

การหาค่าความหนาผิวและการสึกหรอที่เหมาะสมที่สุด
สำหรับการกัดอะลูมิเนียม A356 แบบกึ่งของแข็ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS AND
TOOL WEAR IN MILLING FOR SEMI-SOLID
A356 ALUMINUM**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Doctor of Engineering in Manufacturing Engineering**

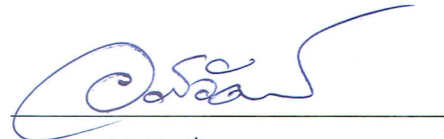
Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การหาความเหมาะสมและการเลือกที่เหมาะสมที่สุด
สำหรับการกักอะลูมิเนียม A356 แบบกึ่งของแข็ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



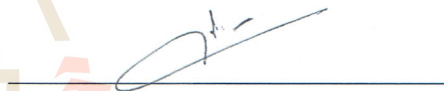
(ผศ. ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร. สมศักดิ์ สิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. วรรณนัช นุ่งสุต)

กรรมการ



(ผศ. ดร. กัญชลา สุดตาชาติ)

กรรมการ



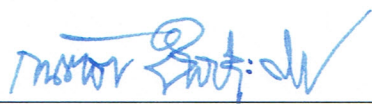
(อ. ดร. ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อุกฤษฏ์ ชนทรัพย์ทวี : การหาค่าความหยาบผิวและการสึกหรอที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกัดอะลูมิเนียม A356 แบบกึ่งของแข็ง (OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS AND TOOL WEAR IN MILLING FOR SEMI-SOLID A356 ALUMINUM) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, 173 หน้า.

ค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดเป็นตัวชี้วัดสำคัญในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ เนื่องจากค่าความหยาบผิวเป็นสิ่งที่แสดงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการสึกหรอของเครื่องมือตัดเป็นตัวชี้วัดที่สะท้อนต้นทุนการผลิต จากการเปลี่ยนเครื่องมือตัดเฉือนเพื่อรักษาระดับค่าความหยาบผิวและหลีกเลี่ยงการสูญเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนและพารามิเตอร์ของรูปทรงเครื่องมือตัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนและรูปทรงของเครื่องมือตัดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด สมการทางสถิติจะถูกสร้างเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในเทอมของพารามิเตอร์การตัดเฉือน ได้แก่ ความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟัน รวมถึงเทอมของพารามิเตอร์รูปทรงเครื่องมือตัดเฉือน ได้แก่ มุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวรัศมี ในการทดลองนี้ชิ้นทดสอบถูกขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งแบบ Gas Induce Semi Solid โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบ T6 ในการทดลองได้ออกแบบการทดลองภายใต้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ทดลองตัดเฉือนด้วยเครื่องซีเอ็นซีและดอกเอ็นมิลที่ผลิตจากคาร์ไบด์ขนาด 12 มิลลิเมตร ภายใต้กระบวนการกัดด้วยสภาวะแบบแห้งจากการทดลอง พบว่า สมการทำนายที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าความหยาบผิว และค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดระหว่าง -5.2% ถึง 12.0% และ -6.0% ถึง 5.0% ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหยาบผิวได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน, ความเร็วตัดเฉือน และมุมคายเศษ ในขณะที่พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดได้แก่ ความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟัน

UKRIT THANASUPTAWEE : OPTIMIZATION OF SURFACE
ROUGHNESS AND TOOL WEAR IN MILLING FOR SEMI-SOLID A356
ALUMINUM. THESIS ADVISOR : SOMSAK SIWADAMRONGPONG,
Ph.D., 173 PP.

END MILLING PROCESS/ALUMINUM SEMI SOLID A356/SURFACE
ROUGHNESS/TOOL FLANK WEAR/CENTRAL COMPOSITE DESIGN

Surface roughness and tool wear were well known as important indicators in metal cutting processes. Surface roughness was absolutely important factor to represent surface quality of the products. Furthermore, tool wear was also significant to reflect manufacturing cost in the view of tool changing to maintain level of surface roughness and defect avoiding. The both indicators were influenced by machining parameters and tool geometry. Accordingly, the purpose of this study was to investigate the influence of machining parameters and tool geometry on surface roughness and tool flank wear. Statistical model has been developed using central composite design to predict surface roughness and tool flank wear in term of machining parameter such as cutting speed, feed per tooth and tool geometry such as helix angle and radial rake angle. Work pieces were produced by Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) and T6 heat treatment process. CNC machining center and 12 millimeters carbide end milling cutter were conducted under dry cutting condition. From the experimental results, it was found that the surface roughness and tool flank wear could be predicted by the models with deviation between -5.2% to 12.0% and -6.0% to 5.0% respectively. The main effects that influenced to surface roughness were feed per tooth, cutting speed and radial

rake angle while tool flank wear was influenced by cutting speed and feed per tooth.



School of Manufacturing Engineering

Academic year 2018

Student's Signature อภิชัย

Advisor's Signature ~~~~~

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้ให้กำเนิด ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาตลอดมา พร้อมทั้งได้อบรมสั่งสอน แนวความคิดและการปฏิบัติตน ทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ รวมถึงหลาย ๆ กำลังใจจากญาติพี่น้อง และครอบครัวที่เป็นกำลังใจอย่างยิ่ง อีกทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทุก ๆ ท่าน ที่มีได้เอื้อนาม ทำให้ งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้ความรู้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัย และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด พร้อมทั้งขอขอบคุณคณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้โอกาสผู้วิจัยเข้ามาศึกษา รวมถึงคุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เลขานุการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย จนสำเร็จได้ในวันนี้

อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำการวิจัย.....	4
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 โลหะอลูมิเนียม.....	6
2.1.1 โลหะผสมหล่ออลูมิเนียม (3XX.XX).....	9
2.1.2 อลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356.....	9
2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง.....	11
2.3 ขั้นตอนการบ่มแข็ง (Age Hardening).....	13
2.3.1 ขั้นตอน Solution Treatment.....	13
2.3.2 ขั้นตอน Quenching.....	15
2.3.3 ขั้นตอน Aging.....	15
2.4 งานกัด.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1	อิทธิพลที่มีผลต่อการตัดเฉือน.....	17
2.4.2	เครื่องกัดซีเอ็นซี.....	20
2.4.2.1	หลักการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซี.....	20
2.4.2.2	แกนและทิศทางของเครื่องกัดซีเอ็นซี.....	22
2.4.2.3	เครื่องมือตัดสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซี.....	22
2.4.2.4	อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซี.....	24
2.5	ความหยาบผิว (Surface Roughness).....	25
2.5.1	ลักษณะของพื้นผิว.....	25
2.5.2	มาตรวิทยาการวัดความหยาบผิว.....	25
2.6	การสึกหรอในเครื่องมือกล.....	26
2.6.1	กลไกของการสึกหรอ.....	28
2.6.2	ชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด.....	29
2.6.3	ข้อกำหนดในการวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) ตามมาตรฐาน ISO 3685: 1993.....	31
2.7	การทดลองและการออกแบบการทดลอง.....	33
2.7.1	คำศัพท์ที่ควรรู้จักเกี่ยวกับการทดลอง.....	37
2.7.2	การออกแบบการทดลอง.....	36
2.7.2.1	หลักการพื้นฐานสำหรับการออกแบบการทดลอง.....	37
2.7.2.2	แนวทางในการออกแบบการทดลอง.....	38
2.7.2.3	ประเภทของการทดลอง.....	39
2.7.3	การออกแบบการทดลองแบบแฟคชั่นนัลแฟคทอเรียล	40
2.7.4	วิธีการพื้นผิวผลตอบ.....	44
2.7.5	แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต (CCD).....	46
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	57
3.1	วัสดุ (Materials).....	57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	60
3.2.1	เครื่องกัด.....	60
3.2.2	เครื่องมือตัด.....	60
3.2.3	เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน.....	61
3.2.4	เครื่องมือวัดค่าความแข็งผิวงาน.....	62
3.2.5	เครื่องทดสอบแรงดึง.....	63
3.2.6	สเปกโตรมิเตอร์.....	63
3.2.7	อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าความหยาบผิว.....	64
3.2.8	อุปกรณ์สำหรับการวัดการสึกหรอของเครื่องมือตัด.....	65
3.3	การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง.....	65
3.3.1	การทดลองเพื่อกำหนดระดับของอัตราป้อนต่อฟัน.....	66
3.3.2	การทดลองเพื่อกำหนดระดับของความเร็วตัดเนื้อ.....	66
3.4	การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเพื่อหาปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	67
3.5	การประยุกต์ใช้การออกแบบส่วนผสมกลางเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	40
3.6	การดำเนินการทดลอง.....	71
3.6.1	การเตรียมชิ้นงานก่อนดำเนินการทดลอง.....	71
3.6.2	ดำเนินการทดลอง.....	72
3.7	การวิเคราะห์ความหยาบผิว.....	73
3.8	การวิเคราะห์ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	73
4	ผลการดำเนินการวิจัย.....	76
4.1	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว.....	76
4.2	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบ ของเครื่องมือตัด.....	79
4.3	ผลการทดลองและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิว.....	81
4.3.1	การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Adequacy Checking).....	83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ ของสมการถดถอย.....	86
4.3.3	การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square).....	88
4.3.4	การวิเคราะห์ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว.....	89
4.3.5	การวิเคราะห์ผลกระทบรวมที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว.....	92
4.3.6	สร้างสมการทำนายค่าความหยาบผิว.....	97
4.3.7	การทดลองยืนยันผล.....	98
4.3.8	หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย.....	99
4.4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการสึกหรอ ที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	100
4.4.1	การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Adequacy Checking).....	102
4.4.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ ของสมการถดถอย.....	105
4.4.3	การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square).....	105
4.4.4	การวิเคราะห์ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอ ที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	107
4.4.5	การวิเคราะห์ผลกระทบรวมที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอ ที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	111
4.4.6	สร้างสมการทำนายค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	116
4.4.7	การทดลองยืนยันผล.....	117
4.4.8	หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย.....	118
4.5	หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยแบบหลายวัตถุประสงค์.....	119
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	120
5.1	ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของ เครื่องมือตัด.....	120
5.2	ผลกระทบหลักของปัจจัยต่อความหยาบผิวและค่าการสึกหรอ ที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	121

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3	ความแม่นยำของสมการทำนายค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอ ที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	122
5.4	สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอ ที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	122
5.5	สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยแบบหลายวัตถุประสงค์.....	122
5.6	ข้อเสนอแนะ.....	123
รายการอ้างอิง.....		124
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัด.....	129
ภาคผนวก ข.	ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมหล่อ แบบกึ่งของแจ้งหมายเลข A356.....	141
ภาคผนวก ค.	ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อ แบบกึ่งของแจ้งหมายเลข A356.....	143
ภาคผนวก ง.	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	146
ประวัติผู้เขียน.....		173

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สัญลักษณ์กลุ่มอุณหภูมิเหนียวหล่อผสม.....7
2.2	สัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering).....8
2.3	ค่าความเร็วตัดของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....18
2.4	ค่าอัตราป้อนสามารถดูได้จากคู่มือมาตรฐาน.....19
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัยและจำนวนเงื่อนไขการทดลอง.....43
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษาและจำนวนเงื่อนไขการทดลอง.....43
2.7	แสดงค่า α และ n_0 สำหรับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยต่างกัน.....48
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของอุณหภูมิเหนียวหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....58
3.2	ปัจจัยระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์ขึ้นกรองปัจจัยเบื้องต้น.....67
3.3	รูปแบบและลำดับขั้นการออกแบบการทดลองในการทดลอง.....68
3.4	รูปแบบและลำดับขั้นการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง.....69
3.5	ตัวอย่างตารางการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง.....70
3.6	ผลการทดสอบความแข็งของอุณหภูมิเหนียวหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6.....71
3.7	ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของอุณหภูมิเหนียวหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6.....72
4.1	การออกแบบแฟกทอเรียลสำหรับค่าความหยาบผิว.....76
4.2	วิเคราะห์ความแปรปรวนที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบของผิว.....78
4.3	การออกแบบแฟกทอเรียลสำหรับค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....79
4.4	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความสึกหรอ ที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....81
4.5	ผลการทดลองค่าความหยาบผิวจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....82
4.6	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการกำลังสองสำหรับค่าความหยาบผิว.....87
4.7	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการกำลังสองสำหรับค่าความหยาบผิวหลังปรับปรุง.....88
4.8	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความหยาบผิวหลังปรับปรุงแบบจำลอง สำหรับสมการทำนายเมื่อตัวแปรถูกเข้ารหัส.....97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความหยาบผิวหลังปรับปรุงแบบจำลอง สำหรับสมการทำนายเมื่อพิจารณาจากตัวแปรธรรมชาติ.....	98
4.10 การทดลองยืนยันผลค่าความหยาบผิว.....	99
4.11 ผลการทดลองค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจากแต่ละเงื่อนไข การทดลอง.....	101
4.12 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการกำลังสองสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ.....	106
4.13 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการกำลังสองสำหรับค่าความหยาบผิวหลังปรับปรุง....	107
4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด หลังปรับปรุงแบบจำลองสำหรับสมการทำนายเมื่อตัวแปรถูกเข้ารหัส.....	116
4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด หลังปรับปรุงแบบจำลองสำหรับสมการทำนายเมื่อพิจารณาจากตัวแปรธรรมชาติ.....	117
4.16 การทดลองยืนยันผลค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	118
ก.1 ผลการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบของการทดลองที่ 1-31 ที่จำนวนการตัดเนื่อง 20 รอบ (1 รอบ : 3,360 ตร.มม.).....	130
ก.2 ผลการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบของการทดลองยืนยันผลที่ 1-4 ที่จำนวน การตัดเนื่อง 20 รอบ (1 รอบ : 3,360 ตร.มม.).....	131
ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31.....	132
ก.4 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองยืนยันผลที่ 1-4.....	140
ข.1 ส่วนผสมทางเคมีของอูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....	142

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียม.....	10
2.2	โครงสร้างจุลภาคของโลหะกึ่งของแข็ง (ซ่าย) เปรียบเทียบกับการหล่อทั่วไป (ขวา).....	12
2.3	สมบัติของแท่งอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ตัดด้วยมือ โดยใช้แรงเพียงเล็กน้อยก็ขึ้นรูปได้.....	12
2.4	กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยวิธี Gas Induced Semi-Solid (GISS).....	13
2.5	ขั้นตอนการบ่มแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356.....	13
2.6	ความสามารถในการละลายของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมภายในเนื้อเมตริกซ์ กับอุณหภูมิ.....	14
2.7	ลักษณะของการกัด.....	16
2.8	หลักการควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล CNC.....	21
2.9	แนวแกนของเครื่องกัดซีเอ็นซี.....	22
2.10	รูปทรงของเครื่องมือตัด (ดอกกัดเอ็นมิลล์).....	23
2.11	อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools Holder).....	24
2.12	ปลอกจับ (Collet).....	24
2.13	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต.....	26
2.14	ชิปที่ถูกเหวี่ยงออกมา.....	27
2.15	การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear).....	28
2.16	การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear).....	29
2.17	การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear).....	29
2.18	ชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด.....	31
2.19	การแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear).....	32
2.20	การวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ.....	32
2.21	รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป.....	33
2.22	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล.....	41
2.23	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล.....	41
2.24	ตัวอย่างแสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25	พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ.....45
2.26	เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ.....45
2.27	ส่วนประกอบของการออกแบบเส้นทรีลคอมโพสิตที่มี 2 ปัจจัย.....47
2.28	ส่วนประกอบของการออกแบบเส้นทรีลคอมโพสิตที่มี 3 ปัจจัย.....47
3.1	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6.....58
3.2	วัสดุชิ้นงานอะลูมิเนียม A356-T6 สำหรับการทดลอง.....59
3.3	ขนาดวัสดุชิ้นทดสอบ.....59
3.4	เครื่องกัด CNC Milling ยี่ห้อ CHEVALIER รุ่น QP1620-L.....60
3.5	ดอกกัดเอ็นมิลล์ (End Mill) ยี่ห้อ Arno.....61
3.6	เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน.....62
3.7	เครื่องวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ.....62
3.8	เครื่องทดสอบแรงดึง.....63
3.9	สเปกโตรมิเตอร์.....64
3.10	อุปกรณ์วัดความหยาบผิว.....64
3.11	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....65
3.12	ผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของอัตราป้อนต่อพื้น.....66
3.13	ผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของความเร็วตัดเฉือน.....67
3.14	การกัดปาดผิวหน้าอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6.....73
3.15	การวัดค่าการสึกหรอที่มุมหลบตามมาตรฐาน ISO 3685:1993.....74
3.16	ภาพรวมของกรอบวิจัย.....75
4.1	กราฟพาเรโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว.....77
4.2	กราฟพาเรโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....80
4.3	การกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างสำหรับค่าความหยาบผิว.....83
4.4	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าที่ถูกทำนายสำหรับค่าความหยาบผิว.....84
4.5	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองสำหรับค่าความหยาบผิว.....84
4.6	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับความเร็วตัดเฉือนสำหรับค่าความหยาบผิว.....85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับอัตราป้อนต่อพื้นที่สำหรับค่าความหยาบผิว.....	85
4.8 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับมุมเกลียวสำหรับค่าความหยาบผิว.....	86
4.9 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับมุมคายเศษในแนวรัศมีสำหรับค่าความหยาบผิว....	86
4.10 ผลกระทบหลักของความเร็วตัดเฉือนที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว.....	89
4.11 ผลกระทบหลักของอัตราป้อนที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว.....	90
4.12 ผลกระทบหลักของมุมเกลียวที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว.....	91
4.13 ผลกระทบหลักของมุมคายเศษในแนวรัศมีที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว.....	91
4.14 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว.....	92
4.15 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อพื้นที่ ต่อค่าความหยาบผิว.....	93
4.16 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมเกลียวต่อค่าความหยาบผิว....	93
4.17 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมคายเศษในแนวรัศมี ต่อค่าความหยาบผิว.....	94
4.18 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อพื้นที่และมุมเกลียวต่อค่าความหยาบผิว....	95
4.19 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อพื้นที่และมุมคายเศษในแนวแกนรัศมีต่อ ค่าความหยาบผิว.....	96
4.20 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวแกนรัศมีต่อ ค่าความหยาบผิว.....	96
4.21 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อค่าความหยาบผิว.....	100
4.22 การกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ.....	102
4.23 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าที่ถูกทำนายสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ....	102
4.24 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองสำหรับค่าการสึกหรอ ที่มุมหลบ.....	103
4.25 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับความเร็วตัดเฉือนสำหรับค่าการสึกหรอ ที่มุมหลบ.....	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับอัตราป้อนต่อพื้นที่สำหรับการลิกหรือที่มุมหลบ.....	104
4.27 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับมุมเกลียวสำหรับการลิกหรือที่มุมหลบ.....	104
4.28 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับมุมคายเศษในแนวรัศมีสำหรับการลิกหรือที่มุมหลบ.....	104
4.29 ผลกระทบหลักของความเร็วตัดเฉือนที่ส่งผลต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	108
4.30 ผลกระทบหลักของอัตราป้อนที่ส่งผลต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	109
4.31 ผลกระทบหลักของมุมเกลียวที่ส่งผลต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	109
4.32 ผลกระทบหลักของมุมคายเศษในแนวรัศมีที่ส่งผลต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	110
4.33 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	111
4.34 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อพื้นที่การลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	112
4.35 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมเกลียวต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	112
4.36 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมคายเศษในแนวรัศมีต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	113
4.37 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อพื้นที่และมุมเกลียวต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	114
4.38 ผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อพื้นที่และมุมคายเศษในแนวแกนรัศมีต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	115
4.39 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวแกนรัศมีต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	115
4.40 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อค่าการลิกหรือที่มุมหลบของเครื่องมือตัด.....	118

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.41	กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอ ของเครื่องมือตัด.....	119
ค.1	โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....	144
ค.2	โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....	144
ค.3	โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....	145
ค.4	โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....	145



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมซิลิกอนถือว่าเป็นวัสดุที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากว่าเป็นวัสดุที่ใช้อย่างแพร่หลาย เพราะวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความสามารถในการหล่อขึ้นรูปได้ดี และที่สำคัญมีน้ำหนักเบา โดยเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักแล้วมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กมาก (Eguskiza et al., 2015; Lim et al., 2017) อะลูมิเนียมซิลิกอนเกรด A356 เป็นวัสดุที่มีปริมาณการใช้งานเป็นจำนวนมากในการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์, อากาศยาน และชิ้นส่วนของเครื่องจักรด้วยวิธีการหล่ออะลูมิเนียม เนื่องจากว่าเป็นวัสดุที่หล่อขึ้นรูปได้ง่าย ง่ายต่อการแปรรูป มีความแข็งและความแข็งแรงสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ไม่เป็นสนิม สามารถทำการเชื่อมได้ สามารถเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการอบชุบทำการกัดแต่งได้ง่ายและขึ้นรูปได้ดี แต่อย่างไรก็ตามในการหล่ออะลูมิเนียมทั่วไปมักพบปัญหาโพรงจากการหดตัว และรูพรุนที่เกิดจากโพรงอากาศ ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting ที่ได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทยและต่างประเทศเพื่อลดปัญหาดังกล่าวคือ การหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะมีการแข็งตัว (Gas Induce Semi-Solid) กรรมวิธีนี้เป็นกระบวนการหล่อโดยการปล่อยแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งแกรไฟต์พรุนสู่น้ำโลหะก่อนเทเข้าสู่ช่องส่งน้ำโลหะเพื่อทำการขึ้นรูป ซึ่งทำให้โลหะมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม โดยโลหะกึ่งของแข็งที่ได้เริ่มมีการแข็งตัวบางส่วนในขณะที่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ทำให้ลดการเกิดโพรงหดตัวทำให้วัสดุมีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น นอกจากนี้ทำให้อุณหภูมิของโลหะกึ่งของแข็งลดลงในขณะที่ถูกเทเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่งผลให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานนานขึ้น (Wannasin et al., 2008; Burapa et al., 2010; Elahi et al., 2016)

กระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยดอกเอ็นมิลล์เป็นการตัดเฉือนผิวชิ้นงานออกจากชิ้นงานทีละน้อยเพื่อให้วัสดุที่เหลือมีรูปร่างต่าง ๆ ตามต้องการ โดยการสัมผัสระหว่างคมตัดของเครื่องมือตัดกับชิ้นงาน ซึ่งความหนาของเศษจะมีขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราป้อน และความลึกในการกัดชิ้นงาน ในปัจจุบันกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยดอกเอ็นมิลล์โดยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling Machine) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการตัดเฉือนขึ้นรูป

ชิ้นส่วนต่าง ๆ ใน อุตสาหกรรมที่ผ่านกระบวนการผลิตอื่น ๆ มาแล้ว เช่น งานหล่อ งานตีขึ้นรูป เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถนำเนื้อของวัสดุออกได้อย่างรวดเร็ว มีความแม่นยำสูง ผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน และชิ้นงานที่มีรูปร่างได้หลากหลาย สามารถลดเวลาและต้นทุนการผลิต ที่สำคัญสามารถผลิตชิ้นงานที่ได้ผิวที่ดีก่อนที่ประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ในอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นงานเกี่ยวกับแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน ชิ้นส่วนของยานพาหนะ เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องจักร รวมไปถึงใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Subramanian et al., 2014) นอกจากนี้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเป็นอีกหนึ่งสิ่งที่มีความสำคัญมากสำหรับการตัดสินใจในเรื่องเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการตัดเฉือนวัสดุ ในอุตสาหกรรมอายุการใช้งานของเครื่องมือไม่ได้มีผลต่อการวัดความสามารถในการตัดเฉือนเท่านั้น แต่ยุคที่มีการแข่งขันสูงในอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีความจำเป็นมากในการพยากรณ์อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเพื่อมั่นใจว่าเวลาในการเปลี่ยนเครื่องมือตัดเฉือนเหล่านั้นไม่ส่งผลให้กระบวนการผลิตหยุดชะงัก ซึ่งค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดเกิดจากผลกระทบจากปัจจัยในกระบวนการตัดเฉือนและรูปทรงของเครื่องมือตัด

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า มีการศึกษาถึงค่าความเรียบผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดดูลูมิเนียมหลายชนิด แต่สำหรับอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS ยังไม่มีนักวิจัยท่านใดทำการศึกษานอกจากนี้นักวิจัยส่วนใหญ่ทำการสร้างโมเดลในการพยากรณ์ค่าความหยาบผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด โดยศึกษาเฉพาะพารามิเตอร์พื้นฐานในการตัดเฉือน เช่น ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด แต่ในโมเดลการทำงานจริง ๆ แล้วสามารถพิจารณาทั้งรูปทรงของเครื่องมือตัดและพารามิเตอร์ในการตัดเฉือน

จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ค่าความหยาบผิวงาน และการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด ในเทอมของพารามิเตอร์ในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS โดยกำหนดปัจจัย 4 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 2 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟันและความเร็วตัดเฉือน รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 2 ปัจจัย ได้แก่ มุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวรัศมี ซึ่งคาดว่าจะประโยชน์กับอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ในการเลือกใช้สภาวะกัดที่เหมาะสม เพื่อลดต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนและลดเวลาการผลิต และเพิ่มคุณภาพการผลิตได้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนที่เหมาะสมต่อของความหยาบผิว และการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการทดลองการกัดโดยใช้ เครื่องซีเอ็นซีมีลถึง 3 แกนยี่ห้อ CHEVALIER รุ่น QP1620 L

1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ อลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS

1.3.3 ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS โดยไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry Cutting) ใช้ดอกเอ็นมิล (End Mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร 2 คมตัด

1.3.4 ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบในเทอมของพารามิเตอร์ในกระบวนการกัดทั้งหมด 4 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วตัดเฉือน (Cutting Speed) และอัตราการป้อนต่อฟัน (Feed Per Tooth) รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 2 ปัจจัย ได้แก่ มุมเกลียว (Helix Angle) และมุมคายเศษในแนวรัศมี (Radial Rake Angle)

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) กำหนดขอบเขตงานวิจัย
- 3) วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อกำหนดปัจจัยและผลตอบสนอง ในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS โดยไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry Cutting)
- 4) ทดลอง เพื่อกำหนดระดับของปัจจัย
- 5) ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญ
 - เตรียมชิ้นงานทดลอง ให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 48×70 มิลลิเมตร

- ตรวจสอบการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดก่อนทดลอง ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์และประมวลภาพถ่าย ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD+Motorized

6) ทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ

- 7) บันทึกผลและวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลอง
- 8) ทดลองป้อนผลตอบที่ได้ และทำการวิเคราะห์ผลทดสอบ
- 9) สรุปผลการดำเนินงานและเสนอข้อเสนอแนะและจัดทำรายงานการวิจัย
- 10) เผยแพร่งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

- 1) อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2) ศูนย์ระบบการผลิตอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ
 - อลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS
- 2) เครื่องมือสำหรับการตัดเฉือน
 - เครื่องซีเอ็นซีมีดถึง 3 แกน ยี่ห้อ CHEVALIER รุ่น QP1620 L
 - มีดกัดประเภทเอ็นมิลล์ (End Mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร 2 คมตัด
- 3) เครื่องมือวัด
 - เครื่องวัดค่าความหยาบผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 ที่ทดสอบด้วยแผ่นเทียบมาตรฐาน Mitutoyo Ra 2.97 μm
 - เครื่องมือวิเคราะห์และประมวลภาพถ่าย ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD+Motorized

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เกิดวัฒนธรรมองค์กรนำไปสู่การประหยัดพลังงานไฟฟ้าและใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.4.2 ใช้เป็นข้อมูลหรือหน่วยงานต้นแบบสำนักงานสีเขียวให้กับหน่วยงานอื่นภายในมหาวิทยาลัย

1.4.3 ได้มาตรการหรือแนวทางปฏิบัติสำหรับการจัดทำโครงการสำนักงานสีเขียวให้เป็นสำนักงานที่ได้รับการยอมรับในด้านการประหยัดและดำเนินกิจการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย โลหะอลูมิเนียม กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง ขั้นตอนการบ่มแข็ง (Age Hardening) งานกัด ความหยาบผิว (Surface Roughness) การสึกหรอในเครื่องมือกล การทดลองและการออกแบบการทดลองซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 โลหะอลูมิเนียม

อลูมิเนียม เป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ (พยูร เกตุกราย, 2553) เช่น มีความหนาแน่นน้อยและมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูง จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และชิปนาวทู สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนต่อการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่าย และราคาไม่แพงมากนัก

อลูมิเนียมหล่อผสมตามมาตรฐานของ ASM (American Society of Metals)

ตัวเลขตัวที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุหนึ่งเป็นหลัก ดังตารางที่ 2.1 เช่น 2XX.X เป็นกลุ่มธาตุผสมของอลูมิเนียม ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

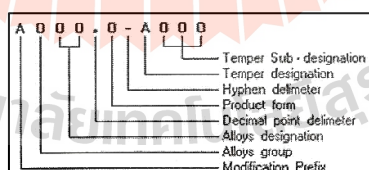
ตัวเลขตัวที่สองและสาม เป็นสัญลักษณ์แสดงอลูมิเนียมผสม ที่มีธาตุผสมชนิดอื่นผสมเข้าไปหรือแสดงอลูมิเนียมบริสุทธิ์

ตัวเลขตัวที่สี่ เป็นสัญลักษณ์ซึ่งเป็นการแบ่งตามการผลิตอย่างอื่น โดยจะใช้จุดทศนิยมแสดงการผลิต เป็นต้น เช่น การหล่อหรือจากแท่งอินกอต การปรับปรุงจากธาตุผสมเดิมหรือจำนวนสิ่งที่ปนเข้าไป แสดงโดยตัวอักษรก่อนตัวเลข ตัวอักษร “X” ใหญ่ ใช้สำหรับธาตุผสมที่ทดลองอยู่ อลูมิเนียมหล่อผสมทั่วไปจะใช้ตัวเลข 3 หลัก

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสัญลักษณ์กลุ่มอลูมิเนียมหล่อผสม (วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542)

1XX.X	อลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XX.X	ทองแดง (Copper , Cu)
3XX.X	ซิลิกอน (Silicon , Si) – ทองแดง (Copper , Cu) – แมกนีเซียม (Mg) ซิลิกอน (Silicon , Si) – แมกนีเซียม (Magnesium , Mg) ซิลิกอน (Silicon , Si) – ทองแดง (Copper , Cu)
4XX.X	ซิลิกอน (Silicon , Si)
5XX.X	แมกนีเซียม (Magnesium , Mg)
7XX.X	สังกะสี (Zinc , Zn)
8XX.X	ดีบุก (Tin , Sn)
9XX.X	ธาตุอื่นๆ (Other Element)
6XX.X	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

American Aluminum Association Casting Alloys ได้กำหนดมาตรฐานและแยกประเภทอลูมิเนียมหล่อผสมตาม (American National Standard Institute) ANSI Standard ได้ ดังนี้



A : อักษรตัวแรก หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum Alloy) แม้ว่าส่วนผสมจะแตกต่างกัน

O : Alloy group จะเป็นตัวเลขตัวเดียวจาก 1 ถึง 9 ใช้เป็นตัวกำหนด ธาตุหลักของ Alloys หรือ Major Alloying

OO : Alloys designation เป็นตัวเลข 2 หลัก กำหนดความแตกต่างของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลขที่กำหนดเหมือนกับ Major Alloy ในบางครั้งตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณ % ไม่น้อยกว่าของ Al ที่มีผสมอยู่ เช่น 190.X เท่ากับ Al ผสมอยู่ 99.90%

.O : ตัวเลขหลังจุดทศนิยม หมายถึง รูปแบบการผลิต หรือ Product Form เป็นตัวเลขหลักเดียว คือ .O : เป็น Casting Specification

.1 : เป็น Ingot Specification

.2 : เป็น Ingot Specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า .1 Ingot Specification

A : Temper designation เป็นตัวกำหนดแทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการ Heat Treatment ที่ใช้กับ Heat Treatable Alloys ดังนี้

F : As Cast Condition หมายถึง งานจากสภาพหล่อ โดยไม่ต้องใช้ กรรมวิธีใด ๆ ควบคุมภายหลังการหล่อขึ้นรูป

H : Strain Hardened หมายถึง สภาพของงานแข็งตัวเอง เนื่องจาก ความเครียด จากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่าง ๆ

O : Anneal หมายถึง การอบอ่อน ใช้กับงานหล่อ ที่ต้องนำไปอบ เพื่อปรับปรุงขนาดรูปร่างให้คงที่ (Stability) ขณะใช้งาน หรือเพื่อทำให้เพิ่มความเหนียว (Ductility)

W : Solution Heat Treat เป็นการอบเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็น สารละลายของแข็ง เฟสเดียวใช้กับ Alloys ที่สามารถชุบแข็งด้วยตนเองได้ในบรรยากาศปกติ

T : เป็นการอบด้วยความร้อน โดยกำหนดกรรมวิธี Temper ที่แน่นอนดีกว่า F หรือ O การกำหนดกรรมวิธี “F”, “O” และ “T” ทุกกระบวนการ สามารถหล่อด้วย แบบทรายและแบบเหล็ก

OO : Temper Sub-designation เป็นตัวเลขระบุกรรมวิธีทำ Temper ที่ชัดเจนโดยระบุอุณหภูมิและเวลา

O : ช่วงเวลาปฏิบัติ การที่แยกละเอียดไปได้อีก 10 วิธีการจาก T1 ถึง T10 และส่วนปลีกย่อยอีก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering) (วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542)

T1	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงตามปกติในบรรยากาศปกติและบ่มแข็งด้วยตนเอง (Naturally Aged) โดยธรรมชาติและสภาพงานไม่เปลี่ยนแปลง
T2	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งแรงจะเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิปกติ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นขณะใช้งาน
T3	นำงานไปทำการอบละลาย (Solution Heat Treated) แล้วปล่อยให้งานเย็นตัวลง แล้วทำ Naturally Aged โดยทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศจะเกิดความแข็งแรงเอง Strain Hardening
T4	ทำ Solution Heat Treated และ Naturally Aged เพื่อให้ความแข็งแรงคงตัว

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering) (วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542) (ต่อ)

T5	ปล่อยให้งานค่อย ๆ เย็นตัวลงในสภาพเดิม แล้วนำไปทำการบ่มแข็งเทียม (Artificially Aged)
T6	เป็นการทำ Solution Heat Treated , Quenching แล้วทำ Artificially Aged
T7	เป็นการทำ Solution Heat Treatment และ Stabilized
T8	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged
T9	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Artificially Aged แล้วนำมาทำ Cold Worked
T10	เป็นการให้งานเย็นตัวตามปกติ แล้วนำไปขึ้นรูป Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged

2.1.1 โลหะผสมหล่ออลูมิเนียม (3XX.XX)

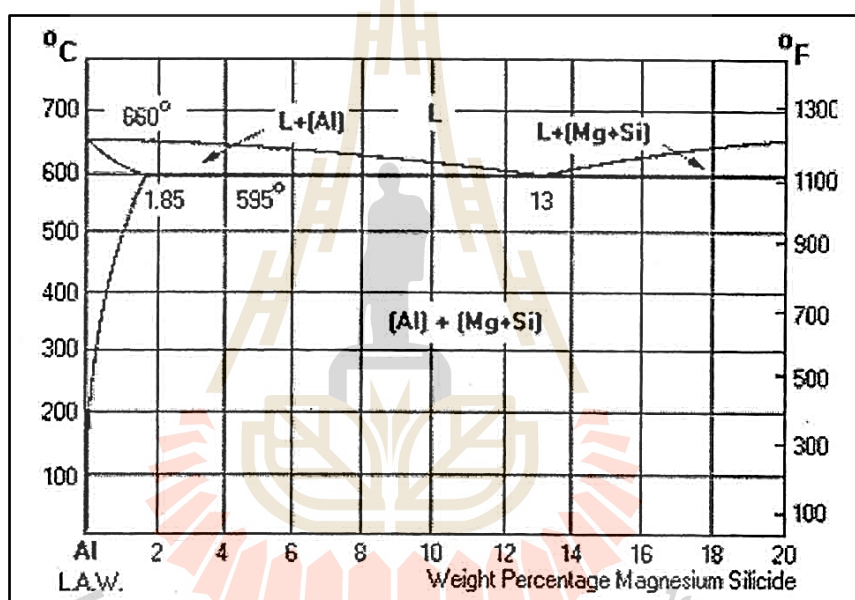
โลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอนเป็นโลหะผสมที่มีความสามารถในการไหลดีทำให้ งานหล่อเป็นรูปได้ง่าย และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีจึงเป็นวัสดุที่ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม (Eguskiza et al., 2015; Lim et al., 2017)

จากแผนภูมิสมดุลภาคของอลูมิเนียม-ซิลิกอน ดังรูปที่ 2.1 โดยจะมีลักษณะเด่นชัด ที่ซิลิกอนแยกตัวไม่ละลายในอลูมิเนียม โดยเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 577 °C และมีส่วนผสม ของซิลิกอน 11.6% การแยกตัวให้ปฏิกิริยายูเทคติกจากโลหะหลอมเหลว 11.6% ซิลิกอน จะให้ เฟส α ที่มี 1.65% ซิลิกอน เฟส Si มีสมบัติที่แข็งและเปราะ ถ้าในโครงสร้างมีการตกผลึกของ เฟส Si ขนาดใหญ่จะมีลักษณะต่อเนื่อง มีผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำและขาดสมบัติด้าน ความเหนียว การปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะผสมสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น เพิ่มอัตรา การเย็นตัวภายในแบบหล่อให้สูงขึ้น เพิ่มปริมาณนิวเคลียสของการแข็งตัวเพื่อลดขนาดเกรนให้เล็ก ลงหรือใช้เทคนิคโมดิฟิเคชัน (Modification)

2.1.2 อลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356

อลูมิเนียมหล่อผสมหมายเลข A356 เป็นโลหะผสม อลูมิเนียม-ซิลิกอนแบบ ไฮโปยูเทคติก วัสดุชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปชิ้นส่วนด้วยวิธีการหล่อแบบฉีด และสามารถหล่อได้ดีทั้งในแบบทรายและแบบโลหะ ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสม หมายเลข A356 เป็น Al, 7% Si, 0.35% Mg, 0.20% Fe, 0.20% Cu, 0.10% Mn, 0.10%Zn และ 0.230% Ti การที่มี Si เป็นสารประกอบทำให้มีความสามารถในการไหลตัวได้ดีและการหดตัว

น้อยมาก นอกจากนี้การเติมแมกนีเซียมลงไปเล็กน้อย ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โดยการฟอร์มเฟส Mg_2Si ในเมตริกซ์ของอลูมิเนียม กระบวนการทางความร้อนที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ชนิด T6 คือการนำชิ้นงานไปอบละลายแล้วนำไปชุบน้ำจากนั้นจึงนำไปทำการบ่มแข็งเทียม ซึ่งสรุปได้ว่าวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการทางความร้อนได้ และที่สำคัญวัสดุชนิดนี้มีน้ำหนักเบา (Zhang et al., 2012; Elshalakany et al, 2014; Elahi et al., 2016) ดังนั้นอะลูมิเนียม A356-T6 จึงนิยมนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอากาศยาน และชิ้นส่วนเครื่องจักรต่าง ๆ



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียม (วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542)

โลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้นได้ด้วยวิธีการอบชุบความร้อน แต่เมื่อเติมแมกนีเซียมหรือทองแดง จะเกิดการรวมตัวให้เฟสกับโลหะ เช่น Mg_2Al_3 หรือ $CuAl_2$ ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T5 ที่ประกอบด้วยกระบวนการบ่มแข็งเทียมหรือ T6 ที่ประกอบด้วย 3 กระบวนการ ดังนี้

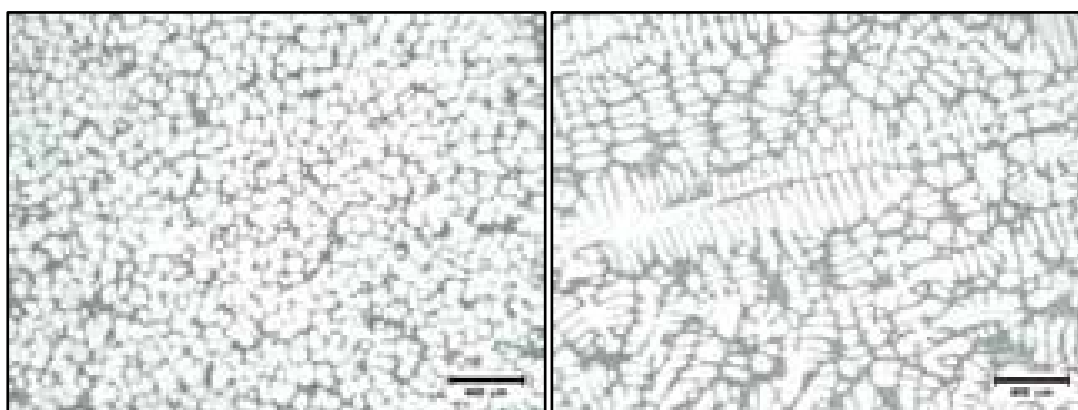
1. การอบละลาย (Solution Treatment) เป็นการอบเพื่อละลายเฟสที่สอง เช่น Mg_2Si หรือ $CuAl_2$ ให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็งและมีการแพร่อย่างทั่วถึงทั้งชิ้นงาน โดยอุณหภูมิและเวลาของการอบละลายขึ้นอยู่กับหมายเลขและขนาดของโลหะผสมเป็นหลัก

2. การชุบเย็น (Quenching) เพื่อให้ธาตุ Mg และ Cu ที่ละลายเป็นสารละลายของแข็งในกระบวนการแรก ยังคงอยู่ในสถานะสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำโลหะผสมจากกระบวนการที่ 1 มาทำให้เกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปสารละลายของแข็งที่มีสถานะอัมคัวยังขาดและพร้อมที่จะตกตะกอนออกมาเมื่อนำมาผ่านกระบวนการขั้นที่ 3

3. การบ่มแข็ง (Aging) เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สองในโลหะที่มีความละเอียดมาก และช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ การบ่มแข็งอาจทำได้ โดยการวางชิ้นงานไว้ใน อุณหภูมิห้องเรียกว่า การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural aging) หรือนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน เรียกว่า การบ่มแข็งเทียม (Artificial aging) โดยอุณหภูมิของการบ่มแข็งที่ขึ้นอยู่กับหมายเลขของโลหะผสม และเวลาของการบ่มแข็งที่ให้ความแข็งแรงสูงสุดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการบ่มแข็ง

2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง

กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1970 ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (MIT) หลังจากนั้นก็ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้คิดค้นพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งขึ้นมาเช่น NRC, SSR, RDC, H-NCM, CRP, SEED และ SLC (Thanabumrungkul, 2010) รวมถึงกระบวนการผลิตโลหะแบบกึ่งของแข็งแบบ GISS ที่คิดค้นโดยนักวิจัยชาว ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปทำได้ด้วยการหล่อโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างแบบก้อนกลม ดังรูปที่ 2.2 (ซ้าย) ลงในแม่พิมพ์แทนการหล่อด้วยน้ำโลหะ โดยโครงสร้างเมื่อแข็งตัว ดังรูปที่ 2.2 (ขวา) สมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์ มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว ทำให้ไม่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมาก ดังแสดงได้จากการตัดแท่งอะลูมิเนียมด้วยมือได้ในสถานะที่เป็นโลหะกึ่งของแข็ง ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการทั้งเรื่องการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ลดการเกิดฟองอากาศและลดการเกิดโพรงหดตัว รวมไปถึงการลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เช่น การลดระยะเวลาในการผลิต, ลดพลังงาน, การลดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้า และช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์

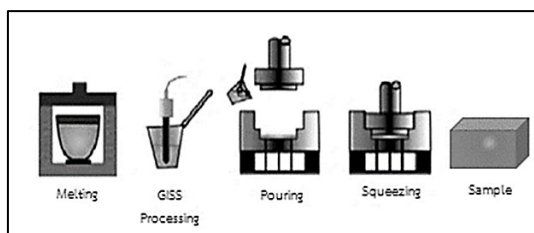


รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะกึ่งของแข็ง (ซ้าย) เปรียบเทียบกับการหล่อทั่วไป (ขวา)
(เจษฎา วรรณสินธุ์, 2554)



รูปที่ 2.3 สมบัติของแท่งอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ตัดด้วยมือ โดยใช้แรงเพียงเล็กน้อยก็ขึ้นรูปได้
(เจษฎา วรรณสินธุ์, 2554)

จากปัญหาดังกล่าวที่มิวิจัย Innovative Metal Technology (MT) ได้คิดค้นกระบวนการใหม่ที่มีชื่อเรียกว่า “กระบวนการ Gas Induced Semi-Solid” หรือ “GISS” ที่ใช้เทคนิคใหม่ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการปล่อยฟองแก๊สที่ละเอียดมากผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนในน้ำโลหะขณะที่มีการแข็งตัวบางส่วน ดังรูปที่ 2.4 ทำให้กระบวนการใหม่นี้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ง่ายและผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีคุณภาพสูงได้ดี ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องต้นแบบของกรรมวิธี GISS ที่สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพในราคาที่ถูกลงกว่าเครื่องจักรที่นำเข้าจากต่างประเทศหลายสิบเท่า

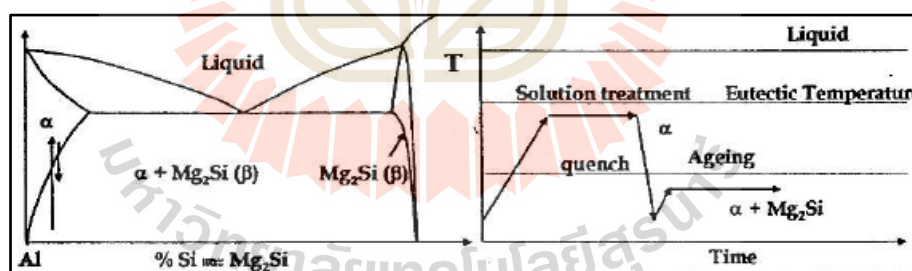


รูปที่ 2.4 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยวิธี Gas Induced Semi-Solid (GISS)

(Burapa et al., 2010)

2.3 ขั้นตอนการบ่มแข็ง (Age Hardening)

โลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอนชนิดเกรด A356 ถูกนำมาเพิ่มความแข็งแรงจากสภาวะหล่อด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (Age Hardening) โดยทำให้เกิดอนุภาคนาโนเล็กของเฟสที่สอง (Secondary Phase) นั่นคือ อนุภาค Mg_2Si กระจายตัวอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ (เฟส) โดยอนุภาค Mg_2Si ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำหน้าที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ด้วยกลไก Cutting และ Bowing ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งขั้นตอนการบ่มแข็งประกอบด้วยกระบวนการอบชุบ 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.5

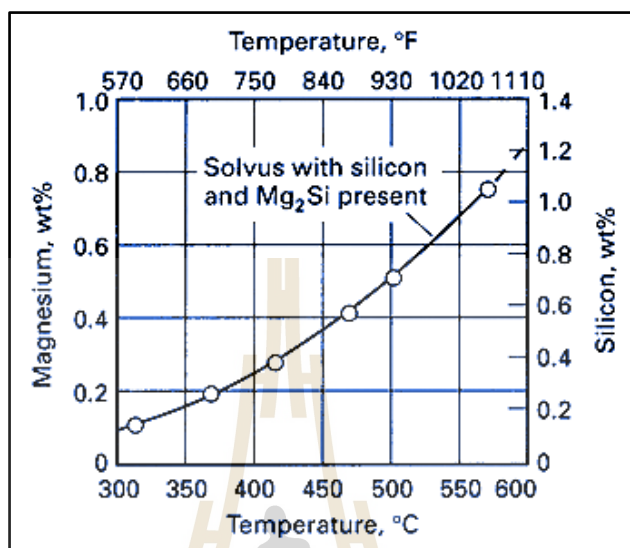


รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการบ่มแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรด A356

2.3.1 ขั้นตอน Solution Treatment

โลหะอลูมิเนียมหล่อผสมเกรด A356 จะมีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญคือ อลูมิเนียม, ซิลิคอน และแมกนีเซียม ซึ่งผลจากอัตราการเย็นตัวขึ้นทดสอบในสภาวะหล่อจะเกิดการ Segregation ของแมกนีเซียมและซิลิคอนอยู่ในรูปของเฟส Mg_2Si ที่มีขนาดใหญ่และซิลิคอนที่เหลือจะอยู่ในรูปเฟส Eutectic Silicon เมื่อขึ้นทดสอบผ่านการทำ Solution Heat Treatment ด้วยการ

อบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูงพบว่าการละลายของเฟส Mg_2Si ทำให้ซิลิคอนและแมกนีเซียมละลายเข้าสู่ในโครงสร้างอลูมิเนียม



รูปที่ 2.6 ความสามารถในการละลายของธาตุซิลิคอนและแมกนีเซียมภายในเนื้อเมตริกซ์กับอุณหภูมิ (Cerri E et al., 2000)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอนหล่อเกรด A356 จากเฟสไดอะแกรมของอลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียมซิลิไซด์พบว่า อุณหภูมิในการแข็งตัวของเฟสแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งเรียกว่าการเกิด Segregation จากเฟสไดอะแกรมพบว่า เมื่อน้ำอลูมิเนียมหลอมเหลวผ่านอุณหภูมิ 615°C จะเริ่มเกิดเฟสของแข็ง เรียกว่า “เฟส $\alpha\text{-Al}$ ” ซึ่งจะเริ่มแข็งตัวก่อนและมีลักษณะรูปร่างคล้ายกิ่งไม้ ที่เรียกว่า “Dendrite” โดยเฟส $\alpha\text{-Al}$ ที่เกิดขึ้นมีปริมาณซิลิคอนและแมกนีเซียมที่สามารถละลายได้น้อยมาก เมื่อเฟส $\alpha\text{-Al}$ เติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้น้ำอลูมิเนียมหลอมเหลวมีปริมาณของธาตุซิลิคอน และแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ตามระหว่างแขน Dendrite ทำให้ชิ้นทดสอบจะอยู่ในสภาวะกิ่งของแข็งกิ่งของเหลว จนกระทั่งเมื่อขึ้นทดสอบเย็นตัวผ่านอุณหภูมิ 577°C จะมีเฟส Eutectic Silicon เกิดขึ้นและเป็นบริเวณที่เย็นตัวสุดท้าย ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีภายในโครงสร้างของชิ้นงาน

โดยขั้นตอน Solution Treatment คือ ขั้นตอนการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้างผลึกเกิดการแพร่ของอะตอมจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำได้รวดเร็วขึ้น โดยการให้ความร้อนกับโลหะผสม

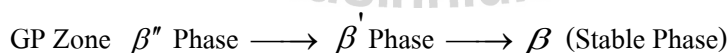
อลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356 จนกระทั่งอุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับ 520-550 °C เป็นระยะเวลา 4-12 ชั่วโมง ทำให้อะตอมของตัวถูกละลายเกิดการละลาย อาทิ เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียม ละลายเข้าสู่ตัวทำละลายคือ เฟส α -Al เพื่อทำให้เนื้อเมตริกซ์มีความเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลาย โดยอาศัยการแพร่ของอะตอมในโครงสร้างซึ่งเป็นการแพร่แบบแทนที่ จากเฟสไดอะแกรมพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานให้สูงขึ้นส่งผลทำให้อะตอมต่าง ๆ ภายในโครงสร้างมีพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดโอกาสในการเกิดช่องว่างภายในโครงสร้างของผลึกซึ่งเรียกว่า “วาแคนซี (Vacancy)” ได้มากขึ้น โดยวาแคนซีที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้อะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมสามารถแพร่แบบแทนที่เข้าสู่เนื้อเมตริกซ์ได้รวดเร็วขึ้น

2.3.2 ขั้นตอน Quenching

โดยการชุบชิ้นทดสอบที่ผ่านขั้นตอน Solution Treatment ในน้ำที่มีอุณหภูมิในช่วง 25-60 °C ทำให้อะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมที่ละลายเข้าสู่เฟส ในระหว่างขั้นตอน Solution Treatment ไม่มีระยะเวลาเพียงพอที่จะแพร่ออกจากเฟสจึงตกค้างภายในเนื้อเมตริกซ์ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Super Saturated Solid-Solution)

2.3.3 ขั้นตอน Aging

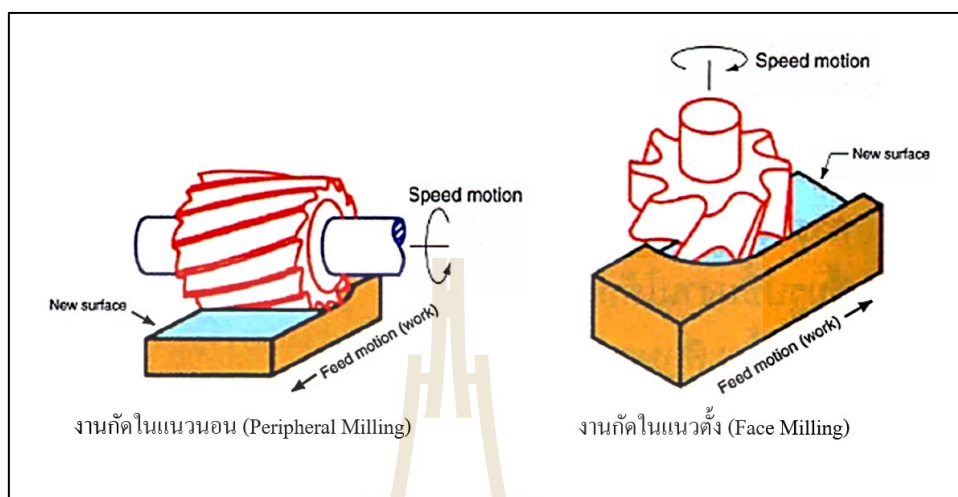
โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ 120-200 °C เป็นระยะเวลา 3-24 ชั่วโมง หลังจากผ่านขั้นตอน Quenching ในขั้นตอน Aging จะเกิดการแพร่ของอะตอมซิลิกอนและแมกนีเซียมออกจากเฟสไปรวมตัวกัน และเกิดเป็นกลุ่มอนุภาคของเฟสใหม่ที่เรียกว่า “อนุภาค Mg_2Si ” และอนุภาคที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรและกระจายตัวในเนื้อเมตริกซ์ โดยอุณหภูมิและระยะเวลาในขั้นตอน Aging มีผลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมที่จะฟอร์มตัวกันเป็นอนุภาค Mg_2Si โดยกลไกการเกิดเฟสใหม่เป็นไปตามปฏิกิริยา Precipitation Hardening ดังนี้



2.4 งานกัด

การกัด (Milling) คือ การตัดเฉือนวัสดุที่เครื่องมือตัดหมุนรอบตัวเองอยู่กับที่ จากนั้นเลื่อนโต๊ะงานที่ใช้จับชิ้นงานให้เคลื่อนที่เข้าไปหาเครื่องมือตัดเพื่อให้เครื่องมือตัดที่กำลังหมุนอยู่นั้นตัดเฉือนวัสดุตามรูปร่างที่ต้องการ โดยเครื่องมือตัดจะหมุนและเคลื่อนที่ช้า ๆ สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ทำให้เกิดระนาบของผิวงานใหม่ ทิศทางการป้อน (Feed Direction) ของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนการหมุนของเครื่องมือตัด ในขณะที่การหมุนของเครื่องมือตัดถูกกำหนดด้วยความเร็ว

(Speed) การกัดขึ้นรูปมีหลายประเภท แต่จำแนกการกัดเป็น 2 ชนิดใหญ่ คือ งานกัดในแนวนอน (Peripheral Milling) และงานกัดในแนวตั้ง (Face Milling) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะของการกัด (อำนาจ ทองแสน, 2559)

ขั้นตอนหลักในกระบวนการกัดเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือน (Shear Deformation) ทำให้เกิดเศษตัด (Chip) เมื่อเศษตัดถูกกัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวชิ้นงานใหม่ กระบวนการกัดนี้ใช้ในการผลิตชิ้นงานให้ตามรูปร่างที่ต้องการและถือว่าเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง

เหตุผลที่กระบวนการกัดมีความสำคัญมากในเชิงพาณิชย์และเชิงเทคโนโลยีสามารถสรุปได้ดังนี้

- สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางกับวัสดุหลายประเภท โดยส่วนใหญ่ใช้ได้กับโลหะแข็งรวมถึง พลาสติกและพลาสติกผสม
- สามารถใช้ในการทำชิ้นงานที่มีรูปร่างหลากหลาย รวมถึงชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยการใช้วิธีการกัดหลาย ๆ แบบและหลาย ๆ ขั้นตอนตามรายละเอียดชิ้นงาน
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดความคลาดเคลื่อนหรือพิสัยความเผื่อ (Tolerance) น้อยกว่า 0.001 นิ้ว (0.025 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่ากระบวนการผลิตส่วนใหญ่
- มีความสามารถผลิตผิวสำเร็จ (Surface Finish) ของชิ้นงานให้มีความเรียบ 16 μin (0.4 μm) หรือดีกว่า

ด้วยคุณสมบัติเบื้องต้น กระบวนการกัดจึงมักนิยมใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบอื่น ๆ มาแล้ว เช่น งานหล่อ (Casting) หรือการขึ้นรูปขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น การตีขึ้นรูป (Forging) โดยรูปร่างทั่วไปของชิ้นงานจะถูกผลิตโดยกระบวนการอื่นและใช้กระบวนการกัดในการผลิตชิ้นงานสำเร็จให้มีขนาดรูปร่างที่ถูกต้องและมีผิวงานตามที่ต้องการ

2.4.1 อิทธิพลที่มีผลต่อการตัดเฉือน

ผู้ปฏิบัติงานจะต้องมีความรู้ในทฤษฎีของการตัดเฉือน พิจารณา ก. ความเร็วตัด (Cutting Speed), ข. ความเร็วรอบ (Speed), ค. อัตราป้อน (Feed Rate) และ ง. ความลึกของการตัด (Depth of Cut) ซึ่งจะต้องสัมพันธ์กับเครื่องจักรด้วยและข้อมูลต่าง ๆ เช่น ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุชิ้นงาน ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุเครื่องมือตัด เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน เพราะจะต้องนำค่าต่าง ๆ มาคำนวณ เพื่อจะนำไปป้อนค่าต่าง ๆ ลงในโปรแกรม CNC เพื่อที่จะนำข้อมูลไปป้อนลงในเครื่องกัด ต่อไป

ก. ความเร็วตัด (Cutting Speed)

ความเร็วตัด คือ ความเร็วตามแนวเส้นรอบวงของเครื่องมือตัดที่สามารถตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานออกได้เป็นระยะทางภายในหนึ่งหน่วยเวลา การเลือกค่าความเร็วตัดนั้นต้องพิจารณาปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุชิ้นงาน ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุเครื่องมือตัด อัตราป้อน ความลึกของการตัด คุณภาพหรือความหยาบผิวงานที่ต้องการ และประสิทธิภาพของเครื่องกัด เป็นต้น โดยความเร็วตัดจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (2.1)$$

โดยที่

V_c	คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)
π	คือ ค่าพาย เป็นค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 3.14
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกสว่านหรือดอกเจาะ (มิลลิเมตร)
N	คือ ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

สำหรับค่าความเร็วตัดของวัสดุแต่ละชนิดนั้น สามารถดูได้จากตารางที่ 2.3 หรือคู่มือในการตัดเฉือนของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งในทางปฏิบัติมักจะนำค่าความเร็วตัดจากตารางไปคำนวณหาความเร็วรอบของเครื่องมือตัดอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 2.3 ค่าความเร็วตัดของวัสดุชนิดต่าง ๆ (อำนาจ ทองแสน, 2559)

ชนิดของวัสดุ	ความเร็วตัด	
	เครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel Cutting Tool)	เครื่องมือตัดคาร์ไบด์ (Carbide Cutting Tool)
เหล็กกล้าใช้งานทั่วไป	21 - 30	45 - 75
เหล็กกล้าเครื่องมือ	18 - 20	40 - 60
เหล็กหล่อ	15 - 25	40 - 60
โลหะผสมทองแดงและดีบุก	20 - 35	60 - 120
อลูมิเนียม	150 - 300	300 - 600

ข. ความเร็วรอบ (Speed)

ความเร็วรอบ คือ จำนวนรอบหรือความเร็วรอบของเครื่องมือตัดที่หมุนไปได้ภายในหนึ่งหน่วยเวลา (นาที) โดยความเร็วรอบของเครื่องมือตัดจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วตัดของและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัดเป็นหลัก โดยความเร็วรอบจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (2.2)$$

โดยที่

- V_c คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)
 π คือ ค่าพาย เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 3.14
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกสว่านหรือดอกเจาะ (มิลลิเมตร)
 N คือ ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

ค. อัตราป้อน (Feed Rate)

อัตราป้อน คือ ระยะที่คมตัดของเครื่องมือตัดที่เคลื่อนที่เข้าตัดเนื้อชิ้นงานภายในหนึ่งหน่วยเวลา (นาที) อัตราป้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพหรือความหยาบผิวงาน และระยะเวลาในการตัดเนื้ออีกด้วย โดยอัตราป้อนจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$V_f = f_z \times Z \times N \quad (2.3)$$

โดยที่

- V_f คือ อัตราป้อน (มิลลิเมตร/นาที)
 f_z คือ อัตราป้อนต่อฟัน (มิลลิเมตร/ฟัน)
 Z คือ จำนวนฟันของเครื่องมือตัด
 N คือ ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

การเลือกใช้อัตราป้อนในงานกัด ต้องพิจารณาจากปัจจัยที่สำคัญ เช่น ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุชิ้นงาน ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุเครื่องมือตัด อัตราป้อน ความลึกและความกว้างของการตัด รูปร่างของเครื่องมือตัด ความแข็งแรง ความเที่ยงตรง ความหนาผิวงานที่ต้องการ ประสิทธิภาพของเครื่องกัด การจับยึดชิ้นงาน และการติดตั้งเครื่องมือตัด เป็นต้น

สำหรับค่าอัตราป้อนสามารถดูได้จากคู่มือมาตรฐาน ซึ่งค่าอัตราป้อนจะขึ้นอยู่กับข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุชิ้นงานและข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุเครื่องมือตัด ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าอัตราป้อนสามารถดูได้จากคู่มือมาตรฐาน

ชนิดของวัสดุ	ชนิดของเครื่องมือตัด					
	Face Mill	Helical Mill	Slotting and Side Mill	End Mill	Form Mill	Circular Saw
เหล็กกล้าใช้งานทั่วไป	0.30	0.25	0.18	0.15	0.10	0.08
เหล็กกล้าเครื่องมือ	0.25	0.02	0.15	0.13	0.08	0.08
เหล็กหล่อ	0.33	0.25	0.18	0.18	0.10	0.08
ทองเหลืองหรือโลหะผสมทองแดงและดีบุก	0.35	0.28	0.20	0.18	0.10	0.08
อลูมิเนียม	0.55	0.45	0.33	0.28	0.18	0.13
สแตนเลส	0.15	0.13	0.10	0.08	0.05	0.05

ง. ความลึกของการตัด (Depth of Cut)

ความลึกของการตัดที่เหมาะสมนั้น ต้องคำนึงถึงคุณภาพหรือความหยาบผิวที่ต้องการ ถ้าเพิ่มความลึกของการตัด เวลาในการผลิตชิ้นงานนั้นจะน้อยกว่า แต่ความหยาบผิวของชิ้นงานจะมีค่ามากกว่าที่จะยอมรับได้ แต่ถ้าเราใช้ความลึกของการตัดน้อย ๆ ความหยาบผิวของชิ้นงานจะมีค่าที่ดีขึ้น แต่เวลาในการผลิตชิ้นงานนั้นจะยาวนานขึ้นและมีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดอีกด้วย โดยทางปฏิบัติจะทำการกัดแบบหยาบก่อน แล้วทำการกัดละเอียด เพื่อให้ได้ความหยาบผิวของชิ้นงานที่ดี

2.4.2 เครื่องกัดซีเอ็นซี

เครื่องกัดซีเอ็นซี แตกต่างกับเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (CNC Machining Center) ตรงที่ เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ มีอุปกรณ์เปลี่ยน Tool อัตโนมัติ ATC (Automatic Tool Changer) ส่วนเครื่องกัด CNC ไม่มี

ประเภทของเครื่องกัด CNC สามารถแบ่งออกได้ตามการติดตั้ง Spindle ได้ 2 แบบ ประกอบไปด้วย

1. Spindle แนวตั้ง (Vertical Machining Center: VMC) ส่วนใหญ่ Spindle จะเคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามแนวแกน Z
2. Spindle แนวนอน (Horizontal Machining Center: HMC) ส่วนใหญ่ Spindle จะเคลื่อนที่เข้า-ออกตามแนวแกน Z และเคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามแนวแกน Y

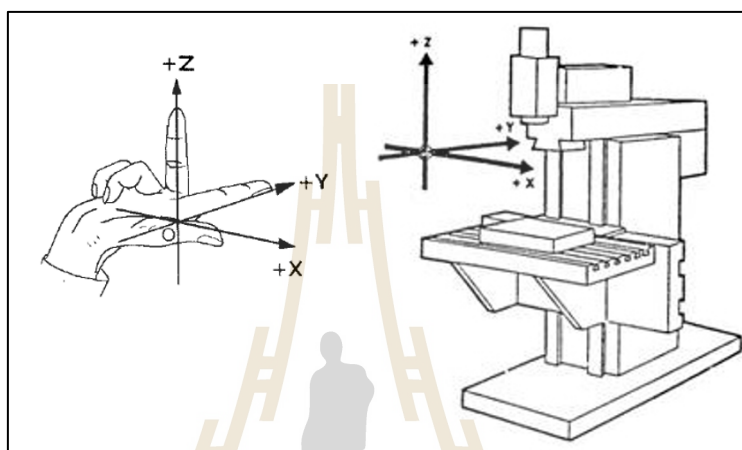
ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกัด CNC ประกอบไปด้วย เช่น แท่นเครื่อง (Machine Bed), โต๊ะงาน (Table), Spindle, ชุดควบคุม (Control Unit), อุปกรณ์สำหรับจับเคลื่อน (Chip Conveyor), ชุดเปลี่ยน โต๊ะชิ้นงาน (Pallet Changer) และชุดโต๊ะงานหมุน (CNC Rotary Table)

2.4.2.1 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

เครื่องจักรกลซีเอ็นซีจะทำงานได้นั้น ระบบควบคุมของเครื่องจะต้องได้รับคำสั่งเป็นภาษาที่ระบบควบคุมเข้าใจได้เสียก่อนว่าจะให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีทำอะไร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือโปรแกรมเอ็นซี (NC Program) เข้าไปในระบบควบคุมของเครื่องผ่านแป้นพิมพ์ (Key Board) หรือเทปแม่เหล็ก (Magnetic Tape) เมื่อระบบควบคุมอ่านโปรแกรมที่ป้อนเข้าไปแล้ว ก็จะนำไปควบคุมให้เครื่องจักรกลทำงาน โดยอาศัยมอเตอร์ป้อน (Feed Moter) เพื่อให้แท่นเคลื่อนเคลื่อนที่ได้ เครื่องกัดซีเอ็นซีจะมีมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ 3 ตัว แนวแกน X, Y และ Z เมื่อระบบควบคุมอ่านโปรแกรมแล้วก็จะเปลี่ยนรหัสของโปรแกรมไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อควบคุมให้มอเตอร์ทำงาน แต่เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากระบบควบคุมนี้มี

2.4.2.2 แกนและทิศทางของเครื่องกัดซีเอ็นซี

วิธีการหาตำแหน่งของแนวแกนต่าง ๆ ของเครื่องกัดซีเอ็นซีทำได้โดยขั้นตอนต่อไปนี้เป็นคือ ให้ผู้ปฏิบัติงานหันหน้าเข้าหาเครื่องกัดซีเอ็นซี แล้วกางนิ้วมือขวาทั้ง 3 นิ้วให้ตั้งฉากกัน โดยทั่วไปแนวแกนของ Spindle ตามหลักของกฎมือขวา ข้อสังเกตคือ ทิศทางที่นิ้วแต่ละนิ้วของมือขวาชี้ออกไปคือ ทิศทางบวกของแต่ละแนวแกน ดังรูปที่ 2.9

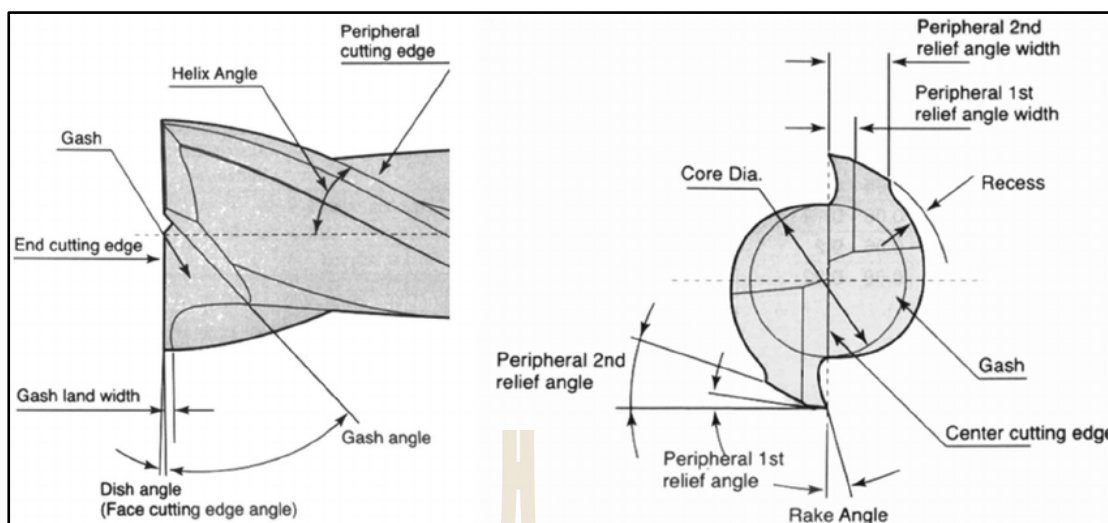


รูปที่ 2.9 แนวแกนของเครื่องกัดซีเอ็นซี

โดยมีจุดศูนย์อ้างอิง (Reference Zero Point) เป็นจุดตัดของทั้ง 3 แกนในการควบคุมและตั้งการระบบการวัดระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดและแท่นเลื่อน ซึ่งทุกแนวแกนการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดระยะด้วยลิมิตสวิตช์ (Limit Switches) ดังนั้นก่อนใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีทุกครั้งจะต้องเลื่อนเครื่องมือตัดกลับไปยังจุดศูนย์อ้างอิง เพื่อให้ชุดควบคุมซีเอ็นซีจำค่าระยะตำแหน่งจุดศูนย์อ้างอิง

2.4.2.3 เครื่องมือตัดสำหรับเครื่องซีเอ็นซี

End Mill เป็นเครื่องมือตัดที่ใช้สำหรับแมชชีนขึ้นงานให้ได้รูปร่างตามแบบที่ต้องการ โดยใช้ร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซีหรือเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำดอก End Mill มีเหล็กกล้ารอบสูง (HSS), คาร์ไบด์ (Carbide) และ Solid Carbide จำนวนคมตัดมีทั้งแบบ 2, 3, 4 หรือ 6 คมตัด และลักษณะของดอก End Mill มีทั้งแบบปลายหน้าตัดตรง (Square) และแบบปลายหน้าตัดครึ่งวงกลม (Ball Nose) สามารถใช้ในงานกัดได้ทั้งแบบงานกัดผิวหยาบและงานกัดผิวละเอียด



รูปที่ 2.10 รูปทรงของเครื่องมือตัด (ดอกกัดเอ็นมิลล์)

ดอก End Mill ส่วนใหญ่ เป็นทรงกระบอกตรงการเลือกดอก End Mill ให้เหมาะสมกับการใช้งานควรพิจารณาจากจำนวนฟันของดอกกัด (Number of Teeth)

- แบบ 1 ฟัน ถูกออกแบบมา เพื่อใช้สำหรับเจาะเนื้อวัสดุที่แข็งและต้องใช้รอบสูงในการเจาะ เพื่อให้เศษหลุดออกมาได้ง่าย เช่น อลูมิเนียม
- แบบ 2 ฟันจะมีร่องคายเศษที่กว้างกว่าเหมาะสำหรับวัสดุที่นิ่ม ใช้ในกรณีกัดร่องลึกเพราะคายเศษได้ดี แต่แข็งแรงน้อยกว่าแบบหลายฟัน
- แบบ 4, 5 และ 6 ฟัน สามารถเก็บรายละเอียดผิวได้สวยงาม นิยมใช้กับวัสดุแข็งเช่น เหล็ก แต่ร่องคายเศษจะเล็กจึงคายเศษได้ไม่ดี

วัสดุที่ใช้ในการผลิตดอกเอ็นมิลล์

1. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) ใช้กันในช่วงที่ยังไม่มีการค้นพบเหล็กกล้าความเร็วสูง ผลิตจากเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.8% ถึง 1.2% มีความสามารถในการชุบแข็งได้ดีและสูญเสียความแข็งที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C ดังนั้น ข้อจำกัดนี้จึงทำให้เหมาะสำหรับเครื่องมือตัดขนาดเล็กและความเร็วรอบในการตัดที่ต่ำ ซึ่งจะใช้ในการแมชีนวัสดุที่อ่อน

2. เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel) หรือ HSS ผลิตจากเหล็กผสมพิเศษเปอร์เซ็นต์โคบอลต์สูง โดยมีส่วนผสมหลักคือ C, Cr, Mo, W, V, Co, Mn และ Si ที่ให้ความแข็งแรง ทนทานการเสียดสีได้สูง มีความสามารถในการชุบแข็งได้ดี และสามารถรักษาสภาพของคมตัดที่ดีไว้จนอุณหภูมิประมาณ 650 °C

3. ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) เป็นส่วนผสมระหว่างธาตุทังสเทนและธาตุคาร์บอน การผสมธาตุคาร์บอนจะทำให้ทังสเทน มีความแข็งแรงมาก ทนต่อแรงขีดข่วน จุดหลอมเหลวของทังสเทนสูงกว่า โลหะชนิดอื่น ๆ จึงสามารถทนอุณหภูมิที่สูงได้ เช่น ส่วนประกอบของหัวจรวด

2.4.2.4 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซี

อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools Holder) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดเครื่องมือตัด เช่น ยึด End Mill, ดอกตัดปาด และดอกสว่าน เป็นต้น ดังรูปที่ 2.11 ในการจับยึดเครื่องมือตัดบางชนิดอาจจะต้องใช้ปลอกจับ (Collet) มาช่วย ดังรูปที่ 2.12 โดยลักษณะของปลอกจับจะมีหลายขนาด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัดที่ใช้งาน



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools Holder)



รูปที่ 2.12 ปลอกจับ (Collet)

2.5 ความหยาบผิว (Surface Roughness)

ในงานอุตสาหกรรมการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานจากการตัดขึ้นรูปโลหะมีความสำคัญต่อคุณภาพชิ้นงานเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะงานที่ต้องการความละเอียดผิวสูง เช่น งานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดความหยาบผิวมีหลายอย่าง ตั้งแต่การกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของความหยาบผิวในขั้นตอนการออกแบบ การเลือกเครื่องมือที่เหมาะสม และครอบคลุมมาตรฐานที่ต้องการ รวมทั้งการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงาน

ความหยาบผิว หมายถึง ขนาดความขรุขระของผิว ซึ่งสามารถสัมผัสและแยกแยะได้ด้วยมือและสายตา แต่บางครั้งก็ไม่สามารถแยกแยะได้ด้วยการสัมผัสด้วยมือและสายตาด้วยเหตุดังกล่าว ในการวัดความหยาบผิวจะใช้เครื่องวัดความหยาบผิว โดยการวัดค่าความหยาบผิวแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การวัดความหยาบผิวโดยเฉลี่ย กับ การวัดความหยาบผิวโดยขนาด

2.5.1 ลักษณะของพื้นผิว

ลักษณะความหยาบผิวมี 3 ชนิด คือ ผิวลักษณะหลัก P (Primary Profile) ผิวลักษณะความหยาบ R (Roughness Profile) และผิวคลื่นคือ W (Waviness Profile) นอกจากนี้ยังมีลักษณะผิวอื่น เช่น WC, WCA, WE, WEA และ IN4776 โดยลักษณะของพื้นผิวนี้อาจสัมพันธ์กับค่าตัวกรองหรือ Digital filter ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของการกรองสัญญาณในรูปแบบของเฟสหรือแบบเกาส์เซียน เช่น 2CR-75%, 2CR-50%, 2CR-75% (Phase Corrected), 2CR-50% (Phase Corrected), Gaussian-50% (Phase Corrected) ซึ่งผู้วัดจะต้องกำหนดค่าตัวกรองความถี่ให้สัมพันธ์กับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการวัด ไม่เช่นนั้นจะส่งผลให้ค่าที่วัดออกมาได้นั้นไม่ตรงกับค่าของชิ้นงาน นอกจากนี้เรายังต้องกำหนด Cutoff Length หรือระยะทางในการกรองค่าความถี่ของความยาวผิวที่ต้องการวัด และค่า Sampling Length คือ ค่าความยาวที่หัววัดเคลื่อนที่บนชิ้นงานที่ต้องการวัดจะต้องปรับตั้งค่าทั้งสองนี้ให้ถูกต้องซึ่งหน่วยความยาวก็จะขึ้นกับมาตรฐานที่ใช้ด้วย เช่น หน่วยนิ้ว หรือมิลลิเมตร

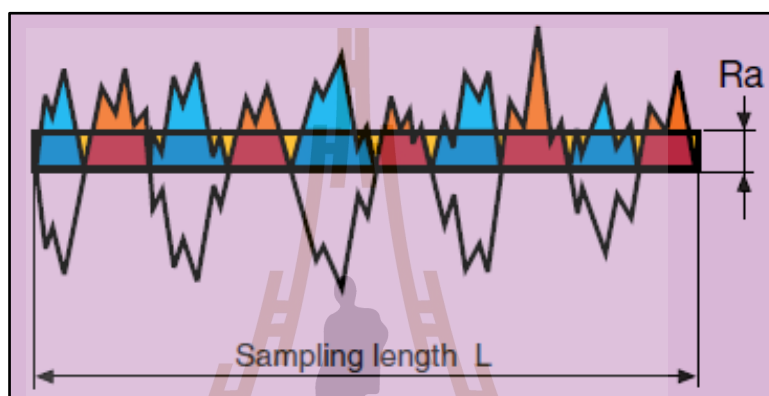
2.5.2 มาตรฐานการวัดความหยาบผิว

โดยทั่วไปการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานสามารถวัดออกมาใน 3 แบบ คือ

- 1) แสดงค่าสถิติ (Statistical Descriptors) เช่น ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ความหยาบผิวรากกำลังสองเฉลี่ย (R_q) หรือ ความสูงกลางของลักษณะความหยาบ (R_c) เป็นต้น
- 2) แสดงค่าสูงสุดต่ำสุด (Extreme Value Descriptors) ซึ่งในบางลักษณะงานอาจต้องการแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของความหยาบผิว เช่น จุดสูงสุด (R_p) จุดต่ำสุด (R_v)

3) แสดงค่าลักษณะพื้นผิว (Texture Descriptors) เช่น โดยทั้งหมดนี้ ค่าสถิติ Ra เป็นค่าที่ดีที่สุดและได้รับการยอมรับในงานด้านวิศวกรรมมากที่สุด

ค่า Ra คือ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิตที่ได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (L) ดังรูปที่ 2.13 ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ISO 4287 โดยค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็น ไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 2.13 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต

เครื่องมือวัดความหยาบมีความแตกต่างจากเครื่องมือวัดทั่วไป สิ่งสำคัญประการหนึ่ง คือ มาตรฐานอุตสาหกรรมของเครื่องมือวัด ซึ่งบ่งบอกว่าเครื่องวัดความหยาบผิวรุ่นนั้น ๆ สามารถวัดความหยาบผิวของชิ้นงานตามข้อกำหนดของมาตรฐานใดบ้าง เช่น ISO 4287 : 1997 (ยุโรป), ANSI/ASME B 46.1-1995 (อเมริกา), JIS B 0601-1994 (ญี่ปุ่น) เป็นต้น

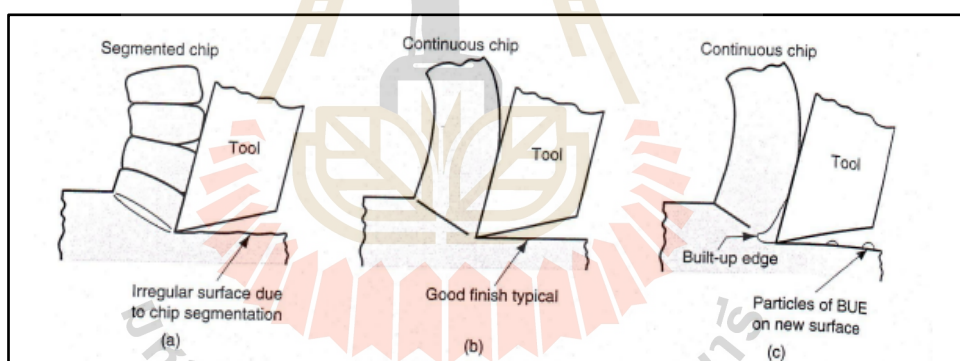
2.6 การสึกหรอในเครื่องมือกล

การสึกหรอของเครื่องมือมือตัด (Tool Wear) คือ การใช้งานจนกระทั่งเครื่องมือตัดหมดสภาพการใช้งานระหว่างการตัดเนื้อที่ถูกกระทำด้วยพลังงานความร้อนและพลังงานกล ในการศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือกล เราจะต้องเข้าใจศัพท์ของการตัดเนื้อ ซึ่งได้สรุปไว้ดังรูปที่ 2.14 ในรูปประกอบจะเห็นว่าชิป (Chip) หรือเศษวัสดุที่ถูกตัดเนื้อจะหลุดออกมาจากผิวชิ้นงาน โดยเคลื่อนที่ออกจากด้านหน้าเครื่องมือตัดด้วยแรงเฉือนบนเนื้อชิ้นงานที่กระทำอย่างต่อเนื่องชิปที่ถูกเฉือนออกมาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ชิปยาวต่อเนื่อง (Continuous Chips) ชิปลักษณะนี้ เกิดจากการเฉือนหรือกัดแต่งโลหะที่มีความยืดหยุ่นสูง (Ductile) ในขณะที่เนื้อโลหะถูกกัดออกมาเป็นชิปจะมีการแปรรูปแบบพลาสติกของโลหะที่นำมากัดแต่งค่อนข้างมาก ทำให้มีความร้อนจากการแปรรูปเกิดขึ้น ชิปที่ได้มีลักษณะโค้งยาวคล้ายสปริง

2. ชิปยาวต่อเนื่องและมี Built Up Edge เกิดขึ้น (Continuous Chips with “Built Up Edge”) คล้ายกับชิปยาวต่อเนื่องในข้อแรก แต่เมื่อชิปแตกหลุดออกจากชิ้นงานจะทำให้ผิวชิ้นงานที่มีรอยแตก ซึ่งเป็นผิวใหม่ที่ยังสะอาดปราศจากสารประกอบใด ๆ และมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูง สามารถเชื่อมติดไปบนผิวของเครื่องมือกล กลายเป็น Built Up Edge ได้

3. ชิปสั้นไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Chips) ชิปลักษณะนี้เกิดจากการตัดเฉือนโลหะที่มีความยืดหยุ่นไม่สูงมาก ชิปจะเกิดจากการแปรรูปแบบพลาสติกเพียงเล็กน้อยแล้วจึงแตกหลุดออก จึงมีลักษณะสั้นและไม่ต่อเนื่อง ถ้าโลหะที่นำมากัดแต่งมีเฟสที่ 2 ในโครงสร้าง เช่น อนุภาคของสารประกอบซัลไฟด์ ก็จะสามารถช่วยตัดชิปให้สั้นลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุม Built Up Edge ให้อยู่ในปริมาณที่ไม่สูงมากได้เช่นกัน



รูปที่ 2.14 ชิปที่ถูกเฉือนออกมา (a) Discontinuous Chips (b) Continuous Chips
(c) Continuous Chips with “Built Up Edge”

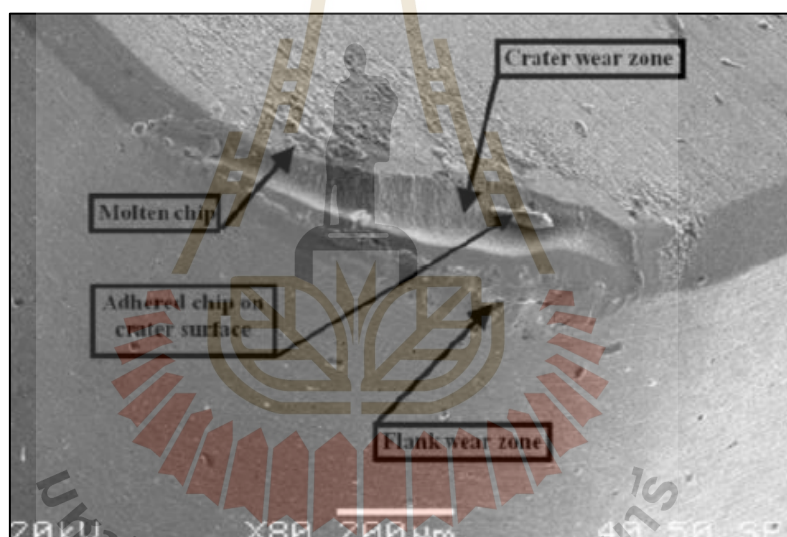
ในการใช้งานจะต้องระวังไม่ให้เกิด Built Up Edge ที่หนาจนเกินไป เนื่องจากการที่ผิวเครื่องมือกลมีเศษวัสดุที่ผ่านการแปรรูปแบบพลาสติกอย่างรุนแรงมาเกาะอยู่จะทำให้เสียขอบตัด ซึ่งจะส่งผลเสมือนว่าเครื่องมือกลนั้น “ทื่อ” ลง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือลดลง โดยทั่วไปในการใช้งานจะพบว่า Built Up Edge เกิดขึ้นและแตกหลุดออกอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยอาจเกิดขึ้นได้หลายรอบใน 1 วินาที เศษของ Built Up Edge ที่หลุดออกมักจะไปเกาะติดอยู่กับผิวด้านใต้ของชิป ช่วยเพิ่มปริมาณการสึกหรอด้านหน้าเรก (Rake Face)

ของเครื่องมือกลและยังทำให้ผิวสำเร็จ (Surface Finish) ที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร หากนำเศษของ Built Up Edge มาวัดค่าความแข็งบางที่จะพบว่า มีความแข็งสูงกว่าวัสดุที่นำมากัดแต่งได้ถึง 3 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุ Built Up Edge ได้ผ่านกระบวนการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work Hardening) จากการแปรรูปที่รุนแรงมาหลายครั้งนั่นเอง

2.6.1 กลไกของการสึกหรอ

การสึกหรอของเครื่องมือกลสามารถเกิดได้ทั้งบนด้านหน้าเรก (Rake Face) และหน้าแฟรังก์ (Flank Face) ซึ่งการสึกหรอพบว่ามีกลไกพื้นฐาน ดังนี้

1. การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear) การสึกหรอในลักษณะนี้เกิดจากการที่ผิวสัมผัสเชื่อมติดกันเป็นจุดเล็ก ๆ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของเครื่องมือกลให้แก่ชิปหรือผิวกัดแต่งของชิ้นงาน



รูปที่ 2.15 การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear) (Alaattin Kacal, 2013)

2. การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear) ในขณะที่ใช้งานจะพบว่าการแพร่ของอะตอมระหว่างผิวของเครื่องมือกลและผิวชิ้นงานเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา การแพร่ของอะตอมจะทำให้ผิวสัมผัสเชื่อมติดกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การแตกหักของยอดสูงในที่สุด กลไกการแพร่และการเชื่อมติดนี้เป็นสาเหตุหลักของการสึกหรอแบบครีเตอร์ ยกตัวอย่าง เช่น ในการกัดแต่งเหล็กกล้าด้วยเครื่องมือที่เป็นวัสดุประกอบ WC-Co ธาตุเหล็ก (Fe) จากชิ้นงานสามารถแพร่เข้าไปในเหล็กกล้า ได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.16 การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear)

3. การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) การสึกหรอลักษณะนี้จะเกิดในกรณีที่ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีเฟสที่สองที่มีความแข็งสูงอยู่ในโครงสร้าง เช่น เฟสคาร์ไบด์หรือไนไตรด์ในเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ อนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) ในเหล็กกล้า เฟสของซิลิคอนและอะลูมินาในอลูมิเนียมผสม เป็นต้น



รูปที่ 2.17 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)

2.6.2 ชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด

การสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัดโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 8 ชนิดดังต่อไปนี้

1. การสึกหรอบนผิวหอบ (Flank Wear) เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างหน้าแฟงกับชิ้นงาน เป็นการสึกหรอที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ถ้าการสึกหรอขยายไปถึงขอบตัดจะทำให้แรงตัดและความเค้นเกิดกับเครื่องมือสูงขึ้น

2. การสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) เป็นความเสียหายที่เกิดบนหน้าเรกหรือด้านบนของเครื่องมือตัด ส่วนใหญ่จะพบในงานกัดของเหล็กกล้าความเร็วสูง การสึกหรอในลักษณะนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างชิปกับวัสดุเครื่องมือกลที่อุณหภูมิใช้งานค่อนข้างสูง ในระหว่างการตัดเฉือน วัสดุเครื่องมืออาจจะละลายเข้าไปอยู่ในชิป หรืออนุภาคนาขนาดเล็กจากเครื่องมืออาจถูกดึงติดไปกับชิปได้ แต่ไม่ว่าจะเป็นกรณีไหนก็จะเกิดเป็นหลุมตื้นบนผิวเครื่องมือตัดขึ้น เครื่องมือตัดที่เกิดการสึกหรอแบบเคเรเตอร์ในปริมาณที่สูงขึ้น ถ้าทิ้งไว้นานก็จะทำให้เครื่องมือตัดแตกในที่สุด

3. การสึกหรอเนื่องจากการเปลี่ยนรูป (Plastic Deformation) เกิดเนื่องจากขณะทำงาน ผิวสัมผัสได้รับความร้อนและแรงกดสูง ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเครื่องมือหรือวัสดุที่เป็นเนื้อหลักอ่อนตัวลงจนอนุภาคคาร์ไบด์สามารถเคลื่อนที่ได้บ้าง วัสดุเครื่องมือจะค่อย ๆ สึกหรอไป คล้ายการสึกหรอแบบเคเรเตอร์แต่ที่ปลาย (Nose) จะเริ่มบิดเบี้ยวเสียรูป ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตไม่ได้ ความเที่ยงตรงและเครื่องมืออาจแตกหักได้

4. การสึกหรอลักษณะแหว่ง (Notch Wear) เกิดจากงานกัดแต่งวัสดุประเภทเหล็กกล้า ไร้สนิม โลหะผสมที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง และวัสดุที่ผ่านการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work Hardening) ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดความร้อนจากการกัดแต่งสูงจึงอาจทำให้มีรอยบาก (Depth-of-Cut Notching) เกิดขึ้นที่ปลายชิป ส่งผลให้เกิด Burr และอาจทำให้เครื่องมือกลแตกได้

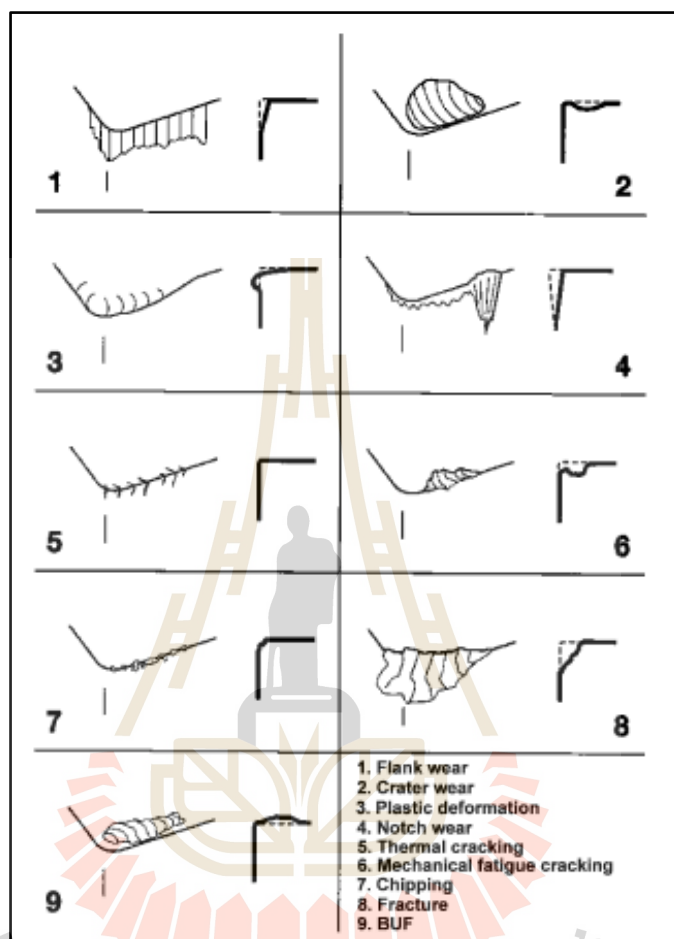
5. การแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) เกิดจากการที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงมากระหว่างขอบตัดและเนื้อในเครื่องมือ ทำให้เกิดรอยแตกเนื่องจากความเค้นจากการขยายตัวต่างกันกับขอบตัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว รอยแตกเหล่านี้จะโตขึ้นอย่างต่อเนื่องและอาจทำให้เครื่องมือกลแตกได้

6. การสึกหรอที่ปลายมิด (Nose Wear) เป็นความเสียหายที่เกิดจากการกัดแต่งโลหะแข็ง โดยอาจเกิดจากการเสียดสี การขัดถูและการเสียรูปของปลายเครื่องมือตัด ซึ่งจะส่งผลต่อความละเอียดของผิวสำเร็จและความเที่ยงตรงของชิ้นงานที่ผลิต

7. การกะเทาะ (Chipping) และการแตกหัก (Fracture) เกิดจากแรงตัดที่ใช้ที่ไม่คงที่การตัดที่ต้องหยุดบ่อย ๆ หรือแม้กระทั่งจากการที่เครื่องจักรสั่นสะเทือนมากขณะใช้งานก็ทำให้เครื่องมือตัดแตกได้ ความเสียหายจากกลไกอื่นที่กล่าวมาก็อาจทำให้ความแข็งแรงของเครื่องมือกลลดลงจนแตกหักได้ นอกจากนี้ถ้าแรงตัดที่ใช้เพิ่มขึ้นจากสาเหตุใดก็ตามจนถึงจุดที่เครื่องมือกลไม่สามารถรับได้แล้วก็จะเกิดการแตกได้

8. การพอกเศษ (Built-Up Edge) เกิดจากการที่เนื้อวัสดุจากชิ้นงานมาเชื่อมติดกับผิวเครื่องมือกล ทับถมเป็นชั้นขึ้นมา ที่หนาเกินไปหรือไม่มีเสถียรภาพทางเคมีจะทำให้แรงกด

ของเครื่องมือเพิ่มขึ้น ผิวสำเร็จแย่ง ความแม่นยำในการกัดแต่งลดลง และอาจทำให้เครื่องมือแตกหัก



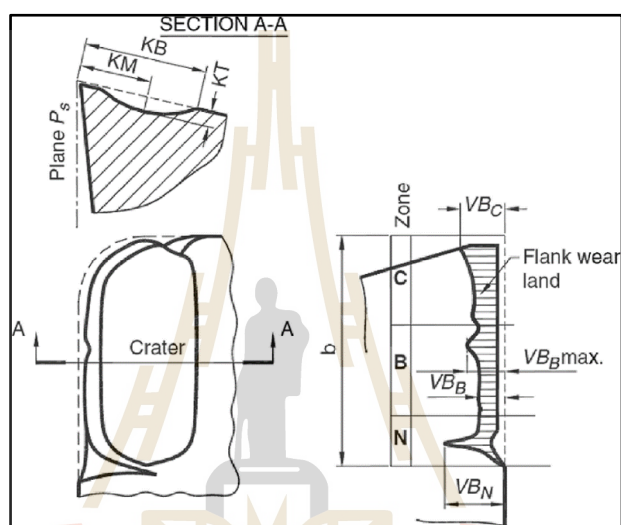
รูปที่ 2.18 ชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด (Sandvik Coromant, 1994)

2.6.3 ข้อกำหนดในการวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหกลบ (Flank Wear) ตามมาตรฐาน ISO 3685: 1993

ตามมาตรฐาน ISO ได้มีการแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหกลบ (Flank Wear) เพื่อการวัดระยะของการสึกหรอบนผิวหกลบ (Flank Wear) ออกเป็น 3 เขต คือ เขต A เขต B และเขต C โดยกำหนดให้ b เป็นระยะป้อนลึกในการตัดเฉือนชิ้นงาน

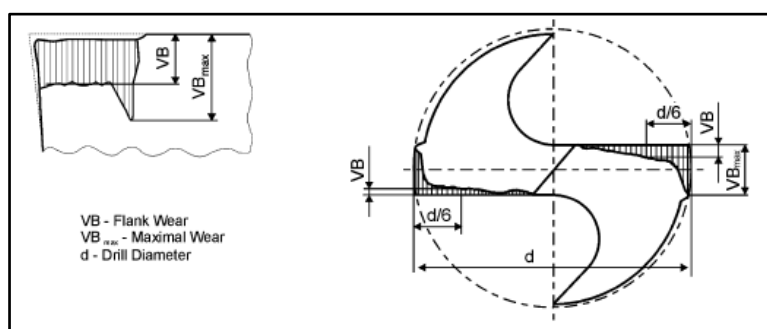
- เขต N เป็นเขตที่อยู่บนผิวหกลบด้านในสุดของคมตัด มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ได้ กำหนดให้เขต N มีค่าเท่ากับ 1 ใน 4 ของ b (เมื่อ b = ระยะป้อนลึก) ดังรูปที่ 2.19

- เขต B เป็นเขตที่อยู่บนผิวหลบเช่นเดียวกับเขต A และเขต B ก็เป็นเขตที่อยู่ระหว่างเขต A กับเขต C มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ไม่ได้กำหนดช่วงกว้างของเขต B แต่จะกำหนดให้ช่วงกว้างของเขต B ขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของเขต A และเขต C ดังรูปที่ 2.19
- เขต C เป็นเขตที่อยู่บนผิวหลบเช่นเดียวกับเขต A และเขต B เขต C จะอยู่นอกสุดของคมตัดและเขต C ก็อยู่ติดกับเขต B มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ได้กำหนดให้เขต C มีช่วงกว้าง เท่ากับรัศมีปลายมีด (Nose) ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear)

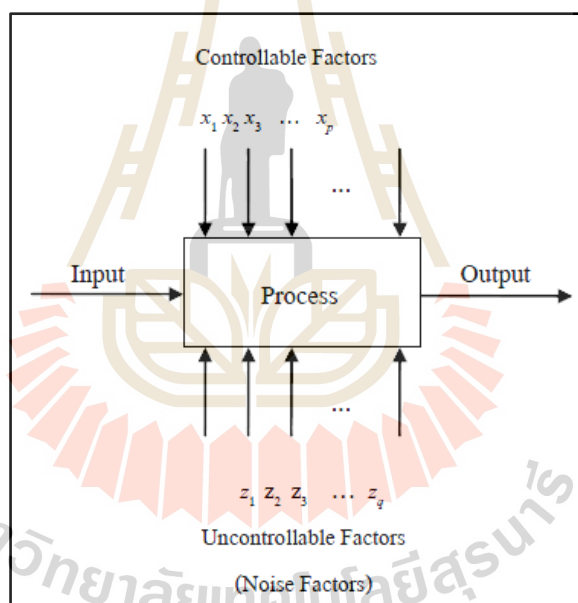
โดยกำหนดให้ทำการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ VB เป็นขนาดการสึกหรอบนผิวหลบเฉลี่ย ส่วน VB_{max} เป็นขนาดการสึกหรอบนผิวหลบสูงสุด ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ (Slavko Dolinsek, 2006)

2.7 การทดลองและการออกแบบการทดลอง

การทดลอง หมายถึง การทดสอบหรือการลองเพื่อหาผลลัพธ์ที่อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอน สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ การทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment) และการทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation) จุดประสงค์ที่สำคัญของการทดลองมี 2 ประการ คือ เป็นการยืนยันข้อเท็จจริง เพื่อพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต และเป็นการค้นหาข้อเท็จจริง เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีต่อระบบการผลิต ซึ่งผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บข้อมูล (Montgomery, 2009) ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังรูปที่ 2.21 (ปารเมศ, 2545)



รูปที่ 2.21 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป (Montgomery, 2009)

อาจมองได้ว่า กระบวนการคือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่น ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ ตัวแปรกระบวนการบางชนิด $x_1, x_2, \dots, x_p$ เป็นตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรบางตัว $z_1, z_2, \dots, z_q$ เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับ

- 1) การหาปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ y
- 2) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ค่า y ได้ตามค่าที่ต้องการ
- 3) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ เพื่อให้ค่า y น้อยที่สุด
- 4) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่เราไม่สามารถ

คุมได้ $z_1, z_2, \dots, z_q$ มีค่าต่ำสุด

การทดลองส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัว ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด เราจะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่สมเหตุสมผลวิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น เมื่อต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้ายังเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experiment Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้ง 2 นี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

2.7.1 คำศัพท์ที่ควรรู้จักเกี่ยวกับการทดลอง

1. การทดลอง (Experiment) ตัวแปรอิสระ หรืออาจเรียกได้ว่าตัวแปรทดลอง (Experimental Variable) เพื่อดูตัวแปรตามซึ่งเป็นผลที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของตัวแปรอิสระนั้น ในการจัดการกระทำจะพยายามจัดสภาพตัวแปรใหม่เพื่อควบคุมสิ่งที่เกี่ยวข้องหรือตัวแปรเกินที่ไม่ต้องการศึกษามีให้มา มีผลต่อตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา

2. แผนการทดลอง (Experimental Design) เป็นแผนการทั่วไปของการทดลอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนและการจัดการตัวแปรอิสระ รวมทั้งการสุ่มหรือเลือกตัวอย่างและการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเพื่อควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนหรือตัวแปรเกินมิให้มีผลต่อตัวแปรตาม เป็นการควบคุมหรือป้องกันความคลาดเคลื่อนที่จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการทดลอง แผนการทดลองมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อปัญหาที่จะศึกษาทดลองแตกต่างกัน แผนการทดลองที่ดีจะต้องดำเนินการทดลองได้ง่ายและให้คำตอบที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา

3. ตัวแปร (Variable) หมายถึง ลักษณะของสิ่งที่สนใจศึกษาที่สามารถแปรเปลี่ยนค่าได้ตามเวลาหรือบุคคลหรือสถานที่หรือคุณลักษณะที่แตกต่างกัน อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง เพศ พันธุ์พืช พันธุ์สัตว์ ขนาดของแปลง ชนิดของปุ๋ย ปริมาณของปุ๋ยที่ใช้ในการทดลอง

สูตรอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น การแปรเปลี่ยนค่าของตัวแปรนั้น เรียกว่า “ระดับของตัวแปร” เช่น เพศ แบ่งเป็น เพศชาย กับ เพศหญิง ดังนั้น เพศ เป็นตัวแปรที่มี 2 ระดับ

4. ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) บางครั้งเรียกว่า ปัจจัย (Factor) หมายถึง ตัวแปรที่เกิดขึ้นก่อน และเป็นตัวแปรเหตุที่ทำให้ผลหรือสิ่งที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะหรือแปรสภาพไป

5. ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หมายถึง ตัวแปรที่เกิดขึ้นทีหลังหรือต้องเปลี่ยนแปลงแปรสภาพหรือคุณลักษณะไปตามอิทธิพลของตัวแปรอิสระ

6. ตัวแปรแทรกซ้อนหรือตัวแปรเกิน (Extraneous Variable) หมายถึง ตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาในขณะนั้น ซึ่งตัวแปรเกินจะมีลักษณะเหมือนตัวแปรอิสระที่มีผลหรืออาจมีผลต่อตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ทำให้การวัดค่าตัวแปรตามคลาดเคลื่อนไปได้ ดังนั้น ในการทดลองจึงต้องพยายามควบคุมหรือจัดอิทธิพลของตัวแปรเกินที่มีผลต่อตัวแปรตามให้หมดไปหรือให้น้อยที่สุด เพื่อให้ผลของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลองเป็นผลแท้จริงที่เกิดจากตัวแปรอิสระที่ทดลองเท่านั้น ตัวแปรชนิดนี้ผู้วิจัยสามารถคาดเดาว่าจะมีอะไรบ้าง จึงสามารถทำการควบคุมล่วงหน้าได้

7. ปัจจัย (Factor) หมายถึง ตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาว่ามีผลกระทบต่อตัวแปรตามหรือไม่ เช่น ในการศึกษาเกี่ยวกับอาหาร 3 สูตร ที่ใช้ในการเลี้ยงไก่ ปัจจัยที่ต้องการศึกษาคือ อาหาร (ตัวแปรอิสระ)

8. ระดับของปัจจัย (Factor Levels) หมายถึง ชนิดย่อย ๆ หรือประเภทต่าง ๆ ของปัจจัย บางครั้งเรียกว่า ทรีทเมนต์ (Treatment)

9. ปัจจัยเดี่ยวและปัจจัยพหุ (Single Factor and Multiple Factor) เป็นการศึกษาตัวแปรอิสระเพียงตัวแปรเดียว ส่วนปัจจัยพหุเป็นการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว

10. ทรีทเมนต์ (Treatment) หมายถึง ระดับต่างๆของปัจจัย หรือวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ปฏิบัติต่อหน่วยทดลองแล้วหน่วยทดลองจะส่งผลตอบสนองออกมาเป็นข้อมูลเพื่อนำไปเปรียบเทียบอิทธิพลของทรีทเมนต์ ตามวัตถุประสงค์ของการทดลองโดยที่ทรีทเมนต์อาจมาจากปัจจัยเดี่ยวหรือหลายปัจจัยร่วมกัน (Treatment Combination)

11. หน่วยทดลอง (Experimental Unit) หมายถึง หน่วยหรือกลุ่มของสิ่งทดลอง (ซึ่งในงานวิจัยจะเรียกว่า Experimental Material) ที่ใช้ในการทดลองโดยได้รับอิทธิพลของทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่งโดยหน่วยทดลองอาจเป็น ต้นไม้ 1 ต้น พืช 1 แปลง สัตว์ทดลอง 1 ตัว หรือสัตว์ทดลอง 5 ตัวในกรงเดียวกัน เช่น ในการทดลองสูตรอาหารที่ใช้เลี้ยงไก่ ถ้าใน 1 กรงขังไก่ไว้ 5 ตัว และให้ไก่ทั้ง 5 ตัว นี้ได้รับอาหารสูตรเดียวกัน น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไก่

ทั้งทรง (5 ตัว) ก็จะเป็น 1 หน่วยทดลอง แต่ถ้าใน 1 ทรง ข้างใดไว้ 1 ตัว แต่ละตัวก็จะเป็น 1 หน่วยทดลอง หรือในการเปรียบเทียบพันธุ์พืช พืช 1 แปลงไม่ว่าจะใหญ่หรือเล็ก จะเป็น 1 หน่วยทดลอง

12 หน่วยตัวอย่าง (Sampling Unit) หมายถึง ส่วนหนึ่งของหน่วยทดลองหรือทั้งหน่วยทดลอง ซึ่งใช้วัดอิทธิพลของทริทเมนต์ตามจุดประสงค์ของการทดลอง

13. ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (Experimental Error) หรือความผันแปรของการทดลอง หมายถึง ความแตกต่างระหว่างหน่วยทดลองที่ได้รับทริทเมนต์เดียวกัน การที่หน่วยทดลองหลาย ๆ หน่วยได้รับทริทเมนต์เดียวกันแต่ให้ผลตอบสนองต่อทริทเมนต์แตกต่างกันอาจเกิดได้จาก 2 สาเหตุ คือ

- ความผันแปรที่เกิดขึ้นภายในหน่วยทดลอง (Inherent Variability) เป็นความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของหน่วยทดลองอยู่แล้ว เช่น ในการทดลองเกี่ยวกับสัตว์ อาจมีความแตกต่างที่เกิดจาก อายุ เพศ หรือน้ำหนักเริ่มต้นของหน่วยทดลองก่อนทำการทดลอง หรือในการทดลองเกี่ยวกับพืชมีความแตกต่างที่อาจจะเกิดจากความอุดมสมบูรณ์ของดินในแปลงทดลองไม่เท่ากันหรือมีความชื้นต่างกัน

- ความผันแปรที่เกิดขึ้นภายนอกหน่วยทดลอง (Extraneous Variability) เป็นความผันแปรที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลอง ซึ่งอาจจะเกิดความผิดพลาดของผู้ทดลอง โดยอาจเกิดจากการปฏิบัติไม่สม่ำเสมอหรือไม่เหมือนกัน เช่น การให้อาหารหรือน้ำไม่เท่ากัน การใส่ปุ๋ยหรือการปราบวัชพืชแตกต่างกัน หรืออาจเกิดจากการใช้เครื่องมือที่ไม่ได้มาตรฐาน การขาดความละเอียดลออในการบันทึกข้อมูล (พิสมัย หาญมงคลพิพัฒน์, 2550)

2.7.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) คือแนวคิดทางสถิติที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตช่วยเพิ่มผลผลิต ช่วยลดความผันแปรในกระบวนการผลิต ช่วยลดเวลาในการผลิต และช่วยลดต้นทุนการผลิต เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุง กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ โดยคำนึงถึงคุณภาพสูงสุดตามความต้องการของลูกค้าเป็นสิ่งสำคัญ

Montgomery (2009) กล่าวว่า การออกแบบการทดลองคือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลองที่จะทำให้สามารถตีความหมายถึงสาเหตุและผลที่ต้องการตัดสินใจได้ กล่าวคือเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่ให้ความสำคัญหรือสิ่งที่สนใจในลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response) ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

ดังนั้น การออกแบบการทดลอง จึงเป็นการกำหนดเงื่อนไขที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของข้อมูลมีสาเหตุจากสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้เท่านั้น เพื่อให้เกิดข้อมูลที่มีสาระมากที่สุดเพื่อสำหรับการตัดสินใจ

2.7.2.1 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง คือ

1) การทดลองซ้ำ (Replication) คือ การทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการทดลองเพิ่มมากขึ้น และยังทำการทดลองเพิ่มมากขึ้นเท่าใดก็จะได้ข้อมูลจากการทดลองเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการทดลองและเพิ่มความเที่ยงตรง แม่นยำของข้อมูลมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์ และผลการสรุปจากการทดลอง มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยการทดลองซ้ำมีประโยชน์คือ ช่วยให้ผู้ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดในการทดลองได้ ซึ่งใช้สำหรับเปรียบเทียบกับผลของปัจจัยที่สนใจศึกษาได้-สิ่งที่ควรพิจารณา คือ การกำหนดจำนวนซ้ำ ซึ่งจะต้องทำอย่างเป็นอิสระต่อกัน ประโยชน์ของการทำซ้ำคือ ทำให้ผู้ทำการทดลองสามารถรู้ค่าประมาณที่เกิดความผิดพลาดจากการทดลองเป็นผลให้ผู้ทำการทดลองใช้เป็นเครื่องมือในการสรุปผลความแตกต่างในเชิงสถิติได้ ถ้ามีจำนวนซ้ำน้อยเกินไป ความแม่นยำในการทดลองอาจมีน้อยไปในขณะเดียวกัน ถ้ามีจำนวนซ้ำมากเกินไปก็อาจทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเสียเวลาเกินความจำเป็น ดังนั้น การกำหนดจำนวนซ้ำจึงจำเป็น ซึ่งการกำหนดจำนวนซ้ำสามารถหาได้โดยใช้ OC-curve (Operating Characteristic Curve)

2) การสุ่ม (Randomization) คือ การจัดลำดับในการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม โดยการสุ่มสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งการสุ่มจะช่วยกระจายความผิดพลาดในการทดลองที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ไปสู่ทุก ๆ การทดลองด้วยโอกาส และขนาดเท่า ๆ กัน เพื่อให้ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลเกิดขึ้นน้อยที่สุด ลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง และหลีกเลี่ยงการทำการทดลองอย่างลำเอียง

3) การควบคุม (Blocking หรือ Control) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงแม่นยำ (Precision) ในการทดลอง โดยป้องกันการรบกวนจากปัจจัยภายนอก (Noise, Nuisance, Factors) และลดความผิดพลาดในการทดลอง โดยบล็อกเดียวกันหมายถึงการควบคุมสภาพในการทดลองให้มีสภาพใกล้เคียงกันมากที่สุด เช่น วัสดุที่ใช้ทดลองควรมี

ความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน ใช้เครื่องจักรเครื่องเดียวกัน ผู้ทดลองคนเดียวกัน วิธีการทดลองเดียวกัน ในช่วงเวลาทดลองใกล้เคียงกัน โดยเปลี่ยนแปลงเฉพาะเงื่อนไขของปัจจัยที่สนใจศึกษาเท่านั้น

2.7.2.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเข้าใจล่วงหน้าว่า เรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไรและจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร โดยมีขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

1) การกำหนดปัญหา (Identify Problem) เป็นขั้นตอนที่ให้ทุกคนมีส่วนร่วมในการออกความคิดเห็นซึ่งอาจมีการทำงานเป็นทีมเพื่อปรึกษาหารือโดยการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา ไม่ว่าจะเป็นแผนกวิศวกรรม แผนกการผลิต แผนกการตลาด เป็นต้น และที่สำคัญผู้ที่มีส่วนร่วมในการออกแบบการทดลองจำเป็นต้องมีความชัดเจนในการกำหนดปัญหาซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญหลายสาขา

2) การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of Factor, Levels and Ranges) ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากการประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) ซึ่งต้องเลือกวิธีการคัดกรองปัจจัยให้เหมาะสมกับการทดลอง และควรที่จะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อย ๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกันในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้าง ๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญ และที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the Response Variable) ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

4) การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design)

ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทำซ้ำ) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อก หรือการใช้แรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น ดังนั้น เราจะหาว่า ปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5) การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) เมื่อดำเนินการ

ทดลองเราจะต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตาม การทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้ การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้น การวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อ ความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis of Data) ใช้วิธีการทาง

สถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของ การทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบ ไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ เป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับ ความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผล สันนิษฐานและมีความน่าเชื่อถือ

7) ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations)

เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทาง ของการศึกษาต่อไป นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (confirmation testing) ควรจะ ทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

2.7.2.3 ประเภทของแผนการทดลอง

- กรณีปัจจัยเดียว (Single Factor)

1) แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized

Design) ใช้กับการทดลองที่ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีขนาดไม่โตนัก โดยการทดลองจะทำโดยยึด หลักการทำแบบสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication)

2) แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่ม (Randomize Block Design) หลักการ คือ การทดลองจะต้องทำการสุ่ม (Randomization) ทุกครั้ง และต้องทำซ้ำ (Replication) ทุกการทดลอง และต้องทำการบล็อก (Blocking) ปัจจัยรอบนอก ซึ่งการบล็อกอาจจะทำมากกว่า 1 บล็อกก็ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัยรอบนอก

- กรณีหลายปัจจัย (Multi Factor)

1) แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป (Multi Factor Experiment) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้ว ยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป แล้วมีผลทำให้อิทธิพลของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่ 2^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลอง k ปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ, 3^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลอง k ปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ

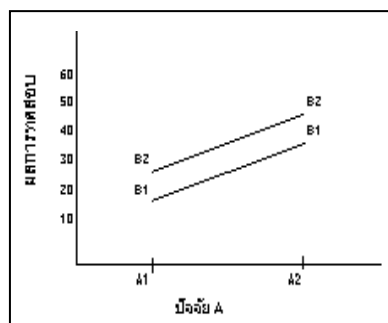
2) แผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design) เป็นการทดลองเฉพาะบางส่วนของซ้ำ

- แผนการทดลองประเภทอื่น ๆ

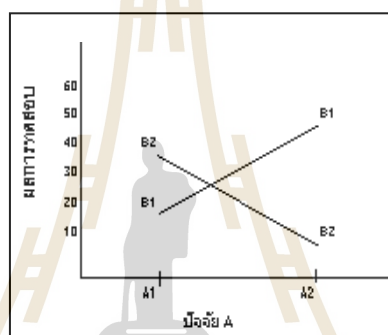
การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) เป็นการออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบ โดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้

2.7.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นการทดลองที่มีลักษณะเฉพาะคือ ทรีทเมนต์ประกอบด้วยรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบินชัน (Treatment Combination) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 Replicate จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเนื่องจากมีปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย



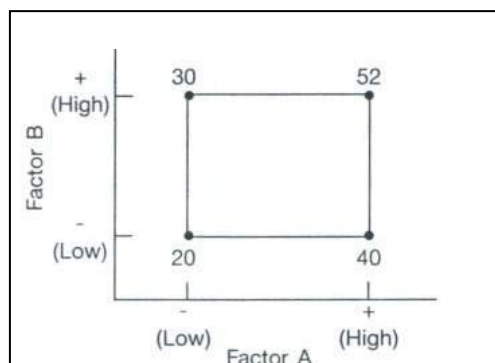
รูปที่ 2.22 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล



รูปที่ 2.23 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล

อิทธิพลของปัจจัยร่วมคือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม ดังรูปที่ 2.22 และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังรูปที่ 2.24 โดย A และ B คือ ปัจจัย 2

การออกแบบชนิด 22 Factorial Design เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัยคือ A และ B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลนั่นคือในแต่ละเรปลิเคตของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรปลิเคตทั้งหมด n ครั้ง จากรูปที่ 2.5 เป็นตัวอย่างการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและสูง โดยถูกแทนด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” ตามลำดับ ผลหลักของปัจจัย A ในการทดลองนี้คือ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัย A ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างแสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

$$A = (40 + 52) / 2 - (20 + 30) / 2 = 21 \quad (2.1)$$

หมายความว่า ในการเพิ่มขึ้นของปัจจัย A จากระดับต่ำไปสู่ระดับสูง จะทำให้ผลตอบเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 21 หน่วย ทำนองเดียวกัน จะสามารถคำนวณหาผลหลักของปัจจัย B ได้คือ

$$B = (30 + 52) / 2 - (20 + 40) / 2 = 11 \quad (2.2)$$

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่สนใจที่จะศึกษา ซึ่งมีอยู่หลายตัวและจะต้องเข้าใจถึงผลกระทบร่วมกันของปัจจัยเหล่านั้นบนตัวแปรตามที่สนใจอยู่การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดันหรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับสูงหรือต่ำของปัจจัยเหล่านั้น ใน 1 เวกเตอร์ที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้น การออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถรองรับปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

ในการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลถ้าหากสนใจศึกษาผลของปัจจัย 2 ปัจจัย จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลองทั้งสิ้น 4 การทดลอง (2^2 , $k = 2$ ปัจจัย) เงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัยและจำนวนเงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	A	B
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

แต่ถ้าจำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษาในการทดลองเพิ่มขึ้น จำนวนเงื่อนไขการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล (2^k) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษาและจำนวนเงื่อนไขการทดลอง

จำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษา (k)	เงื่อนไขการทดลอง
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	256
:	:
K	2^k

2.7.4 วิธีการพื้นผิวผลตอบ

ปารเมศ (2545) ได้กล่าวไว้ว่า วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.3)$$

ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x, x) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ คือ

$$H = f(x_1, x_2) \quad (2.4)$$

ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)”

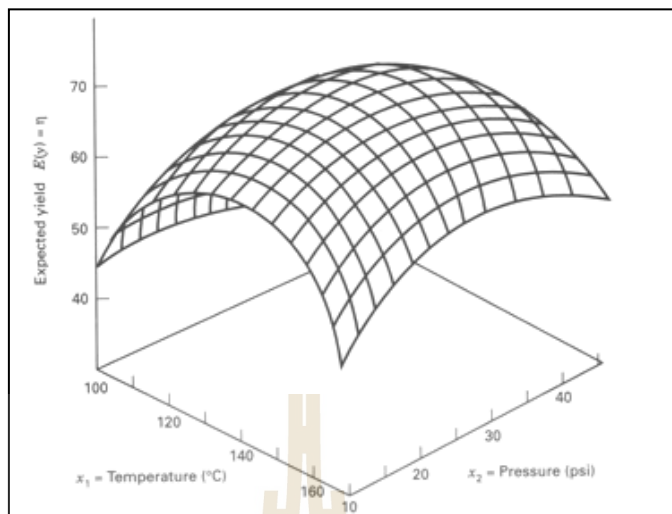
โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิก ดังรูปที่ 2.7 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบ ดังรูปที่ 2.8 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบของ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรก จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

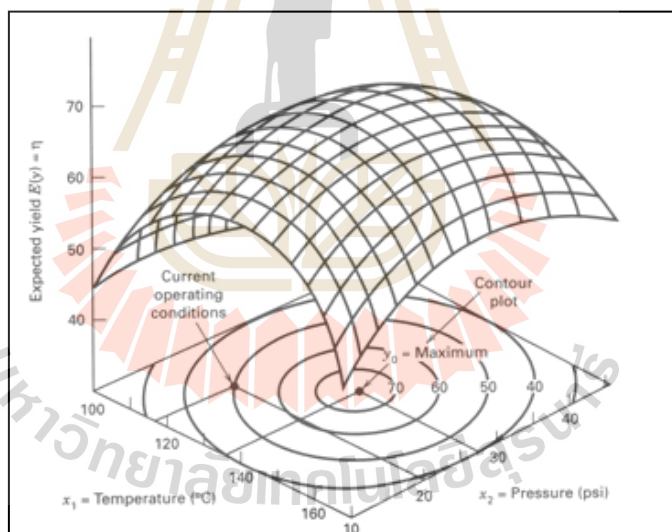
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.5)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสองดังสมการ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.25 พื้นผิวผลตอบแทนแบบสามมิติ



รูปที่ 2.26 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแทน

แผนการทดลองสำหรับการหาสมการพื้นผิวตอบสนองนั้น มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับกลุ่มของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองนั้น ๆ และเพื่อหาเงื่อนไขของปัจจัยต่าง ๆ ในระบบที่ทำให้ได้ค่าของตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด วิธีการนี้ได้มีการเสนอแนะครั้งแรกโดย Box และ Wilson (1951) หลังจากนั้นจึงมีการพัฒนากันต่อ ๆ มา วิธีการดังกล่าวนี้ใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) มาประยุกต์

ในการหารูปแบบความสัมพันธ์ที่เรียกว่ารูปแบบโพลิโนเมียล (Polynomial Model) โดยทั่วไปรูปแบบของพื้นผิวตอบสนองนั้นจะพิจารณารูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 หรือ 2 ส่วนการประมาณค่าพารามิเตอร์หรือสัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปแบบดังกล่าวจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

รูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 โดยทั่วไปมีการนำมาใช้เฉพาะบางแผนการทดลอง ซึ่ง Khuri และ Cornell (1987) ได้กล่าวไว้คือการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ระดับ (2^k Factorial), การออกแบบเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล 2 ระดับ (2^k Fractional Factorial) เป็นต้น

รูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 มีแผนการทดลอง เช่น CCD (Central Composite Design), การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 3 ระดับ (3^k Factorial) เป็นต้น

2.7.5 แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต (CCD)

แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตเป็นการพิจารณารูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 สำหรับ k ตัวแปรซึ่งมีรูปแบบคือ

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.7)$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรตอบสนอง
 $x_1, x_2, \dots, x_k$ คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นๆ
 $\beta_0, \beta_i (i=1, 2, \dots, k), \beta_{ij} (i=1, 2, \dots, k-1; j=2, 3, \dots, k)$
 คือ พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าหรือสัมประสิทธิ์การถดถอย
 ε คือ ค่าคลาดเคลื่อน

แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต เป็นแผนการทดลองที่มีจำนวนปัจจัย k ปัจจัย ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

1) จำนวนจุดของ Factorial Points มีจำนวนเท่ากับ 2^k โดยแต่ละปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัยจะทำการทดลอง 2 ระดับ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ -1 แทนระดับต่ำและ $+1$ แทนระดับสูง ดังนั้นการทดลองสำหรับ Factorial Points สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้คือ

$$(x_1, x_2, \dots, x_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$$

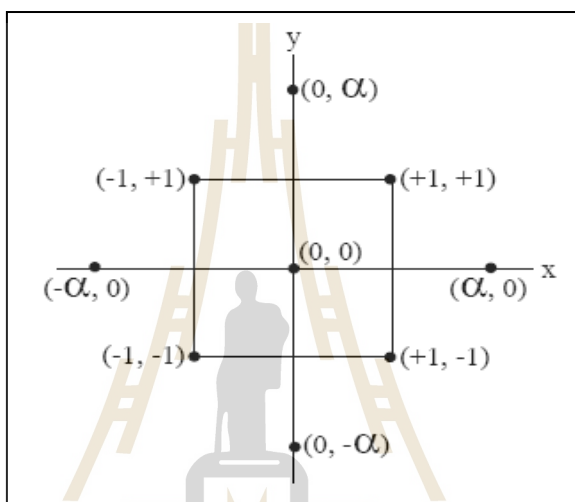
2) จำนวนจุดของ Center Points (n_0) จะต้องมีการทำซ้ำมากกว่า 1 ครั้งเพื่อทำการคำนวณหา Pure Error ในการวิเคราะห์การทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Lack-of-Fit) การทดลองสำหรับ Center Points เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้คือ

$$(x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$$

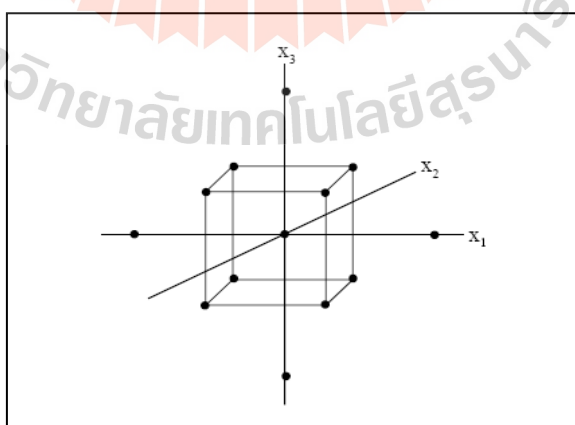
3) จำนวนจุดของ Star Points มีจำนวนเท่ากับ 2^k โดยแต่ละจุดอยู่ห่างจาก Center Points ด้วยระยะที่เท่ากันคือระยะ α โดย $\alpha = \sqrt[k]{2^k}$ จึงเป็นการทดลองที่อยู่ในกลุ่มการทดลองแบบ Rotatable Design การทดลองสำหรับ Star Points เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้คือ

$$(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, \pm\alpha)$$

ดังนั้นการทดลองจะมีจำนวนจุดทั้งหมดเท่ากับ $2^k + 2k + n^0$ ซึ่งการทดลองตามส่วนประกอบดังกล่าวสามารถแสดงตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.27 ส่วนประกอบของการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตที่มี 2 ปัจจัย



รูปที่ 2.28 ส่วนประกอบของการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตที่มี 3 ปัจจัย

เพื่อให้การทดลองเป็นไปตามคุณสมบัติของ Rotatable Design นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของการประมาณค่าตอบสนอง มีค่าคงที่ที่ทุก ๆ จุดของการทดลองที่มีระยะห่างจาก Center Point เท่า ๆ กัน โดยจะต้องมีการกำหนด α และ n_0 อย่างเหมาะสมด้วย นั่นคือ

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k}$$

$$n_0 = \{0.8386(\sqrt{2^k} + 2)^2 - 2^k - 2k\} \quad (2.8)$$

ตารางที่ 2.7 แสดงค่า α และ n_0 สำหรับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยต่างกัน

k	2	3	4	5	6
Factorial Point (2^k)	4	8	16	32	64
Start Points ($2k$)	4	6	8	10	12
Center Points (n_0)	5	6	7	10	15
จำนวน Runs	13	20	31	52	91
α	1.414	1.682	2.000	2.378	2.828

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลวารสารทางวิชาการที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ ซึ่งวารสารเหล่านี้จะช่วยทำให้ข้อมูลในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์และความถูกต้อง ทำให้ผู้สนใจศึกษามีความเข้าใจเกี่ยวกับการวิจัยครั้งนี้ นักวิจัยหลาย ๆ ท่านได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติในการศึกษาถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการตัดเฉือน และได้ใช้วิธีการที่หลากหลายโดยอ้างอิงจากทฤษฎีต่าง ๆ ในการสร้างโมเดลสำหรับการวิเคราะห์, นำมาใช้พยากรณ์ และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิวและอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดในกระบวนการตัดเฉือนวัสดุ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมดังต่อไปนี้

ในปี ค.ศ. 2007 Zhang et al. (2007) ประยุกต์ใช้วิธีการทากูชิในการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนในกระบวนการกัดปาดผิวหน้าอลูมิเนียมเพื่อให้ได้คุณภาพผิวที่ดีที่สุด ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ในการตัดเฉือน ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบ,

อัตราป้อน และความลึกในการตัด จากการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ทั้งสามโดยที่ความเร็วรอบ และอัตราป้อนส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากกว่าความลึกในการกัด

ในปีเดียวกัน Mohamed et al. (2007) ศึกษาการผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการกัด ที่ก่อให้เกิดวัสดุลุมิเนียมด้วยวิธีเจเนรอลเฟคทอเรียลดิไซน์ ซึ่งประกอบไปด้วยความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการกัด พบว่า อัตราป้อนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุดตามด้วยความเร็วรอบ, ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนและความลึกการกัดในแนวแกน, ความลึกในการกัดผล, ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วรอบและความลึกในการกัดตามลำดับ ในขณะที่อัตราป้อนและความลึกในการกัดมีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวเพียงเล็กน้อย

ในปี ค.ศ. 2010 Sivasakthivel et al. (2010) พบว่ามุมเลื่อย, ความเร็วรอบ, ความลึกการกัด ในแนวแกนและความลึกการกัดในแนวรัศมีส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดในการกัดวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 6063 ด้วยดอกเอ็นมิล โดยค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อใช้มุมเลื่อยระหว่าง 40° - 45° ความเร็วรอบที่ประมาณ 5000 รอบต่อนาที ความลึกในการกัดในแนวแกนที่ 3.5 มิลลิเมตร และความลึกในแนวแกนรัศมีที่ 2 มิลลิเมตร

ในปี ค.ศ. 2011 Fratila et al. (2011) ได้ใช้วิธีการทางวิชาการในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับอัตราการนิตสารหล่อเย็น และพารามิเตอร์ในการตัดเนื้อวัสดุอะลูมิเนียมแมกนีเซียม EN AW 5754 ในกระบวนการกัดปาดหน้าด้วยวัสดุตัดเนื้อที่ทำด้วยเหล็กไฮสปีดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวที่ดีที่สุดและการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดโดยทำการเปรียบเทียบอัตราการนิตสารหล่อเย็นปริมาณเล็กน้อยกับการกัดแบบแห้งซึ่งส่งผลต่อความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเพื่อความยั่งยืนของกระบวนการผลิต พารามิเตอร์ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วย ความเร็วตัด ความลึกในการตัด อัตราป้อน และสารหล่อเย็น ในการศึกษาจากผลกระทบของปัจจัยหลักพบว่า การกัดแบบแห้งให้ค่าความเรียบผิวดีที่สุด ในขณะที่อัตราการนิตสารหล่อเย็นเพียงเล็กน้อยที่ 0.03 ลิตรต่อชั่วโมง กับ 90 ลิตร ต่อชั่วโมงให้ค่าความหยาบผิวใกล้เคียงกันและมากกว่ากัดแบบแห้งเล็กน้อย

ในปีเดียวกัน Khorasani et al. (2011) ได้ทำการพยากรณ์อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด ในกระบวนการกัดปาดหน้าวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย AI 7075 โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ในการตัดเนื้อประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการกัด โดยผลตอบของการศึกษา คือ จำนวนนาฬิกาที่กัดได้ ในการศึกษาใช้วิธีการทางวิชาการในการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ จากนั้นใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์อายุการใช้งาน จากการศึกษาพบว่า สมการทางคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนเพียง 3.19 เปอร์เซ็นต์

ในปี ค.ศ. 2012 Cui et al. (2012) ได้ทำการศึกษาในเรื่องของแรงในการตัดเนื้อ, ความหยาบผิว, และรูปแบบของเศษตัดในกระบวนการกัดปาดหน้าเหล็กเกรด AISI H13 ด้วยวิธีการ

ทาทุชิ โดยทำการออกแบบการทดลองด้วยพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนที่แตกต่างกัน จากการทดลอง ผู้วิจัยพบว่าค่าความหยาบผิวจะน้อยที่สุดเมื่ออัตราป้อน ความลึกในการตัดในแนวแกนในระดับที่ต่ำ โดยที่ใช้ค่าความเร็วตัดที่ต่ำกว่า 1400 เมตร/นาที จะส่งผลให้ได้ค่าความหยาบผิวต่ำกว่า 0.3 ไมโครเมตร

ในปีเดียวกัน Kadirgama et al. (2012) ได้พัฒนาโมเดลเพื่อหาค่าคอนดิชันที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิวของอลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ด้วยเม็คมิลคาร์ไบด์ในกระบวนการกัดด้วยดอกเอ็นมิลวิธีการออกแบบการทดลองและวิธีพื้นผิวผลตอบแบบ บ็อกซ์ เบห์น เคน ซึ่งพบว่าหลังจากการปรับปรุงโมเดลพบว่าเป็นที่น่าพอใจมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 2-9%

ในปีเดียวกัน Dimitrios et al. (2012) ได้ทำการศึกษาถึงพารามิเตอร์ในการกัดอลูมิเนียมอัลลอย Al 7075-T6 ด้วยเอ็นมิลแบบบอลโนส ซึ่งพารามิเตอร์ประกอบไปด้วย ความลึกในการตัดเฉือนในแนวรัศมี ความลึกในการตัดเฉือนในแนวแกน อัตราป้อน และการเอียงทูลในการตัดในแนวแกน x และแกน y โดยทำการทดลองทั้งหมด 96 การทดลอง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน และสร้างสมการถดถอยในการพยากรณ์ค่าความหยาบผิว

ในปีเดียวกัน Arokiadass et al. (2012) ได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดต่ำที่สุดด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ ระบุว่าความเร็วรอบและสัดส่วนของ SiCp มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดตามด้วยอัตราป้อน ในขณะที่ความลึกการกัดในแนวแกนในการกัดวัสดุ LM25 Al/SiCp MMC ด้วยดอกกัดเอ็นมิล โดยที่ค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดจะน้อยที่สุดเมื่อความเร็วรอบต่ำ อัตราป้อนต่ำ และเปอร์เซ็นต์ของ SiCp ต่ำ

ในปี ค.ศ. 2013 Pinar et al. (2013) ได้ทำการศึกษาผลกระทบและหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการกัดอลูมิเนียมอัลลอย 5083 แบบพอกเกิดเพื่อให้ได้ความหยาบผิวน้อยที่สุดโดยใช้วิธีการทาทุชิด้วยเม็คอินเลิร์ทที่ห่อมีตชุบิตซีรูน APGT1135PDFR-G2HTI10 โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ประกอบด้วยความเร็วตัด, อัตราป้อน, รูปแบบการเดินของทูล และความลึกในการกัด ผู้เขียนพบว่าค่าความหยาบผิวมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความเร็วตัด และมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราป้อนและความลึกในการตัด จากสมการพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ กัดแบบ spiral ด้วยความเร็วตัด 300 m/min อัตราป้อน 150 mm/min และความลึกที่ 1 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธีการทาทุชิคือ 0.5413 ไมโครเมตร และจากการทดลองเพื่อยืนยันผล 3 การทดลองได้ค่าเฉลี่ย 0.55 ไมโครเมตร ซึ่งมีความแม่นยำและยอมรับได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ในปีเดียวกัน Jatti et al. (2013) ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ในการกัดที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิวในการกัดอลูมิเนียมอัลลอย LM6 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ และเครื่องบิน ด้วยเอนมิลแบบบอลโนส ในการศึกษาครั้งนี้ทางผู้วิจัยทำการศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการกัด โดยสมการทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นมาจากวิธีการ บ็อก เบห์นเคน เป็นหนึ่งในวิธีของวิธีผิวผลตอบทางสถิติ ซึ่งสมการที่ได้มีค่าความน่าเชื่อถือถึง 92.42% จากนั้นผู้วิจัยได้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการ Genetic Algorithm ซึ่งได้พยากรณ์ค่าที่ดีที่สุดของค่าความหยาบผิวได้ 0.45 ไมครอน

ในปีเดียวกัน Emel Kuram et al. (2013) ได้ทำการศึกษาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายผลตอบ ในกระบวนการกัด อลูมิเนียมอัลลอย AL 7075 ด้วยเอนมิลแบบไมโครบอลโนส ด้วยวิธีการทางสถิติ ในการทดลองได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการกัด ที่มีส่งผลต่อค่าความหยาบผิว แรงในการตัดเฉือน และการสึกหรอของเครื่องมือตัดและหาค่าที่เหมาะสมด้วยรูปแบบจำลองคณิตศาสตร์ Gray Relation Analysis จากการทดลองพบว่าค่าที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดน้อยที่สุดคือ ความเร็วรอบ 10000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.5 ไมโครเมตรต่อฟัน และความลึกในการกัด 50 ไมโครเมตร โดยที่ค่าการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบ และความลึกในการตัด ส่วนอัตราป้อนเพิ่มขึ้น การสึกหรอของเครื่องมือตัดจะลดลง ค่าความเหมาะสมของแรงในการตัดเฉือนในแกน x คือ ความเร็วรอบ 10000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.5 ไมโครเมตรต่อฟัน และความลึกในการกัด 100 ไมโครเมตร แรงตัดเฉือนในแกน x จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบ และอัตราป้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อความลึกในการตัดลดลง ค่าความเหมาะสมของแรงในการตัดเฉือนในแกน y คือ ความเร็วรอบ 10000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.5 ไมโครเมตรต่อฟัน และความลึกในการกัด 75 ไมโครเมตร แรงตัดเฉือนในแกน y จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบ และ อัตราป้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อความลึกในการตัดลดลง สำหรับค่าความเหมาะสมของความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ ความเร็วรอบ 12000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.5 ไมโครเมตรต่อฟัน และความลึกในการกัด 50 ไมโครเมตร แรงตัดเฉือนในแกน x จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น

ในปีเดียวกัน Surasit et al. (2013) ได้ศึกษาผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหยาบของผิว ในกระบวนการกัดปาดหน้าอลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกรด 6061 ด้วยเครื่องกัด CNC โดยปัจจัยในการทดลองประกอบไปด้วย ความเร็วรอบ (Speed), อัตราการป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) ไม่เกิน 1 มิลลิเมตรผู้วิจัยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลมาใช้ในการออกแบบการทดลอง พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบของผิวคืออัตราการป้อน และความเร็วตัด ในขณะที่ความลึกของการตัดไม่มีผลต่อความหยาบของผิว นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็น

ว่าพื้นความหยาบของผิวมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อใช้ความเร็วรอบ 4200 rpm และอัตราป้อน 1300 มิลลิเมตรเมื่อสมการถูกนำมาใช้ในการทดลองยืนยันผลพบว่าค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์ (MAPE) ของความหยาบผิวที่ได้จากการคาดการณ์เทียบกับค่ากับการทดลองคิดเป็นร้อยละ 4.12% ซึ่งน้อยกว่าข้อผิดพลาดของค่าความผิดพลาดที่ระบุไว้ของการยอมรับ

ในปีเดียวกัน Surasit et al. (2013) ได้ศึกษาผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหยาบผิว ในกระบวนการกัดปาดหน้าอลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกรด 2024 ด้วยเครื่องกัด CNC โดยปัจจัยในการทดลองประกอบไปด้วย ความเร็วรอบ (Speed), อัตราการป้อน (Feed rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ด้วยหัวปาดหน้าขนาด 63 มิลลิเมตรและเม็ดมีดคาร์ไบด์ ผู้วิจัยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลมาใช้ในการออกแบบการทดลอง พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบของผิวคืออัตราการป้อน และความเร็วตัด ในขณะที่ความลึกของการตัดไม่มีผลต่อความหยาบของผิว นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นความหยาบของผิวมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อใช้ความเร็วรอบ 3600 rpm และอัตราป้อน 1000 มิลลิเมตร เมื่อสมการถูกนำมาใช้ในการทดลองยืนยันผลพบว่าค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์ (MAPE) ของความหยาบผิวที่ได้จากการคาดการณ์เทียบกับค่ากับการทดลองคิดเป็นร้อยละ 4.12% ซึ่งน้อยกว่าข้อผิดพลาดของค่าความผิดพลาดที่ระบุไว้ของการยอมรับ

ในปีเดียวกัน Simunovic et al. (2013) ได้ทำการพยากรณ์คุณภาพของผิวชิ้นงานของอลูมิเนียมอัลลอย Al 6061 ด้วยสมการการถดถอย ในกระบวนการกัดปาดหน้าโดยทำการศึกษาวารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการกัด ในการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนค่าความหยาบผิวจะมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าเพิ่มความเร็วรอบค่าความหยาบผิวจะลดลง ในขณะที่ความลึกในการกัดไม่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว รวมถึงผลกระทบระหว่างความลึกในการกัดกับอัตราป้อน และ ความลึกในการกัดกับความเร็วรอบก็ไม่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเช่นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ความพึงพอใจหลังจากการปรับสมการอยู่ที่ 95.2 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดที่พยากรณ์ได้คือ 0.86 ไมโครเมตร

ในปีเดียวกัน Simunovic et al. (2013) ได้ทำการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ในการพยากรณ์ค่าความหยาบผิวของอลูมิเนียมอัลลอย Al 6061 ด้วยวิธีส่วนผสมกลางทางสถิติและวิธีโครงข่ายประสาทเทียมในกระบวนการกัดแบบปาดหน้า โดยทำการศึกษาวารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการกัด สมการที่ได้มีความน่าเชื่อถือสูงเนื่องจากมีค่า R-square adjusted ถึง 95.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงว่าสมการที่ได้มีความเหมาะสม จากนั้นนำโมเดลที่ได้มาหาพยากรณ์ค่าความหยาบผิวด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อนำผลจากการพยากรณ์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 4.01 เปอร์เซ็นต์

ในปีเดียวกัน P. S. Sivasakthivel et al. (2013) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยในกระบวนการ Machine ที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในดอกกัด (End Milling) ซึ่งประกอบไปด้วย Helix Angle of Cutter, Spindle Speed, Feed Rate, Axial and Radial Depth of Cut โดยโมเดลที่ใช้ในการพยากรณ์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิถูกพัฒนาด้วยวิธีการ Response Surface Methodology การทดลองการ Machine ขึ้นทดสอบอลูมิเนียมเกรด Al 6063 ด้วย High-Speed Steel End Mill โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Rotatable Design ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ K-Type Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ และวัดความเหมาะสมของของโมเดลที่ใช้ในการพยากรณ์ด้วย ANOVA โดยที่โมเดลที่ได้จะสามารถวิเคราะห์ผลกระทบโดยตรงและผลกระทบร่วมของปัจจัยในการ Machining จากนั้นหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยมีจุดเป้าหมายให้ได้ค่าอุณหภูมิ น้อยที่สุด โดยหาด้วยวิธี Genetic Algorithm ที่มาของ Code ใช้ภาษา C พบว่าค่าที่ดีที่สุด คือ 0.173°C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่ต่ำที่สุด

ในปีเดียวกัน Subramanian et al. (2013) ได้พัฒนาแบบจำลองทางสถิติที่มาใช้ในการพยากรณ์แรงตัด (Cutting Force) ในเทอมของปัจจัยในการบวนการ Machining ประกอบไปด้วย Cutting Speed, Cutting Feed Rate, และ Axial Depth of Cut โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Response Surface Methodology ในการ Machining ขึ้นทดสอบ Al 7075-T6 และเครื่องมือตัดแบบอินเลิร์ทลาร์ไบด์ โดยงานวิจัยนี้วัดแรงทั้ง 3 แกน และใช้สมการกำลังสองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง Response Surface Methodology มาพยากรณ์แรงตัดเฉือน และใช้วิธีการ Genetic Algorithm หาค่าแรงตัดเฉือนที่น้อยที่สุด พบค่าแรงตัดเฉือน Infeed Force F_x เท่ากับ 367.67 N, Crossfeed Force F_y เท่ากับ 569.843 N และ Thrust Force F_z เท่ากับ 28.1141 N โดยระดับของปัจจัยที่เหมาะสมแสดงดังตารางต่อไปนี้

ในปีเดียวกัน Subramanian et al. (2013) ทำการพัฒนาแบบจำลองทางสถิติที่มาศึกษาการสั่นสะเทือนของการกัดจากรูปทรงของ High Speed Steel End Mill Cutter เช่น Radial Rake Angle, Nose Radius และพารามิเตอร์ของการ Machining ได้แก่ Cutting Speed, Cutting Feed และ Axial Depth of Cut ในการกัดอลูมิเนียมเกรด Al 7075-T6 โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ ฟันผิวผลตอบ โดยผู้ทำวิจัยวัดการสั่นสะเทือนโดย Piezoelectric Accelerometers และใช้สมการกำลังสองในการพยากรณ์ การสั่นสะเทือน โดยที่วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความสามารถของต้นแบบ และตรวจสอบปัจจัยหลักและปัจจัยที่มีผลร่วมกันของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือน ทำการเลือกพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด ซึ่งทำให้มั่นใจในเสถียรภาพของกระบวนการกัด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ Radial Rake Angle -12° , Nose Radius -0.8 mm , Cutting Speed -115 m/min ,

Cutting Feed Rate -0.04 mm/tooth, Axial Depth of Cut -2.5 mm. ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คาดการณ์เอาไว้กับค่าที่ได้จากผลการทดลองจริง พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมีค่าที่ดีซึ่งอยู่ในระดับความเชื่อมั่นที่ 95 %

ในปีเดียวกัน Jeyakumar et al. (2013) ได้สร้างสมการพยากรณ์แรงในการตัดเฉือน, ความสึกหรอของเครื่องมือตัด และค่าความหยาบผิวโดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยความเร็วรอบ, อัตราป้อน, ความลึกในการตัดเฉือน และรัศมีที่ปลายคมตัด กลุ่มผู้วิจัยระบุว่าความลึกในการตัดและรัศมีของที่ปลายคมตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยระหว่าง อัตราป้อนและความลึกในการกัด รวมถึงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนและรัศมีที่ปลายคมตัดส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดโดยที่ค่าความสึกหรอของเครื่องมือตัดจะสูงเมื่อความเร็วตัดต่ำเพราะว่าแรงในการตัดเฉือนที่สูงและเกิดการฟอร์มตัวของการพอกที่คมตัด ค่าความหยาบผิวจะต่ำที่ความเร็วรอบสูง

ในปี ค.ศ. 2014 Ekici et al. (2014) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนสำหรับกระบวนการกัดวัสดุ Al-10% SiC MMC ด้วยเอ็นมิล โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลดีไซน์ 3 ระดับ โดยปัจจัยในการศึกษาประกอบด้วย ชนิดของผิวเคลือบ ความเร็วตัดเฉือน อัตราป้อน และผู้วิจัยพบว่าอัตราป้อนคือปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุด ตามด้วยชนิดของผิวเคลือบ และความเร็วตัดตามลำดับ

ในปีเดียวกัน M. Subramanian et al (2014) ได้ทำการปรับปรุงโมเดลในการพยากรณ์ค่าความหยาบของผิว จากรูปทรงของเครื่องมือตัดเช่น Radial Rake Angle, Nose Radius และพารามิเตอร์ของการกระบวนการตัดเฉือน ได้แก่ Cutting Speed, Cutting Feed และ Axial Depth of Cut โดยใช้วิธี Response Surface Methodology ในการออกแบบการทดลองการกัดขึ้นทดสอบกัด อลูมิเนียมเกรด Al 7075-T6 โดยใช้ High-Speed Steel End Mill ที่แตกต่างกันด้านรูปทรงในงานวิจัยนี้ทำการวัดค่าความหยาบผิวโดย Mitutoyo Surf Test SJ 201 จากนั้นเก็บผลการทดลองและนำข้อมูลไปสร้างสมการกำลังสองเพื่อนำมาใช้พยากรณ์ค่าความหยาบผิว ตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดลด้วย ANOVA และตรวจสอบปัจจัยหลักและปัจจัยที่มีผลร่วมกันของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบของผิวขึ้นทดสอบผลการทดลองพบว่าค่าที่เหมาะสมที่ส่งผลให้มีค่าความหยาบน้อยที่สุดคือ เช่น Radial Rake Angle เท่ากับ 12° , Nose Radius เท่ากับ 0.8 mm, Cutting Speed เท่ากับ 115 m/min, Cutting Feed เท่ากับ 0.04 mm/tooth และ Axial Depth of Cut เท่ากับ 2 mm

ในปีเดียวกัน Surasit et al. (2014) ได้ศึกษาผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการกัดปาดหน้าอลูมิเนียมแข็งของแข็งเกรด 7075 โดยปัจจัยในการทดลองประกอบไป

ด้วยความเร็วรอบ (Speed), อัตราการป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ซึ่งใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบของผิวคืออัตราการป้อน และความเร็วตัด ในขณะที่ความลึกของการตัดไม่มีผลต่อความหยาบของผิว นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นความหยาบของผิวมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อใช้ความเร็วรอบ 3800 rpm และอัตราป้อน 1000 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อสมการถูกนำมาใช้ในการทดลองยืนยันผลพบว่าค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์ (MAPE) ของความหยาบผิวที่ได้จากการคำนวณเทียบกับค่ากับการทดลองคิดเป็นร้อยละ 3.62 ซึ่งน้อยกว่าข้อผิดพลาดของค่าความผิดพลาดที่ระบุไว้ของการยอมรับ และยังพบว่ารูปแบบของการสึกหรอของเครื่องมือตัดคล้ายกับการแตกหักที่เกิดจากความล้า อาจจะเป็นเพราะว่าเกิดตรงปลายของเครื่องมือตัด หรือผลกระทบจากความต้านทานการสึกหรอน้อย

ในปีเดียวกัน Sukumar et al (2014) ได้ศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อพยากรณ์ค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดปาดหน้าอลูมิเนียมอัลลอย AL 6061 โดยใช้วิธีการทางสถิติในการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัดเนื่อง จากนั้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมพบว่าได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังนี้ ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที อัตราป้อน 250 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการกัด 0.1 มิลลิเมตร จากนั้นใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์ค่าที่ดีที่สุดพบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังนี้ ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที อัตราป้อน 250 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการกัด 0.2 มิลลิเมตร จากผลการศึกษาพบว่าค่าความหยาบผิวที่ได้จากวิธีการทางสถิติและวิธีโครงข่ายประสาทเทียมได้เท่ากับ 0.113 ไมครอน และ 0.115 ไมครอนตามลำดับ

ในปีเดียวกัน Dikshit et al (2014) และคณะได้ทำการทดลองศึกษาถึงแรงในการตัดเฉือนในกระบวนการกัด อลูมิเนียม AI 2014-T6 ด้วยเอนมิลแบบบอล โนส โดยวิธีผิวผลตอบทางสถิติในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลจากความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการกัดในแนวแกน ความลึกในการกัดในแนวรัศมี ภายใต้การกัดแบบแห้ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าแรงในการตัดเฉือนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อน และความลึกในการกัดในแนวแกน และจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ

ในปีเดียวกัน Turgay Kivak et al. (2014) วิธีการทางสถิติและการวิเคราะห์การถดถอยถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลค่าความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานเหล็กกล้าผสมแมงกานีสด้วยเมตมิดคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วย PVD TiAlN และ CVD TiCN/Al₂O₃ ภายใต้สภาวะการกัดแบบ Dry Milling ในการทดลองใช้ L18 (2x3x3) full factorial design และ Orthogonal Array กับเครื่องกัด ANOVA ถูกนำมาใช้ในการช่วยตัดสินใจในการหาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหยาบของผิวและการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Flank Wear) โดยที่ Cutting Tool, Cutting Speed and Feed Rate

ถูกคัดเลือกมาเป็นพารามิเตอร์ที่จะหาการศึกษา จากการทดลองพบว่า Feed Rate เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบของผิวมากที่สุด และ Cutting Speed เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดมากที่สุด การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น (แบบยกกำลังสอง) ถูกนำมาใช้ในการทำนายผลลัพธ์ของการทดลอง จากการยืนยันผลการทดลองจากวิธีการทางสถิติ ประสิทธิภาพสำเร็จเป็นอย่างมากในการค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเกิดความหยาบของผิวชิ้นงานและการสึกหรอของคมตัดด้านข้างน้อยที่สุดในกระบวนการกัด เหล็กกล้าผสมแมงกานีส

ในปี ค.ศ. Jie Yi et al. (2015) ได้สร้างโมเดลพยากรณ์ค่าความหยาบผิวสำหรับสำหรับกระบวนการวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ด้วยไมโครเอ็นมิล โดยใช้วิธีการออกแบบแบบส่วนผสมกลาง ซึ่งคณะวิจัยได้สรุปว่าค่าความหยาบผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นและความเร็วตัดลดลง

ในปีเดียวกัน G. Mahesh et al (2015) ทำการพัฒนาโมเดลที่ใช้ในการทำนายค่าความหยาบของผิว โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบจาก Radial Rake Angle ของ End Mill ร่วมกับปัจจัยที่มีส่งผลกระทบจากกระบวนการตัดเฉือนประกอบไปด้วย Spindle Speed, Feed Rate, Axial Depth of Cut and Radial Depth of Cut เป็นปัจจัยที่ใช้ในการกีดกันทดสอบอะลูมิเนียม เกรด 6063 และทำนายค่าความหยาบผิวด้วยโมเดลสมการกำลังสอง ที่พัฒนามาจากวิธีการวิธีการ Response Surface Methodology ในการทดลองแบ่งระดับของปัจจัยเป็น 5 ระดับ โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนเพื่อศึกษาว่าปัจจัยที่มีผลกระทบโดยและผลกระทบร่วมระหว่างแต่ละปัจจัย จากนั้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการโดยใช้วิธีทางพันธุกรรม (GA) ในการหาค่าความหยาบที่น้อยที่สุด ซึ่งได้ค่าความหยาบที่น้อยที่สุด 0.25 ไมโครเมตร จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองยืนยันผลพบว่าค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบยืนยันผลมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีเยี่ยม

ในปี ค.ศ. 2016 Sheth et al (2016) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการกัด ในกระบวนการตัดเฉือนเหล็กหล่อ WCB ที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวและความเรียบในกระบวนการกัดปาดหน้า โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนในทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าผลตอบ จากนั้นใช้วิธีส่วนผสมกลางในการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์พบว่าสมการที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ของความหยาบผิวและความเรียบ 8.56 เปอร์เซ็นต์ และ 3.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

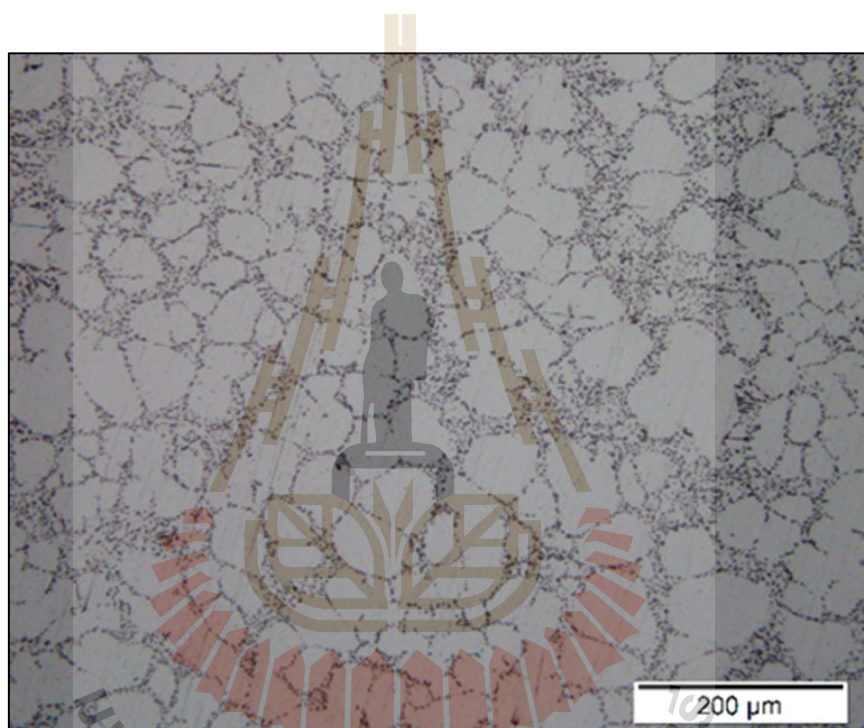
จากปรีทศวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 นำมาสู่วิธีการดำเนินการวิจัย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ซึ่งรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุ
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์
- 3.3 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง
- 3.4 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล
- 3.5 การประยุกต์ใช้การออกแบบส่วนผสมกลางเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
- 3.6 การดำเนินการทดลอง
- 3.7 การวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว
- 3.8 การวิเคราะห์ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด
- 3.9 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ (Materials)

ในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นทดสอบเป็นอะลูมิเนียมหล่อเกรด A356 ซึ่งขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะมีการแข็งตัว (GISS) โดยเริ่มจากก้อนโลหะอะลูมิเนียมเกรด A356 ถูกหลอมในเตาหลอมด้วยอุณหภูมิ 700 °C จากนั้นน้ำโลหะถูกตักขึ้นมาด้วยถ้วยตักจนกระทั่งอุณหภูมิน้ำโลหะลดลงที่ 620 °C จากนั้นปล่อยให้แข็งตัวในโตรเจนผ่านแท่งแกรไฟต์พูน น้ำโลหะในกระบวยเพื่อคว้านน้ำโลหะในขณะที่เริ่มมีการแข็งตัว โดยใช้เวลา 7 นาที จากนั้นน้ำโลหะถูกเทใส่แม่พิมพ์ ซึ่งคายและพันธ์ถูกเผาที่อุณหภูมิ 300 °C และ 80 °C ตามลำดับ และชิ้นงานถูกขึ้นรูปด้วยการหล่ออัดโดยใช้ความดัน 150 MPa ซึ่งขั้นตอนเป็นไปดังรูปที่ 3.1 จากนั้นชิ้นทดสอบที่ผ่านการหล่ออัดได้ถูกนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ดังต่อไปนี้ การอบละลายที่อุณหภูมิ 540 °C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการการชุบเย็น และทำการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

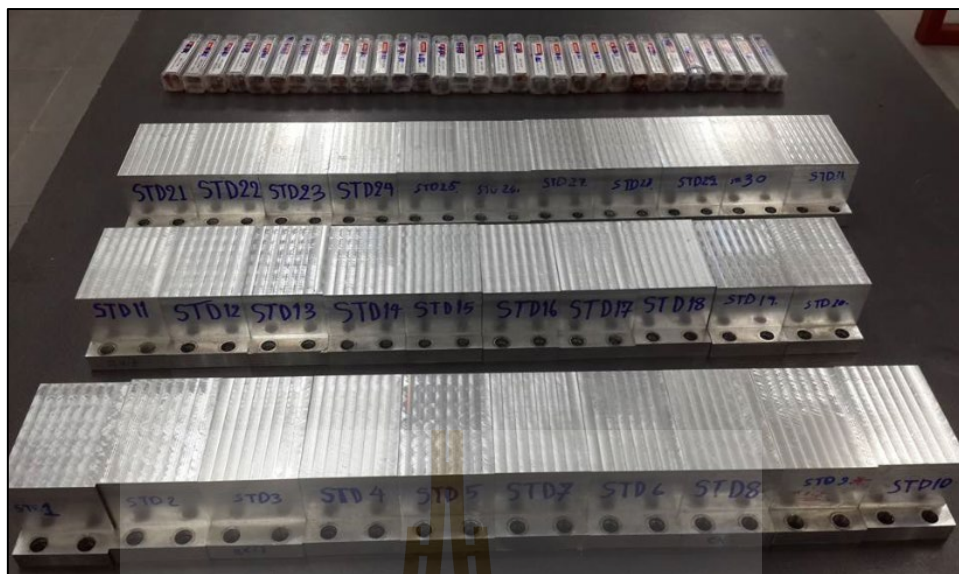
อะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 พบว่าโครงสร้างของชิ้นทดสอบเป็นเกรนแบบก้อนกลม (Globular Structure) โดยประกอบด้วยเนื้อเมตริกซ์ คือ เฟส α -Al (บริเวณสีขาว) และเฟสยูเทคติก ซิลิกอนคือ บริเวณที่มีรูปร่างเป็นแผ่นเล็ก ๆ กระจายตามขอบเกรนของเฟส α -Al ซึ่งเกรนก้อนกลมนี้ทำให้ชิ้นงานแข็งแรงมากขึ้นและลดการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัวของวัสดุ โดยที่ส่วนผสมของอะลูมิเนียม A356 แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งวัสดุได้ถูกกัดขึ้นรูปให้เป็นชิ้นทดสอบ ขนาดพื้นที่หน้าตัด 48×70 มิลลิเมตร ซึ่งรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3



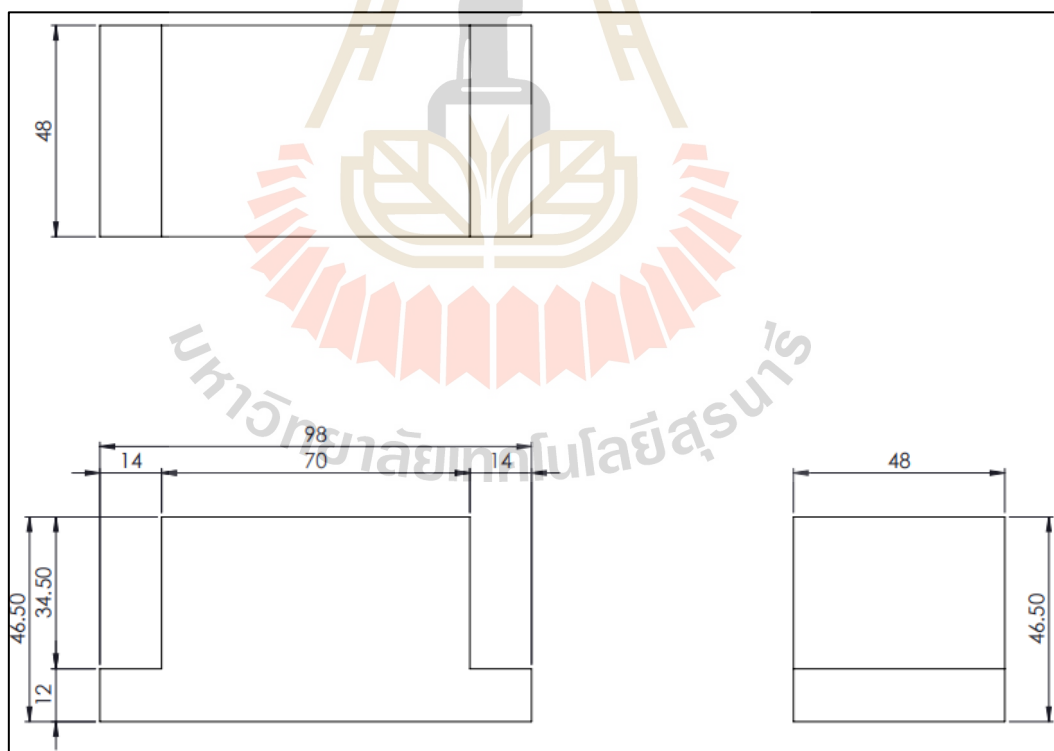
รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
7.18	0.215	0.108	0.0197	0.0045	0.0089	0.112	Bal.



รูปที่ 3.2 วัสดุชิ้นงานอลูมิเนียม A356-T6 สำหรับการทดลอง



รูปที่ 3.3 ขนาดวัสดุชิ้นทดสอบ

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องกัด

เครื่องกัดซีเอ็นซีแกนตั้งยี่ห้อเครื่องกัด CNC Milling ยี่ห้อ CHEVALIER รุ่น QP1620-L ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นเครื่องจักรอัตโนมัติที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อน และเครื่องมือตัดเนื่องโดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมการทำงาน เพื่อให้เกิดการตัดเนื้อวัสดุให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ เครื่องกัดซีเอ็นซีมีชุดคอนโทรลยี่ห้อ FANUC ซึ่งจะใช้การป้อนคำสั่ง G Code และ M Code เพื่อกำหนดขั้นตอนการทำงาน การเลือกใช้เครื่องมือตัด การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ การควบคุมอัตราการป้อน และความเร็วรอบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง ข้อมูลจำเพาะของเครื่องกัดมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 10,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนสูงสุด 10,000 มิลลิเมตรต่อนาที ชุดหัวจับเครื่องมือขนาด BT 40



รูปที่ 3.4 เครื่องกัด CNC Milling ยี่ห้อ CHEVALIER รุ่น QP1620-L

3.2.2 เครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดประเภทดอกกัดเอ็นมิลล์ (End Mill) ผลิตจากบริษัท ARNO ซึ่งทำจากวัสดุคาร์ไบด์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ดอกเอ็นมิลล์ที่มีคมตัด 2 คมตัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ

เครื่องมือตัดที่ 12 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 74 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือตัดที่มีขนาดของมุมเกลียว (Helix Angle) ระหว่าง 30° - 50° และมุมคายเศษในแนวรัศมี (Rake Angle) ระหว่าง 8° - 16° ซึ่งตัวอย่างดอกกัดเอ็นมิลที่มีมุมเกลียวขนาด 35° และมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี 10° เปรียบเทียบกับดอกเอ็นมิลที่มีมุมเกลียวขนาด 45° และมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี 10° แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ดอกกัดเอ็นมิลล์ (End Mill) ยี่ห้อ Armo

3.2.3 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน

เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน ยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 6 ดังรูปที่ 3.6 เป็นเครื่องสำหรับการขัดหยาบและขัดละเอียดผิวชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการทดสอบค่าความแข็ง ทดสอบส่วนผสมทางเคมี และส่องโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ



รูปที่ 3.6 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน

3.2.4 เครื่องมือวัดค่าความแข็งผิวงาน

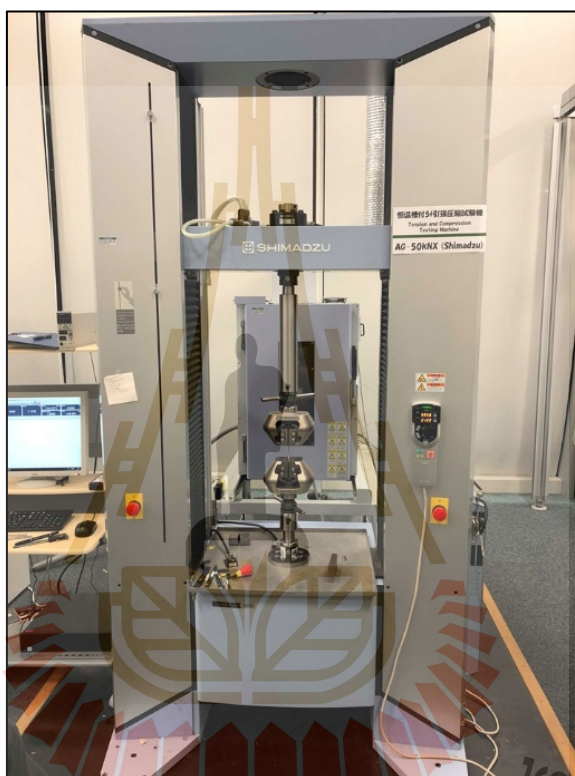
เครื่องวัดความแข็งผิวชิ้นงาน เป็นเครื่องสำหรับวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ ดังรูปที่ 3.7 โดยการใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็กลงไปที่ผิววัสดุด้วย น้ำหนักกดคงที่ 100 กรัม กดเป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อ พื้นที่ของรอยกด



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ

3.2.5 เครื่องทดสอบแรงดึง

เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X ดังรูปที่ 3.8 สามารถรองรับแรงดึงสูงสุดได้ 50 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่มีคุณภาพสูง มีช่วงความละเอียดสูงถึง 1/1000 เท่าของโหลดเซลล์ รองรับการวัดความเร็วในการทดสอบ 0.0005 ถึง 1,000 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแม่นยำของแรง $\pm 1\%$ ของค่าที่แสดง



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.2.6 สเปกโตรมิเตอร์

สเปกโตรมิเตอร์เป็นเครื่องสำหรับวัดทดสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยการยิงลำแสงจากแหล่งกำเนิดผ่านเกรตติงไปสู่วัสดุชิ้นงาน และทำการวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อทำการระบุชนิดของสารโดยได้จากผลการวัดความเข้มแสงที่แตกต่างความยาวคลื่นของแสงและสัดส่วนของพลังงานโฟตอน



รูปที่ 3.9 สเปกโตรมิเตอร์

3.2.7 อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าความหยาบผิว

อุปกรณ์วัดความหยาบผิว ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น Surf Test SJ-210 เป็นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดสอบวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.10 โดยหัวโพรบ (Probe) ที่ปลายหัววัดเคลื่อนที่บนผิวชิ้นงานที่ต้องการวัด ซึ่งความยาวระยะวัดใช้มาตรฐานที่ใช้ด้วย เช่น ISO 4287:1997 (ยุโรป), ANSI/ASME B 46.1-1995 (อเมริกา) และ JIS B0601-1994 (ญี่ปุ่น) เป็นต้น ซึ่งในการวิจัยทำการทดสอบวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average: Ra) เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์วัดความหยาบผิว

3.2.8 อุปกรณ์สำหรับการวัดการสึกหรอของเครื่องมือตัด

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX51 ดังรูปที่ 3.11 เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็กแบบส่องแสงสำหรับขยายภาพ โดยการสะท้อนแสงจากวัตถุเข้าสู่เลนส์ ซึ่งมีกำลังขยายต่าง ๆ (เลนส์ใกล้ตาที่มีกำลังขยายที่ 10 เท่า และเลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยายที่ 5 เท่า, 10 เท่า, 20 เท่า, 50 เท่า และ 100 เท่า) ซึ่งกล้อง OM ใช้คลื่นแสงที่มนุษย์มองเห็น ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ซึ่งแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้น จะทำให้ภาพที่มีความคมชัดมากยิ่งขึ้น



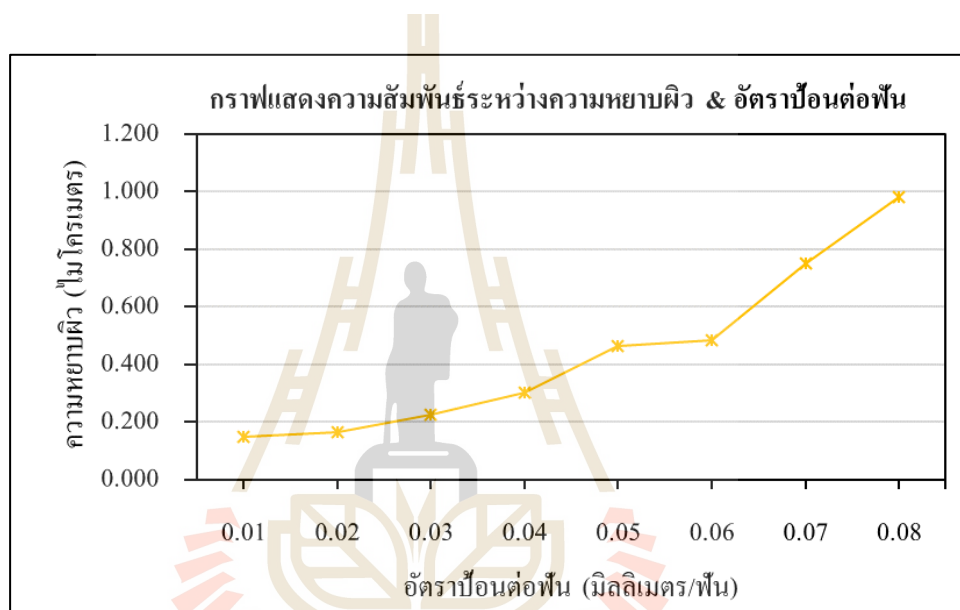
รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.3 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง

จากการทบทวนวรรณกรรมผู้วิจัยได้เลือกปัจจัยที่จะทำการศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบในการตัดเฉือน, อัตราการป้อนต่อฟัน, มุมเกลียว และมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี ผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาช่วงระดับค่าของปัจจัยเพื่อทำการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักที่คาดว่าจะส่งผลต่อความหยาบผิว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาและการสอบถามข้อมูลจากโรงงานผู้ผลิตเครื่องมือตัดหลาย ๆ แห่ง ผู้วิจัยได้รับคำแนะนำช่วงระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสมแก่การใช้งาน และผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาช่วงระดับค่าของปัจจัยดังต่อไปนี้ อัตราป้อนต่อฟันและความเร็วตัดเฉือน ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13

3.3.1 การทดลองเพื่อกำหนดระดับของอัตราป้อนต่อฟัน

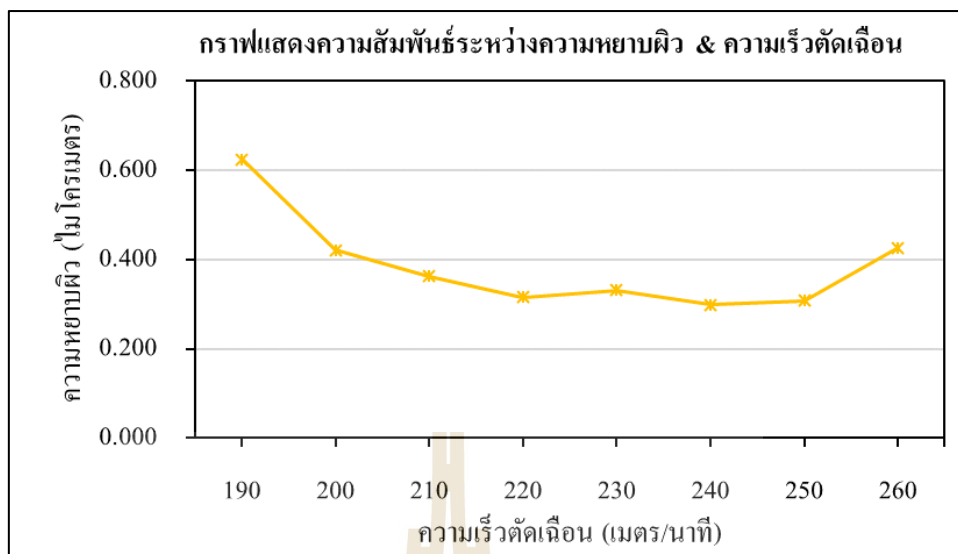
ผู้วิจัยได้กำหนดค่าคงที่ของระดับปัจจัยคือ ค่าความเร็วตัดเฉือน 230 เมตร/นาที, ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร, มุมเกลียว 45° และมุมคายเศษ 14° โดยทำการทดลองศึกษาอัตราป้อนต่อฟันที่ค่า 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07 และ 0.08 มิลลิเมตร/ฟัน จากรูปที่ 3.12 พบว่าเมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงกำหนดอัตราป้อนต่อฟันที่จะนำไปศึกษาในหัวข้อถัดไปคือ 0.02 และ 0.04 เมตร/นาที



รูปที่ 3.12 ผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของอัตราป้อนต่อฟัน

3.3.2 การทดลองเพื่อกำหนดระดับของความเร็วตัดเฉือน

ผู้วิจัยได้กำหนดค่าคงที่ของระดับปัจจัยดังต่อไปนี้ อัตราป้อนต่อฟันคงที่ที่ 0.03 มิลลิเมตร/ฟัน ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร, มุมเกลียว 45° และมุมคายเศษ 14° โดยทำการทดลองศึกษาความเร็วตัดเฉือนที่ค่า 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250 และ 260 เมตร/นาที พบว่าเมื่อความเร็วตัดเฉือนเพิ่มขึ้นระหว่าง 190-250 เมตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลงและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วตัดเฉือนเพิ่มเป็น 260 เมตรต่อนาที ดังนั้นจึงกำหนดระดับของปัจจัยความเร็วตัดเฉือนที่จะนำไปศึกษาในหัวข้อถัดไป คือ 215 และ 245 เมตร/นาที



รูปที่ 3.13 ผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของความเร็วตัดเฉือน

3.4 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

การออกแบบการทดลองเบื้องต้นเป็นการคัดกรองหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด เนื่องจากการคัดกรองปัจจัยมีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 4 ปัจจัย โดยที่ผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือ ระดับสูงและระดับต่ำ ซึ่งปัจจัยระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์ขั้นกรองปัจจัยเบื้องต้น

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับ 2 ระดับ		หน่วย
		ต่ำ (-1)	สูง (1)	
1. ความเร็วตัดเฉือน (Cutting speed)	Vc	215	245	เมตร/นาที
2. อัตราการป้อนต่อฟัน (Feed per tooth)	Fz	0.02	0.04	มิลลิเมตร/ฟัน
3. มุมเกลียว (Helix angle)	Helix	35	45	องศา
4. มุมคายเศษในแนวรัศมี (Rake angle)	Rake	10	14	องศา

ระดับของตัวแปรความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟันผู้วิจัยได้เลือกตามการทดลอง หัวข้อที่ 3.3 ส่วนมุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวแกนรัศมีผู้วิจัยเลือกใช้ตามผู้ผลิตเครื่องมือตัด แนะนำ ซึ่งในอุตสาหกรรมทั่วไปมุมเกลียวจะมีค่าอยู่ระหว่าง 30° - 50° และมุมคายเศษอยู่ในช่วง 8° - 14° สำหรับการตัดเฉือนอลูมิเนียมที่มีเศษสั้น

ตารางที่ 3.3 รูปแบบและลำดับขั้นการออกแบบการทดลองในการทดลอง

StdOrder	PtType	Blocks	Vc	Fz	Helix	Rake	Ra	Flank wear
1	1	1	215	0.02	35	10		
2	1	1	245	0.02	35	10		
3	1	1	215	0.04	35	10		
4	1	1	245	0.04	35	10		
5	1	1	215	0.02	45	10		
6	1	1	245	0.02	45	10		
7	1	1	215	0.04	45	10		
8	1	1	245	0.04	45	10		
9	1	1	215	0.02	35	14		
10	1	1	245	0.02	35	14		
11	1	1	215	0.04	35	14		
12	1	1	245	0.04	35	14		
13	1	1	215	0.02	45	14		
14	1	1	245	0.02	45	14		
15	1	1	215	0.04	45	14		
16	1	1	245	0.04	45	14		

3.5 การประยุกต์ใช้การออกแบบส่วนผสมกลางเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม

การดำเนินการเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยหลักที่มีผลอย่างนัยสำคัญต่อค่าความหยาบของผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 โดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลอง ขั้นตอนนี้เป็น การนำปัจจัยหลักที่ได้จากการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติในเบื้องต้น โดยการนำปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหยาบของผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมาทำการออกแบบการทดลอง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลัก จากงานวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่

เหมาะสมของปัจจัยในบทที่ 2 ได้มีการใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบคือ การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) โดยการออกแบบพื้นผิวผลตอบนี้ก็มีวิธีการที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ซึ่งการทดลองที่ปริบูรณ์ของการออกแบบส่วนประสมกลางจะมีการเพิ่มข้อมูล เพื่อให้มีจุดเพียงพอที่จะหาแบบจำลองกำลังสองได้ จึงเหมาะสำหรับการทดลองบนปัจจัยที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยในขอบเขตที่อยู่นอกเหนือจากค่าในระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัยได้ กล่าวคือ ปัจจัยนำเข้าทุกปัจจัยจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าให้มีขนาดเท่าใดก็ได้ แต่การทดลองที่ปริบูรณ์ของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะไม่มีเพิ่มข้อมูลเช่นเดียวกับการออกแบบส่วนประสมกลาง ทำให้สามารถทำการทดลองบนค่าในระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูงได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใด ๆ ทั้งสิ้น เหมาะสำหรับการทดลองที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยให้อยู่นอกเหนือจากสามระดับได้ (ปารเมศ ชูติมา, 2454) ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) โดยระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลองโดยละเอียดนี้จะมี 5 ระดับ โดยปรับค่าจากระดับต่ำ-สูง ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งปัจจัยและระดับของปัจจัยได้แสดงดังตารางที่ 3.4 และตารางการออกแบบการทดลองแสดงในตัวอย่างตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 รูปแบบและลำดับขั้นการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับ 5 ระดับ					หน่วย
		(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	
1. ความเร็วตัดเฉือน (Cutting speed)	Vc	200	215	230	245	260	เมตร/นาที
2. อัตราการป้อนต่อฟัน (Feed per tooth)	Fz	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	มิลลิเมตร/ฟัน
3. มุมเกลียว (Helix angle)	Helix	30	35	40	45	50	องศา
4. มุมคายเศษในแนวรัศมี (Rake angle)	Rake	8	10	12	14	16	องศา

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างตารางการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

StdOrder	PtType	Blocks	Vc	Fz	Helix	Rake	Ra	Flank wear
1	1	1	215	0.02	35	10		
2	1	1	245	0.02	35	10		
3	1	1	215	0.04	35	10		
4	1	1	245	0.04	35	10		
5	1	1	215	0.02	45	10		
6	1	1	245	0.02	45	10		
7	1	1	215	0.04	45	10		
8	1	1	245	0.04	45	10		
9	1	1	215	0.02	35	14		
10	1	1	245	0.02	35	14		
11	1	1	215	0.04	35	14		
12	1	1	245	0.04	35	14		
13	1	1	215	0.02	45	14		
14	1	1	245	0.02	45	14		
15	1	1	215	0.04	45	14		
16	1	1	245	0.04	45	14		
17	-1	1	200	0.03	40	12		
18	-1	1	260	0.03	40	12		
19	-1	1	230	0.01	40	12		
20	-1	1	230	0.05	40	12		
21	-1	1	230	0.03	30	12		
22	-1	1	230	0.03	50	12		
23	-1	1	230	0.03	40	8		
24	-1	1	230	0.03	40	16		
25	0	1	230	0.03	40	12		
26	0	1	230	0.03	40	12		
27	0	1	230	0.03	40	12		
28	0	1	230	0.03	40	12		
29	0	1	230	0.03	40	12		
30	0	1	230	0.03	40	12		
31	0	1	230	0.03	40	12		

3.6 การดำเนินการทดลอง

3.6.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนดำเนินการทดลอง

3.6.1.1 การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจากการทดสอบความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง การทดสอบส่วนผสมทางเคมี และการทดสอบโครงสร้างจุลภาค โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การทดสอบความแข็ง เริ่มจากขั้นตอนการขัดปรับระนาบด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน โดยทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการวัดค่าความแข็งเฉลี่ย โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งผิวชิ้นงานได้ค่าความแข็งเฉลี่ยดังตารางที่ 3.6

- การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง โดยขึ้นทดสอบได้ถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องตัดชิ้นงานได้น้ำด้วยกระแสไฟฟ้าแบบลวดระบบอัตโนมัติ (CNC wire cut EDM) ยี่ห้อ Mitsubishi electric รุ่น MV-R โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM E8 จากนั้นทำการทดสอบโดยการดึงชิ้นงานด้วยอัตราความเร็วในการดึงที่ 1.02 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงดึงแสดงดังตารางที่ 3.7

- การทดสอบส่วนผสมทางเคมี เริ่มจากขั้นตอนการขัดปรับระนาบด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน โดยทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการวัดค่าส่วนผสมทางเคมี โดยใช้เครื่อง Spectrometer ได้ค่าส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.1

- การทดสอบโครงสร้างจุลภาค เริ่มจากขั้นตอนการขัดปรับระนาบด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน โดยทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วทำการขัดลอูมินา จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปกัดกรดเพื่อดูโครงสร้างจุลภาค โดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบความแข็งของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6

No.	ค่าความแข็ง (HV)
1	122.3
2	113.6
3	120.6
4	121.1
5	116.3

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบความแข็งของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 (ต่อ)

No.	ค่าความแข็ง (HV)
6	122.8
7	103.2
8	110.8
9	114.5
10	107.0
ค่าเฉลี่ย	115.22

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6

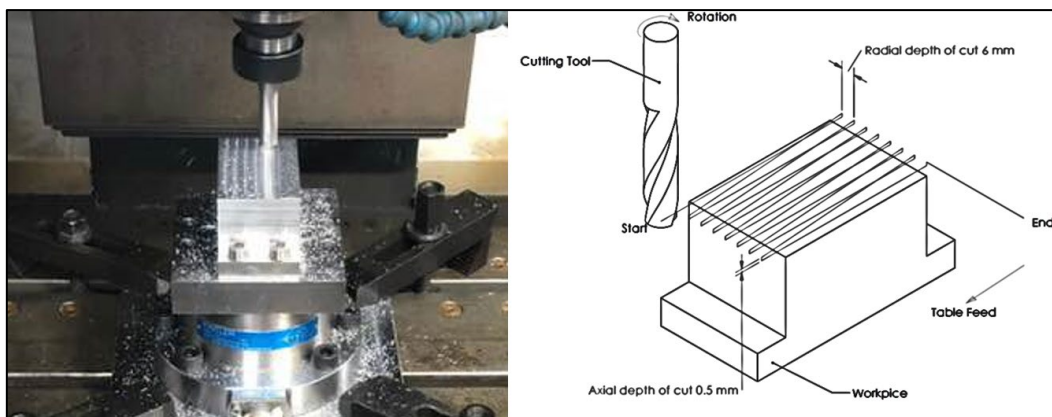
No.	ค่าความต้านทานแรงดึง (MPa)
1	271.72
2	270.77
3	272.74
ค่าเฉลี่ย	271.74

3.6.1.2 การกัดเตรียมขนาดวัสดุชิ้นงานก่อนทำการทดลอง ซึ่งวัสดุได้ถูกกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีให้เป็นชิ้นทดสอบขนาดพื้นที่หน้าตัด 48×70 มิลลิเมตร ซึ่งรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

3.6.1.3 การตรวจสอบคมตัดเนื้อของเครื่องมือตัดคือ ดอกกัดเอ็นมิลล์ (End mill) ที่ผลิตมาจากวัสดุคาร์ไบด์ที่มีคมตัด 2 คมตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาวของคมตัด 20 มิลลิเมตร และความยาวดอกทั้งหมด 74 มิลลิเมตร โดยการล้างทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ก่อนที่จะทำการตรวจสอบคมตัดเนื้อด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.6.2 ดำเนินการทดลอง

ในแต่ละการทดลองจะทำการกัดปาดผิวหน้าอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 ที่มีพื้นที่หน้าตัด 48×70 มิลลิเมตร ด้วยความลึกในการกัดในแนวแกน 0.5 มิลลิเมตร ความลึกการกัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร โดยใช้ดอกกัดเอ็นมิลล์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ที่มีรูปร่างแตกต่างกันไปแต่ละการทดลอง ในงานวิจัยนี้ใช้เอ็นมิลล์ป้อนกัดชิ้นทดสอบในแนวแกน Y และทำการกัดไปในทิศทางเดียวและยกมีดกัดกลับมาเพื่อเริ่มกัดแถวใหม่ ดังรูปที่ 3.14



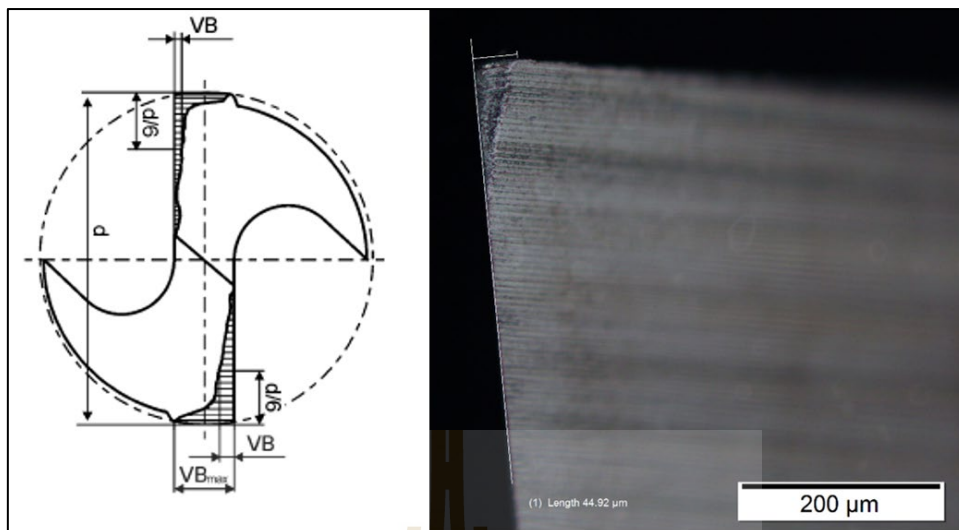
รูปที่ 3.14 การกัดปาดผิวหน้าอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6

3.7 การวิเคราะห์ความหยาบผิว

การวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดความหยาบผิวโดยการบันทึกผลความหยาบผิวจากการกัดชิ้นงานรอบแรกในพื้นที่หน้าตัด 48×70 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 3,360 ตารางมิลลิเมตรของทุก ๆ การทดลอง ในการทดลองนี้กำหนดระยะในการลากวัดที่ระยะ 4 มิลลิเมตร และอัตราเร็วของหัวโพรบเคลื่อนที่ด้วยอัตรา 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที จำนวน 32 ตำแหน่งโดยวัดแถวละ 4 ตำแหน่ง นำข้อมูลที่ได้ในแต่ละการทดลองมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าความหยาบผิวของแต่ละการทดลอง โดยที่ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตมีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm) มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ISO 4287:1997

3.8 การวิเคราะห์ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

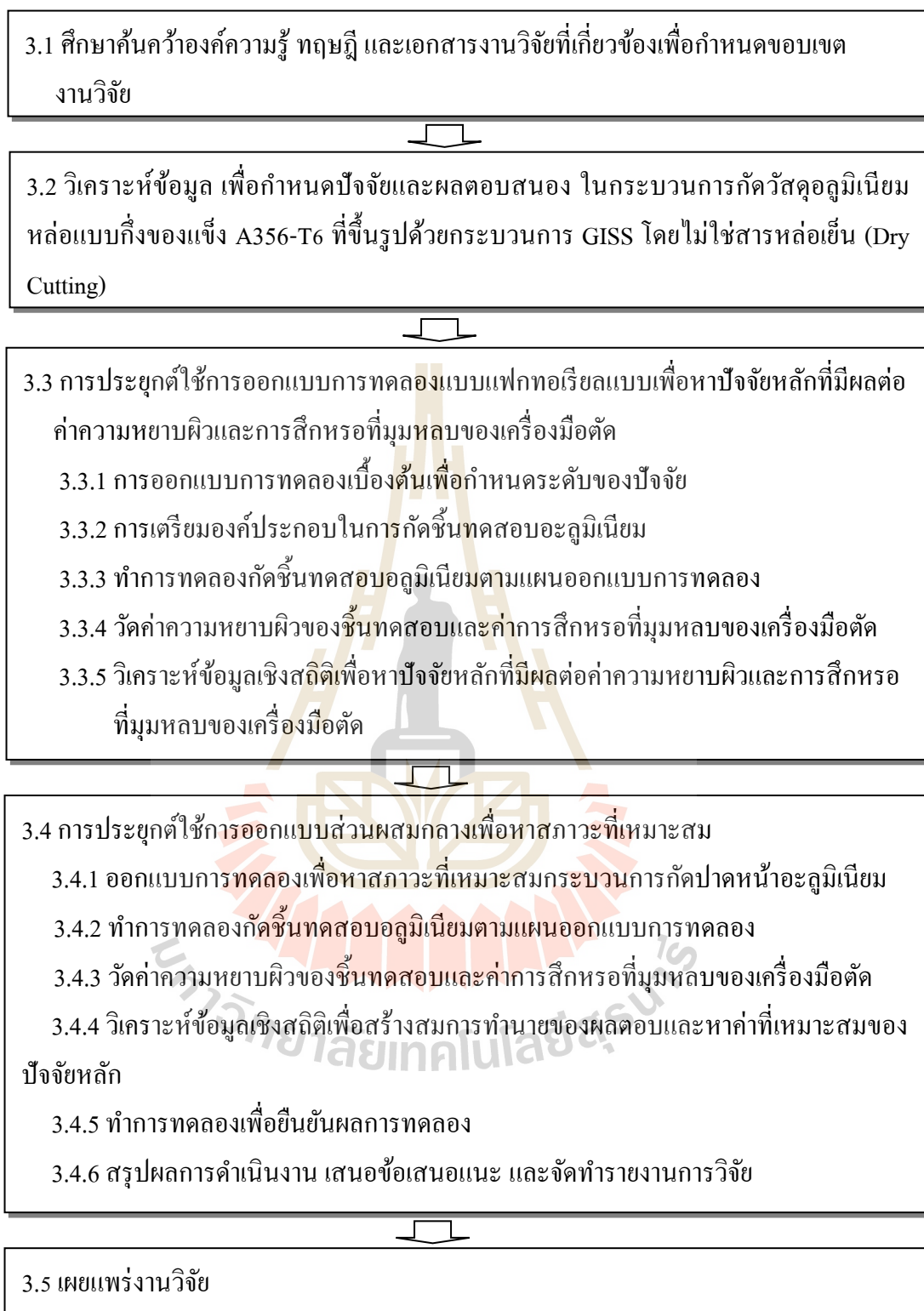
ทำการศึกษาการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 โดยทำการบันทึกผลขนาดการสึกหรอบนผิวหลบหลังจากลอกเอ็นมิลทำการกัดชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 3,360 ตารางมิลลิเมตร ไปทั้งหมด 20 รอบของทุก ๆ การทดลอง โดยวัดขนาดการสึกหรอที่มุมหลบของคมตัดทั้ง 2 คมตัดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยมีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm) ในงานวิจัยนี้อ้างอิงมาตรฐาน ISO 3685:1993 (ยุโรป) ซึ่งวิธีการวัดค่าการสึกหรอที่มุมหลบ ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การวัดค่าการสึกหรอที่มุมหลบตามมาตรฐาน ISO 3685:1993

ผู้วิจัยทำการวางแผนวิธีดำเนินงานวิจัยอย่างเป็นลำดับขั้นตอน เพื่อให้ผลการทดลองที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพและสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ทั้งนี้จึงได้แสดงเป็นภาพรวมของกรอบงานวิจัย โดยมีแนวทางในการศึกษาดังนี้





รูปที่ 3.16 ภาพรวมของกรอบวิจัย

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

จากการดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ และได้มีการบันทึกผลการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ สำหรับในบทนี้ จะแสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงานตามขั้นตอนการดำเนินวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยและผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว
- 4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด
- 4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิว
- 4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

ผลจากการวิจัยนี้ได้จากการทดลองเบื้องต้นโดยนำปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการตัดเฉือน อัตราการป้อนต่อฟัน มุมเกลียว และมุมก่ายเศษในแนวแกนรัศมี โดยปัจจัยดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) โดยทำการทดลองที่ 2 ระดับและทำการทดลองซ้ำครั้ง เพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างนัยสำคัญต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.1

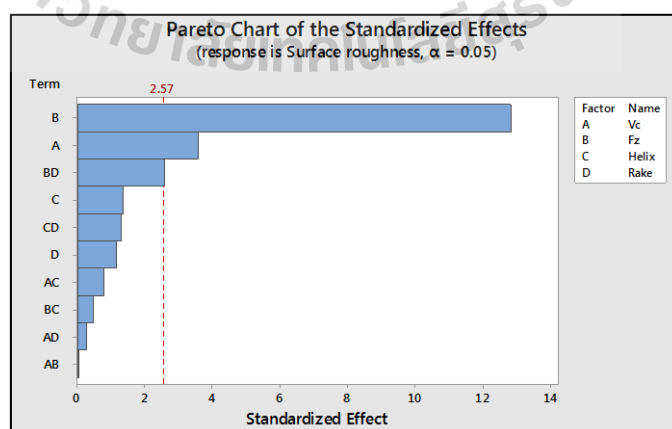
ตารางที่ 4.1 การออกแบบแฟกทอเรียลสำหรับค่าความหยาบผิว

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Vc	Fz	Helix	Rake	Ra
1	4	1	1	215	0.02	35	10	0.230
2	9	1	1	245	0.02	35	10	0.253
3	6	1	1	215	0.04	35	10	0.461
4	12	1	1	245	0.04	35	10	0.505
5	5	1	1	215	0.02	45	10	0.230

ตารางที่ 4.1 การออกแฟกทอเรียลสำหรับค่าความหยาบผิว (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Vc	Fz	Helix	Rake	Ra
6	13	1	1	245	0.02	45	10	0.295
7	10	1	1	215	0.04	45	10	0.432
8	2	1	1	245	0.04	45	10	0.488
9	16	1	1	215	0.02	35	14	0.308
10	11	1	1	245	0.02	35	14	0.375
11	7	1	1	215	0.04	35	14	0.440
12	15	1	1	245	0.04	35	14	0.465
13	1	1	1	215	0.02	45	14	0.243
14	14	1	1	245	0.02	45	14	0.294
15	3	1	1	215	0.04	45	14	0.413
16	8	1	1	245	0.04	45	14	0.488

เมื่อได้ค่าความหยาบผิว ผู้วิจัยใช้โปรแกรม Minitab สร้างกราฟพารेटโตและเส้นนัยสำคัญบนกราฟพารेटโตที่ระดับนัยสำคัญที่เราต้องการมาเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อกำหนดปัจจัยให้เหลือเฉพาะปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากกราฟพารेटโต เมื่อพรีดกราฟพารेटโตที่ระดับ $\alpha = 0.05$ จะได้กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่มีต่อค่าความหยาบผิว ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยابผิวอย่างมีนัยสำคัญพบว่า อัตราป้อนต่อพื้น ความเร็วในการตัดเฉือน และผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อพื้น และความเร็วในการตัดเฉือนส่งผลต่อค่าความหยابมากตามลำดับ โดยเห็นว่าปัจจัยดังกล่าว แสดงผลกระทบเกินกว่าเส้นสีแดง โดยนำปัจจัยที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่า P-Value ได้ผล การวิเคราะห์ข้อมูล ดังตารางที่ 4.2

จากตารางที่ 4.2 สังเกตค่า P-Value ของปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อค่าความหยابผิวอย่างมีนัยสำคัญ และควรนำปัจจัยหลักเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบ การทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งพบว่าปัจจัยดังต่อไปนี้

- 1) อัตราป้อนต่อพื้น
- 2) ความเร็วในการตัดเฉือน
- 3) ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อพื้นและมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยابของผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	0.154216	0.015422	19.06	0.002
Linear	4	0.146830	0.036707	45.38	0.000
Vc	1	0.010302	0.010302	12.74	0.016
Fz	1	0.133956	0.133956	165.60	0.000
Helix	1	0.001482	0.001482	1.83	0.234
Rake	1	0.001089	0.001089	1.35	0.298
2-Way Interactions	6	0.007386	0.001231	1.52	0.331
Vc*Fz	1	0.000002	0.000002	0.00	0.960
Vc*Helix	1	0.000484	0.000484	0.60	0.474
Vc*Rake	1	0.000056	0.000056	0.07	0.803
Fz*Helix	1	0.000182	0.000182	0.23	0.655
Fz*Rake	1	0.005329	0.005329	6.59	0.050
Helix*Rake	1	0.001332	0.001332	1.65	0.256
Error	5	0.004045	0.000809		
Total	15	0.158260			

4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

ผลจากการวิจัยนี้ได้จากการทดลองเบื้องต้น โดยนำปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการตัดเฉือน อัตราการป้อนต่อฟัน มุมเกลียว และมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี ไปออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) โดยทำการทดลองที่ 2 ระดับ เพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างนัยสำคัญต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดซึ่งได้ผล ดังตารางที่ 4.3

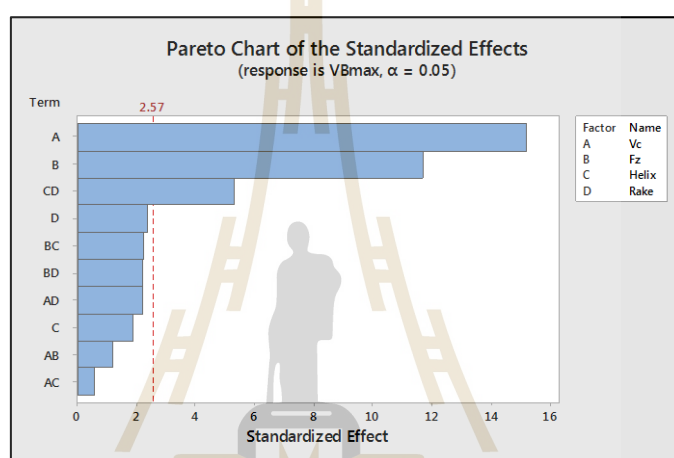
ตารางที่ 4.3 การออกแบบแฟกทอเรียลสำหรับค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Vc	Fz	Helix	Rake	VBmax
1	4	1	1	215	0.02	35	10	38.005
2	9	1	1	245	0.02	35	10	47.270
3	6	1	1	215	0.04	35	10	31.810
4	12	1	1	245	0.04	35	10	41.795
5	5	1	1	215	0.02	45	10	41.335
6	13	1	1	245	0.02	45	10	50.680
7	10	1	1	215	0.04	45	10	36.410
8	2	1	1	245	0.04	45	10	46.315
9	16	1	1	215	0.02	35	14	42.125
10	11	1	1	245	0.02	35	14	50.160
11	7	1	1	215	0.04	35	14	34.060
12	15	1	1	245	0.04	35	14	39.085
13	1	1	1	215	0.02	45	14	37.515
14	14	1	1	245	0.02	45	14	47.190
15	3	1	1	215	0.04	45	14	33.555
16	8	1	1	245	0.04	45	14	39.560

เมื่อได้ค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดผู้วิจัยใช้โปรแกรม Minitab สร้างกราฟพาเรโตและเส้นนัยสำคัญบนกราฟพาเรโตที่ระดับนัยสำคัญที่เราต้องการมาเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อกำหนดปัจจัยที่เหลือเฉพาะปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากกราฟพาเรโต

เมื่อพรีดกราฟฟารโตที่ระดับ $\text{Alpha} = 0.05$ จะได้กราฟฟารโตแสดงผลกระทบที่มีต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด ดังรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญพบว่า ความเร็วในการตัดเฉือน อัตราป้อนต่อฟัน และผลกระทบร่วมระหว่างอัตรามุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี ส่งผลต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมากที่สุด โดยเห็นว่าปัจจัยดังกล่าวแสดงผลกระทบเกินกว่าเส้นสีแดง โดยนำปัจจัยที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาค่า P-Value ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.2 กราฟฟารโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

จากตารางที่ 4.4 สังเกตค่า P-Value ของปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญ และควรนำปัจจัยหลักเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งพบว่ามีปัจจัยดังต่อไปนี้

- 1) ความเร็วในการตัดเฉือน
- 2) อัตราป้อนต่อฟัน
- 3) ผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี

จากผลลัพธ์ของการออกแบบการคัดกรองปัจจัยในเบื้องต้นพบว่าจะต้องเลือกใช้ปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ในการสร้างสมการพยากรณ์ค่าความหยาบผิวและค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิว

ผลจากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ เพื่อพยากรณ์ค่าความหยาบผิวงานในเทอมของพารามิเตอร์ในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยวิธีการ Gas Induce Semi Solid (GISS) ด้วยวิธีการออกแบบพื้นผิวผลตอบ ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลางโดยกำหนดปัจจัย 4 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 2 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน (V_c) และความเร็วตัดเฉือน (F_z) รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 2 ปัจจัย ได้แก่ มุมเกลียว (Helix) และมุมคายเศษในแนวรัศมี (Rake) โดยการออกแบบการทดลองนี้ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์ที่ใช้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 4.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	515.303	51.530	42.12	0.000
Linear	4	460.542	115.136	94.11	0.000
V_c	1	282.576	282.576	230.96	0.000
F_z	1	166.991	166.991	136.49	0.000
Helix	1	4.254	4.254	3.48	0.121
Rake	1	6.721	6.721	5.49	0.066
2-Way Interactions	6	54.761	9.127	7.46	0.022
$V_c * F_z$	1	1.822	1.822	1.49	0.277
$V_c * \text{Helix}$	1	0.429	0.429	0.35	0.579
$V_c * \text{Rake}$	1	5.954	5.954	4.87	0.079
$F_z * \text{Helix}$	1	6.163	6.163	5.04	0.075
$F_z * \text{Rake}$	1	5.966	5.966	4.88	0.078
Helix * Rake	1	34.428	34.428	28.14	0.003
Error	5	6.117	1.223		
Total	15	521.421			

จากตารางที่ 3.5 เป็นตารางกำหนดปัจจัย ระดับ ขอบเขตและสัญลักษณ์ ในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 โดยงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ระดับปัจจัย 5 ระดับ และทำการทดลอง 1 ซ้ำ โดยแต่ละการทดลองทำการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 จำนวน 1 รอบ (รอบละ 3,360 ตารางมิลลิเมตร) ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการการทดลองค่าความหยาบผิวจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Vc	Fz	Helix	Rake	Ra
1	30	1	1	215	0.02	35	10	0.230
2	12	1	1	245	0.02	35	10	0.253
3	14	1	1	215	0.04	35	10	0.461
4	17	1	1	245	0.04	35	10	0.505
5	9	1	1	215	0.02	45	10	0.230
6	3	1	1	245	0.02	45	10	0.295
7	18	1	1	215	0.04	45	10	0.432
8	26	1	1	245	0.04	45	10	0.488
9	6	1	1	215	0.02	35	14	0.308
10	5	1	1	245	0.02	35	14	0.375
11	28	1	1	215	0.04	35	14	0.440
12	29	1	1	245	0.04	35	14	0.465
13	21	1	1	215	0.02	45	14	0.243
14	7	1	1	245	0.02	45	14	0.294
15	25	1	1	215	0.04	45	14	0.413
16	13	1	1	245	0.04	45	14	0.488
17	11	-1	1	200	0.03	40	12	0.388
18	22	-1	1	260	0.03	40	12	0.404
19	23	-1	1	230	0.01	40	12	0.144
20	31	-1	1	230	0.05	40	12	0.371
21	2	-1	1	230	0.03	30	12	0.426
22	8	-1	1	230	0.03	50	12	0.368
23	15	-1	1	230	0.03	40	8	0.339
24	4	-1	1	230	0.03	40	16	0.456
25	27	0	1	230	0.03	40	12	0.281
26	19	0	1	230	0.03	40	12	0.290

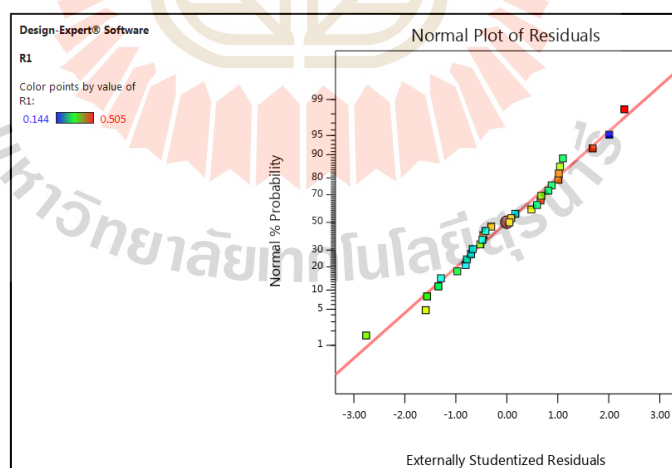
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองค่าความหยาบผิวจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Vc	Fz	Helix	Rake	Ra
27	24	0	1	230	0.03	40	12	0.239
28	1	0	1	230	0.03	40	12	0.240
29	10	0	1	230	0.03	40	12	0.288
30	20	0	1	230	0.03	40	12	0.246
31	16	0	1	230	0.03	40	12	0.248

4.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Adequacy Checking)

ทำการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบค่าความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น ความเพียงพอของแบบจำลองสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

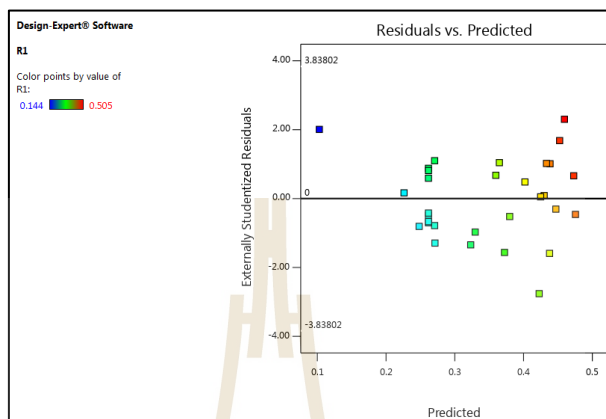
1) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ ซึ่งจากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากการทดลองค่าความหยาบผิว ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น ซึ่งเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนตกค้างของผลตอบมีการกระจายตัวแบบปกติ จุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.3 การกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างสำหรับค่าความหยาบผิว

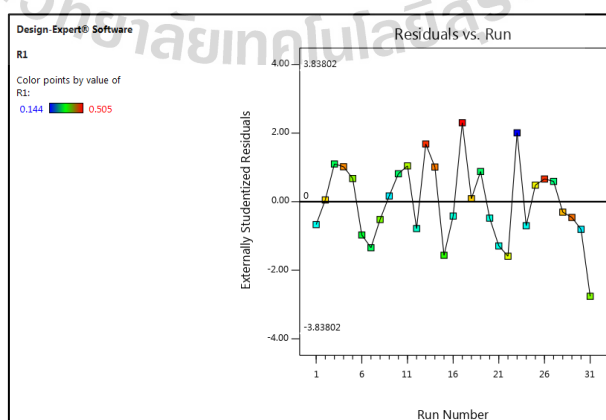
2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความเคลื่อน (Residual) จากรูปที่ 4.4 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วน

ตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plots of Residuals Versus Fitted Values) จากกราฟพบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่ต่างกัน มีการกระจายตัวแบบอิสระทั้งทางบวกและทางลบ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



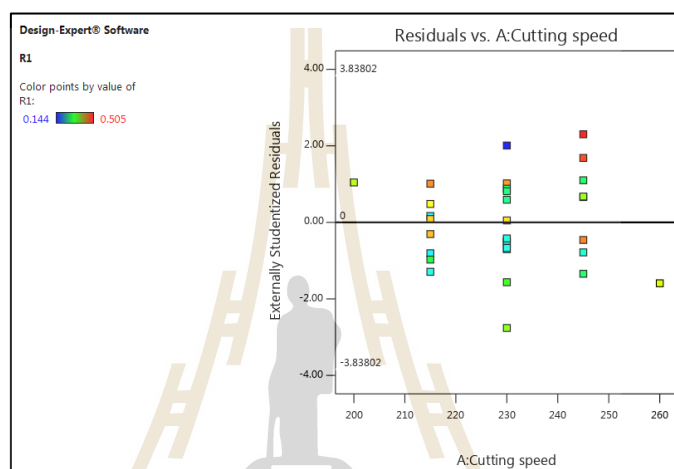
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าที่ถูกทำนายสำหรับค่าความหยาบผิว

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter Plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4.5 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plots of Residuals Versus the Observation Order of the Data) จากกราฟพบว่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวของจุดเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง

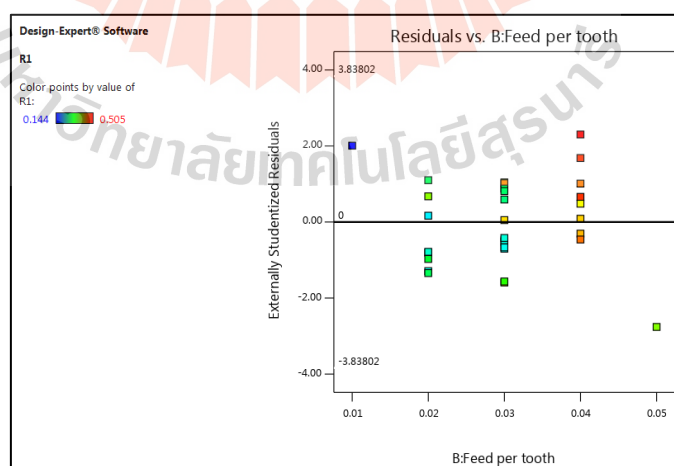


รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองสำหรับค่าความหยาบผิว

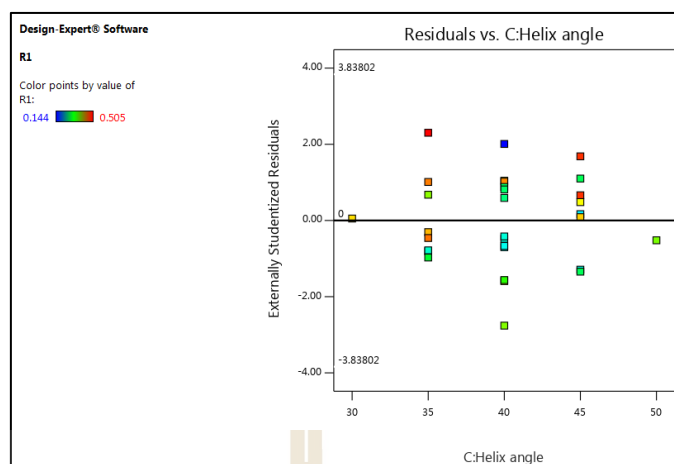
สำหรับรูปที่ 4.6-4.9 แสดงถึงลักษณะความแปรปรวนของข้อมูลส่วนตกค้างกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองโดยใช้แผนภูมิกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบดังรูปที่ 4.6-4.9 จะเห็นได้ว่ากราฟไม่มีลักษณะลู่เข้าหรือลู่ออก แสดงว่าตัวแปรความเร็วตัดเฉือน อัตราป้อนต่อฟัน มุมเกลียว และมุมคายเศษในแนวรัศมีไม่มีความแตกต่างในความแปรปรวน นั่นคือข้อมูลมีความเสถียรในความแปรปรวน



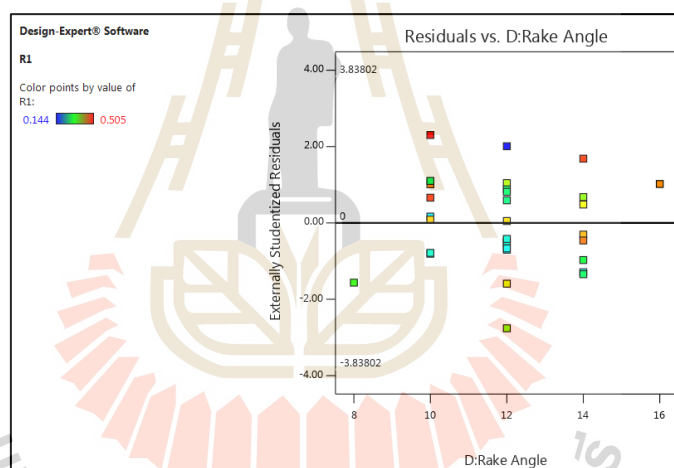
รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับความเร็วตัดเฉือนสำหรับค่าความหยাবผิว



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับอัตราป้อนต่อฟันสำหรับค่าความหยাবผิว



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับมุมเกลียวสำหรับค่าความหยাবผิว



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับมุมคายเศษในแนวรัศมีสำหรับค่าความหยাবผิว

4.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 ได้นำมาทำการวิเคราะห์ด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหยาบผิวด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ชี้ให้เห็นผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อผลตอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากตาราง 4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความหยาบผิวได้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟัน ความเร็วตัดเนื้อ และมุมคายเศษ ตามลำดับ ในขณะที่

ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยابผิวคือ ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อพื้นและมุมคายเศษ นอกจากนี้ผลกระทบจากเทอมกำลังสองที่ส่งผลต่อค่าความหยابผิวโดยที่

ตารางที่ 4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการกำลังสองสำหรับค่าความหยابผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	0.266857	0.019061	16.03	0.000
Linear	4	0.169893	0.042473	35.72	0.000
Vc	1	0.007993	0.007993	6.72	0.020
Fz	1	0.153280	0.153280	128.89	0.000
Helix	1	0.003038	0.003038	2.55	0.130
Rake	1	0.005581	0.005581	4.69	0.046
Square	4	0.089578	0.022394	18.83	0.000
Vc*Vc	1	0.034839	0.034839	29.30	0.000
Fz*Fz	1	0.000002	0.000002	0.00	0.966
Helix*Helix	1	0.035340	0.035340	29.72	0.000
Rake*Rake	1	0.035592	0.035592	29.93	0.000
2-Way Interaction	6	0.007386	0.001231	1.04	0.439
Vc*Fz	1	0.000002	0.000002	0.00	0.966
Vc*Helix	1	0.000484	0.000484	0.41	0.533
Vc*Rake	1	0.000056	0.000056	0.05	0.831
Fz*Helix	1	0.000182	0.000182	0.15	0.701
Fz*Rake	1	0.005329	0.005329	4.48	0.050
Helix*Rake	1	0.001332	0.001332	1.12	0.306
Error	16	0.019027	0.001189		
Lack-of-Fit	10	0.015742	0.001574	2.87	0.104
Pure Error	6	0.003285	0.000548		
Total	30	0.285884			
S = 0.0344847	R-sq = 93.34 %			R-sq (adj) = 87.52%	

ประกอบด้วยผลกระทบของเทอมความเร็วตัดเฉือนกำลังสอง เทอมมุมเกลียวกำลังสอง และเทอมมุมคายเศษกำลังสอง โดยที่พจน์ของปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) ผู้วิจัยจึงตัดเทอมที่เหลือออกจากแบบจำลองแล้วทำการประมาณค่าความแปรปรวนใหม่ ดังตารางที่ 4.7 จากตารางดังกล่าวพบว่า ค่า P value ของเทอม Model มีค่าเท่ากับ 0.000 หมายถึงว่า

สมการมีความพอเพียงที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าค่า P-Value ของ ของผลกำลังสอง (Square Term) มีค่าเท่ากับ 0.000 และอันตรกิริยา (Interaction term) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (α) = 0.05 แสดงว่ามีส่วนโค้งที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบแทน จึงสามารถใช้สมการกำลังสองสำหรับทำนายค่าความหนาแน่นผิวได้ต่อไป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในเทอมต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นผิวแสดงตามตารางที่ 4.8

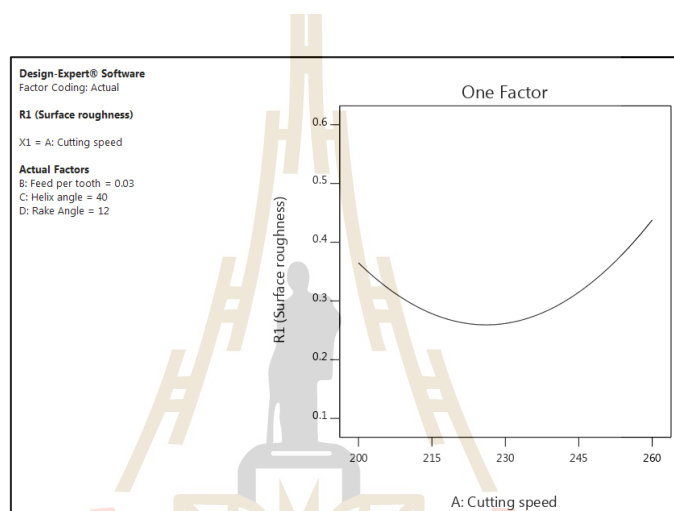
ตารางที่ 4.7 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการกำลังสองสำหรับค่าความหนาแน่นผิวหลังปรับปรุง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0.264797	0.033100	34.53	0.000
Linear	4	0.169893	0.042473	44.31	0.000
Vc	1	0.007994	0.007994	8.34	0.009
Fz	1	0.153280	0.153280	159.92	0.000
Helix	1	0.003037	0.003037	3.17	0.089
Rake	1	0.005582	0.005582	5.82	0.025
Square	3	0.089576	0.029859	31.15	0.000
Vc*Vc	1	0.035178	0.035178	36.70	0.000
Helix*Helix	1	0.035684	0.035684	37.23	0.000
Rake*Rake	1	0.035939	0.035939	37.50	0.000
2-Way Interaction	1	0.005329	0.005329	5.56	0.028
Fz*Rake	1	0.005329	0.005329	5.56	0.028
Error	22	0.021086	0.000958		
Lack-of-Fit	16	0.017801	0.001113	2.03	0.195
Pure Error	6	0.003285	0.000548		
Total	30	0.285884			
S = 0.0309592	R-sq = 92.62 %			R-sq (adj) = 89.94 %	

4.3.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

ทำการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ โดยการพิจารณาจากค่าของ R^2 ที่ได้จากโปรแกรมว่ามีค่าใกล้เคียงกับ 100% หรือไม่ ซึ่งค่า R^2 ควรมีค่ามากกว่า 75% จึงจะถือว่าความพอเพียงในการฟิตข้อมูลและเป็นแบบจำลองที่ดี รวมถึงสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบแทนของผลตอบแทนได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ (Le Man et al, 2010) อย่างไรก็ตามค่า R^2 ที่มีค่าสูงก็ไม่ได้หมายความว่าสมการทำนายผลจะเป็นสมการทำนายผลที่ดี แต่จะต้องดูค่า R-sq (adj)

ประกอบด้วยและจะต้องมีค่าที่สูงเช่นกัน (Koocheki et al, 2009) ตามตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 93.43% และค่า R-sq (adj) เท่ากับ 87.52% ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ และหลัง R2 และ R-sq (adj) ได้รับการปรับค่าแล้วจะมีค่าเท่ากับ 92.62% และ 89.94% ตามลำดับดังตารางที่ 4.7 นอกจากนี้จากการตรวจสอบ Lack of fit ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ มีค่า 0.195 แสดงว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูล และเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสามารถนำไปสร้างสมการทำนายผลเพื่อหาค่าผลตอบได้ต่อไป



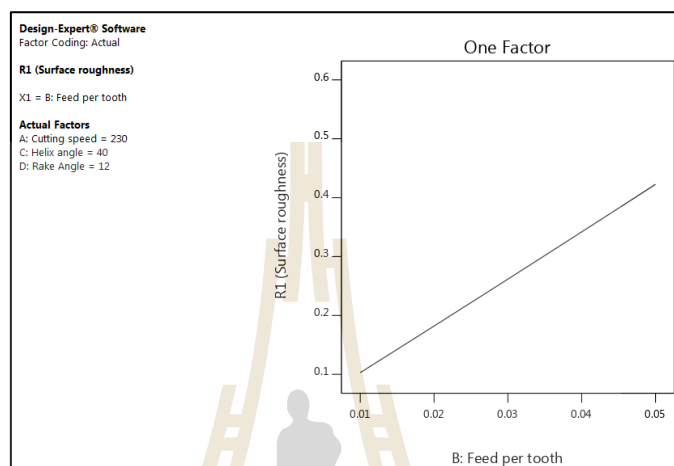
รูปที่ 4.10 ผลกระทบหลักของความเร็วตัดเฉือนที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว

4.3.4 การวิเคราะห์ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว

ในหัวข้อนี้จะพูดถึงผลกระทบหลักของปัจจัยส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าอัตราป้อนต่อฟันเป็นผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญตามด้วยความเร็วตัดเฉือนและมุมคายเศษตามลำดับ โดยที่หัวข้อนี้จะอภิปรายถึงผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวดังต่อไปนี้

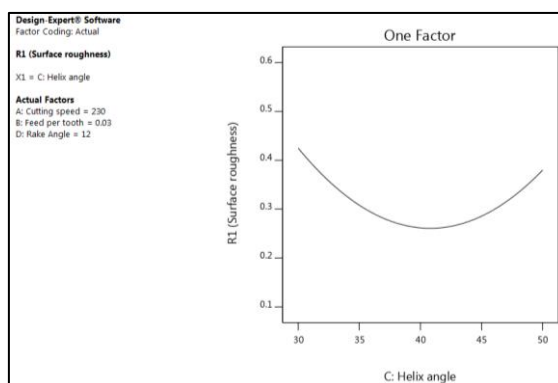
1) ผลกระทบหลักจากความเร็วตัดแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าความความหยาบผิวจะลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเร็วตัดเฉือนระหว่าง 200 ถึง 230 เมตรต่อนาที โดยที่ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดอยู่ระหว่าง 215 ถึง 230 เมตรต่อนาที เนื่องจากเมื่อกัดชิ้นงานด้วยความเร็วตัดสูงจะส่งผลให้คมตัดของดอกเอ็นมิลหมุนกัดชิ้นงานในจำนวนรอบที่มากกว่าเมื่อเดินกัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนต่อฟันที่เท่ากันในระยะทางที่เท่ากัน นั่นหมายความว่าเมื่อดอกเอ็นมิลหมุนครบ 1 รอบ จะตัดเฉือนเนื้อชิ้นงานในปริมาณที่น้อยกว่าส่งผลให้เศษชีพหนาน้อยกว่าซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงตัดเฉือนต่ำกว่า

การกัดชิ้นงานด้วยความเร็วรอบต่ำ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วตัดเฉือนจาก 230-260 เมตรต่อนาทีค่าความหยาบผิวจะสูงเพิ่มขึ้นและจะมีค่ามากที่สุดที่ความเร็วรอบ 260 เมตรต่อนาที อาจเป็นเพราะว่า อุณหภูมิในการตัดเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วตัดเฉือนมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความเครียดและอัตราความเครียดมากขึ้น (Subramanian et al., 2014)



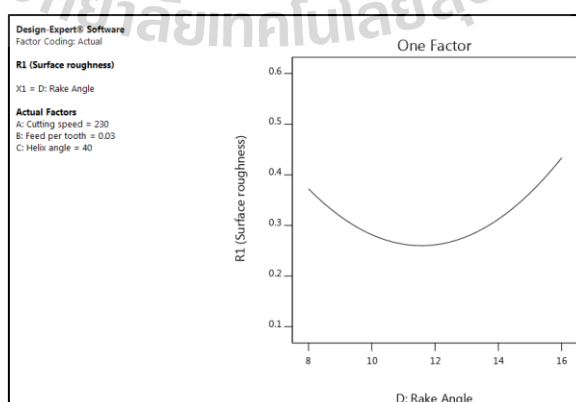
รูปที่ 4.11 ผลกระทบหลักของอัตราป้อนที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว

2) ผลกระทบหลักจากอัตราป้อนต่อพื้นแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า อัตราป้อนต่อพื้นมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความหยาบผิว กล่าวคือเมื่ออัตราป้อนต่อพื้นเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิเมตร ต่อพื้นค่าความหยาบผิวก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปด้วย โดยที่อัตราป้อนต่อพื้น 0.01 มิลลิเมตร ต่อพื้นจะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุด เพราะว่าเมื่อกัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนต่อพื้นที่สูงขึ้นในขณะที่ความเร็วรอบคงที่ในระยะทางที่เท่ากัน คมตัดของดอกเอ็นมิลหมุนจะกัดชิ้นงานในจำนวนรอบที่น้อยกว่าอัตราป้อนต่อพื้นที่ต่ำกว่าเมื่อเดินกัดชิ้นงานไปในระยะทางที่เท่ากัน นั่นหมายความว่า เมื่อดอกเอ็นมิลหมุนครบ 1 รอบ การกัดชิ้นงานด้วยความอัตราป้อนต่อพื้นสูงจะตัดเฉือนเนื้อชิ้นงานในปริมาณที่มากกว่า ส่งผลให้เศษชิพหนามากกว่าการใช้อัตราป้อนต่อพื้นต่ำ รวมถึงส่งผลให้แรงในการตัดเฉือนสูงกว่าการกัดด้วยอัตราป้อนต่อพื้นต่ำ



รูปที่ 4.12 ผลกระทบหลักของมุมเกลียวที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว

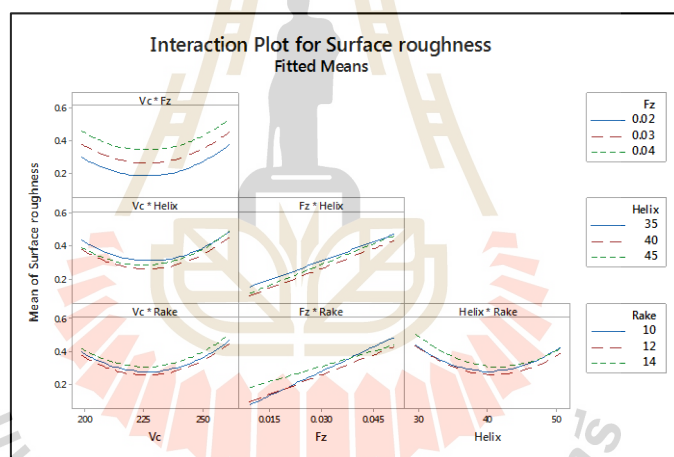
3) ผลกระทบหลักจากมุมเกลียวแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นระหว่าง 30° ถึง 45° จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากว่าเมื่อมุมเกลียวมีค่ามากขึ้นคมตัดของเครื่องมือตัดจะแหลมขึ้นและคมขึ้นที่มุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากัน ทำให้การตัดเฉือนขึ้นงานดีขึ้น ส่งผลให้แรงและความอุณหภูมิในการตัดเฉือนลดน้อยลง นอกจากนี้การที่มุมเกลียวมีค่ามากขึ้นยังส่งผลให้การคายเศษออกจากบริเวณตัดเฉือนมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วงระหว่าง 40° ถึง 45° แต่ในทางกลับกันเมื่อเครื่องมือตัดมีมุมเกลียวมากขึ้นส่งผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างคมตัดและชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงและความอุณหภูมิในแรงตัดเฉือนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มมุมเกลียวจะส่งผลให้มุมคายเศษในแนวแกนลดลงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น (P. S. Sivasakthivel et al., 2014) ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นระหว่าง 45° - 50° ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 ผลกระทบหลักของมุมคายเศษในแนวรัศมีที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว

4) ผลกระทบหลักจากมุมคายเศษในแนวรัศมีแสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าค่าความหยาบผิวมีค่าลดลงเมื่อมุมคายเศษเพิ่มขึ้นจากระหว่าง 8° - 12° เนื่องจากว่าเมื่อมุมคายเศษมีค่ามากขึ้นทำให้มุมเอียงของเครื่องมือตัดมีค่ามากขึ้นด้วยซึ่งส่งผลให้คมตัดคมขึ้นทำให้ตัดชิ้นงานได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อมุมคายเศษในแนวรัศมีสูงขึ้นสามารถทำให้เศษออกจากบริเวณตัดเฉือนได้ดีขึ้นโดยที่ค่าความหยาบผิวมีค่าน้อยที่สุดในช่วง 10° - 12° แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อมุมคายเศษมากเกินไปทำค่าความหยาบผิวมีค่ามากขึ้น เพราะว่าเมื่อมุมคายเศษมากขึ้นก็จะส่งผลให้คมตัดของดอกเอ็นมิลแหลมมากขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อมุมคายเศษในแนวรัศมีมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้บริเวณสัมผัสระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงานมีปริมาณที่มากขึ้นทำให้แรงในการตัดเฉือนและอุณหภูมิในการตัดเฉือนมากขึ้นด้วย (David & John, 2006) ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อมุมคายเศษในแนวแกนรัศมีเพิ่มขึ้นระหว่าง 12° - 16° ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มสูงขึ้น

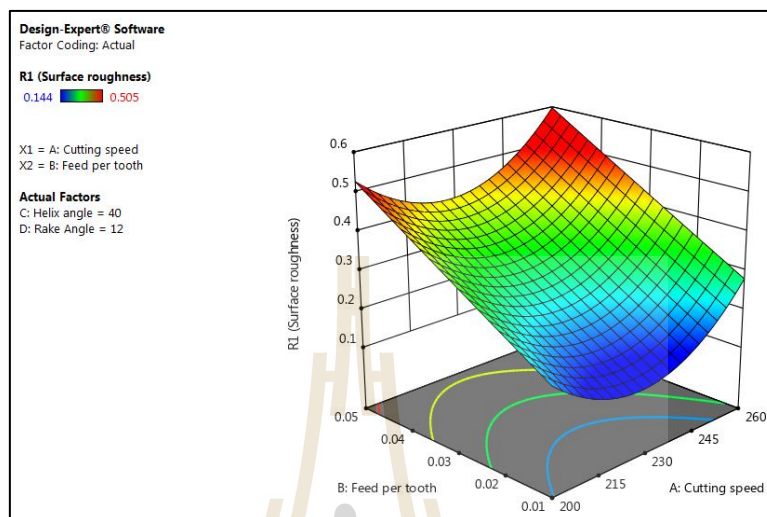
4.3.5 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว



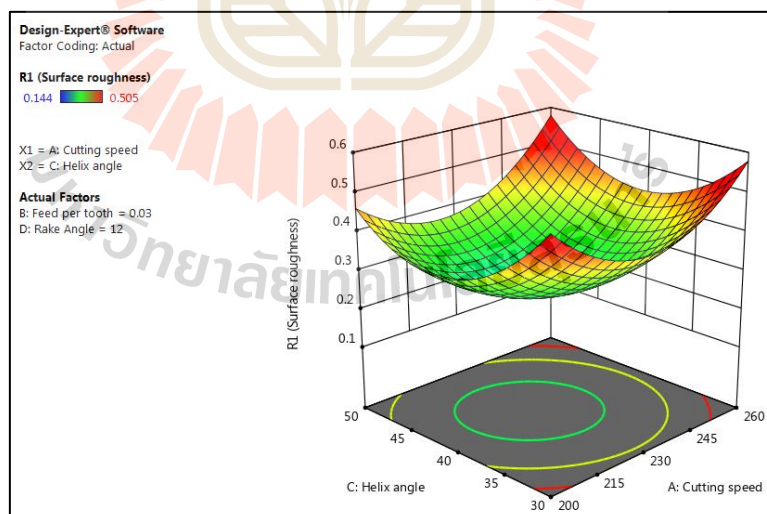
รูปที่ 4.14 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว

1) ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟันแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่า ที่อัตราป้อนในช่วงระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน เมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนเพิ่มขึ้นจาก 200-230 เมตรต่อนาที จะทำให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนเพิ่มขึ้นจาก 230-260 เมตรต่อนาที ที่ทุกช่วงระดับของอัตราป้อนต่อฟัน นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนอยู่ในช่วง 220-230 เมตรต่อนาที และค่าอัตราป้อนต่อฟัน

เท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน ในขณะที่ค่าความหยาบผิวจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความเร็วตัดเท่ากับ 260 เมตรต่อนาที และอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน

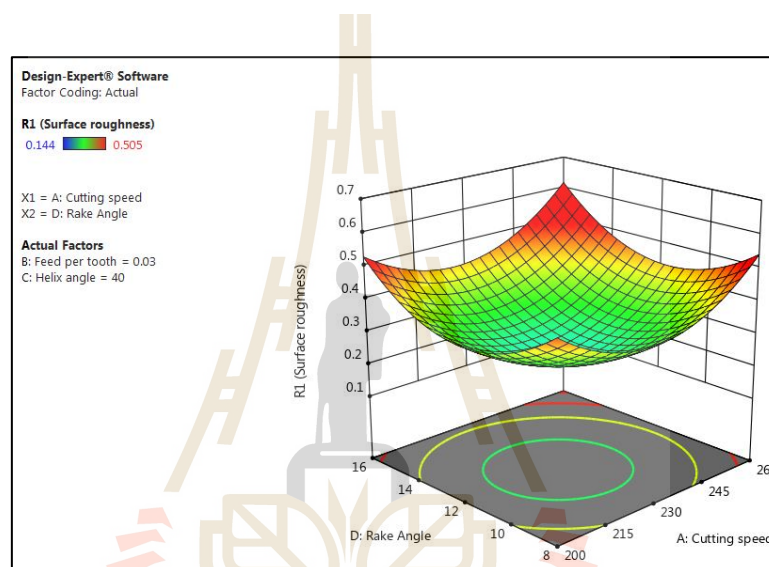


รูปที่ 4.15 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟันต่อค่าความหยาบผิว



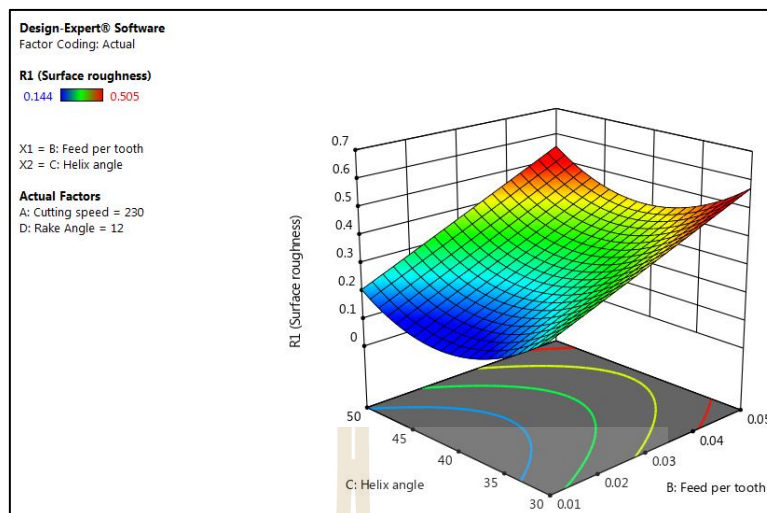
รูปที่ 4.16 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมเกลียวต่อค่าความหยาบผิว

2) ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมเกลียวแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.16 พบว่าเมื่อใช้มุมเกลียวในช่วงระหว่าง 30° - 50° เมื่อค่าความเร็วตัดเพิ่มขึ้นระหว่าง 200-230 เมตรต่อนาที จะทำให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนเพิ่มขึ้นจาก 230-260 เมตรต่อนาที ที่ทุกช่วงระดับของมุมเกลียว นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนอยู่ในช่วง 220-230 เมตรต่อนาที และค่ามุมเกลียวประมาณ 40° ในขณะที่ค่าความหยาบผิวจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความเร็วรอบเท่ากับ 260 เมตรต่อนาที และค่ามุมเกลียวขนาดเท่ากับ 50°



รูปที่ 4.17 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมคายเศษในแนวรัศมีต่อค่าความหยาบผิว

3) ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมคายเศษในแนวรัศมีแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.17 พบว่าเมื่อใช้มุมคายเศษในช่วงระหว่าง 8° - 16° เมื่อค่าความเร็วตัดเพิ่มขึ้นระหว่าง 200-230 เมตรต่อนาที จะทำให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนเพิ่มขึ้นจาก 230-260 เมตรต่อนาที ที่ทุกช่วงระดับของมุมคายเศษในแนวรัศมี นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนอยู่ในช่วง 220-230 เมตรต่อนาทีและค่ามุมเกลียวอยู่ในช่วง 10° - 12° ในขณะที่ค่าความหยาบผิวจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความเร็วรอบเท่ากับ 260 เมตรต่อนาที และมุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 16°

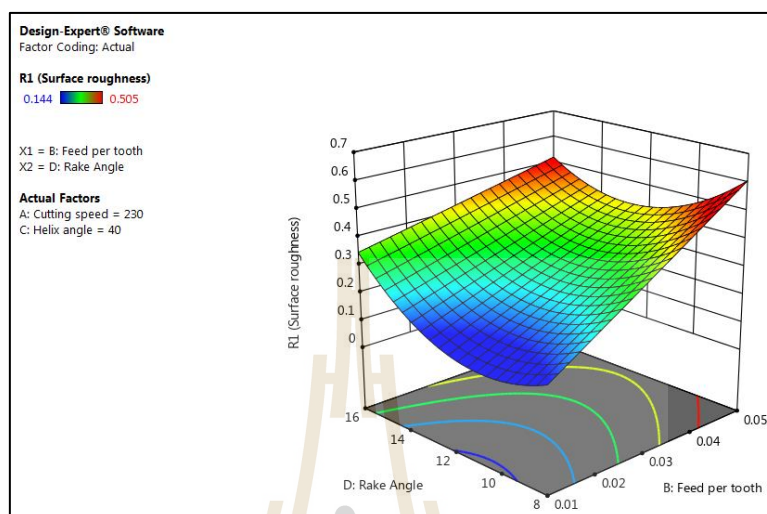


รูปที่ 4.18 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมเกลียวต่อค่าความหยาบผิว

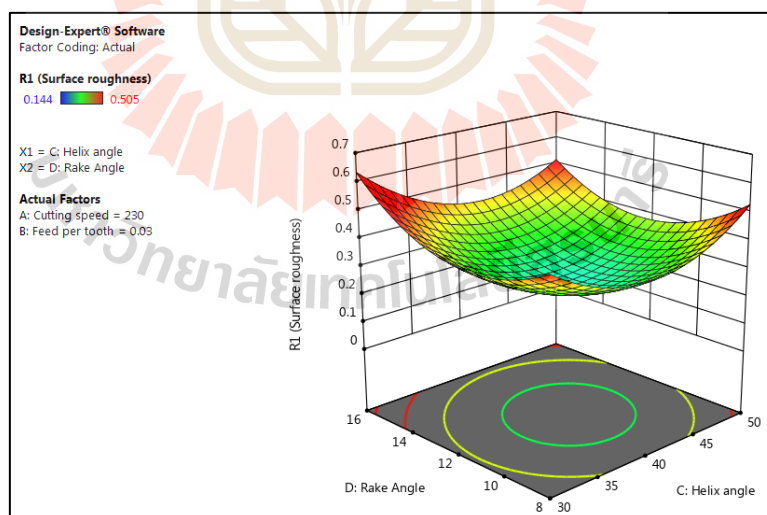
4) ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมเกลียวแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.18 พบว่าเมื่อใช้มุมเกลียวในช่วงระหว่าง 30° - 50° เมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นจาก 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและค่าความหยาบผิวจะมากที่สุดที่อัตราป้อนต่อฟัน 0.05 ฟันต่อมิลลิเมตร ที่ทุกช่วงระดับของมุมเกลียว นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดเมื่อค่าอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน และใช้มุมเกลียวประมาณ 40° ในขณะที่ค่าความหยาบผิวจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้อัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟันและมุมเกลียวขนาด 30°

5) ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมคายเศษในแนวรัศมี ซึ่งเป็นผลกระทบร่วมเพียงคู่เดียวที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อใช้มุมคายเศษในแนวรัศมีในช่วงระหว่าง 8° - 16° เมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นจาก 0.01- 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและค่าความหยาบผิวจะมากที่สุดที่อัตราป้อนต่อฟัน 0.05 ฟันต่อมิลลิเมตรที่ทุกช่วงระดับของมุมเกลียว และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ที่มุมคายเศษในแนวรัศมี 8° จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความหยาบผิวสูงกว่ามุมคายเศษที่ระดับอื่น ๆ เนื่องจากว่าเมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นทำให้เศษชีพมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงการที่มีมุมคายเศษที่ต่ำทำให้เศษชีพไหลออกจากบริเวณตัดเฉือนได้ยาก ส่งผลให้อนุหภูมิในการตัดเฉือนสูงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดเมื่อค่าอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน

และค่ามุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 10° ในขณะที่ค่าความหยาบผิวจะมีค่ามากที่สุด เมื่อค่าอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน และมุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 8°



รูปที่ 4.19 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมคายเศษ
ในแนวแกนรัศมีต่อค่าความหยาบผิว



รูปที่ 4.20 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษ
ในแนวแกนรัศมีต่อค่าความหยาบผิว

6) ผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวรัศมีแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.20 พบว่าเมื่อใช้มุมคายเศษในแนวรัศมีในช่วงระหว่าง 8° - 16° เมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นจาก 30° - 40° จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้ามค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นจาก 40° - 50° ทุกช่วงระดับของมุมคายเศษในแนวรัศมี นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดเมื่อค่ามุมเกลียวประมาณ 40° และค่ามุมคายเศษในแนวรัศมีประมาณ 10° ในขณะที่ค่าความหยาบผิวจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่ามุมเกลียวเท่ากับ 30° และค่ามุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 16°

4.3.6 สร้างสมการทำนายค่าความหยาบผิว

หลังจากตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองแล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของปัจจัยในเทอมต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเขียนสมการสำหรับทำนายค่าความหยาบผิวจากกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 จากการวิเคราะห์ (Estimated Regression Coefficient) โดยใช้ข้อมูลที่คำนวณมาจากโปรแกรมเมื่อนำตัวแปรเข้ารหัส (Code Units) และสมการทำนายเมื่อพิจารณาตัวแปรธรรมชาติ (Uncode Units) ดังตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 เพื่อนำสมการทำนายที่ได้ไปใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยต่อไป

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความหยาบผิวหลังปรับปรุงแบบจำลองสำหรับสมการทำนายเมื่อตัวแปรถูกเข้ารหัส

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	0.2620	0.0101	25.95	0.000
Vc	0.01825	0.00632	2.89	0.009
Fz	0.07992	0.00632	12.65	0.000
Helix	-0.01125	0.00632	-1.78	0.089
Rake	0.01525	0.00632	2.41	0.025
Vc*Vc	0.03487	0.00576	6.06	0.000
Helix*Helix	0.03512	0.00576	6.10	0.000
Rake*Rake	0.03525	0.00576	6.12	0.000
Fz*Rake	-0.01825	0.00774	-2.36	0.028

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความหยابผิวหลังปรับปรุงแบบจำลอง
สำหรับสมการทำนายเมื่อพิจารณาจากตัวแปรธรรมชาติ

Term	Coef
Constant	11.13
Vc	-0.0701
Fz	18.94
Helix	-0.1147
Rake	-0.1765
Vc*Vc	0.000155
Helix*Helix	0.001405
Rake*Rake	0.00881
Fz*Rake	-0.912

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมต่าง ๆ ทุกเทอมที่มีผลต่อค่าความหยابผิว ไปทำการเขียนสมการทำนายค่าความหยابผิวได้ดังนี้

สมการทำนายเมื่อตัวแปรถูกเข้ารหัส (Code Units) คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่าความหยابผิว} = & 0.2620 + 0.01825 \text{ Vc} + 0.07992 \text{ Fz} - 0.01125 \text{ Helix} \\ & + 0.01525 \text{ Rake} + 0.03487 \text{ Vc*Vc} + 0.03512 \text{ Helix*Helix} \\ & + 0.03525 \text{ Rake*Rake} - 0.01825 \text{ Fz*Rake} \end{aligned} \quad (4.1)$$

สมการทำนายเมื่อพิจารณาจากตัวแปรธรรมชาติ (Unicode Units) คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่าความหยابผิว} = & 11.13 - 0.0701 \text{ Vc} + 18.94 \text{ Fz} - 0.1147 \text{ Helix} - 0.1765 \text{ Rake} \\ & + 0.000155 \text{ Vc*Vc} + 0.001405 \text{ Helix*Helix} \\ & + 0.00881 \text{ Rake*Rake} - 0.912 \text{ Fz*Rake} \end{aligned} \quad (4.2)$$

4.3.7 การทดลองยืนยันผล

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองยืนยันผลการทดลอง เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความหยابผิว โดยทำการทดลองยืนยันผลจำนวน 4 การทดลอง

โดยใช้ค่าสภาวะที่แตกต่างกับตารางการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง แต่ยังใช้ระดับปัจจัยที่อยู่ในช่วงขอบเขตของการทดลองแบบแบบส่วนผสมกลางก่อนหน้านี้ ซึ่งผลการทดลองยืนยันผลพบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -5.200-12.048%

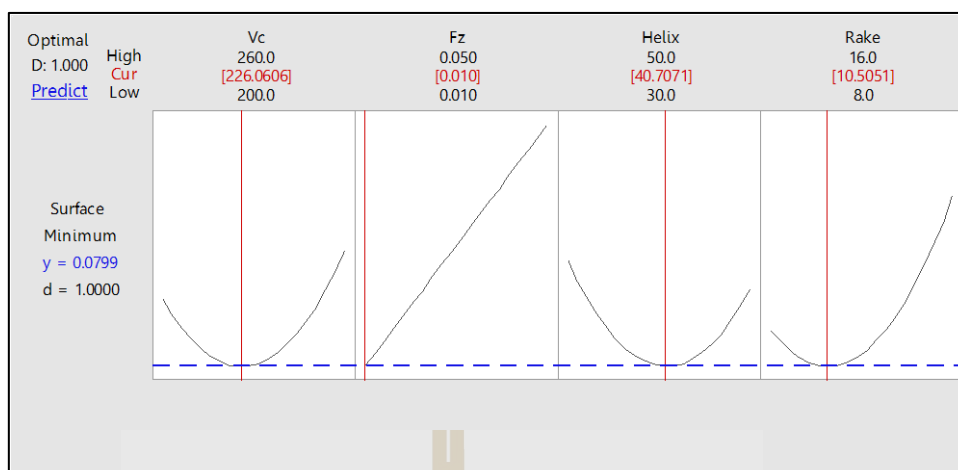
ตารางที่ 4.10 การทดลองยืนยันผลค่าความหยาบผิว

Run	Parameters				Predicted value	Experimental value	% Error
	Vc	Fz	Helix	Rake	Ra	Ra	
1	226	0.01	40	10	0.083	0.093	12.048
2	260	0.025	40	10	0.458	0.448	-2.183
3	240	0.025	40	12	0.250	0.237	-5.200
4	219	0.02	40	12	0.187	0.195	4.278

4.3.8 หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

เมื่อได้สมการทำนายค่าความในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 จากนั้นนำสมการที่ได้ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย โดยขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของผลตอบ ได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (Lower) ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าในระดับสูงสุด (Upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (Weight) และค่าความสำคัญของผลตอบ (Importance) โดยค่าทั้งสองนี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1 เนื่องจากผู้วิจัยต้องการเน้นให้ผลตอบเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด

ผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่าน้อยที่สุดของผลตอบ (Minimize) โดยค่าระดับต่ำของผลตอบ (Lower) เท่ากับ 0.144 ไมโครเมตร ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) เท่ากับ 0.144 มิลลิเมตร และค่าระดับสูงของผลตอบ (Upper) มีค่าเท่ากับ 0.505 ไมโครเมตร เนื่องจากผลการทดลองได้ค่าความหยาบผิวต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.144 และได้ค่าความหยาบผิวมากที่สุดเท่ากับ 0.505 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่เหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดคือ คือ ความเร็วตัดเฉือนเท่ากับ 226.061 เมตรต่อนาที, อัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน, มุมเกลียวเท่ากับ 40.7071° และมุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 10.2626° โดยมีค่าทำนายค่าความหยาบของผิวเท่ากับ 0.0799 ไมโครเมตร ที่ความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 1 โดยมีลักษณะกราฟของแต่ละปัจจัยดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อค่าความหยาบผิว

4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดในเทอมของพารามิเตอร์ในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยวิธีการ Gas Induce Semi Solid (GISS) ด้วยวิธีการออกแบบพื้นผิวผลตอบซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง โดยกำหนดปัจจัย 4 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 2 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน (Vc) และความเร็วตัดเฉือน (Fz) รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 2 ปัจจัย ได้แก่ มุมเกลียว (Helix) และมุมคายเศษในแนวรัศมี (Rake) โดยการออกแบบการทดลองนี้ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์ที่ใช้ดังตารางที่ 3.5

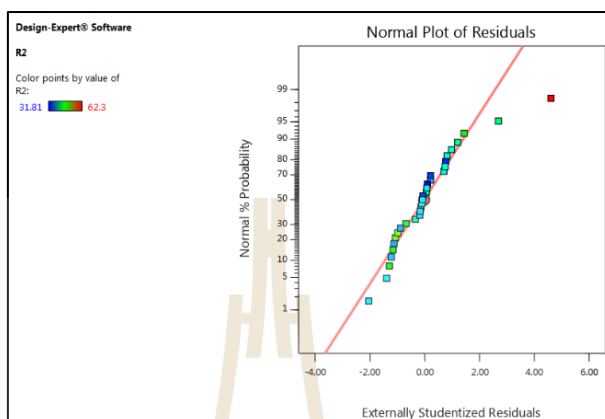
จากตารางที่ 3.1 เป็นตารางกำหนดปัจจัย ระดับ ขอบเขตและสัญลักษณ์ ในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 โดยงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ระดับปัจจัย 5 ระดับ และทำการทดลอง 1 ซ้ำ โดยแต่ละการทดลองทำการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 จำนวน 1 รอบ (รอบละ 3,360 ตารางมิลลิเมตร) ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยของค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Vc	Fz	Helix	Rake	Flank wear
1	30	1	1	215	0.02	35	10	38.005
2	12	1	1	245	0.02	35	10	47.270
3	14	1	1	215	0.04	35	10	31.810
4	17	1	1	245	0.04	35	10	41.795
5	9	1	1	215	0.02	45	10	41.335
6	3	1	1	245	0.02	45	10	50.680
7	18	1	1	215	0.04	45	10	36.410
8	26	1	1	245	0.04	45	10	46.315
9	6	1	1	215	0.02	35	14	42.125
10	5	1	1	245	0.02	35	14	50.160
11	28	1	1	215	0.04	35	14	34.060
12	29	1	1	245	0.04	35	14	39.085
13	21	1	1	215	0.02	45	14	37.515
14	7	1	1	245	0.02	45	14	47.190
15	25	1	1	215	0.04	45	14	33.555
16	13	1	1	245	0.04	45	14	39.560
17	11	-1	1	200	0.03	40	12	37.045
18	22	-1	1	260	0.03	40	12	62.300
19	23	-1	1	230	0.01	40	12	47.300
20	31	-1	1	230	0.05	40	12	33.065
21	2	-1	1	230	0.03	30	12	40.275
22	8	-1	1	230	0.03	50	12	42.785
23	15	-1	1	230	0.03	40	8	40.835
24	4	-1	1	230	0.03	40	16	43.355
25	27	0	1	230	0.03	40	12	36.620
26	19	0	1	230	0.03	40	12	40.340
27	24	0	1	230	0.03	40	12	38.510
28	1	0	1	230	0.03	40	12	38.540
29	10	0	1	230	0.03	40	12	38.725
30	20	0	1	230	0.03	40	12	39.050
31	16	0	1	230	0.03	40	12	40.430

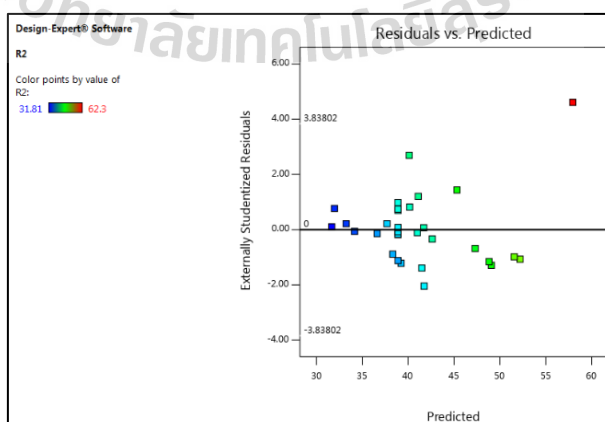
4.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Adequacy Checking)

ทำการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบค่าความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น ความเพียงพอของแบบจำลองสามารถตรวจสอบได้ดังนี้



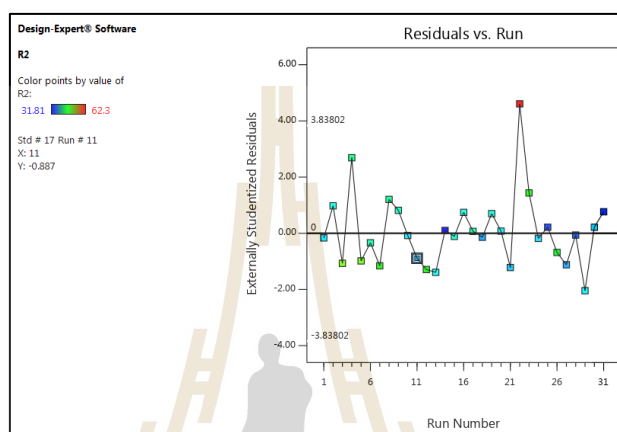
รูปที่ 4.22 การกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ

1) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ ซึ่งจากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองค่าการสึกหรอที่มุมหลบ ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น ซึ่งเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนตกค้างของผลตอบมีการกระจายตัวแบบปกติ จุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

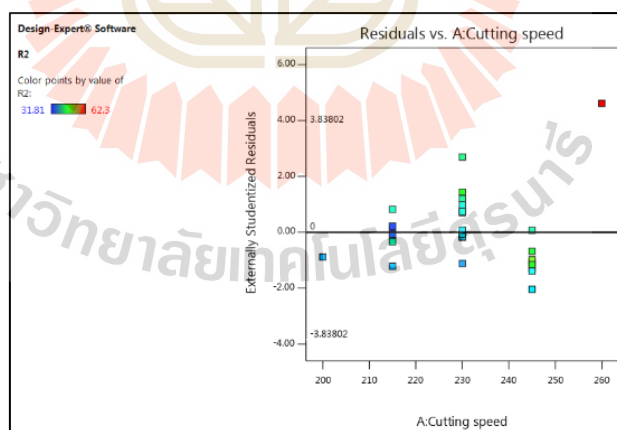


รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าที่ถูกทำนายสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ

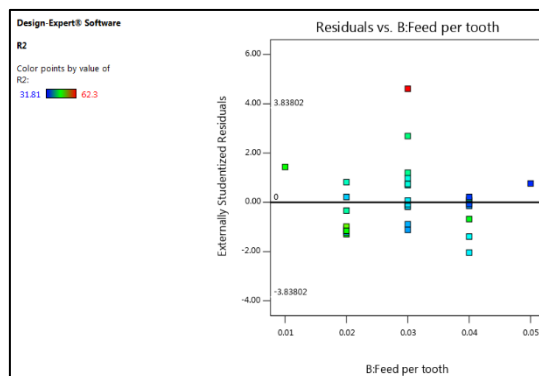
2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลื่อน (Residual) จากรูปที่ 4.23 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plots of Residuals Versus Fitted Values) จากกราฟพบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่ต่างกัน มีการกระจายตัวแบบอิสระทั้งทางบวกและทางลบไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



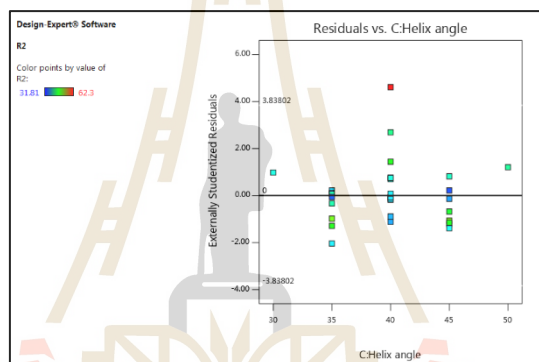
รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ



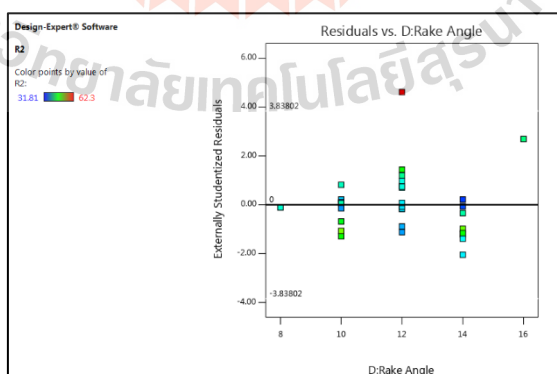
รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับความเร็วตัดเฉือนสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ



รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับอัตราป้อนต่อฟันสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ



รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับมุมเกลียวสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ



รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับมุมคายเศษในแนวรัศมีสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ

สำหรับรูปที่ 4.25-4.28 แสดงถึงลักษณะความแปรปรวนของข้อมูลส่วนตกค้างกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองโดยใช้แผนภูมิกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ ดังรูปที่ 4.25-4.28 จะเห็นได้ว่ากราฟไม่มีลักษณะลู่เข้าหรือลู่ออก แสดงว่าตัวแปรความเร็วตัดเนื้อ, อัตราป้อนต่อฟัน, มุมเกลียว และมุมคายเศษในแนวรัศมีไม่มีความแตกต่างในความแปรปรวน นั่นคือ ข้อมูลมีความเสถียรในความแปรปรวน

4.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.10 ได้นำมาทำการวิเคราะห์ด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ชี้ให้เห็นผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อผลตอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากตารางที่ 4.11 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบได้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ประกอบด้วย ความเร็วตัดเนื้อ และอัตราป้อนต่อฟัน ตามลำดับ ในขณะที่ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบคือ ผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษ นอกจากนี้ผลกระทบจากเทอมกำลังสองที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิว โดยที่ประกอบด้วยผลกระทบของเทอมความเร็วตัดเนื้อกำลังสอง โดยที่พจน์ของปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) ผู้วิจัยจึงตัดเทอมที่เหลือออกจากแบบจำลองแล้วทำการประมาณค่าความแปรปรวนใหม่ดังตารางที่ 4.12 จากตารางดังกล่าวพบว่าค่า P value ของเทอม Model มีค่าเท่ากับ 0.000 หมายถึงว่าสมการมีความพอเพียงที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าค่า P-Value ของ ของผลกำลังสอง (Square Term) มีค่าเท่ากับ 0.000 และอันตรกิริยา (Interaction term) มีค่าเท่ากับ 0.010 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (Alpha) เท่ากับ 0.05 แสดงว่ามีส่วนโค้งที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ จึงสามารถใช้สมการกำลังสองสำหรับทำนายค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดได้ต่อไป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในเทอมต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ในการตัดเนื้อที่ส่งผลกระทบต่อค่าความสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดแสดงตามตารางที่ 4.13

4.4.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

ทำการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ โดยการพิจารณาจากค่าของ R^2 ที่ได้จากโปรแกรมว่ามีค่าใกล้เคียงกับ 100% หรือไม่ ซึ่งค่า R^2 ควรมีค่ามากกว่า 75% จึงจะถือว่าความพอเพียงในการฟิตข้อมูลและเป็นแบบจำลองที่ดี รวมถึงสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบของผลตอบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ (Le Man et al, 2010) อย่างไรก็ตามค่า R^2 ที่มีค่าสูงก็ไม่ได้หมายความว่าสมการทำนายผลจะเป็นสมการทำนายผลที่ดี แต่จะต้องดูค่า R-sq (adj)

ประกอบด้วยและจะต้องมีค่าที่สูงเช่นกัน (Koocheki et al, 2009) ตามตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 93.19 % และค่า R-sq (adj) เท่ากับ 87.24% ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ และหลัง R² และ R-sq (adj) ได้รับการปรับค่าแล้วจะมีค่าเท่ากับ 90.81 % และ 88.51 % ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.13 นอกจากนี้จากการตรวจสอบ Lack of fit ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ มีค่า 0.079 แสดงว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูล และเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสามารถนำไปสร้างสมการทำนายผลเพื่อหาค่าผลตอบได้ต่อไป

ตารางที่ 4.12 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการกำลังสองสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบ

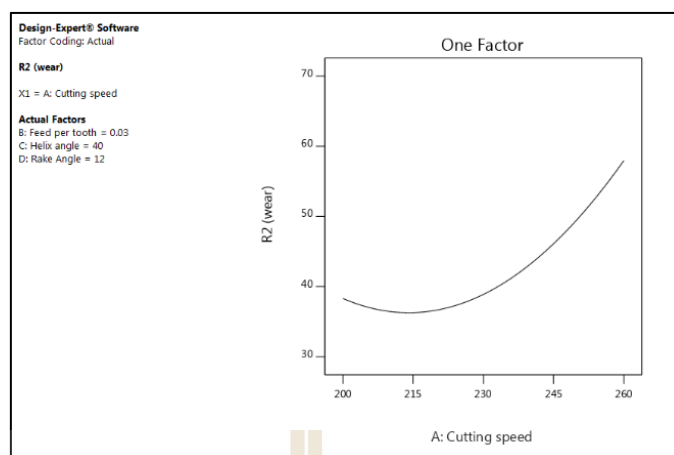
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	1065.30	76.093	15.65	0.000
Linear	4	853.97	213.492	43.91	0.000
Vc	1	577.71	577.711	118.83	0.000
Fz	1	267.73	267.734	55.07	0.000
Helix	1	7.34	7.337	1.51	0.237
Rake	1	1.18	1.184	0.24	0.628
Square	4	156.58	39.144	8.05	0.001
Vc*Vc	1	152.62	152.619	31.39	0.000
Fz*Fz	1	0.11	0.111	0.02	0.882
Helix*Helix	1	2.16	2.156	0.44	0.515
Rake*Rake	1	4.95	4.945	1.02	0.328
2-Way Interaction	6	54.76	9.127	1.88	0.147
Vc*Fz	1	1.82	1.822	0.37	0.549
Vc*Helix	1	0.43	0.429	0.09	0.770
Vc*Rake	1	5.95	5.954	1.22	0.285
Fz*Helix	1	6.16	6.163	1.27	0.277
Fz*Rake	1	5.97	5.966	1.23	0.284
Helix*Rake	1	34.43	34.428	7.08	0.017
Error	16	77.79	4.862		
Lack-of-Fit	10	67.84	6.784	4.09	0.049
Pure Error	6	9.95	1.658		
Total	30	1143.09			
S = 2.20494	R-sq = 93.19 %			R-sq (adj) = 87.24 %	

ตารางที่ 4.13 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสมการกำลังสองสำหรับค่าความหนาผิวหลังปรับปรุง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	1038.01	173.001	39.51	0.000
Linear	4	853.97	213.492	48.76	0.000
Vc	1	577.71	577.711	131.94	0.000
Fz	1	267.73	267.734	61.15	0.000
Helix	1	7.34	7.337	1.68	0.208
Rake	1	1.18	1.184	0.27	0.608
Square	1	149.61	149.614	34.17	0.000
Vc*Vc	1	149.61	149.614	34.17	0.000
2-Way Interaction	1	34.43	34.428	7.86	0.010
Helix*Rake	1	34.43	34.428	7.86	0.010
Error	24	105.09	4.379		
Lack-of-Fit	18	95.14	5.285	3.19	0.079
Pure Error	6	9.95	1.658		
Total	30	1143.09			
S = 2.09250		R-sq = 90.81%		R-sq (adj) = 88.51 %	

4.4.4 การวิเคราะห์ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

ในหัวข้อนี้จะพูดถึงผลกระทบหลักของปัจจัยส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าความเร็วตัดเนื้อเป็นผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ตามด้วยอัตราป้อนต่อฟัน โดยที่หัวข้อนี้จะอภิปรายถึงผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดดังต่อไปนี้

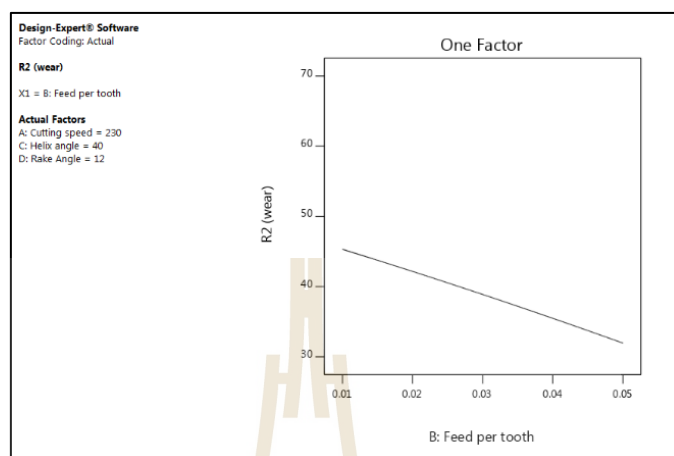


รูปที่ 4.29 ผลกระทบหลักของความเร็วตัดเฉือนที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

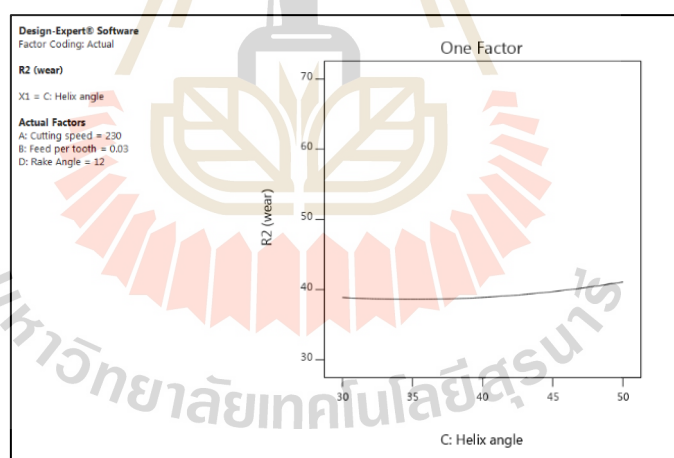
1) ผลกระทบหลักจากความเร็วตัดแสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าค่าการสึกหรอจะลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเร็วตัดเฉือนระหว่าง 200 ถึง 215 เมตรต่อนาที โดยที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดที่ต่ำที่สุดอยู่ระหว่าง 215 เมตรต่อนาที เนื่องจากเมื่อกัดชิ้นงานด้วยความเร็วตัดสูงจะส่งผลให้คมตัดของดอกเอ็นมิลหมุนกัดชิ้นงานในจำนวนรอบที่มากกว่าเมื่อเดินกัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนต่อฟันที่เท่ากันในระยะทางที่เท่ากัน นั่นหมายความว่าเมื่อดอกเอ็นมิลหมุนครบ 1 รอบจะตัดเฉือนเนื้อชิ้นงานในปริมาณที่น้อยกว่าส่งผลให้เศษชิพหนาน้อยกว่า ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงตัดเฉือนต่ำกว่าการกัดชิ้นงานด้วยความเร็วรอบต่ำ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วตัดเฉือนจาก 215-260 เมตรต่อนาที ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดสูงเพิ่มขึ้นและจะมีค่ามากที่สุดที่ความเร็วรอบ 260 เมตรต่อนาที อาจเป็นเพราะว่าอุณหภูมิในการตัดเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการกัดชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความเครียดและอัตราความเครียดมากขึ้น (Subramanian et al., 2014)

2) ผลกระทบหลักจากอัตราป้อนต่อฟันแสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า อัตราป้อนต่อฟันมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด กล่าวคือเมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ค่าความหยาบผิวการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดก็จะมีแนวโน้มลดลง โดยที่อัตราป้อนต่อฟัน 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน จะส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะต่ำที่สุด เพราะว่าเมื่อกัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนต่อฟันที่สูงขึ้นในขณะที่ความเร็วรอบคงที่ในระยะทางที่เท่ากัน คมตัดของดอกเอ็นมิลจะหมุนกัดชิ้นงานด้วยระยะเวลาและจำนวนรอบที่น้อยกว่าอัตราป้อนต่อฟันที่ต่ำกว่าเมื่อเดินกัดชิ้นงานไปในระยะทางที่เท่ากัน

นั่นหมายความว่าเมื่อคอกเอ็นมิลจะสัมผัสกับชิ้นงานในเวลาที่น้อยกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดเนื้อต่ำกว่าการกัดงานด้วยอัตราป้อนต่ำ



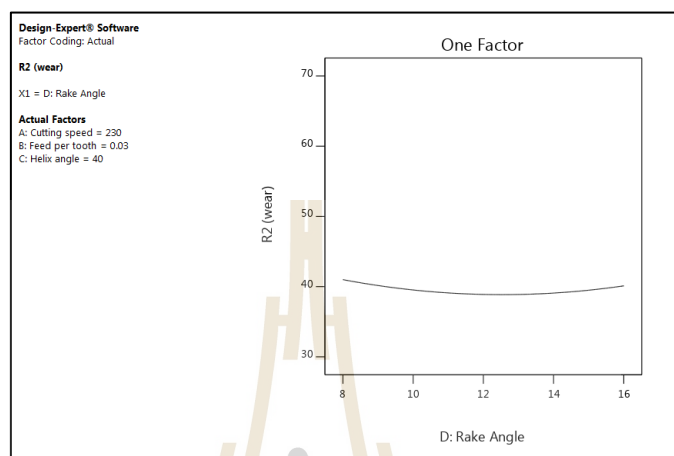
รูปที่ 4.30 ผลกระทบหลักของอัตราป้อนที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด



รูปที่ 4.31 ผลกระทบหลักของมุมเกลียวที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

3) ผลกระทบหลักจากมุมเกลียวแสดงดังรูปที่ 4.28 พบว่า ผลกระทบหลักจากมุมเกลียวไม่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่มุมเกลียวมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด กล่าวคือเมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นระหว่าง 30° ถึง 50° มิลลิเมตรต่อฟัน ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่มุมเกลียว 50° จะส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะสูงที่สุด

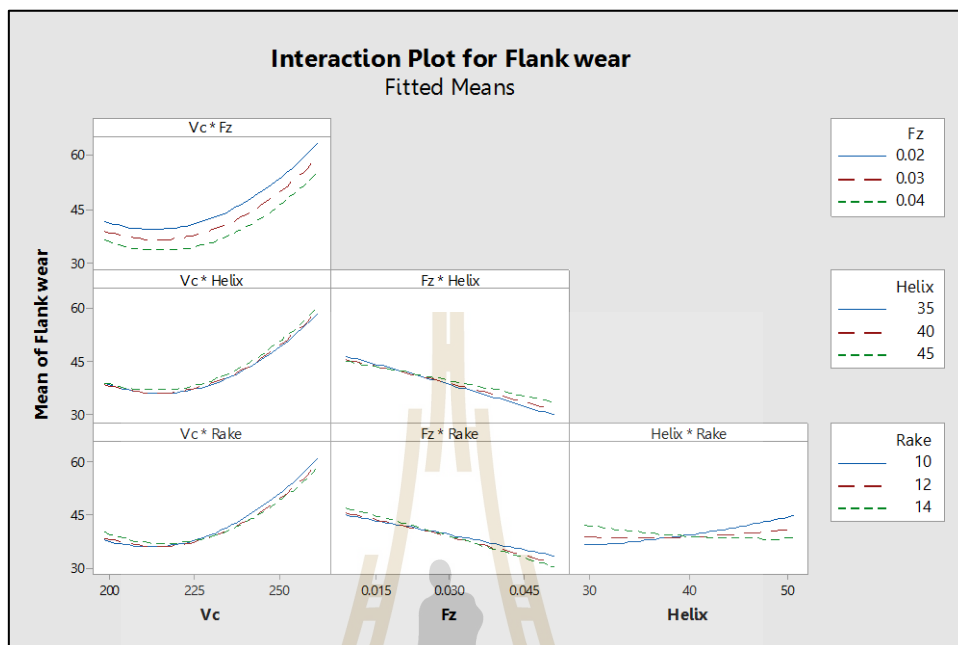
เนื่องจากเมื่อเครื่องมือตัดมีมุมเกลียวมากขึ้นส่งผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างคมตัดและชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงและอุณหภูมิในการตัดเฉือนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มมุมเกลียวจะส่งผลให้มุมคายเศษในแนวแกนลดลงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น (P. S. Sivasakthivel et al., 2014)



รูปที่ 4.32 ผลกระทบหลักของมุมคายเศษในแนวรัศมีที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

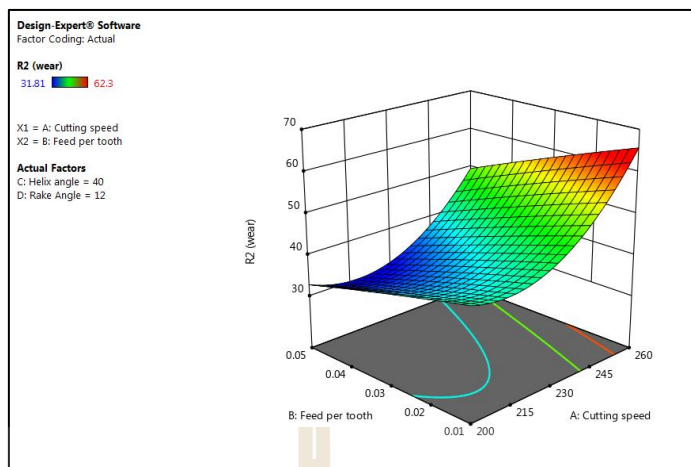
4) ผลกระทบหลักจากมุมคายเศษในแนวรัศมีแสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่าผลกระทบหลักจากมุมคายเศษในแนวรัศมีไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด โดยที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีค่าลดลงเมื่อมุมคายเศษเพิ่มขึ้นจาก 8°-12° เนื่องจากว่าเมื่อมุมคายเศษมีค่ามากขึ้นทำให้มุมเฉือนของเครื่องมือตัดมีค่ามากขึ้นด้วยซึ่งส่งผลให้คมตัดคมขึ้นทำให้ตัดชิ้นงานได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อมุมคายเศษในแนวรัศมีสูงขึ้นสามารถทำให้เศษออกจากบริเวณตัดเฉือนได้ดีขึ้นโดยที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีค่าน้อยที่สุดในช่วงระหว่าง 12°-14° แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อมุมคายเศษมากเกินไปทำค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด มีค่ามากขึ้น เพราะว่าเมื่อมุมคายเศษในแนวรัศมีมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้บริเวณสัมผัสระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงานมีปริมาณที่มากขึ้นทำให้แรงในการตัดเฉือนและอุณหภูมิในการตัดเฉือนมากขึ้นด้วย (David & John, 2006) ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อมุมคายเศษในแนวแกนรัศมีเพิ่มขึ้นระหว่าง 14°-16° ส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มสูงขึ้น

4.4.5 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

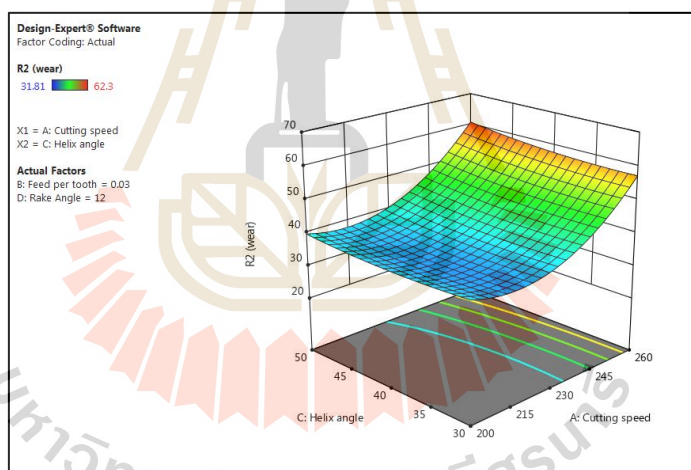


รูปที่ 4.33 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

1) ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟันแสดงดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31 พบว่า ที่อัตราป้อนในช่วงระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน เมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนเพิ่มขึ้นจาก 200-260 เมตรต่อนาที จะทำให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดน้อยที่สุดเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนอยู่ในช่วง 215-230 เมตรต่อนาที และค่าอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ในขณะที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความเร็วตัดเท่ากับ 260 เมตรต่อนาที และอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน



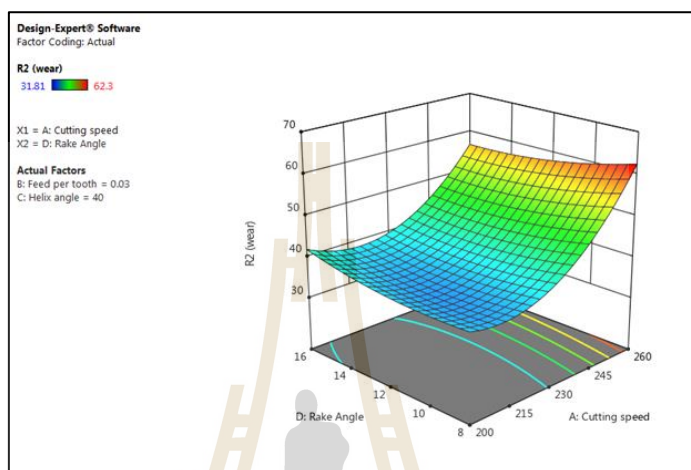
รูปที่ 4.34 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟัน
ต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด



รูปที่ 4.35 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมเกลียว
ต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

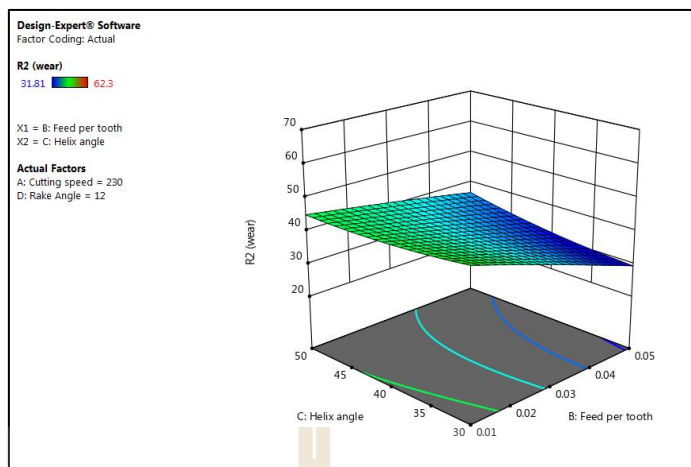
2) ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมเกลียวแสดงดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.32 พบว่า เมื่อใช้มุมเกลียวในช่วงระหว่าง 30° - 50° เมื่อค่าความเร็วตัดเพิ่มขึ้นระหว่าง 200-230 เมตรต่อนาที จะทำให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนเพิ่มขึ้นจาก 230-260 เมตรต่อนาที ที่ทุกช่วงระดับของมุมเกลียว นอกจากนี้

ยังพบว่าจะได้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดที่น้อยที่สุดเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนอยู่ในช่วง 220-230 เมตรต่อนาที และค่ามุมเกลียวประมาณ 30° ในขณะที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความเร็วรอบเท่ากับ 260 เมตรต่อนาที และค่ามุมเกลียวขนาดเท่ากับ 50°



รูปที่ 4.36 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมคายเศษในแนวรัศมีต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

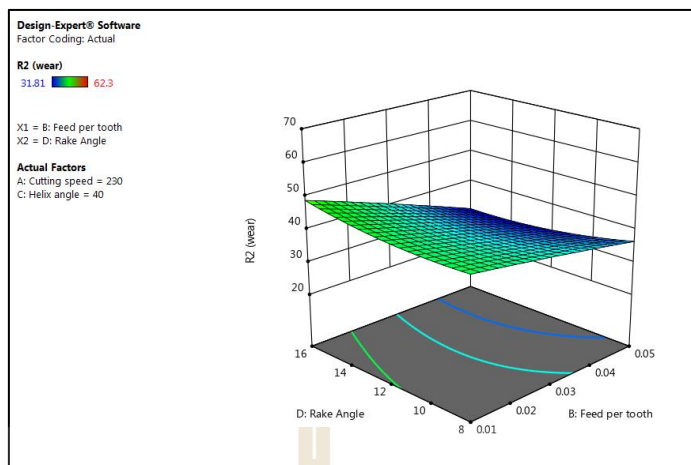
3) ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วตัดเฉือนและมุมคายเศษในแนวรัศมีแสดงดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.33 พบว่าเมื่อใช้มุมคายเศษในช่วงระหว่าง 8° - 16° เมื่อค่าความเร็วตัดเพิ่มขึ้นระหว่าง 200-215 เมตรต่อนาที จะทำให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าความเร็วตัดเพิ่มขึ้นจาก 215-260 เมตรต่อนาที ที่ทุกช่วงระดับของมุมคายเศษในแนวรัศมี นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดที่น้อยที่สุดเมื่อค่าความเร็วตัดเฉือนอยู่ในช่วง 200-215 เมตรต่อนาที และค่ามุมเกลียวอยู่เท่ากับ 8° ในขณะที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความเร็วรอบเท่ากับ 260 เมตรต่อนาที และมุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 16°



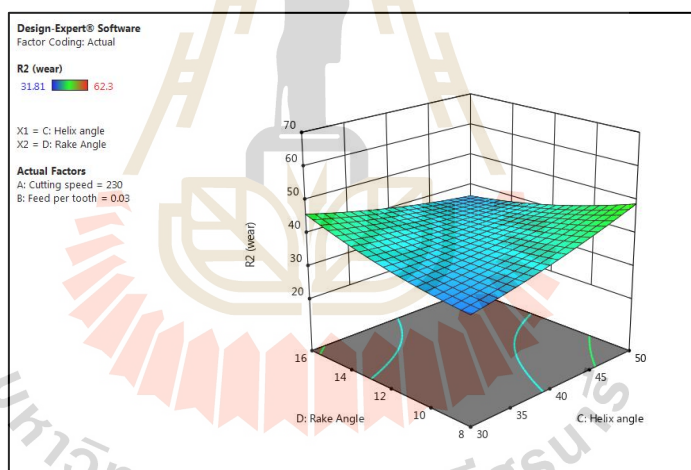
รูปที่ 4.37 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมเกลียว
ต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

4) ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมเกลียวแสดงดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.34 พบว่าเมื่อใช้มุมเกลียวในช่วงระหว่าง 30° - 50° เมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นจาก 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะน้อยที่สุดที่อัตราป้อนต่อฟัน 0.05 ฟันต่อมิลลิเมตร ที่ทุกช่วงระดับของมุมเกลียว นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดที่มากที่สุดเมื่อค่าอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟันและใช้มุมเกลียวประมาณ 40° ในขณะที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้อัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟันและมุมเกลียวขนาด 50°

5) ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมคายเศษในแนวรัศมี ซึ่งเป็นผลกระทบร่วมเพียงคู่เดียวที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญแสดงดังรูปที่ 4.30 และ 4.35 พบว่าเมื่อใช้มุมคายเศษในแนวรัศมีในช่วงระหว่าง 8° - 16° เมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นจาก 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะน้อยที่สุดที่อัตราป้อนต่อฟัน 0.05 ฟันต่อมิลลิเมตร ที่ทุกช่วงระดับของมุมเกลียว และพบว่าจะได้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดที่น้อยที่สุดเมื่อค่าอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน และค่ามุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 8° ในขณะที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าอัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟันและมุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 16°



รูปที่ 4.38 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี
ต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด



รูปที่ 4.39 พื้นผิวแสดงผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวแกนรัศมี
ต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

5) ผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวรัศมีแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่า เมื่อใช้มุมคายเศษในแนวรัศมีในช่วงระหว่าง 8° - 12° เมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นจาก 30° ถึง 50° จะส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้มุมคายเศษในแนวรัศมีในช่วงระหว่าง 12° - 16° ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นจาก 30° - 50°

นอกจากนี้ยังพบว่าจะได้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดที่น้อยที่สุดเมื่อค่ามุมเท่ากับ 30° และค่ามุมคายเศษในแนวรัศมีประมาณ 8° ในขณะที่ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่ามุมเกลียวเท่ากับ 50° และค่ามุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 8°

4.4.6 สร้างสมการทำนายค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

หลังจากตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองแล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของปัจจัยในเทอมต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญ ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเขียนสมการสำหรับทำนายค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดจากกระบวนการถดถอยด้วยวิธีกำลังของกำลัง A356-T6 จากการวิเคราะห์ (Estimated Regression Coefficient) โดยใช้ข้อมูลที่คำนวณมาจากโปรแกรมเมื่อนำตัวแปรเข้ารหัส (Code Units) และสมการทำนายเมื่อพิจารณาตัวแปรธรรมชาติ (Uncode Units) ดังตารางที่ 4.14 และตารางที่ 4.15 เพื่อนำสมการทำนายที่ได้ไปใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยต่อไป

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด
หลังปรับปรุงแบบจำลองสำหรับสมการทำนายเมื่อตัวแปรถูกเข้ารหัส

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	39.417	0.480	82.11	0.000
Vc	4.906	0.427	11.49	0.000
Fz	-3.340	0.427	-7.82	0.000
Helix	0.553	0.427	1.29	0.208
Rake	-0.222	0.427	-0.52	0.608
Vc*Vc	2.255	0.386	5.85	0.000
Helix*Rake	-1.467	0.523	-2.80	0.010

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด
หลังปรับปรุงแบบจำลองสำหรับสมการทำนายเมื่อพิจารณาจากตัวแปรธรรมชาติ

Term	Coef
Constant	430.911
Vc	-4.283
Fz	-334.000
Helix	1.871
Rake	5.756
Vc*Vc	0.010
Helix *Rake	-0.147

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมต่าง ๆ ทุกเทอมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวไปทำการเขียนสมการทำนายค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดได้ดังนี้

สมการทำนายเมื่อตัวแปรถูกเข้ารหัส (Code Units) คือ

$$\begin{aligned} \text{Flank wear} = & 39.417 - 4.906 Vc - 3.340 Fz + 0.553 \text{ Helix} - 0.222 \text{ Rake} \\ & + 2.255 Vc*Vc - 1.467 \text{ Helix}*Rake \end{aligned} \quad (4.1)$$

สมการทำนายเมื่อพิจารณาจากตัวแปรธรรมชาติ (Unicode Units) คือ

$$\begin{aligned} \text{Flank wear} = & 430.9 - 4.283 Vc - 334.0 Fz + 1.871 \text{ Helix} + 5.76 \text{ Rake} \\ & + 0.01002 Vc*Vc - 0.1467 \text{ Helix}*Rake \end{aligned} \quad (4.2)$$

4.4.7 การทดลองยืนยันผล

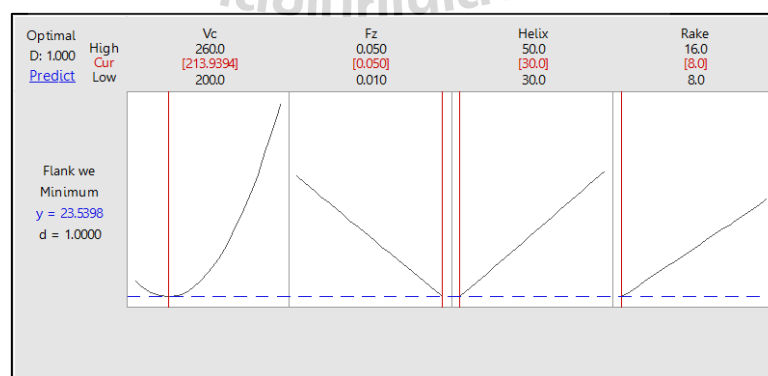
ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดลองยืนยันผลการทดลอง เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด โดยทำการทดลองยืนยันผลจำนวน 4 การทดลอง โดยใช้ค่าสภาวะที่แตกต่างกับตารางการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง แต่ยังคงใช้ระดับปัจจัยที่อยู่ในช่วงขอบเขตของการทดลองแบบแบบส่วนผสมกลางก่อนหน้านี้ ซึ่งผลการทดลองยืนยันผลพบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -6.019-5.026%

ตารางที่ 4.16 การทดลองยืนยันผลค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

Run	Parameters				Predict value	Experiment value	% Error
	Vc	Fz	Helix	Rake	Flank wear	Flank wear	
1	226	0.01	40	10	45.17	44.04	-2.502
2	260	0.025	40	10	58.47	58.60	0.222
3	240	0.025	40	12	45.36	47.64	5.026
4	219	0.02	40	12	40.37	37.94	-6.019

4.4.8 หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

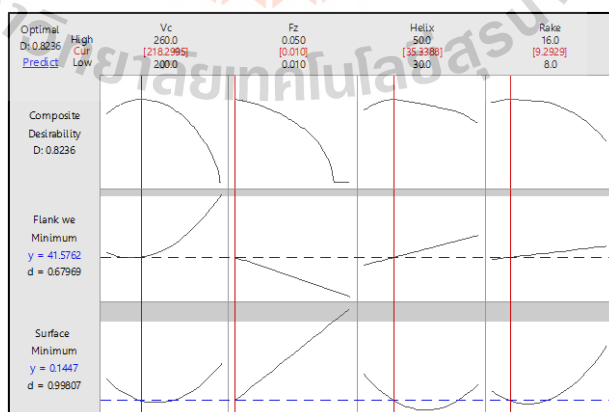
ผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่าน้อยที่สุดของผลตอบ (Minimize) โดยค่าระดับต่ำของผลตอบ (Lower) เท่ากับ 31.81 ไมโครเมตร ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) เท่ากับ 31.81 ไมโครเมตร และค่าระดับสูงของผลตอบ (Upper) มีค่าเท่ากับ 62.3 ไมโครเมตร เนื่องจากผลการทดลองได้การสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 31.81 ไมโครเมตร และได้การสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมากที่สุดเท่ากับ 62.3 ไมโครเมตร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่เหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดที่ต่ำที่สุดคือ ความเร็วตัดเฉือนเท่ากับ 213.94 เมตรต่อนาที, อัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน, มุมเกลียวเท่ากับ 30° และมุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 8° โดยมีค่าทำนายค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดเท่ากับ 23.54 ไมโครเมตร ที่ความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 1 โดยมีลักษณะกราฟของแต่ละปัจจัยตามรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

4.5 หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยแบบหลายวัตถุประสงค์

สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi Objective Optimization) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ทั้งสองผลตอบแทนมีค่าต่ำที่สุด ทั้งค่าความหยابผิวที่น้อยที่สุดและค่าการสึกหรอที่มุลหของเครื่องมือตัดที่น้อยที่สุด โดยที่ผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบแทน (Goal) เป็นค่าน้อยที่สุดของผลตอบแทน (Minimize) โดยค่าระดับต่ำของผลตอบแทนค่าความหยابผิว (Lower) เท่ากับ 0.144 ไมโครเมตร ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) เท่ากับ 0.144 มิลลิเมตร และค่าระดับสูงของผลตอบแทนค่าความหยابผิว (Upper) มีค่าเท่ากับ 0.505 ไมโครเมตร เนื่องจากผลการทดลองได้ค่าความหยابผิวต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.144 และได้ค่าความหยابผิวมากที่สุดเท่ากับ 0.505 และผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบแทน (Goal) เป็นค่าน้อยที่สุดของผลตอบแทน (Minimize) โดยค่าระดับต่ำของผลตอบแทนค่าการสึกหรอที่มุลหของเครื่องมือตัดน้อยที่สุด (Lower) เท่ากับ 31.81 ไมโครเมตร ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) เท่ากับ 31.81 ไมโครเมตร และค่าระดับสูงของผลตอบแทนค่าการสึกหรอที่มุลหของเครื่องมือตัดน้อยที่สุด (Upper) มีค่าเท่ากับ 62.3 ไมโครเมตร เนื่องจากผลการทดลองได้การสึกหรอที่มุลหของเครื่องมือตัดต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 31.81 ไมโครเมตร และได้การสึกหรอที่มุลหของเครื่องมือตัดมากที่สุดเท่ากับ 62.3 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.39 สามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ในช่วงระดับปัจจัยดังกล่าว เมื่อพิจารณาค่าความหยابผิวและค่าการสึกหรอที่มุลหของเครื่องมือตัดร่วมกัน จะส่งผลให้ได้ค่าความหยابผิวที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1447 ไมโครเมตรและค่าการสึกหรอที่มุลหของเครื่องมือตัดต่ำที่สุด 41.5762 ไมครอน เมื่อใช้ความเร็วตัดเฉือน 218.30 เมตรต่อนาที, อัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน, มุมเกลียวเท่ากับ 35.34° และมุมคายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 9.3°



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อค่าความหยابผิวและค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัด

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

พัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนที่เหมาะสมต่อของความหยาบผิว และการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

งานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัยในการศึกษา 4 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 2 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟันและความเร็วตัดเฉือน รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 2 ปัจจัย ได้แก่ มุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวรัศมี ซึ่งผลการศึกษาศาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

5.2 ผลกระทบหลักของปัจจัยต่อความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

5.3 ความแม่นยำของสมการทำนายค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

5.4 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

5.5 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยแบบหลายวัตถุประสงค์

5.6 ข้อเสนอแนะ

5.1 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางพบว่า ผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟัน, ความเร็วตัดเฉือน และมุมคายเศษ ตามลำดับ ในขณะที่ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวคือ ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟันและมุมคายเศษ นอกจากนี้ผลกระทบจากเทอมกำลังสองที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวประกอบด้วยผลกระทบของเทอมความเร็วตัดเฉือนกำลังสอง, เทอมมุมเกลียวกำลังสอง และเทอมมุมคายเศษกำลังสอง ในส่วนของผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั้นจะ

ประกอบด้วย ความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟัน ตามลำดับในขณะที่ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่มุมหลบคือ ผลกระทบร่วมระหว่างมุมเกลียวและมุมคายเศษ นอกจากนี้ผลกระทบจากเทอมกำลังสองที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวโดยที่ประกอบด้วยผลกระทบของเทอมความเร็วตัดเฉือนกำลังสอง โดยที่พจน์ของปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

5.2 ผลกระทบหลักของปัจจัยต่อความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

จากการทดลองออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางสามารถสรุปผลกระทบหลักของปัจจัยต่อความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดได้ดังต่อไปนี้

1. ค่าความเร็วตัดเฉือนระหว่าง 200-230 เมตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีค่าลดลงและค่าความหยาบผิวจะเพิ่มขึ้น
2. อัตราป้อนต่อฟันมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความหยาบผิว กล่าวคือเมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ค่าความหยาบผิวก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปด้วย
3. เมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นระหว่าง 30° - 45° จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลง และพบว่าเมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นระหว่าง 45° - 50° ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มสูงขึ้น
4. เมื่อมุมคายเศษเพิ่มขึ้นจาก ระหว่าง 8° - 12° ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีค่าลดลง และเมื่อมุมคายเศษในแนวแกนรัศมีเพิ่มขึ้นระหว่าง 12° - 16° ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มสูงขึ้น
5. ค่าความเร็วตัดเฉือนระหว่าง 200 ถึง 215 เมตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดลดลง และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 215-260 เมตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น
6. อัตราป้อนต่อฟันมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด กล่าวคือเมื่ออัตราป้อนต่อฟันเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน ค่าความหยาบผิวการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดก็จะมีแนวโน้มลดลง
7. มุมเกลียวมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด กล่าวคือเมื่อมุมเกลียวเพิ่มขึ้นระหว่าง 30° ถึง 50° มิลลิเมตรต่อฟัน ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

8. เมื่อมุมกายเศษเพิ่มขึ้นจากระหว่าง 8° - 12° ส่งผลให้การสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีค่าลดลง และเมื่อมุมกายเศษในแนวแกนรัศมีเพิ่มขึ้นระหว่าง 12° - 16° ส่งผลให้การสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มสูงขึ้น

5.3 ความแม่นยำของสมการทำนายค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

แสดงผลการทดลองยืนยันผลการทดลอง เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดพบว่า เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดอยู่ระหว่าง -5.200-12.048% และ -6.019-5.026% ตามลำดับ

5.4 สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัด

สถานะที่เหมาะสมที่สุดส่งผลให้ความหยาบผิวต่ำที่สุดคือ ความเร็วตัดเฉือนเท่ากับ 226.061 เมตรต่อนาที, อัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน, มุมเกลียวเท่ากับ 40.7071° และมุมกายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 10.2626° โดยมีค่าทำนายค่าความหยาบของผิวเท่ากับ 0.0799 ไมโครเมตร

สถานะที่เหมาะสมที่สุดส่งผลให้ค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดที่ต่ำที่สุดคือ ความเร็วตัดเฉือนเท่ากับ 213.94 เมตรต่อนาที, อัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน, มุมเกลียวเท่ากับ 30° และมุมกายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 8° โดยมีค่าทำนายค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดเท่ากับ 23.54 ไมโครเมตร

5.5 สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยแบบหลายวัตถุประสงค์

เมื่อพิจารณาความหยาบผิวและค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดร่วมกัน จะส่งผลให้ได้ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1447 ไมโครเมตร และค่าการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดต่ำที่สุด 41.5762 ไมครอน เมื่อใช้ความเร็วตัดเฉือน 218.30 เมตรต่อนาที, อัตราป้อนต่อฟันเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน, มุมเกลียวเท่ากับ 35.34° และมุมกายเศษในแนวรัศมีเท่ากับ 9.3°

5.6 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้ที่ได้ในการศึกษาแบบจำลองการทำนายค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด ในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้มุมเกลียวและมุมคายเศษในแนวรัศมีสำหรับกัดอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 หรืออลูมิเนียมเกรดอื่น ๆ และเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการตัดเฉือนอื่น ๆ ต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมจริง อย่างไรก็ตามในการใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการคำนวณค่าต่าง ๆ ควรมีการระมัดระวังในการตั้งค่าในระดับต่ำสุด (Lower) ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าในระดับสูง (Upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบแทน (Weight) และค่าความสำคัญของผลตอบแทน (Importance) เนื่องจากมีผลต่อผลตอบแทนที่ได้เป็นอย่างยิ่ง



รายการอ้างอิง

- เจษฎา วรรณสินธุ์. (2554). เทคนิคการหล่ออลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย.
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พยุร เกตุกราย. (2523). การหล่อโลหะ ภาคการผลิต. กรุงเทพฯ : สมาคมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) กรุงเทพมหานคร.
- พิสมัย หาญมงคลพิพัฒน์. (2550). สถิติและการวางแผนการทดลองทางเกษตร. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิจิตร พงษ์บัณฑิต. (2542). การหลอมละลาย และการปรับปรุงทางโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม AI - Si - Cu - Mg alloys LM25. เทคโนโลยีการหล่อโลหะ. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- อำนาจ ทองแสน. (2559). ทฤษฎีเครื่องมือกล. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- Pinar, A. M., (2013). Optimization of Process Parameters with Minimum Surface Roughness in the Pocket Machining of AA5083 Aluminum Alloy via Taguchi Method. **Arabian Journal for Science and Engineering**. 38(3): 705-714.
- Arokiadass, R., Palaniradja, K. and Alagumoorthi, N. (2012). Prediction and optimization of end milling process parameters of cast aluminium based MMC. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 22(7): 1568-1574.
- Burapa, R., Janudom, S., Chuchee, T., Canyook, R. and Wannasin, J. (2010). Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 20(3): 857-861.
- Cerri, E., Evangelista, E., Spigarelli, S., Cavaliere, P. and DeRiccardis, F. (2000). Effects of Thermal Treatments on Microstructure and Mechanical Properties in a Thixocast 319 Aluminum Alloy. **Materials Science and Engineering**. 284(1-2): 254-260.

- Cui, X., Zhao, J., Jia, C. and Zhou, Y. (2012). Surface roughness and chip formation in high-speed face milling AISI H13 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 61(1-4): 1-13.
- Dikshit, M. K., Puri, A. B. and Maity, A. (2014). Experimental Study of Cutting Forces in Ball End Milling of Al2014-T6 Using Response Surface Methodology. **Procedia Materials Science** 6: 612 – 622.
- Dolinsek, S., and Kopac, J. (2006). Mechanism and types of tool wear; particularities in advanced cutting materials. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. 19(1): 11-18.
- Eguskiza, S., Niklas, A., Fernández-Calvo, A. I., Santos, F. and Djurdjevic, M. (2015). Study of Strontium Fading in Al- Si- Mg AND Al- Si- Mg- Cu Alloy by Thermal Analysis. **International Journal of Metalcasting**. 9(3): 43-50.
- Ekici, E., Samtas G. and Gulesin M. (2014). Experimental and Statistical Investigation of the Machinability of Al-10% SiC MMC Produced by Hot Pressing Method. **Arabian Journal for Science and Engineering**. 39(4): 3289-3298.
- Elshalakany, A. B., Osman, T. A., Khattab, A., Azzam B. and Zaki M. (2014) Microstructure and Mechanical Properties of MWCNTs Reinforced A3 5 6 Aluminum Alloys Cast Nanocomposites Fabricated by Using a Combination of Rheocasting and Squeeze Casting Techniques. **Journal of Nanomaterials**. 2014: 1-14.
- Elahi, M. A. and Shabestari, S.G. (2016). Effect of various melt and heat treatment conditions on impact toughness of A356 aluminum alloy. **Transactions of a Nonferrous Metals Society of China**. 26 (4): 956-965.
- Fratila, D. and Caizar, C. (2011). Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. **Journal of Cleaner Production**. 19: 640-645.
- Hayajneh, M. T., Tahat M. S., and Bluhm J. (2007). A Study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**. 1(1): 1-5.
- Jatti, V. S., Sekhar, Ravi. and Patil, R.K. (2013). Study of Ball Nose End Milling of LM6 Al Alloy: Surface Roughness Optimisation using Genetic Algorithm. **International Journal of Engineering and Technology**. 5(3):2859-2865.

- Jeyakumar, S., Marimuthu, K., and Ramachandran, T. (2013). Prediction of cutting force, tool wear and surface roughness of Al6061/SiC composite for end milling operations using RSM. **Journal of Mechanical Science and Technology**. 27(9), 2813-2822.
- Kacal, A. and Yildirim, F. (2013). High Speed Hard Turning of AISI S1 (60WCrV8) Cold Work Tool Steel. **Acta Polytechnica Hungarica**. 10(8): 169-186.
- Kadirgama, K., Noor, M. M., Rahman, M. M., (2012) Optimization of Surface Roughness in End Milling Using Potential Support Vector Machine. **Arabian Journal for Science and Engineering**. 37(8):2269–2275.
- Khorasani, A. M., Yazdi, M. R. S. and Safizadeh, M. S. (2011). Tool Life Prediction in Face Milling Machining of 7075 Al by Using Artificial Neural Networks (ANN) and Taguchi Design of Experiment (DOE), **International Journal of Engineering and Technology**. 3(1): 30-35.
- Khuri, A.L. and Cornell, J.A. (1987) **Response Surfaces: Designs and Analyses**. Marcel Dekker Inc., New York.
- Kıvak, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. **Measurement**. 50: 19-28.
- Kuram, E. and Ozelik, B. (2013). Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al7075 material with ball nose end mill. **Measurement**. 46: 1849–1864.
- Lim, Y. P., Yeo, W. H., and Masita, A. (2017). Effect of heat treatment on gravity die-cast Sc-A356 aluminium alloy. **Manufacturing Review**. 4(3): 1-3.
- Mahesh G., Muthu, S. and Devadasan, S. R. (2015). Prediction of surface roughness of end milling operation using genetic algorithm. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 77(1-4): 369-381.
- Montgomery, DC., (2009). **Design and Analysis of Experiments, 7th ed.** John Wiley & Sons, New York.
- Rawangwong, S., Boonchouytan, W., Chatthong, J. and Burapa, R. (2013). An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Semi-Solid Cast 6061 Aluminum Alloy Using Carbide Tool. **Advanced Materials Research**. 747: 777-780.

- Rawangwong, S., Chatthong, J., Boonchouytan, W. and Burapa, R. (2013). An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Aluminum Semi Solid 2024 Using Carbide Tool. **Energy Procedia**. 34: 854 – 862.
- Rawangwong, S., Chatthong, J., Boonchouytan, W. and Burapa, R. (2013). Influence of Cutting Parameters in Face Milling Semi-Solid AA 7075 Using Carbide Tool Affected the Surface Roughness and Tool Wear. **Energy Procedia**. 56: 448-457.
- Sheth, S. and George, P. M. (2016). Experimental Investigation and Prediction of Flatness and Surface Roughness during Face Milling Operation of WCB Material. **Procedia Technology**. 23: 344 – 351
- Simunovic, K., Simunovic, G. and Saric, T. (2013). Predicting the surface quality of face milled aluminium alloy using a multiple regression model and numerical optimization. **MEASUREMENT SCIENCE REVIEW**. 13(5): 265-272.
- Simunovic, G., Simunovic, K. and Saric, T. (2013). Modelling and simulation of surface roughness in face milling. **International Journal of Simulation Modelling**. 12(3): 141-153.
- Sivasakthivel, P.S., Murugan, V. V. and Sudhakaran, R. (2010). PREDICTION OF TOOL WEAR FROM MACHINING PARAMETERS BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY IN END MILLING. **International Journal of Engineering Science and Technology**. 2(6): 1780-1789.
- Sivasakthivel, P. S. and R. Sudhakaran, (2013) Optimization of machining parameters on temperature rise in end milling of Al 6063 using response surface methodology and genetic algorithm. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 67(9-12): 2313–2323.
- Subramanian, M., Sakthivel, M., Sooryaprakash, K. and R. Sudhakaran. (2013) Optimization of Cutting Parameters for Cutting Force in Shoulder Milling of Al7075-T6 Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm, **Procedia Engineering**. 64: 690-700.
- Subramanian, M., Sakthivel, M., Sooryaprakash, K. And Sudhakaran, R. (2013). Optimization of end mill tool geometry parameters for Al7075-T6 machining operations based on vibration amplitude by response surface methodology. **Measurement**. 46(10): 4005-4022.

- Subramanian, M., Sakthivel, M. and Sudhakaran, R. (2014). Modeling and Analysis of Surface Roughness of AL7075-T6 in End Milling Process Using Response Surface Methodology. **Arab J Sci Eng.** 39(10): 7299-7313.
- Sukumar, M. S., Ramaiah, P. V. and Nagarjuna, A. (2014). Optimization and Prediction of Parameters in Face Milling of Al-6061 Using Taguchi and ANN Approach. **Procedia Engineering.** 97: 365-371.
- Vakondios, D., Kyratsis, P., Yaldiz, S. and Antoniadis, A. (2012). Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6. **Measurement.** 45(6): 1480–1488.
- Wannasin, J., Junudom, S., Rattanochaikul, T. and Flemings, M.C. (2008). Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Process for Aluminum Die Casting Applications. **Solid State Phenomena.** 141-143: 97-102.
- Yi, J., Jiao, L., Wang, X., Xiang, J., Yuan M. and Gao. S. (2015). Surface Roughness Models and Their Experimental Validation in Micro Milling of 6061-T6 Al Alloy by Response Surface Methodology. **Mathematical Problems in Engineering.** 1-9.
- Zhang, J.Z., Chen, J.C. and Kirby, E.D. (2007). Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. **Journal of Materials Processing Technology.** 184: 233-239.
- Zhang, W., Liu, Y., Yang, J., Dang, J., Xu, H. and Du, Z. (2012) Effects of Sc content on the microstructure of As-Cast Al-7 wt.% Si alloys. **Materials Characterization.** 66: 104-110.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัด



ตารางที่ ก.1 ผลการวัดขนาดการสีกหรอบบนผิวหลบของการทดลองที่ 1-31 ที่จำนวนการตัดเฉือน
20 รอบ (1 รอบ : 3,360 ตร.มม.)

การทดลองที่	ขนาดการสีกหรอบบนผิวหลบ (VB: ไมโครเมตร)		
	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	37.31	38.70	38.005
2	44.92	49.62	47.270
3	31.97	31.65	31.810
4	41.86	41.73	41.795
5	40.49	42.18	41.335
6	48.07	53.29	50.680
7	36.59	36.23	36.410
8	44.47	48.16	46.315
9	42.66	41.59	42.125
10	50.58	49.74	50.160
11	35.62	32.5	34.060
12	37.82	40.35	39.085
13	38.9	36.13	37.515
14	47.69	46.69	47.190
15	34.21	32.90	33.555
16	37.81	41.31	39.560
17	36.82	37.27	37.045
18	67.76	56.84	62.300
19	46.69	47.91	47.300
20	33.15	32.98	33.065
21	40.09	40.46	40.275
22	44.01	41.56	42.785
23	41.26	40.41	40.835
24	42.18	44.53	43.355
25	37.35	35.89	36.620

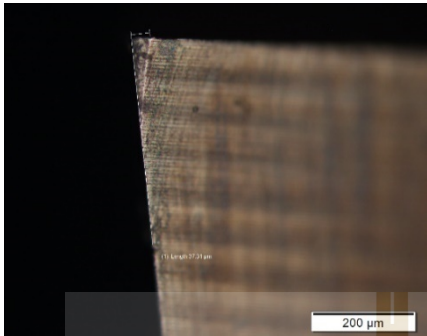
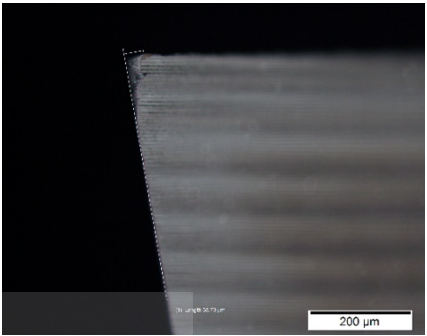
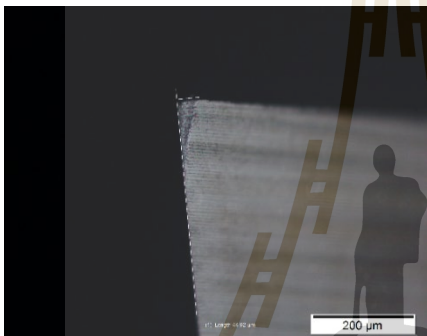
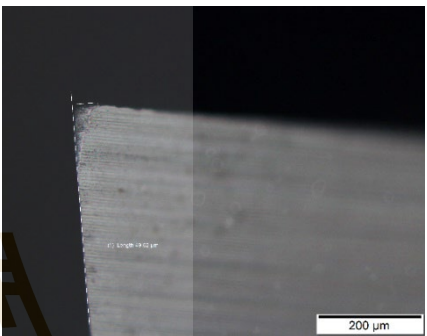
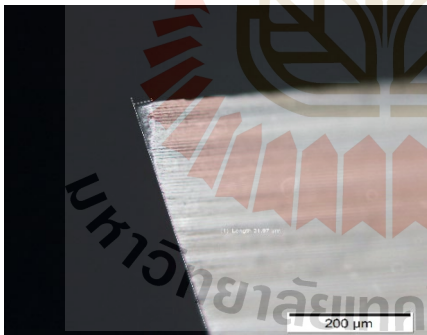
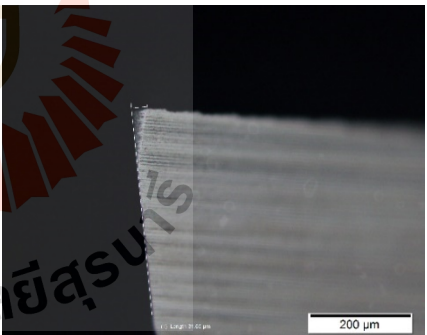
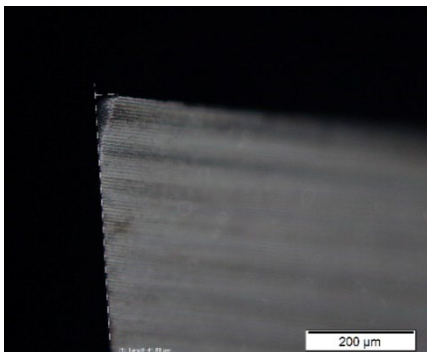
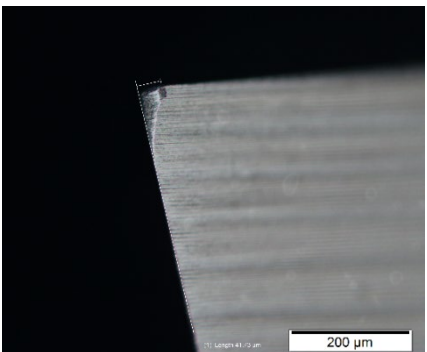
ตารางที่ ก.1 ผลการวัดขนาดการสีกหรอบบนผิวหลบของการทดลองที่ 1-31 ที่จำนวนการตัดเนือน
20 รอบ (1 รอบ : 3,360 ตร.มม.) (ต่อ)

การทดลองที่	ขนาดการสีกหรอบบนผิวหลบ (VB: ไมโครเมตร)		
	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2	ค่าเฉลี่ย
26	39.12	41.56	40.340
27	38.98	38.04	38.510
28	38.63	38.45	38.540
29	39.92	37.53	38.725
30	38.09	40.01	39.050
31	40.44	40.42	40.430

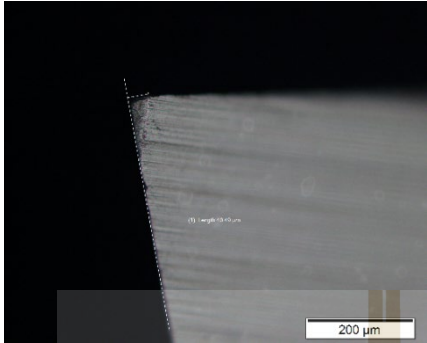
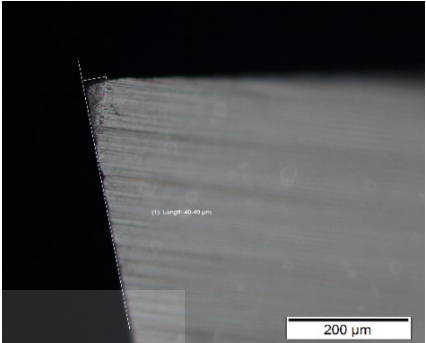
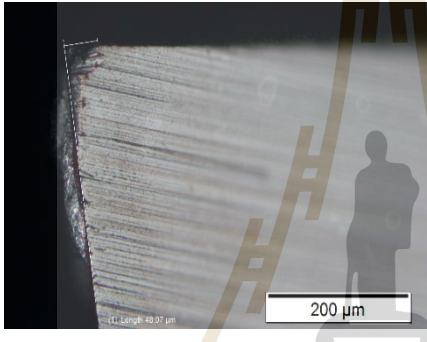
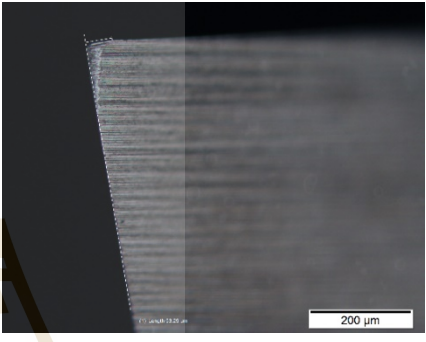
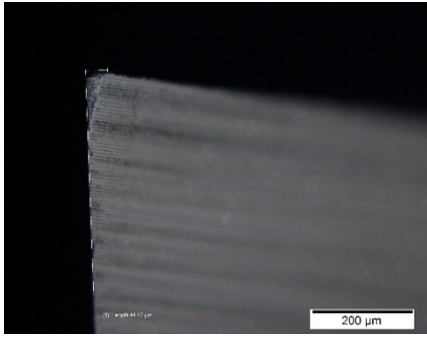
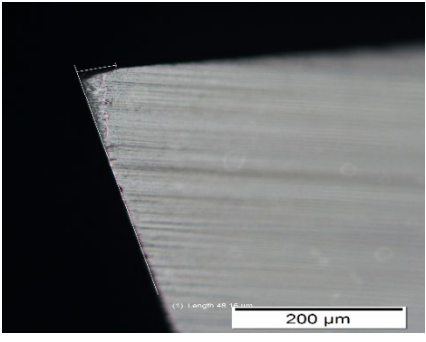
ตารางที่ ก.2 ผลการวัดขนาดการสีกหรอบบนผิวหลบของการทดลองขึ้นย่นผลที่ 1-4
ที่จำนวนการตัดเนือน 20 รอบ (1 รอบ : 3,360 ตร.มม.)

การทดลองที่	ขนาดการสีกหรอบบนผิวหลบ (VB : ไมโครเมตร)		
	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	44.53	43.55	44.04
2	57.13	60.07	58.60
3	46.94	48.34	47.64
4	38.41	37.46	37.94

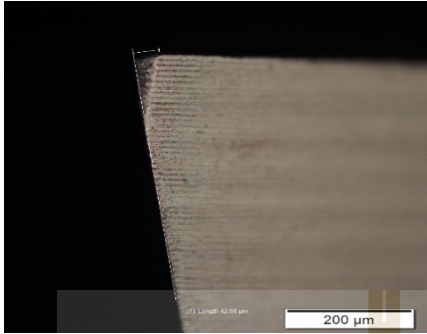
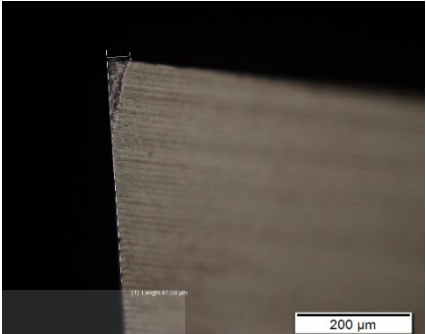
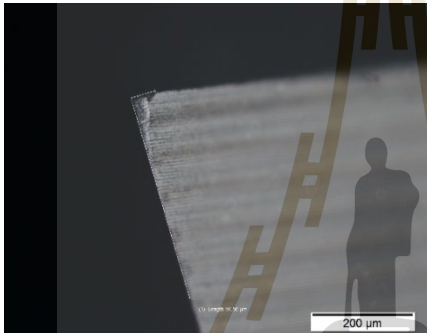
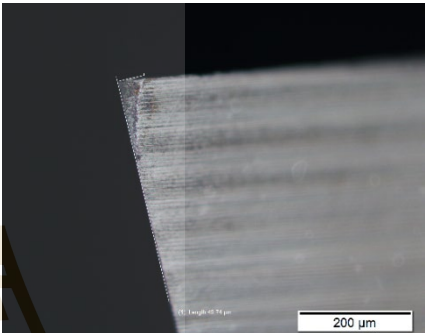
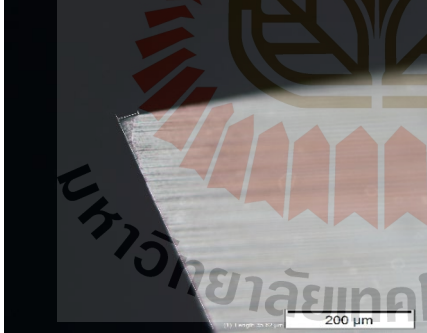
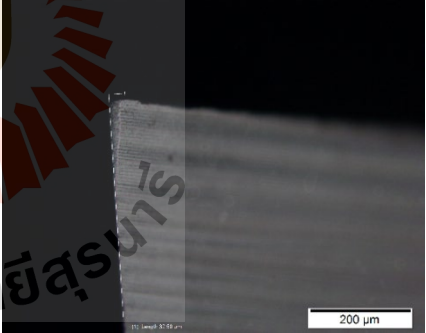
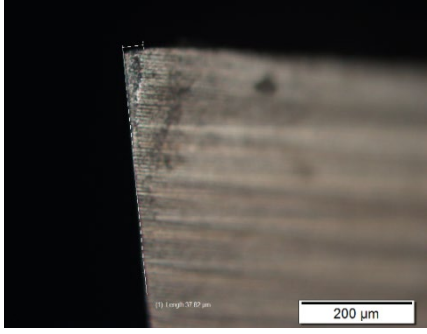
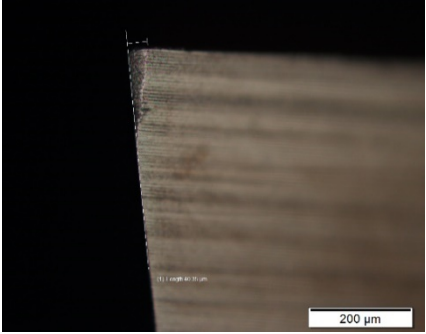
ตารางที่ ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
1		
2		
3		
4		

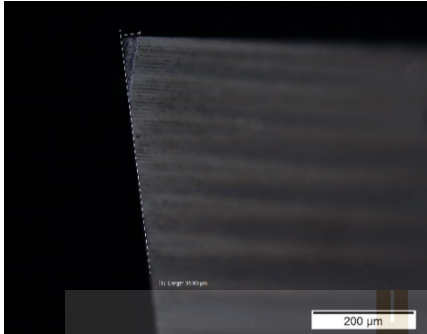
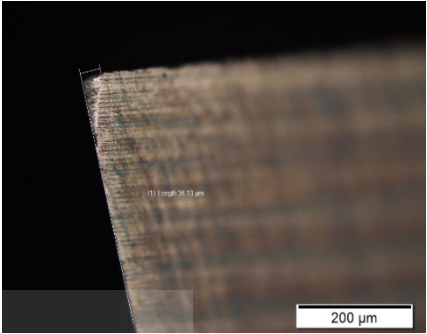
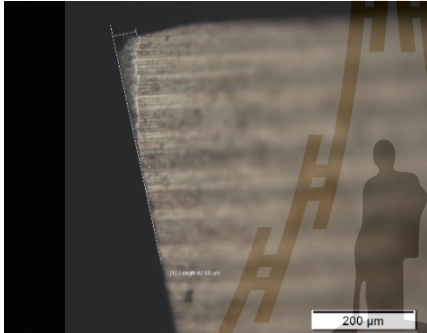
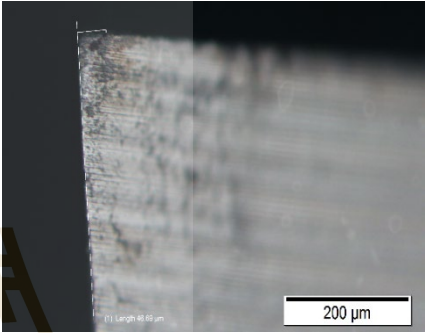
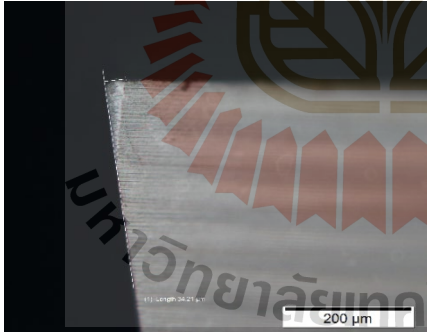
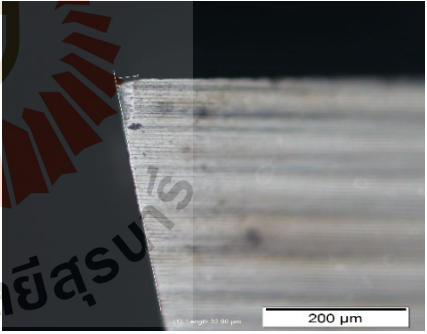
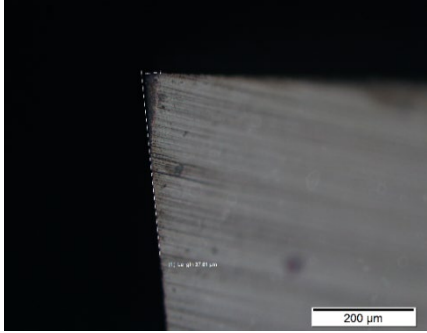
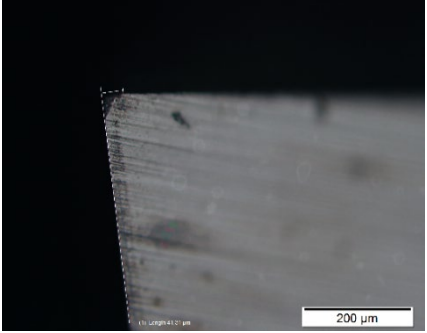
ตารางที่ ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31 (ต่อ)

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
5		
6		
7		
8		

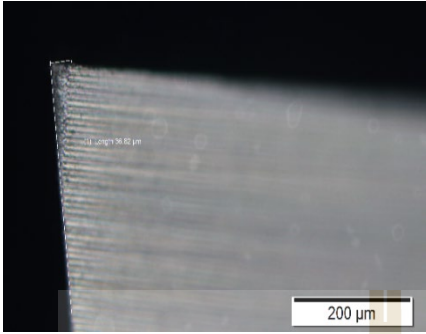
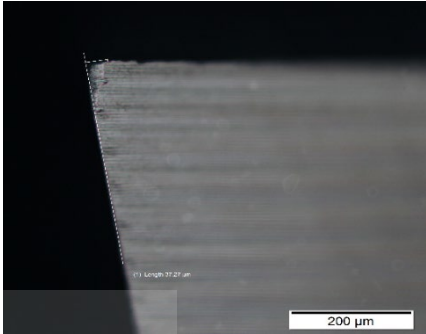
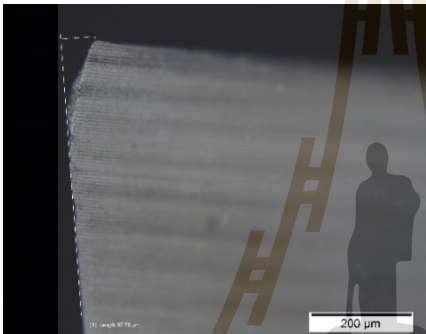
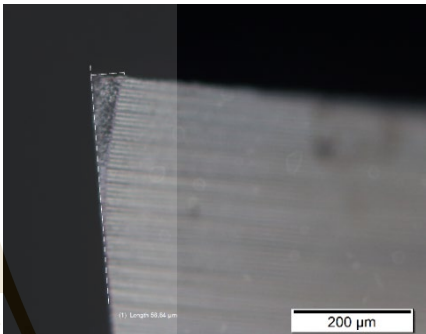
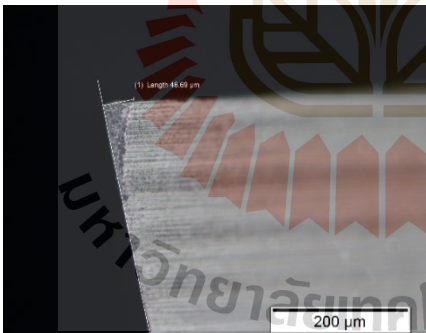
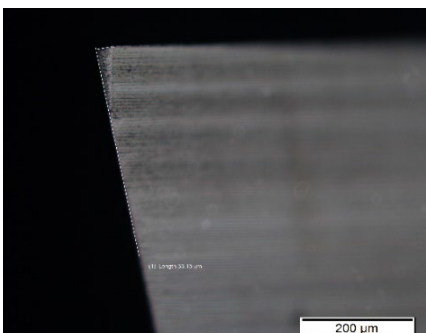
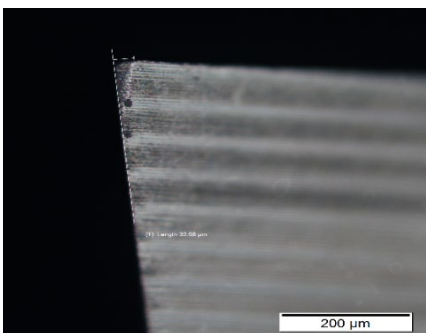
ตารางที่ ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31 (ต่อ)

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
9		
10		
11		
12		

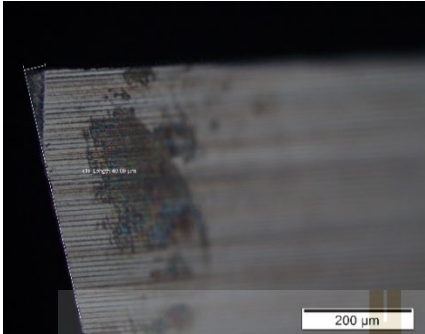
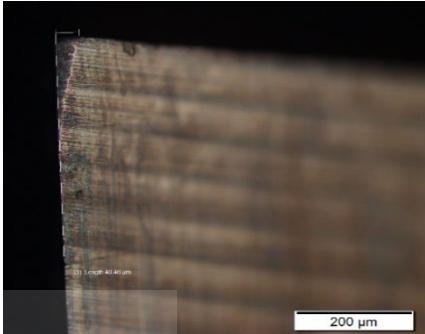
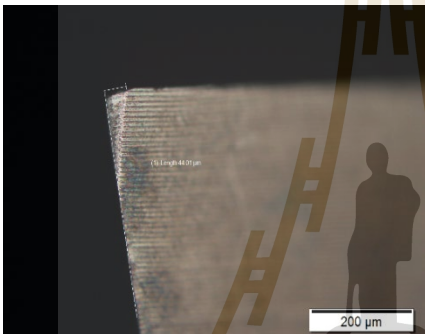
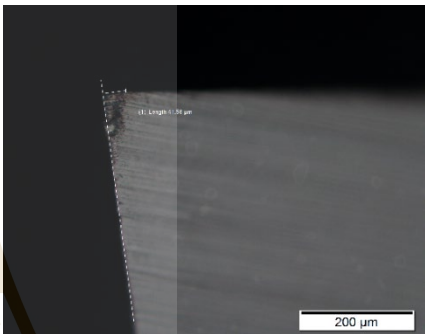
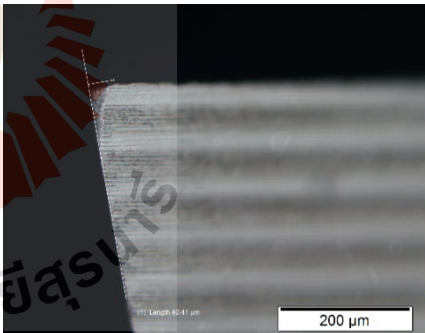
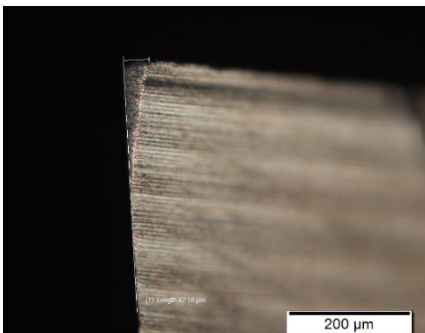
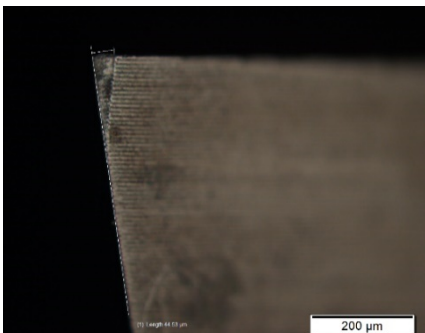
ตารางที่ ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31 (ต่อ)

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
13		
14		
15		
16		

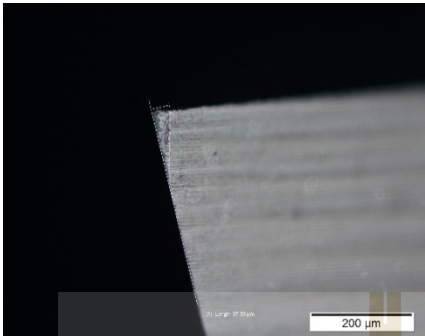
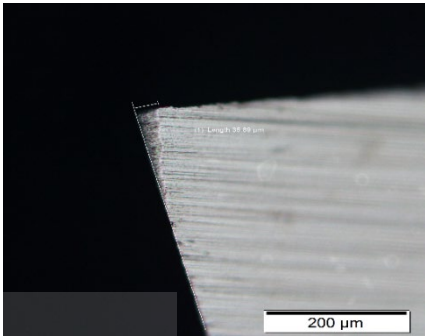
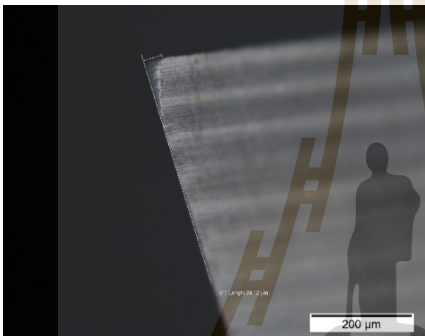
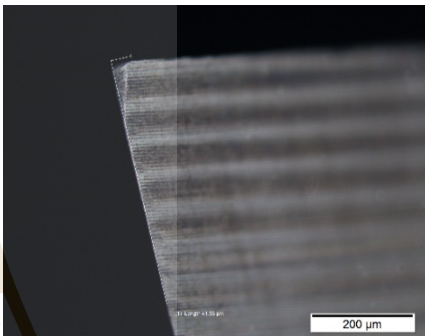
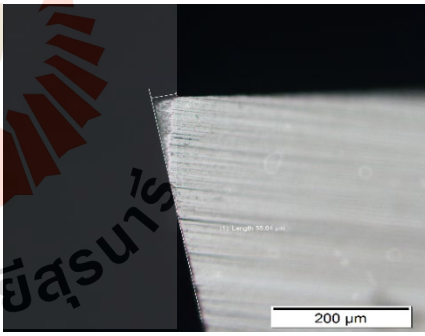
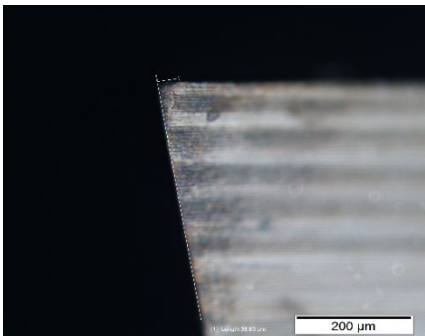
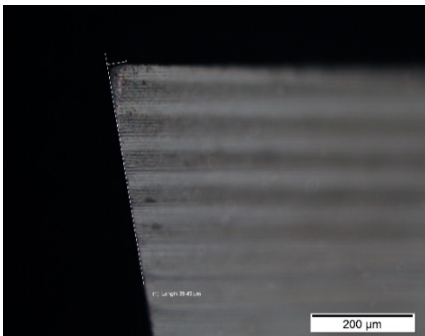
ตารางที่ ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31 (ต่อ)

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
17		
18		
19		
20		

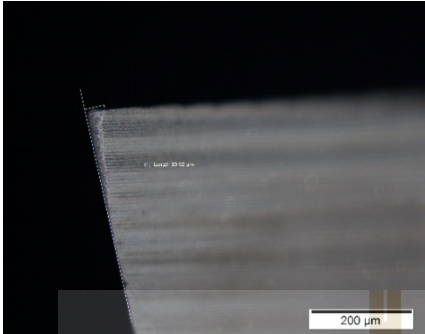
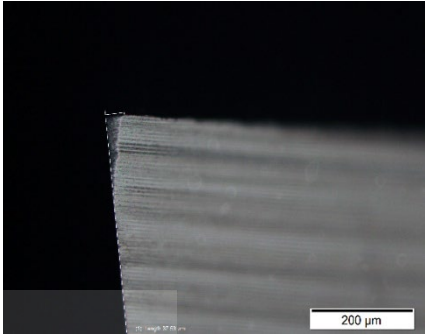
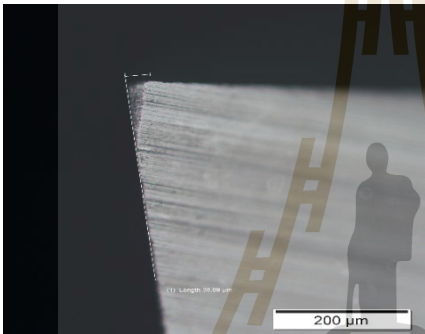
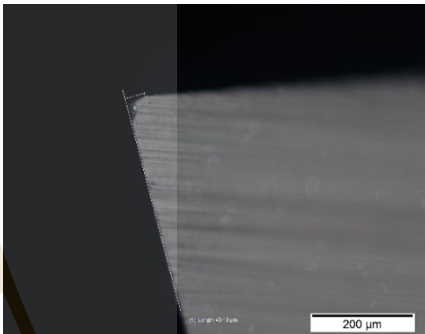
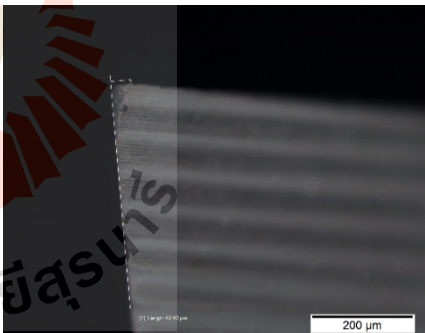
ตารางที่ ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31 (ต่อ)

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
21		
22		
23		
24		

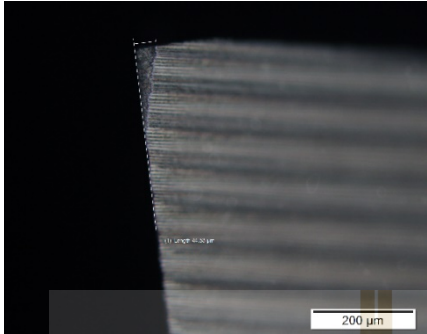
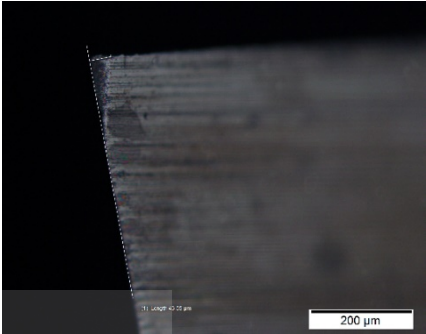
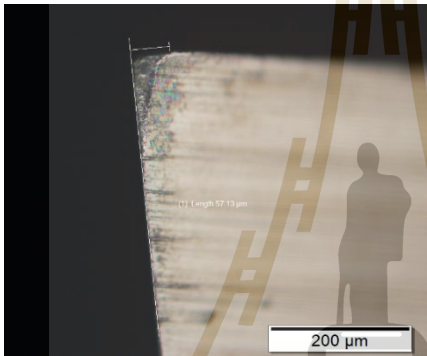
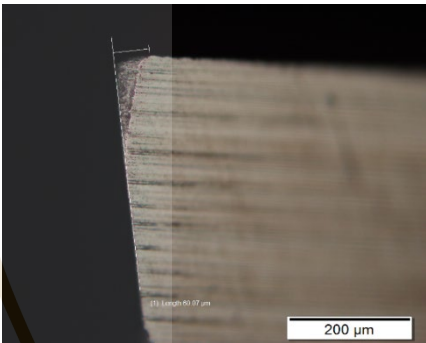
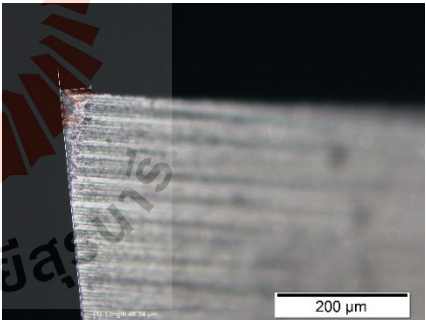
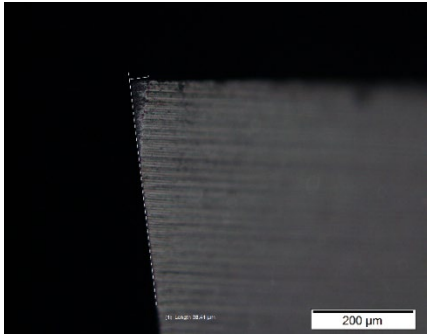
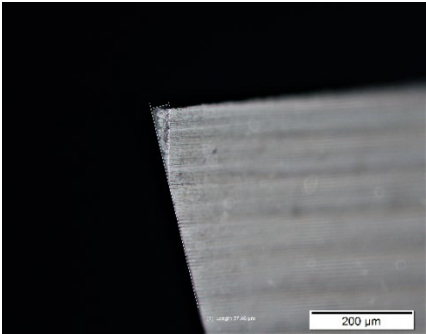
ตารางที่ ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31 (ต่อ)

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
25		
26		
27		
28		

ตารางที่ ก.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-31 (ต่อ)

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
29		
30		
31		

ตารางที่ ก.4 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองขึ้นชั้นผลที่ 1-4

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2
ขึ้นชั้นผล 1		
ขึ้นชั้นผล 2		
ขึ้นชั้นผล 3		
ขึ้นชั้นผล 4		



ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของ
อตุมนิยมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

SPECTRO

1/6/2559 14:12:10

Method: Al-20
Comment: Al/Si-alloys

Element concentration

1/6/2559 14:11:47

Sample Name: 0:
A356-T6

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	7.29	0.113	0.0201	0.0046	0.216	0.00030	0.0054	0.0099
2	7.14	0.108	0.0196	0.0046	0.215	0.00030	0.0053	0.0083
3	7.11	0.102	0.0195	0.0043	0.215	0.00040	0.0053	0.0083
< x > (3)	7.18	0.108	0.0197	0.0045	0.215	0.00033	0.0053	0.0089
sd	0.0983	0.0057	0.00032	0.00019	0.00051	0.00006	0.00010	0.00092
rsd	1.4	5.3	1.6	4.3	0.2	17.0	1.9	10.4

	Ti	Be	Bi	Ca	Co	Ga	Na	P
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.119	< 0.00001	< 0.00010	0.0021	0.0013	0.0097	0.0090	< 0.00020
2	0.111	< 0.00001	< 0.00010	0.00042	0.0013	0.0098	0.0043	< 0.00020
3	0.105	< 0.00001	< 0.00010	0.00014	0.0013	0.0099	0.0054	< 0.00020
< x > (3)	0.112	< 0.00001	< 0.00010	0.00087	0.0013	0.0098	0.0062	< 0.00020
sd	0.0068	0.00000	0.00000	0.0010	0.00001	0.00014	0.0024	0.00000
rsd	6.1	0.0	0.0	118.1	0.8	1.5	39.1	0.0

	Pb	Sn	Sr	V	Zr	Al		
	%	%	%	%	%	%		
1	0.0148	< 0.00020	0.00001	0.0131	0.0040	92.2		
2	0.0121	< 0.00020	< 0.00001	0.0125	0.0032	92.3		
3	0.0098	< 0.00020	< 0.00001	0.0122	0.0031	92.4		
< x > (3)	0.0122	< 0.00020	0.00001	0.0126	0.0035	92.3		
sd	0.0025	0.00000	0.00000	0.00047	0.00048	0.118		
rsd	20.6	0.0	1.1	3.7	13.9	0.1		

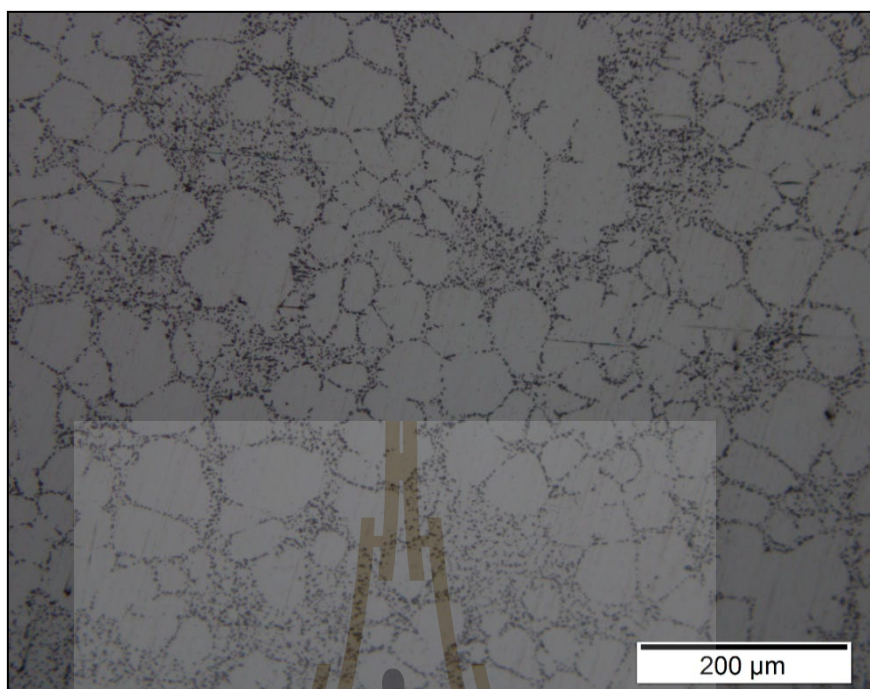
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



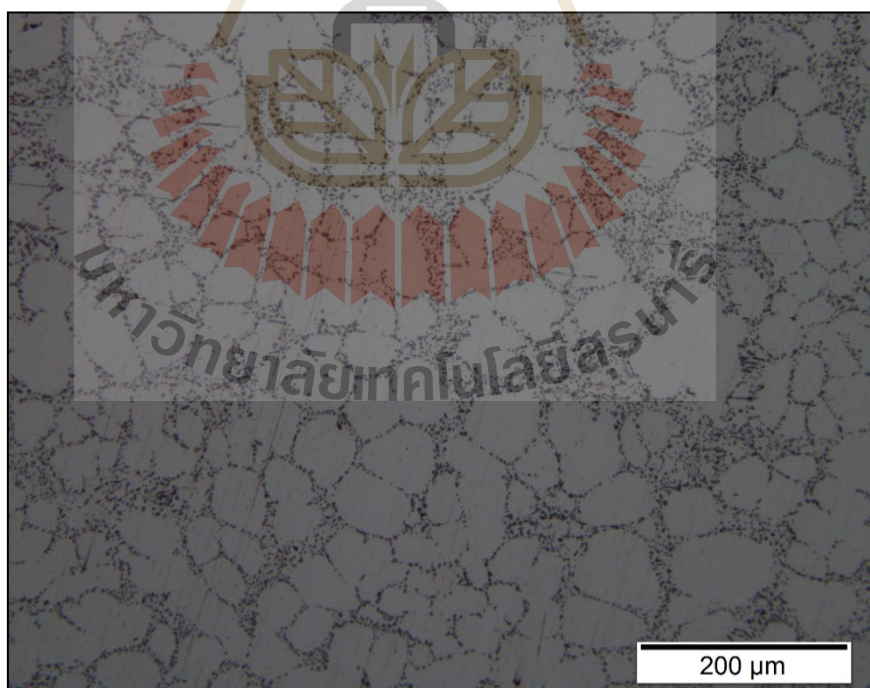
ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างจุดภาคของ
อตุมนิยมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

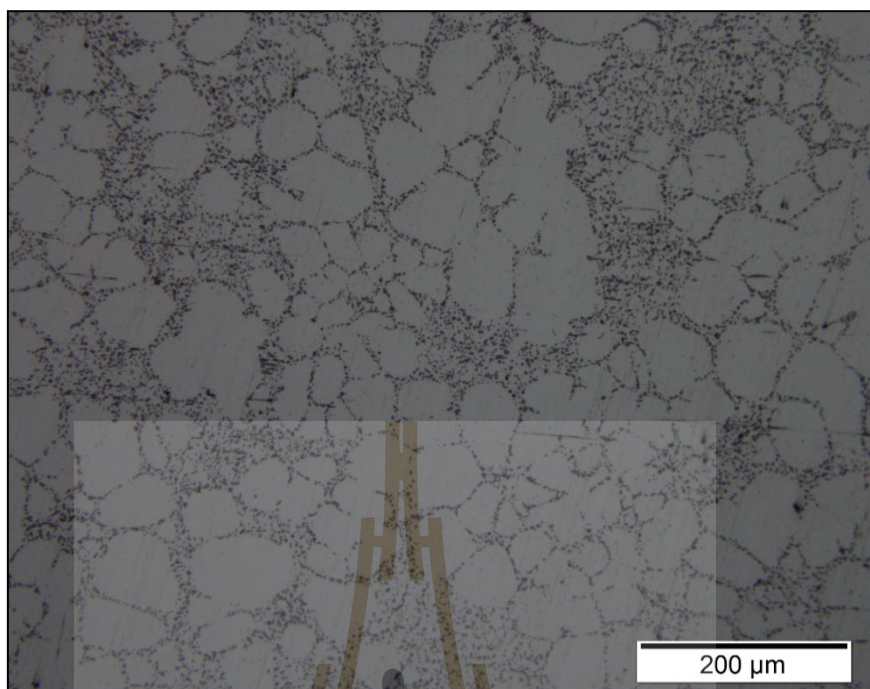
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



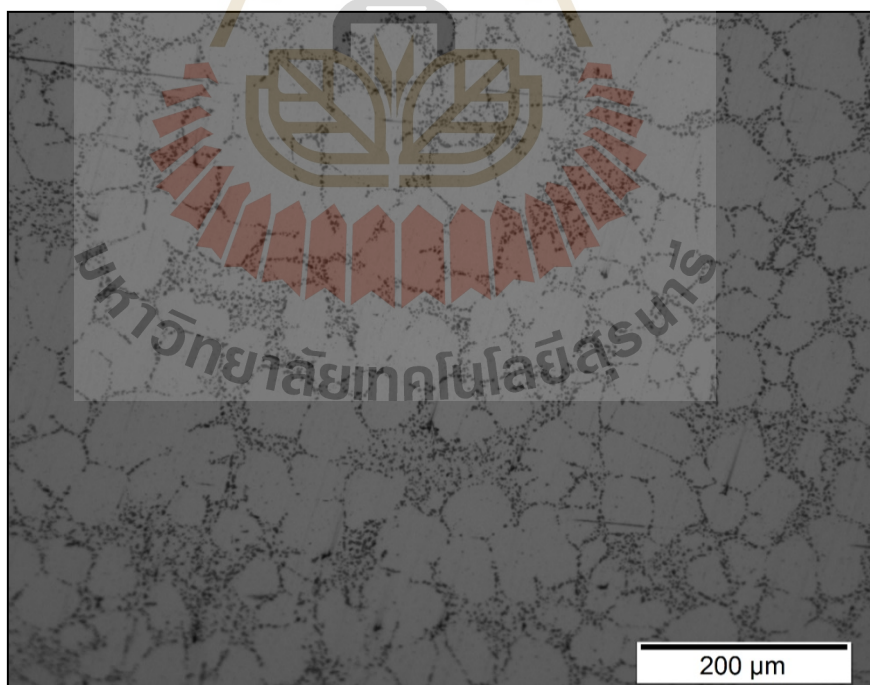
รูปที่ ค.1 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356



รูปที่ ค.2 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356



รูปที่ ค.3 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356



รูปที่ ค.4 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

อุกฤษณ์ ชนทรัพย์ทวี, อังศุมารินทร์ ประภาสพงษ์, สมเดช อิงคะวะระ และสมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์. (2562). ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอที่มุมหลบในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว ปีที่ 35 ฉบับที่ 1 (มิถุนายน พ.ศ. 2562)

Thanasuptawee, U., Thakhamwang, C., Siwadamrongpong, S. (2018). **Evaluation of Face Milling Operation Parameters on Surface Roughness of Crankcase Housing by Two Level Factorial Design with Center Points.** Key Engineering Materials. Vol.780, 105-110.

Thanasuptawee, U., Numfu, M., Wongpoo, K. and Siwadamrongpong, S. (2017). **The Influence of Machining Parameters on Surface Roughness in Face Milling of ADC12 Aluminum Alloy.** The 11th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 13-14 March 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam.

Prapaspong, A., Thanasuptawee, U., Aengchuan, P., and Siwadamrongpong, S. (2017). **The study of machining parameters on surface roughness in the end- milling process of aluminum semi-solid A356.** The 11th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 13-14 March 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam.

Thaprap, T., Ingkawara, S., Thanasuptawee, U. and Siwadamrongpong, S. (2017). **A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE RISE ON MILLING OPERATION.** The 11th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 13-14 March 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam.



วารสารวิทยาศาสตร์ มศว

SRINAKHARINWIROT SCIENCE JOURNAL

โทร. 02 649 5000 ต่อ 18427 โทรสาร. 02 660 0128 E-mail : scjournal@sg.swu.ac.th

๒๒ กุมภาพันธ์ 2562

เรื่อง ตอบรับการตีพิมพ์บทความ

เรียน อาจารย์ อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มศว ขอตอบรับการตีพิมพ์บทความ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เรื่อง : ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาดน้ำและการสึกหรอที่มุมหลบในกระบวนการกัดด้วยคลื่นเสียง
หล่อแบบทั้งของแข็ง A356-T6

ชื่อผู้พิมพ์ : คุณอภัยคุณกรินทร์ ประภาสพงษ์, อาจารย์สมเดช อิงควาระ และ
อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์

โดยบทความของท่าน จะได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ มศว ปีที่ 35 ฉบับที่ 1
(มิถุนายน พ.ศ. 2562)

ในการนี้กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มศว ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง ที่ท่านให้ความสนใจและสนับสนุนวารสารฯ และหวังว่าคงได้รับการสนับสนุนจากท่านอีกในโอกาสต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิญญา ชัยวิสุทธิทางกูร)

บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มศว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Evaluation of Face Milling Operation Parameters on Surface Roughness of Crankcase Housing by Two Level Factorial Design with Center Points

Ukrit Thanasuptawee^{1,2,a}, Chamrat Thakhamwang^{2,b}
 and Somsak Siwadamrongpong^{1,c}

¹School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak 63000, Thailand

^aukrit.thanasuptawee@gmail.com, ^bchamrat_j@hotmail.com, ^csomsaksi@sut.ac.th

Keywords: Full factorial design, Face milling process, Surface roughness, Semi-solid aluminum, ADC12.

Abstract. In this study, there are three machining parameters consist of spindle speed, feed rate and depth of cut which were conducted through full factorial with four center points to determine the effect of machining parameters on the surface roughness and verify whether there is curvature in the model for CNC face milling process in an automotive components manufacturer in Thailand. The workpieces used semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing which they were performed by the ARES SEIKI model R5630 3-axis CNC vertical machining center and face milling cutter with diameter of 63 millimeters. The surface roughness of face-milled was measured by the surface roughness tester. It was found that the greatest main effect influence to surface roughness was spindle speed, followed by feed rate and depth of cut at significance level of 0.05.

Introduction

ADC12 Aluminum alloy is one of the most widely applied aluminum alloy in die casting process in order to produce the electronic parts, aerospace parts and particularly the automotive parts such as cylinder blocks, transmission cases, crankcase housing and converter housing manufacturing because this material has good casting ability and high mechanical property [1] for instance high strength, hot cracking resistance, wear resistance, corrosion resistance, formability and light weight.

Semi-solid metal forming has been known in many decades. Several semi-solid forming techniques are widely used in the casting industry for example, the NRC, SSR, RDC, H-NCM, CRP, SEED and SLC [2]. In a few last years, one of the rheocasting technique that focus on slurry casting is the gas induce semi-solid (GISS) that was developed by GISSO Company Limited in Thailand. This process has many advantages for die casting process such as reducing the gas porosity and shrinkage porosity in work piece, improving mechanical properties. Specially, this process can reduce the production cost such as cycle time, die life extension and melting energy saving [3]. Nowadays, many automotive parts manufacturers in Thailand and some of foreign manufacturers bring this technology to their productions.

Face milling process is very important method for automotive part industries to take away material from the workpiece with high level of accuracy in terms of the shape and dimension as well as high quality of surface finish. The surface roughness is one of indexes of product quality because it has influence on the mechanical properties for instance fatigue behavior, corrosion resistance, creeps life, etc. Sometimes, various catastrophic failures causing the surface finish [4].

Many researchers have studied the effect of cutting parameter on surface roughness in face milling operation by the design of experiments method. Used the factorial experimental design to investigate the main effect of surface roughness in face milling process and found that the factors have effect on surface roughness were feed rate and spindle speed while the depth of cut did not affect surface roughness for semi-solid 2024, 6061, 7075 aluminum alloys [5] - [7]. The central composite design was used for predicting the surface roughness in face milling process of

aluminum alloy 6061. According to result, it claimed that the surface roughness was increased when feed rate increased. In contrast, the surface roughness was decreased when spindle speed increased while the depth of cut did not have the effect on the surface roughness [8]. Taguchi method was adopted to examine the influence of machining parameters and ANN approach was used for predicting the surface roughness in face milling for Al 6061 material [9].

Studies have reported the conclusion of surface roughness of many grades of aluminum alloy for a number of machining processes, but no researcher had studied on the surface roughness in semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy for CNC face milling process. Therefore, the present research focuses on the influence of machining parameter include spindle speed, feed rate and depth of cut on surface roughness in CNC face milling process for semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing.

The GISS die Casting Process

The workpieces in this study were semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housings which were produced by gas induce semi solid die casting process. The liquidus of this material is 582 °c and the eutectic temperature of this material is 572 °c. In this experiment, the ADC aluminum alloy ingots were melted in the graphite crucible at 750 °c. Then, the melted alloy was taken out from the crucible using ladle cup. After that when the melted temperature dropped to 620 °c., the nitrogen gas was injected to the ladle by graphite diffuser with 7 second to stir molten alloys while solidification. The schematic diagram of the GISS is depicted in Fig. 1. Next, the slurry from GISS process was poured to the short sleeve of a die casting machine in order to form the workpieces in this experiment by using pressure of 85 MPa which was controlled by die casting machine. The schematic diagram of GISS die casting process is illustrated in Fig. 2. The Microstructure of semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing is shown in Fig 3. From the illustration we can find that the microstructure of the semi-solid die casted ADC12 aluminum alloys have globular grains and has non-dendritic morphology in the solid phase.



Fig. 1. Schematic diagram of GISS process [10]

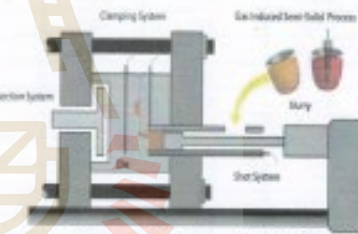


Fig. 2. Schematic diagram of GISS casting process [10]

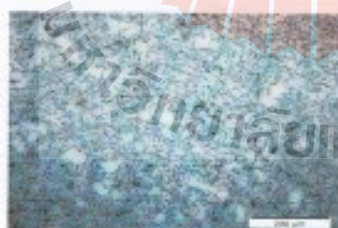


Fig. 3. Microstructure of semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy



Fig. 4. The simulation of experimental setup

Equipment and Experiment Setup

The experiment was carried out on the ARES SEIKI 3-axis CNC vertical machining center model R5630 based on full factorial design 2 levels with 4 center points. Two level factorial experimental design is very useful to filter out the factor which do not have effect on the result. Furthermore, in this experiment we added center points to test for curvature. There are three cutting parameters compose of spindle speed, feed rate, and depth of cut which their levels are shown in Table 1. In this experiment the levels of cutting parameters were recommended from the technical guide book of a tool manufacturer. According to the 2^3 full factorial design with 2 replications ($2^3 \times 2 = 16$) and 4 center points. Thus, total of cutting tests including 20 runs that were carried out as per design matrix. The semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housings in an automotive manufacturer were produced by Kennametal carbide inserts model EDCT140416PDFRLDJ fitted together with Kennametal face mill model K63A06RS90ED14D with 63 millimeters diameter under wet cutting condition which the simulation of experimental set up is shown as Fig.4. The surface roughnesses of face-milled were measured three times by the Hommel surface roughness tester model T8000. Then, their calculated averages have been recorded as Table 2.

Table 1. The cutting parameters and their levels

Cutting parameter	Low	center	High	Unit
1. Spindle speed (A)	2600	3000	3400	rpm
2. Feed rate (B)	1000	1250	1500	mm/min
3. Depth of cut (C)	0.4	0.6	0.8	mm

Table 2. The design matrix and results of experiment

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Spindle speed	Feed rate	Depth of cut	Ra (µm)
1	3	1	1	2600	1000	0.4	0.306
2	12	1	1	3400	1000	0.4	0.263
3	9	1	1	2600	1500	0.4	0.378
4	7	1	1	3400	1500	0.4	0.309
5	16	1	1	2600	1000	0.8	0.315
6	6	1	1	3400	1000	0.8	0.258
7	4	1	1	2600	1500	0.8	0.353
8	11	1	1	3400	1500	0.8	0.293
9	14	1	1	2600	1000	0.4	0.310
10	2	1	1	3400	1000	0.4	0.263
11	17	1	1	2600	1500	0.4	0.374
12	10	1	1	3400	1500	0.4	0.299
13	15	1	1	2600	1000	0.8	0.316
14	20	1	1	3400	1000	0.8	0.250
15	8	1	1	2600	1500	0.8	0.367
16	18	1	1	3400	1500	0.8	0.283
17	19	0	1	3000	1250	0.6	0.242
18	1	0	1	3000	1250	0.6	0.258
19	13	0	1	3000	1250	0.6	0.263
20	5	0	1	3000	1250	0.6	0.256

Results and Discussion

According to the results in table 2, we obtained the analysis of variance of surface roughness as shown in table 3. The analysis was performed at significance level of 0.05. Thus, it means factor will be main effect or interaction effect on surface roughness when their term has p-value less than 0.05. The ANOVA indicated that the main effects were spindle speed, feed rate and depth of cut. In addition, the ANOVA pointed out the interaction effect on the surface roughness were between spindle speed and feed rate as well as feed rate and depth of cut. Furthermore, ANOVA indicated the presence of curvature in the system with p-value of curvature term less than 0.05 and it was shown the excellent relation between significant parameters and surface roughness. These could be implied from the decision coefficient (R^2) of 98.60 % and the adjusted R^2 of 97.58 %.

Table 3. Analysis of variance of surface roughness value

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0.034757	0.004345	96.72	0.000
Linear	3	0.024839	0.00828	184.32	0.000
Spindle speed	1	0.015708	0.015708	349.7	0.000
Feed rate	1	0.008836	0.008836	196.71	0.000
Depth of cut	1	0.000295	0.000295	6.56	0.026
2-Way Interactions	3	0.000663	0.000221	4.92	0.021
Spindle speed*Feed rate	1	0.000361	0.000361	8.04	0.016
Spindle speed*Depth of cut	1	0.000072	0.000072	1.61	0.231
Feed rate*Depth of cut	1	0.00023	0.00023	5.12	0.045
3-Way Interactions	1	0.000067	0.000067	1.48	0.249
Spindle speed*Feed rate*Depth of cut	1	0.000067	0.000067	1.48	0.249
Curvature	1	0.009188	0.009188	204.54	0.000

Fig. 5 gives the pareto chart for significant main and interaction effect on surface roughness which it depicts the spindle speed was the most significant effect on surface roughness, followed by feed rate and depth of cut respectively.

Fig. 6 depicts the cube plot for surface roughness. It shows the average of surface roughness in each condition and it claims that this experiment can obtain the minimum surface roughness at with 3,400 rpm of spindle speed, 1,000 millimeters per minute of feed rate, 0.8 mm of depth of cut.

Fig. 7 shows the main effect plot of surface roughness. It also shows the spindle speed was the highest significant effect with a negative relation to surface roughness. The high spindle speed leads to low surface roughness as reported by some researchers [5]-[8]. The surface roughness was decreased when spindle speed increased from 2,600 to 3,400 rpm. In contrast, feed rate had positive relation to surface roughness. The low feed rate leads to low surface roughness as reported by some researchers [5]-[8]. The surface roughness was increased when feed rate increased from 1,000 to 1,500 millimeters per minute. While, depth of cut was the fewest significant effect with a negative relation to surface roughness. The high depth of cut leads to low surface roughness. The surface roughness was decreased when depth of cut increased from 0.4 to 0.8 millimeters. According to the Fig. 4 and Fig. 5, the depth of cut was almost non-significant effect on surface roughness like some researchers reported before that the depth of cut was non-significant influence on surface roughness [5]-[8], [11].

Fig. 8 shows the interaction effects plot of surface roughness. According to the figure, while we used the spindle speed at 2,600 and 3,400 rpm, the surface roughness value was raised when feed rate increased from 1,000 to 1,500 millimeters per minute. Whereas, we used the spindle speed at 2,600 and 3,400 rpm, the surface roughness was dropped when depth of cut raised from 0.4 to 0.8 millimeters. And while, we used the feed rate at 1,000 to 1,500 millimeters per minute, the surface roughness was increased when depth of cut heightened from 0.4 to 0.8 millimeters.

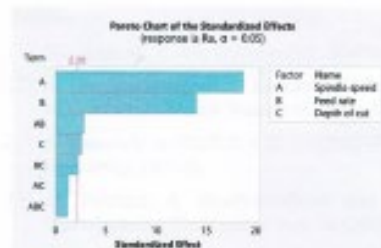


Fig. 5. Pareto chart for significant main and interaction effect on surface roughness

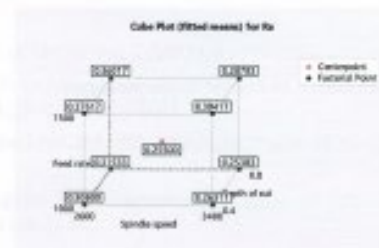


Fig. 6. Cube plot for surface roughness

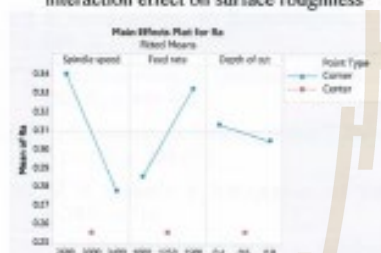


Fig. 7. Main effects plot for surface roughness

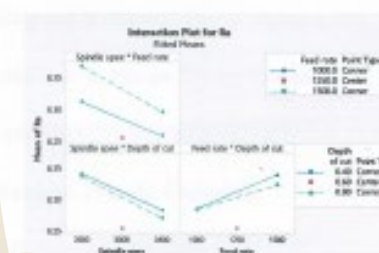


Fig. 8. Interaction effects plot for surface roughness

Conclusion

This research was carried out to study the influence of machining parameters on surface roughness of the semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing using full factorial experimental design with 4 center points. Three parameters consist of spindle speed, feed rate and depth of cut were studied in this study. The results of the analysis are as follows:

1) Spindle speed was a greatest significant effect on the surface roughness. The increasing of the spindle speed and depth of cut affected surface roughness declined. On the other hand, the increasing of the feed rate affected surface roughness increased.

2) The interaction effects of the machining parameters on the surface roughness were between spindle speed and feed rate as well as feed rate and depth of cut.

3) The minimum of surface roughness value was obtained with 3,400 rpm of spindle speed, 1,000 millimeters per minute of feed rate, 0.8 mm of depth of cut.

4) ANOVA demonstrated that curvature to be significant, this indicated the being of curvature in the model. It meant non-linear regression model is more appropriate than linear regression model. Accordingly, next study we will add axial points and center points to our experiment base on central composite design for developing non-linear modelling to predict the minimum of surface roughness.

References

- [1] M. Okayasu, Y. Miyatomo and K. Morinaka: J. of Metals Vol. 5 (2015), p.1440-1453.
- [2] S. Thanabumrungskul, S. Janudom, R. Burapa, P. Dulyapraphant and J. Wannasin: Transactions of Nonferrous Metals Society of China Vol. 20 (2010), p. 1016-1021.
- [3] J. Wannasin in *SEMI-SOLID SLURRY FORMING OF ALLOYS*, 1st Edition, Prince of Songkla University, (2012).
- [4] B. Routara, A. Bandyopadhyay and P. Sahoo: The International Journal of Advance Manufacturing Technology Vol. 40 (2009), p. 1166-1180.
- [5] S. Rawangwong, J. Chatthong, W. Boonchouytan and R. Burapa: Advanced Materials Research. Vol. 747 (2013), p.777-780.
- [6] S. Rawangwong, W. Boonchouytan, J. Chatthong and R. Burapa: Energy Procedia Vol. 34, (2013), p. 854-862.
- [7] S. Rawangwong, J. Chatthong, W. Boonchouytan and R. Burapa: Energy Procedia Vol. 56, (2014), p. 448-457.
- [8] K. Simunovic, G. Simunovic and T. Saric: MEASUREMENT SCIENCE REVIEW Vol. 13 No. 5 (2013), p. 265-272.
- [9] M. S. Sukumar, P. VenkataRamaiah and A.Nagarjuna: Procedia Engineering Vol. 97 (2014), p. 365 – 371d
- [10] Information on <http://rdo.psu.ac.th/en/news/2014Features-21.php>, 2014
- [11] U. Thanasuptawee, S.Siwadamrongpong, M. Numfu, K. Wongpu: 11th SEATUC Symposium (2017).



The Influence of Machining Parameters on Surface Roughness in Face Milling of ADC12 Aluminum Alloy.

Ukrit Thanasuptawee⁽¹⁾, Somsak Siwadamrongpong⁽¹⁾, Manoch Numfu⁽²⁾
Kraisorn Wongpoo⁽²⁾

⁽¹⁾School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

⁽²⁾School of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Thailand

Email: somsaksi@sut.ac.th Tel: 0-4422-4236, Fax: 0-4422-4566

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the influence of machining parameters consist of three parameters (1) cutting speed, (2) feed rate (3) axial depth of cut on the surface roughness in CNC face milling process of semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing. The settings of machining parameters in this experiment were conducted through the full factorial experimental design. In this experiment we use the ARES SEIKI model R5630 3-axis CNC vertical machining center with carbide milling cutter of diameter 80 millimeter to produce the crankcase housing in an automotive production under wet cutting condition. The surface roughness of face-milled was measured by the Hommel surface roughness tester model T8000. Finally, the direct and interaction effects on the surface roughness are plotted with aids to study the significance parameters with a significance level of 0.05.

KEYWORDS: full factorial experimental design, Surface roughness, semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing

1. INTRODUCTION

Presently, aluminum alloys are very important engineering material. They have been commonly used to produce work pieces in many industries because of their excellent mechanical properties. One of a kind grade is widely used in die casting process in order to produce the automotive parts, the electronic parts and aerospace parts such as cylinder blocks, transmission cases, crankcase housing and converter housing manufacturing is ADC12

Aluminum alloy because this material has good casting ability and high mechanical property (Okayasu 2015) for instance, high strength, hot cracking resistance, wear resistance, corrosion resistance, formability and light weight.

Semi-solid metal forming has been known in many decades. This process has many advantages for die casting including reduction of the gas porosity and shrinkage porosity in work piece, improving mechanical properties and particularly, this process can decrease the production cost such as cycle time, die life extension and melting energy saving (Wannasin, 2012). Several semi-solid forming techniques are widely used in the casting industry for example, the NRC, SSR, RDC, H-NCM, CRP, SEED and SLC (Thunabumrungkul, 2010). In a few last years, one of the rheocasting technique that focus on slurry casting is the Gas induce semi-solid (GISS). It was developed by GISSO Company Limited in Thailand. Nowadays, many automotive parts die casters in Thailand and some of foreign manufacturers bring this technology to their production. In this process, the semi-solid slurry is produced by injecting very fine inert gas bubble through a graphite diffuser to agitate molten alloys while solidification.

The surface roughness is very considerable factor to indicate the product quality, due to it has influence on the mechanical properties, for instance, fatigue behavior, corrosion resistance, creeps life, etc. Sometimes various catastrophic failures causing the surface finish (Routara, 2009).

Several researchers have studied the effect of cutting parameter on surface roughness in face milling process using the design of experiments method.

Surasit, et al. (2013) investigated the effect of main factors of surface roughness in semi-solid 6061 aluminum face milling using factorial designs. The controlled factors were the speed, the feed rate and depth of cut. They pointed out that the factors have effect on surface roughness were the feed rate and the speed while the depth of cut did not affect to the surface roughness. Furthermore, the surface roughness was reduced when the speed was 4,200 rpm and the feed rate was 1,300 mm/min.

Surasit, et al. (2013) investigated the effect of main factors of surface roughness in semi-solid 2024 aluminum face milling using factorial designs. The controlled factors including spindle speed, feed rate and depth of cut. They concluded that the factors have effect on surface roughness were feed rate and spindle speed while the depth of cut did not affect the surface roughness. Furthermore, the surface roughness was reduced when the speed was 3600 rpm and the feed rate was 1,000 mm/min.

Simunovic, et al. (2013) used the regression model for predicting the surface roughness. The machining parameters consist of spindle speed, feed rate and depth of cut. They claimed that the surface roughness was increased when feed rate increased. On the other hand, the surface roughness was decreased when spindle speed increased. And they found that the depth of cut did not have the effect on the result.

Surasit, et al. (2014) studied the effect of surface roughness in semi-solid AA 7075 face milling using factorial designs. They found that the factors have effect on surface roughness were feed rate and spindle speed while the depth of cut did not affect the surface roughness. Furthermore, the surface roughness was reduced when the speed was 3800 rpm and the feed rate was 1,000 mm/min.

Sukumar, et al. (2014) investigated and optimized of influential machining parameters in face milling process of Al 6061 material, the controllable parameters in this experiment consist of spindle speed, feed rate and depth of cut. They found that the optimal parameters were spindle speed at 1800 rpm and feed rate at 250 mm/rev and depth of cut at 0.2 mm.

Studies have reported the conclusion of surface roughness of many grades of aluminum alloy for a number of machining processes, but no researcher had studied on the surface roughness in semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy for CNC face milling process.

Accordingly, the present study focuses on the influence of machining parameter such as spindle speed, feed rate and depth of cut on surface roughness in semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy for CNC face milling process.

2. EXPERIMENT

2.1 The GISS die casting process

The workpiece in this study was semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing which produced from gas induce semi solid die casting process. The liquidus of this material is 582 °c and the eutectic temperature of this material is 572 °c.

In this experiment, the alloy ingots were melted in the graphite crucible at 750 °c. Then, the melted alloy was taken out from the crucible using ladle cup. After that when the melted temperature dropped to 620 °c., the nitrogen gas was injected to the ladle by graphite diffuser with 7 second for stir molten alloys while solidification. The schematic diagram of the GISS is depicted in Fig 1. Next, the slurry from GISS process was poured to the short sleeve of a die casting machine in order to form the workpieces in this experiment by using pressure of 85 MPa which was controlled by die casting machine. The schematic diagram of GISS die casting process is illustrated in Fig 2.

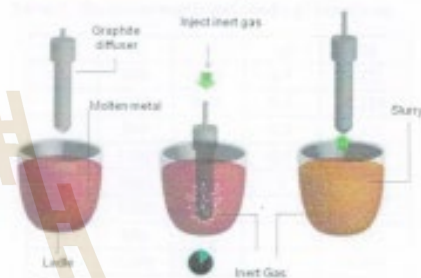


Fig 1 Schematic diagram of gas induced semi-solid (GISS) Process (Jessada, 2014)

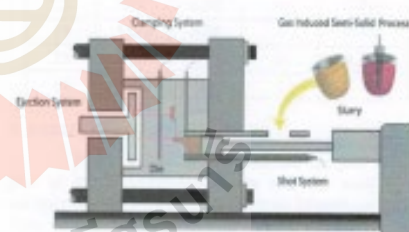


Fig 2 Schematic diagram of GISS die casting process. (Jessada, 2014)

The Microstructure of semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing was shown in Fig. 3. From the illustration we can find that the microstructure of the semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy has globular grains and has non-dendritic morphology in the solid phase.

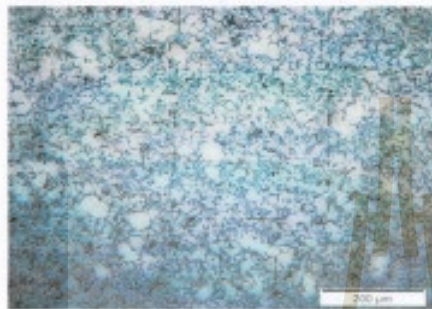


Fig. 3. Microstructure of semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy

2.2 EQUIPMENT AND EXPERIMENT SETUP

The experiment was conducted on the ARES SEIKI model R5630 3-axis CNC vertical machining center based on full factorial design. Three cutting parameters compose of cutting speed (V_c), feed per tooth (F) and depth of cut (A_p) were studied with 2 levels as shown in Table 1. According to, the 2^3 full factorial design with 2 replicates there are $(2^3) \times 2 = 16$ runs of cutting tests were carried out as per design matrix. The levels of cutting parameters were suggested from the technical guide book of a tool manufacturer.

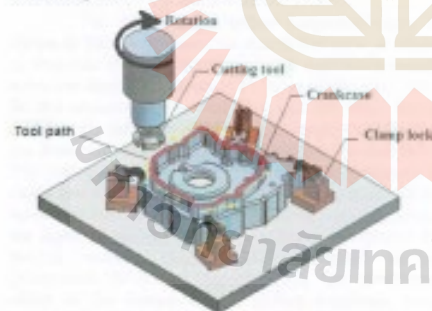


Fig. 4. The simulation of experimental setup

Table 1. The cutting parameters and their levels.

Cutting parameter	High	Low	Unit
1. Cutting speed (V_c)	900	1100	m/min
2. Feed per tooth (F_z)	0.06	0.1	mm/tooth
3. Depth of cut (A_p)	0.5	1	mm

The workpiece material used semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing in an automotive manufacturer was produced by Mitsubishi carbide inserts model SOGT 12 T 308PEFR -JP fitted together with face mill holder model ASX 400-080B06R with 80 millimeter diameter under wet cutting condition. The surface roughness of face-milled was measured by the Hommel surface roughness tester model T8000. Table 2. shows the design matrix and the results of this experiment.

Table 2. The design matrix and results of experiment

Run	V_c	F	A_p	R_a
1	900	0.06	0.5	0.371
2	1100	0.06	0.5	0.319
3	900	0.1	0.5	0.471
4	1100	0.1	0.5	0.467
5	900	0.06	1	0.438
6	1100	0.06	1	0.442
7	900	0.1	1	0.433
8	1100	0.1	1	0.492
9	900	0.06	0.5	0.39
10	1100	0.06	0.5	0.3
11	900	0.1	0.5	0.473
12	1100	0.1	0.5	0.515
13	900	0.06	1	0.411
14	1100	0.06	1	0.448
15	900	0.1	1	0.348
16	1100	0.1	1	0.439

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

From the results, we obtained the half normal plot of the standardized effects and the analysis of variance of surface roughness value by Minitab software. They were shown by Fig 5. and Table 3. respectively.

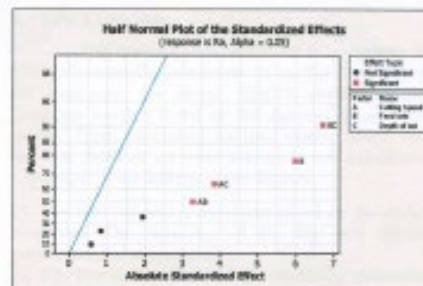


Fig. 5. Half normal plot.

Table 3 Analysis of variance of surface roughness value.

Analysis of Variance for Ra (coded units)							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj R ²	F	p	
Main Effects							
Vc	3	0.0070225	0.0070225	0.0077740	13.49	0.002	
F	1	0.0003063	0.0003063	0.0032863	0.72	0.412	
Ap	1	0.0017760	0.0017760	0.0019760	35.59	0.000	
le	1	0.0024612	0.0024612	0.0026402	5.05	0.000	
2-Way Interactions							
Vc*F	3	0.0026553	0.0026553	0.0028554	23.37	0.000	
Vc*Ap	1	0.0041240	0.0041240	0.0044240	20.80	0.001	
F*Ap	1	0.0012353	0.0012353	0.0013353	14.77	0.001	
3-Way Interactions							
Vc*F*Ap	1	0.0031220	0.0031220	0.0033220	45.24	0.000	
Total	8	0.0084400	0.0084400	0.0084400			
Residual Error	8	0.0034240	0.0034240	0.0034240			
Pure Error	8	0.0034240	0.0034240	0.0034240			
Total	16	0.0118640					

According to the Fig 5., the illustration shows the half normal plot. This graph indicates that the significant main effect is feed per tooth and the significant interaction effect are interaction of $V_c * F$, interaction of $V_c * A_p$ and $F * A_p$.

The ANOVA of surface roughness value is shown in Table 3. It points out that factors have an effect to response (Surface roughness) the significant model terms are those with "Prob. > F" value of less than 0.05. In this experiment, we can find that the main factor significantly influence on the surface roughness was feed per tooth with p-value of the main factors less than 0.05. The cutting speed was not significant to the roughness, it might due to close speed between 2 levels, it should be noted that there is industrial used cutting speed. Anyway, the depth of cut was also not significant as reported by several authors (Surasit 2013), (Surasit 2013), (Simunovic 2013) and (Surasit 2013). The interaction effect of the factors on the surface roughness were between $V_c * F$, $V_c * A_p$ and $F * A_p$ which p-value of such interaction factors less than 0.05. Furthermore, Table 3. depicts that the regression model from the ANOVA analysis was revealed the excellent relation

between significant parameters and surface roughness. These could be implied from the decision coefficient (R^2) of 93.31 % and the adjusted R^2 of 87.45 %.

Fig 6. shows the main effect of machining parameters on the surface roughness. The feed rate was the highest significant effect with a positive relation on surface roughness. The low feed rate leads to low surface roughness. The surface roughness was increased when feed rate increased from 0.06 to 1.0 millimeter per tooth.

Fig 7. shows the interaction effects plot of surface roughness. According to the figure, while we used the cutting speed at 900 and 1,100 meter per minute, the surface roughness was increased when feed rate increased from 0.06 to 1.0 millimeter per tooth. Whereas, we used the cutting speed at 900 meter per minute, the surface roughness was dropped when depth of cut raised from 0.5 to 1.0 millimeter. On the contrary, when we used the cutting speed at 1,100 meter per minute, the surface roughness was increased when depth of cut increased from 0.5 to 1.0 millimeter. And while, we used the feed rate at 0.06 millimeter per tooth, the surface roughness was increased when depth of cut heighten from 0.5 to 1.0 millimeter. In contrast, when we used the feed rate at 0.1 millimeter per tooth, the surface roughness was decreased when depth of cut increased from 0.5 to 1.0 millimeter.

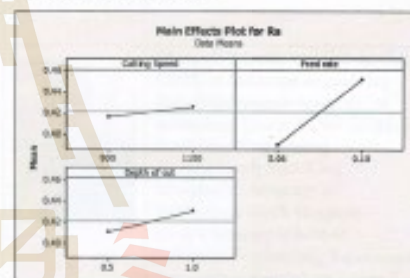


Fig 6. The main effect plot of surface roughness

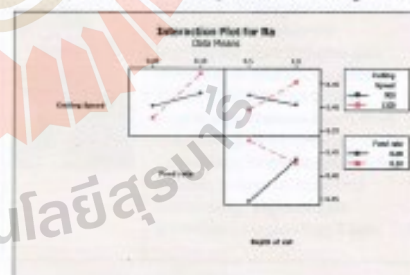


Fig 7. The interaction effect plot of surface roughness

4. CONCLUSIONS

This research were carried out to investigate the effect of machining parameters on surface roughness of the semi-solid die casted ADC12 aluminum alloy crankcase housing based on full factorial experimental design. Three parameters included cutting speed, feed rate and depth of cut were studied in this experiment. The results of the analysis are as follows:

- 1) The feed rate was a significant effect on the surface roughness. The increasing of the feed rate affected surface roughness increased
- 2) The interaction effects of the machining parameters on the surface roughness were between $V_c * F$, $V_c * A_p$ and $F * A_p$.

REFERENCES

- Okayasu, M., Material Properties of Various Cast Aluminum Alloys Made Using a Heated Mold Continuous Casting Technique with and without Ultrasonic Vibration, *J. of Metals*, pp. 1440-1453, 2015.
- Wannasin, J., SEMI-SOLID SLURRY FORMING OF ALLOYS, 1st Edition, Prince of Songkla University, 2012
- Thanabumrungskul, S., Industrial development of gas induced semi-solid process, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp 1016-1021, 2010
- B. C. Routara, Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation, *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 1166-1180, 2009
- Wannasin, J., Semi-solid Die Casting using the Gas Induced Semi-Solid (GISS) Technique, <http://do.jpsu.ac.th/en/news/2014/Features-21.php>, 2014
- Rawangwong, S., An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Semi-Solid Cast 6061 Aluminum Alloy Using Carbide Tool, *Advanced Materials Research Vol. 747*, pp. 777-780 (2013)
- Rawangwong, S., An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Aluminum Semi Solid 2024 Using Carbide Tool, *Energy Procedia*, pp. 854 – 862, (2013)
- Simunovic, G., Predicting the surface quality of face milled aluminium alloy using a multiple regression model and numerical optimization, *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW*, Volume 13, No. 5, 2013
- M. S. Sukumar, Optimization and Prediction of Parameters in Face Milling of Al-6061 Using Taguchi and ANN Approach *Procedia Engineering* 97, pp. 365 – 371, (2014)
- Rawangwong, S., Influence of Cutting Parameters in Face Milling Semi-Solid AA 7075 Using Carbide Tool Affected the Surface Roughness and Tool Wear, *Energy Procedia*, pp. 448 – 457 (2014)

PHOTOS AND INFORMATION



Ukrit Thanasuptawee received the B.E. (2009) in Industrial engineering from Rajamangala university of technology Lanna, M.E. (2011) in Industrial Engineering from Chiang Mai University. He is studying in Ph.D. degree, School of Manufacturing Engineering, Suranaree university of technology.



Somsak Siwadamrongpong received the B.E. (1995) in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology. He is a lecturer, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology



Manoch Numfu received the B.E. (2005) in Industrial engineering from Rajamangala university of technology Lanna, M.Sci. (2008) in Production Engineering (International) from King Mongkut's University of Technology North Bangkok. He is a lecturer, School of Industrial Engineering, Rajamangala university of technology Lanna Tak



Kraisorn Wongpoo received the B.E. (2005) in Industrial engineering from Rajamangala university of technology Lanna, M.Sci. (2008) in Production Engineering (International) from King Mongkut's University of Technology North Bangkok. He is a lecturer, School of Industrial Engineering, Rajamangala university of technology Lanna Tak

THE STUDY OF MACHINING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN THE END-MILLING PROCESS OF ALUMINUM SEMI-SOLID A356

Aungsumarin Prapaspong ⁽¹⁾, Ukrit Thanasuptawee ⁽²⁾, Prasert Aengchuan ⁽³⁾
, Somsak Siwadamrongpong ⁽⁴⁾

(1), (2), (3), (4) School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhonratchasima, Thailand 30000

Email: somsaksi@sut.ac.th

ABSTRACT

This investigation purposes are to study the factors affected the surface roughness in the end-milling process of aluminum semi-solid A356. Surface roughness is an important measure of the quality for part manufacturing. The results of this research could be applied in manufacturing of automotive components industry. The process in preparation of semi-solid aluminum alloy used Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) and T6 heat treatment process is employed. This study was conducted by using computer numerical controlled (CNC) milling machine. The milling process used carbide end mill cutter of 12 millimeter diameter in face milling. The one eight fraction factorial design of experimental method was carried out. Seven main factors in this study consist of four cutting factors and three factors from tool geometry. The factors were feed per tooth, cutting speed, radial depth of cut, axial depth of cut, rake angle, helix angle and number of teeth. The response factor was surface roughness. This experiment was carried out using CNC milling machine on dry cutting condition. The analysis of the result shows that the significant main effects for surface roughness were feed per tooth, number of teeth, rake angle, cutting speed and radial depth of cut. The major interaction effects for surface roughness were between feed per tooth-rake angle, feed per tooth-cutting speed and feed per tooth-helix angle.

KEYWORDS: end-milling, machining parameter, surface roughness design of experiment.

1. INTRODUCTION

Aluminum is a non-ferrous metal that popular in various industries, due to aluminum has excellent mechanical properties such as corrosion resistance, abrasion resistance, flexibility, fatigue behavior, easier machining, good forming ability and lightweight. Therefore, aluminum demand is growth rapidly in the industrial market.

The production of aluminum alloy parts formed by casting usually contains silicon which is the important chemical composition. It cause easier melting, good fluid flow of metals in casting and the ability to forge is excellent. The conventional die casting process sometimes causes dendritic microstructure and affecting on mechanical properties decreased due to the shrinkage porosity during solidification and gas porosity. Recently, semi-solid metal (SSM) casting process technology which is also known as thixocasting, rheocasting, thixoforming or thixomolding was proposed. Gas induced semi-solid (GISS) technique was the new technique by introducing very fine gas bubbles through the graphite diffuser that dip into the molten alloys. This technique was reported to increase mechanical properties and better response to heat treatment process. In the year 2008, Siriporn et al., studied the influence of heat treatment processing parameters on the mechanical properties and the microstructure of semi-solid aluminum alloy A356. The process in preparation semi-solid aluminum alloy is called Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) and the heat treatment

process was T5 and T6. T5 was done by only aging process. T6 was comprised of 3 steps: solution treatment process, quenching and aging process. It was found that the optimum condition of T6 was solution treated at 540°C for 4 hr, quenching and aged at 135°C for 12 hr. with the hardness of 149.90 HV, ultimate tensile strength of 297.07 MPa and elongation of 9.66%.

A brief review of studies on surface roughness of aluminum alloys. Surasit et al., (2013, 2014) carried out the study on main factors for surface roughness in the face milling process of aluminum 6061, semi-solid 2024 and semi-solid AA 7075 using full factorial experimental design. The variable factors were the spindle speed, the feed rate and the depth of cut. The result represented that the main factors effected were the spindle speed and the feed rate. Depth of cut was reported to insignificant. Somsiang et al., (2014) study the factors affecting the surface roughness of 6061-T6 aluminum using 2³ factorial experimental design. The experimental results indicated that the main effect for surface roughness was the feed rate and interaction effect was between depth of cut and feed rate. Elias et al., (2016) carried out research on effect of cutting speed parameters on the surface roughness of Al5083 using full factorial experimental design. The carbide tools coated with TiAlN was used with a diameter of 12 millimeter. The results obtained by increasing of cutting speed and decreasing of feed rate on decreasing of surface roughness while the depth of cut did not affect with the surface roughness. M. Subramanian et al., (2014) created modeling and analysis of surface roughness on AL7075-T6 in end milling process using response surface methodology. Statistical model has been developed to predict surface roughness in terms of tool geometry such as rake angle, nose radius of cutting tool and machining parameters such as cutting speed, cutting feed rate and axial depth of cut. The experiment was carried out with HSS end mill (12 millimeter diameter). The results indicated that minimum surface roughness can be achieved by radial rake angle of 12°, nose radius of 0.8 millimeter, cutting speed of 115 m/min, cutting feed of 0.04 mm/tooth and axial depth of cut of 2 millimeter.

Aluminum A356 is a magnesium-silicon-aluminum alloy. It is extensively used in the manufacturing of automotive components industry such as engine parts, wheel, shock, OEM parts, and others. These products have to go through the machining processes by milling machine and cutting tool. These processes affected on surface roughness of product. Surface roughness is an important measure of the production quality that effects on the mechanical properties of materials. It could be begot some problems that are significant such as degradation of quality surface, which effecting to durability and precision of

products. Therefore, Surface roughness had an impact on the mechanical properties.

This study was interested in studying the factors affected the surface roughness in the end-milling process of aluminum semi-solid A356 that casting process technology using gas induce semi-solid (GISS) process. The seven main factors in this study consist of four cutting factors which were feed per tooth, cutting speed, radial depth of cut and axial depth of cut. The rest three geometry tool factors were rake angle, helix angle and number of teeth. The research could be benefited in the manufacture of automotive components industry and reduce cost and time for the more manufacturing quality.

2. CASTING METHOD FOR ALUMINUM SEMI-SOLID A356

The process in preparation of semi-solid aluminum alloy is called Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) by introducing gas bubbles to the molten alloys at a temperature of 700°C for aluminum semi-solid A356. The low solid fraction was created with bubbling time of 6 second before squeeze casting. The slurry was poured into a die cavity. The applied pressure was controlled by hydraulic press. The die and punch were preheated to 300 and 80°C. Figure 1 showed the schematic diagram of the GISS-SC process. Chemical composition of aluminum semi-solid A356 was shown in Table 1 and Figure 2 was shown the microstructure of the casting aluminum semi-solid A356 before the machining operation was performed.

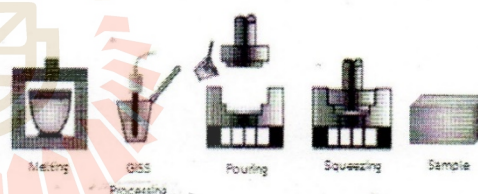


Figure 1. Schematic diagram of the GISS squeeze casting process.

Table 1. Chemical composition of aluminum semi-solid A356.

Si	7.18
Mg	0.215
Fe	0.108
Cu	0.0197
Mn	0.0045
Zn	0.0089
Ti	0.112
Al	Bal.

Materials used in this study was produced by gas induce semi-solid (GISS) technique, from manufacturer. The microstructure of the A356 was globular grains and has shown in figure 2. This grain type cause dense internal microstructure and less shrinkage porosity during solidification. It was due to some metal has been appeared in solid state while flow into the mold and yield to increase on mechanical properties.

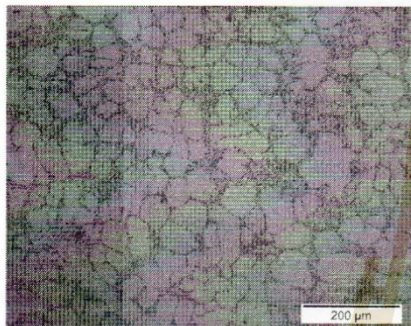


Figure 2. Microstructure of aluminum semi-solid A356

3. EQUIPMENT AND TOOLS

This research aimed to investigate the effect of main factors on the surface roughness in semi-solid A356 end-milling process by computer numerical controlled (CNC) milling machine and using end mill cutter of 12 millimeter diameter. The following equipment and instrument were used.

- 1) Computer numerical controlled (CNC) milling machine of model Bridgeport type VMC-500 16 with technical specifications including a maximum speed of 7,000 rpm and maximum feed rate of 10,000 mm/min.
- 2) Workpiece samples: Semi-solid A 356. The size of the workpiece was 48×48 millimeter cross section and 100 millimeter in length.
- 3) Tool: Fine type carbide tool with 12 millimeter diameter.
- 4) A surface roughness measuring device of model Mitutoyo Surf Test SJ-210.

4. EXPERIMENT

This experiment used computer numerical controlled (CNC) milling machine on condition of dry cutting in the face end-milling process. Set up configuration using carbide end mill cutter of 12 millimeter diameter was employed as shown in figure 3. Figure 4 has shown an

experimental processes flowchart. These were detailed as follows:

- 1) Parameters and Response were selected. Seven main factors were shown in table 2 and the response factor of this research was the surface roughness.
- 2) Design of experiment technique was used to carry out the investigation. 2^{7-3} Design of experiment was employed in this study, totally 16 cutting conditions was determined.
- 3) 480 square millimeter of milling area was cut continuously for each condition. The surface roughness (Ra) was measured for 3 points per milling row. Value of average and standard deviation of each cutting conditions were reported.
- 4) The analysis of variance of surface roughness value with using program Minitab R.16

Table 2. Parameters and levels of test.

Factors	Unit	Symbol	Level	
			(-1)	(+1)
Feed per tooth	mm/z	f_z	0.02	0.04
Cutting speed	m/min	V_c	215	245
Axial depth of cut	mm	A_p	0.4	0.8
Radial depth of cut	mm	A_e	3	6
Helix angle	degrees	Helix	35	45
Rake angle	degrees	Rake	10	14
Number of teeth	cutter	Z	2	3

The following equation have been used to set the experimental cutting conditions

$$\text{Cutting speed} \quad V_c = \frac{D \times \pi \times n}{1000} \quad (1)$$

$$\text{Spindle Speed} \quad n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (2)$$

$$\text{Feed per Tooth} \quad f_z = \frac{V_f}{Z \times n} \quad (3)$$

$$\text{Cutter feed} \quad V_f = f_z \times Z \times n \quad (4)$$

D = Diameter of cutter in millimeter

Z = Number of teeth in cutter

n = Spindle speed in rpm

V_f = Cutter feed in millimeter /min

f_z = Feed per tooth in millimeter/z

V_c = Cutting speed in meters/min

π = 3.1416

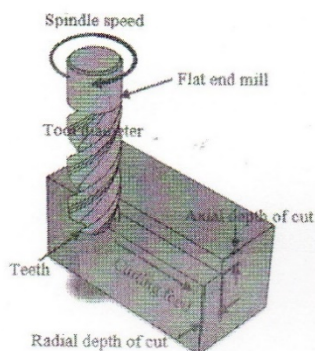


Figure 3. Show the face end-milling process.

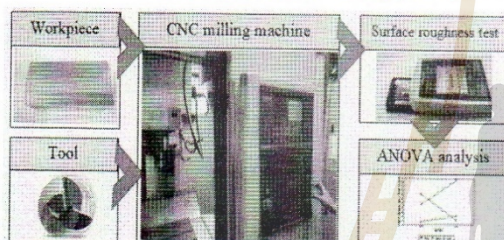


Figure 4. Experimental processes flowchart.

5. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 3 shows 16 experimental results.

Std.	f_z	V_c	A_p	A_e	Z	Helix	Rake	Ra(μ m)
1	0.02	215	0.4	3	2	35	10	0.151
2	0.04	215	0.4	3	3	35	14	0.564
3	0.02	245	0.4	3	3	45	10	0.262
4	0.04	245	0.4	3	2	45	14	0.429
5	0.02	215	0.8	3	3	45	14	0.208
6	0.04	215	0.8	3	2	45	10	0.344
7	0.02	245	0.8	3	2	35	14	0.237
8	0.04	245	0.8	3	3	35	10	0.415
9	0.02	215	0.4	6	2	45	14	0.209
10	0.04	215	0.4	6	3	45	10	0.621
11	0.02	245	0.4	6	3	35	14	0.337
12	0.04	245	0.4	6	2	35	10	0.311
13	0.02	215	0.8	6	3	35	10	0.316
14	0.04	215	0.8	6	2	35	14	0.576
15	0.02	245	0.8	6	2	45	10	0.167
16	0.04	245	0.8	6	3	45	14	0.673

average surface roughness for each condition.

Table 3. The experiment results.

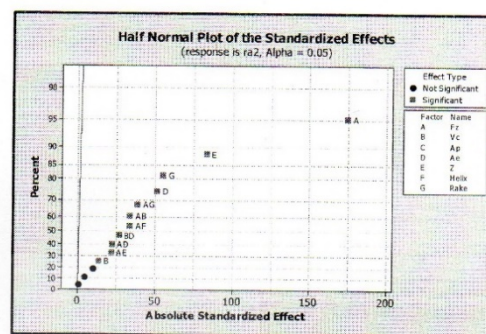


Figure 5. Half Normal Plot.

Figure 5 has shown the half normal plot. This plot revealed that the significant main effect were A, E, G, D and B and the significant interaction effect were AG, AB, AF, BD, AD and AE.

Table 4. Analysis of variance of surface roughness value

Analysis of Variance for Ra .using Adjusted SS Tests							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Main Effects	7	0.371450	0.371450	0.053064	6193.43	0.010	
Fz	1	0.261728	0.261728	0.261728	30547.82	0.004	
Vc	1	0.001564	0.001564	0.001564	182.59	0.047	
Ap	1	0.000175	0.000175	0.000175	20.46	0.139	
Ae	1	0.022509	0.022509	0.022509	2627.20	0.012	
Z	1	0.059318	0.059318	0.059318	6923.31	0.008	
Helix	1	0.000002	0.000002	0.000002	0.20	0.730	
Rake	1	0.026153	0.026153	0.026153	3052.46	0.012	
2-Way Interactions	7	0.047510	0.047510	0.006787	792.17	0.027	
Fz*Vc	1	0.009840	0.009840	0.009840	1148.51	0.019	
Fz*Ap	1	0.000813	0.000813	0.000813	94.87	0.065	
Fz*Ae	1	0.004189	0.004189	0.004189	488.87	0.029	
Fz*Z	1	0.003973	0.003973	0.003973	463.70	0.030	
Fz*Helix	1	0.009787	0.009787	0.009787	1142.25	0.019	
Fz*Rake	1	0.012927	0.012927	0.012927	1508.81	0.016	
Vc*Ae	1	0.005982	0.005982	0.005982	698.20	0.024	
Residual Error	1	0.000009	0.000009	0.000009			
Total	15	0.418968					
S = 0.00292708 PRESS = 0.00219336 R-Sq = 100.00%							
R-Sq(pred) = 99.48% R-Sq(adj) = 99.97%							

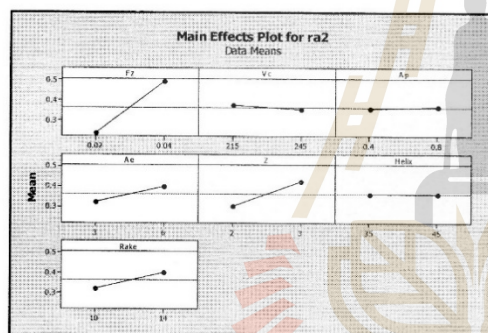
From table 4 could be analyzed the variance of surface roughness of Aluminum Semi-Solid A356. There were detailed as follows:

- 1) The regression model from the ANOVA analysis was revealed the excellent relation between significant parameters and surface roughness. These could be implied from the decision coefficient (R^2) of 100% and the adjusted R^2 of 99.97%.
- 2) The main effect of the factors on the surface roughness were feed per tooth, cutting speed, radial

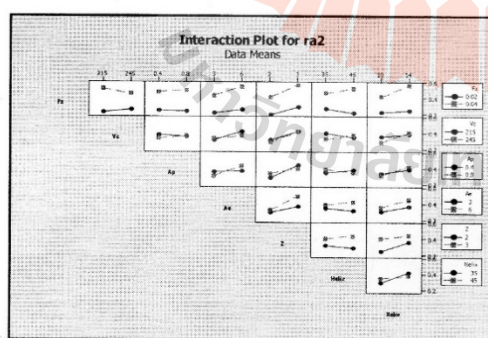
depth of cut, number of teeth and rake angle which p-value of the such main factors less than 0.05.

- 3) The interaction effect of the factors on the surface roughness were between feed per tooth-rake angle, feed per tooth-cutting speed, feed per tooth-helix angle, cutting speed-radial depth of cut, feed per tooth-radial depth of cut and feed per tooth-number of teeth which p-value of such interaction factors less than 0.05.

Figure 6 has shown the individual parameters of machining on the surface roughness. Feed per tooth was the highest significant effects on surface roughness. The Feed per tooth also had the significant interaction with 5 parameters. It could be considered that feed per tooth was the major parameter which affect to surface roughness. Increasing of feed per tooth would yield the better surface roughness. The number of teeth, rake angle and radial depth of cut were considered as significant parameters in the second rank. The good surface roughness should be achieved by setting feed per tooth, number of teeth, rake angle and radial depth of cut in low condition.



(a)



(b)

Figure 6. Individual parameters of machining effect on the surface roughness: (a) main effects and (b) interactions. Half-fraction factorial method.

6. CONCLUSION

The surface roughness of semi-solid A356 was investigated by "Fractional Factorial design" method. Seven parameters were brought into the experiment with face end-milling process. The results of the analysis are as follows:

- 1) Feed per tooth was the highest significant parameter on surface roughness. The decreasing of feed per tooth, number of teeth, rake angle and radial depth of cut to effect surface roughness decreased.
- 2) The significant interaction effects of the factors on the surface roughness were between feed per tooth-rake angle, feed per tooth-cutting speed, feed per tooth-helix angle, cutting speed-radial depth of cut, feed per tooth-radial depth of cut and feed per tooth-number of teeth.

REFERENCES

Siriporn Kuntongkam, "Influence of Heat Treatment Process Parameters on the Mechanical Properties and the Microstructure of Semi-Solid A356 Aluminum Alloy," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 18, no. 2, pp. 93-97, 2008.

Surasit Rawangwong, Worapong Boonchouytan, Jaknarin Chatthong, and Romadorn Burapa, "An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Semi-Solid Cast 6061 Aluminum Alloy Using Carbide Tool," *Advanced Materials Research*, vol. 747, pp. 777-780, 2013.

Surasit Rawangwong, Jaknarin Chatthong, Worapong Boonchouytan and Romadorn Burapa, "An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Aluminum Semi Solid 2024 Using Carbide Tool," *Energy Procedia* 34, pp. 854 – 862, 2013.

Surasit Rawangwong, Jaknarin Chatthong, Worapong Boonchouytan and Romadorn Burapa, "Influence of Cutting Parameters in Face Milling Semi-Solid AA 7075 Using Carbide Tool Affected the Surface Roughness and Tool Wear," *Energy Procedia* 56, pp. 448 – 457, 2014.

Somsiang Chantasee and Sirichai Punsomsakul, "Surface Roughness Prediction of 6061-T6 Aluminum Alloy in Milling Using Regression Model," *KKU Res. J.*, pp. 261-221, 2014.

Elias Rezvani, Hamid Ghayour, and Masoud Kasiri, "Effect of cutting speed parameters on the surface roughness of Al 5083 due to recrystallization," *Mechanical Sciences*, 7, 2016, pp. 85-91.

M.Subramanian, M.Sakthivel, R.Sudhakaran,
 “Modeling and Analysis of Surface Roughness of
 AL7075-T6 in End Milling Process Using Response
 Surface Methodology,” Arab J SciEng, 2014, vol. 39,
 pp. 7299–7313.

PHOTOS AND INFORMATION

	Aungsumarin Prapaspong received the B.E. (2014) degree in Manufacturing Engineering from Suranaree University of Technology. She is studying in degree of master, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.
	Ukrit Thanasuptawee received the B.E. (2009) degrees in Industrial Engineering from Rajamangala University of Technology Lanna, M.E. (2011) degrees in Industrial Engineering from Chiang Mai University. He is studying in degree of Ph.D., School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.
	Prasert Aengchuan received the B.E. (2002) degree in mechanical engineering from Mahidol University, M.E. (2005) degrees in Industrial System Engineering from Asian Institute of Technology, and D.E. (2015) degree in Industrial Engineering from Thammasat University. He is a lecturer, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.
	Somsak Siwadamrongpong received the B.E. (1995) degree in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) degree in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) degree in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology. He is a lecture, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology

A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE RISE ON MILLING OPERATION

Thanet Taprap ⁽¹⁾, Somdech Ingkawara ⁽²⁾, Ukrit Thanasuptawee ⁽¹⁾,
Somsak Siwadamrongpong ⁽¹⁾

⁽¹⁾ School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

⁽²⁾ School of Faculty of Science and Technology,
Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Thailand

Email: somsaksi@sut.ac.th

ABSTRACT

The aim of this research was to study the main factors affected the cutting temperature rise during end milling machining process in carbon steel AISI 1050 sized 64 mm x 64 mm x 24 mm. In this study, the work pieces were machined by the Bridgeport-VMC 500 CNC machining center controlled under dry cutting condition with TiCN coated 4 flutes high speed steel 10 mm diameters end mill tool. The cutting parameters were studied in this experiment including spindle speed, feed rate and radial depth of cut. The 2 levels full factorial experimental design was employed in this study. The cutting temperature rise in this study was measured by K-type thermocouple. The direct and interaction effect of parameters on temperature are analyzed with 95% level of confidence.

KEYWORDS: *cutting temperature rise, machining process, The 2 levels full factorial Experimental design, AISI 1050, TiCN coated tool.*

A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE RISE ON MILLING OPERATION

Thanet Taprap ⁽¹⁾, Somdech Ingkawara ⁽²⁾, Ukrit Thanasuptawee ⁽¹⁾,
Somsak Siwadamrongpong ⁽¹⁾

⁽¹⁾School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

⁽²⁾School of Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Thailand

Email: Email: somsaksi@sut.ac.th

ABSTRACT

The aim of this research was to study the main factors affected the cutting temperature rise during end milling machining process in carbon steel AISI 1050 sized 64 mm x 64 mm x 24 mm. In this study, the work pieces were machined by the Bridgeport-VMC 500 CNC machining center controlled under dry cutting condition with TiCN coated 4 flutes high speed steel 10 mm diameters end mill tool. The cutting parameters were studied in this experiment including spindle speed, feed rate and radial depth of cut. The 2 levels full factorial experimental design was employed in this study. The cutting temperature rise in this study was measured by K-type thermocouple. The direct and interaction effect of parameters on temperature are analyzed with 95% level of confidence.

KEYWORDS: *cutting temperature rise, machining process, The 2 levels full factorial Experimental design, AISI 1050, TiCN coated tool*

1. INTRODUCTION

The machining is a one of the removal material process to become new surface and achieve the desired shape as standard manufacturer's requirements. This process was widely used in several industries such as automotive part, aerospace part and mold manufacturing. The temperature rise of the machining process has an affecting on surface quality of products and tool life.

Marinov (2010) explained that in cutting process, almost all of energy dissipated in plastic deformation is converted into heat that in turn raised the temperature in the cutting zone. He indicated that the heat generation has three main sources in the cutting zone including the heat from plastic deformation in the primary shear zone, the heat from the friction between chip and cutting tool and the heat from the friction between workpiece and

tool flank. Many researchers had studied on temperature measurement techniques in machining processes.

Norased (2015) studied that, factors had significantly effect on the heat in machining process are cutting velocity and feed per tooth but depth of cut had a little effect on heat in cutting zone.

R.C. Dewes et al. (1999) measured the cutting temperature in machining process with ball nose end mills TiCN coated using worn tool and new tool by thermocouple and infrared techniques. He found that tool wear affected temperature expansion. In addition, radial and axial depth of cut have influence on interface and chip temperature.

Branda et al. (2008) studied on heat flow when end milling, at high-speed hardened steels which widely applied to molds and dies. In this experiment, AISI H13 and AISI D2 steels were machined with two types of ball nose end mills: coated with (TiAl)N and tipped with PcBN. using thermocouple. The thermocouple were embedded in internal workpiece with 5 positions at 2 mm. below machined surface. The result showed that overall and higher temperatures were measured when cutting AISI D2, compared to AISI H13, mainly due to hardness of differences.

Abdill Kus et al. (2015) studied on the temperature distribution with the material Al4140 on turning process. In this experiment the temperature was measured by K- type thermocouple and infrared sensor. The result showed that the cutting speed is a direct impact on the increasing of temperature. On the other hand, feed rate is not significant to the temperature.

Although, previous study has focused on the cutting temperature but no one study in the effect of machining parameters on cutting temperature rise in carbon steel grade AISI 1050 with TiCN coated 4 flutes high speed steel 10 mm. Thus, the aim of this research was to study the main factors affected the cutting temperature during end milling in this material by thermocouple which was widely used because of the cost is lower than existing methods.

It can be found that the thermocouple technique is widely used to measure temperature formed by machining processes. The aim of this research was to study the main factors affect the cutting temperature rise during end milling machining process in carbon steel AISI 1050 and would like to present the temperature measurement technique by using K-type thermocouple for temperature rise resulting from machining processes for this trial because there are less people studying on this topic.

2. EXPERIMENT

2.1 Materials and Equipment

2.1.1 CNC machine and cutting tools

In this study, the BRIDGEPORT VMC 500 Vertical Machining Center was used. It has a high potential that are used in most industries and it was shown in Fig. 1. The cutting tool used TiCN coated 4 flutes high speed steel 10 mm diameters end mill (Co 8%), the details of the components is shown in Fig. 2. It is commonly used with hard materials.



Fig. 1. BRIDGEPORT Vertical Machining Center.

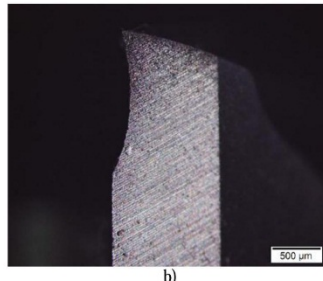
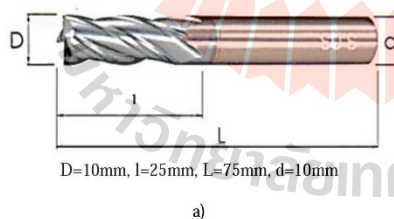


Fig. 2. a) Geometry of EM 4146, TiCN coated HSE.
b) The cutting edge of cutting tool.

2.1.2 Workpiece material

The workpiece in this experiment is carbon steel AISI 1050 sized 64mm×64mm×24mm had the hardness between 185-210 HB. Table 1. shows the chemical composition of AISI 1050.

Table 1. Chemical composition AISI 1050.

%Fe	%C	%Si	%Mn	%P	%S
98.1	0.528	0.262	0.778	0.0187	0.0120

2.1.3 Temperature Measurement

The K-type thermocouple are sized 1.6 mm were embedded into the internal part of the workpiece at 1 mm below the milling surface is shown in Fig. 3. The cutting temperature rise in this research were recorded by TESTO model 176T4 data logger which is a frequency of measuring 1 second to 24 hour and accuracy $\pm 0.3^\circ\text{C}$ at a temperature of -100 to $+70^\circ\text{C}$.

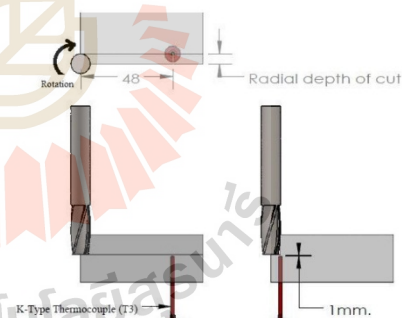


Fig. 3. Positions of K-type thermocouple.

2.2 Experimental set up

The experiments were designed and based on a 2^3 full factorial design with 2 replicates, which is the well known method for screening factors. These experiments were conducted as per the design matrix using a BRIDGEPORT VMC 500 Vertical Machining Center. Moreover, the whole experiments were carried out with a constant axial depth of cut (A_p) = 10 mm. The experiments were conducted as shown in Fig. 4. The level of process parameters were identified by the recommendation of tool manufacturer. Table 2 shows the machining parameters and their levels for this experiment.

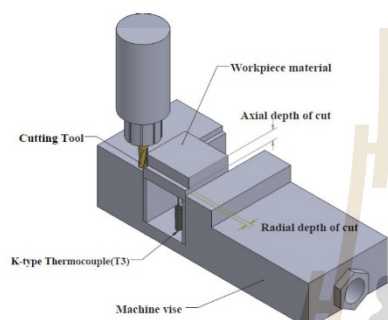


Fig. 4. Show the end-milling process.

Table 2. The machining parameters and their levels.

Parameter	Unit	Symbol	Level	
			Low	High
Spindle speed	RPM	S	800	1270
Feed rate	mm/min	F	20	60
Radial depth of cut	Mm	A_e	2.5	5

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Temperature results

The temperature was measured using a K-type thermocouple sized 1.6 mm, it was inserted into the hole and the initial temperature was noted using the data logger temperature. While machining, the maximum temperature was measured, the difference between the maximum and initial temperature gave the cutting temperature rise. The design matrix and the results of this experiment are shown in the table 3.

Table 3. Experimental design and the results

Std.	S	F	A_e	A_p	Temperature		
					Initial	Maximum	Rise
1	800	20	2.5	10	26.0	41.8	15.8
2	1270	20	2.5	10	26.4	47.2	20.8
3	800	60	2.5	10	26.7	43.5	16.8
4	1270	60	2.5	10	27.0	44.0	17.0
5	800	20	5.0	10	26.8	51.8	25.0
6	1270	20	5.0	10	26.9	55.1	28.2
7	800	60	5.0	10	26.9	56.3	29.4
8	1270	60	5.0	10	26.4	56.4	30.0
9	800	20	2.5	10	25.2	39.3	14.1
10	1270	20	2.5	10	26.1	46.3	20.2
11	800	60	2.5	10	26.5	43.4	16.9
12	1270	60	2.5	10	26.1	43.8	17.7
13	800	20	5.0	10	26.6	50.3	23.7
14	1270	20	5.0	10	27.0	55.7	28.7
15	800	60	5.0	10	27.0	53.7	26.7
16	1270	60	5.0	10	27.0	55.0	28.0

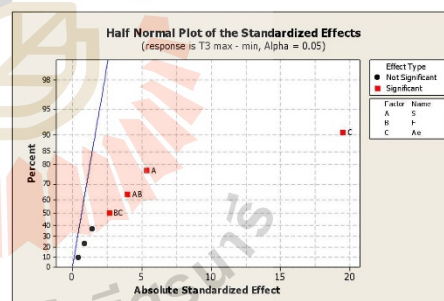


Fig. 5. Half normal plot.

The Fig 5. shows the half normal plot. This graph points that the significant main effects are radial depth of cut and spindle speed and the significant interaction effect are interaction of S * F and interaction of S * Ae.

Table 4. Analysis of variance of cutting temperature rise value.

Analysis of Variance for T3 max - min (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	437.062	437.062	145.687	137.280	0.000
S	1	30.803	30.803	30.803	29.020	0.001
F	1	2.250	2.250	2.250	2.120	0.183
Ae	1	404.010	404.010	404.010	380.690	0.000
2-Way Interactions	3	24.623	24.623	8.208	7.730	0.009
S*F	1	16.810	16.810	16.810	15.840	0.004
S*Ae	1	0.250	0.250	0.250	0.240	0.640
F*Ae	1	7.563	7.563	7.563	7.130	0.028
3-Way Interactions	1	0.903	0.903	0.903	0.850	0.983
S*F*Ae	1	0.903	0.903	0.903	0.850	0.383
Residual Error	8	8.490	8.490	1.061		
Pure Error	8	8.490	8.490	1.061		
Total	15	471.077				
S = 1.03017		Press = 33.69				
R-Sq = 98.20%		R-Sq (pred) = 92.79%		R-Sq (adj) = 69.62%		

The ANOVA tables shown in Table 4. Indicates that factor have an effect to response (Cutting temperature rise) the significant model terms are those with 'Prob. > F' value of less than 0.05 and in this experiment, we can find that the main factor significantly influence on the cutting temperature rise are radial depth of cut, spindle speed with p-value of the such main factors less than 0.05. The interaction effect of the factors on the cutting temperature rise were between S * F and S * Ae which p-value of such interaction factors less than 0.05. Additionally, Table 4.illustrates that the regression model from the ANOVA analysis was revealed the excellent relation between significant parameters and cutting temperature rise. These could be implied from the decision coefficient (R^2) of 98.2 % and the adjusted R^2 of 69.62 %. Fig. 6 shows the main factors affecting on the cutting temperature rise. The radial depth of cut was the highest significant effect and spindle speed was also significant effect on cutting temperature rise. The cutting temperature rise was increased when radial depth of cut and spindle speed increased from 800 to 1,270 rpm and 2.5 to 5 mm respectively. Fig. 7.shows the interaction effects plot of temperature rise. According to the figure, while we used the spindle speed at 1,270 rpm, the cutting temperature rise was reduced when feed rate increased from 20 to 60 mm/min on the other hand, while we used the spindle speed at 800 rpm, the cutting temperature rise was reduced when feed rate increase from 20 to 60 mm/min.

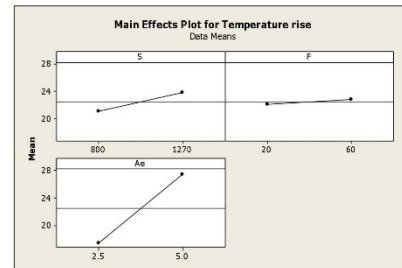


Fig 6. The main effects plot of temperature rise.

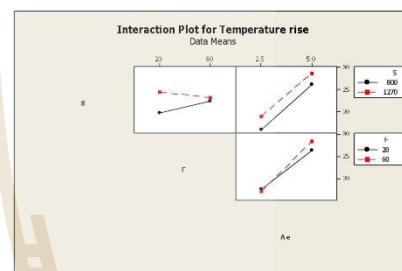


Fig. 7. The interaction effects plot of temperature rise

4. CONCLUSIONS

From the study, the cutting temperature rise of end milling machining process in carbon steel AISI 1050 was investigated by full factorial design method. Three parameters were studied in this experiment. The results of the analysis are as follows:

- 1) The radial depth of cut was the highest significant effect and spindle speed was also significant effect on cutting temperature rise.
- 2) The interaction effects of the factors on the cutting temperature rise were between S * F and S * Ae.

The 11th SEATUC Symposium

REFERENCES

Marinov, V., Manufacturing Processes from Metal Products 1st Edition, pp.74-86, 2010.

Norased, K., Metal Cutting Technology, N-TRIS Solutions&Engineering.co.,ltd2015,http://www.designengineerlife.com/2015/08/metal-cutting-technology/

R.C. Dewes, E. Ng, E. Ng, P.G. Newton, D.K. Aspinwall, Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel, School of Manufacturing and Mechanical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, UK, Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999) 293-301.

Branda, L., Oelho, R., Rodrigues, A., Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcBN-tipped tools, Federal University of Brazil, journal of materials processing technology 199 (2008) 234-244.

Kus, A., Isik, Y., Cakir, M., Coşkun, S., Özdemir, K., Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting, Vocational School of Technical Science, Uludag University, 16059 Bursa, Turkey, Sensors 2015, 15, 1274-1291.

PHOTOS AND INFORMATION



Thanet Taprap received the B.E. (2014) in Automotive Engineering from Suranaree University of Technology. He is studying in M.E., School of Manufacturing Engineering, Suranaree university of technology.



Somdech Ingkawara received the B.E (1992) degree in Industrial Engineering from Rajamangala University of Technology Lanna, M.P.E (1999) in Production Engineering from King Mongkut's University of Technology North Bangkok. He is a lecturer, Department of Industrial Technology Management, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University.



Ukrit Thanasuptawee received the B.E. (2009) in Industrial engineering from Rajamangala university of technology Lanna, M.E. (2011) in Industrial Engineering from Chiang Mai University. He is studying in Ph.D. degree, School of Manufacturing Engineering, Suranaree university of technology.



Somsak Siwadamrongpong received the B.E. (1995) in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology. He is a lecturer, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology

ประวัติผู้เขียน

นายอุกฤษฏ์ ชนทรัพย์ทวี เกิดเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2529 ที่อำเภอเมือง จังหวัดตาก ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอบ้านตาก จังหวัดตาก เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนมัธโนทัย จังหวัดตาก มัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนตากพิทยาคม จังหวัดตาก สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก จังหวัดตาก เมื่อปี พ.ศ. 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อ พ.ศ. 2555

หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2555 ได้รับเข้าทำงานที่สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก และในปี พ.ศ. 2557 ได้ศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาระดับปริญญาเอก ผู้วิจัยได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากที่มีประสบการณ์ด้านการสอนปฏิบัติการและการทำงานวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความชำนาญทางด้านการประยุกต์วิธีการทางสถิติมาใช้ในการกระบวนการตัดสินใจ โดยเฉพาะกระบวนการกักด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ปรากฏดังภาคผนวก ง.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี