

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการตัดเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง

นายก้องเกียรติ พิมพ์ชาติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**FACTORS EFFECTING CUTTING PROPERTY OF
CERAMIC USING ABRASIVE WATERJET**

Kongkiat Phimchat



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2015**

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการตัดเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ปภากร พิทยชาล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ)

กรรมการ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

กรรมการ

(อ. ดร.จงบกล ศรีธร)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ก้องเกียรติ พิมพ์ชาติ:ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการตัดเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง

(FACTORS EFFECTING CUTTING PROPERTY OF CERAMIC USING ABRASIVE

WATERJET)อาจารย์ที่ปรึกษา :ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากรพิทยชาวล,147หน้า

ปัจจุบันอะลูมินาเซรามิกเป็นวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ทางการแพทย์กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการตัดอะลูมินาเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Abrasive Water Jet Cutting) เป็นกระบวนการที่มีคุณลักษณะการตัดชิ้นงานในสภาวะเย็น ทำให้เนื้อวัสดุไม่ก่อให้เกิดการเผาไหม้และอัดตัวในขณะที่ตัด สามารถตัดชิ้นงานที่รูปร่างซับซ้อนได้ ต้นทุนการตัดต่ำและลดระยะเวลาการตัด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการตัดอะลูมินาเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง โดยการตัดอะลูมินาเซรามิกที่ขึ้นรูปวิธีการหล่อ ในงานวิจัยนี้กำหนดตัวแปรต้นคือ แรงดันน้ำ 260, 290, 320 และ 350 MPa และความหนาของอะลูมินาเซรามิก 7, 10 และ 13 mm. และตัวแปรตามคือ ค่าความหยาบผิว มุมเอียงรอยตัด ความสูงคลื่นรอยตัดและรอยแตกร้าว

ผลการวิจัยด้วยระดับความเชื่อมั่น 95%พบว่าแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานทดสอบมีผลต่อค่าความหยาบผิวค่ามุมเอียงรอยตัดและค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัด แต่แรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่มีผลต่อค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน โดยแสดงผลการทดลองได้ดังนี้ การตัดชิ้นงานทดสอบความหนา 7 mm. ด้วยแรงดันน้ำ 260 MPa เกิดความเรียบผิวเฉลี่ยดีเท่ากับ 20.63 ไมโครเมตร ส่วนการตัดชิ้นงานทดสอบความหนา 10 mm. ด้วยแรงดันน้ำ 350 MPa เกิดค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยที่น้อยเท่ากับ 1.24 องศา ส่วนการตัดชิ้นงานทดสอบความหนา 13 mm. ด้วยแรงดันน้ำ 290 MPa เกิดค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดเฉลี่ยที่น้อยเท่ากับ 0.50 mm. และการตัดชิ้นงานทดสอบความหนา 13 mm. ด้วยแรงดันน้ำ 260 MPa เกิดค่ารอยแตกร้าวเฉลี่ยที่น้อยเท่ากับ 0.82 mm.

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

KONGKIATPHIMCHAT : FACTORS EFFECTING CUTTING PROPERTY
OFCERAMIC USING ABRASIVE WATERJET.THESISADVISOR:ASST.
PROF. PAPHAKORN PITAYACHAVAL,Ph.D.,147 PP.

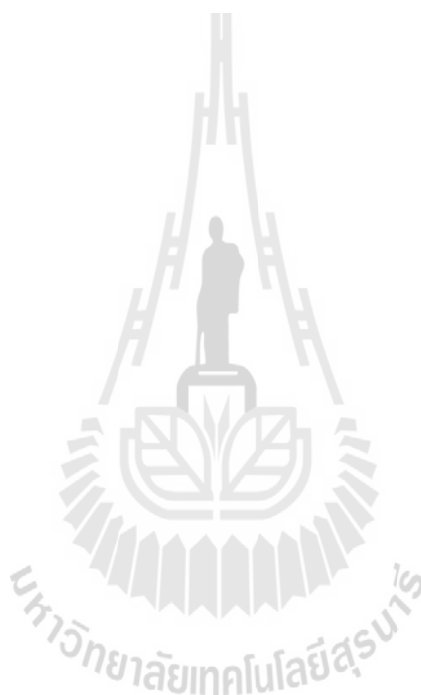
CERAMICCUTTING/SURFACE ROUGHNESS/KERFBEVELANGLE/KERF-
WAVEHEIGHT/CRACKS

Alumina ceramic is a popular material that is widely used for the component of electronic and medical devices. Since an abrasive water jet cutting is a cutting process with high pressure water in cold working state, the product surface is not burned and compressed including presenting the complex shape, low cost cutting and shorten production time. This research aims to study factors effecting cutting property of alumina ceramic using abrasive water jet cutting based on casting alumina ceramic. The independent variables are cutting water pressures: 260, 290, 320 and 350 MPa and alumina ceramic specimen thicknesses: 7, 10 and 13 mm. The dependent variables are surface roughness, kerf bevel angle, proportion of kerf wave height and surface cracks.

The results, based on significant level 0.05, shown that cutting water pressure and thickness effected to surface roughness, kerf bevel angle and kerf wave height. However, these factors were not affected to surface cracks.To establish each factor, the alumina ceramic specimen thicknesses 7 mm. cut by pressure 320 MPa presented surface roughness average 20.63 micrometers. The alumina ceramic specimen thicknesses 10 mm. cut by pressure 350 MPa presented kerf bevel angle average 1.24 degrees. The alumina ceramic specimen thicknesses 13 mm. cut by pressure 290 MPa

presented proportion of kerf wave height average 0.5 mm. The alumina ceramic specimen thicknesses 13 mm. cut by pressure 260 MPa presented surface cracks average 0.82 mm.

.



School of Industrial Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากรพิทยชาลาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมซึ่งได้ให้โอกาสทางการศึกษาและให้คำแนะนำในด้านต่างๆคอยดูแลด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดีและให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยจนสามารถแก้ไขปัญหามาตรต่างๆรวมทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริจงกลผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย และ อาจารย์ ดร.จกมลศิริธรที่ได้กรุณาให้การอบรมสั่งสอนให้ข้อคิดและคำแนะนำต่างๆทั้งด้านการศึกษาและการดำเนินชีวิตความคิดศีลธรรมจรรยาทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินชีวิตได้ในทางที่ถูกต้อง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณรุ่งอรุณ แสงงาม และคุณภาณุ เวทยานุกุล เป็นเจ้าหน้าที่ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) รวมถึงดูแลในขณะทำการทดลองเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาและทำวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้ความรักและความทุ่มเทในการอุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนปลูกฝังให้รักในการศึกษาให้ความเชื่อมั่นและความไว้วางใจตลอดจนเป็นกำลังใจที่ดีและเป็นแรงผลักดันจนทำให้ประสบผลสำเร็จในชีวิต

ก้องเกียรติ พิมพ์ชาติ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	7
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	7
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ทฤษฎีทั่วไปของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง.....	8
2.1.1 องค์ประกอบเบื้องต้นของเครื่องวอเตอร์เจ็ต.....	8
2.1.2 ระบบเพียววอเตอร์เจ็ต.....	9
2.1.3 ระบบแอบราซิฟวอเตอร์เจ็ต.....	11
2.2 ข้อมูลทั่วไปของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 153014.....	14
2.2.1 องค์ประกอบของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530.....	15
2.2.2 ปืนแรงดันสูง MAXIEM.....	16
2.2.3 ซอฟต์แวร์พื้นฐาน (Intelli - MAX) เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมดของ MAXIEM.....	17
2.3 อะลูมินาเซรามิก.....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	ทราาย (Garnet)20.....	
2.4.1	ทราายที่ใช้ในงานตัดระบบแอบราซีฟวอเตอร์เจ็ต	20
2.5	เครื่องวัดความหยาบผิว (Roughness Measurement).....	21
2.6	ความหยาบผิว (Surface Roughness).....	22
2.6.1	ความหลากหลายของดัชนีแสดงค่าความหยาบของผิว.....	23
2.6.2	ความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (Ra).....	24
2.6.3	ตัวชี้วัดภาพร่างของพื้นผิว (Drawing Indications of Surface Texture).....	24
2.7	Scanning Electron Microscope : SEM.....	25
2.8	กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscope).....	26
2.9	ซอฟต์แวร์วิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ Minitab.....	28
2.10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA).....	30
2.11	การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	33
3	วิธีการดำเนินงาน.....	38
3.1	การตั้งค่าเครื่องตัดด้วยสื่อน้ำแรงดันสูง.....	38
3.1.1	หลักการตัดของเครื่องตัดด้วยสื่อน้ำแรงดันสูง	38
3.1.2	สารพัดสำหรับการตัดของเครื่องตัดด้วยสื่อน้ำแรงดันสูง.....	39
3.2	การเตรียมการทดลอง	39
3.2.1	กำหนดปัจจัยในการทดลอง.....	39
3.2.2	ออกแบบชิ้นงานทดลอง.....	40
3.2.3	การสร้างแบบชิ้นงานและกำหนดค่าต่าง ๆ.....	40
3.2.4	การจับชิ้นงานทดลอง.....	43
3.2.5	การกำหนดทางเข้ารอยตัด.....	44
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	44
3.3.1	อุปกรณ์ที่ใช้กับเครื่องตัดด้วยสื่อน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting).....	44
3.3.2	อุปกรณ์วิเคราะห์ความหยาบผิว	48
3.3.3	อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงคลื่น มุมเอียงรอยตัด และรอยแตกร้าว.....	49
3.3.4	โปรแกรม ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล (Two-Way ANOVA).....	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	ดำเนินการทดลองการตัด.....	50
3.4.1	ขั้นตอนการทดลองขึ้นรูปชิ้นงาน.....	50
3.4.2	ขั้นตอนการถ่ายภาพพื้นผิวโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	53
3.4.3	ขั้นตอนการวัดความหยาบผิว.....	54
3.4.4	ขั้นตอนการวัดขนาดมุมเอียงรอยตัด.....	56
3.4.5	ขั้นตอนการวัดความสูงคลื่นรอยตัด.....	58
3.4.6	ขั้นตอนการวัดความสูงคลื่นรอยตัด.....	60
3.5	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง.....	62
3.5.1	การวิเคราะห์ผลค่าความหยาบผิว.....	63
3.5.2	การวิเคราะห์ผลค่ามุมเอียงรอยตัด.....	64
3.5.3	การวิเคราะห์ผลของความสูงคลื่นรอยตัด.....	64
3.5.4	การวิเคราะห์ผลของรอยแตกร้าวของชิ้นงาน.....	65
4	ผลการดำเนินงาน.....	67
4.1	ผลการทดลองถ่ายภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope : SEM.....	67
4.2	ผลการเก็บบันทึกข้อมูลค่าความหยาบผิว.....	68
4.2.1	วิเคราะห์ผลการดำเนินการวัดค่าความหยาบผิว.....	70
4.2.2	การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking).....	70
4.3	ผลการเก็บบันทึกข้อมูลค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน.....	72
4.3.1	วิเคราะห์ผลการดำเนินการวัดค่ามุมเอียงรอยตัด.....	74
4.3.2	การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking).....	75
4.4	ผลการเก็บบันทึกข้อมูลค่าความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงาน.....	77
4.4.1	วิเคราะห์ผลการดำเนินการวัดค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัด.....	79
4.4.2	การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking).....	79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 ผลการเก็บบันทึกข้อมูลค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน.....	81	
4.5.1 วิเคราะห์ผลการดำเนินงานการวัดค่ารอยแตกร้าวรอยตัด.....	82	
4.5.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)	83	
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	85	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	85	
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	87	
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	88	
รายการอ้างอิง	89	
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก. แสดงตารางค่าต่าง ๆ.....	93	
ภาคผนวกข. แสดงการใช้โปรแกรม Minitab 17 Free Trial	118	ภาคผนวกค.
1530 124		
ภาคผนวกง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	143	
ประวัติผู้เขียน	148	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงรายการของอุปกรณ์เครื่องมือที่สามารถตัดโดยกระบวนการวอเตอร์เจ็ต.....13
2.2	แสดงตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Factors ANOVA)31
3.1	แสดงกรอบแนวคิดการวิจัย.....38
3.2	แสดงส่วนผสมของแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูป45
3.3	ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260 , 290 , 320, 350 MPa กับความหนา 7, 10,13 มิลลิเมตร..... 56
3.4	ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าการวัดมุมเอียงรอยตัดที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260 , 290 , 320,350 MPa กับความหนา 7, 10,13 มิลลิเมตร58
3.5	ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลการวัดค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260 ,290 ,320,350 MPa กับความหนา 7, 10,13 มิลลิเมตร.....60
3.6	ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าการวัดรอยแตกกว้างของชิ้นงานที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260 , 290 ,320,350 MPa กับความหนา 7, 10,13 มิลลิเมตร62
5.1	ตารางแสดงสรุปผลการทดลอง.....85
ก.1	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa..... 94
ก.2	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa..... 94
ก.3	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa..... 95
ก.4	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa..... 95
ก.5	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 260 MPa..... 96
ก.6	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 290 MPa..... 96
ก.7	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 320 MPa..... 97
ก.8	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 350 MPa..... 97
ก.9	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 260 MPa..... 98
ก.10	การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 290 MPa..... 98

[illegible]

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.34	การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa... 110
ก.35	การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa... 111
ก.36	การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa... 111
ก.37	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa..... 112
ก.38	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa.....112
ก.39	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa..... 113
ก.40	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa.....113
ก.41	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa.....114
ก.42	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa.....114
ก.43	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa.....115
ก.44	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa.....115
ก.45	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa.....116
ก.46	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa.....116
ก.47	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa.....117
ก.48	การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa.....117
ค.1	แสดงอัตราการไหลของทรายตัด..... 126

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงชุดหัวตัดของระบบเพียวอเตอร์เจ็ต9
2.2	แสดงส่วนประกอบของระบบบอเตอร์เจ็ต 10
2.3	แสดงชุดหัวตัดของระบบแอบราซีฟอเตอร์เจ็ต..... 11
2.4	แสดงส่วนประกอบของระบบแอบราซีฟอเตอร์เจ็ต 12
2.5	แสดงการทำงานของหัวตัด Water jet..... 14
2.6	แสดงองค์ประกอบของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530 . 15
2.7	แสดงระบบส่งผงทรายตัด..... 15
2.8	แสดงกล่องปั๊มควบคุม 16
2.9	แสดงด้านหลังปั๊มแรงดันสูง..... 17
2.10	แสดงด้านหน้าปั๊มแรงดันสูง 17
2.11	แสดงชุดควบคุมการเคลื่อนที่พร้อมหน้าจอ เป็นพิมพ์ เมาส์ และชุดต่อ USB..... 18
2.12	สารขัดทราย (Garnet)..... 20
2.13	เครื่องวัดความหยาบ..... 21
2.14	แสดงความหยาบผิว (Surface Roughness)..... 22
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความหยาบของพื้นผิว (Ra) และสัญลักษณ์ แบบเดิม..... 23
2.16	กราฟความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (Ra)..... 24
2.17	Scanning Electron Microscope : SEM..... 25
2.18	Dino-Lite Digital Microscope..... 26
2.19	การเลือกข้อมูลลงในเวิร์คชีต..... 28
2.20	การเลือกใช้ฟังก์ชันของโปรแกรม Minitab..... 29
2.21	การปรับเปลี่ยนค่าความเชื่อมั่น..... 29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	แสดงการประมวลผลของโปรแกรม Minitab..... 30
3.1	แสดงชิ้นงานที่ทำการทดลองตัด ขนาด $15 \times 35 \times N$ มิลลิเมตร..... 40
3.2	แสดงขั้นตอนการสร้างแบบชิ้นงานและการกำหนดค่าคุณภาพผิวของการตัด..... 41
3.3	แสดงขั้นตอนการเลือกการฉายรังสีและอัตราการใช้ของสารขัด.....42
3.4	แสดงขั้นตอนการเลือกการฉายรังสีวัสดุและความหนาของวัสดุ.....42
3.5	แสดงตำแหน่งหัวตัดห่างจากแกน x ประมาณ 800 มิลลิเมตร และห่างจากแกน y ประมาณ 800 มิลลิเมตร43
3.6	แสดงการจับชิ้นงาน43
3.7	แสดงรอยทางเข้าของชิ้นงานและรอยทางเข้ารอยตัดจริง44
3.8	แสดงภาพแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูปขนาด 7,10 และ 13 mm.45
3.9	แสดงชนิดสารขัดทราย (Garnet).....46
3.10	แสดงภาพเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์แบบดิจิทัล46
3.11	แสดงตัวอย่างเกจที่ใช้ในการตั้งระยะความสูงหัวตัดที่ใช้ในการตัดอะลูมินาเซรามิก.....47
3.12	แสดงการตรวจสอบค่าความหนาของเกจตั้งความสูงหัวตัดหนา 2 มิลลิเมตร ± 0.05047
3.13	แสดงเครื่องวัดค่าความหยาบผิว (Surface Roughness).....48
3.14	Scanning Electron Microscope : SEM.....49
3.15	Dino-Lite Digital Microscope49
3.16	แสดงโปรแกรม Minitab 17 Free Trial..... 50
3.17	แสดงเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง..... 51
3.18	แสดงการจับยึดเหล็กแผ่นบนเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง..... 51
3.19	แสดงตำแหน่งหัวตัดจะใช้เกจขนาด 30 x 100 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ± 0.050 มิลลิเมตรตั้งค่าความสูงหัวตัด..... 52
3.20	แสดงตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้นในการตัด..... 52
3.21	แสดงตัวอย่างการเลือกค่ารายการของวัสดุชนิด Alumina ceramic..... 53

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22	แสดงชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบทองด้วยสุญญากาศ..... 54
3.23	แสดงการถ่ายภาพด้วยเครื่องScanning Electron Microscope..... 54
3.24	แสดงลักษณะของเครื่องวัดความหยาบผิว..... 55
3.25	แสดงตำแหน่งวัดความหยาบผิว..... 55
3.26	แสดงตัวอย่างการถ่ายรูปมุมเอียงรอยตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Dino-Lite Digital Microscope)..... 57
3.27	แสดงภาพตัวอย่างการใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier มาวัดมุมเอียงของชิ้นงาน ด้านบน.....57
3.28	แสดงภาพตัวอย่างการใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier มาวัดมุมเอียงของชิ้นงาน ด้านล่าง.....58
3.29	แสดงตัวอย่างการถ่ายรูปความสูงคลื่นรอยตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Dino-Lite Digital Microscope).....59
3.30	แสดงรูปตัวอย่างการวัดความสูงคลื่นรอยตัด..... 60
3.31	แสดงตัวอย่างการถ่ายรูปรอยแตกร้าวของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Dino-Lit Digital Microscope)..... 61
3.32	แสดงรูปตัวอย่างการวัดรอยแตกร้าวของชิ้นงาน..... 62
4.1	แสดงรูปชิ้นงานที่ได้จากการทดลองตัด67
4.2	แสดงการเปรียบเทียบภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope68
4.3	แสดงการตำแหน่งคู่อค่าความหยาบผิว (Ra)69
4.4	แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน69
4.5	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่าความหยาบผิวของ ชิ้นงาน..... 71
4.6	แสดงผลการวิเคราะห์ความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Minitab 17 Free Trial.....72
4.7	แสดงภาพใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier มาวัดมุมเอียงของชิ้นงานด้านบน.....73
4.8	แสดงภาพใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier มาวัดมุมเอียงของชิ้นงานด้านล่าง73

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน.....74
4.10	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่ามุมเอียงรอยตัด ของชิ้นงาน..... 75
4.11	แสดงผลการวิเคราะห์มุมเอียงรอยตัดของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Minitab 17 Free Trial.... 76
4.12	แสดงรูปการวัดความสูงคลื่นรอยตัด.....77
4.13	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงาน..... 78
4.14	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่าสัดส่วนความสูงคลื่น รอยตัดของชิ้นงาน..... 79
4.15	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Minitab 17 Free Trial..... 80
4.16	แสดงรูปตัวอย่างการวัดรอยแตกร้าวของชิ้นงาน..... 81
4.17	แสดงการเปรียบเทียบค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน..... 82
4.18	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่ารอยแตกร้าวรอยตัด ของชิ้นงาน.....83
4.19	แสดงผลการวิเคราะห์ค่ารอยแตกร้าวรอยตัดของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Minitab 17 Free Trial..... 84
5.1	แสดงลักษณะความพรุนของโครงสร้างแผ่นอะลูมินาเซรามิก..... 86
5.2	แสดงลักษณะลำน้ำที่พุ่งออกมาขณะตัดเนื้อชิ้นงาน..... 86
5.3	แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์..... 87
5.4	Alumina Setter/ Plate for High Temperature Furnaces..... 88
ข.1	แสดงหน้าจอและส่วนประกอบของโปรแกรม Minitab 17 Free Trial.....119
ข.2	แสดงการป้อนข้อมูลเข้าโปรแกรม Minitab 17 Free Trial.....120
ข.3	การเลือกใช้ฟังก์ชันของโปรแกรม Minitab..... 121
ข.4	แสดงการปรับเปลี่ยนค่าความเชื่อมั่นและการสร้างกราฟ.....121
ข.5	แสดงการเลือกรูปแบบกราฟ.....122

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.6	แสดงการเลือกรูปแบบกราฟ.....122
ข.7	แสดงการประมวลผลทางกราฟของโปรแกรม Minitab..... 123
ข.8	แสดงการประมวลผลทางตัวเลขของโปรแกรม Minitab.....123
ค.1	ตัวอย่างคุณภาพของรอยตัด..... 125
ค.2	แสดงการตรวจสอบการใช้ขอบเขตพื้นที่จำกัด..... 127
ค.3	แสดงการดำเนินการทดสอบ ป้อนและหัวตัด..... 128
ค.4	แสดงตัวอย่างคุณภาพเจ็ทสตรีมของทั้งดีและไม่ดี..... 128
ค.5	แสดงการเปรียบเทียบผลที่รูรีดน้ำและท่อผสมชำระมีผลต่อคุณภาพของเจ็ทสตรีม..... 129
ค.6	แสดงเส้นสุดทดสอบป้อนความดันต่ำ..... 129
ค.7	แสดงการตั้งค่า Setup สำหรับเมนูป้อนและหัวตัด..... 131
ค.8	การตั้งค่าสำหรับป้อนและหัวตัด..... 131
ค.9	แสดงการกำหนดค่าสำหรับการตัดและระยะเวลา Relay.....132
ค.10	แสดงตัวอย่างการกำหนดค่าวัสดุ..... 133
ค.11	แสดงฟังก์ชันตำแหน่งหัวตัด..... 133
ค.12	แสดงความสูงแกน Z..... 134
ค.13	แสดงชุดADO ภายในป้อน..... 136
ค.14	แสดงชุดADO ลูกบิดปรับแรงดัน..... 137
ค.15	แสดงการหมุนน็อตสกรูแบบปีกกลับทางกับลูกบิดประมาณ 0.635 เซนติเมตร..... 137
ค.16	แสดงการเลือกไฟล์ ORD , Variable_Dump_Orifice_Adjustment_Routine..... 138
ค.17	แสดงการคลิกปุ่ม Nozzle Test เพื่อปรับตั้งแรงดันป้อน..... 138
ค.18	แสดงหน้าต่างตัวเลือก Test Pump & Nozzle ด้วยการเลือก High..... 139
ค.19	แสดงตั้งค่าแรงดันตัดโดยใช้การปรับความดันสูงของป้อน..... 139
ค.20	แสดงการคลิกปุ่ม STOP หลังจากตั้งค่าแรงดันตัดที่ต้องการ..... 140
ค.21	แสดงการคลิกที่ Start เพื่อการปรับถ่ายโอนแรงดันทางเข้า..... 140
ค.22	แสดงการการปรับตั้งความเร็วรอบของป้อน Local และ Remote..... 141

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมภายในประเทศและต่างประเทศได้มีการพัฒนาและเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ภาคอุตสาหกรรมการผลิตจึงมีความจำเป็นต้องมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้ทันต่อความต้องการของผู้บริโภคที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะประสบปัญหาด้านสถานะเศรษฐกิจหรือปัญหาภายในประเทศก็ตาม จากเหตุผลดังกล่าวจึงต้องมีการปรับปรุงหรือหาความเหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปหรือการผลิตต่าง ๆ จากการใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการขึ้นรูปจึงทำให้ทั้งโรงงานขนาดเล็กและขนาดใหญ่ภายในประเทศต้องทำการพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพที่ดีและทันต่อความต้องการของผู้บริโภค

เซรามิก (Ceramic) เซรามิกมีรากศัพท์มาจากภาษากรีก Keramos มีความหมายว่า สิ่งที่ถูกเผา ในอดีตวัสดุเซรามิกที่มีการใช้งานมากที่สุดคือ เซรามิกดั้งเดิม ทำมาจากวัสดุหลักคือดินเหนียว เซรามิก หมายถึงศิลปะที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปั้นดินเผา เนื่องจากคำว่า “เซรามิก” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่า “เครามอส” ซึ่งหมายถึงวัสดุที่ผ่านการเผา ปัจจุบันนี้ เซรามิก หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบในธรรมชาติ เช่น ดิน หิน ทราย และแร่ธาตุต่างๆ นำมาผสมกัน แล้วทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ หลังจากนั้นจึงนำไปเผาเพื่อเปลี่ยนเนื้อวัสดุให้แข็งแรง สามารถคงรูปอยู่ได้ อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ รวมทั้งเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานรองรับอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกหลายอย่าง เช่น วัสดุทนไฟเป็นวัสดุพื้นฐานของอุตสาหกรรมถลุงและผลิตโลหะ ซีเมนต์เป็นวัสดุสำคัญของงานการก่อสร้าง สถาปัตยกรรม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ โทรทัศน์ วิทยุ รถยนต์ อุปกรณ์ในเครื่องจักรต่างๆ อุปกรณ์ทางการแพทย์ กระดูกเทียม ฟันปลอมจะมีส่วนที่เป็น เซรามิกประกอบอยู่ด้วย เป็นต้น (Scimath, Online, 2555)

เซรามิกแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ (คชินท์, 2553)

(1) เซรามิกแบบดั้งเดิม (Traditional ceramics) ได้แก่ ถ้วย จานชาม สุขภัณฑ์ ลูกถ้วย ไฟฟ้า กระเบื้องปูพื้นและบุผนัง กระเบื้องหลังคา วัสดุทนไฟ แผ่นรองเผาในเตา อิฐก่อสร้าง กระดาษดินไม้ โอ่ง กระฉกและแก้ว ปูนซีเมนต์ ยิปซัม ปูนพลาสติก เป็นต้นซึ่งทำมาจากวัสดุหลักคือดินดำ ดินขาว ดินแดง หินฟันม้า ทราย หินปูน หินผุ ควอตซ์ และแร่อื่นๆ

การแบ่งชนิดของเนื้อดินสำหรับ Traditional ceramics (สิริพรรณ, 2535)

1. ดินเกาลิน (Kaolin) หรือดินไชนาเคลย์ (China clay) เป็นดินที่ประกอบด้วยแร่เคโอลินไนต์เป็นส่วนใหญ่ มีสีขาว สีเทาอ่อน ความเหนียวน้อย การหดตัวและความแข็งแรงหลังการอบแห้งต่ำ ความทนไฟสูง และมีสีขาวหลังการเผา ดินเกาลินมักใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดิน เพิ่มความขาวและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ สาเหตุที่ไม่นิยมใช้แต่ดินเกาลิน เพียงอย่างเดียวมาทำผลิตภัณฑ์นั้น เพราะดินเกาลินไม่มีความเหนียว และต้องใช้อุณหภูมิการเผาสูง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและความหนาแน่น

2. ดินบอลเคลย์ (Ball clay) เป็นดินที่ประกอบด้วยแร่เคโอลินไนต์ ชนิดโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ (Disorder kaolinite) มักมีแร่ลิลด์ มอนต์มอริลโลไนท์ปะปน และมีเหล็กในปริมาณสูง มีสีตั้งแต่เทาจนถึงดำ ขึ้นกับสารปนเปื้อน โดยเฉพาะอินทรีย์วัตถุ อนุภาคมีขนาดเล็ก เหนียว การหดตัวสูง ดินบางแหล่งอาจมีการหดตัวสูงถึง 20% หลังการเผามักให้สีขาวหรือเหลืองอ่อน ดินบอลเคลย์ไม่สามารถนำมาใช้ขึ้นรูปได้โดยลำพัง เพราะมีการหดตัวสูง ต้องมีการผสมดินชนิดอื่น ที่มีความเหนียวน้อยกว่า อาทิ ดินเกาลิน จึงได้ดินที่มีความเหนียวเหมาะสม ต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามในผลิตภัณฑ์ ที่ต้องการความขาว ปริมาณของดินบอลเคลย์ที่ใช้ไม่ควรเกิน 15% และการมีบอลเคลย์ในเนื้อปอร์ซเลน จะทำให้สมบัติความโปร่งแสงลดลง

3. ดินทนไฟ (Fire clays) เป็นดินที่มีสารประกอบของเหล็กออกไซด์ โลหะแมกนีเซีย และอัลคาไลน์น้อย สามารถทนต่อการหลอมเหลว (Fusion) ได้ถึงอุณหภูมิ 1500°C สมบัติอื่นๆ อาทิ ความเหนียว สี มีการผันแปรในช่วงกว้างมาก อาทิ ในบางแหล่งมีความเหนียวเหมาะสมต่อการขึ้นรูป แต่บางแหล่ง ต้องผสมดินบอลเคลย์ เพื่อเพิ่มความเหนียว ดินทนไฟนำมาใช้ผลิตอิฐทนไฟ และวัสดุทนไฟ อาทิ ชิ้นส่วนของเตาเผา เป็นต้น

4. ดินสโตนแวร์ (Stoneware clays) เป็นดินที่มีเนื้อหยาบ เหนียว มีจุดสุกตัวสูง 1200-1300°C สีหลังการเผามีตั้งแต่สีเทาอ่อน เทาเข้ม หรือน้ำตาล นอกจากสีที่มีการผันแปรในช่วงกว้างแล้ว ความเหนียว และช่วงอุณหภูมิของดินสโตนแวร์ ในแต่ละแหล่งแตกต่างกันมาก ดินสโตนแวร์ นิยมใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผา ชนิดเนื้อแน่น แข็งแกร่ง เช่น กระเบื้อง ถ้วยชาม โถ

5. ดินเอิร์ทเทนแวร์ (Earthenware clays) เป็นดินที่มีเหล็กและแร่ต่างๆ ในปริมาณสูง ทนไฟต่ำ ในช่วง 950-1100°C สีของดินมีตั้งแต่สีแดง น้ำตาล เขียว หรือเทา ซึ่งเป็นผลจากเหล็กออกไซด์ ดินหลังเผามีสีแดง เหลืองอ่อน น้ำตาล หรือดำ ดินเอิร์ทเทนแวร์ที่มีสีแดง มักมีความเหนียวสูง ซึ่งสามารถลดความเหนียวได้ โดยผสมทรายหรือหิน เพื่อให้เหมาะสมต่อการขึ้นรูป ดินเอิร์ทเทนแวร์นิยมใช้ทำอิฐ หม้อดินเผา และกระเบื้องมุงหลังคา

(2) เซรามิกสมัยใหม่ (Fine ceramics/ New ceramics/ Advanced ceramics) คือเซรามิกที่ต้องใช้วัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการมาแล้วเพื่อให้มีความบริสุทธิ์สูงได้รับการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) อย่างแม่นยำ โดยเซรามิกสมัยใหม่อาจแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ เซรามิกสำหรับงานโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ เซรามิกสำหรับงานทางด้าน การแพทย์และ อะลูมินาเซรามิก

1. เซรามิกสำหรับงานโครงสร้าง (Structural ceramics) ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้ในงานที่ต้องการสมบัติทางกลที่ดีที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการสึกหรอและการกัดกร่อนได้ดี ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี เป็นฉนวนความร้อน ตัวอย่างเซรามิกสำหรับงานโครงสร้าง เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) สำหรับใช้ทำวัสดุสำหรับตัดแต่ง หัวปั่นไฟ (Burner) ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เช่น ปลอกนำวาล์ว (Valve guide) และ ซีลที่ทนแรงดันสูง (Mechanical seal) ซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride, Si₃N₄) สำหรับใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องยนต์กลไก เช่น ลูกปืน (Bearing ball) วาล์ว (Valve) สลักลูกสูบ (Piston pin) เบรคสำหรับรถยนต์ที่เป็น Exotic car และใบพัดของเทอร์โบชาร์จเจอร์ (Turbocharger rotor blade) และ อะลูมินัมไนไตรด์ (Aluminum nitride, AlN) สำหรับใช้ทำแผ่นรองวงจรสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น กรรไกรและมีดเซรามิกที่ทำด้วยเซอร์โคเนีย (ZrO₂) ซึ่งเป็นมีดเซรามิกที่มีความคมมาก และไม่ต้องลับเนื่องจากเซอร์โคเนียมีความแข็งสูงและไม่สึกกร่อนง่ายจึงไม่ทำให้มีดทื่อ เซรามิกสำหรับงานโครงสร้างอีกตัวอย่างหนึ่งคือผิวของยานกระสวยอวกาศ (Space shuttle) ในตอนที่ยานเข้ามาจากอวกาศเข้าสู่บรรยากาศของโลกนั้นจะเกิดการเสียดสีกับบรรยากาศของโลกทำให้มีอุณหภูมิสูงมาก ซึ่งมากกว่า 2000 °C โครงสร้างลำตัวของยานภายในนั้นจริงๆ แล้วทำจากโลหะผสมซึ่งทนความร้อนได้ไม่เกิน 800 °C แต่ผิวของยานนั้นปูด้วยแผ่นกระเบื้องเซรามิกเล็กๆ ซึ่งทนความร้อนสูงจำนวนมาก ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทำแผ่นเซรามิกดังกล่าว เช่น เส้นใยซิลิกาอะมอร์ฟัสความบริสุทธิ์สูงมาก (Very-high-purity amorphous silica fibers) และ แผ่นกระเบื้องเล็กๆ ที่ทำด้วยเซอร์โคเนียทำให้ทนอุณหภูมิสูงได้และอีกตัวอย่างหนึ่งที่อยู่ใกล้ตัวสำหรับผู้ที่ใช้รถยนต์คือ ที่ท่อไอเสียรถยนต์จะมีเซรามิก ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า แคตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ช่วยทำหน้าที่เปลี่ยน ก๊าซต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่เป็นพิษต่อมนุษย์ให้เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ เช่น เปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำแคตาไลติกคอนเวอร์เตอร์จะต้องมีคุณสมบัติที่สามารถทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันได้เป็นอย่างดี ซึ่งหมายถึงจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้ก็คือคอร์เดียไรท์นั่นเอง โดยแคตาไลติกคอนเวอร์เตอร์นั้นจะ

ใช้คอร์เดียไรท์มาขึ้นรูปโดยการ Extrude เป็นรังผึ้ง (Honey comb) เพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนก๊าซได้ดี

2. อิเล็กโทรเซรามิก (Electroceramics) ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้สมบัติทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ แม่เหล็ก แสง เป็นหลัก อิเล็กโทรเซรามิกนั้นเป็นกลุ่มเซรามิกที่มีมากมายหลายชนิด และครอบคลุมสมบัติด้านต่าง ๆ หลายอย่างได้แก่ ไฟฟ้า แม่เหล็ก แสง และ ความร้อน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ไดอิเล็กทริกเซรามิก (Dielectric ceramics) เช่น แบเรียมไททาเนต (Barium titanate, BaTiO_3) สำหรับใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics) ซึ่งเป็นเซรามิกที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานกล-พลังงานไฟฟ้ากลับไปมาได้ (“Piezo” มาจากภาษากรีก แปลว่า กด (Press)) วัสดุนี้เมื่อให้แรงกลเข้าไปจะสามารถเปลี่ยนแรงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้หรือในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้ ตัวอย่างเช่น เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead zirconate titanate, $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) สำหรับใช้ทำทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ชุดโหลดเซลล์สำหรับเครื่องชั่งขนาดใหญ่ ตัวจุดเตาแก๊ส (Gas ignitor) หรือที่ใกล้ตัวเราก็คือการควั่นเกิดที่เมื่อเปิดแล้วมีเสียงเพลงดังขึ้นก็อาศัยหลักการของเพียโซอิเล็กทริกนั่นเอง นอกจากนี้อิเล็กโทรเซรามิกยังมีเซรามิกแม่เหล็ก (Magnetic ceramics) เช่น เฟอร์ไรต์ (Ferrite, Fe_3O_4) ซึ่งใช้เป็นวัสดุบันทึกข้อมูล เป็นต้น

3. เซรามิกสำหรับงานทางด้านการแพทย์ พวกกระดูกเทียม ฟันปลอม ข้อต่อเทียม ตัวอย่างเช่น วัสดุที่เรียกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งทำมาจากกระดูกวัว กระดูกควายที่ผ่านการเผาแบบ Calcine เพื่อไล่สารอินทรีย์ภายในและนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นกระดูกและนำไปเผาแบบ Sinter อีกครั้งหนึ่ง

4. อะลูมินาเซรามิกชื่อทางเคมีคือ Aluminium oxide มีสูตรทางเคมีเป็น Al_2O_3 จัดเป็นออกไซด์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ยุคโบราณกระทั่งถึงปัจจุบันและยังคงถูกพัฒนานำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคต สมบัติของอะลูมินาที่มีค่าความแข็งแรงสูงมีความหนาแน่นสูงมีความต้านทานต่อการขีดสีและสึกกร่อนสูงทนต่อสารเคมีเป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดีและมีความทนไฟสูงจึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภทเช่น อุตสาหกรรมเครื่องจักร อุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้า อุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้า อุปกรณ์ประกอบในจรวด เครื่องมือตัดแต่งอุปกรณ์ทางการแพทย์อวัยวะเทียมเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เป็นต้น

จะเห็นได้ว่า แนวโน้มการเติบโตของอุตสาหกรรมเซรามิกมีการขยายเป็นวงกว้าง และปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านเซรามิกสมัยใหม่ได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อะลูมินาเซรามิกให้ดียิ่งๆขึ้นไป (ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก, 2545)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นอะลูมินา เซรามิกมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อแตกต่างกัน ทั้งในการเตรียมเนื้อดินปั้น และอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ รวมถึงรูปลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้ โดยทั่วไปแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ (สุรศักดิ์, 2536)

1. การเทแบบ (Casting) วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปน้ำดินข้นๆ (Slip) ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงเทลงในแบบปูนปลาสเตอร์ ปูนจะดูดน้ำและทำให้เนื้อดินเกาะติดกับผนังแบบ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ วิธีนี้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปทรง แต่ต้องใช้น้ำในการขึ้นรูปมาก ทำให้การหดตัวหลังอบแห้งสูง ซึ่งอาจเกิดการแตกหรือบิดเบี้ยวได้ง่าย ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้แก่ เช่น สุขภัณฑ์ ถ้วยชาม ของที่ระลึกประเภทต่างๆ เป็นต้น

2. การอัด (Pressing) วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปของผงกลมๆ ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงนำไปอัด ด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงเพื่อให้เกาะติดกันเป็นแผ่น วิธีนี้จะใช้น้ำในการขึ้นรูปน้อยที่สุด ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง มีการหดตัวน้อยกว่าวิธีอื่นๆ แต่รูปทรงผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้จำกัดกว่า ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้แก่ กระเบื้องชนิดต่างๆ เป็นต้น

การตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกแบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ Diamond cutting Laser cutting และ Waterjet cutting โดยที่ Diamond cutting เพชรใช้เป็นเครื่องมือตัดคมเคียวสำหรับการตัดขนาดเบาๆ ที่อัตราเร็วสูงซึ่งต้องมีการรองรับอย่างมั่นคงแข็งแรงเนื่องจากเพชร มีความแข็งและเปราะสูงมาก เป็นพิเศษประสบปัญหาด้านการตัดเนื่องจากกระบวนการตัดใช้เวลาค่อนข้างนาน ผลิตได้น้อยชิ้น จึงไม่คุ้มค่าต่อการผลิต(ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรม, 2535) Laser cutting ให้ความแม่นยำที่สูงมาก และทำให้รอยที่เกิดจากการตัดโลหะด้วยความร้อนมีขนาดเล็กที่สุดจากกลุ่มของการตัดโดยใช้ อุณหภูมิค่าใช้จ่ายในการใช้ Laser นั้นมีค่าสูงกว่าระบบการตัดแบบอื่นๆทั้งหมด แต่ความหนาของวัสดุที่จะทำการตัดมีความจำกัดและอาจจะมีปัญหาในการตัดวัสดุที่สะท้อนแสงได้Waterjet cutting มีอนุภาคพ่นที่จะทำการตัดโลหะต่างๆให้ขาดได้ โดยจะมีการปล่อยสารกัดกร่อนเป็นแร่โกเมน ลงไปรวมกับกระแสน้ำก่อนที่จะออกจากหัวฉีด ซึ่งจากการผสมผสานกันนี้ทำให้สามารถตัดวัสดุต่างๆ ได้หลากหลายกว่าการใช้น้ำตัดอย่างเดียว โดยทั่วไปการตัดส่วนมากจะตัดภายใต้ น้ำ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดเสียงดังที่เกิดขึ้นค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบนี้มีราคาถูกกว่าแบบ Laser cuttingและไม่ก่อให้เกิดรอยจากความร้อน ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับพวกโลหะแข็งแต่เครื่องมือที่ใช้ในเทคโนโลยีนี้มีราคาที่สูงกว่าเทคโนโลยีแบบอื่นP. Gudimetla et al. (2545) โดยการศึกษารูปแบบโมเดลการทดลองอัตราการกัดเซาะเป็นการเทียบเคียงค่าความแข็งกับขนาดของเกรนและพลังงานแตกร้าวของวัสดุ Jiyue Zeng and Thomass J.kim (1995) ขนาดรอยแตกร้าวสามารถคาดการณ์ได้จากแรงดันน้ำที่พ่นออกมาที่บริเวณจุดตัดซึ่งอาจบอกได้ถึงความสัมพันธ์ของขนาดหัวตัดของเครื่องจักร Gi sand choi and Gi heung (1996) จากการวิเคราะห์ให้ทราบถึงรัศมีการแตกร้าวไม่ได้เกิดจากการ

แพร่กระจายของอนุภาคที่ส่งผลกระทบในกระบวนการทำงานของเครื่องจักร M.wakuda et al. (2001) or Manabu et al. (2003) คุณภาพของพื้นผิวที่สม่ำเสมอสามารถปรับใช้เทคนิคด้วยการส่าย หัวตัดไปข้างหน้าจะสามารถเพิ่มความเรียบผิวเพิ่มขึ้นอีก 30% เมื่อเปรียบเทียบกับการปราศจากการ ส่ายหัวตัด L.chen et al. (1996) ความลึกสูงสุดในการตัดเซรามิกกับรูปแบบแนวคิดใหม่จากการเพิ่ม แรงดันและการลดอัตราการไหลของสารขัดลงจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดชิ้นงานมาก ขึ้น 4%จากวิธีการเดิม A.A.Abdel-Rahaman and A.A.Ei – Domiaty (1998) ลักษณะการตัดแผ่น เซรามิกแบบทิศทางเดียวอัตราการเร็วคงที่ 3.33 mm/s ส่งผลให้พื้นผิวเซรามิกเรียบขึ้น J.wany and D.M.Cuo (2002) ทั้งนี้การวิจัยที่ทำการศึกษาคัดชิ้นงานด้วยระบบ Abrasive Water Jetก็จะ มุ่งเน้นศึกษาไปที่คุณภาพพื้นผิวที่ได้จากการตัดหรือปริมาณในการตัด, Among.them P.Gudimetla et al.(2002), Yukihiro Yamauchi and Shuzo KanZaki. (2002) , J.wang (2006), Ushasta et al. (2014), DerzijaBeaic - Hajdarevic.et al. (2014), M.Hshish et al. (1996) and L.M.Hiavac et al. (2009) การทดลองการตัดด้วยระบบ Abrasive Water Jet นั้นนักวิจัยส่วนมากจะเลือกใช้แผ่นอะลูมิ น่าเซรามิกประเภทที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป (Pressing) มาเป็นชิ้นงานในการทดลองและ ปัจจุบันยังมีข้อมูลไม่เพียงพอเพื่อมาเป็นแนวทางการวิจัยทางด้านการตัดระบบ Abrasive Water Jet ที่ใช้วัสดุประเภทแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่ผ่านการหล่อขึ้นรูป (Casting) มาเป็นชิ้นงานในการทดลอง เนื่องด้วยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปประเภทนี้มีคุณสมบัติเด่นคือ สามารถขึ้นรูปทรงที่ซับซ้อนได้ ต้นทุนการขึ้นรูปแต่ละครั้งถูกกว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูปจึงมีความสนใจที่จะ เลือกใช้วัสดุประเภทนี้มาใช้ในการทดลองตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting)

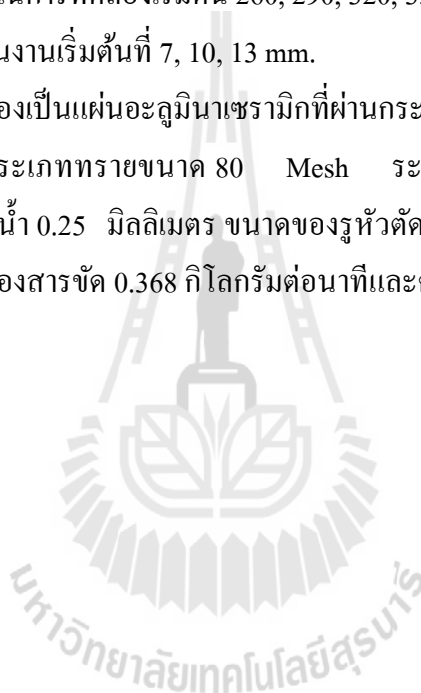
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกกับ ความหนาของแผ่นอะลูมินาเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) โดยเลือกใช้วัสดุประเภท แผ่นอะลูมินาเซรามิกที่ผ่านการหล่อขึ้นรูป (Casting) มาใช้ในการทดลอง เนื่องด้วยแผ่นอะลูมินา เซรามิกที่ผ่านการหล่อขึ้นรูป (Casting) มีคุณสมบัติเด่น คือ สามารถขึ้นรูปร่างซับซ้อนได้ดี การขึ้น รูปแต่ละครั้งมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่ผ่านการอัดขึ้นรูป (Pressing) โดยการ ทดลองตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดผ่านการขึ้นรูปด้วยการหล่อขึ้นรูป (Casting) นี้สามารถนำผล จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการผลิตแผ่นรองแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในภาคอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ และรวมไปถึงใช้ในการผลิตแผ่นอะลูมินาเซรามิกสำหรับแผ่นรองเตา (Alumina Setter/ Plate for High Temperature Furnaces)ในภาคอุตสาหกรรมเตาเผาหรือเตาหลอมอุณหภูมิสูง อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกกับความหนาของแผ่นอะลูมินาเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ใช้เครื่อง Water Jet รุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530 ในการทดลองตัด
- 1.3.2 แรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองเริ่มต้น 260, 290, 320, 350, 380 MPa
- 1.3.3 ความหนาชิ้นงานเริ่มต้นที่ 7, 10, 13 mm.
- 1.3.4 ชิ้นงานทดลองเป็นแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูป
- 1.3.5 ใช้สารขัดประเภททรายขนาด 80 Mesh ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร ขนาดของรูรีดน้ำ 0.25 มิลลิเมตร ขนาดของรูหัวตัด 0.7 มิลลิเมตร กำหนดคุณภาพผิวระดับ Q3 อัตราการไหลของสารขัด 0.368 กิโลกรัมต่อนาทีและความเร็วในการตัด 0.265 มิลลิเมตรต่อวินาที



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้อธิบายถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่จะมาใช้ในการสนับสนุนการศึกษาหาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกกับความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีทั่วไปของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง

นอร์แมน ฟรานซ์ และ โมฮาหมัด ฮาริซ อธิบายว่า ระบบวอเตอร์เจ็ตแรงดันสูงเป็นเครื่องมือในการตัดวัสดุ โดยจำกัดความของคำว่าแรงดันสูง (Ultrahigh-Pressure : UHP) คือต้องมีแรงดันมากกว่า 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเพื่อให้กระแสน้ำไหลผ่านไปยังปลายท่อขนาดเล็ก ทำให้เกิดแรงกระสอยพุ่งจากแรงดันของกระแสน้ำ

การเพิ่มกำลังในการตัดของระบบวอเตอร์เจ็ต ให้สามารถตัดวัสดุที่เป็นเหล็กและวัสดุแข็งชนิดอื่น ๆ ได้ ในระบบแบริฟวอเตอร์เจ็ต ต้องเพิ่มสารกัดกร่อนเข้าไปในระบบวอเตอร์เจ็ตแบบธรรมดา โดยการใช้สารกัดกร่อนที่ทำจากแร่โกเมน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทั่วไปในการผลิตกระด้ายทราย ด้วยวิธีการนี้หัวฉีดที่มีสารกัดกร่อน ก็สามารถตัดวัสดุได้ทุกชนิด ระบบวอเตอร์เจ็ตมีประเภท คือ

1. ระบบเพียววอเตอร์เจ็ต (Pure Water Jet)
2. ระบบแบริฟวอเตอร์เจ็ต (Abrasive Water Jet)

ซึ่งการออกแบบเพื่อใช้งานนั้น คือทั้งแบบเพียวระบบวอเตอร์เจ็ต และระบบแบริฟวอเตอร์เจ็ต น้ำจะต้องผ่านการใช้อากาศอัดแรงดันก่อนทุกครั้งในการทำงาน

2.1.1 องค์ประกอบเบื้องต้นของเครื่องวอเตอร์เจ็ต

1. ระบบการกรองน้ำ (Water Filtration System)
2. ปั๊มแรงดันสูง (The High Pressure Intensifier Pump)
 - เครื่องสูบน้ำเพิ่มแรงดัน (Intensifier Based Pump)
 - เครื่องสูบน้ำระบบขับเคลื่อนตรง (Direct Drivebased Pump)

3.หัวตัด (The Cutting Head)

4.สารขัด (The Abrasive Catcher)

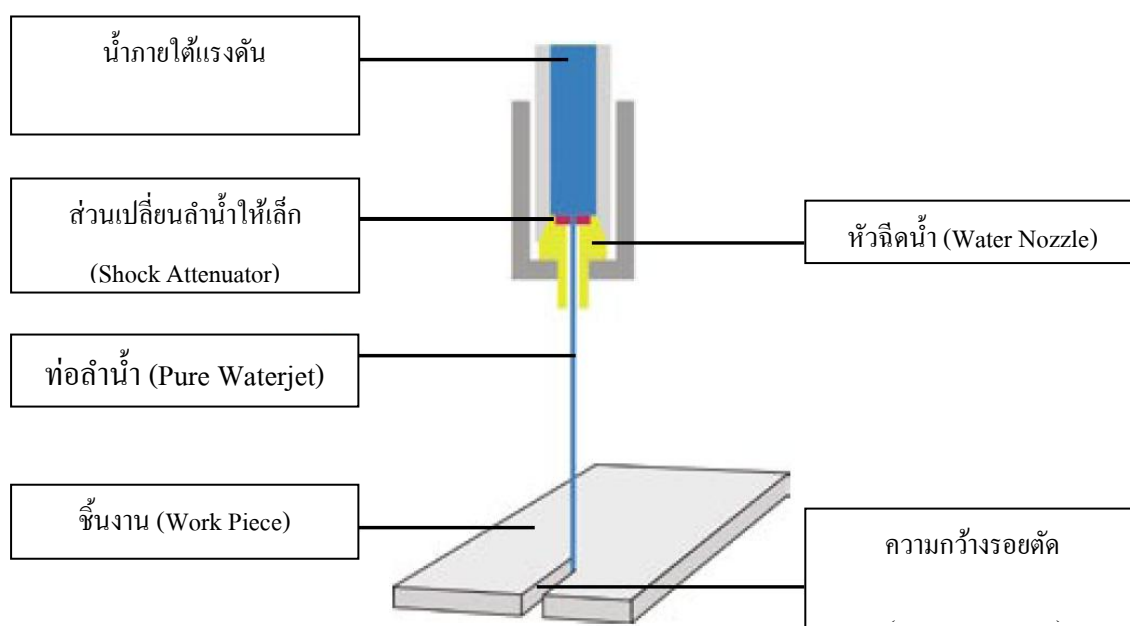
5. คอมพิวเตอร์คำนวณผล(Accumulator)

6.ระบบควบคุมการเคลื่อนไหวน (The Motion Control Systems)

- เครื่องจักรที่ติดตั้งอยู่กับที่แบบ 1 มิติ
- โต๊ะ XY สำหรับการตัด 2 มิติ
- เครื่องจักรแบบ 5 แกนขึ้นไป สำหรับงานตัด 3 มิติ

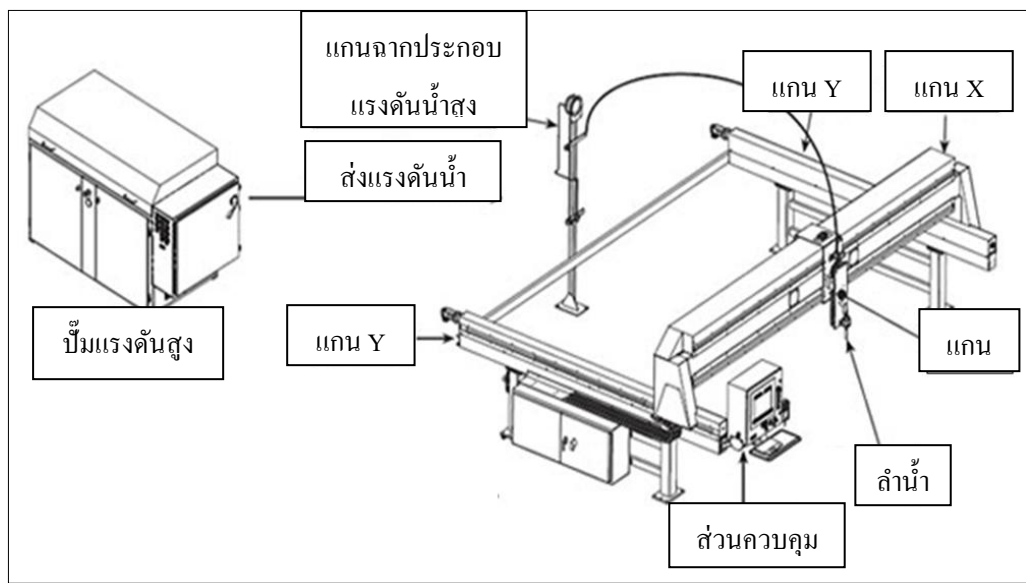
2.1.2 ระบบเพียววอเตอร์เจ็ต(Pure Water Jet)

ระบบเพียววอเตอร์เจ็ตเป็นระบบที่มีกระแสน้ำที่เคลื่อนที่เร็วกว่าเสียงโดยสามารถกัดเซาะวัสดุได้ ซึ่งเป็นระบบดั้งเดิมของการตัดด้วยแรงดันน้ำการนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์ครั้งแรกเกิดขึ้นช่วงต้นของยุคปี 1970 และนำไปใช้ในการตัดกระดาดแข็งลูกฟูก การตัดด้วยระบบเพียววอเตอร์เจ็ต ถูกนำไปใช้มากที่สุดในการตัด ผ้าอ้อมกระดาดกระดาดชำระและอุปกรณ์ภายในรถยนต์ ชุดหัวตัดของระบบเพียววอเตอร์เจ็ต แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงชุดหัวตัดของระบบเพียววอเตอร์เจ็ต

ที่มา : <http://www.engineerstudent.co.uk>



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของระบบวอเตอร์เจ็ท

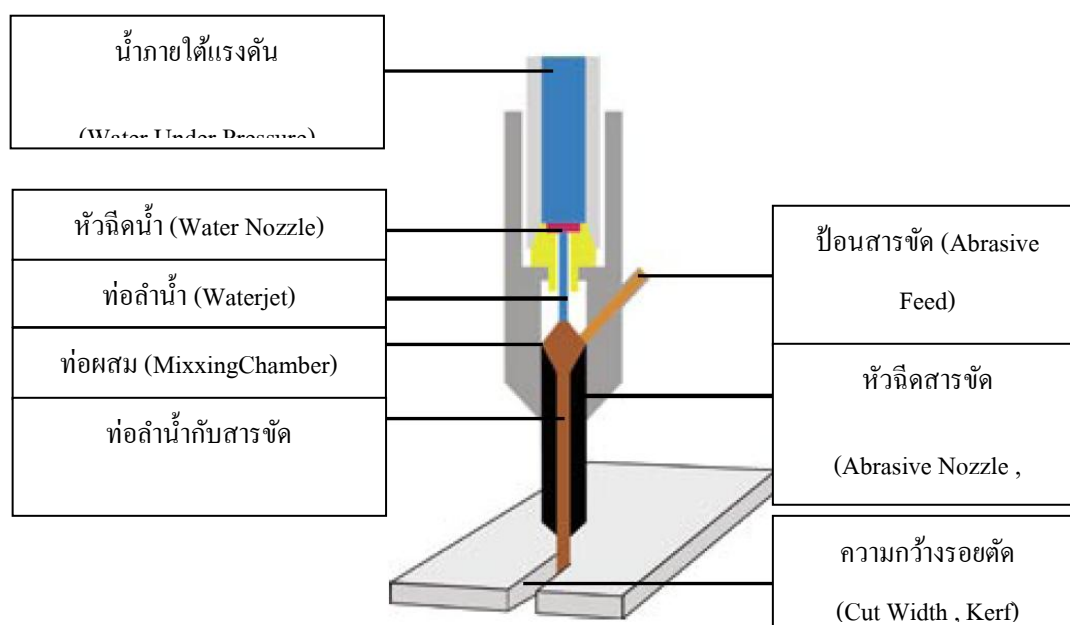
ที่มา : <https://commons.wikimedia.org>

คุณสมบัติของระบบเพียววอเตอร์เจ็ท

1. กระแสน้ำบางมาก (เส้นผ่านศูนย์กลางจะอยู่ที่ 0.004 ถึง 0.010 นิ้ว)
2. สามารถตัดรูปทรงเรขาคณิตที่ให้รายละเอียดสูง
3. สูญเสียเนื้อวัสดุจากการตัดน้อยมาก
4. ไม่ทำให้เกิดความร้อนจากการตัด
5. สามารถตัดวัสดุที่หนาหลายๆ ได้
6. สามารถตัดวัสดุที่บางมากๆ ได้
7. สามารถทำงานตัดได้รวดเร็ว
8. สามารถตัดวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและนุ่มได้เป็นอย่างดี
9. เกิดแรงเสียดทานในการตัดน้อยมาก
10. เดินเครื่องใช้งานได้ 24 ชั่วโมงต่อวัน

2.1.3 ระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ต(Abrasive Water Jet)

ระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ต เป็นระบบที่มีกระแสน้ำของระบบจะเร่งความเร็ว อนุภาคสารกัดกร่อนและอนุภาคเหล่านั้นจะเป็นตัวกัดเซาะระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ตจะตัดวัสดุที่มีความแข็ง เช่น โลหะ หิน วัสดุผสมและเซรามิก ระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ตที่ใช้ตัวแปรเสริมมาตรฐานสามารถตัดวัสดุต่าง ๆ ที่มีความแข็งขนาดเท่ากับหรือมากกว่า เซรามิก อลูมิเนียมออกไซด์ (หรือเรียกว่าอลูมินา, AD 99.9) ชุดหัวตัดของระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ตแสดงดังรูปที่ 2.3



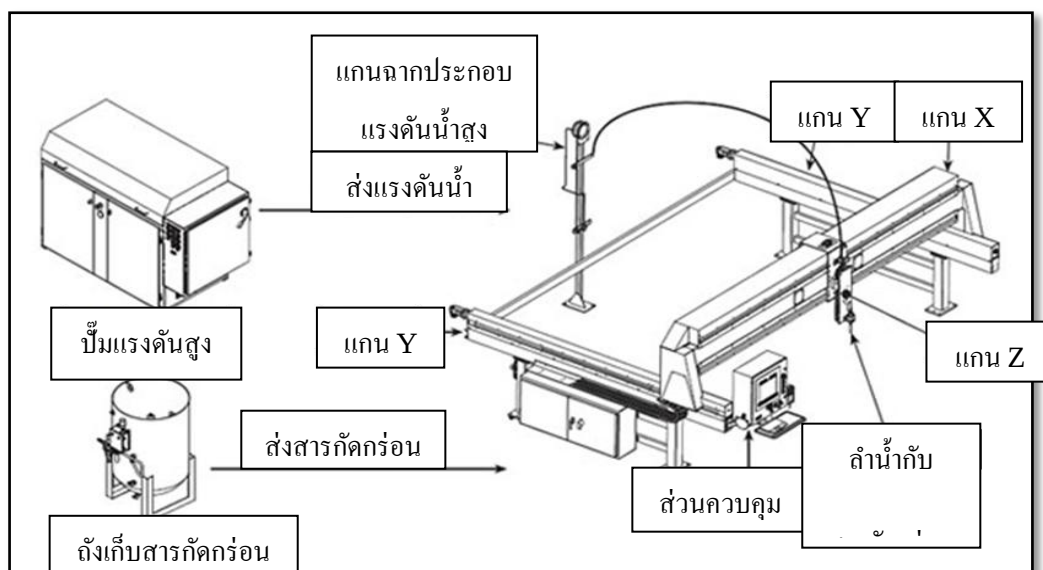
รูปที่ 2.3 แสดงชุดหัวตัดของระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ต

ที่มา : <http://www.engineerstudent.co.uk>

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

สารขัด หรือ Abrasive แต่ละขนาดมีเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกันไปดังนี้

1. 120 Mesh ใช้สำหรับพื้นผิวอ่อนนุ่ม
2. 80 Mesh ใช้สำหรับงานตัดทั่วไป
3. 50 Mesh ได้เร็วกว่าขนาด 80 Mesh และให้พื้นผิวที่หยาบเล็กน้อย



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ต

ที่มา : <https://commons.wikimedia.org>

คุณสมบัติของระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ต

- 1.ความสามารถในการทำงานที่หลากหลายมาก
- 2.ไม่ทำให้เกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน
- 3.ไม่เกิดแรงเค้นของเครื่องจักรกล
- 4.ตั้งคำสั่งการทำงานได้ง่าย
- 5.กระแสน้ำขนาดบาง (0.020 ถึง 0.050 นิ้ว ตามเส้นผ่านศูนย์กลาง)
- 6.สามารถตัดรูปทรงเรขาคณิตที่ไร้รายละเอียดสูงได้
- 7.สามารถตัดวัสดุที่บางมาก ๆ และหนาถึง 10 นิ้วได้
- 8.สามารถทำการตัดวัสดุที่ซ้อนกันได้ และสูญเสียเนื้อวัสดุในการตัดน้อย
- 9.เกิดแรงเสียดทานในการตัดต่ำมาก (ต่ำกว่า 1 ปอนด์ ขณะที่ทำการตัด)
- 10.ติดตั้งหัวฉีดเพียงอันเดียวสำหรับงานตัดที่ใช้หัวฉีดได้เกือบทุกชนิด
- 11.สามารถสลับการใช้งานจากหัวเดียวไปเป็นหลายหัวตัดได้ง่าย
- 12.สามารถสลับการใช้งานของระบบเพียวเวอร์เตอร์เจ็ตและระบบแบริ่งฟอว์เตอร์เจ็ตได้อย่างรวดเร็ว
- 13.ลดขั้นตอนที่จะต้องตกแต่งในกรรมวิธีต่อไปและไม่เกิดเสียจากการตัด

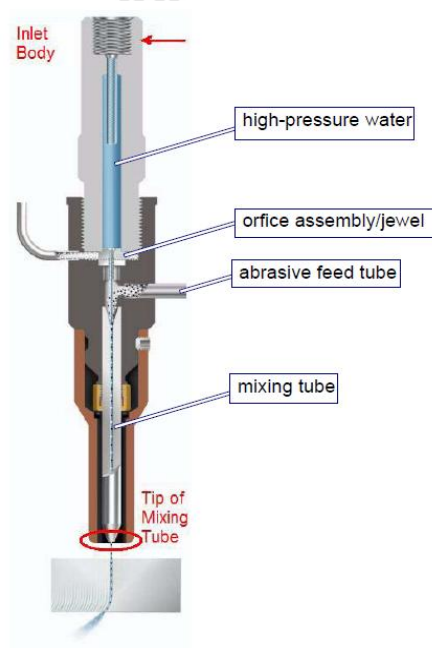
ตารางที่ 2.1 แสดงรายการของอุปกรณ์เครื่องมือที่สามารถตัดโดยกระบวนการวอเตอร์เจ็ท

หมวดของวัสดุ	วัสดุ	ความหนาสูงสุด
คอนกรีต	คอนกรีต คอนกรีตเสริมเหล็ก	14 นิ้วซึ่งรวมทั้งเนื้อละเอียดและหยาบ 14 นิ้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 นิ้ว
หิน	หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินควอร์ตไซต์ หินอ่อน อิฐทนไฟชนิดโปร่ง	12 นิ้ว 12 นิ้วรวมทั้งแผ่นฐาน 12 นิ้ว 8 นิ้ว 1.5 นิ้ว
โลหะ	เหล็กที่ไม่เป็นสนิม เหล็กเหนียว เหล็กดีเหนียว ใช้ทำเครื่องมือ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม เหล็กหล่อ ซิลิคอน ทังสเตนคาร์ไบด์ ทองสัมฤทธิ์, ตะกั่ว, ทองแดง	5 นิ้ว มากกว่า 4.5 นิ้ว มากกว่า 3 นิ้ว 6 นิ้ว 2 นิ้ว มากกว่า 3 นิ้ว มากกว่า 4.5 นิ้ว 0.5 นิ้ว 4 นิ้ว
เซรามิก	อะลูมินา แผ่นกระเบื้องเคลือบเซรามิก อะลูมินารังผึ้ง, อะลูมินาโพลี	1 นิ้ว 0.5 นิ้ว 1 นิ้ว
วัสดุชั้นสูง	เคฟลาร์	2.5 นิ้ว
สารประกอบ	ไฟเบอร์กลาส กราไฟท์	2 นิ้ว 2 นิ้ว
แก้ว	แก้วชั้นเดียว แก้วหลายชั้น แก้วลามิเนต กระจกเครื่องบิน	2 นิ้ว 25 ชั้น 3 นิ้ว 1.5 นิ้ว

ที่มา : ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ (2541:5)

2.2 ข้อมูลทั่วไปของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530

เครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง ผสมกับผงทรายใช้น้ำแรงดันสูงมากกว่า 50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำแรงดันสูงนี้จะเข้าที่ด้านบนของชุดหัวตัด และถูกบังคับจากการไหลผ่านทางเข้าที่มีรูรีด น้ำขนาดเล็ก ๆ ในนั้น การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในห้องปั๊มมีขนาดใหญ่ที่มีความเร็ว ช่วยในการดูด และดึงให้เกิดการไหลของผงทรายกระแสน้ำนี้รวมกับผงทรายก่อนผ่านเข้าท่อผสมที่มีรูขนาดเล็ก ตรงกลางผ่านทะลุทำหน้าที่ผสมน้ำกับผงทรายน้ำผสมผงทรายรวมกันที่มีความเร็วสูงที่ด้านล่างของหลอดผสมนี้จะกลายเป็นเครื่องมือตัดวัสดุ เป็นสตรีมผสมที่มีความเร็วสูง และพร้อมที่จะตัดวัสดุ



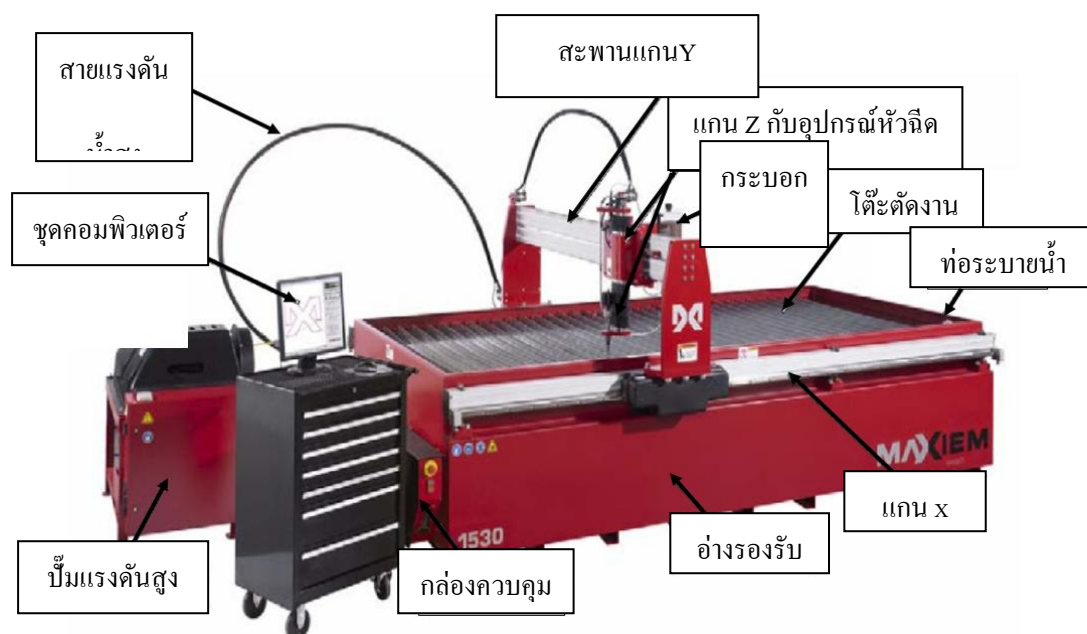
รูปที่ 2.5 แสดงการทำงานของหัวตัด Water jet

ที่มา : <http://www.thermal-mech.com>

ขอบเขตของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530 มีดังนี้

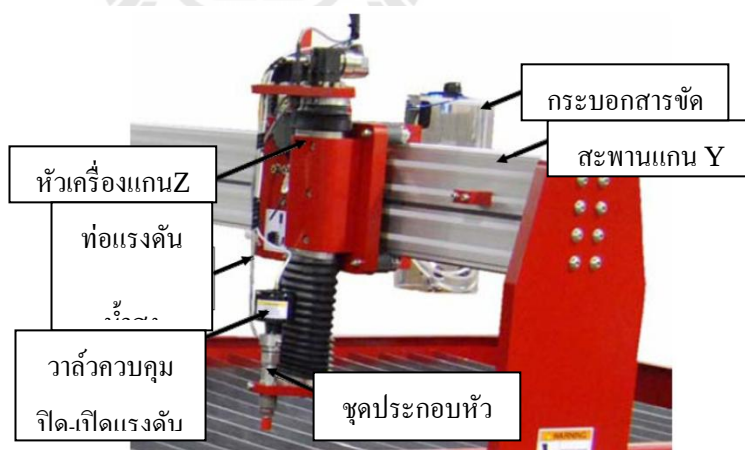
1. ขนาด 4,166 มิลลิเมตร x 2,489 มิลลิเมตร (164 นิ้ว x 98 นิ้ว)
2. น้ำหนักตัวถังสุทธิ Weight(Tank Empty) 6,212 lbs (2,818 กิโลกรัม)
3. ความสูงสุทธิ Operating Height 10 ft (3,048 มิลลิเมตร)
4. น้ำหนักสุทธิ Operating Weight 23,200 lbs (10,545 กิโลกรัม)

2.2.1 องค์ประกอบของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530



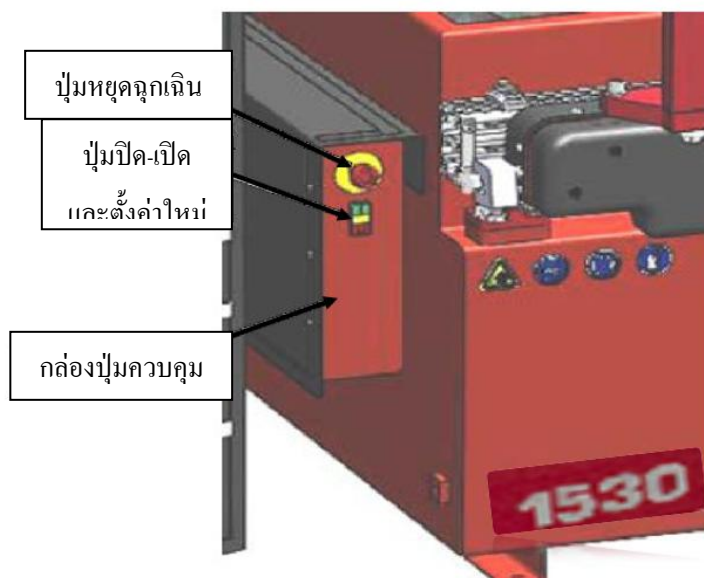
รูปที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530

ที่มา: คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530



รูปที่ 2.7 แสดงระบบส่งผงทรายตัด

ที่มา :คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530

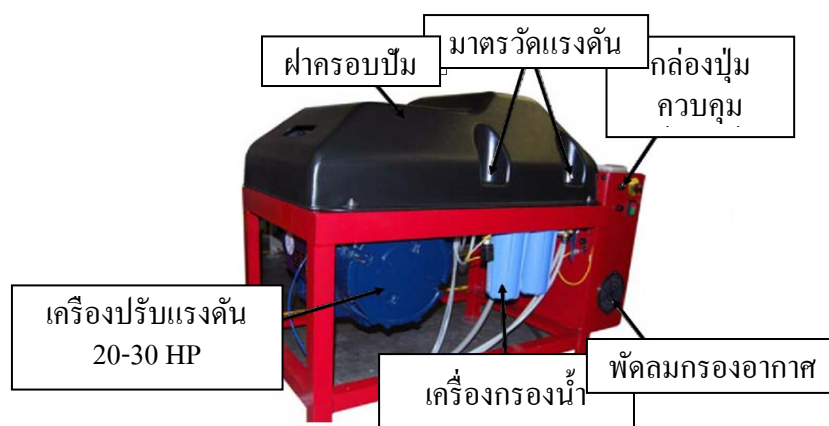


รูปที่ 2.8แสดงกล่องปุ่มควบคุม

ที่มา :คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530

2.2.2 ปั๊มแรงดันสูง MAXIEM ประกอบด้วย

1. ปั๊มน้ำแรงดันสูงจะให้น้ำแรงดันสูงเพื่อการทำงานของเครื่องจักร ชุดหลักของปั๊มจะรวมถึงไดฟ์ความถี่ตัวแปร (VFD) มอเตอร์สายพานระหว่างมอเตอร์และปั๊ม กระบอกสูบ
2. Charge Pump จะต้องสร้างแรงดันน้ำในระดับที่จำเป็น (มากกว่า 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) นอกจากนี้ยังปรับน้ำที่จะเข้าเครื่องให้มีความเย็นก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ปั๊มน้ำ น้ำเย็นนี้จะช่วยยืดอายุการทำงานของ Seal Pump ได้ ถึงเก็บน้ำต้องมีค่าแรงดันประมาณ 10-20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของแรงดันอากาศเพื่อการทำงานที่เหมาะสม ด้านหลังปั๊มแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 2.9 และด้านหน้าปั๊มแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงด้านหลังปั๊มแรงดันสูง

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530



รูปที่ 2.10 แสดงด้านหน้าปั๊มแรงดันสูง

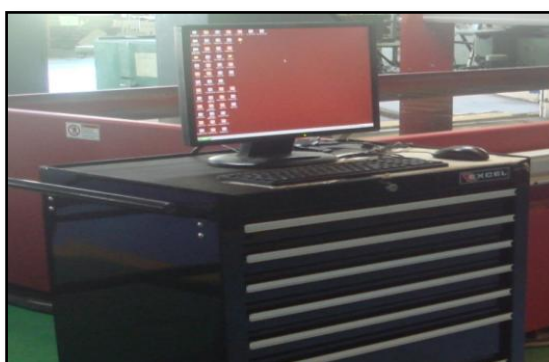
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530

2.2.3 ซอฟต์แวร์พื้นฐาน (Intelli-MAX) เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมดของ MAXIEM ประกอบด้วย

1. การสร้างแบบชิ้นงาน (Layout)รูปแบบซอฟต์แวร์การเขียนแบบ รวมถึงการเขียนแบบครบวงจรและเครื่องมือในการแก้ไขไฟล์ DXF จาก CAD อื่น ๆ โปรแกรมสามารถนำเข้าสู่การ

เขียนแบบหรือสามารถส่งออกไฟล์ไปใช้กับโปรแกรม CAD อื่น ๆ เขียนแบบแล้วสร้างไฟล์ไอออนข้อมูลแบบ OMAX (ORD) ซึ่งรวมถึงคำแนะนำการใช้และรายละเอียดของเส้นทางตัด

2. การทำชิ้นงาน หรือ การกำหนดค่าต่างๆ ในการตัดชิ้นงานจริง (Make) รูปแบบซอฟต์แวร์ตัดชิ้นงานจะคำนวณความเร็วสูงสุดในการตัดวัสดุด้วยแรงดันน้ำสูง สำหรับผลการดำเนินงานและการควบคุมการตัดทั้งหมด ทำให้ทราบเวลาและปริมาณ พงทรายเท่าใด ที่ใช้ในการตัดชิ้นงานและช่วยให้สามารถตรวจสอบเส้นทางตัดที่ถูกต้องของชิ้นงาน แม้ว่าจะไม่ได้เชื่อมต่อกับตัวเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง MAXIEM Water Jet ชุดควบคุมการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงชุดควบคุมการเคลื่อนที่พร้อมหน้าจอ เป็นพิมพ์ เม้าส์ และชุดต่อ USB
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530

2.3 อะลูมินาเซรามิก

อะลูมินา (Alumina) มีชื่อทางเคมีคือ Aluminium Oxide มีสูตรทางเคมีเป็น Al_2O_3 จัดเป็นออกไซด์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ยุคดึกดำบรรพ์ จนกระทั่งถึงปัจจุบันและยังถูกพัฒนานำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคตอะลูมินาบริสุทธิ์มีความถ่วงจำเพาะ 3.4-4.0 จุดหลอมเหลว 2,030 องศาเซลเซียสความแข็ง (Mohs scale) เท่ากับ 9 อะลูมินาในธรรมชาติจัดเป็นแร่ธาตุที่พบในรูปของ Corundum (Al_2O_3) diaspora ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) gibbsite ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) และ bauxite ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) โดยแร่ Corundum ที่พบจะเป็นรัตนชาติเช่นทับทิม (Ruby) ไพลิน (Sapphire) บุษราคัม (Yellow sapphire) เป็นรูปแบบของ Corundum ที่มีมลทินในขณะที่ Corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี อะลูมินาบริสุทธิ์และ Hydrate อะลูมินาสามารถสกัดได้จากแร่ Bauxite และดินลูกรัง โดยวิธีของ Bayer (Bayer process) คือนำแร่มาบดแล้วหลอมด้วยโซดาไฟ (Caustic soda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผาอะลูมินาจะพบในรูปแอลฟา (α) แกมมา (γ) และเบต้า (β) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแอลฟาอะลูมินาและแกมมาอะลูมินาในอุณหภูมิที่ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียสอะลูมินาจะอยู่ในรูป

แกมมาหากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง 1,150 - 1,200 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนอยู่ในรูปของแอลฟา แต่เบต้าอะลูมินาจะอยู่ในรูปของสารประกอบโซเดียมคือ Sodium aluminate ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$) เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาที่มีค่าความแข็งสูงมีความหนาแน่นสูงมีความต้านทานต่อการกัดสีและสึกกร่อนสูงทนต่อสารเคมีเป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดีและมีความทนไฟสูงจึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภทเช่นอุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (Abrasive) อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟอุตสาหกรรมกระดาษอุตสาหกรรมเซรามิกและอื่นๆซึ่งแนวโน้มในการนำอะลูมินาไปใช้งานก็ได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าเอาอะลูมินาไปพัฒนาใช้คืออุตสาหกรรมเซรามิกทั้งเซรามิกดั้งเดิมที่ใช้วัตถุดิบในธรรมชาติซึ่งมีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบและเซรามิกสมัยใหม่โดยในอุตสาหกรรมเซรามิกสมัยใหม่สามารถนำอะลูมินาที่ได้จากการสังเคราะห์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภทเช่นอุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นส่วนรถยนต์อุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้าอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าอุปกรณ์ส่วนประกอบในจรวดเครื่องมือตัดแต่งอุปกรณ์ทางการแพทย์อวัยวะเทียมเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เป็นต้นอะลูมินาที่นำมาใช้ในเซรามิกสมัยใหม่นั้นจะใช้ทั้งที่เป็นผงเป็นผลึกเดี่ยวๆเป็นฟิล์มบางๆเป็นเส้นใยและที่เป็นรูพรุนโดยผงอะลูมินาจะเป็นที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะเป็นวัสดุเริ่มต้นในการขึ้นรูปแบบต่างๆได้ดีทั้งนี้ผงอะลูมินาที่นำมาใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงและมีความละเอียดมาก เพราะสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของอะลูมินาสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการกำจัดมลทินต่างๆออกไป เช่นซิลิกาที่ปนเปื้อนจะมีผลต่อการควบคุม Microstructure มีผลต่ออัตราการสึกกร่อนของอะลูมินารวมทั้งมีผลต่อการเชื่อมผนึก (Sintering) และเคลือบที่ปนเปื้อนก็มีผล ทำให้สมบัติเชิงกลของอะลูมินาลดลง

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านเซรามิกสมัยใหม่ได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อะลูมินาเซรามิกให้ดียิ่งๆขึ้นไปเช่น

- การปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการปรับปรุงองค์ประกอบและ Microstructure
- การใช้ผงอะลูมินาที่มีความละเอียดระดับ Submicrometer เพื่อที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อละเอียดมากๆ
- การพัฒนากรรมวิธีใหม่ๆเพื่อที่จะผลิตอะลูมินาโดยตรงจากการ Oxidation ของอะลูมิเนียมเหลว
- การพัฒนาอะลูมินาเซรามิกชนิดเส้นใยเสริมแรงที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีมากขึ้น
- การพัฒนาอะลูมินาเซรามิกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เพื่อที่จะใช้ในการกรอง

จากการพัฒนาที่ไม่หยุดยั้งคาดว่าในอนาคตอะลูมินาจะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่จะสนับสนุนระบบเทคโนโลยีขั้นสูงเช่นระบบคอมพิวเตอร์ระบบการสื่อสารและโทรคมนาคม เทคโนโลยีชีวภาพเทคโนโลยีทางการแพทย์และอื่นๆมากยิ่งขึ้น

2.4 ทราย (Garnet)

2.4.1 ทรายที่ใช้ในงานตัดระบบแอบราซีฟวอเตอร์เจ็ต

สารกัดกร่อนที่ใช้ในงานตัดระบบแอบราซีฟวอเตอร์เจ็ต คือเม็ดทรายแข็งซึ่งถูกคัดสรรและเลือกขนาดมาโดยเฉพาะ สารกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไปคือ โกเมน คุณสมบัติของทรายโกเมน มีจุดหลอมเหลว 1250 องศาเซลเซียสและความถ่วงจำเพาะที่ 4.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โกเมน มีความแข็ง หยาบ และราคาไม่แพง เช่นเดียวกับกระดาษทรายสีชมพูที่หาได้ในร้านขายอุปกรณ์เครื่องโลหะ ขนาดของโกเมน แต่ละขนาดมีเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกันไปดังนี้

- 120 Mesh (200 - 100 ไมครอน) ใช้สำหรับพื้นผิวอ่อนนุ่ม
- 80 Mesh (300 - 150 ไมครอน) ใช้สำหรับงานตัดทั่วไป
- 50 Mesh (600 - 200 ไมครอน) ตัดได้เร็วกว่าขนาด 80 Mesh เล็กน้อยและ ให้พื้นผิวที่หยาบเล็กน้อย



รูปที่ 2.12 สารขัดทราย (Garnet)

ที่มา : <http://www.alibaba.com/product-detail>

2.5 เครื่องวัดความหยาบผิว (Roughness Measurement)



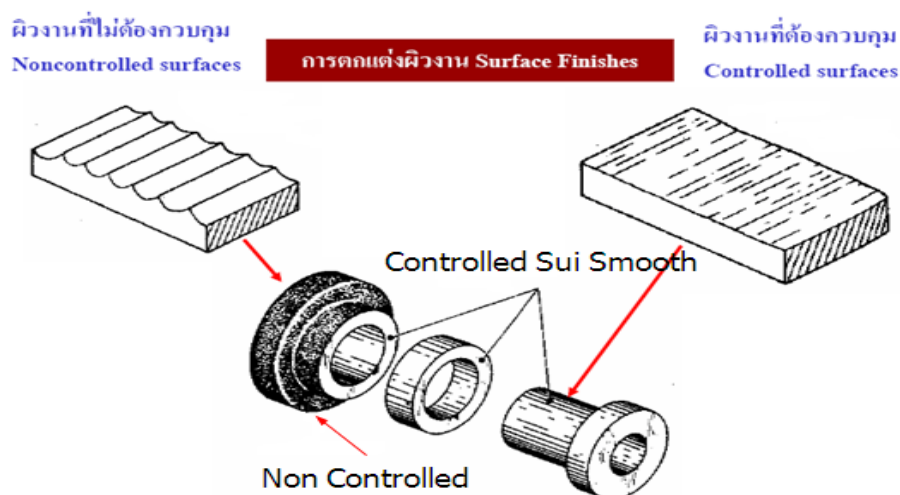
รูปที่ 2.13 เครื่องวัดความหยาบ

ที่มา : <http://www.pantavanij.com>

ในงานอุตสาหกรรมโลหะการ การวัดความหยาบผิวของชิ้นงานจากการตัดขึ้นรูปโลหะมีความสำคัญต่อคุณภาพชิ้นงานเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะงานที่ต้องการความละเอียดผิวสูง เช่นงานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดความหยาบผิวมีหลายอย่างตั้งแต่การกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของความหยาบผิวในขั้นตอนการออกแบบการเลือกเครื่องมือที่เหมาะสมและครอบคลุมมาตรฐานที่ต้องการ รวมทั้งการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานสัญลักษณ์การวัดที่แตกต่างกันตามมาตรฐานที่เครื่องนั้นๆ ใช้ เช่น R_a , R_q , R_z , R_z (JIS), R_y , R_y (DIN), R_c , R_{pi} , R_p , R_{pmax} , R_{vi} , R_v , R_{vmax} , R_{ti} , R_t , R_{3zi} , R_{3z} , R_{3y} , S , P_c (Ppi), S_m , HSC, เป็นต้น การเลือกเครื่องวัดความหยาบผิวยังต้องพิจารณารูปร่างของสไตล์ส เพื่อให้เหมาะกับผิวชิ้นงานที่วัดด้วย

2.6 ความหยาบผิว (Surface Roughness)

ความหยาบผิวแปลมาจากคำว่า “Surface Roughness” ในภาษาอังกฤษ หมายถึงขนาดความขรุขระของผิว หากมีความขรุขระมากแสดงว่ามีความหยาบมาก หากมีความขรุขระน้อยก็แสดงว่ามีความหยาบน้อย ความขรุขระหรือความหยาบจะใช้กับผิวของวัสดุ แต่บางที่อาจใช้คำว่าความเรียบ (Flat) ซึ่งเป็นคำที่อาจทำให้สับสน เพราะความเรียบมักใช้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นเรียบหมายถึง แผ่นไม่ค่อยเป็นคลื่น (Wave) ด้วยเหตุนี้ในบทความนี้จะใช้คำว่าความหยาบผิวแทนคำว่า “Roughness” ในภาษาอังกฤษ



รูปที่ 2.14 แสดงความหยาบผิว (Surface Roughness)

ที่มา : <http://th.misumiec.com>

เหตุผลดังกล่าวความหยาบผิวจึงจัดเป็นสมบัติทางโลหะวิทยาอย่างหนึ่ง ในการวัดความหยาบผิวจะใช้เครื่องวัดความหยาบผิว ซึ่งปัจจุบันมีหลายแบบหลายยี่ห้อให้เลือก แบ่งตามการวัดค่าความหยาบผิวตามเนื้อของวัสดุ จากรูปตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าในการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกันเป็นปัจจัยหลัก ที่ต้องให้คำนึงถึงผิวของชิ้นงาน หรือวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในการสวมหรือประกอบ เพราะถ้าผิวของชิ้นงานไม่ได้มีการควบคุมแล้วนั้น อาจเกิดปัญหาขึ้นได้

2.6.1 ความหลากหลายของดัชนีแสดงค่าความหยาบของผิว

ได้มีการกำหนดคำนิยามและการระบุพารามิเตอร์แสดงความหยาบของพื้นผิว (สำหรับผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม) ไว้ ซึ่งได้แก่ค่าความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต

- (Roughness average : Ra), ความหยาบสูงสุด
- (Roughness total height : Ry), ค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิวแบบสิบจุด
- (Roughness Ten-point mean : Rz), ค่าเฉลี่ยระยะระหว่างช่วงเส้นกราฟไม่สม่ำเสมอ
- (Sm), ค่าเฉลี่ยระยะระหว่างยอดเส้นกราฟ
- (S) และอัตราส่วนความยาวในช่วงเส้นกราฟ
- (tp) ความหยาบของพื้นผิวเป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของพื้นที่ที่ได้รับการสุ่มเลือก

[ค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิวจากเส้นศูนย์กลาง (Ra75) ได้อธิบายไว้ในภาคผนวกของ JIS

B 0031 และ JIS B 0601]

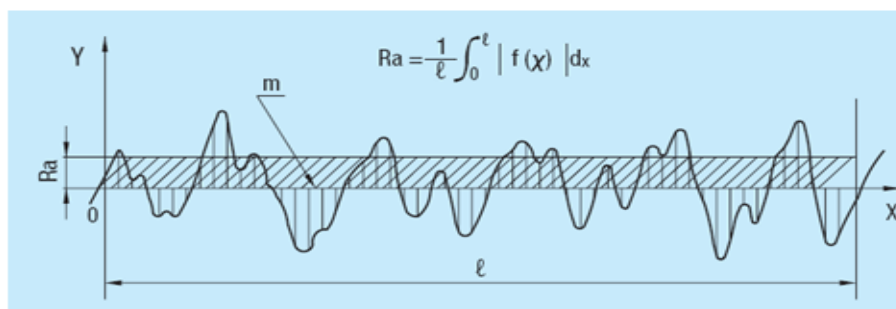
Arithmetic Average Roughness Ra			Maximum Height Ry	Ten-spot Average Roughness Rz	Reference Length of Ry(Rz) ℓ(mm)	Conventional Finish Symbol		
Standard Series	Cut-off Value c(mm)	Graphical Representation of Surface Texture	Standard Series					
0.012 a 0.025 a 0.05 a 0.1 a 0.2 a	0.08 0.25		0.05 s 0.1 s 0.2 s 0.4 s 0.8 s	0.05 z 0.1 z 0.2 z 0.4 z 0.8 z	0.08 0.25			
0.4 a 0.8 a 1.6 a	0.8		1.6 s 3.2 s 6.3 s	1.6 z 3.2 z 6.3 z	0.8			
3.2 a 6.3 a	2.5		12.5 s 25 s	12.5 z 25 z	2.5			
12.5 a 25 a	8		50 s 100 s	50 z 100 z	8			
50 a 100 a			—	200 s 400 s	200 z 400 z		—	

รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความหยาบของพื้นผิว(Ra)และสัญลักษณ์แบบเดิม

ที่มา : <http://th.misumiec.com>

2.6.2 ความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (Ra)

ค่าเฉลี่ยนี้วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ระยะค่าเฉลี่ยนี้จะอยู่บนกราฟตามแนวแกน x ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน y จะเป็นขนาดความหยาบผิว ค่า Ra จะหาได้จากสมการที่แสดงบนรูปมีหน่วยเป็นไมครอน (μm) เมื่อ $x-y = (X)$

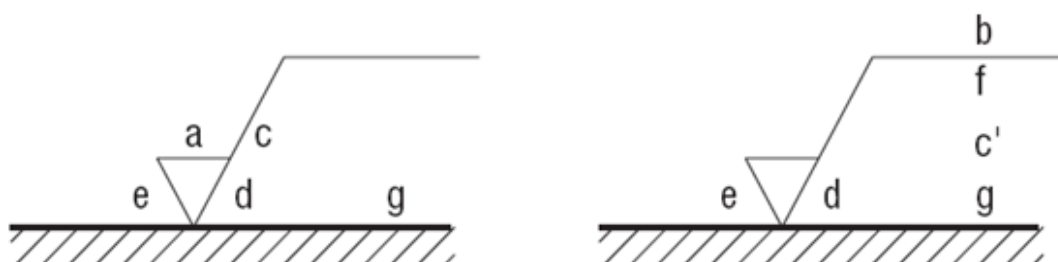


รูปที่ 2.16 กราฟความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (Ra)

ที่มา : <http://th.misumiec.com>

2.6.3 ตัวชี้วัดภาพร่างของพื้นผิว (Drawing Indications of Surface Texture)

ตำแหน่งพื้นผิวเกรนแต่ละตำแหน่งจะแสดงในรูปประกอบด้วย ค่าความหยาบผิว Cut-off value หรือระยะอ้างอิง วิธีการขึ้นรูปโดยการตัดเฉือน Gain dimension ความไม่สม่ำเสมอของผิว และอื่นๆ จะแสดงโดยรอบสัญลักษณ์ผิวตามรูป



a: ค่าของ Ra

b: วิธีการขึ้นรูปโดยการตัดเฉือน

c: ค่า Cut-off ความยาวจากการประเมินค่า

c': ความยาวอ้างอิง ความยาวจากการประเมินค่า

d: สัญลักษณ์ของทิศทางการวางแนวตัด

f: พารามิเตอร์อื่นนอกจาก Ra (ประกอบด้วย tp พารามิเตอร์/ระดับ Cut-off)

g: ความเป็นลอนคลื่นของพื้นผิว (ตามที่กำหนดใน JIS B 0601)

หมายเหตุ : สามารถเพิ่มเติมสัญลักษณ์อื่นนอกจาก a และ f ได้ตามความเหมาะสม

2.7 Scanning Electron Microscope : SEM



รูปที่ 2.17 Scanning Electron Microscope : SEM
ที่มา : <http://www.electron.rmutphysics.com>

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ Electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.8 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล คือ กล้องจุลทรรศน์พร้อมกล้องดิจิทัล โดยสามารถสังเกตจากตัวอย่างผ่านทางคอมพิวเตอร์ กล้องจุลทรรศน์สามารถเป็นบางส่วนหรือทั้งหมดที่ควบคุมด้วยระดับต่างๆของอัตโนมัติ กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลช่วยให้การวิเคราะห์ดีกว่าของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการวัดตัวอย่างของระยะทางและพื้นที่ และปริมาณเซลล์เรืองแสง หรือการตรวจชิ้นเนื้อไมโครสโคปแบบดิจิทัลเป็นรูปแบบของกล้องจุลทรรศน์แสงแบบดั้งเดิมที่ใช้ เลนส์ และกล้องดิจิทัลเพื่อการส่งออกภาพไปยัง จอมอนิเตอร์ บางครั้งโดยวิธีการของซอฟต์แวร์ที่ทำงานบน เครื่องคอมพิวเตอร์ กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลมักจะมีของตัวเองในการสร้าง LED แหล่งกำเนิดแสงและแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์ในการที่มีข้อกำหนดที่จะสังเกตเห็นตัวอย่างได้โดยตรงผ่านเลนส์ไม่มี ตั้งแต่ภาพจะเพิ่มความสนใจไปในวงจรดิจิทัลทั้งระบบถูกออกแบบมาสำหรับจอแสดงผลภาพ เลนส์สำหรับสายตามนุษย์จะถูกตัดออก

กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลธรรมดาราคาค่ากล้องจุลทรรศน์เชิงพาณิชย์ที่ออกแบบสำหรับการใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์แม้ว่าระบบขั้นสูงที่ไม่ต้องใช้คอมพิวเตอร์แยกต่างหากสามารถค่าใช้จ่ายหลายหมื่นดอลลาร์ กล้องจุลทรรศน์เชิงพาณิชย์ราคาต่ำตามปกติละเว้นเลนส์เพื่อให้ความสว่าง (เช่น Kohler ส่องสว่าง และ คมชัดขั้นตอนการ ส่องสว่าง) และมีความคล้ายกับ เว็บแคม กับ เลนส์มาโคร สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอด้วยกล้องดิจิทัลในการวิจัยและพัฒนาให้ดู กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์ USB



รูปที่ 2.18Dino-Lite Digital Microscope

ที่มา : <http://richmoto.tarad.com>

กล้องจุลทรรศน์ USB คือกล้องจุลทรรศน์พลังงานต่ำดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ ตามปกติผ่านทางพอร์ต USB พวกเขามีอยู่อย่างแพร่หลายในราคาที่ต่ำสำหรับการใช้งานที่บ้านหรือในการพาณิชย์ ค่าใช้จ่ายของพวกเขาก็แตกต่างกันไปในช่วงหลายสิบดอลลาร์ ในสาระสำคัญ USB กล้องจุลทรรศน์เป็นเว็บที่มีเลนส์มาโครสูงขับเคลื่อนและโดยทั่วไปจะไม่ใช้แสงส่ง แต่พึ่งพาแสงที่ตกกระทบจากในตัวไฟ LED ที่อยู่ติดกับเลนส์ แสงที่สะท้อนจากตัวอย่างนั้นก็เข้าสู่เลนส์ กล้อง บ่อยครั้ง แต่กล้องมีความไวพอที่จะไม่ต้องแสงเพิ่มเติม ในฐานะที่เป็นกล้องยึดติดโดยตรงกับพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์ Eyepieces ไม่จำเป็นและภาพจะแสดงโดยตรงบนจอภาพ พวกเขามีกำลังขยายที่เจียมเนื้อเจียมตัว (ถึงประมาณ 200 ×) โดยไม่จำเป็นต้องใช้ Eyepieces ที่ค่าใช้จ่ายที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับ Stereomicroscopes ทั่วไปเช่น คุณภาพของภาพสุดท้ายขึ้นอยู่กับความจุของกล้องหรือล้านพิกเซลที่สามารถใช้ได้กับระบบ ที่แตกต่างจาก 1.3 MP, 2 MP, 5 MP และขึ้นไป รวมทั้งผู้ประกอบการคุณภาพทักษะและให้แสงสว่าง จะสามารถบันทึกทั้งภาพนิ่งและวิดีโอบนระบบส่วนใหญ่ กำลังการผลิตของกล้องจุลทรรศน์ USB ส่วนใหญ่จะคล้ายกับกล้องมือถือส่วนใหญ่ประมาณ 2 ล้านพิกเซล

การใช้งานภาพที่สามารถบันทึกและเก็บไว้คล้ายกับเว็บแคมในคอมพิวเตอร์ กล้องมักจะพอกับแหล่งกำเนิดแสงแม้ว่าแหล่งพิเศษ (เช่น ไฟแฟลช LED) สามารถนำมาใช้เพื่อเน้นคุณสมบัติที่น่าสนใจในวัตถุ พวกเขามักมีขนาดใหญ่ ความลึกของเขต และช่วงของ การขยาย เมื่อตรวจสอบไฟล์ภาพบนคอมพิวเตอร์ กล้องมีความไวเพื่อให้เห็นนั้นโดยทั่วไปจะทำงานโดยไม่ต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงใด ๆ เป็นพิเศษกล้องจุลทรรศน์ USB มีประโยชน์มากที่สุดเมื่อตรวจสอบวัตถุแบน เช่น เหยี่ยว , แผลวงจรมินิ หรือเอกสารดังกล่าวเป็น ธนบัตร แต่สามารถใช้บนพื้นผิวของรูปร่างผิดปกติเช่น เส้นใย เนื่องจากการสูง ความลึกของเขต การใช้งานของพวกเขาคือโดยทั่วไปคล้ายกับว่าเป็นภาพสะท้อน กล้องจุลทรรศน์ หรือกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ กล้องจุลทรรศน์ USB มีประโยชน์ที่ดีของการเป็นมากขึ้นขนาดใหญ่กว่ากล้องจุลทรรศน์สเตอริโอธรรมดาเพื่อให้สามารถนำมาใช้ในสาขาที่แนบมากับ เครื่องคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป พวกเขายังมีประโยชน์ในการตรวจสอบรายการที่มีขนาดใหญ่ในแหล่งกำเนิดที่ใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาจะเป็นเรื่องยากหากไม่เป็นไปไม่ได้ อุปกรณ์ดังกล่าวมีประโยชน์ใน ด้านวิศวกรรมนิติเวช ที่มีขนาดใหญ่ แดกหัก พื้นผิวที่ต้องการการตรวจสอบโดยตรงแอปพลิเคชันที่ธรรมดา กล้องจุลทรรศน์แสง จะถูก จำกัด ในการใช้งาน พวกเขาจะได้ตามปกติมือถือสำหรับโปรแกรมนี้ แต่ยังสามารถติดตั้งในหีบขนาดเล็ก (มักจะให้) ที่หีบเฉพาะกิจการที่มีการควบคุมที่ดีขึ้นนอกจากนี้ยังมีจำหน่ายแยกต่างหาก รุ่นที่มีขนาดใหญ่มีพวกเขาโดดเด่นเฉพาะของตัวเองวิธีง่าย ๆ ในการที่กล้องจุลทรรศน์สามารถนำมาใช้คือการเปรียบเทียบของผลึกเกลือเช่น เกลือทะเล และ เกลือ เครื่องชั่งมิลลิเมตรทั่วไปที่ที่ท็อปส์ซูของ ไมโคร

แสดงขนาดที่เล็กกว่าของผลึกเกลืออุกบาศ์ตาราง ความดี ความลึกของข้อมูล ที่มีอยู่จะแสดงด้วย USB ไมโคร ของ ใบเสง หรือใบ Sage กล้องจุลทรรศน์ USB ยังถูกใช้ในหน่วยสืบสวนที่เกิดเหตุ กล้องจุลทรรศน์ USB จำนวนมากสามารถดูวัตถุจากระยะสั้นช่วยให้หลักฐานที่เกิดเหตุที่มีความสำคัญที่จะตรวจสอบการปนเปื้อนไม่จริงหลักฐานในทางใดทางหนึ่ง

2.9 ซอฟต์แวร์วิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ Minitab

เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ประมวลผลข้อมูลทางด้านสถิติ โดยพัฒนาจากกลุ่มนักวิชาการทางด้านสถิติมากกว่า 30 ปีแล้ว โดยปัจจุบันได้พัฒนาปรับปรุงมาจนถึงเวอร์ชัน 17 ซึ่งสามารถใช้กับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดย Minitab เข้ามามีบทบาทสำหรับผู้สถิติในส่วนของประมวลผลและการแสดงผลข้อมูลในลักษณะของตัวเลขและผลในลักษณะของกราฟ ประกอบกับเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาและมีบทบาทต่อชีวิตประจำวัน ดังนั้น Minitab จึงถูกเลือกใช้ด้วยเหตุผลหลัก 3 ประการ คือ

- ความซับซ้อนในการประมวลผล (Complexity)
- ความเที่ยงตรงและแม่นยำในการประมวลผลข้อมูล (Accuracy)
- ความรวดเร็วและความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

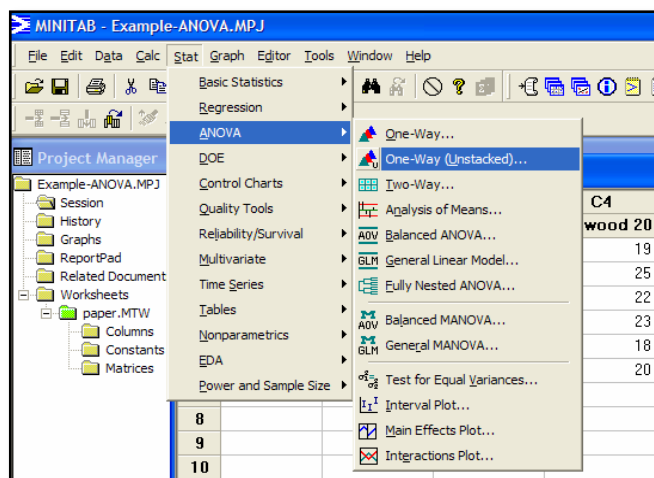
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Minitab

1. เริ่มจากคลิกปุ่มบนวินโดวส์เลือก Start > All Programs > Minitab Solutions > Minitab 17 Statistical Software English
2. ป้อนข้อมูลเข้าสู่เวิร์คชีท เป็นการนำข้อมูลเข้าสู่เวิร์คชีทโดยอาจป้อนจากแป้นพิมพ์หรือเลือกจาก Excel, Access หรือ Text

	C1	C2	C3	C4
	hardwood 5	hardwood 10	hardwood 15	hardwood 20
1	7	12	14	19
2	8	17	18	25
3	15	13	19	22
4	11	18	17	23
5	9	19	16	18
6	10	15	18	20
7				

รูปที่ 2.19 การเลือกข้อมูลลงในเวิร์คชีท

ที่มา: <http://www.msit2005.mut.ac.th>

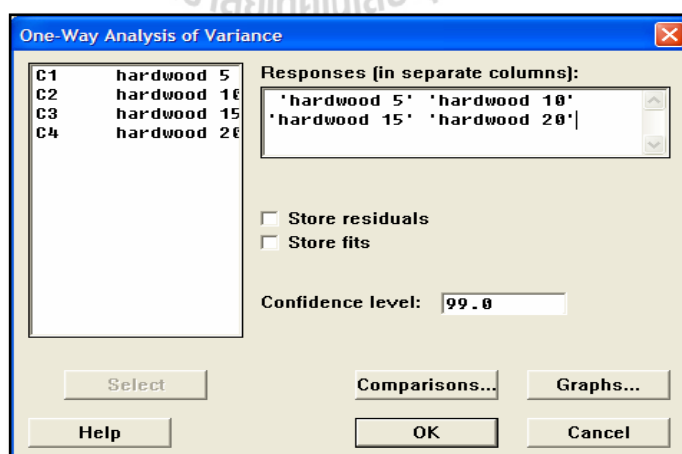


รูปที่ 2.20 การเลือกใช้ฟังก์ชันของโปรแกรม Minitab

ที่มา: <http://www.msit2005.mut.ac.th>

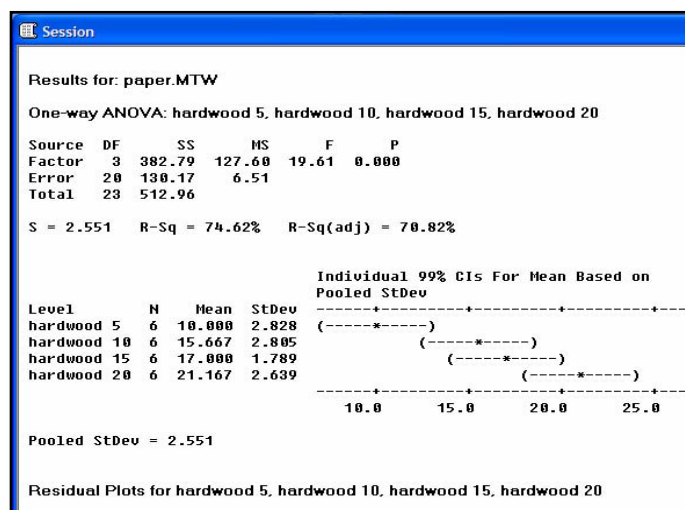
3. ทำการเลือกฟังก์ชันทางสถิติที่จะทำการวิเคราะห์เช่น ANOVA, Statistical Quality Tools Simulation and Distribution เป็นต้น

4. เป็นรายละเอียดของการวิเคราะห์ใด ๆ ที่เลือก ปกติแล้วถ้าเราใช้การตั้งค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ซึ่งเป็นค่าที่มีการใช้ทั่วไปแล้ว เมื่อเราใส่ข้อมูลครบถ้วนตามที่โปรแกรมต้องการแล้ว เราสามารถข้าม แต่ในบางครั้งเราต้องการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว เช่น ค่าความเชื่อมั่น 95% เป็น 99% การสร้างกราฟ หรือจะเป็นการสั่งให้โปรแกรมแสดงค่าหรือเก็บค่าใด ๆ ที่เราต้องการ เป็นต้น แสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.21 การปรับเปลี่ยนค่าความเชื่อมั่น

ที่มา: <http://www.msit2005.mut.ac.th>



รูปที่ 2.22 แสดงการประมวลผลของโปรแกรม Minitab

ที่มา: <http://www.msit2005.mut.ac.th>

5. เป็นการจัดการกับผลการประมวลผลที่โปรแกรม Minitab ดำเนินการให้ซึ่งจะออกมาใน 2 รูปแบบคือ ผลทางตัวเลขหรือตัวอักษรและกราฟ ตัวอย่างของการทำงานในขั้นตอนนี้ เช่น การสร้างรายงาน ตัดข้อมูลผิดปกติ การเปลี่ยนสีกราฟ เป็นต้น

2.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA)

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางเดียวเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้นเพียง 1 ตัวที่มีต่อตัวแปรตามหากต้องการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้นตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป (ที่มีมาตรวัดเป็น Norminal หรือ Ordinal) ที่มีต่อตัวแปรตามจะเรียกการวิเคราะห์นี้ว่า Multifactor ANOVA สำหรับในที่นี้จะศึกษา ANOVA กรณีที่มีตัวแปรต้น 2 ตัวซึ่งเรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่ม (Randomized block design : RBD) และแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial design) ได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.2 แสดงตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Factors ANOVA)

Source of Variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	F-Statistic
Factor A	a-1	SS_A	MS_A	$F_A = MS_A / MS_E$
Factor B	b-1	SS_B	MS_B	$F_B = MS_B / MS_E$
Interaction	$(a-1)(b-1)$	SS_{AB}	MS_{AB}	$F_{AB} = MS_{AB} / MS_E$
Error	$ab(n-1)$	SS_E	MS_E	.
Total	$abn-1$	SS_T	.	.

ที่มา : <https://sites.google.com>

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางในข้างต้นจะพบว่าจำนวนตัวอย่างในแต่ละ cell (ที่ระดับ i ของ Factor A และที่ระดับ j ของ Factor B) มีจำนวนเท่ากันในกรณีที่มีจำนวนไม่เท่ากัน การคำนวณค่า SS จะเหมือนเดิมแต่มีการเปลี่ยนแปลงการคำนวณหา ดังนี้

Error df จะเป็น $N - rc$

Total df จะเป็น $N - 1$ เมื่อ N คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

สมมติฐาน

มีการทดสอบสมมติฐานเพื่อทดสอบสำหรับองค์ประกอบ A (Factor A) องค์ประกอบ B (Factor B) และการกระทำร่วมกันระหว่างองค์ประกอบ A และ B (Interaction AB) ดังนี้ สำหรับองค์ประกอบ A

H_0 : อิทธิพลขององค์ประกอบ A ที่ระดับต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกัน

H_1 : มีอิทธิพลขององค์ประกอบ A อย่างน้อย 2 ระดับที่มีความแตกต่างกัน

สำหรับองค์ประกอบ B

H_0 : อิทธิพลขององค์ประกอบ B ที่ระดับต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกัน

H_1 : มีอิทธิพลขององค์ประกอบ B อย่างน้อย 2 ระดับที่มีความแตกต่างกัน

สำหรับการกระทำร่วมกันระหว่างองค์ประกอบ A กับ B

H_0 : ไม่มีการกระทำร่วมกันระหว่างองค์ประกอบ A กับ B

H_1 : มีการกระทำร่วมกันระหว่างองค์ประกอบ A กับ B

หรือตั้งสมมติฐานทางสถิติอีกแบบได้ ดังนี้ (สายชล, 2553)

สมมติฐานที่ใช้ทดสอบ

1. การทดสอบสมมติฐานการกระทำร่วมระหว่างปัจจัย A และ B

$$H_0 : (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{ab} = 0$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2. การทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของปัจจัย A

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3. การทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของปัจจัย B

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มีย่อประกอบ A กับ B จะทดสอบการกระทำร่วมกันก่อนว่ามีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่หากองค์ประกอบทั้งสองไม่มีการกระทำร่วมกันแสดงว่าองค์ประกอบทั้งสองเป็นอิสระจากกันจะทำการทดสอบอิทธิพลหลัก (Main effect) ต่อไปแต่หากองค์ประกอบทั้งสองมีการกระทำร่วมกันก็จะทำให้ความสำคัญในการศึกษาอิทธิพลหลักลดน้อยลงไปแต่ผู้วิจัยจะสนใจทดสอบอิทธิพลย่อยต่อไปและในการรายงานผลควรแสดงกราฟแสดงการกระทำร่วมกันไว้ด้วยจะช่วยให้สรุปเห็นชัดเจนยิ่งขึ้น

สถิติที่ใช้ทดสอบ

สำหรับองค์ประกอบ A

$$F = \frac{MS_A}{MS_E}; df = r-1, rc(n-1)$$

สำหรับองค์ประกอบ B

$$F = \frac{MS_B}{MS_E}; df = c-1, rc(n-1)$$

สำหรับการกระทำร่วมกันระหว่างองค์ประกอบ A กับ B

$$F = \frac{MS_{AB}}{MS_E}; df = (r-1)(c-1), rc(n-1)$$

2.11 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

F.L. Chen et al. (2001) ได้กล่าวว่าเทคโนโลยีการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Water jet) เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ ข้อดีของการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงคือ ไม่มีการบิดเบือนทางความร้อน มีความยืดหยุ่นสูงและมีความคล่องตัวในการตัด ซึ่งในการศึกษานี้เกี่ยวกับการตัดหลายทิศทาง และการประยุกต์ใช้เทคนิคการตัดแบบสั้นหัวในกระบวนการตัดได้ทำการทดลองใช้เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูงทำการตัดเซรามิก โดยมีขนาดความหนา 12.7 และ 25.4 mm. แรงดันน้ำ 138-345 MPa ความเร็วตัด 15-50 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราการไหล 0.575-0.910 กิโลกรัมต่อวินาที สารขัด ไอโดซาเบอร์ 80 พบว่าการตัดเซรามิกแบบวอเตอร์เจ็ทสามารถปรับปรุงเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยใช้เทคนิคใหม่ของการตัดหัวไปข้างหน้าแบบสั้นในระนาบของการตัด ความลึกโซนเรียบที่มีการสั้นสามารถเพิ่มขึ้นกว่า 30% เมื่อเทียบกับแบบที่ไม่ต้องสั้น การสั้นของหัวไม่ส่งผลกระทบต่อความเร็วในการตัดผ่านซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยไม่สูญเสียคุณภาพของพื้นผิว เทคนิคใหม่นี้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมและยังสามารถใช้สำหรับการตัด AWJ สำหรับวัสดุอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พื้นผิวของจากการเจียรในผ่านรอยตัดสามารถแบ่งออกเป็นสามโซน ในโซนด้านบนซึ่งมีพื้นผิวเรียบและไม่มีรอยและหลุมให้เห็น รอยตัดที่แคบลงที่ละน้อยและความกว้างที่ส่วนท้ายของโซนนี้เท่ากับความกว้างอย่างน้อยจากการตัด ในโซนตรงกลางซึ่งมีรอยเห็นได้ชัด แต่ไม่มีหลุม ความกว้างของรอยยังคงเหมือนเดิมและในโซนล่างซึ่งเป็นลักษณะหลุมมากมาย รอยโค้งเปลี่ยนแปลงไปมากและมีสร้างบอลลูนมากมายอย่างยิ่ง

M. Nanduriet al. (2001) ได้กล่าวว่าปรากฏการณ์การสึกหรอของหัวฉีดในระบบการกัดกร่อนน้ำแรงดันสูง (AWJ) ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระบบผ่านปลายกระบอกฉีดของรูปทรงหัวฉีดและปัจจัยที่กำหนดในการทดสอบการสึกหรอของหัวฉีดในระบบการกัดกร่อนน้ำแรงดันสูง (AWJ) จะถูกตรวจสอบโดยการเร่งความเร็วการสึกหรอโดยจะดำเนินการทดสอบผลทางระยะยาวโดยเลือกใช้สารขัดโกเมน ทดสอบความสัมพันธ์ของอัตราการสึกหรอของวัสดุสองชนิดที่แตกต่างกันด้วยสารขัดโกเมนและอลูมิเนียมขัดออกใช้พบว่าผลของความยาวของหัวฉีด มุมทางเข้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู อัตราการไหลและความดันน้ำของหัวฉีดที่ได้รับการศึกษาจะพบว่ามีความสัมพันธ์กัน

P.Gudimetlaet al. (2002) วิเคราะห์การสร้างรอยตัดจากการกัดกร่อนน้ำแรงดันสูงในอุตสาหกรรมเซรามิกโดยใช้วัสดุเซรามิกอลูมินา 87% ขนาด 150 mm.× 100 mm. ใช้ความหนาที่ 12.5 mm. และ 25 mm. แรงดันน้ำแปรผันเริ่มที่ 290 และ 380 MPa แรงดันน้ำเพิ่มครั้งละ 30 MPa

อัตราการไหลสารกัดกร่อนแปรผันเริ่มที่ 300 และ 800 g/min เพิ่มอัตราการไหลสารกัดกร่อนครั้งละ 100 g/min มุมการพ่นแปรผันเริ่มที่ 0 องศาและ 30 องศา เพิ่มมุมการพ่นครั้งละ 5 องศา โดยที่การทดลองครั้งแรกจะใช้อัตราความเร็วในการตัดแปรผันเริ่มที่ 5 และ 20 mm./min และครั้งที่สองเริ่มใช้ที่ 60 และ 140 mm./min จากการทดลองพบว่าสถานะแรงดันน้ำ 320 MPa อัตราการไหลสารกัดกร่อนที่ 600g/min ให้ค่าความกว้างรอยตัด มุมรอยตัดที่เหมาะสมที่สุดและถ้าความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้ค่าของความหยาบผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นด้วยแต่ในขณะเดียวกันถ้าลดอัตราการไหลของสารกัดกร่อนลงเหลือ 400 g/min ก็จะทำให้ค่าความกว้างรอยตัดลดลงมาด้วยส่วนมุมที่ใช้ในการตัดที่เหมาะสมในการตัดเซรามิกจะอยู่ระหว่าง 15-20 องศา

J.Wang and D.M. Guo(2002)ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรผันของความเร็วที่ใช้ในการตัดวัสดุด้วยเทคโนโลยีน้ำแรงดันสูงโดยเซรามิกส์อะลูมินา 87% ที่ความหนา 12.7 mm ในการทดสอบแรงดันน้ำ 345 และ 380 MPa สารกัดกร่อนประเภท Almandine garnet ขนาด 80 Mesh และค่าคงที่ใช้ทดลองคือ ใช้มุมการพ่นที่ 90 องศา อัตราการไหลสารกัดกร่อน 8.33 g/s ระยะห่างหัวพ่นตัดกับชิ้น 4 mm. เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วยรอยตัด ความลึกเรียบในการตัด ความหยาบผิวพบว่าที่สถานะแรงดันน้ำที่ 345 MPa อัตราความเร็วตัดคงที่ 1 mm./s ลักษณะการตัดแบบทิศทางเดียวและจำนวนตัดผ่านบริเวณเดิม 3 ครั้ง ให้ค่าความเร็วยรอยตัดและค่าความหยาบผิวที่ดีที่สุด แต่ค่าความลึกเรียบที่ดีที่สุดจะอยู่ในช่วงอัตราความเร็วในการที่ตัด 3.33 mm./s ลักษณะการตัดแบบสลับทิศทางการตัดและจำนวนครั้งในการตัดผ่านบริเวณเดิมเพียงครั้งเดียวเท่านั้นแต่ถ้าเปรียบเทียบในลักษณะทิศทางการตัดทั้งสองแบบคือ การตัดแบบทิศทางเดียว การตัดแบบสลับทิศทางการตัดค่าความเร็วตัดที่ 1 mm./s จำนวนตัดผ่านบริเวณเดิม 3 ครั้งพบว่า การตัดแบบทิศทางเดียวให้ค่าความหยาบผิว ค่าความลึกเรียบที่เหมาะสมที่สุด

G. Fowler et al.(2008)ได้อธิบายว่า ในการตัดโลหะด้วยน้ำแรงดันสูงนั้นสิ่งที่มีผลต่อค่าความเรียบผิว, คลื่นรอยตัดนั้น ได้แก่ สารขัด แรงดันน้ำ อัตราการไหลของทราย ความเร็วตัด เป็นต้น ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองหาสารขัดที่เหมาะสมในการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง โดยใช้ตัววัสดุไทเทเนียม ที่แรงดันน้ำ 137.9 MPa (20,000 Psi) ใช้สารขัด 3 ชนิดได้แก่ Grad Bead, Brown Aluminum Oxide, Garnet โดยใช้ค่าความเร็วตัดตั้งแต่ 0.03 ms^{-1} ถึง 0.166 ms^{-1} ให้ค่าความเรียบผิวดังนี้โดยที่ความเร็วตัด 0.03 ms^{-1} Grad Bead ให้ค่าความเรียบผิว (Ra) = $4.5 \mu\text{m}$, Brown Aluminum Oxide = $5.25 \mu\text{m}$, Garnet = $5.75 \mu\text{m}$ ความเร็วตัด 0.08 ms^{-1} Grad Bead ให้ค่าความเรียบผิว (Ra) = $4.75 \mu\text{m}$, Brown Aluminum Oxide = $6 \mu\text{m}$, Garnet = $6.75 \mu\text{m}$ ที่ความเร็วตัด 0.166 ms^{-1} Grad Bead ให้ค่าความเรียบผิว (Ra) = $5 \mu\text{m}$, Brown Aluminum Oxide = $6.75 \mu\text{m}$, Garnet = $7.25 \mu\text{m}$

D.S. Srinivasu et al. (2009) ได้กล่าวว่า ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับการผลิตชิ้นส่วนทางวิศวกรรมเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ความต้านทานการสึกหรอและอุณหภูมิการสลายตัวสูง อย่างไรก็ตามการสร้างพื้นผิว 3 มิติ (e.g.pockets) ในโครงสร้างเซรามิก ด้วยเครื่องจักรกลทั่วไปเป็นงานที่ยาก แต่รูปทรง 3 มิติสามารถสร้างขึ้นโดยการหล่อด้วยลักษณะต่อเนื่องของการสร้างรอยพื้นที่เกิดจากการฉีดออกมา (รูปทรงรอยตัด) โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในกระบวนการ นอกจากนี้ กลไกการกำเนิดรอยตัดภายใต้การกัดเซาะชนิดออก ได้รับการวิเคราะห์การควบคุมความลึกของการกัดเซาะในเครื่องจักรส่งผ่านแบบ มัลติพาสว่า สิ่งที่แตกต่างกันคือ รูปสมมาตร/รูปทรงไม่สมมาตร รอยตัดจะเป็นลักษณะชนิดหรือไม่ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง การกระจายความเร็วของอนุภาค สารกัดกร่อนและมุมที่ส่งผลกระทบต่อภายในเป็นเหตุให้รอยพื้นที่เกิดจากการฉีดออกมาเกิดการเปลี่ยนแปลงในเวลาที่ได้รับอิทธิพลของวัสดุที่พ่นออกมาเป็นสายและเพิ่มความสามารถในการพังทลายของการกัดกร่อนส่งผลกระทบต่อมุมที่ต้น ส่งผลให้อัตราการกัดเซาะที่แตกต่างกันไปตามรอยตัด นำไปสู่ผลกระทบโดยรวมของรูปทรงรอยตัด ความลาดเอียงและผนังคลื่นรอยตัด

จิราศินี มนตรีและคณะ (2551) ได้กล่าวว่า ในการ ศึกษาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับ การตัด เหล็กแผ่นเกรด JSC 590 R ด้วยเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง คณะผู้จัดทำได้ทำการ ออกแบบการตัด วัสดุชิ้นงานให้ขาดโดยค่าต่างๆที่ถูกกำหนดจากบริษัทผู้ผลิตเครื่อง ตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง คือ ค่า แรงดันตัด เท่ากับ 47,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราการไหลของทราย เท่ากับ 0.02 เมตรต่ออนาที และความเร็วตัดจะขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุและความหนาของวัสดุที่ทำการตัด แล้วพิจารณาค่าของ ความเร็วตัดที่ทำให้เวลาตัดขาดน้อยที่สุดเป็นหลัก ซึ่งค่าดังกล่าวจะอยู่ในส่วนของการคิดค่าใช้จ่าย ต้นทุนในการตัด ในที่นี้การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับการตัดเหล็กแผ่นเกรด JSC 590 R ด้วยเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง ที่ความหนา 1.8 มิลลิเมตร ได้ความเร็วตัดเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 1040.80 มิลลิเมตร ต่ออนาที เป็นผลมาจากการตั้งค่าโปรแกรมการตัดตามรายการของวัสดุชนิด Titanium 6Al4V(108) ค่าความหนา 1.05 มิลลิเมตร และที่ความหนา 2.0 มิลลิเมตร ได้ความเร็วตัด เฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 949.25 มิลลิเมตร ต่ออนาที เป็นผลมาจากการตั้งค่าโปรแกรมการตัดตามรายการ ของวัสดุชนิด Aluminum 2024 (215) ค่าความหนา 3.10 มิลลิเมตร โดยค่าความเรียบผิวในการตัด เมื่อวัสดุขาดที่ทำการทดลอง จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของอุตสาหกรรมการตัดทั่วไป

บรรพต มหาคามและคณะ (2554) ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเจาะแบบแรงเสียดทาน ต่อสมบัติงานเจาะอะลูมิเนียมผสม AA 2024 ปรากฏว่าค่าความเรียบของผิวงานอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยเปรียบเทียบกับคุณภาพของผิวงานที่ได้จากขอบเขตของผิวงานจากการเจาะ ($R_a = 1.8-$

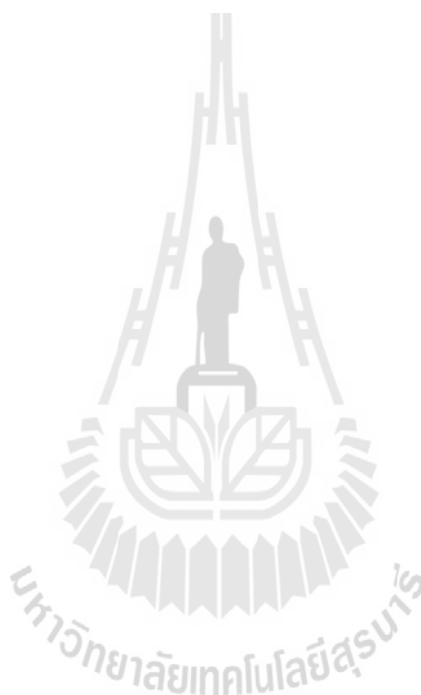
6.3 μm) จากการทดลองพบว่าอัตราป้อน (Feed) มีผลต่อคุณภาพของผิวรูเจาะในการเจาะแบบแรงเสียดทานอะลูมิเนียมผสม AA 2024 ซึ่งมีผลต่อคุณภาพผิวของรูเจาะโดยอัตราป้อน 150 มม./นาที มีความเรียบผิวดีที่สุดที่ค่าเฉลี่ยความเรียบผิว $0.893\mu\text{m}$ และอัตราป้อน 100 มม./นาที มีความเรียบผิวหยาบที่สุดที่ค่าเฉลี่ยความเรียบผิว $1.257\mu\text{m}$ โดยใช้สถิติ (ANOVA) ในการวิเคราะห์

ธีระพงษ์ ดีสาและวัชรินทร์ นาริรักษ์ (2556)ทำการทดสอบแรงดันน้ำที่มีผลต่อการตัดวัสดุอะลูมิเนียม A1100 โดยศึกษาแรงดันน้ำ 5 ระดับ ได้แก่ 170 , 200, 240, 275 และ 310 MPa ใช้ทรายเป็นสารขัดขนาด 120 Mesh ระยะห่างของหัวตัดกับชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร อัตราการไหลของสารขัด 0.368 กิโลกรัมต่อนาที พบว่าแรงดันน้ำ 170 MPa ให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดต่ำสุด เฉลี่ยเท่ากับ 2.85 ไมโครเมตร แรงดันน้ำที่ให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดมากที่สุด 310 MPa เฉลี่ยเท่ากับ 3.89 ไมโครเมตร อีกทั้งยังพบอีกว่า เมื่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดเพิ่มขึ้น แรงดันน้ำ 240 MPa ให้ค่าความสูงคลื่นรอยตัดต่ำสุด เฉลี่ยเท่ากับ 4.04 มิลลิเมตร แรงดันน้ำที่ให้ค่าความสูงคลื่นรอยตัดมากที่สุด 170 MPa เฉลี่ยเท่ากับ 6.38 มิลลิเมตร อีกทั้งยังพบอีกว่า เมื่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสูงคลื่นรอยตัดมีแนวโน้มลดลงและแรงดันน้ำ 170 MPa ให้ค่าความเอียงของชิ้นงานต่ำสุด เฉลี่ยเท่ากับ 0.59 องศา และยังพบอีกว่าที่แรงดันน้ำ 200 – 310 MPa ให้ค่าความเอียงของชิ้นงานไม่แตกต่างกัน

ก้องเกียรติ พิมพ์ชาติ และมานัส รักสุภาพ (2556) ได้ศึกษาอิทธิพลความสูงหัวตัดที่มีผลต่อการตัดอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 6063-T6 ด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) พบว่าระยะความสูงหัวตัด มีผลต่อการตัดชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งระยะห่างหัวตัดกับชิ้นงานระยะ 2.5 มิลลิเมตร ให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดน้อยที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 2.45 ไมโครเมตร ค่ามุมเอียงรอยตัดกับชิ้นงานระยะ 2 มิลลิเมตร มีค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงานน้อยที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.33 องศา และค่าความสูงหัวตัดกับชิ้นงานระยะ 2 มิลลิเมตร ให้ค่าความสูงคลื่นรอยตัดน้อยที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 3.79 มิลลิเมตร แสดงว่าเมื่อระยะความสูงของหัวตัดกับชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ค่ามุมเอียงรอยตัดและความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตาม

สิทธิเดช สายสินและสุทธิพงษ์ ครูห้วย (2556)ใช้เครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูงเพื่อทดสอบหาค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ค่าความสูงคลื่นรอยตัด และค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงาน ที่ดีที่สุดในการทดลองตัดของสารขัดทั้ง 3 ชนิด ในการทดลองตัดและวัดค่าความหยาบผิว สารขัดชนิด Glass beads ให้ค่าความหยาบผิวดีที่สุดโดยให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 2.706 ไมโครเมตร ส่วนสารขัดชนิด Garnet ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยลดลงมาอยู่ที่ 3.680 ไมโครเมตรและสารขัดชนิด Brown

Aluminium oxide ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 6.187 ไมโครเมตร ค่าความสูงคลื่นรอยตัด สารขัดชนิด Garnet ให้ค่าความสูงคลื่นดีที่สุดโดยให้ค่าความสูงคลื่นเฉลี่ยอยู่ที่ 6.112 มิลลิเมตร ส่วนสารขัดชนิด Glass beads ให้ค่าความสูงคลื่นเฉลี่ยลดลงมาอยู่ที่ 18.376 มิลลิเมตร และสารขัดชนิด Brown Aluminium oxide ให้ค่าความสูงคลื่นเฉลี่ยอยู่ที่ 20.457 มิลลิเมตร และค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน สารขัดชนิด Brown Aluminium oxide ให้ค่ามุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุดโดยให้ค่ามุมเอียงของชิ้นงานเฉลี่ยอยู่ที่ 0.362 องศา ส่วนสารขัดชนิด Glass beads ให้ค่ามุมเอียงของชิ้นงานลดลงมาอยู่ที่ 0.45 องศา และสารขัดชนิด Garnet ให้ค่ามุมเอียงของชิ้นงานอยู่ที่ 0.507 องศา



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

บทนี้อธิบายรายละเอียดการศึกษาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกกับความหนาของแผ่นอะลูมินาเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) โดยศึกษาการตั้งค่าเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง การเตรียมการทดลองเครื่องมือและอุปกรณ์ดำเนินการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงกรอบแนวคิดการวิจัย

ปัจจัยนำเข้า (INPUT)	ผลลัพธ์ (OUTPUT)	เครื่องมือและอุปกรณ์ (M/C)
ตัวแปรไม่คงที่ 1.แรงดันน้ำ 2.ความหนา	1.วิเคราะห์ความหยาบผิว	Surface Roughness Scanning Electron Microscope
ตัวแปรคงที่ 1.Water Jet รุ่น Modal 1530 2.แผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูป 3.สารขัดทรายGarnetขนาด 80Mesh 4.ขนาดรูครีดน้ำ 0.25 mm. 5.ขนาดรูหัวตัด 0.7mm. 6.คุณภาพผิว ระดับ Q3 7.อัตราการไหลสารขัด 0.368 kg/min. 8.ความเร็วการตัด 0.265 mm./s.	2.วิเคราะห์มุมเอียงรอยตัด	Dino-Lite Digital Microscope
	3.วิเคราะห์ความสูงคลื่น	Dino-Lite Digital Microscope
	4.วิเคราะห์รอยแตกร้าว	Dino-Lite Digital Microscope

3.1 การตั้งค่าเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง

3.1.1 หลักการตัดของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง

วัสดุที่จะนำมาทำการตัดจะมีคุณสมบัติบางประการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัด สำหรับการตัดด้วยเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงนั้น โดยรายการชนิดของวัสดุในเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงจะสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆของวัสดุทั่วไป แต่ยังไม่สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย

ของวัสดุอื่นๆที่มีในปัจจุบัน เช่น ชนิดวัสดุสังเคราะห์ ชนิดวัสดุค้นพบใหม่ ชนิดวัสดุผสม เป็นต้น แต่ในเบื้องต้นในการตัดวัสดุด้วยเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง จำเป็นต้องทำการเลือกการชนิดของวัสดุและที่สำคัญอีกอย่าง คือ ค่าความหนาของวัสดุที่จะนำมาตัด เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลถึงการตัดขาดของวัสดุ คุณภาพผิวรอยตัดของชิ้นงาน และค่าความเร็วตัดหรือเวลาที่ใช้ในการตัดวัสดุนั้น จึงมีผลทำให้ต้นทุนในกระบวนการตัดด้วยเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงเพิ่มสูงขึ้น

ดังนั้นการศึกษาหาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นเซรามิกกับความหนาของแผ่นเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting)จะมีตัวแปรที่มีอิทธิพลในการพิจารณาต่อการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิก คือความหนาของชิ้นงาน แรงดันน้ำที่ใช้ในการตัด เวลาที่ใช้ในการตัดขาด และคุณภาพผิวรอยตัดของชิ้นงานขาด

3.1.2 สารขัดสำหรับการตัดของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง

ในการตัดวัสดุ ด้วยเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูงสารขัดที่จะนำมาใช้ในการทดลองตัดจะมีลักษณะเป็น เม็ดทรายแข็งซึ่งถูกคัดสรรและเลือกขนาดมาโดยเฉพาะ สารกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไปคือโกเมน คุณสมบัติของทรายโกเมนมีจุดหลอมเหลว 1250 องศาเซลเซียสและความถ่วงจำเพาะที่ 4.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สารกัดกร่อนโกเมนมีความแข็ง หยาบ และราคาไม่แพง โดยขนาดที่ใช้ในการทดลองคือ 80 Mesh (300 - 150 ไมครอน) เหมาะสำหรับงานตัดทั่วไป

3.2 การเตรียมการทดลอง

ออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกด้วยเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง ในเบื้องต้นเป็นการทดลอง ศึกษาหาความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นเซรามิกกับความหนาของแผ่นเซรามิกที่ใช้ในการตัดวัสดุเพื่อทำให้วัสดุขาดทำการวัดค่าความหยาบผิว มุมเอียงรอยตัด ความสูงคลื่นรอยตัด ของชิ้นงานและวัดค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ เป็นข้อพิจารณาในการหา ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานที่เหมาะสมกับการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูป ซึ่งการออกแบบการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 กำหนดปัจจัยในการทดลอง

ในการทดลองประกอบด้วยตัวแปรดังนี้

1. ตัวแปรคงที่

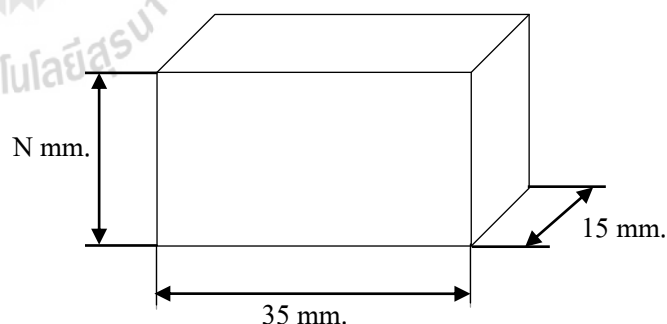
1.1) ใช้เครื่อง Water Jet รุ่น MAXIEM Water Jet Model 1530 ในการทดลองตัด

1.2) ชิ้นงานทดลองเป็นแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูป

- 1.3) สารขัดประเภททราย Garnet ขนาด 80 Mesh
- 1.4) ขนาดของรูรีดน้ำ 0.25 มิลลิเมตร
- 1.5) ขนาดของรูหัวตัด 0.7 มิลลิเมตร
- 1.6) คุณภาพผิวในการตัดที่ Q3 ของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง
- 1.7) อัตราการไหลของสารขัด 0.368 กิโลกรัมต่อนาที
- 1.8) ความเร็วในการตัด 0.265 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 1.9) อุณหภูมิในการตัดอยู่ระหว่าง 8 ± 4 องศาเซลเซียส
2. ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง
 - 2.1) แรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองเริ่มต้น 260, 290, 320 และ 350 MPa
 - 2.2) ความหนาชิ้นงานเริ่มต้นที่ 7, 10 และ 13 mm.

3.2.2 ออกแบบชิ้นงานทดลอง

การออกแบบชิ้นงานตัดสำหรับ เครื่องตัดวัสดุแรงดันสูง สามารถทำได้โดยการสร้างแบบงานที่จะทำการตัดในโปรแกรม การสร้างแบบชิ้นงานซึ่งชิ้นงานในการทดลองจะมีขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตรยาว 35 มิลลิเมตร หากชิ้นงานมีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้ชิ้นงานหล่นลงอ่างตัดซึ่งจะทำให้ยากต่อการค้นหาชิ้นงาน ถ้าขนาดของชิ้นงานทดลองใหญ่เกินไปจะทำให้ต้นทุนในการทดลองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในการตัดแต่ละครั้งต้องใช้ต้นทุนสูง ดังนั้นจึงใช้ขนาดของชิ้นงานทดลองตามขนาดดังกล่าว



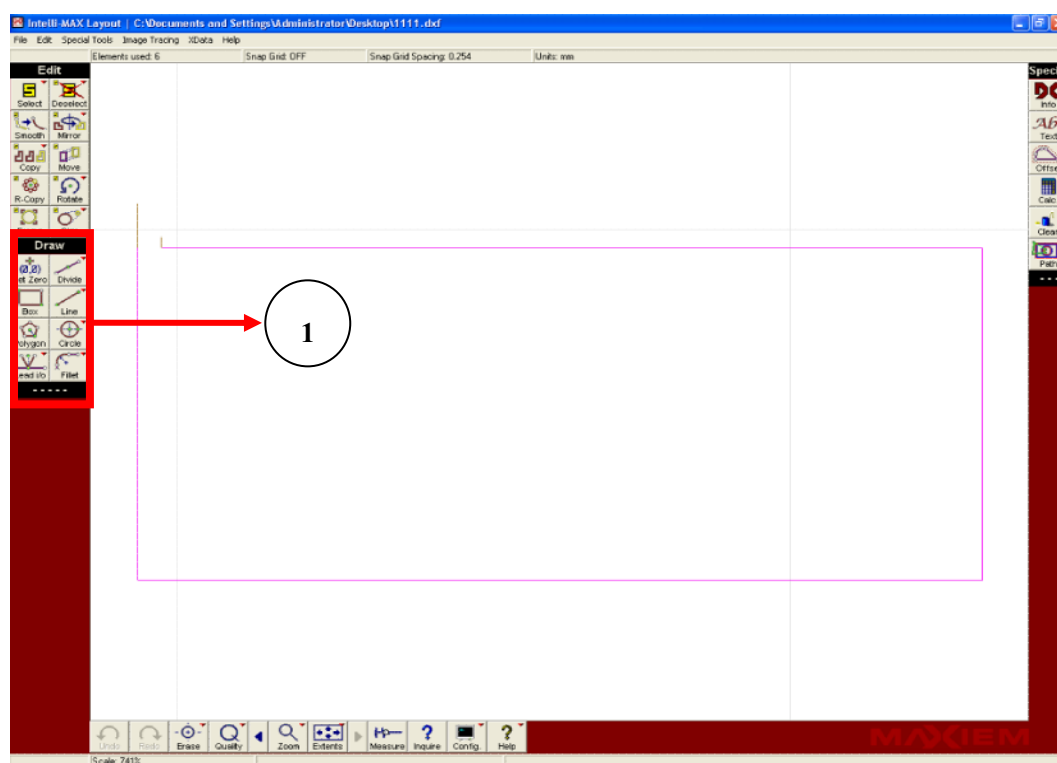
รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นงานที่ทำการทดลองตัด ขนาด $15 \times 35 \times N$ มิลลิเมตร

3.2.3 การสร้างแบบชิ้นงานและกำหนดค่าต่าง ๆ

ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการตัด สามารถอ่านค่าได้จากจอแสดงผลคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องตัดวัสดุแรงดันสูงจะมีซอฟต์แวร์พื้นฐาน Intelli-MAX เป็นตัวควบคุมการทำงาน

ทั้งหมดของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างแบบชิ้นงานการ
ทำชิ้นงานหรือกำหนดค่าต่าง ๆ ในการตัดชิ้นงานจริง มีขั้นตอนดังนี้

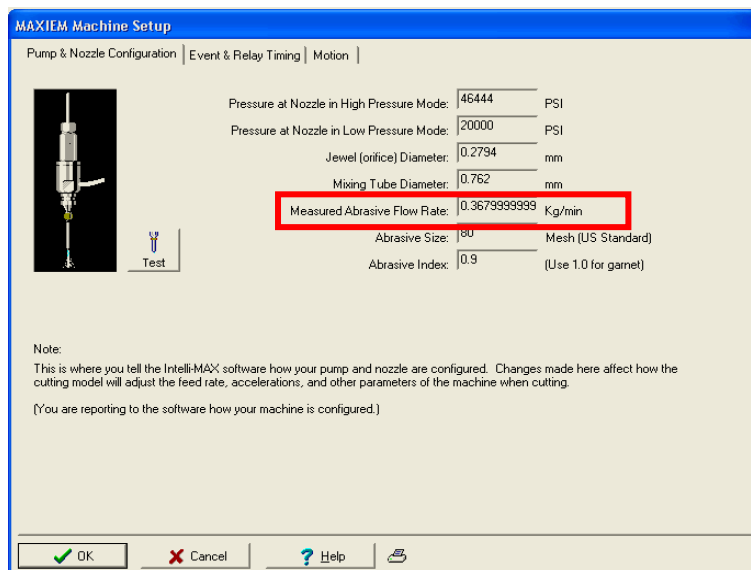
1.สร้างแบบชิ้นงานและการกำหนดค่าคุณภาพผิวของการตัดหรือค่า Q จากระดับ
คุณภาพผิว Q1 ถึง Q5ของรอยตัด และเลือกค่าในโปรแกรมการสร้างแบบชิ้นงานแสดงดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2แสดงขั้นตอนการสร้างแบบชิ้นงานและการกำหนดค่าคุณภาพผิวของการตัด

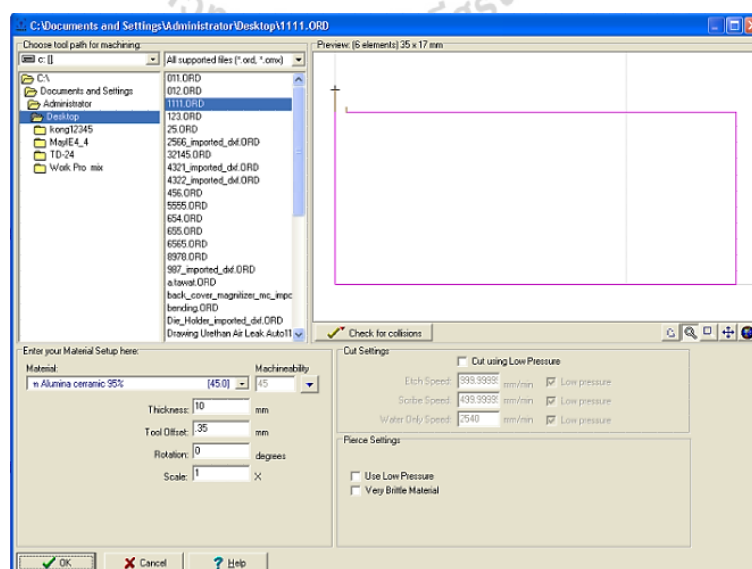
จากรูปที่ 3.2เป็นขั้นตอนในการสร้างแบบชิ้นงาน และการกำหนดค่าคุณภาพผิวของ
การตัดในโปรแกรมพื้นฐานเพื่อใช้ในการตัด ซึ่งหมายเลข 1 คือการสร้างแบบชิ้นงานโดยการ
เลือกคำสั่งต่างๆในแถบเมนู Drawแล้วทำการสร้างแบบตามที่ได้กำหนด โดยเลือกคุณภาพผิวของ
การตัดที่ระดับ 3 ในแถบเมนู Available Qualities

2. การเลือกรายการชนิดสารขัดที่จะนำมาใช้ตัดในโปรแกรม การตัดชิ้นงานจริงจะใช้
ทราย (Garnet) ขนาด 80 Mesh (300 - 150 ไมครอน) อัตราการไหลของสารขัด 0.368 กิโลกรัมต่อ
นาที แสดงดังรูปที่3.3



รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเลือกรายการชนิดและอัตราการไหลของสารขัด

3. ทำการเลือกรายการชนิดของวัสดุและความหนาของวัสดุที่จะนำมาตัดในโปรแกรมการตัดชิ้นงานจริง เป็นขั้นตอนการเลือกรายการชนิดวัสดุและความหนาของวัสดุที่จะนำมาตัด ในโปรแกรมพื้นฐานเพื่อใช้ในการตัด โดยทำการเลือกรายการชนิดของวัสดุในแถบเมนู Material โดยกำหนดวัสดุเป็น อะลูมินาเซรามิก และในการป้อนค่าความหนาของวัสดุจะทำการป้อนที่แถบเมนู Thickness โดยกำหนดค่าความหนาเท่ากับ 7, 10 และ 13 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4



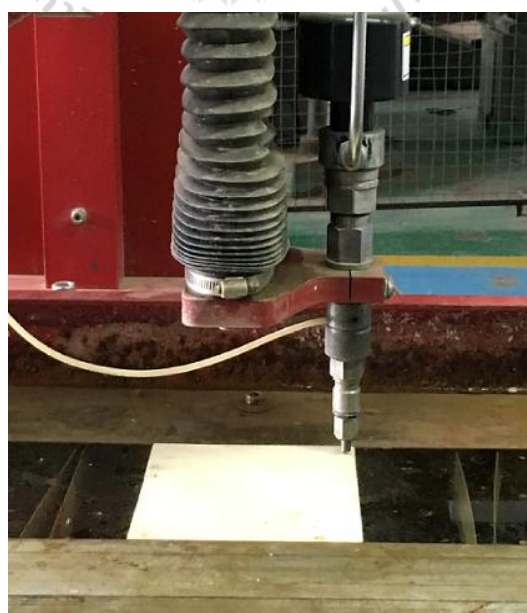
รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการเลือกรายการชนิดวัสดุและความหนาของวัสดุ

3.2.4 การจับชิ้นงานทดลอง

ในการจับชิ้นงานทดลองเพื่อทำการขึ้นรูปวัสดุด้วยน้ำแรงดันสูงนี้ ให้ชิ้นงานทดลองห่างจากแกน X ประมาณ 800 มิลลิเมตร และห่างจากแกน Y ประมาณ 800 มิลลิเมตร สาเหตุที่ต้องกำหนดระยะห่างนี้เพื่อป้องกันการแตกหักของท่อแรงดันน้ำทั้งท่อแกน X และท่อแกน Y แสดงดังรูปที่ 3.5 และ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งหัวตัดห่างจากแกน X ประมาณ 800 มิลลิเมตร และห่างจากแกน Y ประมาณ 800 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 แสดงการจับชิ้นงาน

วัสดุทนไฟอุตสาหกรรมกระดาศอุตสาหกรรมเซรามิกโดยการทดลองครั้งนี้จะเลือกใช้แผ่นอะลูมินาเซรามิกที่มีความหนา 7, 10 และ 13 มิลลิเมตร แสดงดังรูป 3.8 และตารางแสดงส่วนผสมของแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูป ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.8 แสดงภาพแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูปขนาด 7, 10 และ 13 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงส่วนผสมของแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูป

Material property	Value
High purity grades	99.5% Al_2O_3
Sintering temperature($^{\circ}\text{C}$)	1700
Density(g/cm^3)	3.75
High bending strength (MPa)	285

2. ทราช (Garnet)

สารกัดกร่อนที่ใช้ในงานตัดระบบแอบราซีฟเวอร์เจ็ท คือเม็ดทรายแข็งซึ่งถูกคัดสรรและเลือกขนาดมาโดยเฉพาะ สารกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไปคือโกเมน คุณสมบัติของทรายโกเมน มีจุดหลอมเหลว 1250 องศาเซลเซียสและความถ่วงจำเพาะที่ 4.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

โดยสารกัดกร่อนโกเมนมีความแข็ง หยาบ และราคาไม่แพง และขนาดที่ใช้ในการทดลองคือ 80 Mesh (300 - 150 ไมครอน) เหมาะสำหรับงานตัดทั่วไป แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงชนิดสารขัดทราย (Garnet)

3. เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์แบบดิจิทัล

เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ที่ทางผู้จัดทำใช้นั้นเป็นเวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ที่เป็นแบบดิจิทัล มาวัดขนาดของชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วยเครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูงว่ามีความเที่ยงตรงตามแบบที่กำหนดไว้หรือไม่โดยใช้ความละเอียดของเวอร์เนียคาร์ลิเปอร์เท่ากับ 0.02 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงภาพเวอร์เนียคาร์ลิเปอร์แบบดิจิทัล

4. เกจตั้งความสูงหัวตัด

ในการตั้งค่าตำแหน่งระยะของหัวตัด โดยในขั้นตอนนี้การตั้งค่าของตำแหน่งหัวตัดจะใช้วัสดุประเภท SS 400 ในการทำเกจขนาด 30×100 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ± 0.050 มิลลิเมตร โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ในการตรวจสอบค่าความหนาของเกจที่ใช้ในการตั้งค่าระยะความสูงหัวตัดของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงกับวัสดุที่นำมาตัดแสดงดังรูปที่ 3.11, 3.12



รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างเกจที่ใช้ในการตั้งระยะความสูงหัวตัดที่ใช้ในการตัดอะลูมิเนียม

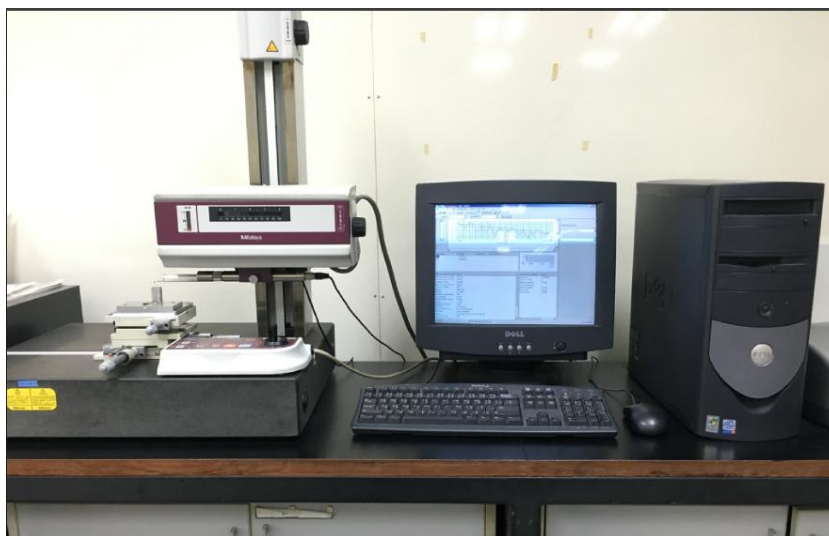


รูปที่ 3.12 แสดงภาพการตรวจสอบค่าความหนาของเกจตั้งความสูงหัวตัด
หนา 2 มิลลิเมตร ± 0.050

3.3.2 อุปกรณ์วิเคราะห์ความหยาบผิว

1. เครื่องวัดความหยาบผิว

เครื่องวัดความหยาบผิวรอยตัดสามารถวัดค่าได้ทั้ง R_a , RMS , R_t , R_y , R_z , $R_{max.D}$, $Rz.D$, BC และชิ้นงานที่นำมาวัดนั้นอยู่ในค่าของเครื่องจึงสามารถทำการวัดค่าได้โดยค่าที่ผู้จัดทำนั้นนำมาใช้เพราะเป็นค่าที่นิยมมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมคือค่า $Roughness\ Surface\ (R_a)$ โดยใช้เครื่อง $Surface\ Roughness$ รุ่น $MitutoyoSV-3000$ วัดค่าความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงเครื่องวัดค่าความหยาบผิว (Surface Roughness)

2. Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ $Electron$ เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ $0.2\ \mu m$ ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า โดยในการทดลองครั้งนี้จะใช้เครื่อง $Scanning\ Electron\ Microscope$ มาใช้ในการเปรียบเทียบพื้นผิวในแต่ละสถานะการทดลอง



รูปที่ 3.14 Scanning Electron Microscope : SEM

3.3.3 อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงคลื่น มุมเอียงรอยตัด และรอยแตกร้าว

1. Dino-Lite Digital Microscope

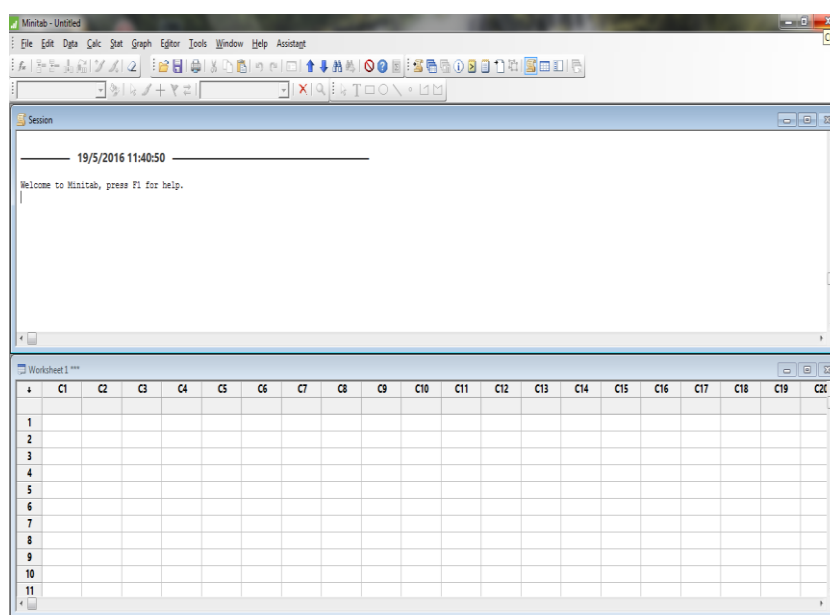
กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล คือ กล้องจุลทรรศน์พร้อมกล้องดิจิทัล โดยสามารถสังเกตจากตัวอย่างผ่านทางคอมพิวเตอร์ กล้องจุลทรรศน์สามารถเป็นบางส่วนหรือทั้งหมดที่ควบคุมด้วยระดับต่างๆของอัตโนมัติ กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลช่วยให้การวิเคราะห์ดีกว่าของกล้องจุลทรรศน์ สำหรับการวัดตัวอย่างของระยะทางและพื้นที่ และปริมาณเซลล์เรืองแสง หรือการตรวจชิ้นเนื้อ ไมโครสโคปแบบดิจิทัลเป็นรูปแบบของกล้องจุลทรรศน์แสงแบบดั้งเดิมที่ใช้ เลนส์ และกล้องดิจิทัลเพื่อการส่งออกภาพไปยัง จอมอนิเตอร์



รูปที่ 3.15 Dino-Lite Digital Microscope

3.3.4 โปรแกรมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล (Two-WayANOVA)

โปรแกรม Minitab 17 Free Trial นั้นนำมาใช้ในการคำนวณทางสถิติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงดันน้ำที่ 260, 290, 320 และ 350 MPa กับความหนา 7, 10 และ 13 mm. ที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูปโดยทำการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวรอยตัด ค่ามุมเอียงรอยตัด ค่าความสูงคลื่นรอยตัดและรอยแตกร้าวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16แสดงโปรแกรม Minitab 17 Free Trial

3.4 ดำเนินการทดลอง

3.4.1 ขั้นตอนการทดลองตัดชิ้นงาน

ดำเนินการ การตัดแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูปโดยแรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320 และ 350 MPa กับความหนา 7, 10 และ 13 mm. ตามลำดับด้วยเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง เพื่อศึกษาหาปัจจัยระหว่างแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดกับความหนาของชิ้นงานที่เหมาะสมในการตัด มีขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบเช็คสภาพความพร้อมในการใช้งานของเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง ชุดคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17แสดงเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง

2. วางแผนชิ้นงานในตำแหน่งของการจับยึดบนเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงพร้อมจับยึดด้วยตัวจับยึดชิ้นงานและใช้ไม้วัดระดับน้ำตรวจสอบแนวความฉากให้ชิ้นงานตั้งฉากกับหัวตัดเพื่อความเที่ยงตรงในการตัดแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิก แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18แสดงการจับยึดหลักแผ่นบนเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง



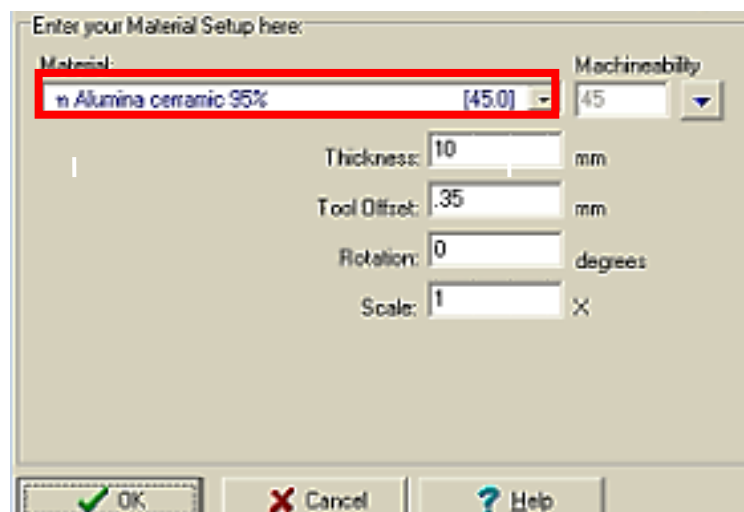
รูปที่ 3.19 แสดงตำแหน่งหัวตัดจะใช้เกจขนาด 30×100 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ± 0.050 มิลลิเมตรตั้งค่าความสูงหัวตัด

3. ในการตั้งค่าตำแหน่งระยะความสูงของหัวตัดนั้น ในขั้นตอนนี้การตั้งค่าของตำแหน่งหัวตัดจะใช้เกจขนาด 30×100 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ± 0.050 มิลลิเมตรตั้งค่าความสูงหัวตัดโดยการตั้งระยะความสูงของหัวตัดนั้นจะตั้งที่ระยะ 2 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 3.19 และตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้นในการตัดแสดงดังรูป 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้นในการตัด

4. เลือกค่ารายการ ของวัสดุชนิดต่างๆ แต่ละรายการ ซึ่งสามารถทำการเลือกค่า ในซอฟต์แวร์พื้นฐาน Intelli-MAX ส่วน โปรแกรมการตัดชิ้นงานจริงแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21แสดงตัวอย่างการเลือกค่ารายการของวัสดุชนิด Alumina ceramic

ในการศึกษาหาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นเซรามิกกับความหนาของแผ่นเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) โดยแรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320 และ 350 MPa กับความหนา 7, 10 และ 13 mm. ใช้สารขัดประเภททราย (Garnet) ขนาด 80 Mesh เพื่อทำการตัดชิ้นงานทดลองทั้งหมดจำนวน 5 ชิ้นในแต่ละสภาวะการทดลองตามลำดับและดำเนินการตั้งค่าต่าง ๆ ในการทดลอง เช่น กำหนดวัสดุและการชดเชยรัศมีหัวตัด เป็นต้น

3.4.2 ขั้นตอนการถ่ายภาพพื้นผิวโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope มาใช้ในการถ่ายภาพพื้นผิวที่กำลังขยายเท่าๆกัน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบพื้นผิว โดยจะเริ่มจากการนำชิ้นงานมาเคลือบทอง ด้วยสุญญากาศ โดยใช้เวลาในการเคลือบ 200 วินาที เพื่อให้การ ถ่ายภาพชัดเจนขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.22 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบทองแล้ว มาเข้าเครื่องถ่ายภาพ โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 แสดงการเคลือบทองด้วยสุญญากาศ

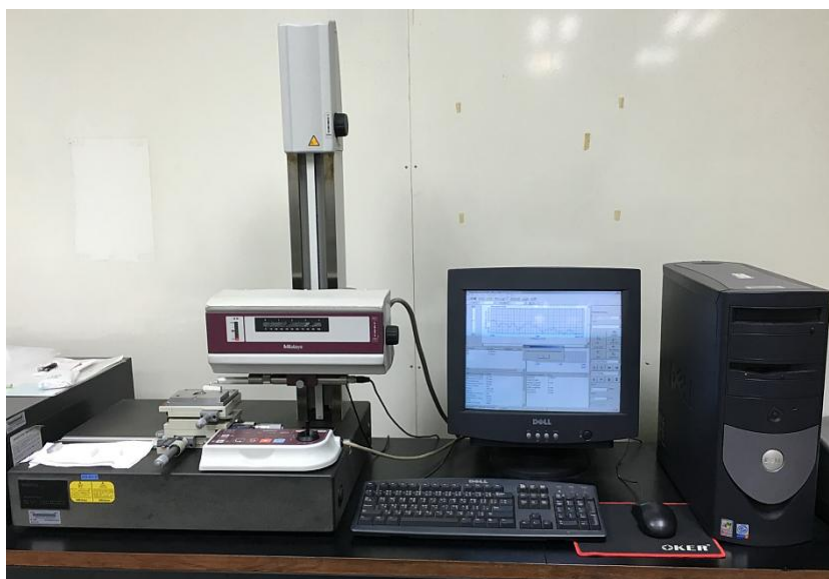


รูปที่ 3.23 แสดงการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

3.4.3 ขั้นตอนการวัดความหยาบผิว

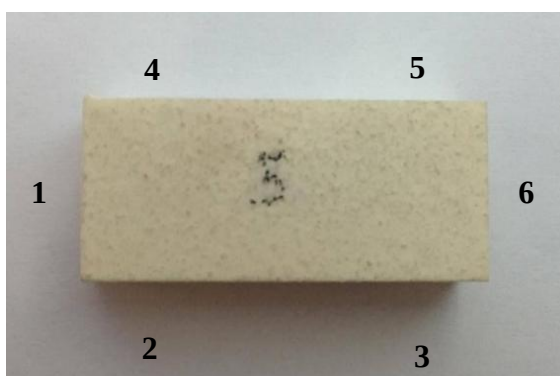
หลังการทดลองตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกด้วยเครื่องตัดวัสดุ น้ำแรงดันสูง จะทำการวัดค่าความหยาบผิวบริเวณรอยตัด เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ และดำเนินการในขั้นตอนต่อไป ซึ่งการวัดค่าความหยาบผิวบริเวณรอยตัดของชิ้นงาน มีขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบเช็คสภาพความพร้อมของเครื่องวัดความหยาบผิวและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวัดความหยาบผิวบริเวณรอยตัดของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะของเครื่องวัดความหนาผิว

2. ทำการวางชิ้นงานบนเครื่องวัดความหนาผิวโดยขั้นตอนการวัดความหนาผิวนั้น ต้องทำการวัดบริเวณตรงกลางรอยตัดของชิ้นงานโดยตั้งค่าการลาก 1 ครั้ง มีความยาวทั้งหมด 8.8 มิลลิเมตร มีการเผื่อระยะหัวและท้าย 0.8 มิลลิเมตร เนื่องจากหน้าตัดของชิ้นงานด้านกว้างมีขนาด 15 มิลลิเมตรและ ส่วนด้านยาวมีขนาดหน้าตัด 35 มิลลิเมตร จึงแบ่งการลากเป็น 2 ช่วงละ 8.8 มิลลิเมตร รวมทั้งหมด 1 ชิ้นจะทำการวัด 6 ครั้ง ใช้ความเร็วในการลาก 5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยเลือกจากค่ากลางการวัดจะเริ่ม จากตำแหน่งรอยตัด 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ เพื่อนำค่าความหนาผิวบริเวณรอยตัดของชิ้นงานในแต่ละด้านมาวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปแสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แสดงตำแหน่งวัดความหนาผิว

3. อ่านค่า Ra และค่าต่างๆที่จอแสดงผล ดังรูป แล้วบันทึกผลค่าความหยาบผิวรอยตัดของชิ้นงาน ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3

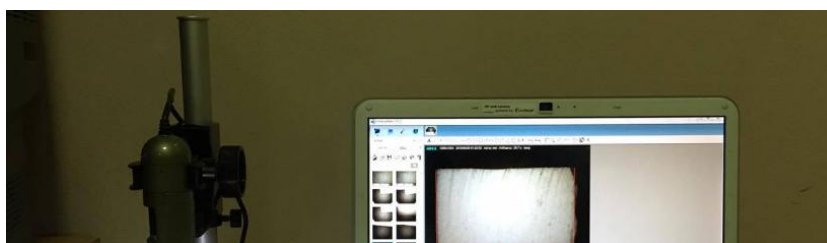
ตารางที่ 3.3 ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320, 350 MPa กับความหนา 7, 10, 13 mm.

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร) แรงดันน้ำ X กับ ความหนา XXmm.						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย
1							
2							
3							
4							
5							
ค่าเฉลี่ย (รวม)							

3.4.4 ขั้นตอนการวัดขนาดมุมเอียงรอยตัด

ในขั้นตอนการวัดขนาดมุมเอียงรอยตัดนั้นจะเริ่มจากการถ่ายรูปมุมเอียง รอยตัด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Dino-Lite Digital Microscope) ในการถ่ายภาพทั้ง 2 ด้าน ได้แก่ ด้านบน ด้านล่าง และจะใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier วัดค่าขนาดมุมเอียงของชิ้นงานหลังจากการแผ่นอะลูมินา เซรามิก และการทดลองหาค่ามุมเอียงรอยตัดนี้จะใช้ชิ้นงานทั้งหมด 60 ชิ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เช็กสภาพความพร้อมของกล้องจุลทรรศน์และอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวัดมุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน
2. ทำการถ่ายรูปมุมเอียง รอยตัด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยทำการวัด 2 ด้าน ทั้ง 60 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 3.26
3. การใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier วัดค่าขนาดมุมเอียงของชิ้นงานหลังจากการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกแสดงดังรูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28
4. บันทึกข้อมูลและสรุปผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.28 แสดงภาพตัวอย่างการใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier มาวัดมุมเอียงของ
ชิ้นงาน ด้านล่าง

ตารางที่ 3.4 ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าการวัดมุมเอียงรอยตัดที่แรงคั้นน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320, 350 MPa กับความหนา 7, 10, 13 mm.

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1										
2										
3										
4										
5										
					ค่าเฉลี่ย (รวม)					

3.4.5 ขั้นตอนการวัดความสูงคลื่นรอยตัด

ในขั้นตอนการวัดความสูงคลื่นรอยตัดนั้นจะเริ่มจากการใช้ กล้องจุลทรรศน์ (Dino- Lite Digital Microscope) ถ่ายภาพความสูงคลื่นรอยตัดและ ใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier วัดความสูงคลื่นรอยตัด โดยจะทำการวัดทั้งหมด 4 ด้าน ในการทดลองนี้จะใช้ชิ้นงานทั้งหมด 60 ชิ้น

และนำค่าที่ได้จากการทดลองบันทึกลงตารางการเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดและนำค่าที่บันทึกลงตาราง นำเอาไปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบความพร้อมของกล้องจุลทรรศน์และอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวัดความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงาน
2. ทำการถ่ายรูป ความสูงคลื่นรอยตัด โดยในการทดลองนี้จะใช้กล้องจุลทรรศน์การถ่ายภาพแสดงดังรูปที่ 3.29
3. แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier ในการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ได้จากการตัดแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกแสดงดังรูปที่ 3.30
4. บันทึกข้อมูลและสรุปผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.29แสดงตัวอย่างการถ่ายรูปความสูงคลื่นรอยตัด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์

(Dino-Lite Digital Microscope)



รูปที่ 3.30 แสดงรูปตัวอย่างการวัดความสูงคลื่นรอยตัด

ตารางที่ 3.5 ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลการวัดค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320, 350 MPa กับความหนา 7, 10, 13 mm.

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร) แรงดันน้ำ X กับ ความหนา XXmm.						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1							
2							
3							
4							
5							
ค่าเฉลี่ย (รวม)							

3.4.6 ขั้นตอน ในขั้นตอน

บัน
ทึก
ลง
ตาราง
นำ
อา
ไป

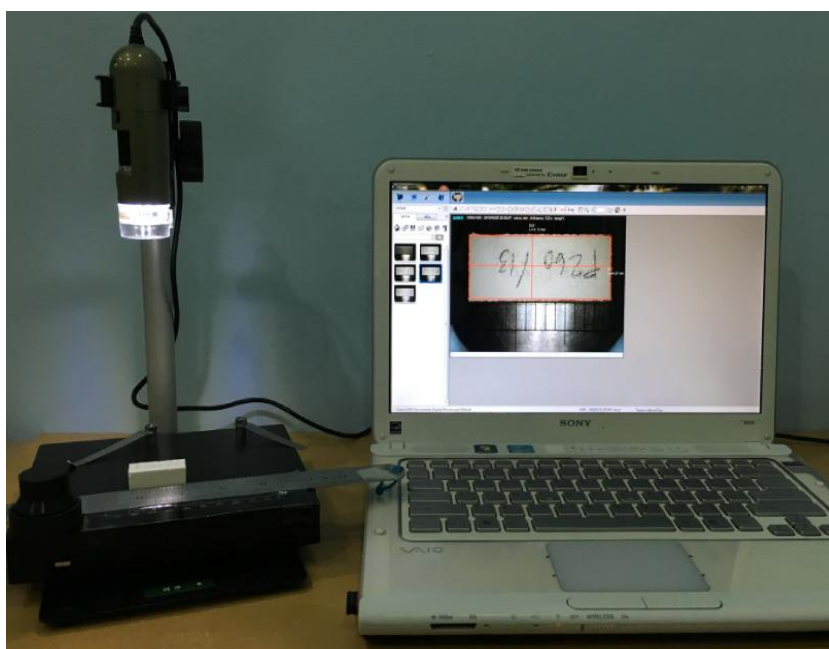
วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบความพร้อมของกล้องจุลทรรศน์และอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวัด รอย
แตกร้าวรอยตัดของชิ้นงาน

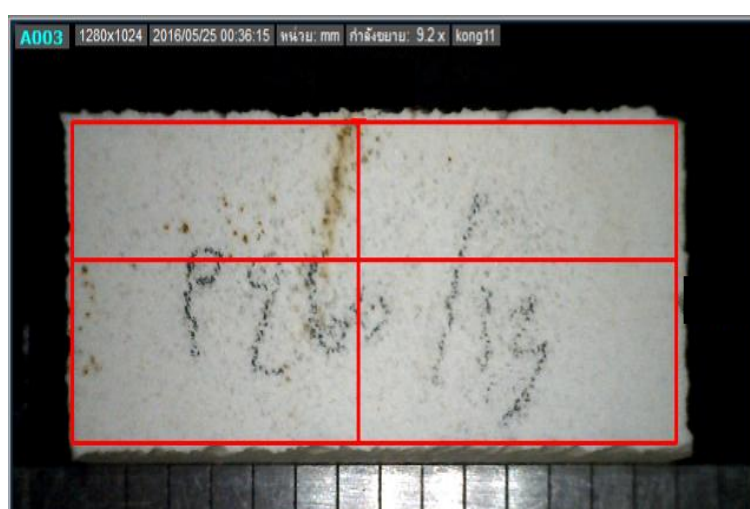
2. ทำการถ่ายรูป รอยแตกร้าว ของชิ้นงาน โดยในการทดลองนี้จะใช้กล้องจุลทรรศน์
การถ่ายภาพแสดงดังรูปที่ 3.31

3. การใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier ในการวัดรอยแตกร้าวของชิ้นงานที่ได้จากการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกแสดงดังรูปที่ 3.32

4. บันทึกข้อมูลและสรุปผลการทดลอง แสดงดังตาราง 3.6



รูปที่ 3.31 แสดงตัวอย่างการถ่ายภาพรอยแตกร้าวของชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Dino-Lite Digital Microscope)



รูปที่ 3.32 แสดงรูปตัวอย่างการวัดรอยแตกร้าวของชิ้นงาน

ตารางที่ 3.6 ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าการวัดรอยแตกร้าวของชิ้นงานที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320, 350 MPa กับความหนา 7, 10, 13 mm.

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1						
2						
3						
4						
5						
ค่าเฉลี่ย (รวม)						

3.5 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลอง จะสามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นเซรามิกกับความหนาของแผ่นเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) ที่มีต่ออิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวค่ามุมเอียงรอยตัดความสูงคลื่นรอยตัด และค่ารอยแตกร้าวที่เกิดจากการตัด โดยการใช้การทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่นัยสำคัญ 0.05 เป็นตัวชี้วัด โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

3.5.1 การวิเคราะห์ผลค่าความหยาบผิว

1. การกำหนดค่าสมมติฐานเพื่อการทดสอบ

การกำหนดค่าสมมติฐานเพื่อการทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน ที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว มีวิธีการตั้งสมมติฐานดังนี้

ปัจจัยของแรงดันน้ำ

H_0 : อิทธิพลของแรงดันน้ำไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

H_1 : อิทธิพลของแรงดันน้ำมีผลต่อค่าความหยาบผิว

หรือการทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของแรงดันน้ำ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$H_1 : \tau_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า; เมื่อ i คือ ระดับแรงดันน้ำ โดยที่ $i = 1, 2, 3, 4$

ปัจจัยของความหนาชิ้นงาน

H_0 : อิทธิพลของความหนาชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

H_1 : อิทธิพลของความหนาชิ้นงานมีผลต่อค่าความหยาบผิว

หรือการทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของความหนา

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$H_1 : \beta_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า ; เมื่อ j คือ ระดับความหนา โดยที่ $j = 1, 2, 3$

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว

หรือ การทดสอบสมมติฐานการกระทำร่วมระหว่าง แรงดันน้ำและ ความหนา

$$H_0 : (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{43}$$

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

3.5.2 การวิเคราะห์ผลค่ามุมเอียงรอยตัด

1. การกำหนดค่าสมมติฐานเพื่อการทดสอบ

การกำหนดค่าสมมติฐานเพื่อการทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน ที่มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัด มีวิธีการตั้งสมมติฐานดังนี้

ปัจจัยของแรงดันน้ำ

H_0 : อิทธิพลของแรงดันน้ำไม่มีผลต่อค่ามุมเอียงรอยตัด

H_1 : อิทธิพลของแรงดันน้ำมีผลต่อค่ามุมเอียงรอยตัด

หรือ การทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของแรงดันน้ำ

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$

$H_1 : \tau_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า; เมื่อ i คือ ระดับแรงดันน้ำ โดยที่ $i = 1, 2, 3, 4$

ปัจจัยของความหนาชิ้นงาน

H_0 : อิทธิพลของความหนาชิ้นงานไม่มีผลต่อค่ามุมเอียงรอยตัด

H_1 : อิทธิพลของความหนาชิ้นงานมีผลต่อค่ามุมเอียงรอยตัด

หรือการทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของความหนา

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$

$H_1 : \beta_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า ; เมื่อ j คือ ระดับความหนา โดยที่ $j = 1, 2, 3$

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาที่มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัด

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาที่มีอิทธิพลต่อมุมเอียงรอยตัด

หรือ การทดสอบสมมติฐานการกระทำร่วมระหว่าง แรงดันน้ำและ ความหนา

$H_0 : (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{43}$

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

3.5.3 การวิเคราะห์ผลของความสูงคลื่นรอยตัด

1. การกำหนดค่าสมมติฐานเพื่อการทดสอบ

การกำหนดค่าสมมติฐานเพื่อการทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน ที่มีอิทธิพลต่อความสูงคลื่นรอยตัด มีวิธีการตั้งสมมติฐานดังนี้

ปัจจัยของแรงดันน้ำ

H_0 : อิทธิพลของแรงดันน้ำไม่มีผลต่อค่าความสูงคลื่นรอยตัด

H_1 : อิทธิพลของแรงดันน้ำมีผลต่อค่าความสูงคลื่นรอยตัด

หรือ การทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของแรงดันน้ำ

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า; เมื่อ } i \text{ คือ ระดับแรงดันน้ำ โดยที่ } i = 1, 2, 3, 4$$

ปัจจัยของความหนาขึ้นงาน

$$H_0: \text{อิทธิพลของความหนาขึ้นงานไม่มีผลต่อค่าความสูงคลื่นรอยตัด}$$

$$H_1: \text{อิทธิพลของความหนาขึ้นงานมีผลต่อค่าความสูงคลื่นรอยตัด}$$

หรือ การทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของความหนา

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า ; เมื่อ } j \text{ คือ ระดับความหนา โดยที่ } j = 1, 2, 3$$

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน

$$H_0: \text{ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาที่มีอิทธิพลต่อ}$$

ความสูงคลื่นรอยตัด

$$H_1: \text{มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาที่มีอิทธิพลต่อ}$$

ความสูงคลื่นรอยตัด

หรือ การทดสอบสมมติฐานการกระทำร่วมระหว่าง แรงดันน้ำและ ความหนา

$$H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{43}$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3.5.4 การวิเคราะห์ผลของรอยแตกร้าวของชิ้นงาน

1. การกำหนดค่าสมมติฐานเพื่อการทดสอบ

การกำหนดค่าสมมติฐานเพื่อการทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน ที่มีอิทธิพลต่อรอยแตกร้าวของชิ้นงาน มีวิธีการตั้งสมมติฐานดังนี้

ปัจจัยของแรงดันน้ำ

$$H_0: \text{อิทธิพลของแรงดันน้ำไม่มีผลต่อค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน}$$

$$H_1: \text{อิทธิพลของแรงดันน้ำมีผลต่อค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน}$$

หรือ การทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของแรงดันน้ำ

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า; เมื่อ } i \text{ คือ ระดับแรงดันน้ำ โดยที่ } i = 1, 2, 3, 4$$

ปัจจัยของความหนาขึ้นงาน

H_0 : อิทธิพลของความหนาขึ้นงานไม่มีผลต่อค่ารอยแตกร้าวของขึ้นงาน

H_1 : อิทธิพลของความหนาขึ้นงานมีผลต่อค่ารอยแตกร้าวของขึ้นงาน

หรือ การทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของความหนา

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$H_1: \beta_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า ; เมื่อ j คือ ระดับความหนา โดยที่ $j=1,2,3$

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของขึ้นงาน

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาที่มีอิทธิพลต่อ
รอยแตกร้าวของขึ้นงาน

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาที่มีอิทธิพลต่อ
รอยแตกร้าวของขึ้นงาน

หรือ การทดสอบสมมติฐานการกระทำร่วมระหว่าง แรงดันน้ำและ ความหนา

$$H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{43}$$

$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยสถิติ (Two-Way ANOVA) โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางเพื่อ ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของขึ้นงานที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิก โดยที่จะหาค่าความหยาบผิว ค่ามุมเอียงรอยตัดความสูงคลื่นรอยตัด และรอยแตกร้าวของขึ้นงานโดยใช้โปรแกรมเป็น Minitab17 Free Trial ในการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

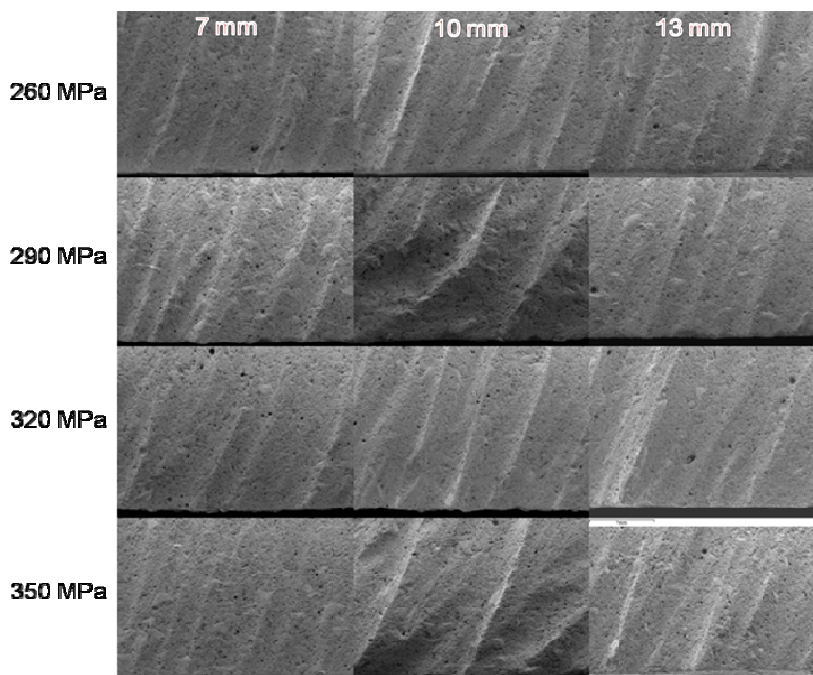
บทนี้นำเสนอผลการทดลองการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูปด้วยเครื่องตัดวัสดุ น้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) โดยแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองเริ่มต้นที่ 260, 290, 320 และ 350 MPa กับความหนา 7, 10 และ 13 mm. เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวค่ามุมเอียงรอยตัด ค่าความสูงคลื่นรอยตัด และวัดค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูลเชิงสถิติแบบจำแนกสองทาง (Two-Way ANOVA) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 17 Free Trial ในการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองถ่ายภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope : SEM

จากการทดลองตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกนั้น จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ได้จากการตัดจะเกิดคลื่นรอยตัดบริเวณพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 4.1 และในขั้นตอนต่อไปก็นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองตัดไปถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope : SEM ที่อัตราขยายเท่าๆกันเพื่อทำการเปรียบเทียบสภาพพื้นผิวในแต่ละสภาวะการทดลอง



รูปที่ 4.1 แสดงรูปชิ้นงานที่ได้จากการทดลองตัด

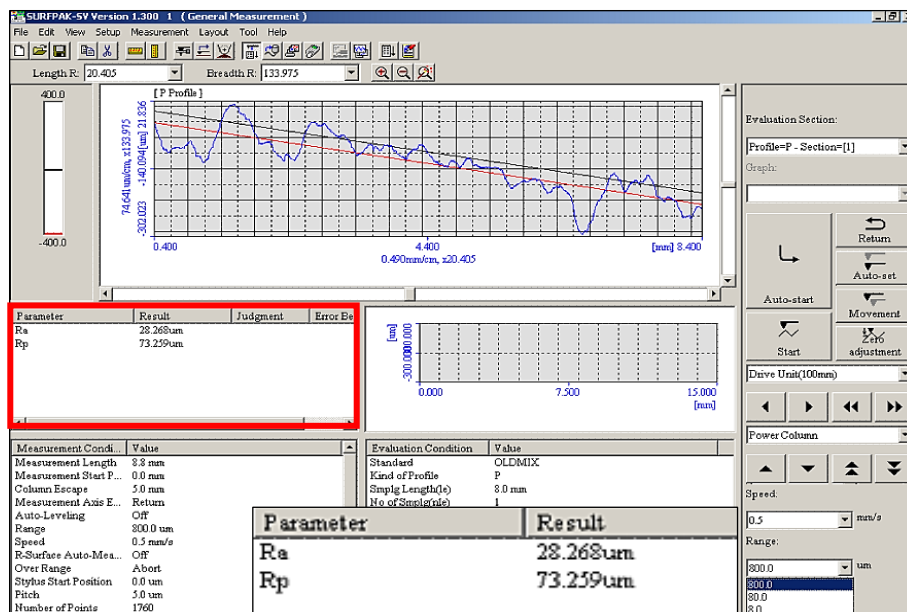


รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope

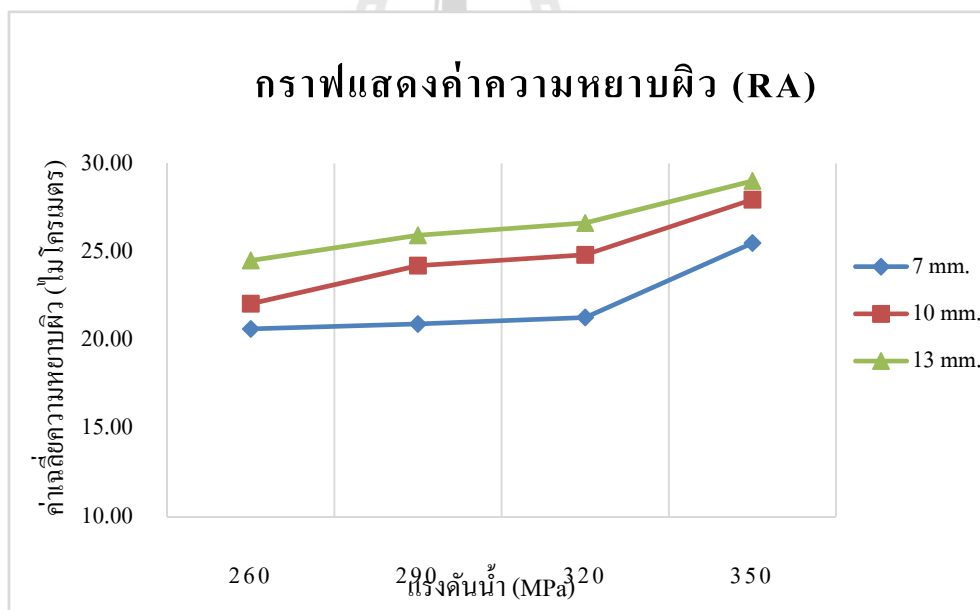
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าแรงดันน้ำที่ 320 MPa กับความหนา 13 mm. พื้นผิวเกิดคลื่นรอยตัดน้อยกว่าสถานะพื้นผิวอื่น ๆ ในแต่ละสถานะการทดลองพิจารณาได้ว่า ระดับแรงดันน้ำที่ 320 MPa เป็นระดับแรงดันน้ำที่เหมาะสมกับความหนาที่ 13 mm. แต่การถ่ายภาพเพื่อเปรียบเทียบด้วย เครื่อง Scanning Electron Microscope : SEM จะเป็นการเปรียบเทียบเบื้องต้น เพื่อดูแนวโน้มของการทดลอง จากนั้นจะนำชิ้นงานที่ได้จากการตัด ไปวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว (Ra) ด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิว (Surface Roughness)

4.2 ผลการเก็บบันทึกข้อมูลค่าความหยาบผิว

การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวในการทดลองตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูปด้วยเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) โดยการเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจะเก็บบริเวณด้านที่ 1-6 ในการวัดแต่ละครั้งจะมีค่าแสดงผลบนจอภาพแสดงดังรูปที่ 4.3 แล้วนำค่าที่ได้บันทึกลงตารางการเก็บข้อมูล แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ก.1-ก.12 และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ในการหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานในการตัดวัสดุด้วยเครื่องตัดวัสดุน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting)



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งค่าความหยาบผิว (Ra)



รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320 และ 350 MPa จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของแต่ละความหนามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากแรงดันน้ำที่ต่ำไปยังแรงดันน้ำที่สูงหรือเมื่อแรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260 MPa ก็จะแสดงแนวโน้มของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ที่ต่ำในแต่ละสถานะของความหนา แต่เมื่อเพิ่ม

แรงดันน้ำจนถึงสถานะแรงดันน้ำที่ 350 MPa ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในแต่ละสถานะความหนาและพบอีกได้ว่าค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นอาจเกิดจากผลกระทบของแรงเหวี่ยงของอนุภาคที่เกิดจากแรงจุดคราก (Yield Point) ภายในลำน้ำที่พุ่งออกมาในขณะตัดเดือนโลหะจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเป็นรากฐานของสาเหตุหลักและอาจรวมไปถึงการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ทำให้เกิดเป็นลักษณะคลื่นรอยตัดซึ่งคลื่นรอยตัดอาจเกิดจากความพรุนของแผ่นอะลูมินาเซรามิกประเภทหล่อขึ้นรูป (Casting) ที่มีความพรุนมากกว่าแผ่นอะลูมินาเซรามิกประเภทอัดขึ้นรูป (Pressing) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดคลื่นรอยตัดที่ประมาณที่สูง (M.Hashish, 1988) ดังนั้นจากกราฟการทดลองนี้ จะเห็นได้ว่าความหนาของชิ้นงานที่ 7mm. กับแรงดันน้ำที่ 260 MPa จะแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเรียบสุด เท่ากับ 20.63 ไมโครเมตร

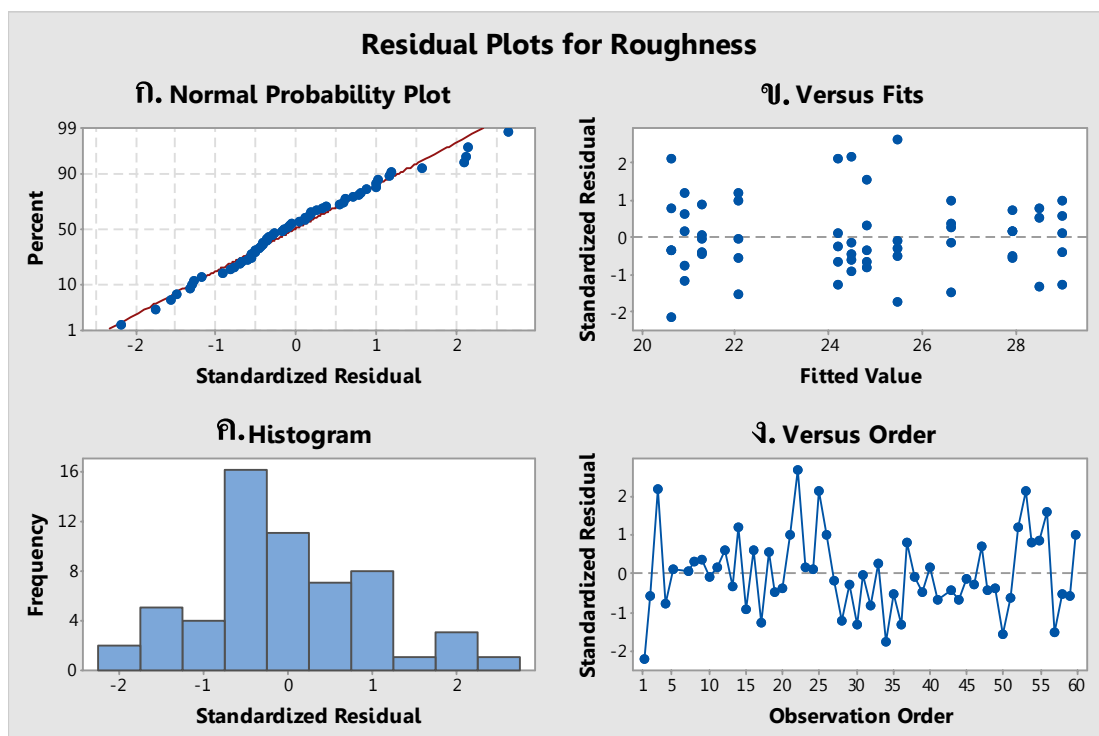
4.2.1 วิเคราะห์ผลการดำเนินงานการวัดค่าความหยาบผิว

จากผลการ

ทดลองในตารางภาคผนวกที่ ก.1-ก.12 แสดงค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) เนื่องมาจากการวิจัยการทดลอง (Experimental research) โดยเฉพาะอย่างยิ่งทดลองกับกลุ่มเล็ก ๆ ควรใช้ระดับแอลฟาเป็น 0.01 หรือ 0.001 ส่วนในการวิจัยภาคสนามหรือเชิงสำรวจ (Field studies and surveys) นิยมใช้เป็น 0.05 (Kohout, 1974 : 306) ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้นนี้ จะใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab 17 Free Trial มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองซึ่งผลการตรวจสอบสามารถแสดงดังนี้



รูปที่ 4.5แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.5กราฟที่ 4.5.ก กราฟ Normal Probability แสดงการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของ Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ กราฟที่ 4.5.ข ฮิสโตแกรมมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ หรือค่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติเหมือนกราฟแรก กราฟที่ 4.5.คและกราฟที่ 4.5.งแสดงการกระจายตัวของ Residual ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Residual มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าข้อมูลของตัวอย่างการทดลองมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ สามารถนำมาวิเคราะห์ผลในขั้นต่อไปได้

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	459.54	41.776	37.91	0.000
Linear	5	444.07	88.814	80.59	0.000
Water pressure	3	199.65	66.551	60.39	0.000
Thickness	2	240.36	120.180	109.05	0.000
2-Way Interactions	6	25.90	4.317	3.92	0.003
Water pressure*Thickness	6	25.90	4.317	3.92	0.003
Error	46	50.70	1.102		
Total	57	510.23			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.04980	90.06%	87.69%	84.21%

รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Minitab 17Free Trial

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเพื่อศึกษาหาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นเซรามิกกับความหนาของแผ่นเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) โดยใช้โปรแกรม Minitab 17 Free Trialพบว่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองตัด ความหนาของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองตัดมีค่า P-Value = 0.000 และปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานมีค่า P-Value = 0.003ซึ่งค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ แสดงว่าแรงดันน้ำ ความหนาของชิ้นงานและปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานนั่นเอง

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจะเห็นได้ว่า ที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันน้ำที่ 260 MPa จะแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่น้อยที่สุด เท่ากับ 20.63 ไมโครเมตรแสดงดังรูปที่ 4.4

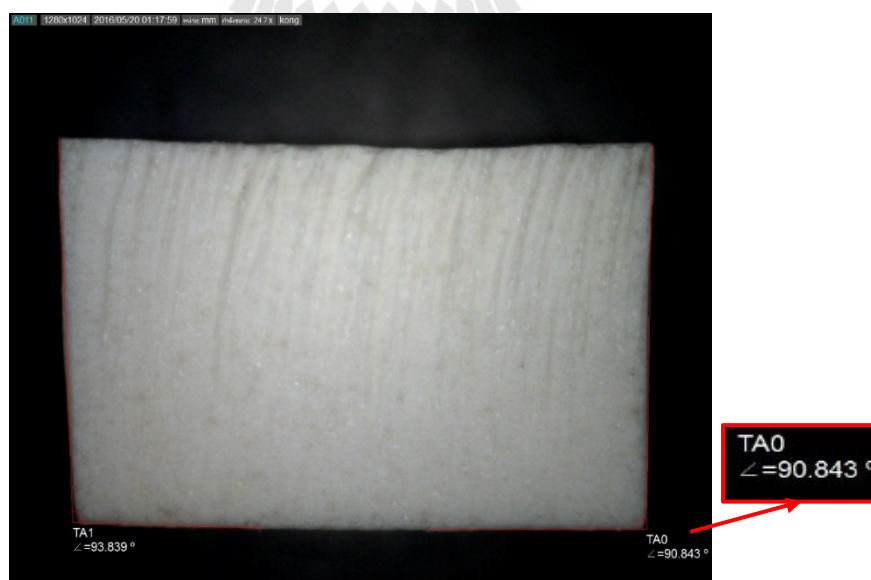
4.3 ผลการเก็บบันทึกข้อมูลค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน

ในการวัดค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงานที่ได้จากการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูปด้วยเครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) การศึกษาหาปัจจัยระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานที่มีผลต่อความสูงคลื่นรอยตัด โดยทำการวัดที่ค่าด้านบนและด้านล่างแสดงดังรูปที่

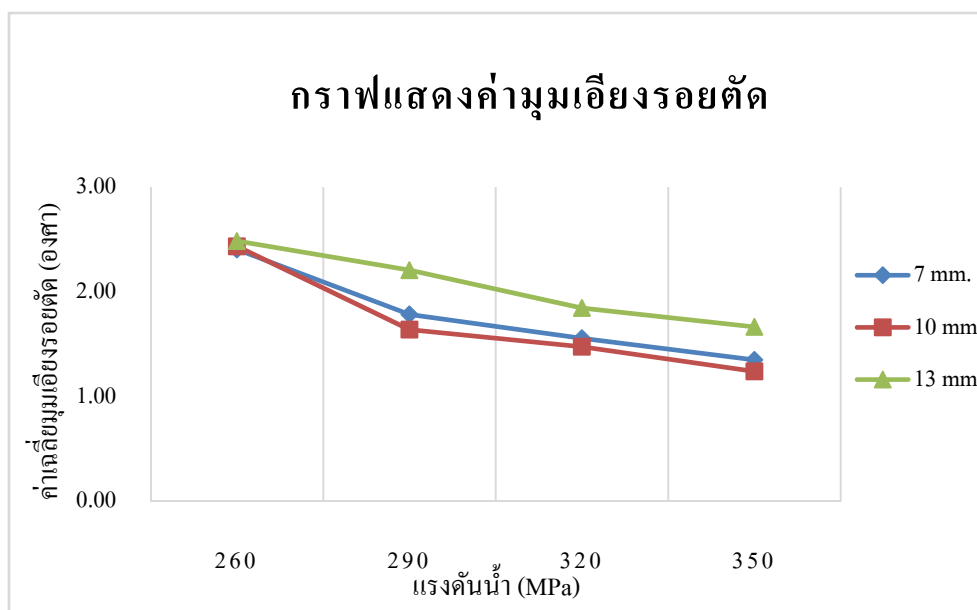
4.7 และรูปที่ 4.8 แล้วทำการถ่ายรูป ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Dino-Lite Digital Microscope) แล้วนำรูปที่ได้มาวัดมุมเอียงรอยตัดด้วยโปรแกรม Dino- Lite Premier แล้ววัดค่าที่ได้ออกมาได้ค่าแสดงในตารางภาพผนวกที่ก.13-ก.24



รูปที่ 4.7 แสดงภาพใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier มาวัดมุมเอียงของชิ้นงานด้านบน



รูปที่ 4.8 แสดงภาพใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier มาวัดมุมเอียงของชิ้นงานด้านล่าง



รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320 และ 350 MPa จะเห็นได้ว่าค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยของแต่ละความหนา มีแนวโน้มลดลงจากแรงดันน้ำที่ต่ำ ไปยังแรงดันน้ำที่สูง หรือเมื่อแรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260 MPa ก็จะแสดงแนวโน้มของค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยที่สูงในแต่ละสถานะของความหนา แต่เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำจนถึงสถานะแรงดันน้ำที่ 350 MPa ค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงในแต่ละสถานะความหนา และพบอีกได้ว่าค่ามุมเอียงรอยตัดที่ลดลงกับแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น อาจเกิดจากเมื่อสถานะแรงดันน้ำที่ต่ำ ลำน้ำที่พุ่งออกมาจากท่อแรงดันน้ำภายใต้ลำน้ำที่พุ่งออกมานั้น ก็จะเกิดลักษณะการบานตัวในอัตราที่สูง จึงเกิดมุมเอียงรอยตัดในแนวโน้มที่สูงขึ้นที่สถานะแรงดันที่ต่ำ 260 MPa แต่เมื่อสถานะแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นที่ 350 MPa ลำน้ำที่พุ่งออกมาจากท่อแรงดันน้ำภายใต้ลำน้ำที่พุ่งออกมานั้น จะเกิดการบานตัวของลำน้ำที่พุ่งออกมาในขณะตัดเดือนโลหะในทิศทางบานตัวค่อนข้างน้อยลง จึงทำให้แนวโน้มของมุมเอียงรอยตัดน้อยลงตามสถานะแรงดันน้ำที่อัตราสูงขึ้น (M.Hashish, 1988) ดังนั้นจากกราฟการทดลองนี้จะพบอีกว่าความหนาของชิ้นงานที่ 10 mm. กับแรงดันน้ำที่ 350 MPa จะแสดงค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยที่น้อยสุด เท่ากับ 1.24 องศา

4.3.1 วิเคราะห์ผลการดำเนินงานการวัดค่ามุมเอียงรอยตัด

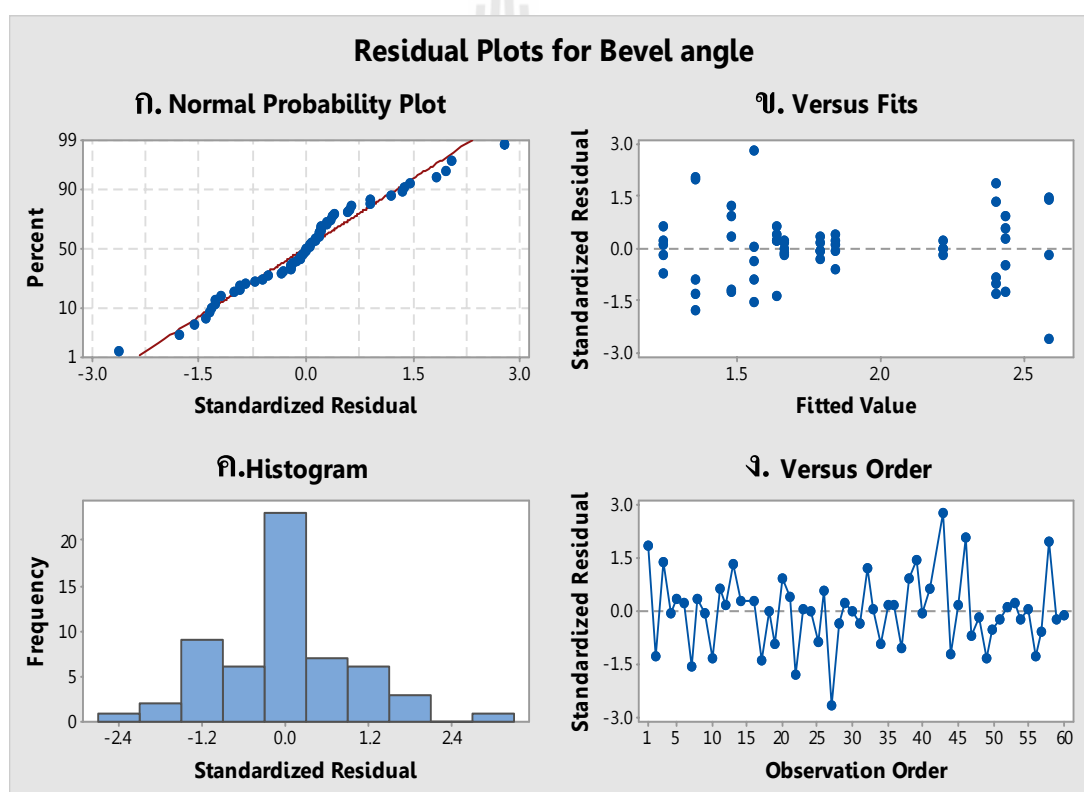
จากผลการ

ทดลองในตารางภาคผนวกที่ ก.13-ก.24 แสดงค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดแผ่นอะลูมินา

เซรามิกที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) เนื่องมาจากการวิจัยการทดลอง (Experimental research) โดยเฉพาะอย่างยิ่งทดลองกับกลุ่มเล็ก ๆ ควรใช้ระดับแอลฟาเป็น 0.01 หรือ 0.001 ส่วนในการวิจัยภาคสนามหรือเชิงสำรวจ (Field studies and surveys) นิยมใช้เป็น 0.05 (Kohout, 1974 : 306) ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้นนี้ จะใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab 17 Free Trial มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองซึ่งผลการตรวจสอบสามารถแสดงดังนี้



รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.10 กราฟที่ 4.10.ก กราฟ Normal Probability แสดงการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของ Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ กราฟที่ 4.10.ข ฮิสโตแกรมมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ หรือค่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติเหมือนกราฟแรก กราฟที่ 4.10.ค และกราฟที่ 4.10.

งแสดงการกระจายตัวของ Residual ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Residual มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าข้อมูลของตัวอย่างการทดลองมีกระจายตัวเป็นแบบปกติ สามารถนำมาวิเคราะห์ผลในขั้นต่อไปได้

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	AdjMS	F-Value	P-Value
Model	11	10.5941	0.96310	13.19	0.000
Linear	5	10.1608	2.03217	27.82	0.000
Water pressure	3	8.9750	2.99167	40.96	0.000
Thickness	2	1.4948	0.74738	10.23	0.000
2-Way Interactions	6	0.2140	0.03567	0.49	0.814
Water pressure*Thickness	6	0.2140	0.03567	0.49	0.814
Error	46	3.3596	0.07303		
Total	57	13.9537			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.270249	75.92%	70.17%	61.44%

รูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ห้มุมเอียงรอยตัดของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Minitab 17 Free Trial

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงานเพื่อศึกษาหาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นเซรามิกกับความหนาของแผ่นเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) โดยใช้โปรแกรม Minitab 17 Free Trial พบว่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองตัดความหนาของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองตัดมีค่า P-Value = 0.000 ซึ่งค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ แสดงว่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองตัดและความหนาของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองตัดมีอิทธิพลต่อค่ามุมเอียงรอยของชิ้นงาน แต่ค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานมีค่า P-Value = 0.814 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานไม่มีอิทธิพลต่อค่ามุมเอียงรอยของชิ้นงานนั่นเอง

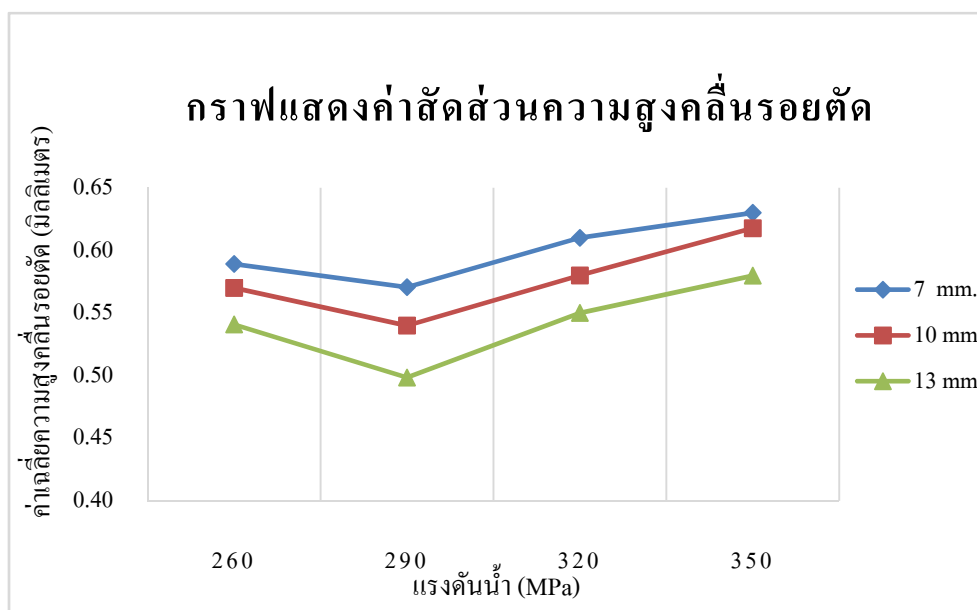
ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบและกราฟแสดงค่ามุมเอียงรอยตัดของชิ้นงานจะเห็นได้ว่า ที่ความหนาของชิ้นงานที่ 10 mm. กับแรงดันน้ำที่ 350 MPa จะแสดงค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยที่น้อยที่สุด เท่ากับ 1.24 องศาแสดงดังรูปที่ 4.9

4.4 ผลการเก็บบันทึกข้อมูลค่าความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงาน

ขั้นตอนการวัดค่าความสูงคลื่นรอยตัดนั้นจะเริ่มจากการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Dino-Lite Digital Microscope) ถ่ายภาพความสูงคลื่นรอยตัดและใช้โปรแกรม Dino-Lite Premier วัดความสูงคลื่นรอยตัด โดยจะทำการวัดทั้งหมด 4 ด้านแสดงดังรูป 4.12 ซึ่งจะนำค่าที่ได้บันทึกลงในตารางการเก็บข้อมูล แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ก.25-ก.36 และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ในการหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสูงคลื่นรอยตัด โดยการทดลองนี้จะใช้ชิ้นงานทั้งหมด 60 ชิ้น



รูปที่ 4.12 แสดงรูปการวัดความสูงคลื่นรอยตัด



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงาน

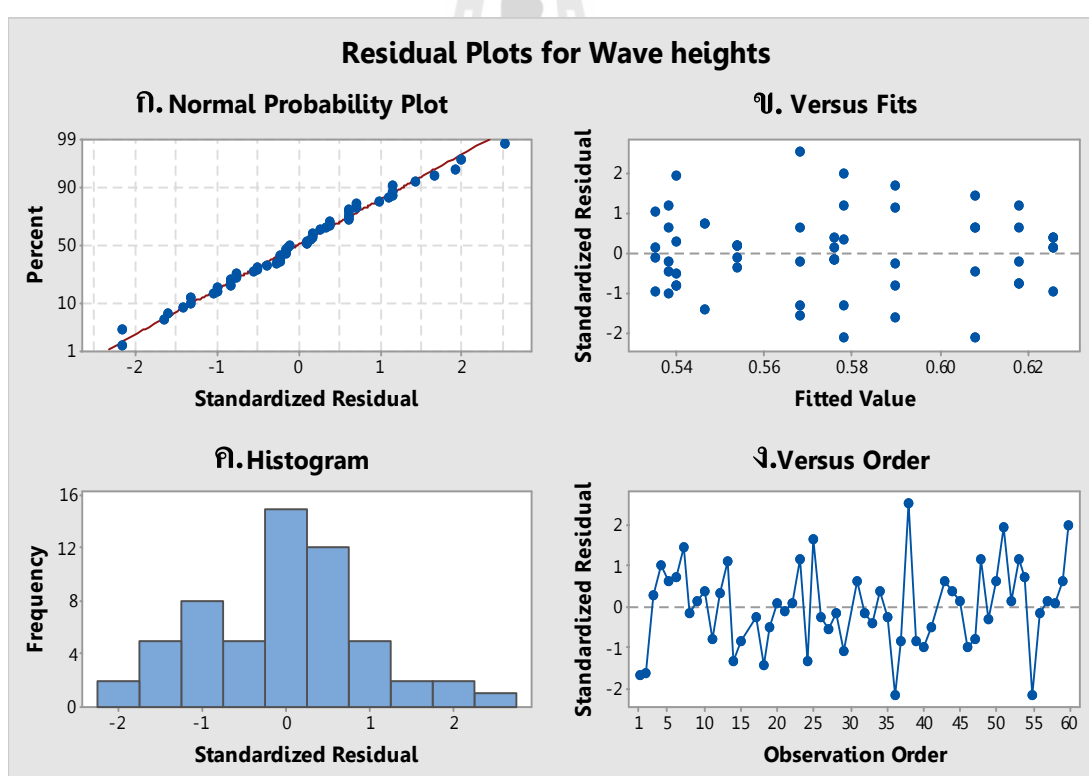
จากรูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320 และ 350 MPa จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยของในแต่ละสถานะความหนามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลงในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน จะสังเกตได้ว่าในสถานะแรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260 MPa ค่าเฉลี่ยสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดชิ้นงานในแต่ละสถานะความหนาของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน จนกระทั่งสถานะแรงดันน้ำที่ 350 MPa มีแนวโน้มค่าเฉลี่ยสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในแต่ละสถานะความหนาของชิ้นงานในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันและพบอีกได้ว่าค่าเฉลี่ยสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นอาจเกิดจากผลกระทบของแรงเหวี่ยงของอนุภาคที่เกิดจากแรงจลน์ (Yield Point) ภายในลำน้ำที่พุ่งออกมาในขณะตัดเฉือนโลหะจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเป็นรากฐานของสาเหตุหลักและอาจรวมไปถึงการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ทำให้เกิดเป็นลักษณะความสูงของคลื่นรอยตัดซึ่งความสูงของคลื่นรอยตัดอาจเกิดจากความพรุนของแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกประเภทหล่อขึ้นรูป (Casting) ที่มีความพรุนมากกว่าแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกประเภทอัดขึ้นรูป (Pressing) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดคลื่นรอยตัดที่ประมาณที่สูง (M.Hashish, 1988) จากกราฟยังแสดงให้เห็นอีกว่าที่สถานะความหนาของชิ้นงานที่ 13 mm. กับสถานะแรงดันน้ำที่ 290 MPa จะแสดงค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดเฉลี่ยที่น้อยสุดเท่ากับ 0.50 mm.

4.4.1 วิเคราะห์ผลการดำเนินงานการวัดค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัด

จากผลการทดลองในตารางภาคผนวกที่ ก.25-ก.36 แสดงค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงานเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) เนื่องมาจากการวิจัยการทดลอง (Experimental research) โดยเฉพาะอย่างยิ่งทดลองกับกลุ่มเล็ก ๆ ควรใช้ระดับแอลฟาเป็น 0.01 หรือ 0.001 ส่วนในการวิจัยภาคสนามหรือเชิงสำรวจ (Field studies and surveys) นิยมใช้เป็น 0.05 (Kohout. 1974 : 306) ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้นนี้ จะใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab 17 Free Trial มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

4.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองซึ่งผลการตรวจสอบสามารถแสดงดังนี้



รูปที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.14 กราฟที่ 4.14.ก กราฟ Normal Probability แสดงการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของ Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ กราฟที่ 4.14.ข ฮิสโตแกรมมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ หรือค่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติเหมือนกราฟแรก กราฟที่ 4.14.คและกราฟที่ 4.14.ง แสดงการกระจายตัวของ Residual ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Residual มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าข้อมูลของตัวอย่างการทดลองมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ สามารถนำมาวิเคราะห์ผลในขั้นต่อไปได้

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	AdjMS	F-Value	P-Value
Model	11	0.053094	0.004827	2.96	0.005
Linear	5	0.040728	0.008146	5.00	0.001
Water pressure	3	0.031340	0.010447	6.41	0.001
Thickness	2	0.011093	0.005547	3.40	0.042
2-Way Interactions	6	0.006251	0.001042	0.64	0.698
Water pressure*Thickness	6	0.006251	0.001042	0.64	0.698
Error	45	0.073327	0.001629		
Total	56	0.126421			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.0403668	42.00%	27.82%	7.17%	

รูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Minitab 17 Free Trial

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงานเพื่อศึกษาหาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นเซรามิกกับความหนาของแผ่นเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูงโดยใช้โปรแกรม Minitab 17 Free Trial พบว่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองตัดมีค่า P-Value = 0.001 และความหนาของชิ้นงานมีค่า P-Value = 0.042 ซึ่งค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ แสดงว่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดลองตัดและความหนาของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองตัดมีอิทธิพลต่อสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงานแต่ค่า

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชั้นงานมีค่า P-Value = 0.698 ซึ่งค่า P-Value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ก็แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชั้นงานไม่มีอิทธิพลต่อสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชั้นงานนั่นเอง

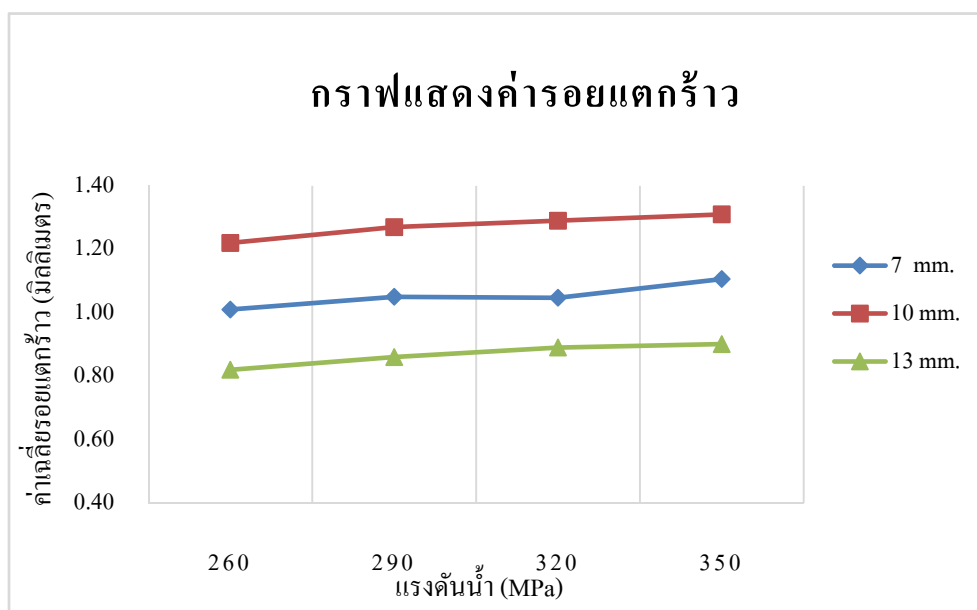
ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบและกราฟแสดงค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชั้นงานจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของชั้นงานที่ 13 mm. กับสภาวะแรงดันน้ำที่ 290 MPa จะแสดงสัดส่วนค่าความสูงคลื่นรอยตัดเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 0.50 mm.แสดงดังรูปที่ 4.13

4.5 ผลการเก็บบันทึกข้อมูลการรอยแตกร้าวของชั้นงาน

ขั้นตอนการวัดการรอยแตกร้าวของชั้นงาน นั้นจะเริ่มจากการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Dino-Lite Digital Microscope) ถ่ายภาพรอยแตกร้าวและใช้โปรแกรม Dino- Lite Premier วัดรอยแตกร้าวของชั้นงาน โดยจะทำการวัดทั้งหมด 4 ด้าน แสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งจะนำค่าที่ได้บันทึกลงในตารางการเก็บข้อมูล แสดงดังตารางภาคผนวกที่ก.37-ก.48 เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ในการหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการรอยแตกร้าว โดยการทดลองนี้จะใช้ชั้นงานทั้งหมด 60 ชิ้น



รูปที่ 4.16 แสดงรูปตัวอย่างการวัดรอยแตกร้าวของชั้นงาน



รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน

จากรูป 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงาน ที่แรงดันน้ำเริ่มต้นที่ 260, 290, 320 และ 350 MPa จะเห็นได้เมื่อทำการพิจารณาความหนาของชิ้นงานในแต่ละระดับของแรงดันน้ำพบว่า ชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า จะเกิดค่ารอยแตกร้าวเฉลี่ยที่สูงกว่า ชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า และเมื่อพิจารณาระดับแรงดันน้ำที่แตกต่างกันจะพบว่า เมื่อแรงดันน้ำที่สูงขึ้นจะเกิดอัตรารอยแตกร้าวเฉลี่ยที่สูงขึ้นทุกสภาวะความหนาของชิ้นงานหรือเมื่อแรงดันน้ำที่ 260 MPa ค่าเฉลี่ยของรอยแตกร้าวจะมีแนวโน้มที่ต่ำแต่เมื่อเพิ่มอัตราแรงดันน้ำขึ้นถึง 350 MPa จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันน้ำมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยและพบอีกได้ว่าค่ารอยแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นอาจเกิดจากผลกระทบของแรงเหวี่ยงของอนุภาคที่เกิดจากแรงจุดคราก (Yield Point) ภายในลำน้ำที่พุ่งออกมาในขณะที่ตัดเฉือนโลหะจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเป็นรากฐานของสาเหตุหลักรวมไปถึงการเคลื่อนตัวของวัสดุที่ทำให้เกิดรอยร้าวแพร่กระจายภายใต้พื้นผิว (M.Hashish, 1988) จากกราฟยังแสดงให้เห็นอีกว่าที่สภาวะความหนาของชิ้นงานที่ 13 mm. กับสภาวะแรงดันน้ำที่ 260 MPa จะแสดงค่ารอยแตกร้าวเฉลี่ยที่น้อยสุด เท่ากับ 0.82 mm.

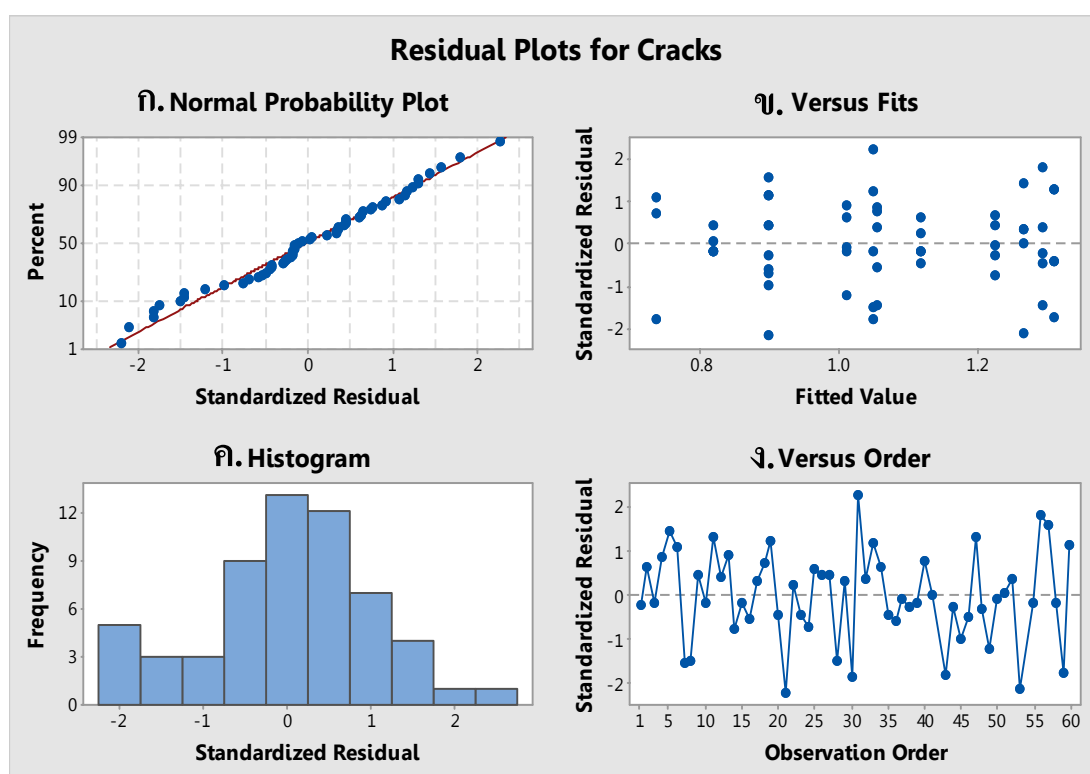
4.5.1 วิเคราะห์ผลการดำเนินงานการวัดค่ารอยแตกร้าวรอยตัด

จากผลการทดลองในตารางภาคผนวกที่ ก.37-ก.48 แสดงค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของชิ้นงานเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดแผ่นอะลูมิเนียมเซรามิกที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) เนื่องมาจากการวิจัยการทดลอง (Experimental research) โดยเฉพาะอย่างยิ่งทดลองกับกลุ่มเล็ก ๆ ควรใช้ระดับแอลฟาเป็น

0.01 หรือ 0.001 ส่วนในการวิจัยภาคสนามหรือเชิงสำรวจ (Field studies and surveys) นิยมใช้เป็น 0.05 (Kohout. 1974 : 306) ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้นนี้ จะใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab 17 Free Trial มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

4.5.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองซึ่งผลการตรวจสอบสามารถแสดงดังนี้



รูปที่ 4.18แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่ารอยแตกร้าวรอยตัดของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.18กราฟที่ 4.18.ก กราฟ Normal Probability แสดงการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของ Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ กราฟที่ 4.18.ข ฮิสโตแกรมมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ หรือค่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติเหมือนกราฟแรก กราฟที่ 4.18.คและกราฟที่ 4.18.งแสดงการกระจายตัวของ Residual ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมี

ความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Residual มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าข้อมูลของตัวอย่างการทดลองมีกระจายตัวเป็นแบบปกติ สามารถนำมาวิเคราะห์ผลในขั้นต่อไปได้

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	AdjMS	F-Value	P-Value
Model	11	1.85609	0.168736	14.11	0.000
Linear	5	1.84958	0.369915	30.92	0.000
Water pressure	3	0.09036	0.030121	2.52	0.070
Thickness	2	1.78316	0.891582	74.53	0.000
2-Way Interactions	6	0.03799	0.006332	0.53	0.783
Water pressure*Thickness	6	0.03799	0.006332	0.53	0.783
Error	46	0.55027	0.011962		
Total	57	2.40636			

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
0.109372	77.13%	71.66%	63.11%	

รูปที่ 4.19 แสดงผลการวิเคราะห์การอยแตกร้าวรอยตัดของชิ้นงานด้วยโปรแกรม

Minitab 17 Free Trial

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของการอยแตกร้าวรอยตัดของชิ้นงานเพื่อศึกษาหาปัจจัยของแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นเซรามิกกับความหนาของแผ่นเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูงโดยใช้โปรแกรม Minitab 17 Free Trial พบว่าค่าความหนาของชิ้นงานมีค่า P-Value = 0.000 ซึ่งค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ แสดงว่าความหนาของชิ้นงานมีอิทธิพลต่อการอยแตกร้าวรอยตัดของชิ้นงานแต่ค่าแรงดันน้ำค่า P-Value = 0.070 และค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานมีค่า P-Value = 0.783 ซึ่งมีค่า P-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ก็แสดงว่าแรงดันน้ำและปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานไม่มีอิทธิพลต่อการอยแตกร้าวรอยตัดของชิ้นงานนั่นเอง

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบและกราฟแสดงการอยแตกร้าวรอยตัดของชิ้นงานจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของชิ้นงานที่ 13 mm. กับสภาวะแรงดันน้ำที่ 260 MPa จะแสดงการอยแตกร้าวเฉลี่ยที่น้อยสุด เท่ากับ 0.82 mm.แสดงดังรูปที่ 4.17

บทที่ 5

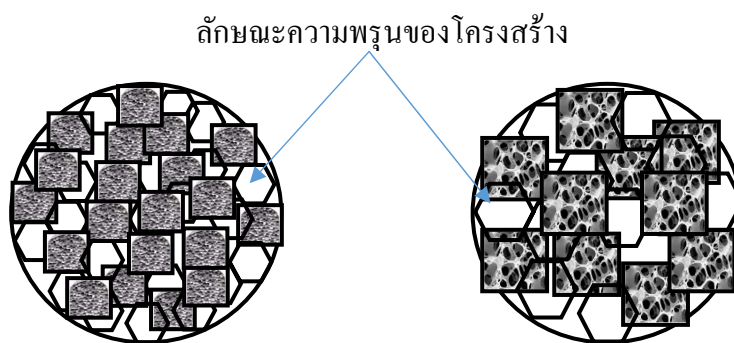
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงสรุปผลการทดลอง

แรงดันน้ำ (MPa)	260			290			320			350		
ความหนา (mm.)	7	10	13	7	10	13	7	10	13	7	10	13
ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว ($\mu\text{m.}$)	20.63	22.06	24.51	20.91	24.22	25.93	21.28	24.83	26.63	25.50	27.96	29.02
ค่าเฉลี่ยมุมเอียงรอยตัด (degree)	2.40	2.44	2.49	1.79	1.64	2.21	1.56	1.48	1.85	1.35	1.24	1.67
ค่าเฉลี่ยสัดส่วนความ สูงคลื่นรอยตัด(mm.)	0.59	0.57	0.54	0.57	0.54	0.50	0.61	0.58	0.55	0.63	0.62	0.58
ค่าเฉลี่ยรอยแตกร้าว (mm.)	1.01	1.22	0.82	1.05	1.27	0.86	1.05	1.29	0.89	1.11	1.31	0.90

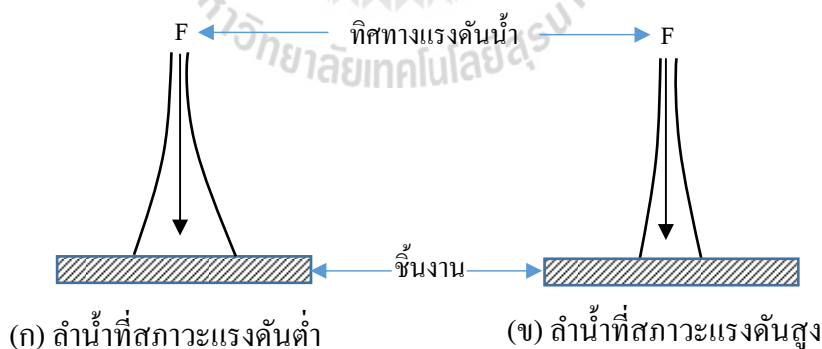
5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่ความหนา 7 mm. ด้วยแรงดันน้ำที่ 260 MPaก่อให้เกิดค่าความหยาบผิวรอยตัดที่เรียบสุดค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นอาจเกิดจากผลกระทบของแรงเหวี่ยงของอนุภาคที่เกิดจากแรงจุดคราก (Yield Point) ภายในลำน้ำที่พุ่งออกมาในขณะตัดเฉือนโลหะจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเป็นรากฐานของสาเหตุหลักและอาจรวมไปถึงการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ทำให้เกิดเป็นลักษณะคลื่นรอยตัด ซึ่งคลื่นรอยตัดอาจเกิดจากความพรุนของแผ่นอะลูมินาเซรามิกประเภทหล่อขึ้นรูป (Casting) ที่มีความพรุนมากกว่าแผ่นอะลูมินาเซรามิกประเภทอัดขึ้นรูป (Pressing) แสดงดังรูปที่ 5.1 จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดคลื่นรอยตัดที่ประมาณที่สูงซึ่งเป็นไปตามหลักการของ(M.Hashish, 1988)



(ก) โครงสร้างภายในการอัดขึ้นรูป (ข) โครงสร้างภายในการหล่อขึ้นรูป

รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะความพรุนของโครงสร้างแผ่นอะลูมินาเซรามิก

5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมเอียงรอยตัดของการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่มีความหนา 10 mm. ด้วยแรงดันน้ำที่ 350 MPa ก่อให้เกิดค่ามุมเอียงรอยตัดที่ดีที่สุด ค่ามุมเอียงรอยตัดที่ลดลงกับแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นอาจเกิดจากเมื่อสภาวะแรงดันน้ำที่ต่ำ ลำน้ำที่พุ่งออกมาจากท่อแรงดันน้ำภายใต้ลำน้ำที่พุ่งออกมานั้นก็จะเกิดลักษณะการบานตัวในอัตราที่สูงจึงเกิดมุมเอียงรอยตัดในแนวโน้มที่สูงขึ้นที่สภาวะแรงดันที่ต่ำ 260 MPa แต่เมื่อสภาวะแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นที่ 350 MPa ลำน้ำที่พุ่งออกมาจากท่อแรงดันน้ำภายใต้ลำน้ำที่พุ่งออกมานั้นแสดงดังรูปที่ 5.2 จะเกิดการบานตัวของลำน้ำที่พุ่งออกมาในขณะที่ตัดเฉือนโลหะในทิศทางบานตัวค่อนข้างน้อยลงจึงทำให้แนวโน้มของมุมเอียงรอยตัดน้อยลงตามสภาวะแรงดันน้ำที่อัตราสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามหลักการของ (M.Hashish, 1988)



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะลำน้ำที่พุ่งออกมาขณะตัดเฉือนชิ้นงาน

5.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดของการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่มีความหนา 13 mm. ด้วยแรงดันน้ำที่ 290 MPa ก่อให้เกิดค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดที่ดีที่สุดค่าเฉลี่ยสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นอาจเกิดจากผลกระทบของแรงเหวี่ยงของอนุภาคที่เกิดจากแรงจุดคราก (Yield Point) ภายในลำน้ำที่พุ่งออกมาในขณะที่ตัด

เลื่อนโลหะจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเป็นรากฐานของสาเหตุหลักและอาจรวมไปถึงการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ทำให้เกิดเป็นลักษณะความสูงของคลื่นรอยตัดซึ่งความสูงของคลื่นรอยตัดอาจเกิดจากความพรุนของแผ่นอะลูมินาเซรามิกประเภทหล่อขึ้นรูป (Casting) ที่มีความพรุนมากกว่าแผ่นอะลูมินาเซรามิกประเภทอัดขึ้นรูป (Pressing) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดคลื่นรอยตัดที่ประมาณที่สูงซึ่งเป็นไปตามหลักการของ (M.Hashish, 1988)

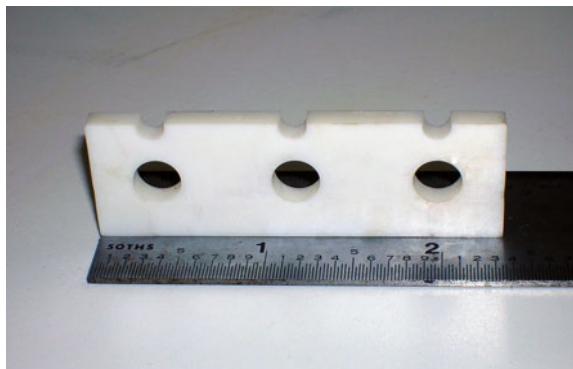
5.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่ารอยแตกกว้างของการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่มีความหนา 13 mm. ด้วยแรงดันน้ำที่ 260 MPaก่อให้เกิดค่ารอยแตกกว้างที่ดีที่สุดค่ารอยแตกกว้างที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นนี้อาจเกิดจากผลกระทบของแรงเหวี่ยงของอนุภาคที่เกิดจากแรงจุดคราก(Yield Point) ภายในลำน้ำที่พุ่งออกมาในขณะที่ตัดแผ่นโลหะจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเป็นรากฐานของสาเหตุหลัก รวมไปถึงการเคลื่อนตัวของวัสดุที่ทำให้เกิดรอยร้าวแพร่กระจายภายใต้พื้นผิวซึ่งเป็นไปตามหลักการของ (M.Hashish, 1988)

5.2 ประโยชน์ที่จะได้รับ

5.2.1 สามารถนำวิธีการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกในการทดลองนี้ ไปประยุกต์ใช้ผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 5.1 ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากการผลิตแผ่นรองแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้น ต้องใช้ความซับซ้อนในการตัด

5.2.2 สามารถนำวิธีการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกในการทดลองนี้ ไปประยุกต์ใช้ผลิตแผ่นอะลูมินาเซรามิกสำหรับแผ่นรองเตา แสดงดังรูปที่ 5.2 ในภาคอุตสาหกรรมเตาเผาหรือเตาหลอมอุณหภูมิสูง

5.2.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเป็นแนวทางในการเลือกตัดวัสดุที่มีความใกล้เคียงกับแผ่นอะลูมินาเซรามิกชนิดหล่อขึ้นรูป ด้วยเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงในระดับแรงดันต่างๆให้เหมาะสม



รูปที่ 5.3 แผ่นรองแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ที่มา : <http://www.waterjetwest.com>



รูปที่ 5.4 Alumina Setter/ Plate for High Temperature Furnaces

ที่มา : <http://www.kroem.com/products.php>

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการทดลองตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิก ควรศึกษาระยะความสูงของหัวตัดกับชิ้นงานเพิ่มเติม เนื่องจากระยะความสูงของหัวตัดมีผลต่อค่าความหยาบผิวของแผ่นอะลูมินาเซรามิก

5.3.2 ควรศึกษาแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิก เนื่องจากแรงดันน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกสูงสุดของการทดลองนี้อยู่ที่ 350MPa นั้น จะสังเกตได้ว่าแนวโน้มของค่ามุมเอียงรอยตัดลดลงจากการเพิ่มแรงดันที่สูงขึ้นตามลำดับ

5.3.3 ความเร็วที่เลือกใช้ในการทดลองตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกครั้งนี้ จะสังเกตได้ว่า สภาพพื้นผิวที่เกิดขึ้นหลังจากการทดลองตัด มีแนวคลื่นรอยตัดเป็นเส้นโค้งแสดงดังภาพผนวกรูป ค.1 นั้น อาจเกิดจากความเร็วที่ใช้ในการตัดสูงเกินไป จึงเป็นสาเหตุสภาพพื้นผิว ดังภาพผนวกรูป ค.1 ดังนั้น ควรปรับความเร็วที่ใช้ในการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิกในการศึกษาการตัดแผ่นอะลูมินาเซรามิก

รายการอ้างอิง

การทำงานของหัวตัดWater jet. [Online]. Available : <http://www.thermal-mech.com/knowledge.php?id=37>

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/mystatistics01/chapter5/2-way-anova>

การวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน. (2557). [Online]. Available: <http://tools-article.sumipol.com/roughness-measurement/>

ก้องเกียรติ พิมพ์ชาติ และมานัส รักสุภาพ. (2556). อิทธิพลความสูงหัวตัดที่มีผลต่อการตัดอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 6063-T6 ด้วยน้ำแรงดันสูง(Water Jet Cutting)ปริญญา
นิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์.

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.[Online]. Available : http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=122

กล้องจุลทรรศน์ USB. [Online]. Available : <http://richmoto.tarad.com/product-th-741372-4346920>

เครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน. [Online]. Available: <http://www.pantavaniij.com/xcart/showroom/showroom.php?company=hollywood&menu=product&productid=17592&cat=2922&page=1>

ความหยาบผิว. [Online]. Available : http://th.misumiec.com/maker/misumi/mech/campaign/email20120206/surface_roughness.html

คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และเทคโนโลยี. (2555). ความหมายของเซรามิกส์. [Online]. Available: <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/Viewbulletin/1340-%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%AB%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%AA%E0%B9%8C?groupid=262>

ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรม.(2535).[Online]. Available : <http://engineerknowledge.blogspot.com/p/blog-page.html>

คชินท์ สายอินทวงศ์. (2553). **เซรามิกCeramic**. [Online]. Available: http://www.thaiceramic.society.com/ab_cer.php

จิราศินันตริและคณะ.(2554).การศึกษาหาพารามิเตอร์สำหรับการตัดแผ่นเกรดJSC 590 Rด้วยเครื่อง
ตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง. ปรินญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรม
ศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์.

ซอฟต์แวร์วิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ Minitap. [Online]. Available : http://www.msit.2005.mut.ac.th/msit_media/2_2550/ITEC2621/Lecture/20071121112658Lq.pdf

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2549). วัสดุวิศวกรรม. บริษัท ส.เอเชียเพรส.

ธีระพงษ์ ดีสาและวัชรินทร์ นริรักษ์.(2556).การศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำที่เหมาะสมในแต่ละ
สถานะการขึ้นรูปวัสดุอะลูมิเนียมเกรด A1100.ปรินญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุต
สาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์.

บรรพต มหาคาม และคณะ.(2551).การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเจาะแบบแรงเสียดทานต่อ
สมบัติงานเจาะอะลูมิเนียมผสม AA 2024.ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต รอง
ศาสตราจารย์ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ระบบเพียวอเตอร์เจ็ต.[Online].Available :http://www.engineerstudent.co.uk/waterjet_cutting.html.

สารขัดทราย (Garnet).[Online]. Available :http://www.alibaba.com/product-detail/XianKe-High-Quality-Garnet-Abrasive-Grit_60056528466.html

ส่วนประกอบของระบบอเตอร์เจ็ต. [Online].Available :<http://www.commonswikimedia.org/wiki/File:Waterjet-cutting-system.jpg>.

สิทธิเดช สายสินและสุทธิพงษ์ ครูห้วย.(2556).การศึกษาสารขัดที่มีผลต่อการตัดวัสดุ
อะลูมิเนียมเกรด 6061 ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยน้ำแรงดันสูง.ปรินญานิพนธ์ สาขาวิชา
วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์.

สายชล สันสมบูรณ์ทอง. (2553).สถิติวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. จามจุรี โปรดักท์: กรุงเทพฯ

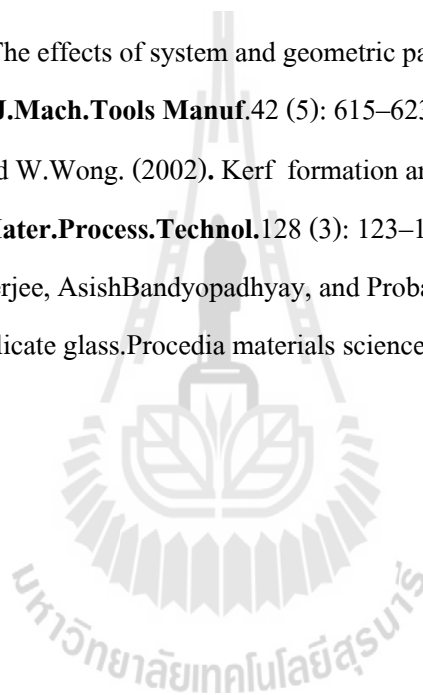
สิริพรรณ นิลโพธิ์. (2535). ดินที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก. [Online]. Available: <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/DECEMBER/radio12-9.htm>

สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล. (2536). การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก. [Online]. Available: <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/July/radio7-1.htm>

อรรณพ ไพบูลย์วัฒนผล.(2555). ทรายเพื่ออุตสาหกรรม.สำนักเทคโนโลยีชุมชน.

- A Division of Omax Corporation. 2009. คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น **MAXIEM Water Jet Model 1530**. กรุงเทพมหานคร.
- A.A.Abdel-Rahman,A.A.Ei-Domiaty, (1998). Maximum depth of cut ceramics using abrasive waterjet technique. **Wear**.218 (1): 216-222.
- DerzijaBegic-Hajdarevic, Ahmet Cekic, MuhamedMehmedovic, and Almina Djelmic. (2014). Experimental study on surface roughness in abrasive waterjet cutting.**Procedia Engineering**. 100(1): 394 – 399.
- D.S. Srinivasu et al. (2009). Influence of kinematic operating parameters on kerf geometry in abrasive waterjet machining of silicon carbide ceramics.**Int.J.Mach.Tools Manuf.** 49 (14): 1077–1088.
- F.L. Chenet al. (2001).The effect of cutting jet variation on striationformation in abrasive water jet cutting. **J. Mater.Process.Technol.**135(1): 1 – 5.
- Gi Sand Choi,Gi Heung. (1996). Process analysis and monitoring in abrasive water jet machining of alumina ceramics.**Int.J.Mach.Tools Manuf.** 37(3): 295-307.
- G. Fowleret al. (2008). The effect of particle hardness and shape whenabrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V.**Wear**.266 (8): 613–620.
- J.Wang, D.M. Guo.(2002). The cutting perperformce in multipass abrasive waterjetmachinning of industrial ceramics.**J. Mater.Process.Technol.** 133 (3): 371–377.
- Jiyue Zeng, Thomas J.kim. (1995). An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting.**Wear**.193 (2): 207-217.
- J.Wang. (2006). Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics.**Int.J.Mach.Sci.** 49 (3): 306–316.
- Kohout, F. J. (1974). **Statistics for Social Scientists: A Co-ordinated Learning System**. New York, John Wiley & Sons.
- L.chen, E.Siores,W.C.K.Wong. (1996). Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials.**J. Mater.Process.Technol.**74 (3): 251–254.
- M.Hashish. (1988). Visualization of the abrasive waterjet cutting process.**Experimental mechanics**. 28 (2): 159-169.M.Hashish, D.E.Steele, and D.H.Bothell. (1996). Machining with super-presure(690) waterjets.**Int.J.Mach.Tools Manuf.** 37 (4): 465-479.

- M.Wakuda, Y.Yamauchi, and S.Kanzaki. (2001). Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials.**Precision engineering**, 26 (3): 193–198.
- Manabu Wakuda, Yukihiro Yamauchi, and Shuzo Kanzaki. (2003). Material response to particle impact during abrasive jet machining of alumina ceramic. **J. Mater.Process.Technol.** 132 (3): 177–183.
- Manabu Wakuda, Yukihiro Yamauchi, and Shuzo Kanzaki. (2002). Surface finishing of alumina ceramics by means of abrasive jet machining.**J. American ceramic society**, 85 (5): 1306–1308.
- M. Nanduriet al. (2002).The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear.**Int.J.Mach.Tools Manuf.**42 (5): 615–623.
- P.Gudimetla, J.Wong, and W.Wong. (2002). Kerf formation analysis in the abrasive waterjet cutting of industrial. **J. Mater.Process.Technol.**128 (3): 123–129.
- UshastaAich, Simul Banerjee, AsishBandyopadhyay, and Probal Kumar Das. (2014). Abrasive waterjet cutting of borosilicate glass.Procedia materials science. 6 (1): 775-785.



ภาคผนวกก

แสดงตารางค่าต่าง ๆ

ตาราง ก.1 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	18.51	15.05*	18.24	18.32	18.88	18.92	18.57	0.68
2	17.57	21.88	16.44	21.45	21.24	23.24	20.30	6.80
3	22.41	22.74	23.12	22.81	22.23	22.35	22.61	0.89
4	24.51	21.03	20.51	21.03	20.29	20.92	21.38	4.22
5	18.09	20.42	20.61	22.01	20.21	24.10*	20.27	3.92
ค่าเฉลี่ย (รวม)							20.63	3.30

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.2 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	19.87	20.20	25.61*	20.98	20.51	19.40	20.19	1.58
2	21.09	21.99	20.76	24.62*	22.99	20.57	21.48	2.42
3	19.34	19.32	20.02	20.56	19.21	20.37	19.80	1.35
4	22.03	20.41	21.08	20.91	21.35	20.62	21.07	1.62
5	21.20	24.74	22.23	21.16	21.31	21.51	22.02	3.58
ค่าเฉลี่ย (รวม)							20.91	2.11

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.3 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	21.87	20.65	22.13	21.01	21.29	21.03	21.33	1.48
2	20.98	19.64	20.52	21.34	21.50	21.18	20.86	1.87
3	22.13	20.99	19.53	22.20	21.32	21.26	21.24	2.67
4	21.20	21.30	25.05*	21.22	19.85	24.19*	20.89	1.45
5	22.61	22.69	21.31	21.98	21.94	22.05	22.10	1.38
ค่าเฉลี่ย (รวม)							21.28	1.77

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.4 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	27.23	24.51	25.67	23.98	25.01	25.99	25.40	3.25
2	28.09	29.04	28.87	28.33	28.21	25.45	28.00	3.59
3	23.09	25.69	25.61	28.02*	27.51*	21.01	23.85	4.68
4	25.03	23.65	25.02	26.40	25.62	25.62	25.22	2.76
5	24.17	24.91	25.45	24.61	25.92	25.05	25.02	1.76
ค่าเฉลี่ย (รวม)							25.50	3.20

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.5 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 260 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	23.90	20.34	21.03	22.62	19.37	21.98	21.54	4.53
2	23.01	23.75	24.56	26.93	18.25	22.44	23.16	8.68
3	21.76	27.17	20.39	22.46	21.43	24.89	23.01	6.79
4	20.41	20.89	22.05	21.86	20.80	25.92	21.99	5.51
5	17.16	19.34	22.74	19.94	22.96	21.43	20.59	5.80
ค่าเฉลี่ย (รวม)							22.06	6.26

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.6 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 290 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	26.22	27.14	26.57	23.05	20.72	22.19	24.32	6.42
2	21.45	25.05	20.60	25.20	23.38	22.42	23.02	4.60
3	25.40	22.39	20.36	28.44	21.50	25.75	23.97	8.08
4	20.32	24.73	24.05	27.32	22.71	22.32	23.58	7.00
5	25.61	24.56	27.53	27.81	25.54	29.54*	26.21	3.25
ค่าเฉลี่ย (รวม)							24.22	5.87

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.7 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	27.16	23.34	25.90	27.51	20.20	26.69	25.13	7.31
2	25.06	22.62	29.87*	23.70	22.47	28.62	24.49	6.15
3	23.34	23.93	23.71	23.51	24.33	25.46	24.05	2.13
4	25.13	24.11	23.05	27.13	21.75	23.91	24.18	5.38
5	24.27	25.21	23.08	28.98	26.40	29.84	26.30	6.76
ค่าเฉลี่ย (รวม)							24.83	5.55

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.8 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	27.62	28.34	29.43	26.81	28.40	31.01*	28.12	2.62
2	30.25	31.78	36.01*	30.59	25.09	22.89	28.12	8.88
3	28.01	25.69	35.73	25.66	24.61	25.19	27.48	11.12
4	28.01	29.56	28.66	28.91	28.46	28.20	28.63	1.55
5	26.51	27.73	27.70	27.34	27.59	27.75	27.44	1.24
ค่าเฉลี่ย (รวม)							27.96	5.08

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.9 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 260 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	31.22*	25.93	25.86	24.25	26.81	29.78	26.53	5.53
2	24.66	21.78	23.35	20.69	22.13	29.22	23.64	8.53
3	22.99	21.64	25.38	20.48	26.46	29.19	24.35	8.71
4	22.76	23.98	22.77	26.97	23.41	24.61	24.08	4.21
5	20.53	21.32	28.31	26.48	18.29*	23.06	23.94	7.78
ค่าเฉลี่ย (รวม)							24.51	6.95

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.10 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 290 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	20.63	22.03	29.75	33.01*	23.32	22.70	23.68	9.13
2	24.42	26.22	29.19	32.57	26.65	34.79	28.97	10.37
3	30.99	26.29	27.02	27.56	26.72	25.71	27.38	5.28
4	22.02	21.56	18.47	23.64	19.50	17.50	20.45	6.14
5	28.82	28.26	27.99	33.77	28.24	28.03	29.18	5.79
ค่าเฉลี่ย (รวม)							25.93	7.34

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.11 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	27.09	26.62	30.05	29.60	25.96	22.61	26.99	7.44
2	27.73	27.56	28.88	28.59	26.61	26.13	27.58	2.75
3	26.58	25.80	27.42	31.77	21.03	28.70	26.88	10.74
4	24.62	23.57	34.43	24.83	23.48	28.07	26.50	10.95
5	22.82	24.61	28.61	24.56	26.10	24.62	25.22	5.79
ค่าเฉลี่ย (รวม)							26.63	7.54

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตารางก.12 การเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวที่ความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	ความหยาบผิว (Ra) (ไมโครเมตร)							
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	33.97	26.80	27.09	30.51	29.97	29.09	29.57	7.17
2	29.21	31.42	33.65*	30.77	23.73	30.52	29.13	7.69
3	26.27	27.30	25.98	27.93	32.90	26.35	27.79	6.92
4	25.98	31.99	26.89	31.29	29.53	26.09	28.63	6.01
5	29.56	31.68	30.45	29.03	29.89	29.14	29.96	2.65
ค่าเฉลี่ย (รวม)							29.02	6.09

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตาราง ก.13 การเก็บข้อมูลมุมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	93.21	92.34	93.01	94.15*	3.21	2.34	3.01	4.15*	2.85	0.87
2	92.83	92.96	92.40	92.71	2.83	2.96	2.40	2.71	2.73	0.56
3	93.29*	92.56	91.81	92.24	3.29*	2.56	1.81	2.24	2.20	0.75
4	92.27	92.35	92.12	91.91	2.27	2.35	2.12	1.91	2.16	0.44
5	92.13	92.03	92.58	91.58	2.13	2.03	2.58	1.58	2.08	1.00
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				2.40	0.72

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตาราง ก.14 การเก็บข้อมูลมุมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	90.12	89.64	93.16*	90.33	2.23	1.33	3.16*	1.74	1.77	0.90
2	87.90	91.82	91.62	91.90	2.10	1.82	1.62	1.90	1.86	0.48
3	88.59	91.41	94.10	88.86	1.41	1.41	2.37	1.66	1.71	0.96
4	87.46	91.45	92.07	88.52	2.08	1.45	2.07	1.48	1.77	0.63
5	88.47	91.44	93.13	91.04	1.53	1.63	2.57	1.54	1.82	1.04
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				1.79	0.80

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตาราง ก.15 การเก็บข้อมูลมุมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	91.03	92.80 *	88.49	91.01	1.03	2.80 *	1.51	1.01	1.18	0.50
2	89.03	92.20	91.32	90.82	0.97	2.20	1.32	0.82	1.33	1.38
3	91.47	88.76	88.13	91.30	1.47	1.24	1.87	1.30	1.47	0.63
4	88.39	92.84	87.68	87.85	1.61	2.84	2.32	2.15	2.23	1.23
5	92.98 *	87.99	88.82	91.53	2.98 *	2.01	1.18	1.53	1.57	0.83
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				1.56	0.91

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตาราง ก.16 การเก็บข้อมูลมุมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	90.38	90.50	91.03	89.74	1.03	0.50	1.03	1.56	1.03	1.06
2	89.07	89.58	90.92	88.60	0.93	0.42	0.92	1.40	0.92	0.98
3	89.13	88.65	90.92	90.69	0.87	1.35	0.92	1.38	1.13	0.51
4	88.82	94.31 *	93.31	91.06	1.18	4.31 *	3.31	1.06	1.85	2.25
5	87.90	92.34	91.56	91.32	2.10	2.34	1.56	1.32	1.83	1.02
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				1.35	1.16

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตาราง ก.17การเก็บข้อมูลมุมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่260MPa

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	91.96	92.13	92.14	92.29	1.96	2.13	2.14	2.29	2.13	0.33
2	91.99	92.55	92.74	92.74	1.99	2.55	2.74	2.74	2.51	0.75
3	92.98	92.41	92.89	92.04	2.98	2.41	2.89	2.04	2.58	0.94
4	93.11	92.03	92.56	92.94	3.11	2.03	2.56	2.94	2.66	1.08
5	93.01	92.12	92.13	91.98	3.01	2.12	2.13	1.98	2.31	1.03
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				2.44	0.83

ตาราง ก.18การเก็บข้อมูลมุมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 290MPa

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	91.32	91.79	91.66	92.15	1.32	1.79	1.66	2.15	1.73	0.83
2	90.73	91.87	91.35	91.25	0.73	1.87	1.35	1.25	1.30	1.14
3	91.09	88.93	87.70	92.30	1.09	1.07	2.30	2.30	1.69	1.23
4	88.92	92.86	88.21	91.44	1.08	2.86	1.79	1.44	1.79	1.78
5	87.98	92.40	88.64	89.02	2.02	2.40	1.36	0.98	1.69	1.42
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				1.64	1.28

ตาราง ก.19การเก็บข้อมูลมูมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 320MPa

ชั้นที่	ค่ามูมที่วัด (องศา)				มูมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มูมเอียงบน = $ 90-(A) $		มูมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มูมซ้าย	มูมขวา	มูมซ้าย	มูมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	91.11	92.25	91.32	91.56	1.11	2.25	1.32	1.56	1.56	1.14
2	88.06	91.80	91.94	91.10	1.94	1.80	1.94	1.10	1.70	0.84
3	91.69	91.83	88.25	88.19	1.69	1.83	1.75	1.81	1.77	0.14
4	90.91	91.43	88.83	91.24	0.91	1.43	1.17	1.24	1.19	0.52
5	91.21	91.21	91.15	88.91	1.21	1.21	1.15	1.09	1.17	0.12
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				1.48	0.55

ตาราง ก.20การเก็บข้อมูลมูมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 10mm. กับแรงดันที่ 350MPa

ชั้นที่	ค่ามูมที่วัด (องศา)				มูมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มูมเอียงบน = $ 90-(A) $		มูมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มูมซ้าย	มูมขวา	มูมซ้าย	มูมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	91.55	91.33	91.48	91.23	1.55	1.33	1.48	1.23	1.40	0.32
2	91.67	91.28	91.25	90.84	1.67	1.28	1.25	0.84	1.26	0.83
3	91.38	91.20	91.53	91.05	1.38	1.20	1.53	1.05	1.29	0.48
4	91.09	90.74	91.02	91.44	1.09	0.74	1.02	1.44	1.07	0.70
5	91.52	89.02	88.75	91.02	1.52	0.98	1.25	1.02	1.19	0.54
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				1.24	0.57

ตาราง ก.21 การเก็บข้อมูลมุมเอียงของชิ้นงานที่มีความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 260MPa

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	93.85	92.91	86.86	91.73	3.85	2.91	3.14	1.73	2.91	2.12
2	87.95	88.75	86.90	91.80	2.05	1.25	3.10	1.80	2.05	1.85
3	92.01	92.01	94.48	88.08	2.01	2.01	1.94	1.92	1.97	0.09
4	92.57	93.30	86.87	92.72	2.57	3.30	3.13	2.72	2.93	0.73
5	93.10	87.64	92.79	92.03	3.10	2.36	2.79	2.03	2.57	1.07
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				2.49	1.17

ตาราง ก.22 การเก็บข้อมูลมุมเอียงของชิ้นงานที่มีความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 290MPa

ชั้นที่	ค่ามุมที่วัด (องศา)				มุมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มุมเอียงบน = $ 90-(A) $		มุมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มุมซ้าย	มุมขวา	มุมซ้าย	มุมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	92.39	91.55	92.27	88.90	2.39	1.55	2.27	2.87	2.27	1.32
2	88.14	91.51	92.60	90.42	1.86	1.92	2.60	2.49	2.22	0.74
3	86.92	91.46	92.31	92.13	2.67	1.77	2.31	2.13	2.22	0.90
4	87.71	91.67	87.84	88.16	2.29	1.83	2.16	2.37	2.16	0.54
5	87.71	88.63	92.06	92.44	2.29	1.89	2.06	2.44	2.17	0.55
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				2.21	0.81

ตาราง ก.23 การเก็บข้อมูลมูมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 320MPa

ชั้นที่	ค่ามูมที่วัด (องศา)				มูมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มูมเอียงบน = $ 90-(A) $		มูมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มูมซ้าย	มูมขวา	มูมซ้าย	มูมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	88.48	92.21	92.20	91.41	1.52	2.21	2.20	1.41	1.83	0.80
2	91.42	92.32	92.30	91.73	1.42	2.32	2.30	1.73	1.94	0.90
3	87.02*	92.13	91.88	91.57	2.98*	2.13	1.88	1.57	1.86	0.56
4	91.68	91.99	92.09	91.80	1.68	1.99	2.09	1.80	1.89	0.41
5	88.66	92.02	91.86	91.59	1.34	2.02	1.86	1.59	1.70	0.68
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				1.85	0.67

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตาราง ก.24 การเก็บข้อมูลมูมเอียงของชิ้นงานที่ความหนา 13mm. กับแรงดันที่ 350MPa

ชั้นที่	ค่ามูมที่วัด (องศา)				มูมเอียงของชิ้นงาน (องศา)					
	ด้านบน (A)		ด้านล่าง (B)		มูมเอียงบน = $ 90-(A) $		มูมเอียงล่าง = $ 90-(B) $		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	มูมซ้าย	มูมขวา	มูมซ้าย	มูมขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา		
1	87.75	92.59	91.71	88.33	1.68	1.77	1.71	1.67	1.71	0.10
2	92.49	91.66	91.71	91.43	1.85	1.66	1.71	1.43	1.66	0.42
3	88.61	91.95	91.77	91.70	1.39	1.95	1.77	1.70	1.70	0.56
4	88.73	92.97	91.98	88.62	1.27	1.86	1.98	1.38	1.62	0.71
5	91.49	91.63	88.47	91.87	1.49	1.63	1.53	1.87	1.63	0.38
					ค่าเฉลี่ย (รวม)				1.67	0.43

ตาราง ก.25 การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	3.72	3.90	4.20	3.05	3.72	0.53	1.15
2	4.31	4.61	3.94	4.65	4.38	0.63	0.71
3	4.20	4.96	4.56	4.52	4.56	0.65	0.76
4	3.59	3.97	4.33	3.65	3.89	0.56	0.74
5	3.97	3.09 *	4.01	4.26	4.08	0.58	0.29
ค่าเฉลี่ย (รวม)					4.12	0.59	0.73

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตาราง ก.26 การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	4.03	3.47	4.84	3.62	3.99	0.57	1.37
2	5.06	5.09	4.81	4.99	4.99	0.71	0.28
3	3.59	4.17	3.70	3.35	3.70	0.53	0.82
4	3.51	3.12	3.94	3.55	3.53	0.50	0.82
5	3.58	3.44	3.76	4.26	3.76	0.54	0.82
ค่าเฉลี่ย (รวม)					3.99	0.57	0.82

ตาราง ก.27การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	4.92	4.65	4.42	4.62	4.65	0.66	0.50
2	4.61	2.62	4.55	4.74	4.13	0.59	2.12
3	4.40	4.41	4.23	4.55	4.40	0.63	0.32
4	4.44	4.79	4.20	4.33	4.44	0.63	0.59
5	3.42	3.73	3.91	3.85	3.73	0.53	0.49
ค่าเฉลี่ย (รวม)					4.27	0.61	0.80

ตารางที่ ก.28การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	4.67	4.61	4.42	4.26	4.49	0.64	0.41
2	4.46	4.55	4.04	4.46	4.38	0.63	0.51
3	4.61	4.48	4.33	4.46	4.47	0.64	0.28
4	4.45	4.14	4.17	3.82	4.15	0.59	0.63
5	4.31	4.48	4.42	4.52	4.43	0.63	0.21
ค่าเฉลี่ย (รวม)					4.38	0.63	0.41

ตาราง ก.29 การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	5.09	4.92	5.31	5.23	5.14	0.51	0.39
2	5.32	5.03	5.31	5.28	5.24	0.52	0.29
3	5.63	5.20	5.71	5.69	5.56	0.56	0.51
4	6.91	6.32	6.87	6.32	6.61	0.66	0.59
5	6.21	5.89	5.78	5.83	5.93	0.59	0.43
ค่าเฉลี่ย (รวม)					5.69	0.57	0.44

ตาราง ก.30 การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	5.12	6.11	5.54	5.67	5.61	0.56	0.99
2	5.32	5.06	5.64	5.34	5.34	0.53	0.58
3	5.46	5.03	5.06	4.57	5.03	0.50	0.89
4	5.67	5.02	5.24	5.03	5.24	0.52	0.65
5	6.01	5.69	5.64	5.78	5.78	0.58	0.37
ค่าเฉลี่ย (รวม)					5.40	0.54	0.70

ตาราง ก.31การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	5.68	5.74	5.88	5.67	5.74	0.57	0.21
2	5.79	5.99	5.68	5.75	5.80	0.58	0.31
3	6.13	5.54	5.16	5.98	5.70	0.57	0.97
4	5.85	5.74	5.83	6.21	5.91	0.59	0.47
5	6.31	5.47	5.36	5.76	5.73	0.57	0.95
ค่าเฉลี่ย (รวม)					5.78	0.58	0.58

ตาราง ก.32การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่350 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	5.91	5.94	5.55	6.35	5.94	0.59	0.80
2	6.50	6.60	6.70	6.60	6.60	0.66	0.20
3	5.64	6.35	6.48	5.12*	6.16	0.62	0.84
4	5.74	6.05	5.67	6.16	5.91	0.59	0.49
5	6.77	6.53	6.38	6.00	6.38	0.64	0.77
ค่าเฉลี่ย (รวม)					6.20	0.62	0.62

หมายเหตุ: * ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่ม

ตาราง ก.33การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่260 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	7.12	6.91	6.99	7.47	7.12	0.55	0.56
2	7.00	7.11	6.25	6.36	6.68	0.51	0.86
3	6.75	7.01	6.92	6.32	6.75	0.52	0.69
4	6.87	6.39	6.62	6.60	6.62	0.51	0.48
5	8.84	8.17	7.12	7.79	7.98	0.61	1.72
ค่าเฉลี่ย (รวม)					7.03	0.54	0.86

ตารางก.34การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่290 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	7.32	7.52	7.24	7.60	7.42	0.57	0.36
2	6.84	6.60	6.00	6.48	6.48	0.50	0.84
3	4.83	5.33	4.49	4.68	4.83	0.37	0.84
4	6.84	7.01	6.20	4.74	6.20	0.48	2.27
5	7.42	7.52	7.23	7.71	7.47	0.57	0.48
ค่าเฉลี่ย (รวม)					6.48	0.50	0.96

ตาราง ก.35 การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	7.66	6.82	7.32	7.21	7.25	0.56	0.84
2	7.05	7.32	7.22	7.01	7.15	0.55	0.31
3	7.03	7.25	7.12	6.93	7.08	0.54	0.32
4	7.32	7.97	7.04	6.76	7.27	0.56	1.21
5	7.14	7.11	7.50	7.40	7.29	0.56	0.39
ค่าเฉลี่ย (รวม)					7.21	0.55	0.61

ตาราง ก.36 การเก็บข้อมูลการวัดความสูงคลื่นรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	ความสูงคลื่นรอยตัด (มิลลิเมตร)						
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ค่าเฉลี่ย	สัดส่วนค่าเฉลี่ย กับความหนา	ค่าพิสัย
1	7.86	7.55	7.47	7.85	7.68	0.59	0.39
2	6.67	6.39	6.91	7.66	6.91	0.53	1.27
3	6.55	6.36	6.41	6.89	6.55	0.50	0.53
4	8.65	7.28	8.08	8.30	8.08	0.62	1.37
5	8.48	8.20	8.47	8.72	8.47	0.65	0.52
ค่าเฉลี่ย (รวม)					7.54	0.58	0.82

ตาราง ก.37 การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	14.07	33.95	0.93	1.05	0.99	0.12
2	13.93	33.87	1.07	1.13	1.10	0.06
3	13.87	33.99	1.13	1.01	1.07	0.12
4	14.17	33.83	0.83	1.17	1.00	0.34
5	14.26	33.73	0.74	1.03	0.89	0.29
ค่าเฉลี่ย (รวม)					1.01	0.19

ตาราง ก.38 การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	14.00	33.73	1.00	1.27	1.14	0.27
2	14.14	33.87	0.86	1.13	1.00	0.27
3	14.00	34.18	1.00	0.82	0.91	0.18
4	14.02	33.73	0.98	1.27	1.13	0.29
5	13.93	33.89	1.07	1.11	1.09	0.04
ค่าเฉลี่ย (รวม)					1.05	0.21

ตาราง ก.39การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	14.20	34.00	0.80	1.00	0.90	0.20
2	14.00	33.67	1.00	1.33	1.17	0.33
3	13.53	33.73	1.27	1.27	1.27	0.00
4	14.33	34.13	0.87	0.87	0.87	0.00
5	14.27	33.67	0.73	1.33	1.03	0.60
ค่าเฉลี่ย (รวม)					1.05	0.23

ตาราง ก.40การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 7 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	13.88	33.93	1.12	1.07	1.10	0.05
2	14.00	33.73	1.00	1.27	1.14	0.27
3	13.87	33.78	1.13	1.22	1.18	0.09
4	14.07	33.80	0.93	1.20	1.07	0.27
5	14.00	33.80	1.00	1.20	1.10	0.20
ค่าเฉลี่ย (รวม)					1.11	0.18

ตาราง ก.41การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่260 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	13.63	33.80	1.37	1.20	1.29	0.17
2	13.78	33.93	1.22	1.07	1.15	0.15
3	13.60	33.87	1.40	1.13	1.27	0.27
4	13.87	33.73	1.13	1.27	1.20	0.14
5	13.73	34.13	1.27	1.17	1.22	0.10
ค่าเฉลี่ย (รวม)					1.22	0.17

ตาราง ก.42การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่290 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	13.73	33.45	1.27	1.55	1.41	0.28
2	13.87	33.53	1.13	1.47	1.30	0.34
3	13.60	33.81	1.40	1.19	1.30	0.21
4	13.86	33.60	1.14	1.40	1.27	0.26
5	13.83	34.05	1.17	0.95	1.06	0.22
ค่าเฉลี่ย (รวม)					1.27	0.26

ตาราง ก.43การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	13.91	33.80	1.09	1.20	1.15	0.11
2	13.40	33.78	1.27	1.22	1.25	0.05
3	13.87	33.47	1.13	1.53	1.33	0.40
4	13.60	33.87	1.40	1.13	1.27	0.27
5	15.00	33.60	1.53	1.40	1.47	0.13
ค่าเฉลี่ย (รวม)					1.29	0.19

ตาราง ก.44การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 10 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	13.60	33.53	1.40	1.47	1.44	0.07
2	13.87	33.59	1.13	1.41	1.27	0.28
3	13.53	33.93	1.47	1.07	1.27	0.40
4	13.53	33.60	1.47	1.40	1.44	0.07
5	13.79	33.93	1.21	1.07	1.14	0.14
ค่าเฉลี่ย (รวม)					1.31	0.19

ตาราง ก.45 การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 260 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	14.13	34.27	0.87	0.73	0.80	0.14
2	14.25	34.15	0.75	0.85	0.80	0.10
3	14.07	34.20	0.93	0.80	0.86	0.13
4	14.13	34.27	0.87	0.73	0.80	0.14
5	14.01	34.26	0.90	0.74	0.82	0.16
ค่าเฉลี่ย (รวม)					0.82	0.13

ตาราง ก.46 การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 290 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	14.27	34.07	0.73	0.93	0.83	0.20
2	14.20	34.20	0.80	0.80	0.80	0.00
3	14.47	34.40	0.53	0.60	0.57	0.07
4	13.80	34.47	1.20	0.53	0.87	0.67
5	13.67	33.82	1.33	1.18	1.26	0.15
ค่าเฉลี่ย (รวม)					0.86	0.22

ตาราง ก.47การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 320 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	13.96	34.16	1.04	0.84	0.94	0.20
2	13.98	34.66	1.02	0.34	0.68	0.68
3	13.99	33.99	1.01	1.01	1.01	0.00
4	14.24	34.17	0.76	0.83	0.80	0.07
5	14.01	33.90	0.99	1.10	1.05	0.11
ค่าเฉลี่ย (รวม)					0.89	0.21

ตาราง ก.48การเก็บข้อมูลการวัดรอยแตกร้าวรอยตัดที่ความหนา 13 mm. กับแรงดันที่ 350 MPa

ชั้นที่	การวัดรอยแตกร้าวรอยตัด (มิลลิเมตร)					
	ระยะไม่เกิดรอยร้าว		รอยแตกร้าว		ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
	ด้านกว้าง (A)	ด้านยาว (B)	ด้านกว้าง = 15-(A)	ด้านยาว = 35-(B)		
1	14.07	34.06	0.93	0.94	0.94	0.01
2	14.27	34.08	0.73	0.92	0.83	0.19
3	14.00	34.33	1.00	0.67	0.84	0.33
4	13.86	34.40	1.14	0.60	0.87	0.54
5	13.98	34.00	1.02	1.00	1.01	0.02
ค่าเฉลี่ย (รวม)					0.90	0.22

ภาคผนวก

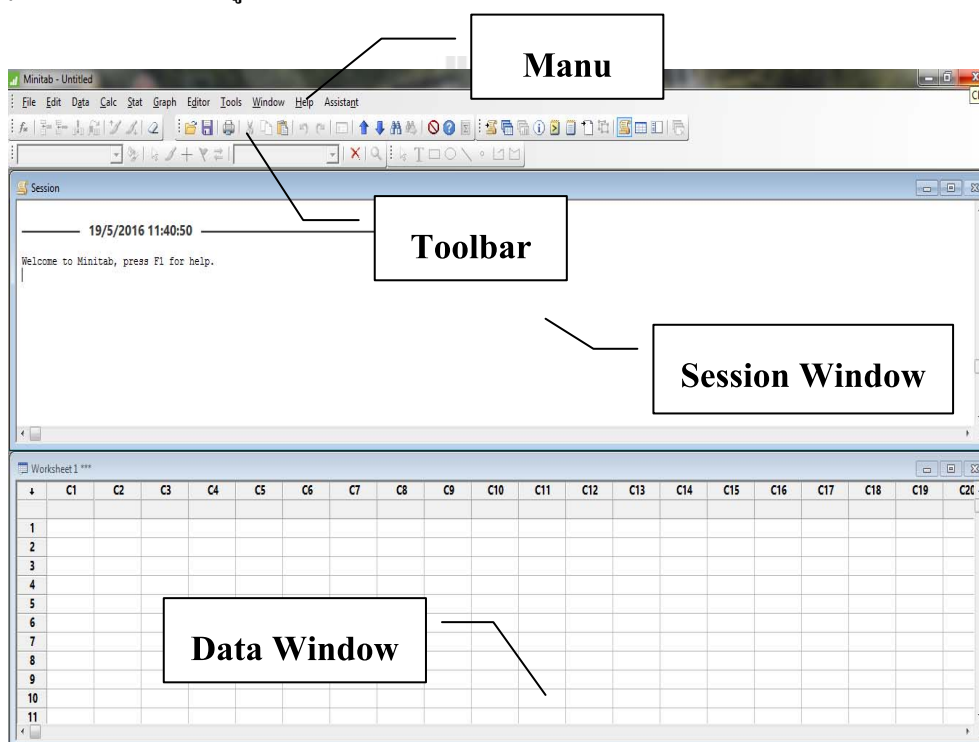
แสดงการใช้โปรแกรม Minitab 17 Free Trial



1. โปรแกรม Minitab

เมื่อเข้าสู่โปรแกรม Minitab จะปรากฏแถบเมนู ทูลบาร์ หน้าต่างสำหรับการรับข้อมูลเรียกว่า Data Window และปรากฏหน้าต่างแสดงผลการคำนวณเรียกว่า Session Window ดังแสดงในรูปที่ ข.1

Data Window มีลักษณะเป็นเวิร์คชีทประกอบด้วยเซลล์ในแนวแถวและแนวคอลัมน์เป็นจำนวนมาก ข้อมูล 1 ชุดจะป้อนลงเซลล์ในแนวคอลัมน์ โดยเรียงตามลำดับจากแถวที่ 1, 2, 3 ลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งหมดข้อมูล

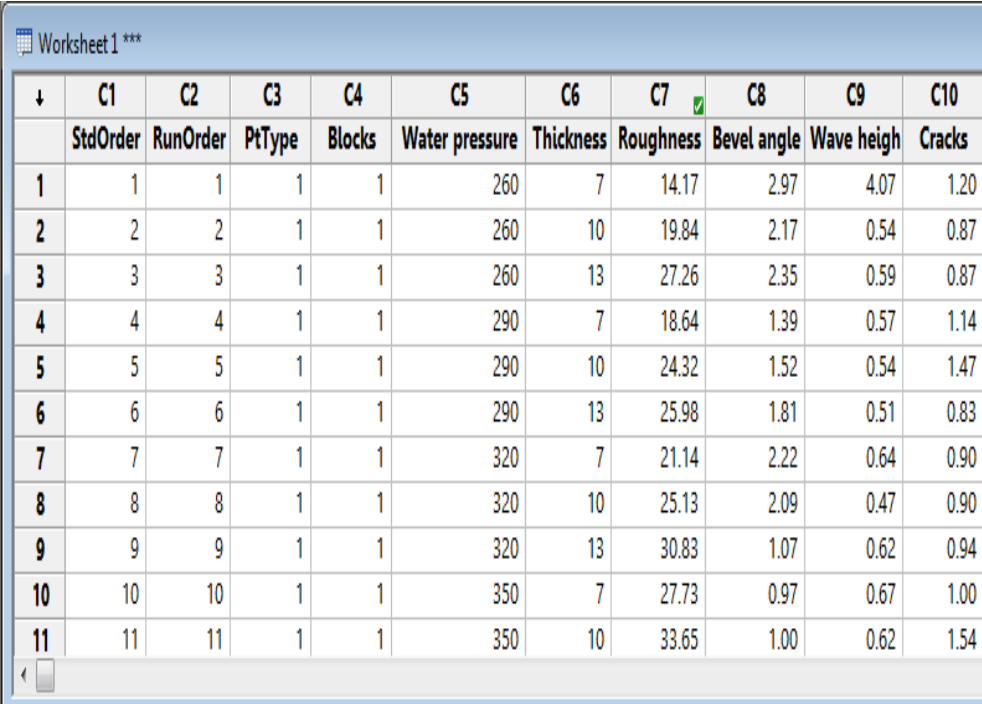


รูปที่ ข.1 แสดงหน้าจอและส่วนประกอบของโปรแกรม Minitab 17 Free Trial

2. ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Minitab

2.1 เริ่มจากปุ่มบนวินโดวส์เลือก Start > All Programs > Minitab Solutions > Minitab 17 Statistical Software English

2.2 ป้อนข้อมูลเข้าสู่เวิร์คชีทเป็นการนำข้อมูลเข้าสู่เวิร์คชีทโดยอาจป้อนจากแป้นพิมพ์ หรือเลือกจาก Excel, Access หรือ Text แสดงดังรูปที่ ข.2



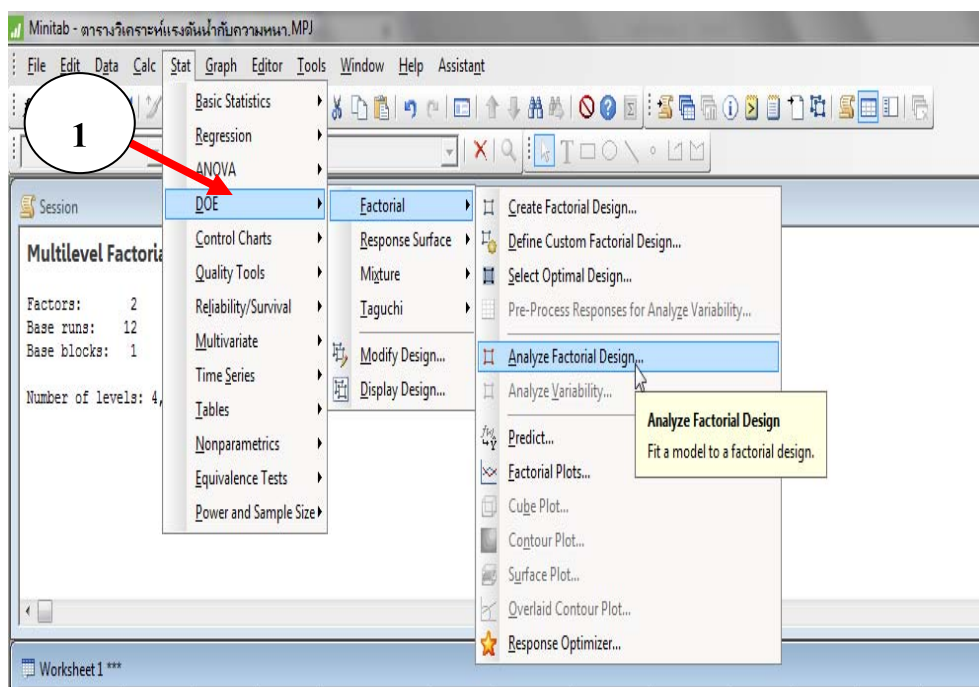
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Water pressure	Thickness	Roughness	Bevel angle	Wave height	Cracks
1	1	1	1	1	260	7	14.17	2.97	4.07	1.20
2	2	2	1	1	260	10	19.84	2.17	0.54	0.87
3	3	3	1	1	260	13	27.26	2.35	0.59	0.87
4	4	4	1	1	290	7	18.64	1.39	0.57	1.14
5	5	5	1	1	290	10	24.32	1.52	0.54	1.47
6	6	6	1	1	290	13	25.98	1.81	0.51	0.83
7	7	7	1	1	320	7	21.14	2.22	0.64	0.90
8	8	8	1	1	320	10	25.13	2.09	0.47	0.90
9	9	9	1	1	320	13	30.83	1.07	0.62	0.94
10	10	10	1	1	350	7	27.73	0.97	0.67	1.00
11	11	11	1	1	350	10	33.65	1.00	0.62	1.54

รูปที่ ข.2 แสดงการป้อนข้อมูลเข้าโปรแกรม Minitab 17 Free Trial

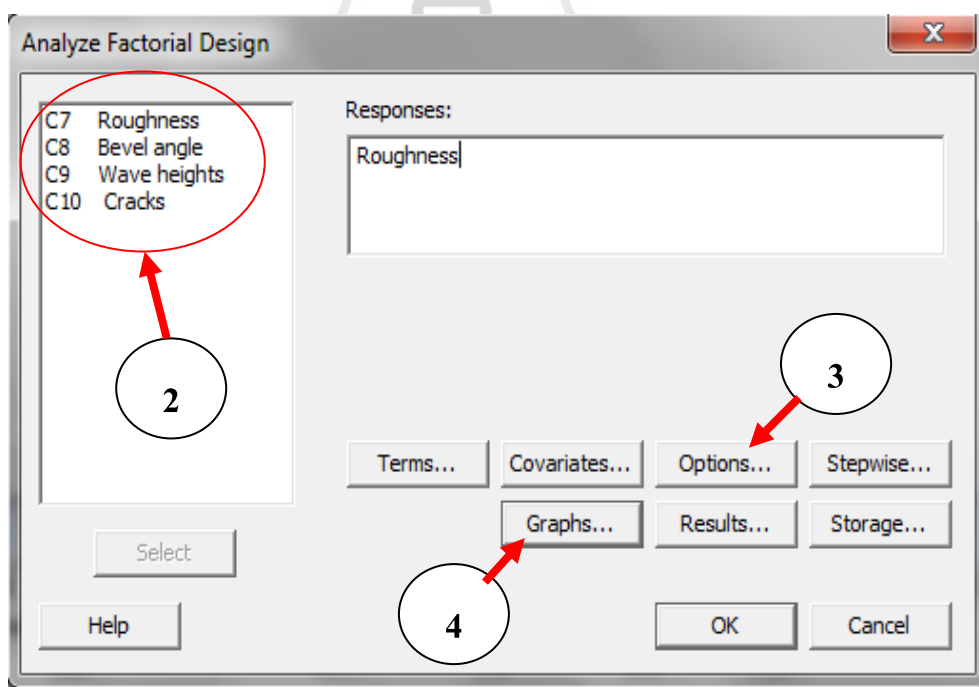
2.3 ทำการเลือกฟังก์ชันทางสถิติที่จะทำการวิเคราะห์ เลือก ANOVA และ Two-Way (Unstacked) ตามลำดับ แสดงดังหมายเลข 1 รูปที่ ข.3

2.4 เลือกชุดข้อมูลที่จะมาใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังหมายเลข 2 รูปที่ ข.4

2.5 การปรับเปลี่ยนค่าความเชื่อมั่น 95% แสดงดังหมายเลข 3 รูปที่ ข.4 การสร้างกราฟ หรือจะเป็นการสั่งให้โปรแกรมแสดงค่าหรือเก็บค่าใดๆที่เราต้องการ เป็นต้น แสดงดังหมายเลข 4 รูปที่ ข.4



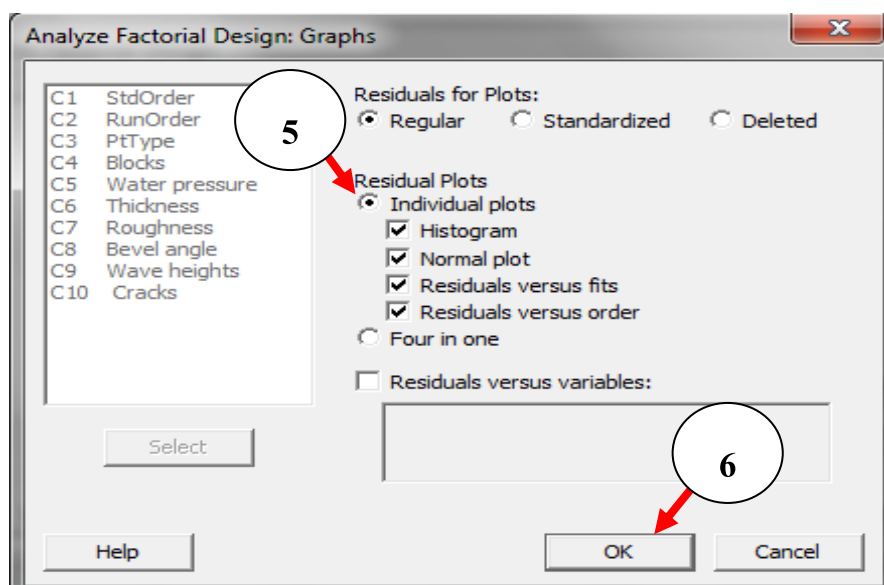
รูปที่ ข.3 การเลือกใช้ฟังก์ชันของโปรแกรม Minitab



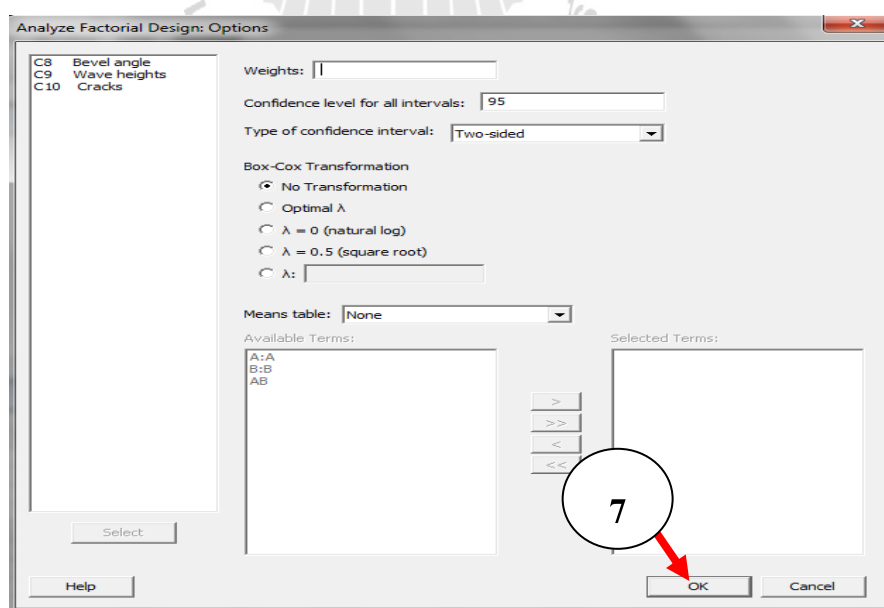
รูปที่ ข.4 แสดงการปรับเปลี่ยนค่าความเชื่อมั่นและการสร้างกราฟ

2.6 เลือกรูปแบบกราฟที่แสดงการประมวลผล แสดงดังหมายเลข 5 รูปที่ ข.5 เลือกปุ่ม OK แสดงดังหมายเลข 6 รูปที่ ข.5

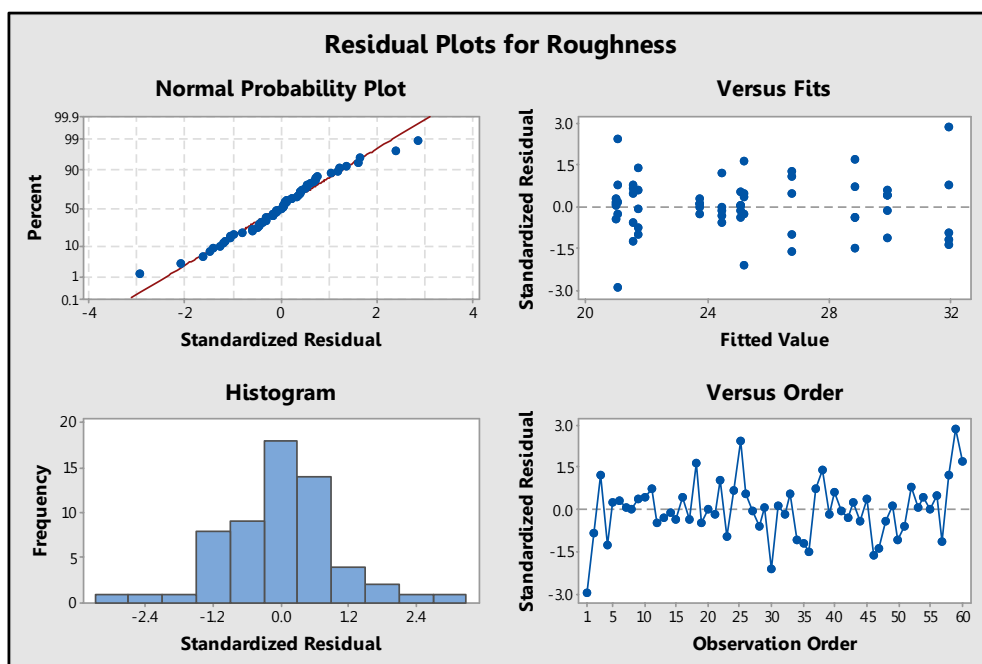
2.7 การประมวลผลเป็นการจัดการกับผลการประมวลผลที่โปรแกรม Minitab ดำเนินการให้ซึ่งจะออกมาใน 2 รูปแบบคือ ผลทางตัวเลขหรือตัวอักษรและกราฟ เลือก OK แสดงดังหมายเลข 7 รูปที่ ข.6



รูปที่ ข.5 แสดงการเลือกรูปแบบกราฟ



รูปที่ ข.6 แสดงการเลือกรูปแบบกราฟ



รูปที่ ข.7 แสดงการประมวลผลทางกราฟของโปรแกรม Minitab

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	740.6	67.325	10.06	0.000
Linear	5	617.5	123.499	18.46	0.000
Water pressure	3	401.2	133.748	19.99	0.000
Thickness	2	216.3	108.125	16.16	0.000
2-Way Interactions	6	123.1	20.514	3.07	0.013
Water pressure*Thickness	6	123.1	20.514	3.07	0.013
Error	48	321.1	6.690		
Total	59	1061.7			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.58655	69.75%	62.82%	52.74%

รูปที่ ข.8 แสดงการประมวลผลทางตัวเลขของโปรแกรม Minitab



ภาคผนวก

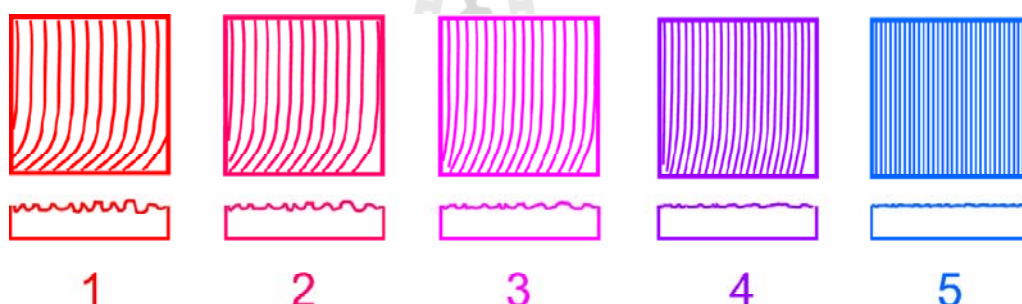
คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น

MAXIEM WaterJetMode 1530

1. การเขียนแบบ โดยใช้โปรแกรม Layout

ขั้นตอนดังนี้

- 1.1 นำเข้าแฟ้มเขียนแบบ(DXF)ในLayoutเครื่องมือวาด Intelli-MAX Basicหรือใช้คำสั่งของโปรแกรมในการสร้างรูปตามแบบชิ้นงาน
- 1.2 ใช้คำสั่งCleanเพื่อลบช่องว่าง จุดที่ไม่จำเป็นต่างๆ และเส้นที่ทับซ้อนกันจากแบบ
- 1.3 กำหนดคุณภาพของการตัดที่จำเป็นสำหรับแบบแต่ละส่วน
 - 1.3.1 คุณภาพ1 ให้คุณภาพต่ำสุดและมีความเร็วตัดสูงที่สุด
 - 1.3.2 คุณภาพ2 ให้คุณภาพต่ำและความเร็วตัดสูง
 - 1.3.3 คุณภาพ 3 ให้คุณภาพปานกลางและความเร็วตัดปานกลาง
 - 1.3.4 คุณภาพ 4 ให้คุณภาพสูงและความเร็วตัดช้า
 - 1.3.5 คุณภาพ 5 ให้คุณภาพสูงที่สุดและความเร็วตัดช้าที่สุด



รูปที่ ก.1 ตัวอย่างคุณภาพของรอยตัด

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

- 1.4 เพิ่ม Lead-InsและLead-Outsให้กับแบบ
 - 1.4.1 Lead-Insลายเส้นยาวกว่า Lead-Outs ลายเส้นยาวสั้นกว่า
 - 1.4.2 ด้านของทางเข้าของLead-in/Outsกำหนดว่าตัดหัวในซ้ายหรือด้านขวาของทางเข้า
 - 1.4.3 ทางเดินของทิศทางหัวตัด มุมกว้างเพื่อลดรอยตัดของทางเข้าให้น้อยสุด
 - 1.4.4 ตรวจสอบค่ากำหนดของLead-in/Outs จากการ Layout
 - 1.4.5 กำหนดทางเข้าของLead-in/Outs ตรงมุม 90 องศาของรูปสี่เหลี่ยม
 - 1.4.6 กำหนดLead-in/Outs ให้เส้นบางที่สุดเพื่อลดรอยตัดให้แคบที่สุด
- 1.5 บันทึกฉบับสมบูรณ์ของไฟล์DXF

- 1.6 ใช้ Layout Path Tool เพื่อระบุเส้นทางตัดและสร้างเพิ่ม ORD
 - 1.6.1 กำหนดเส้นทางทั้งด้วยตนเองหรือโดยอัตโนมัติ
 - 1.6.2 ตรวจสอบการชนกันของเส้นทางตัด
- 1.7 บันทึกแบบเส้นทางสุดท้ายแบบอัตโนมัติบันทึกเป็นไฟล์ ORD

2. การตัดชิ้นงานโดยใช้โปรแกรม Make

- 2.1 การตั้งค่าฮาร์ดแวร์ก่อนเปิดเครื่องจะต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน เช่น แวนป้องกันและถุงมือยาง
 - 2.2 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าหลักสำหรับอุปกรณ์ MAXIEM
 - 2.3 เปิดวาล์วจ่ายลม และเปิดวาล์วน้ำประปา
 - 2.4 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าปั๊มส่งน้ำ
 - 2.5 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller)
 - 2.6 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าปั๊มส่งน้ำแรงดันสูง
 - 2.7 เปิดใช้ปั๊มส่งน้ำนาน 15 นาทีแล้ว วัดอุณหภูมิของทางน้ำออกซึ่งจะต้องรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่ 21.1°C หรือต่ำกว่า
- คำเตือน หากอุณหภูมิทางเข้าถึง 15.6°C (60 °F) อาจจะทำให้การใช้งานสั้นลงหรือถ้าอุณหภูมิมากกว่า 21.1°C (70 °F) จะต้องมีเครื่องทำน้ำเย็น และสิ่งสำคัญ คือทำความเข้าใจว่าโลหะในปั๊มที่อุณหภูมิเกิน 26.7°C (80°F) เป็นเวลา 5 นาทีของการทำงานสามารถทำลาย ชั่วโมงการใช้งานได้ถึง 100 ชั่วโมง
- 2.9 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าในชุดควบคุม MAXIEM ตรวจสอบว่าระบบปฏิบัติการเปิดขึ้นโดยไม่มีปัญหา
 - 2.10 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ประกอบ MAXIEM

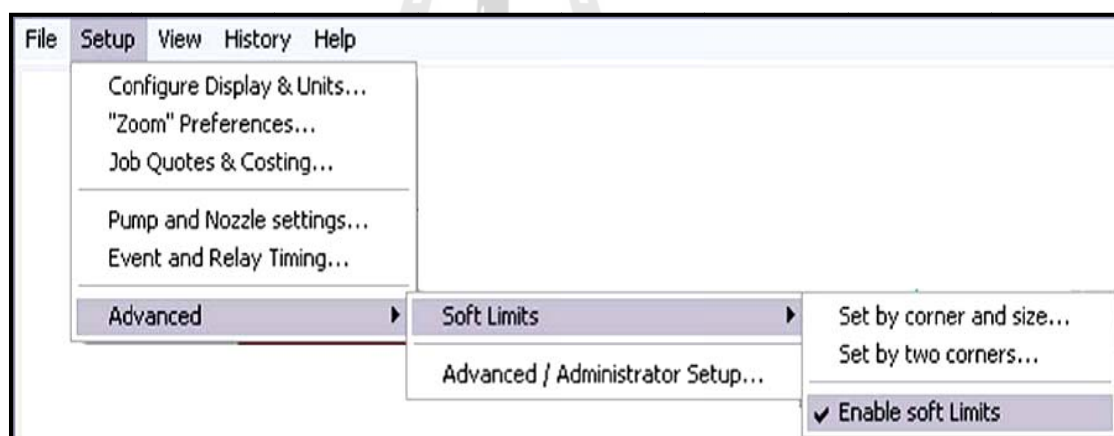
ตารางที่ ค.1 แสดงอัตราการไหลของทรายตัด

ขนาดของปั๊ม	รูรีดน้ำ	ท่อผสมทราย	อัตราการไหลของทรายตัด / Mesh 80
20 แรงม้า	0.011 นิ้ว (0.279 mm.)	0.030/4 นิ้ว (0.76 mm.)	0.75 lbs/minute
30 แรงม้า	0.014 นิ้ว (0.356 mm.)	0.030/4 นิ้ว (0.76 mm.)	0.75 lbs/minute
30 แรงม้า 2 ปั๊ม	0.020 นิ้ว (0.508 mm.)	0.042/4 นิ้ว (1.07 mm.)	1.4 lbs/minute

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

ข้อระมัดระวัง : เปลี่ยนขนาดรูรีดน้ำต้องปรับADO เพื่อลดความดัน Spikes เพื่อป้องกันการใช้งานที่ผิดพลาดหรือศึกษาการตั้งค่าปรับแรงดันADO

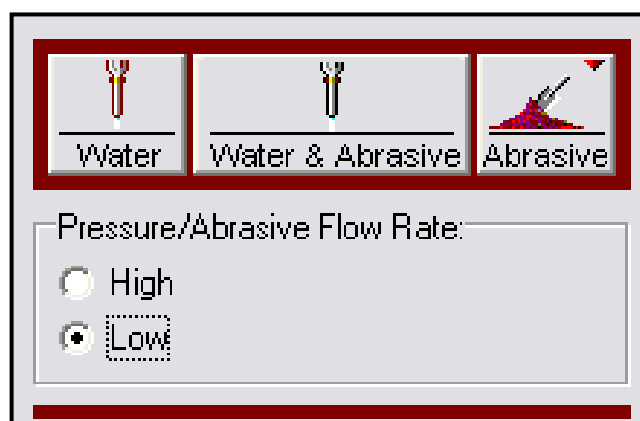
- 2.11 ตรวจสอบท่อผสม รูรีดน้ำและอัตราการไหลของทราย ซึ่งจะต้องตรงกับขนาดปั๊มส่งน้ำแรงดันสูงที่ใช้
- 2.12 กรอกผงทรายขนาดที่ต้องการลงในถังพักทราย โดยสังเกตว่าปริมาณเพียงพอในการตัด
- 2.13 ตรวจสอบระดับน้ำของถังรองตัดเพิ่มหรือระบายน้ำตามต้องการ
- 2.14 ใน Windows ให้คลิกที่ไอคอน Make เปิดตัวซอฟต์แวร์ตัด
- 2.15 Auto Home เพื่อให้อยู่ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์ของเครื่อง (Absolute Home) คลิกขวาปุ่ม Zero ด้านล่างและเลือก Advance หรือ Auto Home
- 2.16 ตรวจสอบว่ามีการใช้ขอบเขตพื้นที่จำกัด (Setup/Advanced/Soft Limits) แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แสดงการตรวจสอบการใช้ขอบเขตพื้นที่จำกัด

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

- 2.17 เคลื่อนตำแหน่งหัวตัดไปที่ตำแหน่งช่องระหว่างแผ่นรองตัด สูงเหนือผิวน้ำประมาณ 1 นิ้ว
- 2.18 ดำเนินทดสอบหัวตัดที่ Low Pressure
 - 2.18.1 คลิกปุ่ม Test เลือกดำเนินทดสอบ ปั๊มและหัวตัดแสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ค.3 แสดงการดำเนินการทดสอบ ปั่นและหัวตัด

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

2.18.2 เลือกLowแล้วคลิกWaterเพื่อเริ่มต้นการทดสอบหัวตัด

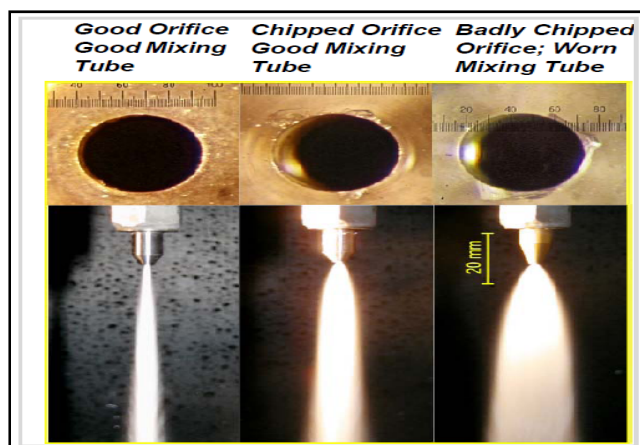
2.18.3เมื่อเริ่มเจ็ทสตรีมที่ส่งทรายจะถูกบล็อกในวาล์ว Bimbalเพื่อป้องกันการไหลของอากาศผ่านหลอดแล้วตรวจสอบคุณภาพของเจ็ทสตรีมแสดงดังรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.4 แสดงตัวอย่างคุณภาพเจ็ทสตรีมของทั้งดีและไม่ดี

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

2.18.4 การเปรียบเทียบผลที่รูรีดน้ำและท่อผสมชำรุดเสียหายมีผลต่อคุณภาพของเจ็ทสตรีมแสดงดังรูปที่ ค.5



รูปที่ ค.5 แสดงการเปรียบเทียบผลที่รูรีดน้ำและท่อผสมชำระดูมีผลต่อคุณภาพของเจ็ทสตรีม
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

2.18.5 ระหว่างการทดสอบเจ็ทสตรีม ปรับจำนวนรอบของปั๊มเพื่อให้ได้แรงดันที่ต้องการเขียนบันทึกจำนวนรอบและแรงดันของปั๊ม จากหน้าจอLCDสำหรับการทดสอบความดันต่ำ

2.18.6คลิก STOPเพื่อสิ้นสุดทดสอบปั๊มความดันต่ำแสดงดังรูปที่ ค.6



รูปที่ ค.6 แสดงสิ้นสุดทดสอบปั๊มความดันต่ำ

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

2.19 ทำการทดสอบหัวตัดที่ High Pressure

ข้อควรระมัดระวัง: ไม่ทดสอบการทำงานของเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงนานเกิน 1 นาที เมื่อหัวตัดอยู่เหนือน้ำมากกว่า 1 นิ้ว อาจทำให้อากาศในน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เจ็ทสตรีมไปกระทบกับกันถึงเกิดแรงพอที่จะตัดทะลุผ่านด้านล่างนี้ เพื่อเป็นการป้องกันการกระทบเจ็ทสตรีมกับกันถึง ควรมีการวางกระเบื้องหรือเศษของชิ้นงานให้อยู่ด้านล่างถึงเพื่อให้ส่วนของ MAXIEM ยังมีชุดแผ่นป้องกันเป็นตัวเลือกเสริม

2.19.1 คลิกปุ่ม Test เพื่อแสดงตัวเลือกการทดสอบหัวตัด

2.19.2 เลือก High แล้วคลิก Water เพื่อเริ่มต้นการทดสอบ

2.19.3 เมื่อเริ่มเจ็ทสตรีมทรายจะถูกส่งผ่านท่อส่งทรายที่ต่อมาจากถังพักทราย เพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพของเจ็ทสตรีม

2.19.4 ระหว่างการทดสอบเจ็ทสตรีมให้ปรับจำนวนรอบของปั๊มเพื่อให้เจ็ทสตรีมมีคุณภาพตามต้องการ แล้วเขียนบันทึกจำนวนรอบและแรงดันของปั๊มจากหน้าจอ LCD สำหรับทดสอบความดันสูง

2.19.5 ในระหว่างการทดสอบนี้จะต้องตรวจสอบความดันน้ำของปั๊มทั้งสองที่ความเร็วรอบสูง แล้วอ่านค่าความแตกต่างระหว่างสองมาตรวัดต้องไม่เกิน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วโดยถ้ามากกว่านี้จะต้องเปลี่ยนหรือทำการกรองน้ำ

2.19.6 คลิก STOP เพื่อสิ้นสุดการทดสอบปั๊มแรงดันน้ำสูง

2.20 ดำเนินการทดสอบการใช้ Water & Abrasive

2.20.1 ถ้าจำเป็นให้คลิกปุ่ม Test เพื่อแสดงตัวเลือกการทดสอบหัวตัด

2.20.2 เลือก High แล้วคลิก Water & Abrasive เพื่อเริ่มต้นการทดสอบ

2.20.3 คลิก STOP เพื่อสิ้นสุดการทดสอบ Water & Abrasive Test

2.21 การวัดอัตราการไหลของผงทราย

2.21.1 ถอดแป้นประกบท่อส่งทราย ออกจากวาล์ว Bimba ด้วยการดึงตรงๆ

2.21.2 วางภาชนะด้านล่าง โดยตรงกับ Bimba วาล์วซึ่งทำการเปิดในช่วงการวัดผงทราย

2.21.3 คลิกปุ่ม Test เพื่อแสดงตัวเลือกการทดสอบหัวตัด

2.21.4 คลิก Abrasive เพื่อเริ่มต้นการไหลของผงทราย

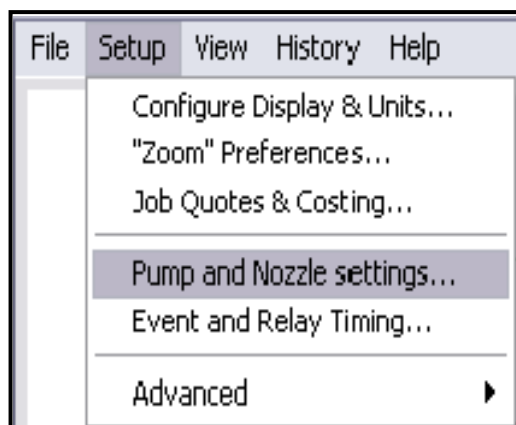
2.21.5 กำหนดปริมาณและน้ำหนักผงทรายที่เก็บในภาชนะในระหว่างหนึ่งนาที บันทึกอัตราการไหลและน้ำหนักของผงทราย ซึ่งไม่รวมน้ำหนักของภาชนะ

2.21.6 นำท่อส่งทรายใส่ที่เดิม โดยกดกลับเข้าวาล์ว Bimba

2.22 ตรวจสอบว่าค่ากำหนดใน Pump Nozzle Setup ตรงกับค่าจริง

2.22.1 คลิกที่ปุ่มSetupในโปรแกรม Makeแล้วจึงเลือกPump and Nozzle

Settings... แสดงดังรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 แสดงการตั้งค่าSetupสำหรับเมนูปั๊มและหัวตัด

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

2.22.2 แสดงค่าที่ถูกต้องหรือแสดงผลที่แตกต่างจากที่บันทึกไว้เมื่อมีการทดสอบของเครื่องแสดงดังรูปที่ ก.8

Pressure at Pump in High Pressure Mode:	50000	PSI
Pressure at Pump in Low Pressure Mode:	20000	PSI
Jewel (orifice) Diameter:	0.014	inches
Mixing Tube Diameter:	0.03	inches
Abrasive Flow Rate:	0.75	Lb/min
Abrasive Size:	80	Mesh (US Standard)
Abrasive Index:	1	(Use 1.0 for garnet)

รูปที่ ก.8 การตั้งค่าสำหรับปั๊มและหัวตัด

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

2.22.3 คลิกOKเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลง

2.23 จากSetup คลิกEvent & Relay Timingให้แน่ใจว่าค่าที่ปรากฏถูกต้องสำหรับเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงแล้วคลิกOKเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ ก.9

Pump & Nozzle Configuration **Event & Relay Timing**

Timing Setup for Specific Transitions: [Note: All units are in "Seconds"]

	High Pressure	Low Pressure
Cut:		
Delay after nozzle fires before abrasive turns on:	0.2	0.2
Additional delay to allow jet to stabilize before proceeding:	0.5	0.5
Time to clear abrasive from nozzle when finished cutting:	0.5	0.5
Etch:		
Delay after nozzle fires before abrasive turns on:	0.2	0.2
Additional delay to allow jet to stabilize before proceeding to start:	0.3	0.3
Time to run nozzle after etch to clear abrasive from nozzle:	0.5	0.5
Scribe:		
Delay after nozzle fires before moving:	0.1	0.1
Water Only:		
Delay after nozzle fires before moving:	1	1
Traverse:		
Seconds to wait after shutdown before traverse:	1	1
Other:		
Pump warm up delay before first move:	3	
High pressure to Low pressure delay:	3	
Low pressure to High pressure delay:	1	

[Restore Timing to Defaults](#)

รูปที่ ค.9 แสดงการกำหนดค่าสำหรับการตัดและระยะเวลา Relay

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

หมายเหตุ : ในการกำหนดค่าสำหรับการตัดและระยะเวลา Relay ในการเริ่มต้นจะต้องปรับค่าเริ่มต้นเหล่านี้ให้ตรงกับความต้องการ

3. การกำหนดค่าซอฟต์แวร์ของ Make

3.1 เลือกแบบชิ้นงาน

3.1.1 คลิกปุ่ม Change Path Setup (หรือใช้ File/Open จากเมนู) และไปยังไฟล์ที่แบบชิ้นงานถูกจัดเก็บ

3.1.2 คลิกชื่อไฟล์ ORD เพื่อเปิดในหน้าจอแสดงตัวอย่าง

3.2 จากหน้าต่างเดียวกันก่อนหน้านี้เปิดโดยทำการคลิก Change Path Setup ดังขั้นตอนที่ 1.1 ข้างต้น เข้าค่าของ Material Setup แสดงดังรูปที่ ค.10

Enter your Material Setup here:

Material:	Granite Uba Tuba (Brazil) [414]	Machineability	413.74
Thickness:	.5	inches	
Tool Offset:	.0135	inches	
Rotation:	0	degrees	
Scale:	1	X	

รูปที่ ค.10 แสดงตัวอย่างการกำหนดค่าวัสดุ

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

4. การตัดวัสดุ

- 4.1 ย้ายหัวตัดไปนอกพื้นที่เพื่อให้มีพื้นที่ในการทำงานกว้างและเพื่อให้เกิดความปลอดภัย
- 4.2 วางวัสดุบนแผ่นรองตัดและใช้ Fixture จับวัสดุอย่างเหมาะสมเพื่อให้วัสดุมั่นคงระหว่างการตัด
- 4.3 เคลื่อนตำแหน่งของหัวตัด เพื่อเริ่มต้นการตัดและกำหนดตำแหน่งให้ Path Start Home แสดงดังรูปที่ ค.11
 - 4.3.1 เคลื่อนตำแหน่งหัวตัด เริ่มต้นการตัด

หมายเหตุ: ระยะทางตั้งแต่เริ่มต้นเส้นทางคือ Zero เสมอ ฟังก์ชันตำแหน่งหัวตัดแสดงดังรูปที่ ค.11

Nozzle Position

000	Distance from "User Home":	0.0000	0.0000	Go home
Zero				
000	Distance from "Path Start":	0.0000	0.0000	Go home
Zero				
Vector	Move X	Jog Left	Jog Right	Jog Up
				Jog Down
				Move Y
				Help

รูปที่ ค.11 แสดงฟังก์ชันตำแหน่งหัวตัด

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

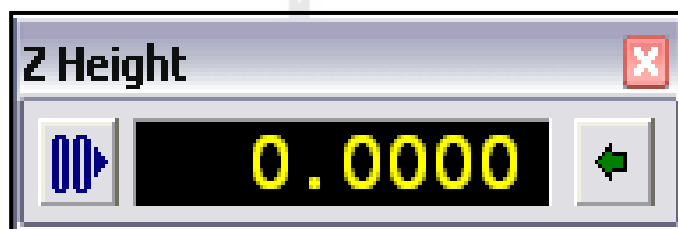
4.4 ตั้งระยะ Standoff หัวตัดบนวัสดุที่ 1.52 มิลลิเมตร และ 0 มิลลิเมตรบนแกน Z

หมายเหตุ: ควรสังเกตดู Keyboard ลัดในไฟล์ช่วยเหลือของ MAXIEM ใช้สำหรับคำสั่งการเคลื่อนไหวแกน X,Y และ Z

4.4.1 ปรับความสูงของหัวตัดไป 1.52 มิลลิเมตร (0.060 นิ้ว) บนวัสดุโดยวางมาตรวัดระหว่างหัวตัดและวัสดุที่ถูกตัดและปรับแกน Z ขึ้นหรือลง ตามความเหมาะสม

4.4.2 เมื่อปรับถูกต้องคลิก View/Show Z Coordinates เพื่อแสดงความสูงพิกัด Z แสดงดังรูปที่ ก.12

4.4.3 การกำหนดความสูง Z คลิกที่ปุ่ม 00 เพื่อตั้ง Z พิกัดที่ศูนย์



รูปที่ ก.12 แสดงความสูงแกน Z

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

4.5 ตรวจสอบเส้นทางการตัดโดย Dry Run

4.5.1 คลิกปุ่ม Begin Machining เพื่อแสดงหน้าต่างของ MAXIEM Path Control

4.5.2 คลิกขวาที่ปุ่ม Start เพื่อแสดงหน้าต่างตัวเลือก

4.5.3 คลิก Dry Run at Full (Rapid Transvers) ความเร็ว (หรือความเร็วอื่นที่เลือก) เพื่อเริ่มต้น

4.5.4 ตรวจสอบการเดินของหัวตัดผ่านวัสดุที่จะตัด ที่คาดว่าจะป็น

4.6 ยกหัวตัดให้สูงขึ้นเพื่อสวมแท่งพองน้ำ

4.7 เคลื่อนหัวตัดไปยังศูนย์ของแกนพิกัด Z คลิกลูกศรด้านขวาของแกน Z (Pop-Up)

4.8 เริ่มตัดโดยคลิก Begin Machining / Start

4.9 เมื่อทำการหยุด Machining ยกหัวตัดขึ้น ทำการล้างคราบผงทรายจากวัสดุตัดและยกชิ้นงานที่ตัดขาดออกจากเครื่อง

5. ตรวจสอบเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง ก่อนเริ่มใช้งาน

5.1 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าเมนส์

5.2 เปิดวาล์วจ่ายลม

- 5.3 เปิดวาล์วน้ำประปา
- 5.4 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าปั๊มส่งน้ำ
- 5.5 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าเครื่องทำน้ำเย็น
- 5.6 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าปั๊มแรงดันสูง
- 5.7 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะวางวัสดุ
- 5.8 Intelli-MAX Basic ซอฟต์แวร์เริ่มต้นทำงาน
- 5.9 การเคลื่อนที่ของหัวตัดให้อยู่ในตำแหน่งของศูนย์ที่ต้องการ
- 5.10 ตั้งค่าขอบเขตพื้นที่ ที่จะทำการตัด
- 5.11 ตำแหน่งของหัวตัดระหว่างแผ่นรองตัด 1-1.5 นิ้ว
- 5.12 ทดสอบหัวตัดด้วยน้ำแรงดันต่ำคลิกที่ TestLowและ Water
- 5.13 ยืนยันเจ็ทสตรีมตรงและแคบ ขณะหนีบท่อส่งผงทราย
- 5.14 จำนวนรอบและแรงดันได้ถูกปรับและตรงกับที่บันทึก
- 5.15 หยุดทดสอบหัวตัดด้วยน้ำแรงดันต่ำ
- 5.16 ทดสอบหัวตัดด้วยน้ำแรงดันสูง คลิกที่ TestHighและWater
- 5.17 ยืนยันเจ็ทสตรีมตรงและแคบขณะหนีบท่อส่งผงทราย
- 5.18 จำนวนรอบและแรงดันได้ถูกปรับและตรงกับที่บันทึก
- 5.19 บันทึกค่าแรงดันของปั๊มน้ำ
- 5.20 หยุดทดสอบหัวตัดด้วยน้ำแรงดันสูง
- 5.21 ทำการทดสอบหัวตัดด้วยน้ำแรงดันสูงและทราย โดยทำการคลิกที่ TestHighและ Water & Abrasive
- 5.22 ยืนยันเพิ่มระดับเสียงและเส้นผ่าศูนย์กลางเจ็ทสตรีม
- 5.23 หยุดทดสอบหัวตัดด้วยน้ำแรงดันสูงและทราย
- 5.24 วัดอัตราการไหลของผงทราย
- 5.25 ตรวจสอบความถูกต้อง การติดตั้งและการตั้งค่ากำหนดปั๊มและหัวตัด
- 5.26 ตั้งค่าความดันสูงและต่ำ เพื่อให้ตรงกับตัวปั๊ม
- 5.27 ยืนยันการตั้งค่าถูกต้องEvent & Relay Timing

6. เตรียมปั๊มสำหรับการใช้งาน

- 6.1 ก่อนเริ่มปั๊มแรงดันสูง
 - 6.1.1 ตรวจสอบชิ้นส่วนของปั๊มบริเวณรอบๆว่าไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆในการทำงานของปั๊มและไม่มีสิ่งกีดกัให้เกิดอันตราย

6.1.2 ตรวจสอบว่าระดับน้ำมันในปั๊มหรือCrankcase มีปริมาณเพียงพอสำหรับการทำงานแต่ละครั้ง

6.1.3 ให้ฝากรอบ ครอบทั้งสายพานและด้านบนของปั๊มเพื่อให้ปั๊มเกิดความปลอดภัย

6.1.4 ให้หัวตัดและท่อผสมติดตั้งอย่างถูกต้อง

6.1.5 ทดลองกับตำแหน่งและหน้าที่ของการควบคุมที่ระบุก่อนหน้านี้

6.1.6 เปิดวาล์วน้ำทางเข้าของที่จ่ายน้ำให้ปั๊มน้ำ

6.1.7 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าเมนส์

6.1.8 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าปั๊มน้ำ

6.1.9 กดปุ่มของสวิตช์

หมายเหตุ : ให้เปิดปั๊มน้ำก่อนในตอนเริ่มต้นเพื่อถ่ายเทอุณหภูมิระหว่างน้ำในท่อส่งและตัวปั๊มแรงดันสูงและให้อุณหภูมิของน้ำเย็นก่อนที่จะใช้งาน

6.2 การกำหนดค่าการปรับถ่ายโอนแรงดันทางเข้า

6.2.1 เปิดสวิตช์ไฟฟ้าที่บริเวณปั๊มแรงดันสูงและชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะวางวัสดุ

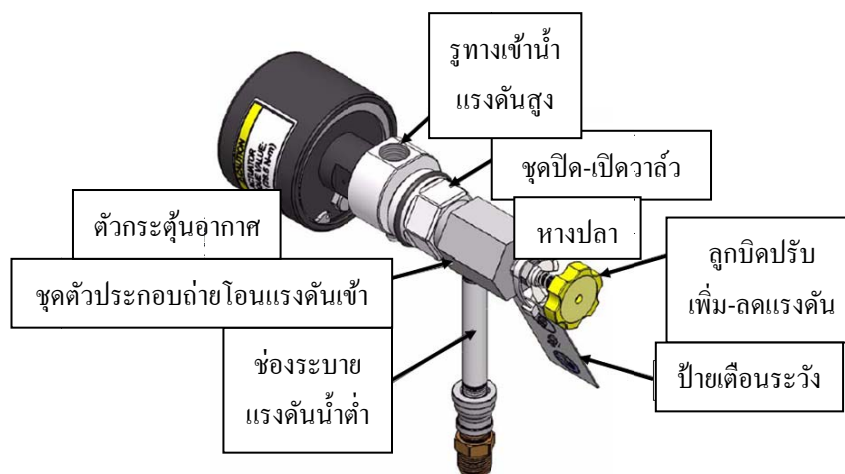
6.2.2 เปิดฝากรอบด้านบนของปั๊ม เพื่อทำการปรับแรงดันในส่วน of ลูกบิดปรับชุด ADO แสดงดังรูปที่ ค.13



รูปที่ ค.13 แสดงชุดADOภายในปั๊ม

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดด้วยวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

6.3 เพื่อให้ก้านวาล์วอยู่ตำแหน่งถูกต้อง ก่อนเริ่มปั๊ม ทำการหมุนนอตสกรูแบบปิกไปทางลูกบิดจนสปริงทำให้ติดปิกทั้งสองกับลูกบิด แสดงดังรูปที่ ค.14

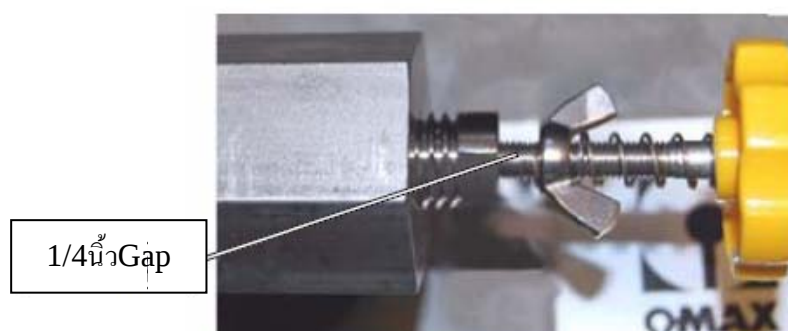


รูปที่ ค.14 แสดงชุดADOลูกบิดปรับแรงดัน

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

6.4 หลังจากนั้น หมุนลูกบิดไปทาง ชุดADOจนนอตสกรูแบบปีกสัมผัสกับชุดADO

6.5 จับลูกบิดเพื่อป้องกันการหมุนตาม และหมุนน็อตสกรูแบบปีกกลับทางกับลูกบิดประมาณ 0.635 เซนติเมตร (1/4 นิ้ว)จะมีช่องว่างสำหรับลูกบิดหากช่องว่างมีไม่เพียงพอ จะทำให้น็อตสกรูแบบปีกติดชุดADOเร็วเกินไป หากเกิดเหตุการณ์นี้ควรคลายเกลียวนอตสกรูแบบปีกออกจากชุดADOเพื่อให้ได้ระยะการปรับที่มากขึ้นแสดงดังรูปที่ ค.15

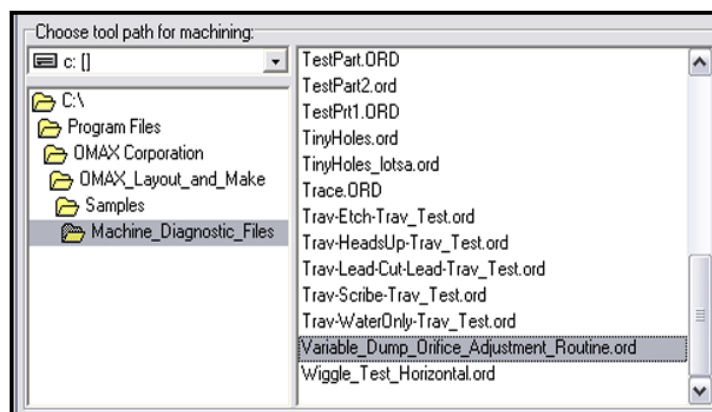


รูปที่ ค.15 แสดงการหมุนน็อตสกรูแบบปีกกลับทางกับลูกบิดประมาณ 0.635 เซนติเมตร

ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

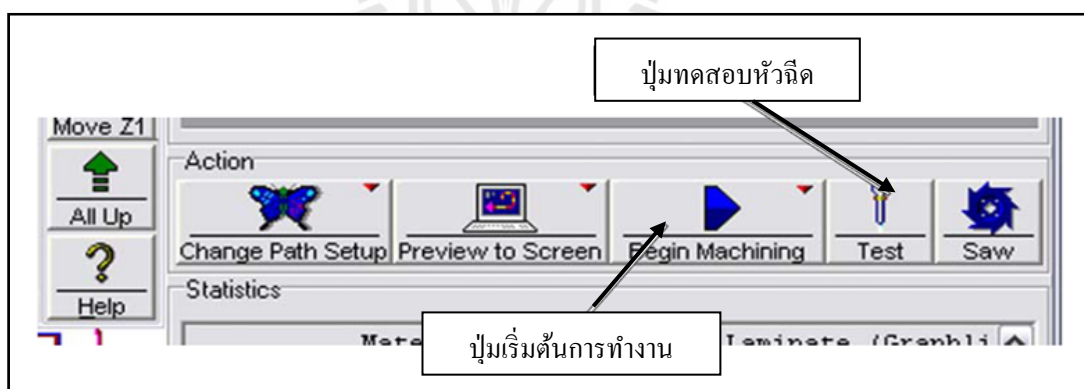
6.6 เปิดตัวซอฟต์แวร์ Make ทำการเคลื่อนตำแหน่งของหัวตัดไปยังตำแหน่งที่จะทดสอบ และทดสอบแรงดันน้ำสูงเท่านั้น

6.7 ในโปรแกรมMakeให้เลือกFile/Open (Change Path Setup)เพื่อเปิดหน้าต่าง Machine_Diagnostic_Files จากนั้นเลือกไฟล์ Variable_Dump_Orifice_Adjustment_Routine.ord แสดงดังรูปที่ ก.16



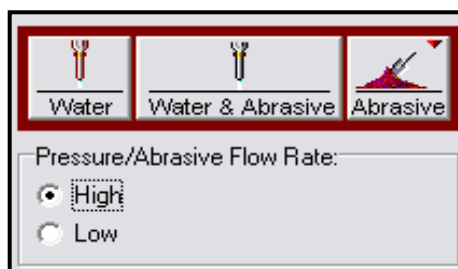
รูปที่ ก.16 แสดงการเลือกไฟล์ ORD , Variable_Dump_Orifice_Adjustment_Routine
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

6.8 คลิกOKเพื่อเลือกเปิดเพิ่ม ORDแสดงดังรูปที่ ก.17



รูปที่ ก.17 แสดงการคลิกปุ่ม Nozzle Testเพื่อปรับตั้งแรงดันปั๊ม
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

6.9 คลิกปุ่มTestเพื่อดูหน้าต่างตัวเลือกTest Pump & Nozzleแสดงดังรูปที่ ก.18



รูปที่ ก.18 แสดงหน้าต่างตัวเลือก Test Pump & Nozzle ด้วยการเลือก High
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

6.10 เลือก High สำหรับ Pressure/Abrasive Flow Rate

6.11 คลิกปุ่ม Water เพื่อให้ปั๊มและหัวตัดเริ่มทำงาน

6.12 ในแผงควบคุมที่ปั๊ม ปรับความดันเพื่อตั้งค่าการตัดให้ความดันเท่ากับ 50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ขณะทดสอบหัวใช้งาน แสดงดังรูปที่ ก.19



รูปที่ ก.19 แสดงตั้งค่าแรงดันตัดโดยใช้การปรับความดันสูงของปั๊ม
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

6.13 เมื่อต้องการลดค่าแรงดันตัดที่ต้องการ บันทึกค่านี้แล้ว คลิก STOP เพื่อหยุดการทดสอบและลดแรงดันชุดหัวตัด แสดงดังรูปที่ ก.20



รูปที่ ค.20 แสดงการคลิกปุ่ม STOP หลังจากตั้งค่าแรงดันตัดที่ต้องการ
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

6.14 ในส่วนของ Variable_Dump_Orifice_Adjustment_Routine.ord ยังคงเปิดไฟล์ใน Make ให้คลิกปุ่ม Begin Machining เพื่อดูหน้าต่าง Path Control

6.15 คลิกปุ่ม Start เพื่อเปิดใช้งานปั๊มและทราบว่าหัวตัดเริ่มทำงานตามเส้นทางของไฟล์ ORD ด้วยแรงดันน้ำสูงเฉพาะกับชุด ADO และไม่ใช่กับหัวตัด แสดงดังรูปที่ ค.21



รูปที่ ค.21 แสดงการคลิกที่ Start เพื่อการปรับถ่ายโอนแรงดันทางเข้า
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

6.16 ที่ชุดส่วนของ ADO หมุนลูกบิดปรับแรงดัน จนได้แรงดันที่ระบุไว้ในจอ LCD ที่แผงควบคุมของปั๊มเท่ากับค่าแรงดันก่อนหน้านี้ในขั้นตอนที่ 6.12 ข้างต้น

6.17 เมื่อตั้งค่าที่ถูกต้องแล้วให้ทำการกดลูกบิดที่จะป้องกันไม่ให้หมุนกลับแล้ว
กระชับน็อต

สกรูแบบปีกเพื่อล็อกลูกบิดให้อยู่ในตำแหน่ง

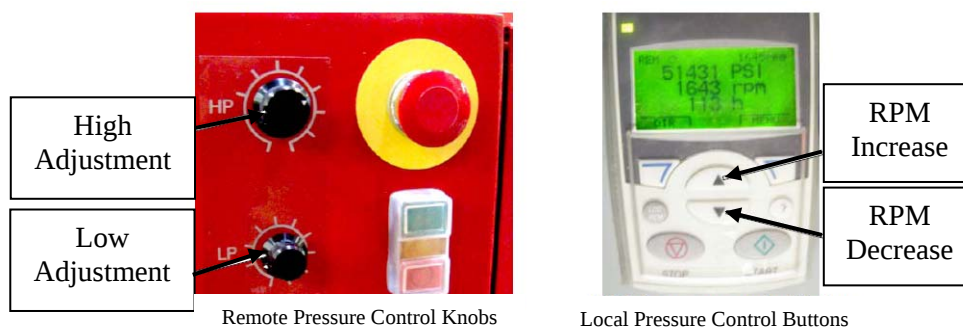
6.18 คลิกที่ปุ่ม Pause ในหน้าต่าง MAXIEM Path Control ตามด้วยการคลิก Close

6.19 ประกอบชิ้นส่วนที่ถอดและปิดฝาปั๊ม

6.20 ปรับแรงดันชุด ADO เสร็จสมบูรณ์

7. การปรับตั้งความเร็วรอบของปั๊ม

ในการปรับความเร็วรอบของปั๊ม จะกำหนดแรงดันตัดและอาจจะปรับขึ้นหรือลงโดยเลือกใช้ปั๊มของปั๊มลูกศรในขณะที่ปั๊มอยู่ในโหมด LOC(Local) หรือใช้ลูกบิดแรงดันสูงหรือแรงดันต่ำขณะที่ปั๊มอยู่ในโหมด REM (Remote) และทำการปรับตั้งความเร็วรอบของปั๊ม แสดงดังรูปที่ ค.22



รูปที่ ค.22 แสดงการการปรับตั้งความเร็วรอบของปั๊ม Local และ Remote
ที่มา : คู่มือการใช้งานเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูงรุ่น MAXIEM WaterJet Model 1530

7.1 เพื่อปรับความเร็วรอบของปั๊มเมื่ออยู่ในโหมดLOC

7.1.1 กดปุ่มLOC REM ที่เป็นกดเพื่อให้LOCปรากฏในด้านบนซึ่งปั๊มแสดงจะอยู่ มุมซ้ายมือ

7.1.2 กด Start ในปั๊มเพื่อเริ่มการทำงานของปั๊ม

7.1.3 เพื่อเพิ่มค่าแรงดันสูง-ปรากฏบนเป็นกดปุ่ม ลูกศรขึ้น

7.1.4 เพื่อลดค่าความดันสูง-ปรากฏบนเป็นกดปุ่ม ลูกศรลง

7.1.5 เมื่อเสร็จแล้วกด STOP ที่เป็นกดปุ่มปิดปั๊มแรงดันสูง

7.2 ทำการตั้งค่าความดันตัดสูงหรือแรงดันต่ำเมื่อในโหมดREM

7.2.1 ตรวจสอบว่าหัวตัดอยู่ในตำแหน่งระหว่างแผ่นรองตัด และเหนือระดับน้ำ ประมาณ 1 นิ้ว

7.2.2 กดปุ่มLOC REM ที่เป็นกดเพื่อให้LOCปรากฏในด้านบนของปั๊มแสดงอยู่ มุมซ้ายมือ

7.2.3 ในโปรแกรมMake ให้คลิกปุ่ม Test เพื่อแสดงตัวเลือก Test Pump and Nozzle

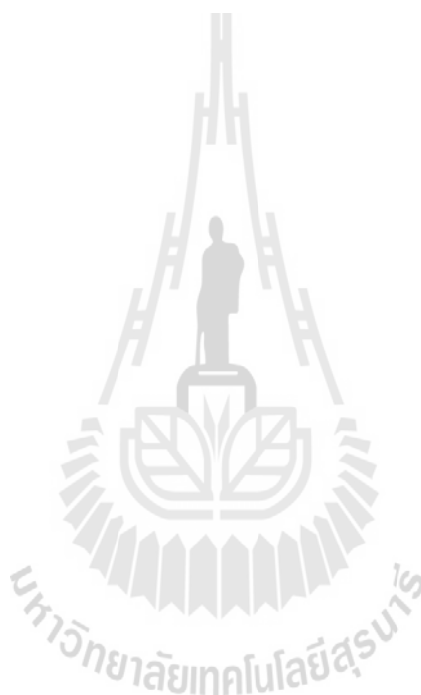
7.2.4 เลือกLow สำหรับ Pressure/Abrasive Flow Rate

7.2.5 คลิกที่ปุ่มWater เพื่อเริ่มต้นการทดสอบหัวในโหมดแรงดันต่ำ

7.2.6 ใช้ลูกบิดปรับแรงดันด้านบนแผงด้านหน้าของปั๊ม ตั้งค่าแรงดันตัดให้ได้ตามที่
ต้องการการตั้งค่านี้จะมีประโยชน์สำหรับการเจาะวัสดุเปราะหรือการแกะสลักและ
Scribing วัสดุที่ต้องลดแรงดันตัดไหมคความดันต่ำได้เปิดใช้งานเฉพาะ โดยสัญญาณ
จากซอฟต์แวร์ควบคุม ในขณะที่ปั๊มอยู่ในโหมดREM

7.2.7 ถัดไปกลับไปไปที่ปั๊มและตัวเลือกหัวตัด และเลือก Height สำหรับการทดสอบ
Abrasive ตัวเลือกFlow Rate

7.2.8 คลิกที่ปุ่มWater เพื่อเริ่มต้นการทดสอบหัวตัดในโหมดแรงดันสูง



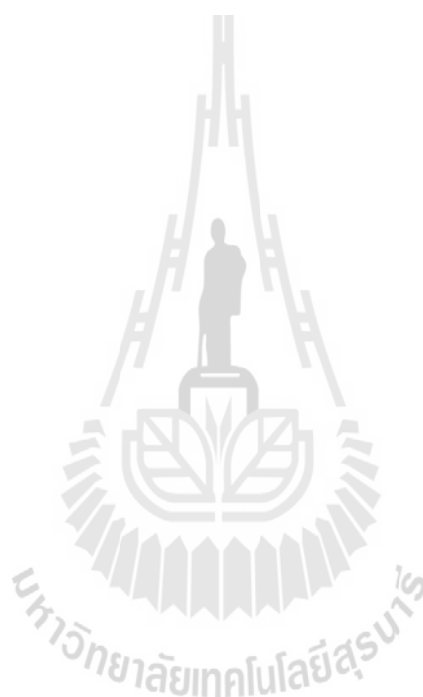
ภาคผนวก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

KongkiatPhimchat, PaphakornPitayachaval, NarongsakThammacho. (2016). **A SURFACE EFFECT OF CERAMIC CUTTING USING ABRASIVE WATERJET**. 10th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. Shibaura institute of Technology, February, 22nd – 24th, 2016, Tokyo, Japan.



A SURFACE EFFECT OF CERAMIC CUTTING USING ABRASIVE WATERJET

Paphakorn Pitayachaval^{1*}, Kongkiat Phimchat¹, Narongsak Thammachot²

¹School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, NakhornRatchasima, 30000, Thailand

²Faculty of Industrial Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, NakhornRatchasima, 30000, Thailand

*E-mail Address: Paphakorn@g.sut.ac.th

ABSTRACT This paper presents factors that effect to surface property of ceramic cutting by using an abrasive water jet. The water pressures and the ceramic thicknesses have been assigned to investigate a kerf wave, a surface roughness and a cracking of ceramic. In the experiment, the water pressures 260 MPa, 290 MPa, 320 MPa, and 350MPa were applied to cut ceramic plate with thickness 7 mm, 10 mm and 13 mm. The surface qualities were analyzed by using a scanning Electron Microscope (SEM). The results showed that there were the relationship between the water pressure and a kerf wave height.

1. INTRODUCTION

Alumina ceramic is a popular material in many industrials such as a space industry, an electrical industry and medical industry. Its main properties are heat resistant, a chemical erosion resistant and an electrical insulator. There are two forming processes for this material: a compression molding and a slip casting. Moreover, there are three cutting processes for alumina ceramic: diamond cutting, laser cutting and water jet cutting. Those three processes are compared based on cutting velocity, dimension accuracy and price.

For water jet cutting, an erosion rate had been considered to compare with model strength, material gain size and cracking (Jiyue Zeng and ThomassJ.kim, 1995). In order to determine size and radius of ceramic cracking, the water pressure and diameter of nozzle (Gi sand choi & Giheung, 1996) and the propagation have been utilized to forecast (M.wakuda, et al., 2001 and Manabu et al., 2003). A ceramic surface roughness has been also improved 30% by using a vibration nozzle technique (L.chen, et al., 1998). In order to apply water jet

to cut ceramic, the related parameters, increase pressure while reduce abrasive velocity were established to increase productively by 4% (A.A.Abdel-Rahaman & A.A.Ei - Domiaty, 1998). Moreover, a tool path planning for ceramic cutting that was cut material along same direction with the constant velocity 3.33 mm/s presented a good surface roughness (J.wany&D.M.Cuo, 2002). In order to improve process parameters for ceramic cutting using abrasive water jet technique, there are several researches that were established (P.Gudimetla, et al., 2002, Yukihiro Yamauchi & Shuzo KanZaki, 2002, J. Wang, 2006, Ushasta, et al., 2014, Derzija Beac-Hajdarevic, et al., 2014, M.Hshish, et al., 1996 and L.M. Hiavac, et al., 2009). Those researchers experimented by using alumina ceramic that was created by compression molding.

This paper presents factors that effect to surface property of ceramic cutting by using an abrasive water jet in which the ceramic is formed by slip casting. The water pressures and the ceramic thicknesses have been assigned to investigate a kerf wave, a surface roughness and a cracking of ceramic.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

There are two factors that are investigated on this experimenter: water pressure and thickness of ceramic produced by slip casting. The water pressures 260 MPa, 290 MPa, 320 MPa, and 350MPa were applied to cut ceramic plate with thickness 7 mm, 10 mm and 13 mm.

The Abrasive water jet Machining (AWJM) used in the experiment, MAXIEM Water Jet Model 1530 type, as shown in Figure 1. In this experiment, 95% alumina ceramic casting type of 150 mmx150 mm were used as specimens in the form of plates, in which the relevant properties of ceramic are listed in Table 1. The size of

specimens equal 15 mm×35 mm., as shown in Figure 2. Trial cuts were conducted at recommended rates (P.Gudimetla, et al., 2002) and the range of values for the parameters were established. The water pressure was varied between 290 and 380 MPa, in steps of 30 MPa, thickness varied between 7 and 13 mm. All other parameters were kept constant using the standard system configuration: orifice diameter = 0.25 mm., mixing tube diameter 0.7 mm, Q3 of surface quality, 80 mesh garnet sand for the abrasive, 2 mm of stand-off distance between the nozzle and workpiece 0.368 kg/min of abrasive flow rate and traverse speed at 0.265 mm/s. The cutting conditions were controlled as following: 80 mesh garnet sand for the abrasive, 2 mm of stand-off distance between the nozzle and workpiece, 0.25 mm of orifice diameter, 0.7 mm of nozzle diameter, Q3 of surface quality, 0.368 kg/min of abrasive flow rate and traverse speed at 0.265 mm/s. The surface qualities were analyzed by using a scanning Electron Microscope (SEM), as shown in figure 3.

Table 1 Material properties of the alumina ceramic

Material property	Value
High purity grades	99.5% Al_2O_3
Sintering temperature (°C)	1700
Density (g/cm^3)	3.75
High bending strength (MPa)	285



Figure 1: Abrasive water jet Machining (AWJM)

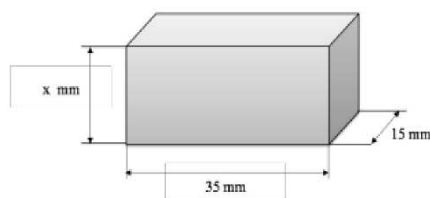


Figure 2: The size of specimens, when x is ceramic thickness



Figure 3: A scanning Electron Microscope (SEM)

3. RESULT

The shape of kerf was established in the same pattern for any cutting conditions, as shown in figure 4. The experiment results shown that the high water pressure for cutting affected to reduce kerfs and the distances between the peaks of kerfs were related with the thickness of ceramic, as shown in figure 5. Additionally, the water pressure at 320 MPa that was assigned to cut ceramic thickness 7 mm. presented the appropriate surface roughness.

4. CONCLUSION

There are the relation between the water pressure and a kerf wave height for cutting ceramic formed slip casting by using abrasive water jet Machining. The thicker ceramic presented more distance between the peaks of kerfs. However, the high of kerfs has to be determined by using Rhinoceros program as the further work.



Figure 4: Shape of kerf

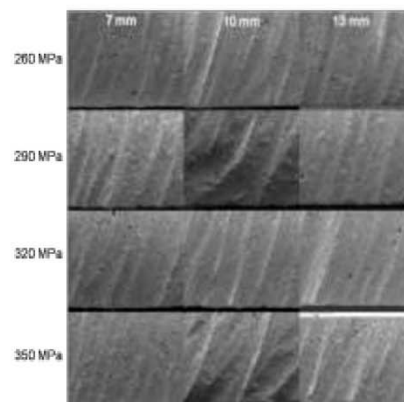


Figure 5: The results of kerfs from cutting conditions

5. ACKNOWLEDGE

This research has been supported by the research and development supporting fund, Suranaree University of Technology.

REFERENCES

A.A. Abdel-Rahman, and A.A.Ei-Domiaty, Maximum depth of cut ceramics using abrasive waterjet technique, 1998.

Derzija Begic-Hajdarevic, Ahmet Cekic, Muhamed Mehmedovic, and Almina Djelmic, Experimental study on surface roughness in abrasive waterjet cutting, 2014.

Jiyue Zeng, and Thomas J.kim, An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting, 1995.

Gi Sand Choi, and Gi Heung, Process analysis and monitoring in abrasive water jet machining of alumina ceramics, 1996.

J.Wang, and D.M.Guo, The cutting performance in multipass abrasive water jet machining of industrial ceramics, 2002.

J.Wang, Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics, 2006.

L.chen, E.Siores, and W.C.K.Wong, Optimizing abrasive waterjet cutting of alumina ceramics, 1996.

M.Hashish, D.E.Steele, and D.H.Bothell, Machining with super-pressure(690) waterjets, 1996.

M.Wakuda, Y.Yamauchi, and S.Kanzaki, Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials, 2001.

Manabu Wakuda, Yukihiko Yamauchi, and Shuzo Kanzaki, Material response to particle impact during abrasive jet machining of alumina ceramic, 2003.

Manabu Wakuda, Yukihiko Yamauchi, and Shuzo Kanzaki, Surface finishing of alumina ceramics by means of abrasive jet machining, 2002.

P.Gudimetla, J.Wong, and W.Wong, Kerf information analysis in the abrasive water jet cutting of industrial, 2002.

Ushasta Aich, Simul Banerjee, Asish Bandyopadhyay, and Probal Kumar Das, Abrasive water jet cutting of borosilicate glass, 2014.



Technology.

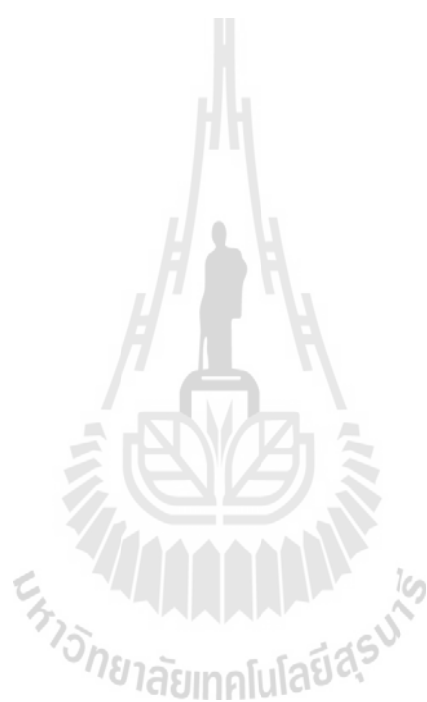
Narongsak Thammachot received the B.ENG. (1993) from Rajamangala University of Technology Isan, M.Eng.(2002) from Asian Institute of Technology, and Ph.D. (2012) from Asian Institute of Technology. He is Asst. Prof., School of Rajamangala University of Technology Isan.



Kongkiat Phimchat received The B.ENG. (2013) From Rajamangala University of Technology Isan. Currently Studying for Master Degree in Industrial Engineering, Suranaree University of Technology.



Paphakorn Pitayachava received the B.E. (1998) from Suranaree University of Technology, M.Eng. (2000) from King Mongkut's University of Technology Thonburi and Ph.D. (2009) from Asian Institute of Technology. She is Asst. Prof., School of Suranaree University of



ประวัติผู้เขียน

นายก้องเกียรติ พิมพ์ชาติเกิดเมื่อวันที่19ตุลาคมพ.ศ. 2527เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนสุขานารีจังหวัดนครราชสีมาชั้นมัธยมศึกษาปีที่1-6ที่โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัยจังหวัดนครราชสีมาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีช่างกลพิษณุพนการนครราชสีมาสาขาเทคนิคการผลิตปีที่เข้าศึกษา 2550ปีที่จบการศึกษา 2552ปริญญาตรีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมปีที่เข้าศึกษา 2553ปีที่จบการศึกษา 2556และสำเร็จการศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศไทยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมปีที่เข้าศึกษา 2557ปีที่จบการศึกษา 2559

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ10 th SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM (SEATUC) SYMPOSIUM, SHIBAURA LNSTITUTE OF TECHNOLOGY ประจำปี 2559 เรื่อง A SURFACE EFFECT OF CERAMIC CUTTING USING ABRASIVE WATERJET