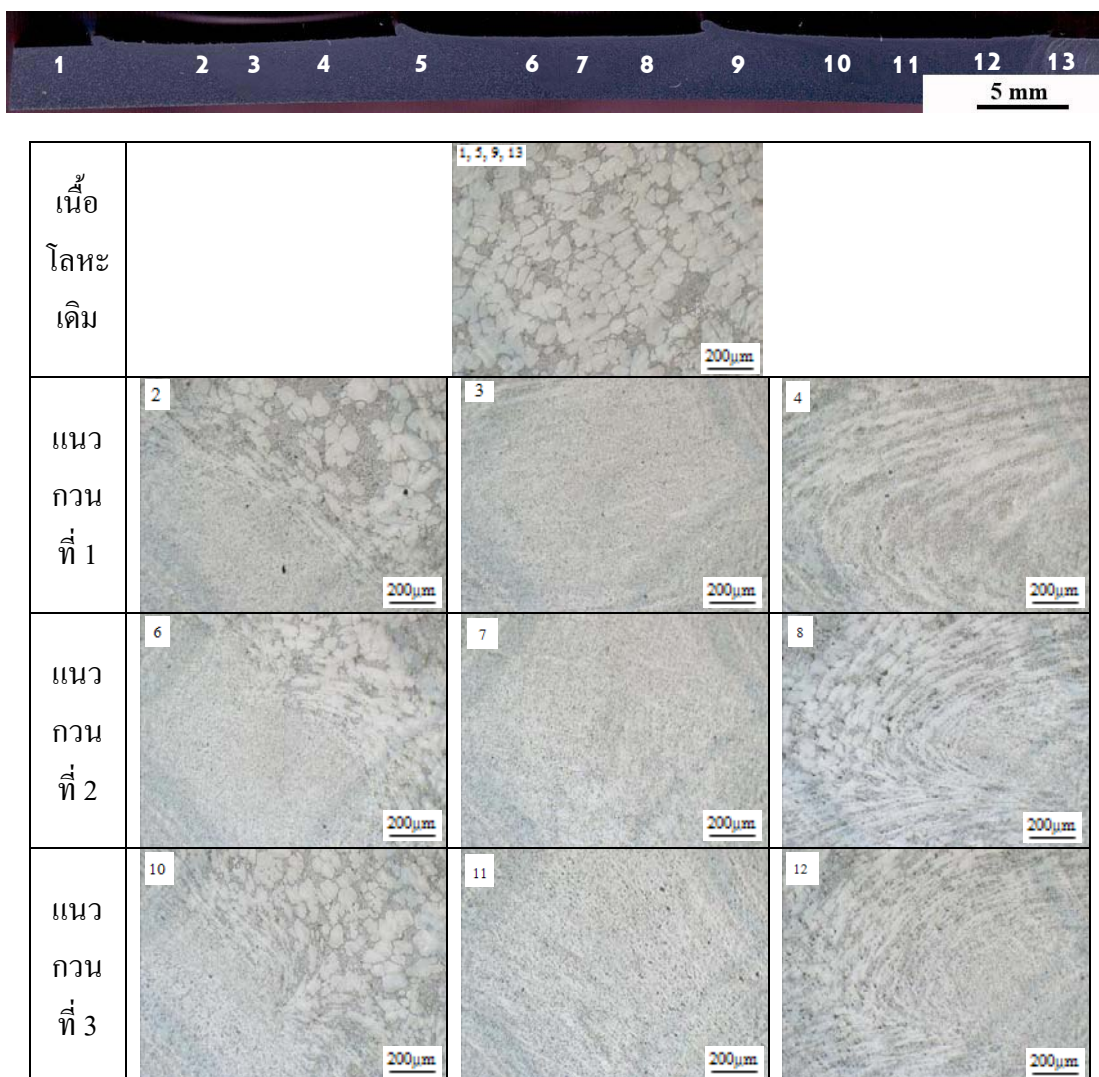
จากการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของความเร็วรอบดังภาพที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 พบว่าทั้งสามความเร็วเดินกวนไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นในรอยกวน [25] ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอยกวนอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบ ๆ หัวกวน ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงกด ความเร็วรอบ และความเร็วเดินกวน ซึ่งทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุเป็นแบบละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิมและมีทิศทางการไหลวนในลักษณะที่แน่นอนรอบหัวกวน แต่ถ้าได้รับความร้อนไม่เพียงพอจะทำให้เกิดช่องว่างขึ้น [26] ซึ่งความลึกของบริเวณที่ถูกกวน เห็นได้ว่าจะมีความลึกใกล้เคียงกันของทุกสภาวะการทดลอง เพราะใช้แรงกดที่เท่ากัน ส่วนความกว้างของบริเวณที่ถูกกวนขึ้นอยู่กับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกวน ซึ่งความร้อนมากจะทำให้บริเวณที่ได้รับความร้อนจะกว้างขึ้น

4.3 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยกวน เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของรอยกวนต่อไป บริเวณจุดเริ่มต้นของการกวน รอยกวน และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side และ advancing side ที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที ความเร็วเดินกวนที่ระดับ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที ดังนี้

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที่

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก่อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที่ บริเวณรอยกวน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si กระจายตัวอยู่เป็นกลุ่มๆบริเวณอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ซึ่งเมื่อเทียบการกระจายตัวของอนุภาค Si กับความเร็วเดินกวนที่ 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที่ พบว่าการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน เนื่องจากการที่ได้รับความร้อนมากเกินไปส่งผลให้เกิดการรวมตัวของเฟสยูเทคติกขึ้นใหม่ ทำให้การกระจายตัวบริเวณที่ถูกกวนไม่สม่ำเสมอ จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยกวน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกวนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกวน 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที่ ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4 8 12 มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าและยาวกว่าความเร็วกวน 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที่ แสดงดังภาพที่ 4.7

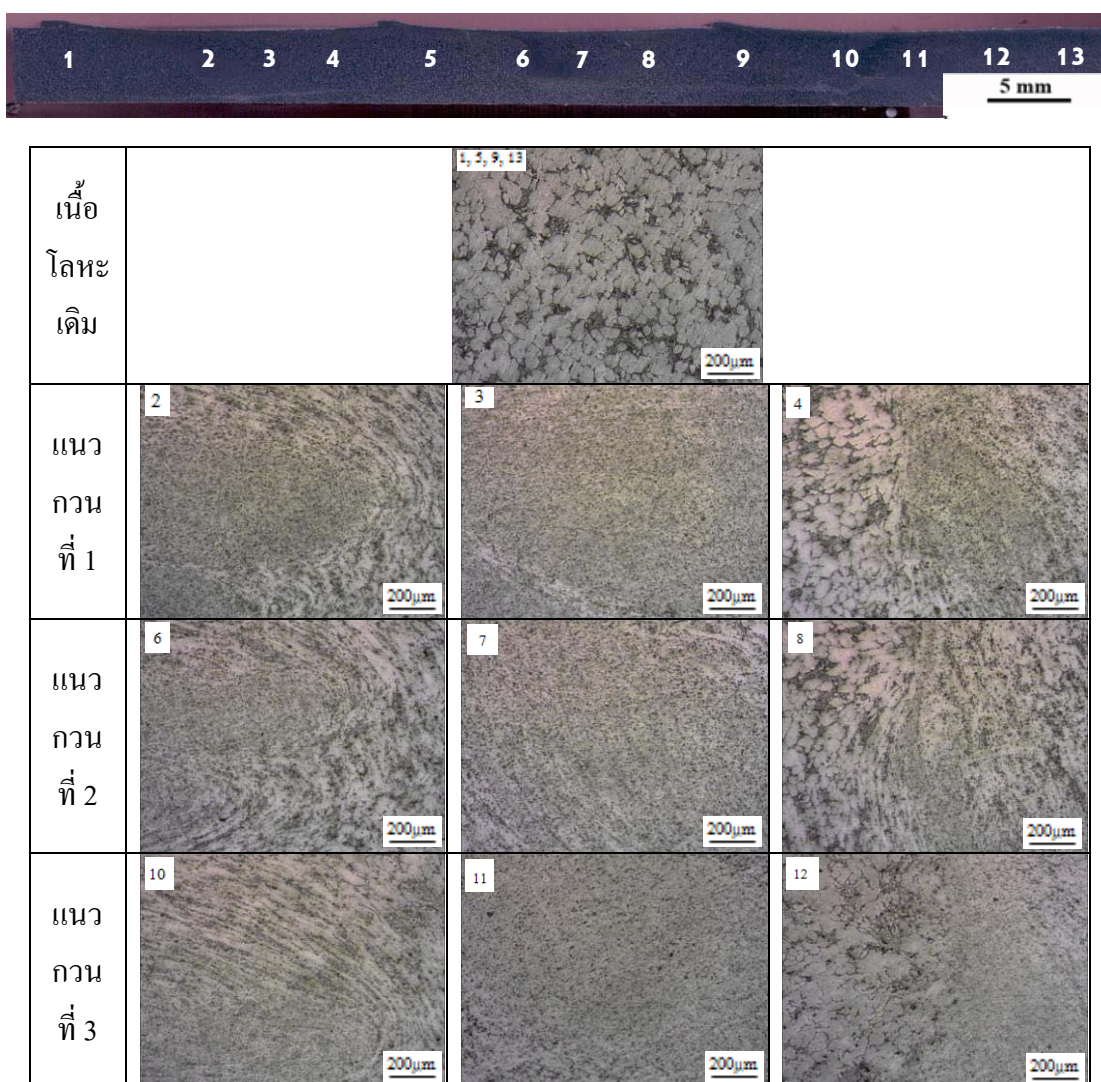


ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกววนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 80 มิลลิเมตร/นาที่

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 120 มิลลิเมตร/นาที่

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก่อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกววน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 120 มิลลิเมตร/นาที่ บริเวณรอยกววน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจาย

ตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวาน ซึ่งเมื่อเทียบการกระจายของอนุภาค Si บริเวณที่ถูกกวาน พบว่ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่าความเร็วเดินกวานที่ 80 และ 160 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งพบเพียงที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที เนื่องมาจากความร้อนที่ได้รับมีความเหมาะสมทำให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการรวมตัวขึ้นใหม่ของเฟสยูเทคติก จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยกวาน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกวานตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกวาน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่เล็กกว่าความเร็วกวาน 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที แสดงดังภาพที่ 4.8

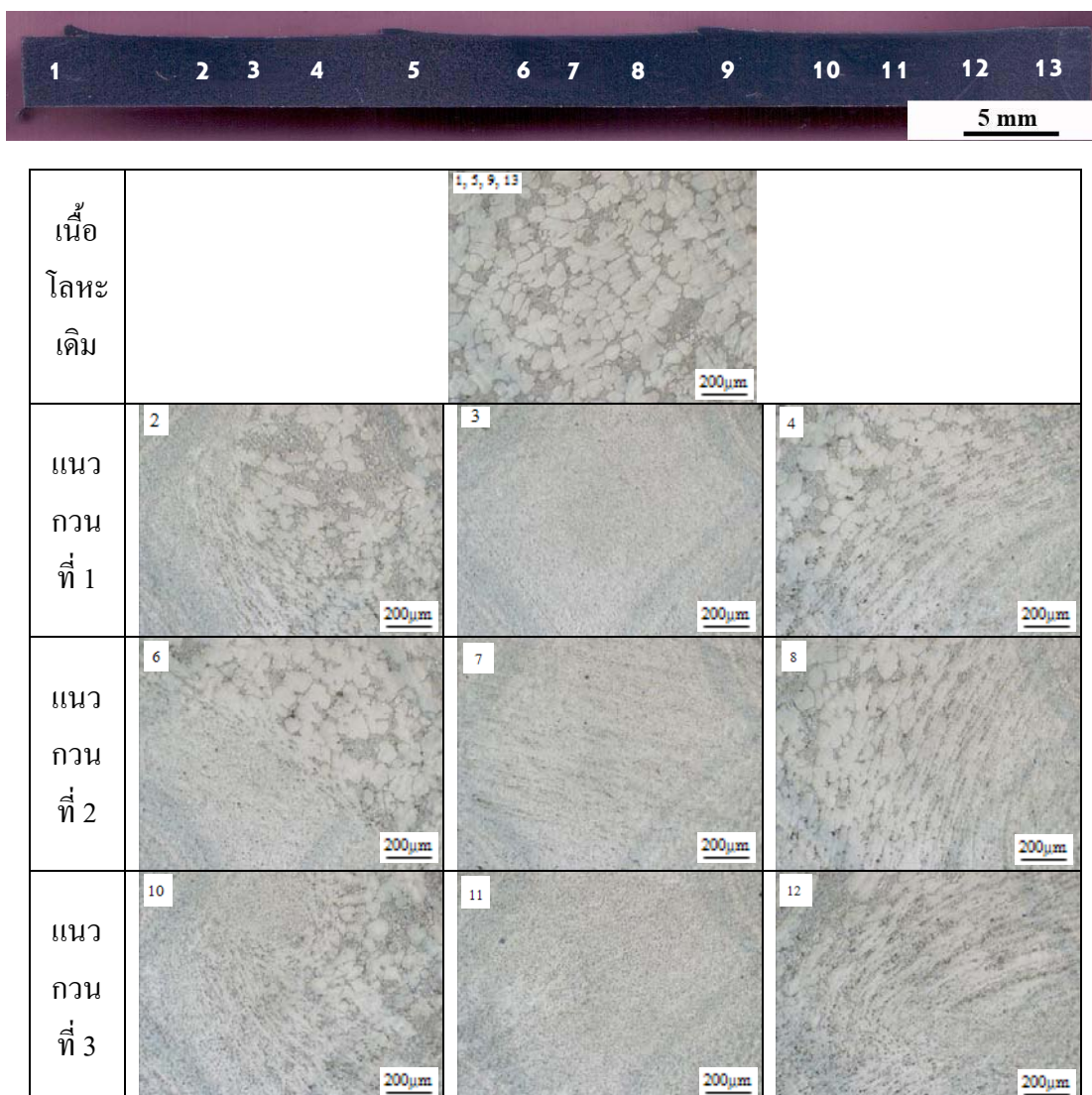


ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวานที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวาน 120 มิลลิเมตร/นาที

ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4, 8, 12 มีลักษณะ โครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดเล็กกว่าความเร็วกวน 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก้อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที บริเวณรอยกวน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างของอนุภาค Si อย่างสม่ำเสมอมากกว่าความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที เนื่องจากความร้อนบริเวณที่ถูกกวนได้รับไม่มากจนเกินไป ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคเป็นไปอย่างสม่ำเสมอในอะลูมิเนียมเมตริกซ์ แต่เมื่อเทียบกับ ที่ความเร็วกวน 120 มิลลิเมตร/นาที พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาค Si ของความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่า จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยกวน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกวนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกวน 160 มิลลิเมตร/นาที แต่มีขนาดเล็กกว่าความเร็วกวน 80 มิลลิเมตร/นาที ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4, 8, 12 มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกวน 160 มิลลิเมตร/นาที แต่มีขนาดเล็กกว่าความเร็วกวน 80 มิลลิเมตร/นาที แสดงดังภาพที่ 4.9

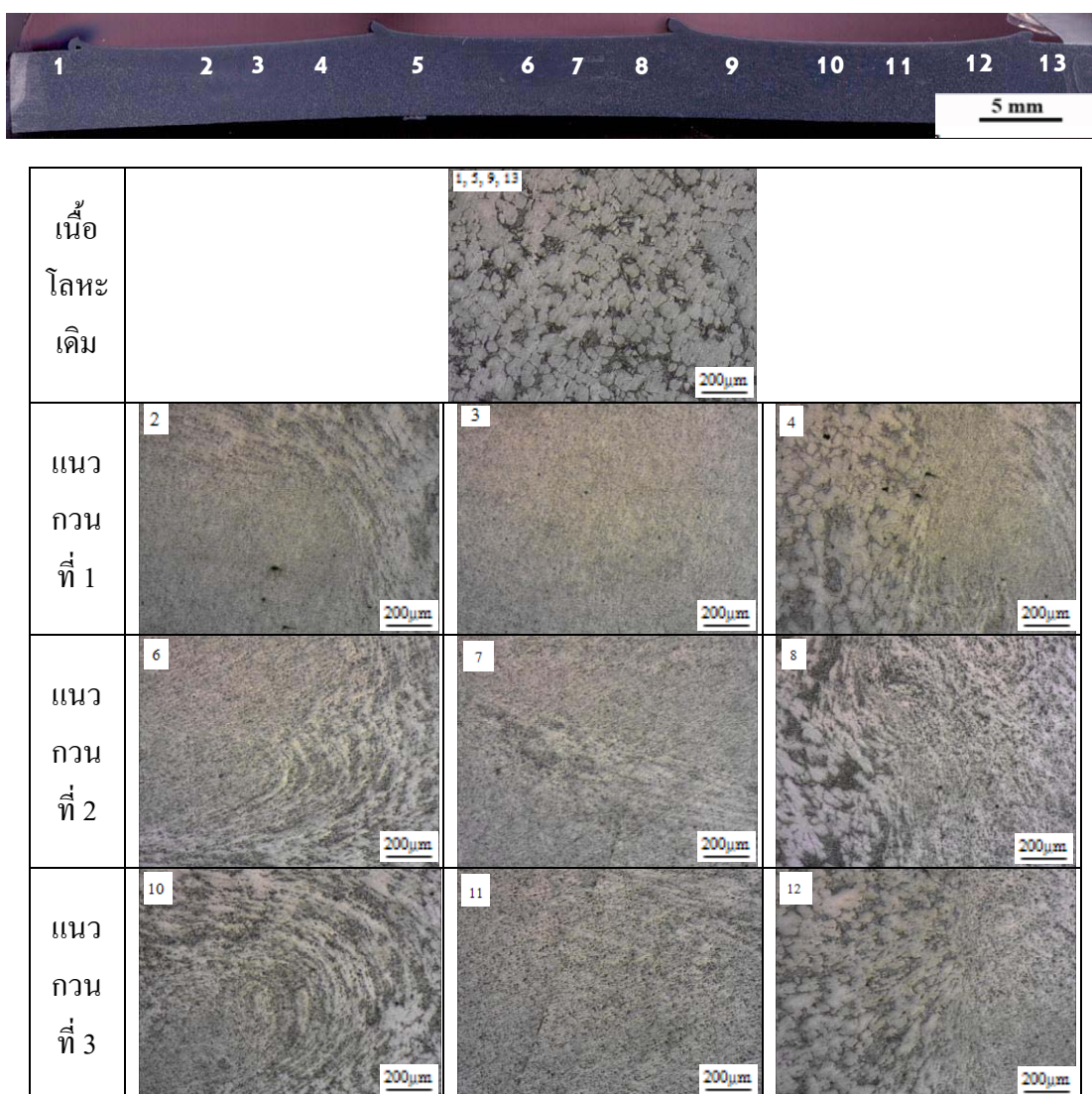


ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกววนที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 160 มิลลิเมตร/นาที่

4.3.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 80 มิลลิเมตร/นาที่

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก้อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกววน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 80 มิลลิเมตร/นาที่ บริเวณรอยกววน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si กระจายตัวอยู่เป็นกลุ่มๆบริเวณ

อะลูมิเนียมเมตริกซ์ ซึ่งเมื่อเทียบการกระจายตัวของอนุภาค Si กับความเร็วเดินกวนที่ 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที พบว่าการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน เนื่องจากการที่ได้รับความร้อนมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของเฟสยูเทคติกขึ้นใหม่ ทำให้การกระจายตัวบริเวณที่ถูกกวนไม่สม่ำเสมอ จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยกวน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกวนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกวน แสดงดังภาพที่ 4.10

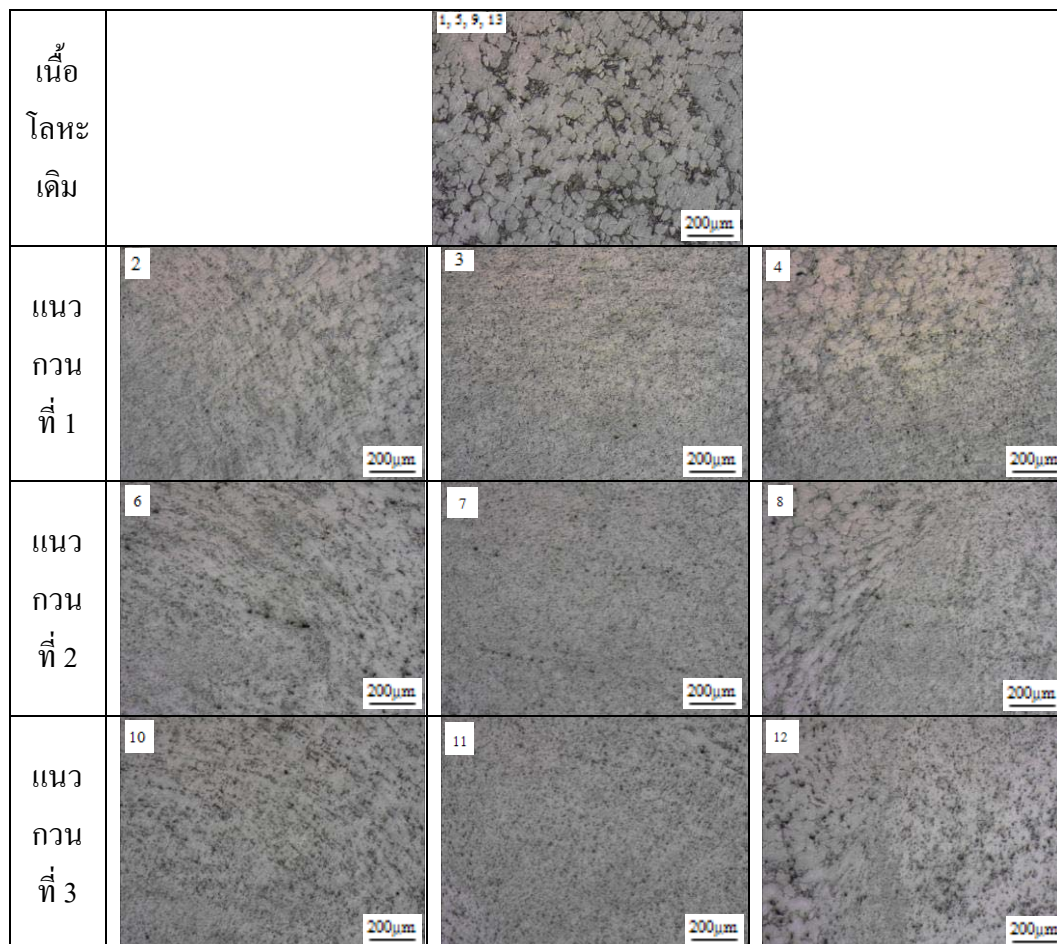


ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที

และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกววน 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที่ ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4, 8, 12 มีลักษณะโครงสร้างเบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกววนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกววนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกววน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกววน 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที่

4.3.5 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 120 มิลลิเมตร/นาที่

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก้อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกววน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 120 มิลลิเมตร/นาที่ บริเวณรอยกววน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกววน ซึ่งเมื่อเทียบการกระจายของอนุภาค Si บริเวณที่ถูกกววน พบว่ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่าความเร็วเดินกววนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที่ เนื่องมาจากความร้อนที่ได้รับมีความเหมาะสมทำให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการรวมตัวขึ้นใหม่ของเฟสยูเทคติก จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยกววน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกววนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกววน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกววน 160 มิลลิเมตร/นาที่ แต่มีขนาดเล็กกว่าความเร็วเดินกววน 80 มิลลิเมตร/นาที่ ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4, 8, 12 มีลักษณะโครงสร้างเบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกววนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกววนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกววน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกววน 160 มิลลิเมตร/นาที่ แต่มีขนาดเล็กกว่าความเร็วเดินกววน 80 มิลลิเมตร/นาที่ แสดงดังภาพที่ 4.11

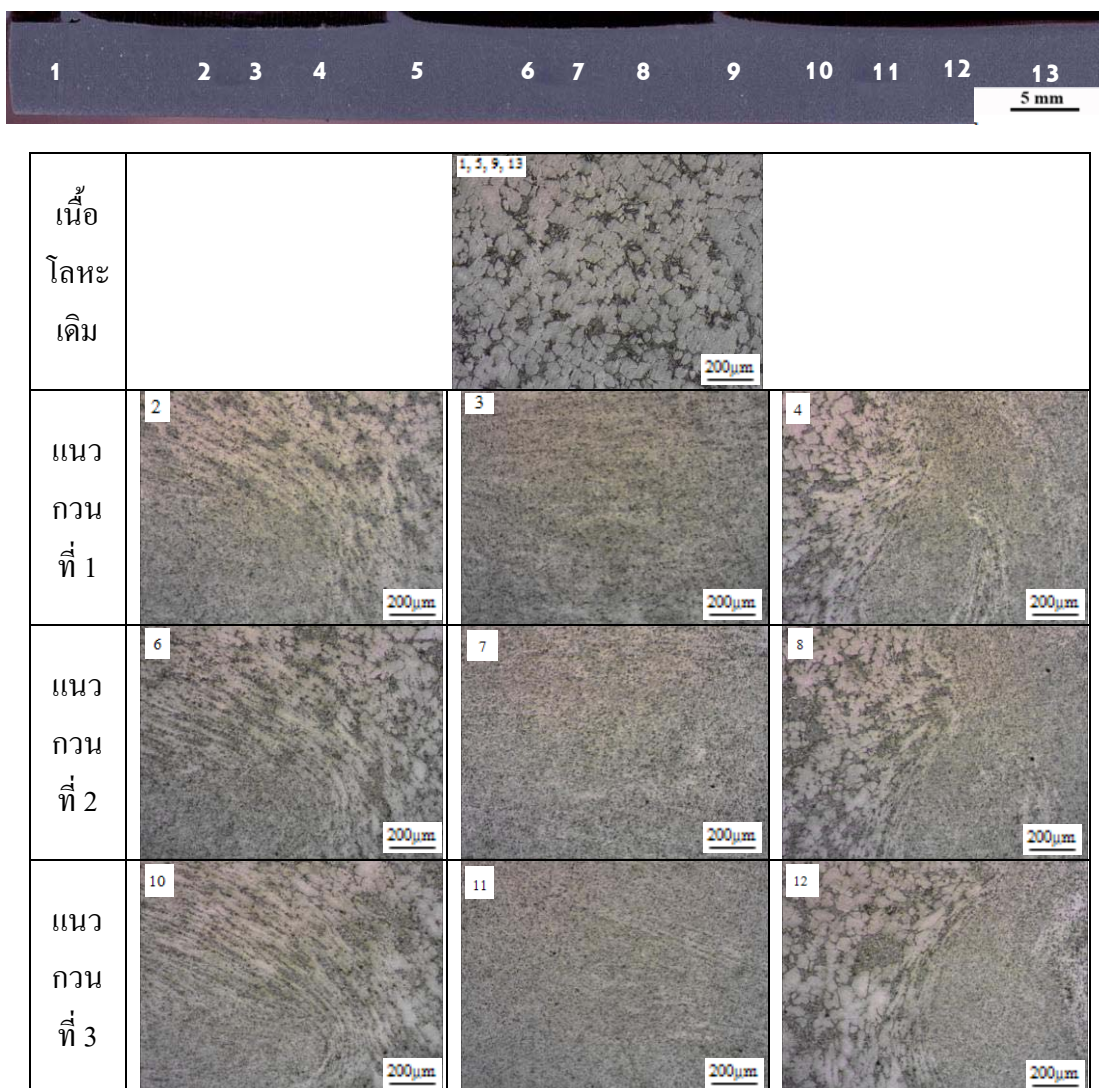


ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที่

4.3.6 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที่

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก่อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที่ บริเวณรอยกวน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจาย

ตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวาน ซึ่งเมื่อเทียบการกระจายของอนุภาค Si บริเวณที่ถูกกวาน พบว่ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่าความเร็วเดินกวานที่ 80 และ 120 มิลลิเมตร/นาที เนื่องจากความร้อนที่ได้รับมีความเหมาะสมทำให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการรวมตัวขึ้นใหม่ของเฟสยูเทคติก จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยกวาน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกวานตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกวาน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่เล็กกว่าความเร็วกวาน 80 และ 120 มิลลิเมตร/นาที แสดงดังภาพที่ 4.12

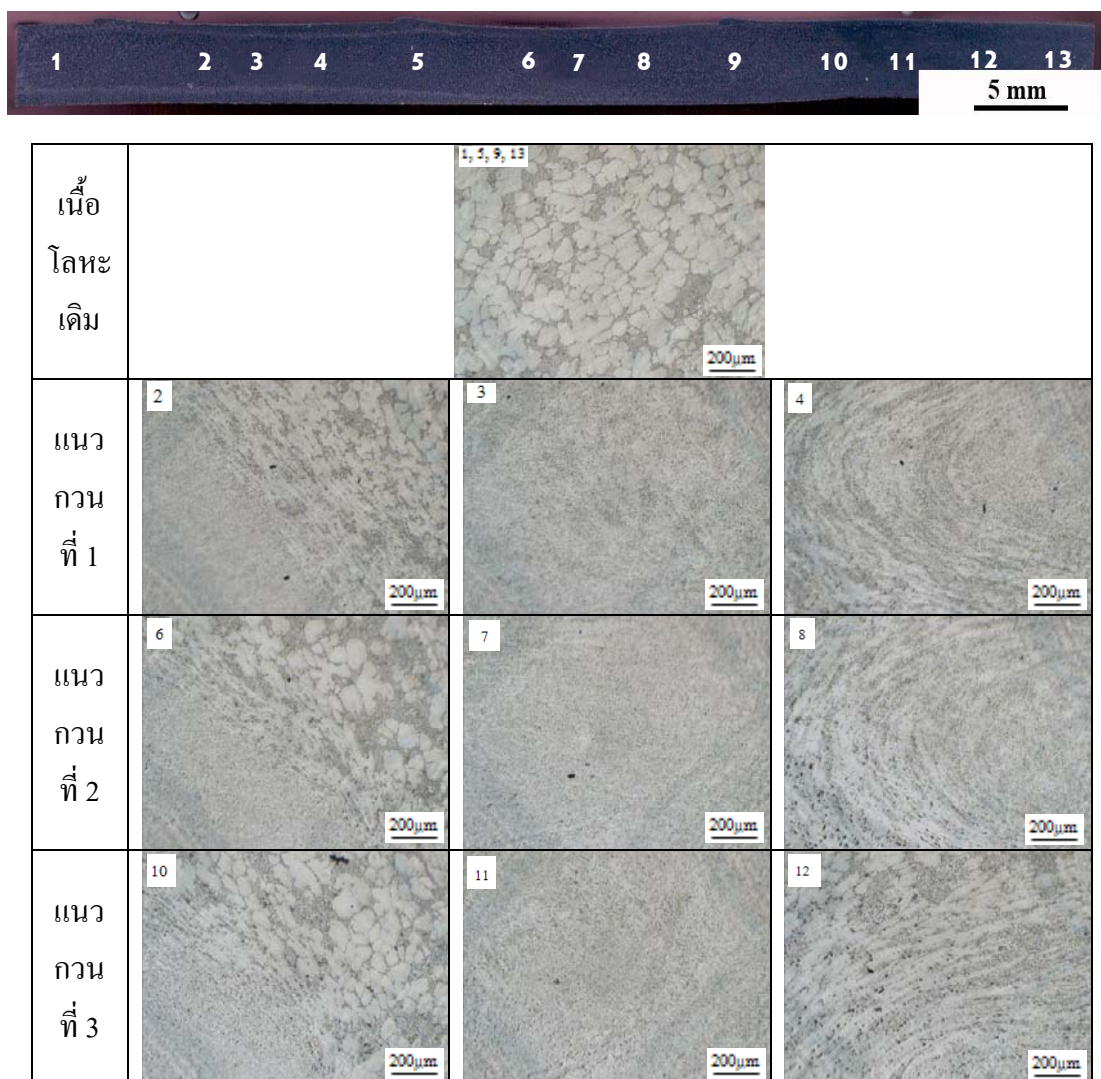


ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวานที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวาน 160 มิลลิเมตร/นาที

ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4, 8, 12 มีลักษณะ โครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่เล็กกว่าความเร็วกวน 80 และ 120 มิลลิเมตร/นาที

4.3.7 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก่อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที บริเวณรอยกวน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si กระจายตัวอยู่เป็นกลุ่มๆบริเวณอะลูมิเนียมแมทริกซ์ ซึ่งเมื่อเทียบการกระจายตัวของอนุภาค Si กับความเร็วเดินกวนที่ 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที พบว่าการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน เนื่องจากการที่ได้รับความร้อนมากเกินไปส่งผลให้เกิดการรวมตัวของเฟสยูเทคติกขึ้นใหม่ ทำให้การกระจายตัวบริเวณที่ถูกกวนไม่สม่ำเสมอ จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยกวน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกวนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกวน 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4, 8, 12 มีลักษณะ โครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกวน 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที แสดงดังภาพที่ 4.13

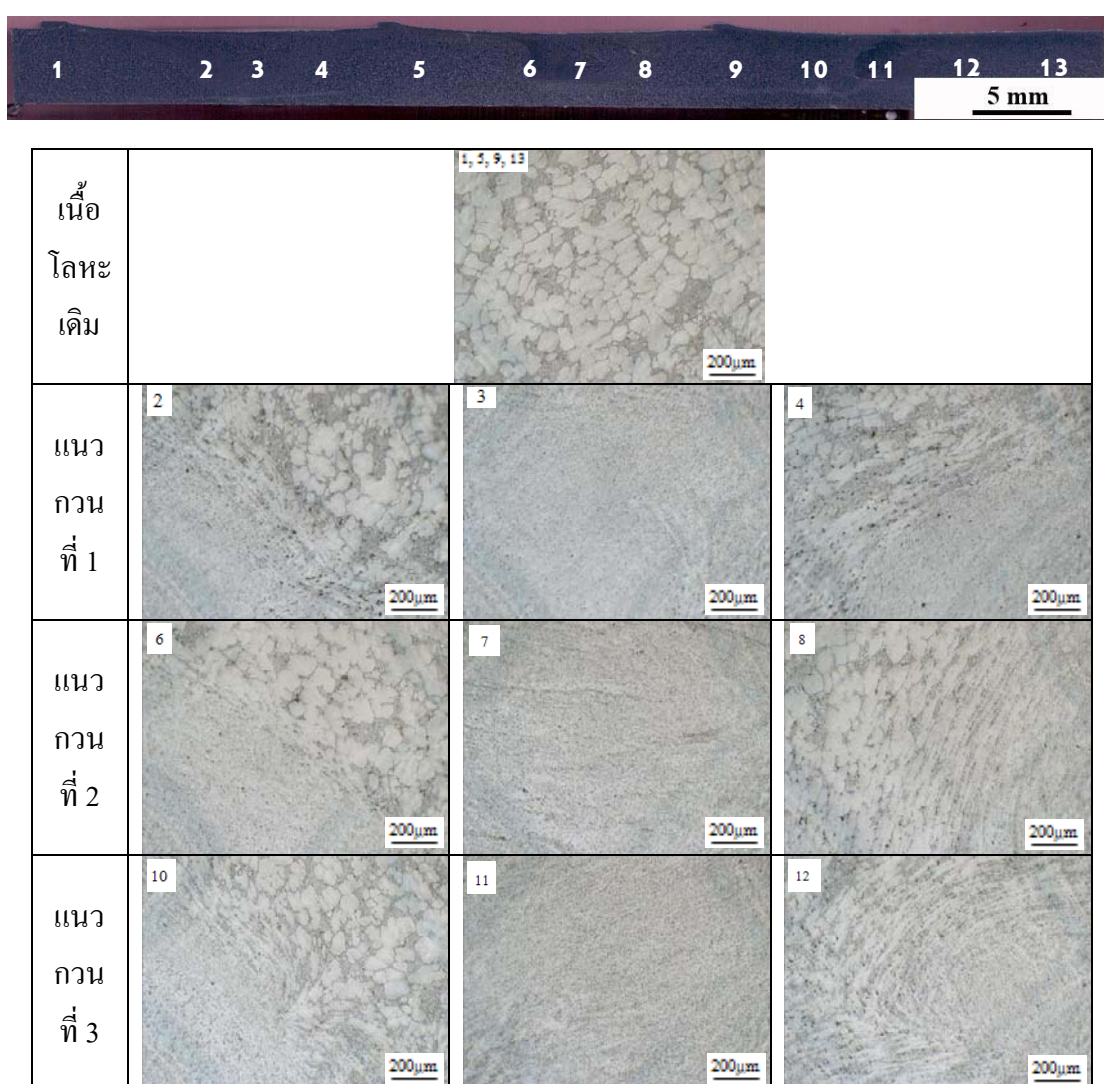


ภาพที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกววนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 80 มิลลิเมตร/นาที่

4.3.8 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 120 มิลลิเมตร/นาที่

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก้อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกววน พบว่า โครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 120 มิลลิเมตร/นาที่ บริเวณรอยกววน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกววน ซึ่งเมื่อเทียบการกระจายของอนุภาค Si บริเวณที่ถูกกววน

พบว่ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่าความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที เนื่องมาจากความร้อนที่ได้รับมีความเหมาะสมทำให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการรวมตัวขึ้นใหม่ของเฟสยูเทคติก จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยกวน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบ คล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกวนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกวน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกวน 160 มิลลิเมตร/นาที แต่มีขนาดเล็กกว่าความเร็วกวน 80 มิลลิเมตร/นาที แสดงดังภาพที่ 4.14

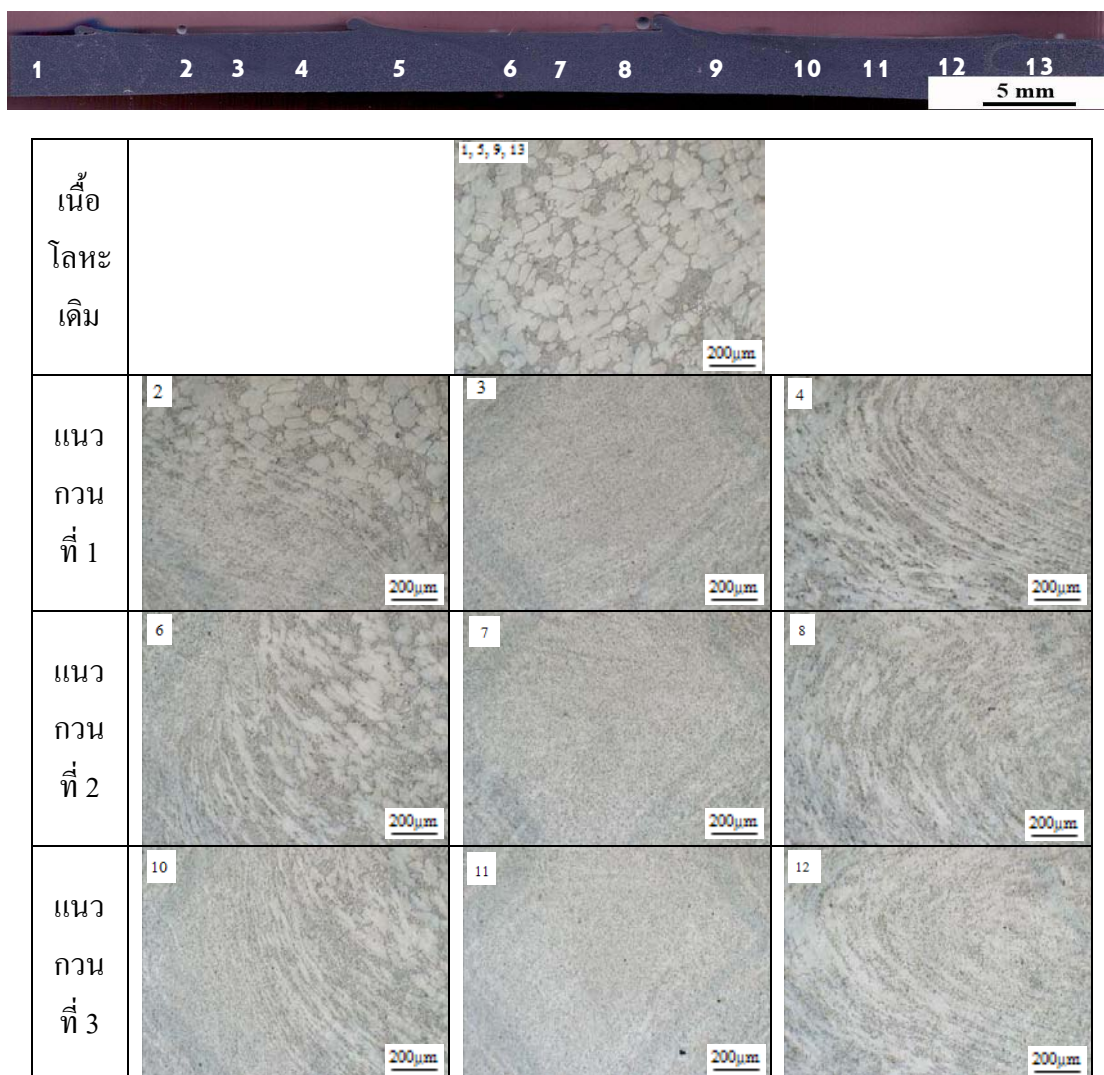


ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที

ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4, 8, 12 มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกววนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกววนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกววน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ใหญ่กว่าความเร็วกววน 160 มิลลิเมตร/นาที่ แต่มีขนาดเล็กกว่าความเร็วกววน 80 มิลลิเมตร/นาที่

4.3.9 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 160 มิลลิเมตร/นาที่

เนื้อโลหะเดิม คือ บริเวณที่ 1, 5, 9, 13 มีลักษณะเป็นเกรนก้อนกลมขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน หลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกววน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกววน 160 มิลลิเมตร/นาที่ บริเวณรอยกววน คือ บริเวณที่ 3, 7, 11 มีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกววน ซึ่งเมื่อเทียบการกระจายของอนุภาค Si บริเวณที่ถูกกววน พบว่ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่าความเร็วเดินกววนที่ 80 และ 120 มิลลิเมตร/นาที่ เนื่องมาจากความร้อนที่ได้รับมีความเหมาะสมทำให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการรวมตัวขึ้นใหม่ของเฟสยูเทคติก จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในรอยกววน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน retreating side คือ บริเวณที่ 2, 6, 10 ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด เนื่องจากด้าน retreating side มีทิศทางการเดินแนวกววนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของตัวกววน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่เล็กกว่าความเร็วกววน 80 และ 120 มิลลิเมตร/นาที่ ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side คือ บริเวณที่ 4, 8, 12 มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating side โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะยาวตามทิศทางการกววนของหัวพิน เนื่องจากด้าน advancing side เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกววนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวกววน และพบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่เล็กกว่าความเร็วกววน 80 และ 120 มิลลิเมตร/นาที่ แสดงดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที่ และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที่

4.3.10 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาครอยกวนของความเร็วรอบและความเร็วเดินกวนที่ต่างกัน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนบริเวณที่ถูกกวน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน และเนื้อโลหะเดิม โครงสร้างจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันของแต่ละบริเวณ ซึ่งมีผลมาจากการได้รับแรงเสียดทานจากการกวนเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นในบริเวณนั้น สามารถสรุปได้ว่า บริเวณเนื้อโลหะเดิมมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นแบบก้อนกลม(บริเวณสีขาว) จะเป็นเฟสของ $\zeta - \text{Al}$ ส่วนบริเวณที่เป็นสีเทาเข้มที่อยู่แทรกกระหว่างเกรนก่อน

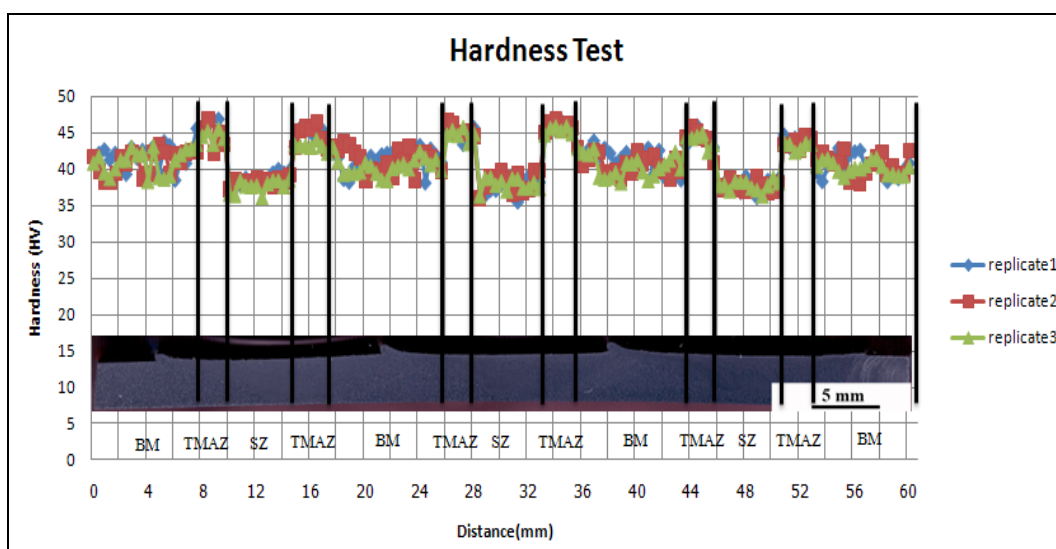
กลุมจะเป็น Mg_2Si หรือเฟสที่เรียกว่า ยูเทคติก ซึ่งเกรนก่อนกลุมจะมีขนาดเฉลี่ยเท่าๆกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ MA *et al.* [13] พบว่า ส่วนบริเวณที่ถูกกวนนั้นเป็นบริเวณที่เกิดจากแรงเสียดทานแบบกวนทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นเกรนที่ละเอียดขึ้นมากกว่าเนื้อโลหะเดิม ส่วนบริเวณที่เป็นยูเทคติกเฟส เมื่อได้รับอิทธิพลจากการกวนทำให้ซิลิกอนเข้าไปผสมในเฟส $\zeta - Al$ ทำให้เฟสทั้งสองรวมกันมีขนาดเกรนที่ละเอียดมาก และยังพบว่าขนาดของเกรนบริเวณที่ถูกกวนจะมีขนาดที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วเดินกวน [11, 27-29] อันเนื่องมาจากบริเวณที่ถูกกวนของความเร็วเดินกวนสูงมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่สม่ำเสมอมากกว่าที่ความเร็วเดินกวนต่ำ [15] ส่วนความเร็วรอบที่สูงมากเกินไปกลับทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะการเพิ่มความเร็วรอบทำให้อุณหภูมิบริเวณที่ถูกกวนนั้นสูงขึ้น ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานมีค่าน้อยลง ดังนั้นความเร็วรอบต้องอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม เพราะจะทำให้เกิดความร้อนที่เพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดสภาวะพลาสติกที่มากเกินไป ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดของรูพรุนและทำให้เกรนมีขนาดละเอียดขึ้น [3, 29-30] แต่ถ้าได้รับความน้อยเกินไปนั้นจะส่งผลให้เกิดช่อง [26] ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน advancing side เป็นผลมาจากการที่ได้รับแรงเสียดทานแบบดึงจากการหมุนของหัวพิน ซึ่งมีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ลักษณะโครงสร้างเกรนคล้ายกับถูกดึง รูปร่างของเกรนเกิดการบิดเบี้ยวตามทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวพิน และพบว่าความเร็วรอบสูงจะมีลักษณะเกรนที่ยาวกว่าความเร็วรอบต่ำ อันเนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วยุโรปจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เกิดความร้อนมากขึ้น ส่วนบริเวณด้าน retreating side เป็นผลมาจากการที่ได้รับแรงเสียดทานแบบอัดในการหมุนของหัวพิน ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ลักษณะโครงสร้างเกรนคล้ายกับถูกอัด รูปร่างของเกรนแคบและละเอียดกว่าด้าน advancing side เล็กน้อย [31] พบว่าความเร็วรอบสูงจะมีลักษณะเกรนที่เล็กกว่าความเร็วรอบต่ำ อันเนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วยุโรปจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เกิดความร้อนมากขึ้น

4.4 การทดสอบความแข็งหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

การทดสอบความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ โดยการกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยกวน ซึ่งถูกตัดขนานกับแนวกวน จัดให้เรียบ ใช้แรงกด 50 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที บนรอยกวนบริเวณเนื้อกวน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนและเนื้อโลหะเดิม รอยกดมีระยะห่างกันประมาณ 400 μm หรือประมาณ 0.4 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที ดังนี้

4.4.1 ทดสอบความแข็งของบริเวณที่ถูกความเร็รรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที

จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกวน (SZ) เฉลี่ย 37.94 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วย ด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 44.57 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อกวน ต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 6.51% ส่วนเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และ retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 9.83% ดังภาพที่ 4.16

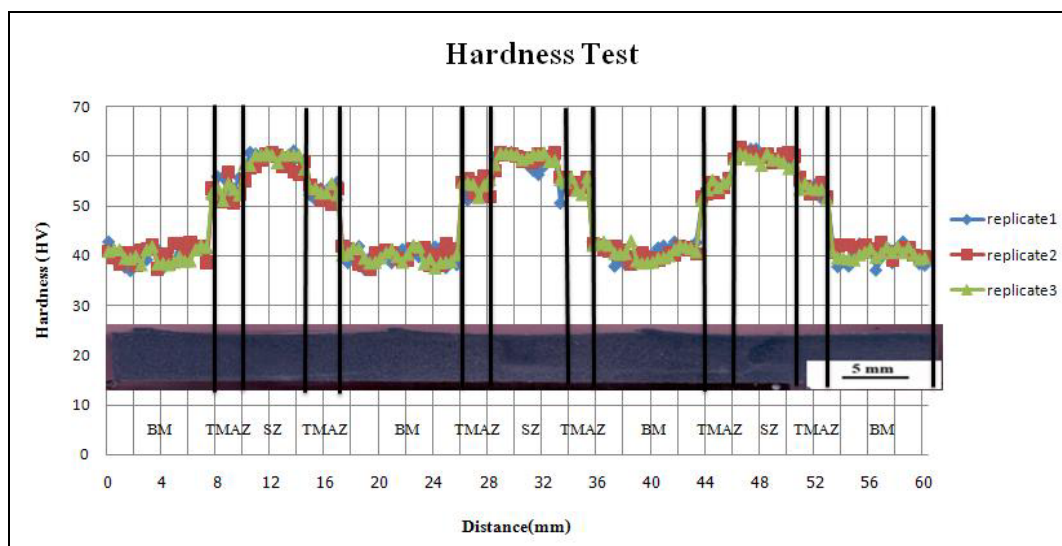


ภาพที่ 4.16 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356 ที่ความเร็รรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.4.2 ทดสอบความแข็งของบริเวณที่ถูกความเร็รรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที

จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกวน (SZ) เฉลี่ย 59.58 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วย ด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย

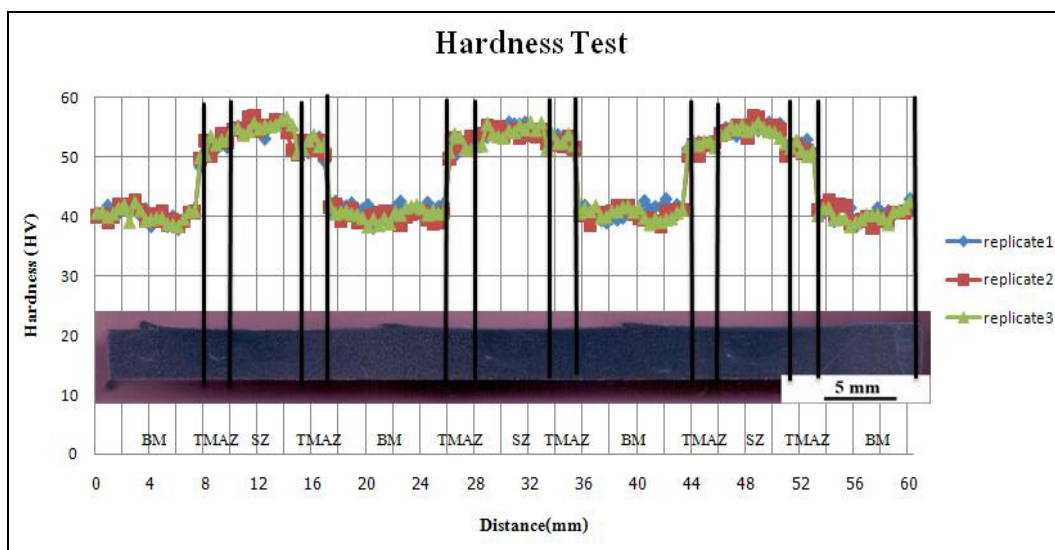
53.55 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้ออ่อน และเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และด้าน retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 46.82% และ 31.96% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วกว 120 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกว)

4.4.3 ทดสอบความแข็งของบริเวณถูกกวที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกว 160 มิลลิเมตร/นาที

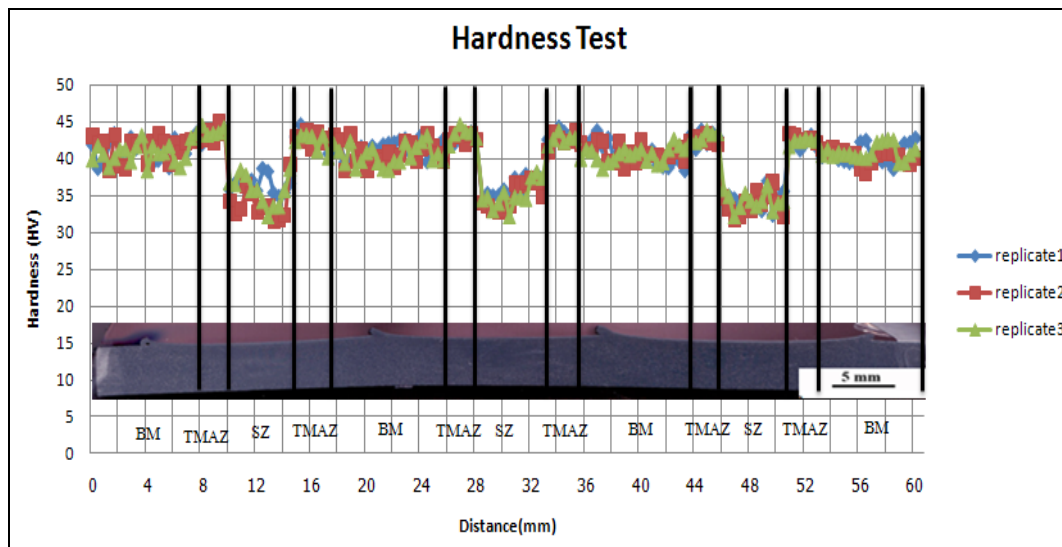
จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกว (SZ) เฉลี่ย 54.71 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วยด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 51.80 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้ออ่อน และเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และด้าน retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 34.82% และ 27.65% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.4.4 ทดสอบความแข็งของบริเวณถูกกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที

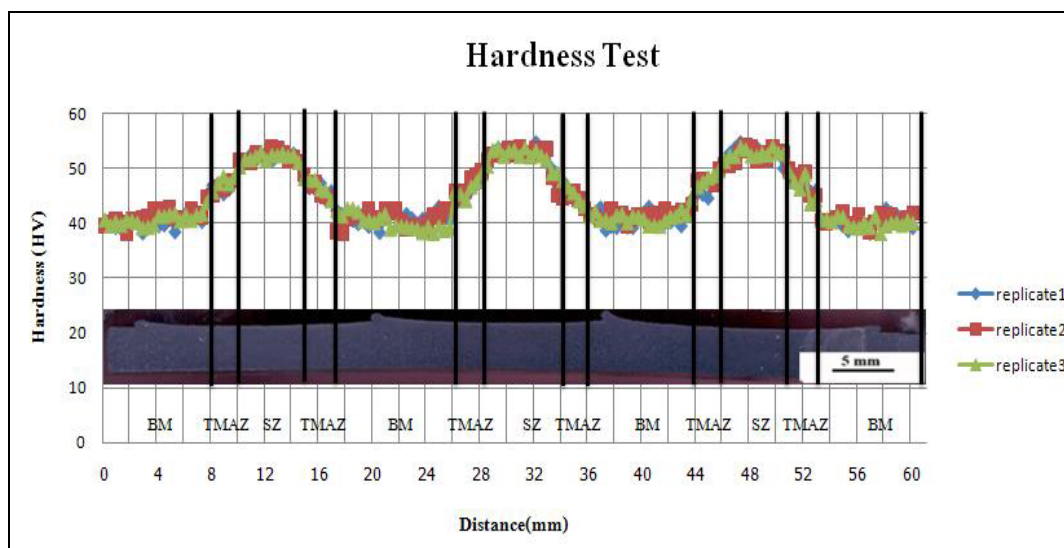
จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกวน (SZ) เฉลี่ย 34.91 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วยด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 42.93 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อกวน ต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 13.97% ส่วนเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และด้าน retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 5.79 % ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.4.5 ทดสอบความแข็งของบริเวณถูกกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที

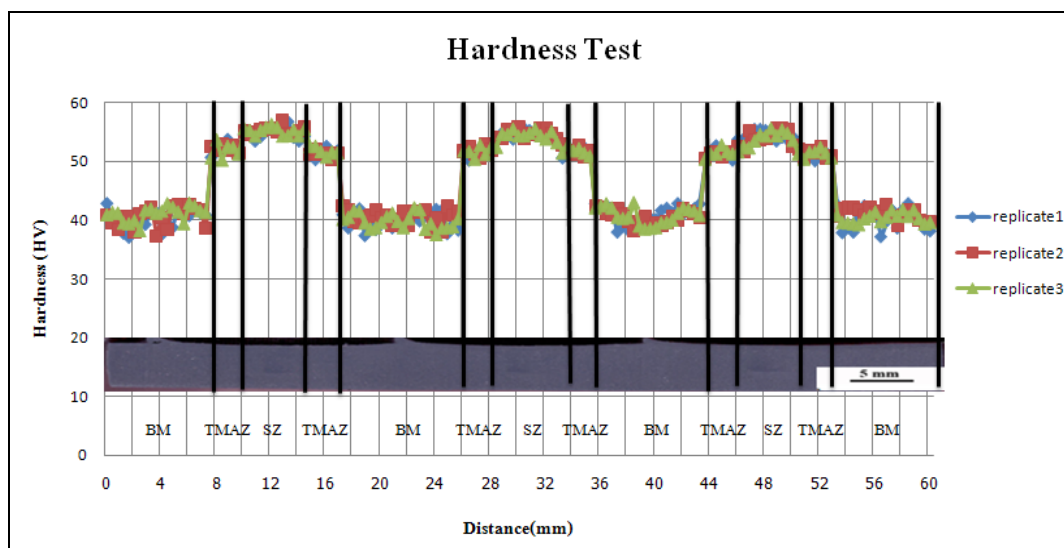
จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกวน (SZ) เฉลี่ย 52.49 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วยด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 46.65 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อกวน และเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และด้าน retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 29.35% และ 14.96% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.4.6 ทดสอบความแข็งของบริเวณถูกกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

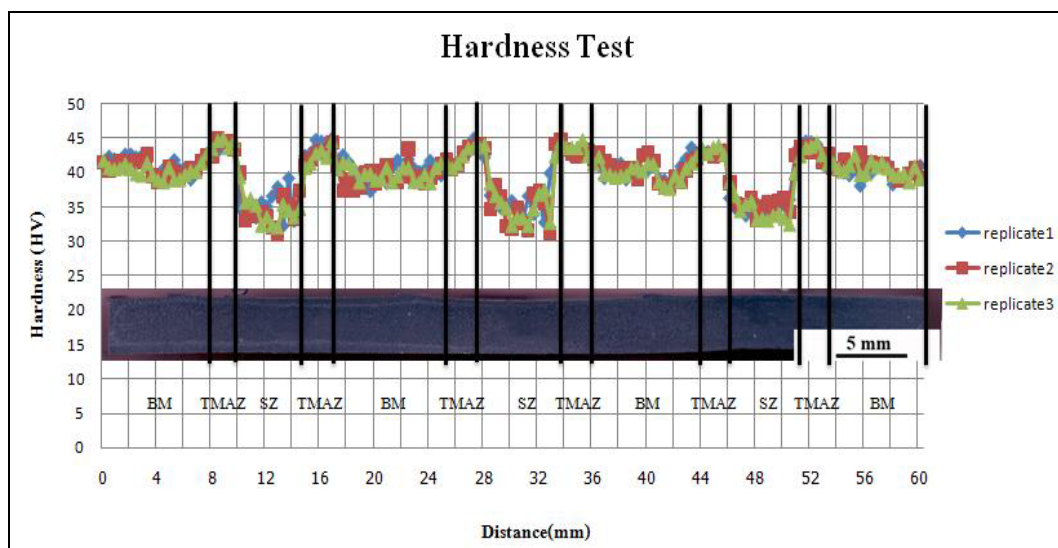
จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกวน (SZ) เฉลี่ย 54.54 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วยด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 51.58 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อกวน และเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และด้าน retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 34.40% และ 27.11% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.4.7 ทดสอบความแข็งของบริเวณถูกกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที

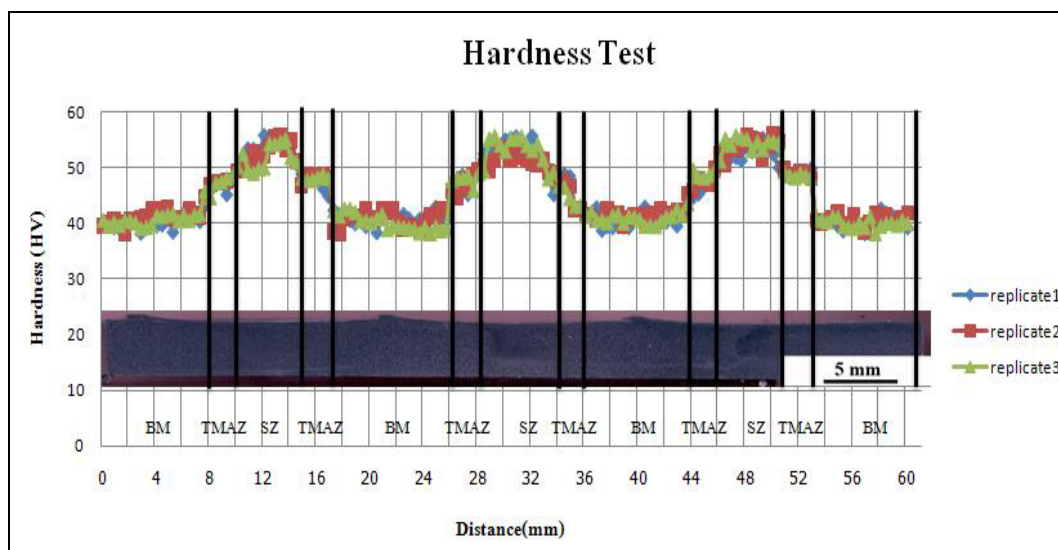
จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกวน (SZ) เฉลี่ย 34.96 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วยด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 43.18 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อกวนต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 13.85% ส่วนเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และ retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 6.41% ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.4.8 ทดสอบความแข็งของบริเวณถูกกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที

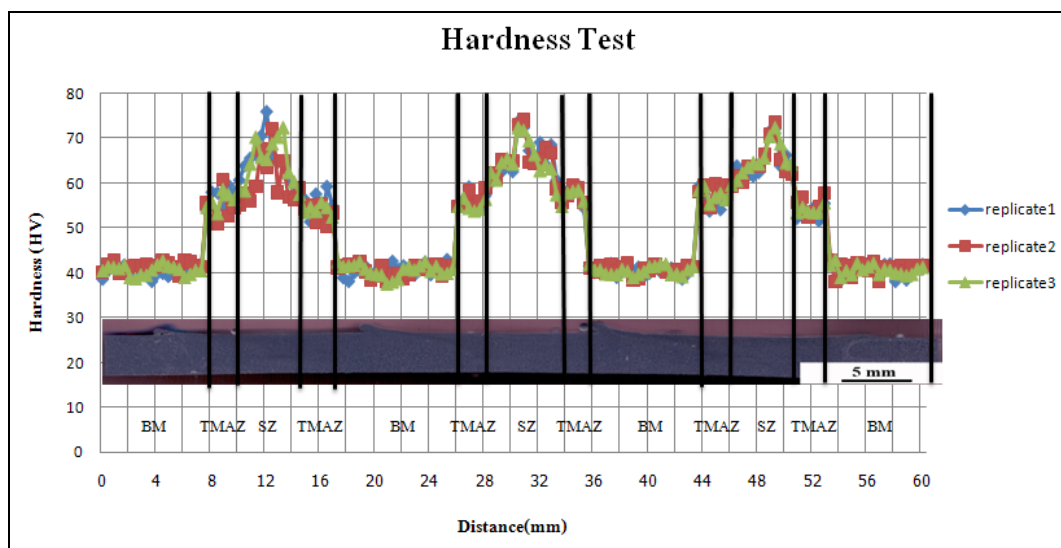
จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกวน (SZ) เฉลี่ย 53.12 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วยด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 47.51 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อกวน และเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และด้าน retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 30.91% และ 17.08% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.4.9 ทดสอบความแข็งของบริเวณถูกกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) เฉลี่ย 40.58 Hv บริเวณรอยกวน (SZ) เฉลี่ย 64.55 Hv บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (TMAZ) ประกอบด้วยด้าน retreating side และ advancing side ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 55.79 Hv อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อกวน และเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน advancing side และด้าน retreating side สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 59.07% และ 37.48% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.24

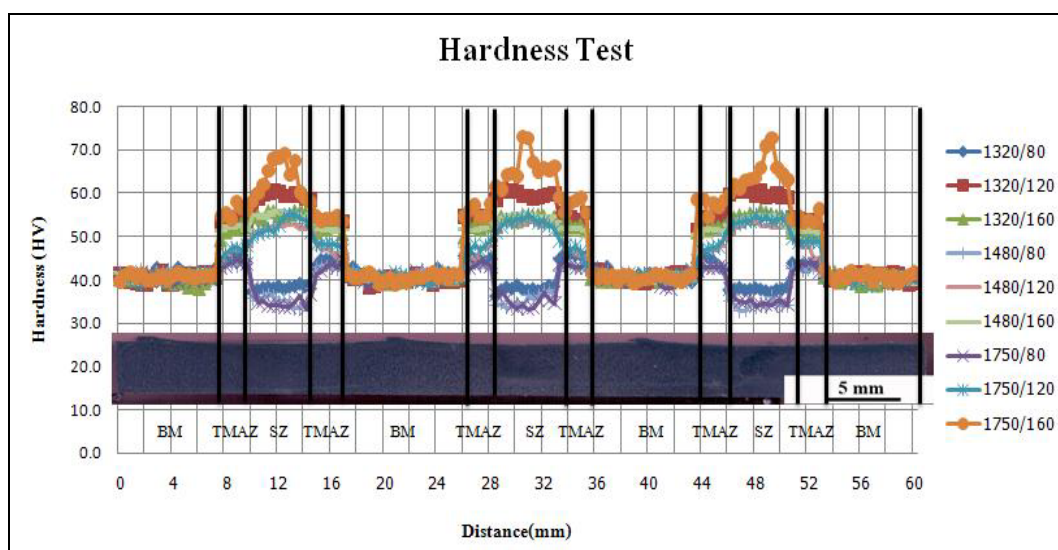


ภาพที่ 4.24 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.4.10 วิเคราะห์ความแข็งของบริเวณถูกกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที และที่ความเร็วเดินกวน 80 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

จากการทดสอบความแข็ง ที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที ความเร็วเดินกวนที่ 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที พบว่าบริเวณรอยกวนมีค่าความแข็งมากกว่าเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากบริเวณรอยกวนมีลักษณะโครงสร้างเกรนที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่มีขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวที่ดีกว่าบริเวณอื่นๆ อนุภาคซิลิกอนที่มีขนาดเล็กเกิดจากการแตกหักของโครงสร้างซิลิกอนและลักษณะการกระจายตัวที่ดีบริเวณแนวกวนส่งผลมาจากการกวนของหัวพิน [4, 9, 12, 15, 22, 32] แต่ที่ความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที ของทุกความเร็วรอบมีค่าความแข็งลดลงจากเนื้อโลหะเดิม เนื่องมาจากได้รับความร้อนจากการกวนที่มากเกินไปจึงส่งผลให้ค่าความแข็งของบริเวณที่ถูกกวนนั้นมีค่าน้อยกว่าเนื้อโลหะเดิม [26] จากการทดลองพบว่าความร้อนที่เกิดระหว่างการกวนนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและความเร็วเดินกวน [29] จากการทดลองเมื่อเพิ่มความเร็วเดินกวนมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มความเร็วรอบมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยลดลง เพราะฉะนั้น ค่าความแข็งหลังจากการกวนมีผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะกวน โดยมีความเร็วรอบและความเร็วเดินกวนเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดความร้อนในการทดลอง และพบว่าที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที ความเร็วเดินกวน 160

มิลลิเมตร/นาที่ ให้ค่าความแข็งที่ดีที่สุด คือ 64.55 Hv ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่ทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยด้าน retreating side และ advancing side เป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งมากกว่าเนื้อโลหะเดิม โดยที่ค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่ทุกสภาวะการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 ค่าความแข็งเฉลี่ยของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที่ ความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที่ (BM : เนื้อโลหะเดิม TMAZ : บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน SZ : บริเวณที่ถูกกวน)

4.5 การทดสอบความแข็งแรงดึงหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

จากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงของการกวน ขึ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 ที่ผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนจะถูกตัดในลักษณะตามยาวกับรอยกวน จากนั้นนำไปกัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM (E8) และทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วยความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} มิลลิเมตร/นาที่ ผลของการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบงาน ดังตาราง 4.1 รายละเอียดต่างๆ แสดงดังภาคผนวก ข

ตาราง 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที

ลำดับ	ความเร็วรอบ : ความเร็วเดินกวน	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
		ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3		
1	1,320 : 80	165.29	160.53	163.89	163.24	2.45
2	1,320 : 120	184.27	182.80	182.68	183.25	0.89
3	1,320 : 160	174.71	175.95	172.80	174.49	1.59
4	1,480 : 80	156.62	158.75	157.69	157.69	1.07
5	1,480 : 120	173.85	172.59	170.21	172.22	1.85
6	1,480 : 160	174.24	176.43	173.19	174.62	1.65
7	1,750 : 80	154.73	154.25	152.98	153.99	0.90
8	1,750 : 120	169.59	170.58	173.59	171.25	2.08
9	1,750 : 160	185.83	189.94	189.93	188.57	2.37

4.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ

ในสมมุติฐานการทดลองจะทำการพิจารณาที่ผลกระทบหลัก (main effects) และผลกระทบ (interaction) ที่ 2 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

พิจารณา Main Effect

-ทดสอบสมมุติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบของเครื่องมือ

μ_1, μ_2, μ_3 คือ ความเร็วรอบของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

$H_0 : \mu_1 | \mu_2 | \mu_3 | 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน

-ทดสอบสมมุติฐานอิทธิพลของปัจจัยความเร็วเดินกวน

η_1, η_2, η_3 คือ ความเร็วเดินกวน

$H_0 : \eta_1 | \eta_2 | \eta_3 | 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินกวนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \eta_1 \neq \eta_2 \neq \eta_3 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินกวนแตกต่างกัน

พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

-ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและความเร็วเดินกวน

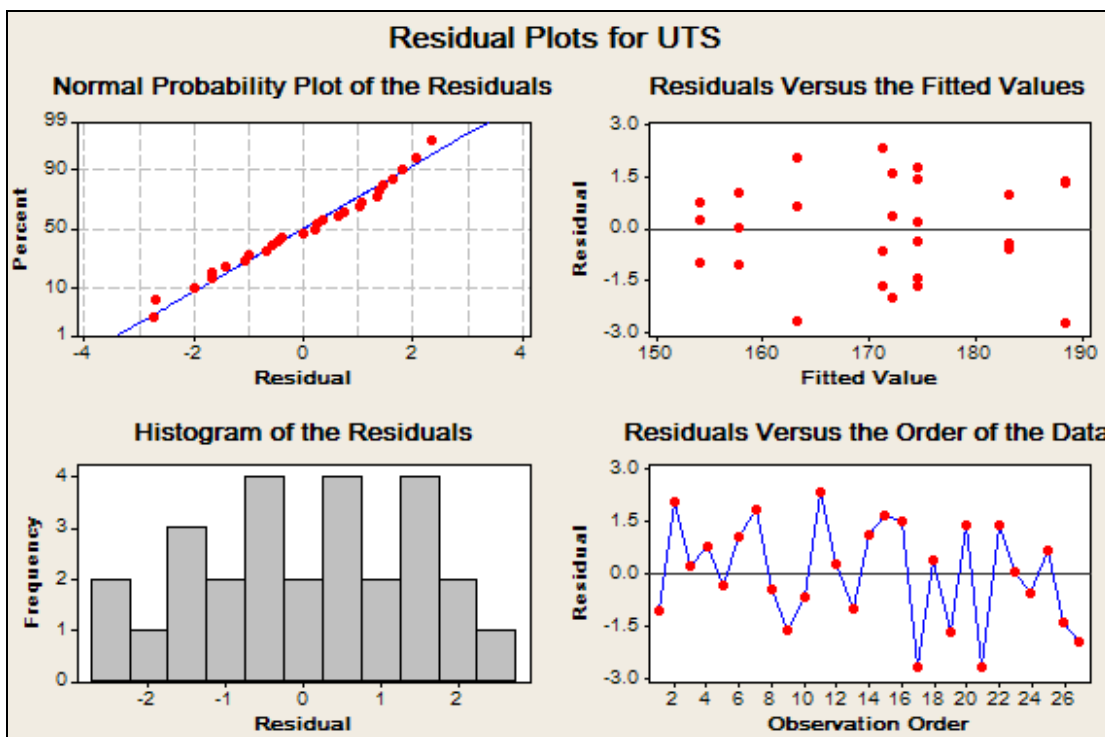
$H_0 : \eta_{ij} | 0$ ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา $/i | 1,2,3; j | 1,2,30$

$H_1 : \eta_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา $/i | 1,2,3; j | 1,2,30$

4.5.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

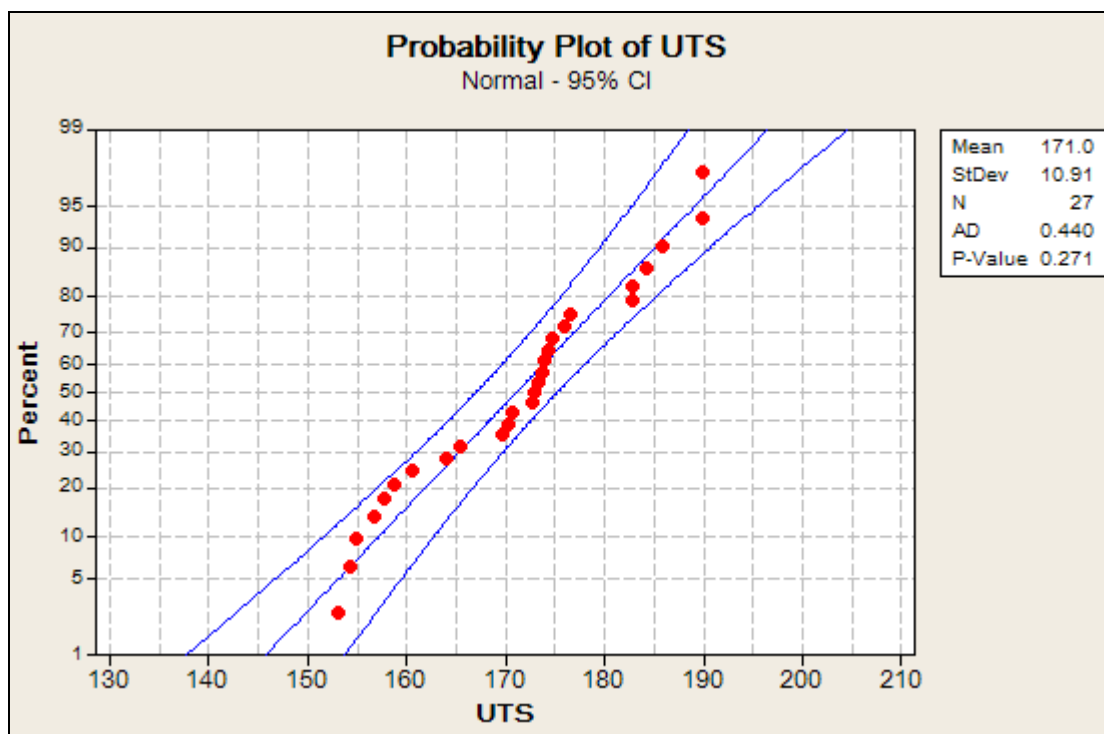
เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม เป็นเส้นตรง และการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ในลักษณะใด เพื่อให้มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลองอยู่ภายใต้สภาวะการควบคุมโดยพิจารณา ดังนี้

1) พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล โดยดูจากกราฟ residual versus the order of the data จากภาพที่ 4.26 เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุ่มอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่จากลักษณะของจุดที่ควรให้ความสำคัญจากภาพที่ 4.26 ดังกล่าวไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม



ภาพที่ 4.26 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

2) พิจารณากระจายตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรง เนื่องจากข้อมูลมีน้อยกว่า 30 ตัว จึงพิจารณาจาก normal probability plot of the residuals ดังภาพที่ 4.26 จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่มีบางจุดกระจายตัวออกนอกเส้นทำให้ไม่มั่นใจในการกระจายตัวของข้อมูล จึงได้มีการทดสอบ normal probability ดังภาพที่ 4.27 จากข้อกำหนด Alpha (ζ) = 0.05 จากกราฟได้ค่า P - Value = 0.271 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ



ภาพที่ 4.27 ลักษณะการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล

3) พิจารณาข้อมูลรอบค่าศูนย์ ลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกันมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์จาก (Model Adequacy Checking) ดังภาพที่ 4.26 ลักษณะข้อมูล Residuals versus the fitted values ที่ได้มีบางค่าที่กระจายตัวออกห่างจากจุดศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลอง มีการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน

จากภาพที่ 4.28 แสดงช่วงความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของรอยกวานจาก ปัจจัยต่างๆเหมือนกัน แสดงว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้ง 9 ครั้ง ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถทดสอบได้ดังนี้

ทดสอบความแตกต่างกันของความแปรปรวน จากสมมติฐาน

$\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2, \omega_4^2, \omega_5^2, \omega_6^2, \omega_7^2, \omega_8^2, \omega_9^2$ คือ ค่าความแปรปรวนของแต่ละการ

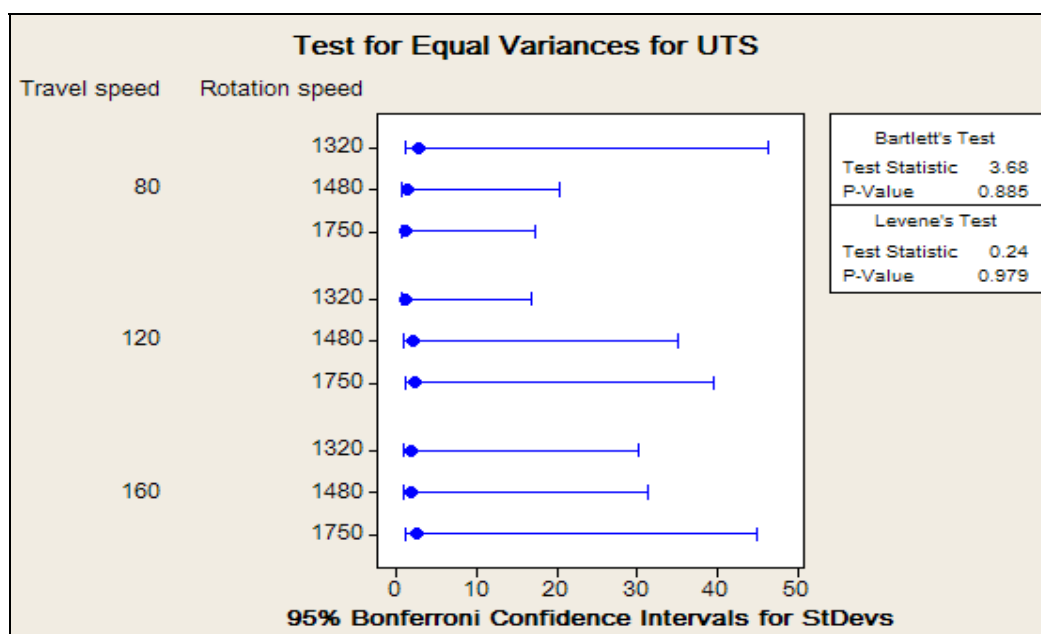
ทดลอง

$H_0 : \omega_1^2 | \omega_2^2 | \omega_3^2 | \omega_4^2 | \omega_5^2 | \omega_6^2 | \omega_7^2 | \omega_8^2 | \omega_9^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 9 เท่ากัน

$H_1 : \omega_1^2 \neq \omega_2^2 \neq \omega_3^2 \neq \omega_4^2 \neq \omega_5^2 \neq \omega_6^2 \neq \omega_7^2 \neq \omega_8^2 \neq \omega_9^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 9 ไม่เท่ากัน

ทดสอบสมมติฐาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\zeta = 0.05$

จาก Bartlett's Test ผลการคำนวณที่ได้ดังภาพที่ 4.28 ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.885 ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่า $\zeta = 0.05$ จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 9 ครั้ง มีค่าเท่ากัน หรือมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.28 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความแข็งแรงดึงตามปัจจัยต่างๆ แสดงในตาราง 4.2 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 98.23% หมายความว่า ความผันแปรต่างๆของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่างๆที่กำหนดค่าให้คงที่ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 98.23% ส่วนที่เหลือประมาณ 1.77% เกิดจากปัจจัยต่างๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) ดังนั้นการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ตาราง 4.2 ANOVA ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบและความเร็วเดินกวน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation speed	2	136.05	136.05	68.02	22.39	0.000
Travel speed	2	2247.83	2247.83	1123.91	369.91	0.000
Rotation speed*Travel speed	4	653.36	653.36	163.34	53.76	0.000
Error	18	54.69	54.69	3.04		
Total	26	3091.93				

R-Sq = 98.23%

4.5.3 ทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

ในการทดสอบสมมติฐานในการทดลองจะทำการพิจารณาที่ผลกระทบหลัก (main effects) และผลกระทบ (interaction) ที่ 2 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

พิจารณา Main Effect

ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบ

$H_0 : \mu_1 | \mu_2 | \mu_3 | 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตาราง 4.2 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบ มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

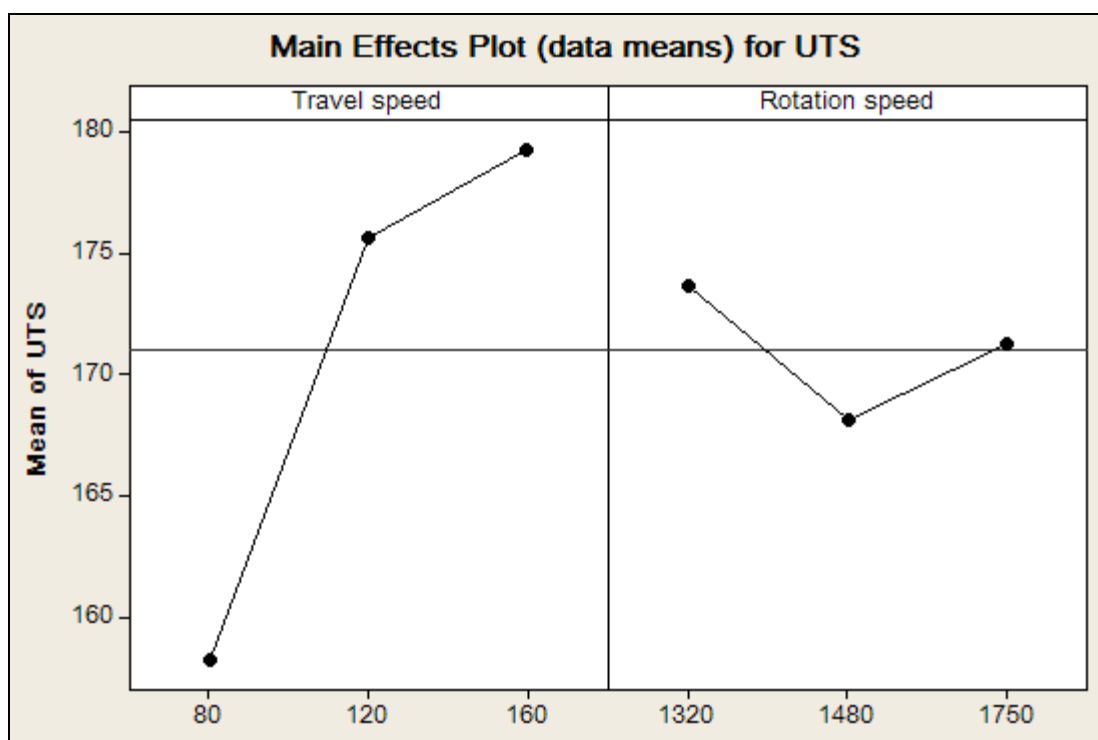
ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของปัจจัยความเร็วเดินกวน

$H_0 : \eta_1 | \eta_2 | \eta_3 | 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินกวนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \eta_1 \neq \eta_2 \neq \eta_3 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินกวนแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตาราง 4.2 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\zeta = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยความเร็วเดินกวนมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ความเร็วรอบและความเร็วเดินกวนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึง พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วเดินกวน จาก 80 มิลลิเมตร/นาที เพิ่มขึ้น 120 มิลลิเมตร/นาที และเพิ่มขึ้น 160 มิลลิเมตร/นาที ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของแต่ละความเร็วเดินกวนนั้นเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มความเร็วรอบ พบว่าความเร็วที่ 1,320 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด ส่วนความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที และ ความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที นั้นค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงน้อยลงมาตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.29



ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับความเร็วรอบและความเร็วเดินกวน

พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

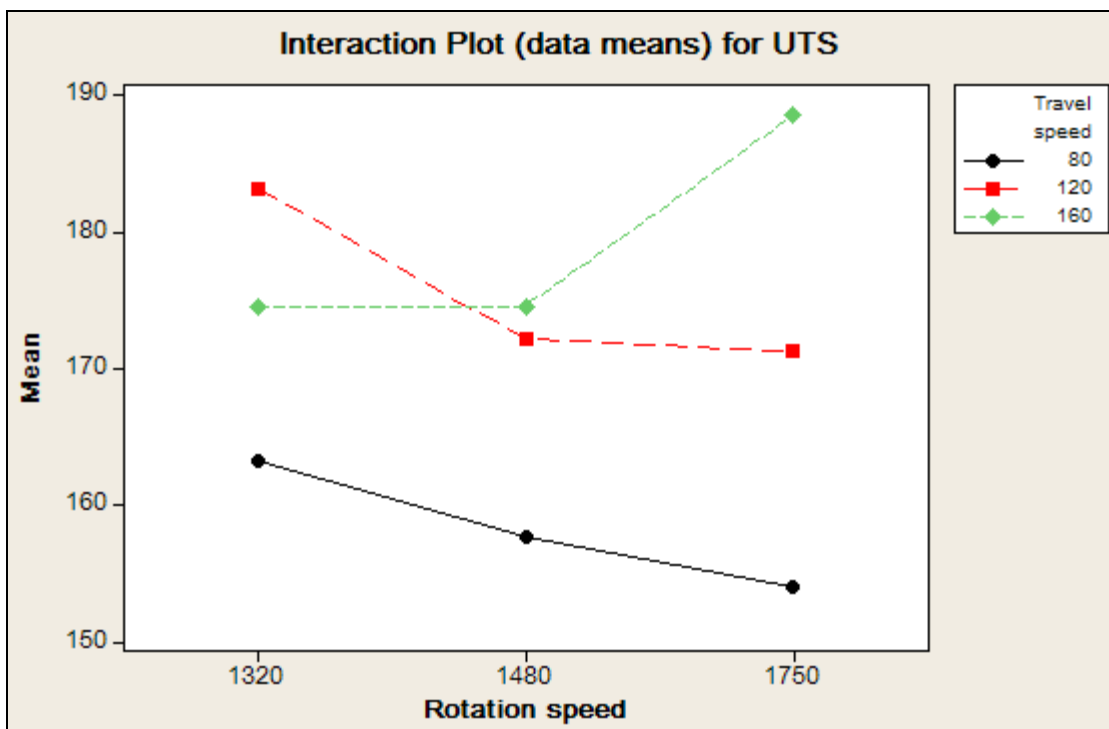
ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและความเร็วเดินกวน

$H_0 : \mu_{ij} = 0$ ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา $/i | 1,2,3; j | 1,2,30$

$H_1 : \mu_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา $/i | 1,2,3; j | 1,2,30$

จากข้อมูลในตาราง 4.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาด้วย ANOVA ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่ามีอิทธิพลของอันตรกิริยา ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วเดินกวนมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากภาพที่ 4.30 กราฟแสดง Interaction ระหว่างอิทธิพลของความเร็วเดินกวน และความเร็วรอบ พบว่าความเร็วเดินกวนที่ 80 และ 120 มิลลิเมตร/นาที มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจาก 1,320 รอบ/นาที ไปจนถึง 1,750 รอบ/นาที แต่ความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที พบว่ามีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความเร็วรอบ โดยพบค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที



ภาพที่ 4.30 อันตรกิริยาระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับความเร็วเดินกวน

4.5.4 การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Fisher

(1) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบที่ 1,320 รอบ/นาที

กำหนดให้ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ความเร็วเดินกวนที่ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

$H_0 : \sigma_1 | \sigma_2 | \sigma_3$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของทั้ง 3 ระดับ ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \sigma_i \neq \sigma_j$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงอย่างน้อย 1 คู่แตกต่างกัน โดยที่ $i \neq j$

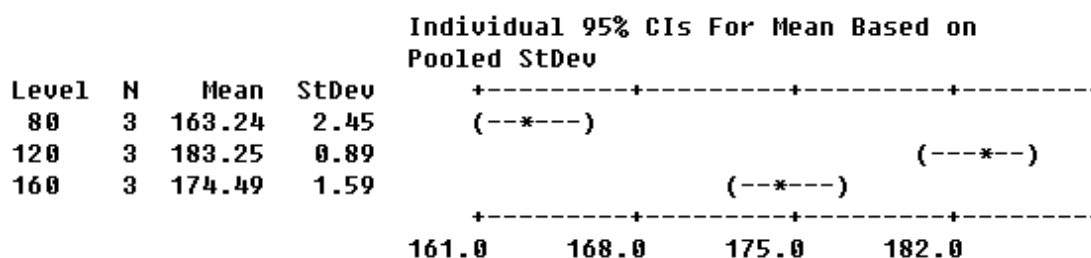
จากข้อมูลในตาราง 4.3 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\zeta = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนว่ามีอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 4.3 ANOVA ของความเร็วรอบที่ 1,320 รอบ/นาที

Source	DF	SS	MS	F	P
1,320	2	603.89	301.95	97.54	0.000
Error	6	18.57	3.10		
Total	8	622.46			

R-Sq = 97.02%

ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที และ 160 มิลลิเมตร/นาที และค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที แสดงดังภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.31 การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,320 รอบ/นาที

(2) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที

กำหนดให้ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ความเร็วเดินกวนที่ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

$H_0 : \sigma_1 | \sigma_2 | \sigma_3$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของทั้ง 3 ระดับ ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \sigma_i \neq \sigma_j$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงอย่างน้อย 1 คู่ แตกต่างกัน โดยที่ $i \neq j$

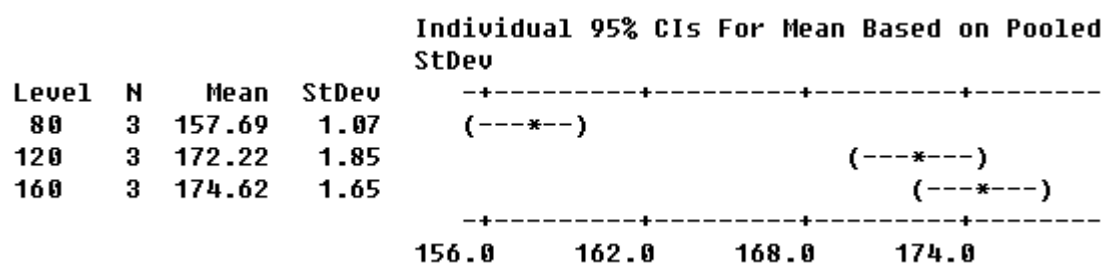
จากข้อมูลในตาราง 4.4 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนว่ามีอย่างน้อย 1 คู่ ที่มีค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 4.4 ANOVA ของความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที

Source	DF	SS	MS	F	P
1,480	2	503.63	251.82	103.72	0.000
Error	6	14.57	2.43		
Total	8	518.20			

R-Sq = 97.19%

ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที และ 160 มิลลิเมตร/นาที แต่ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที ไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที แสดงดัง ภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.32 การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,480 รอบ/นาที

(3) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที

กำหนดให้ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ความเร็วเดินกวนที่ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

$H_0 : \sigma_1 | \sigma_2 | \sigma_3$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของทั้ง 3 ระดับ ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \sigma_i \neq \sigma_j$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงอย่างน้อย 1 คู่ แตกต่างกัน โดยที่ $i \neq j$

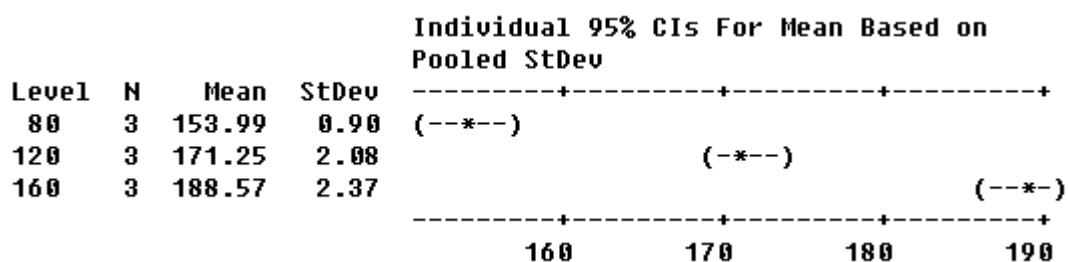
จากข้อมูลในตาราง 4.5 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนว่ามีอย่างน้อย 1 คู่ ที่มีค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 4.5 ANOVA ของความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที

Source	DF	SS	MS	F	P
1,750	2	1793.67	896.83	249.71	0.000
Error	6	21.55	3.59		
Total	8	1815.22			

R-Sq = 98.81%

ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที และ 160 มิลลิเมตร/นาที และค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที แสดงดัง ภาพที่ 4.33



ภาพที่ 4.33 การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,750 รอบ/นาที

(4) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที

กำหนดให้ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ความเร็วรอบที่ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที

$H_0 : \sigma_1 | \sigma_2 | \sigma_3$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของทั้ง 3 ระดับ ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \sigma_i \neq \sigma_j$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงอย่างน้อย 1 คู่แตกต่างกัน โดยที่ $i \neq j$

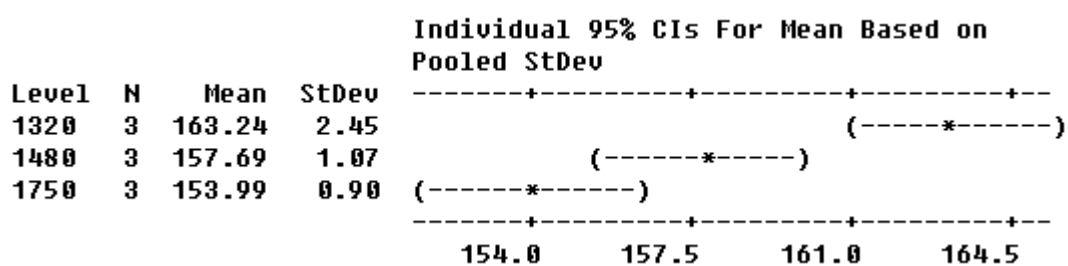
จากข้อมูลในตาราง 4.6 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนว่ามีอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 4.6 ANOVA ของความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที

Source	DF	SS	MS	F	P
80	2	130.05	65.03	24.58	0.001
Error	6	15.87	2.65		
Total	8	145.93			

R-Sq = 89.12%

ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,320 รอบ/นาที แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที และ 1,750 รอบ/นาที แต่ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที ไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที แสดงดังภาพที่ 4.34



ภาพที่ 4.34 การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวน 80 มิลลิเมตร/นาที

(5) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที

กำหนดให้ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ความเร็วรอบที่ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที

$H_0 : \sigma_1 | \sigma_2 | \sigma_3$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของทั้ง 3 ระดับ ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \sigma_i \neq \sigma_j$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงอย่างน้อย 1 คู่ แตกต่างกัน โดยที่ $i \neq j$

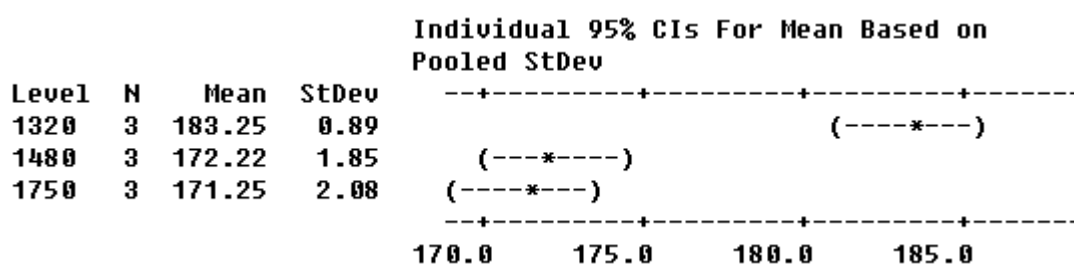
จากข้อมูลในตาราง 4.7 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนว่ามีอย่างน้อย 1 คู่ ที่มีค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 4.7 ANOVA ของความเร็วเดินกวนที่ 120 มิลลิเมตร/นาที

Source	DF	SS	MS	F	P
120	2	266.58	133.29	46.82	0.000
Error	6	17.08	2.85		
Total	8	283.66			

R-Sq = 93.98%

ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,320 รอบ/นาที แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที และ 1,750 รอบ/นาที แต่ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที ไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที แสดงดังภาพที่ 4.35



ภาพที่ 4.35 การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที

(6) ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที

กำหนดให้ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ความเร็วรอบที่ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที

$H_0 : \sigma_1 | \sigma_2 | \sigma_3$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของทั้ง 3 ระดับ ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \sigma_i \neq \sigma_j$ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงอย่างน้อย 1 คู่ แตกต่างกัน โดยที่ $i \neq j$

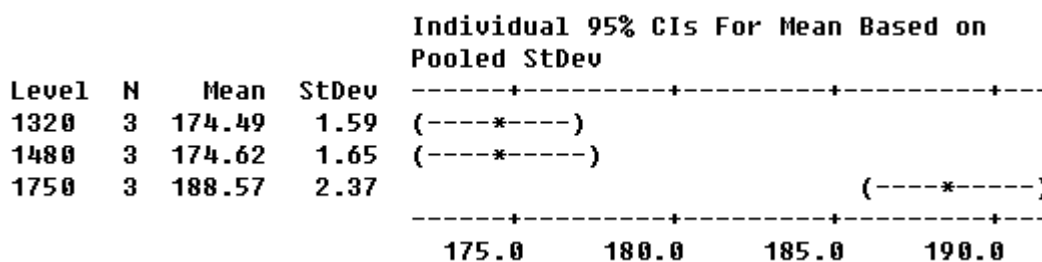
จากข้อมูลในตาราง 4.8 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนว่ามีอย่างน้อย 1 คู่ ที่มีค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 4.8 ANOVA ของความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที

Source	DF	SS	MS	F	P
160	2	392.77	196.39	54.21	0.000
Error	6	21.74	3.62		
Total	8	414.51			

R-Sq = 94.76%

ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,320 รอบ/นาที ไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที แต่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที และค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,480 รอบ/นาที แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงของความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที แสดงดังภาพที่ 4.36



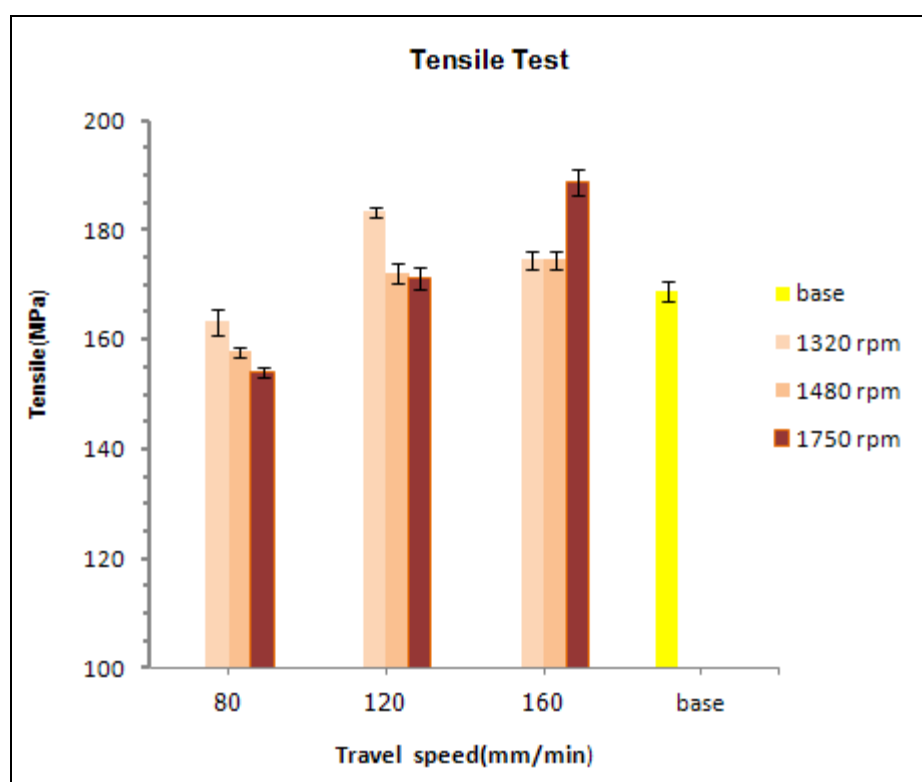
ภาพที่ 4.36 การทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที

4.5.5 วิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของบริเวณถูกกวน ของความเร็วรอบที่ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที กับความเร็วเดินกวนที่ 80 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และความเร็วเดินกวนกับค่าความแข็งแรงดึงในแต่ละปัจจัย ดังภาพที่ 4.37 แสดงผลของการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของแนวกวน ในสถานะความเร็วเดินกวน คือ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วรอบที่ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วเดินกวนที่ความเร็วรอบ 1,480 1,750 รอบ/นาที เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการกวนมีค่าน้อยลงจนถึงความร้อนที่พอเหมาะที่สุดในการกวน คือ ความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที โดยมีค่าความแข็งแรงดึงจากความเร็วเดินกวนต่ำไปความเร็วเดินกวนสูง คือ 153.99 171.25 และ 188.57 MPa ตามลำดับ และเมื่อนำสถานะการทดลองที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ ความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที ไปตัดชิ้นทดสอบตามแนวตามขวางกับรอยกวน พบว่าชิ้นทดสอบที่ตัดตามแนวขวางกับแนวกวนนั้นมีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่าตัดตามแนวยาวกับรอยกวน เนื่องจากบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนมีการเรียงเป็นแถวตามลักษณะเฉพาะของอนุภาค Si (ไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของการตัดตามขวางกับแนวกวนมีค่าน้อยกว่าตัดตามยาวกับรอยกวน [9] ดังแสดงในภาคผนวก ข.5

ส่วนความเร็วรอบที่ 1,320 รอบ/นาที นั้นพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินกวน 120 มิลลิเมตร/นาที มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่ 160 มิลลิเมตร/นาที เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นของสถานะการทดลองนี้มีความร้อนใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่เหมาะสมในการทดลองครั้งนี้ จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงกว่าความเร็วรอบที่ 160 มิลลิเมตร/นาที และพบว่าสาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงน้อยกว่าเนื้อโลหะเดิมนั้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น

ระหว่างการควมมีมากเกินไป [26] โดยในการทดลองมีการใช้โปรแกรมทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติ ประกอบด้วย ความเป็นอิสระของข้อมูล ความเป็นปกติของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล การวิเคราะห์พบว่าข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มปกติคือมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 และข้อมูลมีการกระจายตัวแปรผันสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์



ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,480 และ 1,750 รอบ/นาที ส่วนความเร็วเดินกวนที่ระดับ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

4.6 อภิปรายผลการทดลอง

กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน เป็นเทคนิคใหม่ที่ใช้สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค โดยมีหลักการทำงาน คือ จะเกิดการหมุนของตัวกวน ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นหัวพินและบ่า มีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นระหว่างตัวกวนกับชิ้นงาน ก่อให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความอ่อนตัวและไหลวนเข้าด้วยกัน ซึ่งกรรมวิธีนี้จะทำ

ให้เกิดเกรนที่มีความละเอียดขึ้น สร้างผิวของวัสดุผสม เกิดความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างทางจุลภาคของเฟสอะลูมิเนียมผสมขึ้น

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Santella *et al.* [4] โดยที่ใช้วัสดุชนิดเดียวกัน คือ อะลูมิเนียมเกรด 356 แต่กรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นหลังจากใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน สิ่งที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อผ่านการกวน เกรนมีขนาดละเอียดขึ้นทำให้มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่าขนาดเกรนมีความละเอียดขึ้นเมื่อนำมาเทียบกับเนื้อโลหะเดิม อย่างไรก็ตามกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 มีวัตถุประสงค์เหมือนกับกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลทางความร้อน โดยงานวิจัยของ สิริพร ชันทองคำ [33] ขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง และนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 พบว่ามีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบด้วยเนื้อเมตริกซ์ คือ เฟส ζ -Al (บริเวณสีขาว) และเฟสยูเทคติกซิลิกอน คือ บริเวณที่มีรูปร่างเป็นแผ่นเล็กๆ กระจายตามขอบเกรนของเฟส ζ -Al การเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของเฟสยูเทคติกหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 มีลักษณะกลมมนมากขึ้นและมีขนาดเล็กลง แสดงให้เห็นว่า มีการแพร่ของอะตอมซิลิกอนออกจากเฟสยูเทคติกซิลิกอนและละลายเข้าสู่เมตริกซ์ โดยระยะเวลาของขั้นตอนการอบละลายส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะและรูปร่างของเฟสยูเทคติกซิลิกอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ว่าความร้อนจากการกวนส่งผลให้เกรนมีขนาดละเอียดขึ้นทำให้มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนอย่างสม่ำเสมอส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้น ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 30% เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม แต่กระบวนการทางความร้อนแบบ T6 นั้นไม่สามารถกำจัดรูพรุนที่เกิดจากการหล่อ ต่างกับกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ใช้ตัวกวน ไปกวนให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นระหว่างตัวกวนกับชิ้นงานก่อให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความอ่อนตัวและไหลวนเข้าด้วยกัน ซึ่งสร้างผิวของวัสดุผสมเกิดความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างทางจุลภาคของเฟสอะลูมิเนียมผสมขึ้น ทำให้รูพรุนหายไป

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองของชิ้นทดสอบในสภาวะหล่อของ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนแบบกึ่งของแข็ง เกรด 356 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และผลทดสอบสมบัติเชิงกลที่ประกอบด้วยการทดสอบความแข็งและการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบ โดยการนำกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมาใช้ สามารถสรุปได้ว่า

1. โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบในสภาวะหล่อ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบแบบกึ่งของแข็งนั้นประกอบด้วยเนื้อเมตริกซ์คือเฟส ζ 4 Al , เฟสยูเทคติกซิลิกอน และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบพบว่ามีความแข็ง 40.58 Hv และค่าความแข็งแรงดึง 168.68 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 5.14%

2. โครงสร้างมหภาคที่ผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน พบว่ามีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันเป็นอย่างดี ไม่พบรอยบกพร่องใดๆบนชิ้นงาน ผิวของรอยกวนมีลักษณะเรียบ

3. โครงสร้างทางจุลภาคหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน พบว่าทุกสภาวะมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใดๆบริเวณที่ถูกกวน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนเชิงกลด้าน retreating จะมีลักษณะของโครงสร้างที่ค่อนข้างละเอียดและคล้ายกับถูกอัด และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนเชิงกลด้าน advancing มีลักษณะโครงสร้างแบบยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน retreating

4. ค่าความแข็งของบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนทั้งทางด้าน retreating และ advancing มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นทุกสภาวะการทดลองเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของเนื้อโลหะเดิม แต่บริเวณที่ถูกกวนนั้นมีค่าความแข็งทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยสภาวะที่ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น คือ ความเร็วเดินกวนที่ 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที ของทุกความเร็วรอบ ส่วนสภาวะที่ค่าความแข็งลดลง คือ ความเร็วเดินกวนที่ 80 มิลลิเมตร/นาที ของทุกความเร็วรอบ โดยสภาวะที่ค่าความแข็งมี

ค่าสูงสุด คือ ความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที ใช้ความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที มีค่าเท่ากับ 64.55 Hv ซึ่งเพิ่มขึ้น 59.07% เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม

5. ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดหลังจากการใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมีค่าเท่ากับ 188.57 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 11.8% เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม โดยพบว่าสถานะที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ ความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ประกอบด้วยความเป็นอิสระของข้อมูล ความเป็นปกติของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล การวิเคราะห์พบว่าข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มปกติคือมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 และข้อมูลมีการกระจายตัวแปรผันสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังจากผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนพบว่า ที่ความเร็วรอบที่ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวนที่ 160 มิลลิเมตร/นาที ให้ค่าสมบัติเชิงกลดีที่สุดทั้งค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงดึง

5.2 ข้อเสนอแนะ

สิ่งที่พบหลังจากการใช้กรรมวิธีเสียดทานแบบกวน เพื่อที่จะนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 356

1. ก่อนการกวนควรตรวจสอบผิวของแผ่นงานที่จะนำมากวนเพื่อป้องกันคราบสกปรกต่างๆ ติดกับผิว เพราะคราบสกปรกต่างๆ อาจจะทำให้เกิดความบกพร่องในการกวนได้
2. ก่อนทำการกวนควรกวนชิ้นงานทดลองเพื่อที่จะให้ความร้อนเกิดการสะสมในแผ่นรองชิ้นงานก่อน อีกทั้งเพื่อไล่ความชื้นในแผ่นรองชิ้นงานด้วย
3. ยังมีบริเวณที่เป็นเนื้อโลหะเดิม ถ้าสามารถกวนได้ทั้งหมด น่าจะส่งผลให้ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น
4. นำไปใช้ปรับปรุงชิ้นส่วนในเชิงอุตสาหกรรมรถยนต์ เช่น ระบบรองรับน้ำหนัก ระบบขับเคลื่อน และ ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความทนทานในการใช้งานชิ้นส่วนเหล่านั้น

บรรณานุกรม

- [1] เจษฎา วรรณสินธุ์. “เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดแคสติงแบบกึ่งของแข็ง,” การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2549.
- [2] L. Karthikeyan., V.S. Senthilkumar., V. Balasubramanian and S. Natarajan. “Mechanical property and microstructural changes during friction stir processing of cast aluminum 2285 alloy.” *Journal of Materials and Design*, vol. 30, pp. 2237-2242, Sep. 2008.
- [3] L. Karthikeyan., V.S. Senthilkumar and K.A. Padmanabhan. “On the role variables in the friction stir processing of cast aluminum A319 alloy.” *Journal of Materials and Design*, vol. 31, pp 761-771, Aug. 2009.
- [4] M.L. Santella., T. Engstrom., D. Storjohann and T.Y. Pan. “Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356.” *Journal of Scripta Material*, vol. 53, pp. 201-206, Apr. 2005.
- [5] P. S. Sklad. “Friction Stir Processing of Advanced Materials.” *Lightweight Materials Program Metals and Ceramics Division Oak Ridge National Laboratory*, Nov. 2002.
- [6] R.S. Mishra and Z.Y. Ma. “Friction Stir Welding and Processing.” *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [7] W.M. Thomas and E.D. Nicholas. “Friction Stir Welding for the Transportation Industries.” *Journal of Materials and Design*, vol. 18, pp. 269-273, Jun. 1997.
- [8] A.K. Lakshminarayanan and V. Balasubramanian. “Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique.” *Journal of Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 18, pp. 548-554, Nov. 2007.
- [9] K. Nakata., Y.G. Kim., H. Fujii., T. Tsumura and T. Komazaki. “Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Die Casting Alloy by Multi-pass Friction Stir Processing.” *Journal of Material Science and Engineering*, vol. A437, pp. 274-280, Jul. 2006.

- [10] Y.J. Kwon., N. Saito and I. Shigematsu. "Friction Stir Process as a New Manufacturing Technique of Ultrafine Grained Aluminum Alloy." *Journal of Materials Science Letters*, vol. 21, pp. 1473-1476, 2002.
- [11] Y. Morisada., H. Fujii., T. Nagaoka and M. Fukusumi. "Effect of friction stir processing with SiC particles on microstructure and hardness of AZ31." *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. A433, pp. 50-54, Jun. 2006.
- [12] M. Amirizad., A.H. Kokabi., M.A. Gharacheh., R. Sarrafi., B. Shalchi and M. Azizieh. "Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded A356+15%SiCp cast composite." *Journal of Materials Letters*, vol. 60, pp. 565-568, Oct. 2005.
- [13] Z.Y. Ma., S.R. Sharma and R.S. Mishra. "Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum." *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. A433, pp. 269-278, Jun. 2006.
- [14] อับดุล บินระหีม. "ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยาและทางกลของอะลูมิเนียม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2551.
- [15] ชงชัย เครือผือ. "อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2552.
- [16] M.C. Flemings. *Solidification processing*. New York, U.S.A. : McGraw-Hill Book Company, 1974, pp. 146-154.
- [17] A. Vogel., R.D. Doherty and B. Carton. *Solidification and casting metal*. London, England. : The metal Society, 1979.
- [18] R.D. Doherty., H.I. Lee and E.A. Feest. "Microstructure of stir-cast metals." *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 65, pp. 181-189, May. 2003.

- [19] M.C. Flemings and W.L. Johnson. "High viscosity liquid and semi-solid metal casting: Processes and products," Plenary lecture world foundry conference, KyongJu, Korea, October 20-24, 2002.
- [20] R.A. Martinez. "Formation and Processing of Rheocast microstructures." Ph.D.Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A. 2004.
- [21] R.S. Mishra and M.W. Mahoney. "Friction Stir Processing," in Friction Stir Welding and Processing. R.S. Mishra and M.W. Mahoney, Ed. pp. 309-350.
- [22] K. Elangovan and V. Balasubramanian. "Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy." *Journal of Materials processing technology*, vol. 200, pp. 163–175, Sep. 2007.
- [23] R. Nandan., G.G. Roy., T.J. Lienert and T. Debroy. "Three-Dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel." *Journal of Acta Materialia*, vol.55, pp. 883–895. Dec. 2006.
- [24] Y.G. Kim., H. Fujii., T. Tsumura., T. Komazaki and K. Nakata. "Effect of Welding parameter on Microstructure in stir zone of FSW joints of Aluminum die casting alloy." *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. A415, pp. 250-254, Apr. 2006.
- [25] Y.H. Zhao., S.B. Lin., L. Wu and F.X. Qu. "The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy." *Journal of Materials Letters*, vol. 59, pp. 2948 – 2952. Apr. 2005.
- [26] Y.G. Kim., H. Fujii., T. Tsumura., T. Komazaki and K. Nakata. "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy." *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. A 415, pp. 250-254, Sep. 2005.
- [27] Kh.A.A. Hassan., P.B. Prangnell., A.F. Norman., D.A. Price and S.W. Williams. "Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds." *Journal of Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 8(4), pp. 257 – 268, 2003.
- [28] H. Liu., M. Maeda., H. Fujii and K. Nogi. "Tensile properties and fracture location of friction stir welded joints of 1050-H24 aluminum alloy." *Journal of Materials Science Letters*, vol. 22(1), pp. 41 – 43, 2003.

- [29] H.S. Park., T. Kimura., T. Murakami., Y. Nagano., K. Nakata and M. Ushio. “Microstructure and mechanical properties of friction stir welds of 60%Cu-40%Zn copper alloy.” *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. A371, pp. 160 – 169, Nov. 2003.
- [30] Kh.A.A. Hassan., A.F. Norman., D.A. Price and P.B. Prangnell. “Stability of nugget zone grain structures in high strength Al-alloy friction stir welds during solution treatment.” *Journal of Acta Materialia*, vol. 51, pp. 1923 – 1936, Nov. 2002.
- [31] G. Padmanaban and V. Balasubramanian. “ Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – an experimental approach.” *Journal of Materials and Design*, vol. 30, pp. 2647 – 2656, Oct. 2008.
- [32] W.B. Lee., Y.M. Yeon and S.B. Jung. “The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy.” *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. A356, pp. 154-159, Jun. 2003.
- [33] สิริพร ชันทองคำ. “อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2552.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

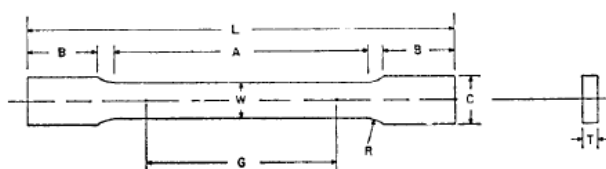
ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล

ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายเจือจาง Keller's reagent

กรดไฮโดรฟลูออริก	ความเข้มข้น 48% 2 ml
กรดไฮโดรคลอริก	(เข้มข้น) 3 ml
กรดไนตริก	5 ml
น้ำ	190 ml

ก.2 ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8

ASTM E 8



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 1½-in. Wide	Sheet-Type, ½-in. Wide	¼-in. Wide
	in.	in.	in.
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	8.00 ± 0.01	2.000 ± 0.005	1.000 ± 0.003
W—Width (Note 3 and Note 4)	1½ + ⅛, - ¼	0.500 ± 0.010	0.250 ± 0.005
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	1	½	¼
L—Over-all length, min (Note 2 and Note 7)	18	8	4
A—Length of reduced section, min	9	2¼	1¼
B—Length of grip section, min (Note 8)	3	2	1¼
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	2	¾	¾

NOTE 1—For the 1½-in. wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 1 in. apart, or one or more pairs of punch marks 8 in. apart may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 1½-in. wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (A) of 2¼ in. may be used with all other dimensions similar to those of the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.004, 0.002 or 0.001 in., respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 0.015, 0.005, or 0.003 in., respectively, larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension T is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 1½-in. wide specimens shall be ⅜ in. Maximum thickness of ½-in. and ¼-in. wide specimens shall be ¾ in. and ¼ in., respectively.

NOTE 6—For the 1½-in. wide specimen, a ½-in. minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 100 000 psi in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—To aid in obtaining axial force application during testing of ¼-in. wide specimens, the over-all length should be as large as the material will permit, up to 8.00 in.

NOTE 8—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of ½-in. wide specimens is over ¾ in., longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

NOTE 9—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 0.10, 0.05 and 0.005 in., respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the ½-in. wide specimen shall be symmetrical within 0.01 in.

NOTE 10—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 0.05 in., and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 0.10 in.

NOTE 11—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than $2W$ from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

ภาคผนวก ข

ค่าความแข็งแรงดึงหลังจากทำกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

ข.1 ค่าความแข็งแรงดึงจากกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเนื้อ โลหะเดิม

สภาพ	Specimen	Tensile Test (MPa)		
		UTS	YS	Elongation (%)
Base	1	170.25	137.9	4.83
	2	168.47	134.65	5.46
	3	171.52	138.12	4.62
	4	167.68	133.89	5.34
	5	169.05	134.42	5.76
	6	165.07	134.67	5.12
	7	167.04	136.97	5.23
	8	168.64	135.46	5.31
	9	170.39	137.68	4.98
	10	169.27	134.68	4.73

หมายเหตุ specimen 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบแต่ละชิ้น

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรอยกวนที่ความเร็วรอบของพิน 1,320 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

Rotation Speed	Travel Speed	Specimen	Tensile Test (MPa)		
			UTS	YS	Elongation (%)
1,320	80	1	164.02	124.56	5.14
		1	166.56	127.35	5.29
		2	160.81	134.62	4.50
		2	160.25	130.45	4.16
		3	162.44	129.87	4.90
		3	165.34	130.76	5.26
	120	1	184.19	167.34	5.22
		1	184.34	168.54	4.75
		2	181.33	163.67	4.57
		2	184.21	168.90	4.10
		3	181.1	161.21	4.82
		3	184.26	166.45	5.60
	160	1	175.35	138.80	4.57
		1	174.06	139.34	4.12
		2	176.11	138.49	4.68
		2	175.78	139.45	4.31
		3	173.82	138.58	5.13
		3	171.78	138.49	5.49

หมายเหตุ

specimen 1,1 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out
specimen 2,2 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out
specimen 3,3 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรอยกวนที่ความเร็วรอบของพิน 1,480 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

Rotation Speed	Travel Speed	Specimen	Tensile Test (MPa)		
			UTS	YS	Elongation (%)
1,480	80	1	157.49	124.56	4.19
		1	155.75	127.35	4.87
		2	158.82	134.62	4.47
		2	158.68	130.45	4.36
		3	158.48	129.87	4.41
		3	156.9	130.76	3.97
	120	1	174.16	127.34	4.10
		1	173.54	128.54	4.57
		2	172.72	123.67	4.89
		2	172.46	128.90	4.75
		3	171.85	121.21	3.98
		3	168.57	126.45	4.27
	160	1	175.28	138.80	4.21
		1	173.2	139.34	4.32
		2	175.93	138.49	4.61
		2	176.92	139.45	4.02
		3	174.53	138.58	4.38
		3	171.85	138.49	4.96

หมายเหตุ

specimen 1,1 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out
specimen 2,2 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out
specimen 3,3 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรอยกวนที่ความเร็วรอบของพิน 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที

Rotation Speed	Travel Speed	Specimen	Tensile Test (MPa)		
			UTS	YS	Elongation (%)
1,750	80	1	153.99	126.46	5.38
		1	155.46	127.79	5.04
		2	155.43	130.76	4.07
		2	153.07	128.27	4.15
		3	151.13	131.21	4.32
		3	154.82	127.98	5.73
	120	1	170.01	138.47	5.35
		1	169.17	136.96	4.94
		2	170.69	132.35	5.18
		2	170.46	138.26	4.30
		3	174.19	130.89	4.06
		3	172.98	134.09	5.05
	160	1	183.14	161.06	5.90
		1	188.52	162.18	5.03
		2	187.79	165.57	5.46
		2	192.08	167.02	4.16
		3	189.36	162.94	4.79
		3	190.5	168.09	4.86

หมายเหตุ

specimen 1,1 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out
specimen 2,2 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out
specimen 3,3 หมายถึง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบซ้ำที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 ชิ้นตามที่ lay out

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของรอยกวนที่ความเร็วรอบของพิน 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินกวน 160 มิลลิเมตร/นาที โดยการตัดชิ้นทดสอบตามขวางกับแนวกวน

Specimen	Tensile Test (MPa)		
	UTS	YS	Elongation (%)
1	177.79	136.67	4.12
2	177.36	131.24	4.20
3	177.17	137.56	4.43
4	176.90	138.11	4.98
5	178.37	136.97	5.04
6	178.23	133.24	5.09
7	178.54	131.49	5.12
8	179.13	136.06	5.54
9	177.90	138.09	4.73
10	178.10	138.41	4.97

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล

นายสุภชัย ชัยณรงค์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5110120046

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

สุภชัย ชัยณรงค์ เสกสรร สุธรรมานนท์ และประภาศ เมืองจันทร์บุรี “การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ อะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งโดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน” การประชุมข่ายงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (IE Network 2010) ระหว่างวันที่ 13-15 ตุลาคม 2553 ณ โรงแรมสุนีย์แกรนด์แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ จ.อุบลราชธานี