

การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอะลูมิเนียมผสมด้วยน้ำ
แรงดันสูงแบบมีสารขัด

INVESTIGATION OF THE CUTTING CONDITION OF
ALUMINUM ALLOY ON ABRASIVE WATER JETS PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอุณหิเยมผสมด้วยน้ำ
แรงดันสูงแบบมีสารขัด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด
ชื่อ – นามสกุล	นายเมธี สุขจี
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัดหรือวอเตอร์เจ็ท เป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่และเริ่มนำมาใช้งานในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงมีคุณสมบัติเด่น คือ ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของวัสดุบริเวณรอยตัด อีกทั้งยังสามารถตัดวัสดุได้หลากหลายชนิดและสามารถตัดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ในวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด ค่าความฉากของชิ้นงานและคลื่นรอยตัดของอลูมิเนียมผสม

ในการดำเนินการศึกษาวิจัย ทำการทดลองตัดชิ้นงานอลูมิเนียมผสมที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง โดยกำหนดตัวแปรหลักของการตัด 3 ตัว คือ แรงดันน้ำที่หัวตัด ขนาดของสารขัด และเกรดของอลูมิเนียม ตัวแปรตามคือ ความหยาบผิวรอยตัด ค่าความฉากของชิ้นงานและคลื่นรอยตัด และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยเทคนิค ANOVA

ผลการวิจัยพบว่า สภาวะการตัดอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัดที่มีค่าความหยาบผิวรอยตัดดีที่สุดเฉลี่ยคือ 3.21 ไมครอน จากการตัดที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh ค่าความฉากของชิ้นงานน้อยที่สุดเฉลี่ย 0.10 องศา จากการตัดที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดสารขัด 60 Mesh ซึ่งขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความฉากของชิ้นงานดีกว่าขนาดของสาร 80 และ 120 Mesh ผลทางด้านคลื่นรอยโดยแรงดันน้ำ 100 - 250 MPa ขนาดสารขัด 60-120 Mesh สามารถตัดชิ้นงานอลูมิเนียมผสมได้โดยไม่ก่อให้เกิดคลื่นรอยตัด ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า ขนาดของสารและเกรดของอลูมิเนียม มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด แรงดันน้ำและขนาดของสารขัดมีอิทธิพลต่อค่าความฉากของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (α) 0.05

คำสำคัญ : การตัดด้วยน้ำแรงดันสูง/ ขนาดสารขัด/ ความหยาบผิว/ ค่าความฉาก/ คลื่นรอยตัด

Thesis Title	Investigation of The Cutting Condition of Aluminum Alloy on Abrasive Water Jets Process
Name - Surname	Mr. Matee Sukkee
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
Academic year	2013

ABSTRACT

The cutting technology of abrasive water jet method is currently new technology, which is widely used in industrial. The most advantage of this method includes no effect on material structure at cutting path, able to cut various material, and able to cut complicated shapes. The objective of this thesis was to study the influences of cutting condition on roughness of cutting surface, perpendicular value and cutting ridge of aluminium alloy.

The study was conducted by cutting aluminium alloy that had a thickness of 25 mm using waterjet cutter machine. Three independent variables used in experiments were water pressure, size of abrasive and type of material; Dependent variables used were the roughness of cutting surface, perpendicular value and cutting ridge and ANOVA method was used for analyzing experimental results.

The experimental results are as follows. The optimized cutting parameter which indicated the cutting surface roughness of 3.21 μm was the water pressure of 175 MPa and the abrasive size of 120 mesh number. The lowest perpendicular value of the work pieces was average 0.10 degree with the water pressure of 250 MPa and the abrasive size of 60 mesh numbers. It was noted that the abrasive size of 60 mesh numbers yielded the perpendicular value of the work pieces better than the abrasive size of 80 and 120 mesh numbers. When the water pressure of 100 – 250 MPa and the abrasive size of 60 – 120 mesh were applied to cut aluminum alloy, the formation of the cutting ridge could not be observed. Statistical analysis revealed that abrasive size and the material type affecting the perpendicular value of the work pieces with statistically significant level (α) of 0.05

Keywords: water jet cutting, size of abrasive, surface roughness, cutting ridge, perpendicular value

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทมณี และดร.ชัยยะ ประณีตพลกรัง กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือด้านเครื่องมือเครื่องจักรและเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองและข้อคิดเห็นตลอดจนความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทั้งในส่วนของการทำงานวิจัยและในส่วนของการทำงานรูปเล่มวิทยานิพนธ์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้รับการอบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทความรู้วิชาการต่างๆ ให้ตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ทางการศึกษาตลอดช่วงเวลาของการศึกษา

เมที สุขจี



สารบัญ

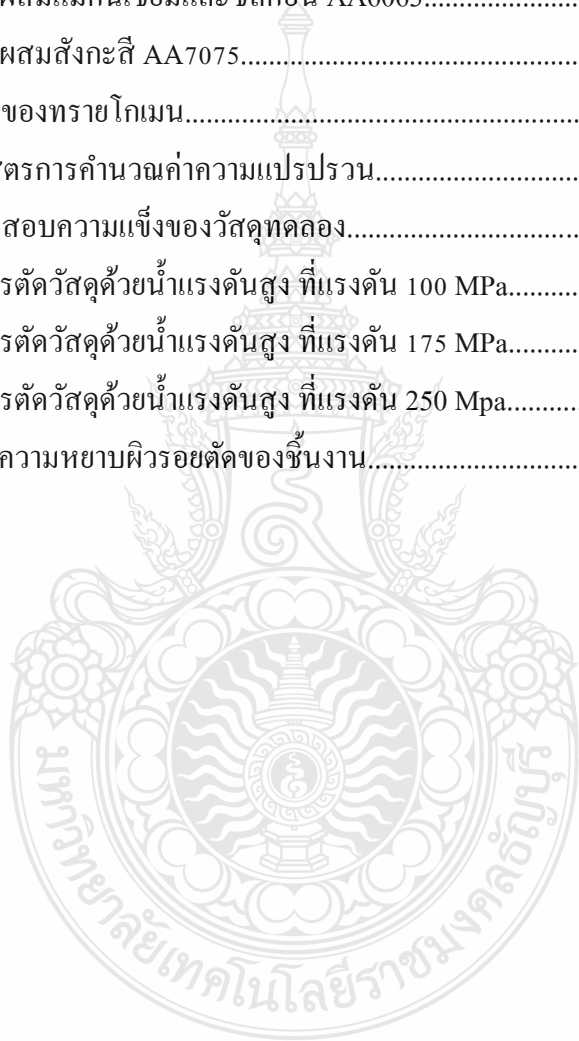
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญเรื่อง.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	14
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	14
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 ทฤษฎีที่สำคัญ.....	16
2.2 อลูมิเนียม (Aluminum).....	24
2.3 สารขัดประเภททราย (Abrasive Garnet).....	27
2.4 ความหยาบผิว.....	28
2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง.....	30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 กระบวนการในการทำวิจัย.....	37
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
3.3 การจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์.....	40
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การป้อนค่าพารามิเตอร์การตัด.....	52
3.6 การทดสอบความหยาบผิว.....	54
3.7 การทดสอบความฉากของชิ้นงาน.....	56
3.8 การทดสอบคลื่นรอยตัด.....	57
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	58
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวรอยตัด.....	58
4.2 ผลการวิเคราะห์ความฉากของชิ้นงาน.....	73
4.3 ผลการวิเคราะห์คลื่นรอยตัด.....	96
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	97
5.1 สรุปผล.....	97
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก ผลการทดลองความหยาบผิว.....	102
ภาคผนวก ข ผลการทดลองความฉากชิ้นงาน.....	130
ภาคผนวก ค ภาพถ่ายการวัดค่าความฉากของชิ้นงาน.....	134
ภาคผนวก ง ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด.....	154
ภาคผนวก ฉ ใบรับรองคุณสมบัติอูมิเนียม.....	164
ภาคผนวก ช ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	168
ประวัติผู้เขียน.....	187

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของอลูมิเนียมตามระบบตัวเลข.....	23
ตารางที่ 2.2 อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน AA6061.....	24
ตารางที่ 2.3 อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน AA6063.....	25
ตารางที่ 2.4 อลูมิเนียมผสมสังกะสี AA7075.....	26
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของทรายโกเมน.....	27
ตารางที่ 2.6 การสรุปสูตรการคำนวณค่าความแปรปรวน.....	34
ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุทดลอง.....	46
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง ที่แรงดัน 100 MPa.....	50
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง ที่แรงดัน 175 MPa.....	51
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง ที่แรงดัน 250 Mpa.....	51
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความหยาบผิวรอยตัดของชิ้นงาน.....	58



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ชุดหัวตัดของระบบเพียวอเตอร์เจ็ท.....	17
รูปที่ 2.2 ชุดหัวตัดของระบบแอบราซีฟอเตอร์เจ็ท.....	18
รูปที่ 2.3 ชุดควบคุมการเคลื่อนที่เครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง.....	20
รูปที่ 2.4 พารามิเตอร์การตัด.....	21
รูปที่ 2.5 ลักษณะของทรายโกเมน.....	27
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของความหยาบผิว.....	28
รูปที่ 2.7 การคำนวณค่าความหยาบผิว (Ra).....	29
รูปที่ 2.8 การคำนวณค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry).....	29
รูปที่ 2.9 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz).....	30
รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลของกระบวนการทำวิทยานิพนธ์.....	37
รูปที่ 3.2 แผนการไหลแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	39
รูปที่ 3.3 เครื่องตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง.....	40
รูปที่ 3.4 เครื่องทำความเย็นน้ำของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง.....	41
รูปที่ 3.5 เครื่องกรองน้ำของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง.....	41
รูปที่ 3.6 ลักษณะทรายขนาด 60 Mesh.....	42
รูปที่ 3.7 ลักษณะทรายขนาด 80 Mesh.....	42
รูปที่ 3.8 ลักษณะทรายขนาด 120 Mesh.....	43
รูปที่ 3.9 ชุดหัวรีดน้ำ (Orifice).....	43
รูปที่ 3.10 ชุดหัวตัด (Focusing tube, Abrasive nozzle).....	44
รูปที่ 3.11 แผ่นเกดตั้งความสูงหัวตัดหนา 2 มิลลิเมตร.....	44
รูปที่ 3.12 ลักษณะวัสดุทดลอง.....	45
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งและลักษณะการทดสอบ.....	45
รูปที่ 3.14 ลักษณะการจับชิ้นงาน.....	46
รูปที่ 3.15 การจับยึดและการตั้งชิ้นงาน.....	47
รูปที่ 3.16 ลักษณะการเข้าตัดของชิ้นงานทดลอง.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.17 การทดสอบแรงดันน้ำที่หัวตัด.....	48
รูปที่ 3.18 โหมคทดสอบแรงดันน้ำ.....	49
รูปที่ 3.19 ชุดปรับแรงดันน้ำ.....	49
รูปที่ 3.20 ลักษณะการตั้งความสูงหัวตัด.....	50
รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการสร้างแบบชิ้นงานและการกำหนดค่าคุณภาพผิวของการตัด.....	53
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการเลือกรายการชนิดและอัตราการใช้ของสารขัด.....	53
รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการเลือกรายการชนิดและความหนาของวัสดุ.....	54
รูปที่ 3.24 ตำแหน่งในวัดความหยาบผิวรอยตัด.....	55
รูปที่ 3.25 ลักษณะเครื่องวัดความหยาบผิว.....	55
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวรอยตัดของเครื่องวัดความหยาบผิว.....	55
รูปที่ 3.27 กล้องจุลทรรศน์ Microscope.....	56
รูปที่ 3.28 ตำแหน่งในวัดความฉากของชิ้นงาน.....	56
รูปที่ 3.29 ลักษณะการวัดความฉากของชิ้นงาน.....	57
รูปที่ 3.30 เครื่องมือในการวัดคลื่นรอยตัด.....	57
รูปที่ 4.1 ความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (100 MPa).....	60
รูปที่ 4.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (175 MPa).....	61
รูปที่ 4.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (250 MPa).....	62
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ยรอยตัด (ขนาดสารขัด 60 Mesh).....	63
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ยรอยตัด (ขนาดสารขัด 80 Mesh).....	63
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ยรอยตัด (ขนาดสารขัด 120 Mesh).....	64
รูปที่ 4.7 Normal Probability Plot ต่อความหยาบผิวรอยตัด.....	65
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	65
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA6061.....	66
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA6063.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของกิริยา่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA7075.....	67
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของกิริยา่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 60 Mesh.....	68
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของกิริยา่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 80 Mesh.....	68
รูปที่ 4.14 อิทธิพลของกิริยา่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 120 Mesh.....	69
รูปที่ 4.15 อิทธิพลของกิริยา่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 100 MPa.....	69
รูปที่ 4.16 อิทธิพลของกิริยา่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 175 MPa.....	70
รูปที่ 4.17 อิทธิพลของกิริยา่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 250 MPa.....	70
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับแรงดันน้ำ.....	71
รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับขนาดของสารขัด.....	72
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับเกรดของอลูมิเนียม.....	73
รูปที่ 4.21 การวัดค่าความฉากของชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 60 Mesh.....	74
รูปที่ 4.22 การวัดค่าความฉากของชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 80 Mesh.....	75
รูปที่ 4.23 ความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 120 Mesh.....	76
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่าความฉากของชิ้นงาน (Pressure 100 MPa).....	77
รูปที่ 4.25 ความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดสารขัด 60 Mesh.....	78
รูปที่ 4.26 ความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดสารขัด 80 Mesh.....	79
รูปที่ 4.27 การวัดค่าความฉากของชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดสารขัด 120 Mesh.....	80
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าความฉากของชิ้นงาน (Pressure 175 MPa).....	81
รูปที่ 4.29 การวัดค่าความฉากของชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดสารขัด 60 Mesh.....	82
รูปที่ 4.30 ความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดสารขัด 80 Mesh.....	83
รูปที่ 4.31 ความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดสารขัด 120 Mesh.....	84
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบความฉากของชิ้นงาน (Pressure 250 MPa).....	85
รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบความฉากของชิ้นงาน (ขนาดสารขัด 60 Mesh).....	86
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความฉากของชิ้นงาน (ขนาดสารขัด 80 Mesh).....	87
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความฉากของชิ้นงาน (ขนาดสารขัด 120 Mesh).....	87
รูปที่ 4.36 Normal Probability Plot ต่อมุมเอียงรอยตัด.....	88

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.37 การวิเคราะห์ห้ด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	89
รูปที่ 4.38 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA6061.....	90
รูปที่ 4.39 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA6063.....	90
รูปที่ 4.40 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA7075.....	91
รูปที่ 4.41 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 60 Mesh.....	91
รูปที่ 4.42 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 80 Mesh.....	92
รูปที่ 4.43 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 120 Mesh.....	92
รูปที่ 4.44 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 100 MPa.....	93
รูปที่ 4.45 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 175 MPa.....	93
รูปที่ 4.46 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 250 MPa.....	94
รูปที่ 4.47 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับแรงดันน้ำ.....	94
รูปที่ 4.48 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับขนาดของสารขัด.....	95
รูปที่ 4.49 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับเกรดของอลูมิเนียม.....	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีวอเตอร์เจ็ต (Water jets) เป็นเทคโนโลยีที่เติบโตเร็วในอุตสาหกรรมปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของวอเตอร์เจ็ต คือ โครงสร้างของวัสดุบริเวณรอยตัดไม่เปลี่ยนแปลง (Heat effect zone) [1] ระบบการตัดวัสดุเป็นแบบเย็น อีกทั้งยังสามารถตัดวัสดุได้หลากหลาย ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง [2] ที่สำคัญการตัดวัสดุด้วยวอเตอร์เจ็ตไม่มีการใช้ก๊าซหรือของเหลวที่พิเศษอื่น การนำเทคโนโลยีวอเตอร์เจ็ตมาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมถือได้ว่าเป็นกลยุทธ์ทางกระบวนการผลิตที่จะสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันในอุตสาหกรรมปัจจุบัน ในอดีตการตัดวัสดุมีวิธีการไม่มากนัก เช่น การตัดด้วยเลื่อยกล ตัดด้วยก๊าซ ตัดด้วยพลาสติก และตัดงานด้วยเส้นลวด (Wire cut) เป็นต้น แต่ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีการตัดใหม่ๆ เช่น เทคโนโลยีการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ต การตัดด้วยเลเซอร์ [3-5] เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีการจะมีข้อจำกัดและข้อกำหนดแตกต่างกันออกไป เช่นการตัดด้วยเลเซอร์ จะมีผลทบในเรื่องของความร้อน ทำให้ชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่บางเกิดการบิดงอ ผิวชิ้นงานไม่เรียบ ผิวชิ้นงานใหม่ มีครีบ บริเวณรอยตัดมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้มีผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปในกระบวนการต่อไป

การนำเทคโนโลยีวอเตอร์เจ็ตเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมสามารถลดขั้นตอนการผลิตได้โดยสามารถขึ้นรูปในกระบวนการเดียว เช่น การเจาะรู การตัดขอบ ตัดชิ้นส่วนแม่พิมพ์ การตัดแผ่นเปล่า และชิ้นส่วนอื่นๆ ในอุตสาหกรรม แต่การตัดด้วยวอเตอร์เจ็ตก็มีปัจจัยหลายด้านที่มีผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงาน เช่น แรงดันน้ำ ขนาดอนุภาคของสารขัด รูปร่างของสารขัด ความแข็งของวัสดุ [4,5,6,7,8] ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานทั้งสิ้น ปัญหาที่พบในการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ตคือ ความหยابผิว ความฉากของชิ้นงาน คลื่นรอยตัด ตัดไม่ขาด งานเป็นครีบ [3,5,9] ซึ่งเกิดจากปัจจัยในการตัดที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิต

ดังนั้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสภาวะการตัดอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด โดยใช้วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียม 3 เกรด ใช้สารขัดประเภททราย 3 ขนาด และใช้แรงดันน้ำที่หัวตัด 3 ระดับ ทดสอบความหยابผิวรอยตัด ความฉากของชิ้นงาน และคลื่นรอยตัด ทดสอบความหยابผิวรอยตัดโดยใช้เครื่องวัดความหยابผิว (Profilometer) ทดสอบความฉากชิ้นงานและทดสอบคลื่นรอยตัด โดยใช้โปรแกรม Rhinoceros วิเคราะห์และยืนยันข้อมูลทางสถิติด้วยเทคนิค ANOVA [10] เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะการตัดวัสดุคูมิเนียมผสม ด้วยน้ำแรงดันสูงที่มีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด ความฉากของชิ้นงานและคลื่นรอยตัด

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด ความฉากของชิ้นงานและคลื่นรอยตัด

1.3 สมมติฐานการศึกษา

1.3.1 ชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วยมอเตอร์เจ็ท ด้วยแรงดันน้ำที่แตกต่างกันนั้น ความหยาบผิว ความฉากของชิ้นงานและคลื่นรอยตัด จะมีความแตกต่างกันไป

1.3.2 ขนาดอนุภาคของสารขัดที่แตกต่างกัน มีผลต่อ ความหยาบผิว ความฉากของชิ้นงาน และคลื่นรอยตัดโดยตรง

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ศึกษาการตัดคูมิเนียมผสมเกรด AA6061-T6, AA6063-T6 และ AA7075-T6 ด้วยเครื่องมอเตอร์เจ็ท รุ่น MAXIEM Water jet Model 1530

1.4.2 ตัดชิ้นงานทดลองขนาด กว้าง 8 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตรและหนา 25 มิลลิเมตร

1.4.3 ทำการทดลองตัดโดยใช้แรงดันน้ำที่หัวตัด

ก.100 MPa

ข.175 MPa

ค.250 MPa

1.4.4 ทำการทดลองตัดโดยใช้สารขัดเป็นทราย (Garnet)

ก.ขนาด 60 Mesh

ข.ขนาด 80 Mesh

ค.ขนาด 120 Mesh

1.4.5 ทดลองตัดชิ้นงานโดยกำหนด ขนาดรูรีดน้ำ 0.25 มิลลิเมตร ขนาดรูหัวตัด 0.7 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร อัตราการไหลของสารขัดโดยเฉลี่ย 0.367 กิโลกรัมต่อนาที และอุณหภูมิของน้ำในการตัดอยู่ในช่วง 10 ± 2 องศาเซลเซียส

1.4.6 ทดสอบความหยาบผิวรอยตัดด้วยเครื่อง Profilometer ยี่ห้อ Mahr รุ่น Marsurf XR20

1.4.7 ทดสอบความฉากของชิ้นงานด้วยกล้อง Microscope ประกอบร่วมคอมพิวเตอร์พร้อม
กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวัด

1.4.8 ทดสอบคลื่นรอยตัดโดยใช้กล้อง Microscope ประกอบร่วมคอมพิวเตอร์พร้อม
กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวัด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 พัฒนาเทคโนโลยีด้านการตัดวัสดุด้วยวอเตอร์เจ็ท เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำ
วิจัยต่อไป

1.5.2 ทราบถึงปัจจัยในการตัดที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิว ความฉากชิ้นงานและ
คลื่นรอยตัด

1.5.3 เพิ่มทางเลือกในการเลือกวิธีการตัดที่สามารถใช้งานได้จริงตามความต้องการ

1.5.4 เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่สำคัญ

2.1.1 การตัดวัสดุด้วยแรงดันน้ำสูง (Water Jets Cutting) [1,2]

ระบบวอเตอร์เจ็ทแรงดันสูงเป็นเครื่องมือในการตัดวัสดุ โดยคำจำกัดความของคำว่าแรงดันสูง (Ultrahigh-pressure, UHP) คือต้องมีแรงดันมากกว่า 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพื่อให้กระแสน้ำไหลผ่านไปยังปลายท่อขนาดเล็ก ทำให้เกิดแรงกระสวยพุ่งจากแรงดันของกระแสน้ำ การเพิ่มกำลังในการตัดของระบบวอเตอร์เจ็ท ให้สามารถตัดวัสดุที่เป็นเหล็กและวัสดุแข็งชนิดอื่นๆ ได้ ในระบบแบริฟวอเตอร์เจ็ท ต้องเพิ่มสารกัดกร่อนเข้าไปในระบบวอเตอร์เจ็ทแบบธรรมดา โดยการใช้สารกัดกร่อนที่ทำจากแร่โกเมน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทั่วไปในการผลิตกระดาษทราย ด้วยวิธีการนี้ หัวฉีดที่มีสารกัดกร่อนก็สามารถตัดวัสดุได้ ระบบวอเตอร์เจ็ทมี 2 ประเภท คือ

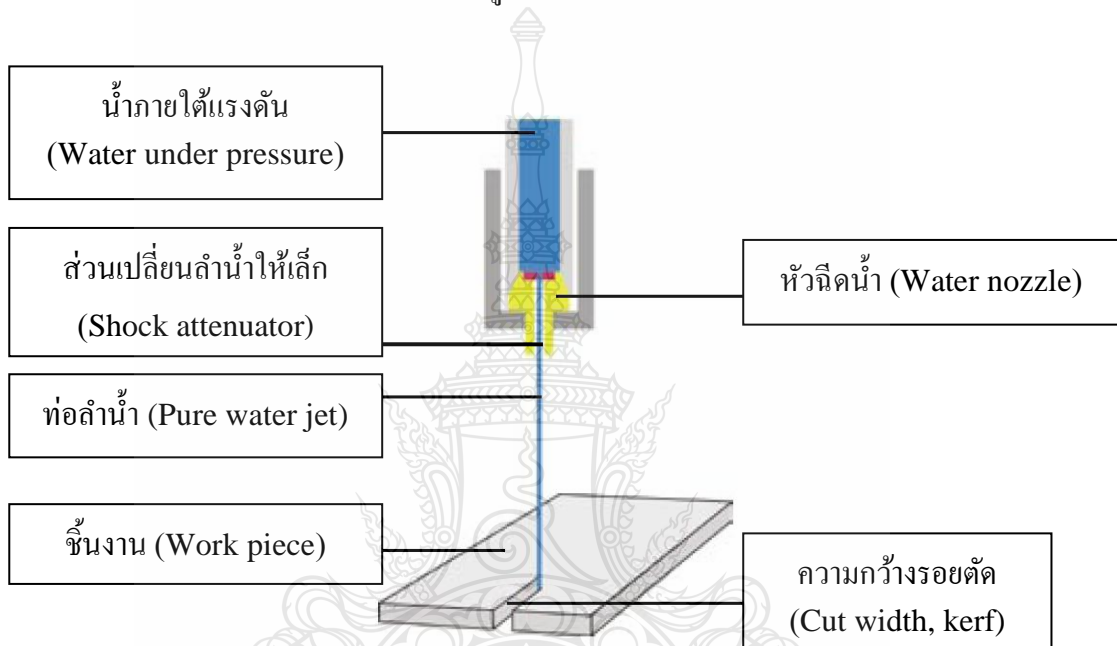
- 1) ระบบเพียววอเตอร์เจ็ท (Pure water jets)
- 2) ระบบแบริฟวอเตอร์เจ็ท (Abrasive water jets)

ซึ่งการออกแบบเพื่อใช้งานนั้น คือทั้งแบบเพียวระบบวอเตอร์เจ็ท และระบบแบริฟวอเตอร์เจ็ท น้ำจะต้องผ่านการใช้อากาศอัดแรงดันก่อนทุกครั้งในการทำงาน องค์ประกอบเบื้องต้นของเครื่องวอเตอร์เจ็ท มีดังนี้

1. ระบบการกรองน้ำ (Water filtration system)
2. ปั๊มแรงดันสูง (The high pressure intensifier pump)
 - 1) เครื่องสูบน้ำเพิ่มแรงดัน (Intensifier based pump)
 - 2) เครื่องสูบน้ำระบบขับเคลื่อนตรง (Direct drive based pump)
 - 3) หัวตัด (The cutting head)
 - 4) สารขัด (The abrasive catcher)
 - 5) คอมพิวเตอร์คำนวณผล (Accumulator)
 - 6) ระบบควบคุมการเคลื่อนไหวน้ำ (The motion control systems)
 - เครื่องจักรที่ติดตั้งอยู่กับที่แบบ 1 มิติ
 - โต๊ะ XY สำหรับการตัด 2 มิติ

2.1.2 ระบบเพียววอเตอร์เจ็ท

ระบบเพียววอเตอร์เจ็ท เป็นระบบที่มีกระแสน้ำที่เคลื่อนที่เร็วกว่าเสียงโดยสามารถกัดเซาะวัสดุได้ ซึ่งเป็นระบบดั้งเดิมของการตัดด้วยแรงดันน้ำ การนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์ครั้งแรกเกิดขึ้น ช่วงต้นของยุคปี 1970 และนำไปใช้ในการตัดกระดาษแข็งลูกฟูก การตัดด้วยระบบเพียววอเตอร์เจ็ท ถูกนำไปใช้มากที่สุดในการตัด ผ้าอ้อมกระดาษ กระดาษชำระ และอุปกรณ์ภายในรถยนต์ ชุดหัวตัดของระบบเพียววอเตอร์เจ็ท แสดงดังรูปที่ 2.1



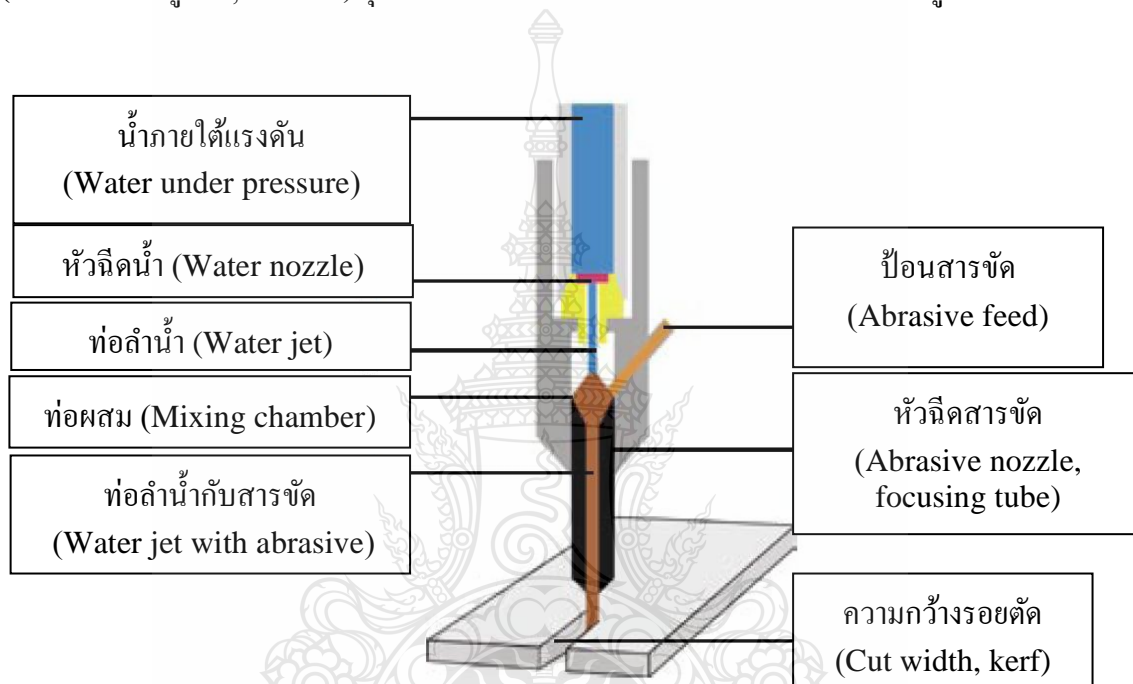
รูปที่ 2.1 ชุดหัวตัดของระบบเพียววอเตอร์เจ็ท [2]

คุณสมบัติของระบบเพียววอเตอร์เจ็ท

- 1) กระแสน้ำบางมาก (เส้นผ่านศูนย์กลางจะอยู่ที่ 0.004 ถึง 0.010 นิ้ว)
- 2) สามารถตัดรูปทรงเรขาคณิตที่หายละเอียดยสูง
- 3) สูญเสียเนื้อวัสดุจากการตัดน้อยมาก
- 4) ไม่ทำให้เกิดความร้อนจากการตัด
- 5) สามารถตัดวัสดุที่บางมากๆ ได้
- 6) สามารถทำงานตัดได้รวดเร็ว
- 7) สามารถตัดวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและนิ่มได้เป็นอย่างดี
- 8) เกิดแรงเสียดทานในการตัดน้อยมาก
- 9) เดินเครื่องใช้งานได้ 24 ชั่วโมงต่อวัน

2.1.3 ระบบแบริฟอวอเตอร์เจ็ท

ระบบแบริฟอวอเตอร์เจ็ท เป็นระบบที่มีกระแสน้ำของระบบจะเร่งความเร็ว อนุภาคสารกัดกร่อน และอนุภาคเหล่านั้นจะเป็นตัวกัดเซาะ ระบบแบริฟอวอเตอร์เจ็ทจะตัดวัสดุที่มีความแข็ง เช่น โลหะ หิน วัสดุผสม และเซรามิก ระบบแบริฟอวอเตอร์เจ็ทที่ใช้ตัวแปรเสริมมาตรฐานสามารถตัดวัสดุต่าง ๆ ที่มีความแข็งขนาดเท่ากับหรือมากกว่า เซรามิก อลูมิเนียมออกไซด์ (หรือเรียกว่า อลูมินา, AD 99.9) ชุดหัวตัดของระบบแบริฟอวอเตอร์เจ็ท แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ชุดหัวตัดของระบบแบริฟอวอเตอร์เจ็ท [2]

ห้องผสมทำหน้าที่คล้ายเป็นลำกล้องปืนไรเฟิลเพื่อที่จะเพิ่มอัตราเร่งอนุภาคสารกัดกร่อน ซึ่งมีอยู่หลายขนาด และอายุการใช้งานที่แตกต่างกัน ห้องผสมมีขนาดยาว 3 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในอยู่ระหว่าง 0.020 ถึง 0.060 นิ้ว ซึ่งขนาดที่ใช้กันทั่วไปมากที่สุดคือขนาด 0.040 นิ้ว

สารขัดหรือ Abrasive แต่ละขนาดมีเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกันไปดังนี้

1. 120 Mesh ใช้สำหรับพื้นผิวอ่อนนุ่ม
2. 80 Mesh ใช้สำหรับงานตัดทั่วไป
3. 50 Mesh ใช้สำหรับงานที่ไม่ต้องการความละเอียด

คุณสมบัติของระบบแบริฟอวอเตอร์เจ็ท

1. ความสามารถในการทำงานที่หลากหลายมาก
2. ไม่ทำให้เกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน
3. ไม่เกิดแรงเค้นของเครื่องจักรกล
4. ตั้งคำสั่งการทำงานได้ง่าย
5. กระแสน้ำขนาดบาง (0.020 ถึง 0.050 นิ้ว ตามเส้นผ่านศูนย์กลาง)
6. สามารถตัดรูปทรงเรขาคณิตที่ให้รายละเอียดสูงได้
7. สามารถตัดวัสดุที่บางมากๆ และหนาถึง 10 นิ้วได้
8. สามารถทำการตัดวัสดุที่ซ้อนกันได้ และสูญเสียเนื้อวัสดุในการตัดน้อย
9. เกิดแรงเสียดทานในการตัดต่ำมาก (ต่ำกว่า 1 ปอนด์ ขณะทำการตัด)
10. ติดตั้งหัวฉีดเพียงอันเดียวสำหรับงานตัดที่ใช้หัวฉีดได้เกือบทุกชนิด
11. สามารถสลับการใช้งานจากหัวเดียวไปเป็นหลายหัวตัดได้ง่าย
12. สามารถสลับการใช้งานของระบบเพียววอเตอร์เจ็ทและระบบแอบราซีฟวอเตอร์เจ็ทได้อย่างรวดเร็ว

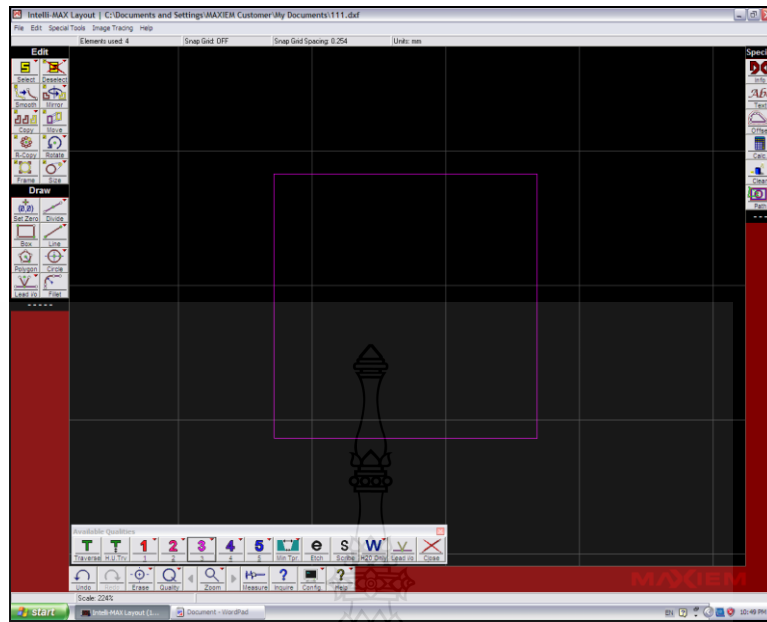
13. ลดขั้นตอนที่จะต้องตกแต่งในกรรมวิธีต่อไปและไม่เกิดเสียงจากการตัดขอบเขตของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water jet model 1530 มีดังนี้

- 1) ขนาด 4,166 มิลลิเมตร x 2,489 มิลลิเมตร (164 นิ้ว x 98 นิ้ว)
- 2) น้ำหนักตัวถังสุทธิ Weight (tank empty) 6,212 lbs (2,818 กิโลกรัม)
- 3) ความสูงสุทธิ Operating height 10 ft (3,048 มิลลิเมตร)
- 4) น้ำหนักสุทธิ Operating weight 23,200 lbs (10,545 กิโลกรัม)

2.1.4 ซอฟต์แวร์พื้นฐานของวอเตอร์เจ็ท

1) การสร้างแบบชิ้นงาน (Layout) รูปแบบซอฟต์แวร์การเขียนแบบ รวมถึงการเขียนแบบครบวงจรและเครื่องมือในการแก้ไข ไฟล์ DXF จาก CAD อื่นๆ โปรแกรมสามารถนำเข้าสู่การเขียนแบบหรือสามารถส่งออกไฟล์ ไปใช้กับ โปรแกรม CAD อื่นๆ เขียนแบบแล้วสร้างไฟล์ไอออนข้อมูลแบบ OMAX (ORD) ซึ่งรวมถึงคำแนะนำการใช้และรายละเอียดของเส้นทางตัด

2) การทำชิ้นงานหรือการกำหนดค่าต่างๆ ในการตัดชิ้นงานจริง (Make) รูปแบบซอฟต์แวร์ตัดชิ้นงานจะคำนวณความเร็วสูงสุดในการตัดวัสดุด้วยแรงดันน้ำสูง สำหรับผลการดำเนินงานและการควบคุมการตัดทั้งหมด ทำให้ทราบเวลาและปริมาณ ผงทรายเท่าใด ที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน และช่วยให้สามารถตรวจสอบเส้นทางตัดที่ถูกต้องของชิ้นงาน แม้ว่าจะไม่ได้เชื่อมต่อกับตัวเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง MAXIEM Water Jet ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 2.3



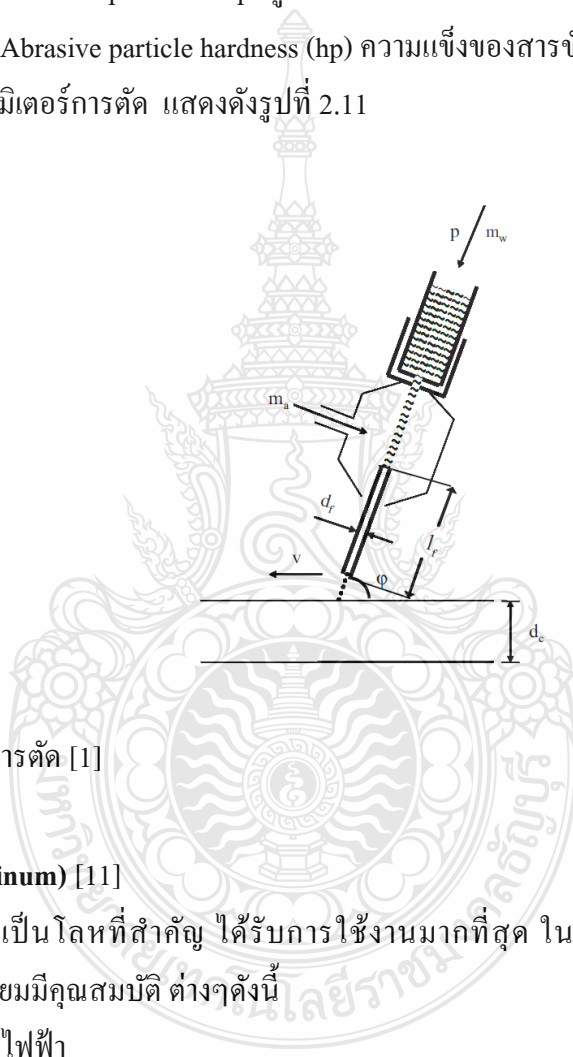
รูปที่ 2.3 ชุดควบคุมการเคลื่อนที่เครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง [2]

2.1.5 ตัวแปรในทางปฏิบัติ (Process parameter)

ในเบื้องต้นตัวแปรที่เกี่ยวข้องในทางปฏิบัติของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง จะมีตัวแปรอยู่หลายประเภท โดยตัวแปรจะมีคุณสมบัติสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ในเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงทั่วไปมีดังต่อไปนี้

- 1) Hydraulic parameters ตัวแปรซึ่งใช้น้ำในการขับเคลื่อน
 - Pump pressure (P) แรงดันเครื่องปั๊ม
 - Water-orifice diameter (d_o) เส้นผ่าศูนย์กลางทางเข้าของน้ำ
 - Water flow rate (mw) อัตราการไหลของน้ำ
- 2) Mixing and acceleration parameters ตัวแปรการผสมและอัตราการเร่ง
 - Focus diameter (df) เส้นผ่านศูนย์กลาง
 - Focus length (lf) ความยาว
- 3) Cutting parameters ตัวแปรการตัด
 - Traverse rate (v) อัตราการตัดผ่าน
 - Number of passes (np) ปริมาณการตัดผ่าน
 - Standoff distance (x) ระยะทางการเดินเครื่องตัด

- Impact angle (ϕ) ผลกระทบของมุม
 - 4) Abrasive parameters ตัวแปรสารขัด
 - Abrasive mass flow-rate (m_a) อัตราการไหลของสารขัด
 - Abrasive particle diameter (d_p) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารขัด
 - Abrasive particle size distribution ($f(d_p)$) ขนาดการกระจายของสารขัด
 - Abrasive particle shape รูปร่างของสารขัด
 - Abrasive particle hardness (h_p) ความแข็งของสารขัด
- พารามิเตอร์การตัด แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.4 พารามิเตอร์การตัด [1]

2.2 อลูมิเนียม (Aluminum) [11]

อลูมิเนียม เป็นโลหะที่สำคัญ ได้รับการใช้งานมากที่สุด ในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) อลูมิเนียมมีคุณสมบัติ ต่างๆดังนี้

สมบัติทางไฟฟ้า

-การต้านทานไฟฟ้าที่ 20° C 2.6548 uΩ-cm

-การนำไฟฟ้า 94.94 %IACS

สมบัติทางฟิสิกส์

-หมายเลขอะตอม 13

-น้ำหนักอะตอม 26.97

-วาเลนซ์	3
-โครงสร้างผลึก	f.c.c
-มิติของแลตทิส	4.049 °A
-ความหนาแน่นที่ 20°C	2.6989 g/mm ³
-จุดหลอมเหลว	660.2 °C
-จุดเดือด	2450 °C
-การหดตัวขณะแข็งตัว	6.6 %
-ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	94.5 cal/g
-ความร้อนแฝงของการเป็นไอ	2260 cal/g
-ความร้อนจำเพาะที่ 100 °C	0.224 cal/g
-การนำความร้อน 20 °C	0.57 cal/g
-การสะท้อนแสง	
แสงจากหลอดทั้งสแตน	90 %
แสง 2000 – 2500 °A	86-87%
แสง 10000 °A	96%
-สี	ขาวเงิน

อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นและอลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought aluminum and wrought aluminum alloy) สามารถจำแนกออก โดยใช้ ระบบตัวเลข 4 หลัก ดังนี้

ตัวเลขหลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุด ในการแสดงกลุ่มของอลูมิเนียมผสม ซึ่งมีอยู่ 8 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.1 เช่น 1XXX แทนโลหะที่มีอลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99% โดยน้ำหนัก เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของอลูมิเนียมตามระบบตัวเลข [14]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอลูมิเนียม
1XXX	อลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00 %
2XXX	ทองแดง (Copper, Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6XXX	แมกนีเซียมกับซิลิกอน (Magnesium, Mg and Silicon, Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc, ZN)
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other Element)
9XXX	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

ตัวเลขหลักที่สอง เป็นสัญลักษณ์ใช้สำหรับกำกับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนผสมของโลหะ ให้แตกต่างไปจากเดิม เช่น ตัวเลข 0 แสดงว่า เป็นโลหะผสมดั้งเดิม ส่วนตัวเลข 1-9 แสดงว่าเป็นโลหะที่ผสมเข้าไปเปลี่ยนแปลงจากเดิม ยกตัวอย่างเช่น หมายเลข 2024 ตัวเลขหลักที่สองคือ 0 (4.5%Cu, 1.5%Mg, 0.5%Si, 0.1%Cr) เมื่อเทียบกับหมายเลข 2218 ตัวเลขหลักที่สองคือ 2 (4.0%Cu, 2.0%Ni, 1.5%Mg, 0.2%Si) ซึ่งสังเกตได้ว่า หมายเลข 2218 มีนิกเกิล (Ni) ผสมเข้าไป

ตัวเลขหลักที่สาม และสี่ เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงชนิดย่อยๆ ของโลหะที่ผสมในกลุ่มเดียวกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น หมายเลข 2014 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 14 (4.4%Cu, 0.8%Si, 0.8%Mn, 0.4%Mg) และหมายเลข 2017 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 17 (0.4%Cu, 0.8%Si, 0.5%Mn, 0.5%Mg, 0.1%Cr)

เฉพาะอลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวเลขหลักที่สามและหลักที่สี่ จะแสดงปริมาณของอลูมิเนียมที่เป็นจุดตกนียม 2 ตำแหน่ง ที่ปรากฏภายหลัง 99% เช่นหมายเลข 1060 และหมายเลข1080 หมายถึง อลูมิเนียมขึ้นรูป ที่มีอลูมิเนียม 99.60%และ99.80% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน AA6061 [14]

ส่วนผสมทางเคมี					
ซิลิกอน (Si) : 0.40-0.80		แมกนีเซียม (Mg) : 0.80-1.20			
เหล็ก (Fe) : 0.70		สังกะสี (Zn) : 0.25			
ไททาเนียม (Ti) : 0.15		แมงกานีส (Mn) : 0.15			
ทองแดง (Cu) : 0.15-0.40		โครเมียม (Cr) : 0.04-0.35			
		อื่นๆ : 0.05			
สมบัติทางอุณหภูมิ					
อุณหภูมิหลอมเหลว		652 °C			
อุณหภูมิแข็งตัว		582 °C			
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20°C		23.6 um/m.k			
ความร้อนจำเพาะ		896 J/kg.k			
ความหนาแน่น		2.70 g/cm ³			
สมบัติทางกล					
Temper	Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)	Shear strength(MPa)
0	124	55	25	-	83
T4	241	145	22	-	165
T6	310	276	12	-	207

การใช้งานอลูมิเนียมเกรด AA6061 เช่น โครงสร้างอาคาร โครงสร้างเครื่องจักรกล หรือ โครงสร้างยานพาหนะที่ต้องการความทนต่อการกัดกร่อน และมีคุณสมบัติในการเชื่อมได้ง่าย เช่น เรือรบ รถไฟ ดิก ท่อลำเลียงน้ำมัน รถบรรทุก รถไฟฟ้า ดิกอาคารที่มีอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ อีกทั้งยังนิยมใช้ทำแม่พิมพ์เป่าพลาสติก แม่พิมพ์ฉีดโฟม ยาง และงานโครงสร้างเช่น หมุดย้ำราว สะพาน อลูมิเนียม AA6061 มีคุณสมบัติเด่นคือ สามารถบ่มแข็งได้ จึงมีความแข็งแรงสูง

ตารางที่ 2.3 อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน AA6063 [14]

ส่วนผสมทางเคมี					
ซิลิกอน (Si) : 0.20-0.60		แมกนีเซียม (Mg) : 0.45-0.90			
เหล็ก (Fe) : 0.35		สังกะสี (Zn) : 0.10			
ไททาเนียม (Ti) : 0.10		แมงกานีส (Mn) : 0.10			
ทองแดง (Cu) : 0.10		โครเมียม (Cr) : 0.10			
		อื่นๆ : 0.05			
สมบัติทางอุณหภูมิ					
อุณหภูมิหลอมเหลว		655 °C			
อุณหภูมิแข็งตัว		615 °C			
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20°C		23.4 um/m.k			
ความร้อนจำเพาะ		900 J/kg.k			
ความหนาแน่น		2.96 g/cm ³			
สมบัติทางกล					
Temper	Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)	Shear strength(MPa)
0	90	48	-	25	69
T1	152	90	20	42	97
T4	172	90	22	-	-
T5	186	145	12	60	117
T6	241	214	12	73	152
T83	255	241	9	82	152
T831	207	186	10	70	124
T832	290	269	12	95	186

การใช้งานอลูมิเนียมเกรด AA6063 เช่น ราวรั้ว อานม้า ประตูหน้าต่าง กระจับของรถบรรทุกรถกระบะ ท่อน้ำ โครงสร้างอาคาร โครงสร้างเครื่องจักรกล หรือโครงสร้างยานพาหนะที่ต้องการความทนต่อการกัดกร่อน และมีคุณสมบัติในการเชื่อมได้ง่าย อลูมิเนียม AA6063 มีคุณสมบัติเด่นคือ สามารถบ่มแข็งได้ จึงมีความแข็งแรงสูง

ตารางที่ 2.4 อลูมิเนียมผสมสังกะสี AA7075 [14]

ส่วนผสมทางเคมี					
ซิลิกอน (Si) : 0.40		แมกนีเซียม (Mg) : 2.1-2.90			
เหล็ก (Fe) : 0.50		สังกะสี (Zn) : 5.10-6.10			
ไททาเนียม (Ti) : 0.20		แมงกานีส (Mn) : 0.30			
ทองแดง (Cu) : 1.2-2.00		โครเมียม (Cr) : 0.18-0.28			
		อื่นๆ : 0.05			
สมบัติทางอุณหภูมิ					
อุณหภูมิหลอมเหลว		635 °C			
อุณหภูมิแข็งตัว		477 °C			
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20°C		23.4 um/m.k			
ปริมาตร		68x10 ⁻⁶ m ³ /m ³ .k			
ความร้อนจำเพาะ		960 J/kg.k			
ความหนาแน่น		2.80 g/cm ³			
สมบัติทางกล					
Temper	Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)	Shear strength(MPa)
0	228	103	17	60	152
T6	572	503	11	150	331
T7	503	434	-	-	-

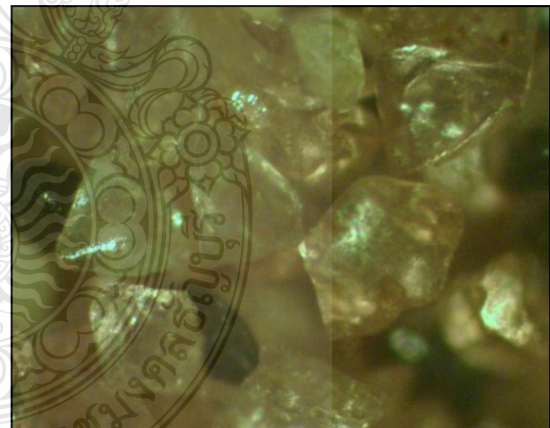
การใช้งานอลูมิเนียมเกรด AA7075 เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องบิน ชิ้นส่วนในรถจักรยานยนต์ อลูมิเนียมเกรดดังกล่าวนี้ มีความแข็งแรงสูงที่สุดในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งทำการขึ้นรูป กลึง กัด ตัด ใส ได้ง่าย สามารถชุบอะโนไดซ์แข็งได้ดีเยี่ยม นิยมใช้ทำแม่พิมพ์เป่าขวดพลาสติก แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก อุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โตะเครื่องมือ แผ่นรองสแตมปีง เป็นต้น

2.3 สารขัดประเภททราย (Abrasive garnet)

สารกัดกร่อนที่ใช้ในงานตัดระบบแบริชีฟวอเตอร์เจ็ต คือเม็ดทรายแข็งซึ่งถูกคัดสรรและเลือกขนาดมาโดยเฉพาะ สารกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไปคือ โกเมน[7,8,10,15] คุณสมบัติของทรายโกเมนมีจุดหลอมเหลว 1,250 องศาเซลเซียส และความถ่วงจำเพาะที่ 4.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โกเมนมีความแข็ง หยาบ และราคาไม่แพง เช่นเดียวกับกระดาษสีชมพูที่หาได้ในร้านขายอุปกรณ์เครื่องโลหะ ขนาดของโกเมน แต่ละขนาดมีเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกันไปดังนี้

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของทรายโกเมน [4]

Chemical Name	Proportion (weight %)
Almandine garnet $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$	Greater than 97%
Ilmenite $FeTiO_3$	Less than 2%
Calcium carbonate $CaCO_3$	Less than 1.5%
Zircon $ZrSiO_4$	Less than 0.2%
Quartz SiO_2 (Crystalline Silica)	Less than 0.2%



รูปที่ 2.5 ลักษณะของทรายโกเมน [1-2]

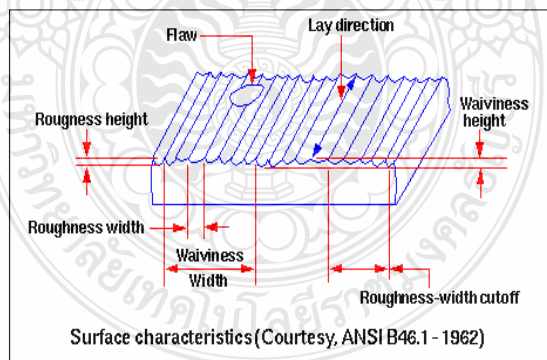
สารขัดประเภททรายที่นำมาใช้กับเครื่องวอเตอร์เจ็ตนั้นมีขนาดที่แตกต่างกัน ตามลักษณะการใช้งานในการตัดวัสดุต่างๆ โดยขนาดนั้นจะเรียกว่า Mesh โดย Mesh จะมีขนาดของทรายตั้งแต่ 50, 60, 80, 120 และ 200 Mesh

2.4 ความหยาบผิว [12]

ในกระบวนการผลิตโดยการใช้เครื่องมือตัดปาดผิวของชิ้นงานเช่น การตะไบ การลึง การกัด หรือกระบวนการอื่นๆ เมื่อนำผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการปาดผิวเหล่านี้มาส่องดูด้วยแว่นขยาย จะพบว่าผิวของชิ้นงานขรุขระเป็นลูกคลื่นสูงๆต่ำๆ ไม่เรียบเสมอกันเหมือนกับการมองด้วยตาเปล่า ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งลักษณะของชิ้นงานที่มีคลื่นสูงต่ำต่างกันมาก ย่อมแสดงว่าชิ้นงานนั้นมีความหยาบผิวสูงมากด้วยเช่นกัน ส่วนชิ้นงานที่มีความแตกต่างกันของคลื่นน้อยแสดงว่าผิวชิ้นงานนั้นเรียบ อัตราความหยาบผิวชิ้นงานจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการผลิตชิ้นงานคุณภาพผิวของชิ้นงานต้องเหมาะสมกับความต้องการใช้งาน ในกรณีที่ผิวของชิ้นงานไม่เหมาะสมกับการใช้งานจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานนั้นๆสั้นลง จะเห็นได้ว่าในการผลิตชิ้นงานผู้ผลิตจำเป็นต้องผลิตชิ้นงานให้มีคุณภาพผิวเป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน หรือตามที่กำหนดในแบบสั่งงาน อย่างไรก็ตามการผลิตชิ้นงานที่มีความเรียบผิวนั้นจะต้องเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าชิ้นงานที่มีกำหนดพิกัดผิว จะเห็นได้จากคุณภาพของชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับต้นทุน

1) การเกิดสภาพของผิว

ภายใต้ขบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร เช่น กลึง, มิลลิ่ง, ไซ, เจียรนัย ฯลฯ บริเวณผิวงานสำเร็จที่มองเห็นและสัมผัสได้นั้น จะเป็นแหล่งที่รวมและสามารถบ่งบอกผลจากแหล่งกำเนิดหลายอย่างปะปนกันอยู่ โดยจะทราบได้ต่อเมื่อได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ผิว (Surface analysis) ส่วนประกอบของผิว แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของความหยาบผิว [12]

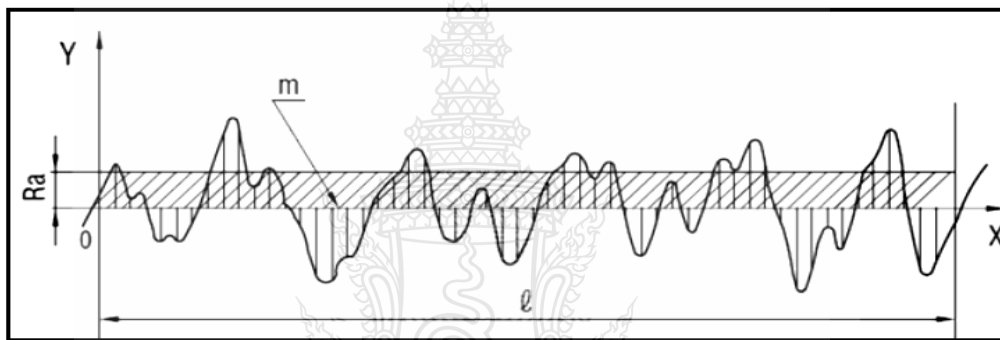
ความหยาบผิวสามารถวัดหรืออ่านค่าได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการอ่านค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (R_a) การอ่านค่าของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของความหยาบผิว (R_y) ตลอดจนการอ่านค่าเฉลี่ยของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด (R_q) ค่าความหยาบผิวในแต่ละลักษณะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการ

ใช้งาน โดยส่วนใหญ่มักนิยามกำหนดเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ย การอ่านค่าความหยาบผิวมีที่มาจาก การคำนวณที่ต่างกันคือ

2) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra: Arithmetical mean roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุด ก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่าง จากเส้นกึ่งกลางด้านล่างกับระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.1

$$Ra = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |f(x)| dx \quad (2.1)$$

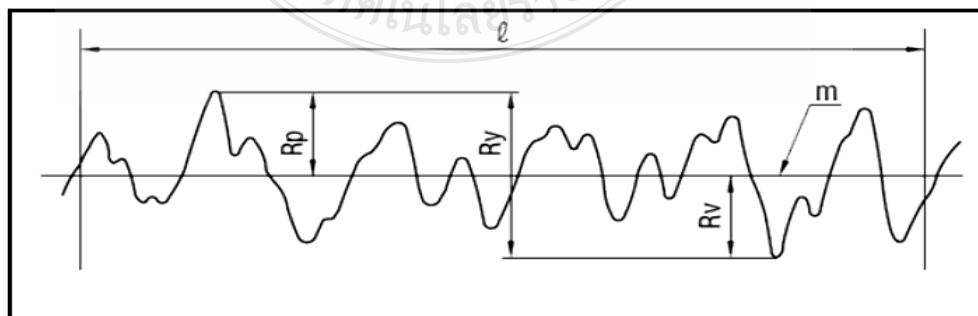


รูปที่ 2.7 การคำนวณค่าความหยาบผิว (Ra) [12]

3) ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry: Maximum Peak)

ค่าความหยาบผิวสูงสุดหมายถึงความต่างสูงสุดระหว่างจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดดังรูปที่ 2.8 โดยคำนวณค่า Ry จากค่าสูงสุดจากเส้นกึ่งกลาง รวมกับค่าต่ำสุดของเส้นก้นแอ่งที่ลึกที่สุดดัง สมการที่ 2.2

$$Ry = Rp + Rv \quad (2.2)$$

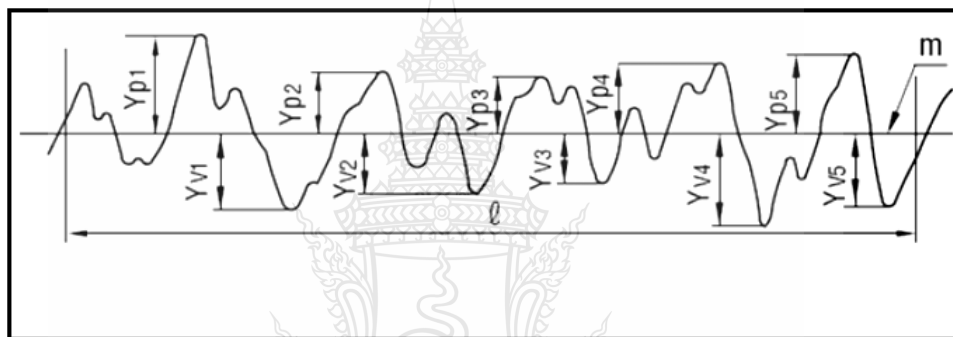


รูปที่ 2.8 การคำนวณค่าความหยาบผิวสูงสุด (Ry) [12]

4) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz: Ten-point mean roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด หมายถึงค่าส่วนต่างสูงสุดจากเส้นกึ่งกลางทางด้านบน 5 ตำแหน่ง และส่วนต่างจากจุดต่ำสุดถึงเส้นกึ่งกลาง 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.9 โดยคำนวณค่า Rz จากค่าสูงสุดจากเส้นกึ่งกลางจำนวน 5 ตำแหน่ง รวมกับค่าต่ำสุดของจุดกันแอ่งที่ลึกที่สุดอีก 5 ตำแหน่ง ดังสมการที่ 2.3

$$Rz = \frac{(Yp_1 + Yp_2 + Yp_3 + Yp_4 + Yp_5) + (Yv_1 + Yv_2 + Yv_3 + Yv_4 + Yv_5)}{5} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.9 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) [12]

2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง [12]

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือคุณภาพที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมมานานพอสมควรแล้ว อย่างไรก็ตามเครื่องมือนี้มักไม่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายในอุตสาหกรรมไทย เนื่องจากมักถูกมองว่าเป็นเครื่องมือคุณภาพขั้นสูง ใช้อย่างยาก ผู้ใช้ต้องมีความรู้ทางสถิติขั้นสูงอย่างดี แต่ในปัจจุบันการเรียนรู้เรื่องการออกแบบการทดลองไม่ยากอย่างที่คิด เนื่องจากมีโปรแกรมทางสถิติ (Statistical software) เกิดขึ้น ทำให้สามารถคำนวณปัญหาทางสถิติที่ซับซ้อนได้สะดวกมากขึ้น การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้าไปในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs of responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้นๆ

2.5.1 คำจำกัดความ

ในการออกแบบการทดลองใดๆ ผู้ออกแบบควรมีความเข้าใจองค์ประกอบต่างๆ ในการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) ปัจจัย (Factor) คือสิ่งที่เราสนใจศึกษาและมีอิทธิพลต่อสิ่งทดลอง ซึ่งเป็นทั้งปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เช่น เวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้น ชนิดของเครื่องจักร เป็นต้น
- 2) ระดับ (Level) คือจำนวนของคุณภาพที่ศึกษาในแต่ละปัจจัย
- 3) ปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction) คือการแสดงออกของระดับต่างๆ ในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย
- 4) อิทธิพลหลัก (Main effect) คืออิทธิพลของปัจจัยหลักที่ศึกษา มักจะไม่สนใจว่ามาจากระดับไหน
- 5) อิทธิพลแฟกทอเรียล (Factorial effect) คืออิทธิพลต่างๆ ทั้งอิทธิพลหลักและปฏิกริยาสัมพันธ์ทั้งหมดในการทดลองซึ่งจะมีเท่ากับ จำนวนการรวมตัว -1 หรือเท่ากับ df ของสิ่งทดลองโดยทั่วไปการทดลองแบบ Factorial มักจะพยายามที่จะทำให้มี Combination น้อยที่สุดคือ ให้มีแค่ 2 ระดับในแต่ละปัจจัย ดังนั้นจึงเขียนในรูป $t = 2^k$ โดยที่ k หมายถึงจำนวนปัจจัยที่ศึกษา t หมายถึง จำนวน Combination ทั้งหมด เช่น

(1) หมายถึง Factorial ที่มีการศึกษา 2 ปัจจัยๆ ละ 2 ระดับ ดังนั้นสิ่งทดลอง = 4

(2) หมายถึง Factorial ที่มีการศึกษา 3 ปัจจัยๆ ละ 2 ระดับ ดังนั้นสิ่งทดลอง = 9

(3) หมายถึง Factorial ที่มีการศึกษา 2 ปัจจัยๆ ละ 3 ระดับ ดังนั้นสิ่งทดลอง = 8

ซึ่งในที่นี้ อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตาม และระดับของปัจจัย (Levels of factor) หมายถึง จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนไปในการทดลองหนึ่ง

การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) ไม่ใช่แค่การ Run computer program เพื่อให้ได้ผลออกมาเท่านั้น แต่รวมถึงการตรวจสอบ ลักษณะและคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง การพิสูจน์ทราบความถูกต้องของ Model ที่ได้ (Model adequacy checking) หาระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยปกติ DOE จะใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นผู้วิเคราะห์ก็ต้องเข้าใจเงื่อนไขของ ANOVA ด้วย

2.5.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) [10]

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามซึ่งเป็นเชิงปริมาณ ส่วนตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มหรือเชิงคุณภาพซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) มีเพียงปัจจัยเดียวซึ่งส่งผลต่อตัวแปรตามใช้เทคนิค 1-Way ANOVA หมายถึง มีตัวแปรตามเป็นเชิงปริมาณ 1 ตัวและตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม 1 ตัว

2) มี 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตามวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Two-way ANOVA กรณีนี้จะมีตัวแปรเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ 1 ตัวและมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวซึ่งเป็นตัวแปรกลุ่มทั้งคู่

3) มี k ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม วิเคราะห์ด้วยเทคนิค k-way ANOVA (k มากกว่าหรือเท่ากับ 3) กรณีนี้หมายถึง มีตัวแปรตามเชิงปริมาณ 1 ตัวและมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 3 ตัว โดยตัวแปรอิสระทุกตัวเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (Two – way ANOVA)

ใช้คำสั่ง ANOVA สำหรับทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกรณีมีตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร ในที่นี้กล่าวกรณีมีตัวแปรอิสระ 2 ตัว และตัวแปรตาม 1 ตัว เรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง คำนวณโดยโปรแกรม Minitab

สมมติฐาน

$$H_0: a_j = 0 \text{ ทุกค่าของ } j$$

$$H_1: a_j \neq 0 \text{ บางค่าของ } j$$

$$H_0: b_k = 0 \text{ ทุกค่าของ } k$$

$$H_1: b_k \neq 0 \text{ บางค่าของ } k$$

$$H_0: (ab)_{jk} = 0 \text{ ทุกค่าของ } j \text{ และ } k$$

$$H_1: (ab)_{jk} \neq 0 \text{ บางค่าของ } j \text{ และ } k$$

ข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

1) ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ (ตัวแปรตาม) ต้องมีระดับการวัดตั้งแต่มาตราอันตรภาค (Interval scale) ขึ้นไป

2) กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ

3) กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มต้องเป็นอิสระจากกัน

4) กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมาจากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากัน

สูตรทดสอบในการวิเคราะห์ความแปรปรวนในแบบสองทางจะต้องคำนวณค่าเหล่านี้สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$SS_{TO} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q Y_{ijk}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q Y_{ijk} \right)^2}{npq} \quad (2.4)$$

SS_{TO} = ผลบวกกำลังสองของยอดรวม

$$SS_A = \sum_{j=1}^p \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^q Y_{ijk} \right)^2}{nq} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q Y_{ijk} \right)^2}{npq} \quad (2.5)$$

SS_A = ผลบวกกำลังสองเนื่องจากแถวหรือปัจจัย

$$SS_B = \sum_{k=1}^q \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p Y_{ijk} \right)^2}{nq} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q Y_{ijk} \right)^2}{npq} \quad (2.6)$$

SS_B = ผลบวกกำลังสองเนื่องจากคอลัมน์หรือปัจจัย

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q Y_{ijk}^2 - \sum_{k=1}^p \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^q Y_{ijk} \right)^2}{nq} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p Y_{ijk} \right)^2}{np} + \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q Y_{ijk} \right)^2}{npq} \quad (2.7)$$

SS_{AB} = ผลบวกกำลังสองเนื่องจากการกระทำร่วมระหว่างปัจจัย A และ B

$$SS_{Wcel} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q Y_{ijk}^2 - \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_{ijk} \right)^2}{n} \quad (2.8)$$

SS_{Wcel} = ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความคลาดเคลื่อน

$$MS_A = \frac{SS_A}{p-1} \quad (2.9)$$

$$MS_A = \text{ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจากปัจจัย A}$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{q-1} \quad (2.10)$$

$$MS_B = \text{ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจากปัจจัย B}$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(p-1)(q-1)} \quad (2.11)$$

$$MS_{AB} = \text{ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจากการกระทำร่วมระหว่างปัจจัย A และ B}$$

$$MS_{W_{cell}} = \frac{MS_{W_{cell}}}{pq(n-1)} \quad (2.12)$$

$$MS_{W_{cell}} = \text{ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจากความคลาดเคลื่อน}$$

ตารางที่ 2.6 สรุปสูตรการคำนวณค่าความแปรปรวน [10]

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F
A	SS_A	$P - 1$	MS_A	$[1]/[4]$
B	SS_B	$Q - 1$	MS_B	$[2]/[4]$
AB	SS_{AB}	$(p - 1)(q - 1)$	MS_{AB}	$[3]/[4]$
Within Cell	$SS_{W_{cell}}$	$pq(n-1)$	$MS_{W_{cell}}$	
Total	SS_{TO}	44		

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 นรา และศิวกกร. [12] ทำการศึกษาวิจัยทดสอบการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 หนา 4 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดแบบเลเซอร์ โดยกำหนดตัวแปรหลักของการตัด 3 ตัว ประกอบด้วยพลังงานของเลเซอร์ (Power), ความถี่ในการปล่อยแสง (Frequency), และความเร็วตัด (Cutting speed), ตัวแปรตามคือ ค่าความหยาบผิว (Surface roughness) ซึ่งใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล 3^3 แล้ววิเคราะห์ผลการทดลองด้วยสถิติ

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า พลังงาน ความถี่ในการปล่อยแสงของเลเซอร์และความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อความหยาบผิว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และจากการ

วิเคราะห์ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสภาวะการตัดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 หนา 4 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดแบบเลเซอร์ ที่ให้ค่าความหนาผิวต่ำสุด คือการตัดโดยใช้ค่าพลังงานของเลเซอร์ 800 (W), ค่าความถี่ 200 (Hz) และค่าความเร็วตัด 500 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งจะได้ค่าความเรียบผิวประมาณ 1.25 ไมครอน

2.6.2 G. Fowler, I.R. Pashby, P.H. Shipway [4] ทำการศึกษาผลกระทบของอนุภาคและรูปร่างของสารขัดที่มีผลต่อการตัดไทเทเนียมด้วยวอเตอร์เจ็ต ได้อธิบายว่า ในการตัดโลหะด้วยน้ำแรงดันสูงนั้นสิ่งที่มีผลต่อค่าความเรียบผิว, คลื่นรอยตัดนั้น ได้แก่ สารขัด แรงดันน้ำ อัตราการไหลของทราย ความเร็วตัด เป็นต้น ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองหาสารขัดที่เหมาะสมในการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงโดยใช้ตัดวัสดุไทเทเนียม ใช้แรงดันน้ำ 137.9 Mpa (20,000 Psi) ใช้สารขัด 3 ชนิดได้แก่ Glass bead, Brow Aluminium oxide, Garnet โดยใช้ค่าความเร็วตัดตั้งแต่ 0.03 ms^{-1} ถึง 0.166 ms^{-1}

ผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วตัด 0.03 ms^{-1} สารขัดที่ส่งผลให้ค่าความหนาผิวเรียบผิวดีที่สุดคือ สารขัด Glass bead ขนาด 120 Mesh ให้ค่าความเรียบผิว (Ra) = $4.5 \mu\text{m}$ ที่ความเร็วตัด 0.08 ms^{-1} สารขัดประเภท Glass bead ยังให้ค่าความเรียบผิวดีกว่าสารขัดชนิด Brow Aluminium oxide และ Garnet เฉลี่ยอยู่ที่ (Ra) = $4.75 \mu\text{m}$ และที่ความเร็วตัด 0.166 ms^{-1} ได้ค่าความหนาผิวน้อยสุดเฉลี่ย (Ra) = $5 \mu\text{m}$ ซึ่งยังคงเป็นสารขัดประเภท Glass bead

2.6.3 L.Chen , E.Siores และ W.C.K. Wong [5] ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดเซรามิกด้วยแรงดันน้ำสูง โดยมีขนาดความหนาของวัสดุ 12.7 และ 25.4 มิลลิเมตร แรงดันน้ำ 138-345 MPa ความเร็วตัด 15-50 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราการไหล 0.575-0.910 กิโลกรัมต่อนาที สารขัด ไอโดซา ขนาด 80 Mesh ผลการทดลองพบว่าเทคโนโลยีวอเตอร์เจ็ต Abrasive มีประสิทธิภาพในการตัดเนื้อวัสดุแข็ง เช่นเซรามิกส์ การตัดเซรามิกด้วยวอเตอร์เจ็ต สามารถตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เทคนิคใหม่ของการเอียงหัวตัดไปข้างหน้าในระนาบของการตัด ความลึกโซนเรียบที่มีการเพิ่มขึ้นกว่า 30% เมื่อเทียบกับแบบที่ไม่เอียงหัวตัด การเอียงของหัวไม่ส่งผลกระทบต่อความเร็วในการตัดผ่าน โดยไม่สูญเสียคุณภาพของพื้นผิว เทคนิคใหม่นี้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมและยังสามารถใช้สำหรับการตัด AWJ สำหรับวัสดุอื่นๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ พื้นผิวของรอยตัดสามารถแบ่งออกเป็นสามโซน ในโซนด้านบนซึ่งมีพื้นผิวเรียบและไม่มีรอยและหลุมให้เห็น รอยตัดที่แคบลงทีละน้อยและความกว้างที่ส่วนท้ายของโซนนี้เท่ากับความกว้างอย่างน้อยจากการตัดในโซนตรงกลาง ซึ่งเห็นรอยได้ชัด แต่ไม่มีหลุม ความกว้างของรอยยังคงเหมือนเดิม

2.6.4 J. John Rozario Jegaraj and N. Ramesh babu [13] ทำการศึกษานาฬิกาของรูรีดน้ำ (Orifice) และขนาดรูหัวฉีดสารขัด (Focusing Nozzle diameter) ที่มีผลต่อคุณภาพในการตัดวัสดุ

อลูมิเนียมผสม 6063-T6 ด้วยวอเตอร์เจ็ต (Water Jets Cutting) ด้วยปัจจัยที่แตกต่างกัน ได้แก่ ขนาด รูรีดน้ำ 0.25, 0.3 และ 0.4 มิลลิเมตร แรงดันน้ำ 100, 175 และ 250 MPa ขนาดรูหัวฉีด 0.76, 1.02, 1.2 และ 1.6 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของสารขัด 0.07, 0.11 และ 0.22 กิโลกรัมต่อนาที และปัจจัยคงที่ใช้ขนาดของสารขัด 120 Mesh ผลการทดลองพบว่า จากปัจจัยข้างต้นที่สามารถตัดชิ้นงานได้หนาดัง 50 มิลลิเมตรคือ แรงดัน 175 MPa, ขนาดรูหัวฉีด 1.2 มิลลิเมตร, ขนาดรูรีดน้ำ 0.25 มิลลิเมตร, อัตราการไหลของสารขัด 0.07 กิโลกรัมต่อนาที ผลทางด้านความกว้างคลื่นรอยตัดได้ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร จากแรงดัน 250 MPa รูฉีดสารขัด 0.76 มิลลิเมตร รูรีดน้ำ 0.25 มิลลิเมตรและอัตราการไหลของสารขัด 0.07 กิโลกรัมต่อนาที ผลทางด้านมุมเอียงรอยตัด ได้มุมเอียงน้อยที่สุดเท่ากับ 0.25 องศา จากแรงดัน 250 MPa ขนาดรูฉีดสารขัด 0.76 มิลลิเมตร ขนาดรูรีดน้ำ 0.25 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของสารขัด 0.07 กิโลกรัมต่อนาที และผลทางด้านความหยาบผิวได้ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 2 μm จากแรงดัน 250 MPa ขนาดรูรีดน้ำ 0.25 มิลลิเมตร ขนาดรูฉีดสารขัด 0.76 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของสารขัดเท่า 0.22 กิโลกรัมต่อนาที

2.6.5 Adnan Akkurt [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของประเภทวัสดุและความหนาของวัสดุต่อเวลาในการเจาะด้วยเครื่องวอเตอร์เจ็ต ซึ่งอธิบายว่า กระบวนการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ตกำลังพัฒนาซึ่งมีความสัมพันธ์ของการพัฒนาทางด้านวัสดุวิศวกรรม โดยการศึกษาที่ใช้วัสดุ Brass-353, อลูมิเนียมบริสุทธิ์, อลูมิเนียมผสมเกรด 6061, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS1030 และเหล็กกล้าขึ้นรูปงานเย็น ซึ่งในการศึกษากระบวนการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ตนี้ ทำการทดสอบผลกระทบทางด้านความหนาและผิวรอยตัด ผลการทดลองพบว่าความแข็งของวัสดุมีผลต่อความหยาบผิวไม่แตกต่างกัน และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างวัสดุและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

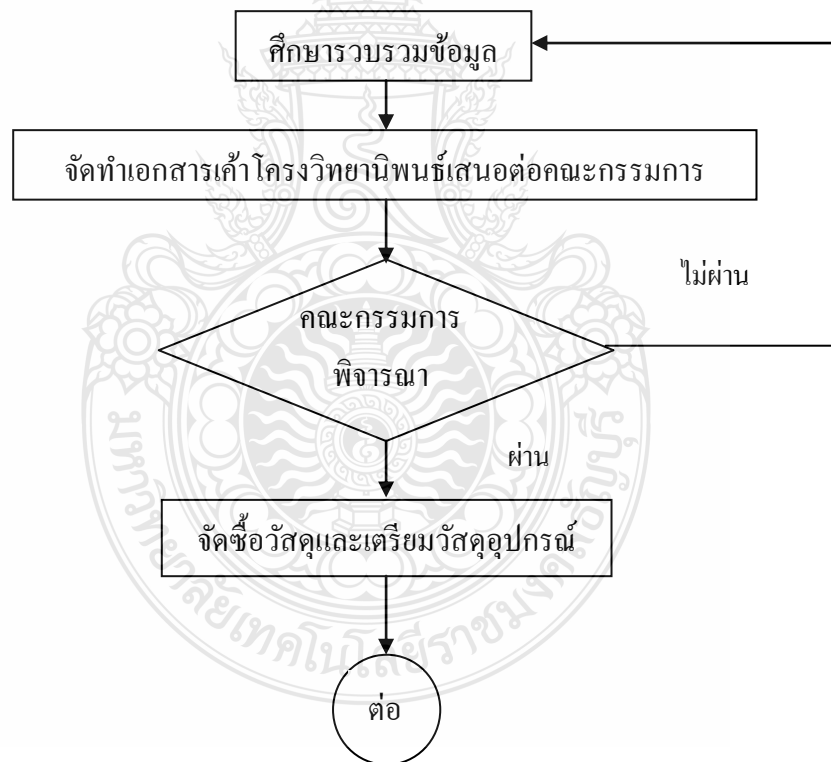
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การตัดวัสดุในแต่ละวิธีจะมีผลกระทบต่อชิ้นงานที่แตกต่างกัน เช่น จากงานวิจัยของ นรา และสิวกกร ทำการทดลองตัดวัสดุ SUS304 ด้วยเลเซอร์ จะมีผลกระทบต่อโครงสร้างของรอยตัด ทำให้ผิวรอยตัดมีความแข็งขึ้น หากเปรียบเทียบกับ การตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน การตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของรอยตัด จากงานวิจัยของ L.Chen, John Rozario และงานวิจัยของ Adan Akkurt ทำการศึกษาปัจจัยที่แตกต่างกัน พบว่าในแต่ละปัจจัยมีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน เช่น ความหยาบผิวรอยตัด คลื่นรอยตัด และค่าความฉากของชิ้นงาน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวได้แก่ แรงดันน้ำ รูปร่างและขนาดของสารขัด ความหนาวัสดุและเกรดวัสดุ หากทำการตัดด้วยปัจจัยที่เหมาะสมจะทำให้ได้คุณภาพของชิ้นงานดีขึ้น

บทที่ 3

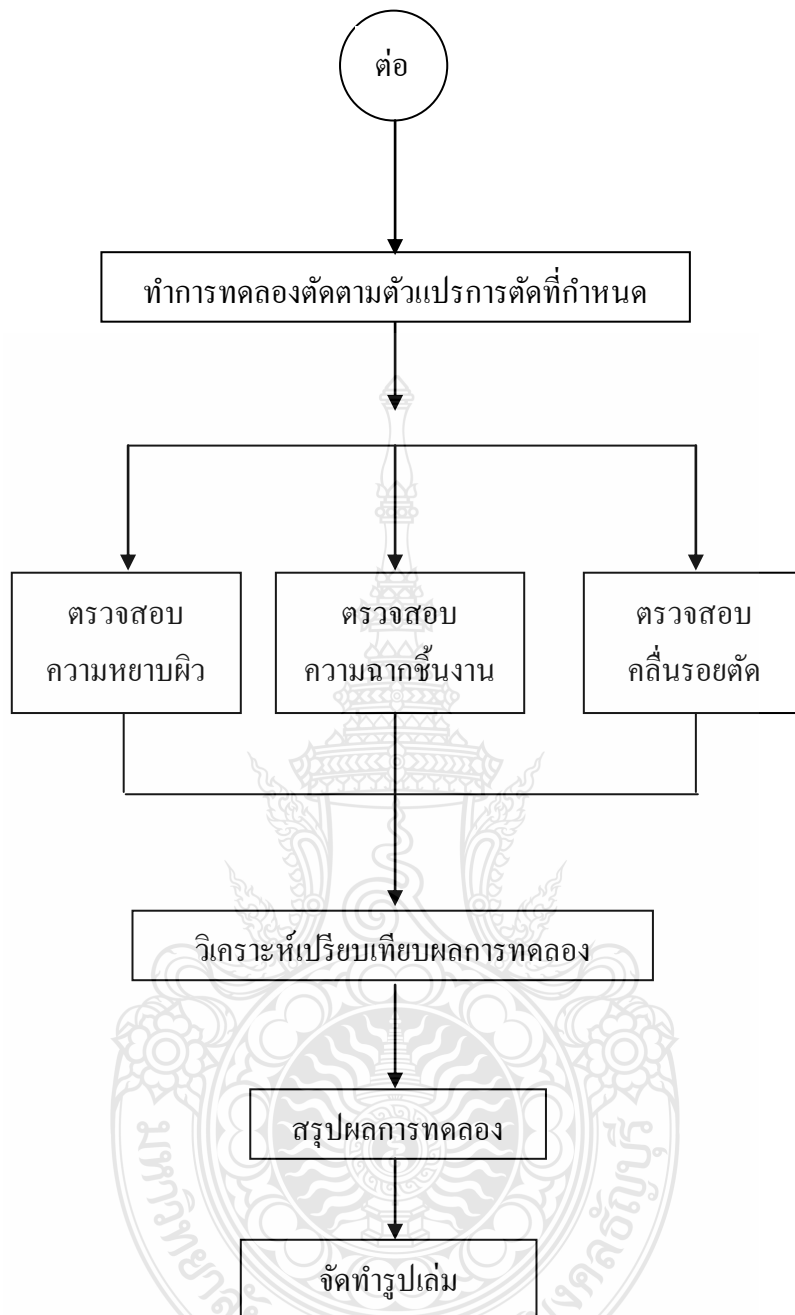
วิธีดำเนินงานวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้วางแผนการดำเนินการ เพื่อศึกษาถึงสภาวะที่มีผลต่อการตัดอคูมิเนียมผสมเกรด 6061-6063 และ 7075 ด้วยวอเตอร์เจ็ท โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองมาตรวจสอบทางกายภาพด้านความเรียบผิว (Surface roughness) ความฉากของชิ้นงาน (Kerf taper) [15,16] และคลื่นรอยตัด (Striation) [4,9] สารระคายเคืองในการดำเนินการวิจัยจะกล่าวตั้งแต่กระบวนการในการทดลอง ดังแผนภาพการไหลในการทำวิจัยในรูปที่ 3.1 รายละเอียดของกระบวนการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ท การกำหนดตัวแปรในการทดลอง การวัดวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 กระบวนการในการทำวิจัย



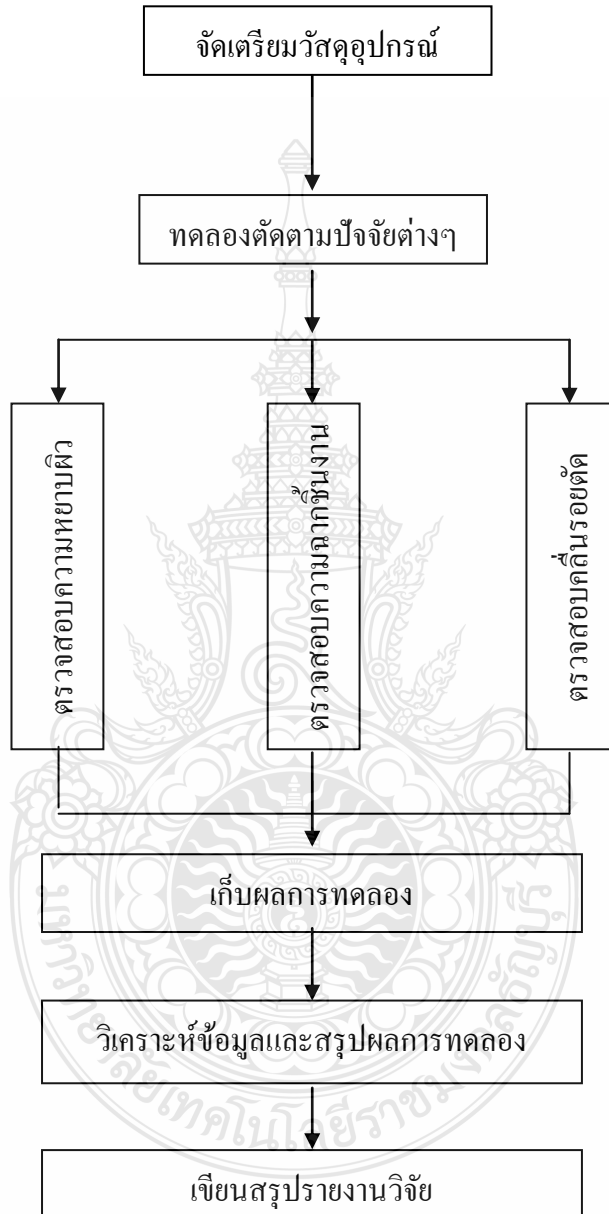
รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลของกระบวนการทำวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลของกระบวนการทำวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดคลุมนิยมนิยมผสมเกรด 6061-6063 และ 7075 ด้วยวอเตอร์เจ็ท สามารถแบ่งขั้นตอนการปฏิบัติงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แผนการไหลแสดงขั้นตอนการทดลอง

3.3 การจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

3.3.1 เครื่องตัดวัสดุด้วยแรงดันน้ำ (Water Jets Cutting)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดอลูมิเนียมผสมเกรด 6061-6063 และ 7075 ด้วยวอเตอร์เจ็ทน้ำใช้เครื่อง รุ่น MAXIEM Water jet model 1530 ในการทดลอง ซึ่งมีขนาดความกว้างของบ่อตัดเท่ากับ 2,489 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 4,166 มิลลิเมตร ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ โปรแกรมวิชาช่างผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง



รูปที่ 3.4 เครื่องทำความเย็นน้ำของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง

เครื่องทำความเย็นน้ำของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูงโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการตัดวัสดุจะอยู่ประมาณ 8-12 องศาเซลเซียส เนื่องจากท่อแรงดันน้ำในขณะที่ทำการตัดชิ้นงานจะมีอุณหภูมิสูงจึงต้องปรับอุณหภูมิของน้ำให้เย็นเพื่อลดอุณหภูมิภายในท่อในขณะที่เครื่องทำงาน



รูปที่ 3.5 เครื่องกรองน้ำของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง

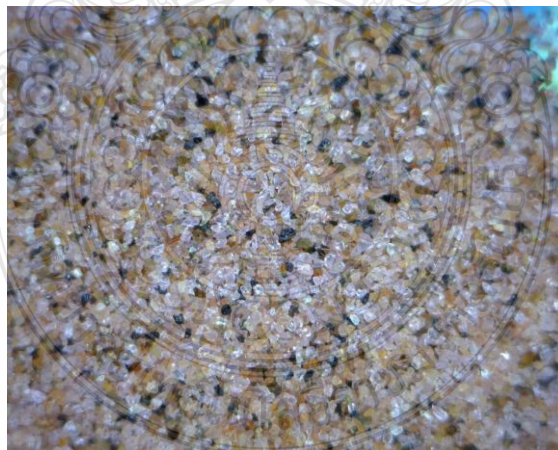
เครื่องกรองน้ำของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง โดยเครื่องกรองจะกรองน้ำเพื่อไม่ให้มีฝุ่นละอองหรือเศษของดินหรือที่เจือปนที่มากับน้ำเข้าเครื่องเพื่อไม่ให้หัวตัดวัสดุน้ำแรงดันสูงตัน

3.3.2 สารขัด (Abrasive)

สารขัดที่ใช้ในการทดลองคือเม็ดทรายแข็งซึ่งถูกคัดสรรและเลือกขนาดมาโดยเฉพาะ สารกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไปคือโกเมน คุณสมบัติของทรายโกเมนมีจุดหลอมเหลว 1250 องศาเซลเซียส มีขนาด 60 Mesh, 80 Mesh และ 120 Mesh แสดงดังรูปที่ 3.6 ถึง 3.8



รูปที่ 3.6 ลักษณะทรายขนาด 60 Mesh



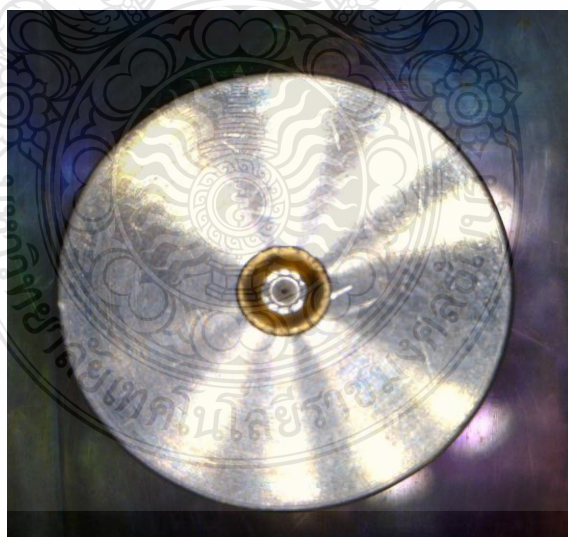
รูปที่ 3.7 ลักษณะทรายขนาด 80 Mesh



รูปที่ 3.8 ลักษณะทรายขนาด 120 Mesh

3.3.3 ชุดหัวรีดน้ำ (Orifice)

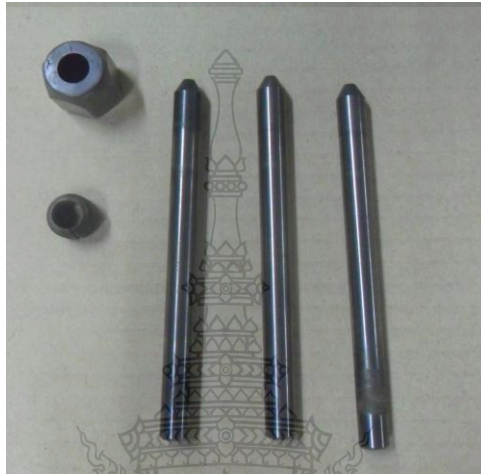
ชุดหัวรีดน้ำมีหน้าที่ลดขนาดของลำน้ำให้มีขนาดเล็กลงตามขนาดของรูในหัวรีด ซึ่งรูในหัวรีดมีขนาด 0.25 มิลลิเมตร ความโตนอกของหัวรีดน้ำ 12 มิลลิเมตรและมีความหนา 5 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุคาร์ไบด์ แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชุดหัวรีดน้ำ (Orifice)

3.3.4 ชุดหัวตัด (Focusing tube, Abrasive nozzle)

ชุดหัวตัดมีหน้าที่ผสมน้ำและสารกัดกร่อนก่อนที่ลำน้ำจะออกจากหัวตัด อีกทั้งยังทำหน้าที่เพิ่มอัตราเร่งอนุภาคสารขัดไปตัดชิ้นงาน ซึ่งชุดหัวตัดมีขนาดรูใน 0.7 มิลลิเมตร มีขนาดความโตนอก 5 มิลลิเมตร และมีความยาว 76 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุคาร์ไบด์ แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชุดหัวตัด (Focusing tube, Abrasive nozzle)

3.3.5 แผ่นเกจตั้งความสูงหัวตัด

การตั้งค่าความสูงของหัวตัด ใช้แผ่นเกจในการตั้งค่า ซึ่งมีความหนา 2 มิลลิเมตร แผ่นเกจ ทำจากวัสดุ SUS304 กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร มีมุมเอียง 20 องศา แสดงดังรูปที่ 3.11

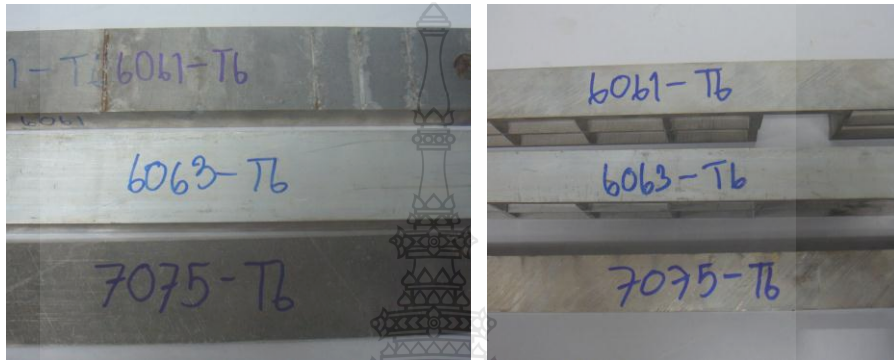


รูปที่ 3.11 แผ่นเกจตั้งความสูงหัวตัดหนา 2 มิลลิเมตร

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.4.1 เตรียมชิ้นงานทดลอง

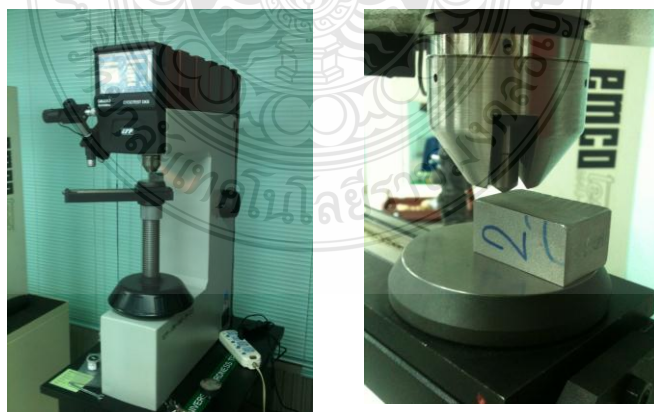
เตรียมวัสดุทดลองอลูมิเนียมผสมเกรด AA 6061-T6, AA 6063-T6 และ AA 7075-T6 ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 1,000 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร เพื่อเป็นชิ้นงานทดลองตัดด้วยเครื่องวอเตอร์เจ็ท ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะวัสดุทดลอง

3.4.2 การทดสอบความแข็งของวัสดุทดลอง

การทดสอบความแข็งของวัสดุทดลอง ใช้การทดสอบแบบ Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม 136 ° และใช้น้ำหนักกดที่ใช้อยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัม โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งและลักษณะการทดสอบ

การทดสอบความแข็งแบบ Vickers มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบ Brinell คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักที่กดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุทดลอง แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุทดลอง

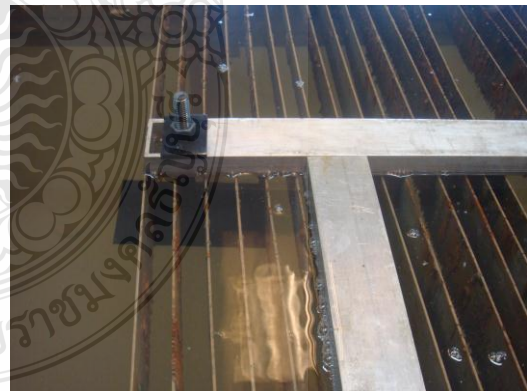
วัสดุทดลอง	จุดที่ 1 (HV)	จุดที่ 2 (HV)	จุดที่ 3 (HV)	ผลรวม	เฉลี่ย (HV)
AA6061	100.3	96.8	96.7	293.8	97.93
AA6063	74.3	73.4	70.7	218.4	72.80
AA7075	103.4	104.4	98.6	306.4	102.13

3.4.3 การยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องวอเตอร์เจ็ท

การจับยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องวอเตอร์เจ็ทเป็นกระบวนการที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่ง เนื่องจากหากจับยึดชิ้นงานไม่แน่น จะส่งผลต่อความเรียบผิว มุมเอียงรอยตัดและคลื่นรอยตัด โดยตรงดังนั้นทางผู้วิจัยจึงออกแบบอุปกรณ์ในการจับยึดเพิ่มอีกหนึ่งชุด เพื่อเพิ่มแข็งแรงให้กับการจับยึดชิ้นงานดังรูปที่ 3.14

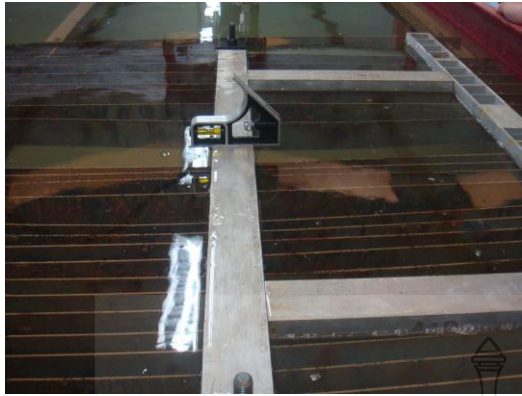


ก. ลักษณะการจับชิ้นงาน

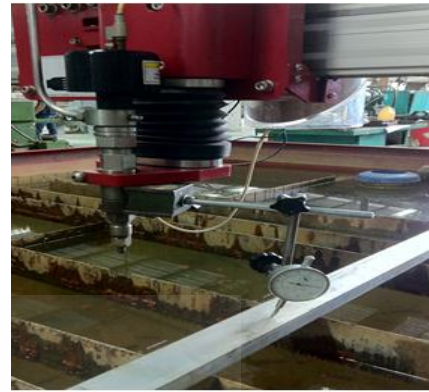


ข. อุปกรณ์จับยึดที่สร้างเพิ่มความแข็งแรง

รูปที่ 3.14 ลักษณะการจับชิ้นงาน



ก.แสดงการตั้งระนาบของชิ้นงานเบื้องต้น

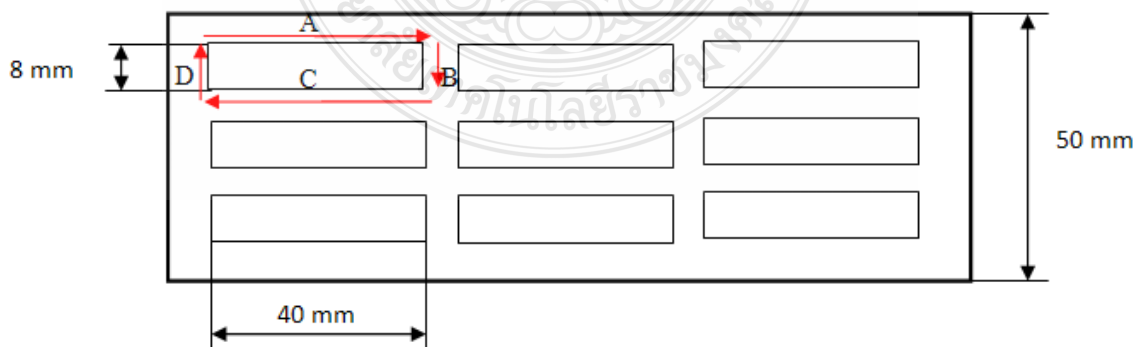


ข.แสดงการปรับตั้งระนาบชิ้นงาน

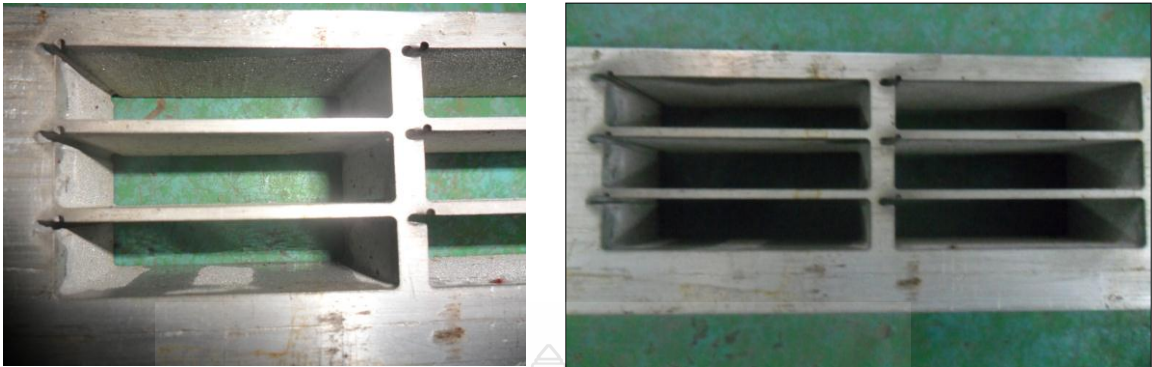
รูปที่ 3.15 การจับยึดและการตั้งชิ้นงาน

3.4.4 การกำหนดทางเข้าตัด

ในกระบวนการตัดชิ้นงานทดลองนี้ ขนาดชิ้นงานมีความกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร แต่วัสดุที่ทำการทดลองตัดมีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร ซึ่งทิศทางการตัดจะเริ่มตั้งแต่ตำแหน่ง A ตัดวนตามแบบงานจนจบกระบวนการที่ตำแหน่ง D หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ตำแหน่งในการตัด (offset) ไป 2-3 มิลลิเมตร และดำเนินการตัดเหมือนกับชิ้นงานชิ้นที่ 1 จนกระทั่งได้ชิ้นงานทดลองครบตามที่ต้องการ หลังจากที่ได้จำนวนชิ้นงานทดลองครบตามต้องการแล้ว จึงทำการเปลี่ยนค่าแรงดันน้ำจนครบตามสภาวะการตัด ซึ่งใช้ทิศทางการตัดเหมือนกันทุกสภาวะการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ลักษณะการเข้าตัดของชิ้นงานทดลอง



รูปที่ 3.16 ลักษณะการเข้าตัดของชิ้นงานทดลอง (ต่อ)

3.4.4 กำหนดแรงดันน้ำ (Pressure)

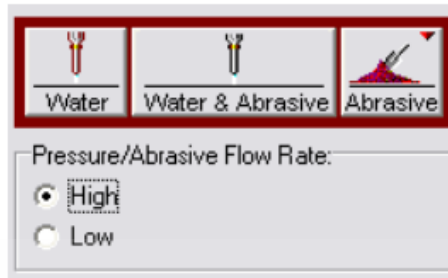
ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าแรงดันน้ำ 3 ระดับ คือ 100 MPa, 175MPa และ 250MPa จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแรงดันน้ำมีอิทธิพลต่อความเรียบผิว คลื่นรอยตัดและมุมเอียงรอยตัด วิธีการปรับแรงดันน้ำของเครื่องตัดด้วยแรงดันน้ำมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ทดสอบแรงดันน้ำที่เครื่องใช้อยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 3.17 การทดสอบแรงดันน้ำที่หัวตัด

2) ไปที่โหมดทดสอบแรงดันน้ำ (Water only) ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.18 โหมดทดสอบแรงดันน้ำ

3) ปรับแรงดันน้ำที่ต้องการที่ชุด ADO (Adjustable dump orifice) ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.19 ชุดปรับแรงดันน้ำ

- 4) อ่านค่าแรงดันน้ำที่จอแสดงผลค่าแรงดัน
- 5) เมื่อได้ค่าที่ต้องการแล้วให้กดลูกบิดที่จะป้องกันไม่ให้หมุนกลับแล้วกระชับนอตสกรูแบบปีกเพื่อล็อกลูกบิดให้อยู่ในตำแหน่ง
- 6) ทดสอบแรงดันน้ำที่ต้องการอีกครั้งในโหมดของทดสอบแรงดันน้ำอย่างเดียว

3.4.5 การตั้งความสูงหัวตัด

ความสูงของหัวตัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 2 มิลลิเมตร จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสูงหัวตัด พบว่าระยะความสูงหัวตัดมีผลกับมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงานซึ่งระยะที่เหมาะสม คือ 2 มิลลิเมตร แต่ถ้าหากมีระยะน้อยกว่านี้อาจทำให้หัวตัดเสียหายได้ เนื่องจากวัสดุที่

นำมาตัดอาจมีความโก่งตัวหรือความสูงต่ำไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ความสูงหัวตัดที่ 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ลักษณะการตั้งความสูงหัวตัด

3.4.6 ดำเนินการตัดตามเงื่อนไขทดลอง

ในการดำเนินการทดลองตัดอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA6061-T6, AA6063-T6 และ AA7075-T6 นี้ เงื่อนไขการทดลอง มีตัวแปรทดลองที่ต้องควบคุม ซึ่งมีเงื่อนไขเบื้องต้นดังนี้ แรงดันน้ำที่หัวตัด 100MPa, 175MPa และ 250MPa ชนิดของสารขัดเป็นทรายโกเมนมีขนาด 60 Mesh, 80 Mesh และ 120 Mesh รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.1 ถึง ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง ที่แรงดัน 100 MPa

ลำดับ	แรงดันน้ำ (MPa)	ขนาดของสารขัด (Mesh)	วัสดุ	ขนาดหัวรีดน้ำ (mm)	ขนาดท่อลำน้ำ (mm)	อัตราการไหลของสารขัด (kg/min)
1	100	60	AA6061	0.25	0.7	0.368
2	100	60	AA6063	0.25	0.7	0.368
3	100	60	AA7075	0.25	0.7	0.368
4	100	80	AA6061	0.25	0.7	0.368
5	100	80	AA6063	0.25	0.7	0.368
6	100	80	AA7075	0.25	0.7	0.368

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง ที่แรงดัน 100 MPa (ต่อ)

ลำดับ	แรงดันน้ำ (MPa)	ขนาดของ สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ขนาดหัว รีดน้ำ (mm)	ขนาดท่อ ลำน้ำ (mm)	อัตราการไหล ของสารขัด (kg/min)
7	100	120	AA6061	0.25	0.7	0.368
8	100	120	AA6063	0.25	0.7	0.368
9	100	120	AA7075	0.25	0.7	0.368

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง ที่แรงดัน 175 MPa

ลำดับ	แรงดันน้ำ (MPa)	ขนาดของ สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ขนาดหัว รีดน้ำ (mm)	ขนาดท่อ ลำน้ำ (mm)	อัตราการไหล ของสารขัด (kg/min)
1	175	60	AA6061	0.25	0.7	0.368
2	175	60	AA6063	0.25	0.7	0.368
3	175	60	AA7075	0.25	0.7	0.368
4	175	80	AA6061	0.25	0.7	0.368
5	175	80	AA6063	0.25	0.7	0.368
6	175	80	AA7075	0.25	0.7	0.368
7	175	120	AA6061	0.25	0.7	0.368
8	175	120	AA6063	0.25	0.7	0.368
9	175	120	AA7075	0.25	0.7	0.368

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง ที่แรงดัน 250 MPa

ลำดับ	แรงดันน้ำ (MPa)	ขนาดของ สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ขนาดหัว รีดน้ำ (mm)	ขนาดท่อ ลำน้ำ (mm)	อัตราการไหล ของสารขัด (kg/min)
1	250	60	AA6061	0.25	0.7	0.368
2	250	60	AA6063	0.25	0.7	0.368
3	250	60	AA7075	0.25	0.7	0.368

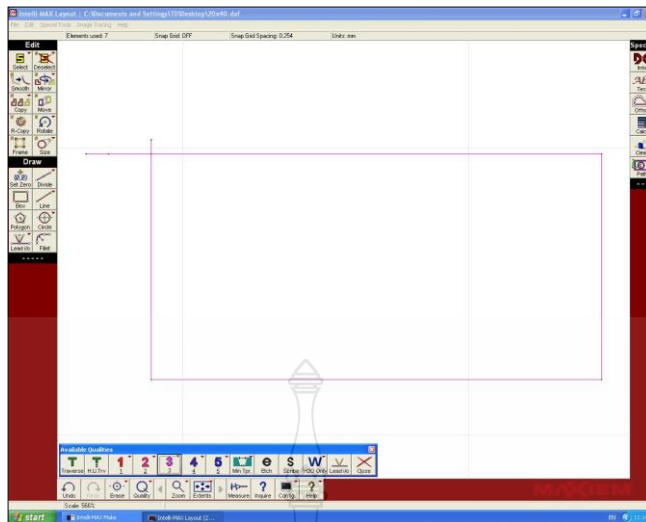
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง ที่แรงดัน 250 MPa (ต่อ)

ลำดับ	แรงดันน้ำ (MPa)	ขนาดของสารขัด (Mesh)	วัสดุ	ขนาดหัวรีดน้ำ (mm)	ขนาดท่อลำน้ำ (mm)	อัตราการไหลของสารขัด (kg/min)
4	250	80	AA6061	0.25	0.7	0.368
5	250	80	AA6063	0.25	0.7	0.368
6	250	80	AA7075	0.25	0.7	0.368
7	250	120	AA6061	0.25	0.7	0.368
8	250	120	AA6063	0.25	0.7	0.368
9	250	120	AA7075	0.25	0.7	0.368

3.5 การป้อนค่าพารามิเตอร์การตัด

ในการตัดวัสดุด้วยเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูงค่าผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการตัด สามารถอ่านค่าได้จากจอแสดงผลคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูงจะมีซอฟต์แวร์พื้นฐาน Intelli-MAX เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมดของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างแบบชิ้นงาน และการทำชิ้นงานหรือกำหนดค่าต่างๆ ในการตัดชิ้นงานจริง ซึ่งเบื้องต้นจะต้องทำการเลือกค่าต่างๆ ในโปรแกรมพื้นฐานเพื่อใช้ในการตัด มีขั้นตอนดังนี้

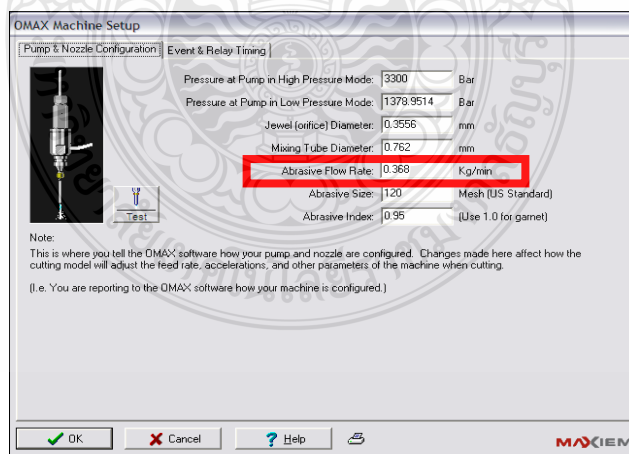
1) การสร้างแบบชิ้นงานและการกำหนดค่าคุณภาพผิวของการตัดหรือค่า Q จากระดับคุณภาพผิว Q1 ถึง Q5 ของรอยตัด และเลือกค่าใน โปรแกรมการสร้างแบบชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการสร้างแบบชิ้นงานและการกำหนดค่าคุณภาพผิวของการตัด

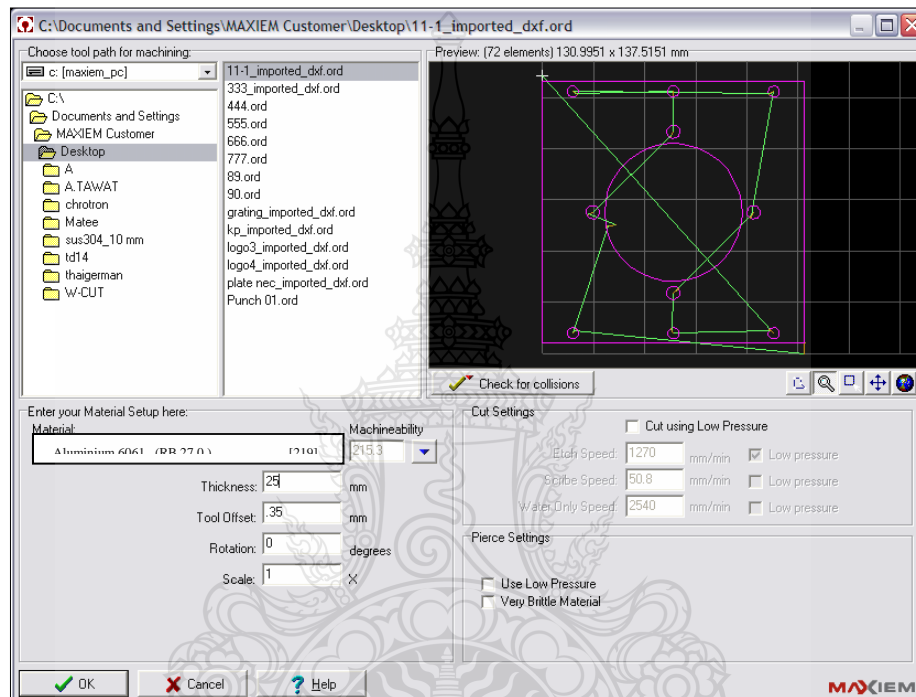
จากรูปที่ 3.21 เป็นขั้นตอนในการสร้างแบบชิ้นงาน และการกำหนดค่าคุณภาพผิวของการตัดในโปรแกรมพื้นฐานเพื่อใช้ในการตัด คือการสร้างแบบชิ้นงานโดยทำการเลือกคำสั่งต่างๆ ในแถบเมนู Draw แล้วทำการสร้างแบบตามที่ได้กำหนด การกำหนดค่าคุณภาพผิวของการตัด โดยทำการเลือกค่าคุณภาพผิวที่ระดับ 3 ในแถบเมนู Available qualities

2) ทำการเลือกรายการชนิดสารขัดที่จะนำมาตัดใน โปรแกรมการตัดชิ้นงานจริงที่อัตราการไหลของสารขัด 0.368 kg/min แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการเลือกรายการชนิดและอัตราการไหลของสารขัด

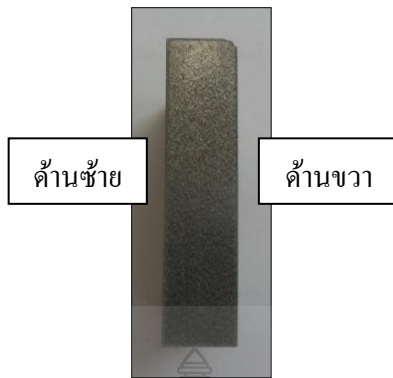
3) ทำการเลือกรายการชนิดและความหนาของวัสดุที่จะนำมาตัดในโปรแกรมการตัดชิ้นงานจริง เป็นขั้นตอนการเลือกรายการชนิดและความหนาของวัสดุที่จะนำมาตัด ในโปรแกรมพื้นฐานเพื่อใช้ในการตัด เลือกรายการชนิดของวัสดุ โดยทำการเลือกรายการชนิดของวัสดุในแถบเมนู Material ตามที่ได้กำหนด และ ค่าความหนาของวัสดุ โดยทำการป้อนค่าที่ความหนาในแถบเมนู Thickness แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการเลือกรายการชนิดและความหนาของวัสดุ

3.6 การทดสอบความหยาบผิว

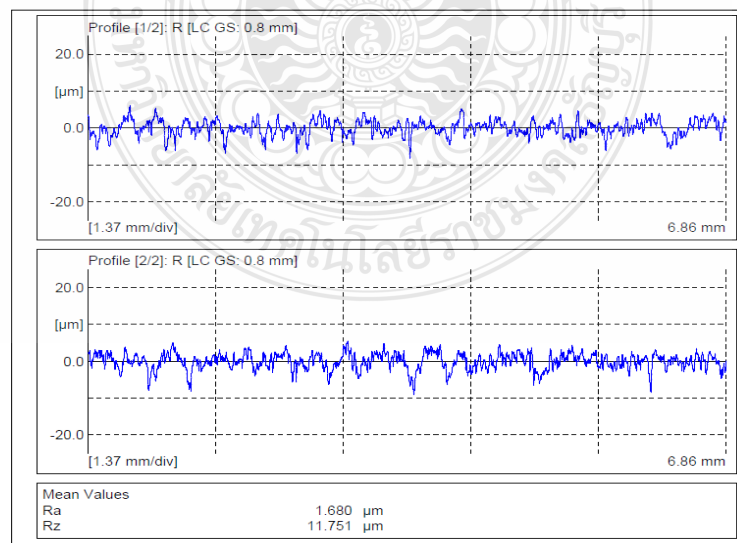
เครื่อง (Surface roughness instrument ชนิด Contact stylus profilometer) ยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf XR20 เป็นเครื่องทดสอบความหยาบละเอียดของผิววัสดุโดยใช้ปลายเข็มขนาดเล็กสแกนลากไปบนผิววัสดุ ลักษณะการสปริงขึ้นลงของปลายเข็ม เมื่อลากผ่านผิวไม่เรียบ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านระบบการวิเคราะห์สัญญาณ แสดงเป็นแผนภาพและค่าความหยาบผิวในหน่วยไมโครเมตร โดยมีขั้นตอนการวัดความหยาบผิวรอยตัดนั้น ต้องทำการวัดบริเวณตรงกลางรอยตัดของชิ้นงาน ในตำแหน่งรอยตัดด้านซ้ายและด้านขวาตามลำดับแสดงดังรูปที่ 3.24 เพื่อนำค่าความหยาบผิวรอยตัดของชิ้นงานในแต่ละด้าน มาวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 ตำแหน่งในวัดความหยาบผิวรอยตัด



รูปที่ 3.25 ลักษณะเครื่องวัดความหยาบผิว



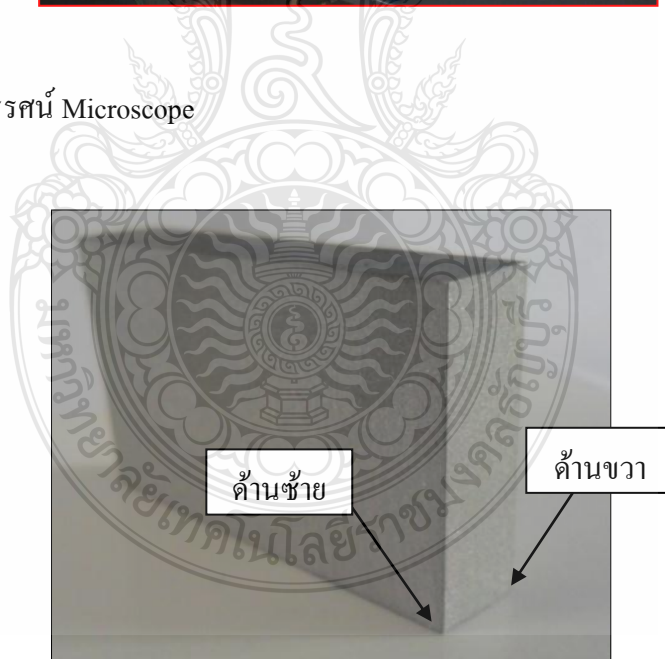
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวรอยตัดของเครื่องวัดความหยาบผิว

3.7 การทดสอบความฉากของชิ้นงาน

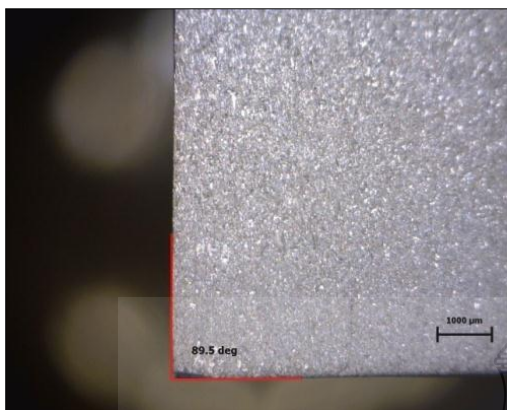
การตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงที่ชิ้นงานมีความหนาหลายๆ มีผลกระทบในเรื่องของความฉากของชิ้นงาน เนื่องจากเจ็ทสตรีมของน้ำที่ออกจากหัวตัดมีแรงดันมากกว่าภายนอก จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ตัดออกมาเกิดมีมุมเอียง การทดสอบความฉากของชิ้นงานนี้ใช้กล้อง Microscope ประกอบพร้อมคอมพิวเตอร์พร้อมกับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวัด



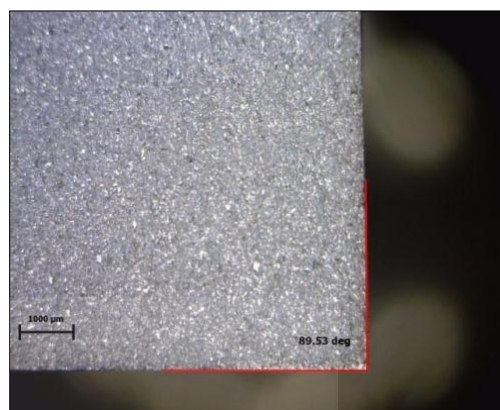
รูปที่ 3.27 กล้องจุลทรรศน์ Microscope



รูปที่ 3.28 ตำแหน่งในวัดความฉากของชิ้นงาน



ก.ลักษณะการวัด ด้านซ้ายของชิ้นงาน

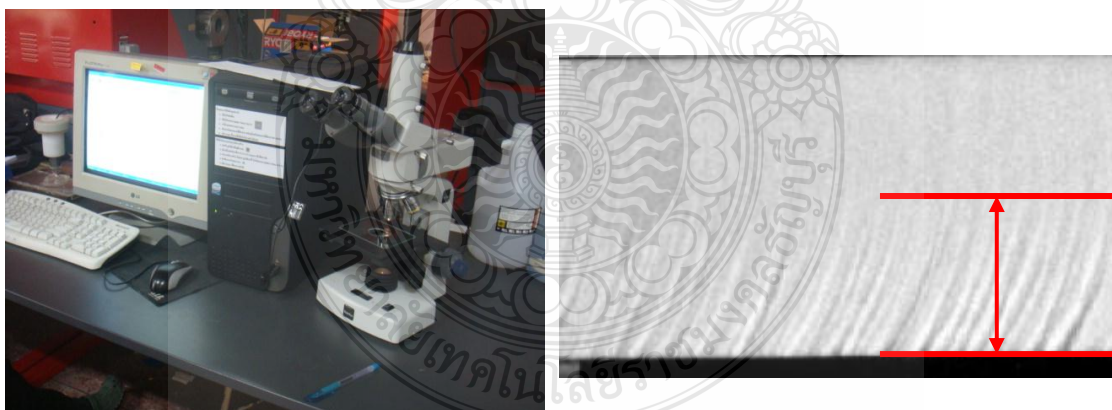


ข.ลักษณะการวัด ด้านขวาของชิ้นงาน

รูปที่ 3.29 ลักษณะการวัดความฉากของชิ้นงาน

3.8 การทดสอบคลื่นรอยตัด

การวัดคลื่นรอยตัด ใช้กล้อง Microscope ประกอบรวมคอมพิวเตอร์พร้อมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวัด โดยการถ่ายรูปจากกล้อง Microscope แล้วนำมาวัดขนาดของคลื่นรอยตัด ด้วยโปรแกรม Rhinoceros แสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 เครื่องมือในการวัดคลื่นรอยตัด

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

การตัดอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061-T6, AA6063-T6 และ AA7075-T6 ด้วยวิธีการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด ซึ่งทำการแปรเปลี่ยนแรงดันน้ำที่หัวตัดและแปรเปลี่ยนขนาดของสารขัดที่คาดว่าจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน โดยศึกษาค่าความหยาบผิวรอยตัด ศึกษามุมเอียงรอยตัดและคลื่นรอยตัด ที่ได้จากการแปรเปลี่ยนสภาวะในการทดลอง จะถูกรวบรวมและวิเคราะห์ผลเป็นลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวรอยตัด

การวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดลอง ที่บริเวณรอยตัดตามเงื่อนไขการทดลองด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf XR20 ซึ่งทำการวัดความหยาบผิว 2 ด้านของชิ้นงานทดลอง ได้ผลการทดลองดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความหยาบผิวรอยตัดของชิ้นงาน

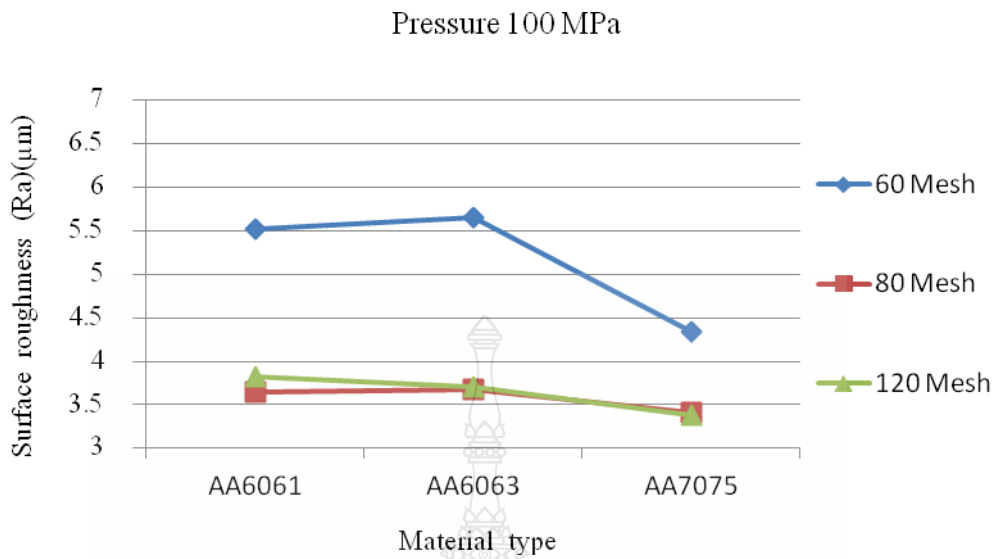
ลำดับที่	แรงดันน้ำ (MPa)	ขนาดของสารขัด (Mesh)	เกรดอลูมิเนียม	ค่าความหยาบผิว		ค่าเฉลี่ย (μm)
				R1 (μm)	R2 (μm)	
1	100	60	6061	5.586	5.444	5.51
2	175	60	6061	6.411	5.971	6.19
3	250	60	6061	5.156	5.105	5.75
4	100	60	6063	5.533	5.769	5.65
5	175	60	6063	5.324	5.725	5.52
6	250	60	6063	6.861	5.407	6.13
7	100	60	7075	4.367	4.307	4.34
8	175	60	7075	5.123	3.975	4.55
9	250	60	7075	5.352	6.237	5.22
10	100	80	6061	3.444	3.829	3.64
11	175	80	6061	4.052	3.892	3.97
12	250	80	6061	3.688	3.794	3.74
13	100	80	6063	3.616	3.744	3.68

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความหยาบผิวรอยตัดของชิ้นงาน (ต่อ)

ลำดับที่	แรงดันน้ำ (MPa)	ขนาดของ สารขัด (Mesh)	เกรด อลูมิเนียม	ค่าความหยาบผิว		ค่าเฉลี่ย (μm)
				R1 (μm)	R2 (μm)	
14	175	80	6063	3.796	3.976	3.89
15	250	80	6063	3.462	3.791	3.63
16	100	80	7075	3.318	3.504	3.41
17	175	80	7075	3.675	3.274	3.41
18	250	80	7075	3.557	3.463	3.51
19	100	120	6061	3.816	3.833	3.82
20	175	120	6061	3.724	3.604	3.66
21	250	120	6061	3.213	4.130	3.67
22	100	120	6063	4.003	3.390	3.70
23	175	120	6063	3.619	3.843	3.73
24	250	120	6063	4.021	3.988	4.00
25	100	120	7075	3.612	3.140	3.38
26	175	120	7075	3.184	3.235	3.21
27	250	120	7075	4.153	3.542	3.55

4.1.1 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 100 MPa ที่มีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด

การทดลองตัดอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร ด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด มีค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ แรงดันน้ำที่หัวตัด 100 MPa และขนาดของสารขัด 60, 80 และ 120 Mesh ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ความหยาบผิวรอยตัดจากกราฟดังนี้

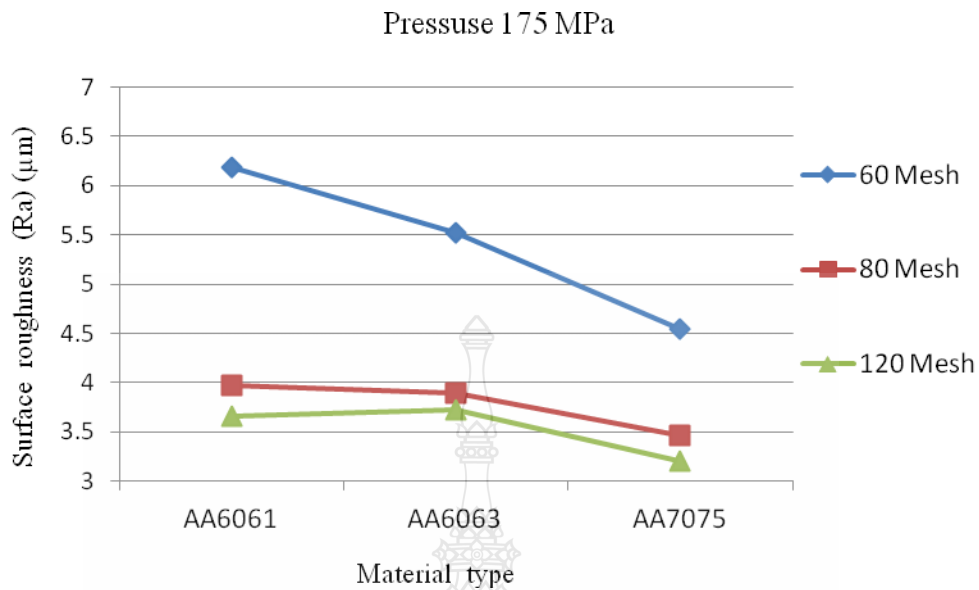


รูปที่ 4.1 ความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (100 MPa)

จากรูปที่ 4.1 สิ่งที่สังเกตเห็นได้ พบว่าสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดสูงกว่าสภาวะการตัดอื่น โดยที่สภาวะการตัดดังกล่าวนี้ อลูมิเนียมเกรด AA7075 มีค่าความหยาบผิวน้อยกว่าอลูมิเนียมเกรด AA6061 และ AA6063 ทางด้านสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดของสารขัด 80 Mesh และ 120 Mesh มีค่าความหยาบผิวใกล้เคียงกันทุกสภาวะการทดลอง การเกิดความแตกต่างของความหยาบผิวลักษณะนี้อาจมีสาเหตุมาจากขนาดและรูปร่างของสารขัด ซึ่งขนาดของสารขัด 60 Mesh มีขนาดใหญ่กว่าขนาดและรูปร่างของสารขัด 80 และ 120 Mesh หากเปรียบเทียบกับการตัดด้วยเลเซอร์ การตัดด้วยน้ำแรงดันสูงถือว่าดี้อยกว่าการตัดด้วยเลเซอร์ทางด้านความหยาบผิว [12]

4.1.2 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 175 MPa ที่มีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด

การทดลองตัดอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร ด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด มีค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ แรงดันน้ำที่หัวตัด 175 MPa และสารขัดประเภททรายขนาด 60, 80 และ 120 Mesh ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ความหยาบผิวรอยตัดจากกราฟดังนี้

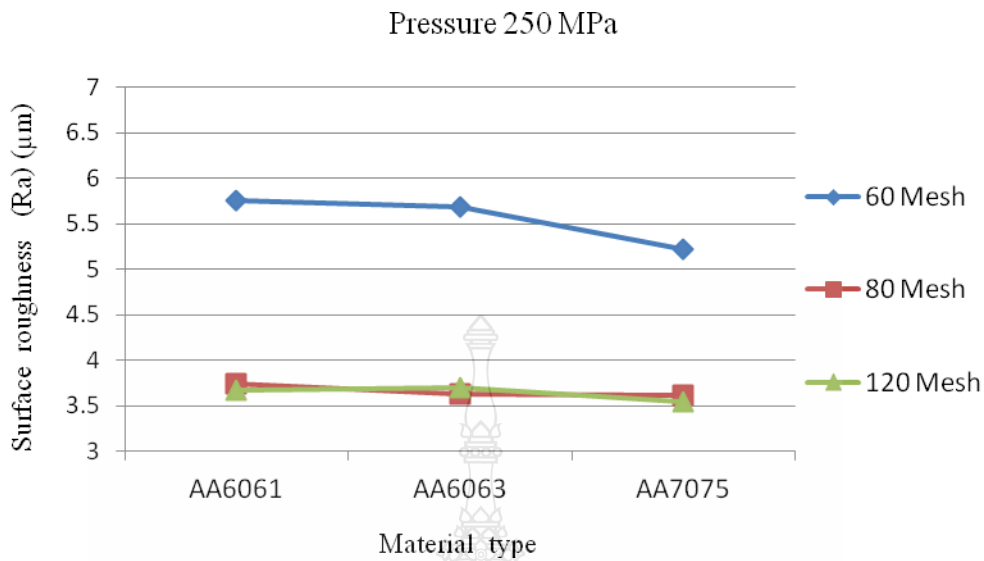


รูปที่ 4.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (175 MPa)

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบความหยาบผิวรอยตัดที่แรงดันน้ำ 175 MPa วัสดุเป็น อลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ขนาดของสารขัด 60, 80 และ 120 Mesh จะเห็นได้ว่า สภาวะการตัดนี้ขนาดของสารขัด 60 Mesh ยังให้ค่าความหยาบผิวสูงกว่าขนาดสารขัด 80 และ 120 Mesh หากพิจารณาขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh ของสภาวะการตัดนี้ ค่าความหยาบผิวยังมีความใกล้เคียงกัน และหากเปรียบเทียบกับสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 100 MPa ยังถือว่าไม่แตกต่างกันมากนัก

4.1.3 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 250 MPa ที่มีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด

การทดลองตัดอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร ด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด มีค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ แรงดันน้ำที่หัวตัด 250 MPa และขนาดของสารขัด 60, 80 และ 120 Mesh ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ความหยาบผิวรอยตัดจากกราฟดังนี้

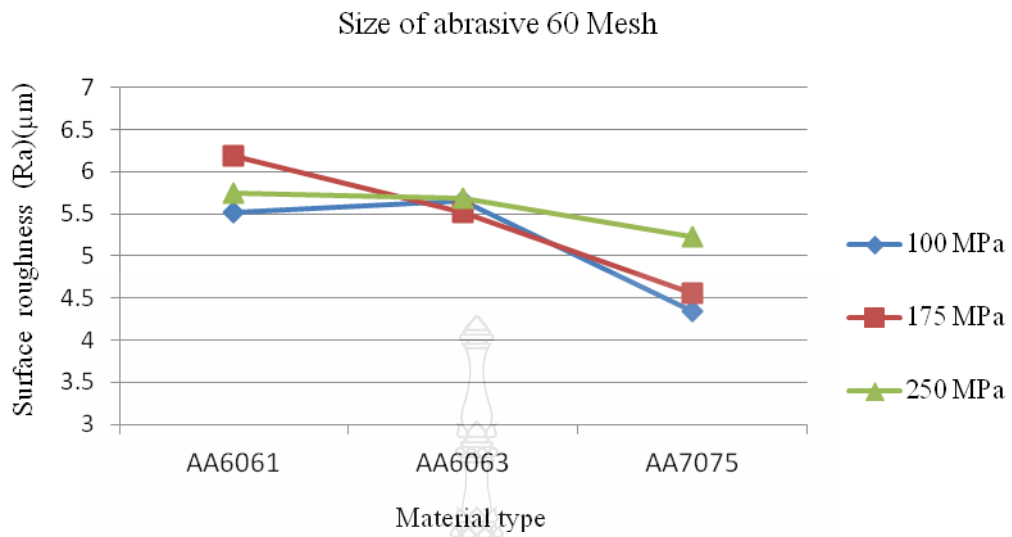


รูปที่ 4.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (250 MPa)

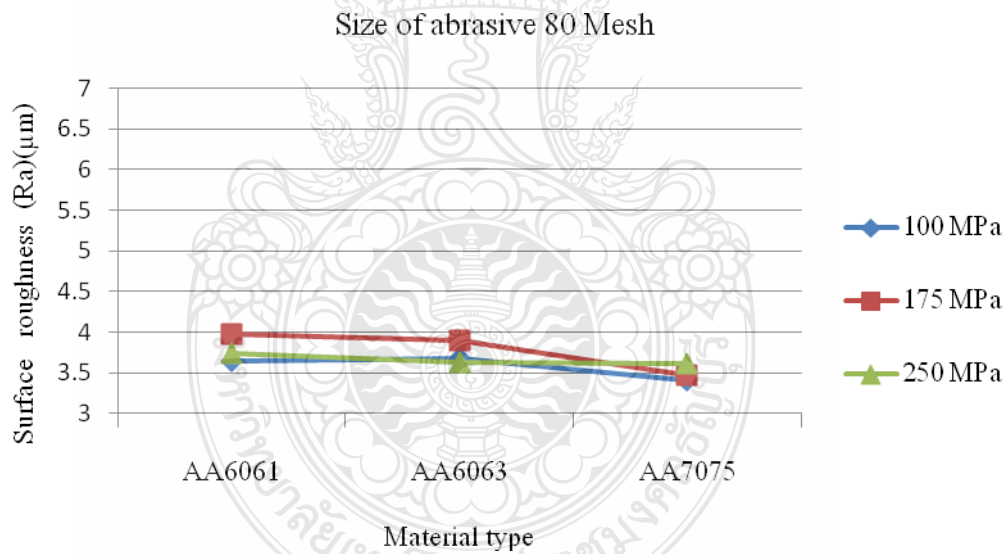
จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความหยาบผิวรอยตัดที่แรงดันน้ำ 250 MPa วัสดุเป็นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ขนาดของสารขัด 60, 80 และ 120 Mesh จากการทดสอบพบว่า ค่าความหยาบผิวในการใช้สารขัดขนาด 60 Mesh ยังมีค่าสูงกว่าขนาดสารขัด 80 และ 120 Mesh ในการตัดอลูมิเนียมทั้ง 3 เกรด ซึ่งหากเปรียบเทียบกับแรงดันน้ำที่ 100 MPa และ 175 MPa ยังคงมีค่าความหยาบผิวรอยตัดไม่แตกต่างกันมาก ในส่วนของสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh ค่าความหยาบผิวไม่แตกต่างกันเหมือนสภาวะการตัดอื่นๆ อีกทั้งยังพบว่า ขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดสูงกว่าขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh ทุกสภาวะการตัด

4.1.4 อิทธิพลขนาดของสารขัด 60 80 และ 120 Mesh ที่มีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด

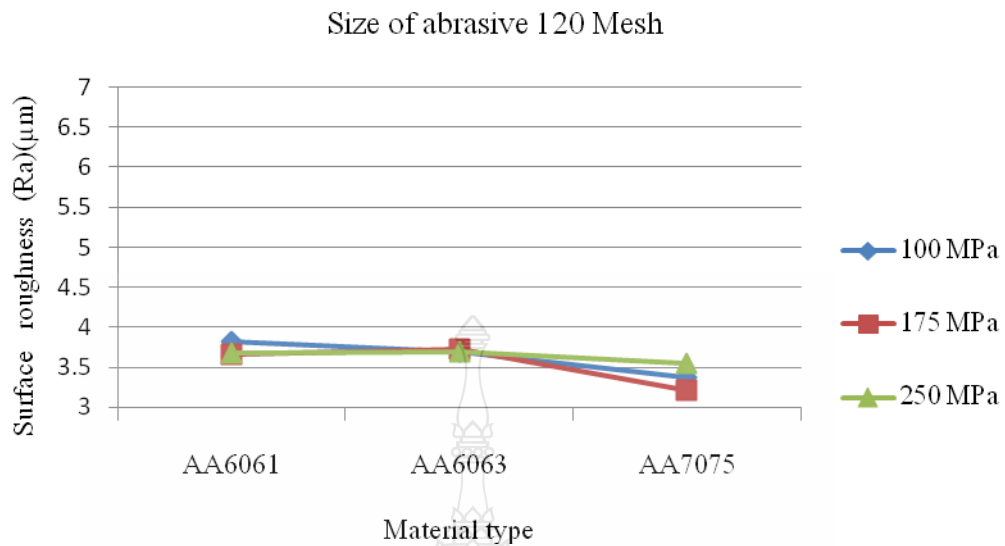
จากการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยกราฟที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัดของแรงดันน้ำ 100 175 และ 250 MPa ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลเพียงด้านเดียว ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบข้อมูลด้านขนาดของสารขัดเป็นปัจจัยหลัก ที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด เพื่อที่จะสามารถอธิบายผลการทดลองได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แสดงรายละเอียดดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ยรอยตัด (ขนาดสารขัด 60 Mesh)



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ยรอยตัด (ขนาดสารขัด 80 Mesh)

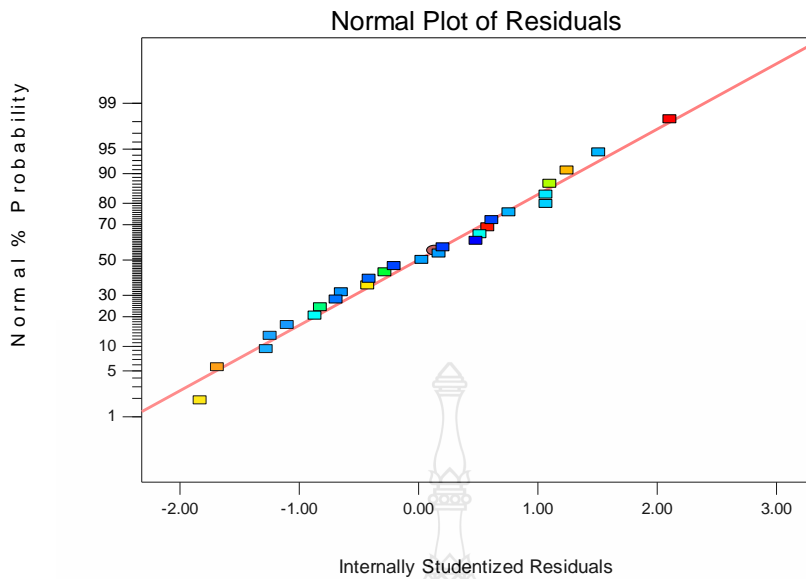


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ยรอยตัด (ขนาดสารขัด 120 Mesh)

จากกราฟที่ 4.4 - 4.6 แสดงการเปรียบเทียบความหยาบผิวรอยตัด ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลด้านขนาดของสารขัดให้เป็นปัจจัยหลัก ซึ่งกราฟทั้ง 3 รูป ชี้ให้เห็นว่า เมื่อขนาดของสารขัดมีขนาดเล็กลง ทำให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดดีขึ้น ซึ่งขนาดของสารขัด 120 Mesh ให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดดีกว่า 60 และ 80 Mesh แสดงว่าขนาดของสารขัดมีผลโดยตรงกับความหยาบผิวรอยตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวอเตอร์เจ็ท

4.1.5 การวิเคราะห์ผลด้วยสถิติ

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติเป็นการตรวจสอบส่วนที่ตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ ซึ่งจากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเส้นตรงไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความพอเพียง



รูปที่ 4.7 Normal Probability Plot ต่อความหยาบผิวรอยตัด

การวิเคราะห์ ANOVA โดยการอ่านค่า P-Value ที่ได้จากราย ANOVA ค่า P-Value ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ปัจจัยใดที่มีค่าน้อยกว่าค่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด หรือหากมากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวรอยตัด ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ว่าการตัดลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัดด้วยปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะพิจารณาจากค่า P-Value ดังแสดงผลวิเคราะห์จากรูปที่ 4.8

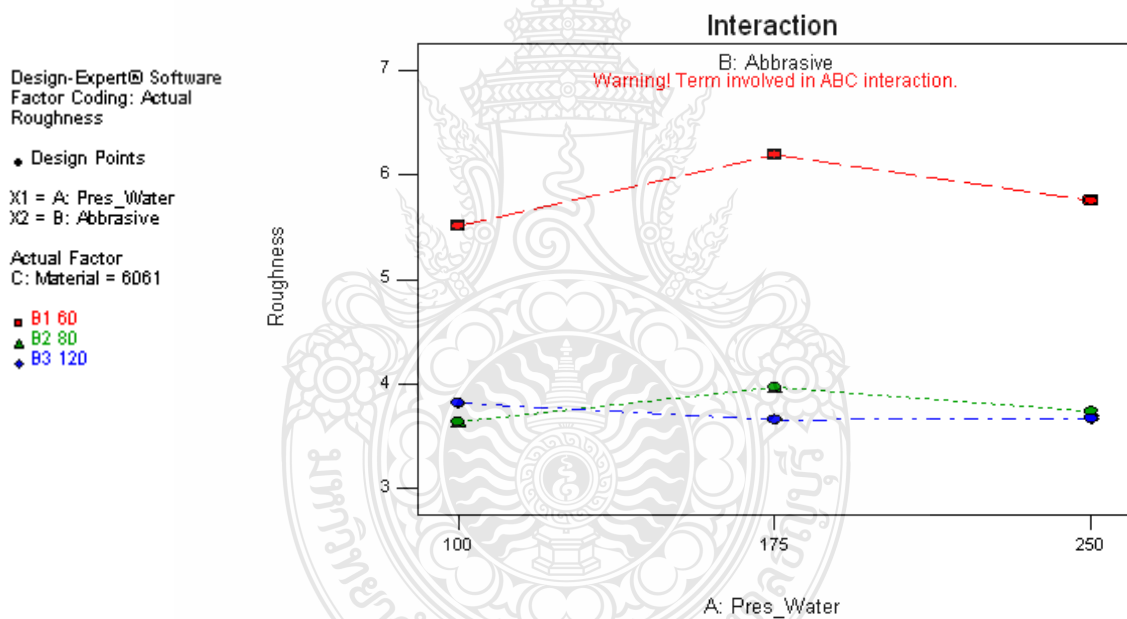
Response	1	Roughness			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	22.81	18	1.27	37.21	< 0.0001
A-Pres_Water	0.24	2	0.12	3.50	0.0811
B-Abbrasive	19.11	2	9.55	280.45	< 0.0001
C-Material	2.13	2	1.06	31.24	0.0002
AB	0.30	4	0.076	2.24	0.1545
AC	0.28	4	0.070	2.07	0.1772
BC	0.75	4	0.19	5.53	0.0196
Residual	0.27	8	0.034		
Cor Total	23.09	26			

รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

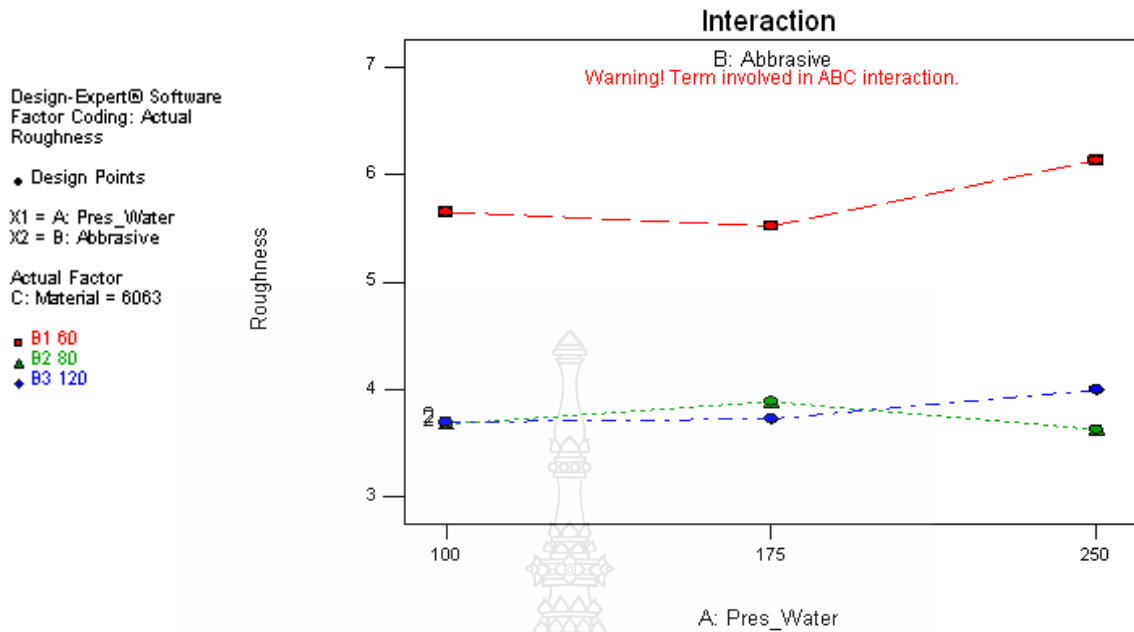
จากรูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองโดยกำหนดให้ปัจจัย A คือ แรงดันน้ำที่หัวตัด B คือ ขนาดของสารขัดและ C คือเกรดอลูมิเนียม จากผลการทดสอบพบว่า มี 2 ปัจจัยหลักที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ B และ C แสดงว่าทั้ง 2 ปัจจัยมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัดและอันตรกิริยาของขนาดสารขัด (ปัจจัย B) และเกรดอลูมิเนียม (ปัจจัย C) มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด แต่หากนำปัจจัยทั้ง 3 มาวิเคราะห์ร่วมกันจะพบว่าไม่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด ส่วนค่า P-Value ของเกรดอลูมิเนียมมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด

4.1.6 ทดสอบอิทธิพลของกิริยาร่วม

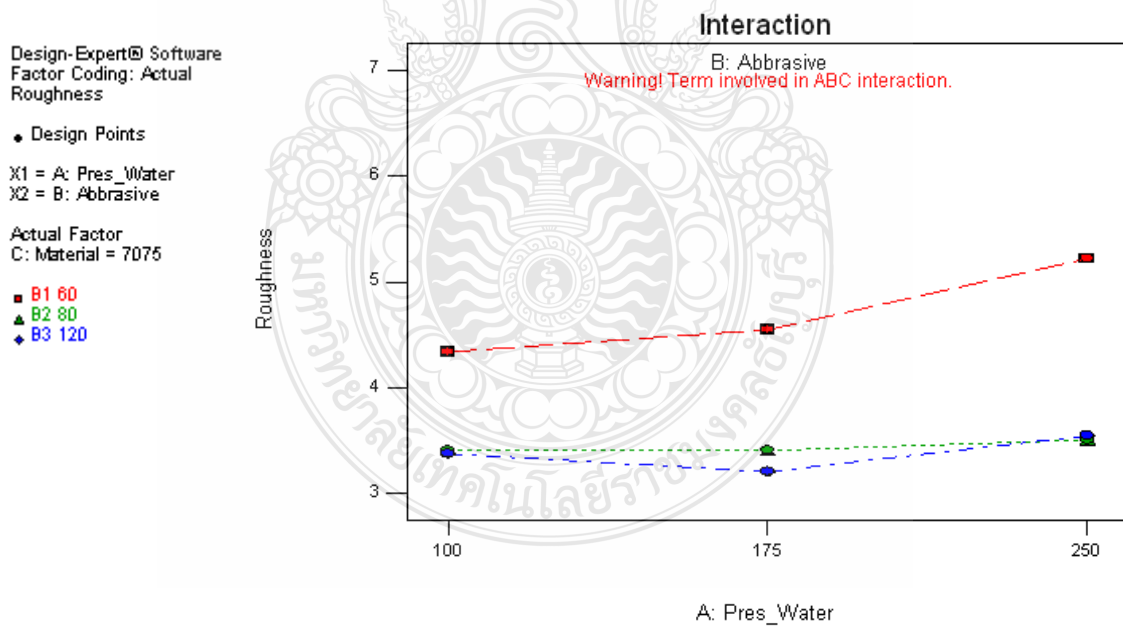
1) อิทธิพลของกิริยาร่วมระหว่างแรงดันน้ำ (ปัจจัย A) และขนาดของสารขัด (ปัจจัย B) ดังรูปที่ 4.9 รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA6061



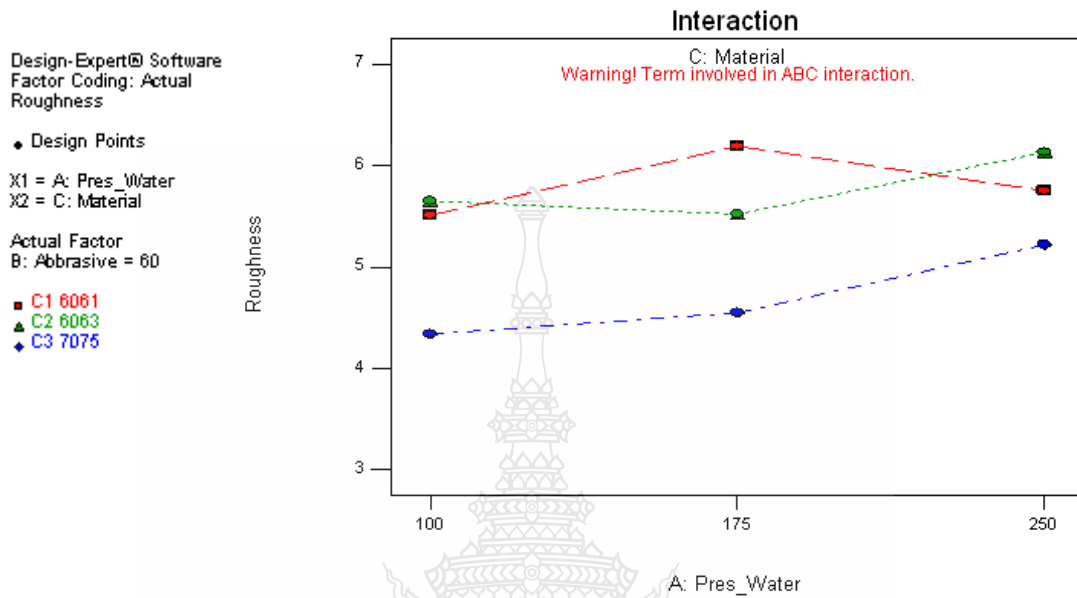
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA6063



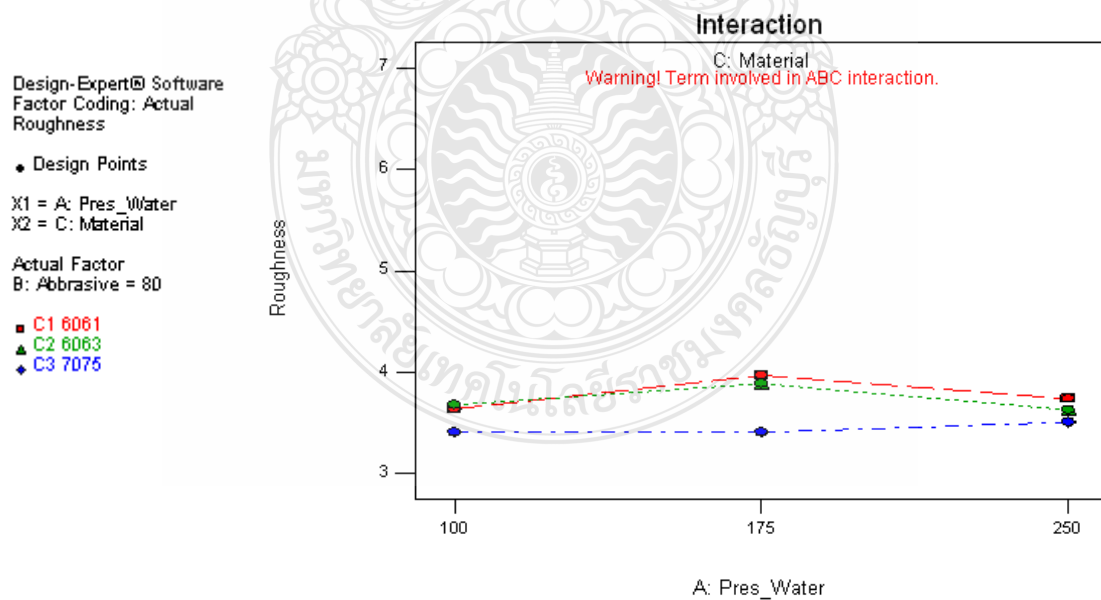
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA7075

2) อิทธิพลของกิริยาร่วมระหว่างแรงดันน้ำ (ปัจจัย A) และเกรดลูมิเนียม (ปัจจัย C)

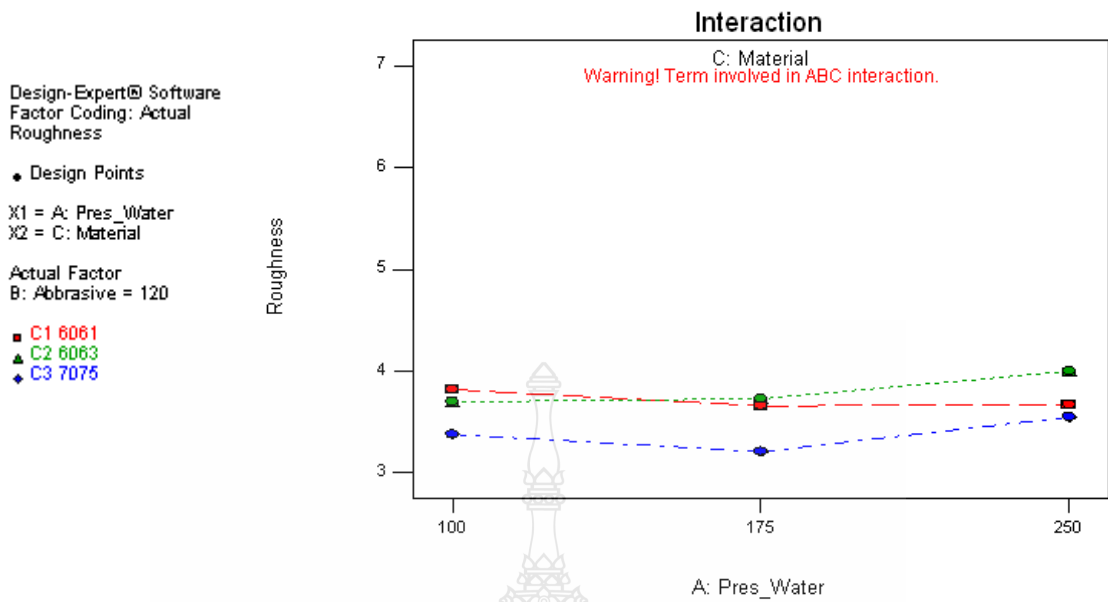
ดังรูปที่ 4.12 รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 60 Mesh

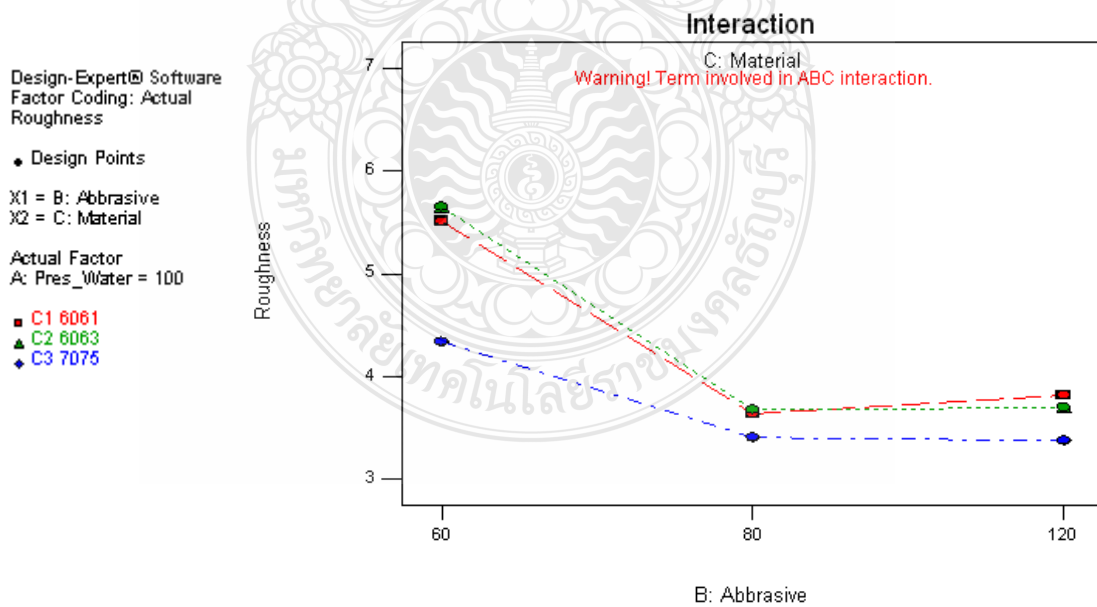


รูปที่ 4.13 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 80 Mesh

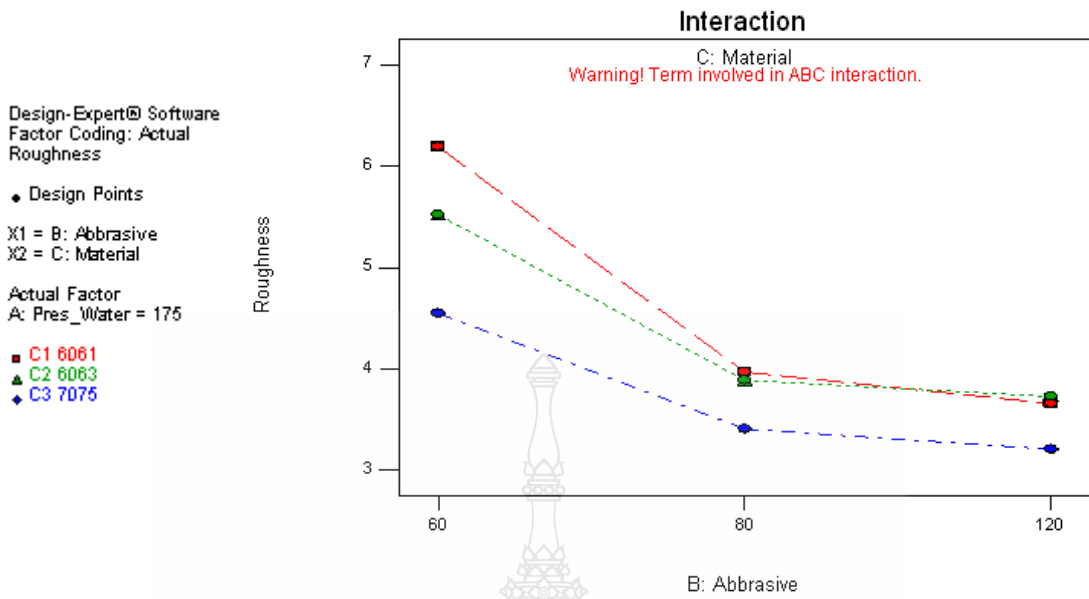


รูปที่ 4.14 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 120 Mesh

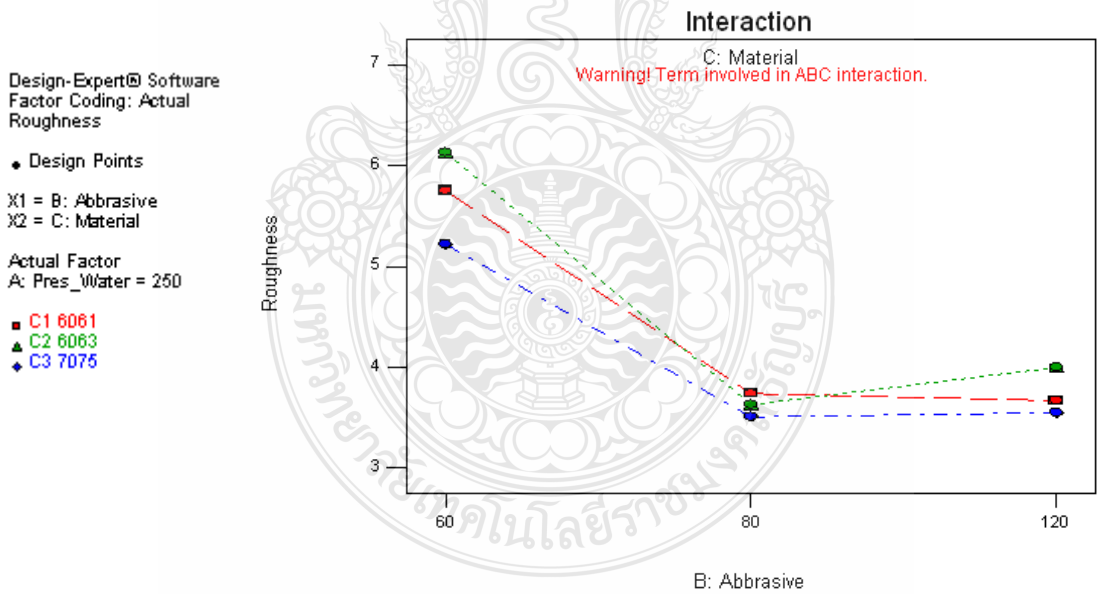
3) อิทธิพลของกิริยาร่วมระหว่างขนาดของสารขัด (ปัจจัย B) และเกรดอลูมิเนียม (ปัจจัย C) ดังรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 100 MPa



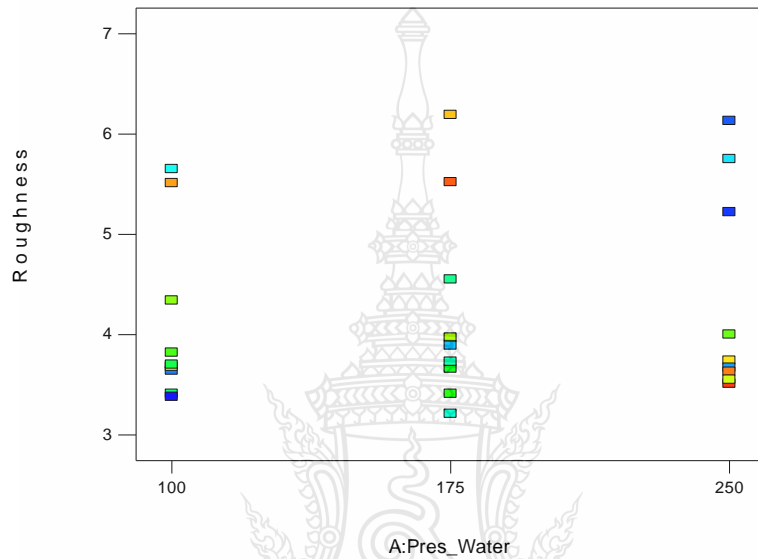
รูปที่ 4.16 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 175 MPa



รูปที่ 4.17 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 250 MPa

การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย โดยการนำข้อมูลมาเป็นสร้างแผนภูมิแสดงการกระจายของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับระดับของทุกปัจจัยทุกตัว ดังรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.20

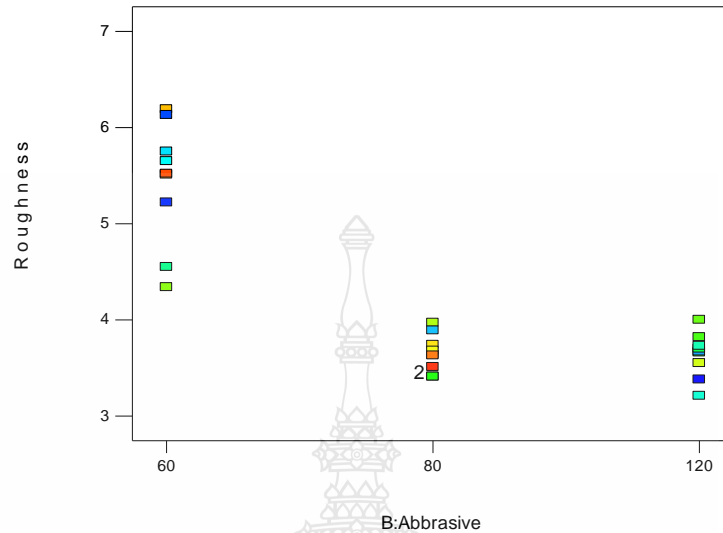
1) ส่วนตกค้างกับแรงดันน้ำ (ปัจจัย A)



รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับแรงดันน้ำในการตัดลูมิเนียม ผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด

จากรูปที่ 4.18 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) ของความเรียบผิว เทียบกับ แรงดันน้ำ 100 175 และ 250 MPa เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ ว่าค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียง

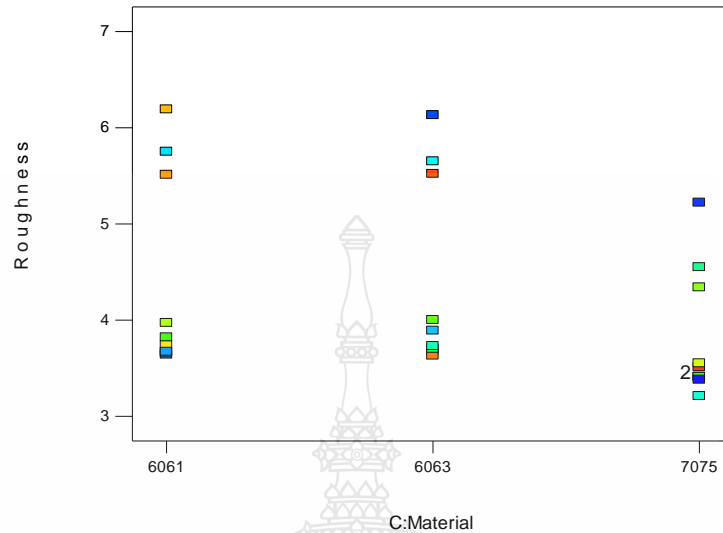
2) ส่วนตกค้างกับขนาดของสารขัด (ปัจจัย B)



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับขนาดของสารขัดในการตัดอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด

จากรูปที่ 4.19 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) ของความเรียบผิวเทียบกับ ขนาดของสารขัด 60 80 และ 120 Mesh เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียง

3) ส่วนตกค้างกับเกรดของอลูมิเนียม (ปัจจัย C)



รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับเกรดของอลูมิเนียม

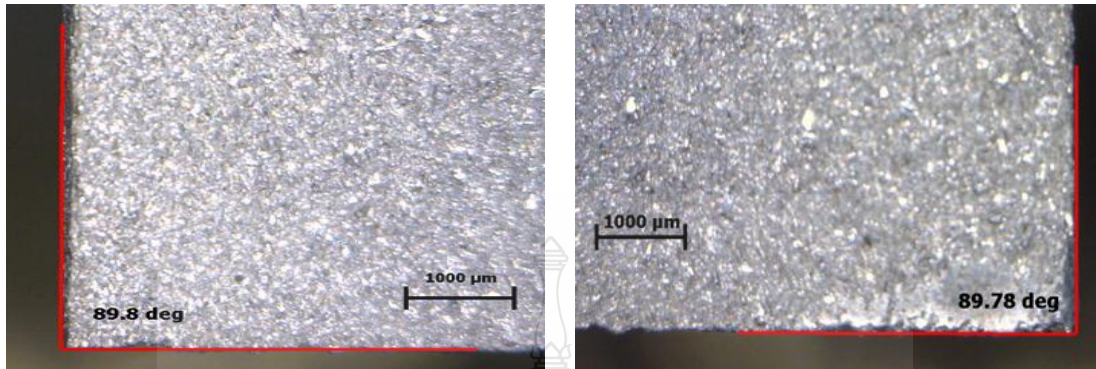
ในการตัดอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด

จากรูปที่ 4.20 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) ของความเรียบผิว เทียบกับ เกรดของอลูมิเนียม AA6061 AA6063 และ AA7075 เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายมีความสมมูลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียง

4.2 ผลการวิเคราะห์ความฉากของชิ้นงาน

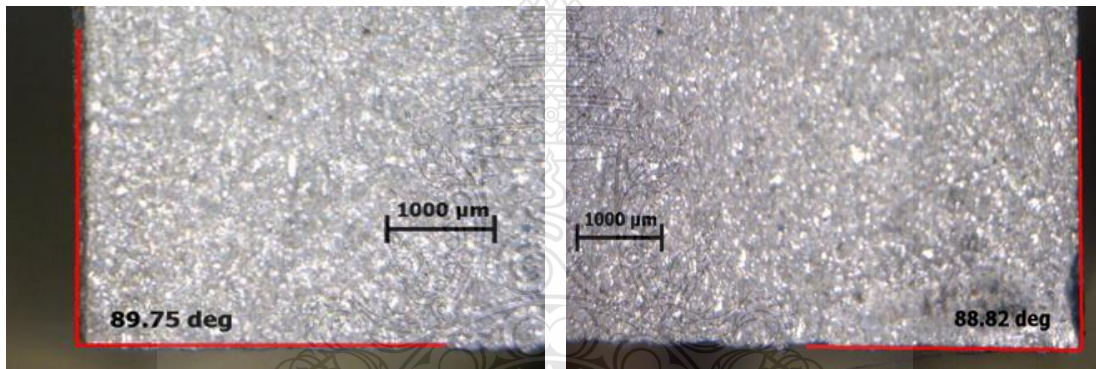
ในการวัดวิเคราะห์ค่าความฉากของชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร ในกระบวนการตัดด้วยเครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด ทำการวัดค่าความฉากของชิ้นงานที่ด้านซ้ายและด้านขวาของชิ้นงาน โดยการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวัดความฉากของชิ้นงาน มีผลการทดลองดังนี้

4.2.1 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 60 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



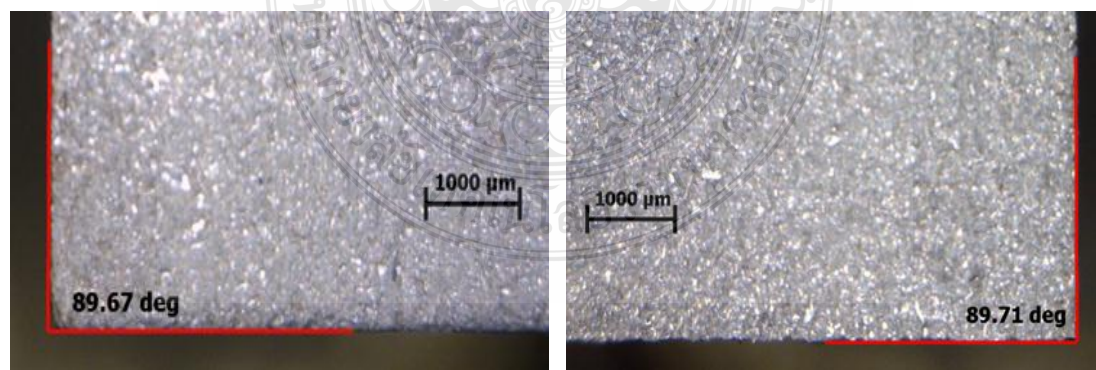
(ก) ความฉากด้านซ้าย AA6061

(ข) ความฉากด้านขวา AA6061



(ค) ความฉากด้านซ้าย AA6063

(ง) ความฉากด้านขวา AA6063



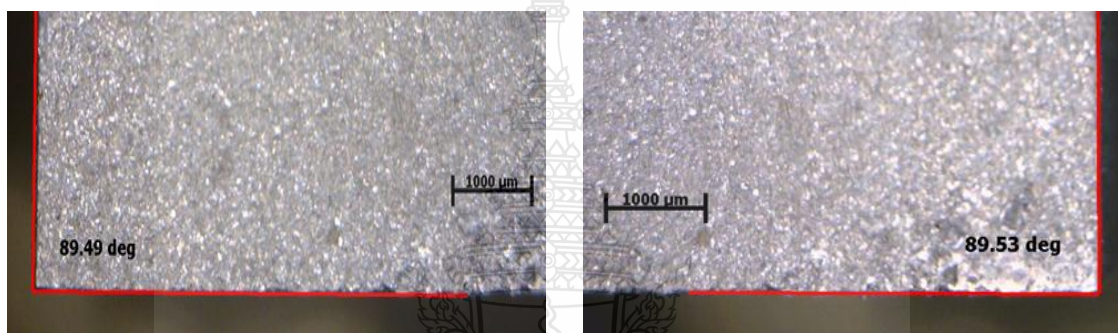
(จ) ความฉากด้านซ้าย AA7075

(ฉ) ความฉากด้านขวา AA7075

รูปที่ 4.21 การวัดค่าความฉากของชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 60 Mesh

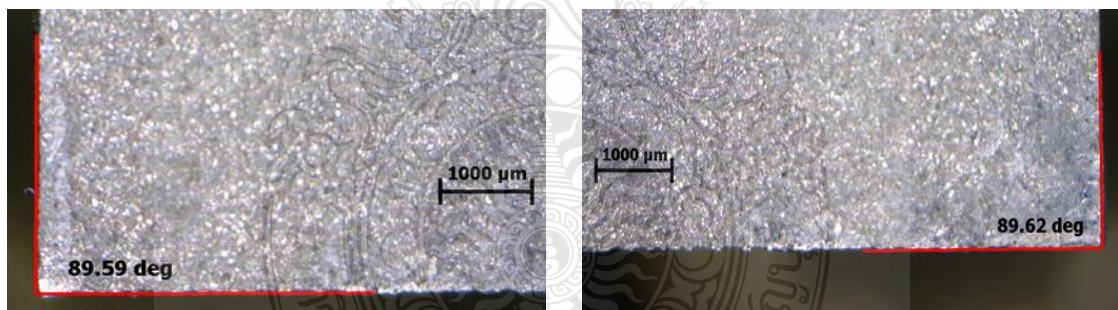
รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบค่าความฉากของชิ้นงาน ของแรงดันน้ำที่ 100 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 พบว่าอลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความฉากน้อยสุดเฉลี่ย 0.18 องศา ตามด้วยอลูมิเนียมเกรด AA6063 มีค่าความฉาก 0.21 องศา และ AA7075 มีค่าความฉาก 0.24 องศา ตามลำดับ และยังพบอีกว่าสถานะการตัดดังกล่าวนี้ ให้ค่าความฉากชิ้นงานอลูมิเนียมแตกต่างกันน้อยมาก และที่สำคัญทำให้ทราบว่า การตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด ทำให้ชิ้นงานด้านล่างมีขนาดใหญ่กว่าด้านบนเล็กน้อย

4.2.2 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 80 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



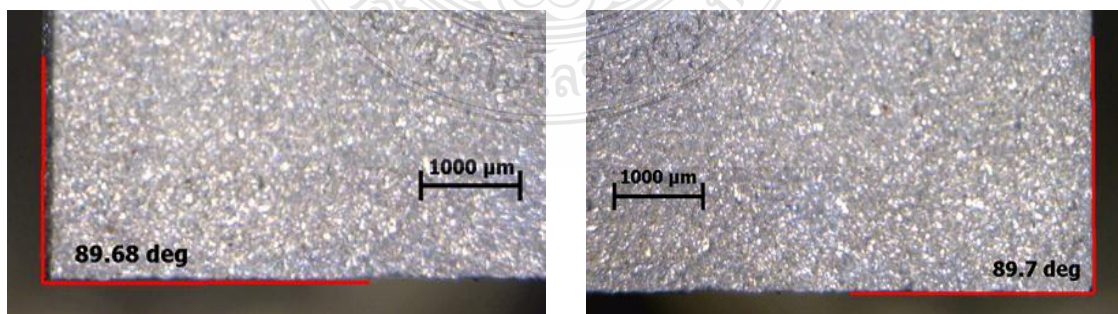
(ก) ความฉากด้านซ้าย AA6061

(ข) ความฉากด้านขวา AA6061



(ค) ความฉากด้านซ้าย AA6063

(ง) ความฉากด้านขวา AA6063



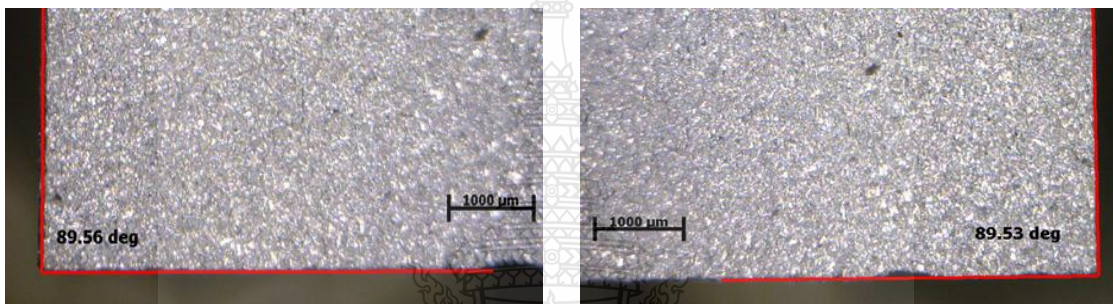
(จ) ความฉากด้านซ้าย AA7075

(ฉ) ความฉากด้านขวา AA7075

รูปที่ 4.22 การวัดค่าความฉากของชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 80 Mesh

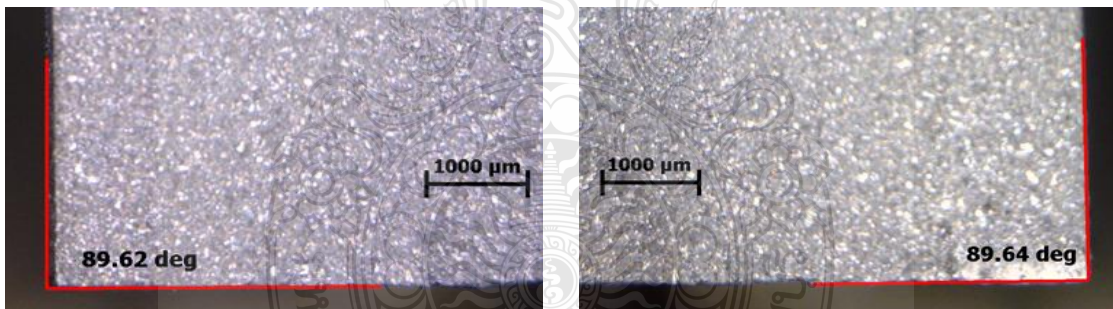
รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบค่าความฉากของชิ้นงานของแรงดันน้ำที่ 100 MPa ขนาดของสารขัด 80 Mesh วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 พบว่าอลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความฉากน้อยสุดเฉลี่ย 0.24 องศา ตามด้วยอลูมิเนียมเกรด AA6063 มีค่าความฉาก 0.25 องศา และ AA7075 มีค่าความฉาก 0.32 องศา หากเทียบกับสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh พบว่ามีแนวโน้มค่าความฉากของชิ้นงานสูงขึ้น อีกทั้งยังพบว่าสภาวะการตัดดังกล่าวนี้ ให้ค่าความฉากแตกต่างกันน้อยมาก และขนาดของชิ้นงานด้านล่างยังคงมีขนาดโตกว่าด้านบนเล็กน้อย

4.2.3 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 120 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



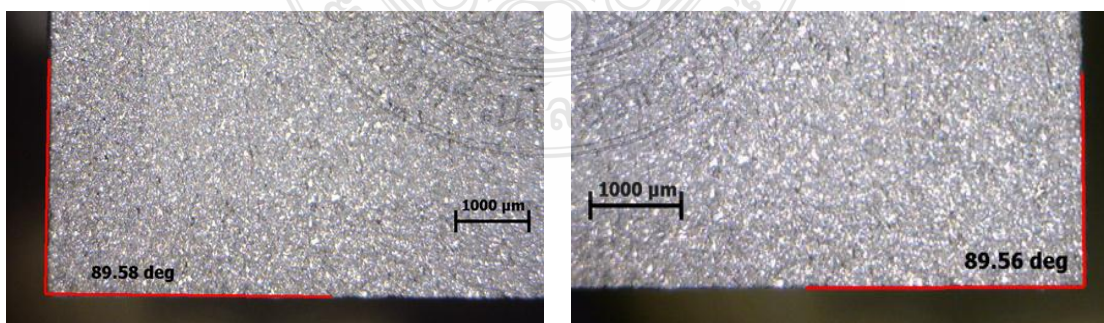
(ก) ความฉากด้านบนซ้าย AA6061

(ข) ความฉากด้านบนขวา AA6061



(ค) ความฉากด้านล่างซ้าย AA6063

(ง) ความฉากด้านล่างขวา AA6063

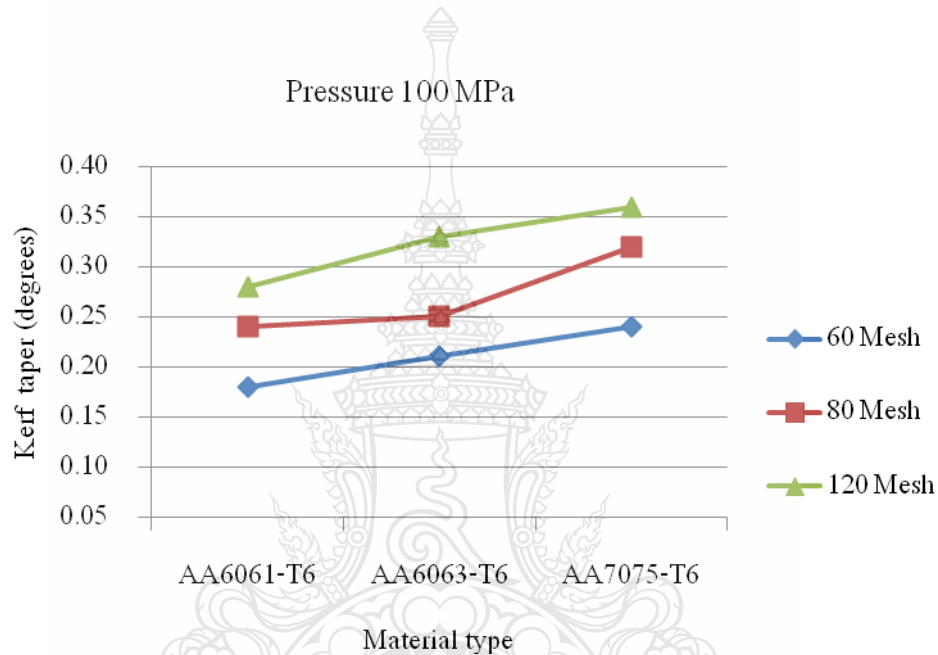


(จ) ความฉากด้านล่างซ้าย AA7075

(ฉ) ความฉากด้านล่างขวา AA7075

รูปที่ 4.23 การวัดค่าความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 120 Mesh

รูปที่ 4.23 แสดงผลการทดสอบความเป็นฉากของชิ้นงาน ในสภาวะแรงดันน้ำที่ 100 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร พบว่าอลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความฉากของชิ้นงานน้อยสุดเฉลี่ย 0.28 องศา ตามด้วยอลูมิเนียมเกรด AA6063 มีค่าความฉาก 0.33 องศา และ AA7075 มีค่าความฉาก 0.36 องศา และพบว่าเมื่อขนาดของสารขัดเล็กลงทำให้ค่าความฉากของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ส่วนชิ้นงานด้านล่างยังคงมีขนาดใหญ่กว่าด้านบนเพิ่มขึ้นอีกเนื่องมีมุมเอียงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น



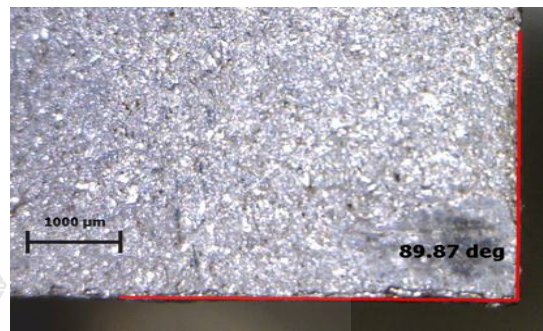
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่าความฉากของชิ้นงาน (Pressure 100 MPa)

รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบความเป็นฉากชิ้นงานที่ตัวแปรแรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดสารขัด 60, 80 และ 120 Mesh ตามลำดับ จากค่าความเป็นฉากของชิ้นงานที่พบ ขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความฉากของชิ้นงานต่ำสุด โดยเฉลี่ย ในการทดลองตัดอลูมิเนียมทั้ง 3 เกรด ส่วนขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh มีค่ามุมเอียงรอยตัดใกล้เคียงกันของอลูมิเนียมทั้ง 3 เกรด ซึ่งเกิดจากขนาดและรูปร่างของสารขัดขนาด 60 Mesh มีขนาดใหญ่กว่า 80 และ 120 Mesh มีผลทำให้การแตกตัวหลังจากการกระทบกับชิ้นงานในขณะตัด แตกตัวได้ช้ากว่าขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh

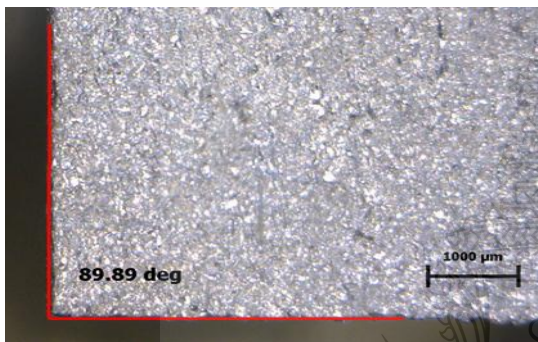
4.2.4 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



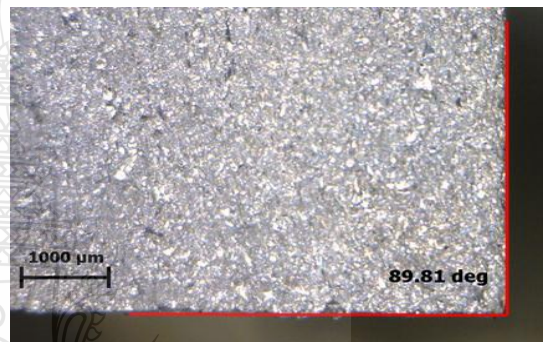
(ก) ความฉากด้านซ้าย AA6061



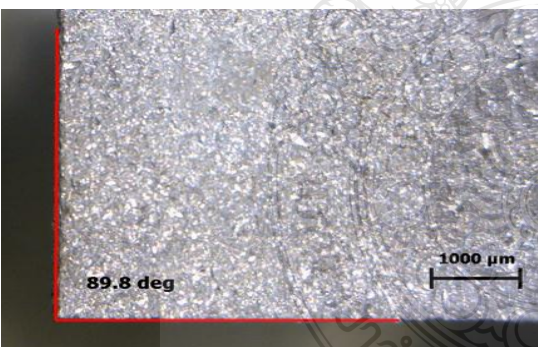
(ข) ความฉากด้านขวา AA6061



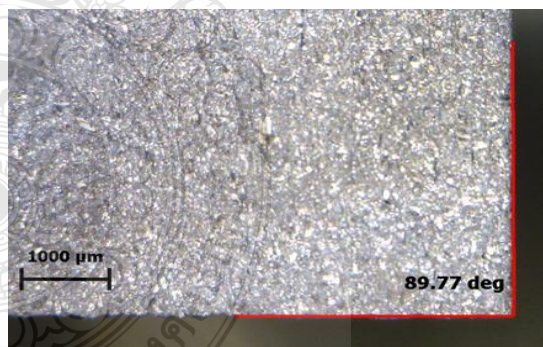
(ค) ความฉากด้านซ้าย AA6063



(ง) ความฉากด้านขวา AA6063



(จ) ความฉากด้านซ้าย AA7075



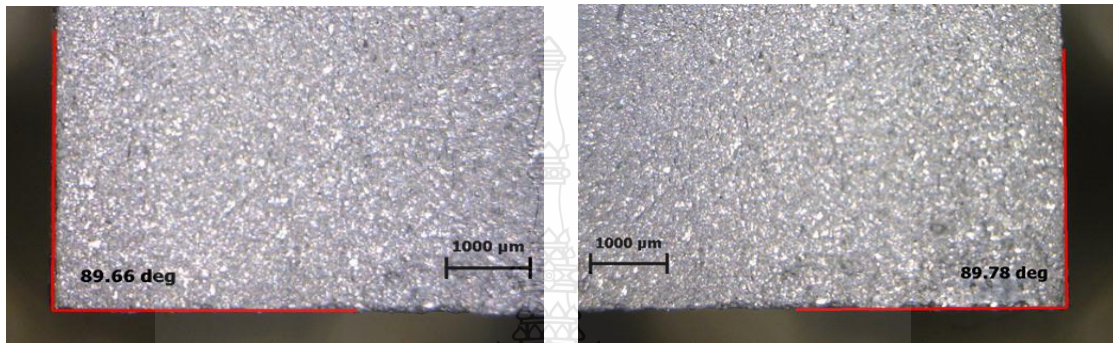
(ฉ) ความฉากด้านขวา AA7075

รูปที่ 4.25 การวัดค่าความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดสารขัด 60 Mesh

รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบความเป็นฉากของชิ้นงานของสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 พบว่าอลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความฉากน้อยสุดเฉลี่ย 0.19 องศา ตามด้วยอลูมิเนียม

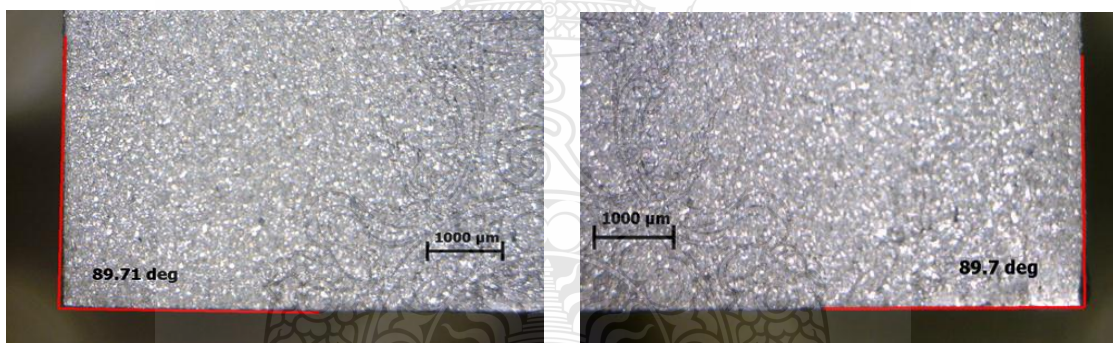
เกรด AA6063 มีความเป็นฉากของชิ้นงานเฉลี่ย 0.20 องศา และ AA7075 เฉลี่ย 0.22 องศา หากเปรียบเทียบกับสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 100 MPa ยังถือว่าไม่แตกต่างกันมากนัก จึงสามารถอธิบายได้ว่าแรงดันน้ำ 100 และ 175 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงานใกล้เคียงกัน และขนาดของชิ้นงานด้านล่างยังคงมีขนาดใหญ่กว่าด้านบนเหมือนกัน

4.2.5 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 80 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



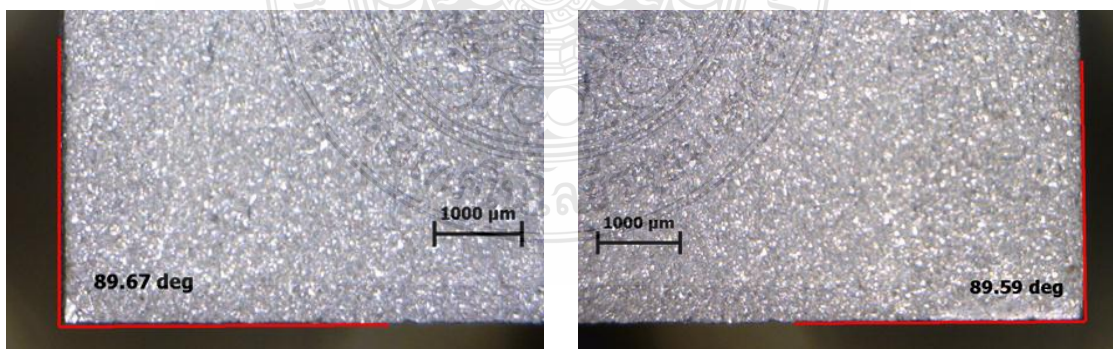
(ก) ความฉากด้านบนซ้าย AA6061

(ข) ความฉากด้านล่างขวา AA6061



(ค) ความฉากด้านบนซ้าย AA6063

(ง) ความฉากด้านล่างขวา AA6063



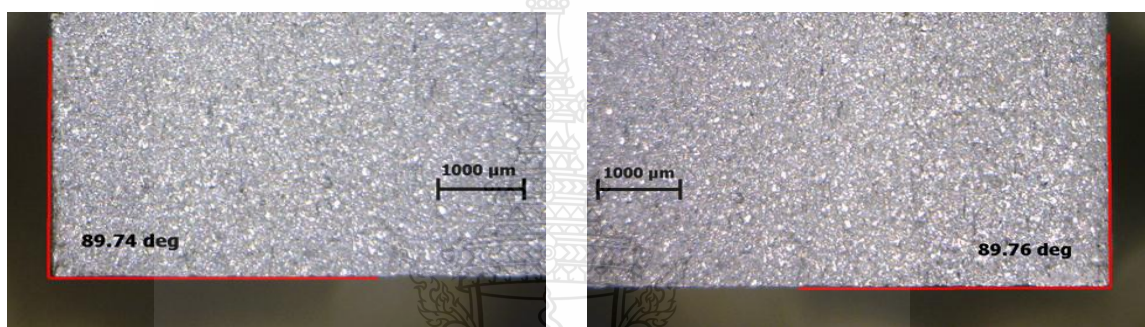
(จ) ความฉากด้านบนซ้าย AA7075

(ฉ) ความฉากด้านล่างขวา AA7075

รูปที่ 4.26 การวัดค่าความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดสารขัด 80 Mesh

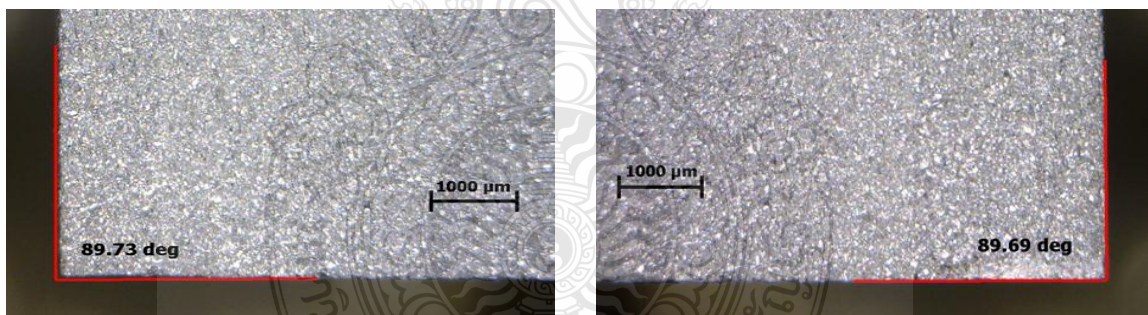
ผลการทดสอบความเป็นฉากของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.26 ที่ 175 MPa ขนาดของสารขัด 80 Mesh จากการทดลองพบว่า อลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความเป็นฉากดีที่สุดเฉลี่ย 0.22 องศา ตามด้วยอลูมิเนียมเกรด AA6063 เฉลี่ย 0.26 องศา และ AA7075 เฉลี่ย 0.27 องศา หากพิจารณากับขนาดของสารขัด 60 Mesh มีลักษณะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสภาวะการตัดนี้มีแนวโน้มค่าความเป็นฉากชิ้นงานลดลง หากเปรียบเทียบกับสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 100 MPa ขนาดของสารขัด 80 Mesh ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า แรงดันน้ำมีอิทธิพลต่อความเป็นฉากของชิ้นงานโดยตรง และยังสามารถสรุปได้ อีกว่าเมื่อแรงดันน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความฉากของชิ้นงานลดลง

4.2.6 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



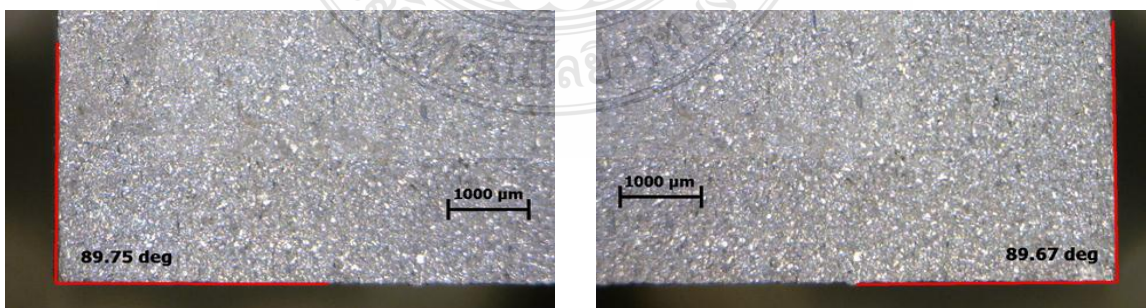
(ก) ความฉากด้านซ้าย AA6061

(ข) ความฉากด้านขวา AA6061



(ค) ความฉากด้านซ้าย AA6061

(ง) ความฉากด้านขวา AA6061

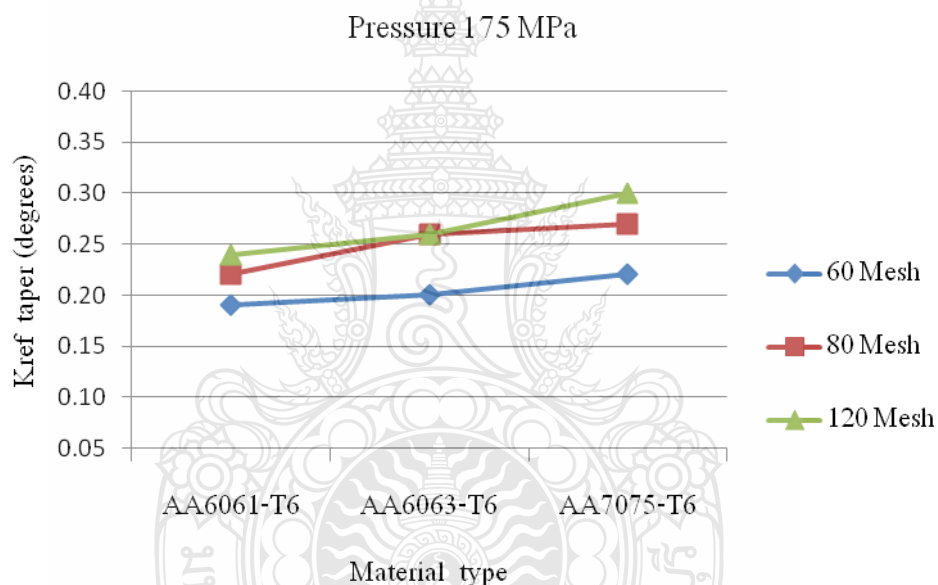


(จ) ความฉากด้านซ้าย AA6061

(ฉ) ความฉากด้านขวา AA6061

รูปที่ 4.27 การวัดค่าความฉากของชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดสารขัด 120 Mesh

รูปที่ 4.27 แสดงผลการทดสอบความฉากของชิ้นงานของแรงดันน้ำที่ 175 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh พบว่า อลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความฉากดีที่สุดเฉลี่ย 0.24 องศา ตามด้วย อลูมิเนียมเกรด AA6063 เฉลี่ย 0.26 องศา และ AA7075 เฉลี่ย 0.30 องศา ตามลำดับ สภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh นี้ หากพิจารณาจากขนาดของสารขัด ก็จะพบว่าขนาด 120 Mesh มีค่าความฉากสูงกว่า 60 และ 80 Mesh เกือบทุกสภาวะการทดลอง และหากเปรียบเทียบกับแรงดันน้ำ 100 MPa มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นในขณะที่ขนาดของสารขัดเล็กกลงจะทำให้ค่าความฉากน้อยตาม และขนาดของชิ้นงานด้านล่างก็ยังคงมีขนาดใหญ่กว่าด้านบน

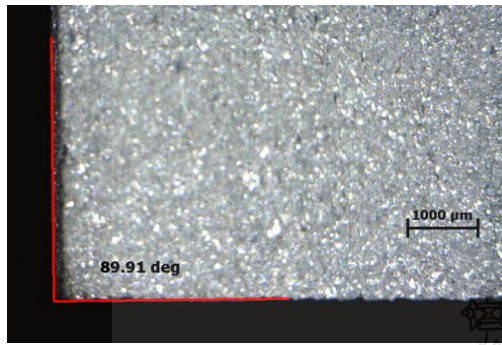


รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าความฉากของชิ้นงาน (Pressure 175 MPa)

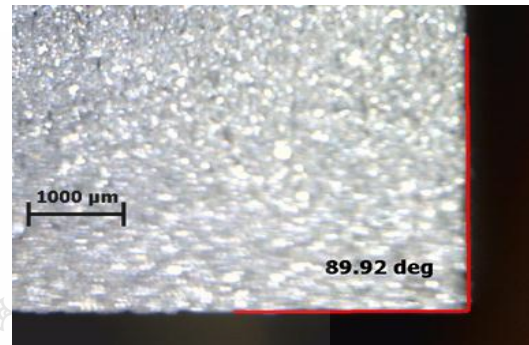
จากรูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบค่าความฉากของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 60, 80 และ 120 Mesh วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความฉากชิ้นงานดีกว่าขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh อย่างเห็นได้ชัด และมีแนวโน้มความฉากดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปกราฟที่ 4.12 และขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh ยังคงมีความเป็นฉากใกล้เคียงกัน คาดว่าสาเหตุที่ขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความฉากของชิ้นงานดีกว่าสารขัดขนาดอื่นๆ เป็นสาเหตุมาจากรูปร่างและขนาดที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้การแตกตัวหลังจากการกระทบกับชิ้นงาน

ในขณะที่ตัดหรือเสียดสีกับชิ้นงาน ทำให้แตกตัวได้ช้ากว่าขนาดของสารขัดอื่น แต่ขนาดของสารขัด 80 และ 120 มีขนาดเล็กตามลำดับ แตกตัวเร็วในขณะที่ตัดหรือในขณะที่เสียดสีกับชิ้นงานทำให้ขนาดของชิ้นงานไม่คงที่ เป็นสาเหตุทำให้มีความเอียงของชิ้นงานเกิดขึ้น

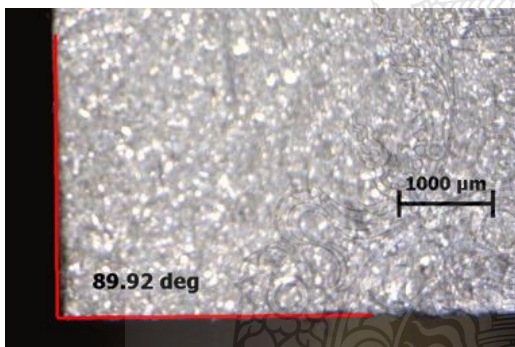
4.2.7 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



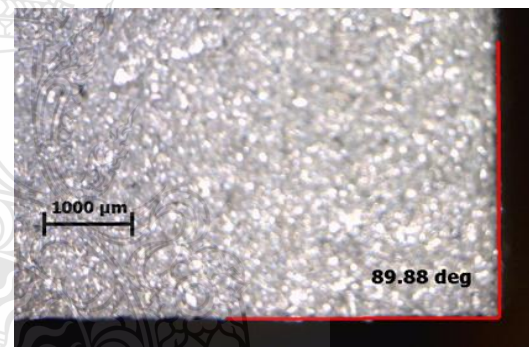
(ก) ความฉากด้านซ้าย AA6061



(ข) ความฉากด้านขวา AA6061



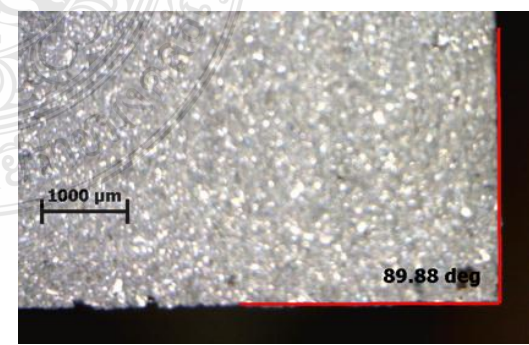
(ค) ความฉากด้านซ้าย AA6063



(ง) ความฉากด้านขวา AA6063



(จ) ความฉากด้านซ้าย AA7075

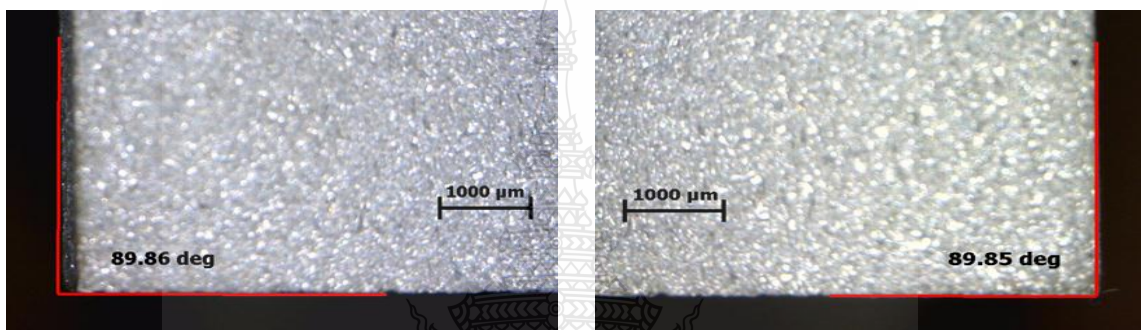


(ฉ) ความฉากด้านขวา AA7075

รูปที่ 4.29 การวัดความฉากของชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดสารขัด 60 Mesh

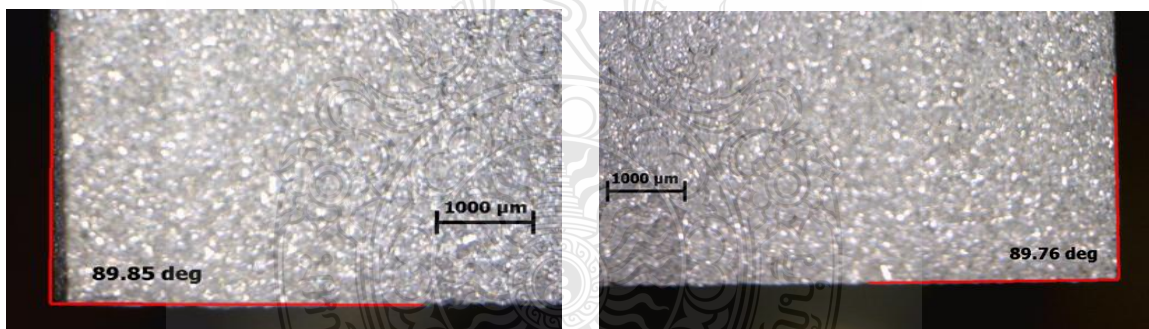
ผลการทดสอบความเป็นฉากของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.29 แสดงผลการทดสอบที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh พบว่า อลูมิเนียมเกรด AA6061 และ AA6063 ให้ค่าความฉากของชิ้นงานดีที่สุดเฉลี่ย 0.10 องศา และ 0.11 องศาตามลำดับ อลูมิเนียมเกรด AA7075 ในสภาวะการตัดนี้มีค่าความฉากเฉลี่ย 0.19 องศา การตัดอลูมิเนียมผสมด้วยสภาวะที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh มีแนวโน้มค่าความฉากของชิ้นงานดีขึ้น หากเปรียบเทียบกับสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำ 100 และ 175 MPa

4.2.8 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 80 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



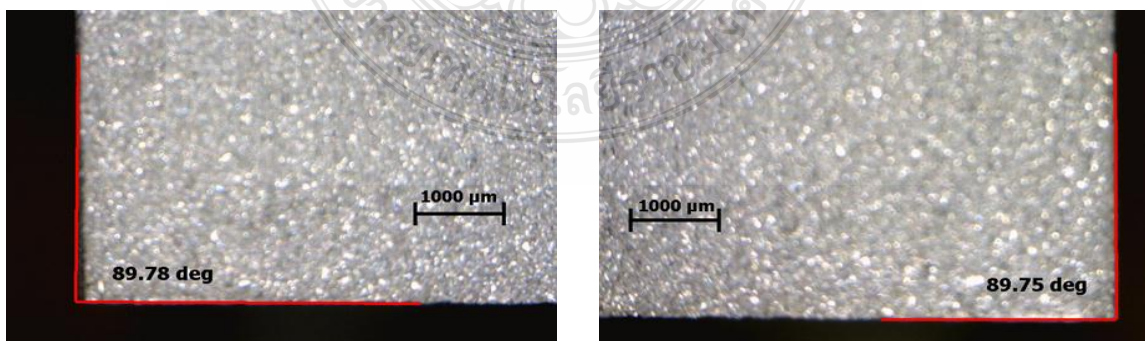
(ก) ความฉากด้านซ้าย AA6061

(ข) ความฉากด้านขวา AA6061



(ค) ความฉากด้านซ้าย AA6061

(ง) ความฉากด้านขวา AA6061



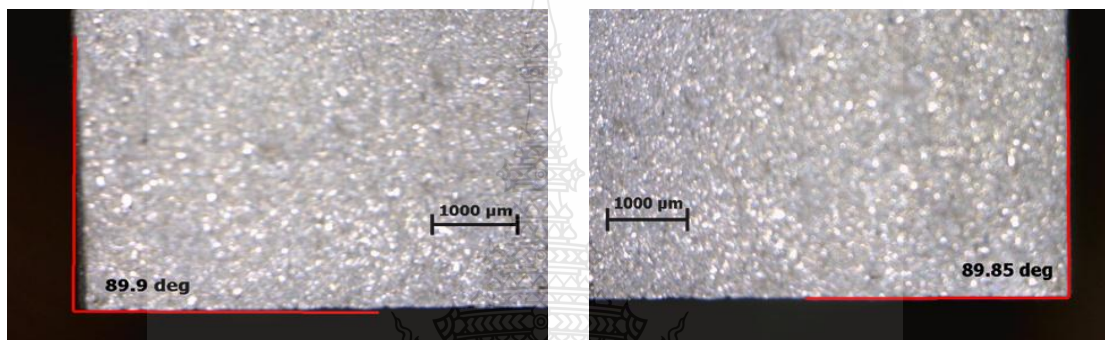
(จ) ความฉากด้านซ้าย AA6061

(ฉ) ความฉากด้านขวา AA6061

รูปที่ 4.30 การวัดค่าความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดสารขัด 80 Mesh

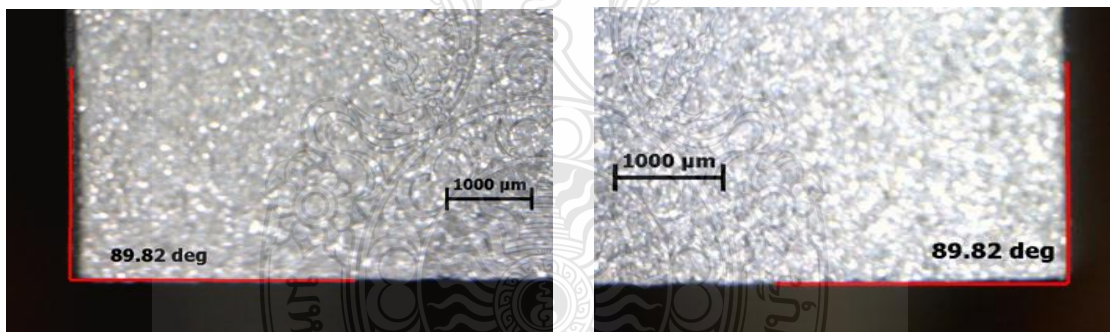
รูปที่ 4.30 แสดงผลการทดสอบค่าความฉากของชิ้นงานจากการตัดด้วยแรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 80 Mesh พบว่า อลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความฉากดีสุดเฉลี่ย 0.14 องศา ตามด้วยอลูมิเนียมเกรด AA6063 เฉลี่ย 0.17 องศา และ AA7075 เฉลี่ย 0.21 องศา แต่หากเปรียบเทียบกับขนาดสารขัด 60 Mesh จะสังเกตเห็นว่ามีค่าความฉากของชิ้นงานน้อยกว่า จึงสามารถอธิบายได้ว่าขนาดของสารขัดเล็กลงทำให้ค่าความฉากของชิ้นงานน้อยกว่าขนาดของสารขัดที่มีขนาดใหญ่ และขนาดของชิ้นงานด้านล่างยังคงมีขนาดโตกว่าด้านบน

4.2.9 อิทธิพลของแรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh ที่มีผลต่อค่าความฉาก



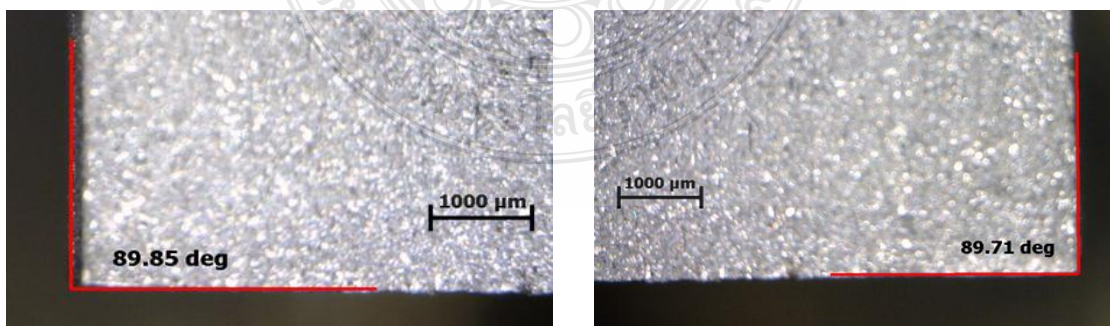
(ก) ความฉากด้านบนซ้าย AA6061

(ข) ความฉากด้านล่างขวา AA6061



(ค) ความฉากด้านบนซ้าย AA6061

(ง) ความฉากด้านล่างขวา AA6061

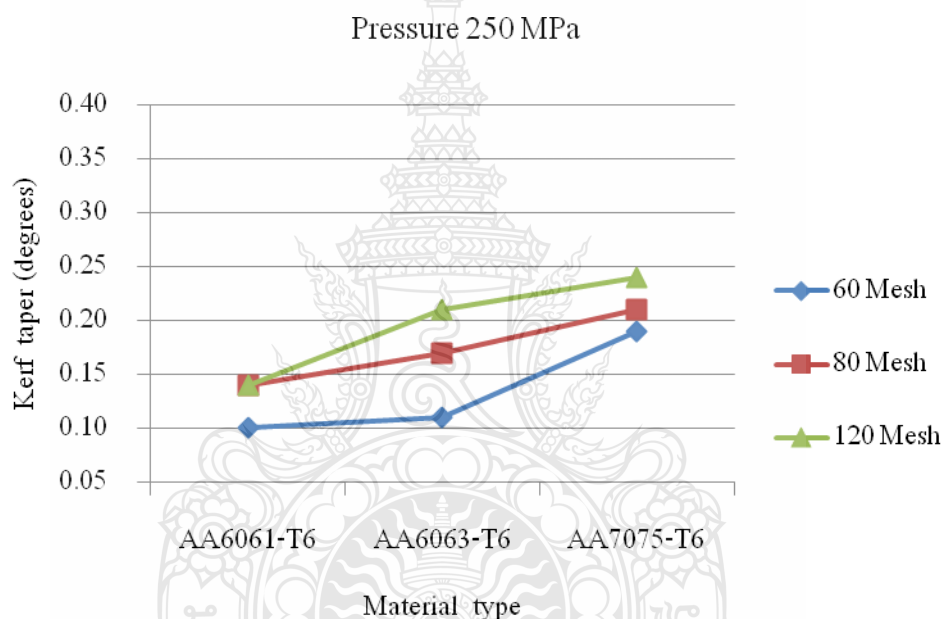


(จ) ความฉากด้านบนซ้าย AA6061 (ฉ)

(ฉ) ความฉากด้านล่างขวา AA6061

รูปที่ 4.31 การวัดค่าความฉากชิ้นงานที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดสารขัด 120 Mesh

ผลการทดสอบความเป็นฉากของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.31 ที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 พบว่าอลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความเป็นฉากของชิ้นงานดีสุดเฉลี่ย 0.14 องศา ตามด้วยอลูมิเนียมเกรด AA6063 เฉลี่ย 0.21 องศา และอลูมิเนียมเกรด AA7075 เฉลี่ย 0.24 องศา จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นว่าโดยส่วนใหญ่แล้วอลูมิเนียมเกรด AA6061 มีค่าความฉากค่อนข้างดีกว่าอลูมิเนียมเกรดอื่น ตามด้วยอลูมิเนียมเกรด AA6063 และ AA7075 ตามลำดับ สาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจากสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน การตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด ยังคงทำให้ชิ้นงานด้านล่างมีขนาดใหญ่กว่าด้านบนเหมือนกับการตัดในสภาวะอื่นๆ



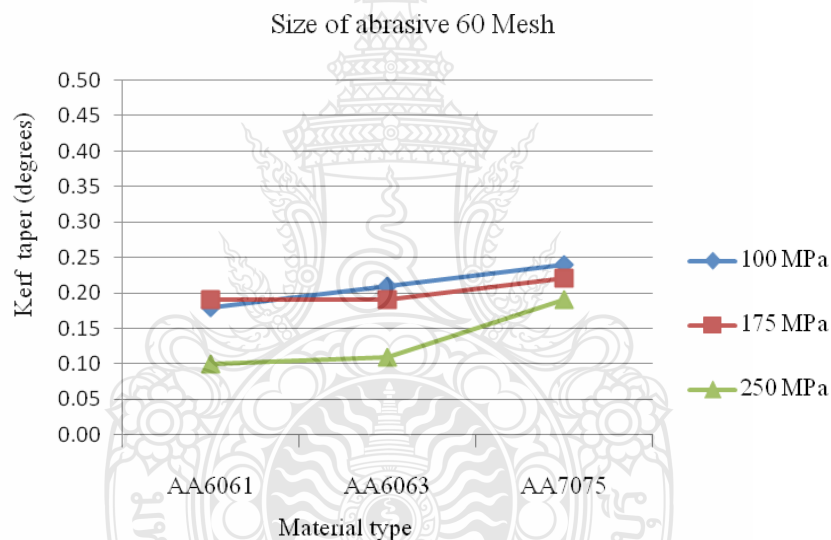
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบความฉากของชิ้นงาน (Pressure 250 MPa)

จากรูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบความเป็นฉากของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารขัด 60, 80 และ 120 Mesh วัสดุอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, AA6063 และ AA7075 ที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร จากกราฟเปรียบเทียบความเป็นฉากของชิ้นงาน จะสังเกตเห็นว่าขนาดของสารขัด 60 Mesh ยังคงให้ค่าความเป็นฉากของชิ้นงานดีกว่าขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh อย่างเห็นได้ชัด ความเป็นฉากของชิ้นงานจะดีขึ้นเมื่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นในขณะที่ขนาดของสารขัดโตขึ้น ส่วนขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh ยังคงมีความเป็นฉากแตกต่างกันเล็กน้อย คาดว่าสาเหตุที่ขนาดของสารขัด 60 Mesh ยังคงให้ค่าความเป็นฉากของชิ้นงานดีกว่าสารขัดขนาดอื่นๆ เป็นสาเหตุมาจากรูปร่างและขนาดของสารขัดที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้การแตกตัวหลังจากการกระทบกับชิ้นงาน

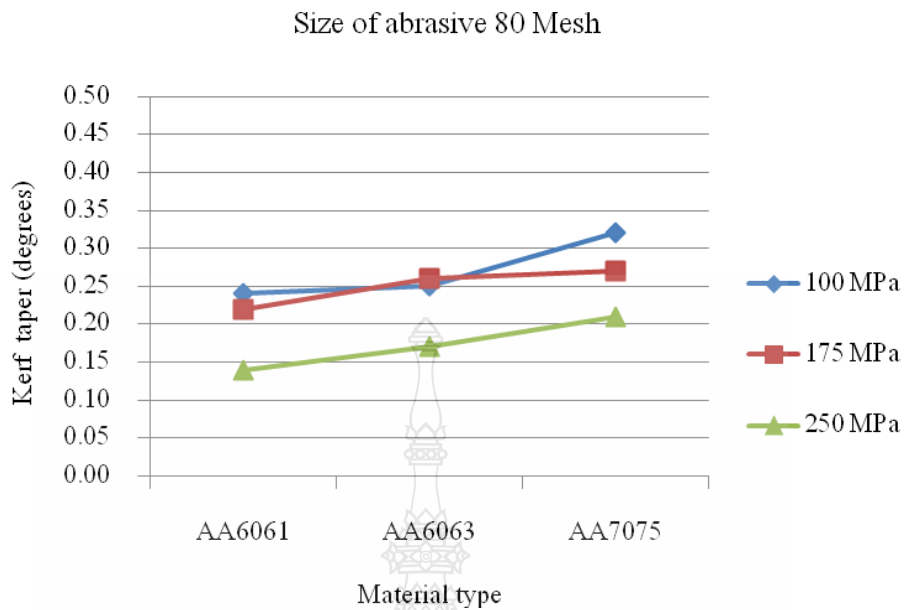
ในขณะที่ตัดหรือเสียดสีกับชิ้นงาน ทำให้แตกตัวได้ช้ากว่าขนาดของสารขัดอื่น แต่ขนาดของสารขัด 80 และ 120 มีขนาดเล็กกว่าเกิดการแตกตัวเร็วในขณะที่ตัดหรือในขณะที่เสียดสีกับชิ้นงานทำให้ขนาดของชิ้นงานไม่คงที่

4.2.10 อิทธิพลขนาดของสารขัด 60 80 และ 120 Mesh ที่มีผลต่อความฉากของชิ้นงาน

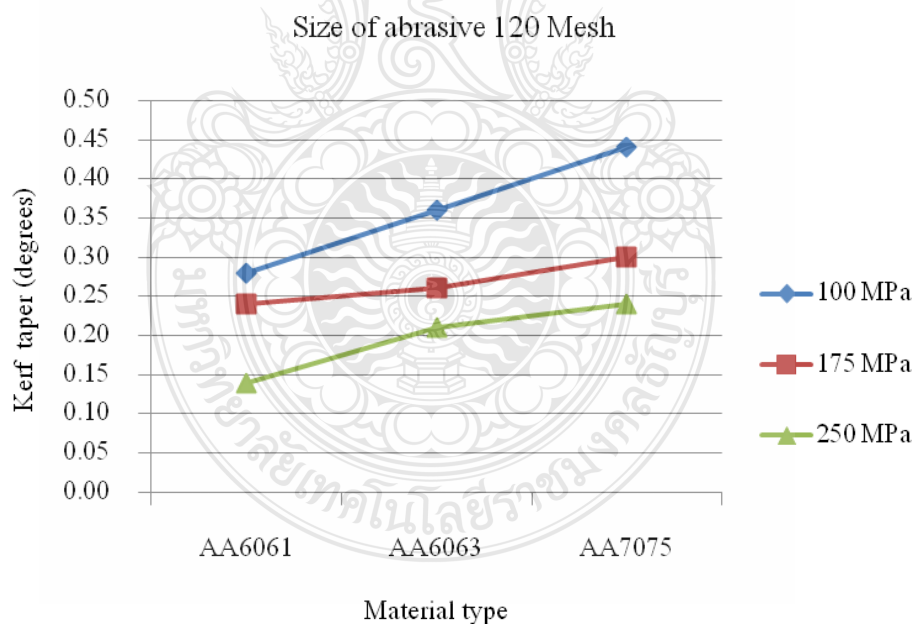
จากการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยกราฟที่ 4.27 ถึง 4.29 แสดงความฉากเฉลี่ยของชิ้นงานหลักจากการทดลองตัด ของแรงดันน้ำ 100 175 และ 250 MPa ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลเพียงด้านเดียว ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบข้อมูลด้านขนาดของสารขัดที่มีอิทธิพลต่อความฉากของชิ้นงาน เพื่อที่จะสามารถอธิบายผลการทดลองได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แสดงรายละเอียดดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบความฉากของชิ้น (ขนาดสารขัด 60 Mesh)



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความฉากของชิ้น (ขนาดสารขัด 80 Mesh)



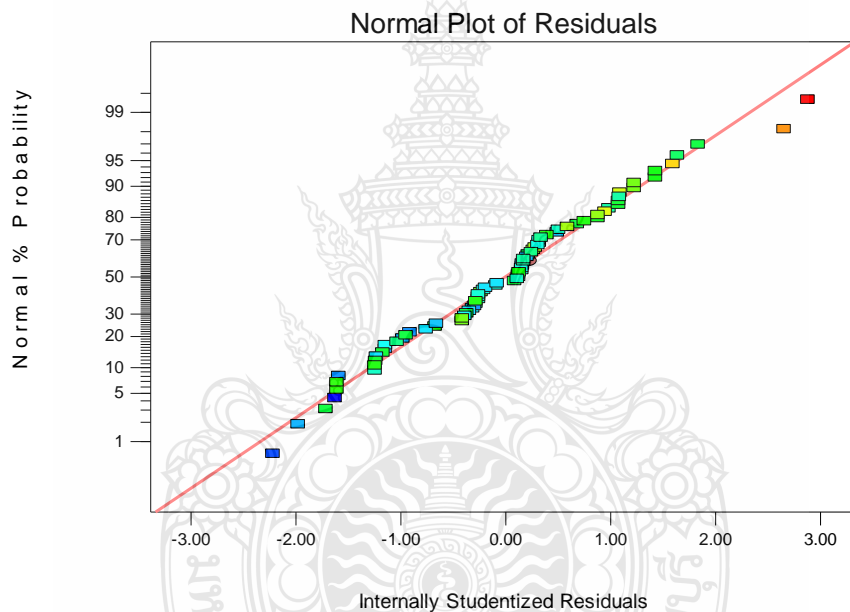
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความฉากของชิ้น (ขนาดสารขัด 120 Mesh)

จากกราฟที่ 4.33 – 4.35 แสดงการเปรียบเทียบค่าความฉากของชิ้นงาน ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลด้านขนาดของสารขัดเป็นปัจจัยหลัก ซึ่งกราฟทั้ง 3 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะ

พบว่า ขนาดของสารขั้วที่มีขนาดใหญ่ ทำให้มีค่าความฉากดีกว่าขนาดของสารขั้วที่มีขนาดเล็ก ในการทดลองนี้ใช้สารขั้วขนาด 60 80 และ 120 Mesh ซึ่งขนาดของสารขั้ว 60 Mesh จะมีขนาดใหญ่กว่าสารขั้วตัวอื่น หากพิจารณาในด้านแรงดันน้ำจะพบว่า เมื่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น ค่าความฉากของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม

4.2.11 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติเป็นการตรวจสอบส่วนที่ตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ ซึ่งจากรูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นว่าเส้นตรงไม่แสดงถึงผิดปกติให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความพอเพียง



รูปที่ 4.36 Normal Probability Plot ต่อมุมเอียงรอยตัด

การวิเคราะห์ ANOVA โดยการอ่านค่า P-Value ที่ได้จากราย ANOVA ว่าค่า P-Value ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ปัจจัยใดที่มีค่าน้อยกว่าค่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัด หรือหากมากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัด ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ว่าการตัดลุมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขั้วด้วยปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะพิจารณาจากค่า P-Value ดังแสดงผลดังรูปที่ 4.37

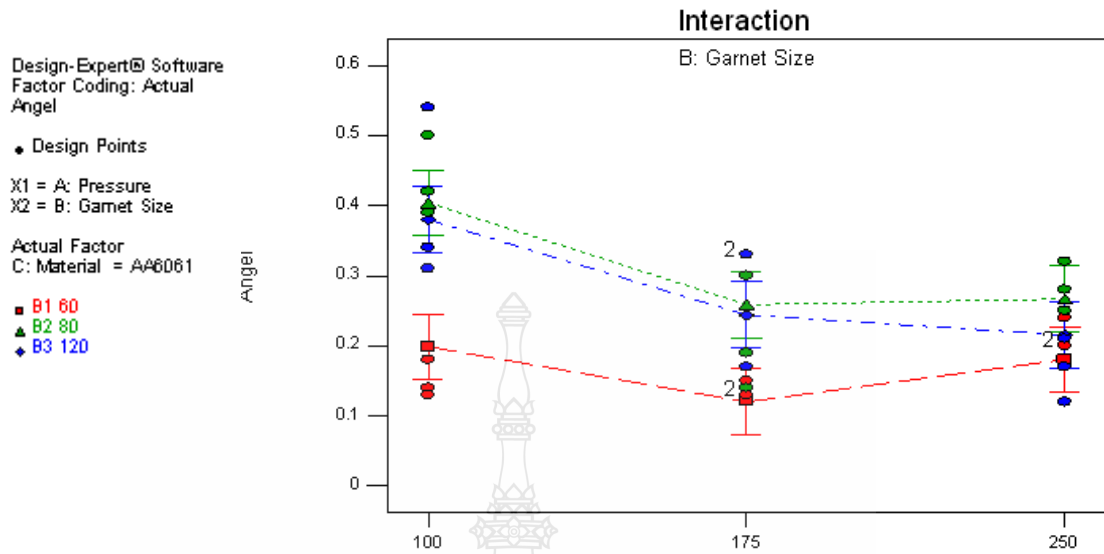
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	0.67	18	0.037	7.86	<0.0001
A-Pressure	0.28	2	0.14	29.59	<0.0001
B-Gamet Size	0.27	2	0.13	28.20	<0.0001
C-Material	0.025	2	0.012	2.60	0.0824
AB	0.056	4	0.014	2.98	0.0259
AC	0.034	4	8.463E-003	1.79	0.1420
BC	8.030E-003	4	2.007E-003	0.42	0.7901
Residual	0.29	62	4.725E-003		
Lack of Fit	0.078	8	9.722E-003	2.44	0.0249
Pure Error	0.22	54	3.985E-003		
Cor Total	0.96	80			

รูปที่ 4.37 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

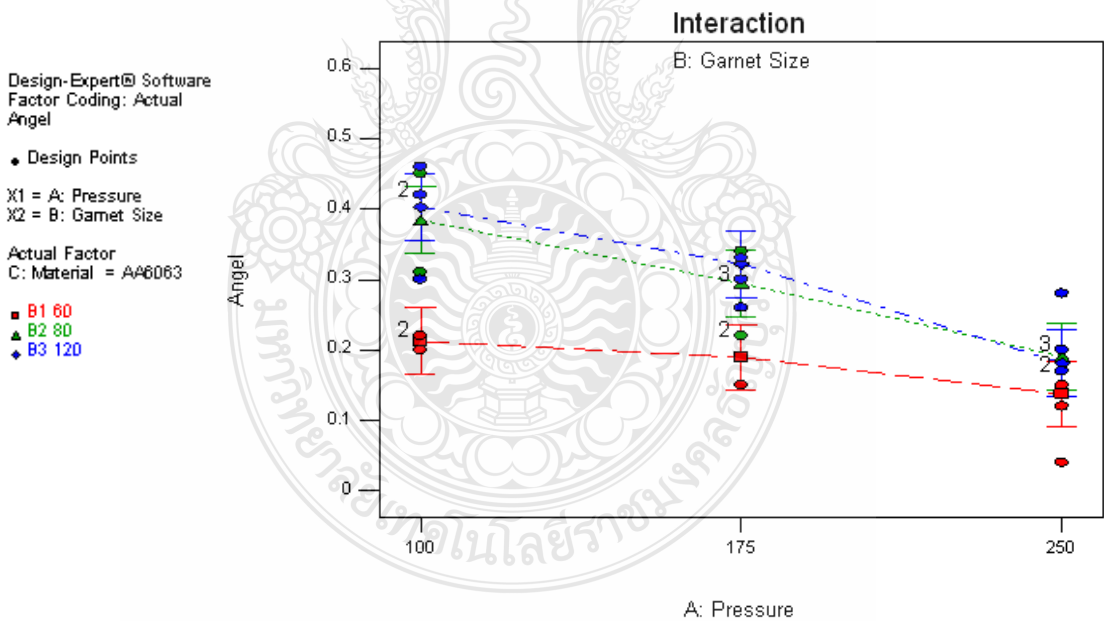
จากรูปที่ 4.37 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง โดยกำหนดให้ปัจจัย A คือ แรงดันน้ำที่หัวตัด B คือ ขนาดของสารขัดและ C คือเกรดอลูมิเนียม จากผลการทดสอบพบว่า มี 2 ปัจจัย ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ปัจจัย A และปัจจัย B แสดงว่าทั้ง 2 ปัจจัยนี้ มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัดรอยตัด และอันตรกิริยาของแรงดันน้ำที่หัวตัด (ปัจจัย A) และขนาดของสารขัด (ปัจจัย B) มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัด ส่วนค่า P-Value ของเกรดอลูมิเนียมมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีอิทธิพลต่อมุมเอียง รอยตัด และหากนำปัจจัยทั้ง 3 มาวิเคราะห์ร่วมกันจะพบว่าไม่มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัดทั้งสิ้น

4.2.12 ทดสอบอิทธิพลของกิริยาร่วม

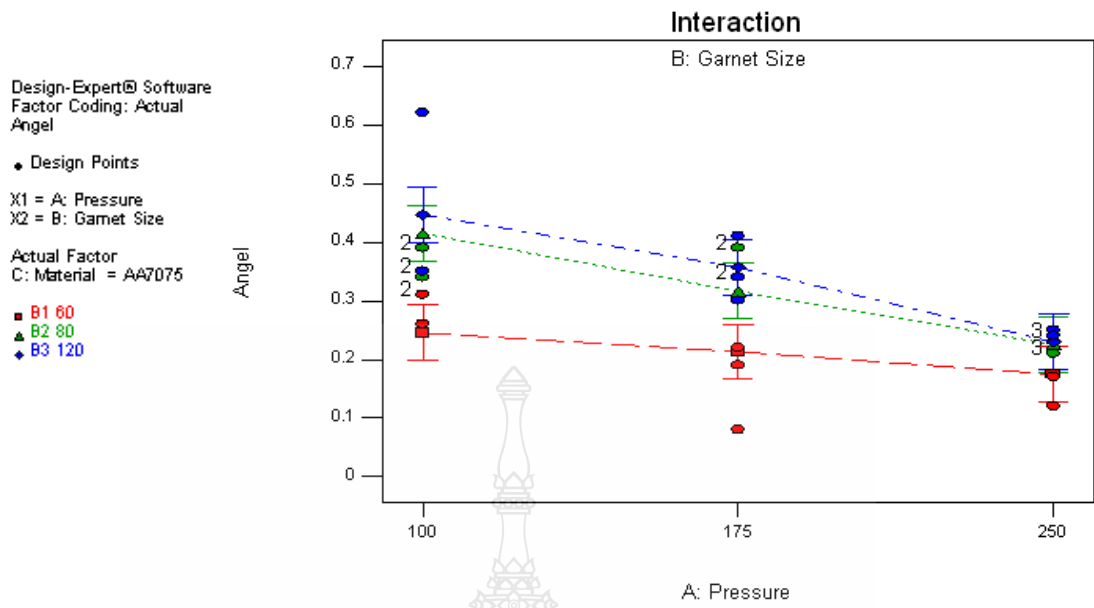
1) อิทธิพลของกิริยาร่วมระหว่างแรงดันน้ำ (ปัจจัย A) และขนาดของสารขัด (ปัจจัย B) ดังรูปที่ 4.38 รูปที่ 4.39 และรูปที่ 4.40 ตามลำดับ



รูปที่ 4.38 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA6061



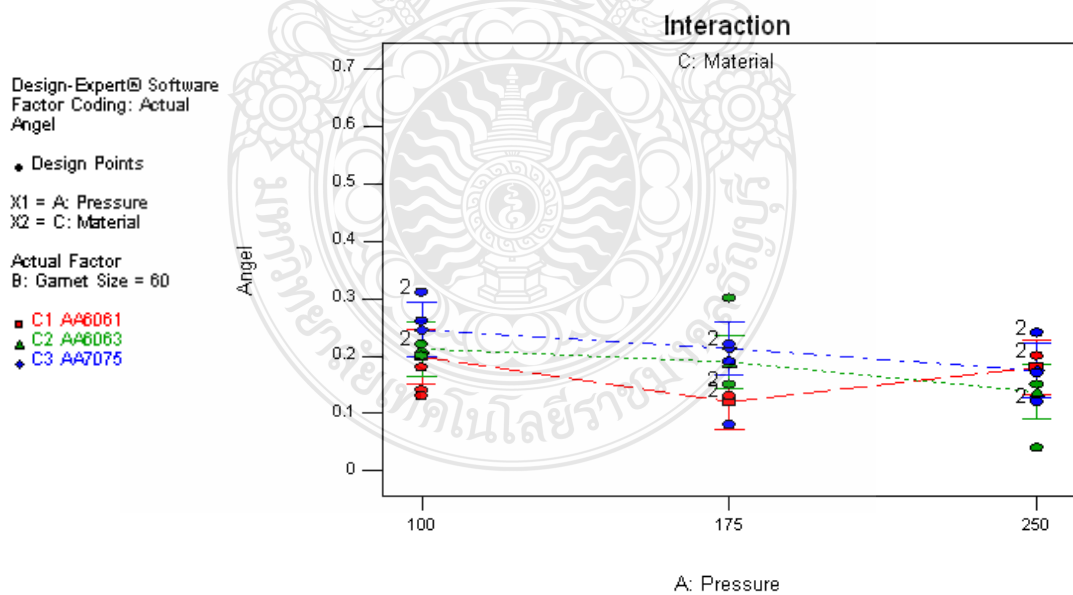
รูปที่ 4.39 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA6063



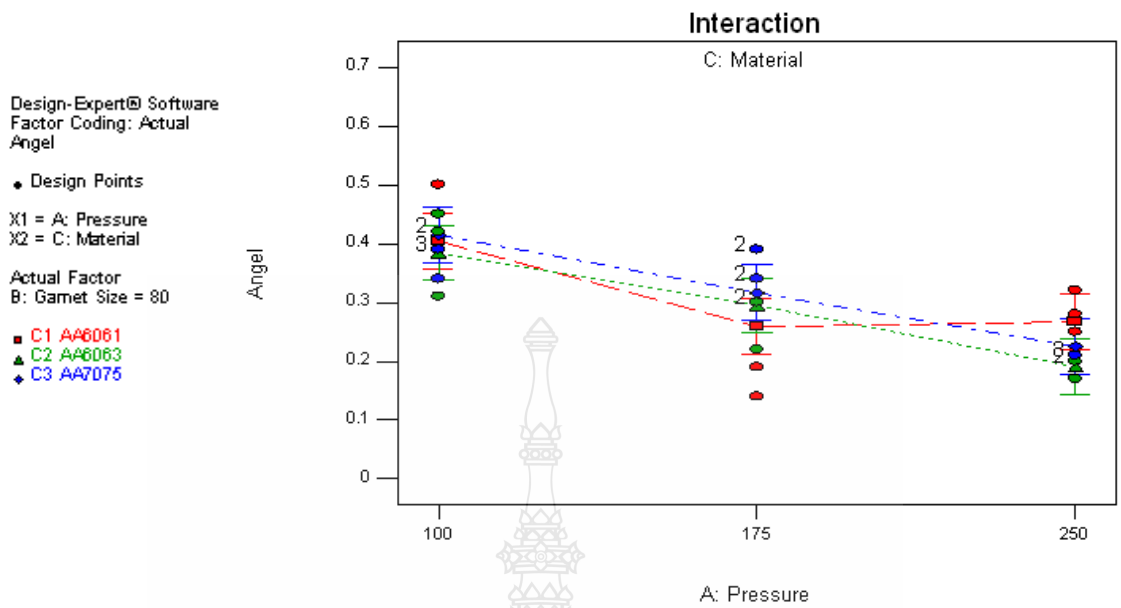
รูปที่ 4.40 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B ของเกรดอลูมิเนียม AA7075

2) อิทธิพลของกิริยาร่วมระหว่างแรงดันน้ำ (ปัจจัย A) และเกรดอลูมิเนียม (ปัจจัย B)

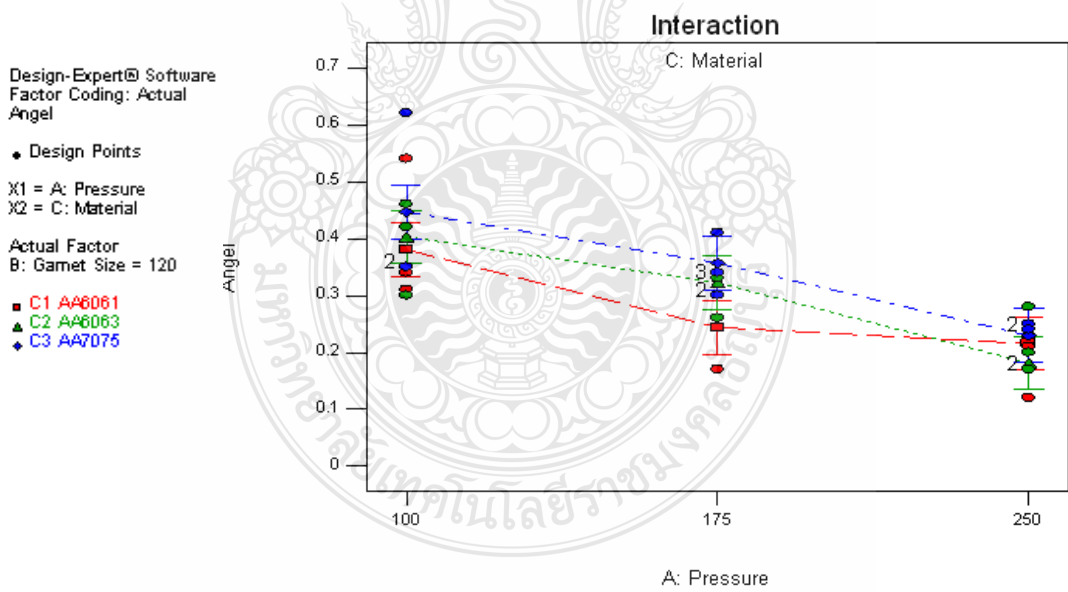
ดังรูปที่ 4.4 รูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43 ตามลำดับ



รูปที่ 4.41 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 60 Mesh

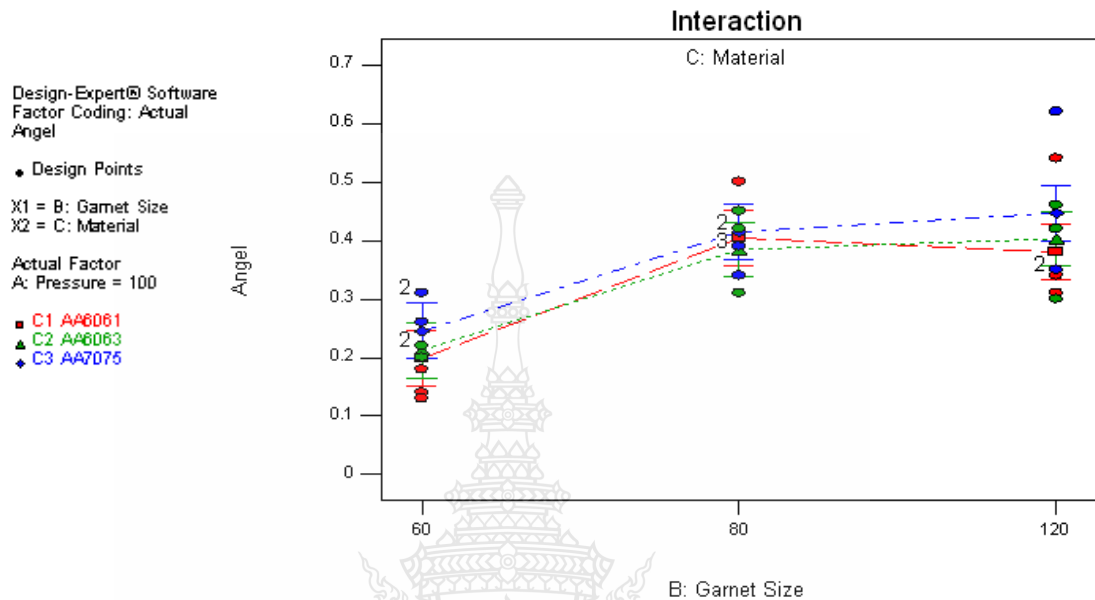


รูปที่ 4.42 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 80 Mesh

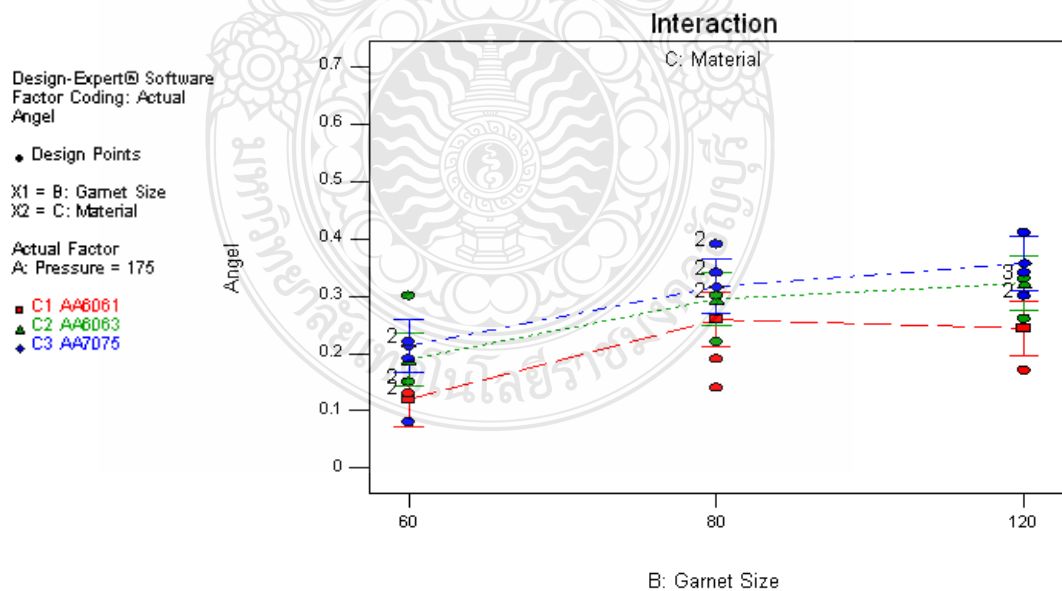


รูปที่ 4.43 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C ของขนาดสารขัด 120 Mesh

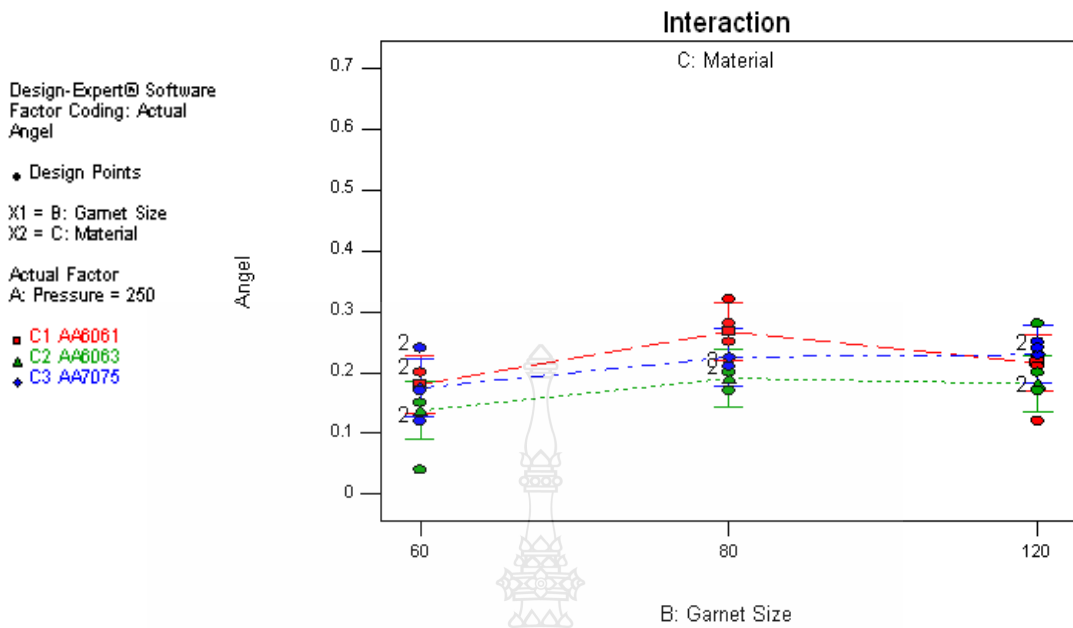
3) อิทธิพลของกิริยาร่วมระหว่างขนาดของสารจัด (ปัจจัย B) และเกรดอลูมิเนียม (ปัจจัย C) ดังรูปที่ 4.44 รูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46 ตามลำดับ



รูปที่ 4.44 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 100 MPa



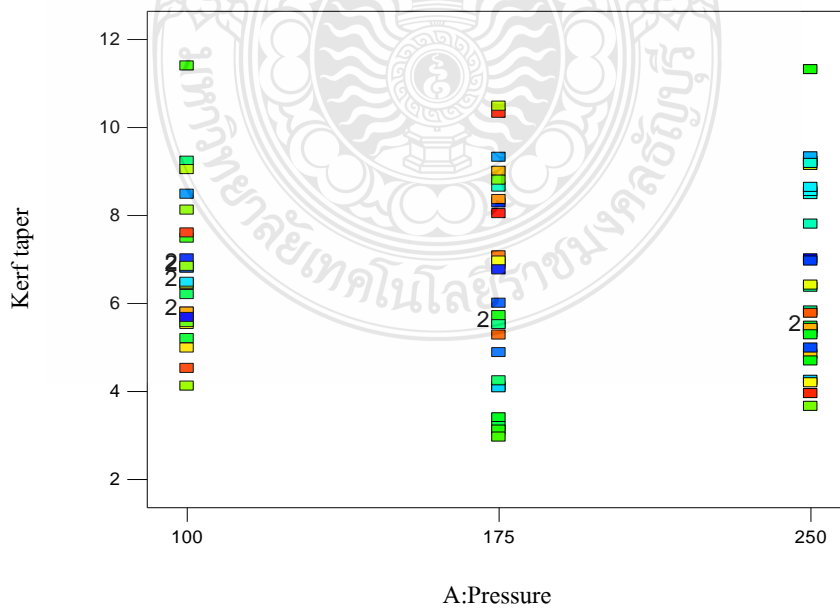
รูปที่ 4.45 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงดันน้ำ 175 MPa



รูปที่ 4.46 อิทธิพลของกิริยาร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C ของแรงคั้นน้ำ 250 MPa

การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย โดยการนำข้อมูลมาเป็นสร้างแผนภูมิแสดงการกระจายของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับระดับของทุกปัจจัยทุกตัว

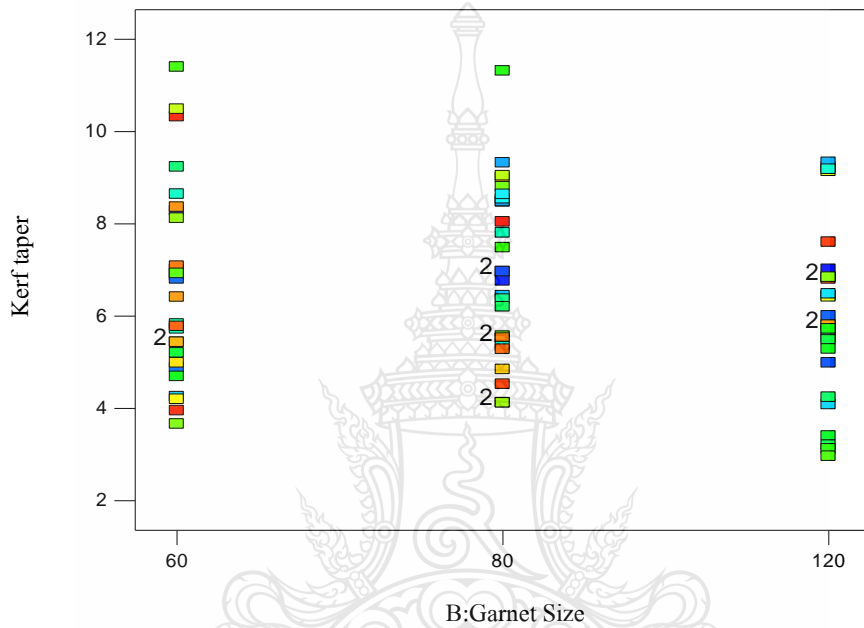
1) ส่วนตกค้างกับแรงคั้นน้ำ (ปัจจัย A)



รูปที่ 4.47 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับแรงคั้นน้ำ

จากรูปที่ 4.47 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ของความเรียบผิวเทียบกับแรงดันน้ำ 100 175 และ 250 MPa เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียง

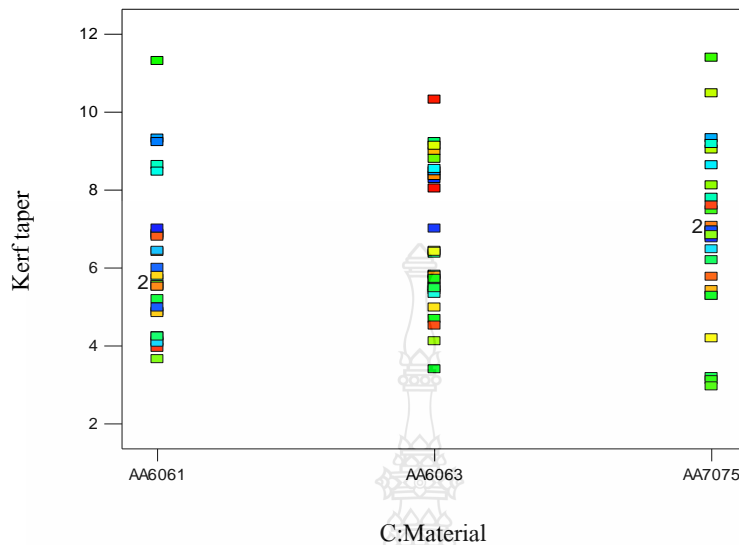
2) ส่วนตกค้างกับขนาดของสารขัด (ปัจจัย B)



รูปที่ 4.48 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับขนาดของสารขัด

จากรูปที่ 4.48 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ของความเรียบผิวเทียบกับขนาดของสารขัด 60 80 และ 120 Mesh เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียง

3) ส่วนตกค้างกับเกรดของอลูมิเนียม (ปัจจัย C)



รูปที่ 4.49 การกระจายตัวของค่าตัดส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับเกรดของอลูมิเนียม

จากรูปที่ 4.49 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ของความเรียบผิว เทียบกับเกรดของอลูมิเนียม AA6061 AA6063 และ AA7075 เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายมีความสอดคล้องกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียง

4.3 ผลการวิเคราะห์คลื่นรอยตัด

ผลการทดสอบคลื่นรอยตัดของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการทดลองตัดด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสมเกรด AA-6061, AA-6063 [10] และ AA-7075 ความหนา 25 มิลลิเมตร ทดลองตัดด้วยแรงดันน้ำที่หัวตัด 100 175 และ 250 MPa ขนาดของสารขัด 60 80 และ 120 Mesh ทำการทดสอบคลื่นรอยตัดด้วยถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์ทั้งสองด้าน แล้วนำไปวัดค่าความสูงคลื่นรอยตัดด้วยโปรแกรม Rhinoceros จากผลการทดลองพบว่า การตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยสภาวะดังกล่าว ไม่ปรากฏคลื่นรอยตัด ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก ง. ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. John Rozario Jegaraj สามารถตัดวัสดุได้ความหนา 50 มิลลิเมตร [13] นั้นหมายความว่า แรงดันน้ำในช่วง 100 MPa ถึง 250 MPa และขนาดของสารขัด 60 Mesh ถึง 120 Mesh สามารถตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมได้โดยไม่เกิดคลื่นรอยตัด มีผลการทดลองแสดงภาคผนวก ง.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการที่ได้ศึกษาค้นคว้าและทดลองตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียม 3 เกรดได้แก่ AA6061-T6, AA6063-T6 และ AA7075-T6 ที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร ทำการเปลี่ยนแปรตัวแปรแรงดันน้ำที่หัวตัด 100 MPa, 175MPa และ 250 MPa เปลี่ยนแปลงขนาดของสารขัดชนิดทราย 60 Mesh, 80 Mesh และ 120 Mesh เพื่อเพิ่มทางเลือกและเป็นข้อมูลพื้นฐานให้กับผู้ที่สนใจและนำไปประยุกต์ใช้กับงานในอุตสาหกรรม ในการตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด จากผลการทดลองที่สามารถสรุปผลการทดลองและมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 อิทธิพลของสภาวะการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไม่ส่งผลต่อความหยาบผิวรอยตัดชิ้นงานอลูมิเนียมผสมที่ความหนา 25 มิลลิเมตร ขนาดของสารขัดประเภททราย ที่มีความโตแตกต่างกันมีผลต่อความหยาบผิวรอยตัดโดยตรง ซึ่งขนาดของสารขัดที่มีขนาดเล็กให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดดีกว่าขนาดของสารขัดที่มีขนาดโต เกรดของอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงใกล้เคียงกันมีผลกับความหยาบผิวรอยตัดของชิ้นงาน สภาวะการตัดที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดดีที่สุดคือ แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh และอลูมิเนียมเกรด AA7075 ได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 3.21 ไมโครเมตร

การศึกษาสภาวะการตัดอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด ที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด ได้ผลจากการวิเคราะห์การทดลอง พบว่า มี 2 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด คือ ขนาดของสารขัดและเกรดอลูมิเนียม แต่หากนำปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันน้ำขนาดของสารขัดและเกรดอลูมิเนียมมาวิเคราะห์ร่วมกันจะพบว่าไม่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5.1.2 อิทธิพลของสภาวะการตัดที่มีผลต่อความฉากของชิ้นงาน แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อความฉากของชิ้นงานโดยตรง เมื่อแรงดันน้ำสูงขึ้นทำให้ความเป็นฉากของชิ้นงานน้อยลงขนาดของสารขัดประเภททรายมีผลกับความฉากของชิ้นงาน เนื่องจากสารขัดที่มีขนาดใหญ่มีลักษณะการแตกตัวในขณะที่ตัดจะแตกตัวได้ช้ากว่าขนาดของสารขัดที่มีขนาดเล็ก เกรดของอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงใกล้เคียงกันไม่มีผลต่อความฉากของชิ้นงาน สภาวะการตัดอลูมิเนียมผสม

ด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารกัดที่ส่งผลต่อความฉากของชิ้นงานดีสุดคือ แรงดันน้ำ 250 MPa ขนาดของสารกัด 60 Mesh และอลูมิเนียมเกรด AA6061 ให้ค่าความฉากเฉลี่ย 0.10 องศา

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยเทคนิค ANOVA พบว่า มี 2 ปัจจัยหลัก ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ แรงดันน้ำและขนาดของสารกัด แสดงว่าทั้ง 2 ปัจจัยนี้มีอิทธิพลต่อความฉากของชิ้นงาน และตัวแปรเกรดอลูมิเนียมมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน หากพิจารณาจากปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันน้ำ ขนาดของสารกัดและเกรดอลูมิเนียมมาวิเคราะห์ร่วมกันจะพบว่า ไม่มีอิทธิพลต่อความฉากของชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5.1.3 อิทธิพลของสภาวะการตัดที่มีผลต่อคลื่นรอยตัด แรงดันน้ำที่หัวตัดในช่วง 100 MPa ถึง 250 MPa สามารถตัดชิ้นงานที่มีความหนาชิ้นงาน 25 มิลลิเมตร โดยไม่ปรากฏคลื่นรอยตัดทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งสามารถใช้ขนาดของสารกัดประเภททรายที่มีขนาด 60 – 120 Mesh ได้ โดยไม่ก่อให้เกิดคลื่นรอยตัด โดยวัสดุเป็นอลูมิเนียมเกรด AA6061 AA6063 และ AA7075 ที่คุณสมบัติด้านความแข็งแรงใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1) ควรมีการศึกษาวัสดุประเภทอื่นเช่น SKD11 S45C SS400 หรือ SUS304 ที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร ซึ่งอาจจะมีผลต่อความหยาบผิวรอยตัด ความฉากของชิ้นงานและคลื่นรอยตัด

2) ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงาน เช่น มุมเอียงหัวตัด ขนาดของรูรีดน้ำ รูปร่างของสารกัดที่แตกต่างกัน และขนาดความยาวของท่อลำน้ำ

รายการอ้างอิง

- [1] นอร์แมน ฟรานซ์ และ โมฮามัด ฮาซิช. ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับวอเตอร์เจ็ต. [Online]. Available: <http://www.flowasia.com/thai/about-flow.cfm.htm>
- [2] A Division of Omax Corporation. 2552. คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM water jet Model 1530. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร.
- [3] Adnan Akkurt., 2009. “The effect of material type and plate thickness on drilling time of abrasive water jet drilling process” Materials and Design 30, Vol.2009.pp810-815
- [4] Fowler G., Pashby I.R., Shipway P.H.. 2009. “The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling alloy Ti6Al4V” Wear, Vol.266.2009.pp613-620.
- [5] Chen L., Siores E., Wong W.C.K.. 1998. “Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials” Journal of Material Processing Technology, Vol.74.1998.pp251-254.
- [6] Osma A.H., Mabrouki T., They B., Buisine D. 2004. “Experimental analysis of High - Speed air – water jet flow in an abrasive water jet mixing tube” flow measurement and instrumentation 15 (2004) 37 – 48
- [7] Libor M.HLavac., Hlavacova.,Petr Jandacka.2010 “Comminution of material particles by water jets – Influence of the inner shape of the mixing chamber”. International Journal of Mineral Processing 95.pp25-29
- [8] Boud F., Carpenter C., Folkes J.,Shipway P.H.2010. “Abrasive waterjets cutting of a titanium alloy : The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality”. Journal of Materials Processing Technology 210.pp2197-2205
- [9] Orbanic H., Junkar M. 2008. “Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting”. Wear, Vol.265, 2008.pp821-830.
- [10] สายทาน สีนสมบูรณ์. 2553. สถิติวิศวกรรม.สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ, หน้า454-469.
- [11] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. 2541. วัสดุวิศวกรรม. เล่ม 2. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล นครราชสีมา. ซีเอ็ดยูเคชั่น.กรุงเทพมหานคร, หน้า135-40

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [12] นรา บุรีพันธ์และสิวกร อ่างทอง. 2554. “อิทธิพลของสภาวะการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ด้วย เลเซอร์ที่มีผลต่อความหยาบผิว”. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554.พัทยา, ประเทศไทย, 20-21 ตุลาคม 2554 : แผ่นซีดีรอม
- [13] John Rozario J. Jegaraj., Ramesh Babu N. 2005. “A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive water jets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter”, International Journal of Machine Tool & Manufacture, Vol.45,2005. pp1443-1450.
- [14] วิชัย พุ่มจันทร์และสิวกร กิตติพงษ์ กิมะพงศ์.2552. “การเชื่อมอลูมิเนียม AA6063 และอลูมิเนียม AA7075 โดยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน”.การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2552.ขอนแก่น,ประเทศไทย, 21-22 ตุลาคม 2552 : แผ่นซีดีรอม
- [15] Azmir M.A., Ahsan A.K.2009. “A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate”. Journal of Materials Processing Technology 209.pp6168-6173
- [16] Hlavav L.M., Hlavacova., Gembalova L. 2009. “Experimental method for the investigation of the abrasive water jets cutting quality”.Journal of Materials Processing Technology 209 .pp6190-6195



ภาคผนวก





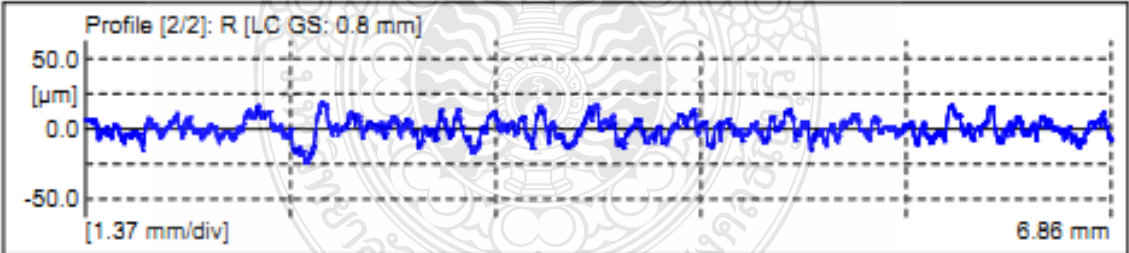
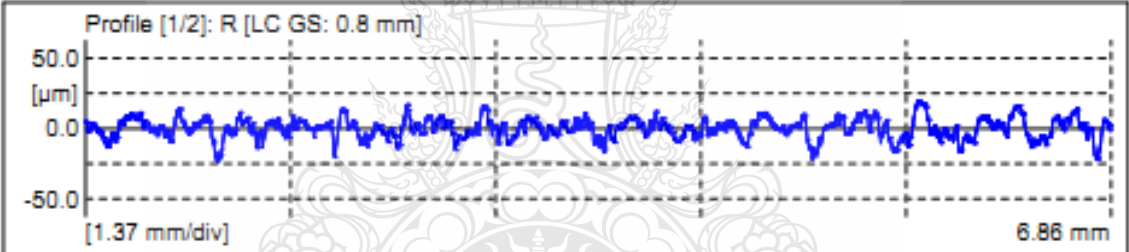
ภาคผนวก ก

ผลการทดลองความหยابผิว



 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTAPHON New Measurement	

Object: 14,500MPa-6061-60
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board Drive Unit: GD 25 Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ra</th> <th>Rz</th> <th>Rmax</th> </tr> <tr> <th></th> <th>μm</th> <th>μm</th> <th>μm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1:</td> <td>5.586</td> <td>36.010</td> <td>41.64</td> </tr> <tr> <td>2:</td> <td>5.444</td> <td>32.833</td> <td>43.12</td> </tr> <tr> <td>Xb:</td> <td>5.515</td> <td>34.422</td> <td>42.38</td> </tr> <tr> <td>R:</td> <td>0.142</td> <td>3.177</td> <td>1.48</td> </tr> </tbody> </table>		Ra	Rz	Rmax		μm	μm	μm	1:	5.586	36.010	41.64	2:	5.444	32.833	43.12	Xb:	5.515	34.422	42.38	R:	0.142	3.177	1.48
	Ra	Rz	Rmax																						
	μm	μm	μm																						
1:	5.586	36.010	41.64																						
2:	5.444	32.833	43.12																						
Xb:	5.515	34.422	42.38																						
R:	0.142	3.177	1.48																						
Lt: 9.60 mm [N=5] Ls: 2.5 μm VB: $\pm 250 \mu\text{m}$ Vt: 0.50 mm/s Points: 38400 [2]																									

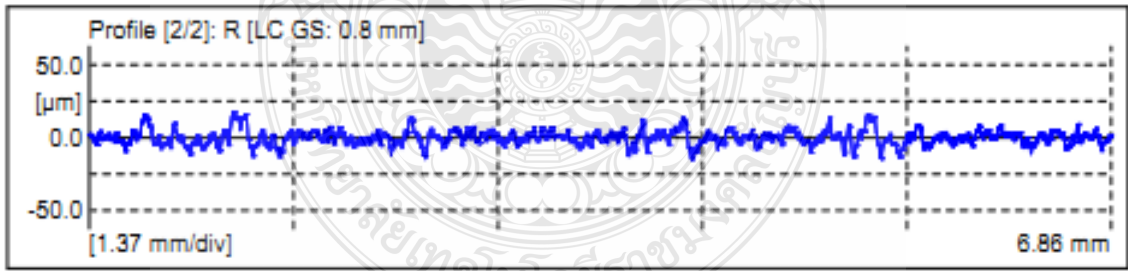
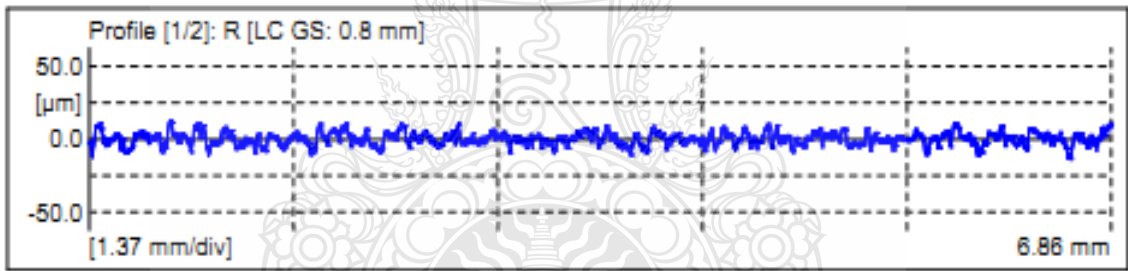


Mean Values	
Ra	5.51 μm
Rz	34.42 μm
Rmax	42.38 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object:	14,500MPa-8061-80
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	3.444	22.057	25.10
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	3.829	27.453	30.76
La:	2.5 μm	Xb:	3.636	24.755	27.93
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$	R:	0.385	5.397	5.66
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

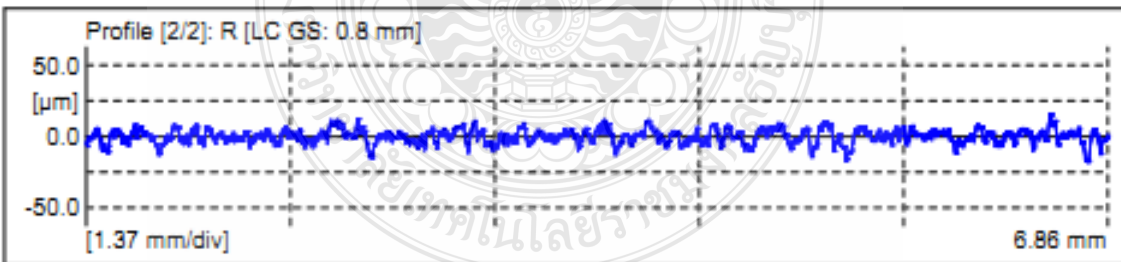
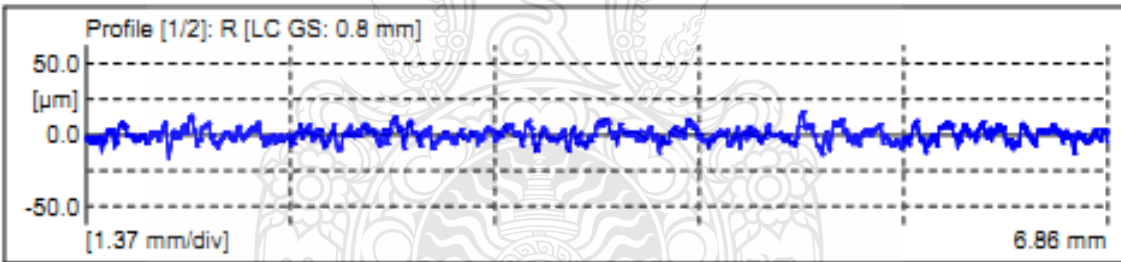


Mean Values	
Ra	3.64 μm
Rz	24.75 μm
Rmax	27.93 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object: 14,500MPa-6061-120
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	μm	μm	μm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.816	26.023	30.45
	2: 3.833	26.688	33.34
	Xb: 3.825	26.356	31.89
	R: 0.018	0.665	2.89
Lt: 9.60 mm [N=5]			
Ls: 2.5 μm			
VB: $\pm 250 \mu\text{m}$			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

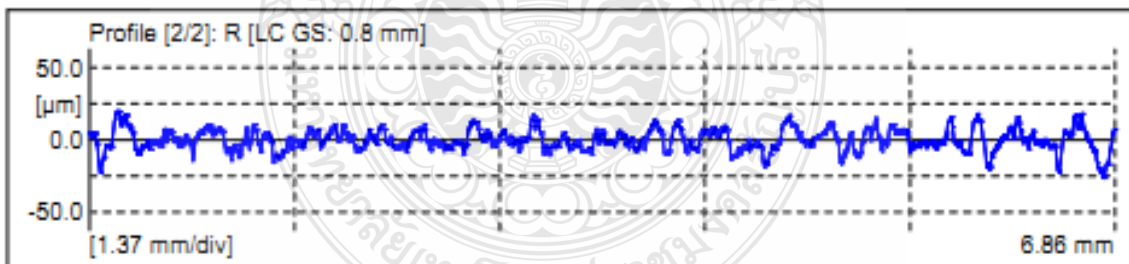
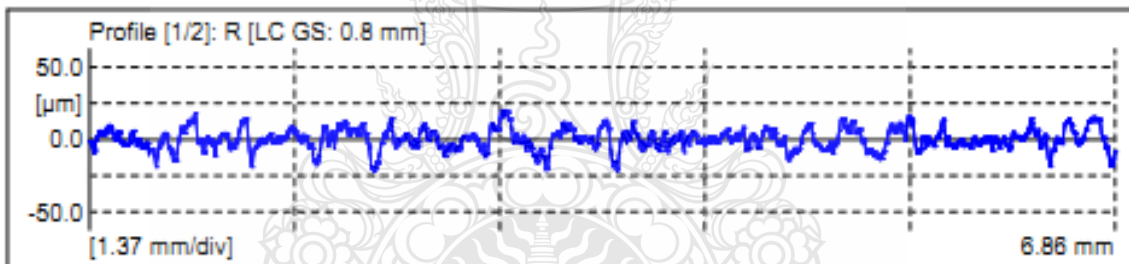


Mean Values	
Ra	3.82 μm
Rz	26.36 μm
Rmax	31.89 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object: 14,500MPa-6063-60
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	µm	µm	µm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 5.533	35.653	40.58
	2: 5.769	34.674	44.62
Lt: 9.60 mm [N=5]	Xb: 5.651	35.163	42.60
La: 2.5 µm	R: 0.237	0.979	4.04
VB: ±250 µm			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

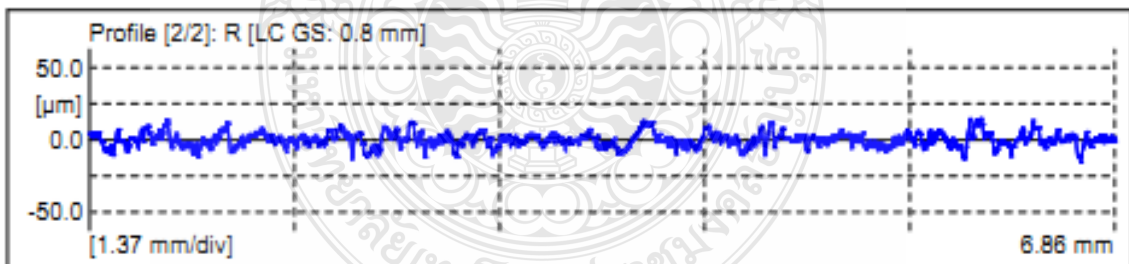
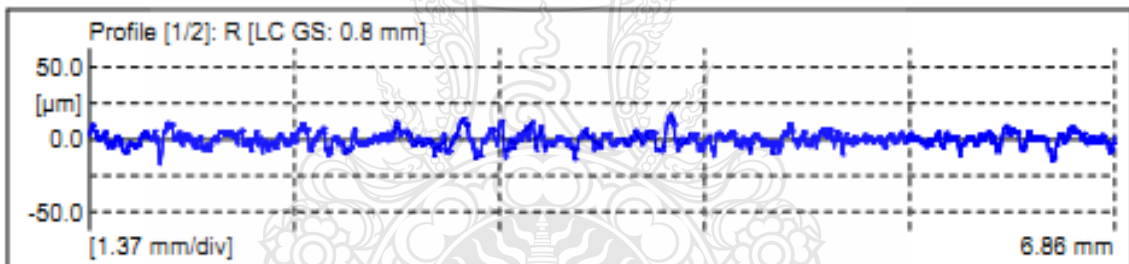


Mean Values	
Ra	5.65 µm
Rz	35.16 µm
Rmax	42.60 µm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object: 14,500MPa-6063-80
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	μm	μm	μm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.616	27.059	30.91
Lt: 9.60 mm [N=5]	2: 3.744	25.870	30.63
Ls: 2.5 μm	Xb: 3.680	26.464	30.77
VB: ±250 μm	R: 0.128	1.189	0.28
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

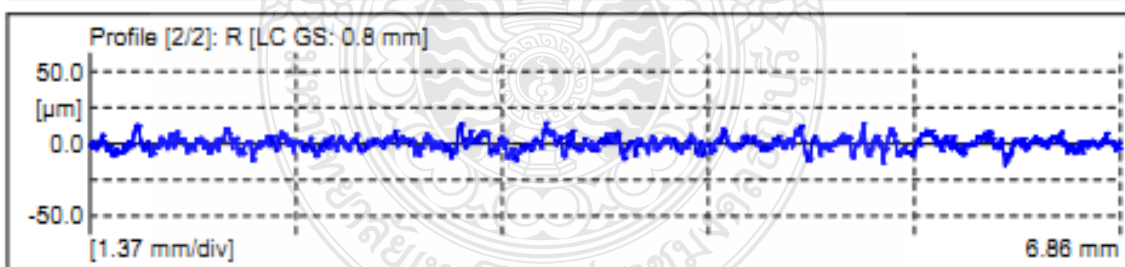
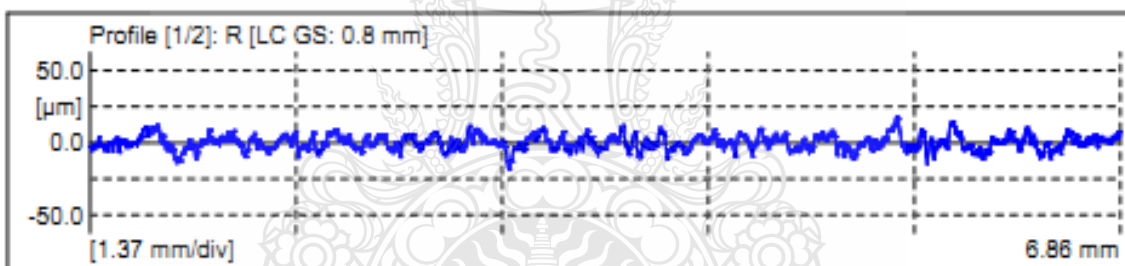


Mean Values	
Ra	3.68 μm
Rz	26.46 μm
Rmax	30.77 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object:	14,500MPa-6063-120
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	4.003	27.609	30.42
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	3.390	25.628	28.14
La:	2.5 μm	Xb:	3.697	26.619	29.28
VB:	±250 μm	R:	0.613	1.982	2.28
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

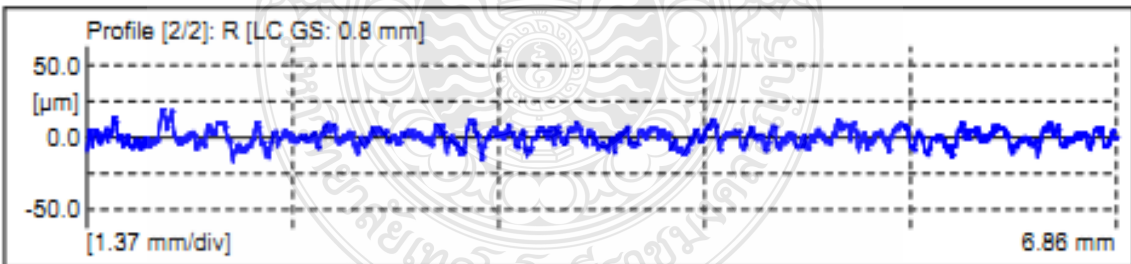
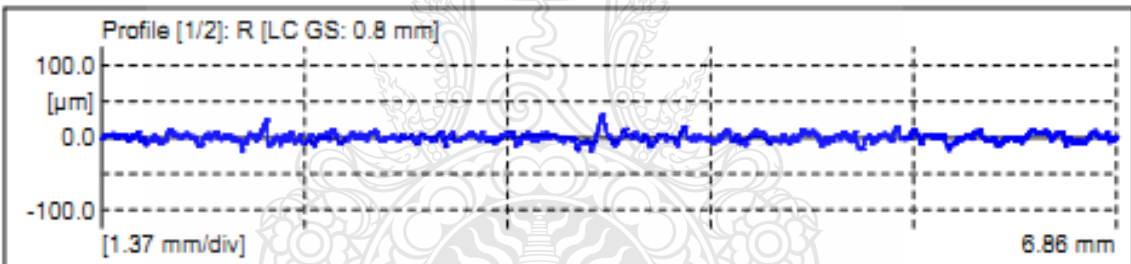


Mean Values	
Ra	3.70 μm
Rz	26.62 μm
Rmax	29.28 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTAPHON New Measurement	

Object:	14,500MPa-7075-60
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	4.367	35.864	50.13
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	4.307	26.616	36.29
Ls:	2.5 μm	Xb:	4.337	31.240	43.21
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$	R:	0.060	9.248	13.84
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

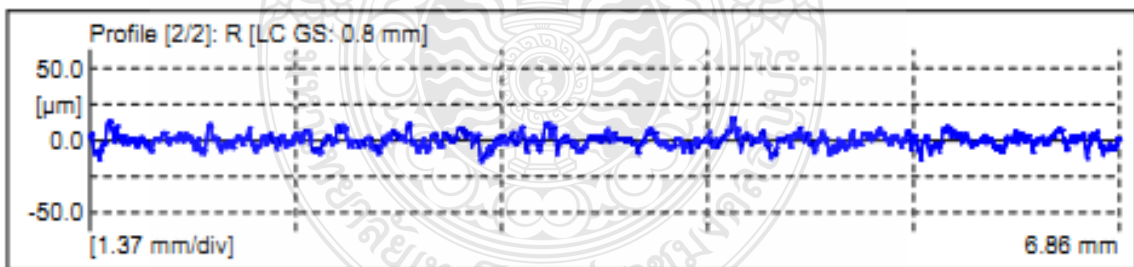
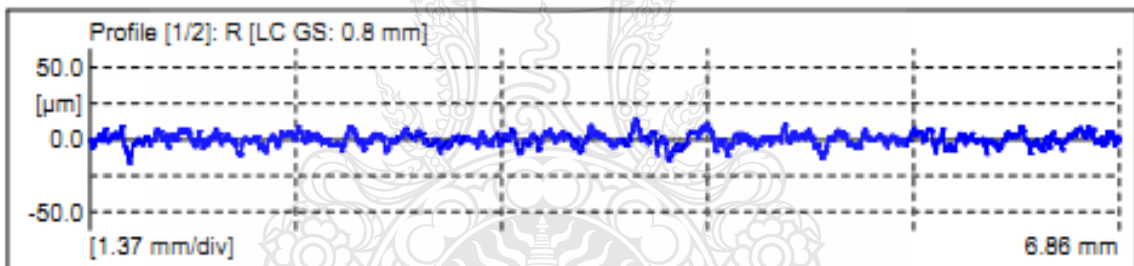


Mean Values	
Ra	4.34 μm
Rz	31.24 μm
Rmax	43.21 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object: 14,500MPa-7075-80
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	µm	µm	µm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.318	23.489	28.57
Lt: 9.60 mm [N=5]	2: 3.504	25.387	28.73
Ls: 2.5 µm	Xb: 3.411	24.438	28.65
VB: ±250 µm	R: 0.186	1.898	0.16
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

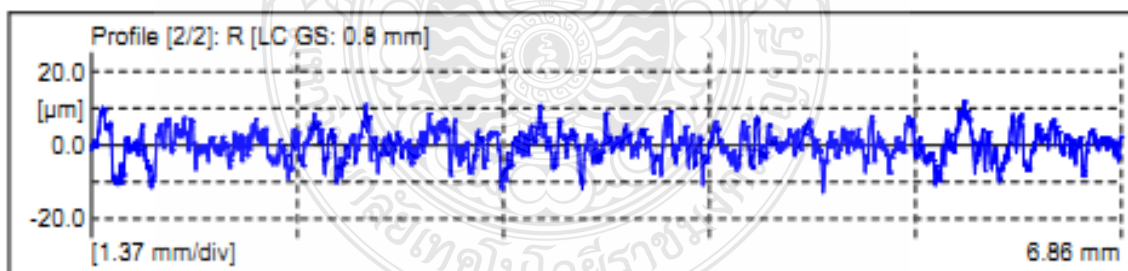
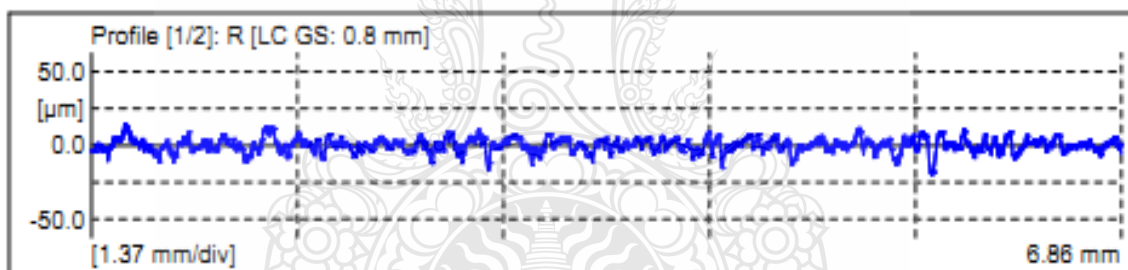


Mean Values	
Ra	3.41 µm
Rz	24.44 µm
Rmax	28.65 µm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object: 14,500MPa-7075-120
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	3.612	26.284	29.85
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	3.140	22.071	22.67
Ls:	2.5 μm	Xb:	3.376	24.177	26.26
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$	R:	0.472	4.213	7.18
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

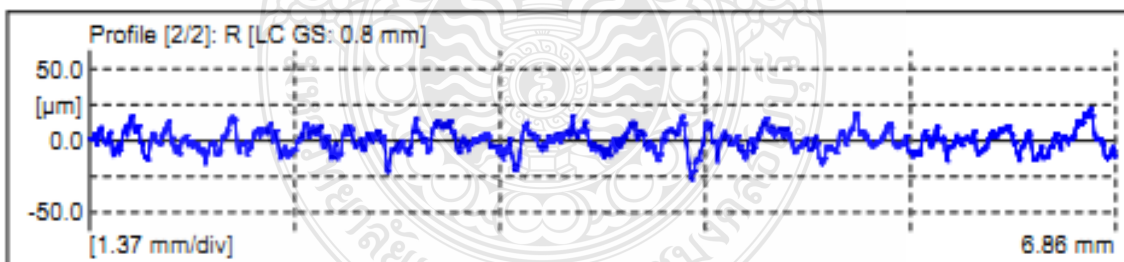
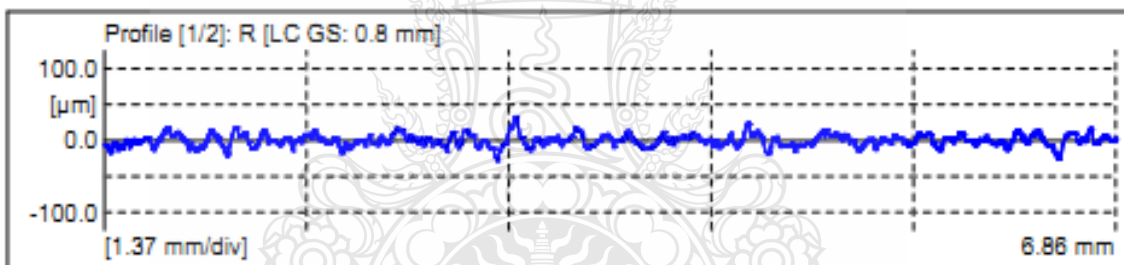


Mean Values	
Ra	3.38 μm
Rz	24.18 μm
Rmax	26.26 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object:	25,000MPa-6061-60
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	6.411	43.483	46.63
		2:	5.971	37.739	44.52
		Xb:	6.191	40.611	45.57
		R:	0.441	5.744	2.11
Lt:	9.60 mm [N=5]				
Ls:	2.5 μm				
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$				
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

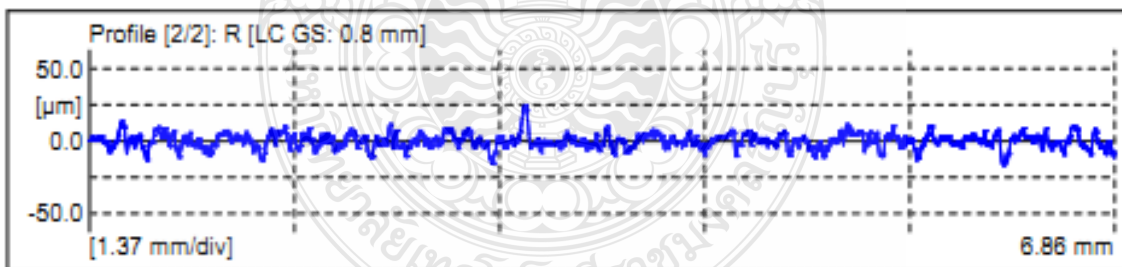
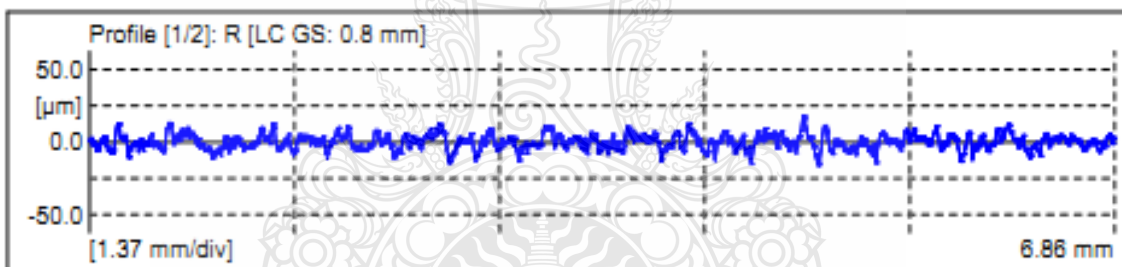


Mean Values	
Ra	6.19 μm
Rz	40.61 μm
Rmax	45.57 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object:	25,000MPa-6061-80
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	4.052	27.125	33.38
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	3.892	27.704	34.38
Ls:	2.5 μm	Xb:	3.972	27.414	33.88
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$	R:	0.160	0.579	1.00
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

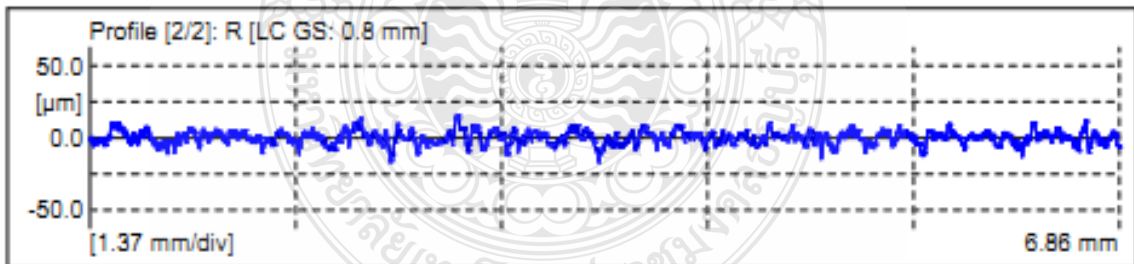
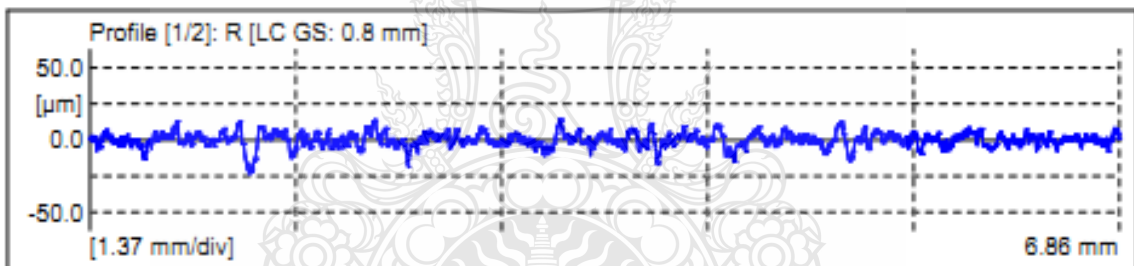


Mean Values	
Ra	3.97 μm
Rz	27.41 μm
Rmax	33.88 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object: 25,000MPa-6061-120
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	µm	µm	µm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.724	28.678	36.06
Lt: 9.60 mm [N=5]	2: 3.604	25.898	32.42
Ls: 2.5 µm	Xb: 3.664	27.288	34.24
VB: ±250 µm	R: 0.120	2.780	3.63
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

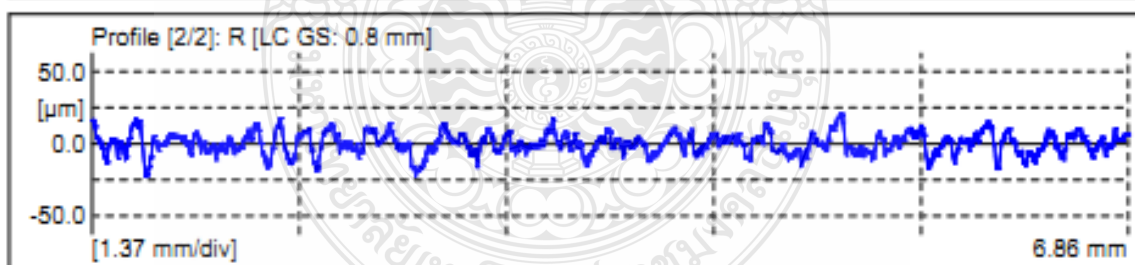
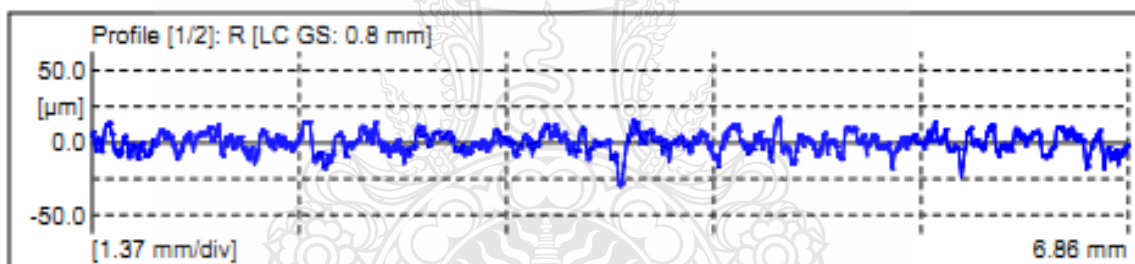


Mean Values	
Ra	3.66 µm
Rz	27.29 µm
Rmax	34.24 µm



 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTAPHON New Measurement	

Object: 25,000MPa-6063-60
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	5.324	36.160	45.25
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	5.725	35.863	40.24
Ls:	2.5 μm	Xb:	5.524	36.012	42.74
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$	R:	0.401	0.296	5.02
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

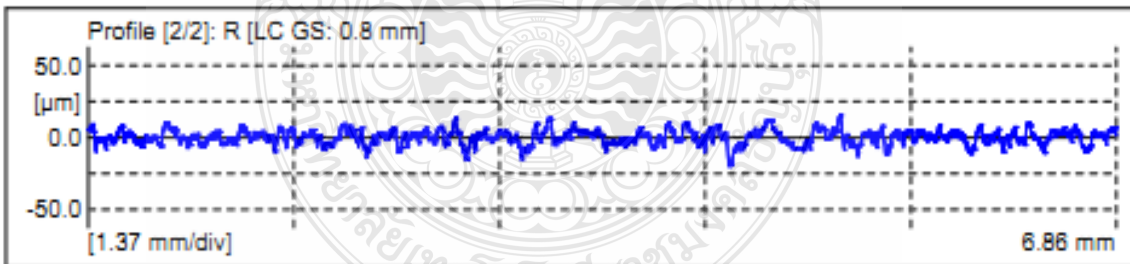
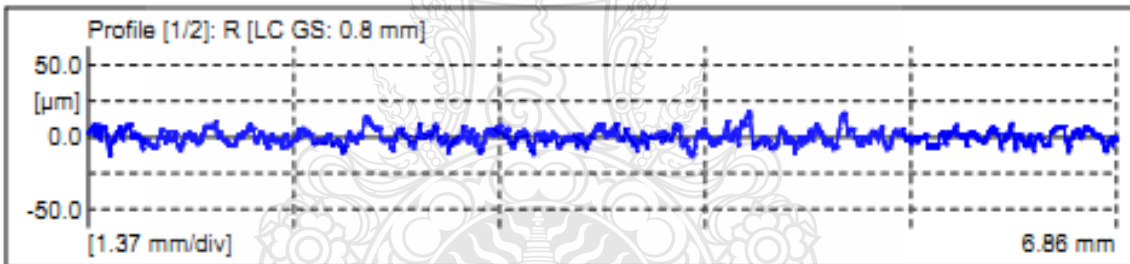


Mean Values	
Ra	5.52 μm
Rz	36.01 μm
Rmax	42.74 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTAPHON New Measurement	

Object: 25,000MPa-6063-80
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	µm	µm	µm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.796	24.486	29.46
	2: 3.976	26.916	35.08
Lt: 9.60 mm [N=5]	Xb: 3.886	25.701	32.27
Ls: 2.5 µm	R: 0.180	2.431	5.63
VB: ±250 µm			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

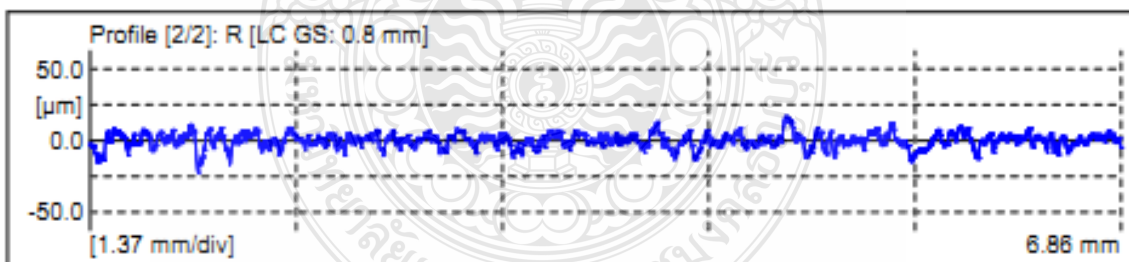
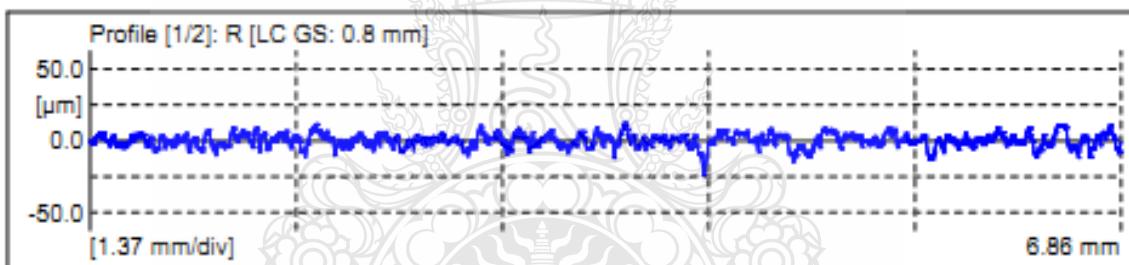


Mean Values	
Ra	3.89 µm
Rz	25.70 µm
Rmax	32.27 µm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object:	25,000MPa-6063-120
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFV-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	3.619	25.146	36.05
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	3.843	26.214	33.16
Ls:	2.5 μm	Xb:	3.731	25.680	34.61
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$	R:	0.224	1.069	2.90
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

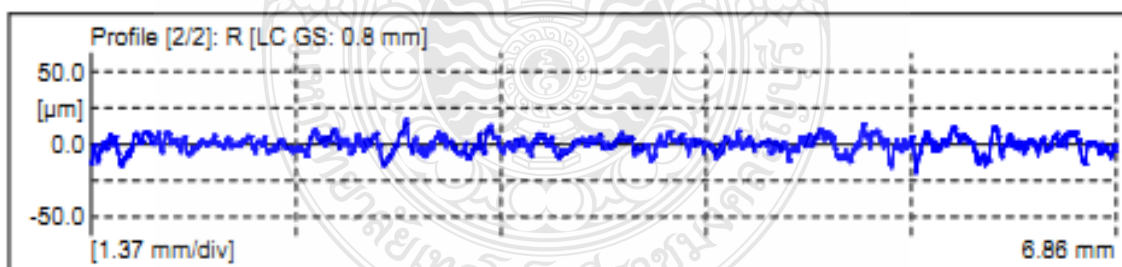
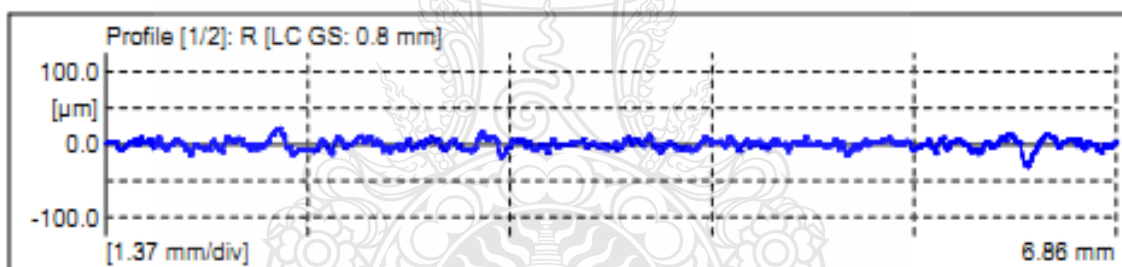


Mean Values	
Ra	3.73 μm
Rz	25.68 μm
Rmax	34.61 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTAPHON New Measurement	

Object: 25,000MPa-7075-60
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	μm	μm	μm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 5.123	34.091	47.23
	2: 3.975	27.602	32.13
	Xb: 4.549	30.846	39.68
	R: 1.148	6.488	15.09
Lt: 9.60 mm [N=5]			
Ls: 2.5 μm			
VB: $\pm 250 \mu\text{m}$			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

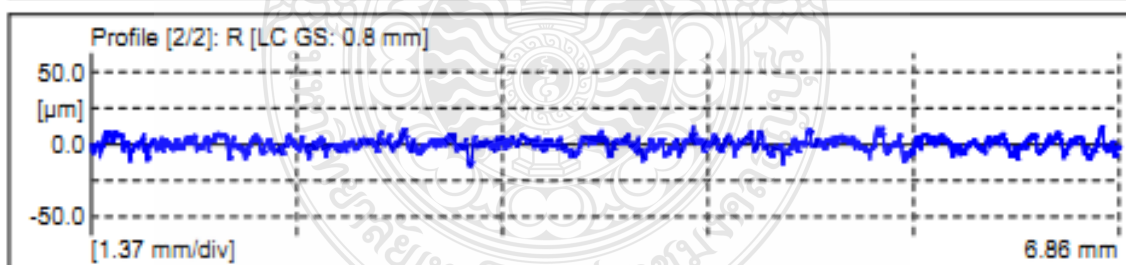
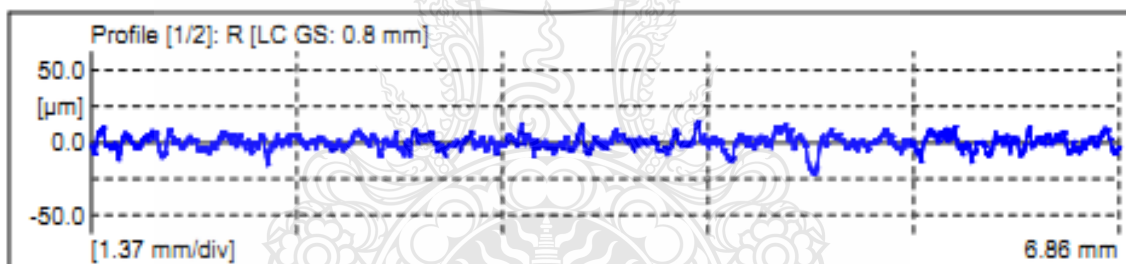


Mean Values	
Ra	4.55 μm
Rz	30.85 μm
Rmax	39.68 μm



 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	B.NATTHAPHON New Measurement	

Object: 25,000MPa-7075-80
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	μm	μm	μm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.675	25.420	33.76
Lt: 9.60 mm [N=5]	2: 3.274	23.410	25.49
Ls: 2.5 μm	Xb: 3.475	24.415	29.62
VB: $\pm 250 \mu\text{m}$	R: 0.401	2.010	8.27
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

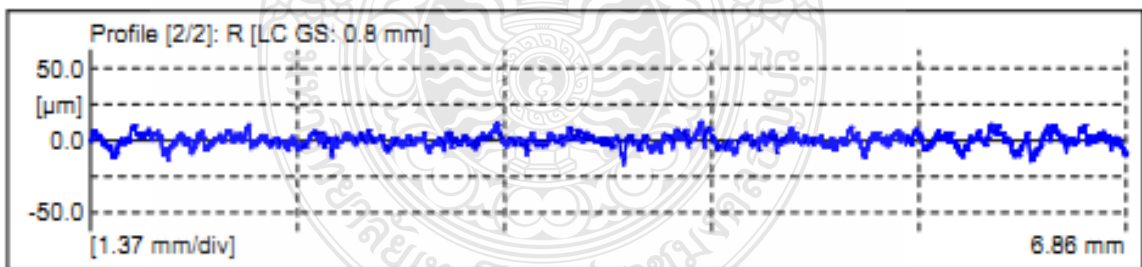
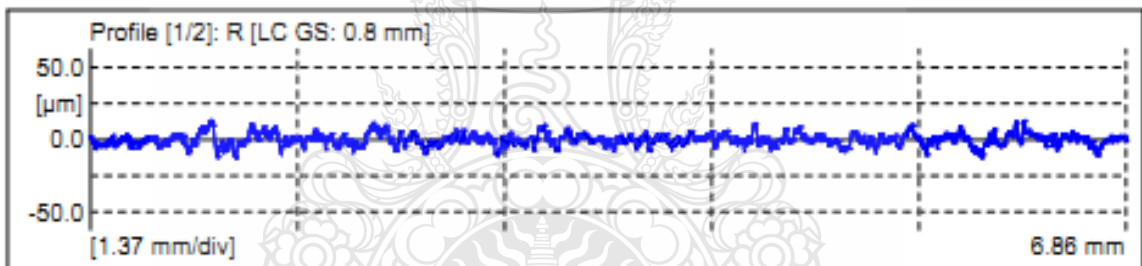


Mean Values	
Ra	3.47 μm
Rz	24.41 μm
Rmax	29.62 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/06/13
	XCR20-Admin New Measurement	

Object:	25,000MPa-7075-120
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	3.184	22.829	25.78
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	3.235	24.688	29.96
Ls:	2.5 μm	Xb:	3.210	23.759	27.87
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$	R:	0.052	1.859	4.18
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

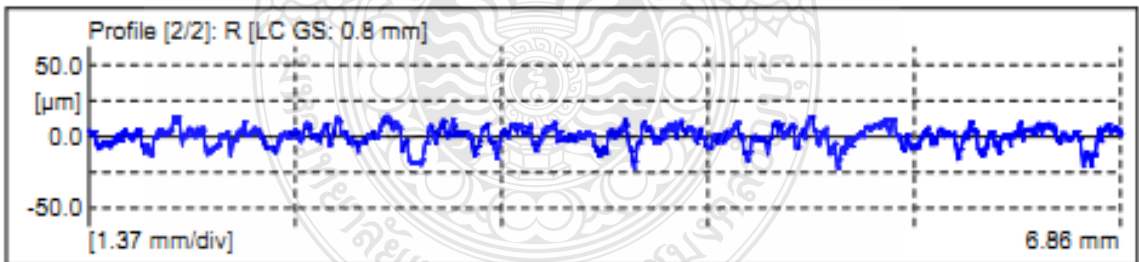
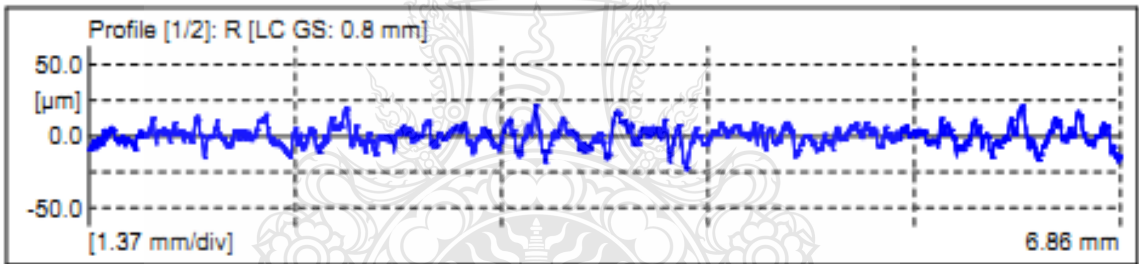


Mean Values	
Ra	3.21 μm
Rz	23.76 μm
Rmax	27.87 μm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/08/13
	B.NATTAPHON 36000-6061-60.prf	

Object:	36,000-6061-60
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board				
Drive Unit:	GD 25				
Pick-up:	MFW-250 # 6851804 [9.0 %]				
Lt:	9.60 mm [N=5]	Xb:	Ra	Rz	Rmax
Ls:	2.5 µm		µm	µm	µm
VB:	±250 µm	1:	5.156	34.484	45.38
Vt:	0.50 mm/s	2:	5.105	32.668	36.38
Points:	38400 [2]	Xb:	5.131	33.576	40.88

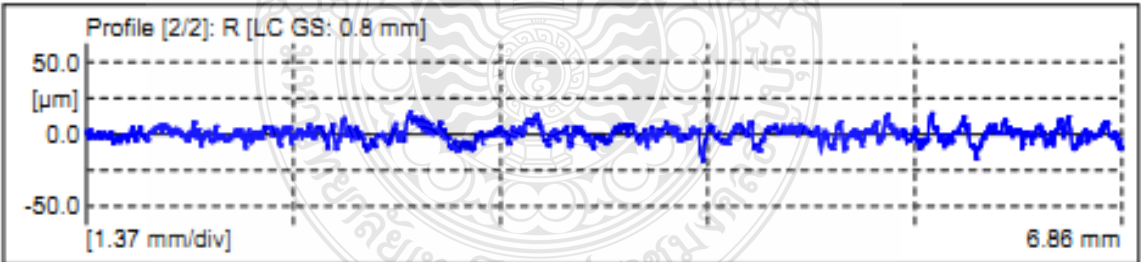
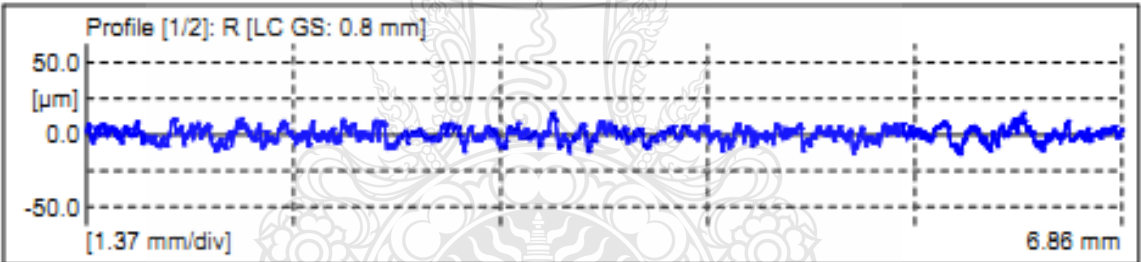


Mean Values	
Ra	5.13 µm
Rz	33.58 µm
Rmax	40.88 µm



 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/08/13
	B.NATTAPHON 36000-6061-80.prf	

Object: 36,000-6061-80
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	µm	µm	µm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.688	24.393	28.71
	2: 3.794	27.335	31.82
	Xb: 3.741	25.864	30.26
Lt: 9.60 mm [N=5]			
Ls: 2.5 µm			
VB: ±250 µm			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

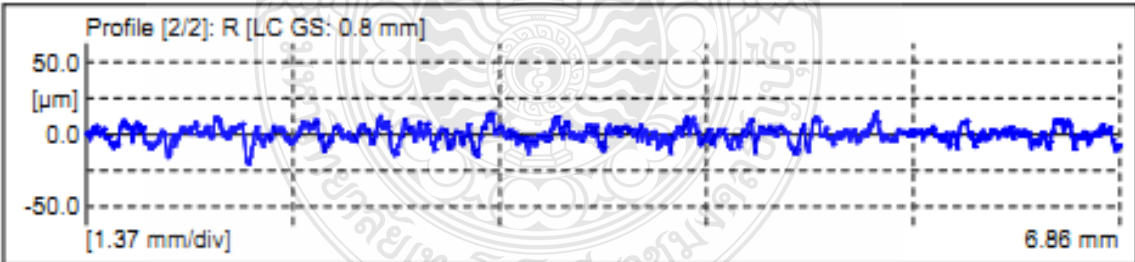
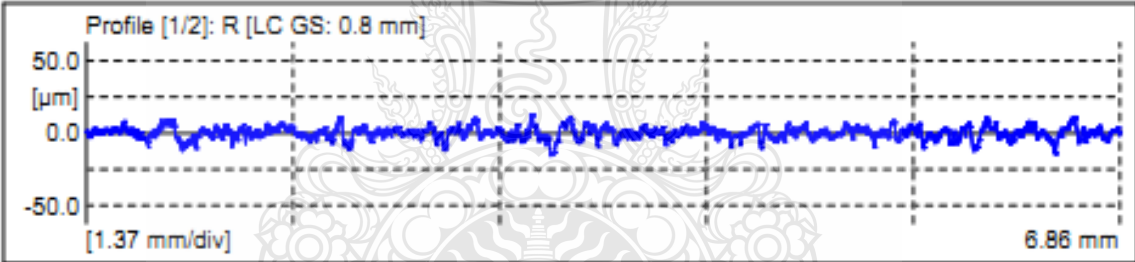


Mean Values	
Ra	3.74 µm
Rz	25.86 µm
Rmax	30.26 µm



 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/08/13
	B.NATTHAPHON 36000-6061-120.prf	

Object: 36,000-6061-120
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	µm	µm	µm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.213	23.295	28.08
	2: 4.130	27.778	32.70
	Xb: 3.671	25.536	30.39
Lt: 9.60 mm [N=5]			
Ls: 2.5 µm			
VB: ±250 µm			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

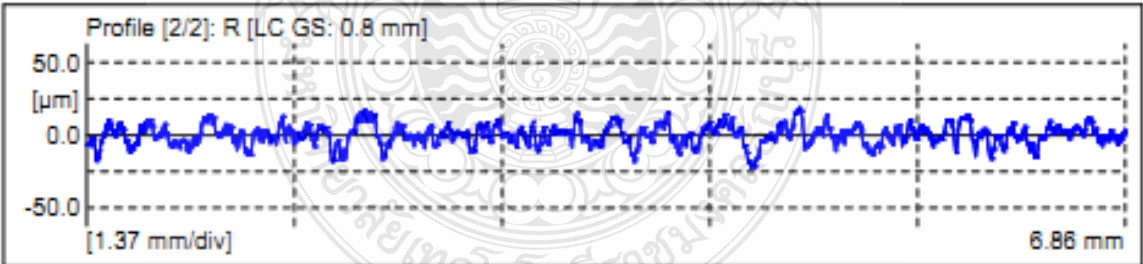
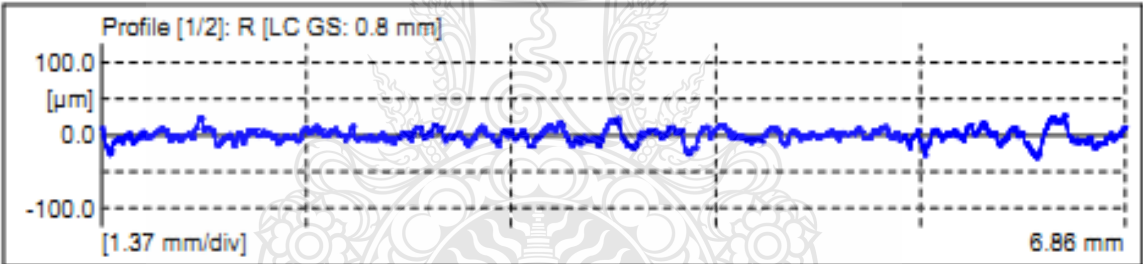


Mean Values	
Ra	3.67 µm
Rz	25.54 µm
Rmax	30.39 µm



 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/08/13
	B.NATTAPHON 36000-6063-60.prf	

Object: 36,000-6063-60
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	μm	μm	μm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 6.861	45.353	59.06
	2: 5.407	34.392	40.97
	Xb: 6.134	39.872	50.01
Lt: 9.60 mm [N=5]			
Ls: 2.5 μm			
VB: $\pm 250 \mu\text{m}$			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

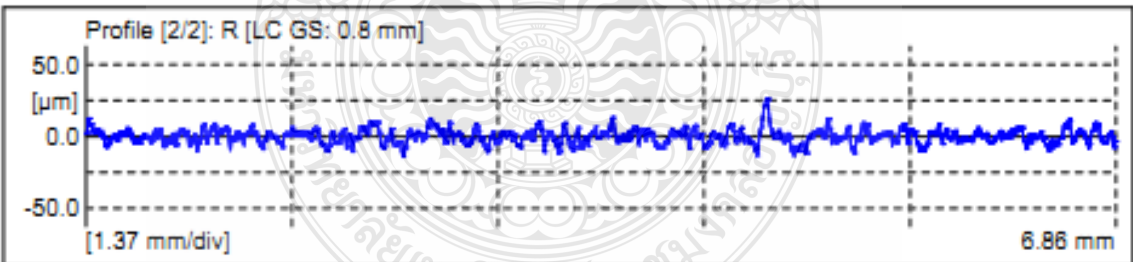
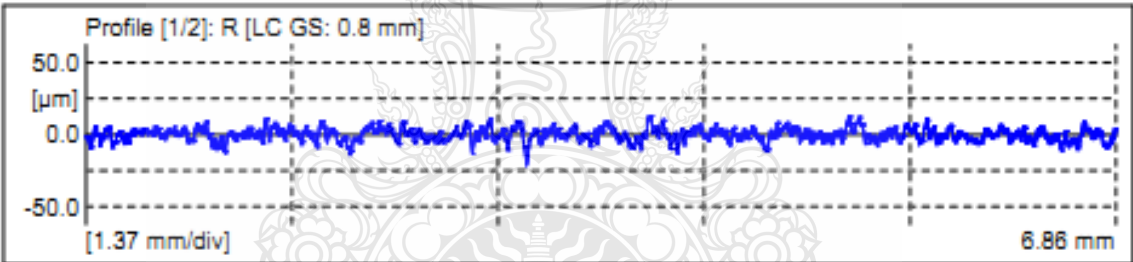


Mean Values		
Ra	6.13	μm
Rz	39.87	μm
Rmax	50.01	μm



 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/08/13
	B.NATTHAPHON 36000-6063-80.prf	

Object: 36,000-6063-80
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	µm	µm	µm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.462	25.814	34.29
	2: 3.791	27.046	39.37
	Xb: 3.626	26.430	36.83
Lt: 9.60 mm [N=5]			
Ls: 2.5 µm			
VB: ±250 µm			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

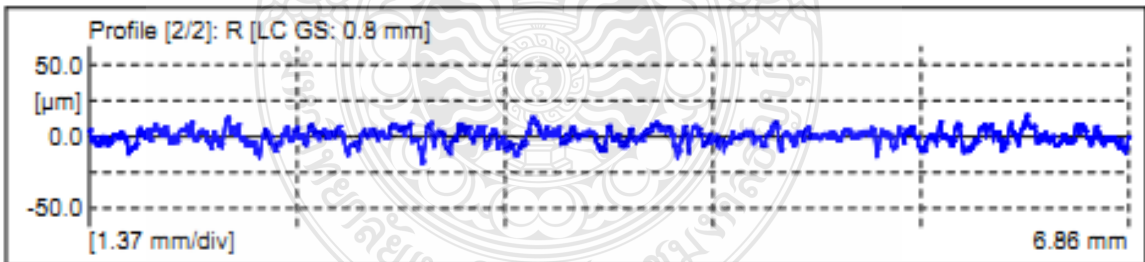
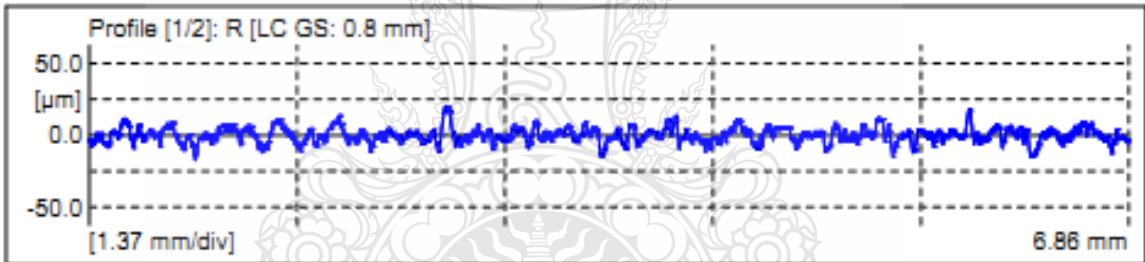


Mean Values	
Ra	3.63 µm
Rz	26.43 µm
Rmax	36.83 µm



 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/08/13
	B.NATTAPHON 36000-6063-120.prf	

Object:	36.000-6063-120
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFV-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	4.021	29.468	33.27
Lt:	9.60 mm [N=5]	2:	3.988	27.171	28.75
Ls:	2.5 μm	Xb:	4.005	28.319	31.01
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$				
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				

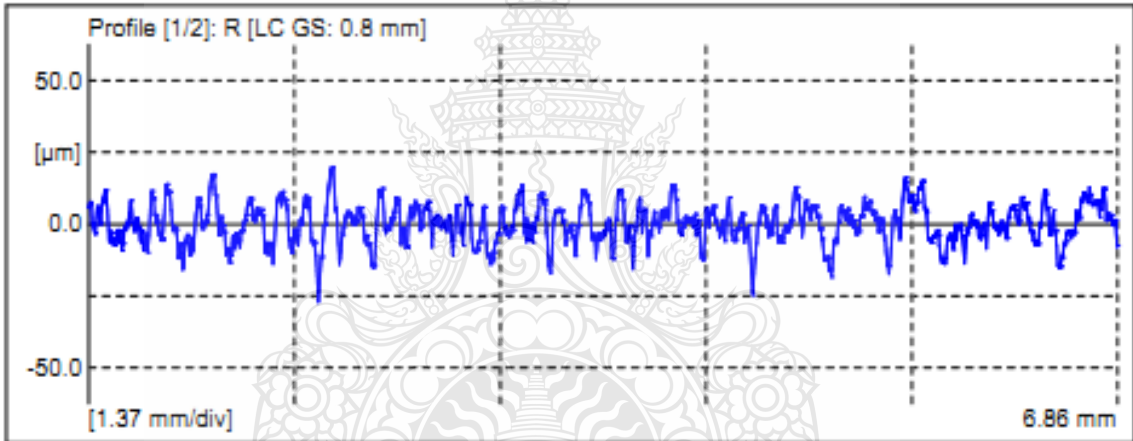


Mean Values	
Ra	4.00 μm
Rz	28.32 μm
Rmax	31.01 μm



 <p>MarSurf XCR 20 V1.20-4</p>	<p>DMAC/KMUTNB</p> <p>B.NATTAPHON 36000-7075-60.prf</p>	 <p>06/07/13</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------

Object: 36,000-7075-60
Number:
Comment:

<p>Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board Drive Unit: GD 25 Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]</p>	<p>Lt: 9.60 mm [N=5] Ls: 2.5 µm VB: ±250 µm Vt: 0.50 mm/s Points: 38400 [2]</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------

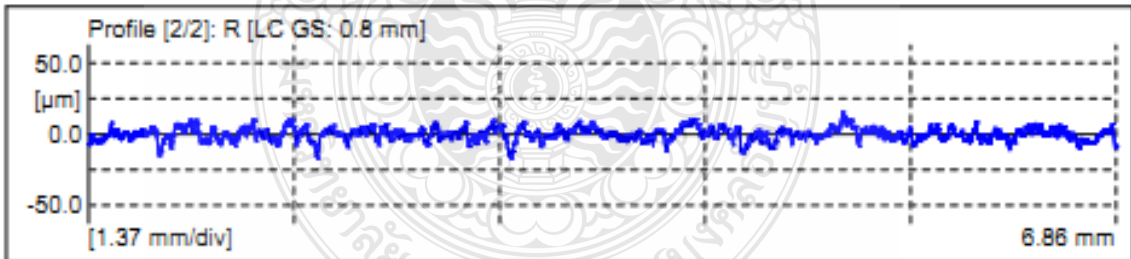
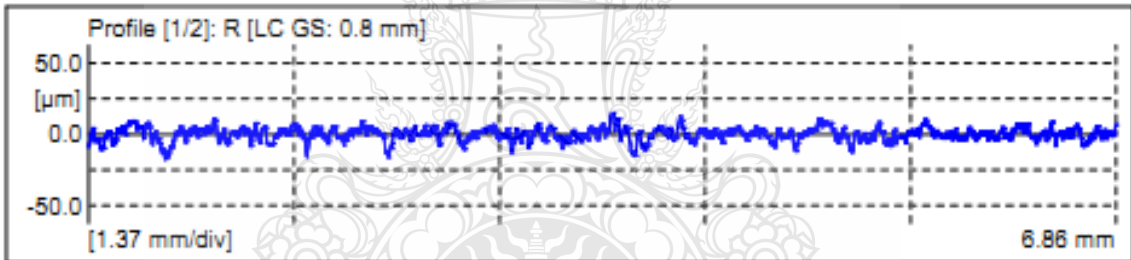


Profile [1/2]: R [LC GS: 0.8 mm]	
Ra	5.352 µm
Rz	36.363 µm
Profile [2/2]: R [LC GS: 0.8 mm]	
Ra	6.237 µm
Rz	41.839 µm



 Mahr MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/08/13
	B.NATTAPHON 36000-7075-80.prf	

Object: 36,000-7075-80
 Number:
 Comment:

Meas. Instrum.: Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax
Drive Unit: GD 25	μm	μm	μm
Pick-up: MFW-250 # 6851804 [9.0 %]	1: 3.557	25.163	30.17
	2: 3.463	25.366	28.29
	Xb: 3.510	25.264	29.23
Lt: 9.60 mm [N=5]			
Ls: 2.5 μm			
VB: $\pm 250 \mu\text{m}$			
Vt: 0.50 mm/s			
Points: 38400 [2]			

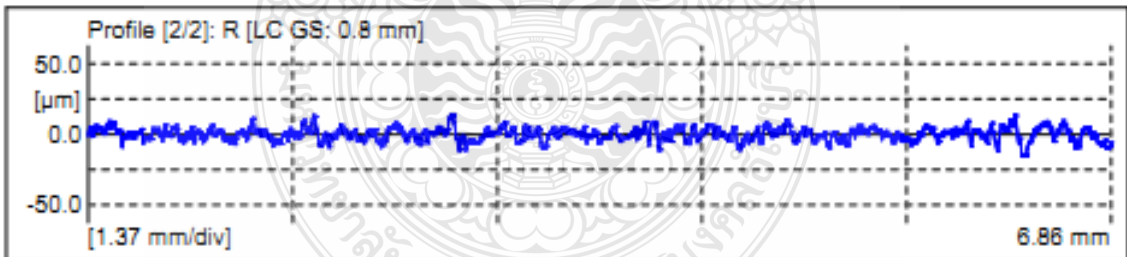
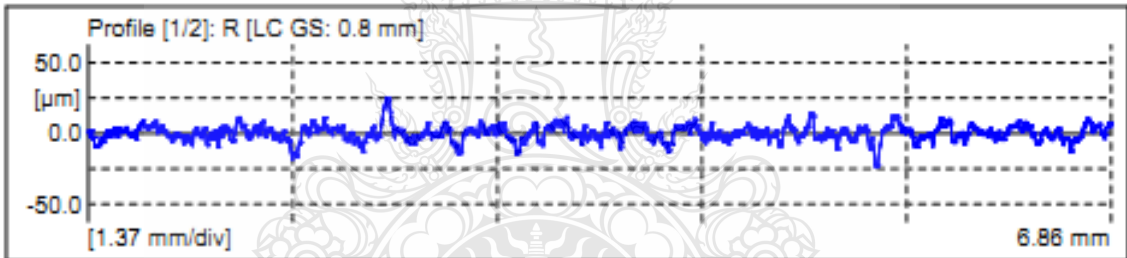


Mean Values	
Ra	3.51 μm
Rz	25.26 μm
Rmax	29.23 μm

 MarSurf XCR 20 V1.20-4	DMAC/KMUTNB	 06/08/13
	B.NATTHAPHON 36000-7075-120.prf	

Object:	36,000-7075-120
Number:	
Comment:	

Meas. Instrum.:	Mahr Data Acquisition Board	Ra	Rz	Rmax	
Drive Unit:	GD 25	μm	μm	μm	
Pick-up:	MFV-250 # 6851804 [9.0 %]	1:	4.153	31.857	41.27
		2:	3.542	23.697	29.80
		Xb:	3.847	27.777	35.53
Lt:	9.60 mm [N=5]				
Le:	2.5 μm				
VB:	$\pm 250 \mu\text{m}$				
Vt:	0.50 mm/s				
Points:	38400 [2]				



Mean Values	
Ra	3.85 μm
Rz	27.78 μm
Rmax	35.53 μm

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองค่าความฉกฉวยงาน



ตาราง ข.1 ผลการวัดค่าความหนาของชิ้นงานที่แรงดัน 100 MPa จำนวน 27 ชิ้น

100 Mpa									
60			80			120			
ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย	ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย	ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย	
AA6061	0.20	0.22	0.21	0.26	0.23	0.25	0.44	0.20	0.18
	0.21	0.12	0.17	0.22	0.26	0.24	0.20	0.35	0.28
	0.20	0.10	0.15	0.25	0.24	0.25	0.44	0.30	0.37
	เฉลี่ย		0.18	เฉลี่ย		0.24	เฉลี่ย		0.28
AA6063	0.25	0.18	0.22	0.41	0.25	0.25	0.38	0.36	0.37
	0.13	0.25	0.19	0.41	0.24	0.26	0.42	0.34	0.38
	0.19	0.28	0.24	0.39	0.23	0.25	0.34	0.30	0.32
	เฉลี่ย		0.21	เฉลี่ย		0.25	เฉลี่ย		0.36
AA7075	0.33	0.29	0.31	0.32	0.30	0.31	0.42	0.44	0.43
	0.22	0.12	0.17	0.31	0.31	0.31	0.40	0.45	0.43
	0.26	0.21	0.24	0.34	0.31	0.33	0.47	0.48	0.48
	เฉลี่ย		0.24	เฉลี่ย		0.32	เฉลี่ย		0.44

ตาราง ข.2 ผลการวัดค่าความหนาของชิ้นงานที่แรงดัน 175 MPa จำนวน 27 ชิ้น

175 Mpa									
60			80			120			
ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย	ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย	ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย	
AA6061	0.10	0.13	0.12	0.34	0.22	0.28	0.26	0.24	0.25
	0.18	0.30	0.24	0.21	0.27	0.24	0.22	0.28	0.25
	0.18	0.22	0.20	0.22	0.20	0.21	0.21	0.35	0.28
	เฉลี่ย		0.19	เฉลี่ย		0.22	เฉลี่ย		0.24
AA6063	0.11	0.19	0.15	0.29	0.30	0.30	0.27	0.31	0.29
	0.20	0.22	0.21	0.34	0.24	0.29	0.25	0.25	0.25
	0.21	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.25	0.25	0.25
	เฉลี่ย		0.19	เฉลี่ย		0.26	เฉลี่ย		0.26
AA7075	0.20	0.23	0.22	0.33	0.41	0.37	0.25	0.33	0.29
	0.17	0.26	0.22	0.35	0.33	0.34	0.21	0.27	0.34
	0.18	0.26	0.22	0.42	0.40	0.41	0.28	0.28	0.28
	เฉลี่ย		0.22	เฉลี่ย		0.27	เฉลี่ย		0.30

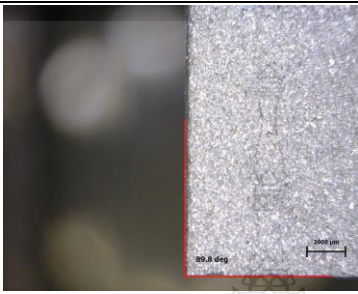
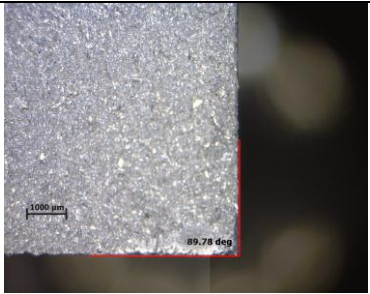
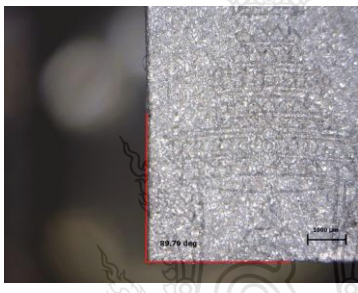
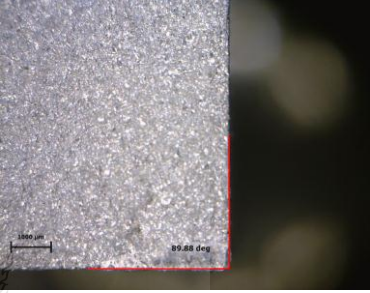
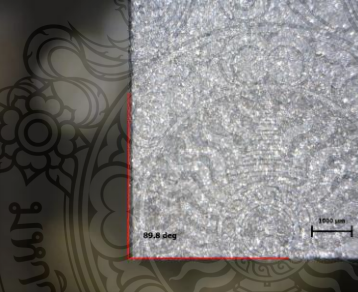

ตาราง ข.3 ผลการวัดค่าความหนาของชิ้นงานที่แรงดัน 250 MPa จำนวน 27 ชิ้น

		250 Mpa								
		60			80			120		
		ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย	ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย	ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย
AA6061		0.09	0.08	0.09	0.14	0.15	0.15	0.10	0.15	0.13
		0.11	0.06	0.09	0.19	0.20	0.20	0.15	0.14	0.15
		0.11	0.12	0.12	0.20	0.27	0.24	0.16	0.15	0.16
		เฉลี่ย		0.10	เฉลี่ย		0.14	เฉลี่ย		0.14
AA6063		0.08	0.12	0.10	0.15	0.24	0.20	0.18	0.18	0.18
		0.06	0.14	0.10	0.12	0.23	0.18	0.15	0.29	0.22
		0.06	0.12	0.09	0.15	0.13	0.14	0.21	0.27	0.24
		เฉลี่ย		0.11	เฉลี่ย		0.17	เฉลี่ย		0.21
AA7075		0.10	0.12	0.11	0.27	0.25	0.26	0.15	0.29	0.22
		0.19	0.24	0.22	0.15	0.25	0.20	0.24	0.25	0.25
		0.21	0.25	0.23	0.21	0.12	0.17	0.20	0.29	0.25
		เฉลี่ย		0.19	เฉลี่ย		0.21	เฉลี่ย		0.24

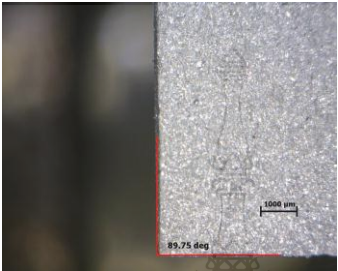
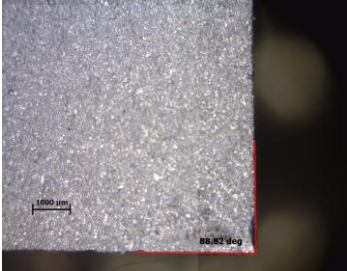


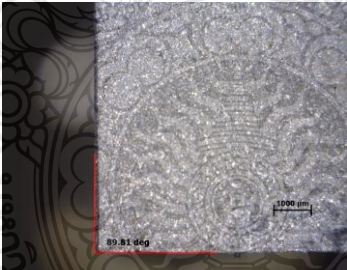
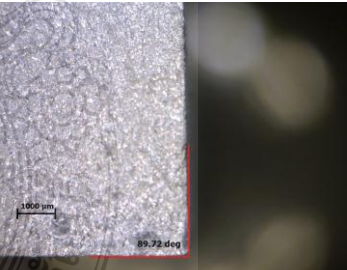
ภาคผนวก ค
ภาพถ่ายการวัดค่าความฉากของชิ้นงาน



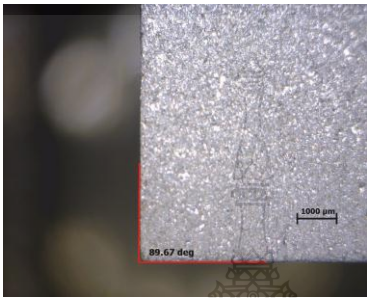
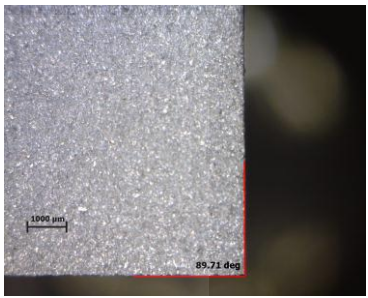
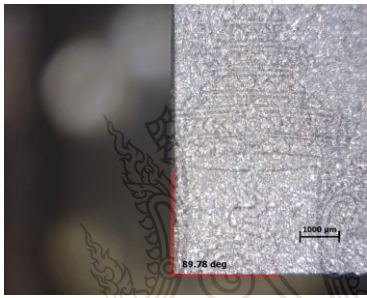
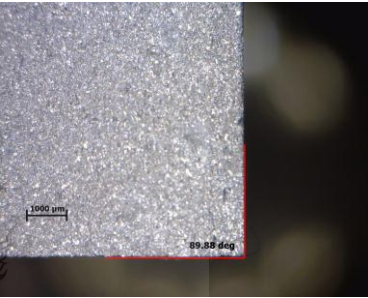
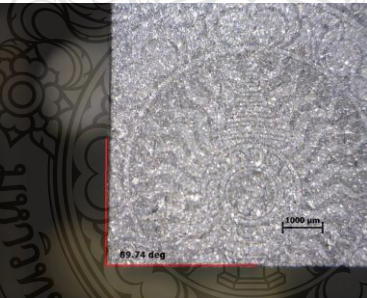
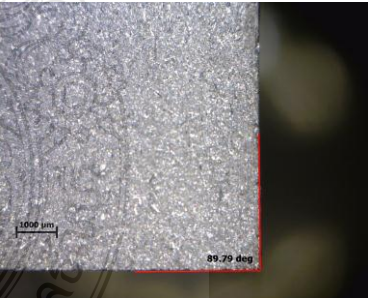
ตาราง ค.1 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6061		
2	60	6061		
3	60	6061		

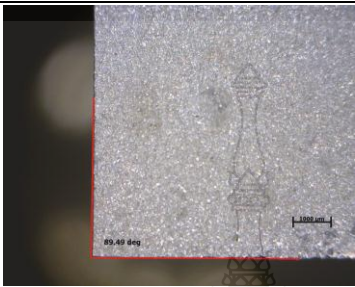
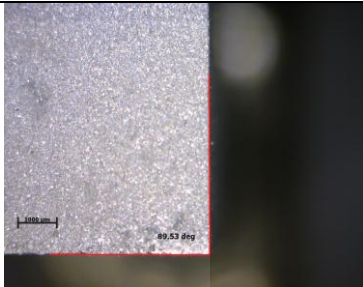

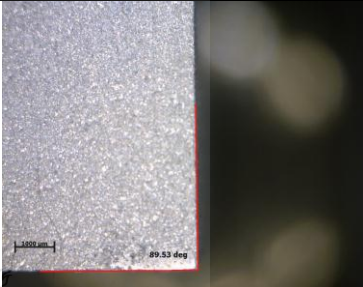

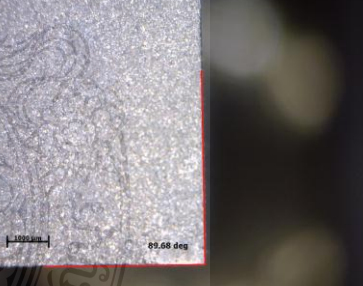
ตาราง ค.2 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6063		
2	60	6063		
3	60	6063		

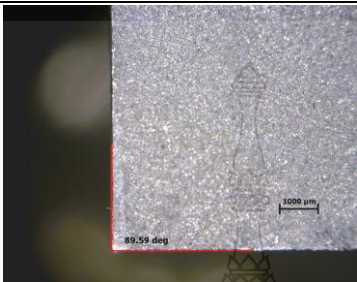
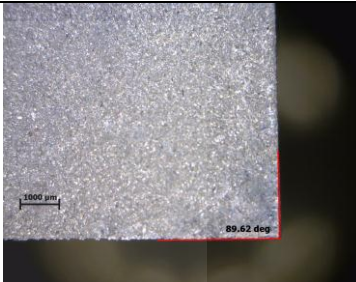

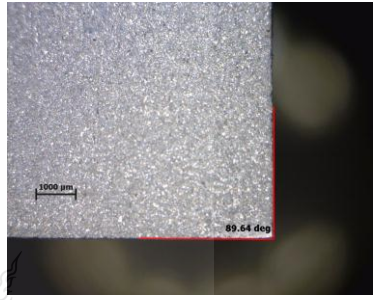
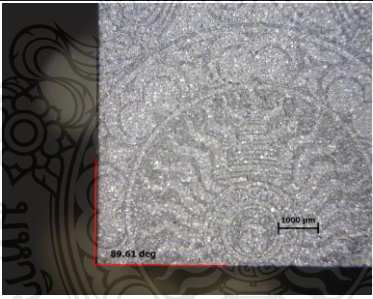
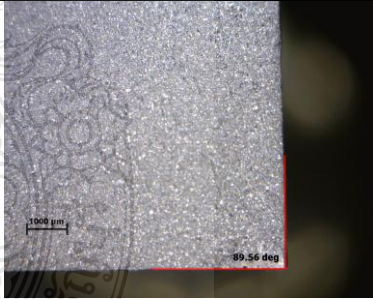
ตาราง ค.3 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชิ้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	7075		
2	60	7075		
3	60	7075		

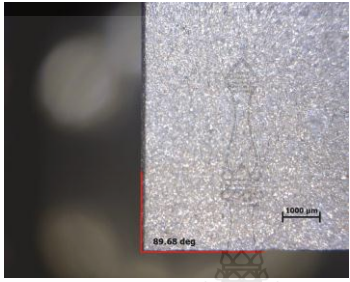
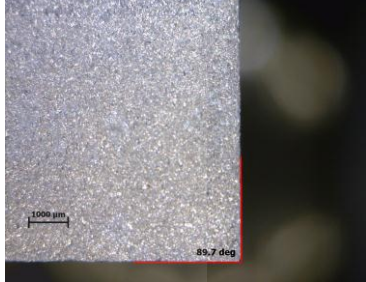

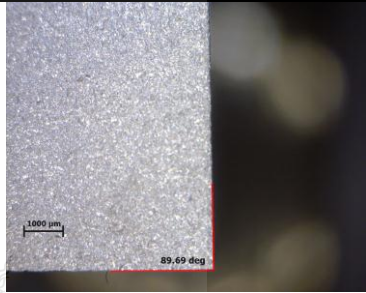
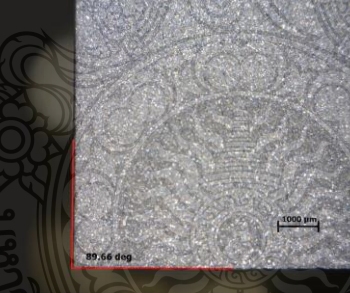
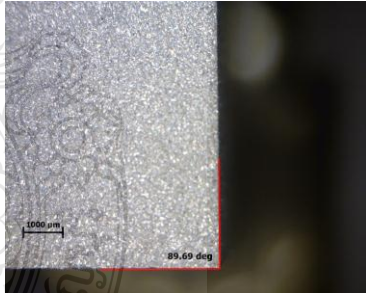
ตาราง ค.4 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	6061		
2	80	6061		
3	80	6061		

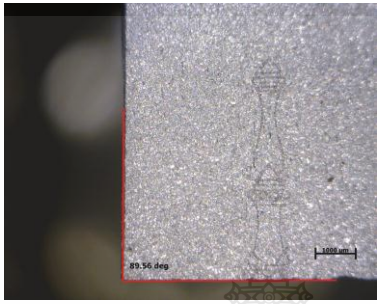
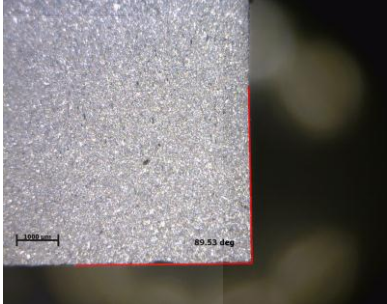
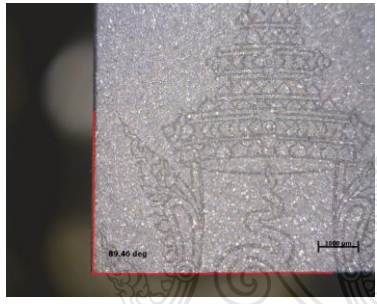
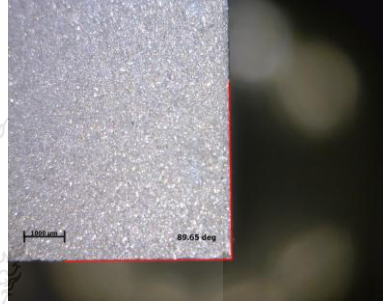
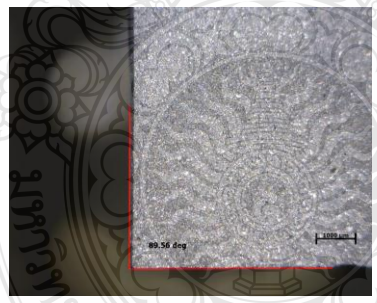
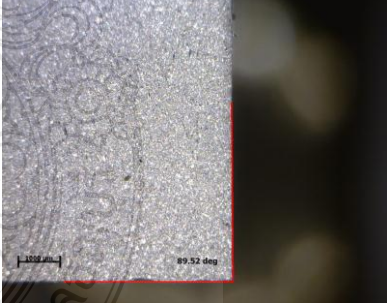
ตาราง ค.5 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	6063		
2	80	6063		
3	80	6063		


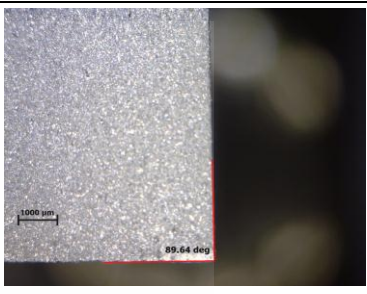
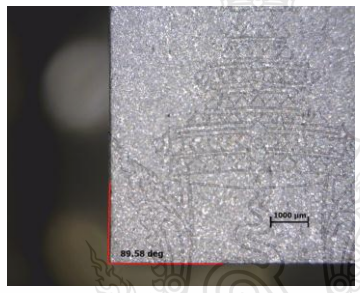
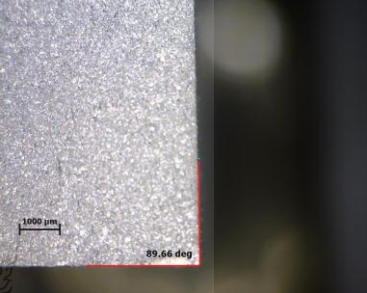

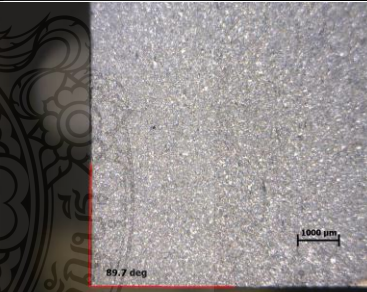
ตาราง ค.6 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชิ้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	7075		
2	80	7075		
3	80	7075		

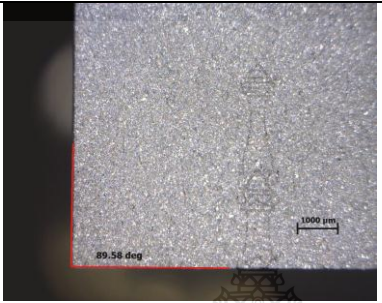
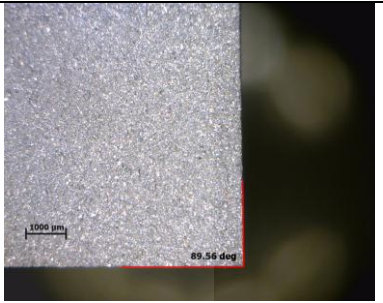

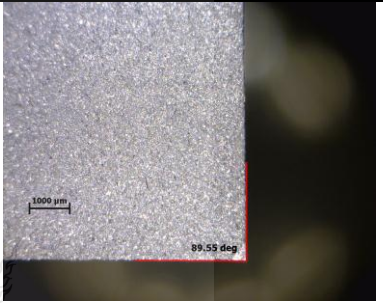
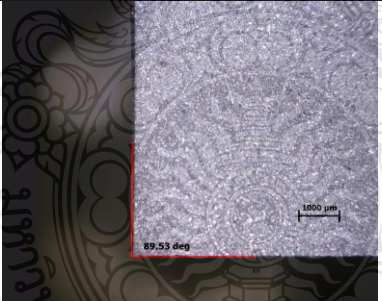
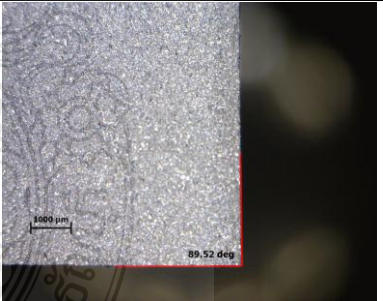
ตาราง ค.7 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	6061		
2	120	6061		
3	120	6061		

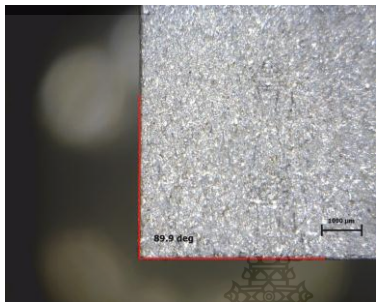
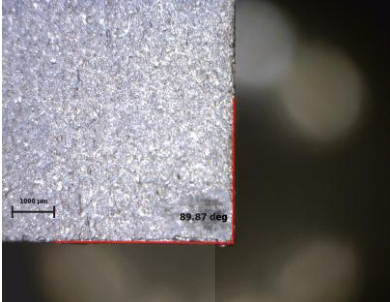

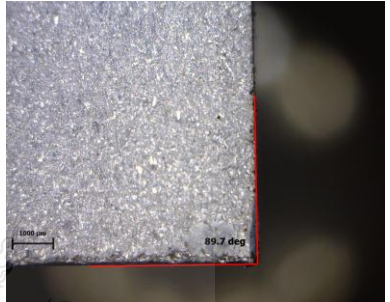

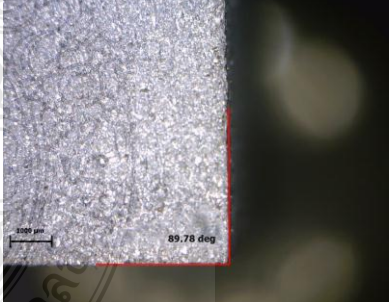
ตาราง ค.8 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	6063		
2	120	6063		
3	120	6063		

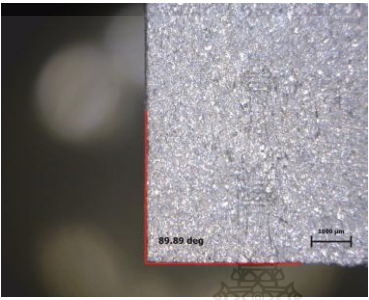
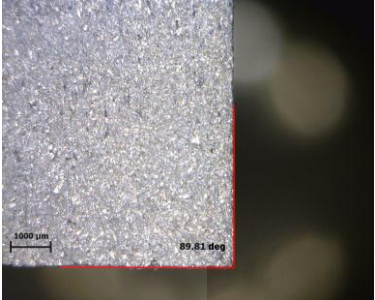

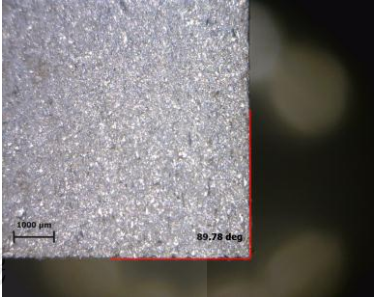
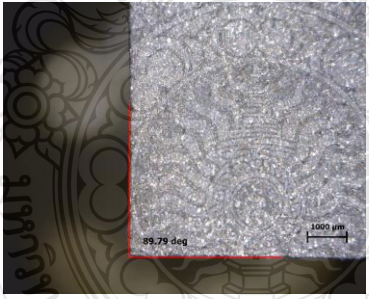

ตาราง ค.9 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	7075		
2	120	7075		
3	120	7075		

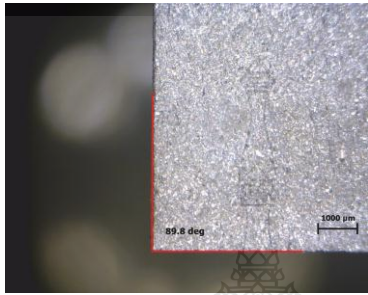
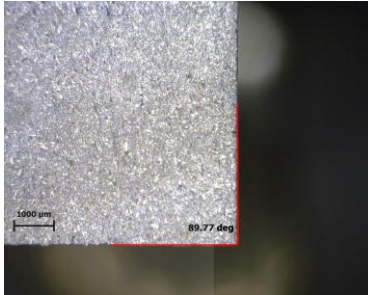
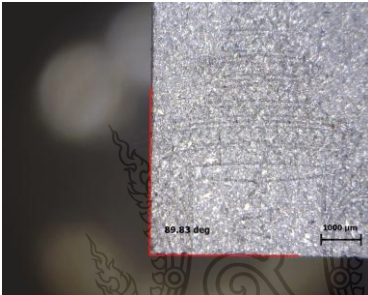
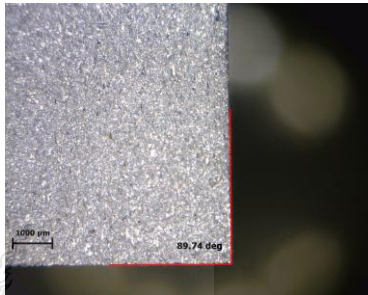
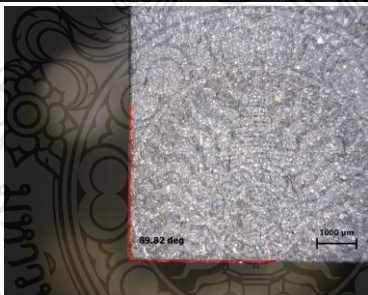
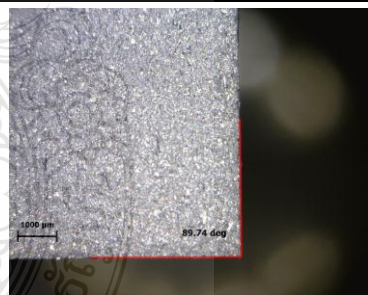
ตาราง ค.10 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6061		
2	60	6061		
3	60	6061		

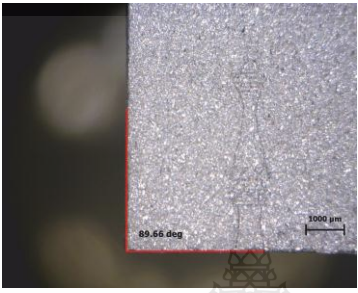
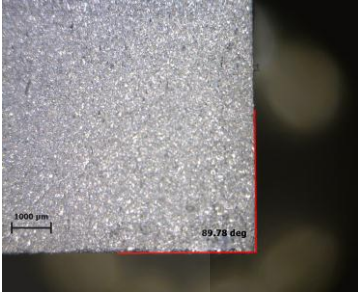
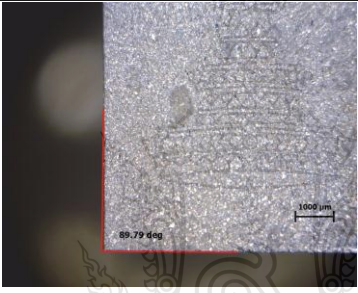
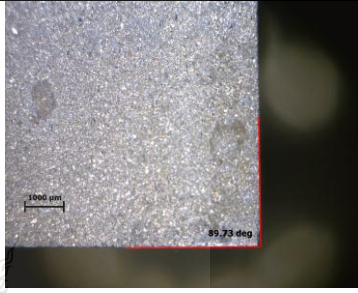
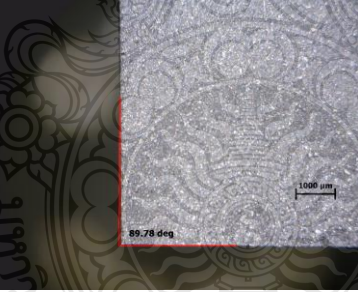
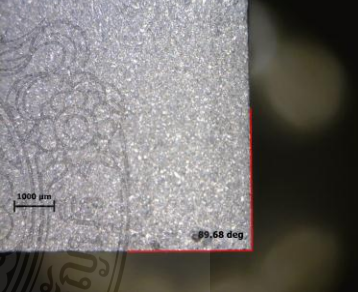
ตาราง ค.11 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6063		
2	60	6063		
3	60	6063		

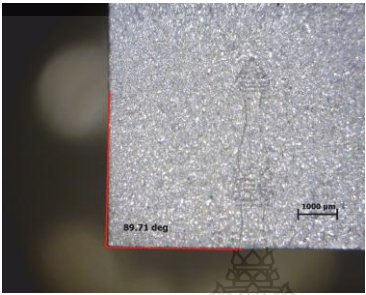
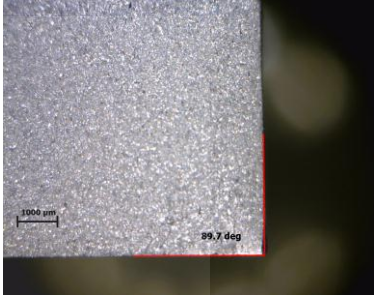

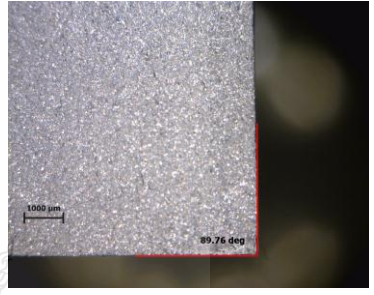
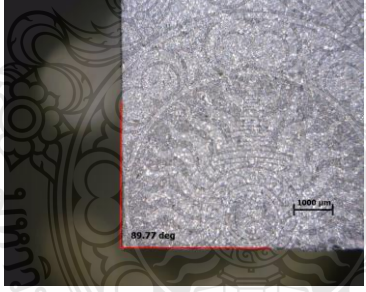
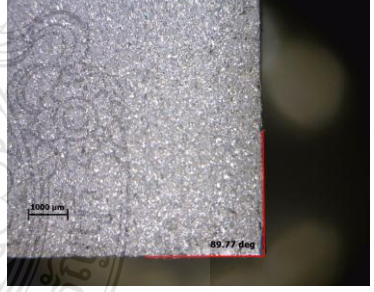
ตาราง ค.12 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	7075		
2	60	7075		
3	60	7075		

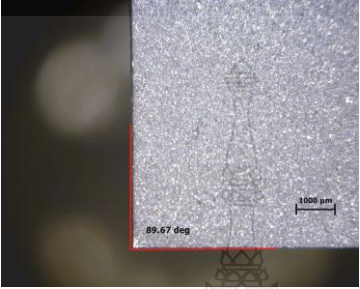

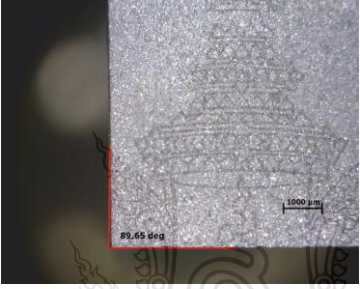
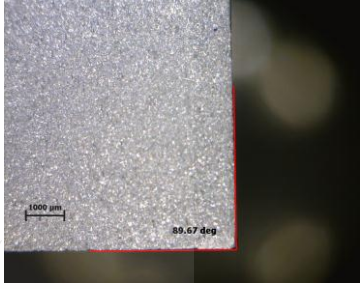
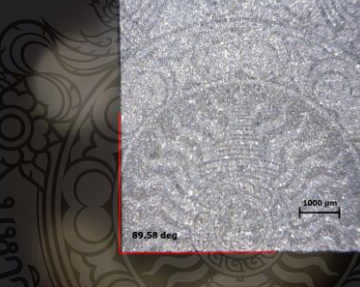
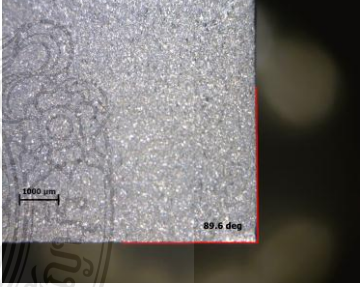
ตาราง ค.13 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	6061		
2	80	6061		
3	80	6061		

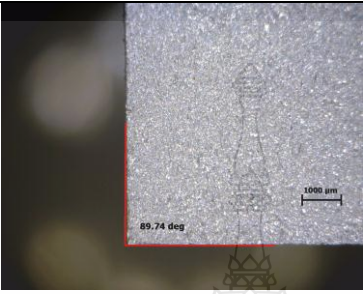
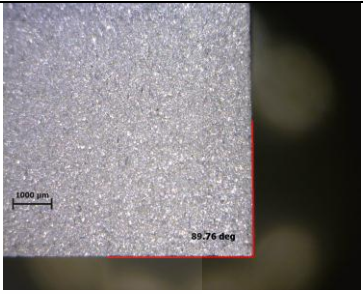

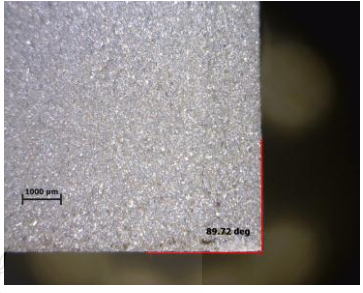
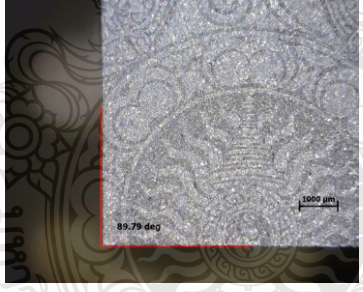
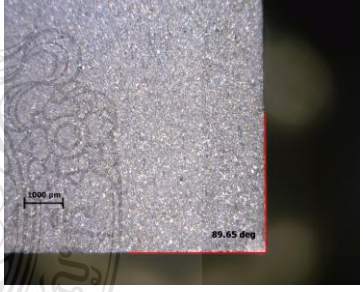
ตาราง ค.14 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	6063		
2	80	6063		
3	80	6063		

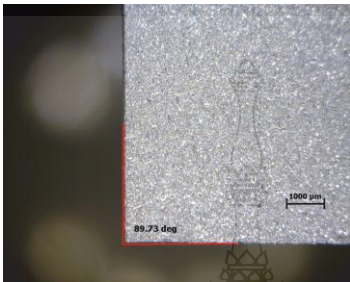
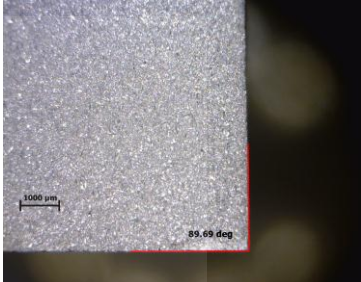

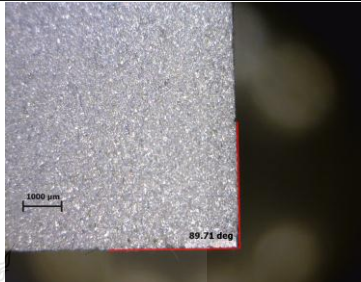

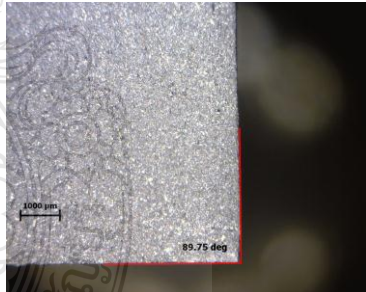
ตาราง ค.15 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	7075		
2	80	7075		
3	80	7075		

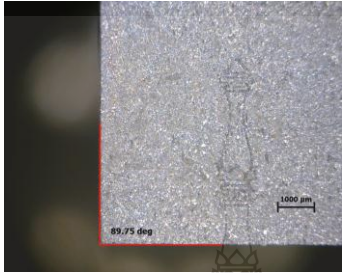
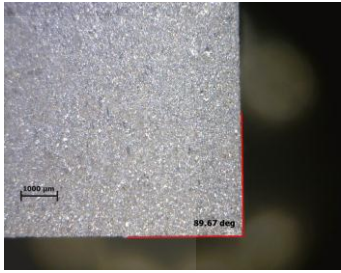
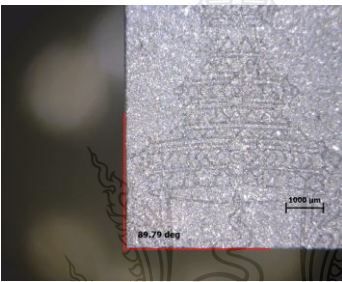
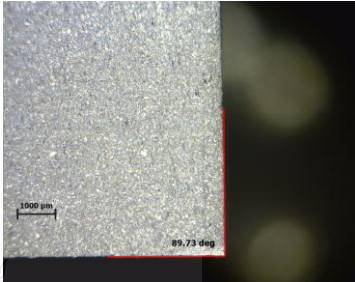
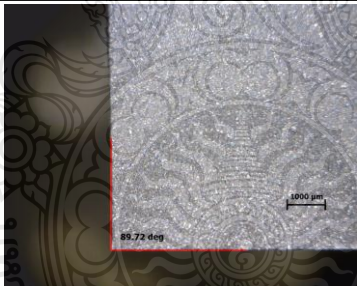
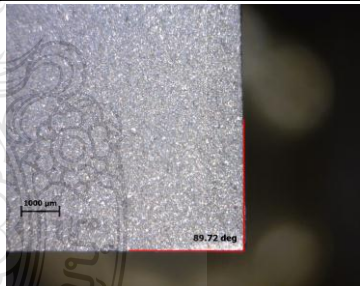
ตาราง ค.16 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	6061		
2	120	6061		
3	120	6061		

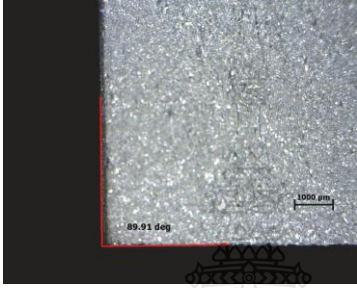
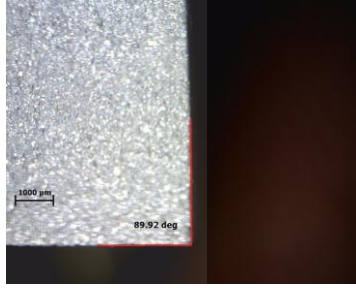
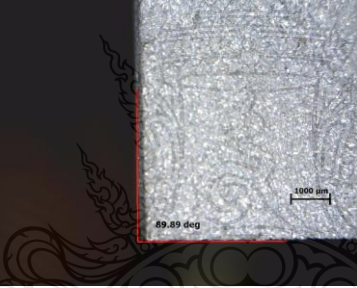


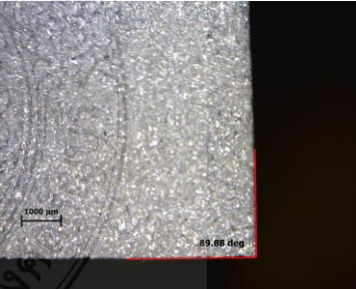
ตาราง ค.17 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	6063		
2	120	6063		
3	120	6063		

ตาราง ค.18 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	7075		
2	120	7075		
3	120	7075		

ตาราง ค.19 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 250 MPa

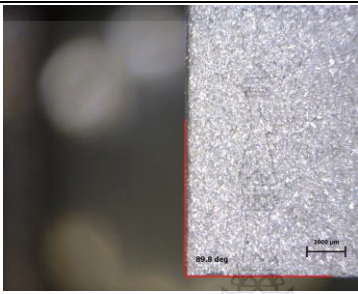
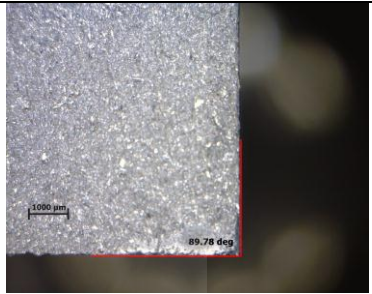

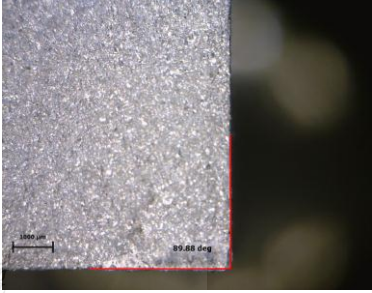
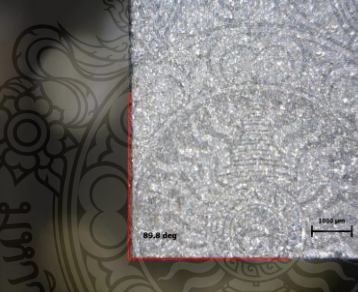
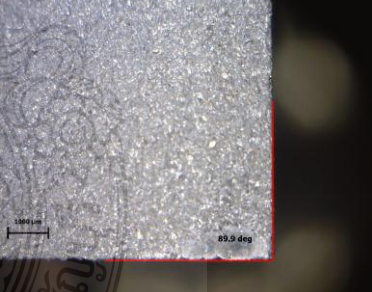
ชิ้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6061		
2	60	6061		
3	60	6061		



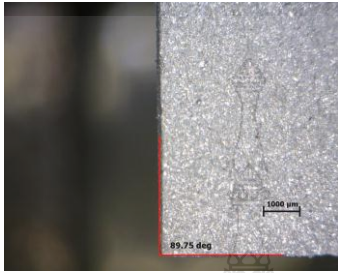
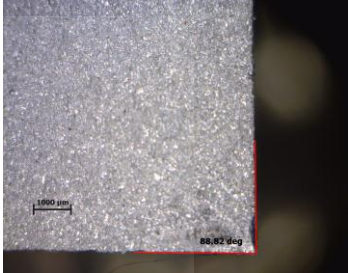
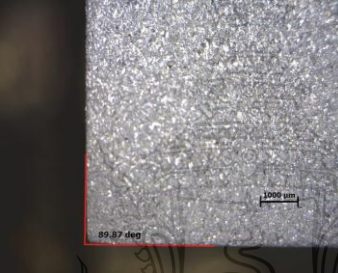
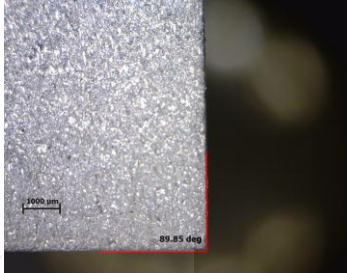
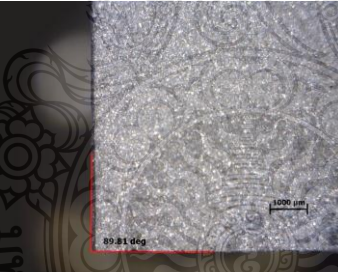
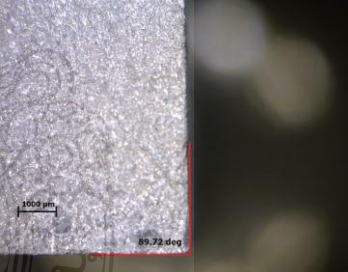
ภาคผนวก ค

ภาพถ่ายการวัดค่าความฉากของชิ้นงาน

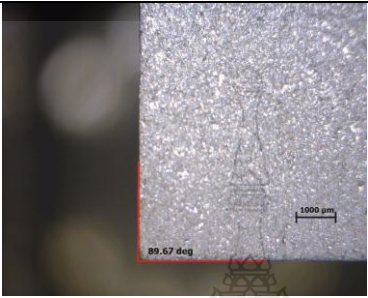
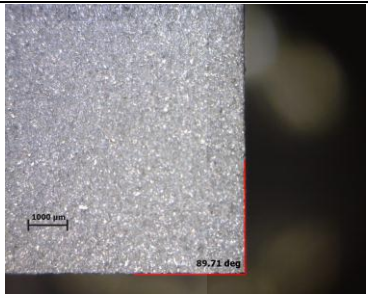
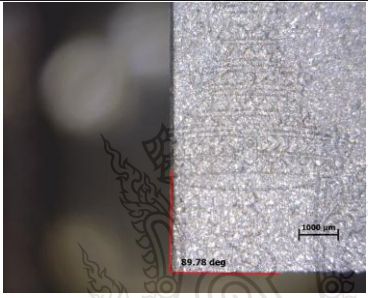
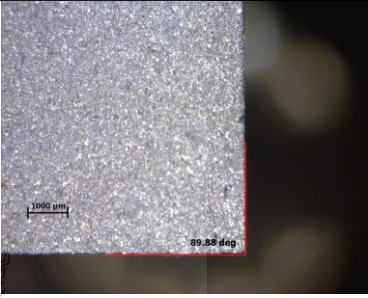
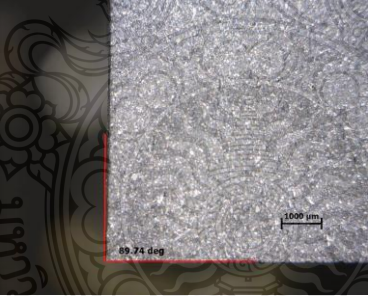
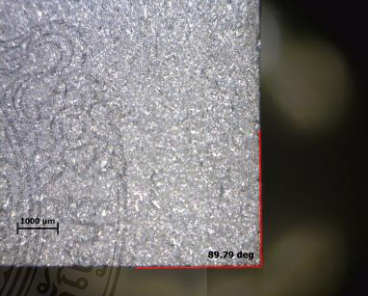
ตาราง ค.1 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชิ้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6061		
2	60	6061		
3	60	6061		

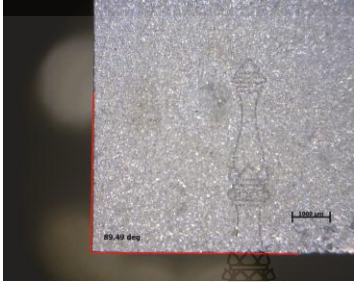
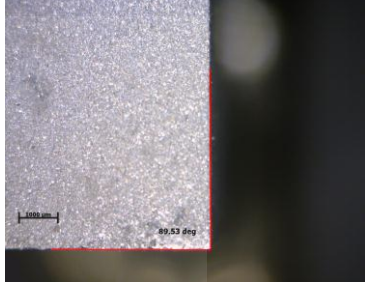

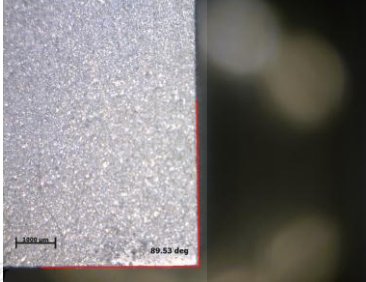

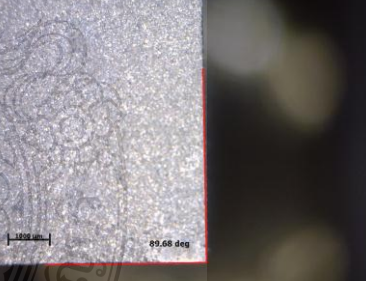
ตาราง ค.2 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6063		
2	60	6063		
3	60	6063		

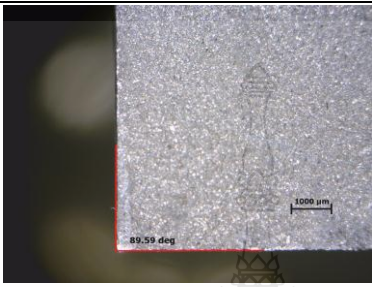
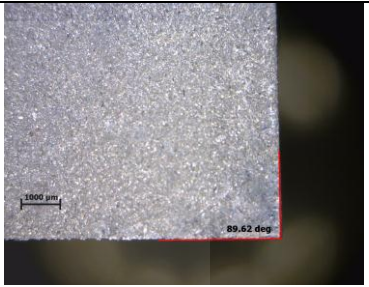
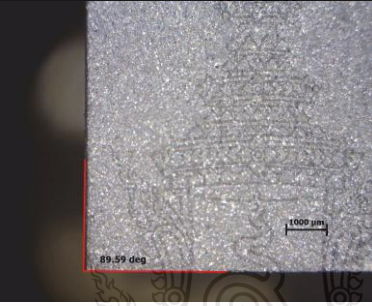
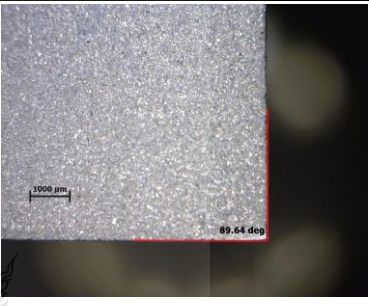
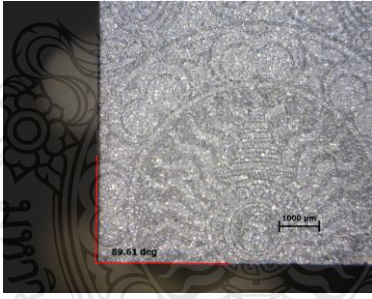

ตาราง ค.3 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	7075		
2	60	7075		
3	60	7075		

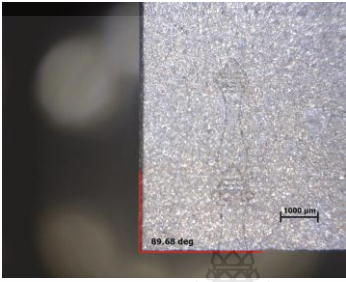
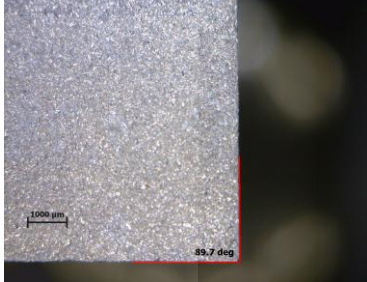

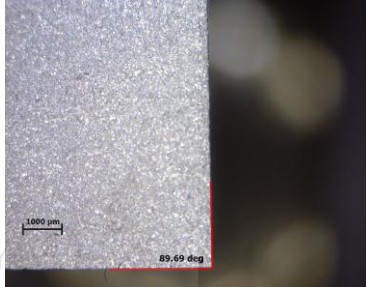
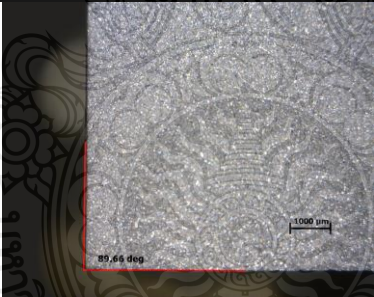
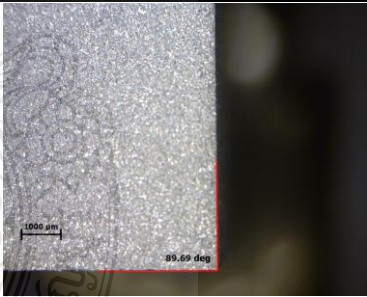
ตาราง ค.4 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	6061		
2	80	6061		
3	80	6061		

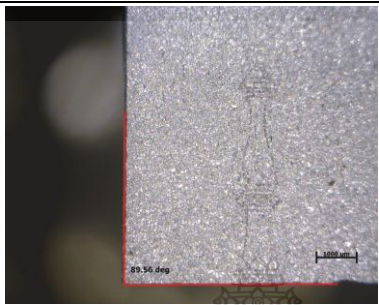
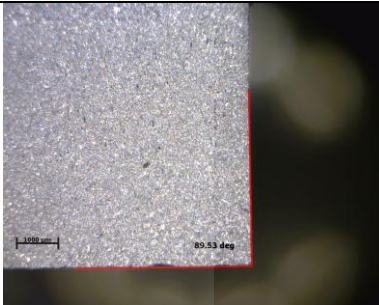
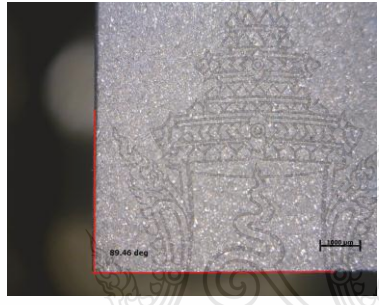
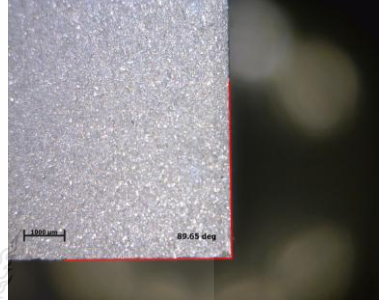

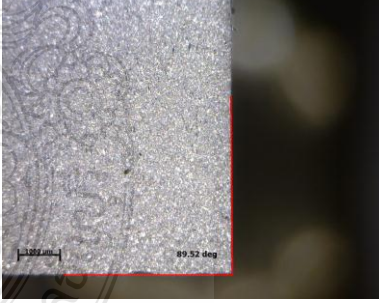
ตาราง ค.5 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชิ้นที่	ขนาดสารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	6063		
2	80	6063		
3	80	6063		

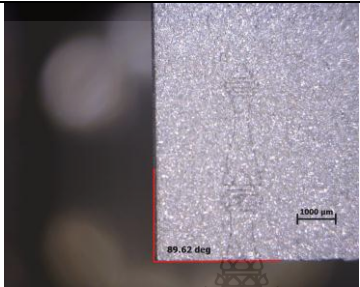
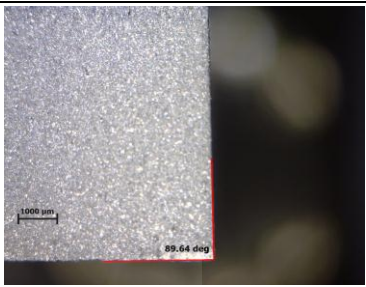
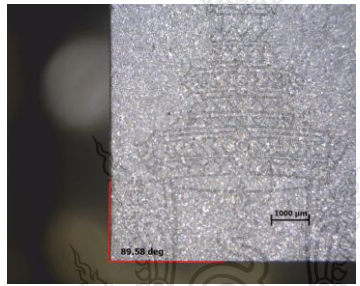
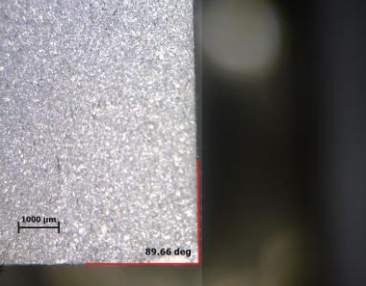

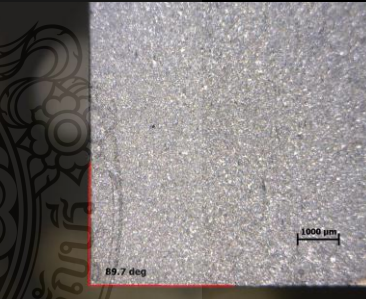
ตาราง ค.6 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	7075		
2	80	7075		
3	80	7075		

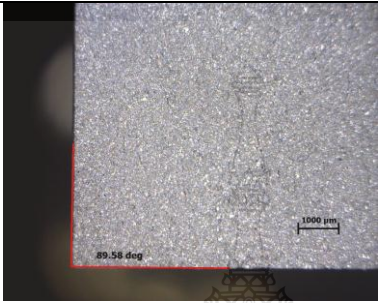
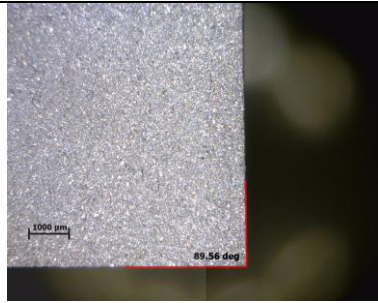

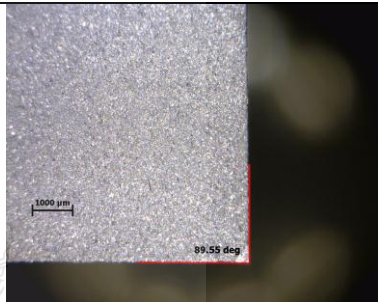
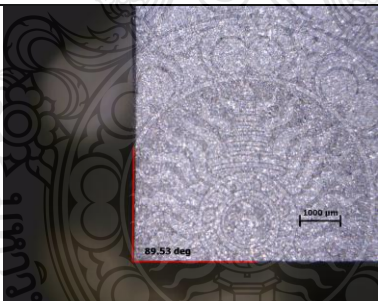
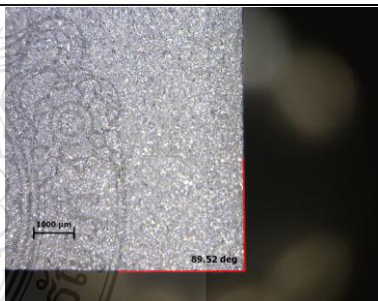
ตาราง ค.7 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	6061		
2	120	6061		
3	120	6061		

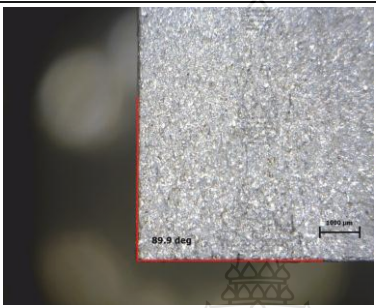
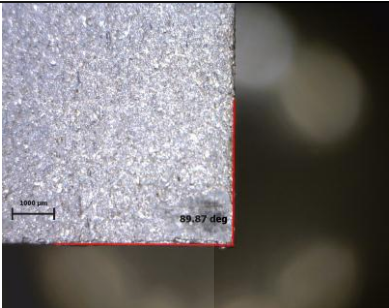

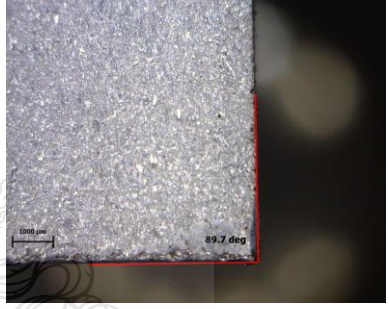
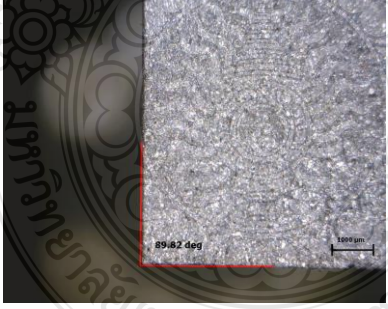
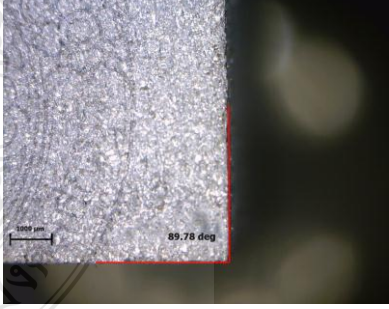
ตาราง ค.8 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้นที่	ขนาดสารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	6063		
2	120	6063		
3	120	6063		

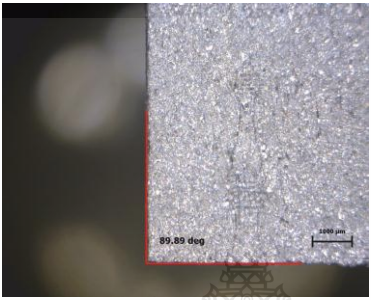
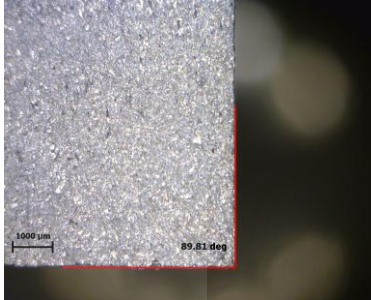

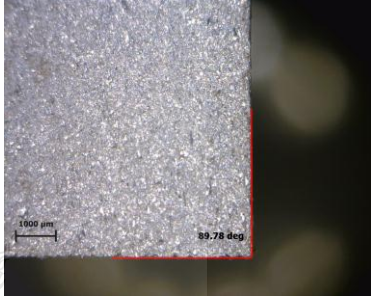
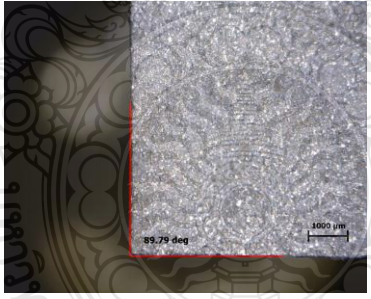

ตาราง ค.9 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 100 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	7075		
2	120	7075		
3	120	7075		


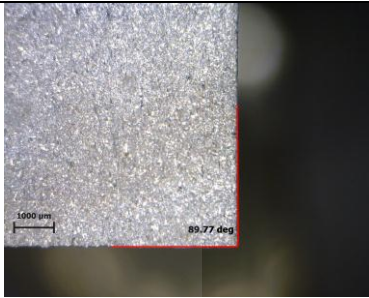
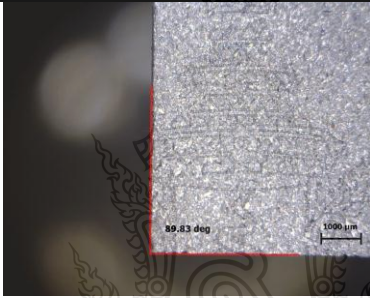
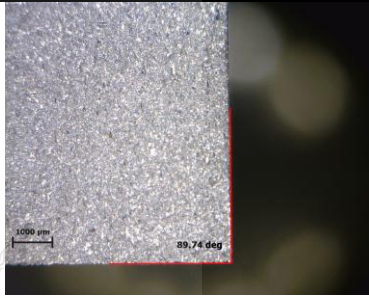
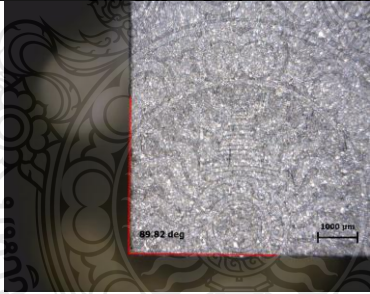
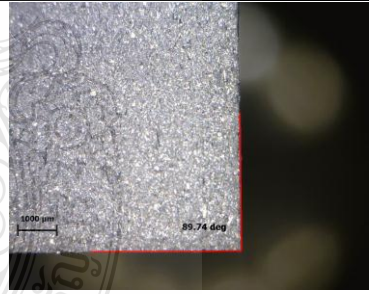
ตาราง ค.10 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6061		
2	60	6061		
3	60	6061		

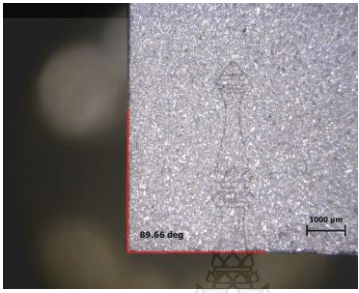
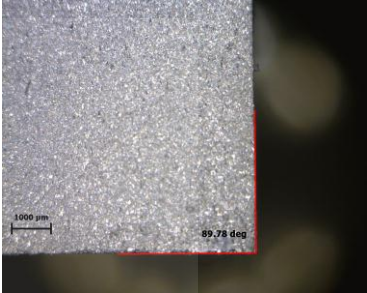
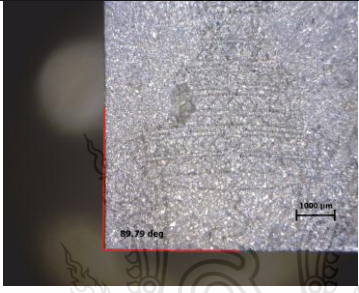
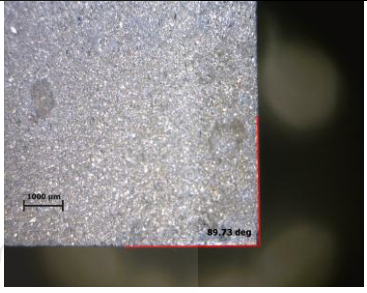

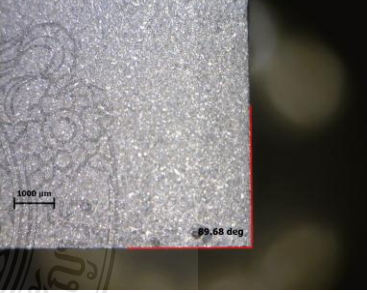
ตาราง ค.11 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6063		
2	60	6063		
3	60	6063		

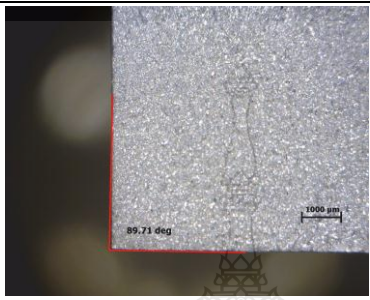
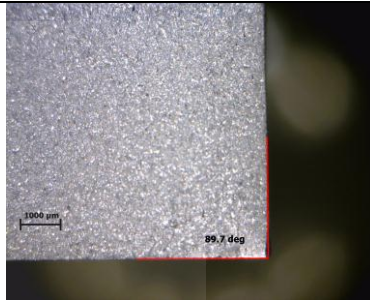
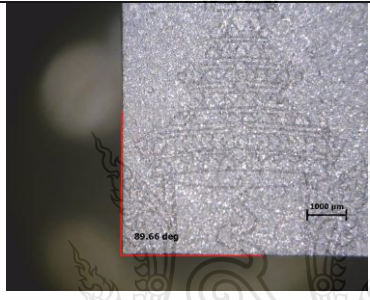
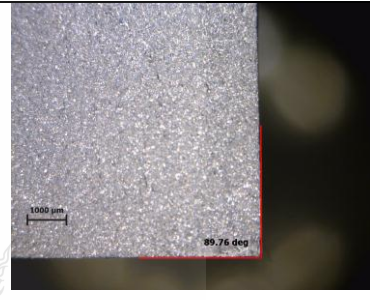
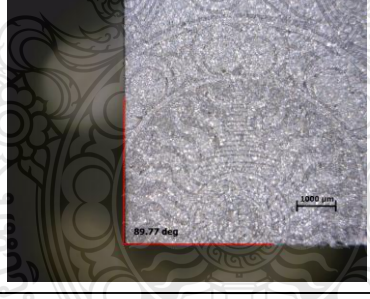
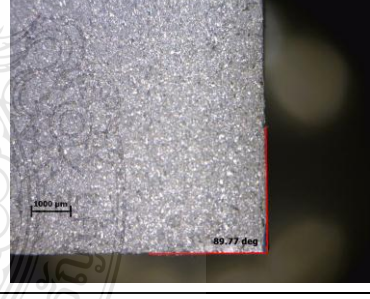
ตาราง ค.12 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้นที่	ขนาดสารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	7075		
2	60	7075		
3	60	7075		

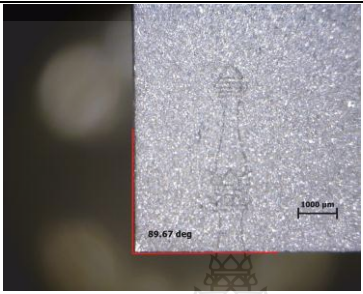
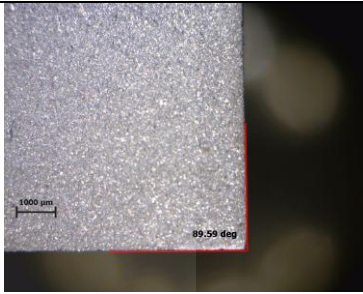

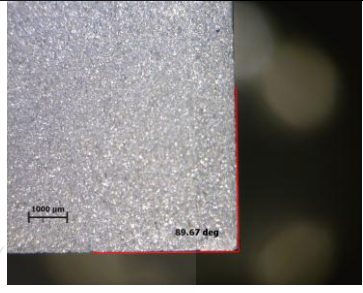


ตาราง ค.13 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	6061		
2	80	6061		
3	80	6061		

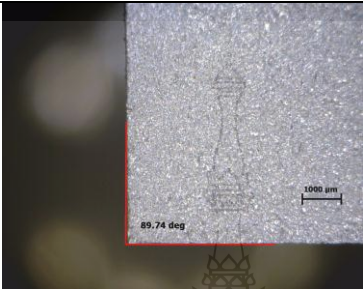
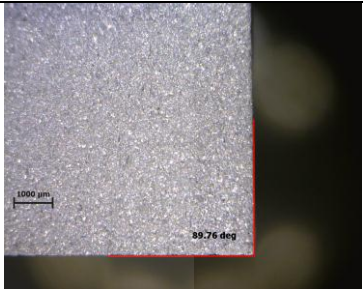

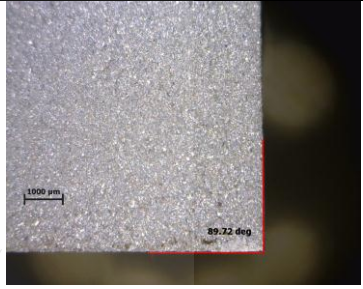

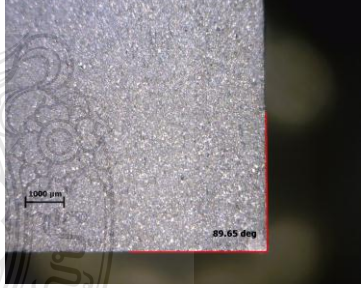
ตาราง ค.14 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	6063		
2	80	6063		
3	80	6063		

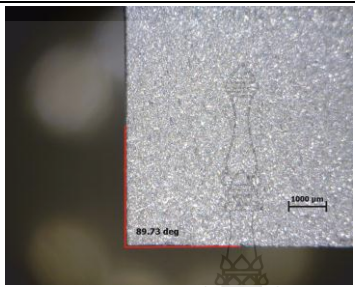
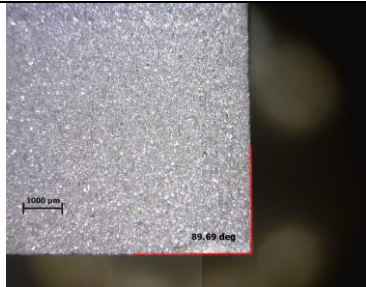
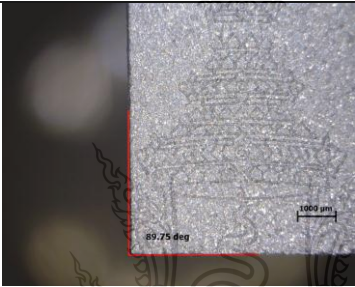
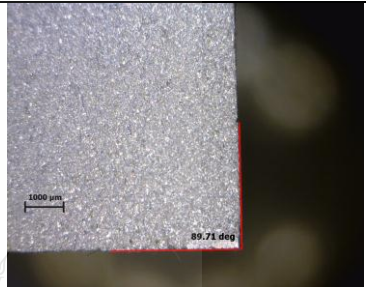

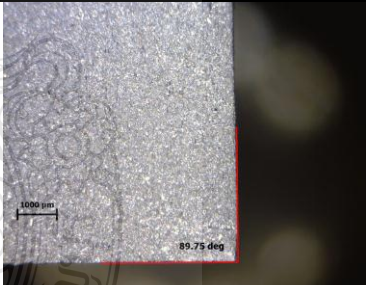
ตาราง ค.15 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	80	7075		
2	80	7075		
3	80	7075		

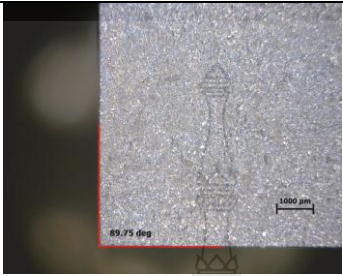
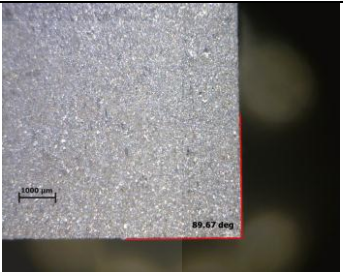

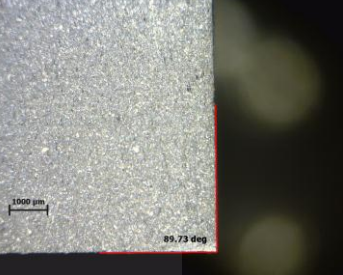

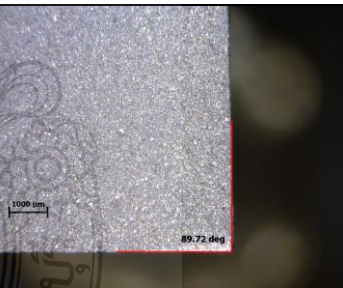
ตาราง ค.16 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	6061		
2	120	6061		
3	120	6061		

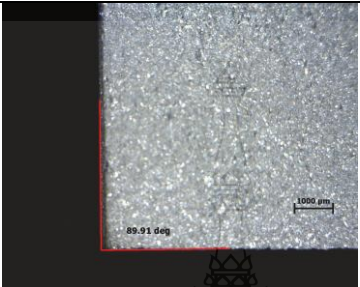
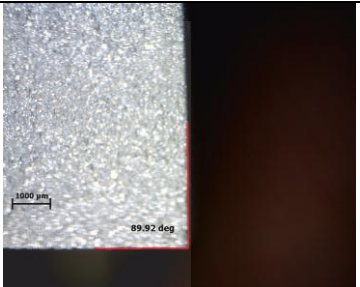

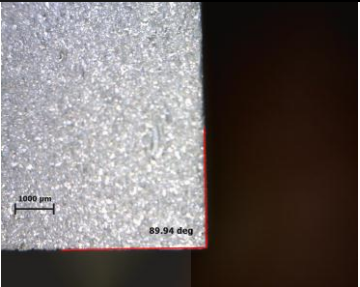

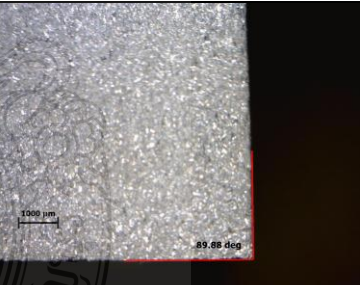
ตาราง ค.17 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	6063		
2	120	6063		
3	120	6063		

ตาราง ค.18 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 175 MPa

ชิ้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	120	7075		
2	120	7075		
3	120	7075		

ตาราง ค.19 การวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำ 250 MPa

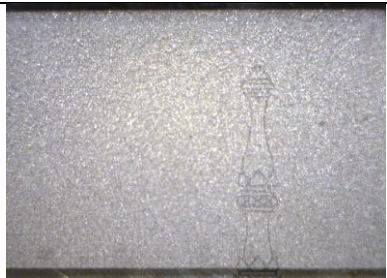





ชิ้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	60	6061		
2	60	6061		
3	60	6061		



ภาคผนวก ง







ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด

ตาราง ง.1 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 100 MPa สารขัด 60 Mesh







ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	60	6061		
2	60	6063		
3	60	7075		

ตาราง ง.1 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 100 MPa สารขัด 80

Mesh (ต่อ)

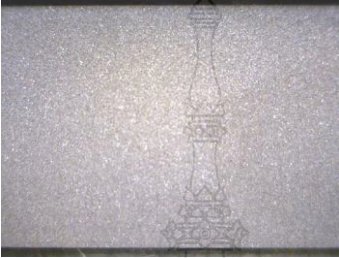





ชั้นที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	80	6061		
2	80	6063		
3	80	7075		

ตาราง ง.1 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 100 MPa สารขัด 120Mesh (ต่อ)







ชิ้นที่	ขนาดสารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	120	6061		
2	120	6063		
3	120	7075		

ตาราง ง. 2 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 175 MPa สารขัด 60

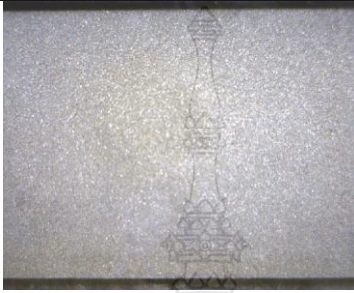





Mesh

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	60	6061		
2	60	6063		
3	60	7075		

ตาราง ง. 2 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 175 MPa สารขัด 80 Mesh (ต่อ)







ชิ้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	80	6061		
2	80	6063		
3	80	7075		

ตาราง ง. 2 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 175 MPa สารขัด 120 Mesh (ต่อ)

ชั้น ที่	ขนาดสาร ขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	120	6061		
2	120	6063		
3	120	7075		







ตาราง ง.3 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 250 MPa สารขัด 60

Mesh







ชิ้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	60	6061		
2	60	6063		
3	60	7075		

ตาราง ง. 3 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 250 MPa สารขัด 80

Mesh (ต่อ)

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	80	6061		
2	80	6063		
3	80	7075		

ตาราง ง. 3 ลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดคลื่นรอยตัด ที่แรงดันน้ำ 250 MPa สารขัด 120 Mesh (ต่อ)

ชั้น ที่	ขนาด สารขัด (Mesh)	วัสดุ	ภาพถ่าย	
			ด้าน 1	ด้าน 2
1	80	6061		
2	80	6063		
3	80	7075		

ภาคผนวก ฉ
ใบรับรองคุณสมบัติต่อคู่มือนิยมผสม





YE FONG ALUMINIUM

No. 12-10, Dongshi, Dong

Taoyuan County 32

Tel: +886-3-4773677 Fax: +886-

LTD.



ye-fong.com

Certificate of Quality

Sold by: Ye Fong Aluminium Industrial Ltd.

Ship to: METAL NETWORKS PTE LTD.

Order No.: MN-81349

Material: 7075-T6

Quantity: 19pcs

Lot No.:10103030009-1

Specification: ASTM B221M-07

No.	Contents	Requirement	Unit								
1	Dimension	Ø63.5X3000	mm								
2	Tensile Strength	≥ 560	Mpa								
3	Yield Strength	≥ 495	Mpa								
4	Elongation	≥ 6	%								
5	Hardness										
6	Chemical Composition										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Max	Other Total	Al
	≤0.40	≤0.50	1.20-2.00	≤0.30	2.10-2.90	0.18-0.28	5.10-6.10	≤0.20	≤0.05	≤0.15	Rem

Actual Measurement

No.	Contents	Measurement	Unit								
1	Dimension	Ø63.58X3000									
2	Tensile Strength	617.37	Mpa								
3	Yield Strength	554.52	Mpa								
4	Elongation	12.10	%								
5	Hardness										
6	Chemical Composition										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Max	Other Total	Al
	0.078	0.082	1.552	0.038	2.332	0.227	5.772	0.038	0.0112	0.0184	Rem

Checked by:H.L. Huang

Date: 20 Apr 2012

Signature: *H.L. Huang*

Approved by: H.K. Li

Date: 20 Apr 2012

Signature: *H.K. Li*

Verified by: Y. M. Chang

Date: 20 Apr 2012

Signature: *Y.M. Chang*

Company Stamp:



Only Stamped Certificate Valid

QP-011-C



YE FONG ALUMINIUM INDUSTRIAL

No. 12-10, Dongshi, Dongming Village, Xinwu Township,

Taoyuan County 32747, Taiwan R.O.C.

Tel: +886-3-4773677 Fax: +886-3-4972333 Email: ye-fong@ye-fong.com



Certificate of Quality

Sold by: Ye Fong Aluminium Industrial Ltd.

Ship to: METAL NETWORKS PTE LTD.

Order No.: MN-81365

Material: 6061-T6

Quantity: 20pcs

Lot No.: 10107090008-1

Specification: ASTM B221M-12; AMS-QQA-200/8

No.	Contents	Requirement	Unit
1	Dimension	Ø63.5X3000	mm
2	Tensile Strength	≥ 260	Mpa
3	Yield Strength	≥ 240	Mpa
4	Elongation	≥ 9	%
5	Hardness		
6	Chemical Composition		

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Max	Other Total	Al
0.40-0.8	≤ 0.7	0.15-0.40	≤ 0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	≤ 0.25	≤ 0.15	≤ 0.05	≤ 0.15	Rem

Actual Measurement

No.	Contents	Measurement	Unit
1	Dimension	Ø63.5X3000	mm
2	Tensile Strength	313.83	Mpa
3	Yield Strength	297.19	Mpa
4	Elongation	13.20	%
5	Hardness		
6	Chemical Composition		

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Max	Other Total	Al
0.580	0.148	0.265	0.0183	0.849	0.136	0.0123	0.0204	0.0094	0.01955	Rem

Checked by: C.C.Huang

Date: 17 Aug 2012

Signature: C. C. Huang

Approved by: H.K.Li

Date: 17 Aug 2012

Signature: H.K.Li

Verified by: Y.M. Chang

Date: 17 Aug 2012

Signature: Y.M. Chang

Company Stamp:

Only Stamped Certificate Valid



MATERIAL CONFORMS TO AMS QQA-250/11
STANDARDS IN ALL RESPECTS



西南铝

产品质量证明书



PRODUCT QUALITY CERTIFICATE 中国驰名商标

编号: 00223201206000174
Serial No:

订货单位 Customer		OKAYA SINGAPORE PTE LTD									
合同号 Contract No	140022561 SWA12-0829-010-17	产品名称 Product	预拉伸板		批号 Lot No	C2M7748					
合金状态 Alloy And Temper	6063-T651	规格(mm) Dimension	25.4000 * 1220 * 2440			箱数 Box Count	1				
技术标准 Technique Standard		Q/SWA10204-2003				片数 Quantity	11.000				
化学成分标准 Chemical Composition Standard		GB/T3190-1996				重量(kg) Weight	2,320.000				
机械性能 Mechanical Property											
状态 Temper	取样方法 Sampling Method	抗张强度(MPa) Tensile Strength		屈服强度(MPa) Yield Strength		延伸率(%) Elongation					
		标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value				
T651	横向	≥290.000	315-315	≥240.00	285-290	≥7.000	14.0-17.0				
高曲 Curve		探伤 Ultrasonic		合格							
化学成分 % Chemical Composition											
熔炼号 Melt No	元素 Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
	标准值 Standard Value	0.40-0.80	≤0.70	0.15-0.40	≤0.15	0.80-1.20	0.04-0.35	—	≤0.25	≤0.15	余量
C313479	实测值 Actual Value	0.63	0.5	0.23	0.03	1.0	0.19	—	0.03	0.01	Remainder
包覆层厚度 Adhesion		晶粒度 Grain Size		杯突 Cup Bulge		硬度 Hardness		电导率 Conductance			
标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value		
高倍 Microstructure	合格	低倍 Macrostructure	合格	氢含量(ml/100gAl) Hydrogen Content		标准值 Standard Value		—			
表面质量 Surface Control	合格	几何尺寸 Dimension Control		合格	标准值 Standard Value		—				
备注 Note											

质量、环境、职业健康安全分别通过ISO9001、AS9100、ISO14001、GB/T28001管理体系认证。本产品的铅、汞、镉、六价格的含量均符合欧盟ROHS指令2005/618/EC的要求。食品和药品包装用铝材砷≤100PPm。Quality, Environment and Professional Health & Safety Management System have Certified as per IS 09001, AS9100, ISO14001 and GB/T28001. Content of Plumbum, Hydrargyrum, Cadmium and sexavalent chrome conforms to ROHS 2005/618/EC. Arsenic ≤100PPm for food and drug packaging aluminum alloy.

检查员: YIYAN YUN (集团) 有限责任公司
Inspector: Southwest Aluminium (Group) Co., Ltd.

日期: 2012-06-07
Date: 2012-06-07



刮涂层拔 95105615 或免
费拔 8008105615 查询真伪

西南铝业(集团)有限责任公司
SOUTHWEST ALUMINIUM (GROUP) CO., LTD.
地址: 中国重庆西彭 Address: Xipeng Town, Chongqing City, China 电话: (TEL): (008623)65809668



ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล

ร่วมกับ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร

Proceedings

IE Network Conference 2013

Green Productivity and Innovation

16 - 18 ตุลาคม 2556

โรงแรม เอวัน เดอะ รอยัล ครุช พัทยา ชลบุรี

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมหน่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช

ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

ผศ.ดร.มานพ เรียวเดชะ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ. ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

ดร.เพ็ญสุตา พันธุ์คำ

ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง

ดร.ฐิติกร พัฒนพิบูล

ดร.นงนุชวิภา จันทรศรี

อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล

ผศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์

รศ.ดร.ชนนาถ กฤตวรกาญจน์

ผศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว

รศ.ดร.นิวิธ เจริญใจ

ผศ.ดร.วิสสนัย วรรณจรรย์ยา

รศ.ดร.วิมลสิน เหล่าศิริถาวร

ผศ.ดร.อรรถพล สมุทคุปต์

รศ.ดร.อภิชาติ โสภางแดง

ดร.วสวัชร นาคเขียว

ผศ.ดร.ศักดิ์เกษม ระมิงค์วงศ์

ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช

ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์

ดร.อนิรุท ไชยजारุณิช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์

ผศ.ดร.อภินันทนา อุดมศักดิ์กุล

รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์

รศ.วชิระ มีทอง

ผศ.ดร.ธนัญญา วสุศรี

ผศ.ดร.สุขสันต์ พรหมบุญพงศ์

ผศ.ดร.อิศรทัต พึ่งอ้น

ผศ.เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร
ผศ.เชิดพงษ์ จอมเดช
ผศ.เจริญ สุนทราวาณิชย์
ดร.ปภัศร ชัยวัฒน์
อ.ภัทธีรา ม้วนจั่น

ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์
อ.แบงค์ งามอรุณโชติ
อ.อาวุธ สนใจยุทธ
ผศ.มงคล สีนะวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์
ผศ.ดร.กุลศ พิมาพันธุ์ศรี
ผศ.ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์

ผศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร
ดร.ธนสาร อินทรกำจรชัย
ดร.วรพจน์ มีถม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา
อ.ธนกฤต โชติภาวริศ
อ.ธนิดา สุนารักษ์
อ.พัฒนพงษ์ แสงหัตถ์วัฒนา

อ.พรเทพ แก้วเชื้อ
อ.วรินทร์ เกียรติบุญกุล
อ.อรณิชา อนุชิตชาญชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ณฐา ศุภทัชฐีเยียร
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์
ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
ผศ.นฤทธิ์ คชฤทธิ์
ผศ.ไพฑูรย์ พูลสุขโข
ผศ.ไพบูลย์ แยมเพื่อน
ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก

ผศ.ศรีโร จารุภิญโญ
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง
ผศ.สุรัตน์ ตรียวนพงศ์
ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ
ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง
ดร.ระพี กาญจนะ
อ.วรรณวิจิตศิริ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ผศ.ดร.นนทโชติ อุดมศรี

ผศ.จักรินทร์ น่วมทิม

ผศ.ร่ำพีง เจริญยศ

ดร.สมพงษ์ พิริยานต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุโขทัยธรรมมาธิราช

รศ.ผกามาศ ผจญเกล้า

รศ.สุภาวดี ธีรธรรมากร

รศ.สุณี ภูสีม่วง

รศ.ศุภณี เรียบเลิศหิรัญ

ดร.แหวบบุญ แยมแสงสังข์

อ.กรรณิการ์ ยัมนา

อ.จิรานุช บุตดีจัน

อ.บุญชัย วลีธรรมสวัสดิ์

อ.ภูมิ เจือศิริภักดี

อ.อิทธิเดช มูลมั่งมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.จงกล ศรีธรร

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จิรัชัย พุทธกุลสมศิริ

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล

ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์

ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ

ดร.สันต์ รั้ววิบูลย์

อ.วุฒิกรณ์ จรรย์ตันติเวทย์

อ.อรดี พฤติศรีณนันท

ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

มหาวิทยาลัยนครพนม

ดร.บัณฑิต บุญขาว

ดร.วิชัย พัฒนพล

อ.รุจาภา นันทโพธิ์เดช

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ

มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

รศ.ดร.ไพโรจน์ เนียมมาศ

ผศ.วิชญ์ บัวเทศ

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ดร.วีระยุทธ สุดสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ดร.จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

รศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร

ผศ.ดร.ประณต บุญไชยอภิสิทธิ์

ผศ.อวยชัย วงศ์รัตน์

ดร.อนันตกุล อินทรผดุง

อ.ชาญชัย วัลลิสิต

อ.พิเชษฐ์ รัตนบุญทวี

อ.ภาสุระ อังกุลานนท์

อ.ลักขณา ฤกษ์เกษม

อ.อรมน ปั่นทอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

อ.ธณิดา โขนงนุช

อ.อลงกรณ์ เมืองไหว

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

อ.เปรมชัย มูลกล้า

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

รศ.นียดา สวัสดิพงษ์

ผศ.สุทัศน์ จันบัวลา

ดร.ชาติ ทีฆะ

ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ณัฐลี

ดร.สิรวัลภ์ เรืองช่วย ตู้อู่ประกาย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผศ.ดร.ชูชาติ พยอม

ผศ.ดร.ณัฐกานต์ พวงไพบูลย์

ผศ.ดร.นิคม ลนขุนทด

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

อ.ทิวรัตน์ ศรีราตรี

อ.วสันต์ พลั้วพันธ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิศต์

ดร.กัณฑ์ อินทวงศ์

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร

ผศ.นุกุล อุบลบาน

ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ธนรัตน์ แต้ววัฒนา

ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

ผศ.ดร.พิลดา หวังพานิช

ผศ.รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์

ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ดร.วราธร ปัญญางาม

ดร.สิระเดช ชาตินิยม

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ผศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

ผศ.ชวลิต มณีศรี

ดร.อัศวิน วงศ์วิวัฒน์

อ.จักรพันธ์ กัณหา

อ.ธนิน ศรีวะระมย์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รศ.สมชาย ชูโฉม

รศ.วนิดา รัตนมณี

ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา

ผศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล

ผศ.ดร.รัฐชนา สีนธวาลัย

ผศ.ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์

ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์

ผศ.เจริญ เจตวิจิตร

ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ

ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม

ผศ.ดร.ประภาค เมืองจันทร์บุรี

มหาวิทยาลัยสยาม

รศ.ดร.วันชัย ริจิรวนิช
รศ.คันสนีย์ สุภาภา
ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วนิทธิ
ผศ.ดร.รัฐวุฒิ ฐัแทนคุณ
ผศ.ดร.อาทิตย์ โสตรโยม

อ.ณัฐพล พุฒยางกูร
อ.ธัชฉนวนธ์ แคนเขต
อ.ปุณยิศา คีนดี
อ.พงศ์พัฒน์ เพชรรุ่งเรือง
อ.วิมลพรรณ คงสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา
ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร

ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์
ดร.วัฒน์ชัย พฤกษ์กานนท์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

ดร.นิตาการ สมสุข
อ.จิตลดา หมายมัน

อ.วรลักษณ์ เสถียรรังษฤกษ์
อ.อรอุมา กอสนาน

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส
ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ
ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์
ดร.จรวัยพร แสันทวีสุข
ดร.ธารชуда พันธนิกุล
ดร.สันท์ โอพาพิริยกุล

โรงเรียนนายเรืออากาศ

น.อ.สุทธิ ศรีบุรพา

น.ท.ปัญญารักษ์ โกศลวัฒน์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผศ.ดร.ณัฐพล ลีมีจ๊ะจรัส
ผศ.ดร.พิศุทธิ พงศ์ชัยฤกษ์
ผศ.ดร.วราคม เนินน้อย
ผศ.ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ

ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์
ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.วิภู ศรีสืบสาย

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล

รศ.ดร.วลัยลักษณ์ อัครีรวงศ์

รศ.ดร.ภรณ์ชัย กัลยาศิริ

รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์

รศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต

ผศ.ดร.ชุมพล ยวงใย

ดร.พลชัย โชติปรายนกุล

ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์

ผศ.วันชัย สีสากวิวงศ์

ดร.กัญจนา ทองสนิท

ดร.คณศ พลอยदनัย

ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม

ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

อ.กวินธร สัยเจริญ

มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย

รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

ผศ.ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง

ผศ.ดร. ดร.ธนกรณ์ แน่นหนา

ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์

ผศ.ดร.สรนาถ ไกรภู

ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

ดร.จิรพรรณ เสี่ยงโรคาพาธ

ดร.มงคล เทียนวิบูลย์

อ.สิทธิพันธ์ ตันฑวิรุฬห์

ดร.รณชัย ศิโรเวฐนกุล

ดร.ศุภชัย ราษฎร์ศิริ

อ.กัญจน์ คณาธารทิพย์

อ.ดวงยศ สุภิกิตย์

อ.ธนา สาตรา

อ.นพกร ภูระยา

อ.พิมพ์ลัญช์ สุตะโคตร

MAN005	อิทธิพลของปัจจัยวัสดุที่มีผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด <i>พิชิต วงษ์สุวรรณ ธงชัย เฟื่องจันทร์ดี และ ศิริชัย ต่อสกุล</i>	6
MAN006	อิทธิพลของปัจจัยวัสดุที่มีผลต่อแรงในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด <i>ศิริโชค แหยมเจริญ ธงชัย เฟื่องจันทร์ดี และ ศิริชัย ต่อสกุล</i>	อง 7
MAN007	การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม 6063 และอะลูมิเนียม 7075 ด้วยบ่าเครื่องมือ 0 องศา <i>วิชัย พุ่มจันทร์</i>	8
MAN008	อิทธิพลของการอบบ่มอะลูมิเนียมผสม 6063 และอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน <i>วิชัย พุ่มจันทร์ และ ทวี หมดสี</i>	9
MAN009	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่คมตัดเครื่องมือสำหรับงานกลึงตัวอย่างโลหะ <i>วีระพงษ์ กาญจนวงศ์กุล</i>	10
MAN010	การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการตัดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ต่อปัญหาด้านคุณภาพ <i>อดิศักดิ์ กองกุล และ อภิวินน์ มุตตามระ</i>	11
MAN011	การวิจัยเพื่อหาช่องว่างที่เหมาะสมของแม่พิมพ์โลหะปั๊มตัดขาดสำหรับวัสดุวัสดุรูปทรงกลม <i>กัมปนาท ถ่ายสูงเนิน วิมลภ อรุณสง มาโนช ริตินโย และ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร</i>	A1100 12
MAN012	การสร้างหน้ากากตะกั่วสำหรับโครงสร้างเมมส์แอกซูเอเตอร์ด้วยกระบวนการลิทอกราฟี <i>พงษ์ศักดิ์ เกิดลาภี อนุรัตน์ วิศิษฎ์สรอรรถ คมกฤต เล็กสกุล และ รุ่งเรือง พัฒนากุล</i>	13
MAN013	การออกแบบเครื่องสีข้าวกล้องแบบภูมิปัญญาท้องถิ่น <i>จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์ สุทัศน์ ขานน้ำคำ และ ตะวันฉาย โพธิ์หอม</i>	14
MAN014	การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอะลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด <i>เมที สุขซี และ ศิริชัย ต่อสกุล</i>	15
MAN015	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการผลิตด้วยกรรมวิธี Ram extrusion <i>สุรศักดิ์ มะธิโตปะนำ ศิริชัย ต่อสกุล และ สุรัตน์ วรรณศรี</i>	16



การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอะลูมิเนียมผสม
ด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด

Investigation of the Cutting Condition of Aluminum Alloy
on Abrasive Water Jets Process.

เมที สุขชี¹ ศิริชัย ต่อสกุล²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: mateesukkee@gmail.com

Matee Sukkee¹ Sirichai Torsakul²

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
E-mail: mateesukkee@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบวนการตัดวัสดุ อะลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jets Cutting) ปัจจัยการทดลองประกอบด้วย แรงดันน้ำที่หัวตัดและขนาดของสารขัด โดยทำการทดลองเพื่อ อศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำ และขนาดของสารขัดที่มีผลต่อ ความหยาบผิวและมุมเอียงรอยตัด วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอะลูมิเนียมผสม 3 ชนิด ได้แก่ AA6061-T6, AA6063-T6 และ AA7075-T6 ความหนา 25 มิลลิเมตร แรงดันน้ำในการทดลอง 3 ระดับ คือ 100 MPa, 175 MPa และ 250 MPa และสารขัด 3 ขนาด ได้แก่ 60 Mesh, 80 Mesh และ 120 Mesh ผลการศึกษาวีจยพบว่า สภาวะการตัดอะลูมิเนียมผสม ทุกสภาวะการทดลองให้ค่าความหยาบผิวไม่แตกต่างกัน วัสดุ AA7075-T6 มีความหยาบผิวต่ำที่สุดเท่ากับ 3.21 ไมครอน จากการตัดที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh สำหรับในส่วนของมุมเอียงรอยตัดพบว่า ทั้งแรงดันน้ำที่หัวตัดและขนาดของสารขัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (α) 0.05 และผลจากการทดสอบมุมเอียงรอยตัดพบว่า เมื่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นและขนาดของสารขัดเล็กลง ทำให้มุมเอียงรอยตัดน้อยลงทุกสภาวะการทดลอง คำหลัก วอเตอร์เจ็ตตัดดึง แรงดันน้ำ ขนาดสารขัด ความหยาบผิว มุมเอียงรอยตัด

การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอลูมิเนียมผสม
ด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด
Investigation of the Cutting Condition of Aluminum Alloy
on Abrasive Water Jets Process.

เมที สุขชัย* ศิริชัย ต่อสกุล²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: mateesukkee@gmail.com

Matee Sukkee¹ Sirichai Torsakul²

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
E-mail: mateesukkee@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบวนการตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jets Cutting) ปัจจัยการทดลองประกอบด้วยแรงดันน้ำที่หัวตัดและขนาดของสารขัด โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำและขนาดของสารขัดที่มีผลต่อความหยาบผิวและมุมเอียงรอยตัด วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอลูมิเนียมผสม 3 ชนิด ได้แก่ AA6061-T6, AA6063-T6 และ AA7075-T6 ความหนา 25 มิลลิเมตร แรงดันน้ำในการทดลอง 3 ระดับ คือ 100 MPa, 175 MPa และ 250 MPa และสารขัด 3 ขนาด ได้แก่ 60 Mesh, 80 Mesh และ 120 Mesh ผลการศึกษาริวิจัยพบว่า สภาวะการตัดอลูมิเนียมผสมทุกสภาวะการทดลองให้ค่าความหยาบผิวไม่แตกต่างกัน วัสดุ AA7075-T6 มีความหยาบผิวต่ำที่สุดเท่ากับ 3.21 ไมครอน จากการตัดที่แรงดันน้ำ 175 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh สำหรับในส่วนของมุมเอียงรอยตัดพบว่า ทั้งแรงดันน้ำที่หัวตัดและขนาดของสารขัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (α) 0.05 และผลจากการทดสอบมุมเอียงรอยตัดพบว่า เมื่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นและขนาดของสารขัดเล็กลง ทำให้มุมเอียงรอยตัดน้อยลงทุกสภาวะการทดลอง

คำหลัก วอเตอร์เจ็ตคัตติง, แรงดันน้ำ, ขนาดสารขัด, ความหยาบผิว, มุมเอียงรอยตัด

Abstract

This research was studied on the cutting process of aluminum alloy by Water jets Cutting method with experimental factors consisted of water pressures at head nozzle and size of abrasive. The experiments aimed to study the influences of water pressure and abrasive sizes on surface roughness and cutting bevel. Materials used in this study were 3 types of aluminum alloys as; AA6061-T6, AA6063-T6 and AA7075-T6; with 25 millimeter of width. Three levels of water pressure were used as 100, 175 and 250 MPa. Respectively, while 3 types of abrasive were used as 60, 80 and 120 Mesh, respectively. The results revealed that all condition of aluminum alloy cutting had differences of surface roughness as; AA7075-T6 had its lowest roughness of 3.21 micron caused by water pressure ay 175 MPa and 120

Mesh of abrasive. For the cutting bevel, it was found that water pressures at head nozzle and size of abrasive was the main factor affecting cutting bevel with statistically significant different at 0.05 level and the results of bevel cutting revealed that increasing of water pressure and smaller size of abrasive made the decreasing of cutting bevel in all experimental conditions.

Keywords: Water jets cutting, Water pressure, Size of abrasive, Surface roughness, Cutting bevel

1. บทนำ

เทคโนโลยีวอเตอร์เจ็ท (Water Jets) เป็นเครื่องมือที่เติบโตเร็วที่สุดในอุตสาหกรรมปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของวอเตอร์เจ็ท คือ ไม่มีผลกระทบในเรื่องของความร้อน (Heat Effect Zone) ต่อโครงสร้างของวัสดุ [1-2] ระบบการตัดวัสดุเป็นแบบเย็น อีกทั้งยังสามารถตัดวัสดุได้หลากหลาย ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุที่มีความแข็ง [2] ในอดีตการตัดวัสดุมีวิธีการไม่มากนัก เช่น การตัดด้วยเลื่อยกล ตัดด้วยแก๊ส ตัดด้วยพลาสมา และตัดงานด้วยเส้นลวด (Wire Cut) เป็นต้น แต่ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีการตัดใหม่ๆ เช่น เทคโนโลยีการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ท การตัดด้วยเลเซอร์ [3] ซีเอ็นซีแก๊สและอื่นๆ ซึ่งในแต่ละวิธีการจะมีข้อจำกัดและข้อกำหนดแตกต่างกันออกไป เช่นการตัดด้วยเลเซอร์และซีเอ็นซีแก๊ส จะมีผลทบในเรื่องของความร้อน ทำให้ชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่บางเกิดการบิดงอ ผิวชิ้นงานไม่เรียบ ผิวชิ้นงานไหม้ มีครีบ บริเวณรอยตัดมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้มีผลกระทบต่อกะบวนการขึ้นรูปในกระบวนการต่อไป

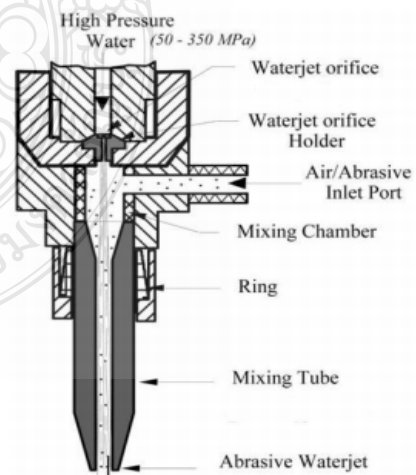
การนำเทคโนโลยีวอเตอร์เจ็ทเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม สามารถลดขั้นตอนการผลิตได้โดยสามารถขึ้นรูปในกระบวนการเดียว เช่น การเจาะรู การตัดขอบ ตัดแม่พิมพ์ตัวผู้ ตัดแม่พิมพ์ตัวเมีย การตัดแผ่นเปลา และชิ้นส่วนอื่นๆ ในอุตสาหกรรม แต่การตัดด้วยวอเตอร์เจ็ทก็มีปัจจัยหลายด้านที่มีผลกระทบต่อชิ้นงาน เช่น แรงดันน้ำ ขนาดอนุภาคของสารขัด รูปร่างของสารขัด [4] ความแข็งของวัสดุ ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานทั้งสิ้น ปัญหาที่พบในการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ทคือ ความหยابผิว มุมเอียงรอยตัด คลื่นรอยตัด ตัดไม่ขาด งานเป็นครีบ [5-7] ซึ่งเกิดจากปัจจัยในการตัดที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิต

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด

(Abrasive water jets) โดยใช้วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสม 3 เกรด ใช้สารขัดประเภททราย 3 ขนาด และใช้แรงดันน้ำที่หัวตัด 3 ระดับ หลังจากการทดลองตัดแล้วทำการทดสอบความหยابผิวรอยตัด มุมเอียงรอยตัด โดยใช้เครื่องทดสอบความหยابผิววิเคราะห์ความหยابผิวรอยตัด ใช้เครื่อง Tool Marker Microscope วิเคราะห์มุมเอียงรอยตัดพร้อมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวัด เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาวะการตัด และนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการทดลอง

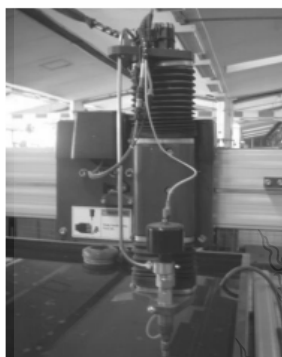
ในการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด (Abrasive water jets) ใช้เครื่องวอเตอร์เจ็ท รุ่น MAXIEM Water jet Model 1530 วัสดุทดลองเป็นอลูมิเนียมผสม สารขัดเป็นประเภททราย (Garnet) เทคนิคการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงแสดงในรูปที่ 1 [8]



รูปที่ 1 แสดงเทคนิคการตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเครื่องตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง



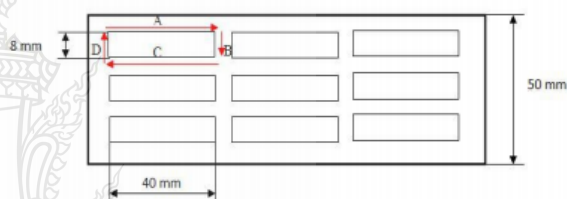
รูปที่ 3 แสดงชุดหัวตัดของเครื่องตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูง

ทำการตัด ชิ้นงานทดสอบให้มีขนาดกว้าง 8 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตรและหนา 25 มิลลิเมตร ในแต่ละสภาวะการทดลอง นำชิ้นงานที่ได้จากการตัดมาทดสอบความหยาบผิวรอยตัดและทดสอบมุมเอียงรอยตัด ซึ่งสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 1 แล้ววิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วย ANOVA ตารางที่ 1 แสดงสภาวะการตัดลู่มีเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด

Parameter	Operating range
Water jets pressure	100, 175, 250 (MPa)
Abrasive type and size	Garnet with 60,80,120 Mesh
Material type	AA6061-T6 AA6063-T6 AA7075-T6
Stand-off distance	2 mm
Angle of cutting	90 degrees
Feed rate	0.266 mm/sec
Abrasive flow rate	0.34 kg/min
Focusing nozzle	0.7 mm

2.1 การตัดชิ้นงานทดลอง

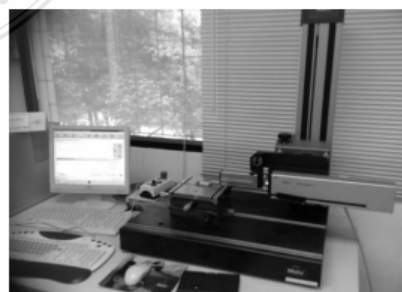
ในกระบวนการตัดชิ้นงานทดลองนี้ ขนาดชิ้นงานมีความกว้าง 8 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร แต่วัสดุที่ทำการทดลองตัดมีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร และหนา 25 มิลลิเมตร ซึ่งทิศทางการตัดจะเริ่มต้นที่ตำแหน่ง A ตัดวนตามแบบงานจนจบกระบวนการที่ตำแหน่ง D หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ตำแหน่งในการตัด (offset) ไป 2-3 มิลลิเมตร และดำเนินการตัดเหมือนกับชิ้นงานชิ้นที่ 1 จนกระทั่งได้ชิ้นงานทดลองครบตามที่ต้องการ หลังจากที่จำนวนชิ้นงานทดลองครบตามต้องการแล้ว จึงทำการเปลี่ยนค่าแรงดันน้ำจนครบตามตัวแปรการตัด ซึ่งใช้ทิศทางการตัดเหมือนกันทุกสภาวะการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงทางเข้าตัดชิ้นงาน

2.2 การทดสอบความหยาบผิวรอยตัด

การทดสอบความหยาบผิวรอยตัดใช้เครื่อง Surface Roughness Instrument ชนิด Contact Stylus Profilometer ยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf XR20 ใช้ปลายเข็มขนาดเล็กสแกนลากไปบนผิววัสดุ ลักษณะการสปริงขึ้นลงของปลายเข็ม เมื่อลากผ่านผิวไม่เรียบ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านระบบการวิเคราะห์สัญญาณ แสดงเป็นแผนภาพและค่าความหยาบผิวในหน่วยไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 5



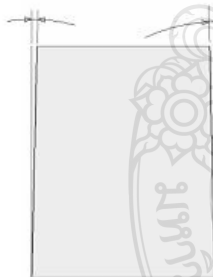
รูปที่ 5 แสดงลักษณะเครื่องทดสอบความหยาบผิว

2.3 การทดสอบมุมเอียงรอยตัด

การตัดวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงที่ชิ้นงานมีความหนา มากๆ มีผลกระทบในเรื่องของมุมเอียงรอยตัด เนื่องจาก เจ็ทสตรีมของน้ำที่ออกจากหัวตัดมีแรงดันมากกว่า ภายนอก จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ตัดออกมาเกิดมีมุมเอียง รอยตัด การทดสอบมุมเอียงรอยตัดของงานวิจัยนี้ใช้ เครื่อง Tool Maker Microscope แสดงดังรูปที่ 6 ทำการ วัดด้านบนและด้านล่างเพื่อนำขนาดที่ได้มาจำลองภาพ หาค่ามุมเอียงรอยตัดแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แสดงลักษณะเครื่อง Tool Maker Microscope

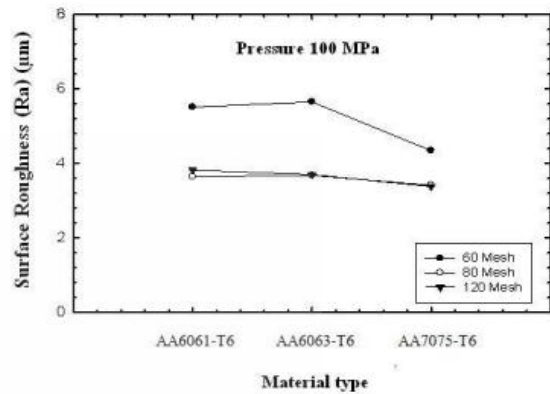


รูปที่ 7 แสดงลักษณะการจำลองภาพในการวัดมุมเอียงรอยตัด

3. ผลการทดลอง

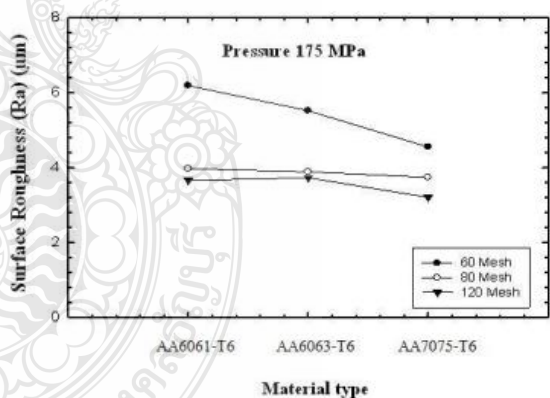
การตัดอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061-T6 AA6063-T6 และ AA7075-T6 ด้วยวิธีการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงแบบ มีสารขัด ในการทดลองตัดทำการแปรเปลี่ยนแรงดันน้ำที่ หัวตัดและแปรเปลี่ยนขนาดของสารขัด ที่คาดว่าจะมี ผลต่อสมบัติทางกายภาพ โดยการศึกษาค่าความหยาบ ผิวรอยตัด และศึกษามุมเอียงรอยตัด ที่ได้จากการ แปรเปลี่ยนตัวแปรการตัด จะถูกรวบรวมและวิเคราะห์ผล เป็นลำดับดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบความหยาบผิวรอยตัด



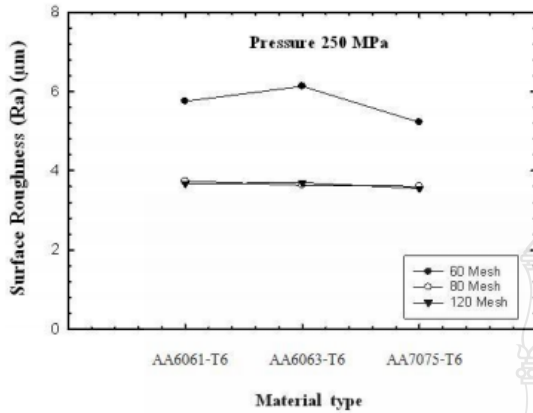
รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (100 MPa)

จากรูปที่ 8 สังเกตเห็นได้ว่า แรงดันน้ำที่หัวตัด 100 MPa และขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความหยาบ ผิวมากที่สุดทุกสภาวะการตัดหากเทียบกับขนาดของสาร ขัด 80 Mesh และ 120 Mesh



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (175 MPa)

จากรูปที่ 9 ค่าความหยาบผิวรอยตัดของสภาวะการ ตัดแรงดันน้ำที่หัวตัด 175 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดมากที่สุดทุกสภาวะการ ตัด อีกทั้งยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปลี่ยนเกรดอลูมิเนียม ในขณะที่ขนาดของสารขัด 80 Mesh และ 120 Mesh ให้ ค่าความหยาบผิวรอยตัดใกล้เคียงกัน

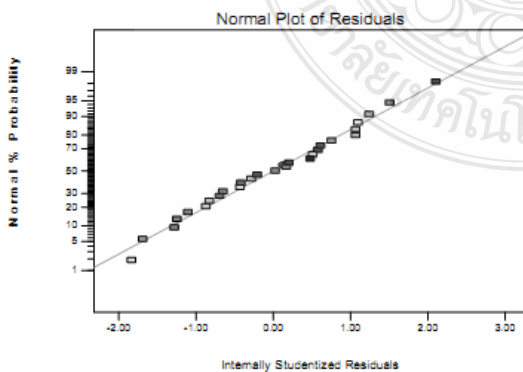


รูปที่ 10 กราฟแสดงความหยาบผิวเฉลี่ยของรอยตัด (250 MPa)

จากรูปที่ 10 ค่าความหยาบผิวรอยตัดที่สภาวะการตัดแรงดันน้ำที่หัวตัด 250 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความหยาบผิวมากที่สุดเฉลี่ย 6.13 ไมครอน ซึ่งเป็นการตัดวัสดุ AA6063-T6 และขนาดของสารขัด 80 Mesh และ 120 Mesh ให้ค่าความหยาบผิวไม่แตกต่างกัน

3.1.1 การวิเคราะห์ผลความหยาบผิวรอยตัดด้วยสถิติ

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติเป็นการตรวจสอบส่วนที่ตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามี การกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ ซึ่งจากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าเส้นตรงไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติตามข้อสมมติ

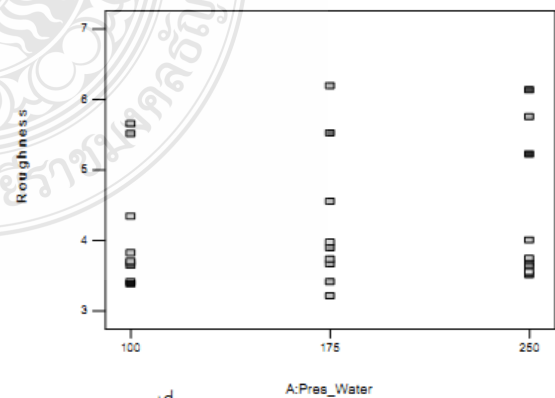


รูปที่ 11 Normal Probability Plot ต่อความหยาบผิวรอยตัด

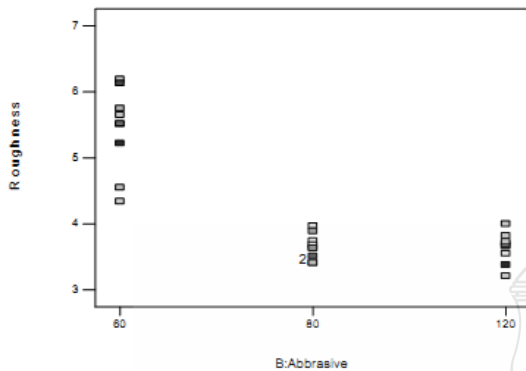
Response	1	Roughness			
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	22.81	18	1.27	37.21	< 0.0001
A-Pres_Water	0.24	2	0.12	3.50	0.0811
B-Abbrasive	19.11	2	9.55	280.45	< 0.0001
C-Material	2.13	2	1.06	31.24	0.0002
AB	0.30	4	0.076	2.24	0.1545
AC	0.28	4	0.070	2.07	0.1772
BC	0.75	4	0.19	5.53	0.0196
Residual	0.27	8	0.034		
Cor Total	23.09	26			

รูปที่ 12 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

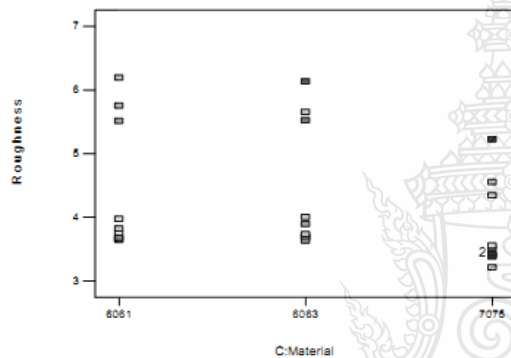
จากรูปที่ 12 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองโดยกำหนดให้ปัจจัย A คือ แรงดันน้ำที่หัวตัด B คือ ขนาดของสารขัด และ C คือเกรดอลูมิเนียม จากผลการทดสอบพบว่า มี 2 ปัจจัยหลักที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ B และ C แสดงว่าทั้ง 2 ปัจจัยมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด และอันตรกิริยาของขนาดสารขัด (ปัจจัย B) และเกรดอลูมิเนียม (ปัจจัย C) มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด แต่หากนำปัจจัยทั้ง 3 มาวิเคราะห์ร่วมกันจะพบว่ามีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด ส่วนค่า P-Value ของเกรดอลูมิเนียมมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวรอยตัด ซึ่งสามารถยืนยันผลค่า P-Value ทั้ง 3 ปัจจัยจาก Residuals vs. Predicted Plot ดังรูปที่ 13 - 15



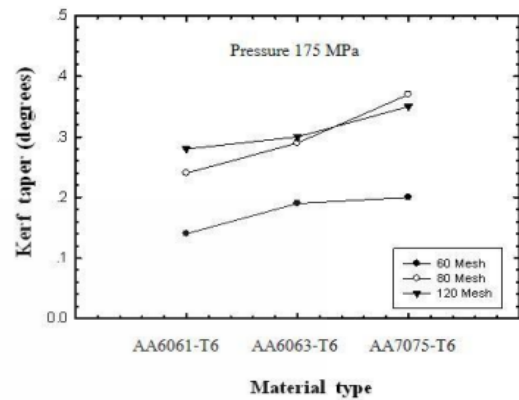
รูปที่ 13 Residuals vs. Predicted Plot ของปัจจัยแรงดันน้ำที่หัวตัด



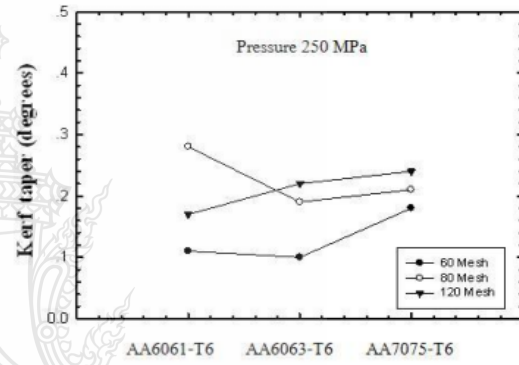
รูปที่ 14 Residuals vs. Predicted Plot ของปัจจัยขนาดสารขัด



รูปที่ 15 Residuals vs. Predicted Plot ของปัจจัยเกรดอลูมิเนียม

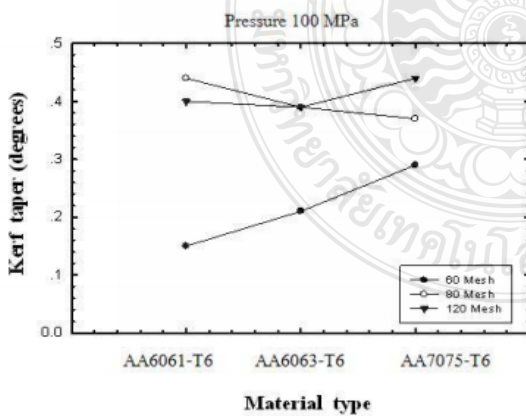


รูปที่ 17 กราฟแสดงมุมเอียงรอยตัด (Pressure 175 MPa)



รูปที่ 18 กราฟแสดงมุมเอียงรอยตัด (Pressure 250 MPa)

3.2 ผลการทดสอบมุมเอียงรอยตัด

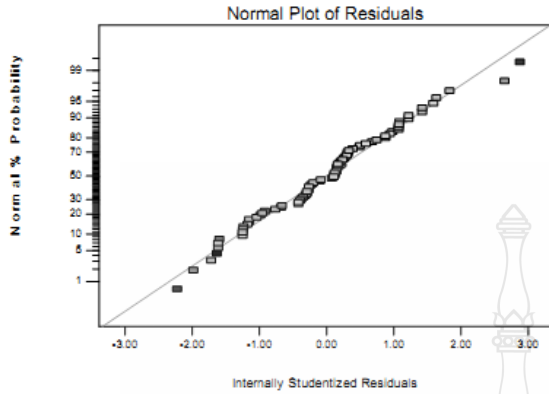


รูปที่ 16 กราฟแสดงมุมเอียงรอยตัด (Pressure 100 MPa)

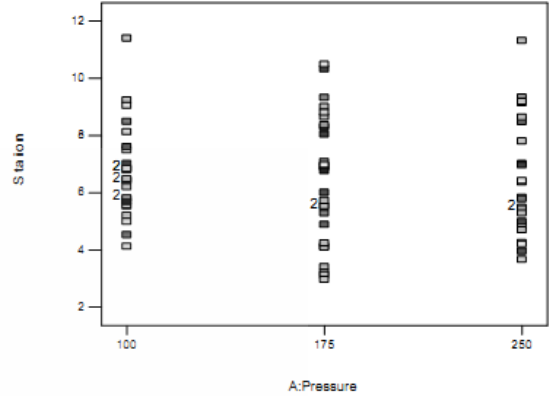
จากรูปกราฟผลการทดลองที่ 16 – 18 พบว่าการตัดอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด ได้ค่ามุมเอียงรอยตัดน้อยสุดเฉลี่ย 0.10 องศา จากการใช้น้ำแรงดันที่หัวตัด 250 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh วัสดุเกรด AA6063-T6 มีความแข็งประมาณ 72.8 HV ซึ่งสภาวะการตัดดังกล่าวให้ค่ามุมเอียงรอยตัดน้อยสุดทุกสภาวะการทดลอง และขนาดของสารขัด 80 และ 120 Mesh ให้ค่ามุมเอียงรอยตัดใกล้เคียงกัน และมีรูปแบบมุมเอียงรอยตัดเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของสารขัดเล็กลง

3.2.1 การวิเคราะห์ผลมุมเอียงรอยตัดด้วยสถิติ

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติเป็นการตรวจสอบส่วนที่ตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ ซึ่งจากรูปที่ 19 แสดงให้เห็นว่าเส้นตรงไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติตามข้อสมมติ



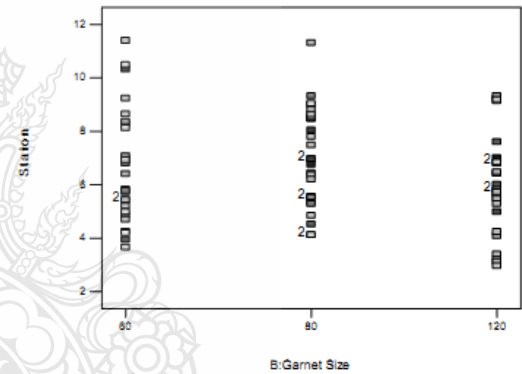
รูปที่ 19 Normal Probability Plot
ต่อมูมเอียงรอยตัด



รูปที่ 21 Residuals vs. Predicted Plot
ของปัจจัยแรงดันน้ำที่หัวตัด

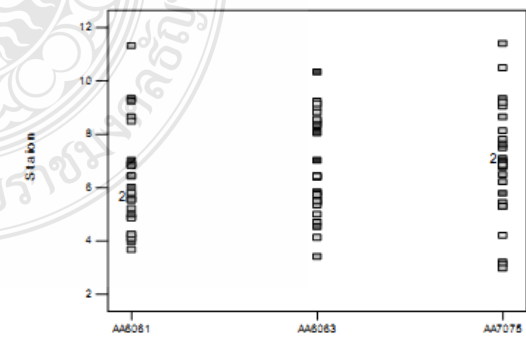
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	0.67	18	0.037	7.86	<0.0001
A-Pressure	0.28	2	0.14	29.59	<0.0001
B-Garnet Size	0.27	2	0.13	28.20	<0.0001
C-Material	0.025	2	0.012	2.60	0.0824
AB	0.056	4	0.014	2.98	0.0259
AC	0.034	4	8.463E-003	1.79	0.1420
BC	8.030E-003	4	2.007E-003	0.42	0.7901
Residual	0.29	62	4.725E-003		
Lack of Fit	0.078	8	9.722E-003	2.44	0.0249
Pure Error	0.22	54	3.985E-003		
Cor Total	0.96	80			

รูปที่ 20 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA
ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 22 Residuals vs. Predicted Plot
ของปัจจัยขนาดสารขัด

จากรูปที่ 20 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง โดยกำหนดให้ ปัจจัย A คือ แรงดันน้ำที่หัวตัด B คือ ขนาดของสารขัด และ C คือ เกรตอลูมิเนียม จากผลการทดสอบพบว่า มี 2 ปัจจัย ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ปัจจัย A และปัจจัย B แสดงว่าทั้ง 2 ปัจจัยนี้ มีอิทธิพลต่อมูมเอียงรอยตัด และอันตรกิริยาของแรงดันน้ำที่หัวตัด (ปัจจัย A) และขนาดของสารขัด (ปัจจัย B) มีอิทธิพลต่อมูมเอียงรอยตัด ส่วนค่า P-Value ของเกรตอลูมิเนียมมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีอิทธิพลต่อมูมเอียงรอยตัด และหากนำ ปัจจัยทั้ง 3 มาวิเคราะห์ร่วมกันจะพบว่าไม่มีอิทธิพลต่อมูมเอียงรอยตัด ซึ่งสามารถยืนยันผลค่า P-Value ทั้ง 3 ปัจจัยจาก Residuals vs. Predicted Plot ดังรูปที่ 21 – 23



รูปที่ 23 Residuals vs. Predicted Plot
ของปัจจัยเกรตอลูมิเนียม

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด ด้วยการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวรอยตัดและมุมเอียงรอยตัด ปัจจัยการทดลองได้แก่ แรงดันน้ำที่หัวตัด 3 ระดับ คือ 100 MPa, 175 MPa และ 250 MPa ขนาดของสารขัด 3 ระดับ คือ 60 Mesh, 80 Mesh และ 120 Mesh และวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอลูมิเนียม 3 เกรด คือ AA6061 - T6, AA6063 - T6 และ AA7075 - T6 จากการทดสอบค่าความหยาบผิวรอยตัดพบว่า ค่าความหยาบผิวรอยตัดน้อยสุดเฉลี่ย 3.21 ไมครอน จากการใช้แรงดันที่หัวตัด 175 MPa ขนาดของสารขัด 120 Mesh เป็นอลูมิเนียมเกรด AA7075 - T6 ที่มีขนาดความแข็งประมาณ 102 HV อีกทั้งในการวิจัยนี้พบว่า ขนาดของสารขัด 60 Mesh ให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดมากที่สุดทุกสภาวะการทดลอง ส่วนด้านมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน จากการทดสอบพบว่า มุมเอียงรอยตัดน้อยสุดเฉลี่ย 0.10 องศา ซึ่งใช้แรงดันน้ำที่หัวตัด 250 MPa ขนาดของสารขัด 60 Mesh และยิ่งพบอีกว่าสภาวะการตัดที่แรงดันน้ำที่หัวตัด 250 MPa และขนาดสารขัด 60 Mesh ให้ค่ามุมเอียงรอยตัดน้อยสุดทุกสภาวะการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันวิทยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] นอร์แมน ฟรานซ์ และ โมฮาหมัด ฮาซิช. ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับวอเตอร์เจ็ต. [Online]. Available: <http://www.flowasia.com/thai/about-flow.cfm.htm>
- [2] A Division of Omax Corporation. 2552. คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM water jet Model 1530. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร.
- [3] นรา บุรีพันธ์และศิวกอ อ่างทอง. 2554. "อิทธิพลของสภาวะการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ด้วย

- เลเซอร์ที่มีผลต่อความหยาบผิว". การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2554. พัทยา, ประเทศไทย, 20-21 ตุลาคม 2554 : แผ่นซีดีรอม
- [4] Fowler G., Pashby I.R., Shipway P.H.. 2009. "The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling alloy Ti6Al4V" *Wear*, Vol.266.2009.pp613-620.
- [5] Chen L., Siores E., Wong W.C.K.. 1998. "Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials" *Journal of Material Processing Technology*, Vol.74.1998.pp251-254.
- [6] John Rozario J. Jegaraj., Ramesh Babu N. 2005. "A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive water jets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter", *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol.45,2005. pp1443-1450.
- [7] Orbanic H., Junkar M. 2008. "Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting". *Wear*, Vol.265, 2008.pp821-830.
- [8] Osma A.H., Mabrouki T., They B., Buisine D. 2004. "Experimental analysis of High - Speed air - water jet flow in an abrasive water jet mixing tube" *flow measurement and instrumentation* 15 (2004) 37 - 48

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายเมที สุขจี
วัน เดือน ปีเกิด	3 พฤษภาคม 2528
ที่อยู่	638 หมู่ 12 ตำบลโคกสูง อำเภอแก่งคร้อง จังหวัดชัยภูมิ 36150
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน นครราชสีมา
ประสบการณ์ทำงาน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
เบอร์โทรศัพท์	080-1709596
อีเมล	mateesukkee@gmail.com

