

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงกับแรงตัด

นางสาวเดือนพรรณ จันทนา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF RELATION BETWEEN ROUNDNESS AND CUTTING FORCE
ON TURNING PROCESS

Miss Deuanphan Chanthana



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของชิ้นงานใน

กระบวนการกลึงกับแรงตัด

โดย

นางสาวเดือนพรรณ จันทนา

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคีย์)

เดือนพรรณ จันทนา : การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงกับแรงตัด (A STUDY OF RELATION BETWEEN ROUNDNESS AND CUTTING FORCE ON TURNING PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 186 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด แรงตัด และความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึง เพื่อใช้ในการทำนายความกลมของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) ไดนาโมมิเตอร์ถูกใช้เพื่อช่วยในการตรวจวัดแรงในขณะที่ตัดที่เกิดขึ้น แรงตัดพลวัตจะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขการตัด อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตระหว่างแรงตัดรัศมีและแรงป้อนตัด (AVF_x/AVF_y) ถูกเสนอเพื่อกำจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัด เพื่อให้สมการทำนายความกลมที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ทำนายความกลมโดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป สมการทำนายความกลมถูกนำเสนอในรูปแบบสมการเอกซ์โปเนนเชียล 6 ตัวแปร ประกอบด้วย ความเร็วตัด 100-200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4-0.6 มิลลิเมตร อัตราป้อนตัด 0.15-0.25 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4-0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา และอัตราค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการวิเคราะห์สมการทำนายความกลมรูปแบบเอกซ์โปเนนเชียล แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความกลมมากที่สุด และความกลมสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มความเร็วตัด เพิ่มขนาดรัศมีจุมุมมีด และเพิ่มมุมคายเศษโลหะ ผลการทดสอบสมการทำนายความกลมที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้เงื่อนไขการตัดใหม่ภายใต้ขอบเขตการวิจัยมีความแม่นยำเท่ากับ 95.43% ซึ่งถือว่าสมการทำนายความกลมที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูง

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ นิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570913321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: ROUNDNESS / CNC TURNING / MONITORING / CUTTING FORCE RATIO
 DEUANPHAN CHANTHANA: A STUDY OF RELATION BETWEEN ROUNDNESS
 AND CUTTING FORCE ON TURNING PROCESS. ADVISOR: ASSOC. PROF.
 SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, Ph.D., 186 pp.

The aim of this research is to study the relations of the roundness, the cutting forces and cutting conditions in the CNC turning process. The dynamic cutting forces are utilized to predict the in-process roundness under various cutting conditions. The dynamometer has been installed to monitor the cutting forces during the cutting process. The dynamic cutting forces depend on the cutting conditions such as the hardness of material. They are hence necessary to be generalized and dimensionless by taking the ratio of the average variances of dynamic radial force (AVF_x) to that of the dynamic feed force (AVF_y).

The roundness model is proposed by employing the exponential function with the six factors of the cutting speeds of 100-200 m/min, the feed rates of 0.15-0.25 mm, the depths of cut of 0.4-0.8 mm, the tool nose radiuses of 0.4-0.8 mm, the rake angles of -6° , 11° , and the dynamic cutting force ratio. The multiple regression analysis was applied to calculate the coefficients of the model by using the least square method at the confident level of 95%. The experimental results showed that the dynamic cutting force ratio is the most influence factor to the roundness. The better roundness can be obtained by increasing the cutting speed, the tool nose radius and the rake angle.

The developed in-process prediction roundness model has been proved by the new cutting tests and the experimental results showed that the developed roundness model can be used to predict the roundness during the cutting with the high accuracy of 95.43%.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอนอย่างดียิ่ง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ และรองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่อง จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณนายชาญณรงค์ รุ่งเรือง และนายจักรพันธ์ เมืองวัฒน์ ที่ได้คำแนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์ ดูแล บำรุงรักษาเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ตามเป้าหมายที่กำหนด

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา จนทำให้ได้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอมอบความกตัญญูตเวทิตาคุณแต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ช่วยสนับสนุนจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	9
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process)	12
2.2 กระบวนการกลึง (Turning)	14
2.3 เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions).....	15
2.4 เครื่องมือตัด (Cutting Tool)	17
2.5 การเกิดเศษโลหะ	21
2.6 แรงในการตัด.....	25
2.7 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงของการตัด	27
2.8 สัญญาณแรงตัด	28

2.9 ประวัติและวิวัฒนาการของเทคโนโลยีซีเอ็นซี	30
2.10 ความกลม (Roundness)	32
2.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	38
2.12 การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression)	38
2.13 การวิเคราะห์ผล	39
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินวิจัย	45
3.1 การออกแบบการทดลอง	45
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	47
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	50
3.4 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต	58
3.5 การพัฒนาสมการทำนายความกลมของชิ้นงานขณะตัด	60
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	63
4.1 ผลการทดลอง	63
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง	70
4.3 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตและค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ...	73
4.4 กลไกการเกิดรูปร่างความกลม	74
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและอัตราส่วน ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต	75
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและเศษโลหะ	76
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด อัตราส่วนของแรง และพิสัยเส้นผ่าน ศูนย์กลาง	84

4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	102
4.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง แรงตัด และเงื่อนไขการตัดด้วยพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) และเส้นโครงร่าง (Contour plot).....	104
4.10 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ.....	111
4.11 สมการทำนายค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	113
4.12 การทดสอบความแม่นยำของสมการ	117
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	123
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	123
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	124
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรค	125
5.4 ข้อเสนอแนะ	125
รายการอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก.....	128
ภาคผนวก ก โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ความกลม.....	129
ภาคผนวก ข โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของแรงตัด.....	132
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ความกลมและแรงตัด ณ เงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	137
ภาคผนวก ง เสาชโลหะ ณ เงื่อนไขการตัดต่างๆ	165
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	186

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	การศึกษางานวิจัยที่ได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงความกลม	4
ตารางที่ 1.2	ปัจจัยและระดับของการทดลอง	10
ตารางที่ 3.1	แสดงระดับปัจจัยของการทดลอง	46
ตารางที่ 3.2	รายละเอียดเม็ตมีดที่ใช้ในการทดลอง	48
ตารางที่ 3.3	เงื่อนไขการวัดความกลม	51
ตารางที่ 3.4	เงื่อนไขการทดลอง	54
ตารางที่ 4.1	ตารางบันทึกผลการทดลอง	64
ตารางที่ 4.2	เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำสมการ	118
ตารางที่ 4.3	ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำสมการ	119

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	ตัวอย่างเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต	2
รูปที่ 1.2	แรงตัดในแนวแกน 3 มิติ	3
รูปที่ 1.3	การวิเคราะห์แรงตัดและความกลม ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.	6
รูปที่ 1.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกระบวนการกลึง และการตรวจสอบความกลม	7
รูปที่ 1.5	ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อน 0.15 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. มุมคาย เศษโลหะ 11 องศา.....	8
รูปที่ 1.6	แนวคิดการทำวิจัย.....	8
รูปที่ 2.1	รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการตัด.....	12
รูปที่ 2.2	รูปร่างของชิ้นงานที่เกิดจากเครื่องมือตัด.....	13
รูปที่ 2.3	ลักษณะของกระบวนการตัด.....	13
รูปที่ 2.4	กระบวนการกลึง.....	14
รูปที่ 2.5	กระบวนการกลึงแบบต่างๆ.....	15
รูปที่ 2.6	เงื่อนไขการตัดของกระบวนการกลึง	15
รูปที่ 2.7	พัฒนาการของเครื่องมือตัด (Cutting tool).....	17
รูปที่ 2.8	การตัดสินใจเลือกเครื่องมือตัดภายใต้ปัจจัยต่างๆ	18
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเร็วตัด และอัตราการสึกหรอ.....	18
รูปที่ 2.10	การเลือกใช้เครื่องมือตัดตามคุณสมบัติ	19
รูปที่ 2.11	เม็ดมีดกลึง.....	21
รูปที่ 2.12	แบบจำลองการตัด.....	21
รูปที่ 2.13	ภาพถ่ายถ่ายกระบวนการตัด กำลังขยาย 100 เท่า	22

รูปที่ 2.14	ลักษณะของการเกิดเศษโลหะ	23
รูปที่ 2.15	ลักษณะรูปแบบของเศษโลหะ.....	24
รูปที่ 2.16	ชนิดของตัวหักเศษโลหะ (a) Grooved type (b)Obstruction-type.....	25
รูปที่ 2.17	ตัวอย่างตัวหักเศษโลหะ	25
รูปที่ 2.18	ระบบแรงบนคมตัด	26
รูปที่ 2.19	ระบบแรงเสียดทาน.....	26
รูปที่ 2.20	ระบบของแรงเฉือน	27
รูปที่ 2.21	รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงและวิธีการสร้าง	28
รูปที่ 2.22	แรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง	28
รูปที่ 2.23	สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น	29
รูปที่ 2.24	ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบซีเอ็นซี	30
รูปที่ 2.25	เครื่องกลึงซีเอ็นซี	32
รูปที่ 2.26	ความเบี่ยงเบนของรูปทรงเลขาคณิต	33
รูปที่ 2.27	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการวัดแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน.....	33
รูปที่ 2.28	รูปแบบชิ้นงานที่ไม่ได้รูปทรงวงกลม	33
รูปที่ 2.29	รูปแบบชิ้นงานที่ไม่เฉพาะเจาะจง	34
รูปที่ 2.30	การหาความกลมด้วยวิธีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด	34
รูปที่ 2.31	การหาความกลมด้วยวิธีการวงกลมพื้นที่น้อยสุด	35
รูปที่ 2.32	การหาความกลมด้วยวิธีวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด	35
รูปที่ 2.33	แสดงการวัดความกลมด้วยวิธีวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุด	35
รูปที่ 2.34	การวัดความกลมแบบ Circumferential Confining Gauge	36
รูปที่ 2.35	ตัวอย่างเครื่องมือวัดความกลม Detector rotating type	36
รูปที่ 2.36	การวัดชิ้นงานแบบ Rotating on centers	37

รูปที่ 2.37 ตัวอย่างเครื่องวัดค่าความกลมแบบ Table rotating type [24].....	37
รูปที่ 2.38 การวัดความกลมแบบโดยใช้ V-block.....	37
รูปที่ 3.1 ความเร็วตัด ตามคู่มือแนะนำของผู้ผลิต [37].....	46
รูปที่ 3.2 อัตราการป้อนตัดตามคู่มือแนะนำของผู้ผลิต [37].....	47
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	47
รูปที่ 3.4 ด้ามมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง	48
รูปที่ 3.5 เครื่องกลึงซีเอ็นซี	48
รูปที่ 3.6 ไดนาโมมิเตอร์.....	49
รูปที่ 3.7 ออสซิลโลสโคป	49
รูปที่ 3.8 เครื่องขยายสัญญาณ.....	49
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความกลม.....	50
รูปที่ 3.10 การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทำการทดลอง	50
รูปที่ 3.11 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ในเครื่องกลึงซีเอ็นซี	52
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	53
รูปที่ 3.13 การคำนวณค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อน 0.15 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมี จุมุกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	58
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนในการคำนวณค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต.....	59
รูปที่ 4.1 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา	70
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง และการเกิดเศษโลหะ.....	71
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์แรงตัดและค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.4 มม.....	73

รูปที่ 4.4	กลไกการเกิดรูปร่างความกลม	74
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของชิ้นงานและค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง	75
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและอัตราส่วนค่าเฉลี่ย ความแปรปรวนแรงพลวัต (AVF_x/AVF_y)	75
รูปที่ 4.7	การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200, 150 และ 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษ โลหะ 11 องศา	76
รูปที่ 4.8	การวิเคราะห์แรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา	76
รูปที่ 4.9	การวิเคราะห์แรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา	77
รูปที่ 4.10	การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.8 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคาย เศษโลหะ 11 องศา	77
รูปที่ 4.11	การเพิ่มพื้นที่การตัด เมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น	77
รูปที่ 4.12	การวิเคราะห์แรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความลึกตัด 0.8 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา	78
รูปที่ 4.13	การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด และการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ..	78
รูปที่ 4.14	การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด ความลึกตัด 0.4, 0.6 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 200 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา ..	79
รูปที่ 4.15	การเพิ่มพื้นที่การตัด เมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้น	79
รูปที่ 4.16	การวิเคราะห์แรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา ..	80
รูปที่ 4.17	การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด รัศมีจุมูกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา	80

รูปที่ 4.18 ความหนาของเศษโลหะและรัศมีจุมูกมีด.....	81
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์แรงตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที่ อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	81
รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที่ อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	82
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงรัศมีจุมูกมีด และการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง	82
รูปที่ 4.22 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มม.	82
รูปที่ 4.23 มุมคายเศษโลหะ และการเกิดเศษโลหะ	83
รูปที่ 4.24 การวิเคราะห์แรงตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที่ อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.....	83
รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที่ อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.....	84
รูปที่ 4.26 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. และอัตราป้อนตัด 0.15 มม.....	84
รูปที่ 4.27 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. และอัตราป้อนตัด 0.20 มม.....	85
รูปที่ 4.28 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. และอัตราป้อนตัด 0.2 มม.....	85
รูปที่ 4.29 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา	86
รูปที่ 4.30 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	86
รูปที่ 4.31 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./นาที่ อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.	87

รูปที่ 4.32	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุกมีด 0.8 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. และความเร็วตัด 100 ม./นาที.....	88
รูปที่ 4.33	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุกมีด 0.8 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. และความเร็วตัด 150 ม./นาที.....	88
รูปที่ 4.34	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุกมีด 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. และความเร็วตัด 150 ม./นาที.....	89
รูปที่ 4.35	พื้นที่ตัดที่เพิ่มมากขึ้นจากการเพิ่มอัตราการป้อน.....	89
รูปที่ 4.36	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./ นาที ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	90
รูปที่ 4.37	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./ นาที ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	90
รูปที่ 4.38	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม.....	91
รูปที่ 4.39	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุกมีด 0.8 มม. อัตราการป้อน 0.25 มม. และความเร็วตัด 150 ม./นาที	92
รูปที่ 4.40	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุกมีด 0.4 มม. อัตราการป้อน 0.2 มม. และความเร็วตัด 200 ม./นาที	92
รูปที่ 4.41	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุกมีด 0.4 มม. อัตราการป้อน 0.25 มม. และความเร็วตัด 200 ม./นาที	93
รูปที่ 4.42	พื้นที่การตัดที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความลึกตัด.....	93
รูปที่ 4.43	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	94
รูปที่ 4.44	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	94
รูปที่ 4.45	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม.....	95

รูปที่ 4.46	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา ความลึกตัด 0.4 มม. อัตราการป้อน 0.15 มม. และความเร็วตัด 100 ม./นาที	96
รูปที่ 4.47	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา ความลึกตัด 0.8 มม. อัตราการป้อน 0.15 มม. และความเร็วตัด 100 ม./นาที	96
รูปที่ 4.48	เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา ความลึกตัด 0.8 มม. อัตราการป้อน 0.25 มม. และความเร็วตัด 200 ม./นาที	97
รูปที่ 4.49	อิทธิพลของรัศมีจุกมิดที่มีต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน	97
รูปที่ 4.50	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	98
รูปที่ 4.51	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	98
รูปที่ 4.52	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุกมิด 0.4 มม.....	99
รูปที่ 4.53	เงื่อนไขการตัด รัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. อัตราการป้อน 0.15 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที	100
รูปที่ 4.54	เงื่อนไขการตัด รัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. อัตราการป้อน 0.15 มม. และความเร็วตัด 100 ม./นาที	100
รูปที่ 4.55	เงื่อนไขการตัด รัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. อัตราการป้อน 0.15 มม. และความเร็วตัด 150 ม./นาที	101
รูปที่ 4.56	ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./ นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุกมิด 0.4 มม.	101
รูปที่ 4.57	กราฟอันตรกิริยาระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง .	102
รูปที่ 4.58	ผลหลัก (Main effect) ของพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางและปัจจัยที่ใช้ในการ ทดลอง	103
รูปที่ 4.59	ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราส่วนแรงตัด และเงื่อนไขการ ตัด	105

รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราการป้อน และความลึกตัด	106
รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ความเร็วตัด และความลึกตัด ..	106
รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ความเร็วตัด และความลึกตัด ..	107
รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง มุมคายเศษโลหะ และเงื่อนไขการตัด	108
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง รัศมีจุมกมิต และเงื่อนไขการตัด	110
รูปที่ 4.65 Normal Probability Plot	112
รูปที่ 4.66 ทดสอบความอิสระของข้อมูล	112
รูปที่ 4.67 ทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน	113
รูปที่ 4.68 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย	114
รูปที่ 4.69 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอย	115
รูปที่ 4.70 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

1.1.1 แนวโน้มอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกลึง

เทคโนโลยีในอุตสาหกรรมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามความต้องการของผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลงไปอยู่เสมอ [1] โดยในปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจการรักษาสภาพแวดล้อมและการประหยัดพลังงานเป็นสิ่งที่สำคัญ ดังจะเห็นได้จากในอุตสาหกรรมยานยนต์ ผู้บริโภคลดระดับความนิยมลงในรถยนต์หรูราคาขนาดใหญ่ และให้ความสำคัญกับการใช้รถยนต์ที่เหมาะสมกับการใช้ชีวิตมากขึ้น เช่น การใช้รถยนต์ขนาดเล็กที่ประหยัดพลังงานและค่าบำรุงรักษาที่ต่ำ เพื่อการเดินทางในเขตเมือง เป็นต้น จากความเปลี่ยนแปลงของผู้บริโภค ทำให้อุตสาหกรรมต้องพัฒนาเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ทำให้กระบวนการผลิตต้องเพิ่มการใช้เครื่องจักร และเทคโนโลยีระดับสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

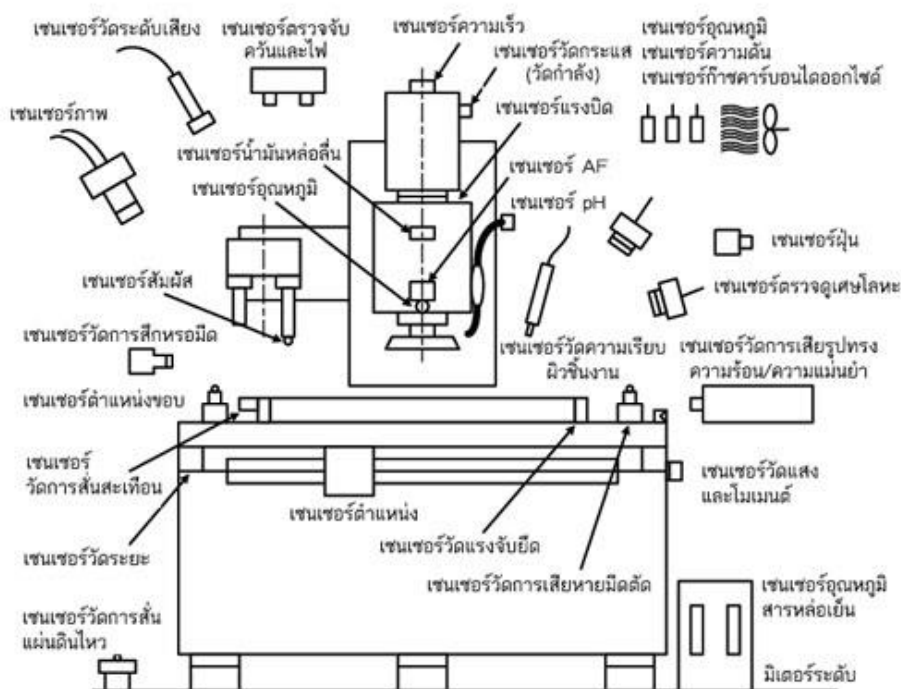
อุตสาหกรรมในประเทศไทยจะต้องปรับตัวและพัฒนาตนเองให้ทันกับเทคโนโลยีและความต้องการของผู้บริโภคในตลาดโลกที่เปลี่ยนแปลงไป เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต มุ่งเน้นการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้าให้มากที่สุด

1.1.2 การวิจัยและพัฒนาเพื่อระบบการผลิตในอนาคต

จากการเปลี่ยนแปลงของอุตสาหกรรมการผลิต การเปลี่ยนแปลงความต้องการของผู้บริโภค และการแข่งขันทางการค้าที่สูงมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการเหล่านี้ทำให้เกิดการพัฒนากระบวนการผลิตมาสู่ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Machine System : IMS) [2] ซึ่งเป็นระบบการผลิตที่สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นๆ ได้ เครื่องจักรสามารถทำงานได้ด้วยตนเอง และสามารถหาค่าสมรรถนะที่เหมาะสมได้ภายใต้สภาวะการณ์ที่กำหนดได้ โดยการใช้เซนเซอร์ที่มีความน่าเชื่อถือในการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตของเครื่องจักรกล

โดยระบบการตรวจติดตามสามารถทำได้โดยตรงและโดยอ้อม ตัวอย่างเช่น การใช้เซนเซอร์ในการตรวจติดตามความสึกหรอโดยตรง หรือการตรวจติดตามทางอ้อมโดยตัวแปรที่สำคัญ เช่น การวัดอุณหภูมิ พลังงาน หรือแรงตักที่เกิดขึ้นเพื่อเพื่อบอกถึงการสึกหรอทางอ้อมของมีดตัด

เซนเซอร์ที่อยู่ในกระบวนการผลิตสำหรับเครื่องจักรกลอัจฉริยะจะสร้างขึ้นมาจากเทคโนโลยีขั้นสูง มีความเที่ยงตรงสูง ผู้ผลิตจึงสามารถใช้เซนเซอร์เข้ามามีส่วนช่วยในการติดตามกระบวนการผลิต นอกจากนี้แล้วผู้ผลิตยังสามารถติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับเครื่องมือหรือเครื่องจักรเพื่อช่วยในการควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตได้อีกด้วย



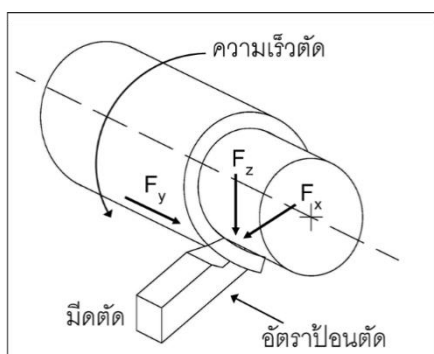
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.1.3 กระบวนการกลึงและการติดตามสัญญาณขณะตัด

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous Cut) โดยที่มีตัดตัดจะเคลื่อนที่ขนานไปกับแกนหมุนและตัดผิวด้านนอกออก ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมีขนาดลดลง เครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปงานกลึงมีทั้งเครื่องกลึงที่เป็นการควบคุมแบบธรรมดา (Manual) และเครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ (CNC) ซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่ระบบซีเอ็นซีจะใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการควบคุมการทำงานของเครื่องจักร เก็บข้อมูล หรือช่วยในการป้อนข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขโปรแกรม โดยการควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติจะให้ชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง ลดระยะเวลาในการผลิต ไม่จำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีทักษะสูง มี

ความยืดหยุ่นสามารถปรับเปลี่ยนโปรแกรมได้ง่าย ลดระยะเวลาในการปรับตั้งและเปลี่ยนเครื่องมือ และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน



รูปที่ 1.2 แรงตัดในแนวแกน 3 มิติ

จากแนวคิดพัฒนาเพื่อระบบการผลิตในอนาคต ในกระบวนการกลึงสามารถใช้เซนเซอร์เพื่อช่วยในการติดตามแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด ได้โดยการใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงแสดงดังรูปที่ 1.2 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แรง ได้แก่

- 1) แรงตัดในแนวรัศมี เรียกว่า แรงรุนหรือแรงรัศมี (Radius force : F_x)
- 2) แรงในทิศทางขนานกับการป้อน เรียกว่า แรงป้อนตัด (Feed force : F_y)
- 3) แรงในทิศทางขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัดหลัก (Main force : F_z)

ซึ่งสามารถนำสัญญาณแรงตัดที่ได้จากการติดตามกระบวนการกลึงนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อช่วยในการติดตามสถานะของกระบวนการผลิต หรือควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการกลึง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการประยุกต์ใช้สัญญาณแรงตัดเพื่อช่วยในการติดตามกระบวนการและควบคุมกระบวนการกลึงที่หลากหลาย [1, 3] ใช้สัญญาณแรงตัดเพื่อช่วยในการติดตามความคลาดเคลื่อนความกลมในกระบวนการกลึงเร็ว และใช้เซนเซอร์เพื่อตรวจจับตำแหน่งเครื่องมือตัด ชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเครื่องมือตัด เพื่อช่วยในการปรับปรุงความกลมให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด [4] ใช้สัญญาณแรงขณะตัดสร้างแบบจำลองเพื่อติดตามความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานในกระบวนการกลึง [5] ใช้สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นจริงบนเครื่องซีเอ็นซีสร้างแบบจำลองพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานเพื่อช่วยลดของเสียในกระบวนการผลิต โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานได้ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดอยู่นอกขอบเขตของการทดลอง งานวิจัย

นี้จึงได้ศึกษาการใช้เซนเซอร์ โดยการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อช่วยในการติดตามแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด และนำสัญญาณแรงตัดที่ได้นี้มาช่วยในการติดตามความกลมในกระบวนการผลิตด้วยเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

1.1.4 ความสำคัญของความกลมในกระบวนการผลิตและกระบวนการประกอบ

รูปร่างทรงกระบอกเป็นรูปร่างเลขาคณิตพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักร อุปกรณ์ แม่พิมพ์ ชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดรูปร่างทรงกระบอกสามารถผลิตที่หลากหลายแต่โดยส่วนมากแล้วผลิตมาจากกระบวนการกลึงซึ่งเป็นกระบวนการตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous Cut) ในกระบวนการผลิตที่ต้องการความละเอียดสูง ความกลม (Roundness) ของชิ้นงานส่งผลโดยตรงต่อการประกอบ ในชิ้นส่วนที่มีการหมุนความกลมส่งผลกระทบทำให้เกิดเสียง การสั่นสะเทือน และส่งผลกระทบโดยตรงต่อจุดศูนย์กลางในการหมุนของชิ้นส่วนของเครื่องจักร ในชิ้นส่วนที่ต้องมีการเคลื่อนที่ ความกลมส่งผลต่อการเสียดสี และการสึกหรอของชิ้นส่วนได้

การควบคุมความกลมของชิ้นงานในกระบวนการผลิตต้องอาศัยทักษะของผู้วัด ชิ้นงานอาจได้รับความเสียหายจากการสัมผัสตรวจสอบ สูญเสียเวลาในการผลิตอันเนื่องมาจากการรอผลการตรวจสอบ ต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูงในการตรวจสอบ และการตรวจติดตามความกลมของชิ้นงานสามารถทำได้หลังจากการผลิตแล้วเท่านั้น จากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้โดยส่วนมากในกระบวนการผลิตไม่สามารถตรวจติดตามความกลมของชิ้นงานที่ผลิตออกมาได้ทั้งหมด

1.1.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความกลมของชิ้นงาน

ตารางที่ 1.1 การศึกษางานวิจัยที่ได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงความกลม

งานวิจัย	ปัจจัย	รายละเอียด	ข้อจำกัด
[3]	- สัญญาณแรงตัด	ใช้สัญญาณแรงขณะตัดในกระบวนการกลึงเร็ว ติดตามและชดเชยความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือตัดเพื่อปรับปรุงความกลม	แบบจำลองที่ได้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่ใช้ในการวิจัยเท่านั้น
[4]	- สัญญาณแรงตัด - ความยาวชิ้นงาน	ใช้สัญญาณแรงขณะตัดตรวจประมาณความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	แบบจำลองที่ได้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่ใช้ในการวิจัยเท่านั้น

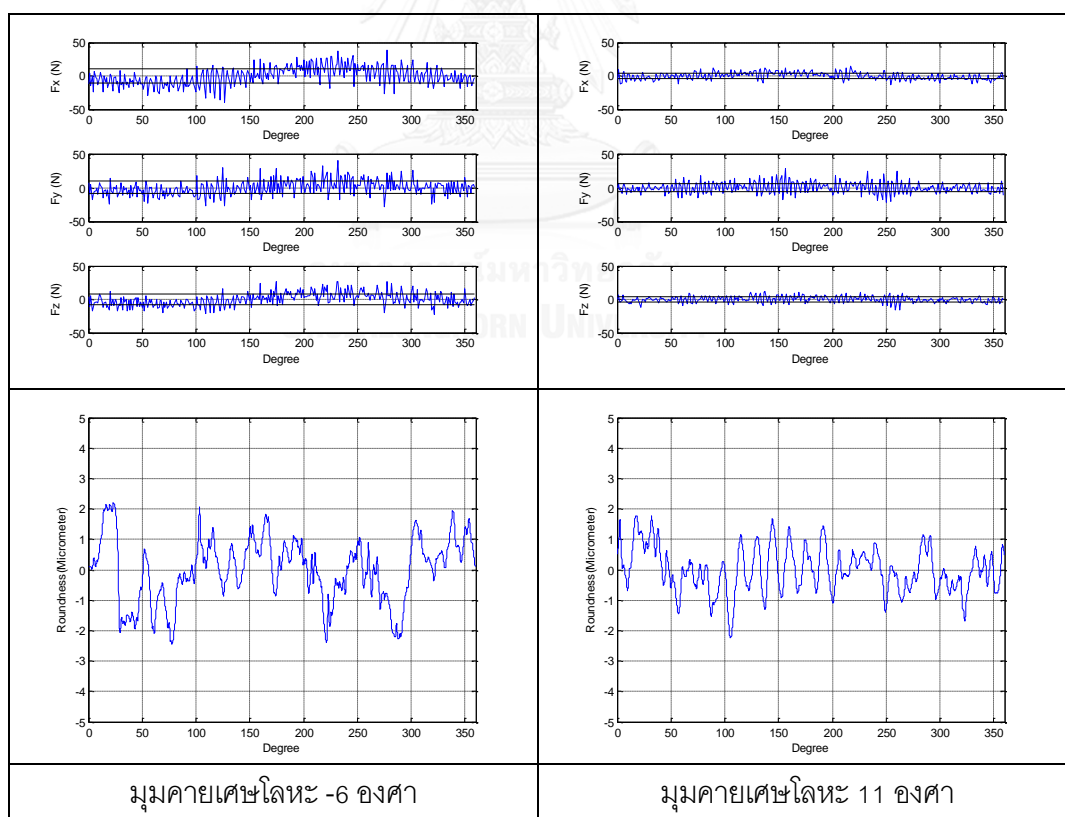
งานวิจัย	ปัจจัย	รายละเอียด	ข้อจำกัด
	- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	และการโค้งตัวของชิ้นงานในกระบวนการกลึง	
[5]	- ความเร็วตัด - อัตราการป้อน - ความลึกตัด - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง - อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวชิ้นงาน	ตรวจสอบความขนาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานขณะตัดในกระบวนการกลึงโดยใช้ Artificial Neural Networks	แบบจำลองสามารถใช้ได้ภายใต้เงื่อนไขที่ทำการทดลองเท่านั้น
[6]	- ความเร็วตัด - อัตราการป้อน - ความลึกตัด	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดในกระบวนการกลึงและความกลม	ไม่สามารถพยากรณ์ความกลมในขณะตัดได้
[7]	- จำนวนจุดภาพ หรือ พิกเซล - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง - ความกลม	ประดิษฐ์เครื่องวัดความกลมโดยวัดจากค่าสายตามอง โดยการใช้ภาพถ่ายประมวลผล ทำให้ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงาน	ไม่สามารถตรวจสอบความกลมในขณะตัดได้
[8]	- ความเร็วตัด - อัตราการป้อน - ความลึกตัด - สัญญาณแรงตัด สถิต	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการเจียระไน	สัญญาณแรงตัดสถิตส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ความกลม

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาตามตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการควบคุมความกลมในกระบวนการกลึง ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และสัญญาณแรงตัด แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ได้มีการศึกษามาแล้วนั้นยังไม่ครอบคลุมรัศมีงูมกมิต

และมุมคายเศษโลหะ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรัศมีจุมกมีดจะส่งผลต่อขนาดของพื้นที่ตัด พื้นที่ตัดนี้ส่งผลต่อแรงตัดให้มีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามขนาดพื้นที่ตัด และมุมคายเศษโลหะมีส่วนในการกำหนดทิศทางการไหลของเศษโลหะ ซึ่งมุมคายเศษโลหะที่แตกต่างกันนั้นย่อมส่งผลให้เกิดแรงตัดที่แตกต่างกัน ดังนั้นปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จึงควรถูกนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์กับความกลม งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษปัจจัยเพื่อใช้ในการทำนายความกลม ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ และแรงขณะตัด

1.1.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและแรงตัดพลวัต

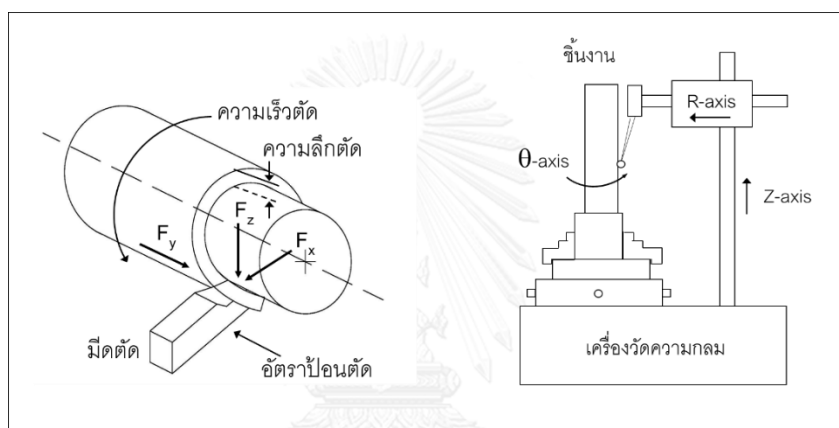
จากการทดลองเบื้องต้น รูปที่ 1.3 แสดงการวิเคราะห์แรงตัดพลวัตและความกลมของชิ้นงานตามลำดับ พบว่าแรงตัดมีลักษณะเป็นลูกคลื่น เมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้แอมพลิจูดแรงตัดมีขนาดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานและเครื่องมือตัดเกิดการสั่นสะเทือน จึงส่งผลให้ความกลมที่ตรวจสอบได้นั้นมีขนาดของแอมพลิจูดเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ แปรผันไปในทิศทางเดียวกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นน่าจะมีความสอดคล้องกับเช่นเดียวกับความกลม



รูปที่ 1.3 การวิเคราะห์แรงตัดและความกลม ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที

อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมกมีด 0.4 มม.

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [9] ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงขณะตัดที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนเส้นผ่านศูนย์กลางในกระบวนการกลึงชิ้นงานรูปทรงกระบอก พบว่าแรงรัศมี (F_x) และแรงป้อนตัด (F_y) เป็นแรงที่มีอิทธิพลต่อรูปทรงของชิ้นงาน จากรูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง และการตรวจสอบความกลมจะพบว่า แอมพลิจูดของแรงตัดรัศมี (F_x) อยู่ในทิศทางเดียวกับการตรวจสอบความกลม และเป็นแรงที่ส่งผลต่อรูปร่างความกลมของชิ้นงาน แรงป้อนตัด (F_y) เป็นแรงที่ส่งผลต่อรูปร่างของชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับการวัดความกลม

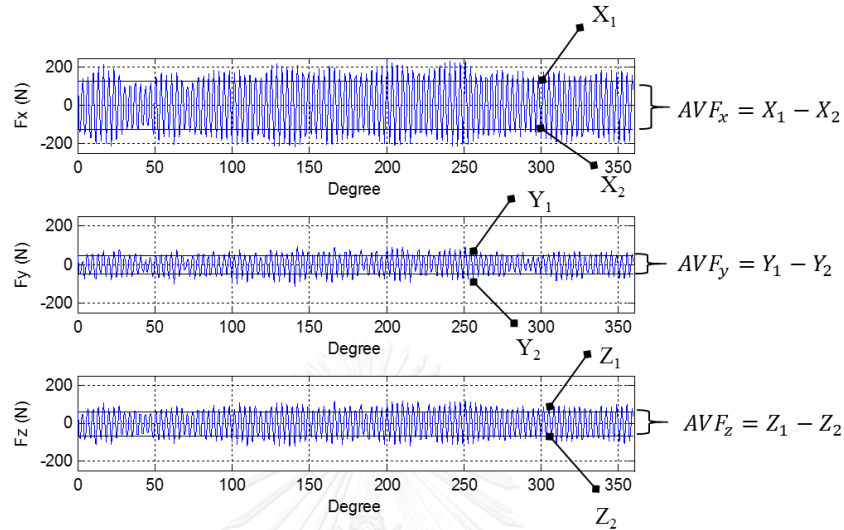


รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกระบวนการกลึง และการตรวจสอบความกลม

อย่างไรก็ตามแรงตัดพลวัตจะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขการตัด [2] เช่น ความเร็วในการหมุนชิ้นงาน ความลึกในการตัด อัตราการป้อนตัด และการเกิดเศษโลหะ เป็นต้น เมื่อเกิดการแตกหักของเศษโลหะขณะตัด จะส่งผลให้แรงพลวัตเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเศษโลหะพุ่งชนมีดตัดและชิ้นงาน จึงส่งผลให้แอมพลิจูดของแรงมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งหากนำสัญญาณแรงตัดเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักมาใช้ในการพัฒนาสมการทำนายความกลม อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการแรงตัดที่เกิดจากการแตกหักของเศษโลหะ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตในการพัฒนาสมการทำนายความกลม เพื่อที่จะช่วยในการลดอิทธิพลของการแตกหักของเศษโลหะที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 1.4 และเพื่อสามารถใช้แรงตัดพลวัตในการติดตามความกลมขณะตัดแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป จึงได้ประยุกต์ใช้อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต [2]

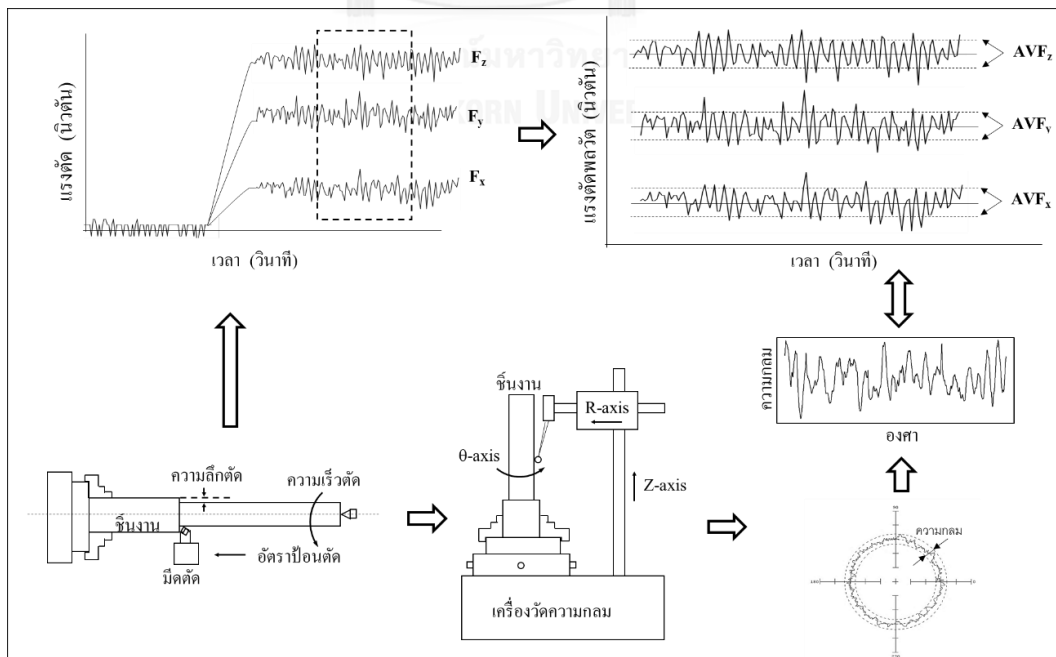
จากความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัตและความกลมที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาของการประยุกต์ใช้ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดรัศมี (AVF_x) และค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อน

ตัด (AVF_y) ในการคำนวณอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) เพื่อประมาณความกลมที่เกิดขึ้นขณะตัด โดยไม่ต้องคำนึงถึงสภาวะการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 1.5 ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อน 0.15 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุมัด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

1.1.7 แนวคิดในการทำวิจัย



รูปที่ 1.6 แนวคิดการทำวิจัย

จากแนวคิดพัฒนาเพื่อระบบการผลิตในอนาคต เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด แรงตัด และความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึง จึงได้เสนอแนวคิดในการทำวิจัย ดังรูปที่ 1.6 ไดนามิเตอร์ถูกใช้เพื่อช่วยในการตรวจวัดแรงในขณะตัดที่เกิดขึ้น ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตถูกนำมาใช้ในการคำนวณสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นเพื่อลดอิทธิพลจากสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะ โดยเลือกใช้ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดรัศมี (AVF_x) ซึ่งเป็นแรงที่ส่งผลต่อรูปร่างความกลมของชิ้นงาน และอยู่ในทิศทางเดียวกับการตรวจสอบความกลม และค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อนตัด (AVF_y) เป็นแรงที่ส่งผลต่อรูปร่างของชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับการวัดความกลม เป็นแรงที่ทำให้เกิดรูปทรงกระบอกของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามแรงตัดพลวัตจะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขการตัด [2] เช่น ความเร็วในการหมุนชิ้นงาน ความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด เป็นต้น เพื่อให้สมการทำนายความกลมที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ทำนายความกลมโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป อัตราส่วนแรงตัดถูกเสนอเพื่อกำจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัด ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนออัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดรัศมีและแรงป้อนตัด (AVF_x/AVF_y) และปัจจัยที่ส่งผลต่อความกลมของชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุ่มกมิต และมุมคายเศษโลหะในการพัฒนาสมการทำนายความกลม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความกลมชิ้นงานและแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. กระบวนการกลึงโดยการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting)
2. ทำการเก็บข้อมูลการตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY
3. วัสดุทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน S45C โดยกลึงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 40 มิลลิเมตร อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องวัดความกลม
4. เครื่องวัดความกลมยี่ห้อ TOKYO SEIMITSU CO.,LTD รุ่น ROUND COM 43C
5. ชนิดเม็ดมีดที่ใช้ในการตัดเป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide)

6. ด้ามมีดกลึง เบอร์ SDJCR2525M-11 และ PDJNR2525M-15
7. เซ็นเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121
8. ความสึกหรอของมีดตัดไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร
9. เงื่อนไขการทดลอง แสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ปัจจัยและระดับของการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ
ความเร็วตัด	100, 150 และ 200 เมตร/นาที
อัตราป้อน	0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตร/รอบ
ความลึกตัด	0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร
รัศมีจุก	0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร
มุมคายเศษโลหะ	-6 และ 11 องศา

10. โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าความแข็งของวัสดุ (Hardness) เท่ากันทั้งชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรกลอัจฉริยะในอนาคต ในการตรวจติดตามความกลมในขณะตัด
2. ลดของเสียอันเนื่องมาจากการเสียรูปของชิ้นงาน
3. เพิ่มความสามารถในการตรวจติดตามกระบวนการผลิต

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเครื่องจักรกลอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีการตรวจติดตามในงานกลึงโดยการประมาณค่าความกลมของผิวจากแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดจริง
2. สามารถนำเทคโนโลยีระบบการตรวจติดตามและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมาใช้เพื่อควบคุมคุณภาพชิ้นงาน
3. เป็นแนวทางในการลดของเสีย และการตรวจสอบคุณภาพแบบทันทีที่ทำให้สามารถลดต้นทุน เวลา และเพิ่มความสามารถในกระบวนการผลิต

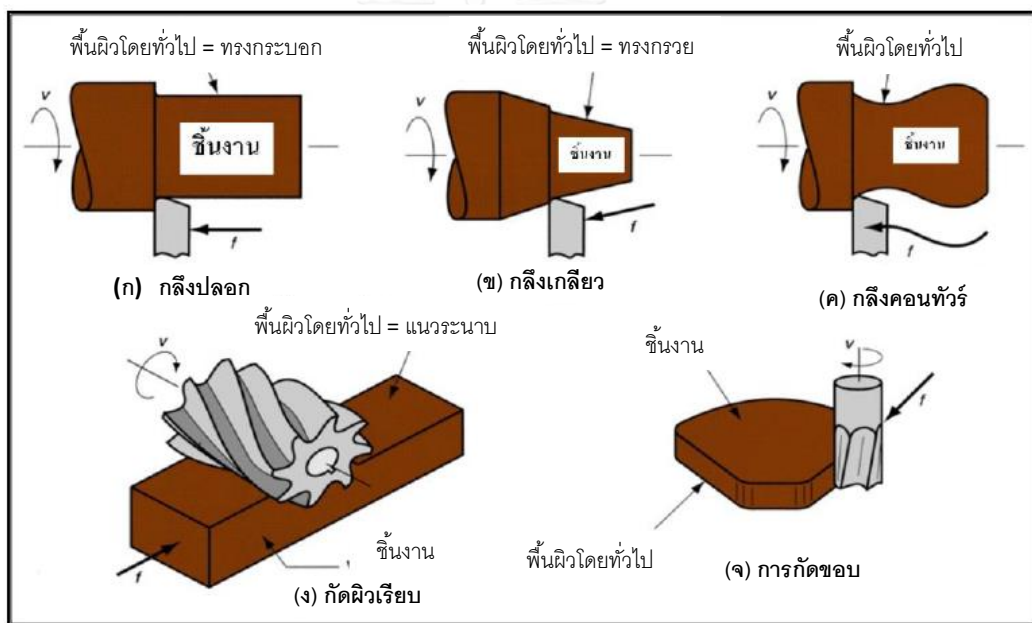
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี เครื่องขยายสัญญาณ วิธีการเก็บสัญญาณ และการแปลงข้อมูล
2. ศึกษาขั้นตอนการใช้เครื่องวัดความกลม และเงื่อนไขของกระบวนการวัด
3. ศึกษาทฤษฎีและคําค่างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
4. กำหนดเงื่อนไขในการตัดที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน
5. ออกแบบการทดลอง
6. ทำการทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาปัจจัยและวิเคราะห์ผลการตัด
7. ตรวจสอบค่าความกลมของชิ้นงาน ณ เงื่อนไขกระบวนการตัดต่างๆ
8. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ
9. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

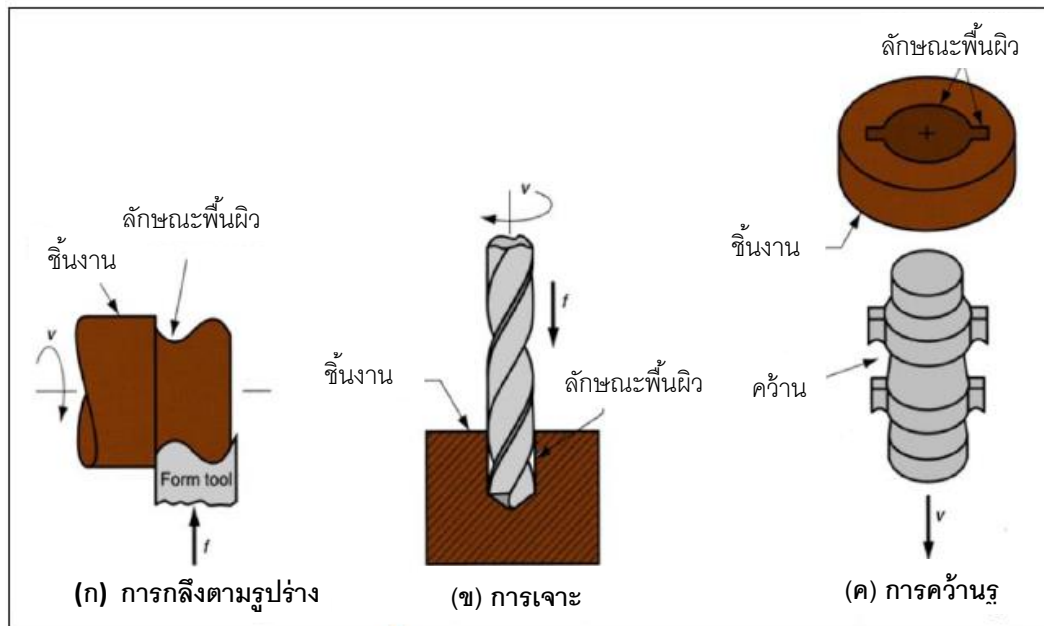
2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process)

กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process) [10] หมายถึง กระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องมือตัด (Cutting tool) ในการกำจัดเนื้อวัสดุออกเพื่อให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ เป็นกรรมวิธีการผลิตยาวนานย้อนไปถึงยุคก่อนประวัติศาสตร์ เช่น มีด หรือ ขวาน ที่ทำจากหิน เป็นต้น ซึ่งหากชิ้นงานเป็นโลหะจะเรียกว่ากระบวนการกำจัดเนื้อโลหะ (Metal Removal Process) ซึ่งเป็นการกำจัดเนื้อวัสดุออกไม่มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ โดยใช้ทั้งเครื่องมือตัดและเครื่องมือกล (Machine tool)



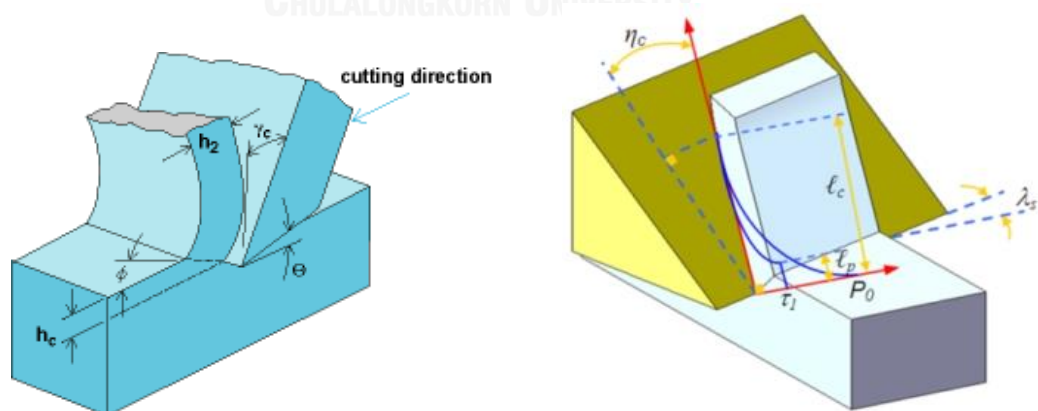
รูปที่ 2.1 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการตัด

โดยกระบวนการตัด ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ 1) การกลึง 2) การเจาะ และ 3) การกัด ส่วนกระบวนการตัดอื่นๆ นั้นประกอบไปด้วยการไส (Shaping) การไสยาว (Planing) การแทงขึ้นรูป (Broaching) และการเลื่อย (Sawing) รวมถึงกระบวนการใช้ผงขัด (Abrasive) ในการกำจัดเนื้อวัสดุออก เช่น การเจียรระไน (Grinding) [10]



รูปที่ 2.2 รูปร่างของชิ้นงานที่เกิดจากเครื่องมือตัด

นอกจากการแบ่งกระบวนการตัดตามชนิดของเครื่องมือตัดเพียงอย่างเดียวแล้ว ยังสามารถแบ่งตามลักษณะของกระบวนการตัด คือ กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) คือ กระบวนการตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุในแนวตั้งฉากกับคมตัด และกระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting) คือ กระบวนการตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุทำมุมกับคมตัด [11, 12]

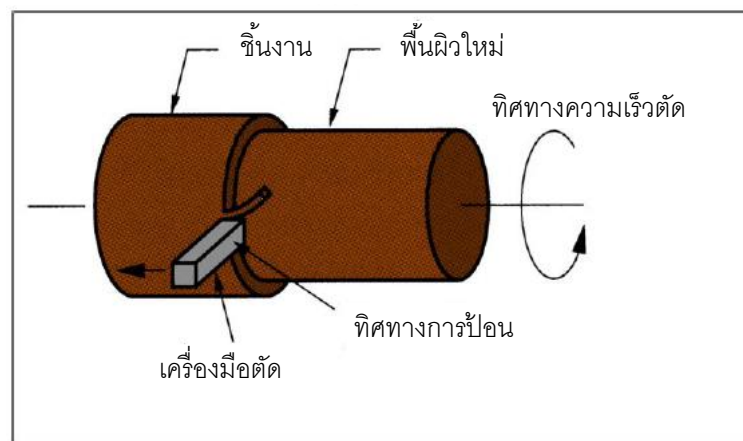


(a) กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) (b) กระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting)

รูปที่ 2.3 ลักษณะของกระบวนการตัด

2.2 กระบวนการกลึง (Turning)

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous Cut) [2, 10] โดยที่มิตัดจะเคลื่อนที่ขนานไปกับแกนหมุนและตัดผิวด้านนอกออก ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมีขนาดลดลง ตัวแปรทางเรขาคณิตที่สำคัญของกระบวนการกลึง คือ รัศมีจมูกมีดตัด (Nose radius) ด้านข้างมุมคาย (Side rake) ด้านหลังมุมคาย (Back rake) และด้านข้างของมุมตัด (Side cutting edge angle) เศษโลหะจะไหลออกมาที่หน้ามุมคาย (Rake face) ของมีดตัด ด้านข้างมุมคายจะเอียงออกจากหน้าของมุมตัด ส่วนด้านหลังมุมคายจะเอียงจากปลายของมีดตัดที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นงานที่ถูกกลึง

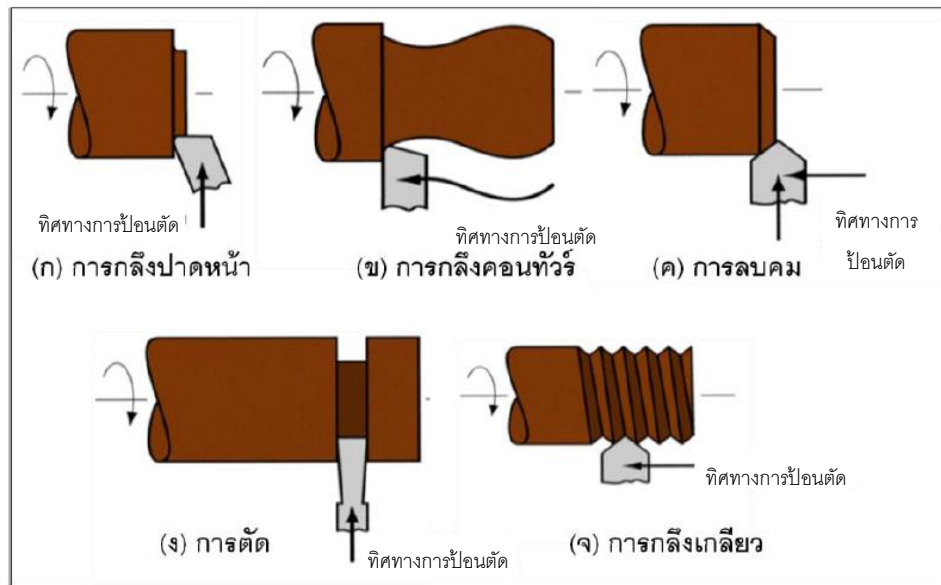


รูปที่ 2.4 กระบวนการกลึง

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการกลึง ประกอบด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้

- 1) อัตราการป้อนตัด (Feed rate) คือ อัตราเร็วของการเดินมีดในทิศทางตามแกนหมุนของชิ้นงาน หรือระยะที่ใบมีดกลึงเคลื่อนที่ไปได้ต่อการหมุนของชิ้นงาน 1 รอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ (mm/r) หรือนิ้วต่อรอบ (in/r)
- 2) ความเร็วตัด (Cutting speed) คือ ความเร็วของผิวของชิ้นงานที่ต้องทำการตัดออกเคลื่อนที่ผ่านคมมีดตัดของมีดกลึง มีหน่วยเป็นเมตรต่อนาที (m/min) หรือฟุตต่อนาที (ft/min)
- 3) ความลึกตัด (Depth of cut) คือ ความหนาของชิ้นงานที่ต้องการตัดในแนวรัศมีและตั้งฉากกันแกนการหมุนของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) หรือนิ้ว (in)

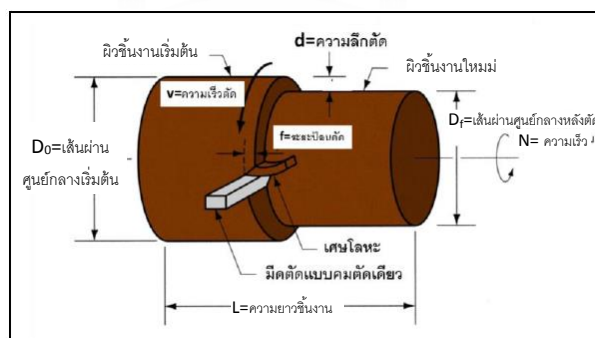
ซึ่งผลที่ได้จากการตัดก็คือ ขนาดของชิ้นงาน (Dimension) ความละเอียดของผิว (Surface roughness) เศษกลึง (Chip) และการสึกหรอของมีดกลึง (Tool wear)



รูปที่ 2.5 กระบวนการกลึงแบบต่างๆ

2.3 เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions)

เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions) [7] ประกอบไปด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed, v) อัตราการป้อนตัด (Feed rate, f) และความลึกตัด (Depth of cut, d) ซึ่งความเร็วตัดจะเป็นผลรวมของเวกเตอร์ของความเร็วก่เกิดจากการหมุน และการป้อน



รูปที่ 2.6 เงื่อนไขการตัดของกระบวนการกลึง

$$V_c = \frac{V}{\cos\theta} \tag{2.3-1}$$

โดยที่

V_c = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

V = ความเร็วผิว (เมตร/นาที)

θ = มุมระหว่างความเร็วตัดและความเร็วผิวของชิ้นงาน (องศา)

แต่ความเร็วที่เกิดขึ้นจากการป้อนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วผิวของชิ้นงาน จึงทำให้ $\cos\theta \rightarrow 1$ จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$V_c = V \quad (2.3-2)$$

และความสัมพันธ์ของความเร็วตัดและความเร็วรอบ (Spindle speed) แสดงได้ดังนี้

$$v = \frac{\pi DN_w}{1,000} \quad (2.3-3)$$

โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

N_w = ความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบ/นาที)

สำหรับอัตราการป้อนตัด เมื่อกำหนดให้มีมุมข้างคมตัด (Side cutting edge angle) เท่ากับ θ_s และกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราการป้อนตัด f สามารถคำนวณหาความหนาของเศษวัสดุก่อนตัด f_a และความกว้างของการตัด b หาได้จาก

$$f_a = f \cos\theta_s \quad (2.3-4)$$

$$b = \frac{d}{\cos\theta_s} \quad (2.3-5)$$

โดยที่ f = อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

d = ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)

ความเร็วป้อน (Feed speed) คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมีดตัด คำนวณได้จาก

$$V_f = f N_w \quad (2.3-6)$$

โดยที่ V_f = ความเร็วป้อน (มิลลิเมตร/นาที)

อัตราการกำจัดโลหะ (Metal removal rate) คือ ปริมาณของวัสดุที่ตัดต่อหน่วยเวลา สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_w = 1,000 f d V \quad (2.3-7)$$

โดยที่ Z_w = อัตราการกำจัดโลหะ (ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที)

เวลาในการตัด (Cutting time) คือ เวลาที่เครื่องมือตัดใช้ในการเคลื่อนย้ายจากจุดตำแหน่งเริ่มต้น ไปยังตำแหน่งสุดท้ายของการตัด สามารถคำนวณได้จาก

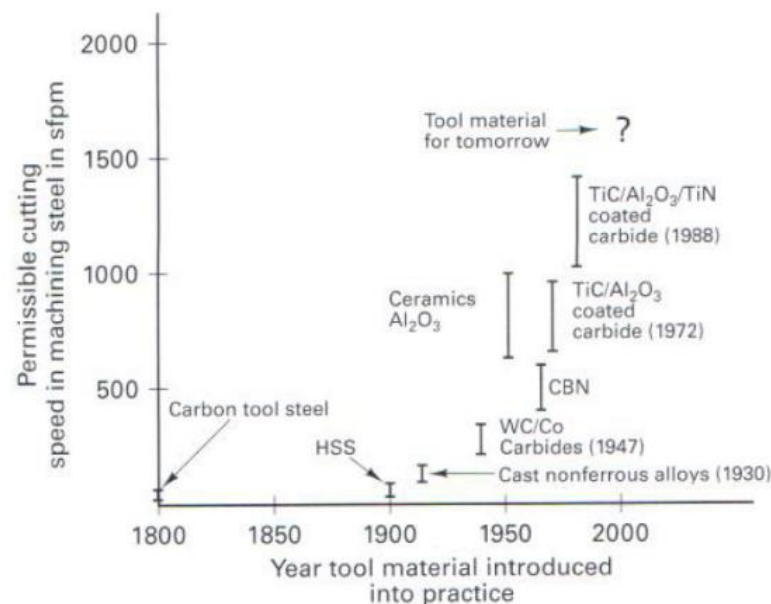
$$T_m = \frac{L}{V_t} \quad (2.3-8)$$

โดยที่ T_m = เวลาในการตัด (นาที)

L = ความยาวของส่วนที่ต้องการกลึง (มิลลิเมตร)

2.4 เครื่องมือตัด (Cutting Tool)

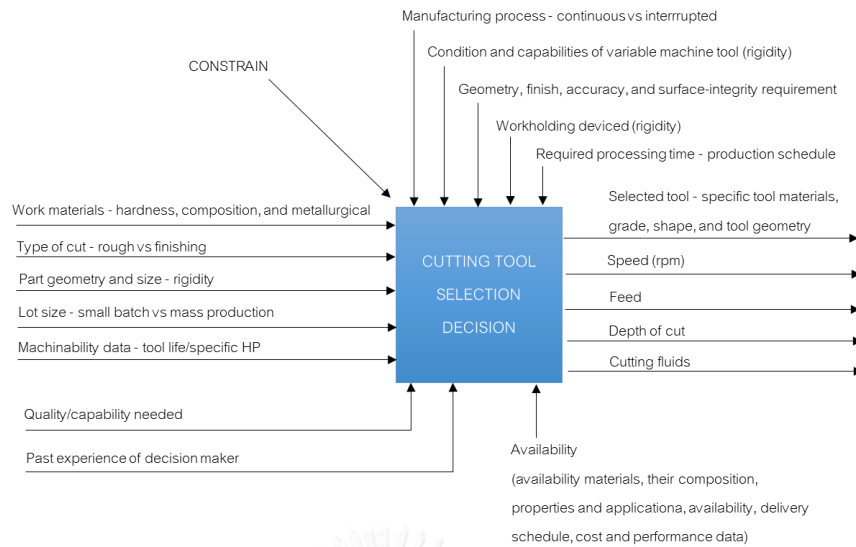
ความสำเร็จในการตัดโลหะขึ้นอยู่กับทางเลือกวัสดุของเครื่องมือตัด (Cutting Tool) [11] ไม่ว่าจะเป็นวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด หรือรูปทรงเรขาคณิต ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดมีคุณสมบัติให้เลือกใช้ที่หลากหลาย ความสามารถในการตัด และต้นทุน รูปภาพที่ 2.7 แสดงพัฒนาการของเครื่องมือตัดที่ได้รับการพัฒนาวัสดุ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้สามารถทำการตัดที่ความเร็วตัดสูงได้ ส่วนหนึ่งเพื่อการเพิ่มผลิตผล (Productivity)



รูปที่ 2.7 พัฒนาการของเครื่องมือตัด (Cutting tool)

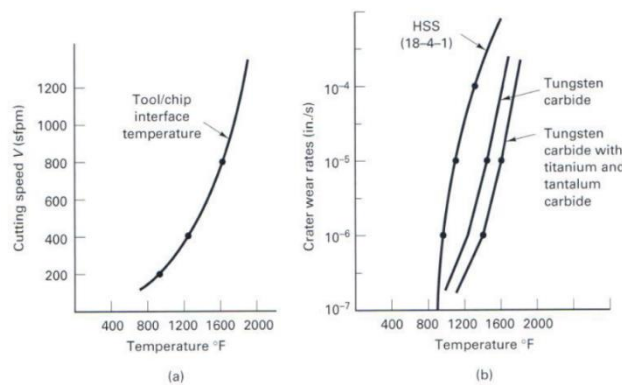
โดยในการพิจารณาเลือกเครื่องมือตัด ควรพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้

- ลักษณะของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด เช่น ความแข็ง (Hardness) องค์ประกอบทางเคมี (Chemical) และคุณสมบัติทางโลหะ (Metallurgical state)
- คุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการ เช่น รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ความแม่นยำ (Accuracy) คุณภาพผิว (Finish) ที่ต้องการ
- ลักษณะเครื่องมือตัด รวมไปถึงด้ามมีดตัด ต้องมีความแข็งแรง (Rigidity) ที่สามารถรองรับแรงเฉือนในการตัดในช่วงที่เลือกใช้งานได้
- เครื่องมือตัดที่เลือกใช้ต้องสามารถระบบสนับสนุนต่างๆ ได้ เช่น ระบบควบคุม ระบบเซ็นเซอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.8 การตัดสินใจเลือกเครื่องมือตัดภายใต้ปัจจัยต่างๆ

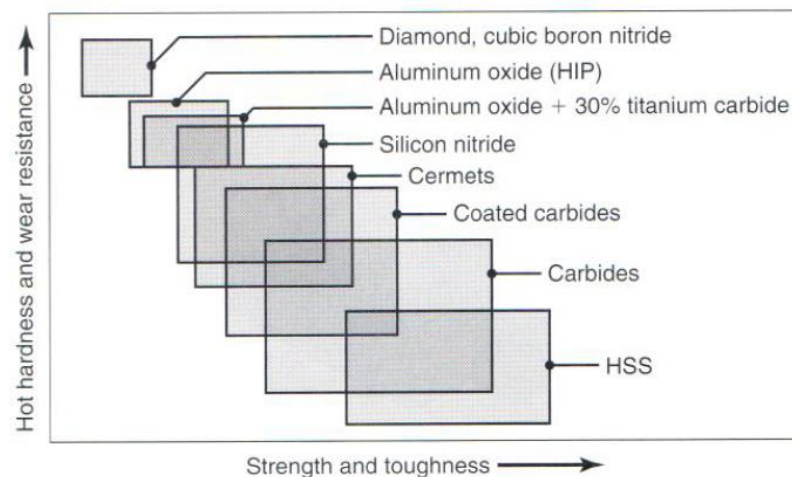
ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุเครื่องมือตัดได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (Productivity) ดังนั้นเครื่องมือตัดจึงต้องใช้ความเร็วในการตัดสูง ทำให้อุณหภูมิการตัดสูงขึ้น ส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด ในระบบกระบวนการผลิตด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ การพยากรณ์อายุของเครื่องมือตัดจะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ และต้องการการรวบรวมจากพนักงานให้น้อยที่สุด จึงต้องการเครื่องมือตัดที่มีอายุการใช้งานได้นาน และเครื่องจักรสามารถเปลี่ยนเครื่องมือตัดได้โดยอัตโนมัติเมื่อถึงอายุที่ของเครื่องมือตัดที่กำหนดไว้



- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และความเร็วตัด (Cutting speed)
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และอัตราการสึกหรอ (Crater wear rate)

รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเร็วตัด และอัตราการสึกหรอ

เครื่องมือตัดจำเป็นต้องมีความแข็งมากกว่าวัสดุชิ้นงาน จึงจะสามารถทำให้เกิดการตัดได้ แต่นอกจากความแข็งเพียงอย่างเดียวแล้ว เครื่องมือตัดต้องมีคุณสมบัติในการต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง (Hot Hardness) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear Resistance) และมีความเหนียวต้านทานต่อการแตกร้าว (Toughness) รูปทรงเลขาคณิตของมีดตัด (Tool Geometry) โดยต้องคำนึงถึงวัสดุที่ใช้ทำมีดตัด (Tool Material) แต่โดยทั่วไปแล้ว เครื่องมือตัดไม่สามารถมีคุณสมบัติครบถ้วนภายในมีดตัดชนิดเดียว [13, 14] มีดตัดที่ทำมาจาก วัสดุที่แตกต่างกัน ก็จะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน



รูปที่ 2.10 การเลือกใช้เครื่องมือตัดตามคุณสมบัติ

- 1) เหล็กกล้าคาร์บอน และ เหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steel) เป็นวัสดุที่มีราคาถูก สามารถลับคมได้ง่าย แต่มีความแข็งแรงและการต้านทานการสึกหรอต่ำ ไม่สามารถใช้ตัดที่ความเร็วรอบสูงได้ เนื่องจากไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้เพียงพอ จึงนิยมใช้ในการตัดความเร็วรอบต่ำ
- 2) เหล็กกล้าเร็ว (High-speed steel) เป็นเหล็กหล่อผสมที่ถูกพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ความเร็วรอบสูง แข็งแรง ทนทานต่อการสึกหรอ ราคาไม่แพงมาก สามารถใช้ในการตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการทนทานต่อแรงกระแทกและการแตกหักได้ดี
- 3) โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt-steel) มีความแข็งแรงสูงแม้ว่าอุณหภูมิการใช้งานสูง ทนทานต่อการสึกหรอ แต่ความเหนียวต่ำ รับแรงกระแทกได้น้อย จึงนิยมใช้ในงานตัดหยาบ

- 4) คาร์ไบด์ (Carbide or sintered carbide) มีความแข็งแรงสูง มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อการสึกหรอ นำความร้อนได้สูงและไม่แพร่ความร้อน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ
- ก. ทั้งสแตนคาร์ไบด์
 - ข. ไทเทเนียมคาร์ไบด์
- เพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกด้วยการผสมโคบอลต์ แต่ความแข็งแรงจะลดลง แต่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้โดยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม เหมาะสมกับการตัดที่ใช้ความเร็วรอบต่ำ และใช้กับการตัดแบบแห้งได้
- 5) เครื่องมือเคลือบผิว (Coated tools) เป็นการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องมือตัด เพื่อให้สามารถใช้งานที่ความเร็วรอบสูง อัตราการตัดสูง เหมาะสมกับกระบวนการผลิตที่ต้องการลดเวลาในการทำงาน และต้นทุนในการผลิต สามารถช่วยยืดอายุมีดตัด โดยทั่วไปสารเคลือบที่นิยมใช้ ได้แก่
- ก. ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เคลือบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ด้านทานอุณหภูมิสูง ความเสียดทานต่ำ สามารถใช้กับงานตัดที่มีอัตราการตัดสูง
 - ข. ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เคลือบเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ โดยจะทำการเคลือบอยู่บนทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 6) เซรามิกเคลือบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มีคุณสมบัติพิเศษคือไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เนื่องจากเป็นสารเคลือบพวกออกไซด์ สามารถทนทานต่ออุณหภูมิได้สูง ด้านทานการสึกหรอ อัตราการนำความร้อนต่ำ
- 7) เซรามิก (Ceramics) ทำมาจากอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ทนทายต่อการขัดสี ทนทานต่อความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงาน และผิวหลังการตัดมีความเรียบสูง แต่ไม่ทนต่อแรงกระแทก
- 8) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride : CBN) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากที่สุด ทนทานต่อการสึกหรอ คมตัดมีความแข็งแรงแต่เปราะ จึงไม่เหมาะสมกับการตัดที่มีการสั่นสะเทือนสูง
- 9) ซิลิกอนไนไตรด์ (SiN) เป็นมีดตัดที่มีวัสดุพื้นฐานเป็นซิลิกอน และเติมอลูมิเนียมออกไซด์ ยทเทียมออกไซด์ ไทเทเนียมไนไตรด์ลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ทำให้มีความเหนียว ด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน สามารถใช้งานที่อุณหภูมิการตัดสูงได้

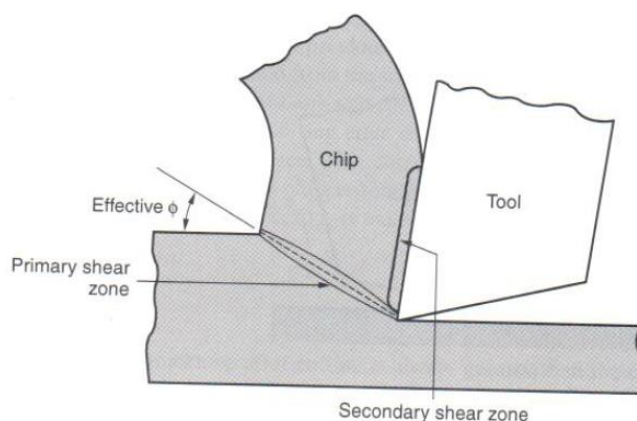
10) เพชร (Diamond) ทนทานต่อการสึกหรอ มีความเสียดทานต่ำ มาตรฐานลับคมได้ง่าย ใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง คุณภาพผิวดัดสูง



รูปที่ 2.11 เม็ดมีดกลึง

2.5 การเกิดเศษโลหะ

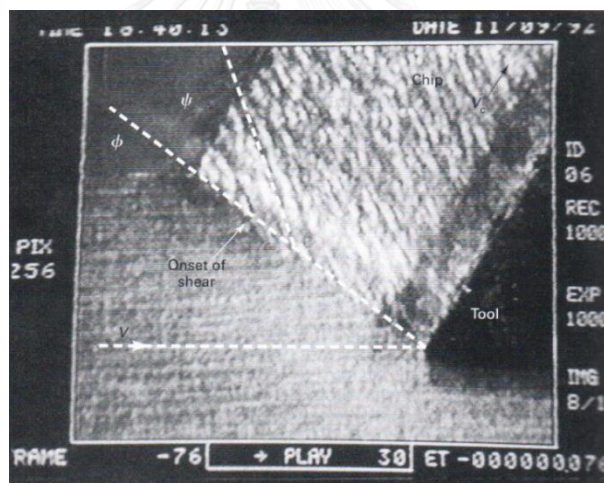
การตัดวัสดุชิ้นงาน จะรับแรงกระทำจากเครื่องมือตัดผ่านทางคมตัด [2, 15] ซึ่งจะมีผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นในหลายลักษณะ ซึ่งในกระบวนการตัดที่เกิดขึ้นจริงจะเป็นการตัดในลักษณะสามมิติ ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเกิดเศษตัดได้ยากเนื่องจากมีความซับซ้อน โดยส่วนมากจึงนิยมอธิบายลักษณะการเกิดเศษโลหะในรูปแบบสองมิติ หรือที่เรียกว่า กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting)



รูปที่ 2.12 แบบจำลองการตัด

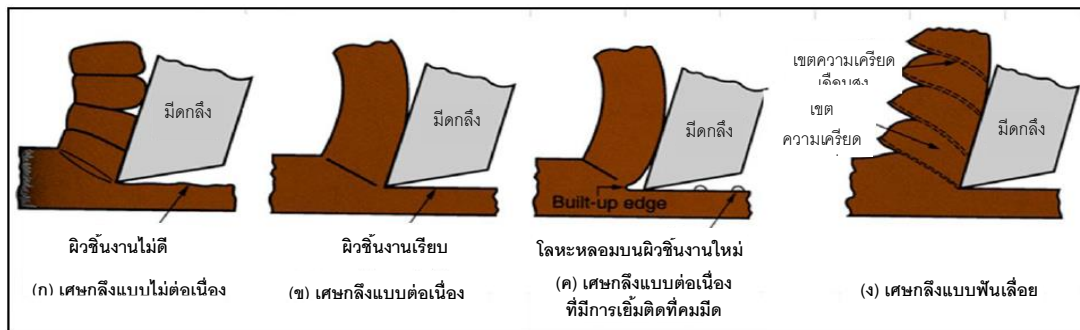
- บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่เกรนวัสดุยังไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เนื่องจากยังไม่มีแรงมากกระทำต่อเกรนของวัสดุงาน
- บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่โลหะหรือวัสดุงานเกิดการเปลี่ยนรูป เมื่อมีแรงมากกระทำกับวัสดุ แต่จะสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้ เนื่องจากยังไม่ถึงจุดคราก (Yield Point) และจุด Plastic deformation ซึ่งเป็นบริเวณที่ 3

- บริเวณที่ 3 จะเกิดความเค้นที่จุดนี้มากขึ้น และเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจนกลายเป็นเศษตัดที่บริเวณนี้ เม็ดเกรนของวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวในแนวตัดเฉือน (Shear Plan) เนื่องจากการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุที่บริเวณนี้ และความแข็งแรงจะมากขึ้น ซึ่งเรียกว่าบริเวณการเฉือน (Shear zone)
- บริเวณที่ 4 เลยจุดที่เกิดการเคลื่อนตัว (Slip) ของเกรนในแนวเฉือนที่บริเวณการเฉือนไปแล้ว โดยบริเวณนี้เกรนของวัสดุจะเคลื่อนตัวอย่างถาวร นอกจากความแข็งแรงจะมากขึ้นแล้ว ความร้อนหรืออุณหภูมิก็จะสูงขึ้นด้วย และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น
- บริเวณที่ 5 เกรนส่วนใหญ่ที่เกิดการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุกลายเป็นเศษที่ได้จากการตัดเฉือน ทำให้เกิดความแตกต่างกันด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์มากขึ้น และความแข็งแรงในเศษตัดมากขึ้น



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายถ่ายภาพกระบวนการตัด กำลังขยาย 100 เท่า

ในรูปที่ 19 แสดงรูปภาพของกระบวนการตัด กำลังขยาย 100 เท่า ด้วยการถ่ายภาพความเร็วสูงที่ความถี่การถ่ายภาพ 1,000 ภาพต่อวินาที เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการเกิดเศษโลหะ [16] จากรูปภาพแสดงให้เห็นการเริ่มเกิดมุมเฉือน ซึ่งพฤติกรรมของชิ้นงานบริเวณระนาบเฉือนจะเกิดแรงกด/แรงดึง ส่งผลให้เนื้อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น และวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร



รูปที่ 2.14 ลักษณะของการเกิดเศษโลหะ

รูปร่างของมีดตัดสามารถแสดงได้ด้วยมุม 2 มุม คือ มุมคาย (Rake angle, α) และมุมหลบ (Clearance angle) โดยมุมคายเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษกลึงโลหะ ส่วนมุมหลบจะเป็นมุมระหว่างผิวหลบ (flank face) กับผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้ว โดยในระหว่างการตัดคมตัดของมีดกลึงจะถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่แน่นอนในระยะเวลาที่ต่ำกว่าพื้นผิวของชิ้นงาน รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความลึกตัด (t_1) ในขณะที่เศษโลหะกำลังก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาของเศษโลหะจะเพิ่มขึ้นเป็น t_2 อัตราส่วนระหว่าง t_1 กับ t_2 เรียกว่า อัตราส่วนความหนาของเศษโลหะ (Chip thickness ratio, r) ซึ่งอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2.5-1 และอัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากความหนาของเศษโลหะหลังจากการตัดจะมากกว่าความหนาก่อนการตัดเสมอ

$$r = \frac{t_1}{t_2} \quad (2.5-1)$$

และความยาวของระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$l = \frac{t_1}{\sin\phi} = \frac{t_2}{\cos(\phi-\alpha)} \quad (2.5-2)$$

โดยที่

l = ความยาวระนาบเฉือน (มิลลิเมตร)

t_1 = การป้อน หรือความลึกในการตัดแล้วแต่กรณี (มิลลิเมตร)

t_2 = ความหนาของเศษโลหะ (มิลลิเมตร)

ϕ = มุมระนาบเฉือน (องศา)

α = มุมคายเศษโลหะ (องศา)

จากสมการที่ 2.5-2 จะได้

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin\phi}{\cos(\phi-\alpha)} \quad (2.5-3)$$

จากความสัมพันธ์

$$\cos(\phi - \alpha) = \cos\phi \cos\alpha + \sin\phi \sin\alpha$$

แทนค่าลงในสมการที่ 2.5-3 จะได้

$$\tan\phi = \frac{\left(\frac{t_1}{t_2}\cos\alpha\right)}{1 - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)\sin\alpha} \quad (2.5-4)$$

จากสมการที่ 2.5-1 แทนค่าลงในสมการ 2.5-4 จะได้











$$\tan\phi = \frac{r_a \cos\alpha}{1 - r_a \sin\alpha} \quad (2.5-5)$$

จากสมการที่ 2.5-5 มุมคายเศษวัสดุเป็นตัวแปรที่มีผลต่อมุมระนาบเฉือนในกรณีที่มีมุมคาย เศษวัสดุมีค่ามากขึ้นจะมีผลให้ความหนาของเศษวัสดุมีค่าลดลง และมุมระนาบเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นค่าของมุมระนาบเฉือนสามารถใช้คำนวณค่าที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง คือ พื้นที่ระนาบเฉือนได้ดังนี้

$$A_s = \frac{t_1 b}{\sin\phi} \quad (2.5-6)$$

โดยที่ A_s = พื้นที่ระนาบเฉือน (ตารางมิลลิเมตร)

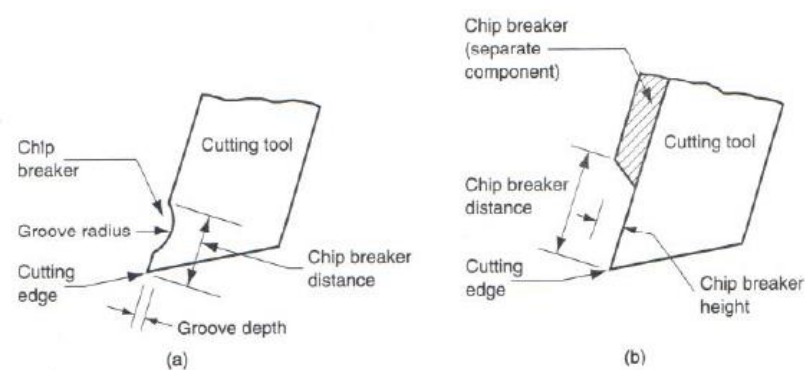
b = ความกว้างของการตัด (มิลลิเมตร)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									
ribbon chips	tangled chips	corkscrew chips	helical chips	long tubular chips	short tubular chips	spiral tubular chips	spiral chips	long comma chips	short comma chips
				good					
				acceptable					
unfavourable									

รูปที่ 2.15 ลักษณะรูปแบบของเศษโลหะ

เศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดอาจมีลักษณะได้หลายรูปแบบ เช่น ริบบิ้น (Ribbon chips) หยิกหยอย (Tangled chips) หรือแบบเกลียว (Corkscrew chips) เป็นต้น ซึ่งเศษโลหะที่เกิดขึ้นนี้มีความคม อาจเป็นอันตรายต่อพนักงานผู้ปฏิบัติงานได้ หรือเกิดขึ้นอาจเกิดการขัดสีที่

ผิวของชิ้นงาน ทำให้คุณภาพผิวจากการตัดไม่ดี และเศษโลหะอาจเกาะติดอยู่ที่มุมของปลายมีด ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเศษโลหะ ได้แก่ วัสดุของชิ้นงาน เรขาคณิตของมีดตัด สารหล่อเย็น การเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของเครื่องกลึง และเงื่อนไขการตัด แต่เศษโลหะที่เกิดขึ้นนี้ สามารถบังคับให้เกิดการแตกหักได้โดย ตัวหักเศษโลหะ (Chip breaker) [11, 15] ซึ่งจะอยู่บนมุมคายของมีดตัด โดยวางตัวขวางกับทิศทางการไหลของเศษโลหะ เพื่อบังคับให้เศษโลหะเกิดการโค้งงอ เกิดความเค้นดึงในเศษโลหะและเกิดการแตกหัก



รูปที่ 2.16 ชนิดของตัวหักเศษโลหะ (a) Grooved type (b) Obstruction-type

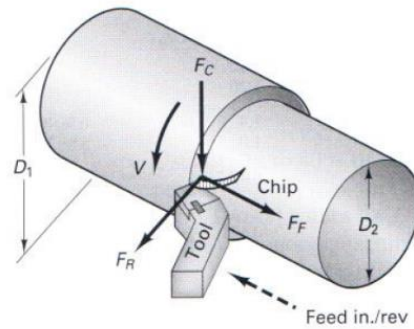


รูปที่ 2.17 ตัวอย่างตัวหักเศษโลหะ

2.6 แรงในการตัด

2.6.1 แรงบนคมตัด [17]

แรงบนคมตัด หมายถึง แรงที่กระทำบนเครื่องมือตัด หากทำการวิเคราะห์เพียง 2 มิติ โดยใช้แบบจำลองของการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) จะพบว่า มีแรงลัพธ์ (Resultant force) ซึ่งเมื่อแยกออกมาจะพบว่าเป็นแรงที่มีทิศทางขนานกับความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัด (Cutting force) และแรงในทิศทางขนานกับการป้อน เรียกว่า แรงป้อน (Feed force)



รูปที่ 2.18 ระบบแรงบนคมตัด

จากรูปภาพที่ 24 จะได้ความสัมพันธ์

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad (2.6-1)$$

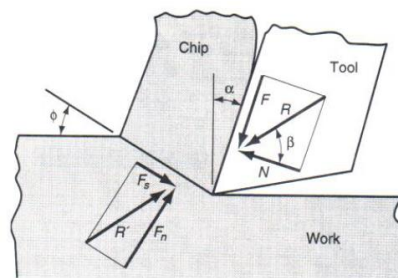
$$\gamma = \tan^{-1} \frac{F_f}{F_c} \quad (2.6-2)$$

โดยที่

- R = แรงลัพธ์
- F_c = แรงตัด
- F_f = แรงป้อน

2.6.2 แรงเสียดทาน

เมื่อเริ่มการกระบวนการตัด เศษวัสดุจากการตัดจะเคลื่อนที่ผ่านผิวคายเศษวัสดุของเครื่องมือตัด ทำให้เกิดแรงเสียดทาน (Friction force) กดบนผิวคายเศษวัสดุของเครื่องมือตัด เรียกว่า แรงกดบนผิวคายเศษวัสดุ (Normal force on force) ซึ่งสามารถคำนวณสัมพันธ์กับความเสียดทานระหว่างเศษวัสดุและผิวคายเศษวัสดุได้ เมื่อกำหนดให้ β คือ มุมเสียดทาน (Friction angle)



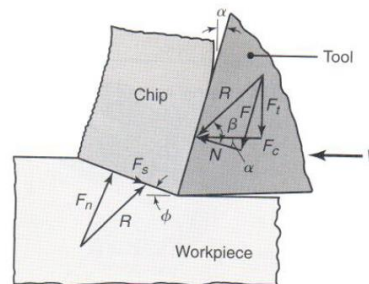
รูปที่ 2.19 ระบบแรงเสียดทาน

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\beta \quad (2.6-3)$$

โดยที่ μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
 F = แรงเสียดทาน (นิวตัน)
 N = แรงกดบนผิวคายเศษวัสดุ (นิวตัน)
 β = มุมเสียดทาน (องศา)

2.6.3 แรงเฉือน

แรงเฉือน หมายถึง แรงที่กระทำบนระนาบเฉือน เป็นแรงที่ทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบถาวรกลายเป็นเศษวัสดุ [18] โดยกำหนดให้ F_s คือ แรงเฉือน (Shear force)



รูปที่ 2.20 ระบบของแรงเฉือน

และ F_n คือ แรงกดบนระนาบเฉือน (Normal force on shear plane)

$$R = \sqrt{F_s^2 + F_n^2} \quad (2.6-4)$$

2.7 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงของการตัด

สามารถใช้รูปหลายเหลี่ยมมาช่วยในการคำนวณแรงตัดได้ โดยการกำหนดเวกเตอร์ของแรง และผลบวกของแรงทั้งสองคือ แรงลัพธ์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้แรงลัพธ์เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมจากนั้นลากเส้นต่อจากผิวคายเศษวัสดุตัดกับวงกลม จะได้แรงเสียดทานและแรงกดผิวคายเศษวัสดุ

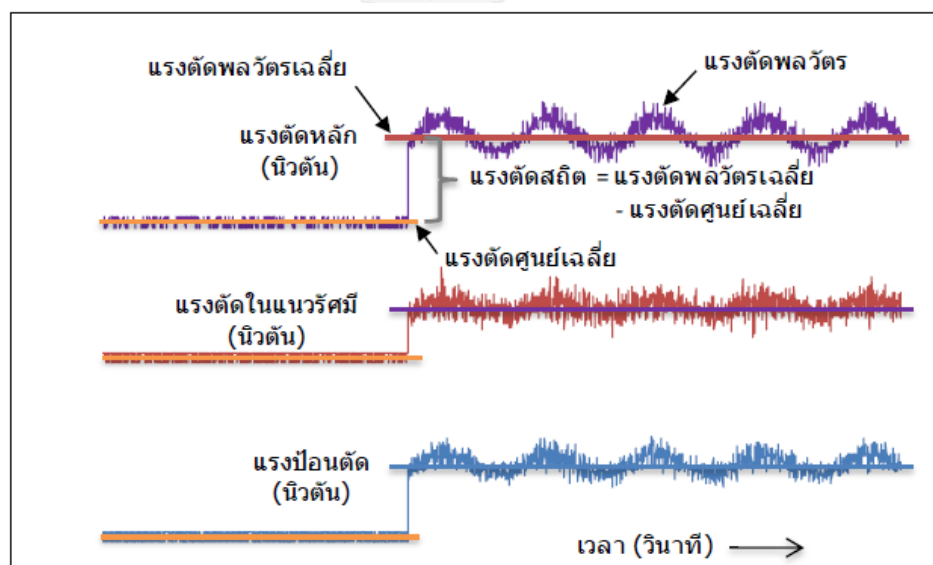
ขั้นตอนที่ 2 คำนวณมุมระนาบเฉือน (ϕ) จากนั้นกำหนดมุมลงในรูปจากจุดตัดของมุมนี้กับวงกลม จะได้แรงเฉือนและแรงกดบนระนาบเฉือน

จากรูปที่ 2.22 แรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แรง [19] ได้แก่

- 1) แรงตัดในแนวรัศมี เรียกว่า แรงรุนหรือแรงรัศมี (Radius force : F_x)
- 2) แรงในทิศทางขนานกับการป้อน เรียกว่า แรงป้อนตัด (Feed force : F_y)
- 3) แรงในทิศทางขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัดหลัก (Main force : F_z)

โดยในการวิเคราะห์แรงตัด [20] จะใช้เครื่องไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ในการวัดแรงตัดที่เกิดขึ้น และใช้แอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ในการขยายสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยแรงตัดในเบื้องต้นจะอยู่ในรูปของสัญญาณแรงตัดซึ่งเป็นแบบอนาล็อกดังรูปที่ 2.23 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ

- แรงตัดศูนย์ คือ แรงที่ยังไม่เกิดการตัดจริง ซึ่งเกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ของอุปกรณ์
- แรงตัดพลวัต (Dynamic force) คือ แรงที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการตัด
- แรงตัดสถิต (Static force) คือ แรงตัดเฉลี่ยที่กำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยเกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัต และค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์

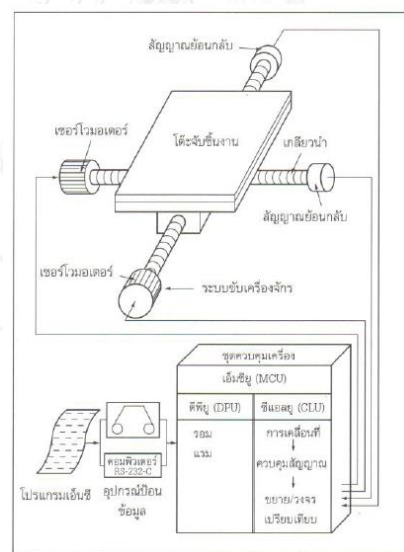


รูปที่ 2.23 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น

2.9 ประวัติและวิวัฒนาการของเทคโนโลยีซีเอ็นซี

ระบบควบคุมเครื่องจักรกลด้วยคอมพิวเตอร์หรือซีเอ็นซี (Computer Numerical Control : CNC) [21] เป็นระบบที่พัฒนามาจากระบบควบคุมด้วยตัวเลขหรือเอ็นซี (Numerical Control : NC) ซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่ระบบซีเอ็นซีจะใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการควบคุมการทำงานของเครื่องจักร เก็บข้อมูล หรือช่วยในการป้อนข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขโปรแกรม โดยสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ในช่วงแรกเทคโนโลยีซีเอ็นซียังไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากถูกโรงงานอุตสาหกรรมและคนงานต่อต้านเทคโนโลยีใหม่ เนื่องจากเป็นการปฏิบัติอุตสาหกรรมในยุคนั้น จึงเป็นการเพิ่มความหวาดกลัวให้แก่คนงาน ทำให้ขาดความมั่นใจในการทำงาน

ต่อมาวิวัฒนาการและความก้าวหน้า โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้มีความรวดเร็วและความแม่นยำมากขึ้น จึงได้นำเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกล กลายเป็นระบบซีเอ็นซี [21] ซึ่งระบบซีเอ็นซีมีส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบซีเอ็นซี

- 1) ส่วนที่เป็นโปรแกรมสั่งงาน (Part program) คำสั่งในระบบซีเอ็นซีมีลักษณะเป็นแถวที่เขียนไว้ในแบบของตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์ เพื่อใช้เป็นคำสั่งในการเคลื่อนที่เครื่องมือตัดบนเครื่องจักรซีเอ็นซี
- 2) ส่วนที่ใช้ในการป้อนข้อมูลของโปรแกรม (Program input device) เป็นซอฟต์แวร์ (Software) ในการป้อนโปรแกรมเพื่อเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์

- 3) หน่วยควบคุมการทำงานของเครื่องจักร (Machine control unit) หน่วยควบคุมการทำงานของเครื่องจักร ทำหน้าที่ในการแปลคำสั่งจากส่วนป้อนข้อมูลของโปรแกรม ไปเป็นสัญญาณควบคุมการขับเคลื่อนเครื่องจักรซีเอ็นซี
- 4) ส่วนที่เป็นระบบควบคุมการขับเคลื่อน (Drive system)
- 5) เครื่องจักรกล (Machine tool) ระบบการควบคุมมี 2 ลักษณะ คือ
 - ก. แบบวงรอบเปิด เป็นระบบการควบคุมที่ไม่มีการตรวจสอบสัญญาณย้อนกลับ (Feedback system) ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าสัญญาณที่ส่งมานั้นได้ทำแล้วหรือไม่ หรือมีข้อผิดพลาดอย่างไร
 - ข. แบบวงรอบปิด เป็นระบบที่มีการตรวจสอบสัญญาณย้อนกลับ

ข้อดีของระบบซีเอ็นซี

- มีความเที่ยงตรงสูง
- ลดระยะเวลาในการผลิต
- ช่วยลดต้นทุนในการผลิต
- ลดจำนวนเครื่องมือ และอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน
- พนักงานที่ปฏิบัติงานกับเครื่องจักร ไม่จำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีทักษะสูง ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่าย
- การตรวจสอบคุณภาพสามารถทำได้โดยง่าย
- มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง สามารถปรับเปลี่ยนโปรแกรมได้ง่าย
- ลดระยะเวลาในการปรับตั้งและเปลี่ยนเครื่องมือ
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน

ข้อจำกัด

- เครื่องจักรในระบบซีเอ็นซีมีราคาสูง
- การบำรุงรักษายุ่งยาก และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง
- จำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีทักษะสูงในการเขียนโปรแกรม

โดยในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีซีเอ็นซีมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหลายชนิด โดยทั่วไปซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์มีอยู่ 2 ชนิด คือ

- ชนิดเพลาตั้ง (Vertical Machining Center spindle, VMCs) การจัดยึดคมตัดอยู่ในแนวตั้ง สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 แนวแกน คือ แกน X แกน Y แกน Z และใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการทำงาน

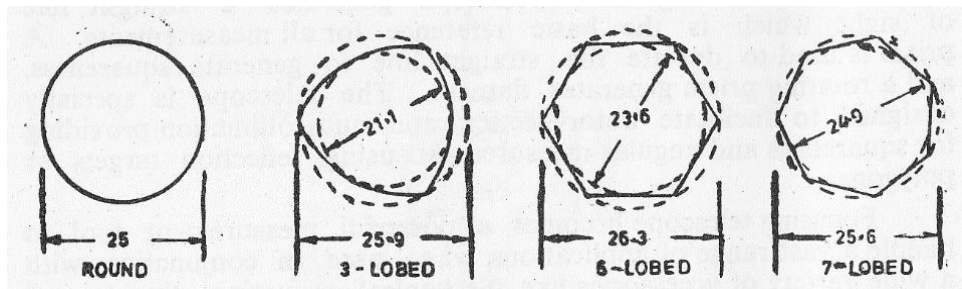
- ชนิดเพลานอน (Horizontal Machining Center spindle, HMCs) ตำแหน่งการจับยึดคมตัดอยู่ในแนวนอน [22] ใต้งานสามารถหมุนได้ 360 องศาสำหรับการเคลื่อนที่เป็นวงกลม สามารถทำงานได้หลายด้านในการยึดจับเพียงครั้งเดียว และสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบยืดหยุ่นได้ 4 แนวแกน คือ แกน X แกน Y แกน Z และแกน B



รูปที่ 2.25 เครื่องกลึงซีเอ็นซี

2.10 ความกลม (Roundness)

ในการประกอบชิ้นส่วนวงกลมหรือทรงกระบอก หากนำชิ้นส่วนมาทำการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 จุด ที่อยู่ตรงข้ามกันด้วยเครื่องมืออย่างเช่น ไมโครมิเตอร์ จะพบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละมุมที่ทำการวัดมีขนาดไม่เท่ากัน อันมีสาเหตุมาจากความกลมที่ไม่สมบูรณ์ [23] นั่นแสดงให้เห็นว่าการควบคุมเพียงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเพียงอย่างเดียว นั้นไม่เพียงพอ แต่ต้องพิจารณาความถูกต้องทางรูปทรงเรขาคณิตด้วย โดยการตรวจสอบข้อผิดพลาดโดยการหมุนชิ้นงานไปรอบๆ เพื่อหาความเบี่ยงเบนของชิ้นงาน

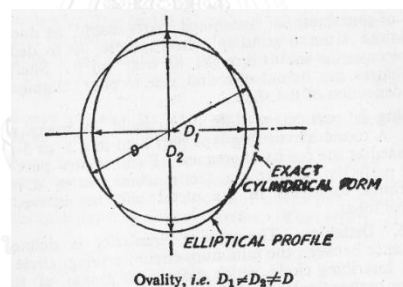


รูปที่ 2.26 ความเบี่ยงเบนของรูปทรงเลขาคณิต

โดยความเบี่ยงเบนของความกลมที่เกิดขึ้นนี้อาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่น การจับยึดชิ้นงาน ความเยื้องศูนย์ของเครื่องจักร สิ่งสกปรกหรือเศษโลหะที่ตกค้างอยู่บริเวณที่ยึดจับชิ้นงาน ความไม่สมดุลของเครื่องจักร ความร้อน การสั่นสะเทือน และโค้งงอชิ้นงานเมื่อถูกเครื่องมือตัดกระทำขณะผลิต เป็นต้น

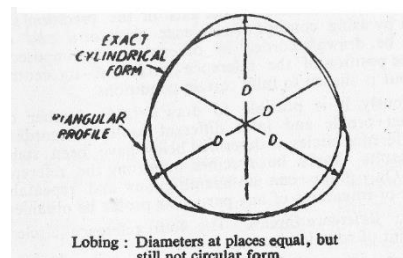
ความผิดปกติของความกลมที่สามารถพบได้โดยทั่วไป มีดังต่อไปนี้

- ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำการวัดจุดที่อยู่ตรงข้ามกันของวงกลม หรือทรงกระบอก โดยลากผ่านจุดศูนย์กลางของวงกลมแต่ละตำแหน่งมีขนาดไม่เท่ากัน



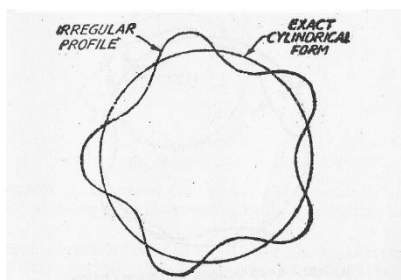
รูปที่ 2.27 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการวัดแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน

- ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำการวัดสองจุดตรงข้ามกันโดยลากผ่านจุดศูนย์กลางของวงกลมแต่ละตำแหน่งมีขนาดเท่ากัน แต่ไม่ได้รูปทรงแบบวงกลม



รูปที่ 2.28 รูปแบบชิ้นงานที่ไม่ได้รูปทรงวงกลม

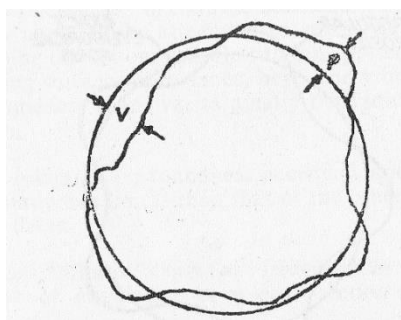
○ ความผิดปกติที่ไม่มีรูปแบบเฉพาะเจาะจง



รูปที่ 2.29 รูปแบบชิ้นงานที่ไม่เฉพาะเจาะจง

ในกระบวนการผลิตที่ต้องการความละเอียดสูง ความกลมของชิ้นงานส่งผลโดยตรงต่อการประกอบ ในชิ้นส่วนที่มีการหมุนความกลมส่งผลกระทบทำให้เกิดเสียง การสั่นสะเทือน และส่งผลกระทบโดยตรงต่อจุดศูนย์กลางในการหมุนของชิ้นส่วนของเครื่องจักร ในชิ้นส่วนที่ต้องมีการเคลื่อนที่ ความกลมส่งผลต่อการเสียดสี และการสึกหรอของชิ้นส่วนได้ การวัดค่าความกลมมี 4 วิธี แบ่งตามลักษณะการอ้างอิงจากวงกลมในอุดมคติที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

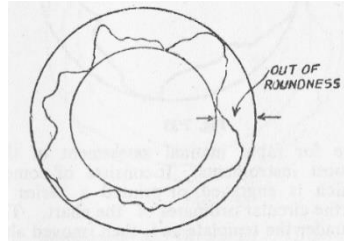
- 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด (Least square circle : LSC) คือ ผลรวมของกำลังสองของระยะรัศมี ที่ทำการวัดระยะห่างของมุมเท่าๆ กัน แล้วทำให้เกิดวงกลมในอุดมคติที่ดีที่สุด จุดศูนย์กลางของวงกลมดังกล่าวจะเรียกว่า Least square center (L.S.C.) ความคลาดเคลื่อนของความกลมจะสามารถหาได้จากระยะห่างมากที่สุดของผิว (Peak : P) ที่อยู่นอกวงกลมในอุดมคติที่เกิดขึ้น บวกกับระยะน้อยสุดของผิว (Valley : V) ที่อยู่ในวงกลมในอุดมคติที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.30 การหาความกลมด้วยวิธีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด

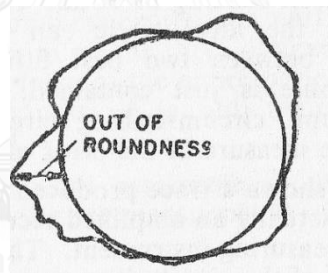
- 2) วงกลมพื้นที่น้อยสุด (Minimum zone circle : MZC) วิธีการนี้เป็นการหาวงกลม 2 วง ที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยประกอบด้วยวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่

สุด และเล็กที่สุดเมื่อเทียบจากผิวของชิ้นงาน และค่าความกลมที่ได้คือความแตกต่างระหว่างวงกลมใหญ่สุด และเล็กสุด



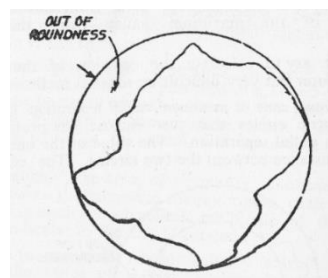
รูปที่ 2.31 การหาความกลมด้วยวิธีการวงกลมพื้นที่น้อยสุด

- 3) วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด (Maximum inscribed circle : MIC) วิธีการนี้เป็นการสร้างวงกลมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถวาดภายในผิวของชิ้นงาน จุดศูนย์กลางและรัศมีสามารถหาได้โดยการลองผิดลองถูก (Trial and error) ค่าความกลมของวิธีการนี้คือระยะของผิวชิ้นงานที่สูงที่สุด (Peak : P) ผิวงกลม ซึ่งวิธีการนี้ ระยะที่น้อยสุดของผิว (Valley : V) มีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง



รูปที่ 2.32 การหาความกลมด้วยวิธีวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด

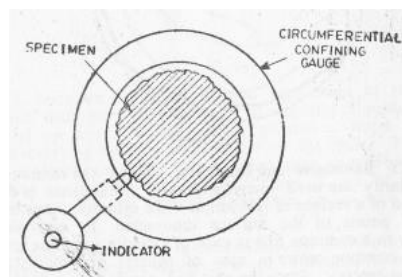
- 4) วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด (Minimum circumscribed circle : MCC) วิธีการนี้เป็นการสร้างวงกลมที่เล็กที่สุดที่สามารถวาดภายในผิวของชิ้นงาน ค่าความกลมของวิธีการนี้คือระยะที่น้อยสุดของผิว (Valley : V) และระยะของผิวชิ้นงานที่สูงที่สุด (Peak : P) ของวิธีการนี้มีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง



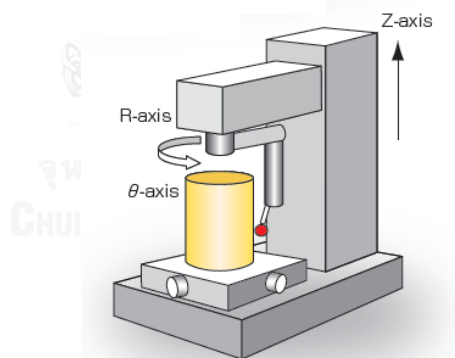
รูปที่ 2.33 แสดงการวัดความกลมด้วยวิธีวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด

วิธีการในการวัดความกลม

- 1) Diametral Method วิธีการนี้เป็นวิธีการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายๆ จุด โดยทำการวัดจุดที่อยู่ตรงข้าม 180 องศา วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพหรือค่าความกลมที่ไม่น่าเชื่อถือ
- 2) Circumferential Confining Gauge วิธีการวัดความกลมแบบนี้ เป็นการหมุนเครื่องมือวัดรอบชิ้นงานที่ทำการวัด [24] โดยระยะห่างระหว่างเครื่องมือวัดและชิ้นงานมีความสำคัญต่อความน่าเชื่อถือ แต่วิธีการนี้ไม่สามารถใช้ในการวัดความร่วมศูนย์ (Concentricity) ความเรียบ (Flatness) ได้

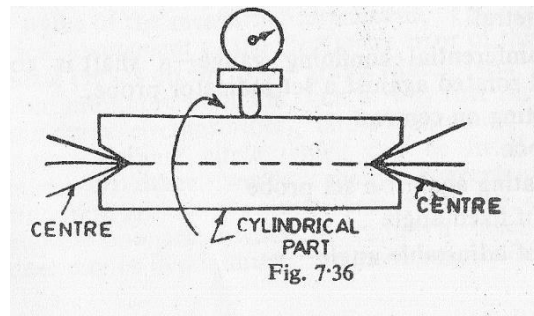


รูปที่ 2.34 การวัดความกลมแบบ Circumferential Confining Gauge

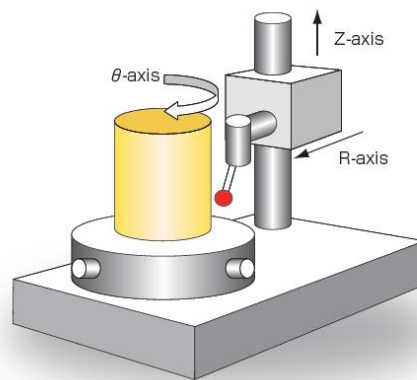


รูปที่ 2.35 ตัวอย่างเครื่องมือวัดความกลม Detector rotating type

- 3) Rotating on centers ตัวอย่างของชิ้นงานที่นิยมใช้วิธีนี้ในการวัด ได้แก่ เพลา เป็นต้น เพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าความกลมขณะหมุนอยู่บนศูนย์ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากความเยื้องศูนย์กลางของตัววัดชิ้นงาน ความได้ระนาบของชิ้นงาน

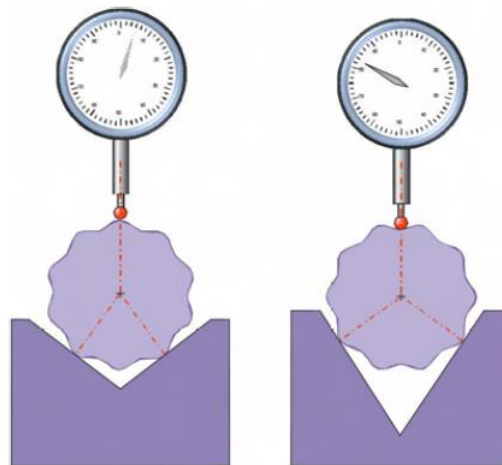


รูปที่ 2.36 การวัดชิ้นงานแบบ Rotating on centers



รูปที่ 2.37 ตัวอย่างเครื่องวัดค่าความกลมแบบ Table rotating type [24]

- 4) Assessment using a V-block วิธีการนี้จะวาง V-block ไว้บนพื้นเรียบ หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ต้องการวัดมาวางบน V-block อีกทีหนึ่ง ยึดเครื่องมือวัดไว้กับที่ หลังจากนั้นหมุนชิ้นงานไปโดยรอบจนครบ 360 องศา โดยที่มุมของ V-block 60 องศา หรือ 90 องศา ให้ผลการวัดเช่นเดียวกัน [25]



รูปที่ 2.38 การวัดความกลมแบบโดยใช้ V-block

2.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในกรณีที่ต้องการศึกษาค่าเฉลี่ยของประชากร 2 ชุด แต่ต้องการทดลองเพียงครั้งเดียว สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) [26] โดยอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง หรือคุณลักษณะทางคุณภาพ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained Variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัย หรือวิธีการปฏิบัติที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between group variation)
- 2) ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained Variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากขาดความรู้ ซึ่งบางครั้งเกิดจากผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงในรูปความผิดพลาดที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error residual) หากผู้ทำการทดลองมีความรู้ความสามารถมากขึ้น ความผิดพลาดในส่วนนี้จะลดลง

2.12 การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression)

รูปแบบของสมการความถดถอยเชิงพหุคูณ

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) [26] เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม 1 ตัว ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณนั้นจะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามว่ามีลักษณะความสัมพันธ์กันเช่นใด สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ จะต้องหาสมการถดถอยเพื่อใช้ในการพยากรณ์ของตัวแปรตาม (Y) และหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานรวมทั้งหาค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เป็นไปได้สูงสุดระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม รูปแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว มีรูปแบบดังสมการที่ 2.12-1

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_x x_x + e \quad (2.12-1)$$

พารามิเตอร์ $\beta_j, j = 0, 1, \dots, k$ ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้แสดงระนาบแบบระนาบเกิน (Hyper plane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย $\{x_j\}$ พารามิเตอร์ β_j แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือ $x_i (i \neq j)$ มีค่าคงตัว

สมมติฐานหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ

- 1) ความคลาดเคลื่อน เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
- 2) ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ นั่นคือ $E(e) = 0$
- 3) ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า $v(e) = \sigma_e^2$
- 4) e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน ; ($i \neq j$) นั่นคือ covariance (e_i, e_j) = 0

2.13 การวิเคราะห์ผล

การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

การสรุปผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่ง คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธ หรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดย P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value จะแสดงถึงค่าที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถข้อสรุปผล การทดลองที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นค่าที่น้อยที่สุด ของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0

โดยปกติ แล้วค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ทดลองก็จะสามารถทราบว่าข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่ายิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากค่าค่าสัมประสิทธิ์ ในการตัดสินใจมีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมี

ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จึงนิยมใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R_{adj}^2) แทน [27]

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Tangjitsitcharoen [5] งานวิจัยฉบับนี้อธิบายเกี่ยวกับ การพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานในขณะตัดจริงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด รัศมีจุมกมิต ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงสถิต โดยใช้ ไดนามิเตอร์ในการตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด และใช้สมการถดถอยพหุคูณเพื่อแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีวัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานในขณะตัด เพื่อลดของเสียที่อาจเกิดขึ้นและลดต้นทุนการผลิตได้

จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนแรงตัด รัศมีจุมกมิต และความเร็วในการตัดสูงขึ้น ค่าความขรุขระของผิวที่ได้จะมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราป้อนตัดและความลึกตัดมากขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระของผิวที่ได้จะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการสั่นสะเทือนของมีดตัด และเพื่อพิจารณาความขรุขระที่ได้จากสมการที่ถูกสร้างขึ้นจากการทดลอง พบว่าค่าความแม่นยำความขรุขระของผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 87.3% และความขรุขระสูงสุดอยู่ที่ 86.5% จึงสามารถสรุปได้ว่า สมการความขรุขระสามารถนำไปใช้งานได้จริงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

L. Rico, A. Naranjo, S. Noriega, E. Matertinez, L. Vidal [6] งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการกลึง ที่มีผลต่อความกลมของชิ้นงานทรงกระบอกเหล็กกล้า 1018 Steel โดยใช้พารามิเตอร์ในการตัด คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด โดยใช้เทคนิคการนำเสนอข้อมูลแบบพื้นที่ผิวตอบสนองและการออกแบบการทดลอง พบว่าความเร็วตัดส่งผลกระทบต่อความกลมอย่างมีนัยสำคัญ และมีอันตรกิริยาของความเร็วตัดและอัตราป้อนที่มีผลต่อความกลมของชิ้นงาน

Azmi Mohamed, Abdul Halim Esa, Muhammad Azmi Ayub [7] งานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องวัดความกลมโดยการวัดจากค่าสายตามอง (A vision base inspection system) โดยใช้การวิเคราะห์การวัดความกลมแบบวงกลมพื้นที่น้อยสุด (Minimum zone circle : MZC) โดยการถ่ายภาพประมวลผล โดยการใช้อ่านพิกเซล หรือ พิกเซล (Pixel) ของภาพถ่ายเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง และคำนวณหาความกลม มีข้อดีตรงที่ไม่มีเครื่องมือใด

สัมพันธ์กับชิ้นงาน มีความถูกต้องแม่นยำสูง และสามารถนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือตรวจติดตามการวัดความกลมในกระบวนการได้

H. Saglam, F. Unsacar & Yaldiz [8] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความขรุขระของผิวชิ้นงานบนเครื่องเจียรระโน (Grinding) กับพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการกัดชิ้นงาน โดยกำหนดพารามิเตอร์ ได้แก่ ความลึกตัด ความเร็วตัด และอัตราการป้อน และแรงสถิต (Static force) ที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ตัดบนเครื่องเจียรระโนโดยใช้เซ็นเซอร์วัดแรงตัดวัดแรงที่แท้จริง โดยใช้ตารางแนวฉาก (Orthogonal arrays : OAs) เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยหลายปัจจัย และใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของความกลม และความขรุขระของผิวที่พารามิเตอร์ต่างๆ จากการทำการทดลองพบว่า การควบคุมความกลมและความขรุขระผิวของชิ้นงานนั้นควรทำการควบคุมที่ความเร็วตัด และความลึกตัด

S. Tangjititsitcharoen, P. Tangpornprasert, Ch. Virulsri, N.Rojanarowan [28] งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบตรวจติดตาม และควบคุมตำแหน่งของเพลลาและแหวนในการประกอบชิ้นส่วนของมอเตอร์ฮาร์ดดิสก์ด้วยพิสัยความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $\pm 2.5 \mu\text{m}$ โดยการสร้างเครื่องตรวจจับความชัน ที่ถูกออกแบบและพัฒนาเพื่อตรวจวัดและหาอนุพันธ์ของแรงกดในขณะทำงาน โดยการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงเป็นตัวชี้วัดในการควบคุมการทำงานของเครื่องจักร และเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง โดยการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อทำการตรวจวัดแรงกดขณะทำการประกอบ ซึ่งเครื่องที่ได้รับการออกแบบพัฒนานี้สามารถช่วยลดปัญหาเพลลาสูงได้

T.Moriwaki, T. Shibasaka, T. Somkiat [29] เป็นงานวิจัยที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตรวจติดตามการสึกหรอของมีดตัด ในระหว่างกระบวนการกลึงสำหรับเครื่องซีเอ็นซี โดยการใช้สมการฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล มาช่วยในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการตัดเฉพาะและอัตราส่วนป้อนตัด ค่าดัชนี a ในฟังก์ชันถูกกำหนดเป็นตัวชี้วัดการสึกหรอของมีดตัด โดยมีค่าเทียบเท่ากับอัตราส่วนความต้านทานการตัดเฉพาะ ที่อัตราการป้อนตัดศูนย์และอนันต์ เพื่อคำนวณหาค่าของ a ได้แทรกคำสั่งตัดในกระบวนการตัดจริงเพื่อตรวจสอบหาขนาดความสึกหรอของมีดตัดจริง โดยเปลี่ยนอัตราการป้อนตัดปัจจุบันในกระบวนการตัดปกติให้เป็นอัตราการป้อนตัดแบบขั้นหรือลง ที่อัตราการป้อนตัดต่างๆ อย่างตั้งใจเพื่อวัดแรงตัด และระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการตัดเฉพาะ โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดแรงตัดในขณะกลึงชิ้นงาน และจากผลการทดลองการประมาณการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการตัดจริง

ได้พิสูจน์แล้วว่าดัชนี a เป็นตัวชี้วัดที่ดี ในการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัด แม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะแตกต่างกัน

S. Tangjitisitcharoen [30] งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของชิ้นงาน และสัดส่วนของพื้นที่แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานถูกแสดงในรูปแบบของสมการถดถอยพหุคูณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดของสัดส่วนพื้นที่ของแรงตัดพลวัต และเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีจุมุมมีด และความลึกกัด โดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากการทดลองโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ในการวัดแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะตัด และวัดค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาโดเมนความถี่พบว่า ความถี่ของแรงตัดและผลการวัดความขรุขระมีความสอดคล้องกัน จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในโดเมนเวลาโดยการคำนวณพื้นที่แรงตัดพลวัต โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู มาสร้างเป็นแบบจำลองค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานในขณะตัด โดยมีความแม่นยำอยู่ที่ 90.3%

Salah Hamed Ramadan Ali, Hassan Hassan Mohamad, Mohamed Kamal Bedewy [31] งานวิจัยมีเป้าหมายในการนำเครื่องวัดจุดโคออร์ดิเนต (Coordinate Measurement Machines : CMM) ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของความกลม ความตรง และความร่วมศูนย์ในกระบวนการกลึงเครื่องยนต์ดีเซล ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงาน ที่ไม่ตรงกับการออกแบบและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการวัดขนาด และรูปทรงเลขาคณิตด้วยเครื่องมือที่มีความแม่นยำ เพื่อตรวจสอบและติดตามความรุนแรงของการสึกหรอ จนทำให้เกิดการชำรุดในกระบวนการของเครื่องยนต์ อันเนื่องมาจากการเสียดของรูปทรงเลขาคณิตของวงกลมในทิศทางตามขวางและตามยาว

โดยการวัดความกลม ความตรง และความร่วมศูนย์ของชิ้นงานในระดับไมโครเมตร โดยใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำ ทำให้สามารถศึกษาการสึกหรอของชิ้นส่วนได้อย่างละเอียด เป็นแรงผลักดันเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนวัตกรรมเพื่อป้องกัน ลดความสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากแรงเสียดทาน และความสึกหรอในกระบวนการกลึงให้ลดลง เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

Wei Gao *, Satoshi Kiyono [32] งานวิจัยนี้พัฒนาเครื่องมือวัดความกลมเป็นแบบหัว Probe สามจุดเพื่อเพิ่มข้อมูลในการวัดความกลมของชิ้นงาน เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดให้มีความ

แม่นยำ โดยการแปลงสัญญาณจากหัว Probe 3 จุดมาเป็นแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ความกลม ซึ่งใช้เทคนิคการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) กับการวัดความกลมแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด (Least square circle : LSC) และใช้สมการฟูเรียร์เพื่อพัฒนาโมเดลการคำนวณของแบบจำลองคอมพิวเตอร์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

E. H. K. Fung, S. M. Cheung [33] เนื่องจากในกระบวนการที่ต้องการความแม่นยำในกระบวนการกลึงนั้น ต้องใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำซึ่งมีราคาสูง ส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตบทความวิจัยฉบับนี้จึงทำการศึกษาความคลาดเคลื่อนของความกลมที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกลึงบนเครื่องกลึง โดยการติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของมีดตัดและตำแหน่งการตัดบนชิ้นงาน โดยใช้หลักการทางสถิติแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear approach) วิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ และพยากรณ์ความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากข้อมูลที่ทำให้การสังเกต และทำการชดเชยค่าเพื่อให้ค่าความกลมที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงอยู่ในขอบเขตที่กำหนด จากการทำการทดลองสามารถปรับปรุงความคลาดเคลื่อนของความกลมที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงได้ถึง 24% ภายใต้เงื่อนไขที่ทำการทดลอง

Eric H. K. Fung and Steve K. S. Leung [34] ได้อธิบายการออกแบบ และการจำลองกระบวนการกลึง 2 มิติ โดยใช้หลักการทางสถิติแบบไม่เชิงเส้น (autoregressive moving average : ARMAX) ในการพยากรณ์และทำการควบคุมความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อความกลมของชิ้นงาน โดยในการทำการจำลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการกลึงนี้ช่วยปรับปรุงความกลมของชิ้นงานได้สูงถึง 66%

P. S. Kalos, K. N. Nandurkar, L.G.Navale [35] เนื่องจากข้อกำหนด กฎหมาย ข้อบังคับเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม และต้นทุนเกี่ยวกับสารหล่อเย็นที่ใช้ในกระบวนการกลึง จึงได้นำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการกลึงโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น กระบวนการตัดแบบแห้งเป็นกระบวนการตัดที่พยายามใช้ของเหลวในการหล่อเย็นน้อยสุด จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาโดย Marcos-Barcena et. al. (2005), ได้ทำการศึกษาความคลาดเคลื่อนของความกลมของวัสดุ UNS A92024 (Al-Cu) ในกระบวนการกลึงชิ้นงานรูปทรงกระบอก โดยกระบวนการตัดแบบแห้ง โดยใช้ความเร็วตัด และอัตราการป้อนตัด ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ของความกลมในรูปแบบของฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลในการตรวจติดตามความกลมในระหว่างกระบวนการกลึง จากงานวิจัยที่ผ่านมาจึงเลือกใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม ในการประยุกต์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมโดยรอบ และนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า งานวิจัยนี้สามารถ

พยากรณ์เงื่อนไขของกระบวนการตัด (ความเร็วตัด และอัตราการป้อนตัด) ที่จำเป็นในการควบคุมความกลม

TIAN Yingzhong, LI Ming, LI Wei, WU Ganghua, FANG Minglun [36] งานวิจัยฉบับนี้ใช้เซ็นเซอร์ 2 ตำแหน่ง และ 3 ตำแหน่งในการตรวจติดตามความคลาดเคลื่อนของความกลม ในกระบวนการวัดของเพลาลูกเบี้ยวที่ผลิตมาจากกระบวนการเจียรระไน (Noncircular grinding process : NGP) ซึ่งเพลาลูกเบี้ยวนี้เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญชิ้นหนึ่งในเครื่องยนต์ ต้องการความแม่นยำของขนาดในการผลิตสูง ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์โดยการแปลงสัญญาณของการถ่วงน้ำหนักจากโดเมนเวลามาเป็นโดเมนความถี่ (FFT) และเปรียบเทียบผลการวัดความกลมโดยใช้เซ็นเซอร์ 2 ตำแหน่ง และ 3 ตำแหน่งในระหว่างกระบวนการผลิต กับการวัดความกลมโดยเครื่องวัดในห้องทดสอบ พบว่าการใช้เซ็นเซอร์ 3 ตำแหน่งให้ความแม่นยำในการตรวจวัดความกลมในขณะเจียรระไนได้แม่นยำมากกว่า

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

ในการดำเนินการวิจัยจะใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) ในการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากสุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆ ปัจจัย (Factors) พร้อมกัน ทำการทดลองโดยการตัดชิ้นงานตามปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง เก็บข้อมูลแรงตัด เงื่อนไขการตัด และความกลมที่ได้จากการตรวจสอบมาสร้างสมการทำนายความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$ เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว

3.1.1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาตามตารางที่ 1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของความกลมในกระบวนการกลึงมีดังนี้ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และแรงตัด จะเห็นได้จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งยังไม่มีมีการพิจารณารัศมีจุมกมิต และมุมคายเศษโลหะ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรัศมีจุมกมิตจะส่งผลต่อขนาดของพื้นที่ตัด พื้นที่ตัดนี้ส่งผลต่อแรงตัดให้มีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามขนาดพื้นที่ตัด และมุมคายเศษโลหะมีส่วนในการกำหนดทิศทางการไหลของเศษโลหะ ซึ่งมุมคายเศษโลหะที่แตกต่างกันนั้นย่อมส่งผลให้เกิดแรงตัดที่แตกต่างกัน ดังนั้นปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จึงควรถูกนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์กับความกลม งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยเพื่อใช้ในการทำนายความกลม ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$ เพื่อพัฒนาสมการทำนายความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึง โดยทำการวิเคราะห์ความกลมด้วยวิธีการวงกลมพื้นที่น้อยสุด (Minimum zone circle : MZC) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุดลบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันบนรูปร่างความกลมของชิ้นงาน เนื่องจากเป็นวิธีการตรวจสอบความกลมที่ให้ความคลาดเคลื่อนน้อยสุด ในงานวิจัยที่จะกล่าวต่อไปนี้จะใช้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง เพื่อแสดงถึงความกลม โดยค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่ามากแสดงถึงการเสียรูป บิดเบี้ยวของชิ้นงานจากรูปร่างวงกลมในอุดมคติมาก และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าน้อยแสดงถึงรูปร่างของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับรูปร่างวงกลมในอุดมคติ

3.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับของปัจจัย (Level) จะพิจารณาจากคู่มือการแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด ประกอบกับพิจารณาให้เป็นเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องด้วย เพื่อให้ได้คุณภาพผิวของชิ้นงานที่ดี ซึ่งสามารถแบ่งเป็นระดับต่างๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับปัจจัยของการทดลอง

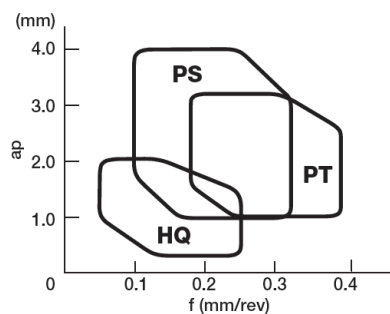
ปัจจัย	ระดับ
ความเร็วตัด	100, 150 และ 200 เมตร/นาที
อัตราป้อน	0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตร/รอบ
ความลึกตัด	0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร
รัศมีจมูก	0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร
มุมคายเศษโลหะ	-6 และ 11 องศา

- 1) ความเร็วตัด ทำการกำหนดระดับปัจจัยความเร็วตัด เป็น 3 ระดับ คือ 100 150 และ 200 เมตร/นาที การกำหนด 3 ระดับ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง นอกจากนี้ยังเป็นความเร็วตัดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม และเป็นความเร็วที่เหมาะสมตามคู่มือแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด

Classification	Grade	Cutting speed (m/min)				
		50	100	150	200	250
M15	CA6515			180 (120-240)		
M25	CA6525			150 (80-220)		
M30	PR1125		120 (70-160)			

รูปที่ 3.1 ความเร็วตัด ตามคู่มือแนะนำของผู้ผลิต [37]

- 2) อัตราการป้อนตัด ทำการกำหนดระดับปัจจัยของอัตราการป้อนตัดเป็น 3 ระดับ คือ 0.15 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตร/รอบ เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง



รูปที่ 3.2 อัตราการป้อนตัดตามคู่มือแนะนำของผู้ผลิต [37]

- 3) ความลึกตัด การกำหนดระดับปัจจัยของความลึกตัดเป็น 3 ระดับ คือ 0.4 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง ทั้งนี้การเลือกใช้ความลึกตัด ปกติจะใช้ความลึกตัดที่น้อยเพื่อให้ได้ผิวที่ดี แต่หากน้อยเกินไปก็จะถูกบดบังด้วยอิทธิพลของรัศมีงูมกมิต

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) **ชิ้นงาน** (Work piece material) เหล็กกล้าคาร์บอน S45C มีลักษณะทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-40 มิลลิเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานในการทำวิจัยมีขนาดไม่เกิน 30-40 มิลลิเมตร และยาวไม่เกิน 300 มิลลิเมตร อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของระยะการวัด และการติดตั้งชิ้นงานของเครื่องวัดความกลม)



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

- 2) **เม็ดมีด** (Insert) แบบคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN) ยี่ห้อ Kennametal

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดเม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง

มุกคายเศษโลหะ -6 องศา		มุกคายเศษโลหะ 11 องศา	
	DNMG150604FN DNMG150608FN		DCMT11T304HQ DCMT11T308HQ

3) **ด้ามมีดกลึง** เบอร์ SDJCR2525M-11 และ PDJNR2525M-15



(ก) PDJNR2525M-15

(ข) SDJCR2525M-11

สำหรับมุกคายเศษโลหะ -6 องศา

สำหรับมุกคายเศษโลหะ 11 องศา

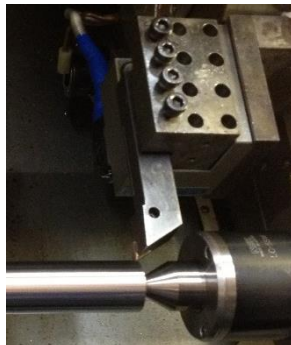
รูปที่ 3.4 ด้ามมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง

4) **เครื่องกลึงซีเอ็นซี** (CNC turning machine) ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY



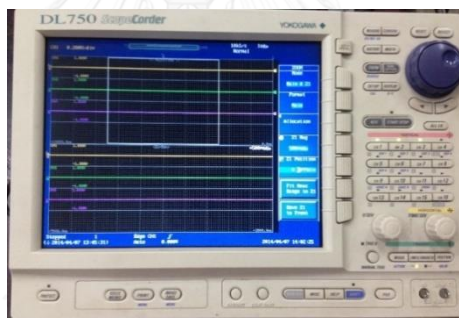
รูปที่ 3.5 เครื่องกลึงซีเอ็นซี

- 5) ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ยี่ห้อ Kister รุ่น 9121 สำหรับวัดแรงตัด



รูปที่ 3.6 ไดนาโมมิเตอร์

- 6) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 ใช้สำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 3.7 ออสซิลโลสโคป

- 7) เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)



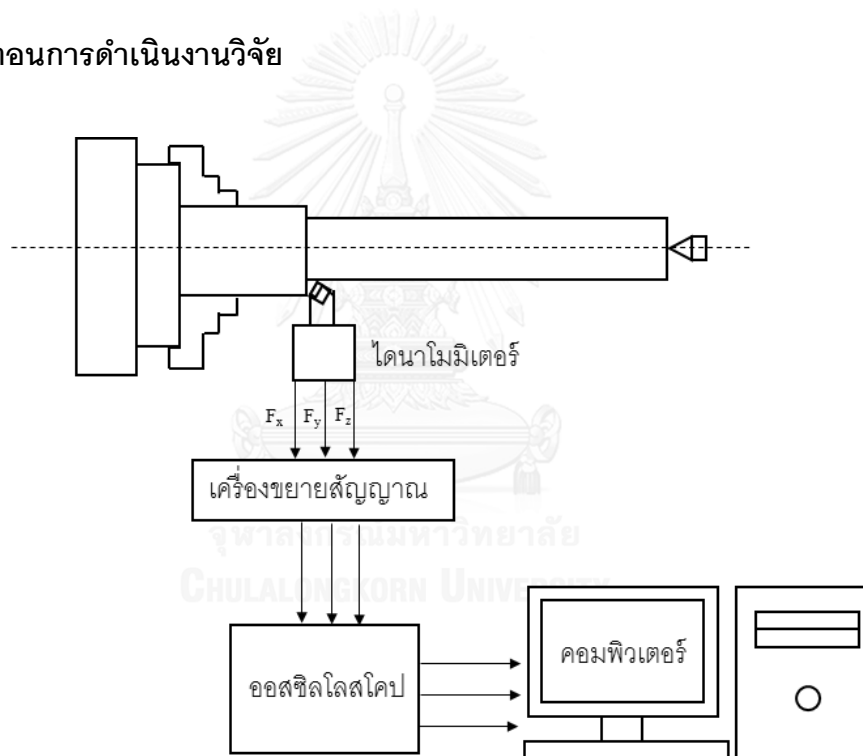
รูปที่ 3.8 เครื่องขยายสัญญาณ

- 8) เครื่องวัดความกลม (Roundness Tester) ยี่ห้อ TOKYO SEIMITSU CO.,LTD รุ่น ROUND COM 43C



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความกลม

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.10 การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทำการทดลอง

- 1) ติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3.10
 - ก. ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เข้ากับชุดป้อมมีด (Turret) เพื่อใช้วัดสัญญาณแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด
 - ข. เชื่อมต่อสายสัญญาณวัดแรงตัดเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)

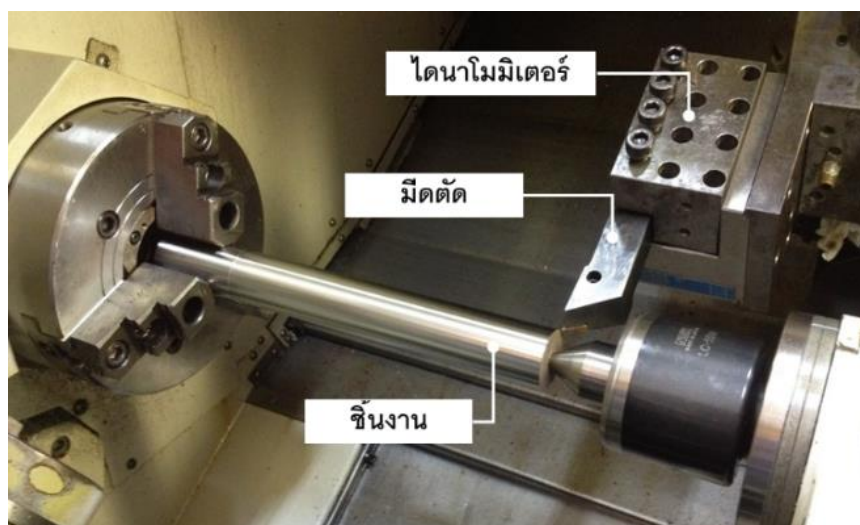
- ค. เชื่อมต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ใช้แสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด
- 2) เตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการตัด โดยการกลึงผิวของชิ้นงานให้เสมอกัน เนื่องจากความสูงของผิวชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน จะทำให้ความลึกตัดที่ใช้ในการทดลองคลาดเคลื่อน ส่งผลโดยตรงต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น และควบคุมตำแหน่งของชิ้นงานให้ขนานกับทิศทางการตัด เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของความกลมอันเนื่องมาจากการเยื้องศูนย์
 - 3) ทำการกลึงชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ ตามตารางที่ 3.4 โดยในขณะที่ตัดเครื่องจักรต้องไม่เกิดการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติ
 - 4) บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัด โดยสัญญาณแรงตัดพลวัตที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์ จะถูกขยายสัญญาณด้วยเครื่องขยายสัญญาณ และถูกกรองความถี่ย่านสัญญาณต่ำที่ 5,000 เฮิรท์ โดยใช้อัตราการเก็บข้อมูล 10,000 ค่าต่อวินาที
 - 5) เก็บตัวอย่างของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง
 - 6) ตรวจสอบสภาพการสึกหรอของเม็ดมีดตัดด้วยเครื่องวัดความสึกหรอ โดยความสึกหรอที่ใช้จะต้องมีขนาดไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร
 - 7) วัดค่าความกลมผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความกลมผิวชิ้นงาน โดยใช้เงื่อนไขการวัดดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการวัดความกลม

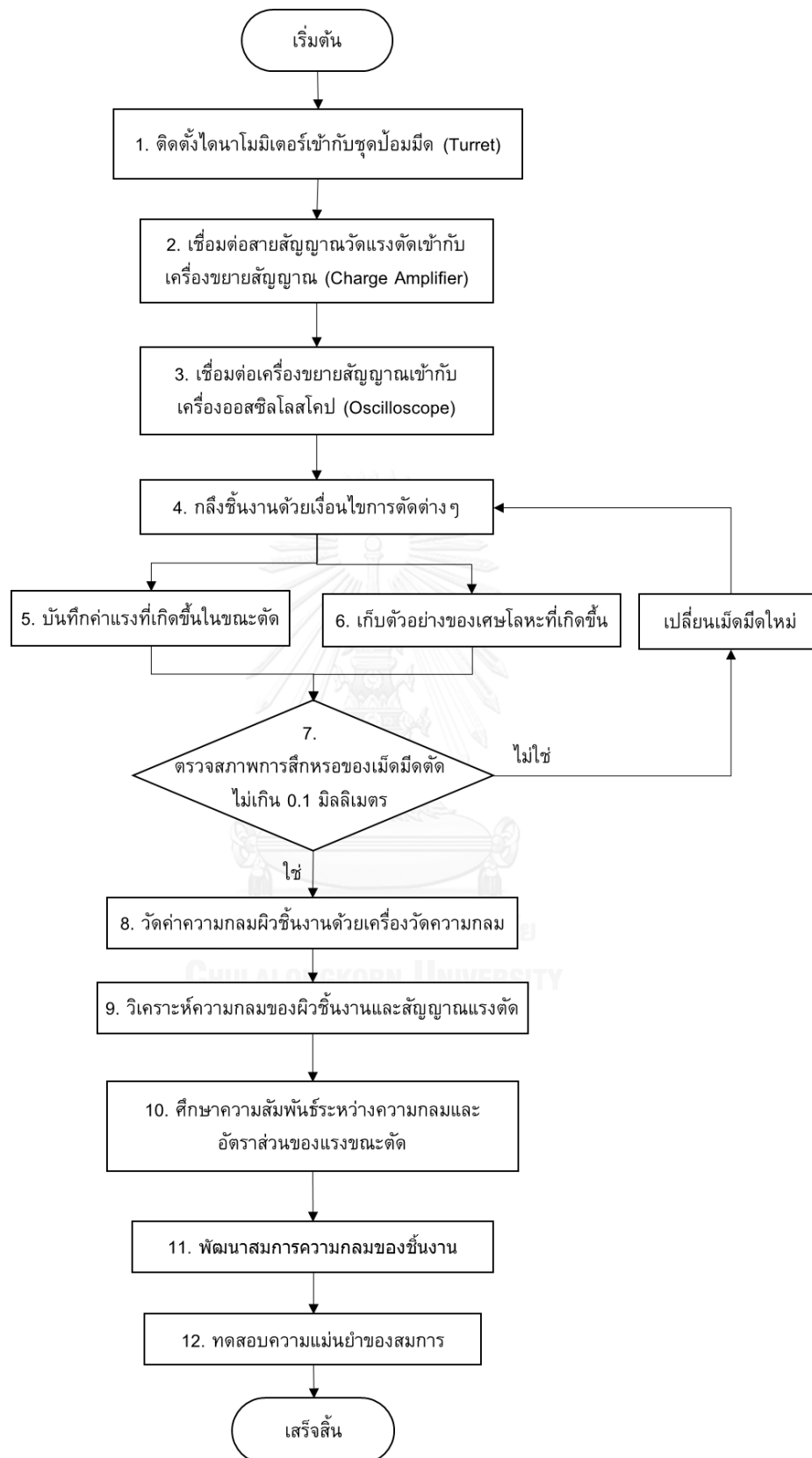
Analysis item	Roundness
Measurement magnification	X2,000
Filter type	2RC filter
Measurement method	Manual
Speed	6 radius/min
Invalid angle	5.0 Degree

- 8) วิเคราะห์เงื่อนไขการตัด ความกลมของชิ้นงาน สัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่สอดคล้องกัน และอัตราส่วนค่าความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y)
- 9) พัฒนาสมการความกลมของชิ้นงาน
 - 9.1) เสนอสมการในรูปแบบเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งการคำนวณจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัด และอัตราส่วนของแรงในขณะตัด

- 9.2) จากสมการแบบไม่เชิงเส้น แปลงในรูปสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้การแปลงลอการิทึม
- 9.3) วิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method) เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย
- 9.4) แปลงรูปลอการิทึม โดยการจัดให้อยู่ในรูปของสมการเอกซ์โปเนนเชียล
- 10) ทำการทดสอบความแม่นยำสมการความกลมที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.11 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ในเครื่องกลึงซีเอ็นซี



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการทดลอง

รท	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกกัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
1	200	0.15	0.8	0.4	-6
2	150	0.15	0.4	0.8	11
3	150	0.25	0.6	0.8	-6
4	150	0.25	0.8	0.8	11
5	200	0.2	0.6	0.8	11
6	150	0.2	0.6	0.4	11
7	200	0.25	0.4	0.4	-6
8	200	0.25	0.8	0.8	11
9	150	0.25	0.6	0.4	11
10	200	0.25	0.6	0.4	-6
11	100	0.15	0.6	0.4	11
12	150	0.2	0.8	0.4	11
13	200	0.25	0.4	0.4	11
14	100	0.25	0.6	0.4	11
15	150	0.25	0.6	0.8	11
16	200	0.15	0.4	0.4	-6
17	150	0.15	0.6	0.8	-6
18	200	0.15	0.4	0.4	11
19	150	0.25	0.4	0.4	11
20	200	0.15	0.6	0.8	-6
21	200	0.15	0.6	0.4	11
22	150	0.15	0.4	0.4	-6
23	150	0.15	0.6	0.8	11
24	200	0.25	0.8	0.8	-6
25	150	0.2	0.8	0.4	-6
26	100	0.25	0.6	0.8	11
27	150	0.15	0.4	0.8	-6

ที่	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
28	150	0.25	0.4	0.8	11
29	200	0.2	0.6	0.8	-6
30	150	0.2	0.4	0.8	-6
31	100	0.25	0.8	0.4	11
32	200	0.25	0.6	0.8	11
33	100	0.15	0.6	0.4	-6
34	100	0.2	0.4	0.8	-6
35	200	0.25	0.6	0.4	11
36	100	0.2	0.8	0.8	11
37	200	0.2	0.4	0.8	-6
38	100	0.15	0.4	0.8	-6
39	100	0.15	0.6	0.8	-6
40	200	0.2	0.4	0.4	11
41	150	0.2	0.8	0.8	11
42	200	0.15	0.4	0.8	11
43	100	0.25	0.6	0.4	-6
44	200	0.2	0.8	0.4	11
45	100	0.25	0.4	0.8	-6
46	150	0.15	0.8	0.4	-6
47	200	0.25	0.8	0.4	11
48	150	0.25	0.6	0.4	-6
49	200	0.25	0.4	0.8	-6
50	100	0.15	0.6	0.8	11
51	100	0.15	0.8	0.4	11
52	150	0.25	0.4	0.8	-6
53	100	0.15	0.4	0.4	-6
54	150	0.15	0.8	0.8	11
55	100	0.2	0.8	0.4	-6

ที่	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
56	200	0.15	0.8	0.4	11
57	150	0.15	0.6	0.4	11
58	150	0.2	0.4	0.4	-6
59	150	0.25	0.8	0.8	-6
60	100	0.25	0.8	0.8	11
61	150	0.2	0.4	0.8	11
62	200	0.15	0.8	0.8	-6
63	100	0.2	0.6	0.8	-6
64	200	0.25	0.6	0.8	-6
65	150	0.2	0.6	0.4	-6
66	150	0.15	0.8	0.8	-6
67	200	0.15	0.4	0.8	-6
68	200	0.2	0.8	0.4	-6
69	150	0.25	0.8	0.4	-6
70	200	0.15	0.6	0.4	-6
71	100	0.15	0.8	0.8	11
72	100	0.2	0.6	0.4	11
73	150	0.2	0.8	0.8	-6
74	200	0.2	0.6	0.4	11
75	150	0.25	0.8	0.4	11
76	100	0.25	0.8	0.8	-6
77	200	0.15	0.6	0.8	11
78	100	0.25	0.4	0.8	11
79	100	0.15	0.8	0.8	-6
80	200	0.2	0.4	0.8	11
81	150	0.15	0.8	0.4	11
82	100	0.2	0.8	0.4	11
83	200	0.25	0.4	0.8	11

ที่	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
84	100	0.25	0.4	0.4	-6
85	100	0.25	0.4	0.4	11
86	100	0.15	0.8	0.4	-6
87	100	0.2	0.4	0.4	-6
88	100	0.2	0.4	0.4	11
89	100	0.15	0.4	0.4	11
90	150	0.2	0.6	0.8	11
91	150	0.2	0.6	0.8	-6
92	100	0.2	0.6	0.8	11
93	200	0.15	0.8	0.8	11
94	200	0.25	0.8	0.4	-6
95	150	0.2	0.4	0.4	11
96	150	0.15	0.6	0.4	-6
97	100	0.15	0.4	0.8	11
98	200	0.2	0.8	0.8	-6
99	200	0.2	0.8	0.8	11
100	100	0.25	0.6	0.8	-6
101	150	0.25	0.4	0.4	-6
102	150	0.15	0.4	0.4	11
103	200	0.2	0.6	0.4	-6
104	200	0.2	0.4	0.4	-6
105	100	0.25	0.8	0.4	-6
106	100	0.2	0.8	0.8	-6
107	100	0.2	0.6	0.4	-6
108	100	0.2	0.4	0.8	11

3.4. การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต

ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัด (Average Variances) ได้มาจากการคำนวณโดยการแบ่งแรงขณะตัดออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ค่าแรงเป็นบวก และส่วนที่ค่าแรงเป็นลบ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของแรงค่าบวก ลบด้วยค่าเฉลี่ยของแรงค่าลบ แสดงดังสมการที่ 4.4-1 ถึง 4.4-3

$$AVF_x = X_1 - X_2 \quad (4.4-1)$$

โดยที่ AVF_x = ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงรัศมี (นิวตัน)

X_1 = ค่าเฉลี่ยของแรงรัศมีค่าบวก (นิวตัน)

X_2 = ค่าเฉลี่ยของแรงรัศมีค่าลบ (นิวตัน)

$$AVF_y = Y_1 - Y_2 \quad (4.4-2)$$

โดยที่ AVF_y = ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อนตัด (นิวตัน)

Y_1 = ค่าเฉลี่ยของแรงป้อนตัดค่าบวก (นิวตัน)

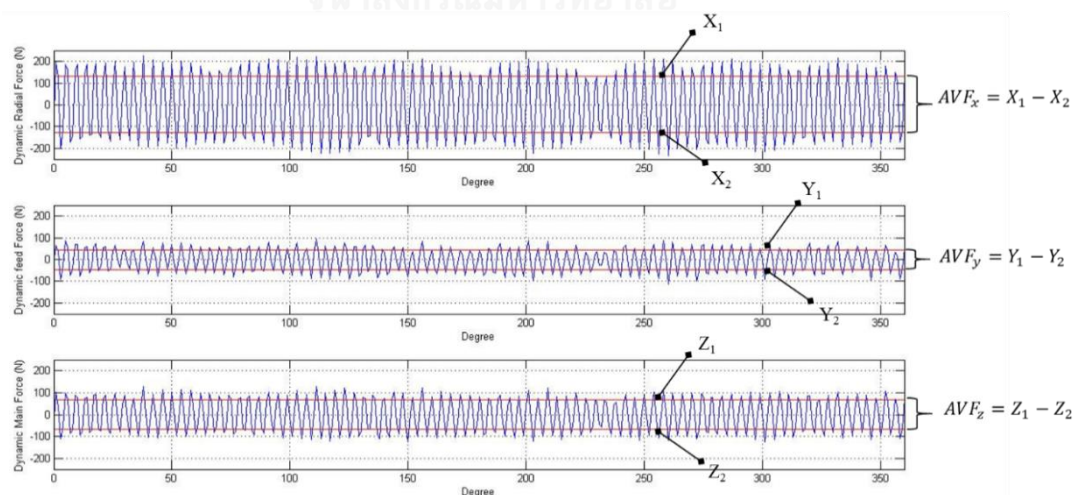
Y_2 = ค่าเฉลี่ยของแรงป้อนตัดค่าลบ (นิวตัน)

$$AVF_z = Z_1 - Z_2 \quad (4.4-3)$$

โดยที่ AVF_z = ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดหลัก (นิวตัน)

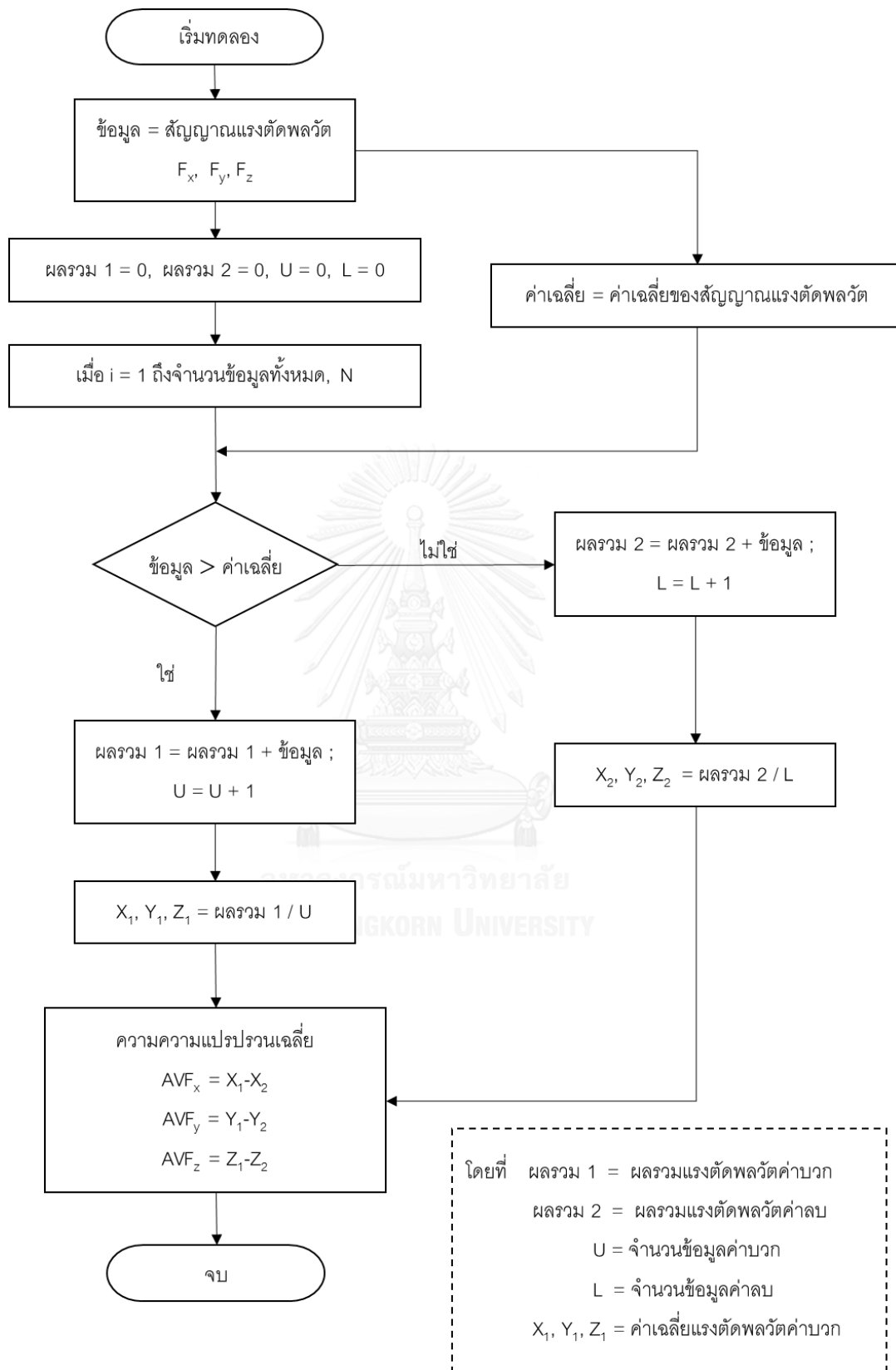
Z_1 = ค่าเฉลี่ยของแรงตัดหลักค่าบวก (นิวตัน)

Z_2 = ค่าเฉลี่ยของแรงตัดหลักค่าลบ (นิวตัน)



รูปที่ 3.13 การคำนวณค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อน 0.15 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุ่มมีด 0.4 มม.

มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนในการคำนวณค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต

3.5 การพัฒนาสมการทำนายความกลมของชิ้นงานขณะตัด

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [38] ได้ทำการศึกษาความคลาดเคลื่อนของความกลม จากการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงานด้วยสมการเชิงเส้น แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากแบบจำลองความกลมไม่สามารถอธิบายคุณสมบัติแบบพลวัตได้ จึงพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวของชิ้นงานขณะตัด [39] โดยนำเสนอสมการในรูปแบบเอกซ์โปเนนเชียล อ้างอิงตามทฤษฎีการหาค่าความขรุขระของผิวชิ้นงาน โดยพัฒนาสมการจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัด ได้แก่ อัตราการป้อนตัด รัศมีจุมูกมีด ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมูกมีด มุมคายพิเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัด พบว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาสมการทำนายพิสัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานขณะตัดจากความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด อัตราส่วนของค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดขณะตัดและพิสัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ในรูปแบบสมการเอกซ์โปเนนเชียลดังนี้

$$R_0 = C_1 \cdot (V)^{a_1} \cdot (f)^{a_2} \cdot (D)^{a_3} \cdot (R_n)^{a_4} \cdot (e)^{a_5} \cdot \left(\frac{AVF_x}{AVF_y} \right)^{a_6} \quad (3.4-1)$$

โดยที่	R_0	= ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)
	V	= ความเร็วตัดชิ้นงาน (เมตรต่อนาที)
	f	= อัตราการป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)
	D	= ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
	R_n	= รัศมีจุมูกมีด (มิลลิเมตร)
	γ	= มุมคายพิเศษโลหะ (องศา)
	AVF_x	= ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงรัศมี (นิวตัน)
	AVF_y	= ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อนตัด (นิวตัน)

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, C_1$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากสมการแบบไม่เชิงเส้น 3.4-1 ถูกแปลงและนำเสนอในรูปแบบสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้การแปลงลอการิทึม ดังนี้

$$\ln R_0 = \ln C_1 + a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln D + a_4 \ln R_n + a_5 \gamma + a_6 \ln \left(\frac{AVF_x}{AVF_y} \right) \quad (3.4-2)$$

จากสมการถดถอยพหุคูณสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 \quad (3.4-3)$$

โดยที่

y แทนค่า $\ln R_0$

x_1 แทนค่า $\ln V$

x_2 แทนค่า $\ln f$

x_3 แทนค่า $\ln D$

x_4 แทนค่า $\ln R_n$

x_5 แทนค่า $\ln \gamma$

x_6 แทนค่า $\ln \left(\frac{AVF_x}{AVF_y} \right)$

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ แทนค่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการซึ่งได้มาจาก

การวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) จากข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง ได้แก่

1.1) เงื่อนไขการตัดต่างๆ

1.2) ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

1.3) สัญญาณแรงตัด

1.4) เศษโลหะที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ

2) คำนวณอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต ซึ่งอัตราส่วนของแรงนี้ต้องเป็นแรงตัด ณ ตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบพิสัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัด

4) วิเคราะห์ความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดและการเกิดเศษโลหะ

5) วิเคราะห์ความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดต่างๆ ในการทำวิจัย และพิสัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

6) วิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ โดยการการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน (Residual)

6.2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

6.3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

7) พัฒนาสมการทำนายความกลมด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย

8) ทดสอบความแม่นยำของสมการ



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะทำการกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยใช้แรงตัดที่ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ ประกอบไปด้วยปัจจัยในการตัดดังนี้ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด และมุมคายเศษโลหะ ปัจจัยดังกล่าวถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ศึกษาหาความสัมพันธ์ เพื่อพัฒนาสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน โดยประยุกต์ใช้อัตราส่วนของแรงตัดในกระบวนการกลึง เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วย ใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN)

4.1 ผลการทดลอง

ทำการทดลองโดยการตัดภายใต้เงื่อนไขดังตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการทดลอง และบันทึกผลการทดลองที่ได้ เก็บตัวอย่างเศษโลหะ ตรวจสอบความกลม คำนวณอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัด $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$ และบันทึกค่าลงในตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ที่	ความเร็วตัด (ม.นท)	อัตราป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)	สถานะ เศษโลหะ
1	200	0.15	0.8	0.4	-6	1.173	5.057	แตกหัก
2	150	0.15	0.4	0.8	11	1.104	4.657	ต่อเนื่อง
3	150	0.25	0.6	0.8	-6	1.241	5.814	ต่อเนื่อง
4	150	0.25	0.8	0.8	11	1.770	5.850	แตกหัก
5	200	0.2	0.6	0.8	11	1.007	4.550	ต่อเนื่อง
6	150	0.2	0.6	0.4	11	1.710	5.590	ต่อเนื่อง
7	200	0.25	0.4	0.4	-6	1.597	5.492	ต่อเนื่อง
8	200	0.25	0.8	0.8	11	0.886	4.754	แตกหัก
9	150	0.25	0.6	0.4	11	2.772	7.410	ต่อเนื่อง
10	200	0.25	0.6	0.4	-6	1.597	5.998	ต่อเนื่อง
11	100	0.15	0.6	0.4	11	1.337	5.105	ต่อเนื่อง
12	150	0.2	0.8	0.4	11	2.514	6.578	แตกหัก
13	200	0.25	0.4	0.4	11	0.890	4.686	ต่อเนื่อง
14	100	0.25	0.6	0.4	11	1.209	5.641	ต่อเนื่อง
15	150	0.25	0.6	0.8	11	1.292	5.608	ต่อเนื่อง

ที่	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)	สถานะ เศษโลหะ
16	200	0.15	0.4	0.4	-6	1.270	4.635	ต่อเนื่อง
17	150	0.15	0.6	0.8	-6	1.270	5.397	ต่อเนื่อง
18	200	0.15	0.4	0.4	11	0.726	4.047	ต่อเนื่อง
19	150	0.25	0.4	0.4	11	1.177	5.246	ต่อเนื่อง
20	200	0.15	0.6	0.8	-6	1.132	5.181	ต่อเนื่อง
21	200	0.15	0.6	0.4	11	0.886	4.991	ต่อเนื่อง
22	150	0.15	0.4	0.4	-6	2.094	5.873	ต่อเนื่อง
23	150	0.15	0.6	0.8	11	1.224	4.759	ต่อเนื่อง
24	200	0.25	0.8	0.8	-6	1.277	5.576	แตกหัก
25	150	0.2	0.8	0.4	-6	2.274	6.430	แตกหัก
26	100	0.25	0.6	0.8	11	1.557	5.608	ต่อเนื่อง
27	150	0.15	0.4	0.8	-6	1.071	5.019	ต่อเนื่อง
28	150	0.25	0.4	0.8	11	1.049	4.976	ต่อเนื่อง
29	200	0.2	0.6	0.8	-6	1.144	5.397	ต่อเนื่อง
30	150	0.2	0.4	0.8	-6	1.095	5.122	ต่อเนื่อง
31	100	0.25	0.8	0.4	11	1.264	5.762	แตกหัก

ที่	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_z}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)	สถานะ เศษโลหะ
32	200	0.25	0.6	0.8	11	1.120	4.567	ต่อเนื่อง
33	100	0.15	0.6	0.4	-6	1.154	5.564	แตกหัก
34	100	0.2	0.4	0.8	-6	1.424	5.749	ต่อเนื่อง
35	200	0.25	0.6	0.4	11	1.080	5.194	ต่อเนื่อง
36	100	0.2	0.8	0.8	11	2.174	6.147	แตกหัก
37	200	0.2	0.4	0.8	-6	0.928	4.099	ต่อเนื่อง
38	100	0.15	0.4	0.8	-6	1.331	5.509	ต่อเนื่อง
39	100	0.15	0.6	0.8	-6	1.315	5.681	ต่อเนื่อง
40	200	0.2	0.4	0.4	11	0.711	4.047	ต่อเนื่อง
41	150	0.2	0.8	0.8	11	1.493	5.112	แตกหัก
42	200	0.15	0.4	0.8	11	0.880	4.017	ต่อเนื่อง
43	100	0.25	0.6	0.4	-6	1.041	5.057	ต่อเนื่อง
44	200	0.2	0.8	0.4	11	1.238	5.011	ต่อเนื่อง
45	100	0.25	0.4	0.8	-6	1.485	6.060	ต่อเนื่อง
46	150	0.15	0.8	0.4	-6	1.650	5.691	ต่อเนื่อง
47	200	0.25	0.8	0.4	11	1.433	6.118	แตกหัก

ที่	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_z}{AVF_r}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)	สถานะ เศษโลหะ
48	150	0.25	0.6	0.4	-6	1.966	6.725	แตกหัก
49	200	0.25	0.4	0.8	-6	1.037	4.606	ต่อเนื่อง
50	100	0.15	0.6	0.8	11	1.902	5.976	แตกหัก
51	100	0.15	0.8	0.4	11	1.831	5.550	ต่อเนื่อง
52	150	0.25	0.4	0.8	-6	1.254	5.621	ต่อเนื่อง
53	100	0.15	0.4	0.4	-6	1.980	6.481	ต่อเนื่อง
54	150	0.15	0.8	0.8	11	1.457	4.894	แตกหัก
55	100	0.2	0.8	0.4	-6	1.348	5.719	แตกหัก
56	200	0.15	0.8	0.4	11	1.148	4.794	ต่อเนื่อง
57	150	0.15	0.6	0.4	11	1.362	5.249	ต่อเนื่อง
58	150	0.2	0.4	0.4	-6	1.546	6.174	ต่อเนื่อง
59	150	0.25	0.8	0.8	-6	1.865	6.375	แตกหัก
60	100	0.25	0.8	0.8	11	1.399	5.873	แตกหัก
61	150	0.2	0.4	0.8	11	1.136	4.659	ต่อเนื่อง
62	200	0.15	0.8	0.8	-6	1.320	5.428	ต่อเนื่อง
63	100	0.2	0.6	0.8	-6	1.687	6.102	ต่อเนื่อง

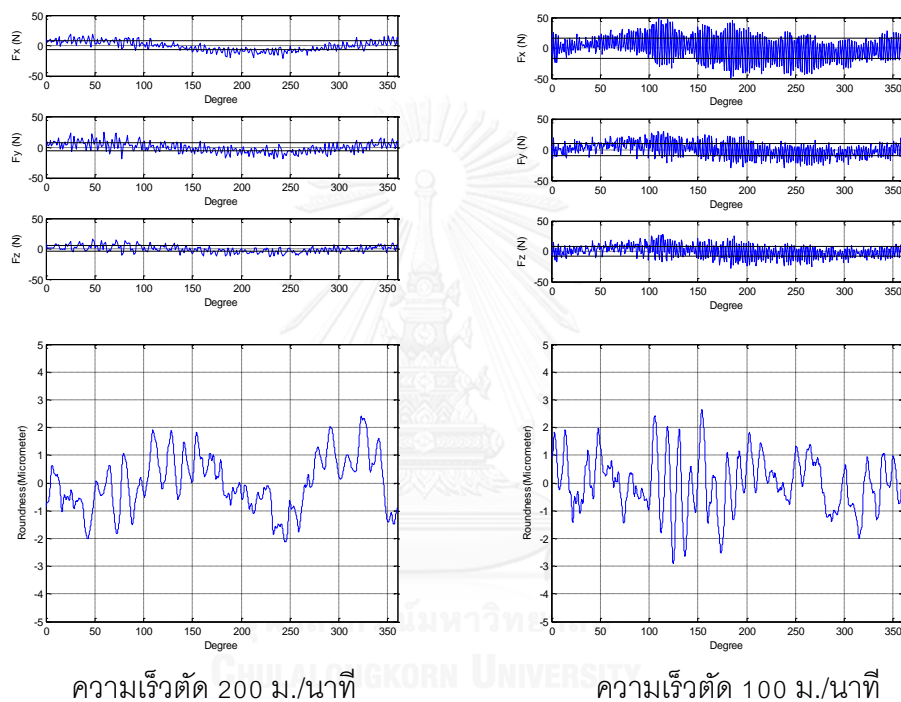
ที่	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)	สถานะ เศษโลหะ
64	200	0.25	0.6	0.8	-6	0.787	4.579	ต่อเนื่อง
65	150	0.2	0.6	0.4	-6	2.347	6.291	แตกหัก
66	150	0.15	0.8	0.8	-6	1.544	5.358	ต่อเนื่อง
67	200	0.15	0.4	0.8	-6	0.983	4.156	ต่อเนื่อง
68	200	0.2	0.8	0.4	-6	1.760	6.018	แตกหัก
69	150	0.25	0.8	0.4	-6	2.391	7.233	แตกหัก
70	200	0.15	0.6	0.4	-6	1.279	5.744	แตกหัก
71	100	0.15	0.8	0.8	11	2.379	5.873	แตกหัก
72	100	0.2	0.6	0.4	11	0.956	4.602	ต่อเนื่อง
73	150	0.2	0.8	0.8	-6	1.687	5.666	แตกหัก
74	200	0.2	0.6	0.4	11	1.097	4.991	ต่อเนื่อง
75	150	0.25	0.8	0.4	11	2.446	7.162	แตกหัก
76	100	0.25	0.8	0.8	-6	0.973	5.325	แตกหัก
77	200	0.15	0.6	0.8	11	1.274	4.768	ต่อเนื่อง
78	100	0.25	0.4	0.8	11	1.349	5.154	ต่อเนื่อง
79	100	0.15	0.8	0.8	-6	1.600	5.799	แตกหัก

ที่	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_2}{AVF_1}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)	สถานะ เศษโลหะ
80	200	0.2	0.4	0.8	11	1.090	4.547	ต่อเนื่อง
81	150	0.15	0.8	0.4	11	2.488	6.119	แตกหัก
82	100	0.2	0.8	0.4	11	1.460	5.919	ต่อเนื่อง
83	200	0.25	0.4	0.8	11	1.019	4.017	ต่อเนื่อง
84	100	0.25	0.4	0.4	-6	1.376	6.010	ต่อเนื่อง
85	100	0.25	0.4	0.4	11	1.321	5.375	ต่อเนื่อง
86	100	0.15	0.8	0.4	-6	1.696	5.460	แตกหัก
87	100	0.2	0.4	0.4	-6	1.748	6.449	ต่อเนื่อง
88	100	0.2	0.4	0.4	11	1.181	4.837	ต่อเนื่อง
89	100	0.15	0.4	0.4	11	1.600	5.736	ต่อเนื่อง
90	150	0.2	0.6	0.8	11	1.179	5.230	ต่อเนื่อง
91	150	0.2	0.6	0.8	-6	1.246	5.681	ต่อเนื่อง
92	100	0.2	0.6	0.8	11	1.608	5.541	ต่อเนื่อง
93	200	0.15	0.8	0.8	11	0.809	3.944	ต่อเนื่อง
94	200	0.25	0.8	0.4	-6	1.784	6.301	แตกหัก
95	150	0.2	0.4	0.4	11	1.058	4.788	ต่อเนื่อง

ที่	ความเร็วตัด (ม.นท.)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_1}{AVF_2}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)	สถานะ เศษโลหะ
96	150	0.15	0.6	0.4	-6	1.600	5.670	แตกหัก
97	100	0.15	0.4	0.8	11	1.227	4.657	ต่อเนื่อง
98	200	0.2	0.8	0.8	-6	1.396	5.550	แตกหัก
99	200	0.2	0.8	0.8	11	0.871	4.722	แตกหัก
100	100	0.25	0.6	0.8	-6	1.611	6.234	ต่อเนื่อง
101	150	0.25	0.4	0.4	-6	1.703	6.250	แตกหัก
102	150	0.15	0.4	0.4	11	1.067	4.686	ต่อเนื่อง
103	200	0.2	0.6	0.4	-6	1.540	5.649	ต่อเนื่อง
104	200	0.2	0.4	0.4	-6	1.329	5.107	ต่อเนื่อง
105	100	0.25	0.8	0.4	-6	0.978	4.976	แตกหัก
106	100	0.2	0.8	0.8	-6	1.244	5.873	แตกหัก
107	100	0.2	0.6	0.4	-6	1.132	5.832	ต่อเนื่อง
108	100	0.2	0.4	0.8	11	1.227	4.793	ต่อเนื่อง

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการกลึงพบว่า แรงตัดรัศมี (F_x) แรงป้อนตัด (F_y) และแรงตัดหลัก (F_z) มีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแรงตัดพลวัตนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางในลักษณะแปรผันไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อแอมพลิจูดแรงตัดพลวัตมีค่าสูงมากขึ้น ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน จึงส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตรวจสอบได้ก็จะมีสูงมากขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.1

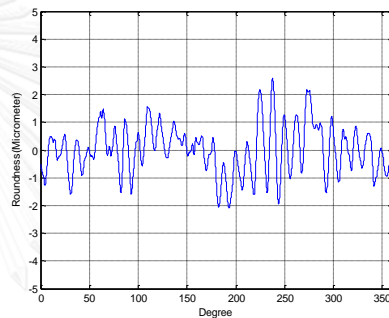
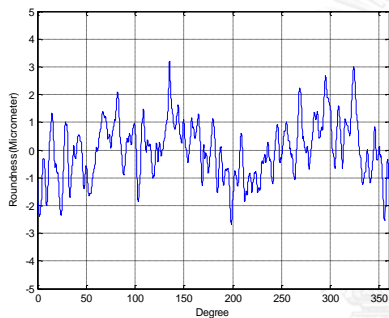
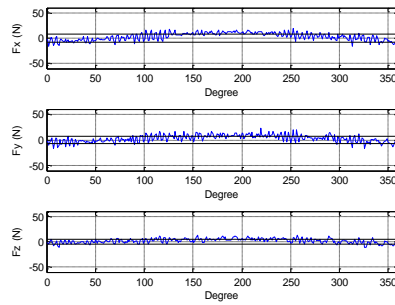
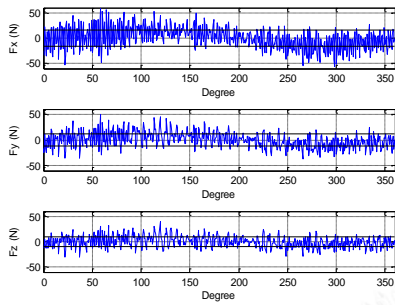
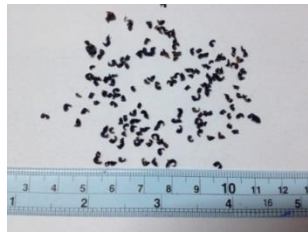


รูปที่ 4.1 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม.

ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

เมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น เศษโลหะมีความหนา จึงง่ายต่อการแตกหัก การแตกหักของเศษโลหะขณะตัดที่เกิดขึ้นนี้จะพ่นชนมีดตัดและชิ้นงาน ส่งผลให้แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตมีขนาดใหญ่มากขึ้น และการเพิ่มพื้นที่การตัดทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น แสดงดังรูปที่

4.2



- (1) เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที่ อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา
- (2) เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./นาที่ อัตราป้อนตัด 0.20 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง และการเกิดเศษโลหะ

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าแรงตัดพลวัตมีความสอดคล้องกับความกลมที่เกิดขึ้น และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัตและความกลมนี้ จะต้องทำการเปรียบเทียบข้อมูล ณ จุดอ้างอิงเดียวกัน การคำนวณตำแหน่งแรงตัดพลวัตจากเงื่อนไขการตัดต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางสามารถคำนวณได้ดังนี้

4.2.1 การคำนวณระยะเวลาที่ใช้ในการกลึงชิ้นงาน 1 รอบ

อ้างอิงจากความสัมพันธ์ของความเร็วตัดและความเร็วรอบ (Spindle speed) ที่แสดงดังสมการที่ 2.3-3 สามารถจัดรูปใหม่ดังสมการที่ 4.2-1

$$N_w = \frac{1000v}{\pi D} \quad (4.2-1)$$

โดยที่ N_w = ความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบ/นาที)
 V = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)
 D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

จากสมการที่ 4.2-1 นี้นำมาใช้ในการคำนวณระยะเวลาที่ใช้ในการกลึงชิ้นงาน 1 รอบ ซึ่งจะเท่ากับระยะที่ทำการตรวจสอบความกลมได้ดังนี้

วิธีคำนวณ

ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมีขนาด 38.2 มิลลิเมตร จะได้ว่า

$$N_w = \frac{1,000(200)}{\pi(38.2)} = 1,666.54 \frac{\text{รอบ}}{\text{นาที}}$$

ดังนั้น เวลาในการตัดต่อการหมุน 1 รอบจึงเท่ากับ

$$\frac{1}{N_w} = \frac{1}{1,666.54 \text{ รอบ}} \frac{\text{นาที}}{60 \text{ วินาที}} \times \frac{60 \text{ วินาที}}{1 \text{ นาที}} = 0.036 \text{ วินาที/รอบ}$$

4.2.2 จำนวนจำนวนแรงตัดพลวัตที่ต้องทำการวิเคราะห์

เมื่อคำนวณระยะเวลาที่ใช้ในการกลึงชิ้นงาน 1 รอบแล้ว ในลำดับต่อไปจะเป็นขั้นตอนการคำนวณจำนวนแรงตัดพลวัตที่ต้องทำการวิเคราะห์ โดยอัตราของการสุ่มเก็บข้อมูลของเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ใช้ในการวิจัย จะมีค่าเท่ากับ 10,000 ข้อมูล/วินาที ดังนั้นจึงสามารถคำนวณจำนวนแรงตัดพลวัตที่ต้องใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมได้ดังสมการที่ 4.2-2

$$\text{จำนวนข้อมูล} = \text{อัตราการเก็บข้อมูล} \times \text{ระยะเวลาที่ใช้ในการกลึงชิ้นงาน 1 รอบ} \quad (4.2-2)$$

วิธีคำนวณ

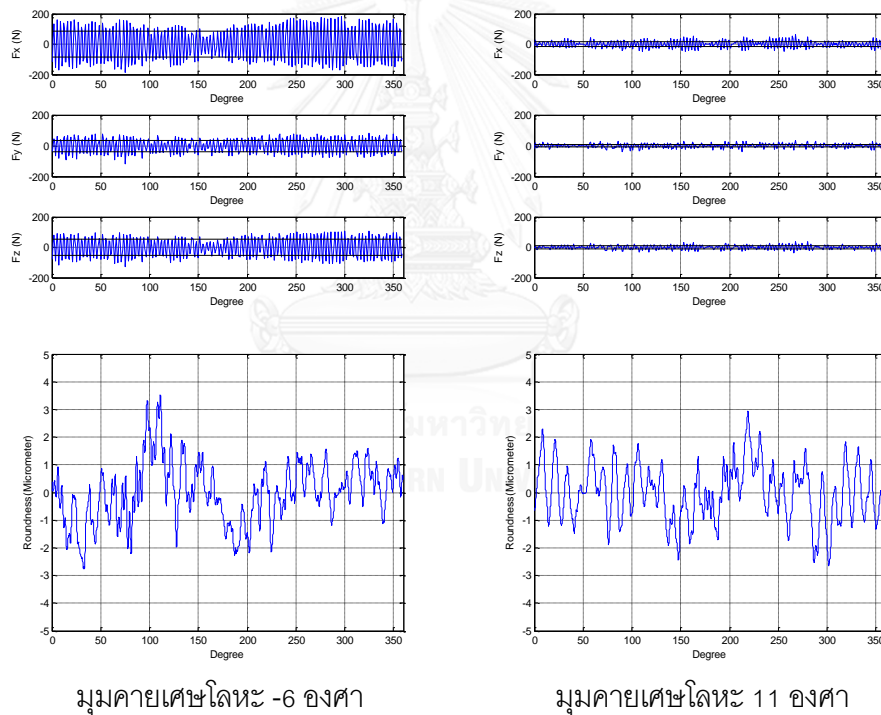
จากการคำนวณระยะเวลาที่ใช้ในการกลึงชิ้นงาน 1 รอบ มีค่าเท่ากับ 0.036 วินาที/รอบ อัตราของการสุ่มเก็บข้อมูลเท่ากับ 10,000 ข้อมูล/วินาที

$$\text{จำนวนข้อมูล} = 10,000 \times 0.036 = 360 \text{ ข้อมูล}$$

ดังนั้น ต้องทำการวิเคราะห์แรงตัดพลวัต ณ ตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบความกลม จำนวน 360 ข้อมูล

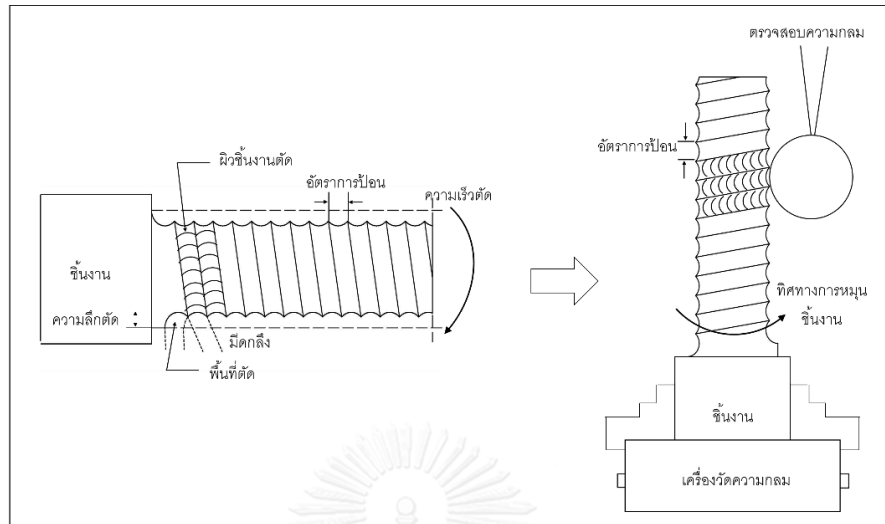
4.3 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตและค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

แรงตัดพลวัตจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วในการหมุน ชิ้นงาน อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ และการแตกหักของเศษโลหะ เมื่อเศษโลหะเกิดการแตกหักขณะตัด เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะพุ่งชนมีดตัดและชิ้นงาน ส่งผลให้แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งหากนำสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักมาใช้ในการพัฒนาสมการทำนายค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการแรงตัดที่เกิดจากการแตกหักของเศษโลหะ ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตเพื่อช่วยลดอิทธิพลของการแตกหักของเศษโลหะที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.3 เพื่อให้สามารถทำนายค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางขณะตัดได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น



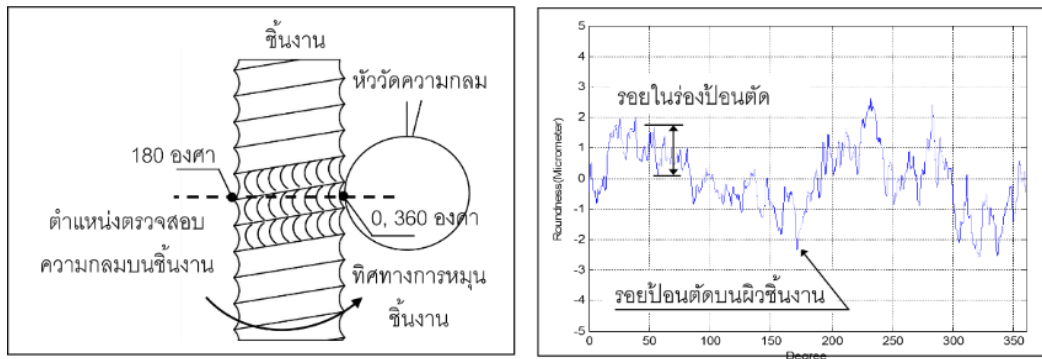
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์แรงตัดและค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมกมีด 0.4 มม.

4.4 กลไกการเกิดรูปร่างความกลม



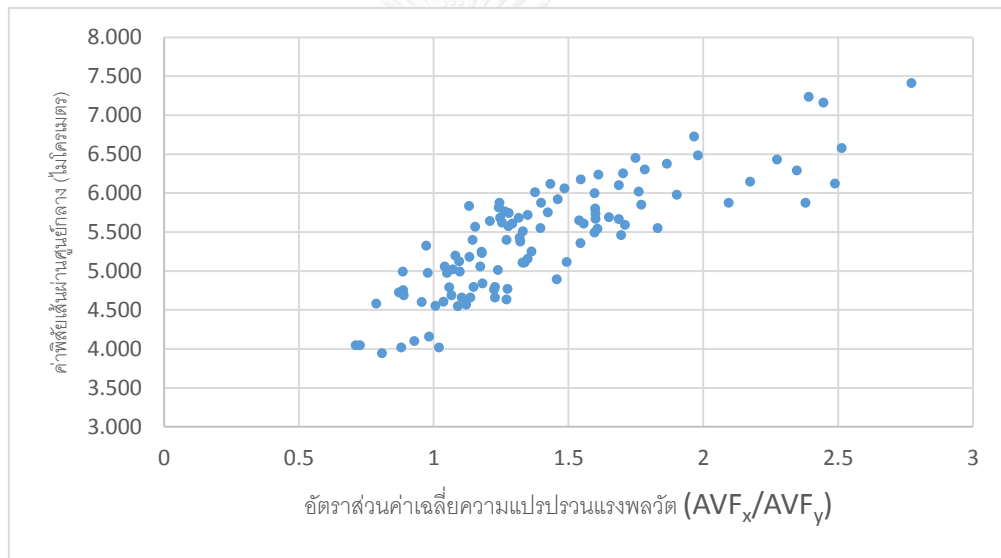
รูปที่ 4.4 กลไกการเกิดรูปร่างความกลม

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะเรขาคณิตการตัดในกระบวนการกลึง เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วย ไบมีตคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN) ผิวบนชิ้นงานที่เกิดจากขอบคมมีด รัศมีจุ่มกัดตัด และเงื่อนไขการตัดทำให้เกิดรอยป้อนตัดบนชิ้นงาน เมื่อทำการตรวจสอบค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้วยเครื่องวัดความกลมชนิดแทนชิ้นงานหมุน และหัววัดความกลมอยู่ที่ตำแหน่งเดิม (Table Rotating Type) จากรูปที่ 4.5 เมื่อหัววัดความกลมสัมผัสผิวของชิ้นงานตำแหน่งเริ่มต้น 0 องศา และชิ้นงานหมุนไปจนถึงตำแหน่งที่ 180 องศา หัววัดความกลมจะอยู่ที่ตำแหน่งสันของารป้อนตัดบนผิวของชิ้นงานที่เกิดจากเรขาคณิตของมีดตัดและการป้อนตัด สันบนชิ้นงานที่เกิดจากการป้อนตัดจะไปดันหัววัดความกลมกระดกลง จึงทำให้รูปร่างของความกลมที่ตำแหน่ง 180 องศา มีแนวโน้มลดลงจากตำแหน่งเริ่มต้น เมื่อหมุนชิ้นงานกลับมาอยู่ที่ตำแหน่ง 360 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งเริ่มต้นการวัด หัววัดความกลมจะกลับมาอยู่ที่ตำแหน่งเดิม จึงทำให้รูปร่างของความกลมกลับมาอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับตอนเริ่มต้นวัดชิ้นงาน และถูกคลื่นเล็กๆ ที่เกิดขึ้นในร่องป้อนตัด เป็นความขรุขระผิวที่เกิดจากการสั่นสะเทือน จึงทำให้ผิวของชิ้นงานมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งการสั่นสะเทือนนี้จะขึ้นกับ อัตราการป้อนชิ้นงาน ความเร็วรอบในการหมุน ความลึกตัด และรัศมีจุ่มกัดของการตัด [2]



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของชิ้นงานและค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงพลวัต (AVF_x/AVF_y)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของชิ้นงานและอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) ดังรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่ออัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) มีค่าสูงขึ้น ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการตรวจสอบนั้นก็จะมีขนาดพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นตามไปด้วย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดรัศมี (AVF_x) มีค่าเพิ่มสูงมากกว่าค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อนตัด (AVF_y) แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดรัศมี (AVF_x) ที่เพิ่มสูงมากขึ้นนี้ส่งผลต่อรูปร่างความกลมของชิ้นงานเป็นอย่างมาก ทำให้เครื่องมือตัดและชิ้นงานเกิดการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตรวจสอบได้นั้นมีค่าเบี่ยงเบนเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและเศษโลหะ

จากการทำวิจัยภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยในการตัดดังนี้ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและการเกิดเศษโลหะ



(1) 200 เมตร/นาที



(2) 150 เมตร/นาที

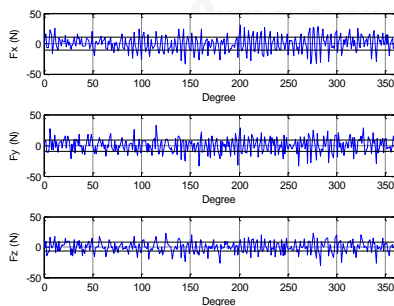


(3) 100 เมตร/นาที

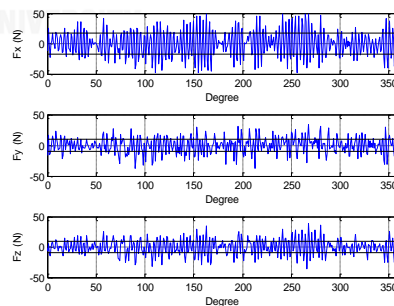
รูปที่ 4.7 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200, 150 และ 100 ม./นาที

อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากการทำการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วตัดเพิ่มสูงขึ้น เศษโลหะที่จะมีความยาวต่อเนื่องมากขึ้น อันเนื่องมาจาก เมื่อความเร็วตัดเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการตัดสูงขึ้น เนื้อวัสดุอ่อนนุ่มมากขึ้น แรงตัดพลวัตลดลงดังรูปที่ 4.8 จึงทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนตัวออกมาได้อย่างต่อเนื่อง เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงานลดลง จึงทำให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดลดลง



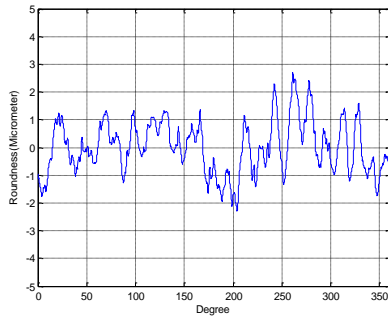
ความเร็วตัด 200 ม./นาที



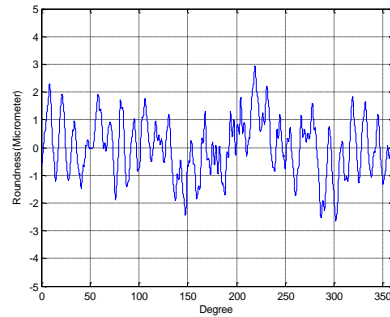
ความเร็วตัด 150 ม./นาที

รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์แรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม.

ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



ความเร็วตัด 200 ม./นาที



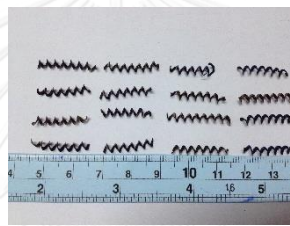
ความเร็วตัด 150 ม./นาที

รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์แรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนตัดและการเกิดเศษโลหะ



(1) 0.15 มิลลิเมตร



(2) 0.20 มิลลิเมตร

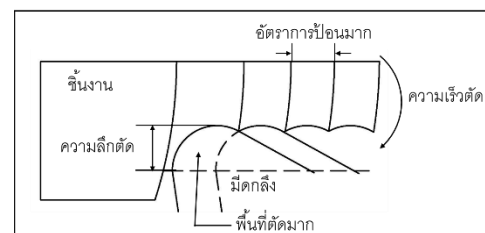
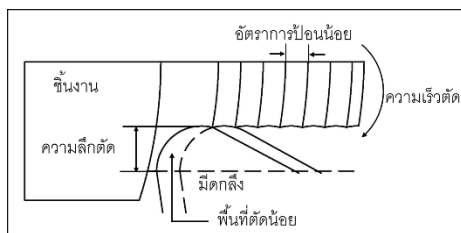


(3) 0.25 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.10 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตร

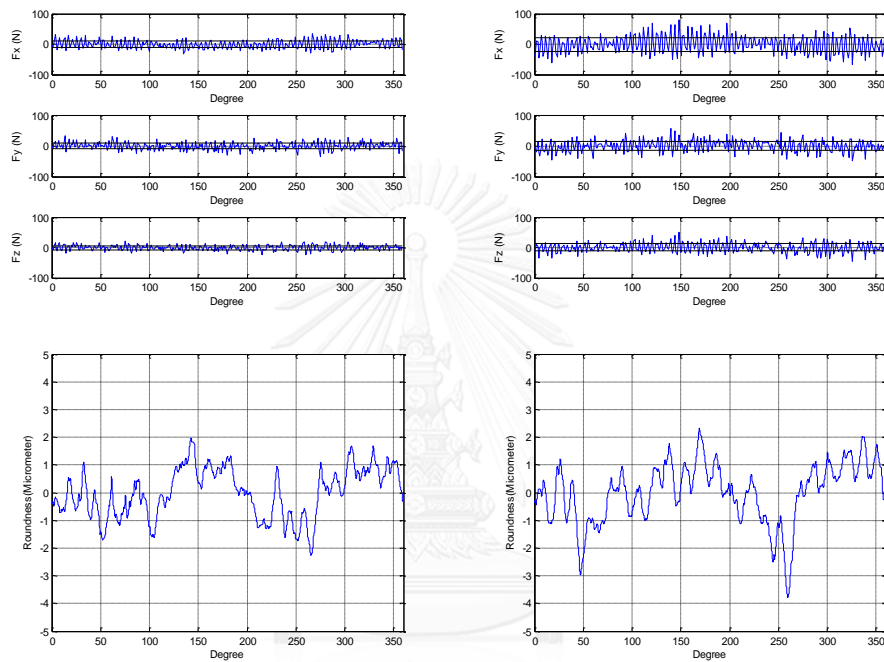
ความลึกตัด 0.8 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากการทำการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการป้อนตัดสูงมากขึ้น ความยาวเศษโลหะที่เกิดขึ้นมีขนาดสั้นกว่าอัตราการป้อนตัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากเมื่อใช้อัตราการป้อนตัดสูงมากขึ้นพื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความหนาของเศษโลหะ ทำให้เศษโลหะมีความหนามากขึ้น ดังรูปที่ 4.11 ทำให้เกิดการโค้งงอ และเครื่องที่มาชนกับหน้าคายเศษโลหะ จึงทำให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายมากกว่า



รูปที่ 4.11 การเพิ่มพื้นที่การตัด เมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น

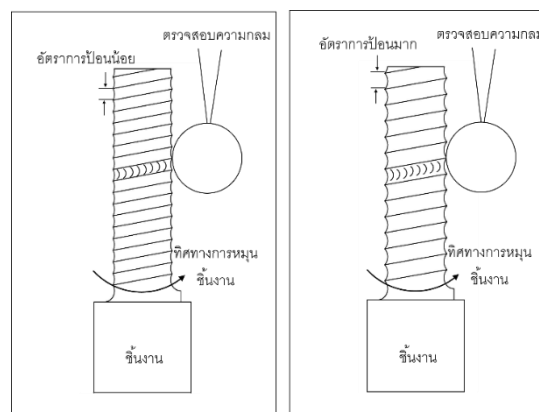
พื้นที่การตัดที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้แรงตัดพลวัตมีขนาดเพิ่มสูงมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.12 ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ทำให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มอัตราการป้อนตัด จะส่งผลให้จุดสูงสุด-จุดต่ำสุดของผิวชิ้นงาน (Peak-to-Valley) มีขนาดเพิ่มสูงมากขึ้น ส่งผลพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการตรวจสอบมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.13



อัตราป้อนตัด 0.15 มม.

อัตราป้อนตัด 0.25 มม.

รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์แรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความลึกตัด 0.8 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด และการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและการเกิดเศษโลหะ



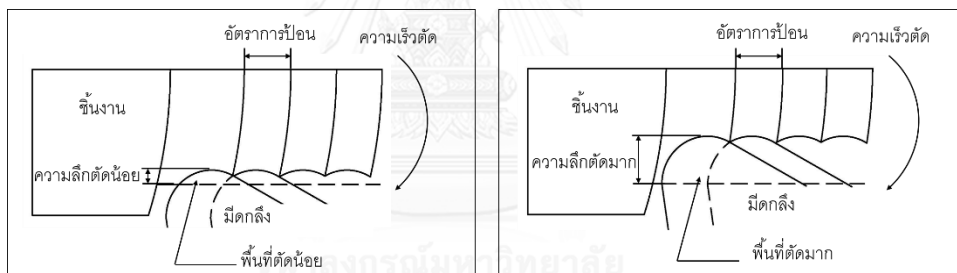
(1) 0.4 มิลลิเมตร

(2) 0.6 มิลลิเมตร

(3) 0.8 มิลลิเมตร

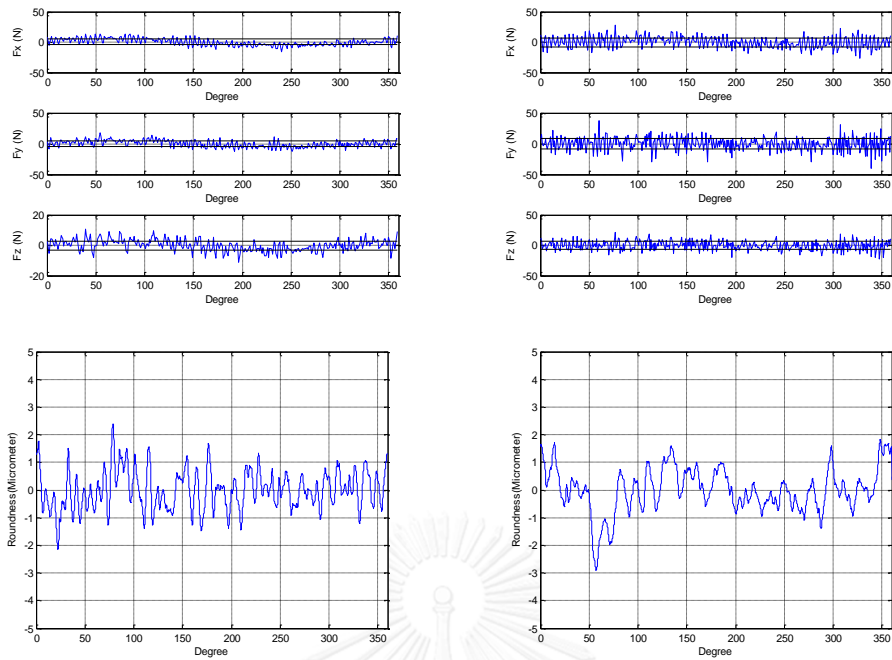
รูปที่ 4.14 การเกิดเศษโลหะเนื่องจากการตัด ความลึกตัด 0.4, 0.6 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากการทำการทดลองพบว่า เมื่อความลึกตัดสูงมากขึ้น ความยาวเศษโลหะมีขนาดสั้นลง เนื่องจากเมื่อความลึกตัดสูงมากขึ้น เศษโลหะจะมีความกว้าง และความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะ จึงเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าการใช้ความลึกตัดที่ต่ำกว่า แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การเพิ่มพื้นที่การตัด เมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้น

เมื่อพื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น จากการเพิ่มความลึกตัด พื้นที่การตัดที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลให้แรงตัดพลวัตเพิ่มสูงมากขึ้นโดยเฉพาะแรงตัดรัศมี (F_x) และแรงป้อนตัด (F_y) แสดงดังรูปที่ 4.16 ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ความลึกตัด 0.4 มม.

ความลึกตัด 0.8 มม.

รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์แรงตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

4.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีจุมุกมีดและการเกิดเศษโลหะ



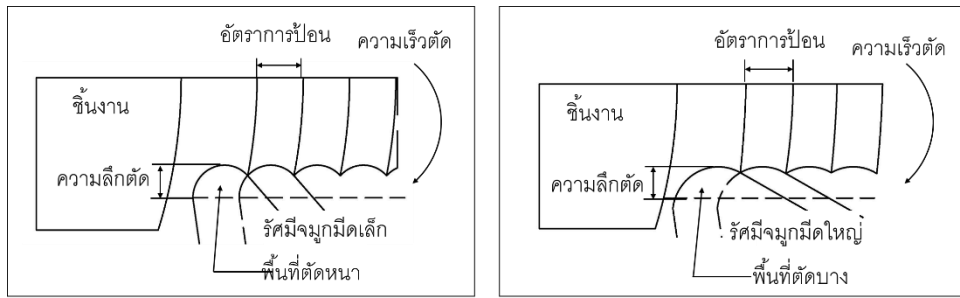
(1) 0.4 มิลลิเมตร



(2) 0.8 มิลลิเมตร

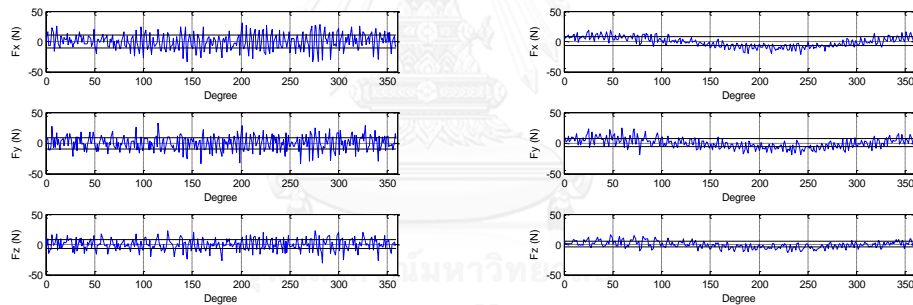
รูปที่ 4.17 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด รัศมีจุมุกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากการทำการทดลองพบว่า เมื่อรัศมีจุมุกมีดมีขนาดใหญ่มากขึ้น เศษโลหะมีที่เกิดขึ้นจะมีความยาวต่อเนื่อง เนื่องจากการใช้รัศมีจุมุกมีดที่มีขนาดเล็ก จะส่งผลให้เศษโลหะมีความหนา เมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะ จึงทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายมากกว่า จึงส่งผลให้เศษโลหะเมื่อรัศมีจุมุกมีดมีขนาดเล็กจึงมีขนาดความยาวที่สั้นมากกว่า แสดงดังรูปที่ 4.18

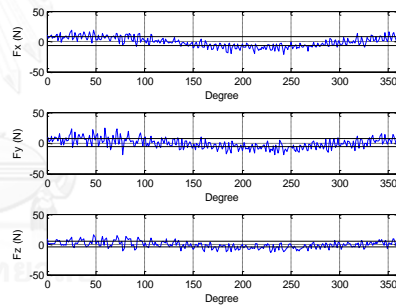


รูปที่ 4.18 ความหนาของเศษโลหะและรัศมีจุมุกมีด

การใช้รัศมีจุมุกมีดที่มีขนาดเล็กในขณะที่เงื่อนไขการตัดอื่นๆ ยังคงเดิม ความหนาของเศษโลหะเพิ่มมากขึ้น พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้แรงตัดเพิ่มสูงมากขึ้น เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.19-4.20 การใช้รัศมีจุมุกมีดที่มีขนาดใหญ่จะช่วยลดรอยป้อนตัด (Feed Mark) ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เมื่อทำการตรวจสอบความกลม ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จึงมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.21



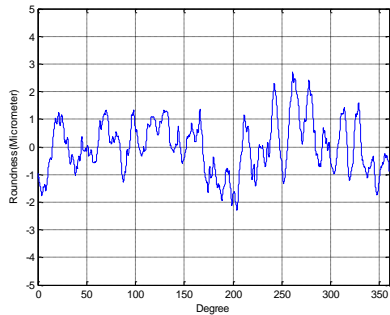
รัศมีจุมุกมีด 0.4 มม.



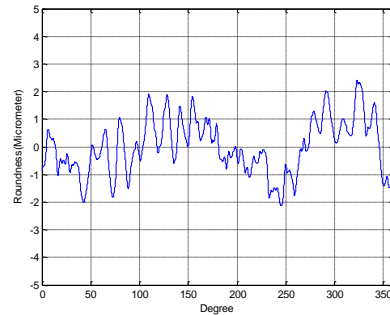
รัศมีจุมุกมีด 0.8 มม.

รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์แรงตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม.

รัศมีจุมุกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

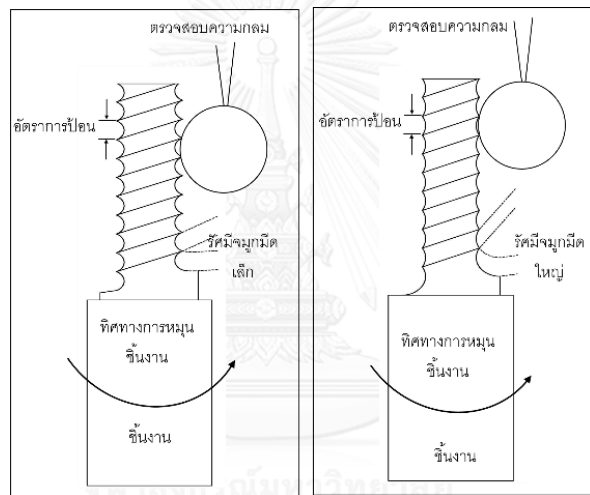


รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม.



รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มม.

รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงรัศมีจุ่มกมิต และการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

4.6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมคายเศษโลหะและการเกิดเศษโลหะ



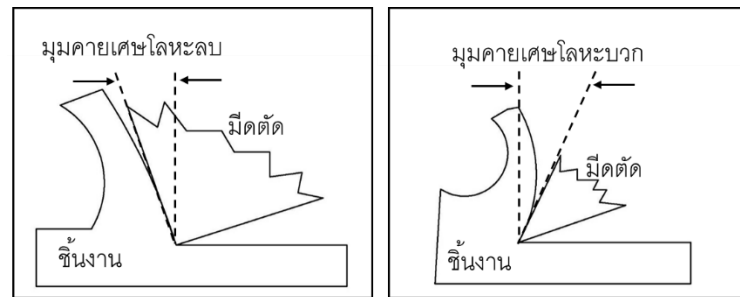
(1) มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



(2) มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

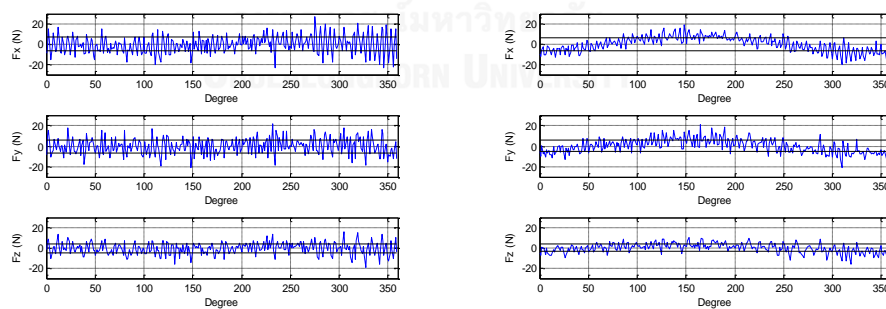
รูปที่ 4.22 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม.

จากการทำการทดลองพบว่า เมื่อมุมคายเศษโลหะที่มีค่ามากกว่า เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะมีความยาวต่อเนื่องมากกว่า เนื่องจากมุมคายเศษโลหะที่มีค่าบวกเศษโลหะที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนตัวผ่านหน้ามีดตัดออกไปได้ดีกว่ามุมคายเศษโลหะที่มีค่าลบ เศษโลหะที่เกิดขึ้นจึงมีความยาวต่อเนื่อง



รูปที่ 4.23 มุมคายเศษโลหะ และการเกิดเศษโลหะ

เมื่อพิจารณาแรงตัด มุมคายเศษโลหะที่มีค่าบวกจะช่วยลดแรงในการตัด ทำให้การสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงานมีขนาดลดลง จึงทำให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อใช้มุมคายเศษโลหะที่มีค่าบวกมีค่าน้อยกว่าการใช้มุมคายเศษโลหะที่มีค่าลบ แสดงดังรูปที่ 4.24-4.25

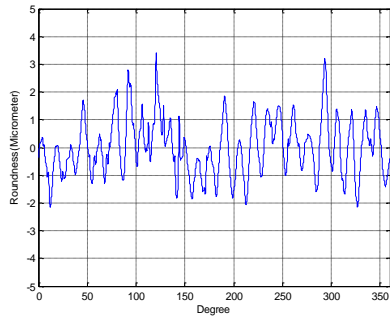


มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

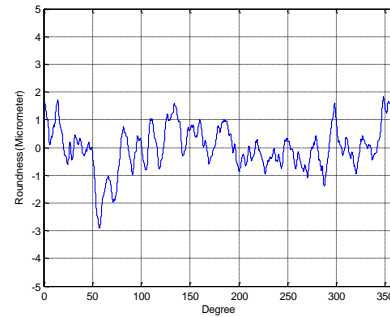
มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.24 การวิเคราะห์แรงตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม.

ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.



มูมคายนเคษโลหะ -6 องศา

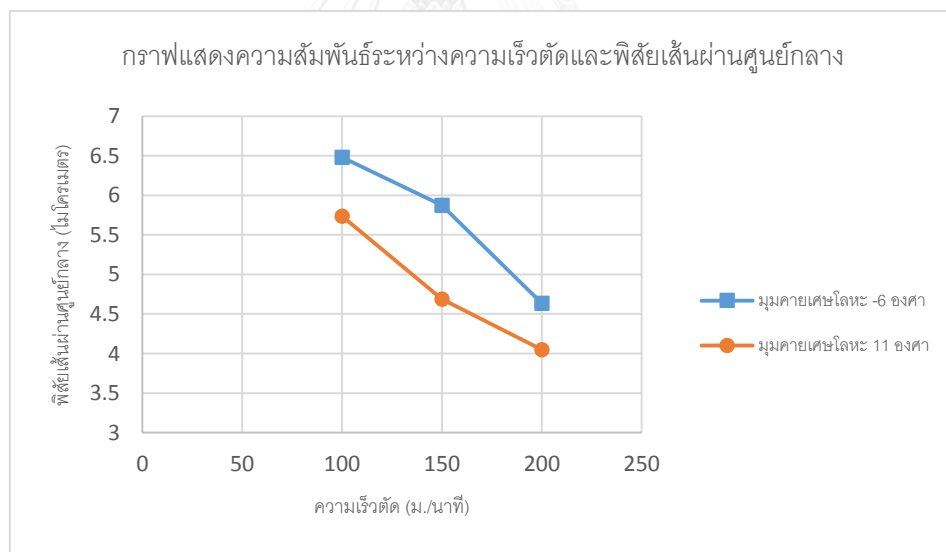


มูมคายนเคษโลหะ 11 องศา

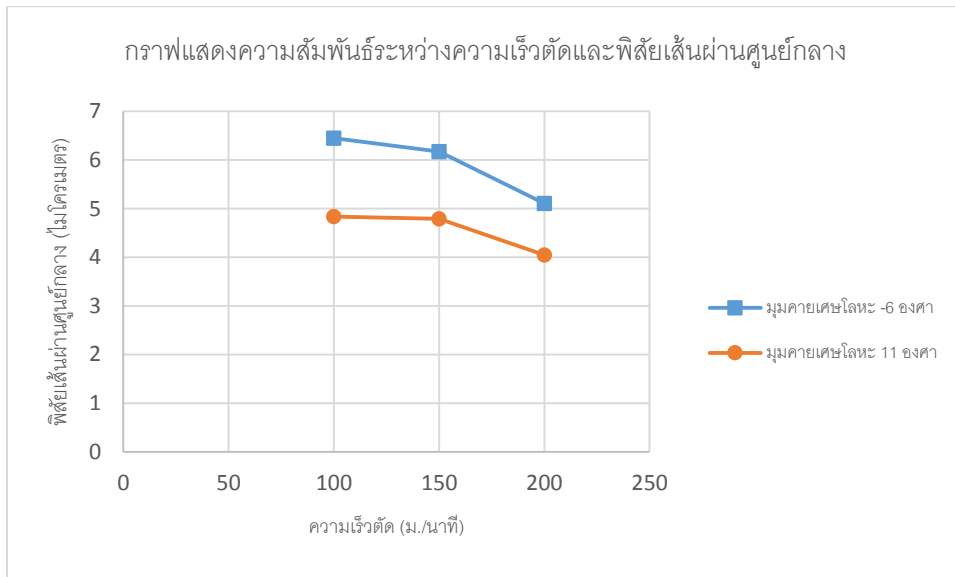
รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที
อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด อัตราส่วนของแรง และพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

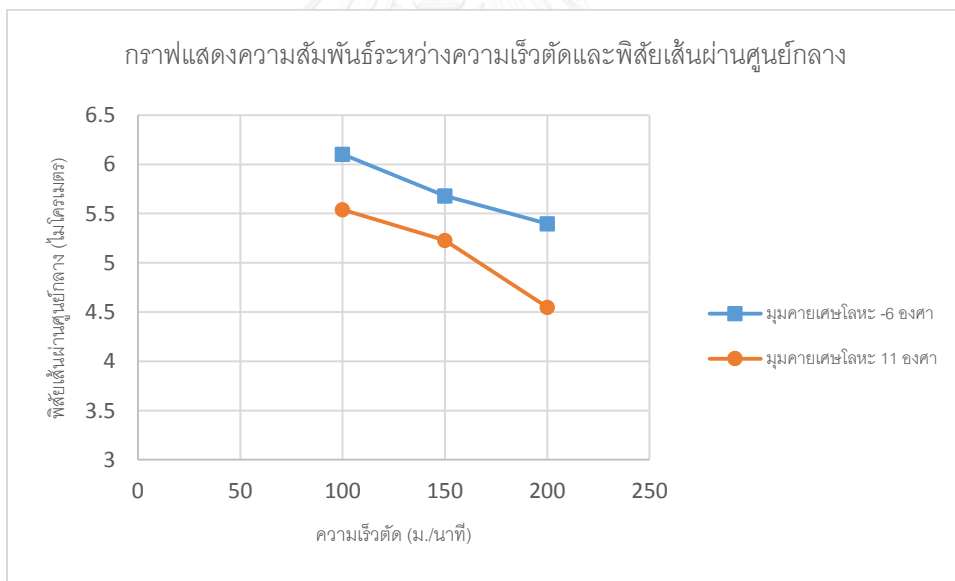
4.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง



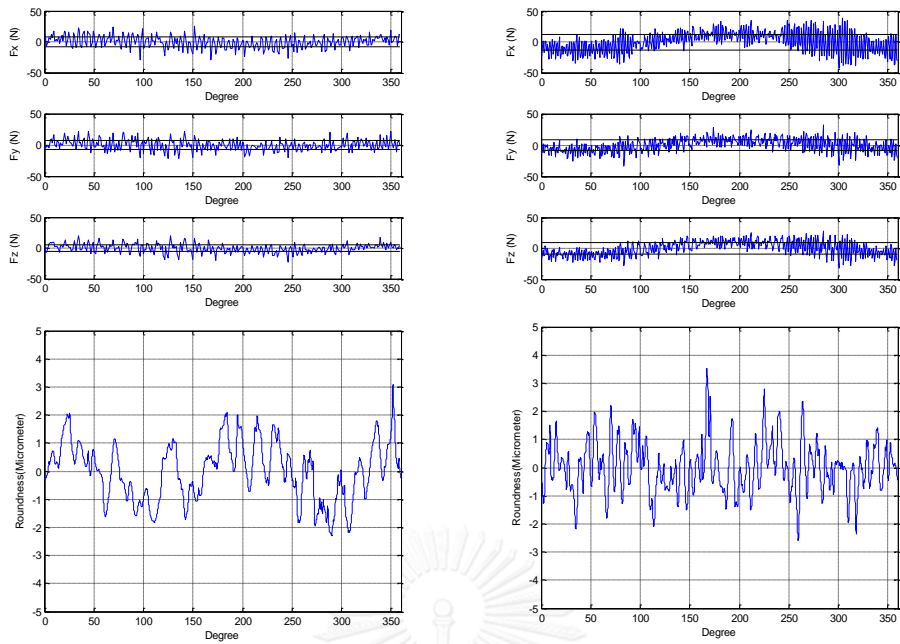
รูปที่ 4.26 เงื่อนไขการตัด มูมคายนเคษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม.
ความลึกตัด 0.4 มม. และอัตราป้อนตัด 0.15 มม.



รูปที่ 4.27 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.
ความลึกตัด 0.4 มม. และอัตราป้อนตัด 0.20 มม.



รูปที่ 4.28 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.
ความลึกตัด 0.6 มม. และอัตราป้อนตัด 0.2 มม.

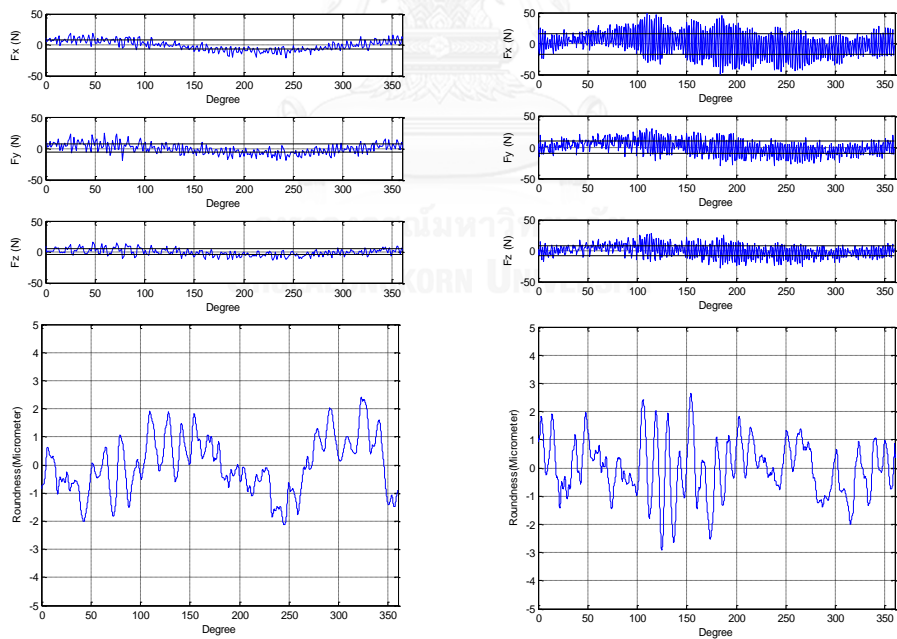


ความเร็วตัด 200 ม./นาที

ความเร็วตัด 100 ม./นาที

รูปที่ 4.29 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม.

ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



ความเร็วตัด 200 ม./นาที

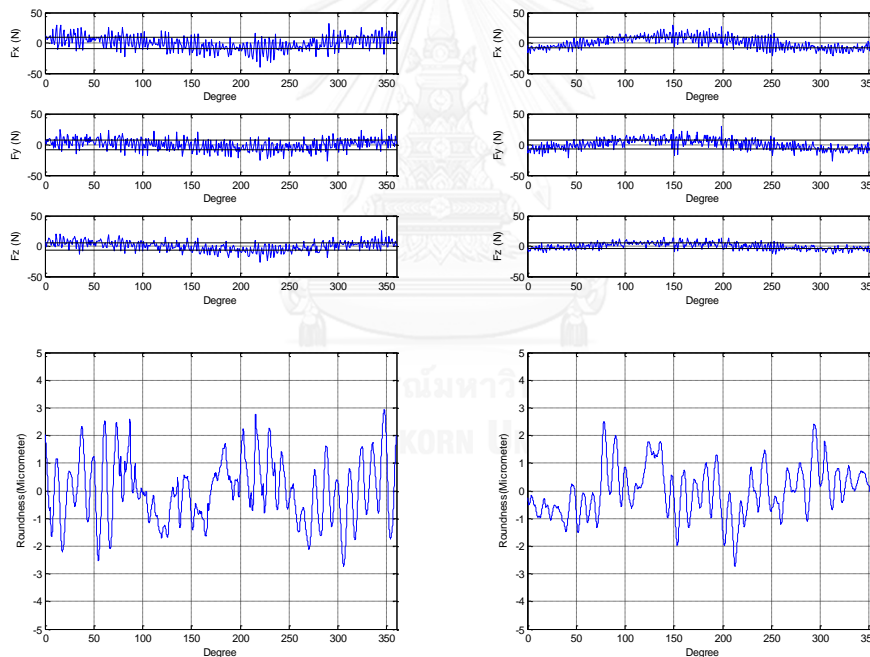
ความเร็วตัด 100 ม./นาที

รูปที่ 4.30 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.2 มม.

ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากรูปที่ 4.26-4.28 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วตัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มสูงมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดสูงมากขึ้น วัสดุจึงมีความอ่อนนุ่มลง จึงใช้แรงในการตัดน้อยกว่า ตัวอย่างผลการทดลองในกระบวนการตัดแสดงดังรูปที่ 4.29-4.30 แรงตัดรัศมีพลวัต (F_x) แรงป้อนตัดพลวัต (F_y) และแรงตัดหลักพลวัต (F_z) มีค่าลดลงเมื่อความเร็วตัดเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาโมดูลคาบพิเศษโลหะ จากผลการทดลองพบว่าโมดูลคาบพิเศษโลหะที่เป็นบวก จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้น สามารถเคลื่อนตัวออกได้สะดวกมากกว่า และความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดน้อยกว่า จึงทำให้แรงตามแนวแกนมีขนาดลดลงโดยเฉพาะแรงตัดหลักพลวัต (F_z) เมื่อใช้โมดูลคาบพิเศษโลหะที่เป็นบวก ส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มีค่าดีกว่าโมดูลคาบพิเศษโลหะที่เป็นลบ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.31

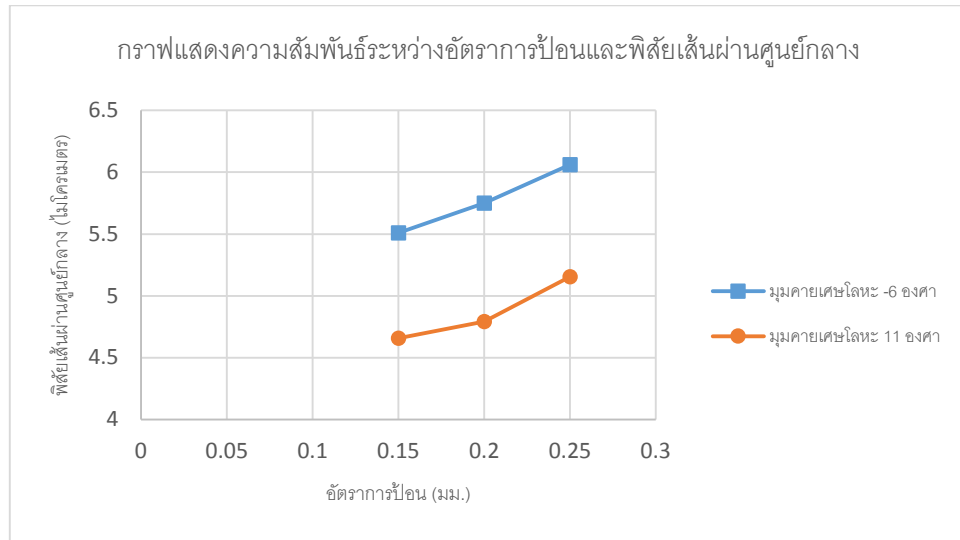


โมดูลคาบพิเศษโลหะ -6 องศา

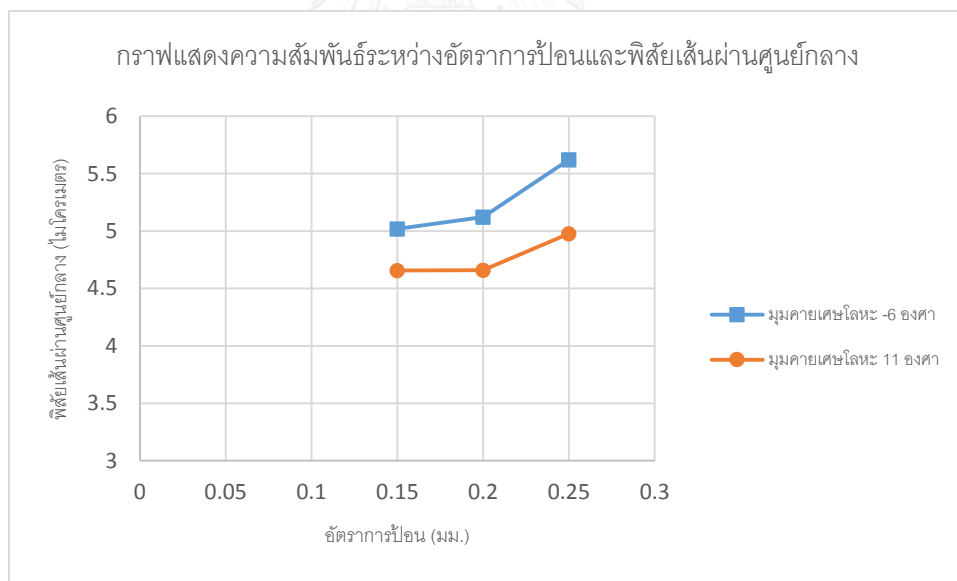
โมดูลคาบพิเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.31 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./นาที
อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.

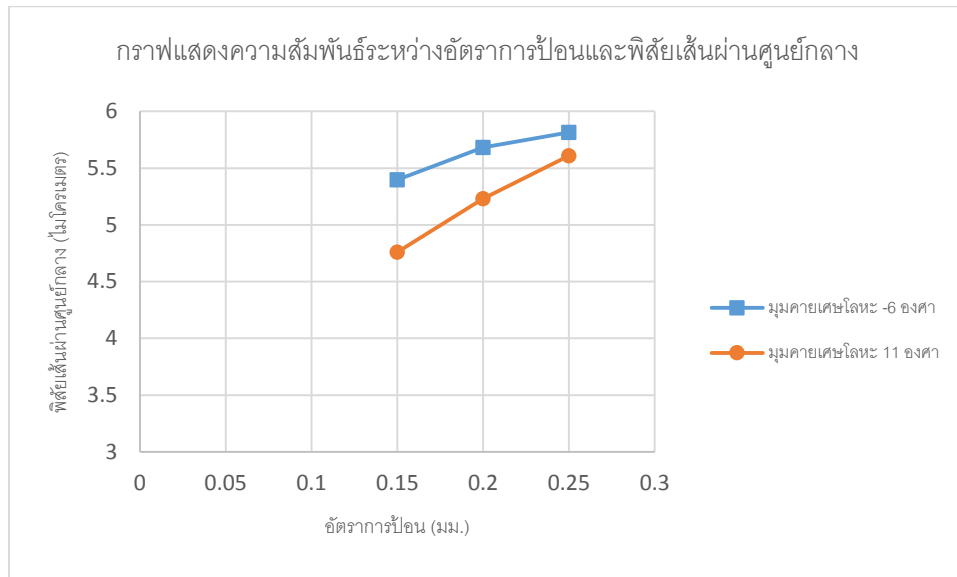
4.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูปที่ 4.32 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุ่มมีด 0.8 มม.
ความลึกตัด 0.4 มม. และความเร็วตัด 100 ม./นาที

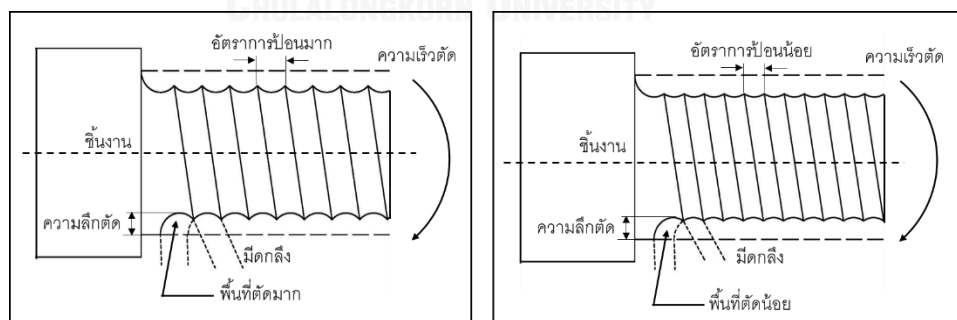


รูปที่ 4.33 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุ่มมีด 0.8 มม.
ความลึกตัด 0.4 มม. และความเร็วตัด 150 ม./นาที

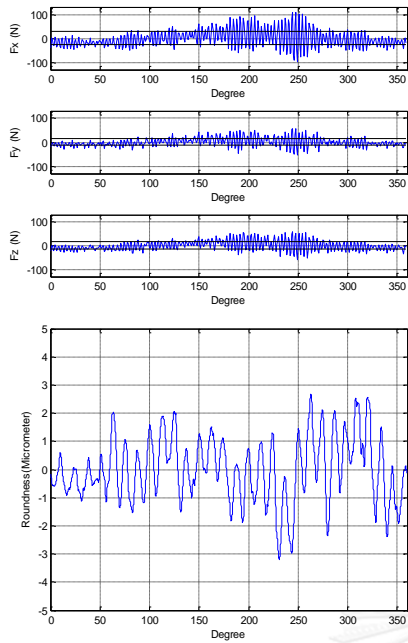


รูปที่ 4.34 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. และความเร็วตัด 150 ม./นาที

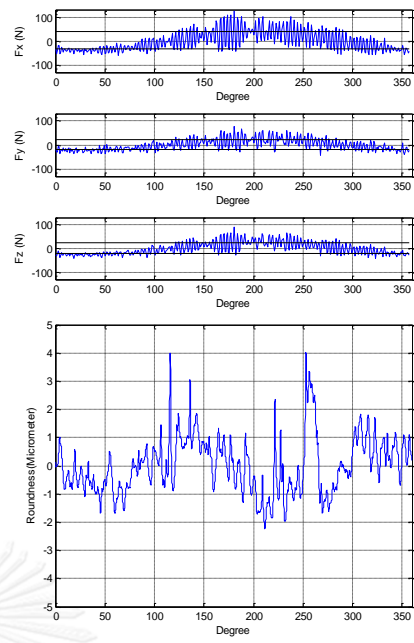
จากรูปที่ 4.32-4.34 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความลึกตัดคงเดิม จะทำให้พื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.35 ส่งผลให้แรงพลวัตทั้งสามแกนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.36-4.37 จากแรงตัดที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้เครื่องมือตัด และชิ้นงานเกิดการสั่นสะเทือน จึงส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าสูงมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.35 พื้นที่ตัดที่เพิ่มมากขึ้นจากการเพิ่มอัตราการป้อน

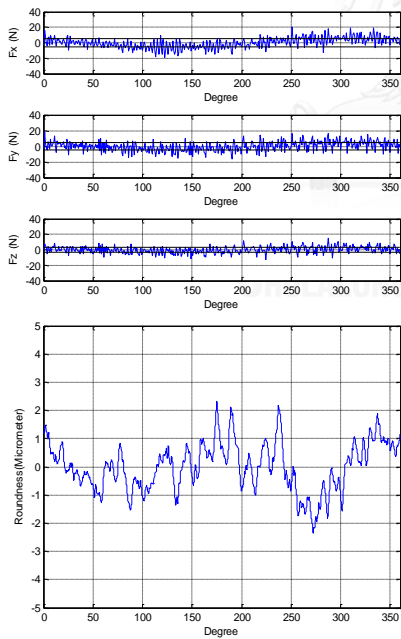


อัตราป้อนตัด 0.15 มม.

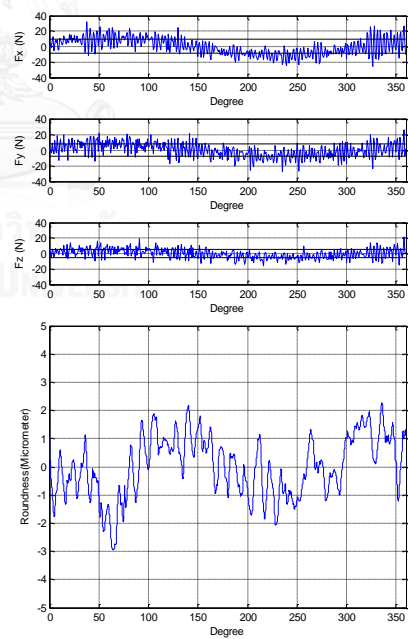


อัตราป้อนตัด 0.25 มม.

รูปที่ 4.36 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./นาที ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

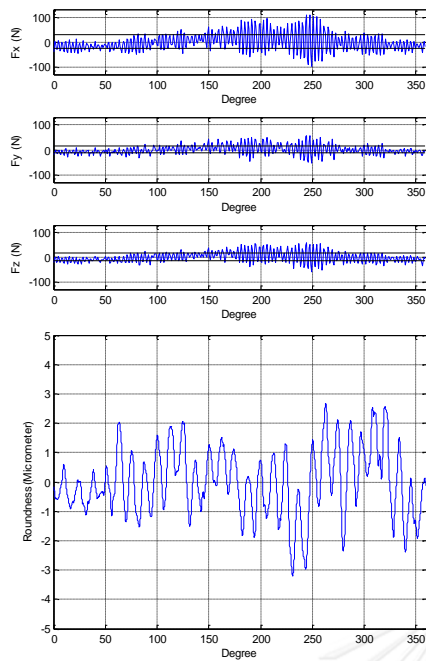


อัตราป้อนตัด 0.15 มม.

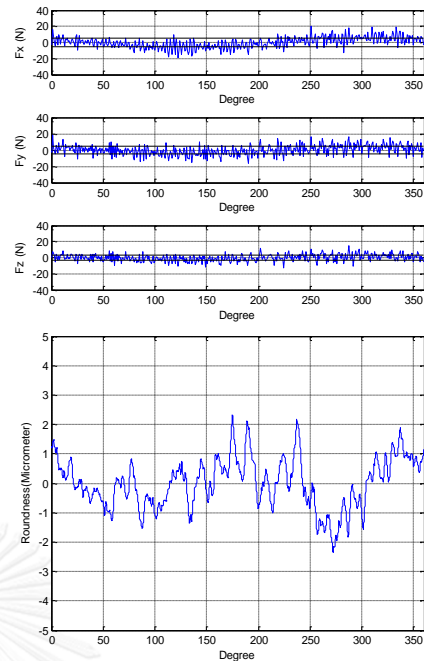


อัตราป้อนตัด 0.25 มม.

รูปที่ 4.37 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./นาที ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

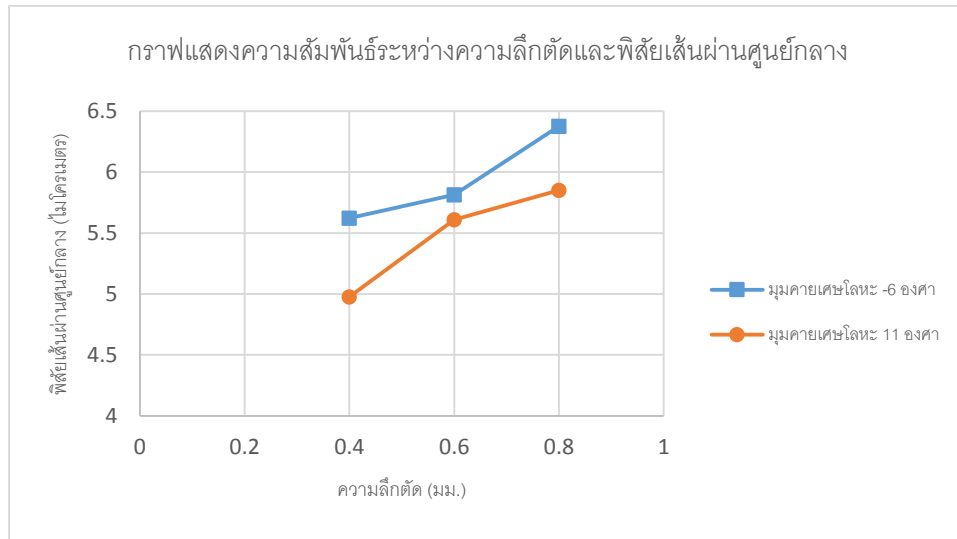


มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

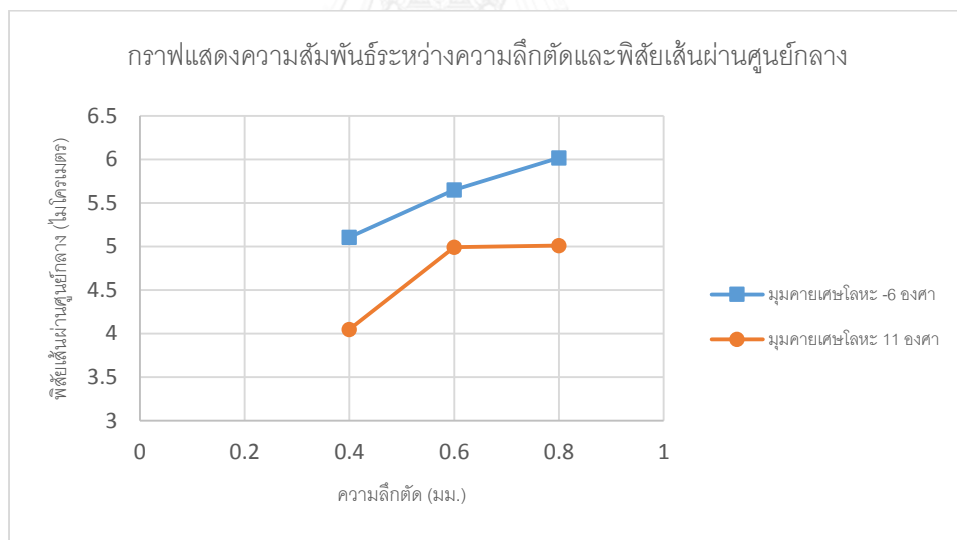
รูปที่ 4.38 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในระบบการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 150 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุ่มมีด 0.4 มม.

เมื่อพิจารณามุมคายเศษโลหะ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและความกลมจากรูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่ามุมคายเศษโลหะที่เป็นบวก จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนตัวออกได้สะดวกมากกว่า และความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดน้อยกว่า จึงทำให้ส่งผลให้แรงตัดพลวัตทั้งสามแกนมีค่าลดลง พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจึงน้อยกว่ามุมคายเศษโลหะที่เป็นลบ

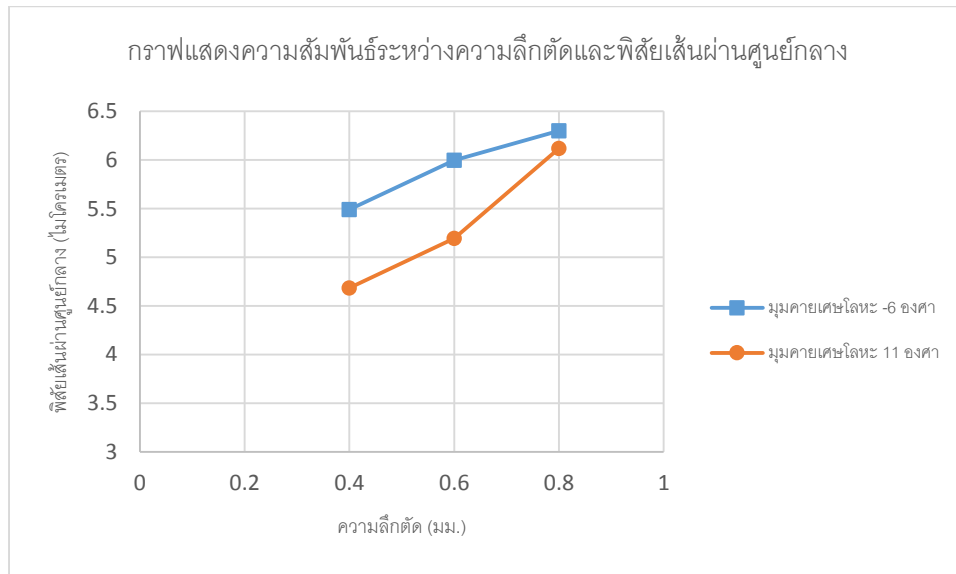
4.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูปที่ 4.39 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.
อัตรากรรป้อน 0.25 มม. และความเร็วตัด 150 ม./นาที

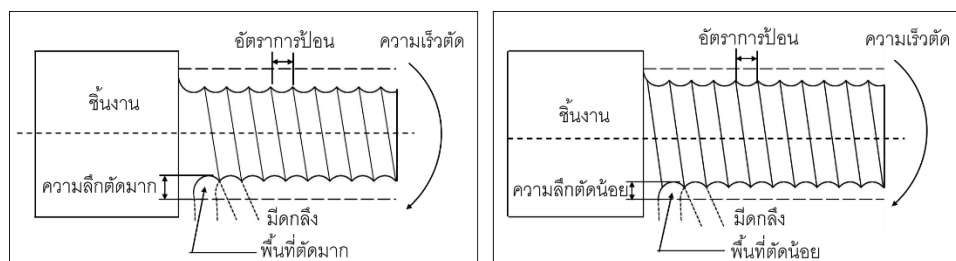


รูปที่ 4.40 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.
อัตรากรรป้อน 0.2 มม. และความเร็วตัด 200 ม./นาที

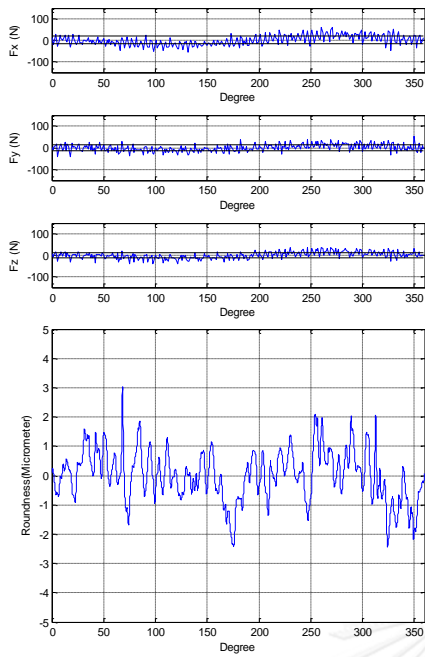


รูปที่ 4.41 เงื่อนไขการตัด มุมคายเศษโลหะ -6 และ +11 องศา รัศมีจุ่มมีด 0.4 มม. อัตราการป้อน 0.25 มม. และความเร็วตัด 200 ม./นาที

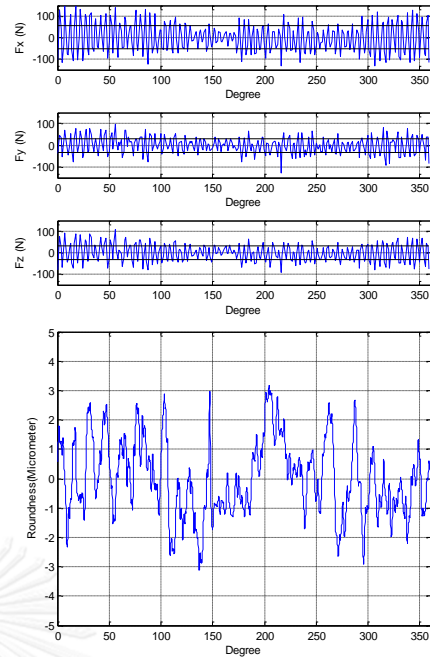
จากรูปที่ 4.39-4.41 แสดงความสัมพันธ์ของความลึกตัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่าเมื่อความลึกตัดเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนและความเร็วตัดคงเดิม จะทำให้พื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.42 ส่งผลให้แรงตัดพลวัตมีค่าเพิ่มมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.43-4.44 เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน โดยการเพิ่มความลึกตัดเป็นการเพิ่มพื้นที่ตัดในทิศทางเดียวกับแรงรัศมีแสดงดังรูปที่ 4.45 จึงส่งผลให้เมื่อเพิ่มความลึกตัดแรงตัดรัศมีพลวัต (F_x) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มีค่าสูงมากขึ้นตามไปด้วย จากผลการทดลองนี้ช่วยยืนยันให้เห็นว่าแรงรัศมีพลวัต (F_x) เป็นแรงตัดที่มีอิทธิพลต่อพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.42 พื้นที่การตัดที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความลึกตัด



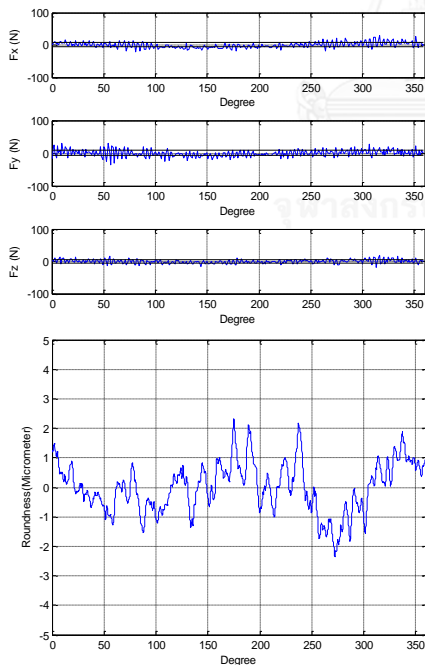
ความลึกตัด 0.4 มม.



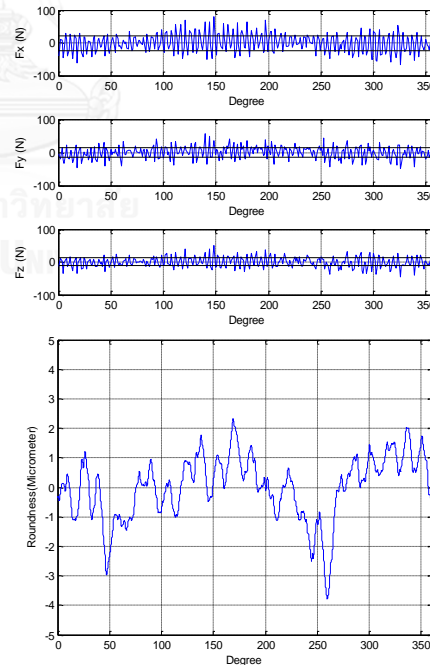
ความลึกตัด 0.8 มม.

รูปที่ 4.43 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที

อัตราป้อนตัด 0.25 มม. รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



ความลึกตัด 0.4 มม.

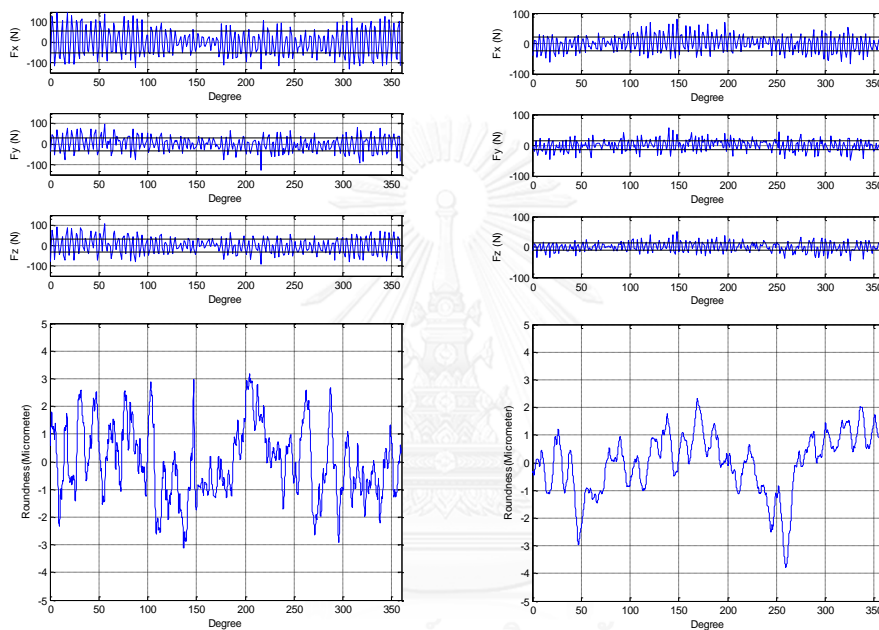


ความลึกตัด 0.8 มม.

รูปที่ 4.44 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที

อัตราป้อนตัด 0.25 มม. รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

เมื่อพิจารณามุมคายพิเศษเฉพาะ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามุมคายพิเศษเฉพาะที่มีค่าเป็นบวก เศษโลหะสามารถเคลื่อนตัวออกได้โดยง่าย ส่งผลให้แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดลง แต่แรงตัดรัศมี (F_x) ยังคงมีค่ามากกว่าแรงป้อนตัด (F_y) เนื่องจากการเพิ่มความลึกตัดเป็นการพื้นที่ตัดซึ่งส่งผลต่อแรงรัศมีพลวัต จากการใช้มุมคายพิเศษเฉพาะที่มีค่าเป็นบวกช่วยให้แรงตัดที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้มุมคายพิเศษเฉพาะที่มีค่าเป็นลบ ผิวชิ้นงานที่ได้จึงออกมาดี ส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่ามุมคายพิเศษเฉพาะที่เป็นลบ



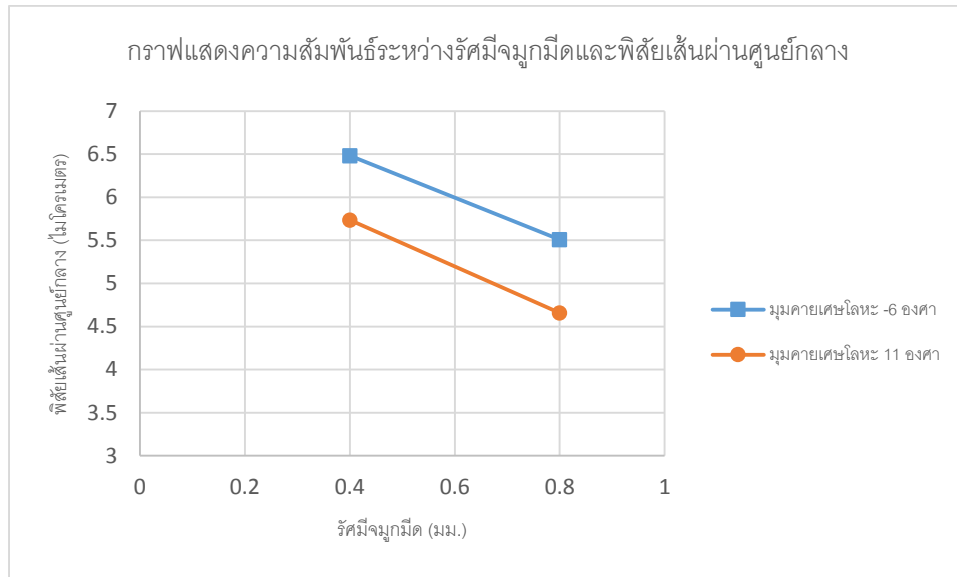
มุมคายพิเศษเฉพาะ -6 องศา

มุมคายพิเศษเฉพาะ 11 องศา

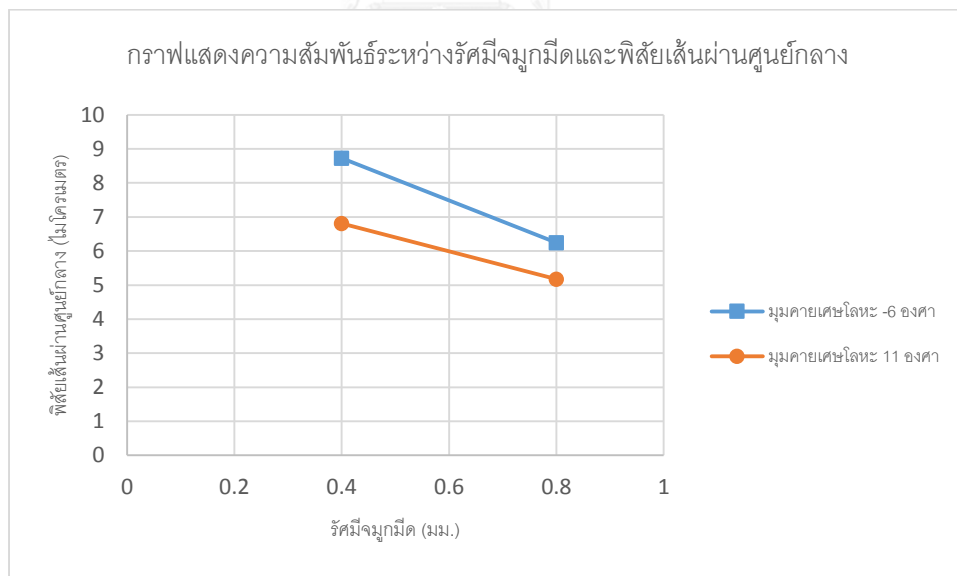
รูปที่ 4.45 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 200 ม./นาที

อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุ่มมิต 0.4 มม.

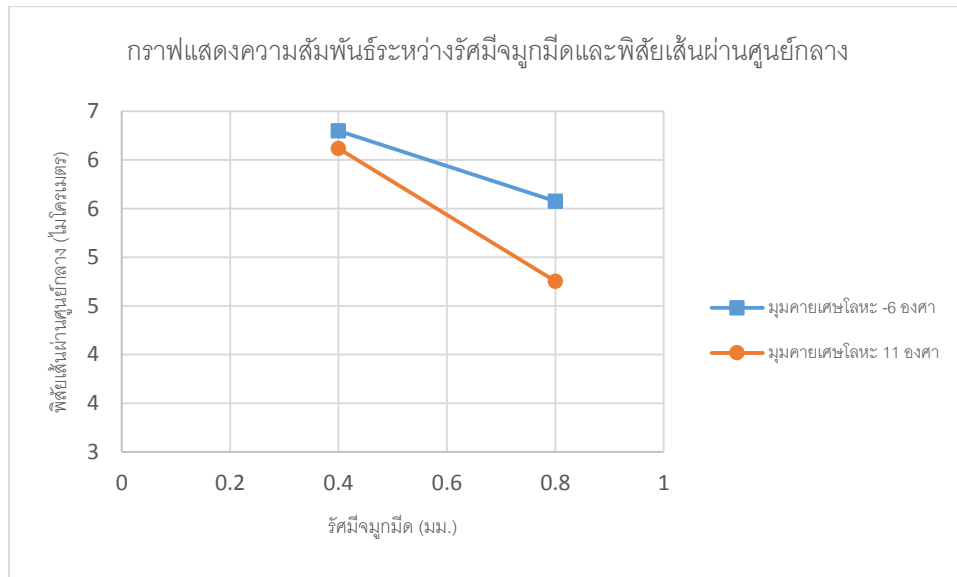
4.7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีจุมุกมิดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูปที่ 4.46 เงื่อนไขการตัด มุมคายนะ -6 และ +11 องศา ความลึกตัด 0.4 มม.
อัตราการป้อน 0.15 มม. และความเร็วตัด 100 ม./นาที

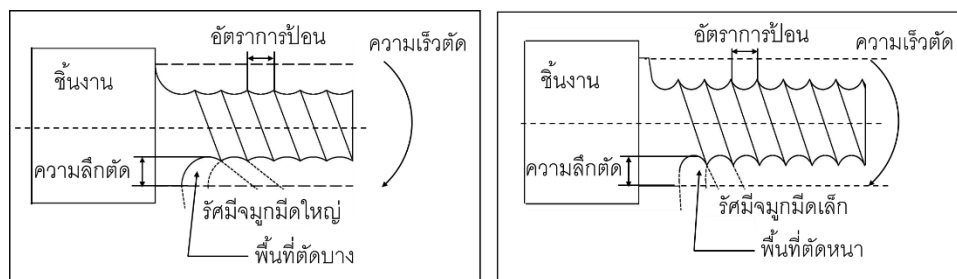


รูปที่ 4.47 เงื่อนไขการตัด มุมคายนะ -6 และ +11 องศา ความลึกตัด 0.8 มม.
อัตราการป้อน 0.15 มม. และความเร็วตัด 100 ม./นาที

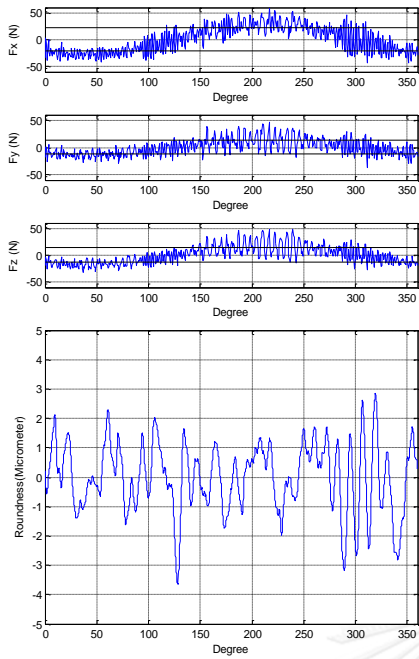


รูปที่ 4.48 เงื่อนไขการตัด มุมคายพิเศษโลหะ -6 และ +11 องศา ความลึกตัด 0.8 มม. อัตราการป้อน 0.25 มม. และความเร็วตัด 200 ม./นาที

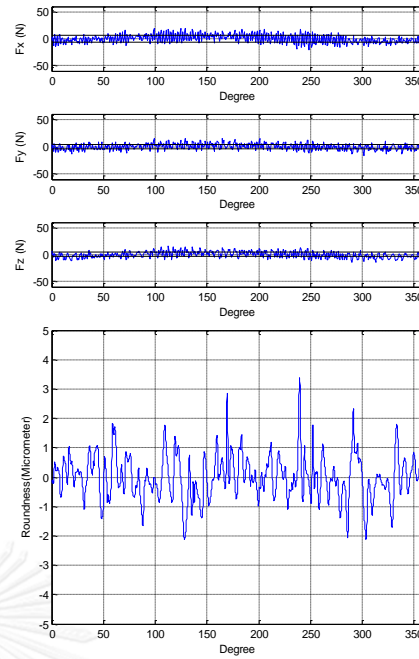
จากรูปที่ 4.46-4.48 แสดงความสัมพันธ์ของรัศมีจุมกมิดเงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่า เมื่อรัศมีจุมกมิดมีขนาดใหญ่มากขึ้น ในขณะที่เงื่อนไขการตัดอื่นๆ คงเดิม ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยลง เนื่องจากการใช้รัศมีจุมกมิดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้พื้นที่การตัดลดลง ส่งผลให้แรงตัดพลวัตมีค่าลดลง เกิดการสั่นสะเทือนน้อยลง และการใช้รัศมีจุมกมิดที่มีขนาดใหญ่จะช่วยลดรอยตัดที่เกิดจากการป้อนตัดที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.49 จึงทำให้ผิวมีความเรียบมากขึ้น ส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง ความสัมพันธ์ของรัศมีจุมกมิดและแรงตัดพลวัตดังรูปที่ 4.50-4.51



รูปที่ 4.49 อิทธิพลของรัศมีจุมกมิดที่มีต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน



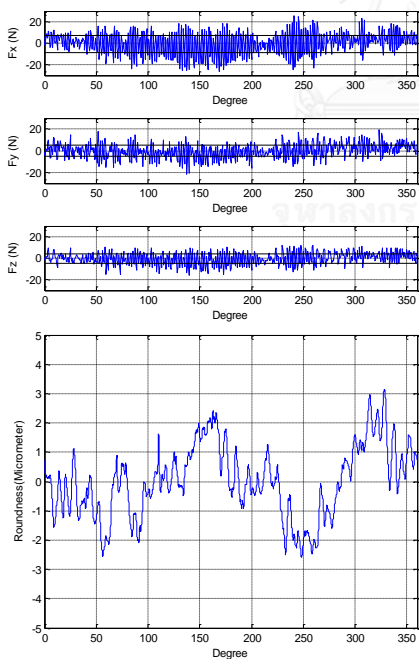
รัศมีจุ่มมีด 0.4 มม.



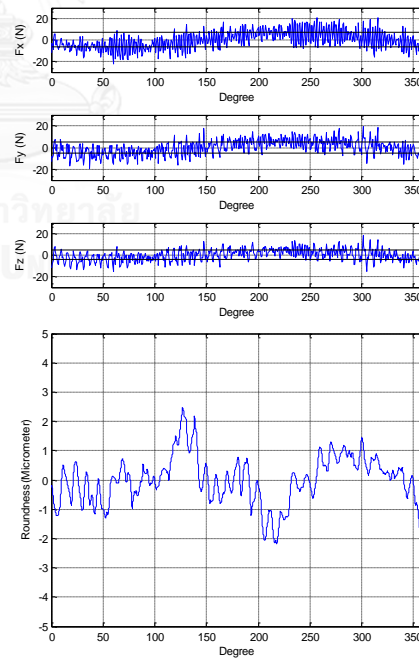
รัศมีจุ่มมีด 0.8 มม.

รูปที่ 4.50 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที

อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



รัศมีจุ่มมีด 0.4 มม.

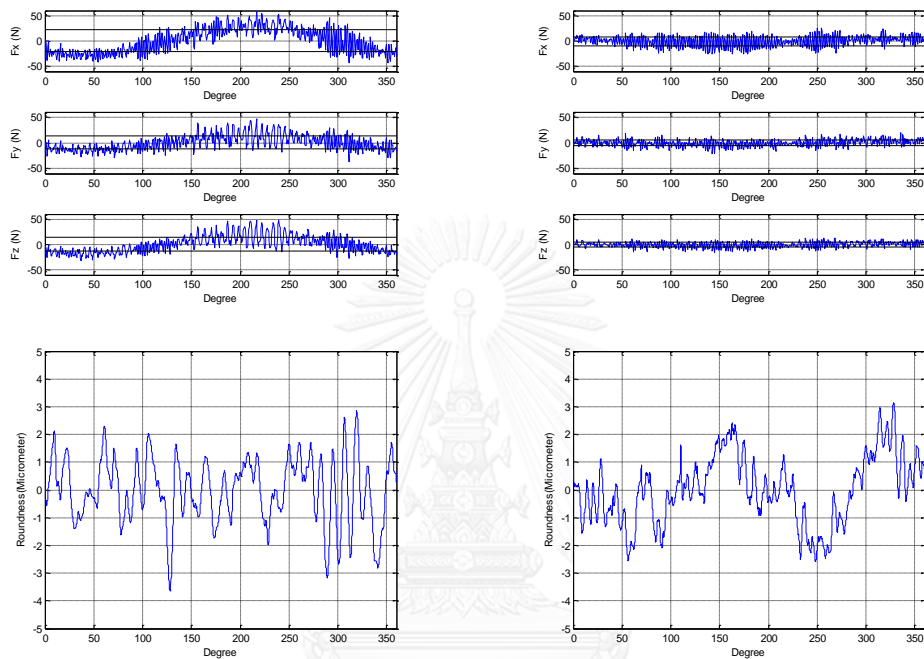


รัศมีจุ่มมีด 0.8 มม.

รูปที่ 4.51 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที

อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

เมื่อพิจารณาโมเมนต์ของเศษโลหะ โมเมนต์ของเศษโลหะที่มีค่าเป็นบวก จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนตัวออกได้โดยง่าย เกิดการต้านทานที่มีค่าน้อย แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์เศษโลหะค่าลบ ผิวที่ได้ของโมเมนต์เศษโลหะที่มีค่าบวกจึงมีค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง



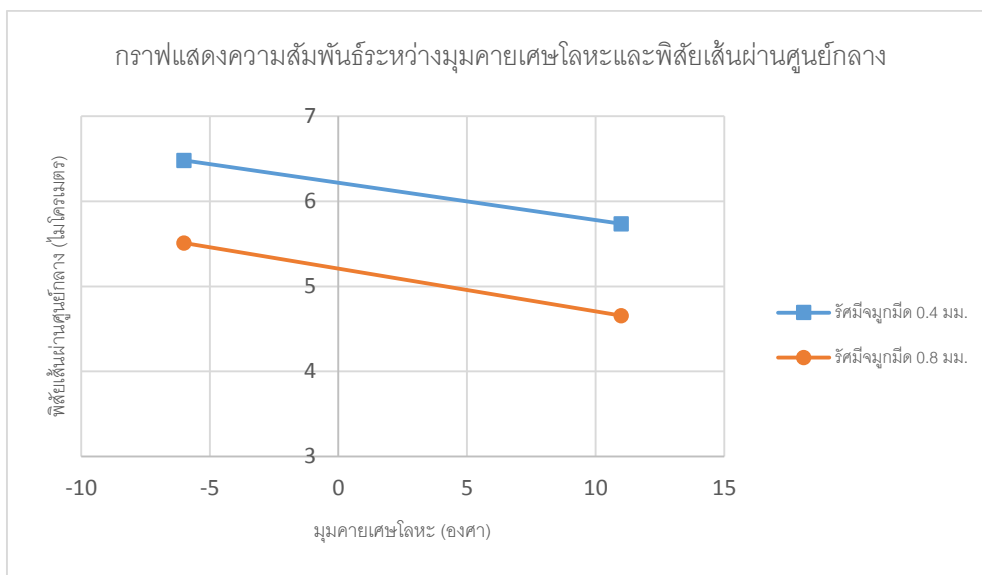
โมเมนต์เศษโลหะ -6 องศา

โมเมนต์เศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.52 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที

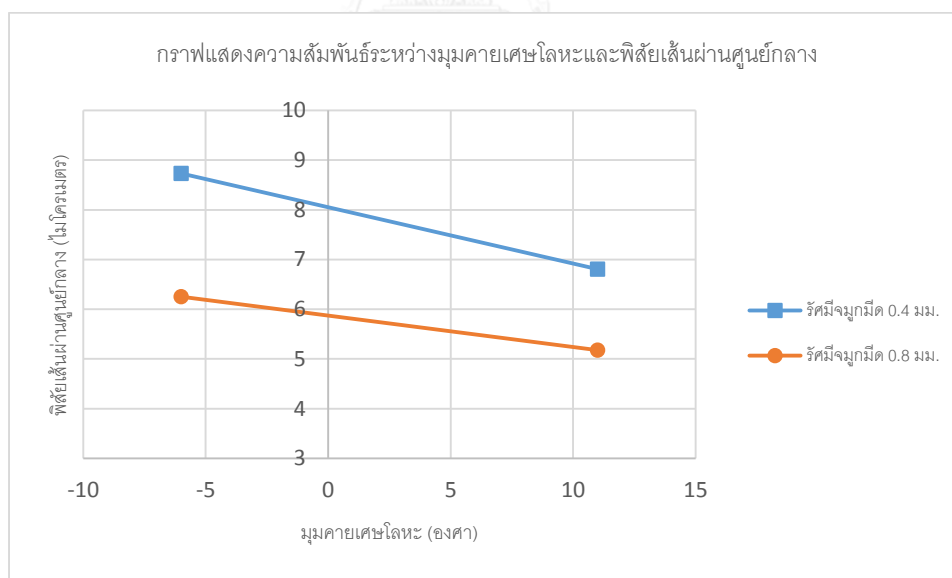
อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจมูกมีด 0.4 มม.

4.7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมคายเศษโลหะและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง



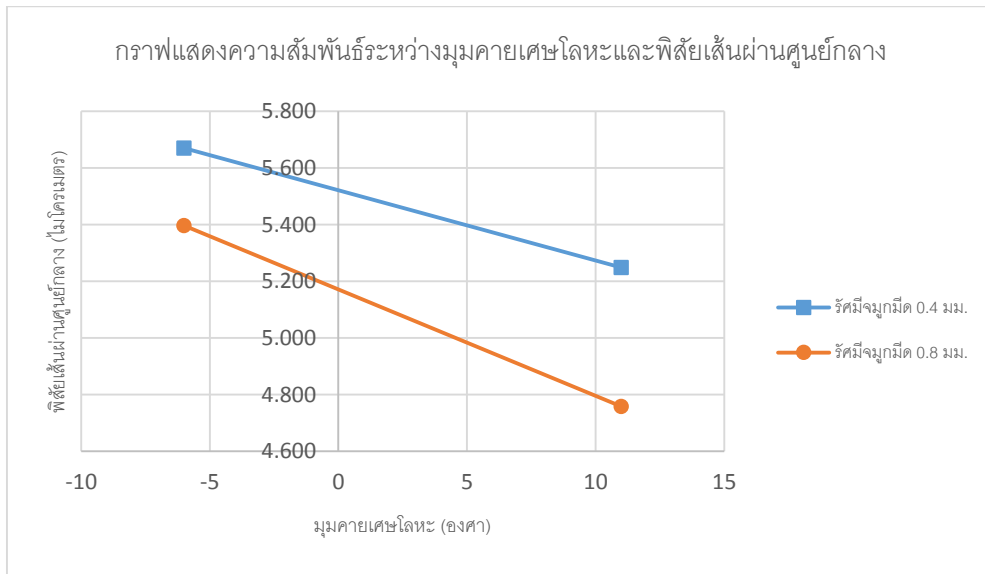
รูปที่ 4.53 เงื่อนไขการตัด รัศมีจุ่มมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. อัตราการป้อน 0.15 มม.

และความเร็วตัด 100 ม./นาที

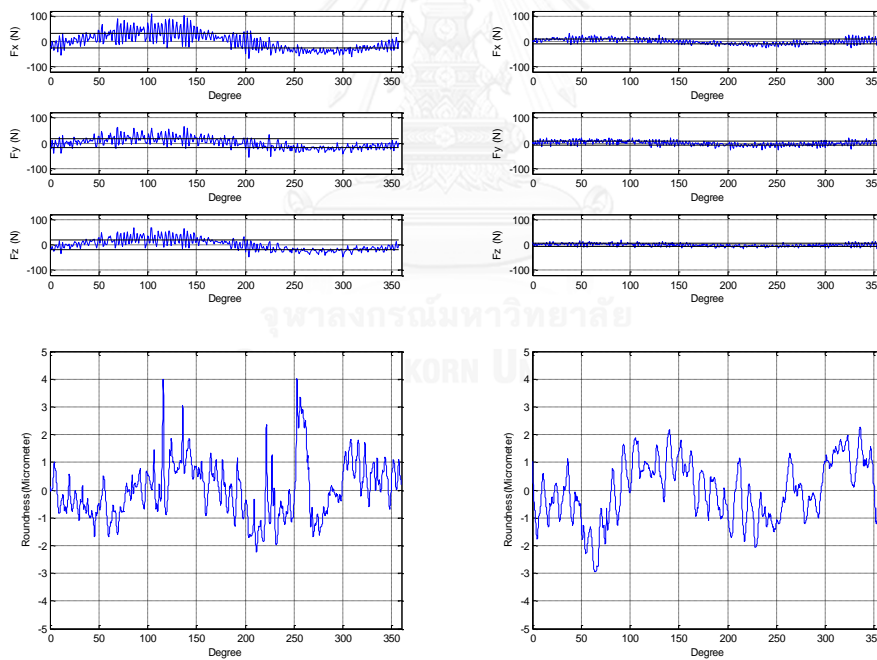


รูปที่ 4.54 เงื่อนไขการตัด รัศมีจุ่มมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. อัตราการป้อน 0.15 มม.

และความเร็วตัด 100 ม./นาที



รูปที่ 4.55 เงื่อนไขการตัด รัศมีจุมุมมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. อัตราการป้อน 0.15 มม. และความเร็วตัด 150 ม./นาที



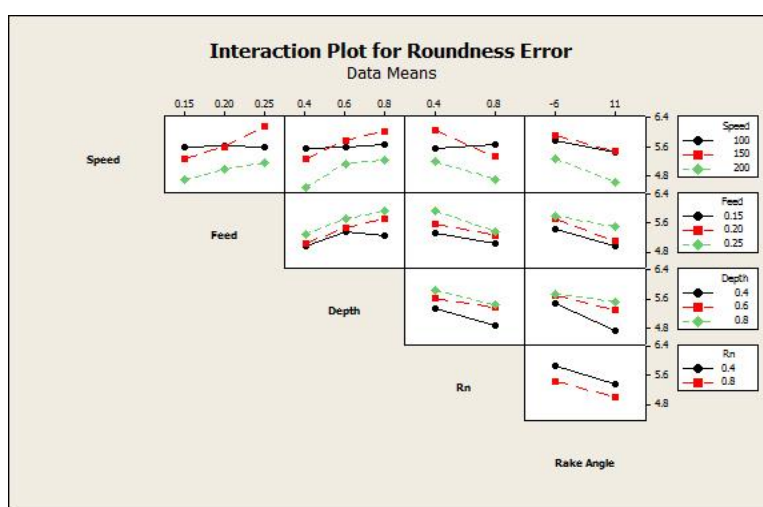
มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.56 ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด ณ เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.

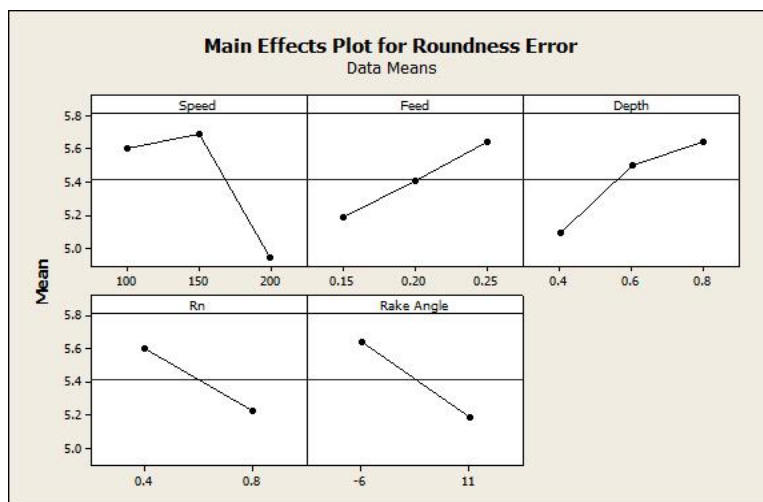
จากรูปที่ 4.53-4.55 แสดงความสัมพันธ์ของมุมคายเศษโลหะที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่า มุมคายของเศษโลหะที่มีค่ามากขึ้น ในขณะที่รัศมีจุมุกมีด และเงื่อนไขการตัดอื่นๆ คงเดิม จะทำให้เศษโลหะเคลื่อนตัวออกได้ง่าย ด้านการเคลื่อนที่ของมีดตัดน้อย แสดงดังรูปที่ 4.23 แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยกว่ามุมคายเศษโลหะค่าลบ แสดงดังรูปที่ 4.56 ผิวที่ได้ของมุมคายเศษโลหะที่มีค่าสูงขึ้นจึงมีค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 4.57 กราฟอันตรกิริยาระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

กราฟอันตรกิริยาระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ที่ระดับของแต่ละปัจจัย หากเส้นกราฟที่เกิดขึ้นประมาณได้ว่าขนานกันจะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันของแต่ละปัจจัย แต่หากเส้นกราฟที่เกิดขึ้นไม่ขนานกันจะบ่งบอกถึงการมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของแต่ละปัจจัย จากรูปที่ 4.57 แสดงให้เห็นว่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่เกิดขึ้นบนระดับของความเร็วตัดมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับของปัจจัยอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าความเร็วตัดมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทดลอง ได้แก่ อัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีจุมุกมีด และมุมคายเศษโลหะ แต่เมื่อกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆ คงเดิมและทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัดก็พบว่า เมื่อความเร็วตัดที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง แสดงว่าความเร็วตัดมีผลอย่างมีนัยสำคัญ



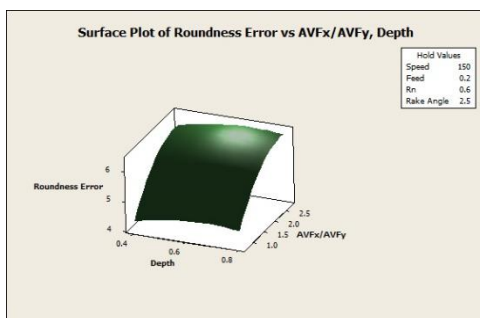
รูปที่ 4.58 ผลหลัก (Main effect) ของพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 4.58 ผลหลักของพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

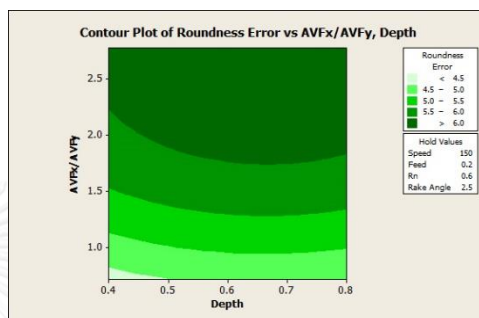
- 1) ความเร็วตัดเพิ่มสูงมากขึ้นจะทำให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วดัดทำให้คุณสมบัติการตัดเพิ่มสูงมากขึ้น วัสดุอ่อนนุ่ม แรงตัดลดลง จึงส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าลดลง
- 2) อัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เนื่องจากการการเพิ่มอัตราการป้อนตัดทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น แรงตัดเพิ่มขึ้น เกิดการสั่นสะเทือนที่มีดัดและชิ้นงาน พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจึงเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้การเพิ่มอัตราการป้อนตัดส่งผลต่อเรขาคณิตการตัดทำให้เกิดรอยป้อนตัดที่มีสันสูงขึ้น จึงส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการตรวจสอบมีขนาดเพิ่มสูงมากขึ้น
- 3) ความลึกตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เนื่องจากการการเพิ่มความลึกตัดทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น แรงตัดเพิ่มขึ้น เกิดการสั่นสะเทือนที่มีดัดและชิ้นงาน จึงส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเพิ่มสูงขึ้น
- 4) รัศมีจุมกมีดเพิ่มขึ้นจะทำให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดรัศมีจุมกมีดจะทำให้พื้นที่การตัดลดลง แรงตัดลดลง จึงมีส่วนช่วยในการปรับปรุงขนาดพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

- 5) มุมคายพิเศษโลหะเพิ่มขึ้นจะทำให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากการเพิ่มมุมคายพิเศษโลหะจะช่วยลดการต้านทานการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ ส่งผลให้แรงตัดลดลง ขนาดพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

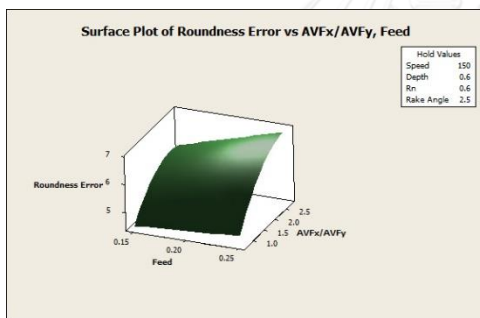
4.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง แรงตัด และเงื่อนไขการตัดด้วยพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) และเส้นโครงร่าง (Contour plot)



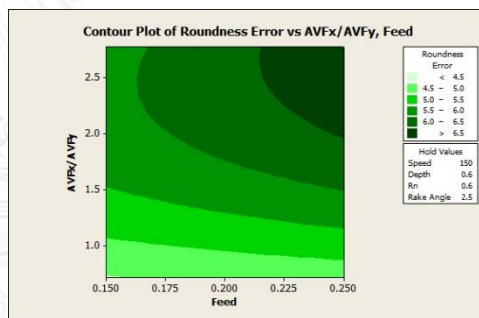
(ก)



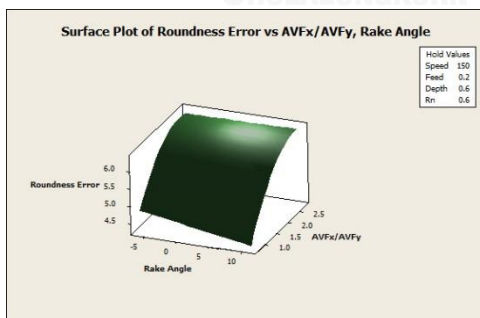
(ข)



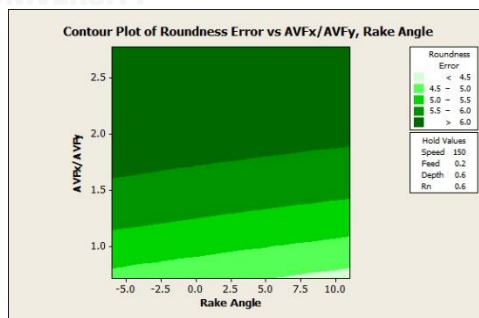
(ค)



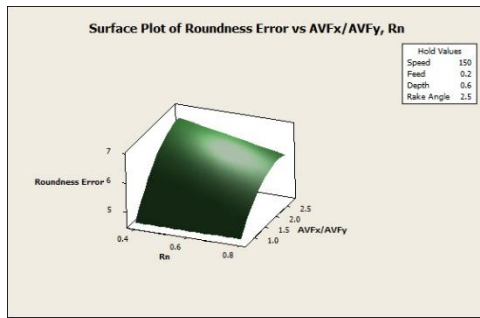
(ง)



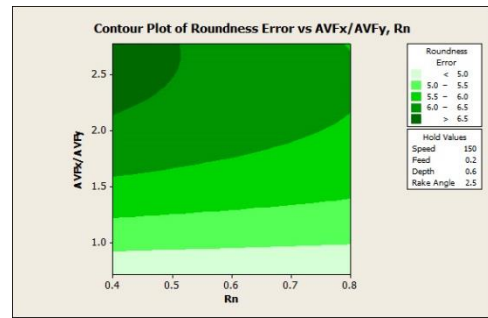
(จ)



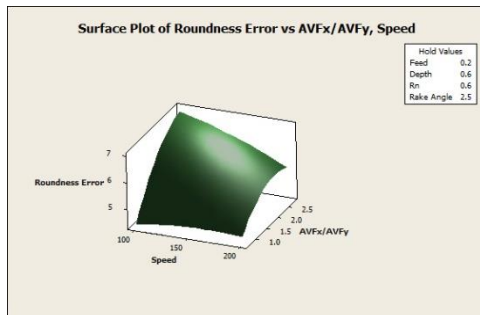
(ฉ)



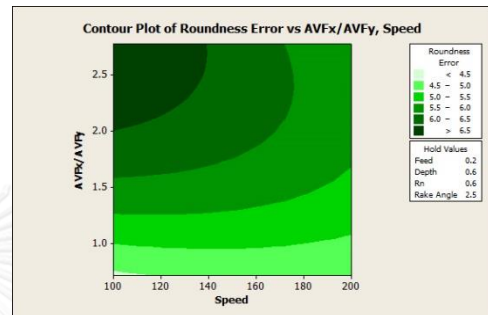
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

พื้นผิวผลตอบ

เส้นโครงร่าง

รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราส่วนแรงตัด และเงื่อนไขการตัด

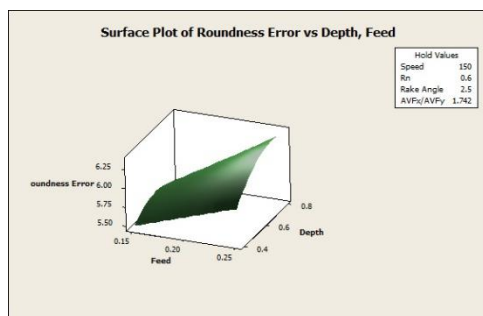
จากรูปที่ 4.59 แสดงพื้นผิวผลตอบและเส้นโครงร่าง ของความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราส่วนแรงตัด และเงื่อนไขการตัด จากรูป 4.59(ก) - 4.59(ข) การเพิ่มความลึกในการตัด ส่งผลให้แรงตัดมีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความลึกตัดจะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มสูงมากขึ้นดังรูปที่ 4.11 จึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในกระบวนการตัด ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจึงมีขนาดเพิ่มขึ้น

ในลักษณะเดียวกันกับอัตราการป้อน จากรูป 4.59(ค) - 4.59(ง) การเพิ่มอัตราการป้อน จะเป็นการเพิ่มพื้นที่การตัด แรงตัดเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และนอกจากแรงตัดแล้ว การเพิ่มอัตราการป้อน ทำให้เกิดเรขาคณิตของการตัดที่ส่งผลให้จุดสูงสุด-จุดต่ำสุดบนผิวชิ้นงานเพิ่มสูงมากขึ้นดังรูปที่ 4.35 จึงทำให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

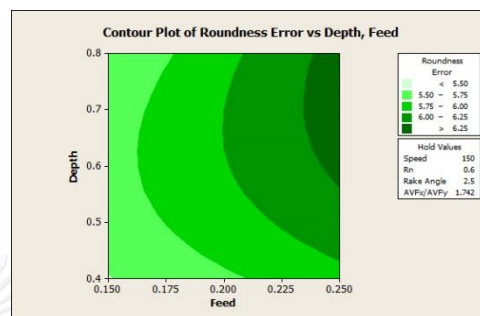
มุมคายเศษโลหะ จากรูป 4.59(จ) - 4.59(ฉ) การใช้มุมคายเศษโลหะที่มีค่ามาก จะมีส่วนช่วยในการลดความต้านทานการเคลื่อนที่ของเศษโลหะดังรูปที่ 4.23 จึงช่วยลดแรงตัดที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

รัศมีจุกมิด จากรูป 4.59(ช) - 4.59(ซ) การเพิ่มขนาดของรัศมีจุกมิด จะทำให้ความหนาของพื้นที่การตัดลดลง แรงตัดลดลง ส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

ความเร็วในการตัด จากรูป 4.59(ณ) - 4.59(ญ) การเพิ่มความเร็วตัด จะทำให้อุณหภูมิการตัดเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุอ่อนนุ่ม แรงตัดจึงลดลง ส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแรงตัดสามารถลดลงได้จากการลดความลึกในการตัด ลดอัตราการป้อน เพิ่มมุมคายเศษโลหะ เพิ่มรัศมีจุ่มกมิด และเพิ่มความเร็วตัด ซึ่งช่วยในการปรับปรุงค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางให้ลดลงได้



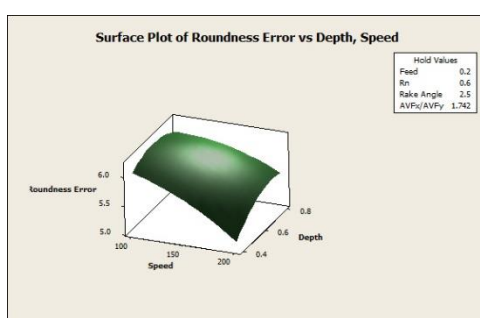
(ก) พื้นผิวผลตอบ



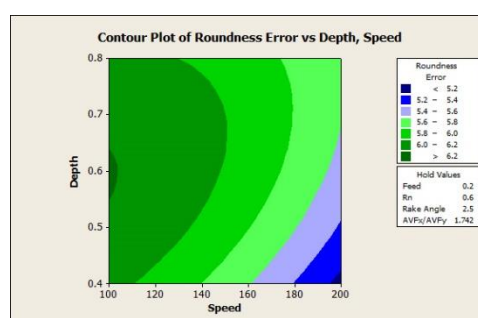
(ข) เส้นโครงร่าง

รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราการป้อน และความลึกตัด

จากรูปที่ 4.60(ก)-4.60(ข) จากเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด จะอยู่ ณ ตำแหน่งที่อัตราการป้อน 0.15 มม. และความลึกตัด 0.4 มม. ในขณะที่เงื่อนไขการตัดอื่นคงเดิม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มความลึกตัดและอัตราการป้อน จะทำให้พื้นที่การตัดเพื่อมากขึ้น ส่งผลให้แรงตัดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในกระบวนการตัด และเรขาคณิตในการตัด ทำให้เกิดรูปร่างผิวของชิ้นงานที่มีจุดสูงสุด-ต่ำสุด จึงส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มสูงขึ้น



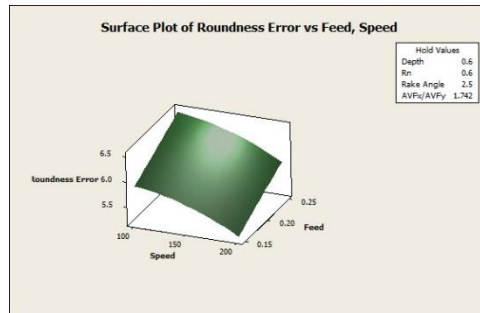
(ก) พื้นผิวผลตอบ



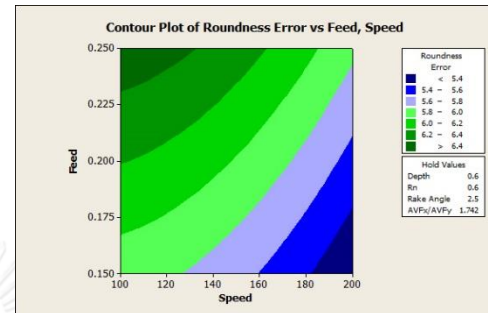
(ข) เส้นโครงร่าง

รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ความเร็วตัด และความลึกตัด

จากรูปที่ 4.61(ก)-4.61(ข) จากเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด จะอยู่ ณ ตำแหน่งความเร็วตัด 200 ม./นาที และความลึกตัด 0.4 มม. เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มสูงมากขึ้น จะทำให้วัสดุอ่อนนุ่มจากอุณหภูมิในการตัด แรงในการตัดลดลง และความลึกตัดลดลง ทำให้พื้นที่ที่ตัดลดลง ส่งผลให้แรงตัดลดลง ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจึงลดลง



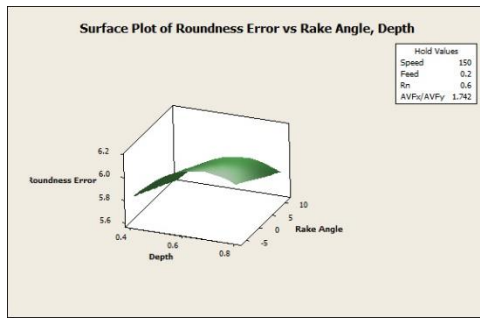
(ก) พื้นผิวผลตอบ



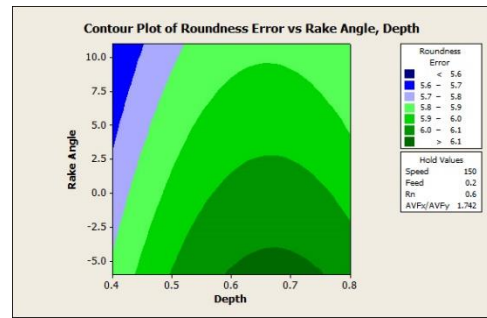
(ข) เส้นโครงร่าง

รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ความเร็วตัด และความลึกตัด

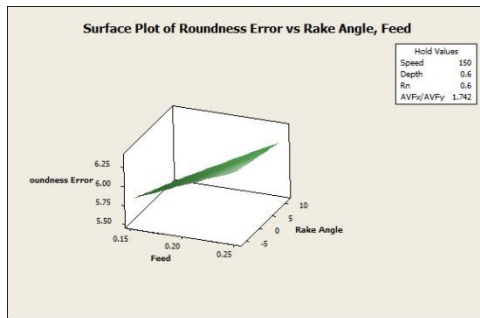
จากรูปที่ 4.62(ก)-4.62(ข) จากเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด จะอยู่ ณ ตำแหน่งความเร็วตัด 200 ม./นาที และอัตราการป้อนตัด 0.15 มม. เนื่องจากการความเร็วตัดที่เพิ่มสูงมากขึ้น จะทำให้วัสดุอ่อนนุ่มจากอุณหภูมิในการตัด แรงในการตัดลดลง และอัตราการป้อนตัดน้อยสุด ทำให้พื้นที่การตัดน้อย แรงตัดลดลง และมีส่วนช่วยในการปรับปรุงเรขาคณิตที่เกิดจากการตัดบนผิวของชิ้นงานที่ส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง



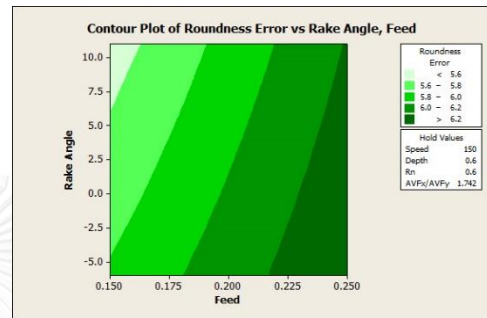
(ก)



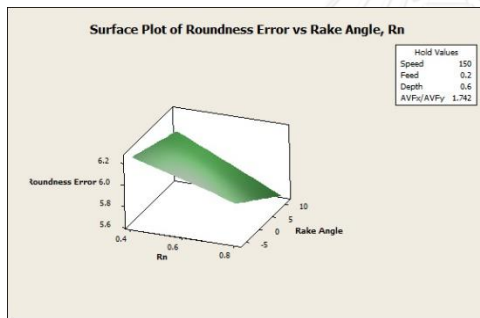
(ข)



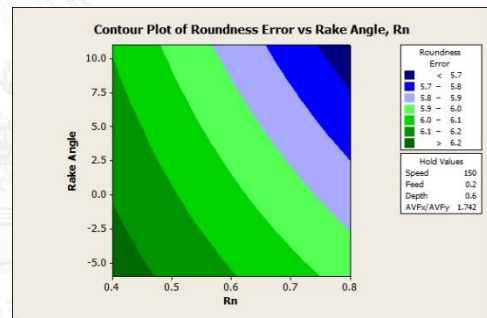
(ค)



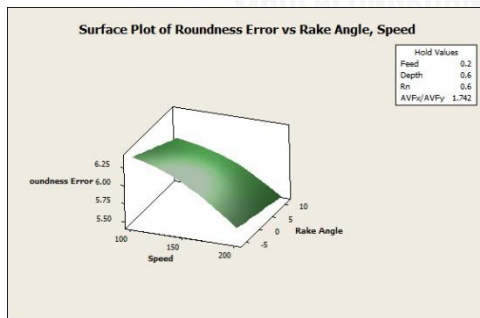
(ง)



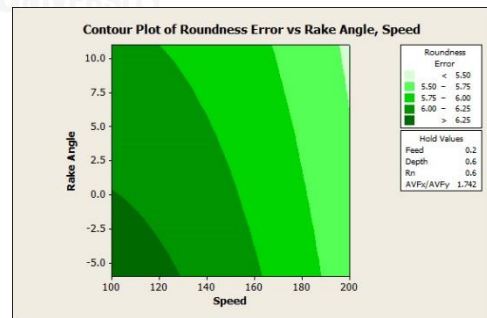
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

พื้นผิวผลตอบ

เส้นโครงร่าง

รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง มุมคายเศษโลหะ และเงื่อนไขการตัด

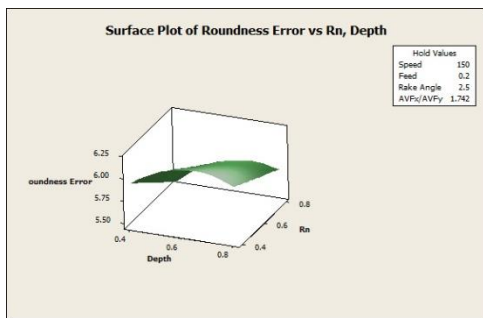
จากรูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง มุมคายพิเศษโลหะ และเงื่อนไขการตัดต่างๆ จากพื้นผิวผลตอพบว่ามีเงื่อนไขการตัดอื่นคงเดิม การเพิ่มมุมคายพิเศษโลหะมากขึ้น จะมีส่วนช่วยทำให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้มุมคายพิเศษโลหะที่มีค่าบวก มีส่วนช่วยในการลดการต้านทานการเคลื่อนที่ของเศษโลหะแรงในการตัดลดลง พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจึงลดลง

รูปที่ 4.63(ก)- 4.63(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง มุมคายพิเศษโลหะ และความลึกตัด จากผลการทดลองค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดได้มาจากการใช้มุมคายพิเศษโลหะที่มีค่าบวก เนื่องจากช่วยลดความต้านทานการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ และความลึกตัดน้อยเพื่อลดพื้นที่การตัด ทำให้แรงตัดลดลง ส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

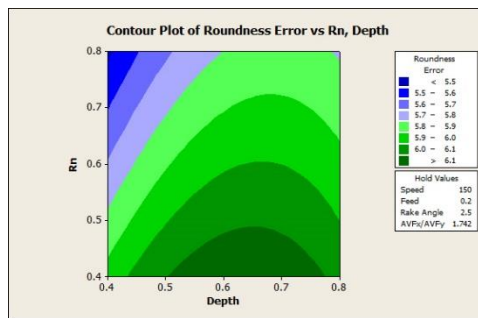
รูปที่ 4.63(ค)- 4.63(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง มุมคายพิเศษโลหะ และอัตราการป้อน จากผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอและเส้นโครงร่าง การปรับปรุงค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางให้มีค่าน้อยสามารถปรับปรุงได้จากการใช้มุมคายพิเศษโลหะที่มีค่าบวก และอัตราการป้อนตัดน้อย เนื่องจากมีส่วนช่วยลดแรงตัด และปรับปรุงคุณภาพผิวของชิ้นงานจากเรขาคณิตของการตัด

รูปที่ 4.63(จ)- 4.63(ฉ) ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง มุมคายพิเศษโลหะ และรัศมีจุมุกมีด จากผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอและเส้นโครงร่าง การปรับปรุงค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางให้มีค่าน้อยสามารถปรับปรุงได้จากการใช้มุมคายพิเศษโลหะที่มีค่าบวก และรัศมีจุมุกมีดที่มีขนาดใหญ่ เพื่อลดพื้นที่การตัดและแรงตัด การใช้รัศมีจุมุกมีดขนาดใหญ่ช่วยลดรอยป้อนตัดที่เกิดขึ้น จึงทำให้จุดสูงสุด-จุดต่ำสุดบนผิวชิ้นงานลดลง ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจึงมีขนาดลดลง

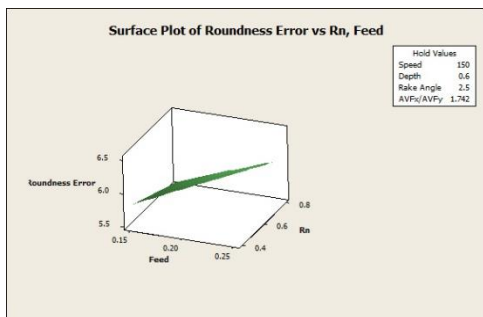
รูปที่ 4.63(ช)- 4.63(ซ) ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง มุมคายพิเศษโลหะและความเร็วตัด จากผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอและเส้นโครงร่าง การปรับปรุงค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางให้มีค่าน้อยสามารถปรับปรุงได้จากการใช้มุมคายพิเศษโลหะที่มีค่าบวก และการเพิ่มความเร็วในการตัด เนื่องจากการใช้มุมคายพิเศษโลหะที่มีค่าบวกช่วยลดความต้านทานการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ และการเพิ่มความเร็วดังกล่าวทำให้วัสดุอ่อนนุ่ม ส่งผลให้ง่ายต่อการตัด แรงตัดลดลง ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจึงมีขนาดลดลง



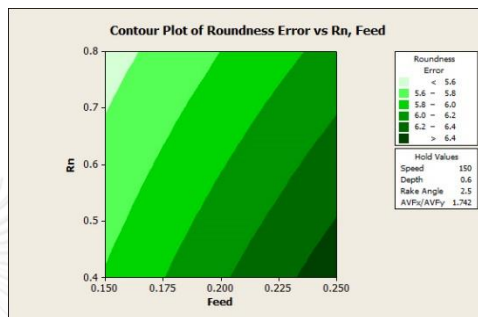
(ก)



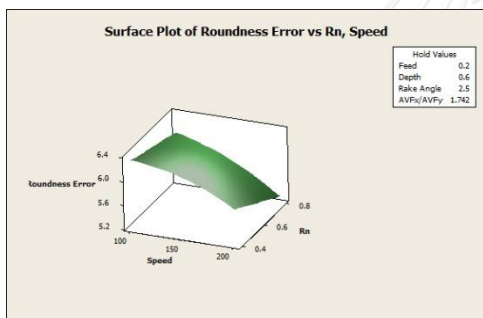
(ข)



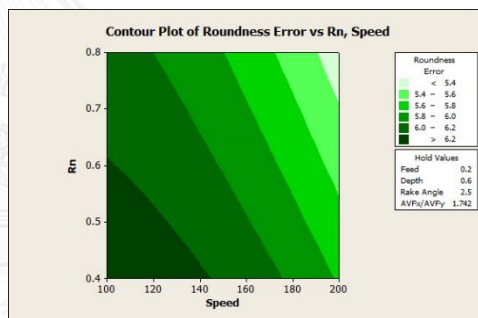
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

พื้นผิวผลตอบ

เส้นโครงร่าง

รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง รัศมีจุมกมิต และเงื่อนไขการตัด

จากรูปที่ 4.64 เมื่อเงื่อนไขการตัดอื่นคงเดิม การเพิ่มขนาดรัศมีจุมกมิตจะมีส่วนในการช่วยทำให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดรัศมีจุมกมิตจะทำให้พื้นที่การตัดลดลง ส่งผลให้แรงตัดลดลง และการเพิ่มขนาดรัศมีจุมกมิตขนาดใหญ่จะช่วยลดรอยป้อนตัดที่เกิดขึ้น จึงส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดลดลง

จากรูปที่ 4.64(ก)- 4.64(ข) ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุดเมื่อเลือกใช้รัศมีจุมกมิตขนาด 0.8 มม. และความลึกตัด 0.4 มม. เนื่องจากเป็นเงื่อนไขการตัดที่มีพื้นที่การตัดน้อยสุด ทำ

ให้แรงตัดลดลงเมื่อเทียบกับเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ประกอบกับรัศมีจุมุกมีดขนาดใหญ่จะช่วยลดรอยป้อนตัดที่เกิดขึ้น จึงส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดลดลง

จากรูปที่ 4.64(ค)- 4.64(ง) ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุดเมื่อเลือกใช้รัศมีจุมุกมีดขนาด 0.8 มม. และอัตราการป้อน 0.15 มม. ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพื้นที่การตัดที่เกิดจากการป้อนตัดน้อยสุด และรัศมีจุมุกมีดขนาดใหญ่จะช่วยลดรอยป้อนตัดที่เกิดขึ้น จึงส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดลดลง

จากรูปที่ 4.64(จ)- 4.64(ฉ) ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุดเมื่อเลือกใช้รัศมีจุมุกมีดขนาด 0.8 มม. และความเร็วตัด 200 ม./นาที เนื่องจากการเพิ่มความเร็วตัดส่งผลต่ออุณหภูมิการตัด วัสดุอ่อนนุ่มมากขึ้น แรงในการตัดลดลง และการใช้รัศมีจุมุกมีดขนาดใหญ่ช่วยลดพื้นที่การตัด ส่งผลให้แรงตัดลดลงเช่นกัน จึงเป็นที่มาของค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด

4.10 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

ในหัวข้อนี้จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด แรงขณะตัด และความกลม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการทำนายความกลมด้วยค่าความสัมพันธ์ ซึ่งเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) โดยมีเงื่อนไขการวิเคราะห์การถดถอยดังนี้

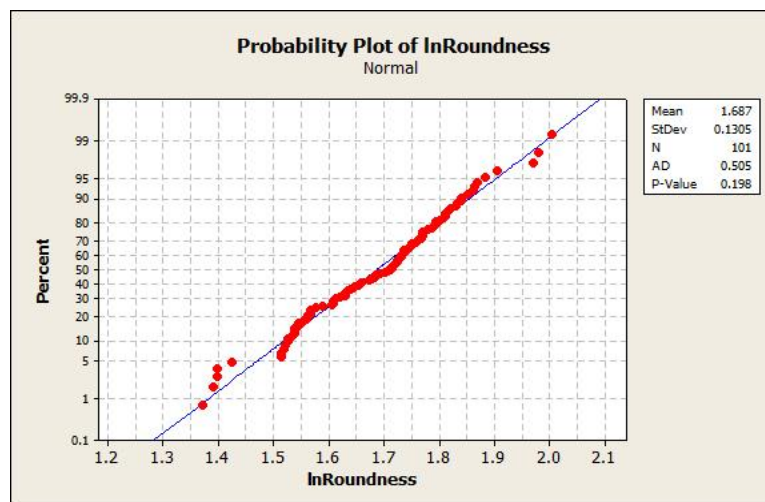
- 1) ความคลาดเคลื่อน เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
- 2) ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ นั่นคือ $E(e) = 0$
- 3) ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า $v(e) = \sigma_e^2$
- 4) e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน ; ($i \neq j$) นั่นคือ covariance (e_i, e_j) = 0

4.10.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

ทำการทดสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ด้วย Normal Probability Plot โดยมีสมมติฐานของการทดสอบดังนี้

H_0 : ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ความคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

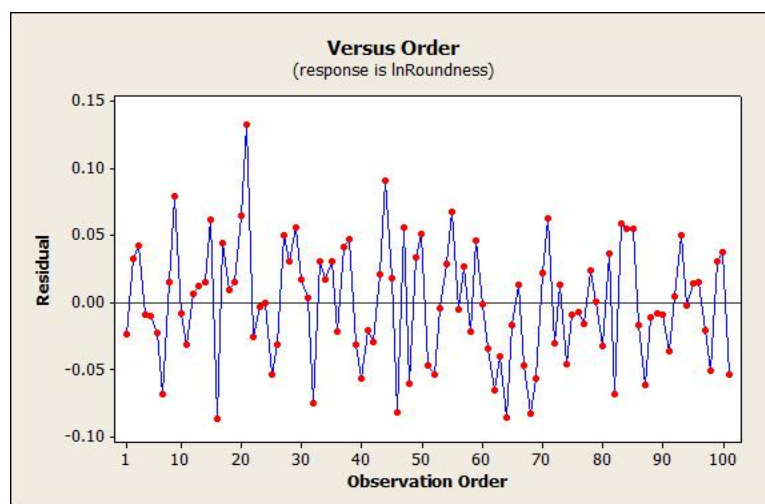


รูปที่ 4.65 Normal Probability Plot

จากรูปที่ 4.65 ความคลาดเคลื่อนมีการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง ไม่เกาะกลุ่ม ความคลาดเคลื่อนแต่ละจุดอยู่ใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ และมีค่า P-Value = 0.198 เมื่อเทียบกับความผิดพลาดที่ยอมรับได้ 5% ($\alpha = 0.05$) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก และสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

4.10.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

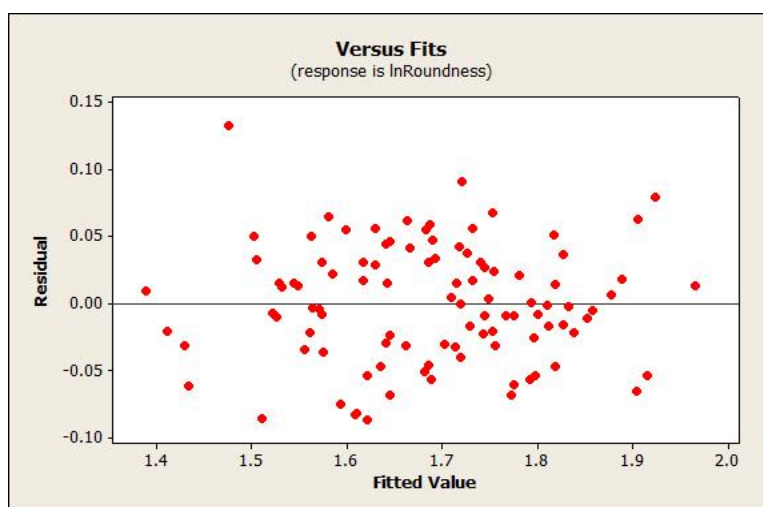
จากรูปที่ 4.66 ทดสอบความอิสระของข้อมูล แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนและลำดับการทดลอง พบว่าลักษณะของค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบศูนย์ และไม่มีรูปแบบเป็นอย่างไรอย่างหนึ่ง หรือเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.66 ทดสอบความอิสระของข้อมูล

4.10.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล จึงได้ทำการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน แสดงดังรูปที่ 4.67 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนมีการกระจายตัวรอบศูนย์ และไม่มีรูปแบบเป็นอย่างไรอย่างหนึ่ง จึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 4.67 ทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

4.11 สมการทำนายค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากการทำการทดลองตัดชิ้นงาน (S45C) ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์ ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ แรงขณะตัด และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 4.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการที่ 3.4-2 ดังนี้

$$\ln R_0 = 2.35 - 0.0935 \ln V + 0.163 \ln f + 0.0681 \ln D - 0.0494 \ln R_n - 0.00393 \gamma + 0.296 \ln \left(\frac{AVF_x}{AVF_y} \right) \quad (4.7-1)$$

4.11.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

เพื่อทำการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม (พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง) และตัวแปรอิสระ (ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ และแรงขณะตัด) มีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$$

$$H_1 : \beta_j \text{ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับศูนย์}$$

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงผลดังนี้

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	1.51107	0.25185	123.80	0.000
Residual Error	94	0.19122	0.00203		
Total	100	1.70230			

Source	DF	Seq SS
lnV	1	0.24355
lnf	1	0.17971
lnD	1	0.19137
lnRn	1	0.13400
Rake Angle	1	0.25975
ln(AV Fx/AV Fy)	1	0.50269

รูปที่ 4.68 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยที่ระดับการยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ($\alpha = 0.05$) ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.000 จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง หมายความว่าสมการถดถอยที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประมาณค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่เกิดขึ้นได้

4.11.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

เพื่อเป็นการทดสอบตัวแปรอิสระประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมูกมีด มุมคายเศษโลหะ และแรงขณะตัด มีความสามารถในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางหรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงผลดังนี้

The regression equation is

$$\ln\text{Roundness} = 2.35 - 0.0935 \ln V + 0.163 \ln f + 0.0681 \ln D - 0.0494 \ln R_n - 0.00393 \text{ Rake Angle} + 0.296 \ln(\text{AV Fx}/\text{AV Fy})$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.34791	0.09821	23.91	0.000
lnV	-0.09345	0.01732	-5.39	0.000
lnf	0.16297	0.02175	7.49	0.000
lnD	0.06806	0.01717	3.96	0.000
lnRn	-0.04944	0.01365	-3.62	0.000
Rake Angle	-0.0039270	0.0005463	-7.19	0.000
ln(AV Fx/AV Fy)	0.29620	0.01884	15.72	0.000

S = 0.0451033 R-Sq = 88.8% R-Sq(adj) = 88.0%

รูปที่ 4.69 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอย

จากผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอย พบว่าค่า P-Value ของตัวแปรอิสระในสมการ มีค่าน้อยกว่าระดับการยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ($\alpha = 0.05$) ทุกค่า จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระในสมการสามารถใช้ในการทำนายค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้ทุกตัวแปรอย่างมีนัยสำคัญ

ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระสามารถบอกได้ถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระนั้นๆ และความกลมที่เกิดขึ้น โดยเครื่องหมายบวกหรือลบของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระจะแสดงถึงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่มีเครื่องหมายบวกแสดงถึงความสัมพันธ์แปรผันตรง และเครื่องหมายลบแสดงถึงความสัมพันธ์แบบแปรผันผกผัน ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระในสมการที่มีผลต่อค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง จากสมการที่ 4.7-1 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระและค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้ดังนี้

- 1) ความเร็วตัด เครื่องหมายค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยลบ แสดงถึงความสัมพันธ์แบบผกผัน สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากสมการจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ความเร็วตัดและความกลมจะพบว่า เมื่อความเร็วตัดเพิ่มสูงมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิการตัดสูงมากขึ้น ส่งผลให้เนื้อวัสดุอ่อนนุ่ม จึงใช้แรงในการตัดน้อย ส่งผลให้การสั่นสะเทือนน้อย คุณภาพผิวที่ได้จึงออกมาดี
- 2) อัตราป้อนตัด เครื่องหมายค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยบวก แสดงถึงความสัมพันธ์แปรผันตรง สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการป้อนเพิ่มมากขึ้น ค่าพิสัยเส้นผ่าน

ศูนย์กลางที่ได้จากสมการนี้จะมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราป้อนตัด จะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น ทำให้แรงตัดพลวัตเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน และการเพิ่มอัตราป้อนตัดจะให้จุดสูงสุดและจุดต่ำสุด (Peak-Valley) ของชิ้นงานมีขนาดสูงมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.14 ส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น

- 3) ความลึกตัด เครื่องหมายค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยบวก แสดงถึงความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความลึกตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากสมการนี้จะมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มความลึกตัดจะทำให้พื้นที่ตัดเพิ่มมากขึ้น แรงขณะตัดเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเพิ่มมากขึ้น
- 4) รัศมีจุมูกมีด เครื่องหมายค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยลบ แสดงถึงความสัมพันธ์แบบผกผัน สามารถอธิบายได้ว่าการใช้รัศมีจุมูกมีดที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น จะทำให้พื้นที่การตัดลดลง จึงทำให้แรงตัดลดลง และการใช้รัศมีจุมูกมีดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะช่วยลดรอยป้อนตัดที่เกิดขึ้น เมื่อทำการตรวจสอบค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง จึงทำให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง แสดงดังรูปที่ 4.49
- 5) มุมคายเศษโลหะ เครื่องหมายค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยลบ แสดงถึงความสัมพันธ์แบบผกผัน สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมุมคายเศษโลหะมากขึ้น ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากสมการจะมีแนวโน้มลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้มุมคายเศษโลหะที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เศษวัสดุขณะตัดเคลื่อนตัวออกได้ง่าย แรงขณะตัดน้อยลง การสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงานน้อย ส่งผลให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง
- 6) อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัด (AVF_x/AVF_y) เครื่องหมายค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยบวก แสดงถึงความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราส่วนแรงตัดเพิ่มมากขึ้น พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากสมการนี้จะมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้เมื่อค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงรัศมี (AVF_x) มีค่าสูงมากกว่าค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงป้อนตัด (AVF_y) เมื่อแรงตัดรัศมีเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และแรงรัศมีอยู่ในทิศทางที่ส่งผลต่อรูปร่าง

ความกลมของชิ้นงานโดยตรง จึงทำให้ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตรวจสอบได้นั้นมีค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลมากที่สุด คือ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตึงพลาวัต (AVF_x/AVF_y) แต่อย่างไรก็ตาม ทุกตัวแปรสามารถใช้อธิบายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้ดีมากยิ่งขึ้นเมื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ อย่างรอบด้าน

4.11.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

จากการวิเคราะห์การถดถอยตามรูปที่ 4.69 สมการทำนายค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางพบว่า $R^2 = 88.8\%$ และ $R_{adj}^2 = 88.0\%$ ตามลำดับ หมายความว่า ตัวแปรตอบสนอง (ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง) เปลี่ยนแปลงตามตัวแปรอิสระ (ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต มุมคายเศษโลหะ และแรงขณะตัด) 88.8% ส่วนอีก 11.2% ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆ ที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ในสมการทำนายความกลม และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 80% แสดงว่าตัวแปรอิสระสามารถอธิบายตัวแปรตอบสนองได้เป็นอย่างดี

ดังนั้น จึงเสนอสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางในรูปแบบของสมการเอกซ์โปเนนเชียล ด้วยการแปลงลอการิทึมธรรมชาติออกจากสมการ จะได้สมการพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางดังนี้

$$R_0 = e^{2.35} \cdot V^{-0.0935} \cdot f^{0.163} \cdot D^{0.0681} \cdot R_n^{-0.0494} \cdot e^{-0.00393\gamma} \cdot \left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)^{0.296} \quad (4.7-2)$$

4.12 การทดสอบความแม่นยำของสมการ

เพื่อทำการทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ถูกพัฒนาขึ้น จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัด โดยทำการทดลองภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม เงื่อนไขการตัดใหม่ได้ถูกกำหนดขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำสมการ

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำสมการ

เม็ดมิดคาร์ไบด์	DNMG150604FN	
	DNMG150608FN	
	DCMT11T304HQ	
	DCMT11T308HQ	
ความเร็วตัด	120 และ 250 เมตร/นาที	
อัตราป้อน	0.18 และ 0.30 มิลลิเมตร/รอบ	
ความลึกตัด	0.2 และ 0.5 มิลลิเมตร	
รัศมีจุ่มก	0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร	
มุมคายเศษโลหะ	-6 และ 11 องศา	

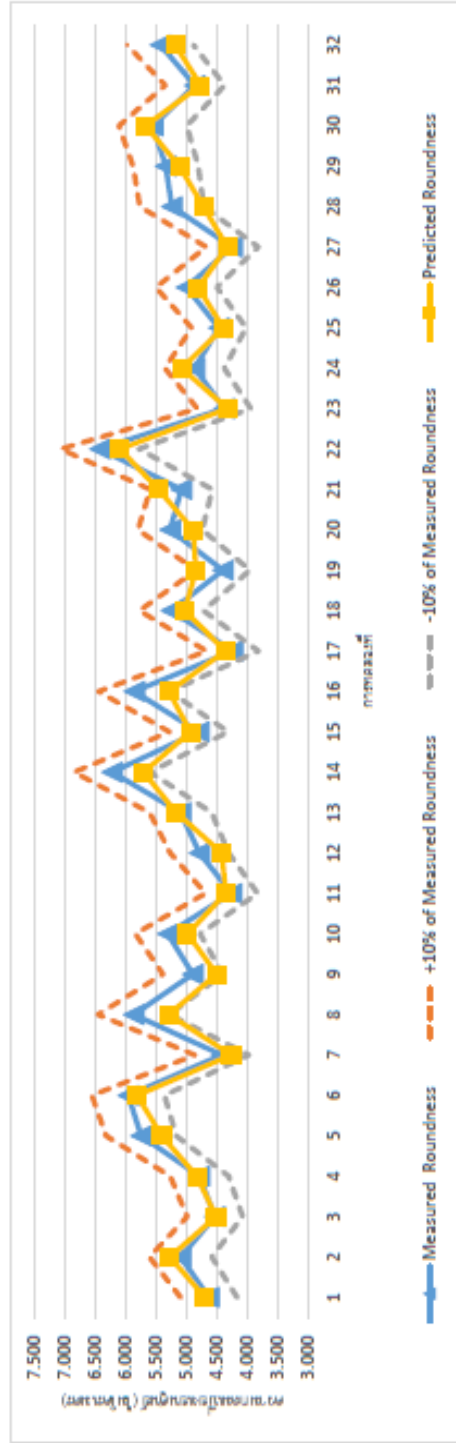
ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำสมการ จากตารางประกอบด้วยเงื่อนไขการตัดภายใต้ขอบเขตการตัดเดิม อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริง และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากสมการ ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดอยู่นอกเหนือจากเงื่อนไขการตัดที่นำมาพัฒนาสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ความกลมที่วัดจริง และพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากสมการนั้นพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.70 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำสมการ

ที่	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคาย เศษโลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง จากการวัด (ไมโครเมตร)	พิสัยเส้นผ่าน ศูนย์กลางจากสมการ (ไมโครเมตร)
1	120	0.18	0.2	0.4	-6	0.894	4.643	4.707
2	120	0.30	0.2	0.4	-6	0.998	5.107	5.285
3	250	0.18	0.2	0.4	-6	0.988	4.545	4.526
4	250	0.30	0.2	0.4	-6	0.935	4.799	4.840
5	120	0.18	0.5	0.4	-6	1.164	5.756	5.417
6	120	0.30	0.5	0.4	-6	1.122	5.968	5.823
7	250	0.18	0.5	0.4	-6	0.659	4.433	4.274
8	250	0.30	0.5	0.4	-6	1.032	5.876	5.304
9	120	0.18	0.2	0.8	-6	0.873	4.907	4.516
10	120	0.30	0.2	0.8	-6	0.924	5.319	4.982
11	250	0.18	0.2	0.8	-6	0.983	4.271	4.368
12	250	0.30	0.2	0.8	-6	0.779	4.799	4.431
13	120	0.18	0.5	0.8	-6	1.123	5.108	5.180

ที่	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคาย เศษโลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง จากการวัด (ไมโครเมตร)	พิสัยเส้นผ่าน ศูนย์กลางจากการ (ไมโครเมตร)
14	120	0.30	0.5	0.8	-6	1.182	6.232	5.715
15	250	0.18	0.5	0.8	-6	1.213	4.811	4.947
16	250	0.30	0.5	0.8	-6	1.156	5.869	5.301
17	120	0.18	0.2	0.4	11	0.873	4.256	4.371
18	120	0.30	0.2	0.4	11	1.066	5.259	5.041
19	250	0.18	0.2	0.4	11	1.571	4.412	4.856
20	250	0.30	0.2	0.4	11	1.223	5.280	4.901
21	120	0.18	0.5	0.4	11	1.510	5.097	5.472
22	120	0.30	0.5	0.4	11	1.649	6.433	6.104
23	250	0.18	0.5	0.4	11	0.870	4.394	4.340
24	250	0.30	0.5	0.4	11	1.126	4.878	5.091
25	120	0.18	0.2	0.8	11	1.008	4.480	4.408
26	120	0.30	0.2	0.8	11	1.028	5.012	4.819
27	250	0.18	0.2	0.8	11	1.210	4.261	4.344
28	250	0.30	0.2	0.8	11	1.221	5.253	4.734

ที่	ความเร็วตัด (ม.วนาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคาย เศษโลหะ (องศา)	อัตราส่วนแรง $\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	พิสัยเส้นผ่าน ศูนย์กลางจากการ (ไมโครเมตร)
29	120	0.18	0.5	0.8	11	1.360	5.353	5.127
30	120	0.30	0.5	0.8	11	1.455	5.563	5.684
31	250	0.18	0.5	0.8	11	1.353	4.874	4.780
32	250	0.30	0.5	0.8	11	1.355	5.440	5.196



รูปที่ 4.70 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|f_t - a_t|}{a_t} \quad (4.8-1)$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ} = 100\% - \text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} \quad (4.8-2)$$

เมื่อ f_t = ความกลมที่ได้จากการทำนาย
 a_t = ความกลมที่ได้จากการตรวจสอบจริง
 โดยที่ $n = 1, 2, \dots, t$

เมื่อทำการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางตามสมการที่ 4.8-1 พบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 4.57% นั่นคือสมการที่ได้มีความแม่นยำอยู่ที่ 95.43% ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำในระดับสูงและเป็นที่ยอมรับได้ แม้ว่าเงื่อนไขการตัดอยู่นอกของเขตของการทดลองก็ตาม แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ใช้การทดลอง ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และมุมคายเศษโลหะ สามารถใช้ในการอธิบายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากผลการทดลองทดสอบความแม่นยำสมการมีความสัมพันธ์ลักษณะเดียวกันแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป และการใช้อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) เป็นปัจจัยที่กำจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขของการตัดออกไป เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้สมการในการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อคุณสมบัติ หรือชนิดของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยใช้แรงตัดที่ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ ประกอบไปด้วยปัจจัยในการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด และมุมคายเศษโลหะ ปัจจัยดังกล่าวถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ไปพัฒนาสมการทำนายความกลมของชิ้นงาน โดยประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดในกระบวนการกลึง เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วย ใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN)

5.1 สรุปผลการวิจัย

สมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางถูกพัฒนาขึ้นจากปัจจัยในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด และมุมคายเศษโลหะ ไดนามิเตอร์ถูกติดตั้งบนเครื่องซีเอ็นซีเพื่อตรวจติดตามแรงขณะตัด จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [3-5, 7] ได้พิสูจน์ว่าแรงรัศมีพลวัต (F_x) และแรงป้อนตัดพลวัต (F_y) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางในกระบวนการกลึง แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นถูกนำไปเป็นปัจจัยหนึ่งในการพัฒนาสมการทำนายความกลม ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตถูกเสนอในการพัฒนาสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง เพื่อที่จะช่วยในการลดอิทธิพลของการแตกหักของเศษโลหะ และเพื่อกำจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดออกจากแรงตัด [2] อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง

ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด แรงตัด และความกลม ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการเอกซ์โปเนนเชียล โดยการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณในการช่วยหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลอง จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางนี้ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากผลวิจัยแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด โดยพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้นั้นได้

มากจากการเพิ่มความเร็วตัด ลดอัตราการป้อน ลดความลึกตัด เพิ่มขนาดรัศมีจุมุมกัด และใช้มุมคายเศษโลหะที่มีค่ามาก แสดงดังสมการทำนายความกลมในรูปแบบของสมการเอกซ์โปเนนเชียล สมการที่ 4.7-2

จากการทดสอบความแม่นยำของสมการด้วยการทดลองด้วยเงื่อนไขที่อยู่ภายใต้ขอบเขตของการทำวิจัย พบว่าสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีความแม่นยำในระดับสูง (95.43%) เป็นที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ในการอธิบายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นอย่างดี

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมกัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างมีนัยสำคัญ

2. จากการพัฒนาสมการทำนายความกลมพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด คือ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) เมื่อค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงรัศมี (AVF_x) เพิ่มขึ้นมากกว่าค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อนตัด (AVF_y) ส่งผลให้ความกลมที่ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงรัศมีพลวัต (F_x) ส่งผลโดยตรงต่อรูปร่างความกลมของชิ้นงาน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนค่าความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVF_x/AVF_y) สามารถนำมาใช้ในการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างดี

3. ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งมาจากอิทธิพลของแรงจากการแตกหักของเศษโลหะ การวางองศาของมีดตัด อุณหภูมิชิ้นงาน และความคลาดเคลื่อนจากการวัดความกลมจากการวิเคราะห์การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่า 88.8% เป็นผลจากปัจจัยที่ใช้ในการทำวิจัย และอีกเพียง 11.2% ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ในสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใต้ระดับความเชื่อมั่น 95% และการใช้จำนวนผลการทดลองทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการพัฒนาสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง จะช่วยทำให้สมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น จึงทำให้มั่นใจได้ว่าสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้มีความแม่นยำในระดับสูงและเป็นที่ยอมรับได้

4. การทดสอบความแม่นยำของสมการ ด้วยการทดลองตัดด้วยเงื่อนไขการตัดใหม่ ภายใต้เขตของการทดลอง พบว่าสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางนี้สามารถใช้ในการ

อธิบายความกลมได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากผลการทดลองทดสอบความแม่นยำ
สมการ มีความสัมพันธ์ลักษณะเดียวกันแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรค

1. อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัด ทำให้มีข้อจำกัดในการทำวิจัยในครั้งนี้ดังนี้
 - ก. ขนาดของชิ้นงานในการทำวิจัย ต้องกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 40 มิลลิเมตร และความยาวของชิ้นงานไม่เกิน 300 มิลลิเมตร
 - ข. ในการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางต้องทำการตั้งความร่วมมือศูนย์ระหว่างชิ้นงานและเครื่องวัดความกลมทุกครั้งก่อนการวัด ทำให้ใช้เวลาในการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมาก
 - ค. ข้อมูลพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้ ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ได้ เนื่องจากเป็นอัตราการเก็บข้อมูลของเครื่องวัดความกลม ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดและคุณภาพผิวที่ตรวจสอบเปลี่ยนแปลง เมื่อนำไปวิเคราะห์ในโดเมนความถี่จะให้ความถี่เท่ากับอัตราการเก็บข้อมูลของเครื่องวัดความกลมเสมอ
2. เนื่องจากเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยมีผู้ใช้งานหลายคน จึงทำให้ต้องติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ใหม่ทุกครั้ง ซึ่งนอกจากจะใช้เวลาในการติดตั้งนานแล้ว ยังส่งผลให้การทำวิจัยแต่ละครั้งมีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งการติดตั้งเครื่องไดนาโมมิเตอร์ด้วย

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้สมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีความแม่นยำและประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงควรพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้
 - ก. ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชิ้นงาน เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวนี้ส่งผลโดยตรงต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน
 - ข. ความโค้งตัวของชิ้นงาน เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง
 - ค. การสึกหรอของมีดตัด เนื่องจากส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัด
 - ง. รูปทรงของมีดตัด เนื่องจากรูปทรงมีดตัดที่แตกต่างกัน จะมีมุมด้านข้างที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพผิวที่เกิดขึ้น

๑. สารหล่อเย็น เนื่องจากการใช้สารหล่อเย็นมีส่วนในการช่วยลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด จึงทำให้สามารถเพิ่มความเร็วตัดได้มากขึ้น การเพิ่มความเร็วในการตัดนี้จะช่วยให้คุณภาพผิวดีมากขึ้น ซึ่งความสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นนี้มีความสอดคล้องตามสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง
2. การแยกสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะที่ปนเข้ามาในสัญญาณแรงตัดพลวัต ช่วยให้สามารถตัดองค์ประกอบอื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือจากการวิจัยออกไปได้ ทำให้สมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น [40]
3. การควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานและเครื่องวัดความกลม เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลต่อการขยายตัวของวัสดุ จึงต้องรอให้ชิ้นงานมีเท่ากับอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ แล้วจึงทำการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น



รายการอ้างอิง

1. กระทรวงอุตสาหกรรม. แผนแม่บทพัฒนาอุตสาหกรรมไทย พ.ศ. 2555-2574. 2554 [cited 2557 30 มีนาคม 2557]; Available from: <http://www.oie.go.th/academic/แผนแม่บทพัฒนาอุตสาหกรรมไทย-พศ-2555-2574>.
2. ตั้งจิตลิตเจริญ, ส., วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 2555, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. Fung, E.H.K. and J.C.K. Chan, ARX Modelling and Compensation of Roundness Errors in Taper Turning. The international Journal of advanced manufacturing technology, 2000. 16: p. 404-402.
4. Polini, W. and U. Prisco, The estimation of the diameter error in bar turning: a comparison among three cutting force models. The international Journal of advanced manufacturing technology, 2002. 22: p. 465-474.
5. Tangjitsitcharoen, S., In-process monitoring and prediction of surface roughness in CNC turning process. Advance Materials Research, 2011. 199-200: p. 1958-1966.
6. L. Rico, et al. Effect of cutting parameter on the roundness of cylindrical bars turned of 1018 steel. in Proceeding of the 15th annual international conference on Industrial Engineering Theory. 2010. Applications and practice Mexico City, Mexico.
7. Azmi Mohamed, Abdul Halim Esa, and M.A. Ayub, Roundness Measurement of Cylindrical Part by Machine Vision, in International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering Pahang. 2011: Malaysia
8. H. Saglam, F. Unsacar, and Yaldiz, An experimental investigate as to the effect of cutting parameter on roundness error and surface roughness in cylindrical grinding. International Journal of Product in Research 2005. 43.
9. FAN Sheng-bo and e. al, Prediction of diameter errors compensation in bars turning. Journal CSUT, 2005. 12.

10. สมานมิตร, ก., การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C โดยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว, in ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
11. Lach-Diamant. PCD Cutting insert with chip breaker : Type ISIC. 2011 7 เมษายน 2557]; Available from: <http://lach-diamant.de/english/news/2011/pcd-cutting-insert-with-chipbreaker-type-isic---superior-to-laser-produced-chipbreakers>.
12. Irfan. Advance Manufacturing-Manufacturing process. 2010 31 มีนาคม 2557]; Available from: <http://advancemanufacturing.blogspot.com/2010/11/orthogonal-and-oblique-cutting.html>.
13. จำกั๊ด, บ.เ.ท.เ. เม็ดมีดกลึงยี่ห่อ Kennametal Widia : CNMG DNMG WNMG TNMG. 2551 7 เมษายน 2557]; Available from: <http://ptsc.nanosupplier.com/kennametal-มีดเล็บ-เม็ดมีด-เม็ทอินเสิร์ต-iso-135981-4.html>.
14. Crop, R.T. BECKER Chip Control Geometries. 2014 7 เมษายน 2557]; Available from: <http://www.ranitool.com/becker.htm>.
15. Groover, M.P., Fundamentals of Modern Manufacturing : Materials, Process, and Systems. 2nd Edition ed. 2004, USA John Wiley&Sons.
16. Black, J.T. and R.A. Kohser, DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing. 11th Edition ed. 2013, USA John Wiley&Sons.
17. Groover, M.P., Fundamentals of Modern Manufacturing. 2nd Edition ed. 2004, USA: John Wiley&Sons.
18. Kalpakjian, S. and S.R. Schmid, Manufacturing Engineering Technology. 5 th Edition ed. 2006, USA Pearson Prentice Hall.
19. Altintas, Y., Manufacturing Automation : metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. 1954, USA Cambridge University Press.
20. จันทร่อง, ศ., การพยากรณ์ความขรุขระผิวสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอแบบตนเอง, in ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
21. ทองแสน, อ., ทฤษฎีและการเขียนโปรแกรม CNC สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลด้วยคอมพิวเตอร์. 2544, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.

22. Thomasnet, CNC Turning Center offers off-center Y-axis cutting. 2005.
23. Mechlook. Measurement of Circularity-Straightness, Flatness, Squareness, Parallelism, Circularity and Rotation. 2011 1 เมษายน 2557]; Available from: <http://www.mechlook.com/measurement-circularitystraightness-flatness-squareness-parallelism-circularity-rotation/>.
24. Seimitsu, T. Measuring Instruments Catalog : Roundness-Cylindrical Profile Measuring Instruments. 2013 1 เมษายน 2557]; Available from: <http://www.accretech.de/en/support/metrology/product-information-for-download/>.
25. disk, E.o.a. Manufacturing Process. 2557 1 เมษายน 2557]; Available from: http://engineeronadisk.com/notes_manufact/round.html.
26. ชูติมา, ป., การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
27. เหลืองไพบูลย์, ป.ศ.ณ.อ.แ., ารออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ที่อป.
28. Tangjitsitcharoen, S., P. Tangpornprasert, and C.V.a. N.Rojanarowan, In-process monitoring and control of microassembly by utilizing force sensor. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering 2008. 31.
29. T.Moriwaki, T. Shibasaka, and T. Somkiat, Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning. International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers 2004. 47-3: p. 933-938.
30. Tangjitsitcharoen, S., Advance prediction surface roughness monitoring of dynamic cutting force in CNC turning process. Applied Mechanics and Materials 2013. 239.
31. Salah Hamed Ramadan Ali, H.H. Mohamad, and M.K. Bedewy, Identifying cylinder linear wear using precision coordinate measurement. International journal of precision engineering and manufacturing, 2009. 10.
32. Wei Gao * and S. Kiyono, On-machine roundness measurement of cylindrical workpieces by the combined three-point method. Measurement, 1999. 21.

33. Fung, E.H.K. and S.M. Cheung. Roundness Control in Taper Turning using FCC Techniques. in Proceedings of the American Control Conference Albuquerque. 1997. New Mexico.
34. Fung, E.H.K. and S.K.S. Leung, Roundness Error Compensation in Lathe Turning Through 2-D ARMAX Model Based FCC. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002. 10.
35. P. S. Kalos, K. N. Nandurkar, and L.G.Navale, Control of Roundness on Turned Cylindrical Bars Using Artificial Neural Network. IEEE IEEM 2007.
36. TIAN Yingzhong, et al., Multi-Sensor Tracing Principle for Crankshaft Roundness Measurement During Noncircular Grinding Process. International Technology and Innovation Conference, 2006.
37. Kyocera. CA6515/25 and PR1125 for Stainless Steel Machining. 2014 8 月 17 日 [2557]; Available from: http://global.kyocera.com/prdct/tool/pdf/d_ca65.pdf.
38. Chin DH, Yoon MC, and S. SB, Roundness modelling in BTA deep hole drilling. Precis Eng, 2005. 29.
39. Tangjitsitcharoen, S., In-process prediction of surface roughness by utilizing the cutting force ratio. NAMRI/SME, 2010. 38.
40. Somkiat Tangjitsitcharoen, T. Saksri, and S. Ratanakuakangwan, Advance in chatter detection in ball end milling process by utilizing wavelet transform, in J Intell Manuf. 2013, Published Online.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ความกลม

```

clear;

samp = 3600;           %Sampling Frequency

fname1 = 'r2';        % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext1 = '.txt';        % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname1,ext1]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);      % เรียกไฟล์
eval(['data1=',[fname1],',']); %

[N1,n1]=size(data1); % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถว และ n เป็น
                    % จำนวน
                    % คอลัมน์

fname2 = 'r108';      % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext2 = '.txt';        % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname2,ext2]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);      % เรียกไฟล์
eval(['data2=',[fname2],',']); %

[N2,n2]=size(data2); % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถว และ n เป็น
                    % จำนวน
                    % คอลัมน์

t=360/samp;
tt=(0:t*(N2-1));      %Using plot graph __ time domain

f=(0:(N1-1)/N1*samp;

```



```
freq=f(1:N1/2);           %Using plot graph __ frequency domain

FY=fft(data1(:,2))/(N1*2); % column 2 _ take FFT of Fy
absFY=abs(FY(1:N1/2));
PabsFY=absFY.^2;

figure(104);
plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Roundness
Micrometer^2');
axis([0 150 0 0.05])

figure(105);
plot(tt,data2(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Degree');ylabel('Roundness(Micrometer)');
axis([0 360 -5 5])
```



ภาคผนวก ข
โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของแรงตัด



โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของแรงตัด

```

clear;

samp=360;           %Sampling Frequency

fname='f96';       %ชื่อไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext='.txt';         %ชื่อสกุลไฟล์
filename=[fname,ext]; %รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load(filename);    %เรียกไฟล์
eval(['data=',[fname],'.']);

[N,n]=size(data); %เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถวและ n เป็น
จำนวน
คอลัมน์

t=360/samp;
tt=(0:t*(N-1));   %Using plot graph_time domain

Data1=data(:,1);
Data2=data(:,2);
Data3=data(:,3);

Avg1=mean(data(:,1)); %หาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ
Avg2=mean(data(:,2));
Avg3=mean(data(:,3));

CumUpper1=0;      %สำหรับเก็บค่าสัญญาณที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย
CumUpper2=0;

```

```

CumUpper3=0;

NoUp1=0;           %สำหรับเก็บจำนวนสัญญาณที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย
NoUp2=0;
NoUp3=0;

CumLower1=0;      %สำหรับเก็บค่าสัญญาณที่มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย
CumLower2=0;
CumLower3=0;

NoLow1=0;         %สำหรับเก็บจำนวนสัญญาณที่มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย
NoLow2=0;
NoLow3=0;

for i=1:N          %Loop สำหรับเก็บค่าสัญญาณตาม 4 ตัวแปรข้างบน
    if Data1(i)>=Avg1 %ข้อมูลคอลัมน์ที่ 1
        CumUpper1=CumUpper1+Data1(i); %เก็บค่าที่มากกว่าค่าเฉลี่ย
        NoUp1=NoUp1+1;
    else
        CumLower1=CumLower1+Data1(i); %เก็บค่าที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ย
        NoLow1=NoLow1+1;
    end
    %#####
    if Data2(i)>=Avg2 %ข้อมูลคอลัมน์ที่ 2
        CumUpper2=CumUpper2+Data2(i); %เก็บค่าที่มากกว่าค่าเฉลี่ย
        NoUp2=NoUp2+1;
    else
        CumLower2=CumLower2+Data2(i); %เก็บค่าที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ย
        NoLow2=NoLow2+1;

```

```

end

%#####

if Data3(i)>=Avg3      %ข้อมูลคอลัมน์ที่ 3
    CumUpper3=CumUpper3+Data3(i); %เก็บค่าที่มากกว่าค่าเฉลี่ย
    NoUp3=NoUp3+1;

else
    CumLower3=CumLower3+Data3(i);%เก็บค่าที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ย
    NoLow3=NoLow3+1;

end

%#####

end

AvgUpper1=CumUpper1/NoUp1; %หาค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย
AvgLower1=CumLower1/NoLow1; %หาค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย

AvgUpper2=CumUpper2/NoUp2;
AvgLower2=CumLower2/NoLow2;

AvgUpper3=CumUpper3/NoUp3;
AvgLower3=CumLower3/NoLow3;

%#####

Amp(1)=AvgUpper1-AvgLower1; %หาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณโดยเอาค่าขอบบน-ขอบ
ล่าง
Amp(2)=AvgUpper2-AvgLower2;
Amp(3)=AvgUpper3-AvgLower3;

Amplitude=Amp; %เก็บผลของค่าที่ได้ทั้ง 3 แกนของแรงตัด

%#####

%ใช้สำหรับ Plot กราฟของขนาดแอมพลิจูดทางแกน x

```

```

AA=max(tt);
qq(1)=0;
qq(2)=AA;
for j=1:2
    AvgU1(j)=AvgUpper1;
    AvgL1(j)=AvgLower1;

    AvgU2(j)=AvgUpper2;
    AvgL2(j)=AvgLower2;

    AvgU3(j)=AvgUpper3;
    AvgL3(j)=AvgLower3;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

subplot(3,1,1);plot(tt,data(:,1),qq,AvgU1,'r',qq,AvgL1,'r');grid;zoom on;
xlabel('Degree');ylabel('Dynamic Radial Force (N)');%legend('Ft');
axis([0 360 -250 250])

subplot(3,1,2);plot(tt,data(:,2),qq,AvgU2,'r',qq,AvgL2,'r');grid;zoom on;
xlabel('Degree');ylabel('Dynamic feed Force (N)');%legend('Fr');
axis([0 360 -250 250])

subplot(3,1,3);plot(tt,data(:,3),qq,AvgU3,'r',qq,AvgL3,'r');grid;zoom on;
xlabel('Degree');ylabel('Dynamic Main Force (N)');%legend('Fa');
axis([0 360 -250 250])

```



No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
1	200	0.15	0.8	0.4	-6	1.173	5.057	แตกหัก
2	150	0.15	0.4	0.8	11	1.104	4.657	ต่อเนื่อง
3	150	0.25	0.6	0.8	-6	1.241	5.814	ต่อเนื่อง
4	150	0.25	0.8	0.8	11	1.770	5.850	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
5	200	0.2	0.6	0.8	11	1.007	4.550	ต่อเนื่อง
6	150	0.2	0.6	0.4	11	1.710	5.590	ต่อเนื่อง
7	200	0.25	0.4	0.4	-6	1.597	5.492	ต่อเนื่อง
8	200	0.25	0.8	0.8	11	0.886	4.754	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
9	150	0.25	0.6	0.4	11	2.772	7.410	ต่อเนื่อง
10	200	0.25	0.6	0.4	-6	1.597	5.998	ต่อเนื่อง
11	100	0.15	0.6	0.4	11	1.337	5.105	ต่อเนื่อง
12	150	0.2	0.8	0.4	11	2.514	6.578	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
13	200	0.25	0.4	0.4	11	0.890	4.686	ต่อเนื่อง
14	100	0.25	0.6	0.4	11	1.209	5.641	ต่อเนื่อง
15	150	0.25	0.6	0.8	11	1.292	5.608	ต่อเนื่อง
16	200	0.15	0.4	0.4	-6	1.270	4.635	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
17	150	0.15	0.6	0.8	-6	1.270	5.397	ต่อเนื่อง
18	200	0.15	0.4	0.4	11	0.726	4.047	ต่อเนื่อง
19	150	0.25	0.4	0.4	11	1.177	5.246	ต่อเนื่อง
20	200	0.15	0.6	0.8	-6	1.132	5.181	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
21	200	0.15	0.6	0.4	11	0.886	4.991	ต่อเนื่อง
22	150	0.15	0.4	0.4	-6	2.094	5.873	ต่อเนื่อง
23	150	0.15	0.6	0.8	11	1.224	4.759	ต่อเนื่อง
24	200	0.25	0.8	0.8	-6	1.277	5.576	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
25	150	0.2	0.8	0.4	-6	2.274	6.430	แตกหัก
26	100	0.25	0.6	0.8	11	1.557	5.608	ต่อเนื่อง
27	150	0.15	0.4	0.8	-6	1.071	5.019	ต่อเนื่อง
28	150	0.25	0.4	0.8	11	1.049	4.976	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
29	200	0.2	0.6	0.8	-6	1.144	5.397	ต่อเนื่อง
30	150	0.2	0.4	0.8	-6	1.095	5.122	ต่อเนื่อง
31	100	0.25	0.8	0.4	11	1.264	5.762	แตกหัก
32	200	0.25	0.6	0.8	11	1.120	4.567	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
33	100	0.15	0.6	0.4	-6	1.154	5.564	แตกหัก
34	100	0.2	0.4	0.8	-6	1.424	5.749	ต่อเนื่อง
35	200	0.25	0.6	0.4	11	1.080	5.194	ต่อเนื่อง
36	100	0.2	0.8	0.8	11	2.174	6.147	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
37	200	0.2	0.4	0.8	-6	0.928	4.099	ต่อเนื่อง
38	100	0.15	0.4	0.8	-6	1.331	5.509	ต่อเนื่อง
39	100	0.15	0.6	0.8	-6	1.315	5.681	ต่อเนื่อง
40	200	0.2	0.4	0.4	11	0.711	4.047	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
41	150	0.2	0.8	0.8	11	1.493	5.112	แตกหัก
42	200	0.15	0.4	0.8	11	0.880	4.017	ต่อเนื่อง
43	100	0.25	0.6	0.4	-6	1.041	5.057	ต่อเนื่อง
44	200	0.2	0.8	0.4	11	1.238	5.011	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
45	100	0.25	0.4	0.8	-6	1.485	6.060	ต่อเนื่อง
46	150	0.15	0.8	0.4	-6	1.650	5.691	ต่อเนื่อง
47	200	0.25	0.8	0.4	11	1.433	6.118	แตกหัก
48	150	0.25	0.6	0.4	-6	1.966	6.725	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
49	200	0.25	0.4	0.8	-6	1.037	4.596	ต่อเนื่อง
50	100	0.15	0.6	0.8	11	1.902	5.976	แตกหัก
51	100	0.15	0.8	0.4	11	1.831	5.550	ต่อเนื่อง
52	150	0.25	0.4	0.8	-6	1.254	5.621	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
53	100	0.15	0.4	0.4	-6	1.980	6.481	ต่อเนื่อง
54	150	0.15	0.8	0.8	11	1.457	4.894	แตกหัก
55	100	0.2	0.8	0.4	-6	1.348	5.719	แตกหัก
56	200	0.15	0.8	0.4	11	1.148	4.794	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
57	150	0.15	0.6	0.4	11	1.362	5.249	ต่อเนื่อง
58	150	0.2	0.4	0.4	-6	1.546	6.174	ต่อเนื่อง
59	150	0.25	0.8	0.8	-6	1.865	6.375	แตกหัก
60	100	0.25	0.8	0.8	11	1.399	5.873	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
61	150	0.2	0.4	0.8	11	1.136	4.659	ต่อเนื่อง
62	200	0.15	0.8	0.8	-6	1.320	5.428	ต่อเนื่อง
63	100	0.2	0.6	0.8	-6	1.687	6.102	ต่อเนื่อง
64	200	0.25	0.6	0.8	-6	0.787	4.579	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
65	150	0.2	0.6	0.4	-6	2.347	6.291	แตกหัก
66	150	0.15	0.8	0.8	-6	1.544	5.358	ต่อเนื่อง
67	200	0.15	0.4	0.8	-6	0.983	4.156	ต่อเนื่อง
68	200	0.2	0.8	0.4	-6	1.760	6.018	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
69	150	0.25	0.8	0.4	-6	2.391	7.233	แตกหัก
70	200	0.15	0.6	0.4	-6	1.279	5.744	แตกหัก
71	100	0.15	0.8	0.8	11	2.379	5.873	แตกหัก
72	100	0.2	0.6	0.4	11	0.956	4.592	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
73	150	0.2	0.8	0.8	-6	1.687	5.666	แตกหัก
74	200	0.2	0.6	0.4	11	1.097	4.991	ต่อเนื่อง
75	150	0.25	0.8	0.4	11	2.446	7.162	แตกหัก
76	100	0.25	0.8	0.8	-6	0.973	5.325	แตกหัก

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
77	200	0.15	0.6	0.8	11	1.274	4.768	ต่อเนื่อง
78	100	0.25	0.4	0.8	11	1.349	5.154	ต่อเนื่อง
79	100	0.15	0.8	0.8	-6	1.600	5.799	แตกหัก
80	200	0.2	0.4	0.8	11	1.090	4.547	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
81	150	0.15	0.8	0.4	11	2.488	6.119	แตกหัก
82	100	0.2	0.8	0.4	11	1.460	5.919	ต่อเนื่อง
83	200	0.25	0.4	0.8	11	1.019	4.017	ต่อเนื่อง
84	100	0.25	0.4	0.4	-6	1.376	6.010	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
85	100	0.25	0.4	0.4	11	1.321	5.375	ต่อเนื่อง
86	100	0.15	0.8	0.4	-6	1.696	5.460	แตกหัก
87	100	0.2	0.4	0.4	-6	1.748	6.449	ต่อเนื่อง
88	100	0.2	0.4	0.4	11	1.181	4.837	ต่อเนื่อง

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
89	100	0.15	0.4	0.4	11	1.600	5.736	ต่อเนื่อง
90	150	0.2	0.6	0.8	11	1.179	5.230	ต่อเนื่อง
91	150	0.2	0.6	0.8	-6	1.246	5.681	ต่อเนื่อง
92	100	0.2	0.6	0.8	11	1.608	5.541	ต่อเนื่อง

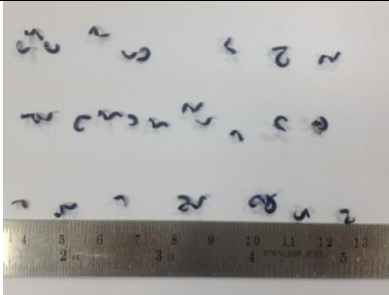




No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
93	200	0.15	0.8	0.8	11	0.809	3.944	ต่อเนื่อง
94	200	0.25	0.8	0.4	-6	1.784	6.301	แตกหัก
95	150	0.2	0.4	0.4	11	1.058	4.788	ต่อเนื่อง
96	150	0.15	0.6	0.4	-6	1.600	5.670	แตกหัก






No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
97	100	0.15	0.4	0.8	11	1.227	4.657	ต่อเนื่อง
98	200	0.2	0.8	0.8	-6	1.396	5.550	แตกหัก
99	200	0.2	0.8	0.8	11	0.871	4.722	แตกหัก
100	100	0.25	0.6	0.8	-6	1.611	6.234	ต่อเนื่อง




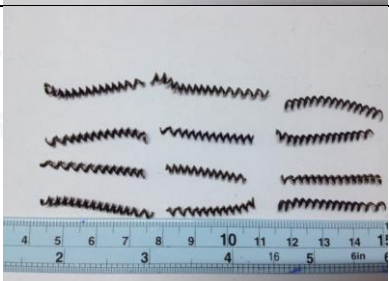

No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
101	150	0.25	0.4	0.4	-6	1.703	6.250	แตกหัก
102	150	0.15	0.4	0.4	11	1.067	4.686	ต่อเนื่อง
103	200	0.2	0.6	0.4	-6	1.540	5.649	ต่อเนื่อง
104	200	0.2	0.4	0.4	-6	1.329	5.107	ต่อเนื่อง







No.	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R_0	สถานะ เศษโลหะ
105	100	0.25	0.8	0.4	-6	0.978	4.976	แตกหัก
106	100	0.2	0.8	0.8	-6	1.244	5.873	แตกหัก
107	100	0.2	0.6	0.4	-6	1.132	5.832	ต่อเนื่อง
108	100	0.2	0.4	0.8	11	1.227	4.793	ต่อเนื่อง














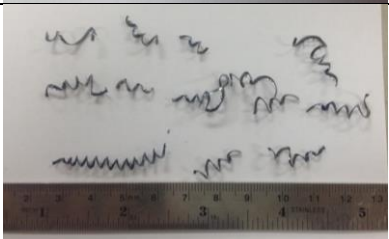
ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
1	200	0.15	0.8	0.4	-6	
2	150	0.15	0.4	0.8	11	
3	150	0.25	0.6	0.8	-6	
4	150	0.25	0.8	0.8	11	
5	200	0.2	0.6	0.8	11	


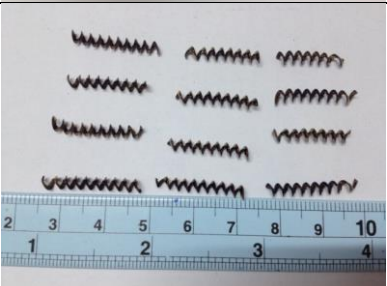




ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
6	150	0.2	0.6	0.4	11	
7	200	0.25	0.4	0.4	-6	
8	200	0.25	0.8	0.8	11	
9	150	0.25	0.6	0.4	11	
10	200	0.25	0.6	0.4	-6	





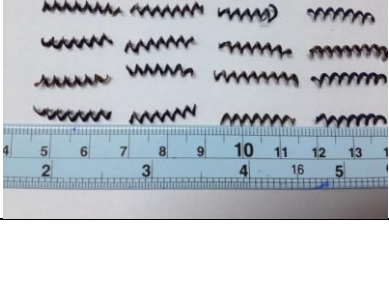
ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
11	100	0.15	0.6	0.4	11	
12	150	0.2	0.8	0.4	11	
13	200	0.25	0.4	0.4	11	
14	100	0.25	0.6	0.4	11	
15	150	0.25	0.6	0.8	11	


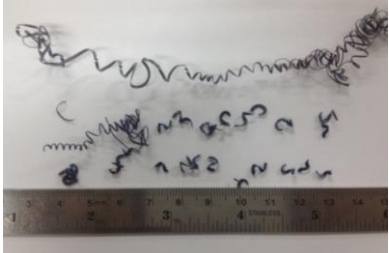




ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
16	200	0.15	0.4	0.4	-6	
17	150	0.15	0.6	0.8	-6	
18	200	0.15	0.4	0.4	11	
19	150	0.25	0.4	0.4	11	
20	200	0.15	0.6	0.8	-6	
21	200	0.15	0.6	0.4	11	





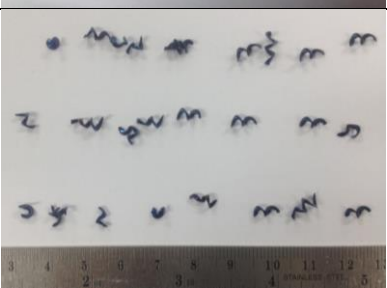

ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
22	150	0.15	0.4	0.4	-6	
23	150	0.15	0.6	0.8	11	
24	200	0.25	0.8	0.8	-6	
25	150	0.2	0.8	0.4	-6	
26	100	0.25	0.6	0.8	11	
27	150	0.15	0.4	0.8	-6	






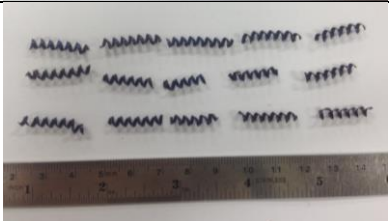
ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
28	150	0.25	0.4	0.8	11	
29	200	0.2	0.6	0.8	-6	
30	150	0.2	0.4	0.8	-6	
31	100	0.25	0.8	0.4	11	
32	200	0.25	0.6	0.8	11	
33	100	0.15	0.6	0.4	-6	




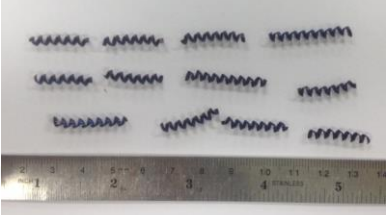

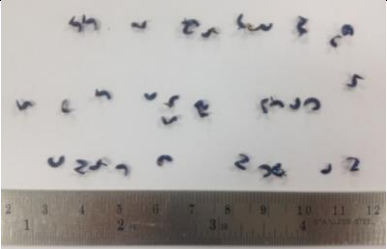
ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
34	100	0.2	0.4	0.8	-6	
35	200	0.25	0.6	0.4	11	
36	100	0.2	0.8	0.8	11	
37	200	0.2	0.4	0.8	-6	
38	100	0.15	0.4	0.8	-6	
39	100	0.15	0.6	0.8	-6	

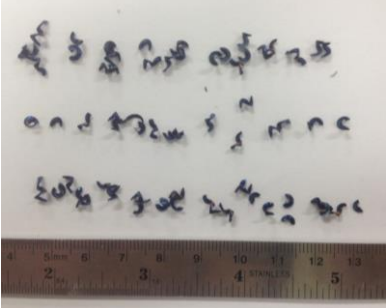
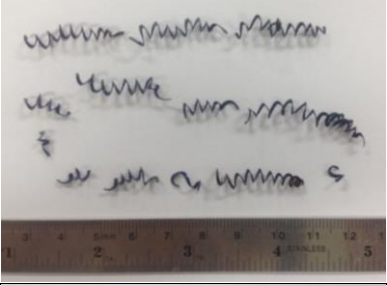



ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
40	200	0.2	0.4	0.4	11	
41	150	0.2	0.8	0.8	11	
42	200	0.15	0.4	0.8	11	
43	100	0.25	0.6	0.4	-6	
44	200	0.2	0.8	0.4	11	

ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
45	100	0.25	0.4	0.8	-6	
46	150	0.15	0.8	0.4	-6	
47	200	0.25	0.8	0.4	11	
48	150	0.25	0.6	0.4	-6	
49	200	0.25	0.4	0.8	-6	
50	100	0.15	0.6	0.8	11	

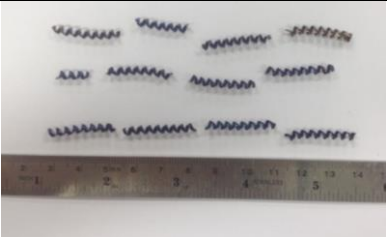


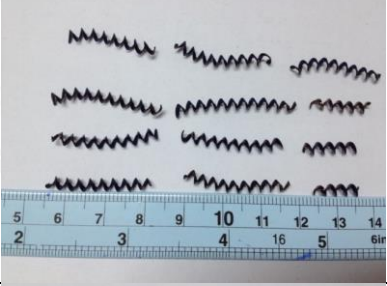


ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
51	100	0.15	0.8	0.4	11	
52	150	0.25	0.4	0.8	-6	
53	100	0.15	0.4	0.4	-6	
54	150	0.15	0.8	0.8	11	
55	100	0.2	0.8	0.4	-6	
56	200	0.15	0.8	0.4	11	






ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
57	150	0.15	0.6	0.4	11	
58	150	0.2	0.4	0.4	-6	
59	150	0.25	0.8	0.8	-6	
60	100	0.25	0.8	0.8	11	
61	150	0.2	0.4	0.8	11	
62	200	0.15	0.8	0.8	-6	





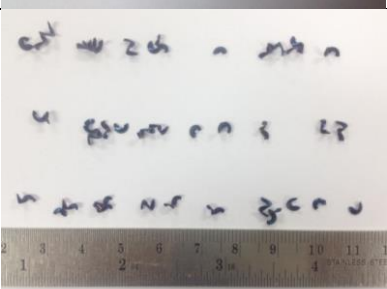
ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
63	100	0.2	0.6	0.8	-6	
64	200	0.25	0.6	0.8	-6	
65	150	0.2	0.6	0.4	-6	
66	150	0.15	0.8	0.8	-6	
67	200	0.15	0.4	0.8	-6	
68	200	0.2	0.8	0.4	-6	




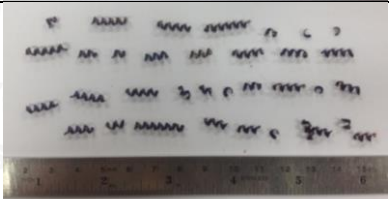

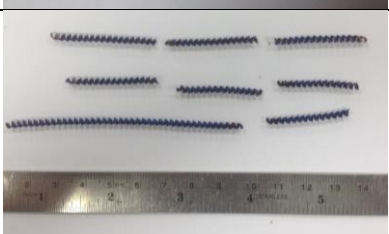
ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
69	150	0.25	0.8	0.4	-6	
70	200	0.15	0.6	0.4	-6	
71	100	0.15	0.8	0.8	11	
72	100	0.2	0.6	0.4	11	
73	150	0.2	0.8	0.8	-6	





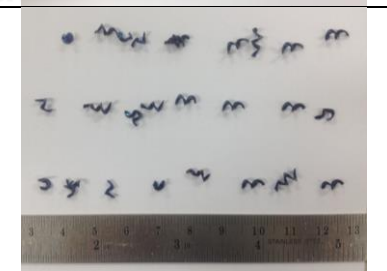
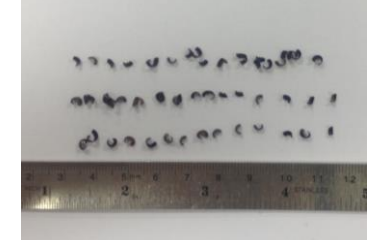
ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
74	200	0.2	0.6	0.4	11	
75	150	0.25	0.8	0.4	11	
76	100	0.25	0.8	0.8	-6	
77	200	0.15	0.6	0.8	11	
78	100	0.25	0.4	0.8	11	



ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
79	100	0.15	0.8	0.8	-6	
80	200	0.2	0.4	0.8	11	
81	150	0.15	0.8	0.4	11	
82	100	0.2	0.8	0.4	11	
83	200	0.25	0.4	0.8	11	
84	100	0.25	0.4	0.4	-6	

ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
85	100	0.25	0.4	0.4	11	
86	100	0.15	0.8	0.4	-6	
87	100	0.2	0.4	0.4	-6	
88	100	0.2	0.4	0.4	11	
89	100	0.15	0.4	0.4	11	

ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
90	150	0.2	0.6	0.8	11	
91	150	0.2	0.6	0.8	-6	
92	100	0.2	0.6	0.8	11	
93	200	0.15	0.8	0.8	11	
94	200	0.25	0.8	0.4	-6	

ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
95	150	0.2	0.4	0.4	11	
96	150	0.15	0.6	0.4	-6	
97	100	0.15	0.4	0.8	11	
98	200	0.2	0.8	0.8	-6	
99	200	0.2	0.8	0.8	11	
100	100	0.25	0.6	0.8	-6	

ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
101	150	0.25	0.4	0.4	-6	
102	150	0.15	0.4	0.4	11	
103	200	0.2	0.6	0.4	-6	
104	200	0.2	0.4	0.4	-6	
105	100	0.25	0.8	0.4	-6	
106	100	0.2	0.8	0.8	-6	

ที่	Speed	Feed	Depth	R_n	γ	เศษโลหะ
107	100	0.2	0.6	0.4	-6	
108	100	0.2	0.4	0.8	11	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเดือนพรรณ จันทนา เกิดเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม 2530 ที่จังหวัดเลย สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเลยอนุกุลวิทยา จังหวัดเลย ต่อมาเข้า ศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

