

การประมาณขนาดการสีกหรือของมีดกัดหัวบอลในกระบวนการกัด

นายธนาริป์ ชาทินันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของปีการศึกษาที่ 2556 ทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' property and should not be used outside the Graduate School.

ESTIMATION OF TOOL WEAR ON BALL-END MILL IN MILLING PROCESS

Mr. Thanathip Jatinandana

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณขนาดการสีกหรือของมีดกัดหัวบอลใน กระบวนการกัด
โดย	นายธนธิป ชาตินันท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฉวีไชย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก)

ธนชาติป ชาตินันท์ : การประมาณขนาดการสึกหรอของมีดกัดหัวบอลในกระบวนการกัด (ESTIMATION OF TOOL WEAR ON BALL-END MILL IN MILLING PROCESS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ, 173 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการนำเสนอรูปแบบของ สมการการประมาณขนาดการสึกหรอของมีดกัดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ชนิดหัวบอล ในระหว่างกระบวนการกัด ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด S50C โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสึกหรอของมีดกัด ได้แก่ ความเร็วรอบในการกัด อัตราการป้อน ความลึกในการกัด เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดและสัดส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะกัด ในการทดลองจะใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียล เพื่อวิเคราะห์ผลตอบของค่าความสึกหรอของมีดกัด ในการทดลองได้ดำเนินการที่ความเร็วรอบตัด 8,000 ถึง 12,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัดที่ 0.02 ถึง 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.3 ถึง 0.7 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ 6 และ 8 มิลลิเมตร โดยสมการเอ็กโปเนนเชียลจะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาสมการการประมาณขนาดการสึกหรอของมีดกัดในกระบวนการกัด

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยดังกล่าวข้างต้นมีผลต่อขนาดการสึกหรอของมีดกัดที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และแรงที่เกิดขึ้นในขณะกัดนั้น สามารถนำมาประมาณการขนาดความสึกหรอของมีดกัดได้ ซึ่งแรงในขณะกัดที่นำมาใช้ในสมการการประมาณขนาดการสึกหรอของมีดกัดนั้นจะอยู่ในรูปสัดส่วนของแรง เนื่องจากสัดส่วนของแรงที่ใช้ มีการแปรผันตามขนาดของความสึกหรอของมีดกัดที่เปลี่ยนไป ไม่ว่าจะเงื่อนไขการกัดอื่นจะเปลี่ยนไปก็ตาม ในการทดสอบความแม่นยำของสมการการประมาณขนาดการสึกหรอของมีดกัดที่เงื่อนไขการกัดใหม่ พบว่าสมการการประมาณขนาดการสึกหรอของมีดกัดนั้นมีความแม่นยำที่ 95.2%

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา..... 2556.....

ลายมือชื่อ.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5371502021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : BALL END MILLING / PREDICTION / TOOL WEAR / CUTTING FORCE RATIO

THANATHIP JATINANDANA : ESTIMATION OF TOOL WEAR ON BALL-END MILL IN MILLING PROCESS. ADVISOR: ASSOC.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng, 173 pp.

The objective of this research is to propose the in-process tool wear prediction model in the ball-end milling process by monitoring of the cutting force ratio. The milling cutter of carbide coating on TiAlN and the workpiece of medium carbon steel grade S50C were applied in this experiment. The model obtained in this research is developed from the actual experiments and the cutting conditions, which consist of the spindle speed of 8,000 to 12,000 rev/min, the feed rate of 0.02 to 0.06 mm/rev, the depth of cut of 0.5 to 0.9 mm, the tool diameters of 6 and 8 mm, and the cutting force ratio. The exponential function is employed to develop the in-process tool wear estimation model at 95% significant level.

The experimentally obtained results showed that the tool wear corresponds to the cutting force ratio, which can be utilized to estimate the tool wear during the milling. The new cutting tests have been conducted to verify the in-process tool wear estimation model and the results have run satisfaction. Finally, it is proved that the in-process tool wear estimation model can be used to predict the tool wear regardless of the cutting conditions with the highly acceptable estimation accuracy about 95.2%.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ถูกล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำ โอกาส ความรู้ ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ศิไชย รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคึก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ นายเกียรติ คุรุณาสวัสดิ์ นายชาญณรงค์ รุ่งเรือง ที่ได้แนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์ และเครื่องจักรในการทดลอง และถ่ายทอดประสบการณ์ของการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำการทดลอง จนทำให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปตามเป้าหมายได้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบ พระคุณบิดา มารดา รวมถึงเพื่อนๆ นิสิต ปริญญาโททุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำในครั้งนี้นับประสงคความสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	11
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	11
1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน	12
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	12
1.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 การออกแบบการทดลอง	47
3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	48
3.4 วิธีการทดลอง.....	52
3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	53
3.6 การออกแบบการทดลอง	57
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล	60

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	62
4.1 ผลการทดลอง	62
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับ ขนาดความลึกมีดกัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ	62
4.3 การสร้างสมการพยากรณ์การสึกของมีดกัด	111
4.4 การประมาณค่าความสึกของมีดกัด	115
4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง	117
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	123
5.1 สรุปผลการวิจัย	123
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	124
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย	124
5.4 ข้อเสนอแนะ	125
รายการอ้างอิง	126
ภาคผนวก	129
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ	130
ภาคผนวก ข รูปมีดกัดที่ขนาดความลึกต่างๆ	164
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	173

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	งานวิจัยในอดีตที่ศึกษาการสึกของเครื่องมือตัด และการประยุกต์ใช้สัดส่วนแรงตัด	8
ตารางที่ 2.1	รูปแบบการชำรุดเสียหายของมีดตัด	19
ตารางที่ 2.2	กลไกการสึกหรอของมีดตัด	19
ตารางที่ 2.3	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยในอดีต	43
ตารางที่ 3.1	ค่าความไม่แน่นอนของเซนเซอร์และเครื่องมือวัด	51
ตารางที่ 3.2	ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	57
ตารางที่ 3.3	ตัวอย่างเมตริกซ์การออกแบบการทดลอง	57
ตารางที่ 4.1	ตารางแสดงการทดสอบความแม่นยำของสมการที่เงื่อนไขการตัดใหม่ ในช่วงของเงื่อนไขการทดลอง	119
ตารางที่ 4.2	ตารางแสดงการทดสอบความแม่นยำของสมการที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงของเงื่อนไขการทดลอง	120

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ข้อมูลดัชนีผลผลิตในปี 2554-2555	1
รูปที่ 1.2 มูลค่าการนำเข้าเครื่องจักรกล ปี 2009-2013.....	2
รูปที่ 1.3 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล	5
รูปที่ 1.4 แสดงแนวความคิดในการใช้ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงตัด กับขนาดความลึกของมีดกัดมาประมาณขนาดความลึกของมีดกัด	10
รูปที่ 2.1 กระบวนการกลึง	13
รูปที่ 2.2 กระบวนการเจาะ	15
รูปที่ 2.3 กระบวนการกัด	14
รูปที่ 2.4 ประเภทของเครื่องกัด (A) เครื่องกัดแนวนอน (B) เครื่องกัดแนวตั้ง	15
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของงานตามชนิดของมีดกัด	15
รูปที่ 2.6 มีดกัดแบบหัวบอล	16
รูปที่ 2.7 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์	17
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยลึกหรือบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด	21
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการสึกหรอของมีดกัด	21
รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการตัดและอายุการใช้งานของมีดตัด	22
รูปที่ 2.11 ผลกระทบของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงในการตัดต่อการสึกหรอ โดยให้เกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอ	22
รูปที่ 2.12 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของมีดกัดและทิศทางการวัดแรง	26
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงแรงในแต่ละแกนที่มุมต่างๆของคมตัดกับชิ้นงาน	27
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างแรงตัดสถิตย์	28
รูปที่ 2.15 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป	30
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	36
รูปที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	48
รูปที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	49
รูปที่ 3.3 มีดกัดแบบหัวบอล ยี่ห้อ 7-LEADERS	49
รูปที่ 3.4 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน.....	50
รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด	50

รูปที่ 3.6	ชาร์จแอมป์ลิไฟเออร์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด	50
รูปที่ 3.7	ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด	51
รูปที่ 3.8	ไมโครสโคปสำหรับวัดขนาดความลึกหรอ	51
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	53
รูปที่ 3.10	ตัวอย่างการวัดขนาดความลึกของมีดกัด	54
รูปที่ 3.11	การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรง	55
รูปที่ 3.12	การเชื่อมต่อสายไดนาโมวัดแรงเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ และเครื่องออสซิลโลสโคป	55
รูปที่ 3.13	การเตรียมชิ้นงานและชิ้นงานที่ผ่านการปาดหน้าเรียบร้อยแล้ว	56
รูปที่ 3.14	การวัดขนาดความลึกหรอของมีดกัด	56
รูปที่ 3.15	แสดงรูปแบบของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด	59
รูปที่ 4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไข การตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน.....	63
รูปที่ 4.2	แสดงขนาดความลึกของมีดกัดที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับแรงในแนวตั้งฉาก Fz ที่เพิ่มขึ้น ในทิศทางเดียวกัน	64
รูปที่ 4.3	แสดงทิศทางการหมุนของดอกกัดและแรงตัดในแกน X	65
รูปที่ 4.4	แสดงขนาดความลึกของมีดกัดที่ขนาดต่างๆ	65
รูปที่ 4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไข การตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน.....	66
รูปที่ 4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไข การตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน.....	67
รูปที่ 4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไข การตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน.....	68

รูปที่ 4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไข การตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน	106
รูปที่ 4.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไข การตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน	107
รูปที่ 4.49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไข การตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน	108
รูปที่ 4.50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไข การตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน	109
รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัด	110
รูปที่ 4.52 NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลความลึกของมีดกัด	113
รูปที่ 4.53 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกของมีดกัด	114
รูปที่ 4.54 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกของมีดกัด	115
รูปที่ 4.55 แสดงการนำสมการประมาณค่าความลึกของดอกกัดไปใช้งาน	118
รูปที่ 4.56 แสดงความแม่นยำของสมการภายในช่วงเงื่อนไขการตัด	120
รูปที่ 4.57 แสดงความแม่นยำของสมการภายนอกช่วงเงื่อนไขการตัด	121
รูปที่ 4.58 ทดสอบความแม่นยำของสมการที่เวลาในการตัดจริง	121

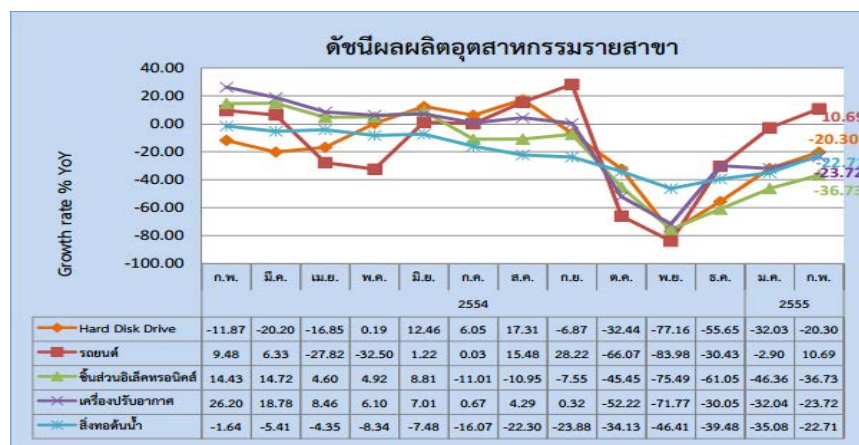
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 อุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทยกำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มขึ้นอีกด้วย อันเนื่องมาจากประเทศไทยเป็นฐานการผลิตที่สำคัญในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากประเทศไทยมีแรงงานฝีมือที่มีคุณภาพและมีค่าจ้างที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ จึงทำให้เป็นข้อได้เปรียบในส่วนนี้ และนอกจากนี้ประเทศไทยยังมีอุตสาหกรรมหลักๆ ที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศได้แก่ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น จากข้อมูลดัชนีผลผลิตในปี 2555 ของกระทรวงอุตสาหกรรมพบว่ามีการเติบโตของอุตสาหกรรมหลักตามที่ได้กล่าวไปนั้นถึงร้อยละ 48.13 เมื่อเทียบกับข้อมูลช่วงปี 2554 หลังเกิดวิกฤตอุทกภัยในประเทศไทย ตามรูปที่ 1.1 ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องใช้วัตถุดิบเป็นปัจจัยพื้นฐานในการผลิต โดยวัตถุดิบสำคัญที่ใช้เป็นปัจจัยในการผลิตคือ วัสดุประเภทเหล็กซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel)



รูปที่ 1.1 ข้อมูลดัชนีผลผลิตในปี 2554-2555 (ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม)[21]

ซึ่งจากข้อมูลดัชนีผลผลิตในปี 2554-2555 นั้น สอดคล้องกับ รายงานปริมาณการนำเข้าเครื่องจักรกลในงานอุตสาหกรรมจัดทำโดยสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย พบว่ามีอัตราการนำเข้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกๆปีเช่นเดียวกัน



Mil Baht	2009	2010	2011	2012	2013	
					Jan	Feb
เครื่องมือกล	46,634	72,223	90,311	113,664	7,938	6,287
เครื่องจักรกลการเกษตร	26,775	31,258	31,604	18,328	1,374	1,291
เครื่องจักรอุตสาหกรรม	264,802	298,289	348,750	404,381	32,784	26,606
รวมมูลค่า	338,212	401,771	470,666	536,372	42,096	34,183

รูปที่ 1.2 มูลค่าการนำเข้าเครื่องจักรกล ปี 2009-2013

(ที่มา: สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย)[22]

จากข้อมูลที่ได้ นั้น จะเห็นว่าเทคโนโลยีในการพัฒนาเครื่องจักรกลในประเทศไทยนั้นยังต้องพึ่งพา ความรู้จากต่างประเทศเป็นหลัก ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้ทำให้ประเทศไทยเสียดุลการค้าต่อต่างประเทศ และที่สำคัญคือ ความรู้ความสามารถที่จะพัฒนาให้เครื่องจักรกลมีความทันสมัยนั้น ไม่ได้ถูกพัฒนาเช่นกัน จากเหตุผลนี้ เพื่อเป็นการพัฒนาเครื่องจักรกลให้มีความเป็นอัจฉริยะ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้ทำการทดลองเพื่อพัฒนาระบบการตรวจติดตามการทำงานของเครื่องจักรขณะทำงานจริง โดยได้ทำการสร้างสมการการพยากรณ์ความถี่ของดอกกัดในกระบวนการกัด ซึ่งทำการศึกษาในชิ้นงานที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนนั้นเป็นชิ้นงานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมปัจจุบัน

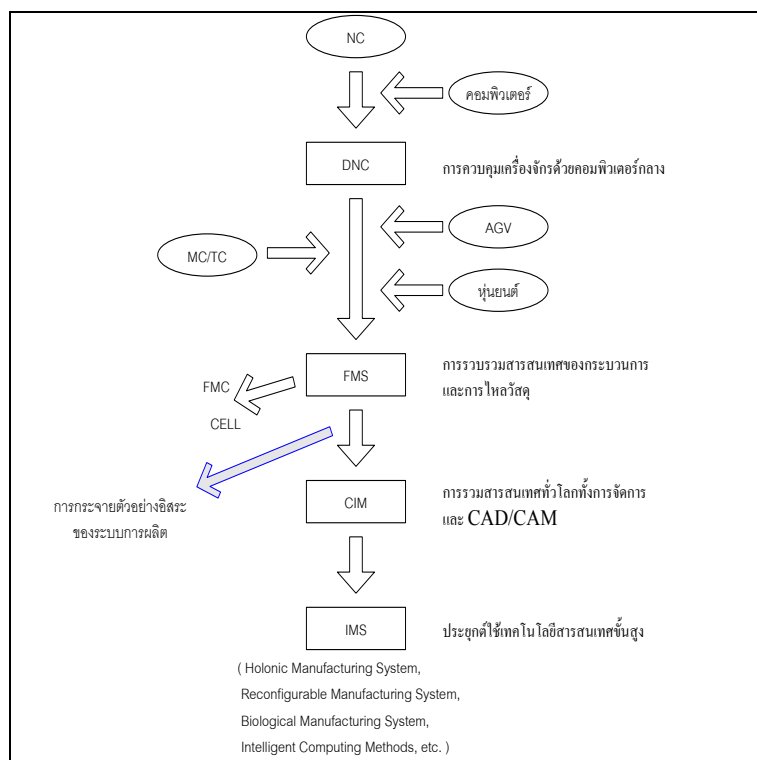
เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุประเภทโลหะ ที่ถูกนำมาเป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับอุตสาหกรรม การผลิต และเป็นที่ยอมรับอย่างมากในการนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนในเครื่องจักรกลต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ เป็นต้น กระบวนการกัด เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง ที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปวัสดุต่างๆ เพื่อให้ได้ ชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ ในปัจจุบันด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ในส่วนของกรรมวิธีการผลิตจึงจำเป็นต้องเป็นการผลิตแบบ ขึ้นสูง ดังนั้นจึงมีการนำเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเข้ามาช่วยในการผลิต โดยเฉพาะเครื่องซีเอ็นซีแมชชีน ึ่งเซ็นเตอร์เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะเครื่องจักรประเภทนี้เป็นเครื่องจักรที่จะทำงาน โดยระบบชุดคำสั่งที่จะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะ ซับซ้อนได้ดี สามารถทำงานได้รวดเร็ว ในกรณีที่เป็นการผลิตในจำนวนมากๆและต้องการความ แม่นยำสูง เครื่องจักรซีเอ็นซีแมชชีนึ่งเซ็นเตอร์จะช่วยเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้งานเครื่องจักรกลซีเอ็นซีให้เกิดประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ด้วย ได้แก่ อัตราการป้อนตัดชิ้นงาน ความเร็วตัด ความลึกตัด ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะส่งผล กระทบโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงาน

กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการใช้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีนั้น ในปัจจุบันนั้นได้เข้ามามี บทบาทอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ อย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องทางด้านเทคโนโลยีการผลิตและการพัฒนาด้านบุคลากร ของอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ของประเทศ ทั้งการผลิตผลิตภัณฑ์โลหะ ผลิตภัณฑ์พลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง และอื่นๆ ซึ่งแม่พิมพ์ที่นำมาใช้จึงมีหลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับวัสดุ เช่น แม่พิมพ์ โลหะ แม่พิมพ์พลาสติก แม่พิมพ์ยาง แม่พิมพ์แก้ว และอื่นๆ และแม่พิมพ์ที่นิยมใช้กันมากทั้งใน และต่างประเทศ ได้แก่ แม่พิมพ์โลหะและแม่พิมพ์พลาสติก ซึ่งนำไปใช้ในเกือบทุกอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสไดรฟ์ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนและยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมของเด็กเล่น และอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติก เป็นต้น เนื่องจากแม่พิมพ์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีรูปร่างเหมือนๆ กัน ได้ครั้งละ จำนวนมากๆ ทำให้สินค้ามีคุณภาพและมาตรฐานเดียวกัน รวมทั้งช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มและสร้างขีด ความสามารถและความได้เปรียบในการแข่งขันสูงในแต่ละอุตสาหกรรม ปัจจุบันไทยมีโรงงานทำ แม่พิมพ์เพียง 3%จากทั้งหมด 2000 โรงงาน ที่สามารถผลิตแม่พิมพ์ที่ได้คุณภาพและมี

ประสิทธิภาพความเที่ยงตรงสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ในประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตงานที่มีคุณภาพและความถูกต้องแม่นยำสูงได้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบการผลิตโดยเครื่องจักรซีเอ็นซีให้มีคุณภาพการทำงานที่สูงขึ้น มีความอัจฉริยะสามารถตัดสินใจในขณะผลิตงานได้เอง เพื่อให้ได้งานที่มีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งการที่เครื่องจักรสามารถตัดสินใจได้นั้น สามารถช่วยในการลดเวลาในการทำงานของคน ทำให้ลดต้นทุนในการผลิตและช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตสูงขึ้น

1.1.2 ภาพรวมของสภาวะการผลิต

ปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจมีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงเพิ่มสูงขึ้น เพื่อให้ธุรกิจสามารถแข่งขันกับคู่แข่งได้ ดังนั้นการผลิตสินค้าจึงไม่ได้คำนึงถึงปริมาณเป็นหลักเพียงอย่างเดียว แต่จะต้องเป็นการผลิตที่ได้คุณภาพ มีความเที่ยงตรง และส่งมอบให้ทันเวลาที่กำหนดด้วย จากอดีตที่ผ่านมาพบว่า เทคโนโลยีควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซีได้ถูกพัฒนาไปอย่างมาก โดยเฉพาะเครื่องจักรกลเชิงปัญญา ซึ่งเป็นเป้าหมายในการพัฒนาเครื่องจักร ในอนาคต เนื่องจากมีความสามารถตัดสินใจแทนผู้ปฏิบัติงานและเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของการตัดได้โดยอัตโนมัติ ในขณะที่เครื่องจักรกลปัจจุบันจะต้องกำหนดเงื่อนไขการตัดให้แน่นอนก่อนที่จะเริ่มทำการตัด โดยในการพัฒนาการผลิตที่ผ่านมาได้มีการพยายามที่จะใช้ระบบการควบคุมเชิงตัวเลขมาใช้ ทำให้ เครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข ที่ถูกพัฒนา นั้น มีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลแบบธรรมดา อัตราผลิตภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วยการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิต (Non-productive time) ในวัฏจักรการผลิตลง จากนั้น เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนหลายเครื่องได้ถูกพัฒนา และนำมาใช้ในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ซึ่งเครื่องจักรกลซีเอ็นซีสมัยใหม่ได้มีการติดตั้งชุดเปลี่ยนเครื่องมืออัตโนมัติ ทำให้ช่วยลดเวลาการเปลี่ยนเครื่องมือตัดลงได้มาก ความก้าวหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือ การควบคุมที่สามารถปรับได้ (Adaptive control, AC) กระบวนการตัดได้ถูกรวมอยู่ในวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องจักร เช่นเซอร์หลายรูปแบบได้ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเพื่อตรวจจับสถานะของการตัดเพื่อที่จะป้อนกลับสารสนเทศต่างๆ ด้วย โดยภาพรวมของการพัฒนาเครื่องจักรกลได้การผลิตจากอดีตที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล

จากการศึกษาพบว่าประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำของโลกได้หันมาลงทุนในประเทศไทยเพื่อเป็นฐานการผลิต ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสไดรฟ์ อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วน อุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และรวมถึงอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ก็ยิ่งมีการเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆ ดังจะเห็นได้จากยอดการส่งออกชิ้นส่วนยานยนต์ของประเทศไทยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งโดยปกติแล้วการผลิตแม่พิมพ์จะใช้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีช่วยในการผลิต เนื่องจากเครื่องจักรกลประเภทนี้มีความยืดหยุ่นในการทำงานที่สูงมาก และประกอบกับโดยส่วนใหญ่แล้วแม่พิมพ์จะมีรูปร่างที่ซับซ้อน ต้องการความแม่นยำสูง ถ้าจะขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรกลทั่วไปไม่สามารถทำได้ และเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนึงเซ็นเตอร์ก็สามารถทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดี ในการผลิตแม่พิมพ์นั้นโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้การขึ้นรูปโดยกระบวนการกัดเป็นหลัก ด้วยคุณสมบัติต่างๆของการขึ้นรูปด้วยวิธีการกัดด้วยดอกกัดหัวบอล[4] คือ

1. เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกัดด้วยดอกกัดหัวบอลนั้นสามารถประยุกต์ได้อย่างกว้างขวางกับวัสดุหลายประเภท โดยส่วนใหญ่จะใช้กับวัสดุประเภทโลหะแข็ง รวมถึงพลาสติกและพลาสติกผสม(Plastic composite) สำหรับเซรามิกนั้นการกัดทำได้ยากเนื่องจากเซรามิกมีความแข็งสูง(Hardness) และมีความเปราะ อย่างไรก็ตามเซรามิกสามารถขึ้นรูปด้วยการกัดได้ โดยวิธีการขัดด้วยผง(Abrasive machining process)
2. สามารถใช้ในการทำชิ้นงานที่มีรูปร่างหลากหลาย รวมถึงชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยการใช้วิธีการกัดหลายๆแบบและหลายๆขั้นตอน ตามรายละเอียดชิ้นงาน
3. สามารถผลิตชิ้นงานที่มีค่าความคลาดเคลื่อนหรือพิสัยความเผื่อ (Tolerance) 0.001 นิ้ว (0.025 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่ากระบวนการผลิตส่วนใหญ่
4. มีความสามารถผลิตผิวสำเร็จ(surface finish) ของชิ้นงานให้มีความเรียบ 16 μin (0.4 μm) หรือดีกว่า

สำหรับกระบวนการผลิตแม่พิมพ์โลหะนั้น จะมีการใช้วัสดุในการทำอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ เหล็กหล่อและเหล็กหล่อเครื่องมือ ซึ่งจะมีความแข็งอยู่ที่ 58 – 63 HRC ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีทนต่อการกัดกร่อนได้สูง ในการที่จะใช้กระบวนการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์นั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ดอกกัดที่มีความแข็งแรงสูง และใช้ความเร็วรอบในการตัดสูง ดอกกัดที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ คือ ดอกกัดประเภทเคลือบผิว ซึ่ง การเคลือบผิวของเครื่องมือตัดจะสามารถทำให้ใช้กับการตัดแบบอัตราการผลิตที่สูงๆได้ ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงานและลดต้นทุนในการตัด การเคลือบผิวของเครื่องมือตัดจะทำให้ลดเวลาการตัดลงได้ถึง 4 เท่า นอกจากนั้นการเคลือบผิวเครื่องมือตัดจะทำให้อายุมีตัดนานกว่ามีดตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารเคลือบที่ใช้กันได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เคลือบแล้วจะมีความเสียดทานต่ำ มีความแข็งแรงสูง ด้านทานอุณหภูมิที่สูง และเป็นสารที่มีความเหนียว การเคลือบผิวมีดตัดด้วยสารจะสามารถใช้ในการตัดที่อัตราการผลิตสูง และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เคลือบอยู่บนทั้งสแตนคาร์ไบด์ จะทำให้สามารถต้านทานการสึกหรอของ หน้าหลอมตัวได้สูง ด้วยเหตุนี้ ดอกกัดประเภทเคลือบผิวจึงเป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการกัดอย่างแพร่หลาย

1.1.3 การพัฒนาการประมาณการสึกหรอของเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ส่วนใหญ่จะเป็นมีดตัดแบบหัวบอล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีดตัดหัวบอลจะมีราคาที่สูงและเหมาะสำหรับการกำจัดเนื้อวัสดุออกทีละน้อยๆ แต่จากการต้องเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้สูงขึ้น จึงมีความต้องการที่จะกำจัดเนื้อวัสดุให้ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องใช้เงื่อนไขการกัดที่สูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มีดตัดสึกหรอเร็วขึ้น และส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนของเครื่องมือตัดสูงตามไปด้วย ปัญหาการสึกหรอของมีดตัดเป็นปัญหาสำคัญในการบวนการกัด เพราะจะทำให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานไม่ได้ตามข้อกำหนด ทั้งในด้านขนาดและความเรียบผิว จึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนมีดตัดบ่อย การเปลี่ยนมีดตัดบ่อยนอกจากจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับมีดตัดเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้เสียเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่อีกด้วย ปัญหาการสึกหรอของมีดตัดจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อผลิตภาพของกระบวนการกัด

ด้วยเหตุนี้การตรวจติดตามจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะถูกพัฒนาเพื่อให้เครื่องจักรสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการได้ สำหรับการตรวจติดตามนั้นจะมีอยู่ 2 แบบ คือ การตรวจติดตามทางตรงและการตรวจติดตามทางอ้อม โดยการตรวจติดตามทางตรงนั้นจะเป็นการตรวจสอบที่เครื่องมือตัดโดยตรง จึงจำเป็นที่จะต้องหยุดกระบวนการผลิตชั่วคราวและนิยมใช้กันในอดีต ส่วนการตรวจติดตามทางอ้อมนั้นเป็นระบบที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อเพิ่มความเป็นอิสระให้เครื่องจักร โดยจะทำการตรวจติดตามสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ เช่น สัญญาณแรง ความสั่นสะเทือน สัญญาณเสียง เป็นต้น ดังนั้นการตรวจติดตามทางอ้อมจึงสามารถทำได้โดยที่ไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิตและสามารถตรวจสอบได้ตลอดเวลาของการดำเนินการ ในส่วนของการตรวจติดตามขนาดความสึกหรอของมีดกัดนั้น เป็นการตรวจติดตามทางอ้อม โดยใช้สัญญาณของแรงตัดที่ได้ในขณะที่ตัดมาทำการประมาณการขนาดความสึกหรอของมีดกัด

จากอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษารูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือตัดต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดความสึกหรอของเครื่องมือตัดกับปัจจัยต่างๆในการตัด มีตัวอย่างดังนี้

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยในอดีตที่ศึกษาการสึกของเครื่องมือตัดและการประยุกต์ใช้สัดส่วนแรงตัด

งานวิจัย	รายละเอียด	ข้อสรุป
1	ทำการศึกษา เพื่อ พัฒนาระบบการตรวจจับการสึกหรอของมีดตัดขณะทำงานของเครื่องกลึง โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกของมีดกลึง กับ ค่าความต้านทานการ ซึ่งได้จากการปรับอัตราการป้อนในขณะตัด[8]	ค่าความต้านทานการตัด สามารถที่จะเป็นตัวชี้วัดอัตราการสึกหรอของมีดตัดได้เป็นอย่างดี ดังนั้นอัตราการป้อนจึงมีผลต่อการสึกหรอของมีดกลึง
งานวิจัย	รายละเอียด	ข้อสรุป
3	ทำการศึกษาเพื่อสร้างสมการในการประมาณการความขรุขระของผิวชิ้นงานในขณะทำงานจริงของกระบวนการกัด โดยใช้สัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นขณะกัดชิ้นงาน ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแรงตัดในแกนXกับแรงตัดในแกนZ [9]	การนำสัดส่วนของแรงมาสร้างสมการนั้นสามารถที่จะประมาณการความขรุขระของผิวได้อย่างแม่นยำโดยที่ไม่มีปัจจัยอื่นรบกวน แม้ว่าเงื่อนไขในการตัดตัวอื่น เช่น ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ความลึกและรัศมีดอกกัดจะเปลี่ยนไปก็ตาม
4	ศึกษาการเกิดความขรุขระผิวของชิ้นงานในกระบวนการกลึงซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงตัดในกระบวนการกลึง เพื่อพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงาน โดยการประยุกต์ใช้สัดส่วนแรงตัด [10]	การนำสัดส่วนของแรงตัดพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระนั้นมีความแม่นยำสูง แม้ว่าเงื่อนไขในการตัดตัวอื่น เช่น ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ความลึกและรัศมีดอกกัดจะเปลี่ยนไปก็ตาม
5	ทำการศึกษากลไกการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการตัดความเร็วสูง ด้วยการตัดเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งที่มีความแข็งมากกว่า 50 HRc [20]	การตัดชิ้นงานภายใต้ความเร็วรอบตัดสูงจะทำให้อุณหภูมิในขณะตัดสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดออกไซด์ของสารเคลือบผิวเมื่อสารเคลือบที่ปลายมีดตัดถูกทำลายการสึกหรอก็ยิ่งเพิ่มขึ้น

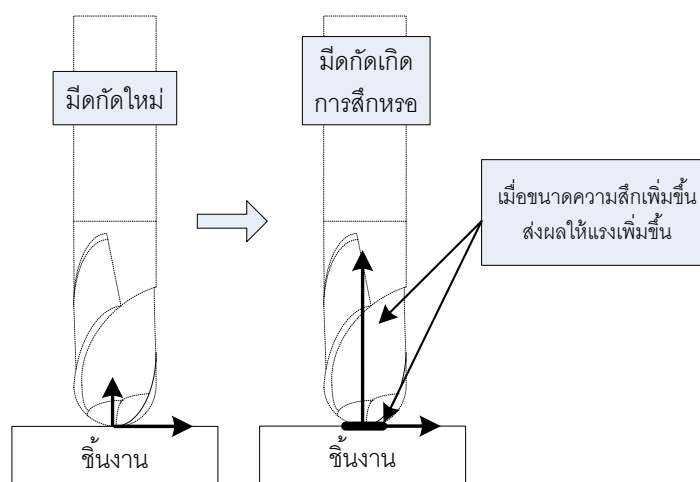
6	<p>ทำการศึกษาการพยากรณ์อายุของเม็ดตัด ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบในงานกัด ไทเทเนียมอัลลอยด์ด้วยเม็ดตัดคาร์ไบด์ ชนิดไม่เคลือบ ผิว ภายใต้สภาวะการตัดแบบแห้ง [15]</p>	<p>ความเร็วตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออายุของเม็ดตัด ตามด้วยอัตราป้อนตัดและความลึกตัด ตามลำดับ เมื่อปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้อายุของเม็ดตัดลดลง</p>
7	<p>ทำการศึกษาแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโดยเม็ดกัดชนิดหวับอล เพื่อต้องการพัฒนาระบบการควบคุมเครื่องจักรให้เป็นอัจฉริยะ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนารูปแบบของสมการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด [13]</p>	<p>ผลที่ได้จากการทดลองนั้น คือ สมการที่สามารถ ตรวจสอบติดตามแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดด้วยเม็ดกัดแบบหวับอล ซึ่งพารามิเตอร์ ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัด อัตราป้อนตัด ขนาดเม็ดกัด ความลึกในการกัดและแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด</p>
8	<p>ทำการศึกษาแรงประกอบที่เกิดขึ้นในขณะตัด ของกระบวนการกัดโดยเม็ดกัดแบบหัวตัด (End Mill) เพื่อพัฒนาระบบการตรวจติดตามความสึกหรอของเม็ดกัด โดยทำการวิเคราะห์หาสัญญาณของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด ซึ่งจะสามารถบอกขนาดความสึกของเม็ดกัดได้ [17]</p>	<p>ระบบการตรวจติดตามที่ได้ จะถูกใช้ ร่วมกับการตัดสินใจของคน เนื่องจากกรณีที่มีแรงตัดสูงๆระบบไม่สามารถคำนวณขนาดความสึกของเม็ดกัดได้ และสามารถส่งย้อนกลับให้เครื่องปรับอัตราป้อนตัดให้เหมาะสมกับความสึกในขณะนั้น</p>

จากตัวอย่างของงานวิจัย พบว่าในอดีตนักวิจัยได้มีความพยายามที่จะพัฒนาให้เครื่องจักรมีความเป็นอัจฉริยะ สามารถที่จะวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ในขณะทำงานได้ เพื่อระบุปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และความสึกหรอของเครื่องมือตัดก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ได้ถูกให้ความสำคัญอย่างมาก จึงมีการศึกษาวิจัยเรื่องดังกล่าวกันอย่างแพร่หลาย

ในงานวิจัยบางงานที่น่าสนใจ พบว่าได้มีการใช้สัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด มาใช้ในการประมาณค่าความขรุขระของผิวชิ้น โดยสมการการประมาณค่าความขรุขระผิวที่ได้นั้นมีความแม่นยำสูงมาก และสามารถใช้งานได้แม้จะเปลี่ยนเงื่อนไขการกัดใหม่ก็ตาม และ

จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวเพิ่มเติมพบว่าความขรุขระผิวของชิ้นงานนั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดความลึกของมีดกัด โดยขนาดความลึกของมีดกัดที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความขรุขระของมีดกัดเพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าว งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้สัดส่วนแรงตัดมาทำการพัฒนาสมการการประมาณขนาดความลึกหรือของมีดกัด เพื่อเป็นรูปแบบในการพัฒนาระบบควบคุมเครื่องจักรให้มีความเป็นอัจฉริยะยิ่งขึ้น โดยมีกรอบแนวความคิดว่าสัดส่วนของแรงตัดนั้น น่าจะมีความสัมพันธ์กับขนาดความลึกของมีดกัดในลักษณะเดียวกันกับความขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงแนวความคิดในการใช้ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดมาประมาณขนาดความลึกของมีดกัด

จากรูปที่ 1.4 แสดงแนวความคิดที่ว่าเมื่อขนาดความลึกเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงในแนวตั้งฉากจึงแปรผันต่อความลึกของมีดกัดโดยตรง และแม้ว่าจะเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดไปอย่างไร ก็สามารถนำสัดส่วนของแรงตัดมาประมาณขนาดความลึกของมีดกัดได้เช่นเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอของมีดกัดหัวบอลและแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X

ความเร็วรอบการตัด(รอบต่อนาที)	8000 10000 และ 12000
อัตราการป้อนตัด(มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.02 0.06
ความลึกตัด(มิลลิเมตร)	0.3 0.7
เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)	6 8

วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) ขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร ซึ่งมีความแข็งไม่เกิน 235 HB

2. มีดตัดที่ใช้เป็นมีดกัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร
3. การสึกหรอของมีดกัดจะกำหนดจากการสึกหรอบนมีดกัด Central wear ที่ขนาดของการสึกหรอต่างๆ โดยไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร(ตามมาตรฐาน ANSI/ASME B94.55-1985) โดยทำการวัดแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัด
4. กำหนดค่าเครื่องออสซิลโลสโคป โดยตั้งค่าต่างๆ ดังนี้
 - Low-pass filter = 500 Hz.
 - Sampling rate = 1 kS/s
5. ทำการเก็บข้อมูลซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของแบบจำลองการประมาณค่าอายุการใช้งานของมีดตัดที่ได้ แต่เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการตัดมีราคาที่สูงจึงเลือกทำการเก็บข้อมูลซ้ำเพียง 2 ครั้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรอัจฉริยะในอนาคต ในการประมาณการสึกหรอของกระบวนการตัดแบบอื่น
2. สามารถพยากรณ์อายุของมีดกัดได้ จากแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะกัดชิ้นงานจริง เพื่อใช้ในการวางแผนการผลิตและควบคุมปริมาณของเสีย อันเกิดมาจากการสึกหรอของมีดกัด

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดกัดและความเรียบผิวชิ้นงานจากกระบวนการกัดโยมีดกัดแบบหับอลได้ในขณะกัดงานจริง

1.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและสำรวจงานวิจัยต่างๆ รวมถึงตรวจสอบปัจจัยในกระบวนการกัดเหล็กกล้าที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน
2. ออกแบบการทดลองและกำหนดเงื่อนไขในการตัดที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน เหล็กกล้ารวมถึงการออกแบบติดตั้งเครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์
3. ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยและวิเคราะห์ผลการตัดสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง (Dry cutting) บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้า
4. ตรวจสอบการสึกหรอของมีดตัด
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยหลักการ ถดถอยเชิงพหุ ร่วมกับวิธีกำลังสองน้อยที่สุด
6. สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

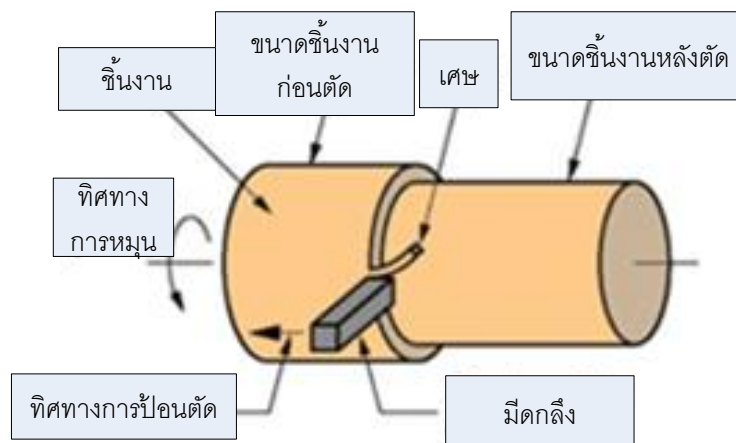
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

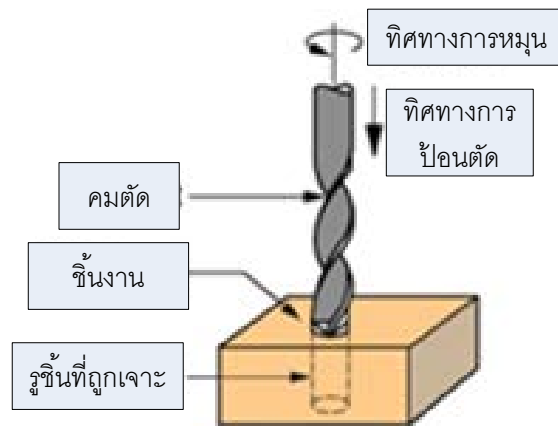
2.1.1 กระบวนการตัด (Machining process)

กระบวนการตัดหมายถึง กระบวนการขจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากชิ้นงาน ในรูปของเศษโลหะ ถ้าชิ้นงานเป็นโลหะแล้วกระบวนการนั้นมักจะถูกเรียกว่ากระบวนการตัดโลหะ โดยการใช้เครื่องมือตัดเพื่อกำจัดส่วนเกินของเนื้อวัสดุ เพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ กระบวนการตัดมีข้อดี คือ ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท สร้างชิ้นงานให้มีขนาดและรูปทรงต่างๆ ได้ มีความแม่นยำสูง และผิวสำเร็จของชิ้นงานมีคุณภาพดี เป็นต้น แต่กระบวนการตัดก็มีข้อเสียคือ เศษตัดที่ต้องทิ้งเยอะและใช้เวลาในการตัดนาน เป็นต้น รูปที่ 2.1 ถึง รูปที่ 2.3 แสดงถึงกระบวนการตัดที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ

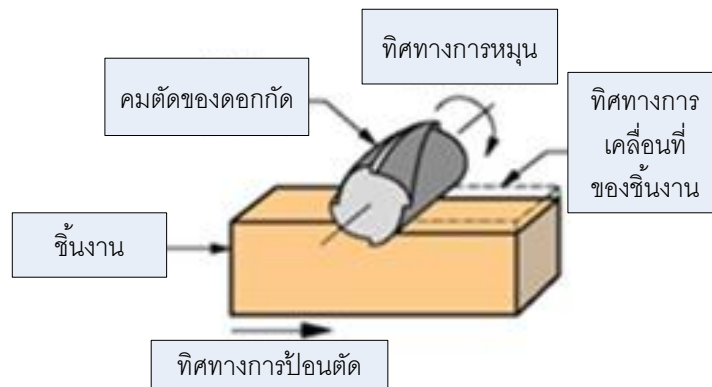
ในปัจจุบันกระบวนการตัดได้พัฒนาไปอย่างมากทั้งทางด้านเครื่องมือกล วัสดุ และการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำให้ปัจจุบันสามารถผลิตชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างแพร่หลายจนแทบจะกล่าวได้ว่าสิ่งของที่ผลิตขึ้นมาเกือบทั้งหมดจะต้องผ่านหรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการตัด



รูปที่ 2.1 กระบวนการกลึง [1]



รูปที่ 2.2 กระบวนการเจาะ [1]

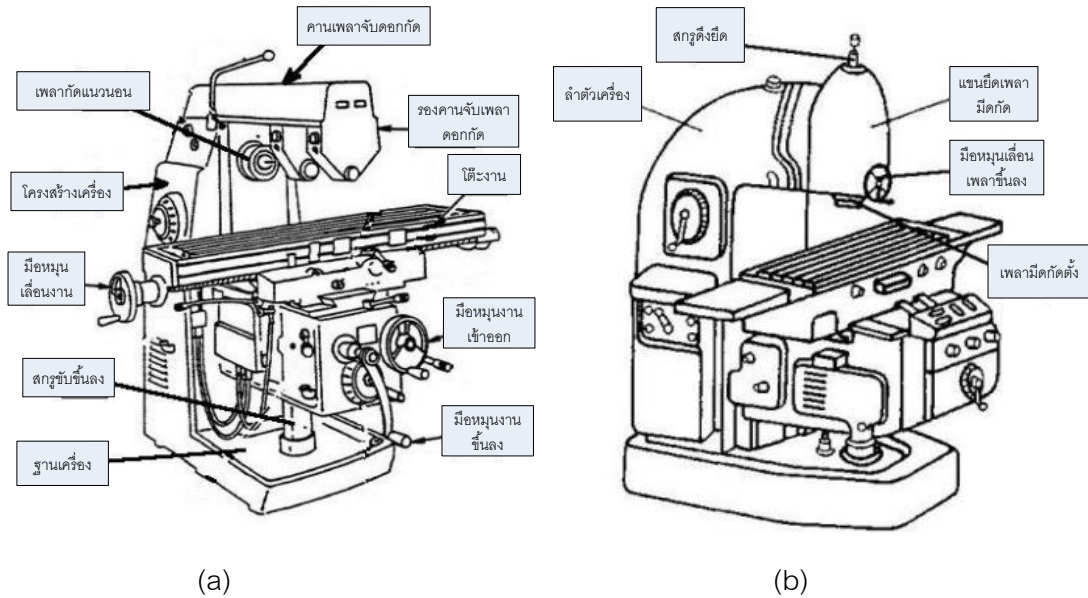


รูปที่ 2.3 กระบวนการกัด [1]

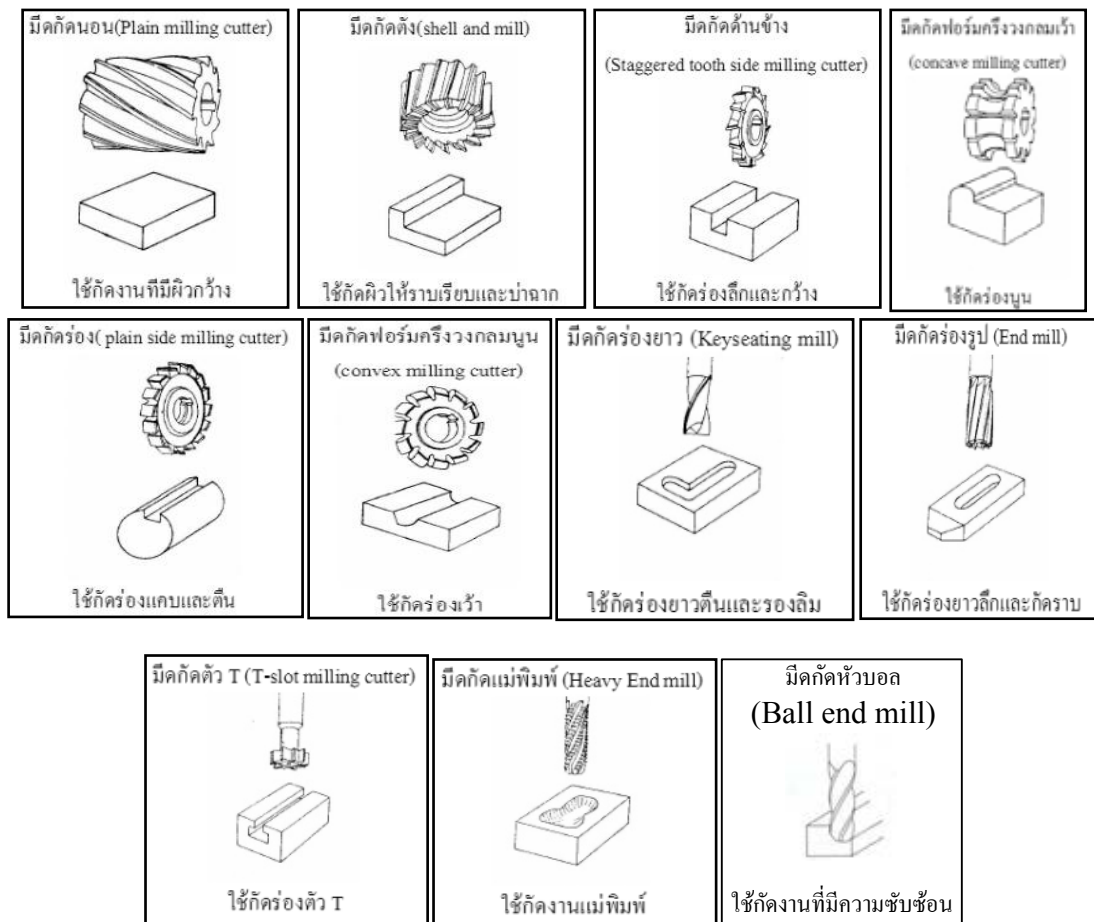
นอกจากนี้ กระบวนการตัดสามารถแบ่งตามชนิดของเครื่องมือตัดได้เป็น การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดคมตัดเดียว การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดหลายคมตัด และการตัดที่ใช้ล้อหินเจียร

2.1.2 เครื่องกัดและกระบวนการกัด (Milling machine and milling process)

เครื่องกัดเป็นเครื่องมือกลพื้นฐานที่สำคัญชนิดหนึ่งในงานขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งเครื่องกัดได้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่างๆ จึงทำให้เครื่องกัดมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันอย่างมาก อย่างไรก็ตามหากจะแบ่งประเภทของเครื่องกัดตามลักษณะแกนหมุนจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องกัดแนวนอน (Horizontal milling machine) และเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเครื่องกัดทั้งสองชนิดนี้ มีความเหมาะสมกับประเภทของงานที่ต่างกัน รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของงานตามชนิดของมีดกัด



รูปที่ 2.4 ประเภทของเครื่องกัด (a) เครื่องกัดแนวขนอน (b) เครื่องกัดแนวตั้ง



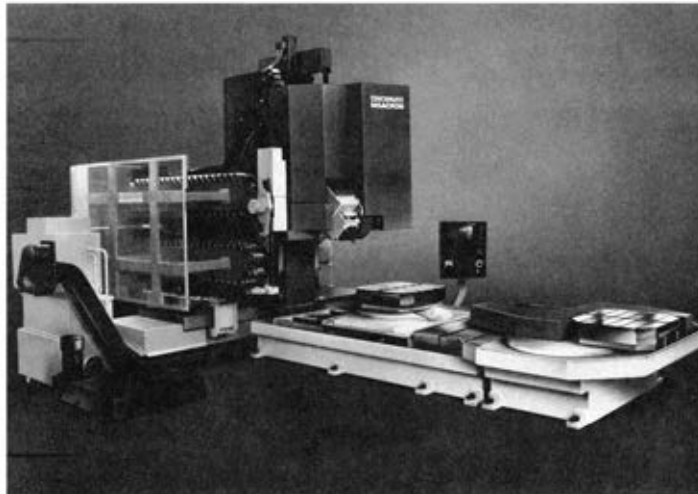
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของงานตามชนิดของมีดกัด

สำหรับมีดกัดหัวบอลได้รับการออกแบบให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและให้ความน่าเชื่อถือที่ดีกว่าในงานกัดดอกแบบ หัวกัดที่ให้อัตราการขจัดเศษสูงสามารถใช้อัตราป้อนสูงได้เนื่องจากการออกแบบที่แข็งแรงและจำนวนฟันตัดสองด้านที่มีประสิทธิภาพ เม็ดมีดและหัวกัดมีความแข็งแรง ให้ความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือสูงสุด เหมาะสำหรับการผลิตแบบไม่ใช้คนควบคุม เครื่องจักร ใช้ได้กับอัตราป้อนที่สูงมาก



รูปที่ 2.6 มีดกัดหัวบอล

ในปัจจุบันนี้งานด้านเทคโนโลยีการผลิตได้ก้าวหน้าไปอย่างมาก เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในด้านการผลิตซึ่งต้องการปริมาณการผลิตสูงๆ ในระยะเวลาอันสั้น และการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน จึงมีการพัฒนาเครื่องกัดให้มีความยืดหยุ่นในการผลิตโดยการพัฒนาเป็นเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (CNC machining center) ซึ่งสามารถทำงานได้หลากหลายมากขึ้น และช่วยลดรอบระยะเวลาในการผลิตให้สั้นลง เนื่องจากการจับยึดชิ้นงานเพียงครั้งเดียวสามารถทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จหรือเกือบสำเร็จได้เลย ซึ่งในส่วนนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการจับยึดชิ้นงานลงได้ เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ [4]

2.1.3 เงื่อนไขการตัดในกระบวนการกัด (Cutting conditions in milling process)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เครื่องกัดเป็นเครื่องมือกลพื้นฐานที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในงานอุตสาหกรรม หากจะแบ่งประเภทของเครื่องกัดตามลักษณะแกนหมุนจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องหมุนกัดแนวนอน (Horizontal milling machine) และเครื่องหมุนกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) ซึ่งเครื่องกัดทั้งสองชนิดนี้ มีความเหมาะสมกับประเภทของงานที่ต่างกัน ความเร็วตัดสำหรับงานกัดในกรณีดอกกัดหัวบอล (Ball-nose end milling) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-1

$$N = \frac{1,000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (2-1)$$

โดยที่ N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกัด (มิลลิเมตร)

V_c = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

ส่วนอัตราป้อนชิ้นงานสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร / นาที ได้ดังสมการที่ 2-2

$$V_f = f_z \times Z \times N \quad (2-2)$$

โดยที่	V_f = อัตราป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร /นาที่)
	f_z = อัตราป้อนมีดตัด (มิลลิเมตร /รอบ)
	Z = จำนวนฟัน
	N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที่)

อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (Material removal rate, MRR) บ่งบอกถึงปริมาตรของวัสดุชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือน (กัด) ออกไปต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร /นาที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-3

$$MRR = 0.001 \times a_r \times a_a \times V_f \quad (2-3)$$

โดยที่	MRR = อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (ลูกบาศก์เซนติเมตร /นาที่)
	V_f = อัตราป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร /รอบ)
	a_r = ความกว้างตัด (มิลลิเมตร)
	a_a = ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

2.1.4 การสึกหรอของมีดตัด (Tool Wear)

ในการตัดชิ้นงาน มีดตัดจะต้องทนต่อแรงและอุณหภูมิที่สูงในระหว่างการตัด ถ้าแรงในการตัดมากเกินไปจะทำให้มีดตัดหักได้ หรือถ้าอุณหภูมิมีดสูงเกินไปจะทำให้มีดตัดอ่อนและเสื่อมได้เร็วเช่นเดียวกัน เทคโนโลยีด้านมีดตัดจะให้ความสำคัญกับประเด็นหลัก 2 ประการคือ เรื่องวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดและรูปร่างของมีดตัด ทั้งนี้ก็เพื่อให้อายุการใช้งานของมีดตัดนานขึ้น ในด้านวัสดุของมีดตัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรง อุณหภูมิ และการสึกหรอในกระบวนการตัด ส่วนในด้านรูปทรงของเครื่องมือตัดจะพัฒนาเกี่ยวกับการหารูปทรงที่เหมาะสมของมีดตัดสำหรับวัสดุของมีดตัด และสำหรับกระบวนการตัดความเสียหายของมีดตัดเกิดขึ้นได้ด้วยสาเหตุหลักๆ 3 อย่าง ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้ว การสึกหรอของมีดตัดจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear) ซึ่งกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษขี้โลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดเสียหายของมีดตัด

รูปแบบการเสียหาย	สาเหตุ	ผลลัพธ์
1. Fracture failure	แรงในการตัดมากเกินไป	เครื่องมือตัดแตกทันที
2. Temperature failure	อุณหภูมิในการตัดสูง	เครื่องมือตัดจะอ่อนและเสียรูป จนทำให้ความคมของมีดตัดลดลง
3. Gradual wear	เกิดการสึกหรอของคมตัด	เนื้อมีดตัดจะหายไปบางส่วน ทำให้ประสิทธิภาพในการตัดลดลง เกิดการสึกอย่างรวดเร็วจนสุดท้ายแล้วความเสียหายจะคล้ายกับความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ

กลไกต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งกลไกการสึกหรอทั้ง 5 แบบจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นในสภาวะที่ใช้ความเร็วในการตัดสูงๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลไกการสึกหรอแบบ Diffusion และ Chemical reaction จะยิ่งเกิดง่ายที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด [1]

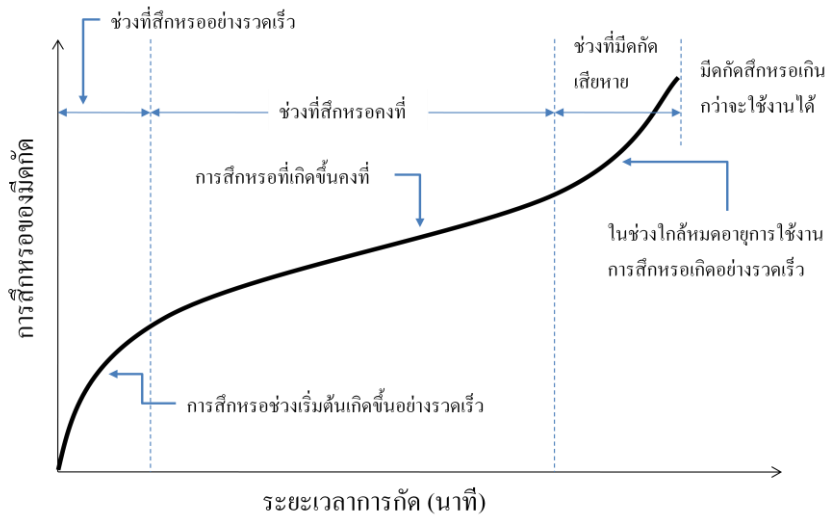
กลไกการสึกหรอ	สาเหตุ	ผลลัพธ์
การขูดขีด (Abrasion)	อนุภาคที่แข็งของชิ้นงานจะทำให้บางส่วนเครื่องมือตัดค่อยๆ หลุดติดออกมา	ทำให้เกิดรอยสึกหรอบนผิวหลบและผิวคาย
การยึดติด (Adhesion)	โลหะสองอย่างถูกทำให้ติดกันภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
การแพร่ (Diffusion)	เกิดการแลกเปลี่ยนอะตอมกันระหว่างผิวหน้าของวัสดุ 2 ชนิด อะตอมของมีดตัดจะหายไป ความแข็งแรงลดลง ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก abrasion และ adhesion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย

ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction)	ความเร็วตัดสูงและอุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เครื่องมือตัดอ่อนลง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
การเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation)	เกิดอุณหภูมิที่สูงบริเวณคมตัด คมตัดจะเริ่มเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก abrasion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวหลบ

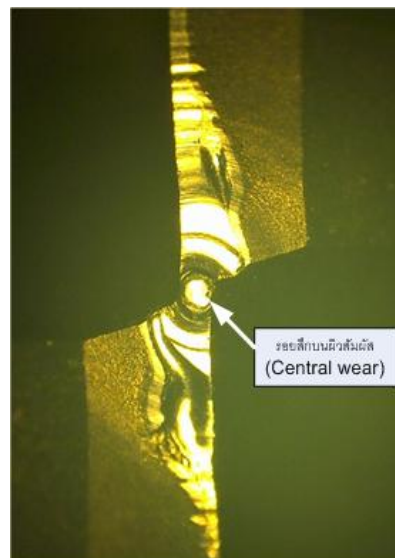
2.1.5 อายุของเครื่องมือตัด (Tool life)

อายุเครื่องมือตัด หมายถึง เวลาตัดโดยนับจากเครื่องมือเริ่มต้นใช้งานโดยที่เครื่องมือไม่เคยใช้งานมาก่อนบนชิ้นงานชนิดเดียวและในสภาวะเดียวกัน จนกระทั่งไม่สามารถใช้เครื่องมือตัดนั้นต่อไปได้ ในขณะที่กำลังทำการตัดจะเกิดกลไกการสึกหรอต่างๆ บนมีดตัด ซึ่งจะมีอัตราที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับระยะเวลาในการตัดแสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งความสัมพันธ์ในรูปจะแสดงถึงรอยสึกหรอบนผิวหลบ (Flank wear) ส่วนรอยสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear) ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันดังรูปที่ 2.10 และนอกจากนี้การสึกหรอของมีดกัดชนิดหัวบอลยังมีการสึกหรอที่เรียกว่า central wear อีกด้วย ซึ่งการสึกหรอดังกล่าวจะส่งผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสโดยตรง โดยช่วงของการสึกหรอสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังรูป

ในกระบวนการตัดจะพบว่าการใช้เครื่องมือตัดไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสียหาย แล้วค่อยนำกลับมาลับคมตัดใหม่เป็นสิ่งที่ไม่สมควรทำ เพราะถ้ามีดตัดแตกแล้วการลับคมตัดให้คมเหมือนเดิมจะทำได้ยากกว่าปกติ และคุณภาพของชิ้นงานก็จะออกมาไม่ดีด้วย ดังนั้นจึงได้ใช้เกณฑ์ในการตัดไว้ดังนี้คือ

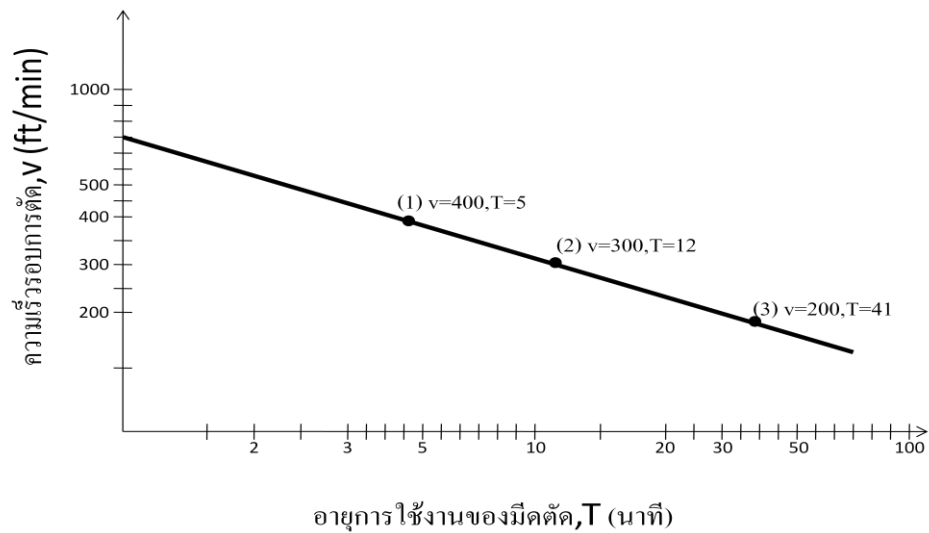


รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคานและเวลาที่ใช้ในการตัด [1]

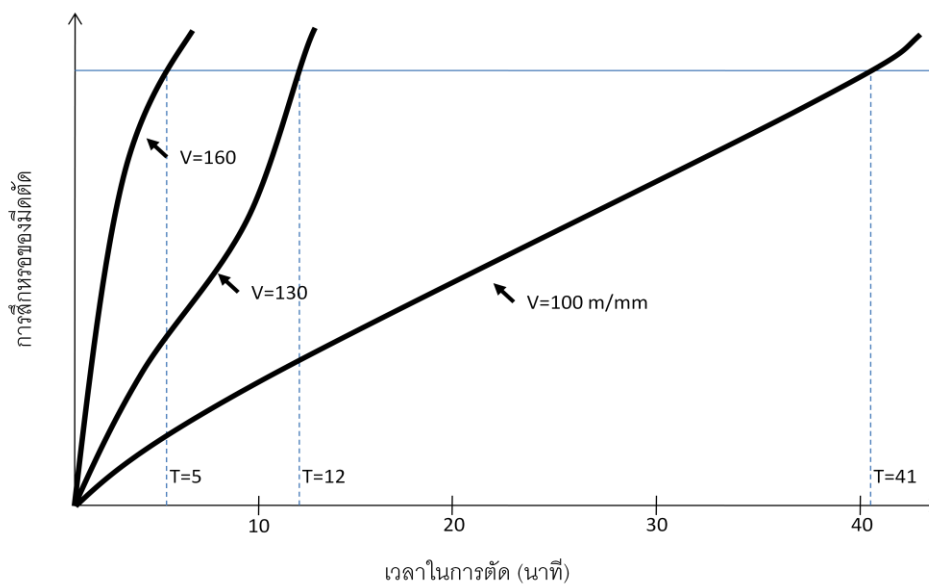


รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการสึกหรอของมีดกัด

ความชันของเส้นโค้งของการสึกหรอในช่วงที่ 2 จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขของการตัด โดยวัสดุของชิ้นงานที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าในวัสดุชิ้นงานที่อ่อน และในทำนองเดียวกัน ความเร็วในการตัด, อัตราป้อนตัด และความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้อัตราการสึกหรอที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการตัดและอายุการใช้งานของมีดตัด [1]



รูปที่ 2.11 ผลกระทบของความเร็วรอบตัดที่เปลี่ยนแปลงในการตัดต่อการสึกหรอ โดยให้เกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอ [1]

โดยความเร็วจะส่งผลต่อการสึกหรอมากที่สุด อายุการใช้งานของมีด (Tool life) ถูกกำหนดเป็นระยะเวลาของการตัดที่มีดตัดสามารถใช้งานได้ หรือระยะเวลาที่มีดตัดเริ่มใช้จนกระทั่งมีดตัดเสียหายอย่างมากจนไม่สามารถใช้งานได้ Frederick W. Taylor ได้ทดลองปฏิบัติงานและได้แสดงการเปรียบเทียบลำดับของ Cutting tools และเสนอแนวคิดที่ว่า ช่วงเวลา

20 นาทีแรกของการตัด มีดจะมีอายุมากที่สุดหลังจากเพิ่ม Spindle Speed จะทำให้มีดตัดเกิดการอ่อนตัวลงภายหลังจาก 20 นาที ของการปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของการสึกหรอที่เร็วที่สุดและถูกต้องจะสัมพันธ์กับ การทำงานของเครื่องจักรชิ้นส่วน ฯลฯ ต่อมาในปี 1907 Taylor ได้นำเสนอ ความสัมพันธ์ระหว่างอายุมีดตัดและความเร็วในการตัดได้ใกล้เคียงมากที่สุด และได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$VT^n = C \quad (2-4)$$

V = ความเร็วตัด

T = อายุมีดตัด , นาที

n = ค่าขึ้นอยู่กับเครื่องมือและชิ้นงาน

C = ค่าคงที่ กำหนดจากวัสดุของชิ้นงานหรือมีดตัดในเวลา 1 นาที

สมการนี้มีชื่อเรียกว่า สมการของเทย์เลอร์ Taylor's Equation หรือ สมการอายุใช้งานของมีด Tool Life Equation

แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตจริงนั้น ไม่สามารถใช้งานมีดตัดจนกระทั่งมีดติดเสียหายได้ เนื่องจากความยากในการลับคมมีดตัดใหม่, ปัญหาในเรื่องคุณภาพของชิ้นงาน และปัญหาในเรื่องของความยากในการวัดระดับการสึกหรอรวมถึงเวลาที่ใช้ในการวัด ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอทางเลือกในการกำหนดเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัด (Tool life criterion) ขึ้นมา 9 ทางเลือกซึ่งมีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตมากกว่า ดังนี้

1. มีดตัดถูกใช้งานจนกระทั่งคมตัดเสียหาย (การเสียหายแบบแตกหัก, การเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ หรือการสึกหรอจนกระทั่งมีดตัดไม่สามารถใช้งานต่อไปได้
2. พนักงานใช้สายตาในการตรวจสอบการสึกหรอที่เกิดขึ้น ซึ่งเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดถูกกำหนดโดยขึ้นอยู่กับการตัดสินใจและความสามารถของพนักงานแต่ละคน
3. พนักงานใช้เล็บมือในการตรวจสอบคมตัดของมีดตัด
4. พนักงานตัดสินใจจากเสียงของกระบวนการผลิตที่เปลี่ยนไป

5. เศษโลหะเริ่มพันกันเป็นสายยาวและยากต่อการจัดการ
6. พื้นผิวสุดท้ายของงานมีคุณภาพลดลง
7. การใช้พลังงานในการตัดเพิ่มขึ้น โดยวัดจากมิเตอร์ที่ต่ออยู่กับเครื่องจักร
8. การนับจำนวนชิ้นงาน โดยพนักงานจะทำการวัดจำนวนชิ้นงานที่ทำได้ และทำการเปลี่ยนมีดตัดเมื่อถึงจำนวนที่กำหนดไว้
9. การนับเวลาที่ใช้ในการตัดทั้งหมด ซึ่งหลักการคล้ายกันกับการวัดจำนวนชิ้นงาน

2.1.6 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Material) [1]

มีดตัดในทางอุดมคตินั้นจะต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) เป็นความสามารถของวัสดุที่จะยังคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง รับแรงกระแทกได้ดี มีความแข็งแรงและความเหนียว (Toughness) และการต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ซึ่งจะส่งผลให้มีมีดตัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่ในความเป็นจริงแล้วคุณสมบัติดังกล่าวไม่สามารถพบได้ในมีดตัดชนิดเดียว โดยวัสดุที่ใช้ในการทำมีดตัดที่ต่างกันจะมีการรวมกันของคุณสมบัติในแต่ละด้านในระดับที่แตกต่างกัน [1]

1. เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steels) เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและใช้มากในงานเจาะรูตีเกลียว มีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลางจะมีอายุมีดตัดจะนานกว่า ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีราคาถูกและลับให้คมได้ง่าย แต่ความแข็งแรงและการทนต่อการสึกหรอต่ำ การทนทานต่ออุณหภูมิสูงไม่เพียงพอสำหรับการตัดที่ความเร็วสูง มีดตัดชนิดนี้จึงใช้กับงานตัดที่ความเร็วรอบต่ำ

2. เหล็กกล้ารอบสูง (High-speed steels) การพัฒนาในการตัดที่ความเร็วรอบสูง ส่วนมากจะเป็นเหล็กหล่อผสมสูงใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของมีดตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ดี

3. โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys) มีความแข็งแรงสูง (58-64 HRC) สามารถทนต่อการสึกหรอได้ดีและสามารถทนทานกับอุณหภูมิได้สูง มีความแข็งแรงสูงแม้ว่าอุณหภูมิใช้งานจะสูงตาม วัสดุจะไม่เหนียวเหมือนเหล็กความเร็วรอบสูง วัสดุนี้ทนแรงกระแทกได้น้อย จึงไม่เหมาะจะใช้กับงานตัดรอบสูง ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ

4. คาร์ไบด์ (Cemented or Sintered carbide) มีความแข็งแรงสูงทุกๆ อุณหภูมิ มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและนำความร้อนสูง ไม่แพร่ความร้อน แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ ทั้งสแตน

คาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งแรงและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งแรงและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น มีดตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบแห้งได้

5. เครื่องมือเคลือบผิว (Coated tools) การเคลือบผิวของเครื่องมือตัดจะสามารถทำให้ใช้กับการตัดแบบอัตราการผลิตที่สูงๆได้ ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงานและลดต้นทุนในการตัด การเคลือบผิวของเครื่องมือตัดจะทำให้ลดเวลาการตัดลงได้ถึง 4 เท่า นอกจากนี้การเคลือบผิวเครื่องมือตัดจะทำให้อายุมีดตัดนานกว่ามีดตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารเคลือบที่ใช้กันได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เคลือบแล้วจะมีความเสียดทานต่ำ มีความแข็งแรงสูง ต้านทานอุณหภูมิที่สูง และเป็นสารที่มีความเหนียว การเคลือบผิวมีดตัดด้วยสารจะสามารถใช้ในการตัดที่อัตราการผลิตสูง และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เคลือบอยู่บนทั้งสแตนคาร์ไบด์ จะทำให้สามารถต้านทานการสึกหรอของ หน้าหลอมตัวได้สูง

6. เซรามิกเคลือบอลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) สามารถทนอุณหภูมิได้สูง มีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำ และสามารถต้านทานการสึกหรอที่ผิวหลบและผิวคายได้ดี และไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เพราะมีสารเคลือบเป็นพวกออกไซด์

7. เซรามิก (Ceramics) ทำจากอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความละเอียดและความบริสุทธิ์สูง วัสดุนี้ทนต่อการขีดสีได้สูง ทนความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ผิวชิ้นงานหลังตัดมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีดตัดชนิดนี้ไม่ทนต่อการกระแทก สามารถทนแรงดันสูงและอุณหภูมิสูงได้ดี อย่างไรก็ตาม เซรามิกไม่มีความเหนียว ผลของการตัดอาจจะเกิดความผิดพลาดถ้าเกิดเศษของมีดตัดหักออกไปในการตัด มีประสิทธิภาพในความเร็วการตัดที่สูงมาก ตลอดจนการตัดของการตัดสุดท้าย หรือเกือบสุดท้ายของงานกลึง

8. คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride : CBN) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากที่สุดทนต่อการสึกหรอและมีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะ จึงไม่เหมาะต่องานที่มีการสั่นสะเทือนเหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง จะสามารถดำเนินการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ชั้น CBN จะทนการขีดถูที่สูงมากและมีค่าความเค้นของมุมมีดตัดสูง มีดตัด CBN จะผลิตให้ขนาดเล็ก เพราะมีดตัด CBN จะแตกง่าย แข็งแกร่งจึงเป็นปัจจัยสำคัญของเครื่องมือตัด

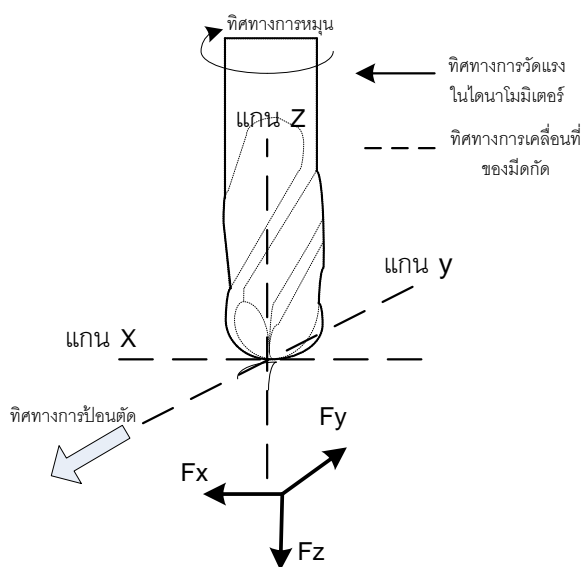
9. ซิลิกอนไนไตรด์ (SiN) เป็นวัสดุที่ทำมีดตัดที่ประกอบด้วยซิลิกอนไนไตรด์พื้นฐานแล้วมีการเติมพวก อลูมินัมออกไซด์ ยทเทียมออกไซด์ และไททาเนียมไนไตรด์เพิ่มเข้าไป มีดตัดชนิด

นี้มีความเหนียวสูง ความทนต่อความร้อนสูง และต้านทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างรวดเร็วได้ดี

10. เพชร (Diamond) ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความเสียดทานต่ำ ลับคมได้ง่ายใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง และรูปทรงของมูมิตัดดี ไม่เปลี่ยนแปลงแล้วให้ผิวงานสำเร็จที่ดี มีความถูกต้องของขนาดสูงในการตัด

2.1.7 แรงในกระบวนการกัด [5]

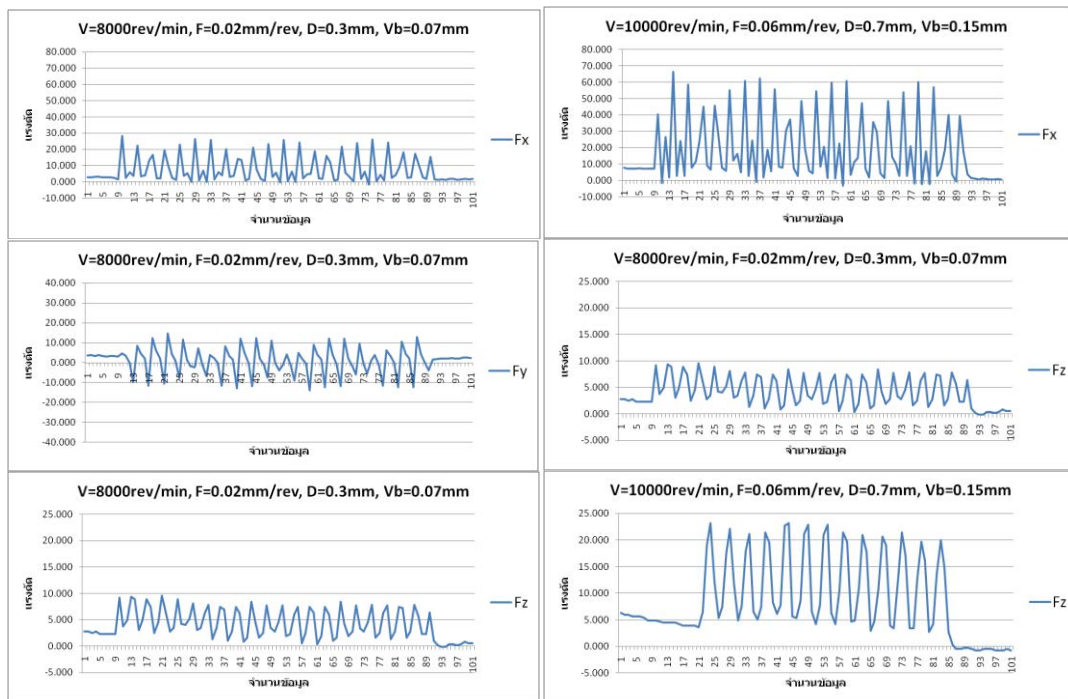
ในกระบวนการกัดนั้น จะมีลักษณะการเคลื่อนที่ของมีดกัดหลัก ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แกน ได้แก่ แกน X แกน Y และ แกน Z โดยแต่ละแกนนั้น จะมีแรงของแต่ละแกนที่เกิดขึ้นในขณะกัดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับการวัดแรงตัดที่เกิดขึ้น จะใช้ไดนาโมมิเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดแรงที่จะแบ่งข้อมูลของแรงที่วัดได้ออกเป็น 3 แกนเช่นกัน



รูปที่ 2.12 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของมีดกัดและทิศทางการวัดแรง

จากลักษณะการทำงานในกระบวนการกัดนั้น มีดกัดจะหมุนรอบตัวเองและเคลื่อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน แรงที่เกิดขึ้นบริเวณคมตัดจะเกิดในแกน X และแกน Y (ส่วนแกน Z นั้นจะเป็นแรงที่เกิดจากพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดและชิ้นงาน) โดยแรงในแกน X จะเริ่มเพิ่มขึ้น เมื่อคมตัดเริ่มกัดชิ้นงานและจะเพิ่มสูงสุดเมื่อคมตัดทำมุม 90 องศา กับชิ้นงาน จากนั้นจะเริ่มลดลงเมื่อคมตัดเคลื่อนออกจากชิ้นงาน โดยจะเกิดขึ้นในแบบเดิมเมื่อคมตัดอันที่สองเริ่มเข้าสู่ชิ้นงานเป็นวัฏจักร ส่วนแรงในแกน Y จะมีรูปแบบการเกิดเหมือนแรงแกน X แต่แรงที่วัดได้จะไม่ชัดเจนเท่าแรงแกน X

เนื่องจากแรงในแกน X นั้นจะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการตัด และแรงในแกน Z นั้นจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดความลึกของมีดกัด ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13

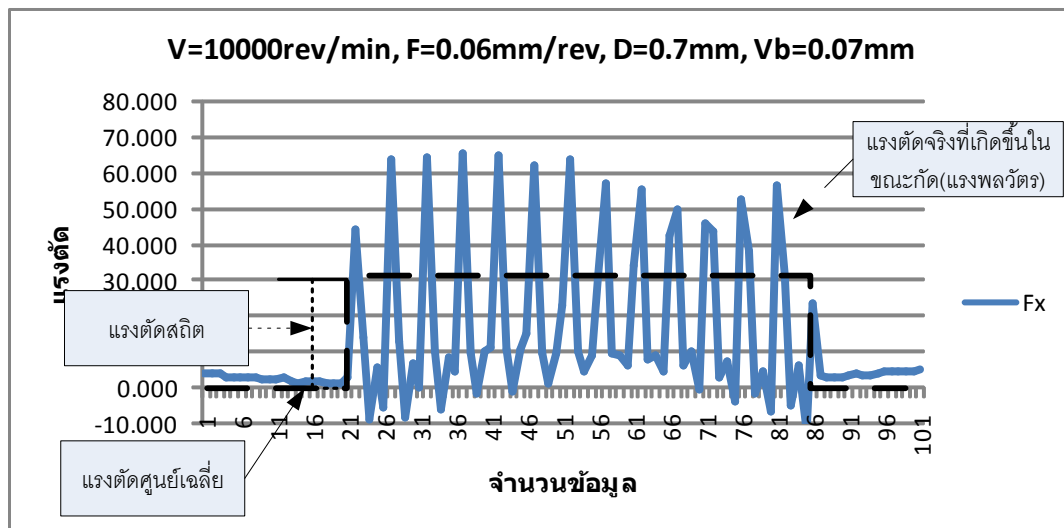


รูปที่ 2.13 กราฟแสดงแรงในแต่ละ แกนที่มุมต่างๆของคมตัดกับชิ้นงาน

จากรูปที่ 2.12 ซึ่งได้แสดงรูปแบบของ แรงที่เกิดขึ้นแต่ละ แกน ในกระบวนการกัด พบว่าแรงในแกน Z จะเพิ่มขึ้นตามขนาดความลึกของมีดกัดที่เพิ่มขึ้น ส่วนแรงในแกน X จะเพิ่มขึ้นตามเงื่อนไขการตัดที่เพิ่มขึ้น สาเหตุนี้ในการนำสัดส่วนของแรงตัดในกระบวนการกัดมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนารูปแบบสมการการประมาณขนาดความลึกนั้น จึงใช้ แรง F_x/F_z เนื่องจากเมื่อนำมาใช้ในรูปของสัดส่วนจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ในขณะเดียวกัน F_y จะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนารูปแบบสมการ

สำหรับข้อมูลแรงตัดที่นำไปใช้ในการพัฒนารูปแบบสมการการประมาณขนาดความลึกของมีดกัดนั้น จะเป็นแรงในลักษณะแรงตัดสถิตย์ เนื่องจากในการทำการทดลองต้องการข้อมูลขนาดของแรงที่เกิดขึ้นที่ค่าความลึกต่างๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้แรงตัดสถิตย์ ซึ่งจะแสดงขนาดของแรงที่เปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.14

จากรูปที่ 2.14 เป็นการแสดงตัวอย่างแรงตัดสถิต ซึ่ง จะเป็นขนาดของแรงที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเริ่มทำการตัดชิ้นงาน โดยแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดซึ่งไม่คงที่ จะถูกเฉลี่ยเป็นข้อมูลเดียว



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างแรงตัดสถิต

2.1.8 การออกแบบการทดลอง

เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง และให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงต้องมีการนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อมูลสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เรพลิเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดให้ว่า

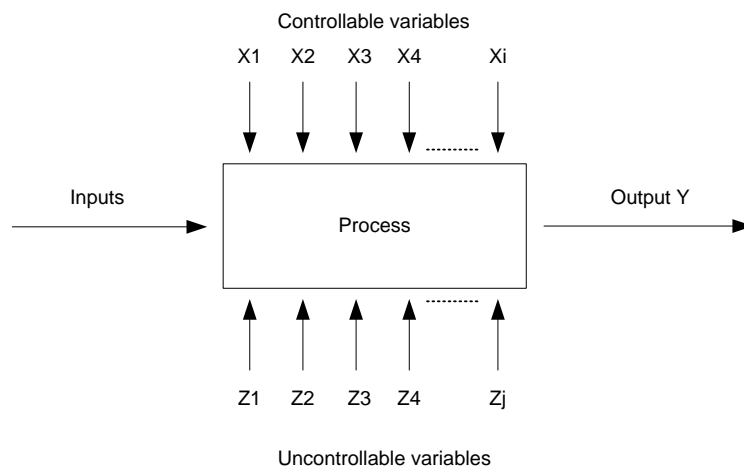
1. เรพลีเคชัน (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เรพลีเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลอง ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ย ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี

2. แรนดอมไมเซชัน (Randomization) เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบทดลอง แรนดอมไมเซชัน หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมุติฐานนี้เป็นจริง การที่เราแรนดอมไมซ์การทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง หลักการพื้นฐานทั้งสามที่กล่าวมานี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการทดลองทุกๆ ชนิด ดังนั้นเราอาจจะต้องกล่าวถึงหลักการทั้งสามนี้บ่อยครั้ง เพื่อเป็นการแสดงและเน้นให้เห็นถึงประโยชน์ของหลักการดังกล่าว

2.1.9 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable variables or factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable or noise variables or factors) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.15 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป

การควบคุมตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบของแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักแล้ว ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวนมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น แหล่งที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ดังนั้นในภาพรวมของการออกแบบการทดลองจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการ ในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลองจึงเกี่ยวข้องกับ

- 1) หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบ Y
- 2) หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ Y อยู่ที่ค่าที่ต้องการ
- 3) หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ Y มีค่าน้อย
- 4) หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

โดยส่วนใหญ่แล้วการทดลองส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัว และวัตถุประสงค์ของผู้ทำการทดลองก็คือ หาผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้กับผลตอบของระบบ เรียกร่างแผนและการดำเนินการทดลองว่า กลยุทธ์ของการทดลอง (Strategy of experimentation) ซึ่งมีหลายกลยุทธ์ที่ผู้ทดลองสามารถนำไปใช้ได้ เช่น แบบหนึ่งปัจจัยต่อครั้ง (One-factor-at-a-time) หรือการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) เป็นต้น

2.1.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในกรณีที่สนใจที่จะศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป และต้องการทดสอบเพียงครั้งเดียว สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการทำการทดสอบทีละคู่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) จัดเป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองหรือลักษณะทางคุณภาพ สนใจศึกษาผลลัพธ์จากระบบหรือกระบวนการ ในการวิเคราะห์จะแยกสาเหตุของความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัยหรือวิธีปฏิบัติ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งอาจถูกเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between group variation)

2. ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากขาดความรู้ หรือความรู้เกี่ยวกับระบบยังไม่มากพอ ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดจากกรณีที่ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงความแตกต่างในส่วนนี้ในรูปของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error or residual) ถ้าผู้ทดลองมีความรู้หรือความสามารถในการควบคุมการทดลองมากขึ้น ความผิดพลาดส่วนนี้ก็จะลดลง

2.1.11 การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis) เป็นกระบวนการตัดสินใจเพื่อยืนยันความเชื่ออย่างใดอย่างหนึ่งเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่อธิบายสภาวะที่เกิดขึ้นจริง และเรียกข้อความที่แสดงถึงการแจ่มแจ้งความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่หมายถึงสภาวะที่เกิดขึ้นจริงว่า สมมติฐานเชิงสถิติ (Statistical Hypothesis) ได้แก่ สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis : H_0) และสมมติฐานอื่น (Alternative Hypothesis : H_1) โดยสมมติฐานหลัก คือ สมมติฐานที่เชื่อว่าเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริง และต้องการทดสอบเพื่อที่จะปฏิเสธสมมติฐานนี้ ส่วนสมมติฐานอื่น คือ สภาวะที่ต้องการยืนยันด้วยเหตุผลการตัดสินใจแบบทดสอบสมมติฐานนี้มีโอกาสในการผิดพลาดได้ 2 ชนิด คือ

1. ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error): การปฏิเสธสมมุติฐานหลัก ทั้งที่ในความเป็นจริงสมมุติฐานหลักถูกต้องอยู่แล้ว มักเรียกความผิดพลาดชนิดนี้ว่า ระดับนัยสำคัญ (Significant Level) แทนด้วยสัญลักษณ์ α โดยที่ $\alpha = P(\text{ปฏิเสธ } H_0 \text{ โดยที่ } H_0 \text{ เป็นจริง})$

2. ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error): การไม่ปฏิเสธสมมุติฐานหลัก ทั้งที่ในความเป็นจริงสมมุติฐานหลักไม่ถูกต้อง แทนด้วยสัญลักษณ์ β และ $1 - \beta$ คืออำนาจในการทดสอบ (Power of Test) โดยที่ $\beta = P(\text{ยอมรับ } H_0 \text{ โดยที่ } H_0 \text{ ไม่เป็นจริง})$

ในการทดสอบสมมุติฐานนั้นต้องออกแบบวิธีการตัดสินใจให้มีระดับนัยสำคัญคงที่ และมีค่าต่ำๆ เช่น 0.05 หรือ 0.10 และให้อำนาจในการทดสอบมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้การตัดสินใจเลือก H_1 ต้องกระทำอย่างมีเหตุผลรองรับที่ชัดเจนจริงๆ ซึ่งเรียกว่า การตัดสินใจแบบยืนยัน (Strong Conclusion) ในการตัดสินใจโดยการทดสอบสมมุติฐาน สามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตั้งสมมุติฐานตามสิ่งที่ต้องการทดสอบ

2. กำหนดวิธีการตัดสินใจ ด้วยการพิจารณาถึงตัวสถิติสำหรับการทดสอบ

พารามิเตอร์รวมถึงการแจกแจงของตัวสถิติดังกล่าว ซึ่งอธิบายขนาดความผันแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขของการทดลอง (Reproducibility) และกำหนดช่วงการปฏิเสธ และการยอมรับ ภายใต้ค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด

3. ออกแบบการทดลอง ด้วยการกำหนดขนาดตัวอย่าง โดยให้อำนาจในการทดสอบอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

4. ดำเนินการทดลองตามที่ออกแบบไว้

ตัดสินใจตามวิธีการตัดสินใจที่กำหนดไว้ โดยหากข้อมูลอยู่ในช่วงการยอมรับให้สรุปว่าไม่มีเหตุผลในการปฏิเสธสมมุติฐาน เนื่องจากข้อมูลอยู่ในช่วงความผันแปรที่เกิดจากสาเหตุธรรมชาติ แต่หากข้อมูลอยู่ในช่วงการปฏิเสธให้ทำการปฏิเสธสมมุติฐาน

2.1.12 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ความเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าวัดการกระจายที่ใช้กันมาก ซึ่งเป็นรากที่สองของความแปรปรวน หากมีการนำสิ่งตัวอย่างไปอนุมานประชากรแล้ว ค่าที่ควรจะเป็นก็จะ หมายถึง ค่าที่ควรจะเป็นของประชากร (μ) ดังนั้น

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \quad (2-5)$$

แต่โดยที่ μ เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า จึงต้องทำการประมาณค่าด้วยค่าเฉลี่ยจากสิ่งตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้สูญเสียความเป็นอิสระของตัวแปรสุ่มในการประมาณค่าครั้งนี้ไปเท่ากับ 1 ตัว เนื่องจาก

$$\hat{\mu} = \bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{10}}{10} = \text{ค่าคงที่} \quad (2-6)$$

จากสมการที่ (2-5) จะพบว่า y_1 ถึง y_{10} มีค่ามากมายหลายค่าตามกฎแห่งโอกาส จึงอาจสรุปได้ว่า หากมีข้อมูลจำนวน n ตัว จะมีข้อมูลที่มีอิสระเพียง $n-1$ ตัวเท่านั้น และจะเรียกจำนวนข้อมูลที่มีอิสระนี้ว่า องศาแห่งความอิสระ (Degree of freedom) ซึ่งหมายถึงจำนวนข้อมูลที่มีสารสนเทศในการอนุมานค่าความเบี่ยงเบนของประชากรได้

ดังนั้น จึงอาจนิยามตัวสถิติสำหรับวัดค่าการกระจายต่อหน่วยในประชากร คือ

$$\text{ความแปรปรวน (Variance)} = \frac{\text{ผลรวมกำลังสอง (SS)}}{\text{องศาแห่งความอิสระ (df)}} \quad (2-7)$$

ในกรณีคิดผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบนรอบค่าที่ควรจะเป็นของประชากรแล้ว จะได้ผลว่า

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (2-8)$$

แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความแปรปรวนที่ได้จะมีค่ามากกว่าความเป็นจริงเนื่องมาจากการยกกำลังสองของค่าความเบี่ยงเบน ดังนั้นจึงสามารถหาความเบี่ยงเบนที่แท้จริงได้ด้วยการถอดรากที่สองของค่าความแปรปรวน และจะเรียกค่านี้ว่า ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) แทนด้วย S ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อนุมานความเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร ดังนั้น

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (2-9)$$

2.1.13 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีการรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยาก P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้อ้างอิงค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถจ้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้

โดยปกติแล้วนิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญเมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณมือนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

2.1.14 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ

วิธีการทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ

2.1.14.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่ามีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ จึงใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R_{adj}^2) แทน

2.1.14.2 การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit test; LOF)

การทดสอบนี้จะทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลซ้ำ แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ โคนพิจารณาจากค่า P-Value ของ LOF ถ้ามีค่ามากกว่าค่า α ที่กำหนดแล้ว สมการมีความเหมาะสม

2.1.14.3 การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง (Hypothesis testing for regression coefficients and interval estimation)

การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยจัดได้ว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์ โดยจะทำการประมาณค่าพยากรณ์ที่ต้องการโดยใช้ค่าประมาณแบบจุดและช่วงต่อไป เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้เมื่อทราบค่าประมาณความแปรปรวนของตัวประมาณดังกล่าวแล้ว จะสามารถดำเนินการทดสอบสมมติฐาน และการประมาณแบบช่วงได้ โดยทั่วไปมักนิยมทดสอบสมมติฐานเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยซึ่งจะทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะสามารถลดรูปลงอีกได้หรือไม่ สำหรับการประมาณแบบช่วงมักจะทำขึ้นเพื่อประโยชน์การพยากรณ์ กรณีสมการถดถอยอย่างง่ายมักจะทำการสร้างช่วงสำหรับค่าความชัน

2.1.14.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple linear regression analysis)[3]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่ง หรือปัจจัยตั้งแต่สองตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม หรือค่าตอบสนองในทางปฏิบัติ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความสัมพันธ์ สามารถเกิดได้หลายกรณี โดยสรุปแบ่งได้เป็น 5 กรณี คือ

- 1) ค่าผิดพลาดจากการวัด (Measurement error or pure error) เกิดจากการคลาดเคลื่อนในการวัดค่า
- 2) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการลดตัวแปรอิสระ (Omission error) เกิดจากการใส่ตัวแปรอิสระลงในสมการวิเคราะห์การถดถอยน้อยกว่าความสัมพันธ์ที่แท้จริง
- 3) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเพิ่มตัวแปรอิสระ (Inclusion error) เกิดในกรณีใส่ตัวแปรอิสระลงในสมการวิเคราะห์การถดถอยมากเกินไปความสัมพันธ์ที่แท้จริง
- 4) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกรูปแบบสมการผิด (Functional form error) เกิดในกรณีที่ผู้ศึกษากำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระผิดไปจากที่ควรเป็น
- 5) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ (Estimation error)

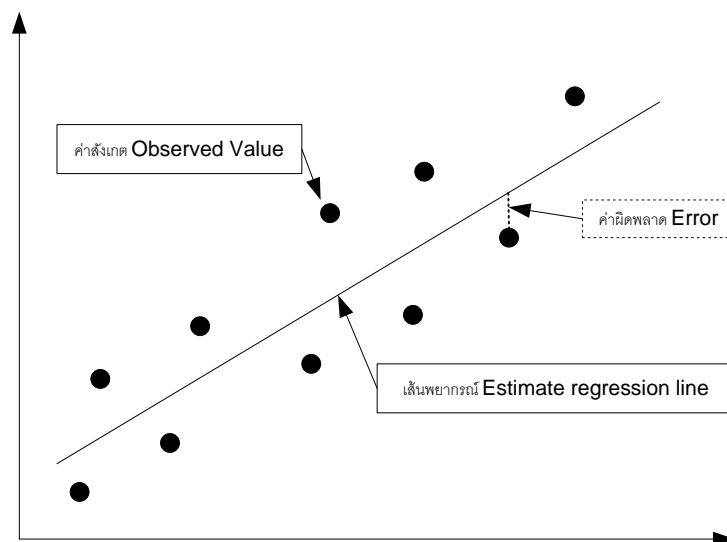
การสร้างสมการถดถอยเชิงพหุคูณ สามารถทำได้ 3 วิธีคือ

- 1) วิธี Backward elimination เริ่มจากการสร้างสมการเต็มรูปแบบ แล้วลดรูปโดยพิจารณาจากค่า P-Value ของตัวแปรอิสระ ที่มีค่า $P\text{-Value} > \alpha$ และมีค่าสูงสุด จะถูกเลือกออกจากสมการจนไม่สามารถลดรูปได้อีก

- 2) วิธี Forward elimination เริ่มจากสมการถดถอยอย่างง่ายและพิจารณาเริ่มตัวแปรอิสระทีละตัว โดยดูจากค่านัยสำคัญ P-Value ที่น้อยที่สุดเป็นตัวเริ่ม แล้วเพิ่มจนกว่าจะเพิ่มไม่ได้ก็จึงหยุด
- 3) วิธี Stepwise selection เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป เนื่องจากเป็นการใช้หลักการของวิธี Backward elimination และ Forward elimination คู่กัน โดยทุกครั้งที่เลือกตัวแปรอิสระตัวใหม่ เข้าในสมการจะทำการพิจารณาว่า ตัวแปรอิสระเดิมในสมการจะสามารถอยู่ในสมการได้หรือควรตัดทิ้งออกไป

2.1.14.5 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method)[3]

ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดนั้น เราควรเลือกพิจารณาค่าที่เกิดผลต่างกำลังสองระหว่างผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจริง และค่าประมาณจากความสัมพันธ์มีค่าน้อยที่สุด จากรูปที่ เป็นการแสดงตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง[3]

จากกราฟพบว่า

L คือ ผลรวมกำลังสองของผลต่างของค่าสังเกต หรือผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจริง และค่าผลตอบสนองที่ได้รับจากการประมาณโดยตัวแบบ

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (2-10)$$

$$L = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (2-11)$$

ตัวประมาณค่าของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของตัวแบบ

จุดตัดแกน

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_0} | \hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1 = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) \quad (2-12)$$

ความชัน

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_1} | \hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1 = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) x_i \quad (2-13)$$

การหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ระบบสมการปกติ

$$\sum_{i=1}^n y_i = n \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-14)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (2-15)$$

การคำนวณค่าประมาณของพารามิเตอร์

ค่าประมาณสัมประสิทธิ์จุดตัดแกน (Intercept) $\hat{\beta}_0$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2-16)$$

ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ความชัน (Slope) $\hat{\beta}_1$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (2-17)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2-18)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-19)$$

2.1.14.6 การทดลองแฟคทอเรียล [3]

การทดลองแฟคทอเรียล (Factorial Experiments) [3] เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษา

ผลกระทบระหว่างปัจจัยหลายปัจจัย โดยมีวัตถุประสงค์คือ ต้องการศึกษากิจกรรมร่วม

(Interaction) ผู้ทดลองจะใช้จำนวนระดับของปัจจัยที่ระดับนั้นขึ้นกับความสำคัญของปัจจัย ปัจจัย

ที่วิกฤต (Critical Factor) หรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาระยะเดียวจะใช้จำนวนระดับที่มีค่ามาก ค่า

จำนวนของระดับที่ระบุจะต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง เช่น ในกรณีศึกษา 2 ปัจจัย วัตถุประสงค์ในการทดลองคือ ทำเพื่อตัดปัจจัยออกหรือทำเพื่อศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ในกรณีที่ศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไปจะเป็นการ ศึกษาความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง หรือ โพลีโนเมียลกำลังสองขึ้นไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตได้มีการพยายามที่จะพัฒนารูปแบบการตรวจจับขนาดการสึกหรอของมีดกัด โดยได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางสาเหตุที่สำคัญก็คือขนาดความสึกหรอของมีดกัดนั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงาน ในช่วงแรกของการศึกษาเพื่อพัฒนารูปแบบการตรวจจับการสึกหรอของเครื่องมือตัด ได้มีการศึกษากลไกการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการตัดความเร็วสูง ด้วยการตัดเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งที่มีความแข็งมากกว่า 50 HRc. พบว่าการที่เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นขณะทำการตัดนั้น เกิดจากกระบวนการเกิดออกไซด์ของสารเคลือบผิวเมื่อสารเคลือบที่ปลายมีดตัดถูกทำลายการสึกหรอก็ยิ่งเพิ่มขึ้น และชิ้นงานเป็นหนึ่งในกลไกหลักที่เป็นสาเหตุของการสึกหรอของมีดกัด และการหลอมติดกันระหว่างเศษตัดกับผิวหลบของมีดตัดเป็นสาเหตุของการสึกหรอของผิวหลบของมีดตัด จากการศึกษาดังกล่าว ทำให้พบว่าความเร็วรอบตัดซึ่งเป็นหนึ่งในเงื่อนไขการตัดนั้นมีผลต่อรูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือตัด [20] จากนั้นได้มีการศึกษาถึงปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยได้ ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ความเรียบผิวของชิ้นงานในงานกลึง โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆได้แก่ ความแข็งของชิ้นงาน อัตราป้อนตัด มุมมีด ความลึกตัด ความเร็วรอบ และเวลาในการตัด โดยการศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานจะไม่พิจารณาการตอบสนองที่ระดับสูงๆ คือตั้งแต่ระดับ 3 ขึ้นไป เนื่องจากที่ผลการตอบสนองที่ระดับสูงๆ โดยปกติแล้วในทางปฏิบัติเกือบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะเกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าสมการตัวแบบความเรียบผิวที่ได้มีความแม่นยำกว่าสมการความเรียบผิวที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป [16] จากความต้องการที่จะพัฒนาระบบอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตหลักให้มีความเป็นอัจฉริยะ จึงมีความพยายามที่จะพัฒนาระบบการตรวจติดตามขนาดความสึกหรอของมีดกัดในขณะกัด ซึ่งจะเป็นการตรวจติดตามทางอ้อม จึงมีการศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่จะเป็นตัวชี้วัดขนาดความสึกหรอของมีดกัดได้ในขณะกัด โดยปัจจัยดังกล่าวก็คือแรงที่เกิดขึ้นในขณะกัด โดยในปี 2007 ได้มีการศึกษาแรงประกอบที่เกิดขึ้นในขณะตัด ของกระบวนการกัดโดยมีดกัดแบบหัวตัด (End Mill) เพื่อพัฒนาระบบการตรวจติดตามความสึกหรอของมีดกัดแบบรวม ซึ่งใช้การตรวจจับแรงตัดแบบ Realtimeและ การคำนวณความสึกหรอของมีดกัดผ่านโปรแกรม โดยได้ติดตั้ง

เครื่องตรวจจับแรงที่มีดัก เพื่อตรวจติดตามแรงที่เกิดขึ้นในแบบ Realtime จุดประสงค์คือเพื่อต้องการวิเคราะห์หาสัญญาณของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด ซึ่งจะสามารถบอกขนาดความลึกของมีดกัดได้ โดยผ่านการคำนวณจากสมการที่ได้จากการทดลอง สำหรับระบบการตรวจติดตามที่สร้างขึ้นมานั้น จะถูกใช้ร่วมกับการตัดสินใจของคน เนื่องจากในกรณีที่มีแรงตัดสูงๆระบบไม่สามารถคำนวณขนาดความลึกของมีดกัดได้ ผลที่ได้ก็คือระบบที่จะตรวจจับความลึกของมีดกัดขณะตัดและสามารถส่งย้อนกลับให้เครื่องปรับอัตราการป้อนตัดให้เหมาะสมกับความลึกในขณะนั้น [17] และได้มีการศึกษารูปแบบของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบหวับลด พบว่าแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโดยมีดกัดชนิดหวับลด สืบเนื่องมาจากความต้องการในการพัฒนาระบบการควบคุมเครื่องจักรเป็นระบบอัจฉริยะ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนารูปแบบของสมการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ ที่มีผลมาจากอิทธิพลของเงื่อนไขการตัด ผลที่ได้จากการทดลองนั้น คือ สมการที่สามารถ ตรวจติดตามแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดด้วยมีดกัดแบบหวับลด และสมการที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้ช่วยในการตัดสินใจในการเลือกเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุด [13] และการศึกษาถัดมาพบว่าปัจจัยในการตัดมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด มีการศึกษาการพยากรณ์แรงตัดในกระบวนการกัดบนเหล็กกล้าชนิด AISI P20 เพื่ออธิบายตัวแบบสมการกำลังหนึ่งและสองสำหรับพยากรณ์แรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด โดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ ปัจจัยที่ใช้พิจารณาได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความกว้างตัด และความลึกตัด จากการศึกษาพบว่า ตัวแบบสมการกำลังหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อแรงตัดมากที่สุดคือ อัตราป้อนตัด ตามด้วยความลึกตัด และความกว้างตัด ตามลำดับ ส่วนตัวแบบสมการกำลังสองพบว่าเมื่ออัตราป้อนตัดสูงขึ้นแรงตัดก็จะสูงตามไปด้วย และแรงตัดจะลดลงเมื่อ ความเร็วตัดลดลง จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า วิธีการพื้นผิวผลตอบได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้ได้ดีในการพยากรณ์แรงตัดตามแนวแกน (Longitudinal) ที่เกิดขึ้นกับการกัด สำหรับเหล็กกล้าชนิด AISI P20 สมการได้ชี้ให้เห็นว่าอัตราป้อนตัดเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้นตามด้วย ความลึกตัด ความกว้างตัด และความเร็วตัด ตามลำดับ โดยที่แรงตัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัดและความลึกตัดให้สูงขึ้น [21] ในขณะเดียวกันเพื่อพัฒนาในรูปแบบการทดลองมีความน่าเชื่อถือและรูปแบบการพยากรณ์ที่ได้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น จึงได้มีการใช้การออกแบบการทดลองที่เป็นมาตรฐานเข้ามาช่วยในการทดลอง ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขการตัดของเครื่องกลึง ที่มีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ในการทดลองนั้นมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 6 ตัว ประกอบด้วย ความเร็วรอบตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีจุ่มมีด ความยาวของ

มีดตัดและชนิดของมีดตัด เป็นการศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และมีความซรุขระผิวเป็นตัวแปรอิสระ จากผลการทดลองพบว่าที่ความยาวของมีดตัดต่างๆจะทำให้ผิวชิ้นงานดี เนื่องจากความยาวของมีดกัด มีผลต่อแรงสั่นสะเทือนขณะตัด และผลที่ได้นั้นได้นำไปพัฒนาเป็นสมการการประมาณค่าความยาวมีดตัด โดยสมการที่ได้นั้นมีความเชื่อมั่นสูงมาก มี P-value < 0.00001[19] และการวิจัยต่อมาได้ ทำการศึกษาการพยากรณ์อายุของมีดตัดด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบในงานกัดไทเทเนียมอัลลอย ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์ชนิดไม่เคลือบผิว (Uncoated carbide insert) ภายใต้สภาวะการตัดแบบแห้ง โดยการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลางขนาดเล็ก ในแบบจำลองของอายุของมีดตัดเพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของ ความเร็วตัด ความลึกตัด และอัตราป้อนตัด โดยการ ใช้การลึกรของผิวหลบเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาอายุของมีดตัด จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า วิธีการออกแบบส่วนประสมกลางขนาดเล็ก สามารถใช้เป็นเทคนิคในการประเมินค่าอายุของมีดตัดในงานกัดไทเทเนียมอัลลอย ภายใต้สภาวะการตัดแบบแห้งได้ดี ในแบบจำลองอายุของมีดตัด พบว่าความเร็วตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออายุของมีดตัด ตามด้วยอัตราป้อนตัด และความลึกตัด ตามลำดับ เมื่อปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้อายุของมีดตัดลดลง จากแบบจำลองอายุของมีดตัดลำดับที่หนึ่ง พบว่าความเร็วตัดจะส่งผลต่ออายุมีดตัดมากที่สุด กล่าวคือ เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น อายุของมีดตัดก็จะสั้นลง การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองลำดับที่สอง แสดงให้เห็นว่าอันตรกิริยาและค่ากำลังสองมีนัยสำคัญทางสถิติ [15] จากการศึกษาแรงเพื่อที่จะใช้ในการพยากรณ์ความลึกรของมีดกัด พบว่ามีข้อจำกัดในการพยากรณ์เมื่อความแข็งของชิ้นงานเป็นไปจะทำให้แรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดเปลี่ยนไปจึงมีการศึกษาหาความต้านทานในการตัดที่มีผลต่อความลึกรของเครื่องมือตัด โดยได้ทำการศึกษา ในการพัฒนาระบบการตรวจจับการลึกรของมีดตัดขณะทำงานของเครื่องกลึง CNC โดยใช้ฟังก์ชัน Exponential แบบถดถอย อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการตัดที่ได้จากการทดลองเปลี่ยนอัตราการป้อนตัดในขณะตัด (ค่า index a) กับขนาดความลึกรของมีดตัด ฟังก์ชัน Exponential แบบถดถอยได้ถูกใช้ในการประเมินการลึกรของมีดตัดกับความต้านทานการตัด พบว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สัมพันธ์กันทั้งในขณะที่ยอัตราการป้อนตัดเป็นศูนย์ และ อัตราการป้อนตัดเป็นอนันต์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของค่า index a ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบการตัด ค่า index a ที่ได้จากการทดลองนั้น สามารถที่จะเป็นตัวชี้วัดอัตราการลึกรของมีดตัดได้เป็นอย่างดี [8] แต่จากการศึกษาดังกล่าวยังพบว่ารูปแบบของการพยากรณ์ยังไม่มีความแม่นยำ เมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป จึงมีการศึกษาต่อและได้พบว่าการนำแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดมาทำเป็นสัดส่วนกันนั้น สามารถที่จะใช้สัดส่วนของแรงดังกล่าวมาช่วยในการพยากรณ์ได้อย่าง

แม่นยำ โดยได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนารูปแบบสมการการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในขณะตัดของกระบวนการกลึง โดยการใช้สัดส่วนแรงตัดเป็นพารามิเตอร์ในการพยากรณ์ความขรุขระ โดยพัฒนารูปแบบของสมการจะได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่เป็นไปในรูปแบบเอ็กโปเนนเชียล โดยจะทำการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยการตัดทั้ง 6 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ความลึกในการตัด มุมตัด รัศมีจุมกมีด และสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด จากผลการทดลองจะทำการหาสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์แต่ละตัวด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ และวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สมการการพยากรณ์ที่ได้นั้นมีระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% จากการทดสอบความแม่นยำพบว่าพารามิเตอร์ทุกตัวมีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความแม่นยำสูง จากนั้นได้มีการได้มีการใช้สัดส่วนของแรงศึกษาต่อยอดไปยังกระบวนการกัด [6] พบว่ากระบวนการกัดเพื่อสร้างสมการในการประมาณการคุณภาพความขรุขระของผิวชิ้นงานในขณะทำงานจริง โดยในการทดลองจะใช้สัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นขณะกัดชิ้นงาน ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงตัดในแกน X กับแรงตัดในแกน Z เนื่องจากการใช้สัดส่วนของแรงนั้น สามารถที่จะประมาณการความขรุขระผิวได้ แม้เงื่อนไขการกัดจะเปลี่ยนไป สำหรับสมการการประมาณค่าความขรุขระที่ได้จากการทดลองนั้น จะอยู่ในรูปเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมด 5 ตัว ได้แก่ ความเร็วรอบตัด อัตราการป้อนตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด ความลึกในการกัดและสัดส่วนของแรงตัด โดยสมการการประมาณค่าความขรุขระผิวที่ได้มีความแม่นยำและระดับเชื่อมั่นที่ 95% [9] และได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น ที่มีผลต่อความสึกหรอของมีดกัดแบบหวับลด ความขรุขระผิวชิ้นงาน และแรงตัด และศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดเหล็กกล้าด้วยมีดกัดแบบหวับลดกับการใช้สารหล่อเย็น โดยการใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบด้วยเทคนิคบ็อกซ์ - เบห์นเคน และจากการศึกษาพบว่า อัตราป้อนตัด ความลึกในการตัด และความเร็วในการตัด ส่งผลต่อกรณีศึกษาจากมากไปน้อยตามลำดับ จากการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบในการสร้างสมการลำดับที่สองของความขรุขระผิวชิ้นงาน, ความสึกหรอของมีดกัด, และสัดส่วนแรงตัด พบว่า สมการสามารถนำไปพยากรณ์ผลตอบดังกล่าวได้ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% และได้เงื่อนไขการตัดที่สภาวะเหมาะสมของเงื่อนไขการตัดแบบเปียก ที่ระดับความพึงพอใจรวม 84.21%, สภาวะที่เหมาะสมของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งที่ระดับความพึงพอใจรวม 75.97%, และสภาวะที่เหมาะสมของเงื่อนไขการตัดแบบสเปรย์ที่ระดับความพึงพอใจรวม 85.65% [4] จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะกัดนั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดความสึกหรอของมีดกัดในกระบวนการกัดหวับลด ผลสรุปที่ได้จากการทดลองดังกล่าวจึงกลายมาเป็นกรอบแนวความคิดของงานวิจัยนี้

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นไปทางด้านการศึกษา ความขรุขระผิวของชิ้นงานเป็นหลัก และจะมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสึกหรอของมีดกัดเป็นรองลงมา โดยเฉพาะมีดกัดหัวบอลซึ่งเป็นเครื่องมือตัดที่นิยมใช้กันมากในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ซึ่งงานวิจัยที่มีค่อนข้างน้อยนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการที่มีดกัดแบบหัวบอลมีราคาค่อนข้างจะสูงกว่ามีดกัดเอ็นมิลล์หรือเม็ดมีดกลึง จึงทำให้เป็นข้อจำกัดในการทำวิจัย

ส่วนงานวิจัยที่ใช้สัดส่วนของแรงตัดมาประยุกต์ใช้ในการ ประมาณการขนาด ความสึกหรอของมีดตัดนั้นก็มีการศึกษาวิจัยเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย เพราะสัดส่วนแรงตัดจะไม่มีหน่วยจึงทำให้สามารถลดตัวแปรในการพิจารณาได้ ทำให้ช่วยลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ผลลงได้ และยังสามารถใช้งานได้ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดหรือวัสดุชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สัดส่วนแรงตัด ในการทดลองเพื่อพัฒนารูปแบบสมการ ประมาณการขนาดความสึกหรอของมีดกัดสัดส่วนแรงตัดที่ใช้ประกอบด้วย แรงในแนวแกน X (F_x) และแรงตัดในแนวแกน Z (F_z) เนื่องจากแรงตัดในแนวแกนทั้งสองเป็นแรงตัดในแรงตัดตามแนวแกน (Axial force) และแนวสัมผัส (Tangential force) ตามลำดับ ซึ่งเป็นแรงตัดที่มีอิทธิต่อความสึกของมีดกัดในกระบวนการกัด

ตารางที่ 2.3 ข้อแตกต่างจากงานวิจัยในอดีต

ลำดับงานวิจัย	เนื้อหาของงานวิจัย	รายละเอียดงานวิจัย			สรุปข้อแตกต่าง
		พารามิเตอร์	การวิเคราะห์ข้อมูล	กระบวนการผลิต	
1	หาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นบ[4]	ความเร็วรอบ, อัตราการป้อน, ความลึกการกัด, ขนาดมีดกัด, สัดส่วนแรงตัด, ความลึกหรือของมีดกัด	- การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ	- การกัดโดยมีดกัดแบบหวับลด	- รูปแบบการทดลอง - ไม่มีการสร้างสมการการประมาณค่าความลึกของมีดกัดแบบหวับลด - เป็นการหาปริมาณสารหล่อเย็นที่เหมาะสมกับเงื่อนไข
2	พัฒนาระบบการตรวจจับการสึกหรอของมีดตัด โดยหาค่าดัชนีค่าต้านทานการตัดจากการปรับอัตราการป้อนตัด [8]	ความเร็วรอบ, อัตราการป้อน, ความลึกการกัด, มุมตัด, แรงตัด, ความแข็งของชิ้นงาน	- เทคนิคเอ็กโปเนนเชียล - Steepest descent method	- การกลึง	- กระบวนการการผลิตที่ทำการทดลอง - เทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูล - พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพยากรณ์ของสมการ
3	ศึกษา เพื่อพัฒนารูปแบบสมการการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในขณะตัดของกระบวนการกลึง โดยการใช้สัดส่วนแรงตัด[6]	ความเร็วรอบ, อัตราการป้อน, ความลึกในการตัด, มุมตัด, รัศมีจุมมีด, สัดส่วนของแรงตัด	- การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ - วิธีกำลังสองน้อยที่สุด	- การกลึง	- กระบวนการการผลิตที่ทำการทดลอง - เป็นสมการการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว

ลำดับ งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	รายละเอียดงานวิจัย			สรุปข้อแตกต่าง
		พารามิเตอร์	การวิเคราะห์ข้อมูล	กระบวนการผลิต	
4	ศึกษากระบวนการกัดเพื่อสร้างสมการในการประมาณการความขรุขระของผิวชิ้นงานในขณะทำงานจริง โดยใช้อัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้นขณะกัด[9]	ความเร็วรอบ, อัตราการป้อน, ความลึกการกัด, ขนาดมีดกัด, สัดส่วนแรงตัด, ความลึกหรือของมีดกัด	- การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ	- การกัดโดยมีดกัดแบบหัวบอล	- เป็นสมการการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว
5	ศึกษากลไกการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการตัดความเร็วสูงพบว่า การที่เกิดอนุภาคนิวเคลียสจะทำให้เคลือบที่ปลายมีดตัดถูกทำลายการสึกหรอก็ยิ่งเพิ่มขึ้น[20]	ความเร็วรอบ , อัตราการป้อน , ความลึกในการตัด, มุมตัด, รัศมีจุมกมีด อนุภาคนิวเคลียสตัด, ชนิดของสาคเคลือบมีดตัด	-	- การกลึง	- เพื่อหาอนุภาคนิวเคลียสเคลือบมีดตัดถูกทำลาย - กระบวนการการผลิตที่ทำการทดลอง - ความแข็งของชิ้นงาน
6	ศึกษาการพยากรณ์อายุของมีดตัดด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบใน งานไทเทเนียมอัลลอยด้วยมีดตัดคาร์ไบด์ชนิดไม่เคลือบผิวในสภาวะการตัดแบบแห้ง โดยการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลางขนาดเล็ก[15]	ความเร็วตัด, ความลึกตัด, อัตราป้อนตัด, ความลึกหรือของมีดกัด	- วิธีการออกแบบส่วนประสมกลางขนาดเล็ก	- การกลึง	- เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล - กระบวนการการผลิตที่ทำการทดลอง - พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณา - ประเภทของชิ้นงานที่ทดลอง

ลำดับ งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	รายละเอียดงานวิจัย			สรุปข้อแตกต่าง
		พารามิเตอร์	การวิเคราะห์ข้อมูล	กระบวนการผลิต	
7	ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาตัวแบบ สำหรับการพยากรณ์ความเรียบผิวของ ชิ้นงานในงานกลึง[16]	ความแข็งของชิ้นงาน, อัตรา ป้อนตัด, มุมมีด, ความลึกกัด, ความเร็วรอบ, เวลาในการตัด	- วิธีการพื้นผิวผล ตอบ	- การกลึง	- กระบวนการการผลิตที่ทำการ ทดลอง - พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณา
8	ทำการศึกษาการพยากรณ์แรงตัดใน กระบวนการกัดบนเหล็กกล้าชนิด AISI P20 เพื่ออธิบายตัวแบบสมการกำลัง หนึ่งและสองสำหรับพยากรณ์แรงตัดที่ เกิดขึ้น[21]	ความเร็วตัด, อัตราป้อนตัด ความกว้างตัด, ความลึกกัด	- วิธีการพื้นผิวผล ตอบ	- การกลึง	- จุดประสงค์ในการทดลอง - กระบวนการการผลิตที่ทำการ ทดลอง - พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณา - ประเภทของชิ้นงานที่ทดลอง
9	ทำศึกษามุมระหว่างคมตัดกับ ชิ้นงานที่มีผลต่อแรงในแต่ละแกนการ กัด โดยใช้มีดกัดแบบหัวบอล[22]	ความเร็วรอบ, อัตราการป้อน, ความลึกการกัด, ขนาดมีดกัด, แรงตัด	-	- การกัดโดยมีด กัดแบบหัวบอล	- จุดประสงค์ในการทดลอง - พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณา
10	ศึกษาแรงในกระบวนการกัดโดยมีดกัด ชนิดหัวบอลเพื่อพัฒนาสมการที่ สามารถอธิบายพฤติกรรมของแรงตัดที่ เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการได้[13]	ความเร็วตัด, ความลึกเชิงมุม, ความลึกเชิงเส้น, อัตราการป้อน	-	- การกัดโดยมีด กัดแบบหัวบอล	- จุดประสงค์ในการทดลอง - พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณา

ลำดับ งานวิจัย	เนื้อหาของงานวิจัย	รายละเอียดงานวิจัย			สรุปข้อแตกต่าง
		พารามิเตอร์	การวิเคราะห์ข้อมูล	กระบวนการผลิต	
11	ทำการศึกษาแรงประกอบที่เกิดขึ้น ในขณะตัด ของกระบวนการกัดโดยมีด กัดแบบหัวตัด (End Mill) เพื่อพัฒนา ระบบการตรวจติดตามความสึกหรอ ของมีดกัดแบบร่วม[17]	ความเร็วรอบ, อัตราการป้อน, ความลึกการกัด, ขนาดมีดกัด, แรงตัด	-	- การกัดโดยมีด กัดแบบหัวตัด	- พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณา - ชนิดของเครื่องมือตัด
12	ศึกษาเงื่อนไขการตัดของเครื่องกลึง ที่ มีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง แบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ[19]	ความเร็วรอบตัด, อัตราการป้อน ตัด, ความลึกในการตัด, รัศมี จุมุมมีด, ความยาวของมีดตัด, ชนิดของมีดตัด	-	- การกลึง	- พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณา - กระบวนการการผลิตที่ทำการ ทดลอง - ศึกษาความขรุขระผิว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของใบมีดกัดหัวบอล ความเรียบผิวชิ้นงาน และแรงตัดที่เกิดขึ้น ในระหว่างกระบวนการตัด และ ศึกษาหาสภาวะ การตัด ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัด เหล็กกล้าด้วยใบมีดกัดหัวบอลกับการใช้สารหล่อเย็น ดังนั้นการทดลองจะมีการแปรผันปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลตอบที่ต้องการศึกษา คือ ความเรียบผิวชิ้นงาน การสึกหรอของใบมีดกัด และแรงตัด โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการตัดที่เหมาะสมในกระบวนการกัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน

3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

เนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ในกระบวนการกัดนั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของชิ้นงานคือ ความเรียบผิวของชิ้นงาน ซึ่งความเรียบผิวของชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสึกหรอของมีดกัด และแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอมีดกัด และแรงตัดสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ปัจจัยหลักๆ ได้แก่

1. ปัจจัยเนื่องจากคน (Man)
2. ปัจจัยเนื่องจากเครื่องจักร (Machine)
3. ปัจจัยเนื่องจากวัตถุดิบ (Material)
4. ปัจจัยเนื่องจากวิธีการ (Method)
5. ปัจจัยเนื่องจากสิ่งแวดล้อม (Environment)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ปัจจัยเนื่องจาก คน เครื่องจักร วัตถุดิบ วิธีการและสิ่งแวดล้อม เป็นปัจจัยคงที่ที่สามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้ ทั้งนี้เพื่อทำการศึกษาถึงปัจจัยเนื่องจากวิธีการเป็นหลัก ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบการทดลองซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง (Cutting Parameter) ในกระบวนการกัดนั้นมีเงื่อนไขของการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ก็คือ ความเร็ว รอบ, ความลึกในการตัด

และอัตราการป้อนตัด โดยเงื่อนไข หลักทั้ง 3 เงื่อนไขดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อ ความเรียบผิวของชิ้นงาน ความลึกหระของมีดกัด และแรงตัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เงื่อนไข /ปัจจัยดังกล่าวมาทำการศึกษา

3.2.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับของปัจจัย (Level) จะกำหนดเป็นแบบค่าคงที่ ซึ่งในแต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยอาศัยข้อมูลทางด้านเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่แนะนำจากคู่มือการใช้งานมีดตัดโดยกำหนดคุณสมบัติของมีดกัด 2คมตัด ชนิดหับบอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการใช้งานไม่ควรเกิน 14000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนไม่เกิน 0.07 มิลลิเมตรต่อรอบ (ที่มา : Hitachi Tool Engineering, Ltd.) [26] ดังนั้นในการทดลองจึงกำหนดเงื่อนไขการตัดดังนี้

1. ความเร็วรอบ เลือกใช้ที่ระดับ 8,000 10,000 และ 12,000 รอบต่อนาที
2. ความลึกกัด เลือกใช้ที่ระดับ 0.3, 0.7 มิลลิเมตร
3. อัตราการป้อนตัด เลือกใช้ที่ระดับ 0.02, 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ

3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. วัสดุชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C/AISI1050) ซึ่งมีขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองจะกำหนดให้มีค่าความแข็งเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงค่าความแข็งของชิ้นงาน เพื่อเป็นการลดปัจจัยการศึกษาถึง คุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

ส่วนผสมทางเคมี (%wt.)	C	Mn	Si	P	S
	0.47-0.55	0.60-0.90	≤0.40	≤0.030	≤0.035
AISI	1050				
JIS	S50C				
DIN	1.1206 (Ck 50/C 50 E)				
สภาพจำหน่าย	อบปกติ ความแข็งไม่เกิน 235 HB				
สภาพหลังชุบ	ชุบแข็งด้วยน้ำ ความแข็ง 58-60 HRC				

รูปที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง [27]

(ที่มา: บริษัทไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์จำกัด)

- มีดกัด เป็นมีดกัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 มีดกัดแบบหัวบอล ยี่ห้อ 7-Leaders

3. เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X ใช้ในการทำการทดลองตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน

4. ไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงตัด (Dynamometer or Force sensor) ยี่ห้อ Kister รุ่น 9257B สำหรับวัดแรงตัด ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ยี่ห้อ Kister type 5073 สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด



รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด



รูปที่ 3.6 ชาร์จแอมพลิไฟเออร์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด

5. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL 750 ใช้สำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 3.7 ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด

6. ไมโครสโคป (Microscope) ยี่ห้อ Keyence รุ่น VHX 600 ใช้สำหรับวัดขนาดความลึกหรือของมีดกัด



รูปที่ 3.8 ไมโครสโคปสำหรับวัดขนาดความลึกหรือ

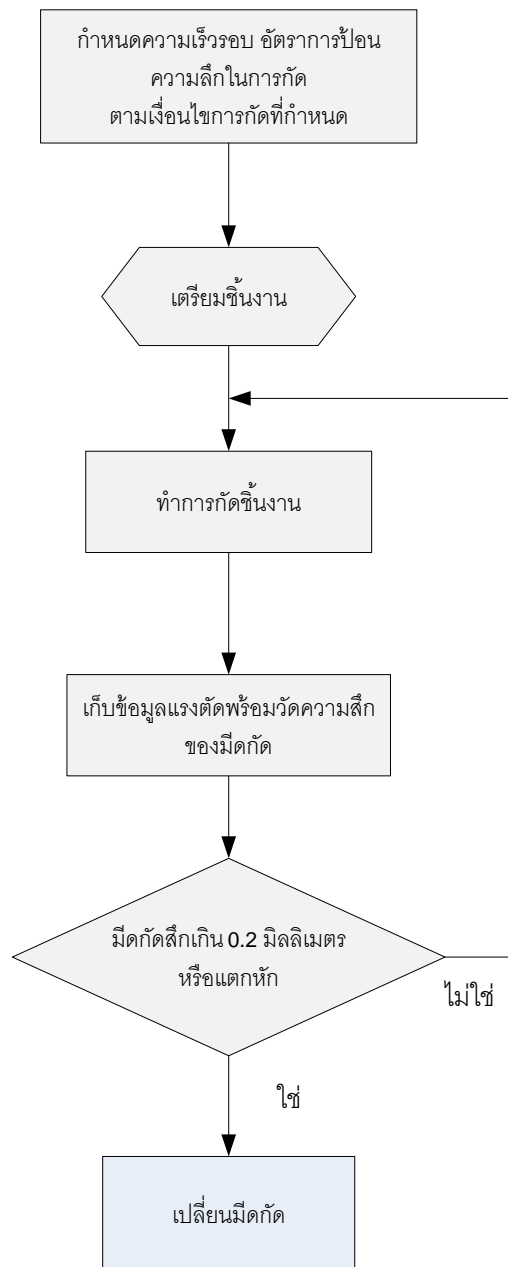
ตารางที่ 3.1 ค่าความไม่แน่นอนของเซนเซอร์และเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัด	รุ่น	ค่าความไม่แน่นอน
เซนเซอร์วัดแรงตัด	Kistler 9257B	0.2N
ออสซิลโลสโคป	YOKOGAWA DL 750	2.0%
เครื่องขยายสัญญาณ	Kistler 5037	5.0%
กล้องไมโครสโคป	VHX 600	$\pm 0.5\mu\text{m}$

3.4 วิธีการทดลอง

สำหรับการทดลอง จะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆที่กำหนดไว้ โดยการทดลองจะเป็นตัดแบบแห้ง ซึ่งจะใช้ดอกกัด 2 ขนาด ได้แก่ 6 มิลลิเมตร และ 8 มิลลิเมตร ความเร็วรอบตัดที่ใช้ คือ 8,000, 10,000 และ 12,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัด คือ 0.02 และ 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการกัด คือ 0.3 และ 0.7 มิลลิเมตร รายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

1. หลังจากเปิดเครื่องจักรแล้ว ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อให้เครื่องจักรดำเนินการการตัดตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้
 2. ทำการกัดชิ้นงาน
 3. เก็บข้อมูลแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด โดยการเก็บข้อมูลนั้นจะทำการสุ่มเก็บ ซึ่งจะสุ่มเก็บข้อมูลเมื่อกัดชิ้นงานได้ความยาว 10 – 15 เซนติเมตร
 4. ทำการวัดขนาดความลึกของดอกกัดที่เกิดขึ้น ขณะที่เก็บแรงแต่ละครั้ง
 5. ทำการกัดชิ้นงาน เก็บข้อมูลแรงและทำการวัดขนาดลึกซ้ำ
 6. เมื่อขนาดความลึกที่วัดได้มีค่า 0.2 มิลลิเมตร ทำการหยุด
 7. เปลี่ยนดอกกัด และเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างเงื่อนไขการตัดในลำดับต่อไป
- ลำดับขั้นตอนการดำเนินการทดลอง ได้แสดงในรูปที่ 3.9



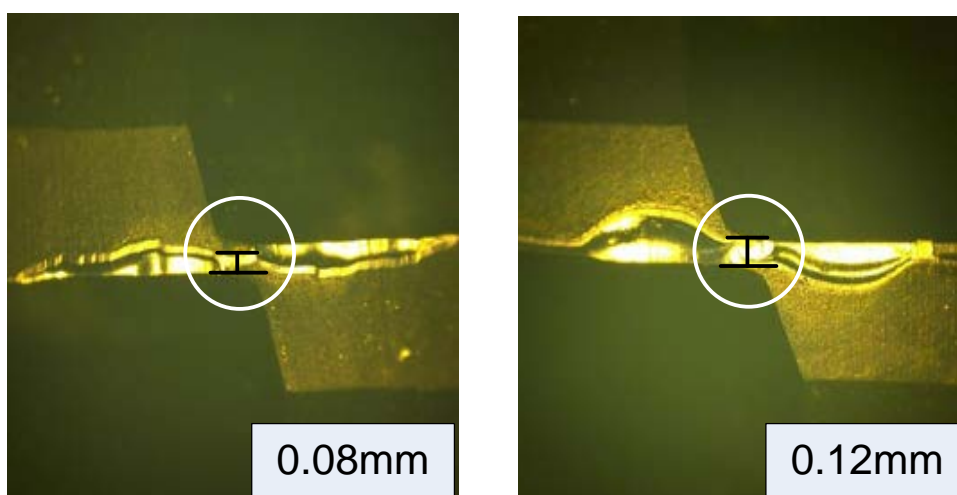
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

เนื่องจากการศึกษาเป็นการทดลองตัดชิ้นงานจนกว่ามีดกัดจะสึกถึงค่าที่กำหนด ในการเก็บข้อมูลของแรงที่ได้ขณะเครื่องจักรทำการกัดนั้นจะทำการสุ่มเก็บเมื่อเครื่องจักรทำการกัดได้ทุกๆระยะความยาวในการกัดประมาณ 100-300 มิลลิเมตร พร้อมทั้งวัดขนาดความลึกของมีดกัด

ที่เกิดขึ้นในขณะนั้นด้วย เมื่อมีดกัดลึกถึงค่าที่กำหนด คือ 0.2 มิลลิเมตร จึงทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยในการเก็บข้อมูลนั้นจะไม่ใช้เวลามาเป็นตัวกำหนดในการเก็บข้อมูล เนื่องจากอัตราการสึกของมีดกัดนั้นไม่คงที่ แต่จะมีอัตราการสึกช้าหรือเร็วที่ขึ้นขึ้นอยู่กับ เงื่อนไขการตัด

ในการวัดขนาดความสึกของมีดกัดจะวัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางความสึกของมีดกัด เนื่องจากการสึกในกระบวนการกัดนั้นจะเป็นการสึกที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนออกจากศูนย์กลาง โดยการวัดขนาดความสึกดังแสดงในรูปที่ 3.10

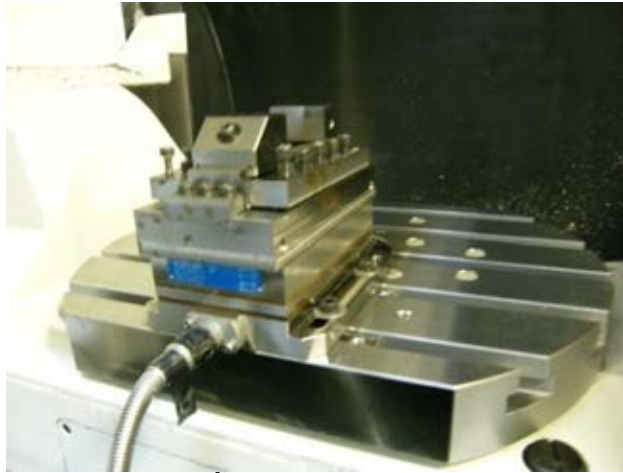


รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการวัดขนาดความสึกของมีดกัด

การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม คือ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านวัสดุดิบ และอุปกรณ์ในการวัดชิ้นงาน ซึ่งไม่สามารถวัดความสึกของมีดกัดได้ตลอดเวลาของการตัด ทำให้ต้องทำการวัดค่าความสึกของมีดกัดทุกๆ ระยะความยาวในการกัดประมาณ 100-300 มิลลิเมตรและทำการตัดจนกว่ามีดกัดจะเกิดการสึกหรือเกินค่าที่กำหนด คือ 0.2 มิลลิเมตร หรือมีดกัดเกิดการแตก (Chipping) จึงจะทำการหยุดการกัดหรือสิ้นสุดเงื่อนไขการตัดนั้นๆ แล้วทำการหาช่วงเวลาการตัดที่เหมาะสม ซึ่งจะนำแต่ละเงื่อนไขการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้

ในการวิเคราะห์เบื้องต้นก่อนจะนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จึงทำการหาระยะเวลาการกัดที่จะนำข้อมูลผลตอบที่ระยะเวลาที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยเลือกระยะเวลาการกัดที่เหมาะสมที่ระยะเวลาเดียวกันในแต่ละเงื่อนไขการตัดมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเปรียบเทียบกัน โดยมีขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลดังนี้

1. ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อใช้ในการวัดแรงตัดในขณะที่ทำการกัดชิ้นงานบนโต๊ะงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (แสดงดังรูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.11 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรง

2. เชื่อมต่อสายไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณ ของแรงตัดที่ได้ จากนั้นต่อ สายเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) (แสดงดังรูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.12 การเชื่อมต่อสายไดนาโมวัดแรงเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณและเครื่องออสซิลโลสโคป

3. ปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลโลสโคป โดยตั้งค่าต่างๆ ดังนี้
 - Low-pass filter = 500 Hz.
 - Sampling rate = 1 kS/sec
4. การเตรียมชิ้นงาน นำชิ้นงานซึ่งมีขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร จับยึดบนปากกาซึ่งยึดอยู่บนโต๊ะงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่ง เซ็นเตอร์ และทำการปาดหน้าชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานได้ระนาบและมีความเรียบ (แสดงดังรูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.13 การเตรียมชิ้นงานและชิ้นงานที่ผ่านการปาดหน้าเรียบร้อยแล้ว

5. เมื่อทำการกัดได้ระยะความยาวประมาณ 100-300 มิลลิเมตรแล้ว จะทำการวัดความลึกหอรของมีดกัดด้วยเครื่องไมโครสโคป ดังรูปที่ 3.15 พร้อมทั้งวัดแรงตัดที่เกิดขึ้น และทำการกัดต่อไปเรื่อยๆ จนกว่ามีดกัดจะมีความลึกหอรเกิน 0.2 มิลลิเมตร หรือมีดกัดเกิดการแตกหักก็จะทำการเปลี่ยนมีดกัดและทดลองด้วยเงื่อนไขการกัดอื่นต่อไป ซึ่งการตัดแต่ละเงื่อนไขการตัดจะเป็นไปตามการออกแบบการทดลอง (แสดงดังตารางที่ 3.1)



รูปที่ 3.14 การวัดขนาดความลึกหอรของมีดกัด

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในหน่วยโวลท์ ต้องนำมาทำการแปลงหน่วยในส่วน
ของสัญญาณแรงตัด ตามค่า sensitivity ได้ดังนี้

- แรงตัดในแนวสัมผัส (Tangential Force, F_x (N)) = V_x (Volt) x 50 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวรัศมี (Radial Force, F_y (N)) = V_y (Volt) x 50 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวแกน (Axial Force, F_z (N)) = V_z (Volt) x 50 (N/Volt)

3.6 การออกแบบการทดลอง

เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษากลับแล้ว ก็นำปัจจัยดังกล่าวไปออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่ผลกระทบบรรทุก 5 ปัจจัย (5 way interaction factorial)[3] โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้รูปแบบของการทดลองดังนี้

ตารางที่ 3.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

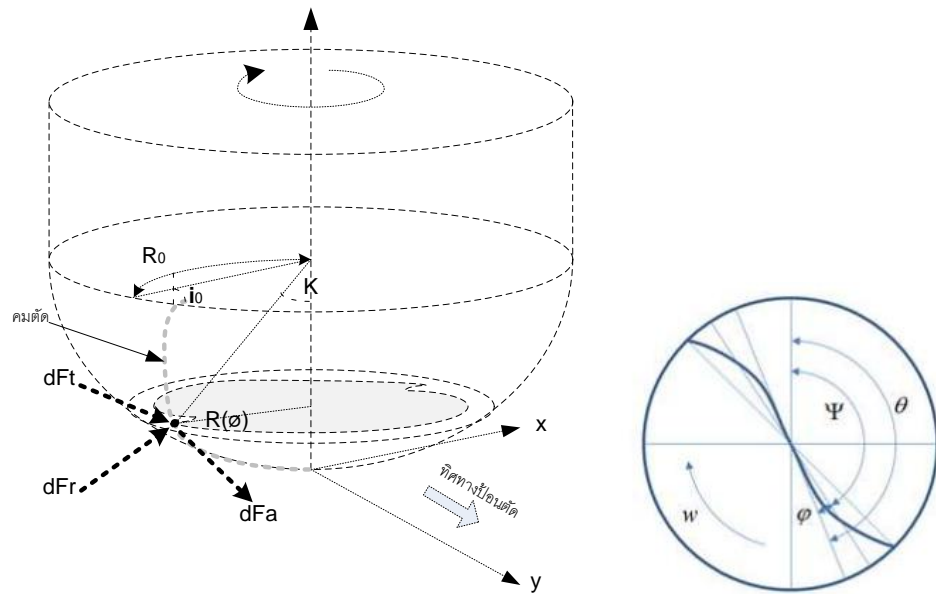
ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	สัญลักษณ์
1. ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	8,000 10,000 12,000	V
2. อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.02 0.06	F
3. ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.3 0.7	D
4. เส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด (มิลลิเมตร)	6 8	d
5. ขนาดความลึกของดอกกัด (มิลลิเมตร)	0.01 ถึง 0.2 มิลลิเมตร	Vb

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างเมตริกซ์การออกแบบการทดลอง

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (F_x/F_z)
1	6	0.02	0.3	8000		
2	6	0.02	0.3	8000		
3	6	0.02	0.3	8000		
4	6	0.02	0.3	8000		
5	6	0.02	0.3	8000		
6	6	0.02	0.3	8000		

7	6	0.02	0.3	8000		
8	6	0.02	0.3	8000		
9	6	0.02	0.3	8000		
10	6	0.02	0.3	8000		
11	6	0.02	0.3	8000		
12	6	0.02	0.3	8000		
13	6	0.02	0.3	8000		
14	6	0.02	0.3	8000		
15	6	0.02	0.3	8000		
16	6	0.02	0.3	8000		
17	6	0.02	0.3	8000		
18	6	0.02	0.3	8000		
19	6	0.02	0.3	8000		
20	6	0.02	0.3	8000		

หมายเหตุ: แรงในแนวแกน x แกน y และแกน z จะมีรูปแบบการคำนวณจากแรงที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัดดังนี้



รูปที่ 3.15 แสดงรูปแบบของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด

จากรูปที่ 3.15 กำหนดให้ แกน x เป็นทิศทางการหมุน แกน y เป็นทิศทางการป้อนตัด และ แกน z เป็นแกนหลักในการกัด โดยได้กำหนดให้

$$\varphi = \frac{z}{R_0} \tan(i_0)$$

$$\Psi(z) = \theta + (j - 1) \frac{2\pi}{N_f} - \varphi$$

เมื่อ R_0 คือรัศมีมีดกัด, θ คือ มุมในการกัด, N_f คือ จำนวนฟัน, i_0 คือ เกลียวมุมตัด, ตำแหน่งฟันเท่ากับ j และความสูงในการกัด คือ z โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงตัดหลัก (Tangential cutting force: F_t), แรงรัศมีหรือแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Radial cutting force: F_r) และแรงตัดตามแนวแกน (Axial cutting force: F_a)

โดยแรงที่เกิดขึ้นในแกน x แกน y และแกน z มีที่มาจากรูปแบบของสมการดังนี้ [28]

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(K) \sin(\Psi) & -\cos(\Psi) & -\cos(K) \sin(\Psi) \\ -\sin(K) \cos(\Psi) & \sin(\Psi) & -\cos(K) \cos(\Psi) \\ \cos K & 0 & -\sin(K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{bmatrix}$$

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.7.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมี กันด้วยหลายชนิด โดยผู้วิจัย เลือกลงใช้ โปรแกรม คอมพิวเตอร์ เนื่องจาก สามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัย ครั้งนี้ได้เป็นอย่างดี สำหรับการออกแบบการทดลองโดย วิธีพินผิวผลตอบ และใช้กันกันแพร่หลาย ในงานวิจัยประเภทต่างๆ

3.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบการทดลอง จะใช้การวิเคราะห์ความ แปรปรวน (ANOVA) ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งในโปรแกรม สำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P-Value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P-Value นั้น จะทำ การเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่า P-Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดง ว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่า มากกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองโดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05 ทั้งนี้การพิจารณาทั้ง อิทธิพลหลัก (Main Effect) และ อันตรกิริยา (Interaction Effect) ว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นหรือไม่

3.7.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ซึ่งทดสอบถึงความสัมพันธ์ ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งค่าส่วนตกค้างแต่ละค่าควรเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ทั้งนี้ต้องได้ จากการทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม โดยจะทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับ ลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล อยู่บนแกนนอน ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหาก ข้อมูลมีความเป็นอิสระ รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไปไม่เป็นแนวโน้ม (Trend) นั่นก็ หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

3.7.4 การตรวจสอบการแจกแจงความเป็นปกติของข้อมูล

ในการตรวจสอบนี้จะทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนนำไปใช้งาน โดยการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นการพล็อตค่าส่วนตกค้าง ลงบน กราฟที่เรียกว่า Normal Probability Paper ซึ่งพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็น สะสม $P_k = (K-1/2)n$ โดย $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วน ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจ ได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน

3.7.5 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และระดับของปัจจัยอยู่บนแกนนอน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาี้มีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ แสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยในกระบวนการกัด ซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วรอบการตัด อัตราป้อนตัด ความลึกในการตัด ขนาดของดอกกัดและแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด ว่ามีความสัมพันธ์กับอัตราการสึกของดอกกัดหัวบอล เพื่อใช้ในการพัฒนาสมการเพื่อพยากรณ์ขนาดความลึกของดอกกัดในขณะกัดได้ สำหรับการทดลองจะใช้การตัดแบบแห้ง เนื่องจากเป็นสภาวะการตัดที่ทำให้ดอกกัดเกิดการสึกได้อย่างชัดเจนที่สุด

4.1 ผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ถึง 4.4 เป็นผลการทดลองของเงื่อนไขการตัดต่างๆ โดยเป็นผลการทดลองที่เลือกมาจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความลึกของดอกกัดกับแรงที่ใช้ตัด ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงในตารางภาคผนวก ก. โดยมีปัจจัยในการทดลองและผลตอบที่ทำการพิจารณาดังต่อไปนี้

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

1. ความเร็วรอบ (V) หน่วย รอบต่อนาที
2. อัตราป้อน (F) หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ
3. ความลึกตัด (D) หน่วย มิลลิเมตร
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด (ϕ) หน่วย มิลลิเมตร
5. สัดส่วนแรงตัด (F_x/F_z)

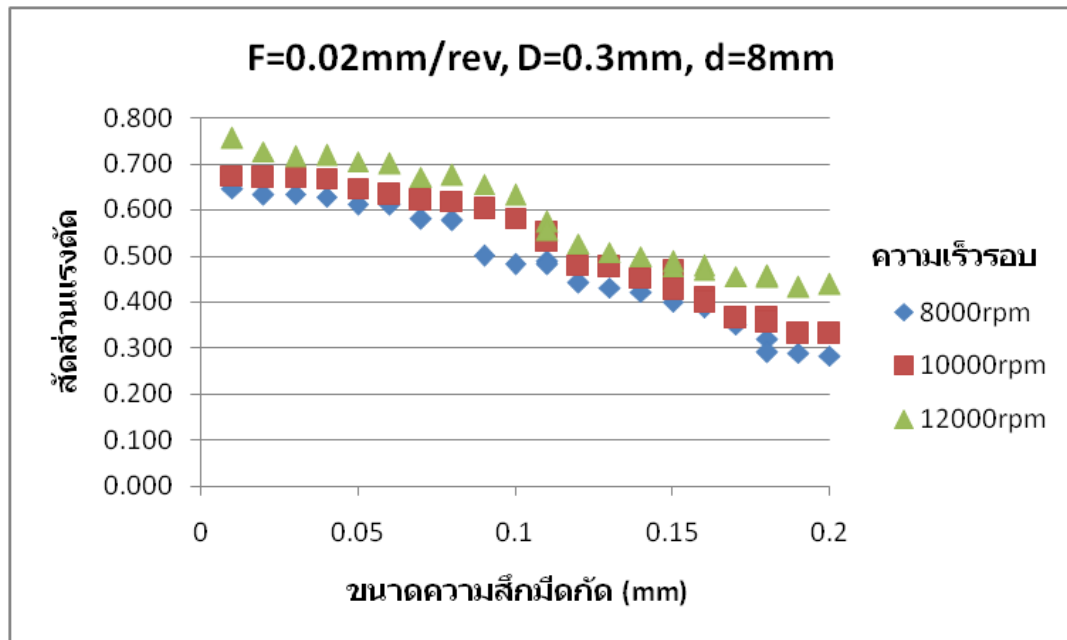
ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะทำการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นเงื่อนไขการตัดและขนาดความลึกหรือของมีดกัดขนาดต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์กับสัดส่วนของแรงตัดที่เกิดขึ้น ที่เงื่อนไขการตัดและขนาดความลึกของมีดกัดนั้นๆ และในการข้อมูลของสัดส่วนแรงตัดจะใช้สัดส่วนระแวงตัดระหว่าง แรงในแนวแกน X และ แรงในแนวแกน Z สำหรับสัดส่วนแรงตัดและขนาดความลึกของมีดกัดที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ ภาคผนวก

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดความลึกมีดกัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

จากการทดลองได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด ที่เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนไป ได้แก่ ความเร็วรอบในการตัด อัตราป้อนตัด ความลึกใน

การตัด และรัศมีของมีดกัด เพื่อหาผลที่เกิดขึ้นกับสัดส่วนของแรงในขณะตัดกับขนาดความลึกเมื่อเงื่อนไขอื่น ๆ ในการตัดเปลี่ยนไป

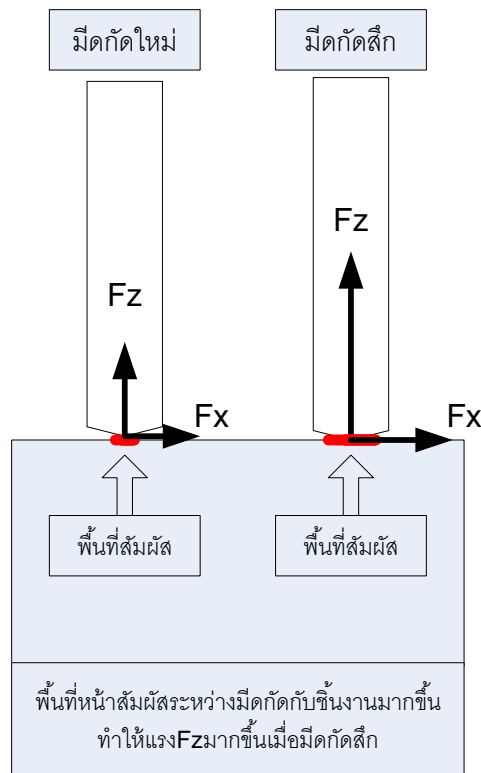
4.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดความลึกมีดกัดที่ความเร็วรอบตัดเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน

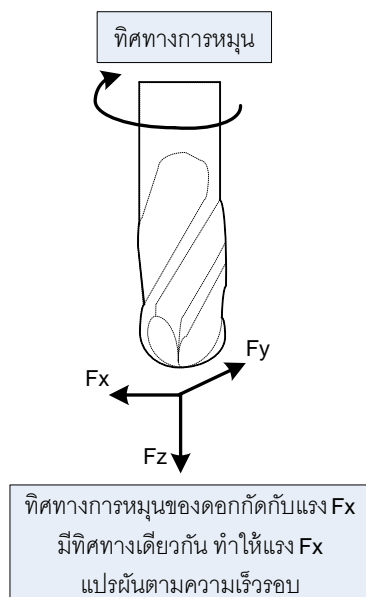
จากรูปที่ 4.1 เป็นข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนของแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วรอบ โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดมีแนวโน้มของข้อมูลไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย จะส่งผลให้สัดส่วนของแรงตัดมาก ในขณะที่เดียวกันเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดมาก จะส่งผลให้สัดส่วนของแรงตัดลดลง จากการทดลองพบว่าสาเหตุที่ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเป็นไปในลักษณะนี้ก็คือ เมื่อขนาดความลึกของมีดกัดมากขึ้น จะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมากขึ้นด้วย เนื่องจากการสึกหรอในกระบวนการกัดนั้นจะเป็นการสึกหรอบนผิวสัมผัส (central wear) ดังนั้นจึงทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น จากการที่พื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้นนั้นจึงส่งผลในแรงในแนวตั้งฉาก F_z เพิ่มขึ้นตาม

ไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อแรง F_z ซึ่งเป็นตัวส่วนในสัดส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้น จึงทำให้สัดส่วนแรงตัด F_x/F_z ลดลง

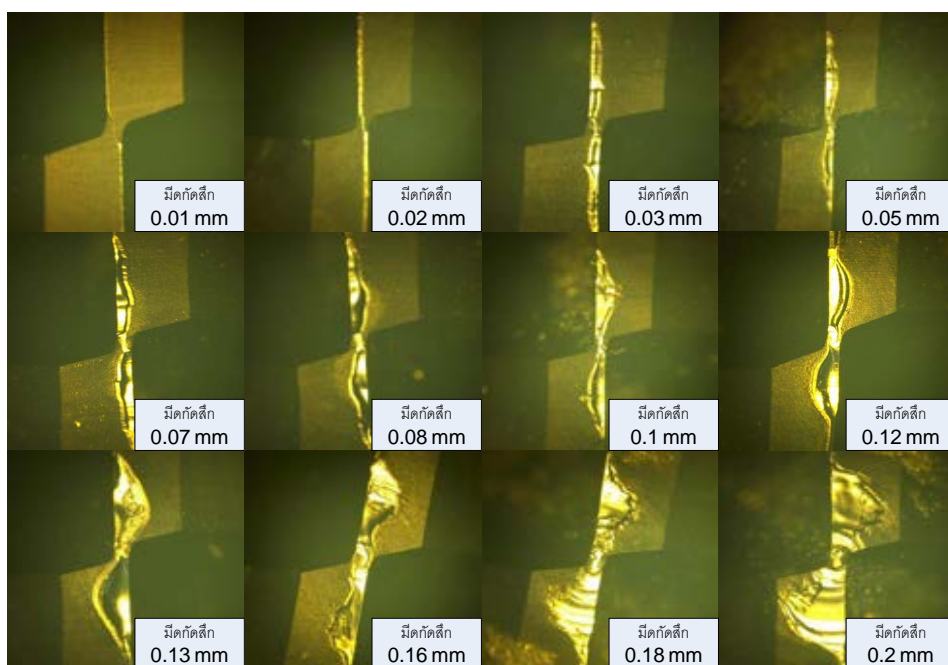


รูปที่ 4.2 แสดงขนาดความลึกของมีดกัดที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับแรงในแนวตั้งฉาก F_z ที่เพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน

ในขณะเดียวกันจากรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกมีดกัดเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วรอบตัด โดยที่ให้อัตราการตัดอื่นคงที่ พบว่า ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ความเร็วรอบตัดที่มากจะส่งผลให้สัดส่วนแรงตัดมากตามไปด้วย ขณะเดียวกันที่ความเร็วรอบตัดที่น้อยกว่าก็จะส่งผลให้สัดส่วนแรงตัดน้อยด้วย สาเหตุที่ข้อมูลเป็นไปในลักษณะนี้ เนื่องจากความเร็วรอบตัดมีทิศทางการหมุนเป็นทิศทางเดียวกับแกน X เมื่อเพิ่มความเร็วรอบตัดให้สูงขึ้น จะทำให้แรงที่คมตัดกระทำต่อชิ้นงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรง F_x จึงแปรผันตามความเร็วรอบตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.3

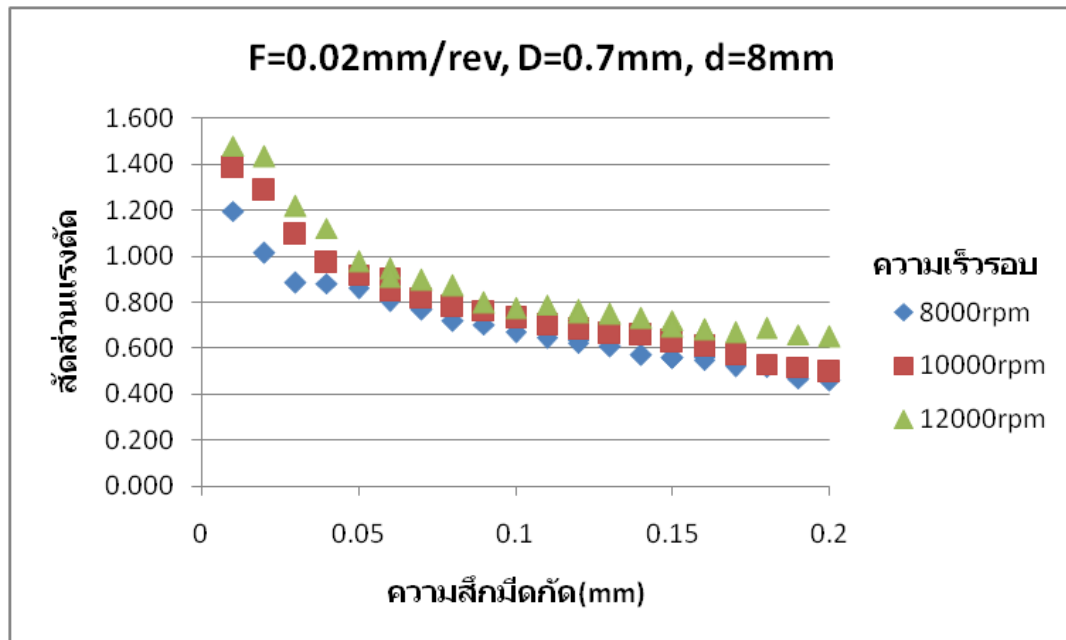


รูปที่ 4.3 แสดงทิศทางการหมุนของดอกกั้ดและแรงตัดในแกน X



รูปที่ 4.4 แสดงขนาดความลึกของมิตกั้ดที่ขนาดต่างๆ

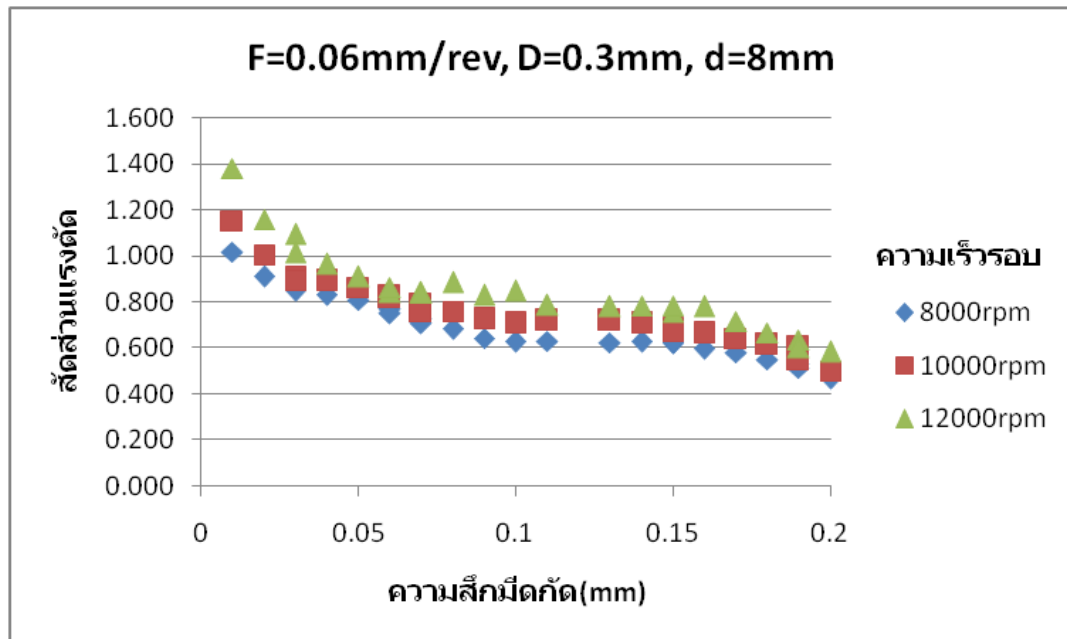
จากรูปที่ 4.4 เป็นการแสดงขนาดความลึกของมีดกัด จะเห็นว่าลักษณะการสึกของมีดกัดนั้นเป็นการสึกแบบผิวสัมผัส (Central wear) เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้แรง F_z เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.5 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดใหม่ โดยเพิ่มความลึกในการกัดเป็น 0.7 มิลลิเมตร ส่วนอัตราการป้อนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดให้เป็นไปตามเงื่อนไขก่อนหน้า จากนั้น ทำการตัดชิ้นงานที่ความเร็วรอบตัดต่างกัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด ยังคงมีแนวโน้มในลักษณะเดิม คือที่ขนาดความลึกของมีดกัดมาก สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าลดลง ส่วนเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลง ไม่ทำให้รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

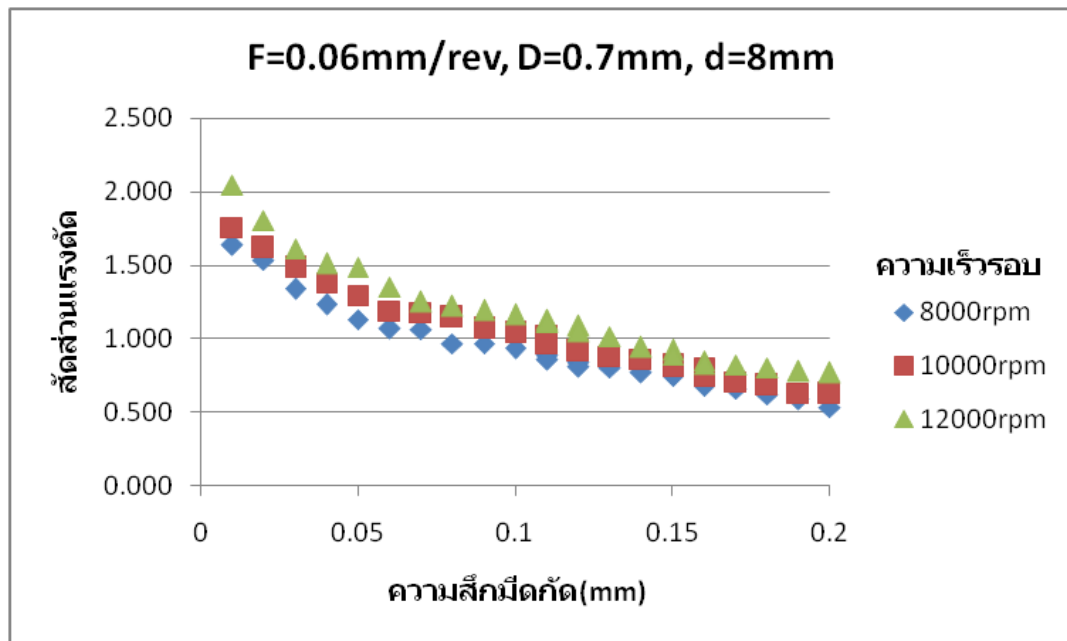
ขณะเดียวกันความเร็วรอบในการตัดยังคงมีผลต่อสัดส่วนแรงตัดที่ขนาดความลึกเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วรอบตัดมาก สัดส่วนแรงตัดยังคงมากอยู่เช่นเดิม



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4. 6 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดใหม่ โดยเพิ่มอัตราการป้อนเป็น 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ และลดความลึกในการกัดให้เป็น 0.3 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดให้เป็นไปตามเงื่อนไขก่อนหน้า จากนั้นทำการตัดชิ้นงานที่ความเร็วรอบตัดต่างกัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด ยังคงมีแนวโน้มในลักษณะเดิม คือที่ขนาดความลึกของมีดกัดมาก สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าลดลง ส่วนเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไม่ทำให้รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

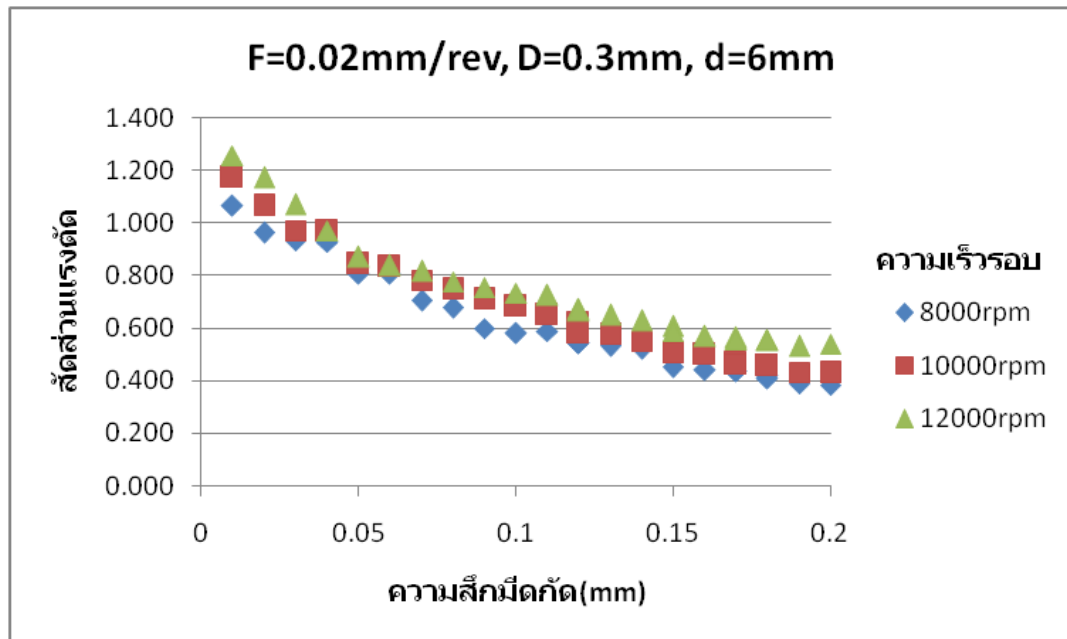
ขณะเดียวกันความเร็วรอบในการตัดยังคงมีผลต่อสัดส่วนแรงตัดที่ขนาดความลึกเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วรอบตัดมาก สัดส่วนแรงตัดยังคงมากอยู่เช่นเดิม



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4. 7 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดใหม่ โดยให้อัตราการป้อนเป็น 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบเช่นเดิม และเพิ่มความลึกในการกัดให้เป็น 0.7 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดให้เป็นไปตามเงื่อนไขก่อนหน้า จากนั้นทำการตัดชิ้นงานที่ความเร็วรอบตัดต่างกัน จากการทดลอง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด ยังคงมีแนวโน้มในลักษณะเดิม คือที่ขนาดความลึกของมีดกัดมาก สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าลดลง ส่วนเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไม่ทำให้รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

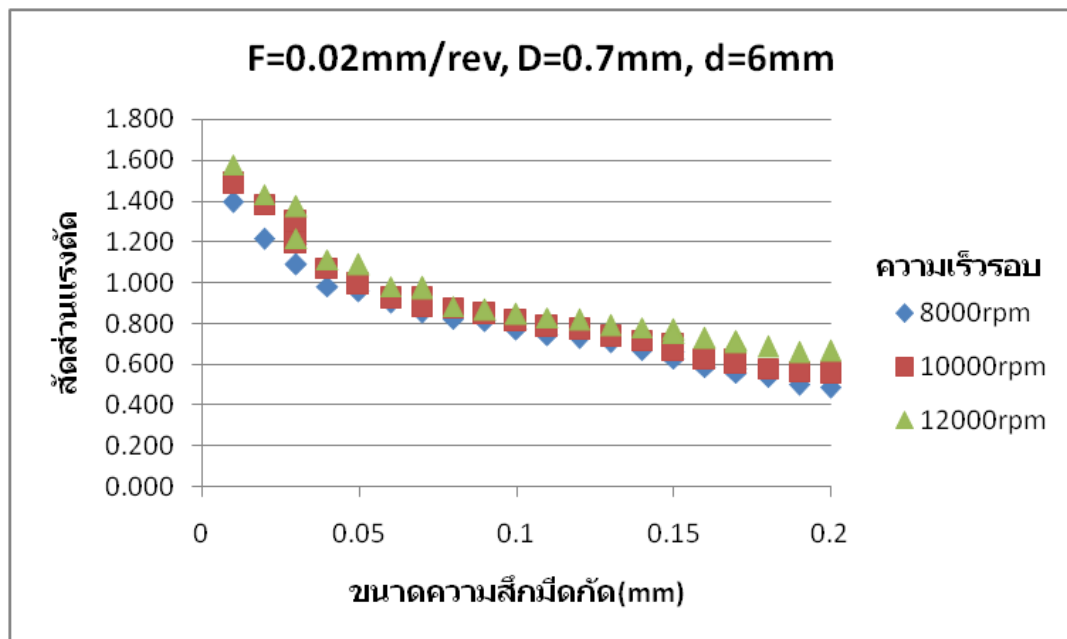
ขณะเดียวกันความเร็วรอบในการตัดยังคงมีผลต่อสัดส่วนแรงตัดที่ขนาดความลึกเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วรอบตัดมาก สัดส่วนแรงตัดยังคงมากอยู่เช่นเดิม



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดเป็นขนาด 6 มิลลิเมตร โดยใช้อัตราการป้อนตัดที่ 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร แล้วทำการกัดชิ้นงาน โดยได้ทำการเปลี่ยนความเร็วรอบตัด เพื่อเก็บข้อมูลสัดส่วนแรงตัดที่ความเร็วต่างๆเมื่อเทียบกับขนาดความลึกของมีดกัด พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดนั้นยังคงมีแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดมาก สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าน้อย แต่ขณะเดียวกันเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่ามาก

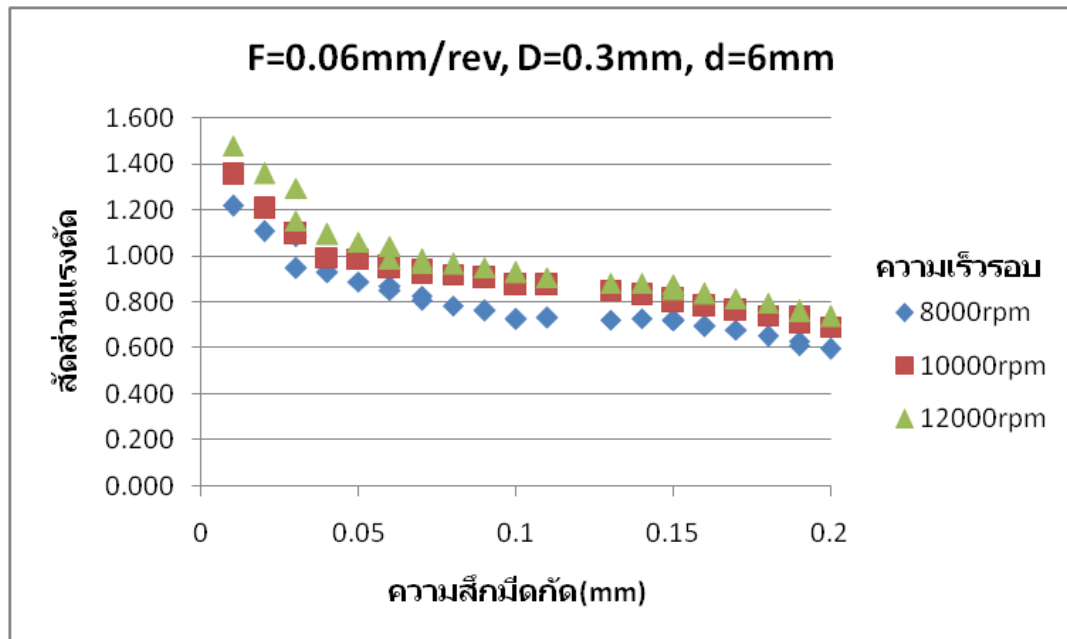
เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลของสัดส่วนแรงตัดที่ขนาดความลึกเดียวกัน แต่ความเร็วรอบตัดต่างกัน พบว่าความเร็วรอบตัดที่มากยังคงส่งผลให้สัดส่วนแรงตัดมากตามไปด้วย ที่ขนาดความลึกเดียวกัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดใหม่ โดยเพิ่มความลึกในการกัดเป็น 0.7 มิลลิเมตร ส่วนอัตราการป้อนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดให้เป็นไปตามเงื่อนไขก่อนหน้า จากนั้น ทำการตัดชิ้นงานที่ความเร็วรอบตัดต่างกัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด ยังคงมีแนวโน้มในลักษณะเดิม คือที่ขนาดความลึกของมีดกัดมาก สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าลดลง ส่วนเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลง ไม่ทำให้รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

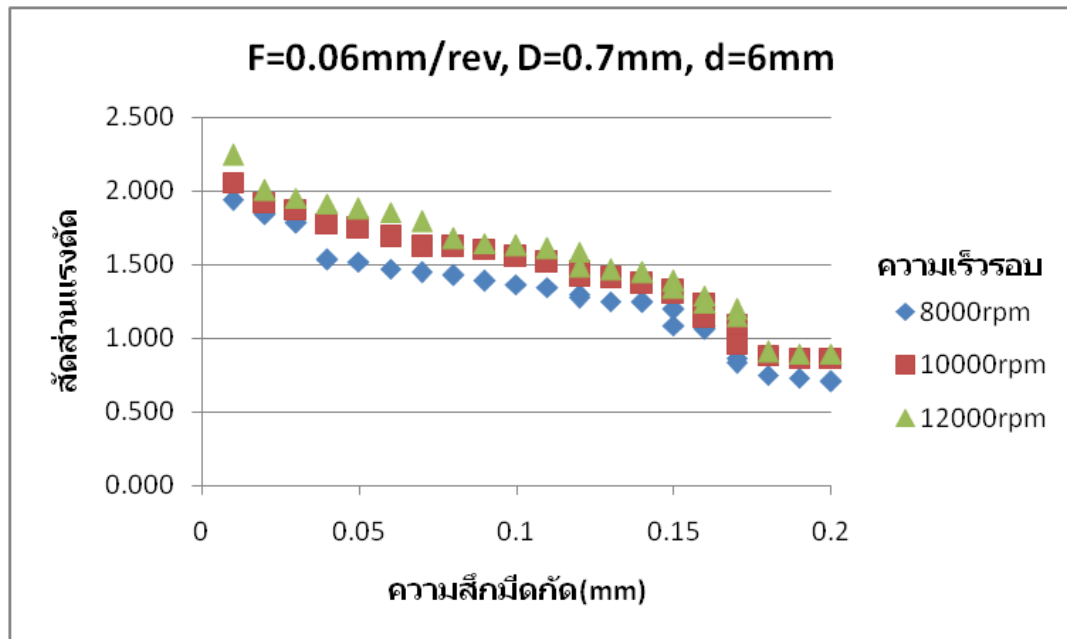
ขณะเดียวกันความเร็วรอบในการตัดยังคงมีผลต่อสัดส่วนแรงตัดที่ขนาดความลึกเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วรอบตัดมาก สัดส่วนแรงตัดยังคงมากอยู่เช่นเดิม



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อน 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4. 10 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดใหม่ โดยเพิ่มอัตราการป้อนเป็น 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ และลดความลึกในการกัดให้เป็น 0.3 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดให้เป็น 6 มิลลิเมตรเช่นเดิม จากนั้นทำการตัดชิ้นงานที่ความเร็วรอบตัดต่างกัน เพื่อทำการเก็บข้อมูลสัดส่วนแรงตัดที่ขนาดความลึกต่างๆ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด ยังคงมีแนวโน้มในลักษณะเดิม คือที่ขนาดความลึกของมีดกัดมาก สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าลดลง ส่วนเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไม่ทำให้รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ขณะเดียวกันความเร็วรอบในการตัดยังคงมีผลต่อสัดส่วนแรงตัดที่ขนาดความลึกเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วรอบตัดมาก สัดส่วนแรงตัดยังคงมากอยู่เช่นเดิม



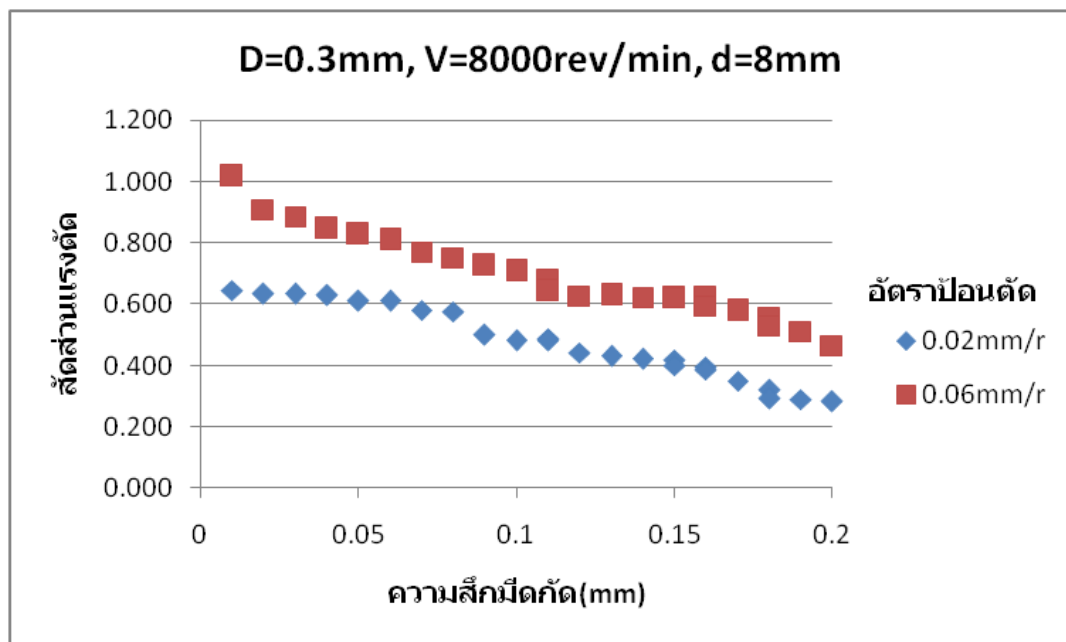
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อน 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4. 11 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดใหม่ โดยให้อัตราการป้อนเป็น 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบเช่นเดิม และเพิ่มความลึกในการกัดให้เป็น 0.7 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดเป็น 6 มิลลิเมตรเช่นเดิม จากนั้นทำการตัดชิ้นงานที่ความเร็วรอบตัดต่างกัน จากการเก็บข้อมูลสัดส่วนแรงที่ขนาดความลึกต่างๆ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด ยังคงมีแนวโน้มในลักษณะเดิม คือที่ขนาดความลึกของมีดกัดมาก สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าลดลง ส่วนเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไม่ทำให้รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ขณะเดียวกันความเร็วรอบในการตัดยังคงมีผลต่อสัดส่วนแรงตัดที่ขนาดความลึกเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วรอบตัดมาก สัดส่วนแรงตัดยังคงมากอยู่เช่นเดิม

จากการทดลอง พบว่าความเร็วรอบในการตัดที่เปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเงื่อนไขการตัดใดๆ จะไม่ส่งผลให้แนวโน้มของข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดเปลี่ยนแปลง

4.2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดความลึกมีดกัดที่อัตราการป้อนตัดเปลี่ยนแปลง

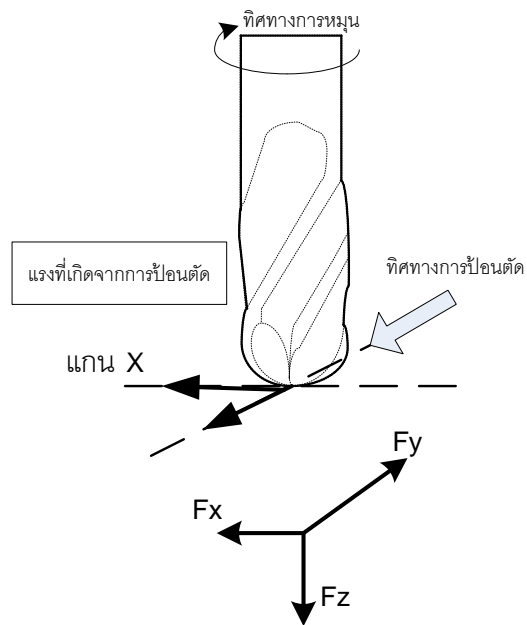


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

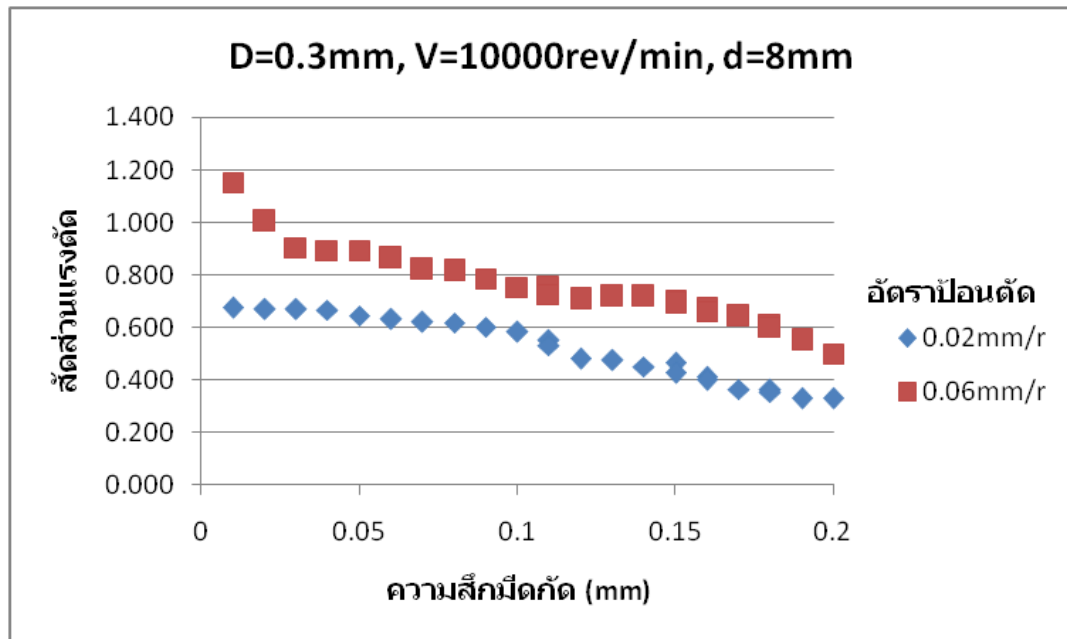
จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยทำการกำหนดเงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด ความลึกการกัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด แต่ทำการเปลี่ยนอัตราการป้อนตัดไปที่ระดับต่างกัน จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน คือที่ขนาดความลึกของมีดกัดมาก พบว่าสัดส่วนแรงตัดจะมีค่าน้อยลงเหมือนกันเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย จะได้สัดส่วนแรงตัดที่มีค่ามาก

จากรูปแบบความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดที่เกิดขึ้น พบว่าในกรณีที่อัตราการป้อนตัดสูง จะส่งผลให้สัดส่วนแรงตัด มีค่าสูงกว่าอัตราการป้อนตัดที่น้อยกว่าที่

ขนาดความลึกเดียวกัน เนื่องจากทิศทางของอัตราการป้อนตดนั้นอยู่ในแนวแกน Y ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแนวการเคลื่อนที่ของคมตด เนื่องจากคมตดมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุน จึงมีแนวการเคลื่อนที่ทั้งในแกน X และในแกน Y ดังนั้นอัตราการป้อนตดที่เปลี่ยนแปลงจึงมีผลต่อแรง F_x เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13



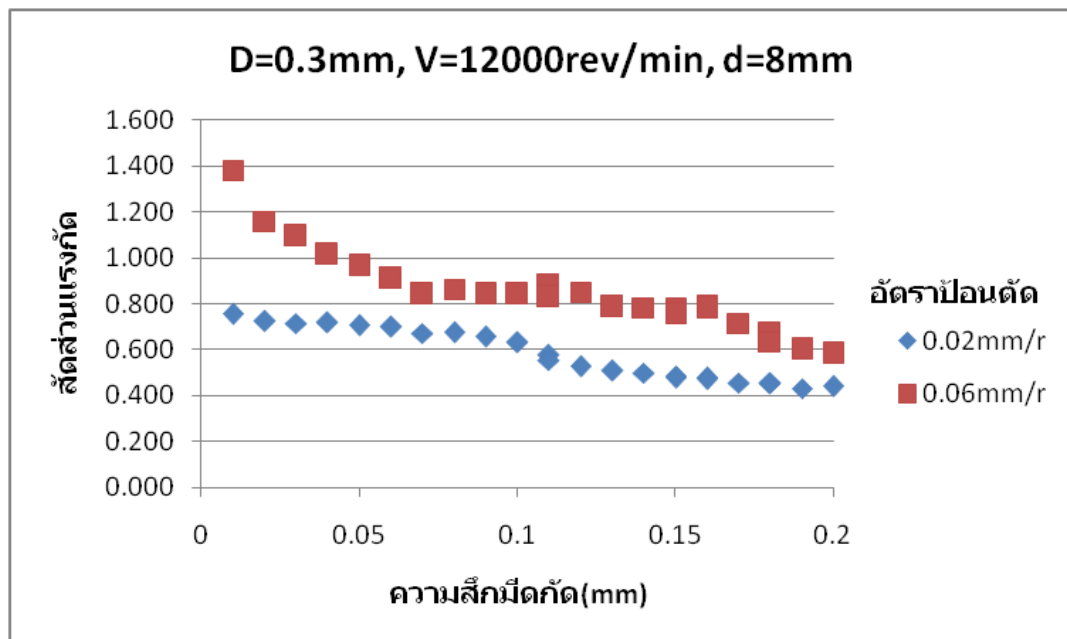
รูปที่ 4.13 แสดงแรงที่บริเวณคมตดเมื่ออัตราป้อนตดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเพิ่มขึ้นเป็น 10000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดนั้นให้เป็นไปตามเงื่อนไขการตัดเดิม จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลงตามขนาดความลึกของมีดกัดที่เพิ่มขึ้น

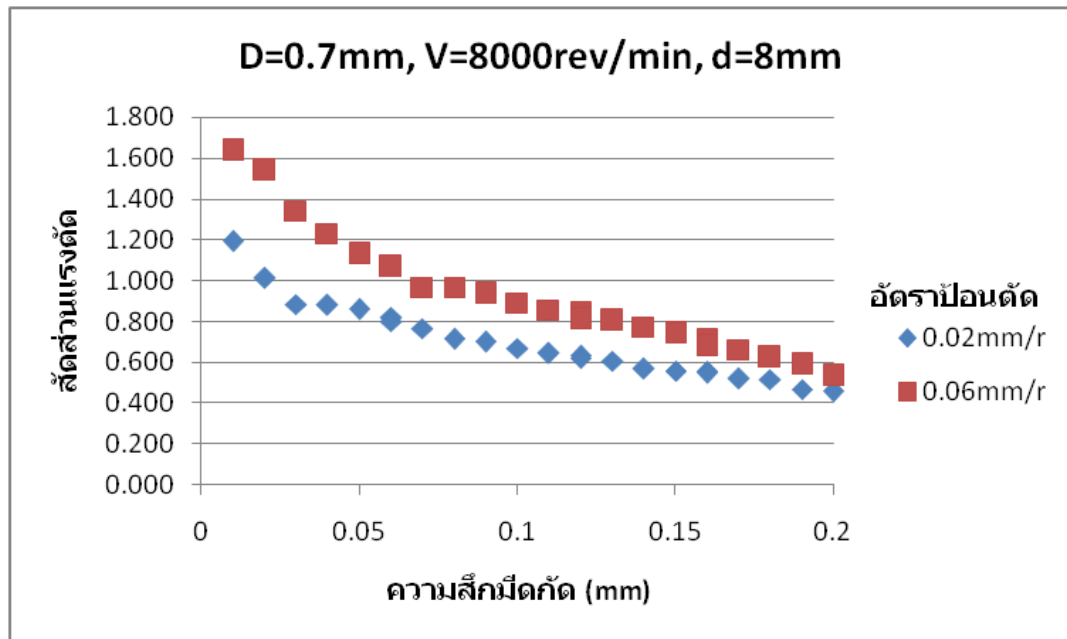
ในขณะเดียวกันก็พบว่าที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกันนั้น การให้อัตราการป้อนตัดที่มาก จะมีผลให้สัดส่วนของแรงตัดมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.15 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเพิ่มขึ้นเป็น 12000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดนั้นให้เป็นไปตามเงื่อนไขการตัดเดิม พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลงตามขนาดความลึกของมีดกัดที่เพิ่มขึ้น

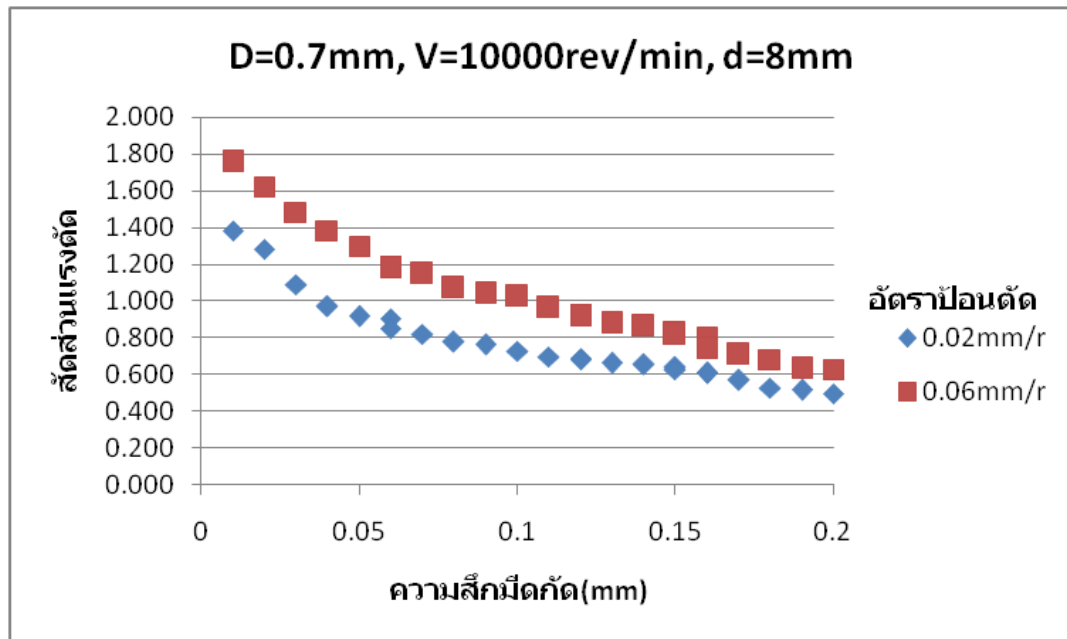
ในขณะเดียวกันก็พบว่าที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกันนั้น การให้อัตราการป้อนตัดที่มาก จะมีผลให้สัดส่วนของแรงตัดมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.16 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 8000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเปลี่ยนเป็น 0.7 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดนั้นให้เป็นไปตามเงื่อนไขการตัดเดิม คือ 8 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

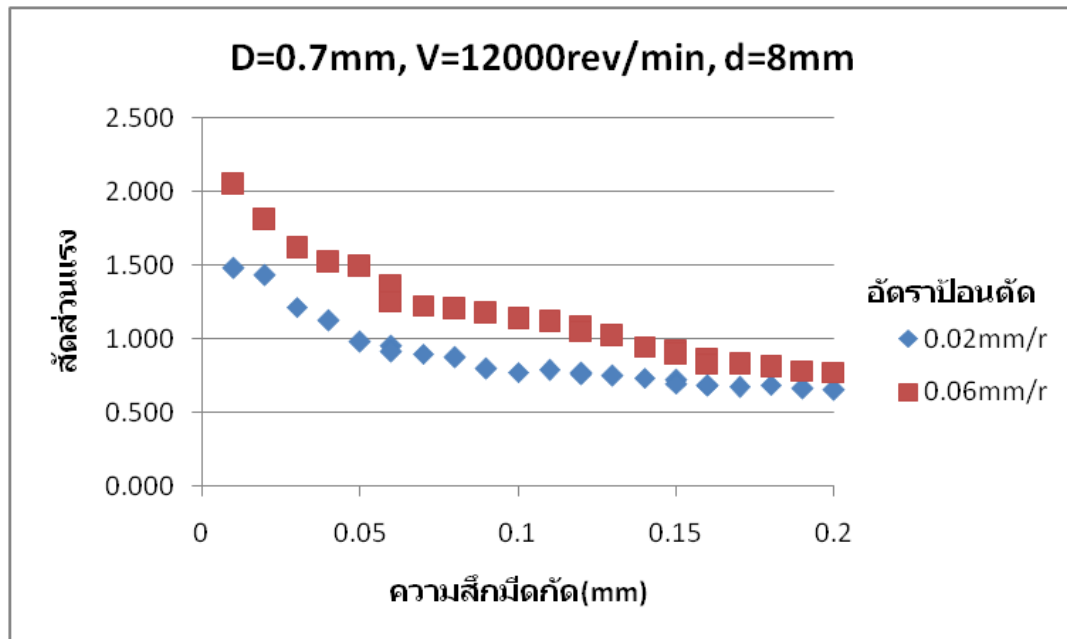
ในขณะเดียวกันก็พบว่าที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกันนั้น อัตราการป้อนตัดที่มากจะมีผลให้สัดส่วนของแรงตัดมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.17 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเพิ่มความเร็วรอบการตัดเป็น 10000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเป็น 0.7 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของมีดกัด 8 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

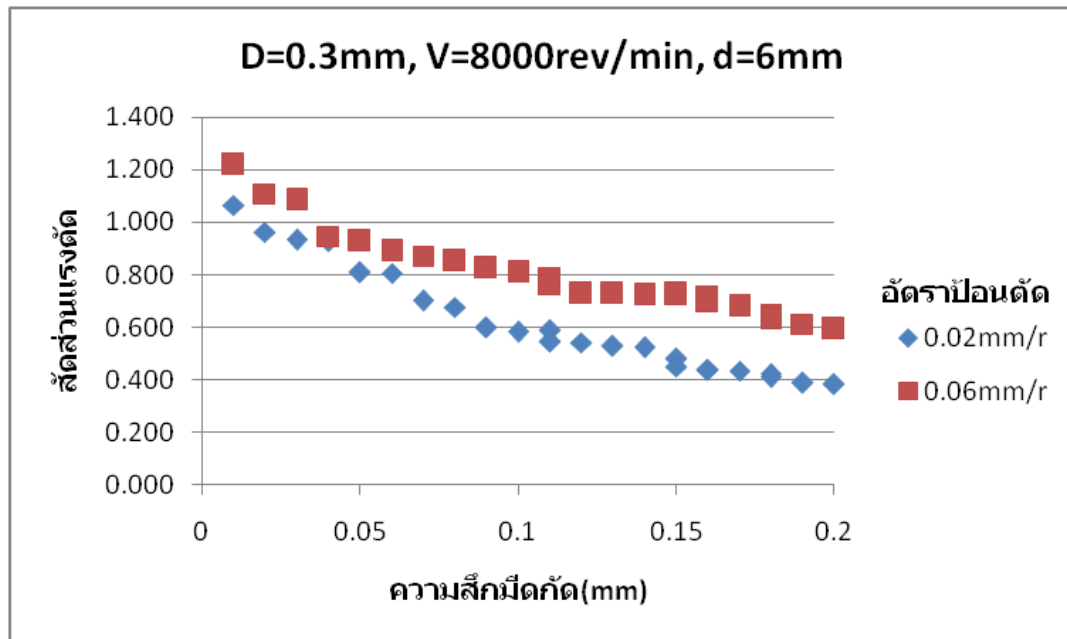
ในขณะเดียวกันก็พบว่าที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกันนั้น อัตราการป้อนตัดที่มาก จะส่งผลให้สัดส่วนของแรงตัดมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.18 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเพิ่มความเร็วรอบการตัดเป็น 12000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเป็น 0.7 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด 8 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

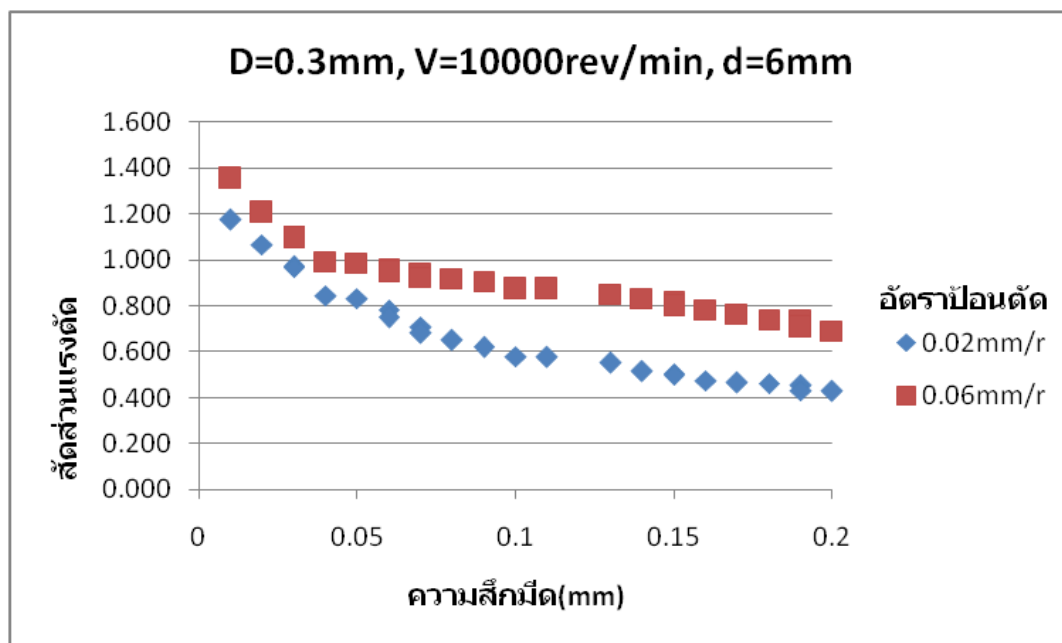
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อัตราการป้อนตัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่อัตราการป้อนตัดที่มากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีอัตราการป้อนตัดน้อย



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.19 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 8000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเป็น 0.3 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

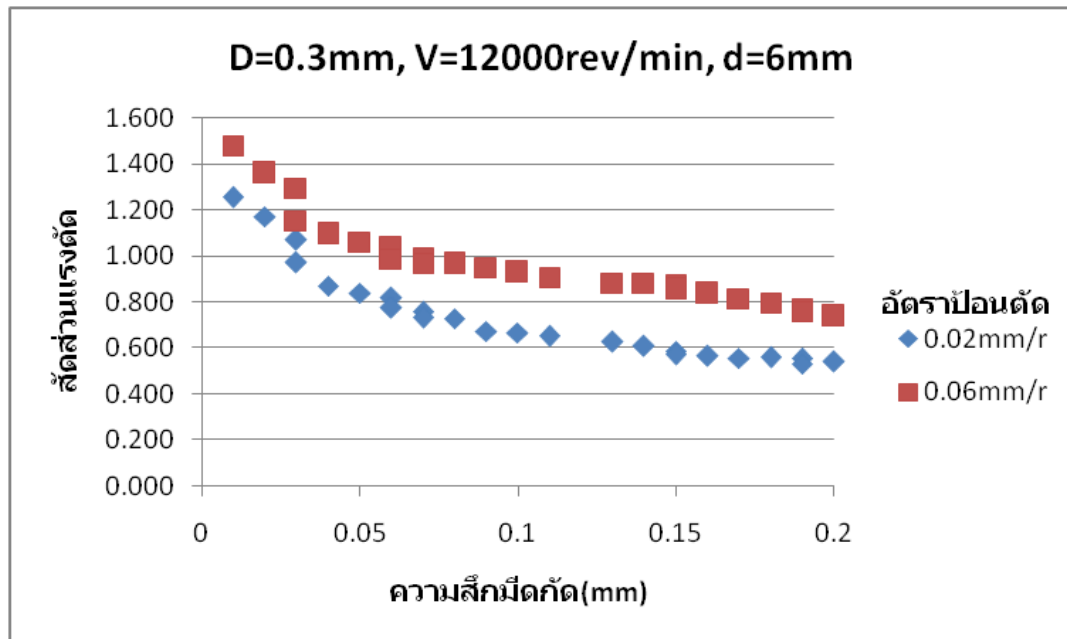
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อัตราการป้อนตัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่อัตราการป้อนตัดที่มากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีอัตราการป้อนตัดน้อย



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.20 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 10000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเป็น 0.3 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดถูกเปลี่ยนเป็น 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

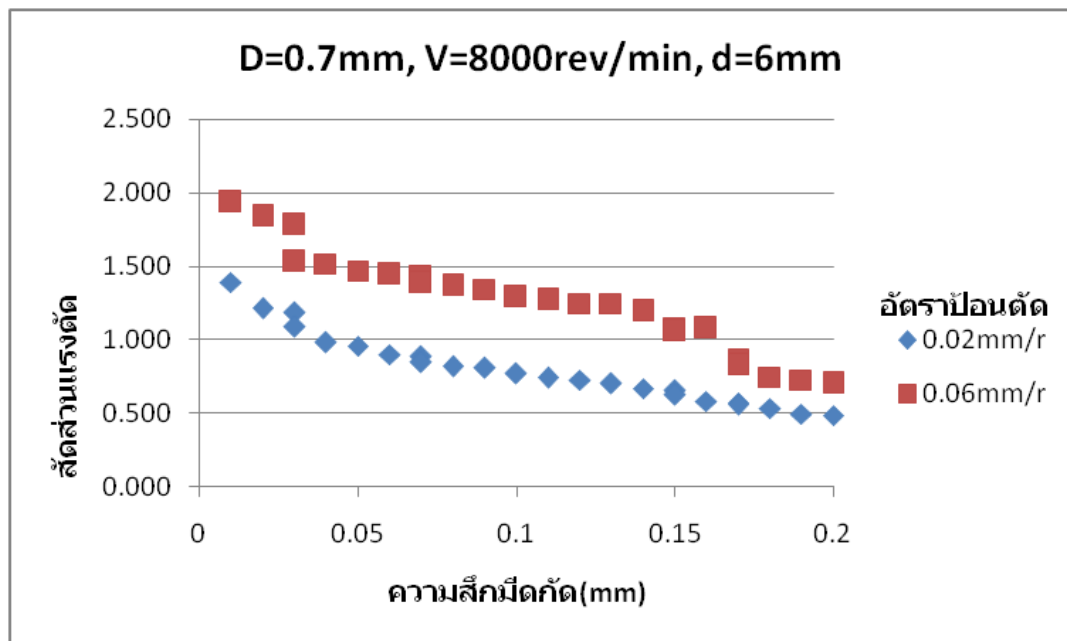
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อัตราการป้อนตัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่อัตราการป้อนตัดที่มากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีอัตราการป้อนตัดน้อย



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบตัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.21 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 12000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเป็น 0.3 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

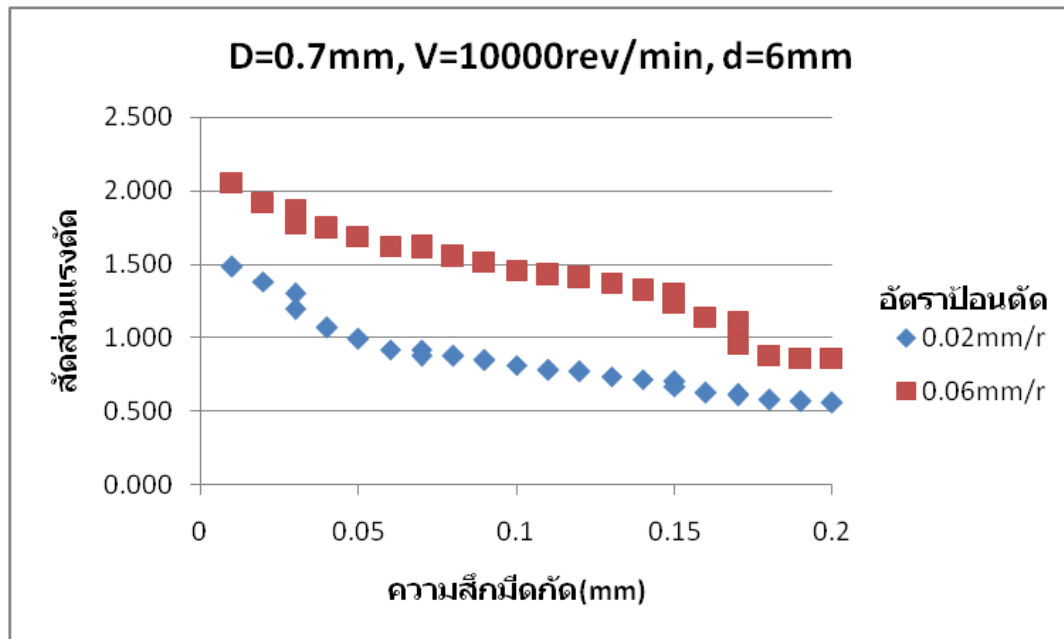
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อัตราการป้อนตัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่อัตราการป้อนตัดที่มากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีอัตราการป้อนตัดน้อย



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.22 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 8000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเป็น 0.7 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความเร็วของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความเร็วของมีดกัดเพิ่มขึ้น

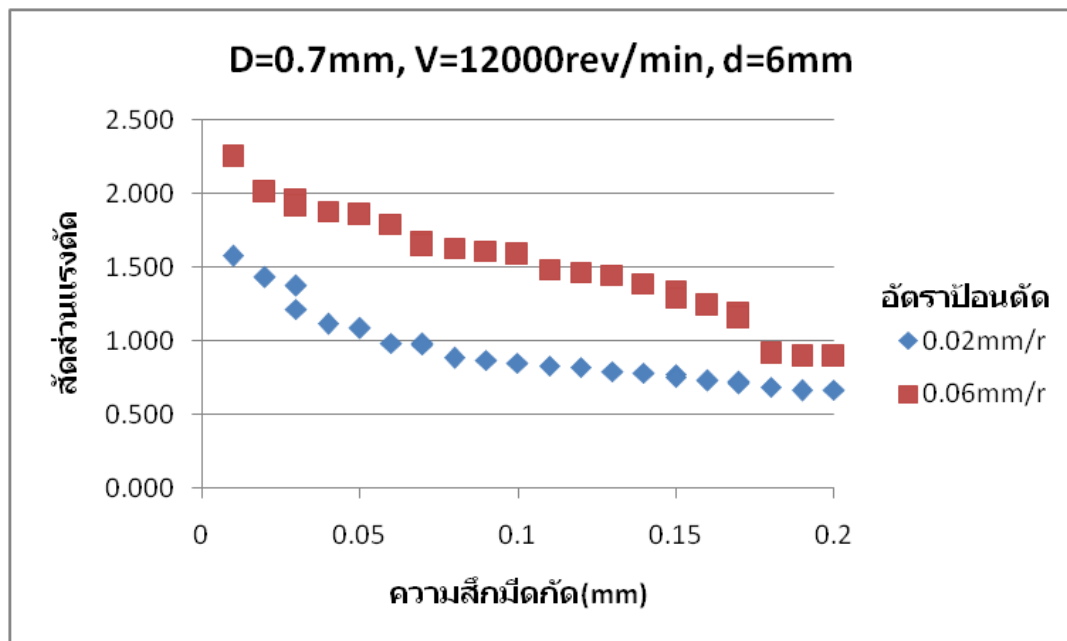
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อัตราการป้อนตัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความเร็วของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่อัตราการป้อนตัดที่มากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีอัตราการป้อนตัดน้อย



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.23 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 10000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเป็น 0.7 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อัตราการป้อนตัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่อัตราการป้อนตัดที่มากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีอัตราการป้อนตัดน้อย



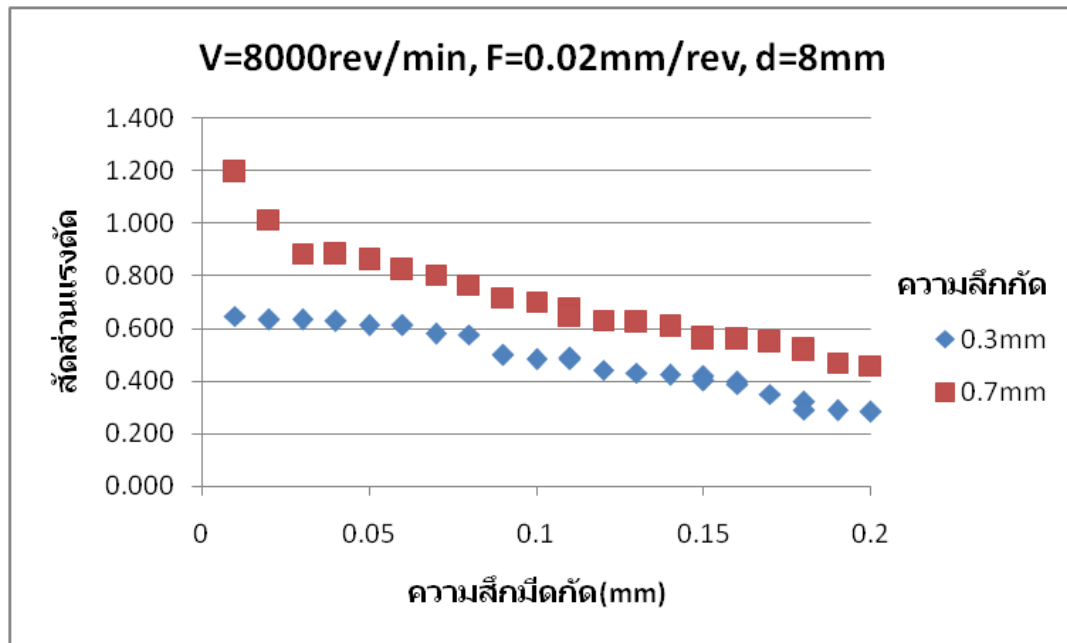
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที ความลึกการกัด 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.24 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 12000 รอบต่อนาที ส่วนความลึกในการกัดเป็น 0.7 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อัตราการป้อนตัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่อัตราการป้อนตัดที่มากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีที่อัตราการป้อนตัดน้อย

ดังนั้นจากการทดลองเปลี่ยนอัตราการป้อนตัด จะเห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนตัดเปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของดอกกัดยังคงเป็นไปในลักษณะเดิม จากลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าอัตราการป้อนตัดที่เปลี่ยนไม่มีผลต่อสัดส่วนของแรงตัด

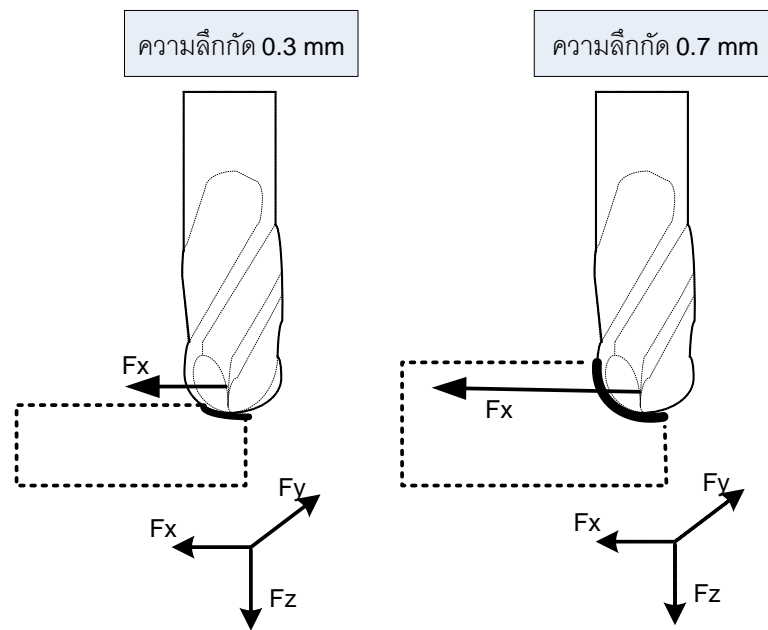
4.2.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด กับขนาดความลึกดอกกัดที่ความลึกในการตัดเปลี่ยนแปลง



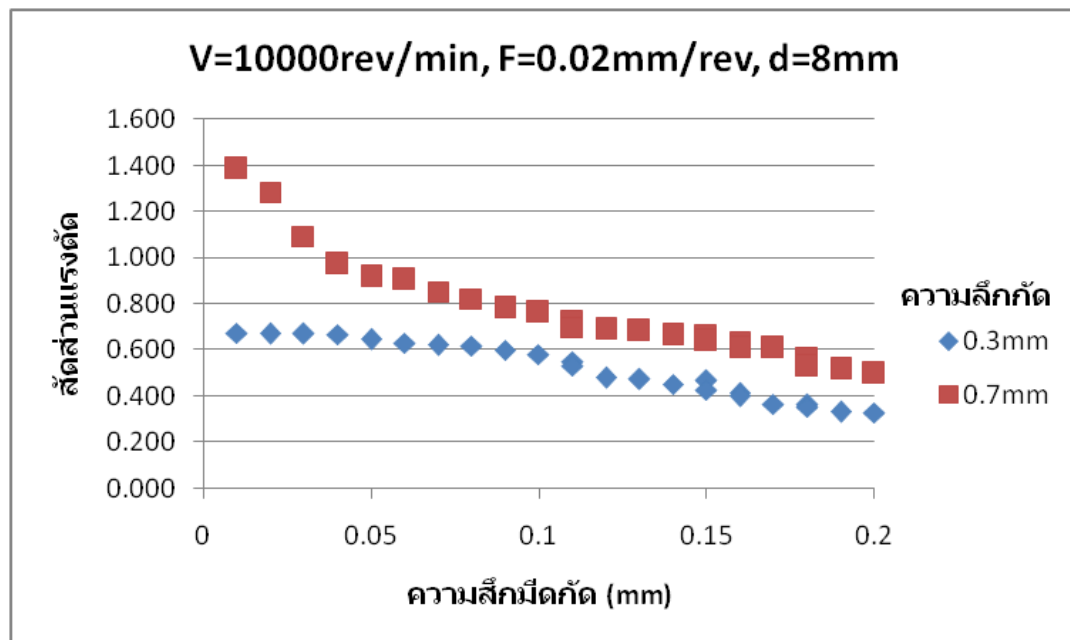
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.25 ในการทดลองนั้นได้ทำการกำหนดเงื่อนไขการตัดไว้คงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร แล้วทำการเปลี่ยนความลึกในการกัดเป็น 2 ระดับ จากข้อมูลที่ได้พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดที่ความลึกการกัดที่ต่างกัน แนวโน้มของข้อมูลจะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ เมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมาก และสัดส่วนของแรงตัดจะเริ่มลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

ส่วนในกรณีที่ความลึกในการตัดที่มากขึ้น จะมีสัดส่วนของแรงตัดที่มากกว่ากรณีที่ความลึกในการตัดน้อย ที่ขนาดความลึกของมีดกัดที่เท่ากัน มีสาเหตุมาจาก เมื่อความลึกในการกัดมากทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างคมตัดกับชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นที่บริเวณคมตัดนั้นเป็นแรง F_x และแรง F_y จึงส่งผลให้แรงทั้งสองเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อแรง F_x เพิ่มขึ้นจึงทำให้สัดส่วนของแรงตัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.26



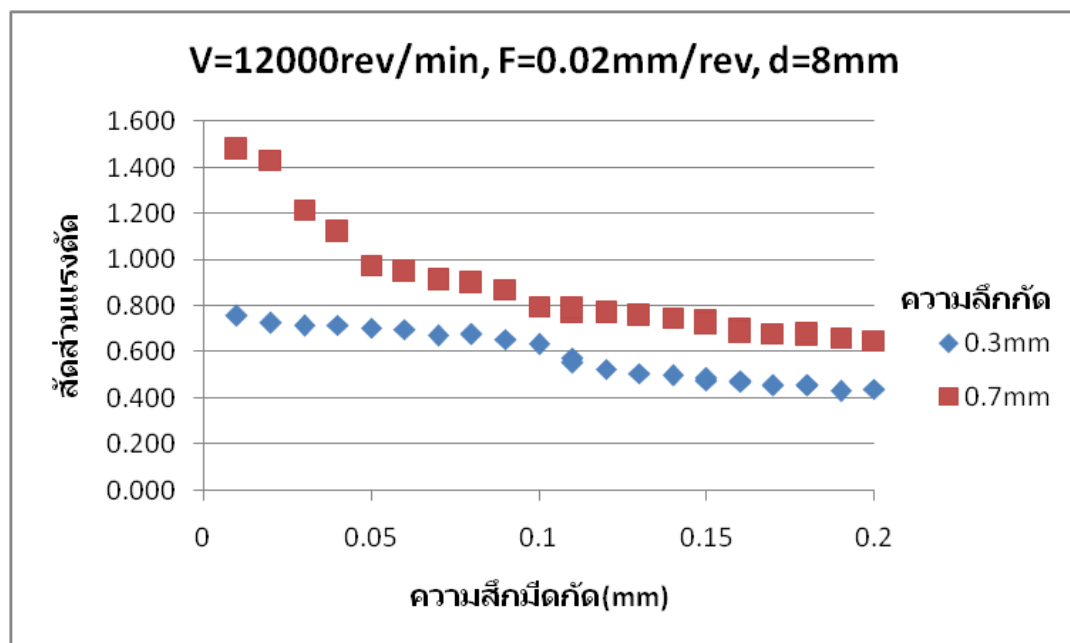
รูปที่ 4.26 แสดงแรง F_x ที่เพิ่มขึ้นเมื่อความลึกการกัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.27 เมื่อทำการเปรียบเทียบความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร พบว่าสัดส่วนของแรง ที่วัดได้ มีแนวโน้มของข้อมูลไปในลักษณะเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สัดส่วนของแรงตัดลดลง

ขณะเดียวกันที่ความลึกการกัดที่มีค่ามาก จะส่งผลให้สัดส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้นที่ค่าความลึกเดียวกัน เนื่องจากที่ความลึกการกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างคมตัดของมีดกัดกับเนื้อชิ้นงานมาก ทำให้แรง F_x มากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้สัดส่วนแรงตัด F_x/F_z มีค่ามากกว่าเงื่อนไขการตัดที่ใช้ความลึกการกัดน้อย ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.26

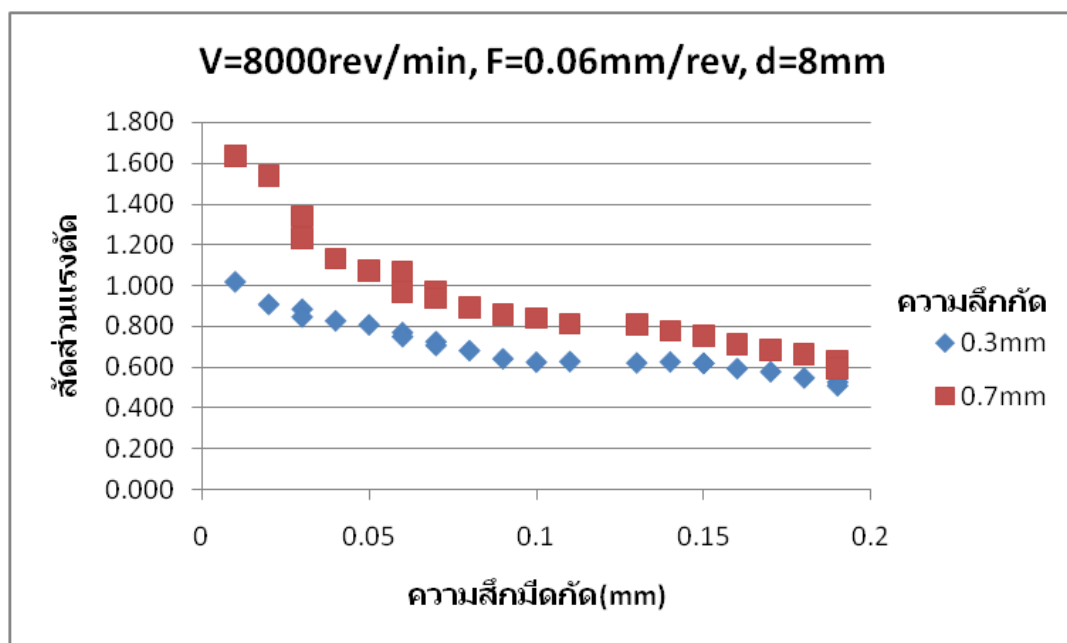


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.28 เมื่อทำการเปรียบเทียบความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/

รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร พบว่าสัดส่วนของแรง ที่วัดได้ มีแนวโน้มของ ข้อมูลไปในลักษณะเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สัดส่วนของแรง ตัดลดลง

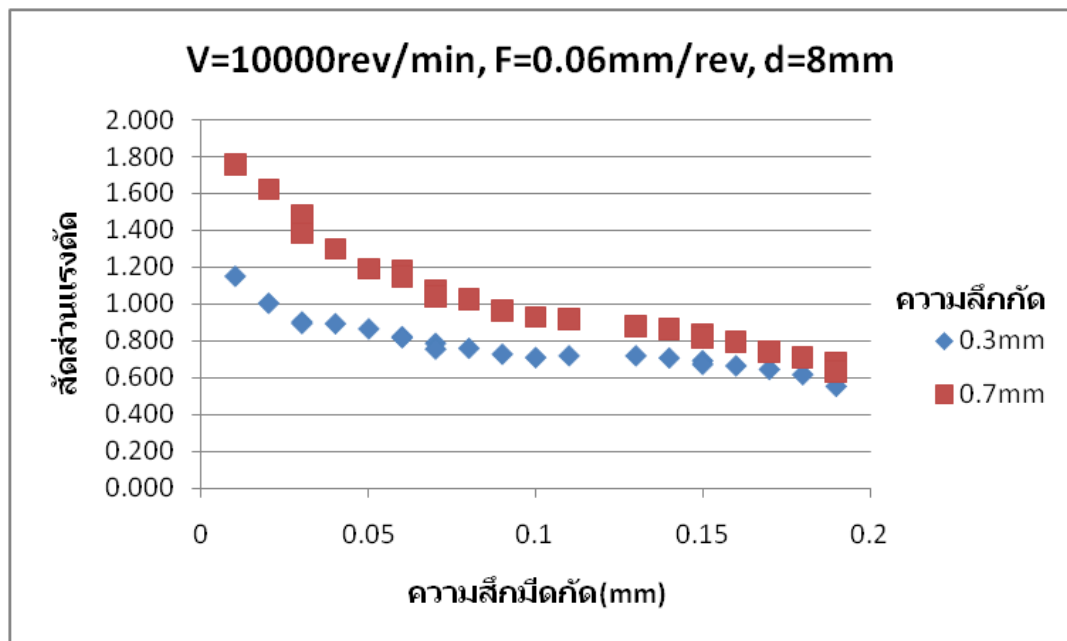
ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลสัดส่วนแรงตัดของความลึกในการตัดทั้ง 2 ระดับ พบว่า ความลึกในการกัดที่มากจะส่งผลให้สัดส่วนของแรงตัดมากขึ้นที่ขนาดความลึกเดียวกัน



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.28 เมื่อทำการเปรียบเทียบความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร พบว่าสัดส่วนของแรง ที่วัดได้ มีแนวโน้มของ ข้อมูลไปในลักษณะเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สัดส่วนของแรง ตัดลดลง

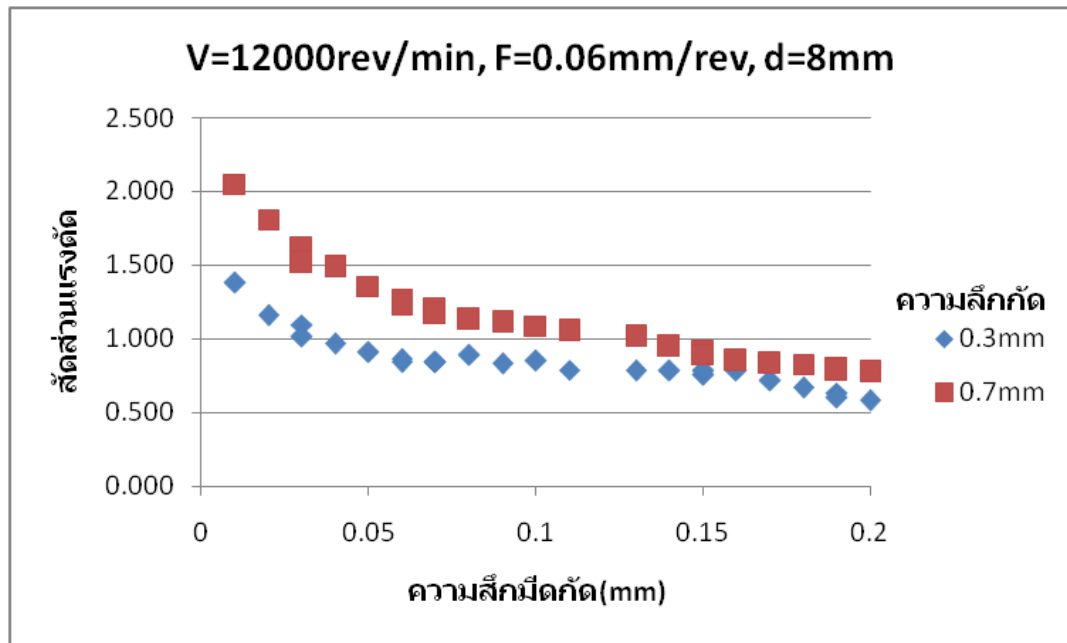
ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลสัดส่วนแรงตัดของความลึกในการตัดทั้ง 2 ระดับ พบว่า ความลึกในการกัดที่มากจะส่งผลให้สัดส่วนของแรงตัดมากขึ้นที่ขนาดความลึกเดียวกัน



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดกับความลึกของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.30 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 10000 รอบต่อนาที ส่วนอัตราการป้อนตัดเป็น 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 8 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

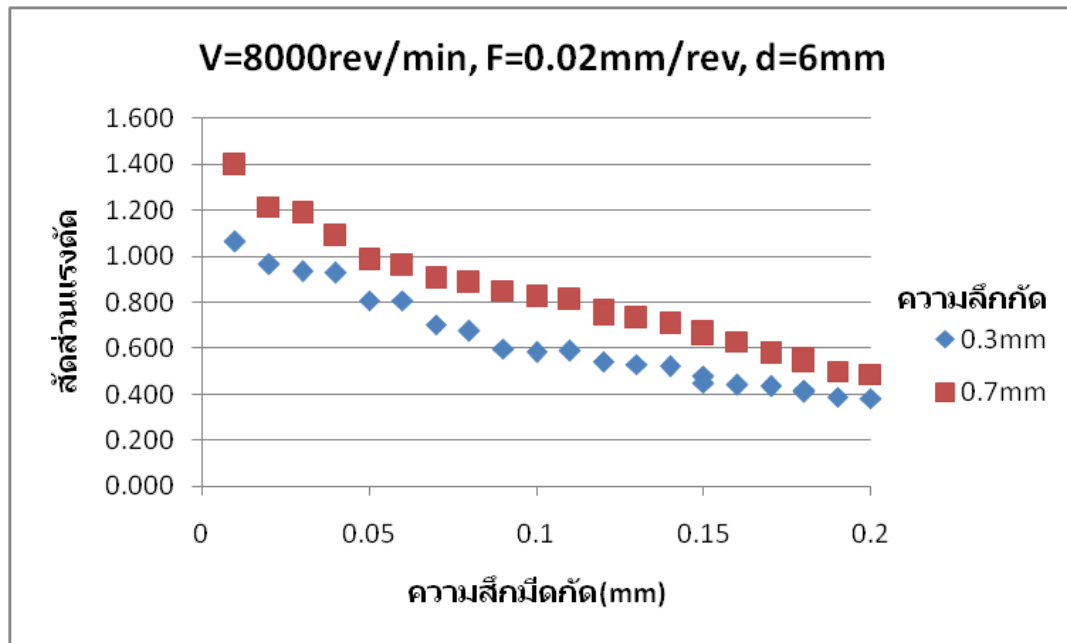
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่มีความลึกการกัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่ความลึกการกัดมากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีที่มีความลึกการกัดน้อย



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 8 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.31 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 12000 รอบต่อนาที ส่วนอัตราการป้อนตัดเป็น 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 8 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

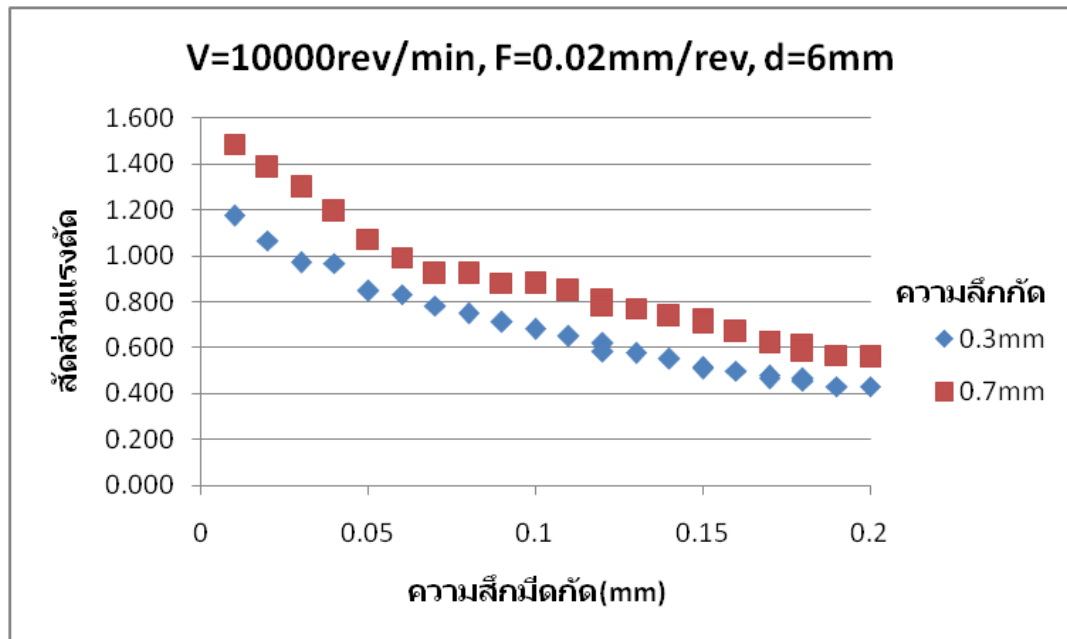
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่มีความลึกการกัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่ความลึกการกัดมากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีที่ความลึกการกัดน้อย



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.32 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 12000 รอบต่อนาที ส่วนอัตราป้อนตัดเป็น 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

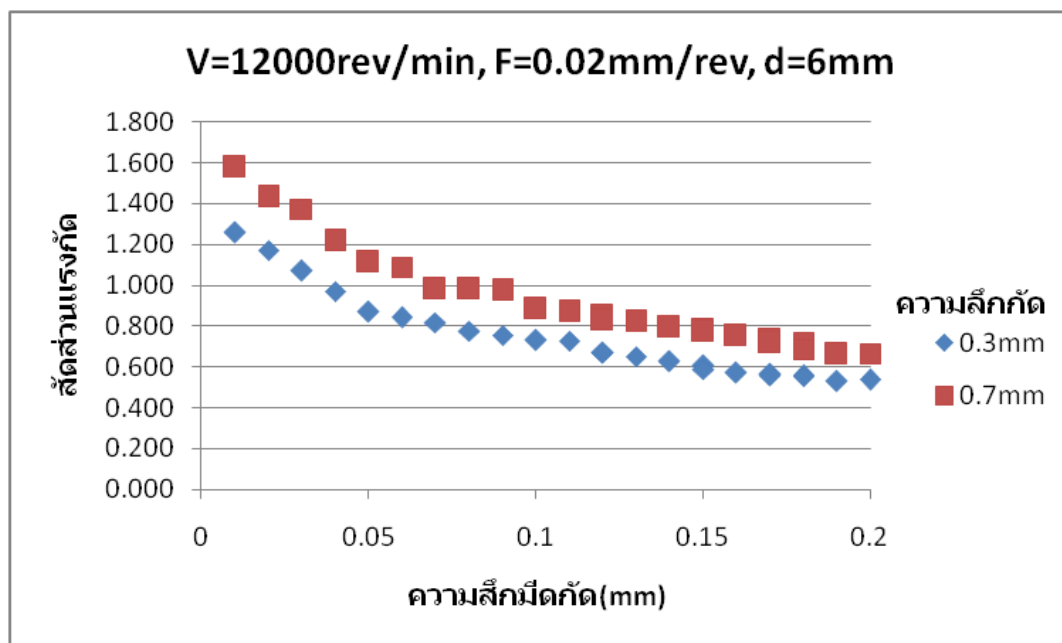
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่มีความลึกการกัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่ความลึกการกัดมากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีที่ความลึกการกัดน้อย



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.33 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 10000 รอบต่อนาที ส่วนอัตราการป้อนตัดเป็น 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

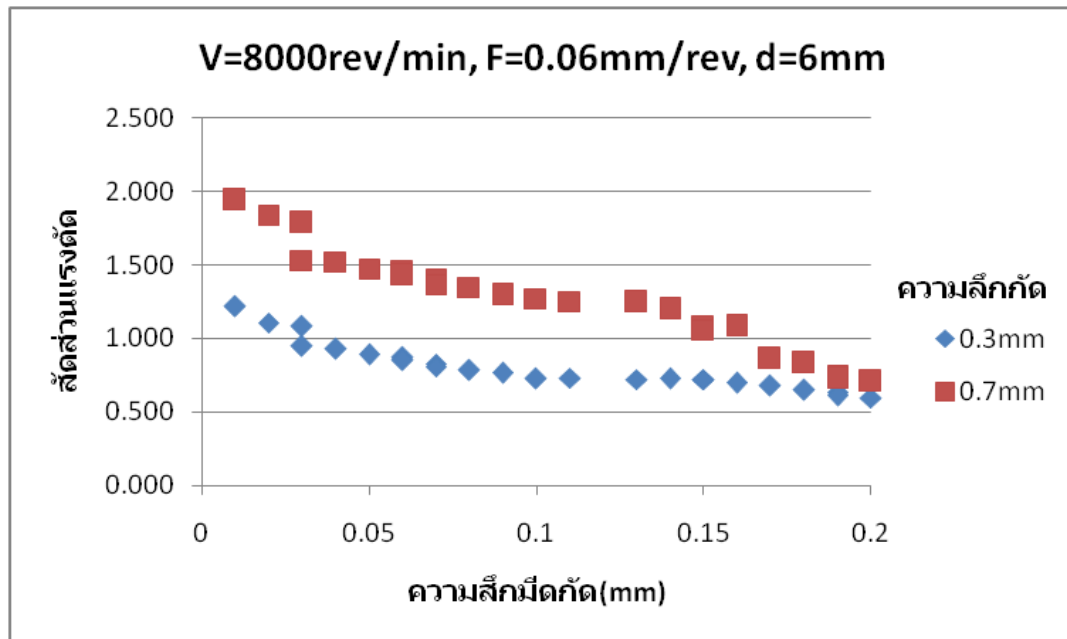
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่มีความลึกการกัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่ความลึกการกัดมากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีที่มีความลึกการกัดน้อย



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.34 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบการตัดเป็น 12000 รอบต่อนาที ส่วนอัตราการป้อนตัดเป็น 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดเป็น 6 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสัดส่วนแรงตัดจะลดลง ในขณะที่ขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

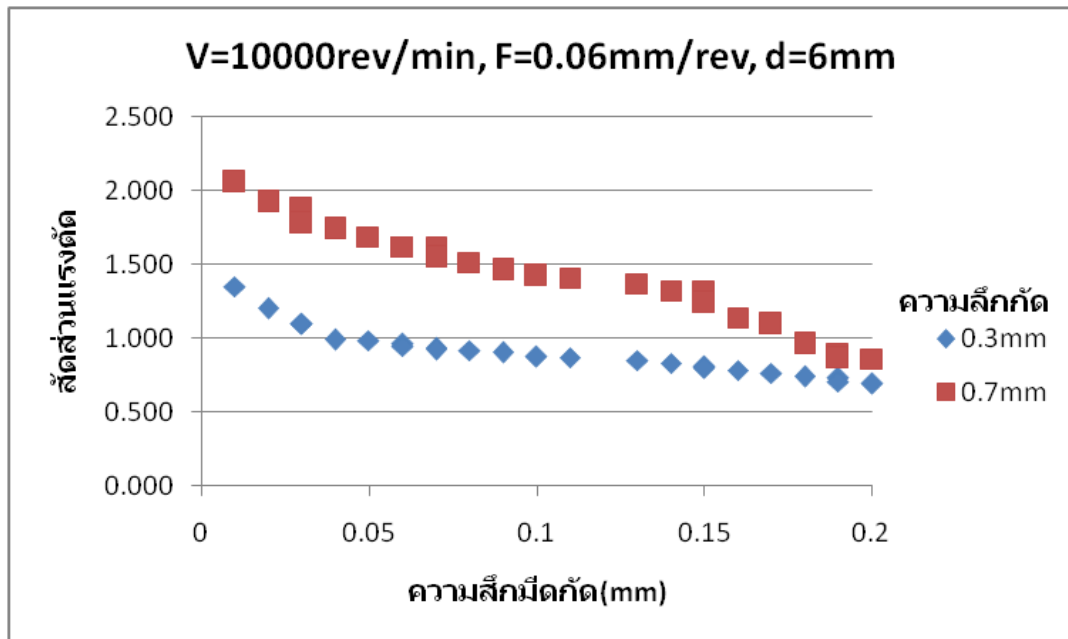
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่มีความลึกการกัดทั้งสองระดับ ที่ขนาดความลึกของมีดกัดเดียวกัน ก็พบว่าที่ความลึกการกัดมากจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากกว่ากรณีที่ความลึกการกัดน้อย



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.35 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยได้กำหนดให้ความเร็วรอบตัดอยู่ที่ 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร จากนั้นทำการตัดชิ้นงานโดยเปลี่ยนความลึกในการกัดเป็น 0.3 และ 0.7 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดที่ความลึกการกัดทั้งสองระดับนั้น มีแนวโน้มของข้อมูลไปในลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงจะมาก และสัดส่วนของแรงจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

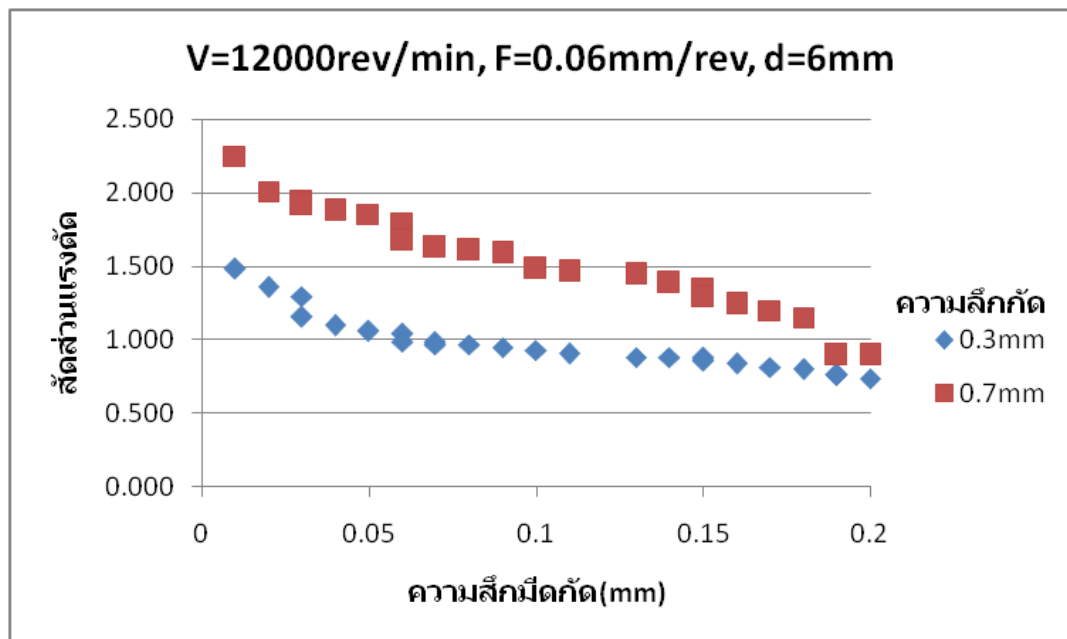
ขณะเดียวกันที่ขนาดความลึกเดียวกัน ความลึกในการกัดที่มากกว่าจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากตามไปด้วย



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.36 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยได้กำหนดให้ความเร็วรอบตัดอยู่ที่ 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จากนั้นทำการตัดชิ้นงานโดยเปลี่ยนความลึกในการกัดเป็น 0.3 และ 0.7 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดที่ความลึกการกัดทั้งสองระดับนั้นมีแนวโน้มของข้อมูลไปในลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงจะมาก และสัดส่วนของแรงจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

ขณะเดียวกันที่ขนาดความลึกเดียวกัน ความลึกในการกัดที่มากกว่าจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากตามไปด้วย



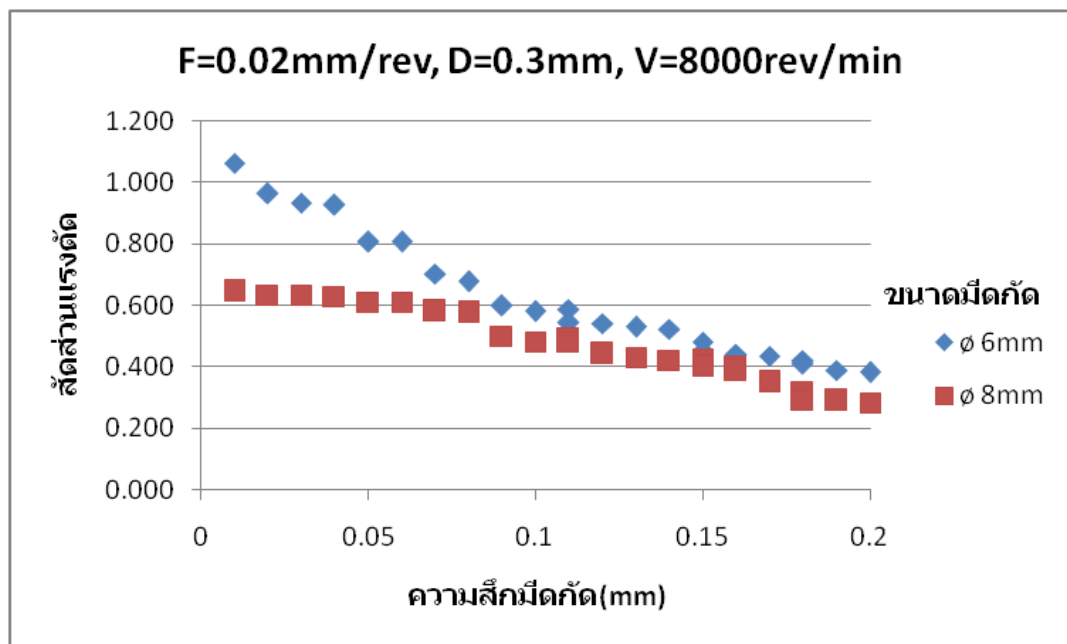
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด 6 มิลลิเมตร ที่ความลึกการกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.3 7 เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยได้กำหนดให้ความเร็วรอบตัดอยู่ที่ 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จากนั้นทำการตัดชิ้นงานโดยเปลี่ยนความลึกในการกัดเป็น 0.3 และ 0.7 มิลลิเมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดที่ความลึกการกัดทั้งสองระดับนั้นมีแนวโน้มของข้อมูลไปในลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงจะมาก และสัดส่วนของแรงจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

ขณะเดียวกันที่ขนาดความลึกเดียวกัน ความลึกในการกัดที่มากกว่าจะมีสัดส่วนแรงตัดที่มากตามไปด้วย

จากการทดลอง เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด ที่ความลึกในการกัดต่างกัน พบว่าไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลง แต่แนวโน้มของข้อมูลยังคงเป็นไปในลักษณะเดิม จากแนวโน้มของข้อมูลที่ไม่เปลี่ยนแปลงสามารถบอกได้ว่าความลึกในการตัดที่เปลี่ยนนั้น ไม่ส่งผลทำให้สัดส่วนแรงตัดเปลี่ยนแปลง

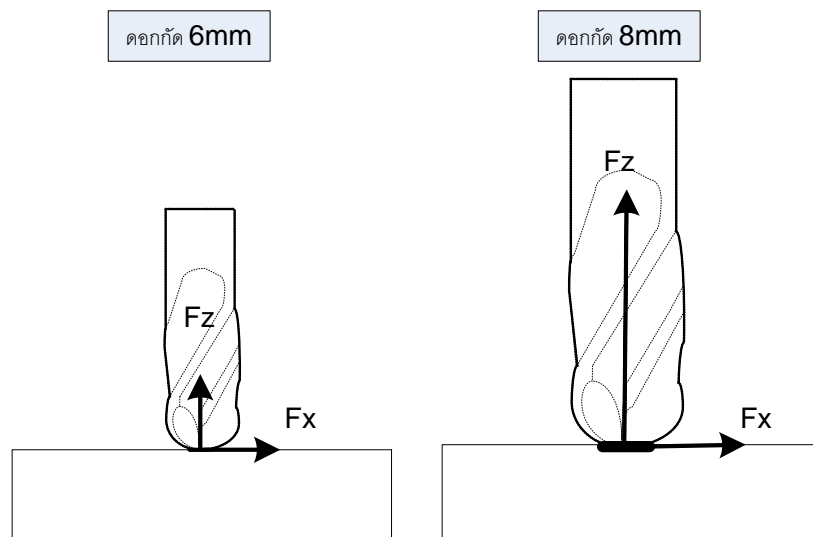
4.2.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดความลึกดอกกัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกัดเปลี่ยนแปลง



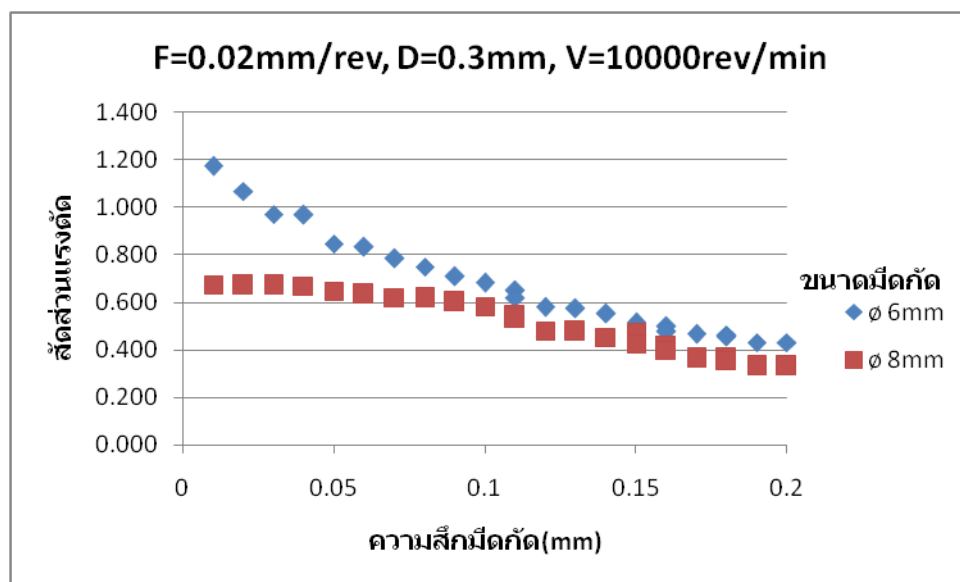
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.38 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร พบว่าข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดใหญ่ จะส่งผลให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น มากกว่าแรง F_x ดังนั้นสัดส่วนของแรงตัด F_x/F_z จึงมีค่าลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 แสดงพื้นที่สัมผัสระหว่างดอกกัดกับชิ้นงานเมื่อขนาดดอกกัดต่างกัน

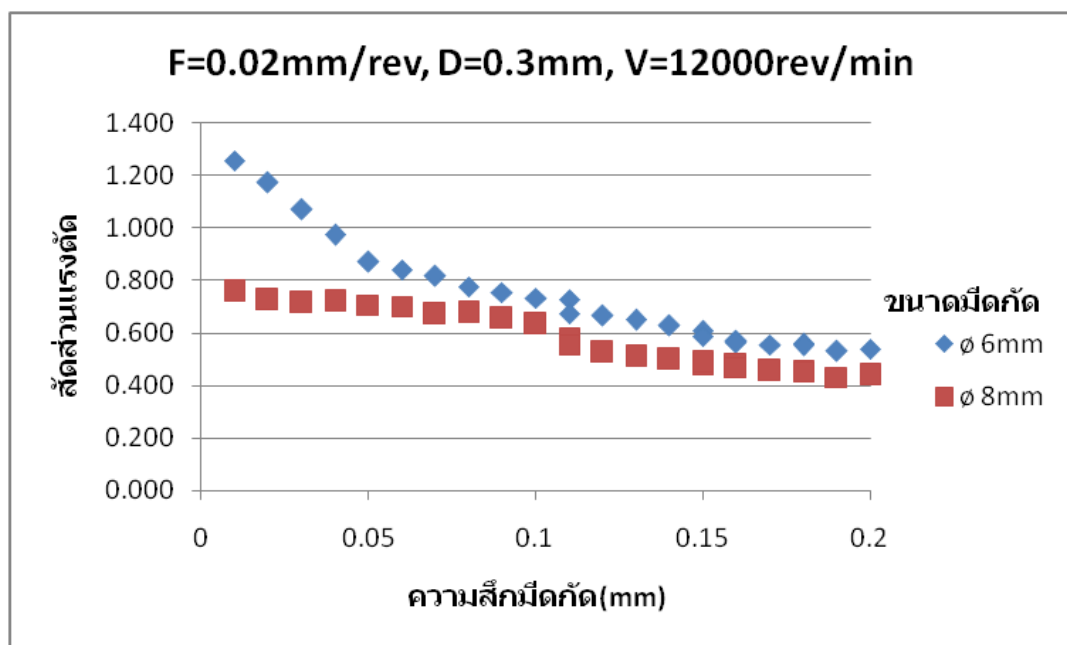


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.40 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร

พบว่าข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง

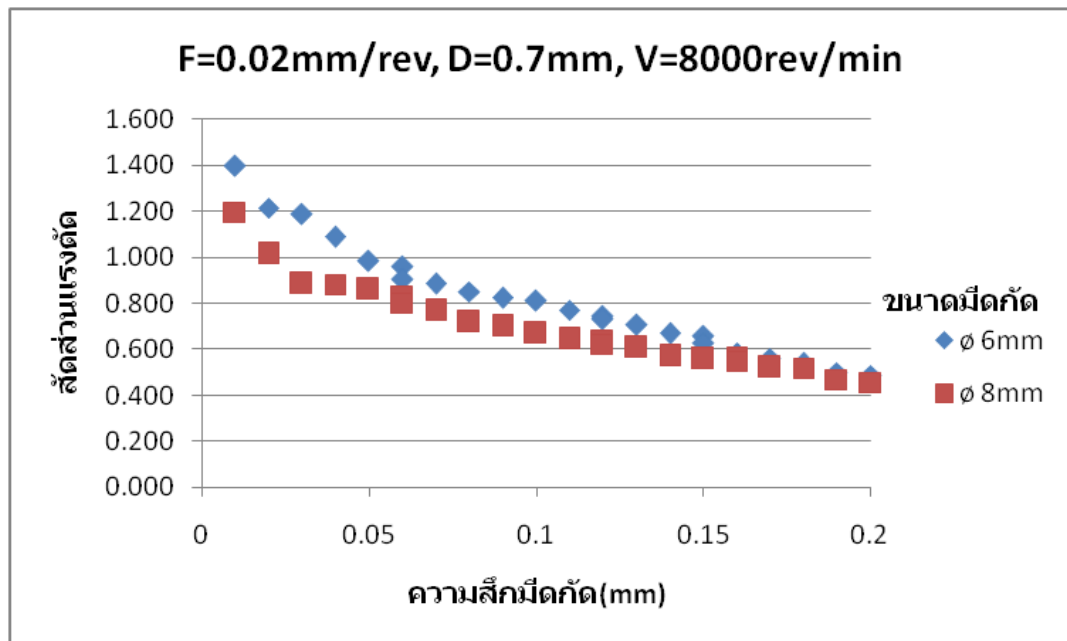


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.41 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร พบว่าข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับ

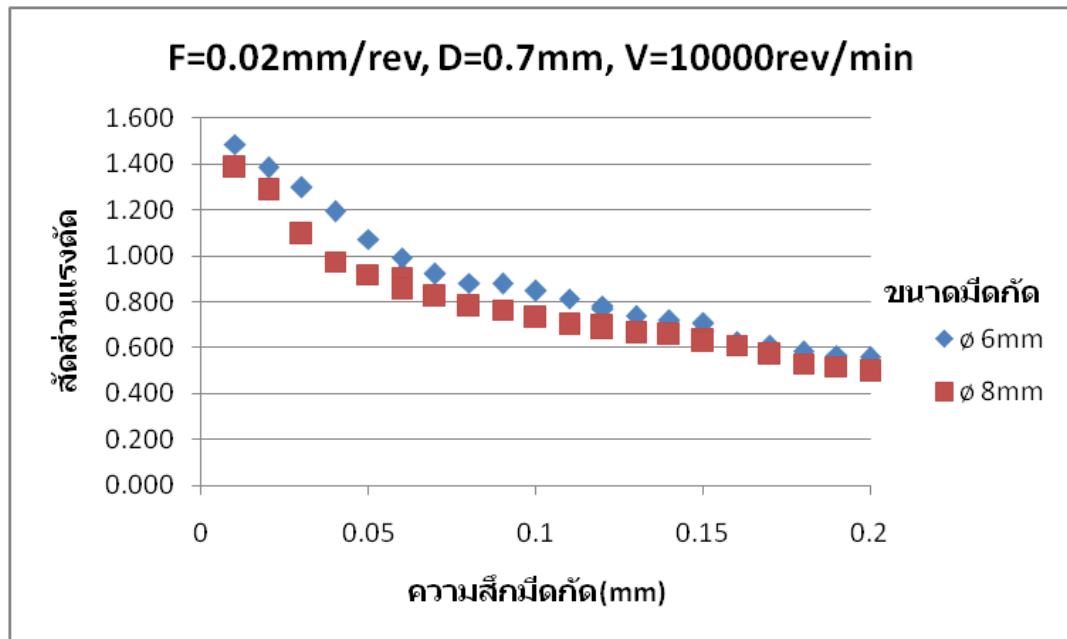
ชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.42 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร พบว่า ข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

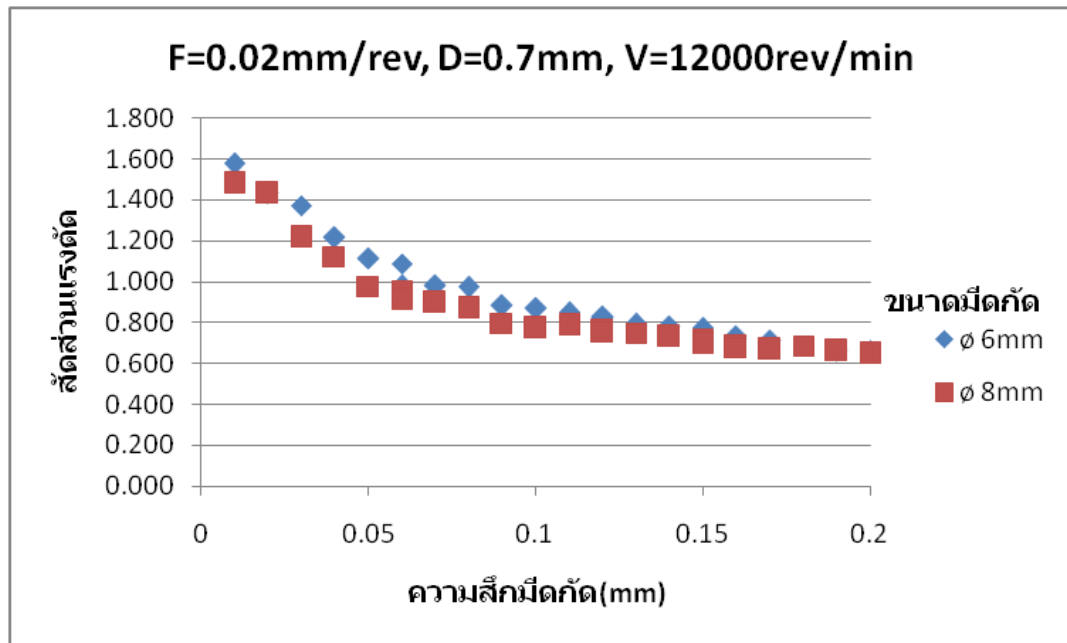
ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบตัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.43 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความเร็วของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร พบว่าข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความเร็วของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความเร็วของมีดกัดเพิ่มขึ้น

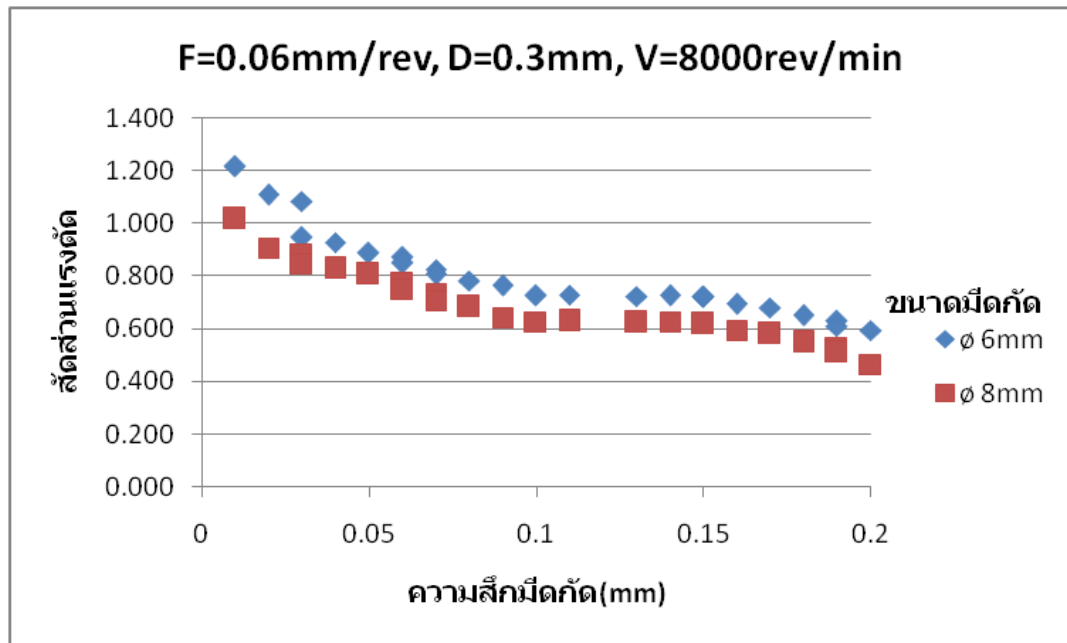
ขณะเดียวกันที่ค่าความเร็วเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.44 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร พบว่าข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

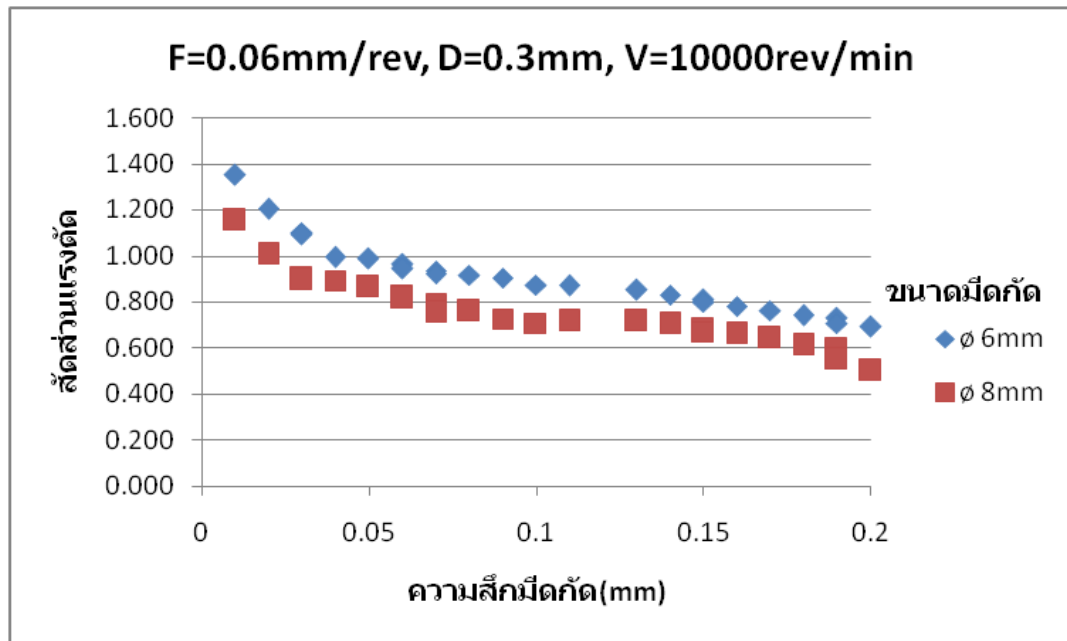
ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนของแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.45 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร พบว่า ข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

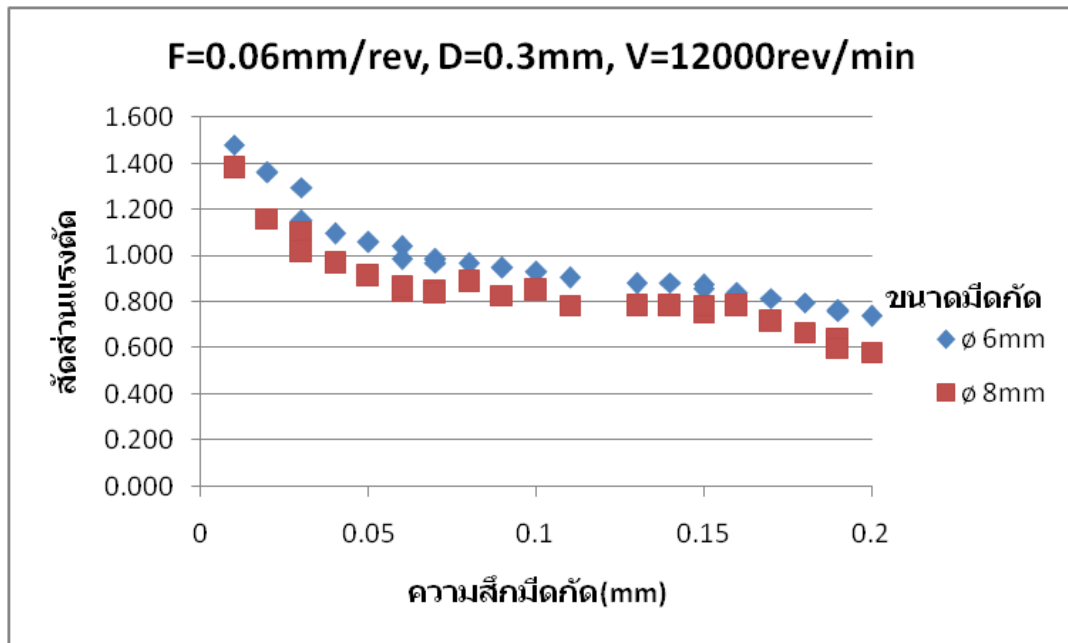
ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.46 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร พบว่าข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

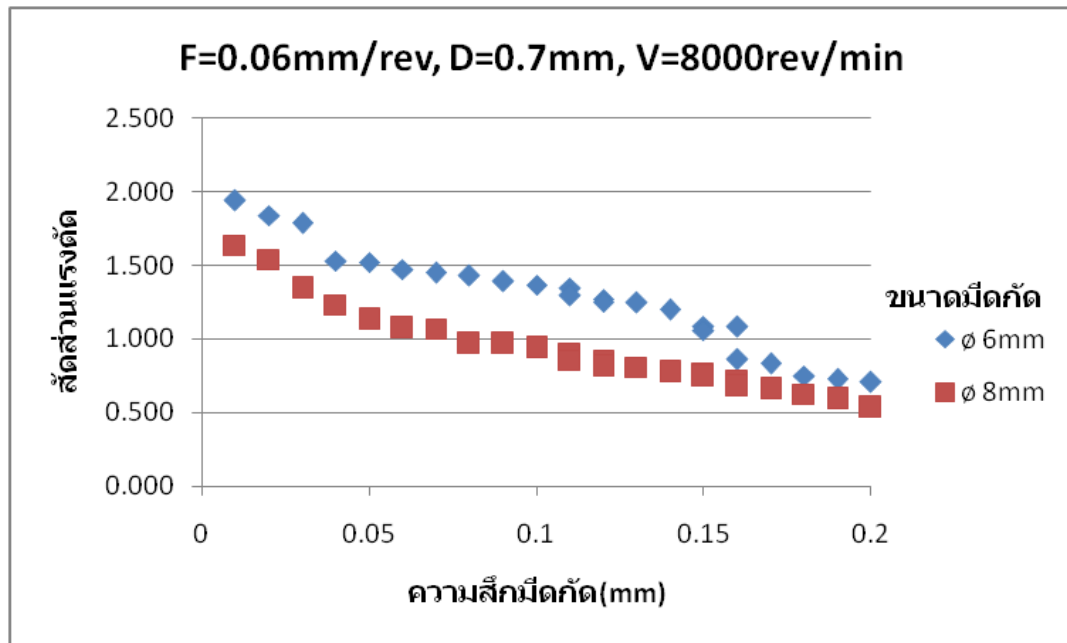
ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.47 เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความลึกของมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน โดยให้เงื่อนไขการตัดอื่นๆคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ขนาดความลึกในการกัด 0.3 มิลลิเมตร พบว่าข้อมูลสัดส่วนของแรงที่วัดได้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น

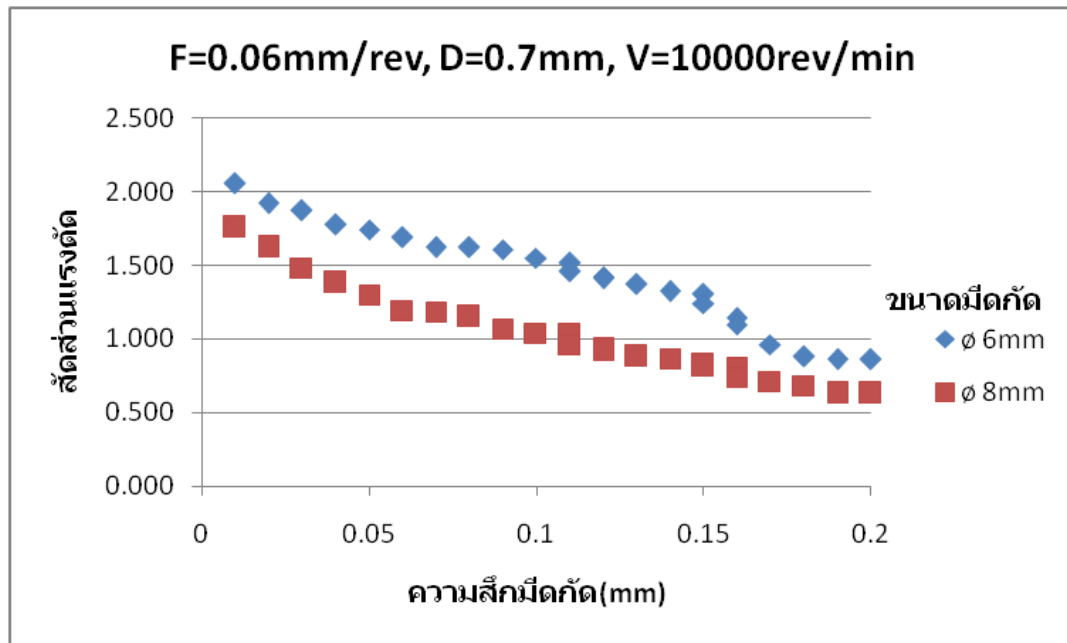
ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัดกับส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.48 ทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยการให้ ความเร็วรอบตัด 8000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร คงที่ จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างส่วนของแรงตัดกับขนาดความเร็วของมีดกัดที่ขนาดของมีดกัดต่างกัน พบว่าที่ขนาดความเร็วที่น้อย ส่วนของแรงตัดจะมีค่ามาก และส่วนของแรงตัดจะลดลงตามขนาดความเร็วที่เพิ่มมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะรูปแบบเดียวกัน แม้ขนาดของมีดกัดจะต่างก็ตาม

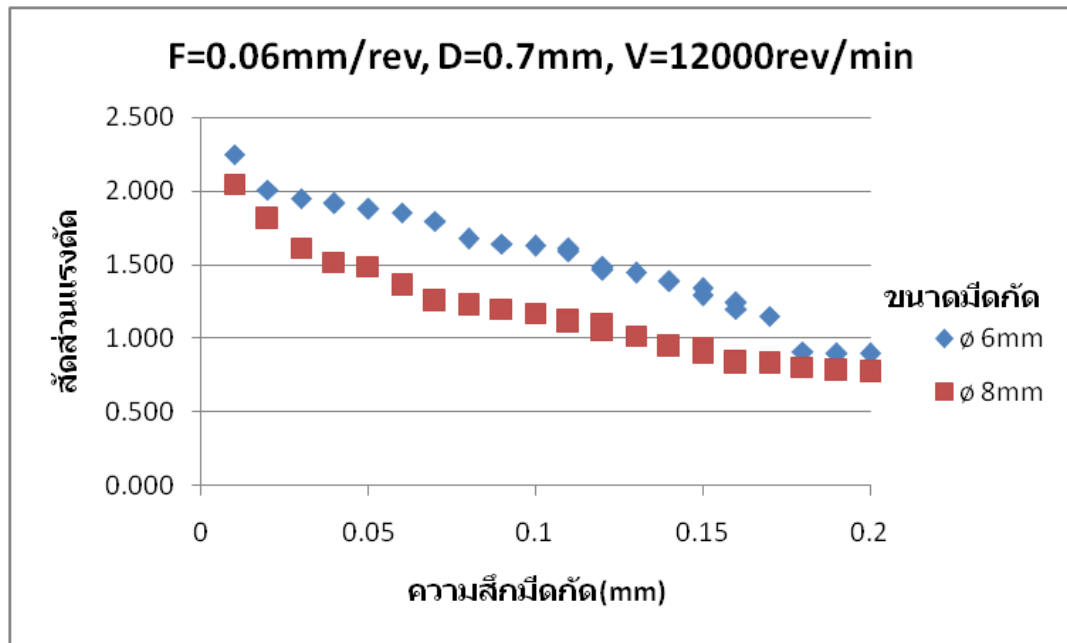
ขณะเดียวกันที่ค่าความเร็วเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้ส่วนของแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.4 9 ทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยการให้ ความเร็วรอบตัด 10000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร คงที่ จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดที่ขนาดของมีดกัดต่างกัน พบว่าที่ขนาดความลึกน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่ามาก และสัดส่วนแรงตัดจะลดลงตามขนาดความลึกที่เพิ่มมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะรูปแบบเดียวกัน แม้ขนาดของมีดกัดจะต่างก็ตาม

ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง



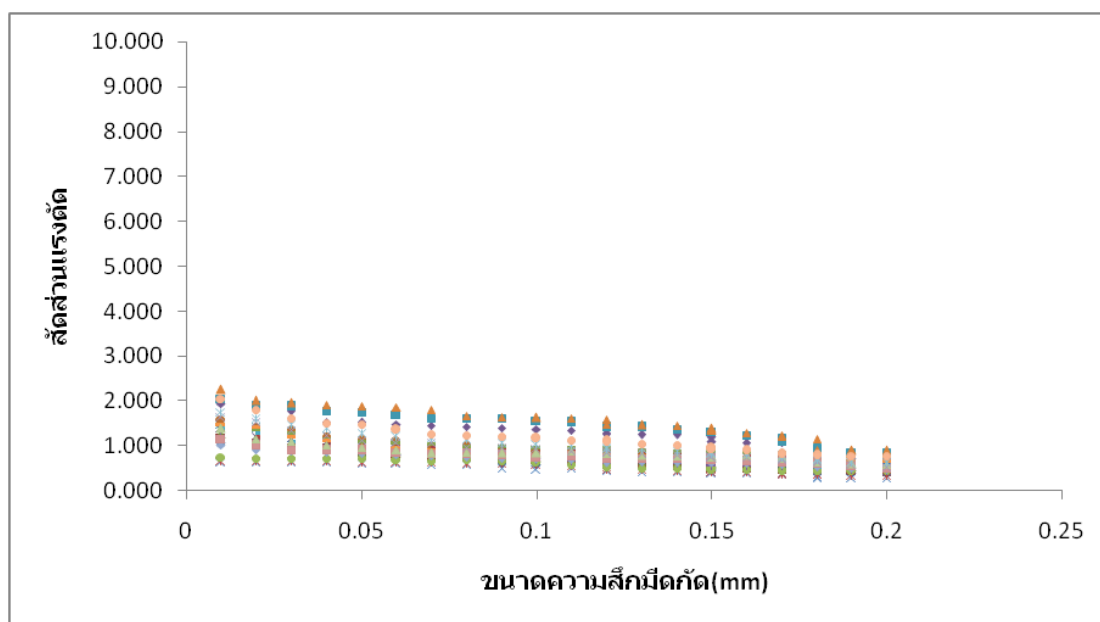
รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกมีดกัดกับสัดส่วนของแรงตัด โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.50 ทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด โดยการให้ ความเร็วรอบตัด 12000 รอบ/นาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการกัด 0.7 มิลลิเมตร คงที่ จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัดที่ขนาดของมีดกัดต่างกัน พบว่าที่ขนาดความลึกน้อย สัดส่วนแรงตัดจะมีค่ามาก และสัดส่วนแรงตัดจะลดลงตามขนาดความลึกที่เพิ่มมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะรูปแบบเดียวกัน แม้ขนาดของมีดกัดจะต่างก็ตาม

ขณะเดียวกันที่ค่าความลึกเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดที่ใหญ่ จะให้สัดส่วนแรงตัดน้อย เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดมากนั้น จะทำพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก รวมทั้งขนาดของมีดกัดที่ใหญ่กว่าก็จะส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรง F_z เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของแรงจึงมีค่าลดลง

4.2.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดกับขนาดความลึกดอกกัดในทุกพารามิเตอร์ของการตัด

จากรูปที่ 4. 51 เมื่อทำการเปรียบเทียบในทุกเงื่อนไขของการตัดได้แก่ ความเร็วรอบตัด 8000 10000 และ 12000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.02 และ 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกการกัด 0.3 และ 0.7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกกัด 6 และ 8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดและความลึกมีดกัดในทุกเงื่อนไขการตัด

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดกับขนาดความลึกของมีดกัด เมื่อนำทุกๆเงื่อนไขการตัดมาแสดงบนกราฟ พบว่าความสัมพันธ์ยังคงมีแนวโน้มที่เป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือเมื่อขนาดความลึกน้อย สัดส่วนของแรงตัดจะมีค่ามาก และสัดส่วนของแรงตัดจะลดลงเมื่อขนาดความลึกเพิ่มขึ้น แม้จะทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดเป็นแบบต่างๆก็ตาม จากข้อมูลดังกล่าวบอกได้ว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนไป จะไม่ส่งผลให้สัดส่วนแรงตัดเปลี่ยนแปลงตามด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำสัดส่วนแรงตัดมาพัฒนาสมการการประมาณค่าความลึกของดอกกัดได้

4.3 การสร้างสมการพยากรณ์การสึกของดอกกัด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการนำเงื่อนไขการตัดต่างๆมาทำการพยากรณ์ความขรุขระของชิ้นงาน เงื่อนไขการตัดที่นำมาใช้ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด ขนาดความลึกของดอกกัด และสัดส่วนของแรงตัด โดยเฉพาะสัดส่วนแรงตัดนั้น สามารถนำมาพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานได้อย่างแม่นยำ [6] และพบว่าขนาดความลึกของเครื่องมือตัดนั้นมีความสัมพันธ์กับความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.52 ดังนั้นจึงสามารถที่จะใช้รูปแบบของสมการในการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน มาประยุกต์เพื่อสร้างสมการประมาณขนาดความลึกของมีดกัดได้เช่นเดียวกัน

จากผลการทดลอง พบว่าเงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด ขนาดความลึกของดอกกัด และสัดส่วนของแรงตัด มีความสัมพันธ์ความความลึกของมีดกัดในแบบเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งสามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้ [10]

$$Vb = C \cdot d^{a_1} \cdot f^{a_2} \cdot D^{a_3} \cdot V^{a_4} \cdot \left(\frac{F_x}{F_z}\right)^{a_5} \quad 4.3-1$$

โดยที่ Vb คือ ความลึกของดอกกัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

f คือ อัตราการป้อนตัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อรอบ

D คือ ความลึกของดอกกัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

V คือ ความเร็วรอบในการตัด มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที

F_x/F_z คือ สัดส่วนของแรงในขณะตัด มีหน่วยเป็น นิวตัน

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากรูปแบบสมการที่ได้(4.2-1) พบว่ายังไม่อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรง จึงต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงพหุคูณ โดยการใช้คุณสมบัติของลอการิทึมมาใช้ในการแปลงรูปสมการได้ดังนี้ [10]

$$\ln Vb = \ln C + a_1 \ln d + a_2 \ln f + a_3 \ln D + a_4 \ln V + a_5 \ln \left(\frac{F_x}{F_z}\right) \quad 4.3-2$$

จากการวิเคราะห์สมการที่ได้ให้อยู่ในรูปการถดถอยพหุคูณ สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการถดถอยพหุคูณได้ดังนี้ [10]

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad 4.3-3$$

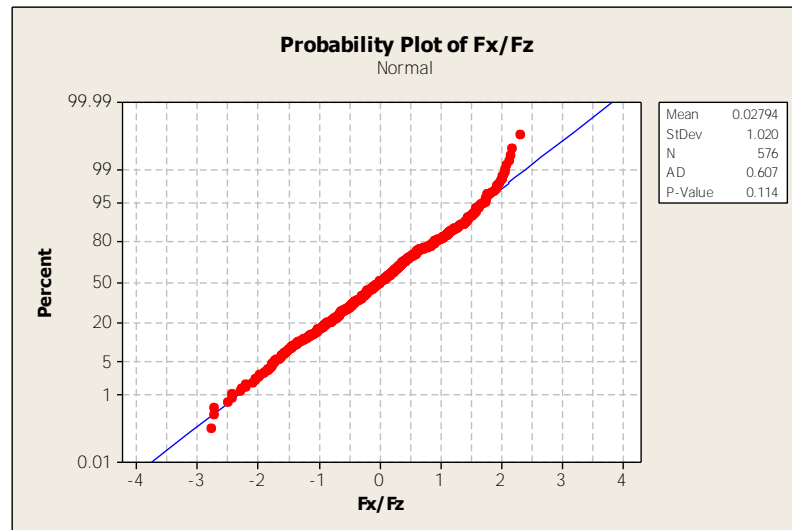
โดยที่ ค่า y_1 เป็นตัวแทนของค่า $\ln Vb$, ค่า x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 เป็นตัวแทนของการแปลงรูปลอการิทึม $\ln d, \ln f, \ln D, \ln V, \ln(Fx/Fz)$ โดย β_0 เป็นค่าตัดแกน y จะแสดงค่า y เมื่อตัวแปรในสมการถดถอยทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนค่า $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ เป็นสัมประสิทธิ์สมการถดถอยพหุคูณ โดยใช้วิธีการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method)

ทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ด้วยวิธี ANOVA ซึ่งจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 กรณี

4.3.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามากกับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง การทดสอบการกระจายแบบปกติของ สัดส่วนส่วนแรงตัด แสดงได้ดังรูปที่ 4.52 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

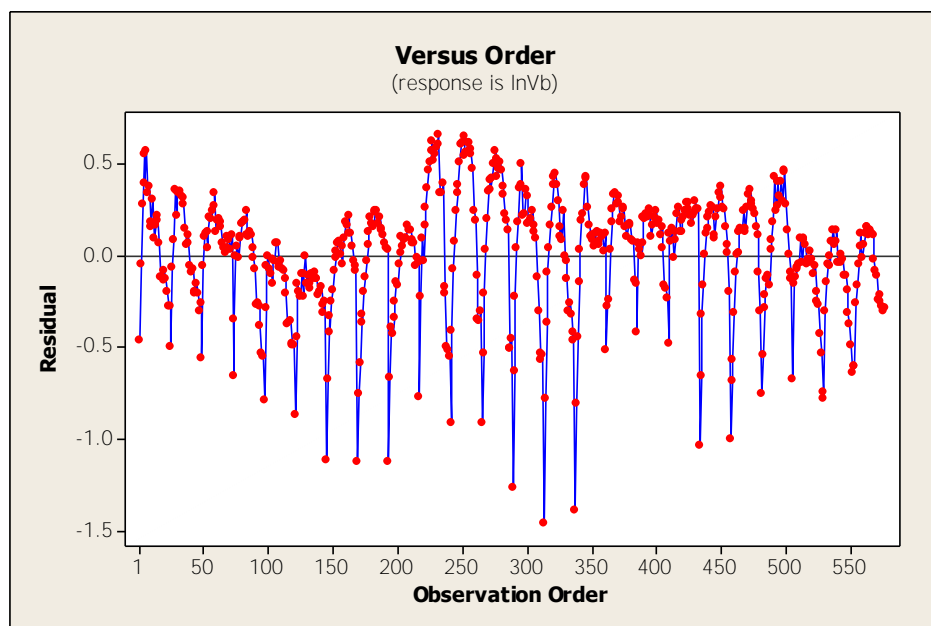
จากรูปที่ 4.52 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูล สัดส่วนแรงตัด มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.52 Normal Probability Plot ของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด

4.3.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการนำค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ความลึกของดอกกัด แสดงดังรูปที่ 4.53 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

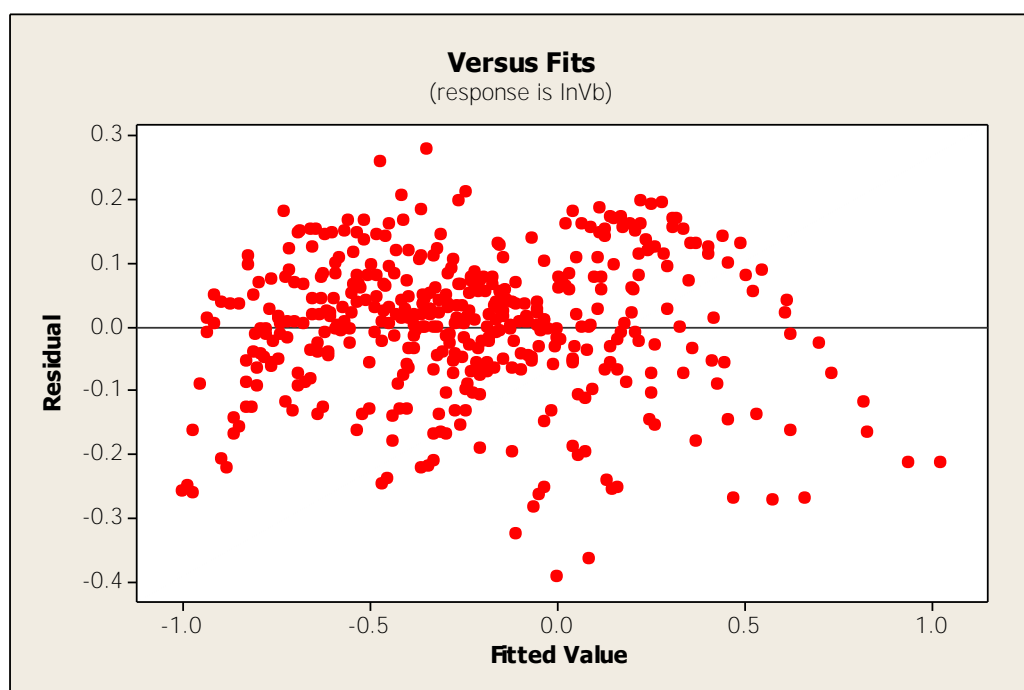


รูปที่ 4.53 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกมีดกัด

จากรูปที่ 4.53 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจาย กระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกของดอกกัด

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการให้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่า ความลึกมีดกัด ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของ ความลึกของมีดกัด แสดงดังรูปที่ 4.54 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.54 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกมีดกัด

จากรูปที่ 4.54 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า ข้อมูลของค่าความผิดพลาดของความลึกมีดกัดมีความแปรปรวนที่คงที่จากทุกปัจจัยที่เป็นเงื่อนไขในการตัด ได้แก่ ความเร็วรอบตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการกัดและขนาดของมีดกัด

4.4 การประมาณค่าความลึกของดอกกัท

จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาสร้างสมการพยากรณ์ความลึกของดอกกัทได้ดังนี้

Regression Analysis: lnVb versus lnDi, lnF, lnD, lnV, ln(Fx/Fz)

The regression equation is

$$\ln Vb = -7.68 - 1.96 \ln Di + 0.928 \ln F + 1.11 \ln D + 1.36 \ln V - 2.75 \ln (Fx/Fz)$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-7.6832	0.7873	-9.76	0.000
lnDi	-1.9618	0.1021	-19.21	0.000
lnF	0.92760	0.03082	30.10	0.000
lnD	1.10715	0.03886	28.49	0.000
lnV	1.35663	0.08623	15.73	0.000
ln(Fx/Fz)	-2.74660	0.05447	-50.43	0.000

$$S = 0.326016 \quad R\text{-Sq} = 81.7\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 81.5\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	270.279	54.056	508.59	0.000
Residual Error	570	60.583	0.106		
Total	575	330.862			

Source	DF	Seq SS
lnDi	1	0.000
lnF	1	0.000
lnD	1	0.000
lnV	1	0.000
ln(Fx/Fz)	1	270.279

รูปที่ 4.55 แสดงถึงการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองโดยการตั้งสมมติฐานทางสถิติคือ

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_a: \text{มี } \mu \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน}$$

การทดลองนี้ทดสอบโดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% (α เท่ากับ0.05) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า P-Value ของสมการพยากรณ์มีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถบอกได้ว่าปัจจัยที่เลือกมาใช้ในการสมการมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ และจากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (Adjusted R-Square) พบว่า

ค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันคือ 81.7% และ 81.5% แสดงว่าตัวแปรที่เลือกใช้ในสมการพยากรณ์มีความเหมาะสม

นำข้อมูลดังกล่าวมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์โดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_a: \beta_j \neq 0$$

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ พบว่าทุกปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าความเร็วรอบตัด อัตราป้อนตัด ความลึกในการกัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดความลึกหรือของมีดกัดในสมการประมาณค่าขนาดความลึกหรือของมีดกัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากการวิเคราะห์การแปรปรวน พบว่าแต่ละปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และเมื่อพิจารณาที่ค่า P-Value ของแต่ละพารามิเตอร์ พบว่าค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 เช่นกัน จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว แสดงว่าพารามิเตอร์ส่งผลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญ และสมการสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของผลตอบที่ได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้การที่ ค่า R-Sqr และ ค่า R-Sqr(adj) มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าปัจจัยที่เลือกมามีความเหมาะสม

จากสมการที่ 4.4-1 ซึ่งเป็นสมการในรูปลอการิทึมสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเอ็กโปเนนเชียลได้ดังนี้

$$Vb = e^{-7.68} \cdot Di^{-1.96} \cdot f^{0.928} \cdot d^{1.11} \cdot V^{1.36} \cdot \left(\frac{F_x}{F_z}\right)^{-2.75} \quad 4.4-2$$

จากสมการประมาณขนาดการสึกหรอของมีดกัดที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถนำมาอธิบายความหมายของแต่ละพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความลึกได้ดังนี้

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด (Di) พบว่าขนาดมีดกัดที่มากจะทำให้ค่าความลึกมากขึ้นด้วย เนื่องจากขนาดของมีดกัดที่มากจะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานมาก ส่งผลให้เกิดแรงระหว่างพื้นที่สัมผัสมาก ทำให้มีดกัดมีค่าความลึกเพิ่มขึ้น

- อัตราการป้อนตัด (f) จากสมการที่ได้พบว่าอัตราการป้อนตัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการป้อนตัดมีทิศทางเดียวกับการหมุนของมีดกัด ส่งผลให้แรง F_x มาก มีดกัดจึงสึกหรอได้มากขึ้น

- ความลึกในการกัด (D) จากสมการที่ได้พบว่าความลึกในการกัดที่มากจะทำให้ค่าความลึกของมีดกัดลดลง เนื่องจากเมื่อค่าความลึกมากทำให้พื้นที่ในการกินเนื้อชิ้นงานมากส่งผลให้แรง F_x มาก จึงทำให้เกิดความสึกหรอได้มากขึ้น

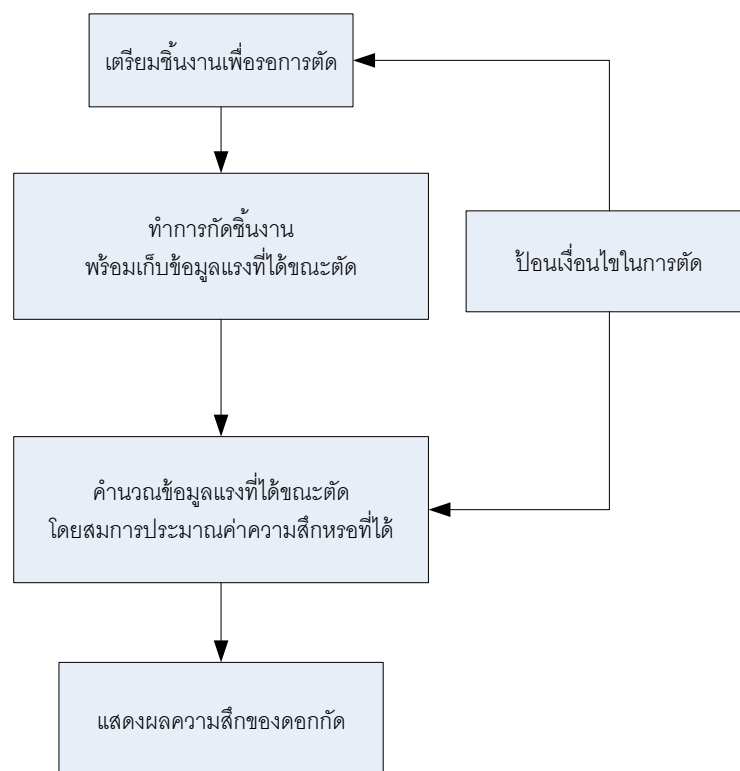
- ความเร็วรอบตัด (V) จากสมการที่ได้พบว่าความเร็วรอบตัดที่มาก จะทำให้ค่าความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบตัดมาก จะส่งผลโดยตรงต่อแรง F_x ดังนั้นที่ความเร็วรอบตัดมาก แรงที่คมตัดจะมากตาม จึงส่งผลให้ค่าความลึกมากขึ้นด้วย

- สัดส่วนแรงตัด ($\frac{F_x}{F_z}$) จากสมการที่ได้พบว่าสัดส่วนแรงตัดที่น้อย จะทำให้ค่าความลึกของมีดกัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่สัดส่วนแรงตัดลดลงนั้น เกิดจากแรง F_z ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าแรง F_x ซึ่งการที่แรง F_z เพิ่มขึ้น เกิดจากความลึกของมีดกัดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เมื่อสัดส่วนแรงตัดลดลง ความลึกมีดกัดจึงเพิ่มขึ้น

4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

การทดสอบยืนยันผลการทดลอง เป็นการทดลองซ้ำ เพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการที่สร้างได้จากการทดลอง เมื่อนำไปใช้งานจริง การทดสอบจะเป็นการนำผลของค่าความลึกของดอกกัดที่ได้จากการวัดจริง มาเปรียบเทียบกับค่าความลึกของดอกกัดที่ได้จากสมการการพยากรณ์ ที่ขนาดของสัดส่วนแรงที่เท่ากัน ซึ่งในการทดสอบจะทำการวัดขนาดความลึกจริงและกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนที่ $\pm 10\%$ จากขนาดความลึกที่วัดได้จริง จากนั้นนำค่าของขนาดความลึกที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบ ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจะต้องอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่ $\pm 10\%$ จากขนาดความลึกที่วัดได้จริง สำหรับการในช่วงความคลาดเคลื่อนที่ $\pm 10\%$ นั้น เป็นค่าที่อยู่ในช่วงพิสัยความเผื่อที่นิยมใช้กับงานจริงในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปโลหะในปัจจุบันเป็นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ซึ่งขนาดต่างๆ โดยเฉพาะขนาดความลึกจะแสดงความเปลี่ยนแปลงในหน่วยมิลลิเมตร ซึ่งเล็กมาก ดังนั้นการในช่วงความเผื่อที่ $\pm 10\%$ จากขนาด

ความลึกที่วัดได้จริงนั้น เมื่อเปรียบเทียบไปกับการใช้งานจริงจะมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนในงานอุตสาหกรรมจริงอย่างมาก ในการทดสอบความแม่นยำนั้นจะทำในเงื่อนไขการตัดที่อยู่ในช่วงของการทดลองจริง และเงื่อนไขการตัดที่อยู่นอกช่วงการทดลองจริง โดยการทดสอบที่ใช้เงื่อนไขการตัดในช่วงการทดลองจริงนั้นทำขึ้นเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการการประมาณขนาดความลึกมีดกัดที่ได้ ซึ่งจะมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

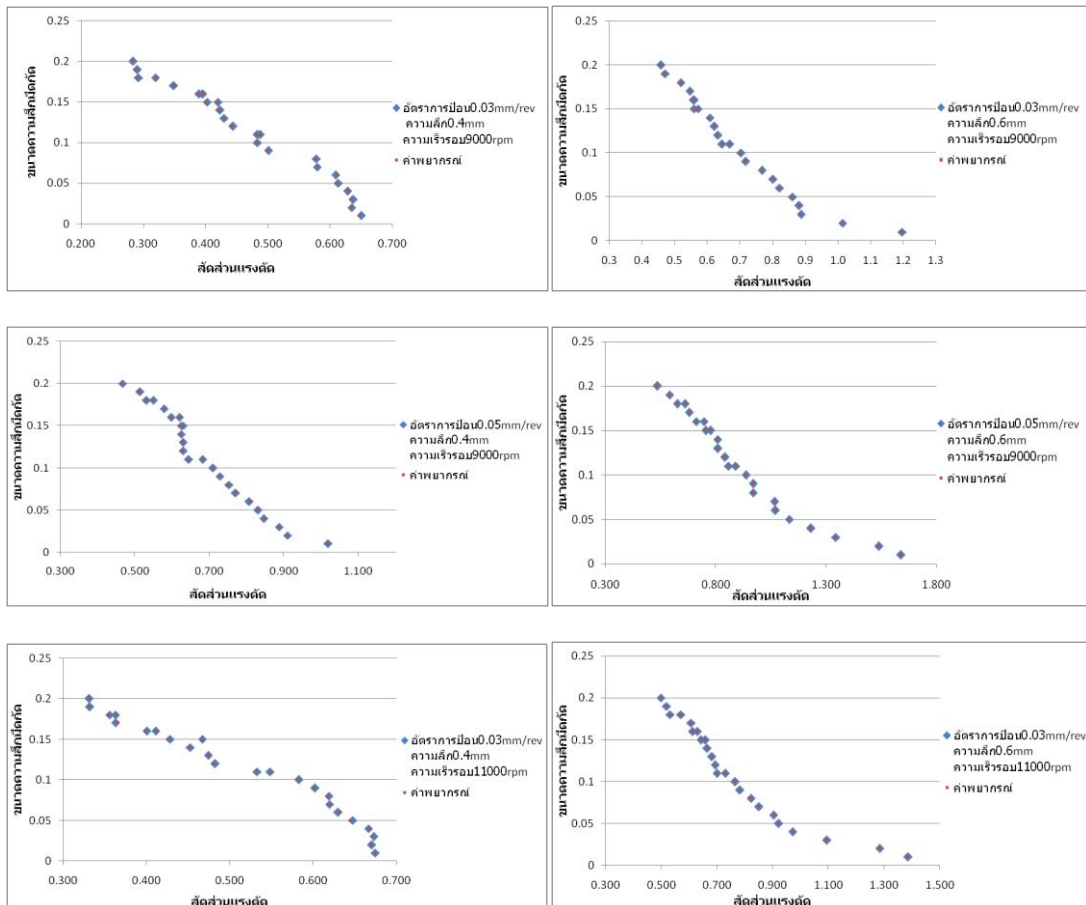


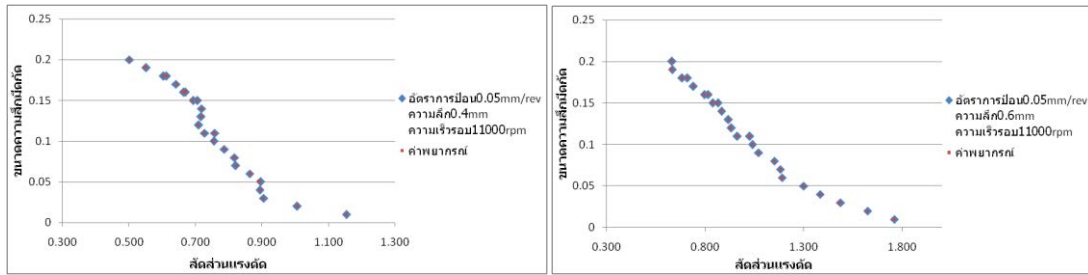
รูปที่ 4.56 แสดงการนำสมการประมาณค่าความลึกของดอกกัดไปใช้งาน

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความแม่นยำของสมการประมาณค่าความลึก โดยจะทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดให้แตกต่างจากค่าที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการทดสอบความแม่นยำของสมการที่เงื่อนไขการตัดใหม่ในช่วงของเงื่อนไขการทดลอง

No.	speed(v)	feed(f)	depth(d)	R
1	9000	0.03	0.4	8
2	9000	0.03	0.6	8
3	9000	0.05	0.4	8
4	9000	0.05	0.6	8
5	11000	0.03	0.4	8
6	11000	0.03	0.6	8
7	11000	0.05	0.4	8
8	11000	0.05	0.6	8





รูปที่ 4.57 แสดงความแม่นยำของสมการภายในช่วงเงื่อนไขการตัด

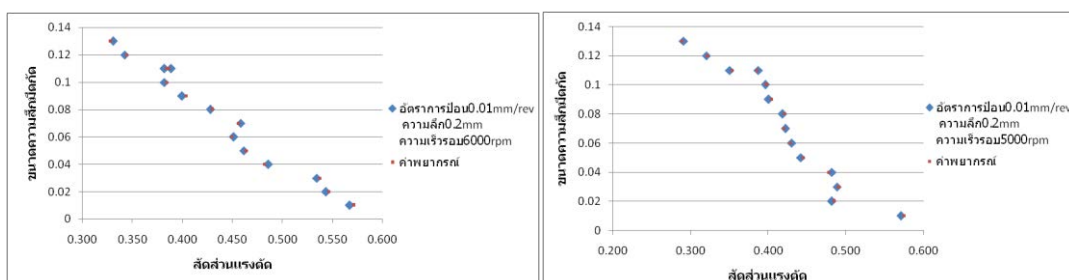
จากรูปที่ 4.57 จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความลึกที่วัดได้จริงกับค่าความลึกที่ได้จากการประมาณค่าโดยสมการ ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการประมาณค่าโดยสมการยังอยู่ในช่วง +10% และ -10% ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สำหรับการคำนวณความแม่นยำของสมการการประมาณค่าความลึกหรือมีดกัดสามารถทำได้ตามสมการดังนี้

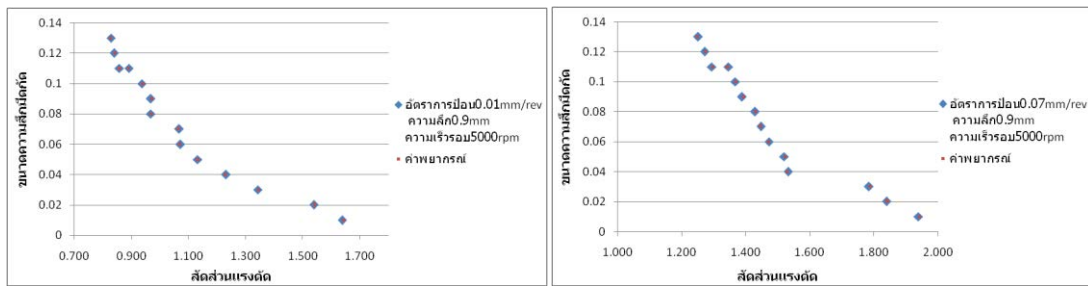
$$\left(\frac{\text{ความลึกที่วัดได้จริง} - \text{ความลึกที่คำนวณได้}}{\text{ความลึกที่คำนวณได้}} \right) \times 100 \tag{4.5-1}$$

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด จะได้ค่าความแม่นยำของสมการประมาณค่าความลึกของดอกกัดอยู่ที่ 95.2%

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการทดสอบความแม่นยำของสมการที่เงื่อนไขการตัดใหม่ในช่วงของเงื่อนไขการทดลอง

No.	speed(v)	feed(f)	depth(d)	R
1	6000	0.01	0.2	6
2	5000	0.01	0.2	6
3	5000	0.01	0.9	6
4	5000	0.07	0.9	6

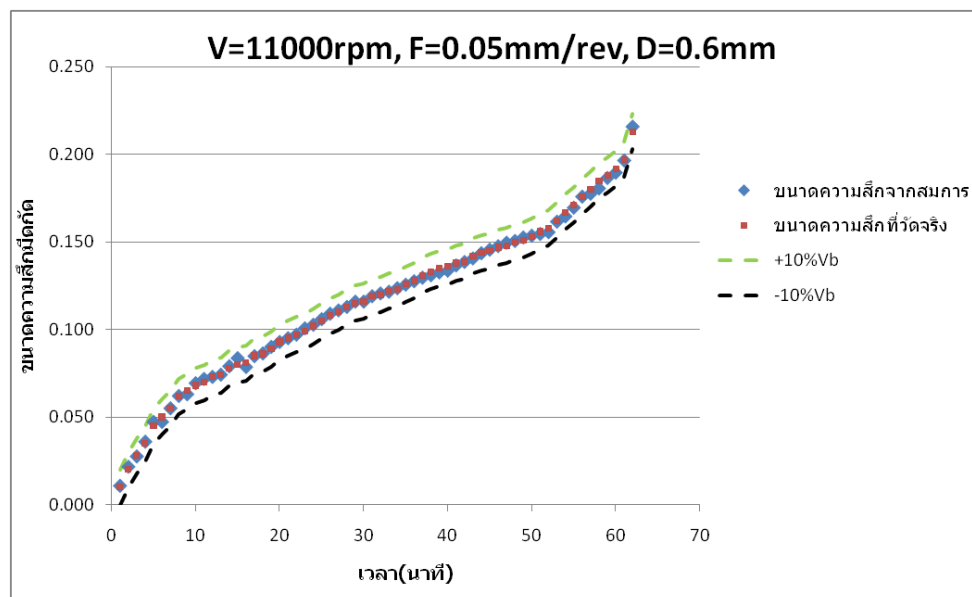




รูปที่ 4.58 แสดงความแม่นยำของสมการภายนอกช่วงเงื่อนไขการตัด

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด จะได้ค่าความแม่นยำของสมการประมาณค่าความลึกของดอกก๊ตอยู่ที่ 94.9%

จากการทดสอบสมการ พบว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำสูงมาก ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าการใช้สัดส่วนแรงตัดมาช่วยในการประมาณการขนาดความลึกหรือของมีดก๊ตนั้น มีประสิทธิภาพกว่าปัจจัยการตัดตัวอื่นๆ แม้เงื่อนไขการตัดอื่นๆ จะเปลี่ยนแปลง สัดส่วนแรงตัดก็จะเปลี่ยนแปลงตาม



รูปที่ 4.59 ทดสอบความแม่นยำของสมการที่เวลาในการตัดจริง

จากรูปที่ 4.59 เป็นการทดสอบความแม่นยำของสมการเมื่อทำการตัดจริง พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีความแม่นยำอยู่ในช่วง +10% และ -10% การทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้

จากสมการการประมาณขนาดความลึกหรือของมีดกัดสามารถนำไปใช้งานได้จริงแม้จะใช้เวลาเป็นตัวกำหนดก็ตาม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการจัดทำเพื่อศึกษาค่าความลึกของดอกกัทแบบหัวบอล ในกระบวนการกัท ที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดที่ค่าความลึกนั้นๆ โดยทำการศึกษาในสภาวะการตัดแบบแห้ง และใช้การทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียลมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อสร้างรูปแบบสมการการประมาณค่าความลึกของดอกกัทในขณะตัด

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาค่าความลึกของมีดกัทแบบหัวบอลที่มีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด เพื่อสร้างสมการการประมาณค่าความลึกของมีดกัทแบบหัวบอล ในสภาวะการตัดแบบแห้ง โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความเร็วรอบในการตัด, อัตราการป้อนตัด, ความลึกตัดและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัท ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่า ความลึกของมีดกัทนั้นมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของแรงตัด โดยเมื่อความลึกมีดกัทมีค่ามาก จะทำให้สัดส่วนของแรงตัดนั้นมีค่าน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานแรงมีดกัท กล่าวคือเมื่อพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับมีดกัทมาก จะส่งผลให้แรง F_z เพิ่มขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับ F_x ซึ่งเป็นผลทำให้สัดส่วนแรงตัด (F_x/F_z) ลดลง จากการทดลองนั้นรูปแบบของความสัมพันธระหว่างความลึกมีดกัทกับสัดส่วนแรงตัด จะเป็นไปได้ในลักษณะเดิม แม้จะเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดก็ตาม

รูปแบบของสมการประมาณค่าความลึกของ มีดกัทที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นมีระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% อย่างมีนัยสำคัญ โดยได้ทำการทดสอบความแม่นยำของสมการที่ได้มาที่เงื่อนไขการตัดใหม่ในช่วงการทดลอง คือ ความเร็วรอบตัด 9000, 11000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.03, 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.3, 0.7 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำการเปลี่ยนมีดกัททุกครั้งเมื่อเริ่มเงื่อนไขการตัดใหม่ ในการทดลองมีการใช้มีดกัททั้งสิ้น 24 แท่ง จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อนำมาพัฒนาเป็นสมการการประมาณขนาดความลึกหรือของมีดกัทสมการที่ได้คือ

$$Vb = e^{-7.68} \cdot Di^{-1.96} \cdot f^{0.928} \cdot d^{1.11} \cdot V^{1.36} \cdot \left(\frac{F_x}{F_z}\right)^{-2.75}$$

โดยสมการที่ได้นั้นจะไม่คำนึงถึงอุณหภูมิในการตัด เนื่องจากสมการสามารถนำไปใช้ประมาณขนาดความลึกของมิดกัตได้เฉพาะการตัดแบบแห้ง และจากการนำสมการที่ได้ไปทดสอบความแม่นยำ พบว่าเมื่อเทียบค่าความลึกของมิดกัตที่ได้จากการวัดจริง กับค่าความลึกของดอกกัตที่ได้จากการคำนวณ มีความแม่นยำอยู่ที่ 95.2% และที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงการทดลองคือ ความเร็วรอบตัด 5000, 6000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.01, 0.07 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2, 0.9 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเทียบค่าความลึกของมิดกัตที่ได้จากการวัดจริง กับค่าความลึกของดอกกัตที่ได้จากการคำนวณ มีความแม่นยำอยู่ที่ 94.9%

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ในการใช้สัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด นั้น เนื่องจากว่าสัดส่วนของแรงสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นกับค่าความลึกของดอกกัตได้ โดยความสัมพันธ์ที่ได้จะมีแนวโน้มในลักษณะเดิม แม้เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนไปหรือความแข็งของวัสดุที่นำมาใช้ทำชิ้นงานเปลี่ยนไปก็ตาม และการใช้แรงตัดในแนวแกน X และ แกน Z มาศึกษานั้น เนื่องจากแรงทั้งสองนั้นส่งผลต่อค่าความลึกของมิดกัตโดยตรง

เนื่องจากการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อที่จะสร้างรูปแบบสมการการประมาณการขนาดความลึกหรือของมิดกัต โดยให้ความสำคัญที่ขนาดความลึกของมิดกัตเป็นหลัก จึงเลือกการทดลองภายใต้สภาวะการตัดแบบแห้ง ซึ่งภายใต้สภาวะดังกล่าวมิดกัตจะสึกได้เร็วที่สุด เพื่อลดเวลาในการดำเนินการทดลอง

ในส่วนของการประมาณการขนาดความลึกหรือของมิดกัตที่ได้จากการทดลองนั้น อาจจะมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่บางส่วน เช่น กรณีที่มีมิดกัตมีสารเคลือบผิวเป็นชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไทเทเนียมออกไซด์เคลือบไนไตร และที่ชิ้นงานเป็นโลหะชนิดอื่น จากข้อจำกัดดังกล่าวอาจจะทำให้สมการไม่มีความแม่นยำเท่าที่ควร

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1. มิดกัตหัวบอลชนิดเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์เคลือบไนไตร และชิ้นงานที่ใช้นั้นมีราคาต่อหน่วยที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้เงื่อนไขในการทดลองในงานวิจัยนี้อาจจะไม่ครอบคลุมต่อลักษณะของงานในบางประเภท

2. เนื่องจากเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ คือ เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ ออร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X ซึ่งจะมีชุดคำสั่งต่างเป็นเฉพาะตัวของทางผู้ผลิต หากมีการเปลี่ยนแปลงยี่ห้อเครื่องจักร จำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนชุดคำสั่งในการควบคุมใหม่ เพื่อประสิทธิภาพในการทำงาน

3. เงื่อนไขการตัดที่นำมาทำการวิจัยนี้ มีความเหมาะสมกับชิ้นงานประเภทเหล็กกล้า คาร์บอน S50C และมีดกัดหัวบอลชนิดเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์เท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงประเภทของชิ้นงานและมีดกัด ควรมีการศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์เพื่อกำหนดเงื่อนไขในการทดลองใหม่

4. อุปกรณ์ที่ใช้วัดขนาดการสึกของมีดกัด คือ กล้องไมโครสโคป (Microscope) ยี่ห้อ Keyence รุ่น VHX 600 สามารถแสดงผลขนาดความสึกของมีดกัดได้ที่ทัศนียภาพสองตำแหน่ง ซึ่งอาจจะมีผลต่อความละเอียดของข้อมูลที่ได้ จึงทำให้ข้อมูลของแรงที่ได้จากการทดลองบางค่า มีค่าความสึกของมีดกัดเหมือนกัน

5. สมการการประมาณขนาดความสึกของมีดกัดที่ได้นั้น จะใช้งานได้ดีเฉพาะสภาวะการตัดแบบแห้งหากต้องการนำไปใช้ในสภาวะการตัดแบบอื่นๆ อาจจะต้องมีการปรับปรุงสมการ

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ในการติดตั้งมีดกัดที่ใช้ในการทดลอง ควรกำหนดตัวยึดชิ้นงานให้แน่นเท่ากันทุกครั้ง และควรตรวจสอบให้มีมีดกัดและชิ้นงานตั้งฉากกัน เนื่องจากทั้งสองปัจจัยนี้มีผลทำให้แรงที่วัดได้ในขณะตัดมีความคลาดเคลื่อนได้

2. เนื่องจากมีดกัดที่ใช้ในการทดลองเป็นมีดกัดชนิดเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์จึงมีความแข็งมาก ดังนั้นที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ จึงทำให้ความสึกของมีดกัดเกิดขึ้นได้ช้า

3. อุปกรณ์ที่ใช้ยึดจับชิ้นงานควรทำความสะอาดอยู่เสมอ เนื่องจากเศษโลหะหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆที่อยู่บนอุปกรณ์จับงานจะส่งผลให้แรงที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนได้

4. ในการวัดสัญญาณควรมีการลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นโดยการต่อสายดิน

5. แนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป ควรทดลองในการตัดวัสดุชิ้นงานอื่นๆ เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น หรือทดลองเปลี่ยนวัสดุหรือรูปแบบของมีดกัด เพื่อเปรียบเทียบกับสมการการทำนายที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร : 2551.
- [2] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [3] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท็อป, 2551.
- [4] ชาญณรงค์ รุ่งเรือง. อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นของกระบวนการตัดเหล็กกล้าโดยใช้ใบมีดกัดหัวบอล. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [5] Tangjitsitcharoen, S., Rungruang, C., and Laiaddee, D. Monitoring of dry cutting and applications of cutting fluid for ball end milling. Industrial Engineering and Management Society (2010) : 242-250.
- [6] Tangjitsitcharoen, S. In-Process Investigation of Turning Process Applied With and Without Cutting Fluid. Journal of mechanical engineering 6 (2009) : 85-102.
- [7] Tangjitsitcharoen, S. Arayapittaya, S., and Thongprasert, S. In-process monitoring and prediction of surface roughness on CNC turning by using response surface analysis. Proceeding of The 36th International MATADOR Conference (2010) : 213-216.
- [8] Moriwaki, T. Shibasaka, T., and Tangjitsitcharoen, S. Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning. The Japan Society of Mechanical Engineers (2004) : 933-938.
- [9] Tangjitsitcharoen, S., and Senjuntichai, A. Intelligent monitoring and prediction of surface roughness in ball-end milling process. Applied Mechanics and Materials (2011) : 121-126.

- [10] Tangjitsitcharoen, S. In-process monitoring and prediction of surface roughness in CNC turning process. Advanced Materials Research (2011) : 199-200.
- [11] Tangjitsitcharoen, S. Advanced prediction of surface roughness by monitoring of dynamic cutting forces in CNC turning process. Applied Mechanics and Materials (2013) : 239-240.
- [12] สมเกียรติ ตั้งจิตผลิตเจริญ , ศักดิ์ดีดา ศรีอนุศาสตร์ และดวงตา ละเอียดดี. การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดสำหรับกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยอัตราส่วนแรงตัด .วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ(สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) (2553) : 93-105
- [13] Milfelner, M. Kopac, J. Cus, F., and Zuperl, U. Genetic equation for the cutting force in ball-end milling. 13th International Scientific Conference on Achievements Mechanical and Materials Engineering (2005) : 432-436.
- [14] Onozuka, H. Asakawa, Y. Sawa, M. Yamanaka, T. Maeda, Y. Watanabe, K., and Tajima, T. Analysis of cutting forces in ball end milling. Production Engineering Research Laboratory Hitachi , Ltd (2011).
- [15] Ginta, T. Amin, A. Radzi, H., and Lajis, M.A. Tool life prediction by response surface Methodology in end milling titanium alloy Ti-6Al-4V using uncoated WC-Co inserts. European Journal of Scientific Research 28 (2009) : 533-541.
- [16] Wang, X., and Feng, C.X. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 20 (2002) : 348-356.
- [17] Kang-Jae, L. Taik-Min, L., and Min-Yang, Yang. Tool wear monitoring system for CNC end milling using a hybrid approach to cutting force regulation. The International Journal of Advance Manufacturing Technilogy 32 (2007) : 8–17.
- [18] Ahmed, A. Sarhan, D., and El-Zahry, R. M. Monitoring of tool wear and surface roughness in endmilling for intelligent machining. International Journal of the Physical Sciences 6 (2011) : 2380-2392.

- [19] Yves, B. Marc, T. Youssef, A., and Jacques, M. Investigation of cutting parameter effects on surface roughness in lathe boring operation by use of full factorial design. Computers and Industrial Engineering 31 (1996) : 645 -651.
- [20] Dolinšek, S. Šuštaršič, B., and Kopac, J. Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes. Wear 250 (2001) : 349-356.
- [21] Abou-El-Hossein, K. A. Kadirgama, K. Hamdi, M., and Benyunis, K. Y. Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel. Journal of Material Processing Technology 182 (2007) : 241–247.
- [22] Hideaki, O. Yohei, A. Masashi, S. Toshio, Y. Yukio, M. Kazushi, W., and Takuji, T. Analysis of cutting forces in ball end milling. Production Engineering Research Laboratory Hitachi Ltd 2011.
- [23] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม . ข้อมูลดัชนีผลผลิตประจำปี 2555-2556. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา : http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry_overview/annual2012.pdf [ธันวาคม 2556].
- [24] สถาบันเหล็กและเหล็กแห่งประเทศไทย . มูลค่าการนำเข้าเครื่องจักรกล 2009-2013. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา : <http://www.nstda.or.th/prs/index.php/database-article/376-database-e-e-market-table24> [3 กรกฎาคม 2556]
- [25] 7-Leaders Corp. End mills, Drills, Reamers Solid Carbide Cutting Tools Catalog. 2007/2008.
- [26] Hitachi tool Engineering. High-Precision Ball End Mills for Maximum Efficiency and Tool Life 2009.
- [27] บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด, คู่มือการใช้งาน Carbon Steel S50C.
- [28] Budex, E., and Altitus, Y. Flexible milling force model for improved surface error predictions. Proceedings of the Engineering System Design and Analysis (1992) : 47-1

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

ตารางที่ 1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
1	6	0.02	0.3	8000	0.01	1.065
2	6	0.02	0.3	8000	0.02	0.963
3	6	0.02	0.3	8000	0.03	0.935
4	6	0.02	0.3	8000	0.04	0.929
5	6	0.02	0.3	8000	0.05	0.809
6	6	0.02	0.3	8000	0.06	0.807
7	6	0.02	0.3	8000	0.07	0.703
8	6	0.02	0.3	8000	0.08	0.677
9	6	0.02	0.3	8000	0.09	0.600
10	6	0.02	0.3	8000	0.1	0.582
11	6	0.02	0.3	8000	0.11	0.589
12	6	0.02	0.3	8000	0.12	0.544
13	6	0.02	0.3	8000	0.12	0.542
14	6	0.02	0.3	8000	0.13	0.531
15	6	0.02	0.3	8000	0.14	0.522
16	6	0.02	0.3	8000	0.15	0.482
17	6	0.02	0.3	8000	0.15	0.451

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
18	6	0.02	0.3	8000	0.16	0.440
19	6	0.02	0.3	8000	0.17	0.437
20	6	0.02	0.3	8000	0.17	0.435
21	6	0.02	0.3	8000	0.18	0.421
22	6	0.02	0.3	8000	0.18	0.409
23	6	0.02	0.3	8000	0.19	0.390
24	6	0.02	0.3	8000	0.2	0.383
25	6	0.02	0.3	10000	0.01	1.174
26	6	0.02	0.3	10000	0.02	1.067
27	6	0.02	0.3	10000	0.03	0.971
28	6	0.02	0.3	10000	0.04	0.968
29	6	0.02	0.3	10000	0.05	0.846
30	6	0.02	0.3	10000	0.06	0.833
31	6	0.02	0.3	10000	0.07	0.783
32	6	0.02	0.3	10000	0.08	0.748
33	6	0.02	0.3	10000	0.09	0.710
34	6	0.02	0.3	10000	0.1	0.682
35	6	0.02	0.3	10000	0.11	0.650

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
36	6	0.02	0.3	10000	0.12	0.619
37	6	0.02	0.3	10000	0.12	0.581
38	6	0.02	0.3	10000	0.13	0.576
39	6	0.02	0.3	10000	0.14	0.552
40	6	0.02	0.3	10000	0.15	0.514
41	6	0.02	0.3	10000	0.15	0.507
42	6	0.02	0.3	10000	0.16	0.499
43	6	0.02	0.3	10000	0.17	0.476
44	6	0.02	0.3	10000	0.17	0.465
45	6	0.02	0.3	10000	0.18	0.464
46	6	0.02	0.3	10000	0.18	0.455
47	6	0.02	0.3	10000	0.19	0.431
48	6	0.02	0.3	10000	0.2	0.431
49	6	0.02	0.3	12000	0.01	1.256
50	6	0.02	0.3	12000	0.02	1.173
51	6	0.02	0.3	12000	0.03	1.072
52	6	0.02	0.3	12000	0.04	0.972
53	6	0.02	0.3	12000	0.05	0.871

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
54	6	0.02	0.3	12000	0.06	0.841
55	6	0.02	0.3	12000	0.07	0.818
56	6	0.02	0.3	12000	0.08	0.777
57	6	0.02	0.3	12000	0.09	0.755
58	6	0.02	0.3	12000	0.1	0.733
59	6	0.02	0.3	12000	0.11	0.727
60	6	0.02	0.3	12000	0.12	0.673
61	6	0.02	0.3	12000	0.12	0.667
62	6	0.02	0.3	12000	0.13	0.651
63	6	0.02	0.3	12000	0.14	0.629
64	6	0.02	0.3	12000	0.15	0.608
65	6	0.02	0.3	12000	0.15	0.588
66	6	0.02	0.3	12000	0.16	0.570
67	6	0.02	0.3	12000	0.17	0.564
68	6	0.02	0.3	12000	0.17	0.556
69	6	0.02	0.3	12000	0.18	0.557
70	6	0.02	0.3	12000	0.18	0.554
71	6	0.02	0.3	12000	0.19	0.532

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
72	6	0.02	0.3	12000	0.2	0.539
73	6	0.02	0.7	8000	0.01	1.396
74	6	0.02	0.7	8000	0.02	1.214
75	6	0.02	0.7	8000	0.03	1.188
76	6	0.02	0.7	8000	0.04	1.089
77	6	0.02	0.7	8000	0.05	0.983
78	6	0.02	0.7	8000	0.06	0.959
79	6	0.02	0.7	8000	0.07	0.903
80	6	0.02	0.7	8000	0.08	0.887
81	6	0.02	0.7	8000	0.09	0.852
82	6	0.02	0.7	8000	0.1	0.822
83	6	0.02	0.7	8000	0.11	0.810
84	6	0.02	0.7	8000	0.12	0.770
85	6	0.02	0.7	8000	0.12	0.744
86	6	0.02	0.7	8000	0.13	0.731
87	6	0.02	0.7	8000	0.14	0.707
88	6	0.02	0.7	8000	0.15	0.671
89	6	0.02	0.7	8000	0.15	0.658

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
90	6	0.02	0.7	8000	0.16	0.629
91	6	0.02	0.7	8000	0.17	0.587
92	6	0.02	0.7	8000	0.17	0.575
93	6	0.02	0.7	8000	0.18	0.560
94	6	0.02	0.7	8000	0.18	0.539
95	6	0.02	0.7	8000	0.19	0.500
96	6	0.02	0.7	8000	0.2	0.488
97	6	0.02	0.7	10000	0.01	1.485
98	6	0.02	0.7	10000	0.02	1.384
99	6	0.02	0.7	10000	0.03	1.298
100	6	0.02	0.7	10000	0.04	1.193
101	6	0.02	0.7	10000	0.05	1.073
102	6	0.02	0.7	10000	0.06	0.992
103	6	0.02	0.7	10000	0.07	0.922
104	6	0.02	0.7	10000	0.08	0.921
105	6	0.02	0.7	10000	0.09	0.880
106	6	0.02	0.7	10000	0.1	0.878
107	6	0.02	0.7	10000	0.11	0.846

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
108	6	0.02	0.7	10000	0.12	0.813
109	6	0.02	0.7	10000	0.12	0.782
110	6	0.02	0.7	10000	0.13	0.769
111	6	0.02	0.7	10000	0.14	0.736
112	6	0.02	0.7	10000	0.15	0.717
113	6	0.02	0.7	10000	0.15	0.704
114	6	0.02	0.7	10000	0.16	0.670
115	6	0.02	0.7	10000	0.17	0.629
116	6	0.02	0.7	10000	0.17	0.618
117	6	0.02	0.7	10000	0.18	0.607
118	6	0.02	0.7	10000	0.18	0.581
119	6	0.02	0.7	10000	0.19	0.567
120	6	0.02	0.7	10000	0.2	0.557
121	6	0.02	0.7	12000	0.01	1.578
122	6	0.02	0.7	12000	0.02	1.432
123	6	0.02	0.7	12000	0.03	1.374
124	6	0.02	0.7	12000	0.04	1.216
125	6	0.02	0.7	12000	0.05	1.112

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
126	6	0.02	0.7	12000	0.06	1.088
127	6	0.02	0.7	12000	0.07	0.982
128	6	0.02	0.7	12000	0.08	0.980
129	6	0.02	0.7	12000	0.09	0.973
130	6	0.02	0.7	12000	0.1	0.885
131	6	0.02	0.7	12000	0.11	0.868
132	6	0.02	0.7	12000	0.12	0.847
133	6	0.02	0.7	12000	0.12	0.829
134	6	0.02	0.7	12000	0.13	0.820
135	6	0.02	0.7	12000	0.14	0.792
136	6	0.02	0.7	12000	0.15	0.782
137	6	0.02	0.7	12000	0.15	0.771
138	6	0.02	0.7	12000	0.16	0.753
139	6	0.02	0.7	12000	0.17	0.730
140	6	0.02	0.7	12000	0.17	0.719
141	6	0.02	0.7	12000	0.18	0.710
142	6	0.02	0.7	12000	0.18	0.686
143	6	0.02	0.7	12000	0.19	0.661

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
144	6	0.02	0.7	12000	0.2	0.664
145	6	0.06	0.3	8000	0.01	1.218
146	6	0.06	0.3	8000	0.02	1.108
147	6	0.06	0.3	8000	0.03	1.085
148	6	0.06	0.3	8000	0.04	0.947
149	6	0.06	0.3	8000	0.05	0.928
150	6	0.06	0.3	8000	0.06	0.889
151	6	0.06	0.3	8000	0.07	0.871
152	6	0.06	0.3	8000	0.08	0.851
153	6	0.06	0.3	8000	0.09	0.827
154	6	0.06	0.3	8000	0.1	0.808
155	6	0.06	0.3	8000	0.11	0.783
156	6	0.06	0.3	8000	0.12	0.764
157	6	0.06	0.3	8000	0.12	0.727
158	6	0.06	0.3	8000	0.13	0.730
159	6	0.06	0.3	8000	0.14	0.723
160	6	0.06	0.3	8000	0.15	0.728
161	6	0.06	0.3	8000	0.15	0.722

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
162	6	0.06	0.3	8000	0.16	0.720
163	6	0.06	0.3	8000	0.17	0.695
164	6	0.06	0.3	8000	0.17	0.680
165	6	0.06	0.3	8000	0.18	0.650
166	6	0.06	0.3	8000	0.18	0.630
167	6	0.06	0.3	8000	0.19	0.612
168	6	0.06	0.3	8000	0.2	0.595
169	6	0.06	0.3	10000	0.01	1.353
170	6	0.06	0.3	10000	0.02	1.205
171	6	0.06	0.3	10000	0.03	1.103
172	6	0.06	0.3	10000	0.04	1.095
173	6	0.06	0.3	10000	0.05	0.993
174	6	0.06	0.3	10000	0.06	0.987
175	6	0.06	0.3	10000	0.07	0.962
176	6	0.06	0.3	10000	0.08	0.947
177	6	0.06	0.3	10000	0.09	0.936
178	6	0.06	0.3	10000	0.1	0.924
179	6	0.06	0.3	10000	0.11	0.919

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
180	6	0.06	0.3	10000	0.12	0.906
181	6	0.06	0.3	10000	0.12	0.873
182	6	0.06	0.3	10000	0.13	0.872
183	6	0.06	0.3	10000	0.14	0.852
184	6	0.06	0.3	10000	0.15	0.832
185	6	0.06	0.3	10000	0.15	0.810
186	6	0.06	0.3	10000	0.16	0.800
187	6	0.06	0.3	10000	0.17	0.782
188	6	0.06	0.3	10000	0.17	0.764
189	6	0.06	0.3	10000	0.18	0.740
190	6	0.06	0.3	10000	0.18	0.730
191	6	0.06	0.3	10000	0.19	0.708
192	6	0.06	0.3	10000	0.2	0.692
193	6	0.06	0.3	12000	0.01	1.481
194	6	0.06	0.3	12000	0.02	1.360
195	6	0.06	0.3	12000	0.03	1.296
196	6	0.06	0.3	12000	0.04	1.154
197	6	0.06	0.3	12000	0.05	1.097

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
198	6	0.06	0.3	12000	0.06	1.061
199	6	0.06	0.3	12000	0.07	1.043
200	6	0.06	0.3	12000	0.08	0.986
201	6	0.06	0.3	12000	0.09	0.984
202	6	0.06	0.3	12000	0.1	0.970
203	6	0.06	0.3	12000	0.11	0.967
204	6	0.06	0.3	12000	0.12	0.949
205	6	0.06	0.3	12000	0.12	0.930
206	6	0.06	0.3	12000	0.13	0.906
207	6	0.06	0.3	12000	0.14	0.882
208	6	0.06	0.3	12000	0.15	0.883
209	6	0.06	0.3	12000	0.15	0.875
210	6	0.06	0.3	12000	0.16	0.855
211	6	0.06	0.3	12000	0.17	0.838
212	6	0.06	0.3	12000	0.17	0.816
213	6	0.06	0.3	12000	0.18	0.798
214	6	0.06	0.3	12000	0.18	0.764
215	6	0.06	0.3	12000	0.19	0.760

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
216	6	0.06	0.3	12000	0.2	0.738
217	6	0.06	0.7	8000	0.01	1.939
218	6	0.06	0.7	8000	0.02	1.839
219	6	0.06	0.7	8000	0.03	1.784
220	6	0.06	0.7	8000	0.04	1.532
221	6	0.06	0.7	8000	0.05	1.520
222	6	0.06	0.7	8000	0.06	1.472
223	6	0.06	0.7	8000	0.07	1.447
224	6	0.06	0.7	8000	0.08	1.428
225	6	0.06	0.7	8000	0.09	1.389
226	6	0.06	0.7	8000	0.1	1.367
227	6	0.06	0.7	8000	0.11	1.346
228	6	0.06	0.7	8000	0.12	1.294
229	6	0.06	0.7	8000	0.12	1.271
230	6	0.06	0.7	8000	0.13	1.251
231	6	0.06	0.7	8000	0.14	1.248
232	6	0.06	0.7	8000	0.15	1.196
233	6	0.06	0.7	8000	0.15	1.086

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
234	6	0.06	0.7	8000	0.16	1.061
235	6	0.06	0.7	8000	0.17	1.081
236	6	0.06	0.7	8000	0.17	0.860
237	6	0.06	0.7	8000	0.18	0.832
238	6	0.06	0.7	8000	0.18	0.749
239	6	0.06	0.7	8000	0.19	0.729
240	6	0.06	0.7	8000	0.2	0.705
241	6	0.06	0.7	10000	0.01	2.058
242	6	0.06	0.7	10000	0.02	1.923
243	6	0.06	0.7	10000	0.03	1.875
244	6	0.06	0.7	10000	0.04	1.778
245	6	0.06	0.7	10000	0.05	1.743
246	6	0.06	0.7	10000	0.06	1.689
247	6	0.06	0.7	10000	0.07	1.623
248	6	0.06	0.7	10000	0.08	1.620
249	6	0.06	0.7	10000	0.09	1.607
250	6	0.06	0.7	10000	0.1	1.552
251	6	0.06	0.7	10000	0.11	1.517

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
252	6	0.06	0.7	10000	0.12	1.461
253	6	0.06	0.7	10000	0.12	1.424
254	6	0.06	0.7	10000	0.13	1.408
255	6	0.06	0.7	10000	0.14	1.371
256	6	0.06	0.7	10000	0.15	1.321
257	6	0.06	0.7	10000	0.15	1.307
258	6	0.06	0.7	10000	0.16	1.240
259	6	0.06	0.7	10000	0.17	1.142
260	6	0.06	0.7	10000	0.17	1.096
261	6	0.06	0.7	10000	0.18	0.961
262	6	0.06	0.7	10000	0.18	0.883
263	6	0.06	0.7	10000	0.19	0.863
264	6	0.06	0.7	10000	0.2	0.863
265	6	0.06	0.7	12000	0.01	2.248
266	6	0.06	0.7	12000	0.02	2.008
267	6	0.06	0.7	12000	0.03	1.951
268	6	0.06	0.7	12000	0.04	1.915
269	6	0.06	0.7	12000	0.05	1.880

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
270	6	0.06	0.7	12000	0.06	1.856
271	6	0.06	0.7	12000	0.07	1.795
272	6	0.06	0.7	12000	0.08	1.676
273	6	0.06	0.7	12000	0.09	1.644
274	6	0.06	0.7	12000	0.1	1.630
275	6	0.06	0.7	12000	0.11	1.611
276	6	0.06	0.7	12000	0.12	1.588
277	6	0.06	0.7	12000	0.12	1.485
278	6	0.06	0.7	12000	0.13	1.464
279	6	0.06	0.7	12000	0.14	1.447
280	6	0.06	0.7	12000	0.15	1.387
281	6	0.06	0.7	12000	0.15	1.341
282	6	0.06	0.7	12000	0.16	1.290
283	6	0.06	0.7	12000	0.17	1.241
284	6	0.06	0.7	12000	0.17	1.198
285	6	0.06	0.7	12000	0.18	1.151
286	6	0.06	0.7	12000	0.18	0.911
287	6	0.06	0.7	12000	0.19	0.894

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
288	6	0.06	0.7	12000	0.2	0.894
289	8	0.02	0.3	8000	0.01	0.647
290	8	0.02	0.3	8000	0.02	0.633
291	8	0.02	0.3	8000	0.03	0.635
292	8	0.02	0.3	8000	0.04	0.629
293	8	0.02	0.3	8000	0.05	0.611
294	8	0.02	0.3	8000	0.06	0.611
295	8	0.02	0.3	8000	0.07	0.580
296	8	0.02	0.3	8000	0.08	0.577
297	8	0.02	0.3	8000	0.09	0.500
298	8	0.02	0.3	8000	0.1	0.482
299	8	0.02	0.3	8000	0.11	0.489
300	8	0.02	0.3	8000	0.12	0.482
301	8	0.02	0.3	8000	0.12	0.442
302	8	0.02	0.3	8000	0.13	0.431
303	8	0.02	0.3	8000	0.14	0.422
304	8	0.02	0.3	8000	0.15	0.419
305	8	0.02	0.3	8000	0.15	0.401

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
306	8	0.02	0.3	8000	0.16	0.396
307	8	0.02	0.3	8000	0.17	0.387
308	8	0.02	0.3	8000	0.17	0.351
309	8	0.02	0.3	8000	0.18	0.321
310	8	0.02	0.3	8000	0.18	0.291
311	8	0.02	0.3	8000	0.19	0.290
312	8	0.02	0.3	8000	0.2	0.283
313	8	0.02	0.3	10000	0.01	0.674
314	8	0.02	0.3	10000	0.02	0.670
315	8	0.02	0.3	10000	0.03	0.671
316	8	0.02	0.3	10000	0.04	0.668
317	8	0.02	0.3	10000	0.05	0.646
318	8	0.02	0.3	10000	0.06	0.632
319	8	0.02	0.3	10000	0.07	0.621
320	8	0.02	0.3	10000	0.08	0.618
321	8	0.02	0.3	10000	0.09	0.602
322	8	0.02	0.3	10000	0.1	0.582
323	8	0.02	0.3	10000	0.11	0.550

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
324	8	0.02	0.3	10000	0.12	0.532
325	8	0.02	0.3	10000	0.12	0.481
326	8	0.02	0.3	10000	0.13	0.476
327	8	0.02	0.3	10000	0.14	0.452
328	8	0.02	0.3	10000	0.15	0.466
329	8	0.02	0.3	10000	0.15	0.427
330	8	0.02	0.3	10000	0.16	0.412
331	8	0.02	0.3	10000	0.17	0.399
332	8	0.02	0.3	10000	0.17	0.365
333	8	0.02	0.3	10000	0.18	0.364
334	8	0.02	0.3	10000	0.18	0.355
335	8	0.02	0.3	10000	0.19	0.331
336	8	0.02	0.3	10000	0.2	0.331
337	8	0.02	0.3	12000	0.01	0.756
338	8	0.02	0.3	12000	0.02	0.726
339	8	0.02	0.3	12000	0.03	0.715
340	8	0.02	0.3	12000	0.04	0.718
341	8	0.02	0.3	12000	0.05	0.705

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
342	8	0.02	0.3	12000	0.06	0.700
343	8	0.02	0.3	12000	0.07	0.671
344	8	0.02	0.3	12000	0.08	0.677
345	8	0.02	0.3	12000	0.09	0.655
346	8	0.02	0.3	12000	0.1	0.633
347	8	0.02	0.3	12000	0.11	0.575
348	8	0.02	0.3	12000	0.12	0.555
349	8	0.02	0.3	12000	0.12	0.527
350	8	0.02	0.3	12000	0.13	0.508
351	8	0.02	0.3	12000	0.14	0.499
352	8	0.02	0.3	12000	0.15	0.477
353	8	0.02	0.3	12000	0.15	0.488
354	8	0.02	0.3	12000	0.16	0.478
355	8	0.02	0.3	12000	0.17	0.470
356	8	0.02	0.3	12000	0.17	0.456
357	8	0.02	0.3	12000	0.18	0.457
358	8	0.02	0.3	12000	0.18	0.454
359	8	0.02	0.3	12000	0.19	0.432

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
360	8	0.02	0.3	12000	0.2	0.439
361	8	0.02	0.7	8000	0.01	1.196
362	8	0.02	0.7	8000	0.02	1.014
363	8	0.02	0.7	8000	0.03	0.885
364	8	0.02	0.7	8000	0.04	0.883
365	8	0.02	0.7	8000	0.05	0.859
366	8	0.02	0.7	8000	0.06	0.824
367	8	0.02	0.7	8000	0.07	0.803
368	8	0.02	0.7	8000	0.08	0.767
369	8	0.02	0.7	8000	0.09	0.717
370	8	0.02	0.7	8000	0.1	0.702
371	8	0.02	0.7	8000	0.11	0.670
372	8	0.02	0.7	8000	0.12	0.644
373	8	0.02	0.7	8000	0.12	0.631
374	8	0.02	0.7	8000	0.13	0.623
375	8	0.02	0.7	8000	0.14	0.607
376	8	0.02	0.7	8000	0.15	0.571
377	8	0.02	0.7	8000	0.15	0.558

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
378	8	0.02	0.7	8000	0.16	0.559
379	8	0.02	0.7	8000	0.17	0.558
380	8	0.02	0.7	8000	0.17	0.549
381	8	0.02	0.7	8000	0.18	0.520
382	8	0.02	0.7	8000	0.18	0.519
383	8	0.02	0.7	8000	0.19	0.470
384	8	0.02	0.7	8000	0.2	0.458
385	8	0.02	0.7	10000	0.01	1.385
386	8	0.02	0.7	10000	0.02	1.284
387	8	0.02	0.7	10000	0.03	1.093
388	8	0.02	0.7	10000	0.04	0.973
389	8	0.02	0.7	10000	0.05	0.919
390	8	0.02	0.7	10000	0.06	0.905
391	8	0.02	0.7	10000	0.07	0.852
392	8	0.02	0.7	10000	0.08	0.821
393	8	0.02	0.7	10000	0.09	0.781
394	8	0.02	0.7	10000	0.1	0.764
395	8	0.02	0.7	10000	0.11	0.731

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
396	8	0.02	0.7	10000	0.12	0.698
397	8	0.02	0.7	10000	0.12	0.691
398	8	0.02	0.7	10000	0.13	0.683
399	8	0.02	0.7	10000	0.14	0.664
400	8	0.02	0.7	10000	0.15	0.657
401	8	0.02	0.7	10000	0.15	0.640
402	8	0.02	0.7	10000	0.16	0.630
403	8	0.02	0.7	10000	0.17	0.611
404	8	0.02	0.7	10000	0.17	0.609
405	8	0.02	0.7	10000	0.18	0.571
406	8	0.02	0.7	10000	0.18	0.531
407	8	0.02	0.7	10000	0.19	0.517
408	8	0.02	0.7	10000	0.2	0.497
409	8	0.02	0.7	12000	0.01	1.478
410	8	0.02	0.7	12000	0.02	1.432
411	8	0.02	0.7	12000	0.03	1.216
412	8	0.02	0.7	12000	0.04	1.122
413	8	0.02	0.7	12000	0.05	0.976

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
414	8	0.02	0.7	12000	0.06	0.948
415	8	0.02	0.7	12000	0.07	0.911
416	8	0.02	0.7	12000	0.08	0.898
417	8	0.02	0.7	12000	0.09	0.872
418	8	0.02	0.7	12000	0.1	0.798
419	8	0.02	0.7	12000	0.11	0.772
420	8	0.02	0.7	12000	0.12	0.789
421	8	0.02	0.7	12000	0.12	0.770
422	8	0.02	0.7	12000	0.13	0.757
423	8	0.02	0.7	12000	0.14	0.749
424	8	0.02	0.7	12000	0.15	0.732
425	8	0.02	0.7	12000	0.15	0.721
426	8	0.02	0.7	12000	0.16	0.695
427	8	0.02	0.7	12000	0.17	0.684
428	8	0.02	0.7	12000	0.17	0.680
429	8	0.02	0.7	12000	0.18	0.670
430	8	0.02	0.7	12000	0.18	0.686
431	8	0.02	0.7	12000	0.19	0.661

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
432	8	0.02	0.7	12000	0.2	0.649
433	8	0.06	0.3	8000	0.01	1.018
434	8	0.06	0.3	8000	0.02	0.908
435	8	0.06	0.3	8000	0.03	0.885
436	8	0.06	0.3	8000	0.04	0.847
437	8	0.06	0.3	8000	0.05	0.828
438	8	0.06	0.3	8000	0.06	0.809
439	8	0.06	0.3	8000	0.07	0.771
440	8	0.06	0.3	8000	0.08	0.751
441	8	0.06	0.3	8000	0.09	0.727
442	8	0.06	0.3	8000	0.1	0.708
443	8	0.06	0.3	8000	0.11	0.683
444	8	0.06	0.3	8000	0.12	0.643
445	8	0.06	0.3	8000	0.12	0.627
446	8	0.06	0.3	8000	0.13	0.630
447	8	0.06	0.3	8000	0.14	0.623
448	8	0.06	0.3	8000	0.15	0.628
449	8	0.06	0.3	8000	0.15	0.622

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
450	8	0.06	0.3	8000	0.16	0.620
451	8	0.06	0.3	8000	0.17	0.595
452	8	0.06	0.3	8000	0.17	0.580
453	8	0.06	0.3	8000	0.18	0.550
454	8	0.06	0.3	8000	0.18	0.530
455	8	0.06	0.3	8000	0.19	0.512
456	8	0.06	0.3	8000	0.2	0.465
457	8	0.06	0.3	10000	0.01	1.153
458	8	0.06	0.3	10000	0.02	1.005
459	8	0.06	0.3	10000	0.03	0.903
460	8	0.06	0.3	10000	0.04	0.895
461	8	0.06	0.3	10000	0.05	0.893
462	8	0.06	0.3	10000	0.06	0.865
463	8	0.06	0.3	10000	0.07	0.822
464	8	0.06	0.3	10000	0.08	0.817
465	8	0.06	0.3	10000	0.09	0.786
466	8	0.06	0.3	10000	0.1	0.754
467	8	0.06	0.3	10000	0.11	0.759

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
468	8	0.06	0.3	10000	0.12	0.726
469	8	0.06	0.3	10000	0.12	0.707
470	8	0.06	0.3	10000	0.13	0.717
471	8	0.06	0.3	10000	0.14	0.717
472	8	0.06	0.3	10000	0.15	0.705
473	8	0.06	0.3	10000	0.15	0.690
474	8	0.06	0.3	10000	0.16	0.670
475	8	0.06	0.3	10000	0.17	0.662
476	8	0.06	0.3	10000	0.17	0.643
477	8	0.06	0.3	10000	0.18	0.614
478	8	0.06	0.3	10000	0.18	0.603
479	8	0.06	0.3	10000	0.19	0.550
480	8	0.06	0.3	10000	0.2	0.500
481	8	0.06	0.3	12000	0.01	1.381
482	8	0.06	0.3	12000	0.02	1.160
483	8	0.06	0.3	12000	0.03	1.096
484	8	0.06	0.3	12000	0.04	1.015
485	8	0.06	0.3	12000	0.05	0.965

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
486	8	0.06	0.3	12000	0.06	0.910
487	8	0.06	0.3	12000	0.07	0.843
488	8	0.06	0.3	12000	0.08	0.863
489	8	0.06	0.3	12000	0.09	0.843
490	8	0.06	0.3	12000	0.1	0.840
491	8	0.06	0.3	12000	0.11	0.887
492	8	0.06	0.3	12000	0.12	0.829
493	8	0.06	0.3	12000	0.12	0.850
494	8	0.06	0.3	12000	0.13	0.786
495	8	0.06	0.3	12000	0.14	0.782
496	8	0.06	0.3	12000	0.15	0.783
497	8	0.06	0.3	12000	0.15	0.754
498	8	0.06	0.3	12000	0.16	0.785
499	8	0.06	0.3	12000	0.17	0.781
500	8	0.06	0.3	12000	0.17	0.716
501	8	0.06	0.3	12000	0.18	0.668
502	8	0.06	0.3	12000	0.18	0.635
503	8	0.06	0.3	12000	0.19	0.601

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
504	8	0.06	0.3	12000	0.2	0.582
505	8	0.06	0.7	8000	0.01	1.639
506	8	0.06	0.7	8000	0.02	1.539
507	8	0.06	0.7	8000	0.03	1.342
508	8	0.06	0.7	8000	0.04	1.232
509	8	0.06	0.7	8000	0.05	1.132
510	8	0.06	0.7	8000	0.06	1.072
511	8	0.06	0.7	8000	0.07	1.067
512	8	0.06	0.7	8000	0.08	0.968
513	8	0.06	0.7	8000	0.09	0.969
514	8	0.06	0.7	8000	0.1	0.937
515	8	0.06	0.7	8000	0.11	0.892
516	8	0.06	0.7	8000	0.12	0.858
517	8	0.06	0.7	8000	0.12	0.840
518	8	0.06	0.7	8000	0.13	0.811
519	8	0.06	0.7	8000	0.14	0.807
520	8	0.06	0.7	8000	0.15	0.775
521	8	0.06	0.7	8000	0.15	0.753

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
522	8	0.06	0.7	8000	0.16	0.748
523	8	0.06	0.7	8000	0.17	0.710
524	8	0.06	0.7	8000	0.17	0.681
525	8	0.06	0.7	8000	0.18	0.662
526	8	0.06	0.7	8000	0.18	0.624
527	8	0.06	0.7	8000	0.19	0.590
528	8	0.06	0.7	8000	0.2	0.535
529	8	0.06	0.7	10000	0.01	1.758
530	8	0.06	0.7	10000	0.02	1.623
531	8	0.06	0.7	10000	0.03	1.485
532	8	0.06	0.7	10000	0.04	1.384
533	8	0.06	0.7	10000	0.05	1.298
534	8	0.06	0.7	10000	0.06	1.193
535	8	0.06	0.7	10000	0.07	1.183
536	8	0.06	0.7	10000	0.08	1.150
537	8	0.06	0.7	10000	0.09	1.070
538	8	0.06	0.7	10000	0.1	1.040
539	8	0.06	0.7	10000	0.11	1.027

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
540	8	0.06	0.7	10000	0.12	0.963
541	8	0.06	0.7	10000	0.12	0.931
542	8	0.06	0.7	10000	0.13	0.919
543	8	0.06	0.7	10000	0.14	0.882
544	8	0.06	0.7	10000	0.15	0.865
545	8	0.06	0.7	10000	0.15	0.836
546	8	0.06	0.7	10000	0.16	0.817
547	8	0.06	0.7	10000	0.17	0.794
548	8	0.06	0.7	10000	0.17	0.742
549	8	0.06	0.7	10000	0.18	0.711
550	8	0.06	0.7	10000	0.18	0.683
551	8	0.06	0.7	10000	0.19	0.633
552	8	0.06	0.7	10000	0.2	0.631
553	8	0.06	0.7	12000	0.01	2.048
554	8	0.06	0.7	12000	0.02	1.808
555	8	0.06	0.7	12000	0.03	1.614
556	8	0.06	0.7	12000	0.04	1.515
557	8	0.06	0.7	12000	0.05	1.488

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
558	8	0.06	0.7	12000	0.06	1.356
559	8	0.06	0.7	12000	0.07	1.255
560	8	0.06	0.7	12000	0.08	1.226
561	8	0.06	0.7	12000	0.09	1.198
562	8	0.06	0.7	12000	0.1	1.170
563	8	0.06	0.7	12000	0.11	1.131
564	8	0.06	0.7	12000	0.12	1.113
565	8	0.06	0.7	12000	0.12	1.088
566	8	0.06	0.7	12000	0.13	1.050
567	8	0.06	0.7	12000	0.14	1.017
568	8	0.06	0.7	12000	0.15	0.947
569	8	0.06	0.7	12000	0.15	0.924
570	8	0.06	0.7	12000	0.16	0.894
571	8	0.06	0.7	12000	0.17	0.853
572	8	0.06	0.7	12000	0.17	0.831
573	8	0.06	0.7	12000	0.18	0.826
574	8	0.06	0.7	12000	0.18	0.806
575	8	0.06	0.7	12000	0.19	0.783

RunOrder	d	F	D	V	Vb	Force ratio (Fx/Fz)
576	8	0.06	0.7	12000	0.2	0.773

หมายเหตุ:

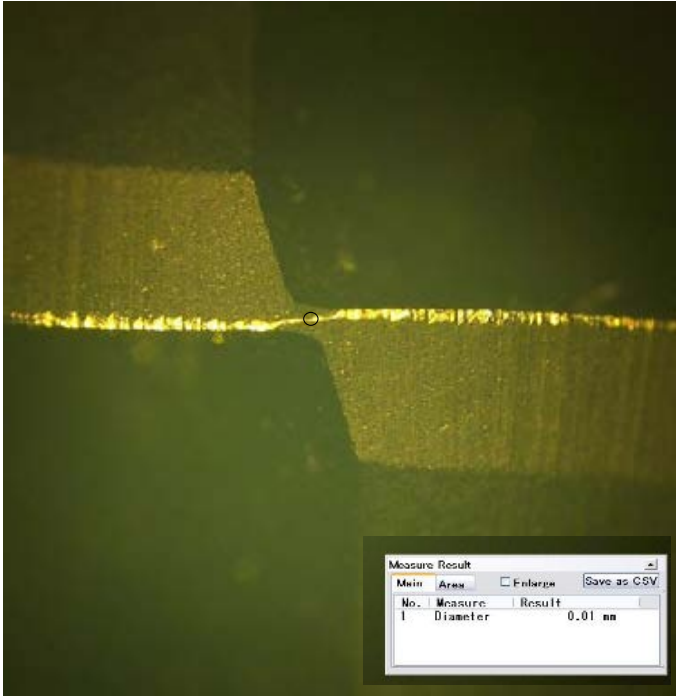
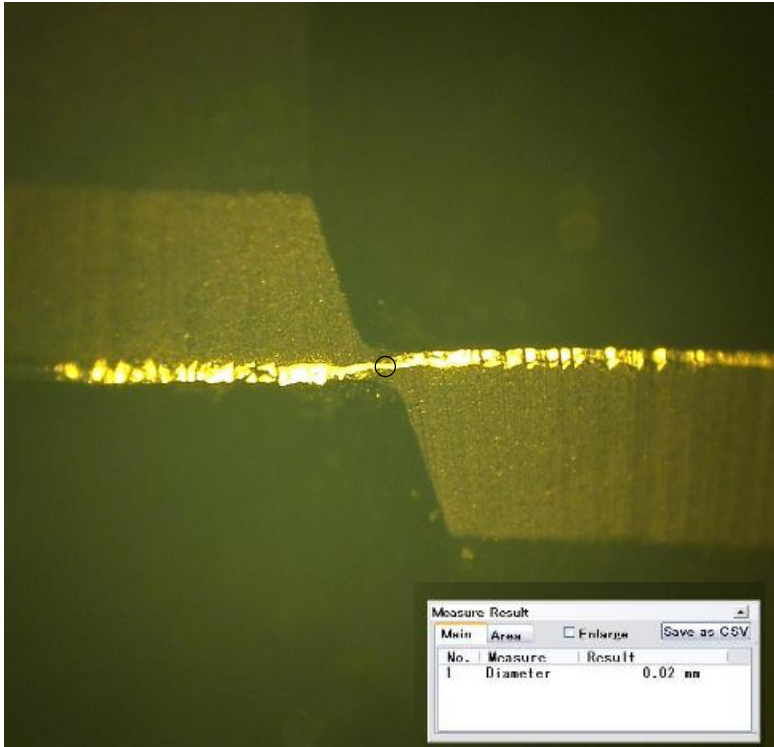
เมื่อ Fx เป็นแรงตัดในแนวสัมผัส มีหน่วยเป็น นิวตัน

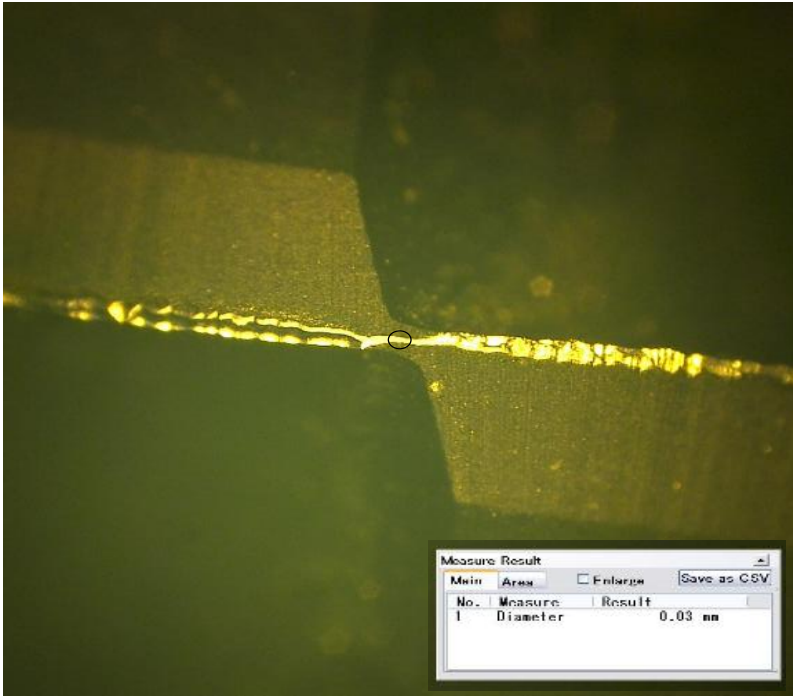
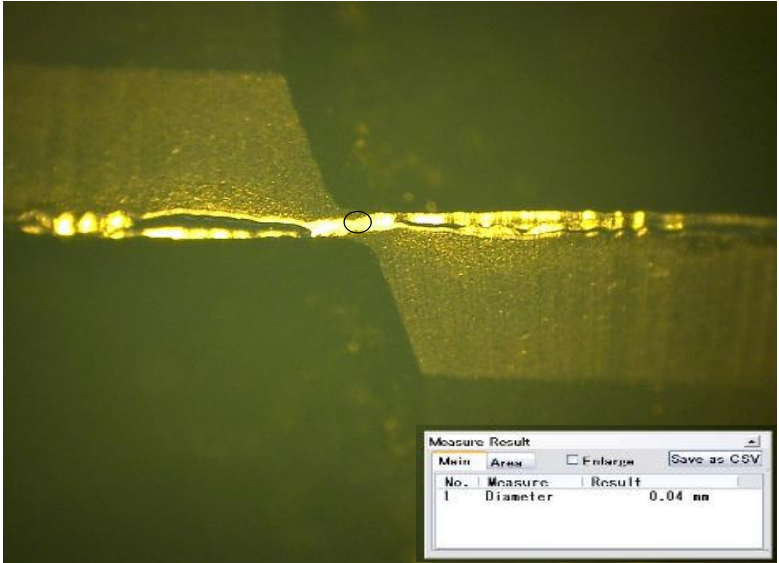
Fy เป็นแรงตัดในแนวป้อนตัด มีหน่วยเป็น นิวตัน

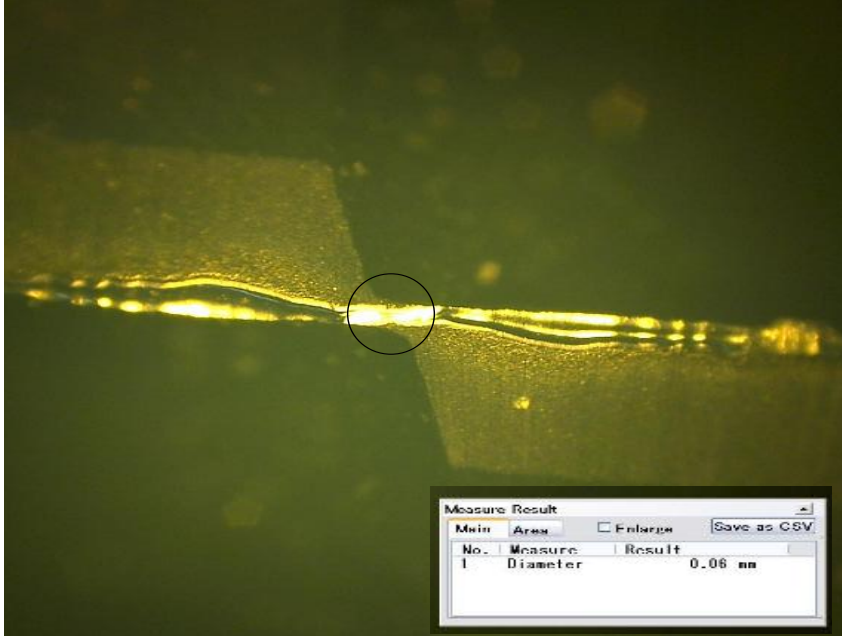
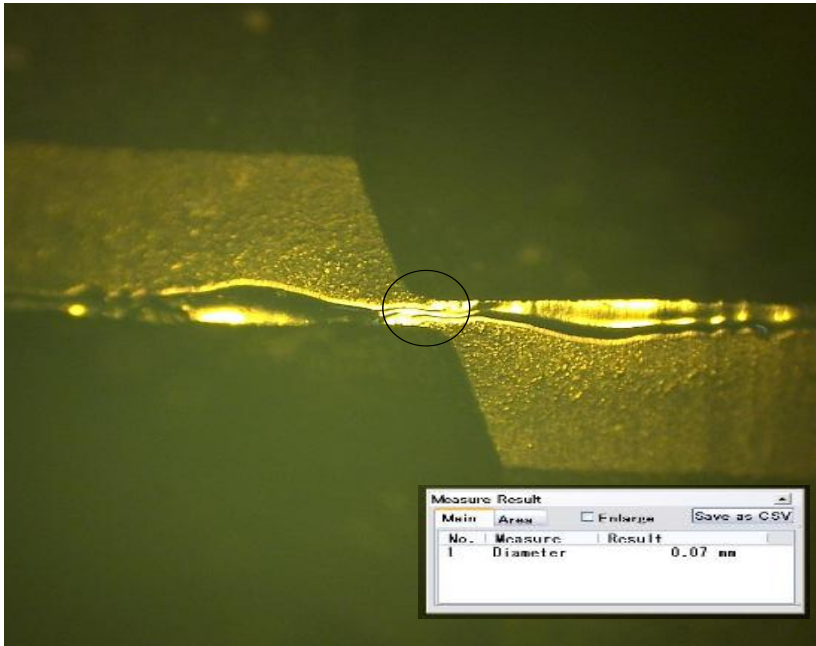
Fz เป็นแรงตัดในแนวตั้งฉาก มีหน่วยเป็น นิวตัน


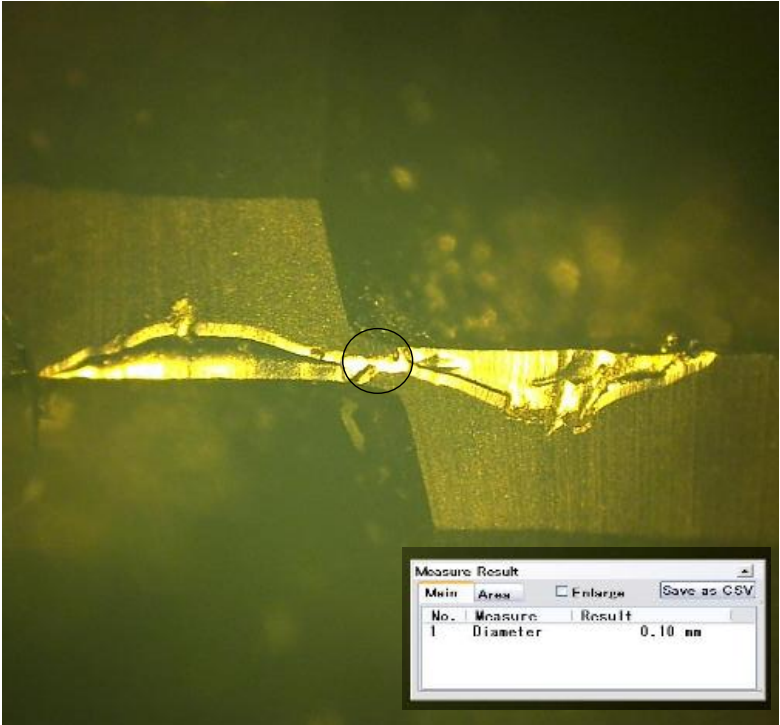
ภาคผนวก ข
รูปมิตกัณฑ์ขนาดความลึกต่างๆ

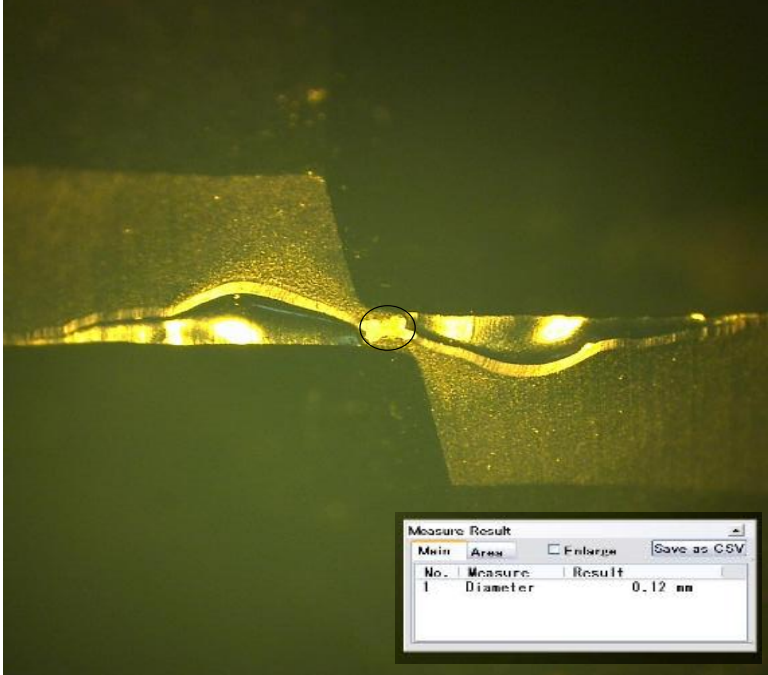

ตารางที่ 1 แสดงขนาดความลึกของมีดกัด



Vb(mm)	รูป
0.01	
0.02	

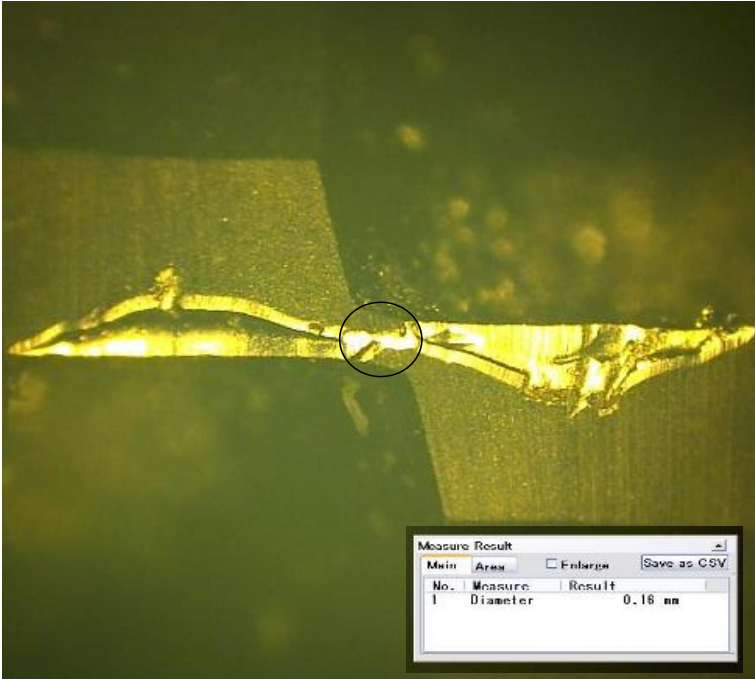
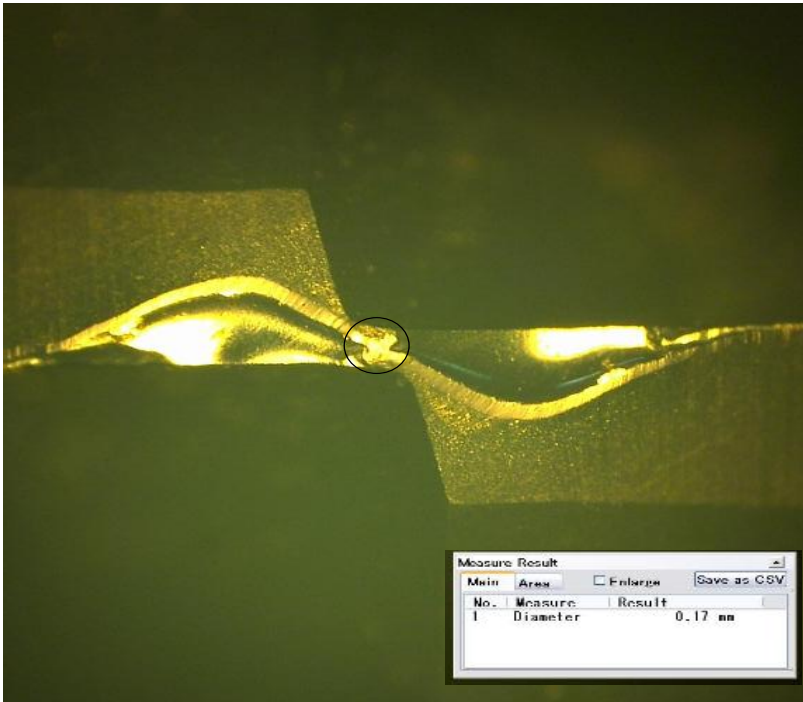
Vb(mm)	รูป						
0.03	 <p>Measure Result</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.03 nm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.03 nm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.03 nm					
0.04	 <p>Measure Result</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.04 nm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.04 nm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.04 nm					

Vb(mm)	รูป						
0.06	 <p>The image shows a cross-section of a fiber with a yellowish, textured surface. A black circle highlights a specific point on the fiber. A software window titled 'Measure Result' is overlaid in the bottom right corner, displaying the following data:</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.06 mm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.06 mm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.06 mm					
0.07	 <p>The image shows a cross-section of a fiber with a yellowish, textured surface. A black circle highlights a specific point on the fiber. A software window titled 'Measure Result' is overlaid in the bottom right corner, displaying the following data:</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.07 mm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.07 mm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.07 mm					

Vb(mm)	รูป
0.09	 <p>Micrograph showing a fiber structure with a diameter of 0.09 mm. A black circle highlights a specific section of the fiber. A 'Measure Result' window is overlaid in the bottom right corner, showing 'Diameter' as '0.09 mm'.</p>
0.10	 <p>Micrograph showing a fiber structure with a diameter of 0.10 mm. A black circle highlights a specific section of the fiber. A 'Measure Result' window is overlaid in the bottom right corner, showing 'Diameter' as '0.10 mm'.</p>

Vb(mm)	รูป						
0.12	 <p>Measure Result</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.12 mm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.12 mm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.12 mm					
0.13	 <p>Measure Result</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.13 mm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.13 mm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.13 mm					

Vb(mm)	ရုပ်						
0.14	 <p>Measure Result</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.14 mm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.14 mm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.14 mm					
0.15	 <p>Measure Result</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.15 mm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.15 mm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.15 mm					

Vb(mm)	ရုပ်						
0.16	 <p>Measure Result</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.16 mm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.16 mm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.16 mm					
0.17	 <p>Measure Result</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.17 mm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.17 mm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.17 mm					

Vb(mm)	รูป						
0.19	 <p>The image shows a cross-section of a fiber with a central core and an outer cladding. A small circular region on the core is highlighted with a black circle. A 'Measure Result' dialog box is overlaid on the bottom right of the image, displaying the following data:</p> <table border="1"><thead><tr><th>No.</th><th>Measure</th><th>Result</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Diameter</td><td>0.19 nm</td></tr></tbody></table>	No.	Measure	Result	1	Diameter	0.19 nm
No.	Measure	Result					
1	Diameter	0.19 nm					

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนาริป ชาตินันท์ เกิดวันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2553