

การทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C



นายชวลิต วงศ์ตั้งถิ่นฐาน

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

TOOL WEAR PREDICTION OF COATED-
CARBIDE INSERT IN TURNING OF CARBON STEEL GRADE S45C

Mr. Chawalit Wongtangthinthan



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

การทำนายขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว
ในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

โดย

นายชวลิต วงศ์ตั้งถิ่นฐาน

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ดีไชย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พวงเพิกคิก)

ชวลิต วงศ์ตั้งถิ่นฐาน : การทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C (TOOL WEAR PREDICTION OF COATED-CARBIDE INSERT IN TURNING OF CARBON STEEL GRADE S45C) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 312 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วนแรงตัดพลวัตในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีบนเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C โดยสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลจากการทดลองการกลึงขึ้นกับปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง ซึ่งประกอบไปด้วยความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด จากผลการทดลองพบว่า สมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงนี้ สามารถใช้ทำนายขนาดการสึกหรอได้ถูกต้องที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อัตราส่วนแรงตัดพลวัตถูกนำเสนอให้ทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงได้ไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตามโดยคำนวณได้จากแรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ยในทิศอัตราการป้อนตัดต่อแรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ยในทิศความเร็วตัดที่เกิดขึ้นจากการตัดจริงซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีขนาดลดลงเมื่อขนาดสึกหรอของเม็ดมีดตัดมีขนาดเพิ่มขึ้น ไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม โดยความถูกต้องของสมการถูกทดสอบความถูกต้องด้วยการกลึงขึ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดใหม่พบว่าสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงสามารถใช้ทำนายขนาดการสึกหรอได้ถูกต้องและมีความแม่นยำ 93.50% แม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5470922921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS:

CHAWALIT WONGTANGTHINTHAN: TOOL WEAR PREDICTION OF COATED-CARBIDE INSERT IN TURNING OF CARBON STEEL GRADE S45C. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng., 312 pp.

The objective of this research is to propose the tool wear prediction model by monitoring the dynamic cutting forces in turning process. The experiments had been conducted with the coated carbide cutting tool and the carbon steel S45C. The proposed tool wear prediction model was developed by using the exponential function which consists of the cutting speed, the feed rate, the depth of cut, and the in-process dynamic cutting force ratio at 95% confidence level. The dynamic cutting force ratio is proposed and determined by the average dynamic feed force in the feed direction to the dynamic main force in the cutting speed direction. The experimentally obtained results showed that the dynamic cutting force ratio becomes lower when the tools wear progresses even though the cutting conditions are changed. The proposed tool wear prediction model is proved by the new cutting tests and the obtained results run satisfactorily with the high accuracy of 93.50%.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Industrial Engineering

Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้ง ร้องศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาส อุทิศเวลาเอาใจใส่ ให้ความรู้ ความเข้าใจ คำปรึกษา คำชี้แนะ และความช่วยเหลือ ตลอดจนแนวทางการดำเนินการวิจัยที่มีประสิทธิภาพ ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นถูกแก้ไขและจบลง จนสามารถทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฉวีไชย กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคิก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบข้อบกพร่องของงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความถูกต้อง สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ นายศิริพงษ์ ดำรงทวีศักดิ์ และนายชาญณรงค์ รุ่งเรือง ที่เสียสละเวลา ให้คำแนะนำ การแก้ปัญหา วิธีการใช้งานเครื่องจักรกลซีเอ็นซีและอุปกรณ์ในการทดลองอย่างถูกต้องและปลอดภัย จนทำให้ได้ผลการทดลองและข้อมูลที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์

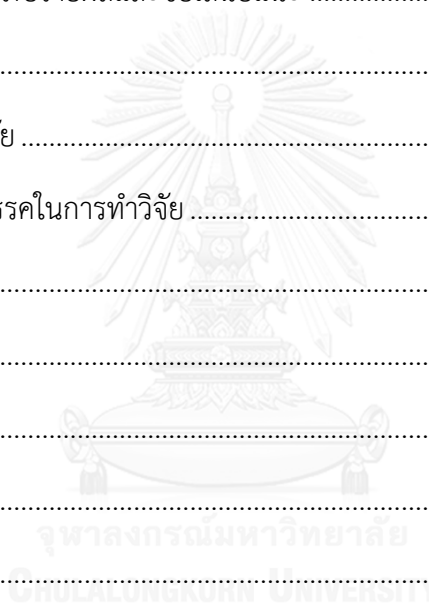
สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจ ในการทำวิจัย รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้กล่าวนามไว้ใน ณ ที่นี้ด้วย กำลังใจของทุกท่านได้รับมาจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	15
1.5 ทฤษฎีและสมมติฐาน หรือกรอบแนวคิดของการวิจัย.....	16
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	78
3.1 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	78
3.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	79
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	83
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	92
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	95

4.1 ผลการทดลอง	95
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด กับขนาดการ สึกหรอของเม็ดมีดตัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	96
4.3 สมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง	129
4.4 การประมาณค่าขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง	134
4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ	138
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	147
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	147
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	149
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการทำวิจัย	151
5.4 ข้อเสนอแนะ	152
รายการอ้างอิง	168
ภาคผนวก.....	173
ภาคผนวก ก.....	176
ภาคผนวก ข.....	209
ภาคผนวก ค.....	294
ภาคผนวก ง	298
ภาคผนวก จ.....	301
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	312



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจติดตามการสึกหรอ ของมีดตัด.....	8
ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดเสียหายของมีดตัด.....	45
ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด.....	47
ตารางที่ 2.3 สรุปข้อแตกต่างจากงานวิจัยในอดีต.....	67
ตารางที่ 3.1 ค่ามาตรฐานส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน	79
ตารางที่ 3.2 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	91
ตารางที่ 3.3 ตารางการออกแบบการทดลองของทุกเงื่อนไขการตัดทั้งหมด.....	91
ตารางที่ 4.1 การทดสอบความแม่นยำสมการเงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงการทดลอง.....	138

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล.....	4
รูปที่ 1.2 ระบบการทำงานของเครื่องจักรกลในระดับการสั่งการอัจฉริยะ.....	5
รูปที่ 1.3 เซนเซอร์ต่างๆที่มีใช้ในการตรวจติดตามในเครื่องจักรกล.....	6
รูปที่ 1.4 เปรียบเทียบขนาดแรงตัดมีดตัดใหม่กับมีดตัดสึกหรอ.....	12
รูปที่ 1.5 เปรียบเทียบลักษณะแรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัตที่อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ที่ขนาดความสึกหรอเท่ากับ 0.176 มิลลิเมตร.....	13
รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดแบบต่างๆที่เป็นพื้นฐานสำคัญ.....	18
รูปที่ 2.2 กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting).....	18
รูปที่ 2.3 กระบวนการตัดแบบเฉียง (Oblique Cutting).....	19
รูปที่ 2.4 ลักษณะงานที่สร้างขึ้นจากการกลึง.....	20
รูปที่ 2.5 กระบวนการกลึงทั่วไปและกระบวนการตัดฉาก (Orthogonal cutting).....	21
รูปที่ 2.6 กระบวนการตัดฉากใน 2 มิติ.....	21
รูปที่ 2.7 แบบจำลองสภาพการเศษโลหะที่ไหลออกขณะตัด ใน 2 มิติ.....	22
รูปที่ 2.8 ความเครียดและความเค้นที่เกิดขึ้นในมีดตัด.....	23
รูปที่ 2.9 กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting).....	24
รูปที่ 2.10 ผลกระทบของมุมเฉือน (shear angle, ϕ) ที่เปลี่ยนแปลงกับลักษณะขนาดของโลหะเศษกลึงในขณะตัด.....	25
รูปที่ 2.11 ปัจจัยต่างๆในกระบวนการกลึง.....	26
รูปที่ 2.12 ภาพฉายสามด้านของเรขาคณิตของมีดกลึง.....	28
รูปที่ 2.13 ภาพฉายไอโซเมตริกของเรขาคณิตของมีดกลึง.....	29
รูปที่ 2.14 การอ่านค่าเรขาคณิตของด้ามมีดกลึง.....	30
รูปที่ 2.15 ผลกระทบของค่ามุมด้านบวกลและด้านลบของมุมคายเศษโลหะด้านหลังของมีดกับลักษณะรูปร่างเศษโลหะที่เกิดขึ้น.....	30
รูปที่ 2.16 ลักษณะสภาพการเกิดเศษโลหะตามลักษณะวัสดุที่แตกต่างกัน.....	31
รูปที่ 2.17 ลักษณะเศษกลึงโลหะจากการกลึง.....	32

	หน้า
รูปที่ 2.18 การเลือกใช้ชนิดของตัวหักเศษโลหะ.....	33
รูปที่ 2.19 ชนิดของตัวหักเศษโลหะ.....	33
รูปที่ 2.20 ผลกระทบต่อรูปร่างเศษโลหะ เมื่อมุมคายเศษโลหะเป็นบวกรหรือลบ.....	34
รูปที่ 2.21 เม็ดมีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ที่มีลักษณะเป็นร่องนูน สูงต่ำเพื่อช่วยให้เศษโลหะ มีวนตัวเกิดแตกหักในขณะตัด.....	34
รูปที่ 2.22 ระบบแรงบนคมตัดของการตั้งฉาก.....	35
รูปที่ 2.23 ระบบแรงเสียดทาน.....	36
รูปที่ 2.24 ระบบของแรงเฉือน.....	37
รูปที่ 2.25 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงและวิธีการสร้าง.....	38
รูปที่ 2.26 เรขาคณิตพื้นฐานของกระบวนการกลึง.....	39
รูปที่ 2.27 องค์ประกอบของแรงตัดทั้งหมดในกระบวนการกลึง.....	39
รูปที่ 2.28 เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์.....	41
รูปที่ 2.29 การต่อไดนาโมมิเตอร์กับมีดกลึงเพื่อวัดแรงตัด.....	42
รูปที่ 2.30 กระบวนการเชื่อมต่อสัญญาณโดยการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรง ซึ่งสัญญาณ แรงตัดถูกแสดงผ่านเครื่องออสซิลโลสโคป.....	43
รูปที่ 2.31 การกระจายความร้อนในบริเวณตัด.....	44
รูปที่ 2.32 ลักษณะการสึกหรอของมีดตัดที่ตำแหน่งหลักของมีดตัด.....	46
รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด.....	48
รูปที่ 2.34 ผลกระทบของความเร็วตัดที่เปลี่ยนแปลงในการวัดขนาดการสึกหรอด้าน ข้างคมตัดโดยกำหนดเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดเป็น 0.5 มิลลิเมตร.....	49
รูปที่ 2.35 ปัจจัยในการเลือกเครื่องมือตัด.....	53
รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งวัสดุเม็ดมีดตัดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น.....	54
รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ของความแข็งวัสดุกับความสามารถในการดูดซับแรงกระทำ ของมีดตัด.....	54
รูปที่ 2.38 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป.....	55
รูปที่ 2.39 ตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย.....	57
รูปที่ 3.1 ภาพวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ใช้ในการกลึง.....	79
รูปที่ 3.2 เม็ดมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง.....	80

	หน้า
รูปที่ 3.3 ด้ามมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง.....	80
รูปที่ 3.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง.....	81
รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์หรือเซนเซอร์วัดแรงตัด.....	81
รูปที่ 3.6 เครื่องขยายสัญญาณแรงตัด.....	82
รูปที่ 3.7 เครื่องออสซิลอโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด.....	82
รูปที่ 3.8 กล้องไมโครสโคปส่องเม็ดยัด.....	83
รูปที่ 3.9 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์บนชุดบีมมีดเครื่องซีเอ็นซี.....	83
รูปที่ 3.10 การต่อสายสัญญาณจากไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ.....	84
รูปที่ 3.11 การต่อสายสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกสัญญาณ.....	84
รูปที่ 3.12 การติดตั้งเครื่องขยายสัญญาณและเครื่องบันทึกสัญญาณ.....	85
รูปที่ 3.13 การติดตั้งชิ้นงานและไดนาโมมิเตอร์ในเครื่องซีเอ็นซี.....	85
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	87
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการวัดขนาดการสึกหรอของเม็ดยัด.....	88
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ขนาดความสึกหรอ(Vb)เท่ากับ 0.20 มิลลิเมตร.....	89
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการคำนวณขนาดแรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย dFz และ dFy.....	90
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดยัดตัด กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต(dFy/dFz) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน.....	96
รูปที่ 4.2 ทิศของแรงตัดสัมพันธ์กับทิศการหมุนของชิ้นงาน.....	97
รูปที่ 4.3 ภาพขนาดการสึกหรอด้านข้างความตัดของเม็ดยัดกลึงที่ขนาดต่างๆ.....	98
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดยัดตัด กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต(dFy/dFz) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน.....	99

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัด กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัด ต่างกัน.....	118
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความลึกตัดและแรงตัด.....	119
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัด กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัด ต่างกัน.....	120
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัด กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัด ต่างกัน.....	121
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัด กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัด ต่างกัน.....	122
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัด กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัด ต่างกัน.....	123
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัด กับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัด ต่างกัน.....	124

รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน.....	125
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน.....	126
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน.....	127
รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ในทุกเงื่อนไขการตัด.....	128
รูปที่ 4.33 Normal Probability Plot ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต.....	131
รูปที่ 4.34 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดหรือแฟรงค์แวร์ (Flank wear) ของเม็ดมีดกลึง.....	132
รูปที่ 4.35 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของขนาดการสึกหรอ.....	133
รูปที่ 4.36 การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงพหุคูณด้วยการแปลงลอการิทึมกลึง.....	134
รูปที่ 4.37 ผลการทดลองที่ 1 การทดสอบความแม่นยำสมการทำนายขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่นอกช่วงได้แก่ ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร.....	139
รูปที่ 4.38 ผลการทดลองที่ 2 การทดสอบความแม่นยำสมการทำนายขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่นอกช่วงได้แก่ ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร.....	140

รูปที่ 4.39 ผลการทดลองที่ 3 การทดสอบความแม่นยำสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงได้แก่ ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร.....	141
รูปที่ 4.40 ผลการทดลองที่ 4 การทดสอบความแม่นยำสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงได้แก่ ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร.....	142
รูปที่ 4.41 ผลการทดลองที่ 1 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงโดยเปรียบเทียบกับเวลา ที่เงื่อนไข ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร.....	143
รูปที่ 4.42 ผลการทดลองที่ 2 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงโดยเปรียบเทียบกับเวลา ที่เงื่อนไข ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร.....	144
รูปที่ 4.43 ผลการทดลองที่ 3 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงโดยเปรียบเทียบกับเวลา ที่เงื่อนไข ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร.....	145
รูปที่ 4.44 ผลการทดลองที่ 4 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงโดยเปรียบเทียบกับเวลา ที่เงื่อนไข ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร.....	146
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างขนาดการสึกหรอของมีดตัดเท่ากับ 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	153

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างเศษโลหะแตกหักที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงเท่ากับ 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	154
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา ที่ให้เศษโลหะแตกหักที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	154
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ ที่ให้เศษโลหะแตกหักที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	155
รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFx ในโดเมนเวลา ด้วยการแปลงเวฟเล็ตที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	157
รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFy และ dFz ในโดเมนเวลา ด้วยการแปลงเวฟเล็ตที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	158
รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFx และ dFy ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ตที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	159
รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFz ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ตที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	160
รูปที่ 5.9 ตัวอย่างขนาดการสึกหรอของเม็ดตัดเท่ากับ 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	160
รูปที่ 5.10 ตัวอย่างเศษโลหะแตกหักที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงเท่ากับ 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	161

รูปที่ 5.11 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา ที่ให้เศษโลหะแตกหัก
 ที่ขนาดการสึกหรอของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตร
 ต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....161

รูปที่ 5.12 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ ที่ให้เศษโลหะแตกหัก
 ที่ขนาดการสึกหรอของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25
 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....162

รูปที่ 5.13 สัญญาณแรงตัดพลวัต dF_x และ dF_y ในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ต
 ที่ขนาดการสึกหรอของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25
 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....163

รูปที่ 5.14 สัญญาณแรงตัดพลวัต dF_z ในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ตที่ขนาดการสึก
 หรอของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด
 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....164

รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงตัดพลวัต dF_x และ dF_y ในโดเมนความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเล็ต
 ที่ขนาดการสึกหรอของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25
 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....165

รูปที่ 5.16 สัญญาณแรงตัดพลวัต dF_z ในโดเมนความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเล็ต
 ที่ขนาดการสึกหรอของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25
 มิลลิเมตรต่อรอบความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....166

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยทั้งในด้านการผลิตการตลาดการจ้างงานและการพัฒนาเทคโนโลยีรวมไปถึงความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกหลายประเภท ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในด้านการลงทุนจากบริษัทต่างชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศญี่ปุ่น ชีตความสามารถในด้านการผลิตและส่งออกชิ้นส่วนยานยนต์ของไทยนั้นเป็นที่ยอมรับในระดับโลก ซึ่งประเทศไทยนั้นมีข้อได้เปรียบในด้านต่างๆ เช่นการสนับสนุนจากภาครัฐที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ นิคมอุตสาหกรรมที่เอื้ออำนวยศักยภาพแรงงาน และยังมีขีดความสามารถในการรองรับการขยายตัวของอุตสาหกรรมยานยนต์ในอนาคตได้ มากไปกว่านั้นการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบยานยนต์ในประเทศไทยมีความเป็นมาตรฐานสากล ทำให้สินค้าที่ผลิตได้นั้นมีคุณภาพสูงและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้เป็นอย่างดี ราคาและคุณภาพหลากหลายของผลิตภัณฑ์เป็นอีกสองปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผู้ผลิตต้องตระหนักถึงในการหาแนวทางพัฒนาวิธีการผลิตที่มีประสิทธิภาพ เพื่อลดต้นทุนการผลิต ทำกำไรสูง ชิ้นส่วนยานยนต์มีความหลากหลาย มีวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์สั้น ส่งมอบแก่ลูกค้าทันเวลาและผลิตผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่ต้องการของตลาด ลดของเสียจากกระบวนการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานและผลิตให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการผลิตชิ้นส่วนต้องได้คุณภาพ เพื่อให้ผู้ผลิตอยู่รอดและดำเนินธุรกิจต่อไปได้

ในปัจจุบันการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โลหะเช่น เพลา ข้อต่อส่งกำลัง ลูกสูบ หรืออุปกรณ์โลหะทางกล นิยมใช้เหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัติ ค่อนข้างเหนียว มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการเสียดสีได้ดี เหล็กกล้าคาร์บอนถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูป ถูกกำหนดขนาดด้วยกระบวนการตัดกลึงโลหะ เหมาะสมแก่การใช้ขึ้นรูปกำหนดขนาด สภาพผิวชิ้นงานได้ถูกต้องตามความต้องการและมีความแม่นยำสูง และเพื่อให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ได้ผลตามความต้องการ เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ได้ผลได้รวดเร็ว เพียงตรงและแม่นยำ จะมีบทบาทมากขึ้นในผลิต จึงเป็นที่นิยมอย่างมาก เพื่อให้ทันแก่ความต้องการของลูกค้า

กระบวนการกลึงโลหะเป็นกระบวนการกำจัดเศษโลหะที่ไม่ต้องการออกด้วยเม็ดมีดกลึง เคลือบผิวคาร์ไบด์ หรือมีดตัด โดยมีดจะเข้าไปทำมุม ตัดชิ้นงานโลหะในขณะที่ชิ้นงานกำลังหมุนทำให้เกิดเศษโลหะที่ไม่ต้องการขึ้น เพื่อปรับปรุงร่างชิ้นงานให้ได้ตามต้องการ แต่ในขณะที่กลึงตัด

ชิ้นงาน จะเกิดความร้อนสูงขึ้นระหว่างชิ้นงานที่หมุนและมีดตัดเพื่อกำจัดเนื้อเศษโลหะที่ไม่ต้องการซึ่งโดนตัดออกไป ซึ่งเป็นสาเหตุปัญหาที่ทำให้มีดตัดสึกหรอ การลดความร้อนขณะกำลังตัดชิ้นงานสามารถทำได้โดยใช้สารหล่อเย็นเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการลดความร้อนของแรงเสียดทานระหว่างเม็ดมีดกำลังและชิ้นงาน จะช่วยชะลอการสึกหรอเม็ดมีดกำลังตัด เพื่อที่จะรักษารูปร่าง ความเรียบผิวชิ้นงานไว้ได้ แต่ไอระเหยจกความร้อนของสารหล่อเย็นจะเป็นมลพิษแก่อากาศแวดล้อม อากาศที่ใช้หายใจ และสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามการใช้สารหล่อเย็นเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยชะลอการสึกหรอของเม็ดมีดตัดได้แต่จากเหตุผลเรื่องค่าใช้จ่ายการใช้สารหล่อเย็นและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีผลงานวิจัยในการลดการใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัดให้น้อยที่สุด [1] โดยหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมเพื่อชะลอการสึกหรอของเม็ดมีดกำลัง โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารหล่อเย็นของเหลว (Wet cutting) การพ่นละอองสารหล่อเย็น (Mist cutting) และการตัดโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry cutting) พบว่าเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดจากการใช้สารหล่อเย็นที่น้อยที่สุดคือเงื่อนไขการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry cutting) โดยมีดตัดสึกหรอช้าและค่าความขรุขระของชิ้นงานตัดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงมีแนวโน้มว่ากระบวนการตัดแบบแห้งจะนิยมใช้มากขึ้นในอนาคต

ในปัจจุบันปัญหามีดตัดสึกหรอยังคงเป็นปัญหาสำคัญในกระบวนการตัดกลึงเนื่องจากยังไม่มีเครื่องมือที่สามารถวัดขนาดการสึกหรอในระหว่างกระบวนการกลึงได้ มีดตัดสึกหรอจะทำให้สภาพความเรียบผิวชิ้นงาน และขนาดชิ้นงานนั้นผิดเพี้ยนไป มีความจำเป็นต้องมีการหยุดการทำงานเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนมีดใหม่ ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการแก้ไขเรื่องต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตเปลี่ยนเม็ดมีดกลึงใหม่และระยะเวลาการผลิตที่มากขึ้นเป็นสิ่งที่ผู้ผลิตไม่ต้องการ ท่ามกลางสภาวะการแข่งขันในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน ผู้ผลิตต้องการใช้วัตถุดิบให้คุ้มค่าที่สุดทำให้เกิดการควบคุมคุณภาพระหว่างการผลิตมากขึ้น และมีความต้องการเทคโนโลยีที่สูงขึ้นของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีมากขึ้นในอนาคต ดังนั้นการตรวจติดตามคุณภาพการกลึงชิ้นงานในระหว่างกระบวนการจึงมีความจำเป็น การที่เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสามารถตรวจติดตามขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกำลังตัดในระหว่างกระบวนการตัดกลึง จะช่วยลดค่าใช้จ่ายเวลาสูญเสียที่ไม่ต้องการออกได้ การตรวจติดตามสภาวะการตัดในระหว่างกระบวนการนั้นเครื่องจักรกลจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีที่สูงขึ้น สามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยตัวเองหรือมีระบบควบคุมอัตโนมัติ ยืดหยุ่น สามารถแสดงผลการทำงาน ตรวจสอบการทำงานได้อัตโนมัติและสามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นๆได้ เทคโนโลยีที่สูงขึ้นนำไปสู่การเป็นเครื่องจักรกลอัจฉริยะซึ่งจะมีบทบาทสำคัญ ในการยกระดับคุณภาพระบบการผลิตปัจจุบันให้ดียิ่งขึ้น

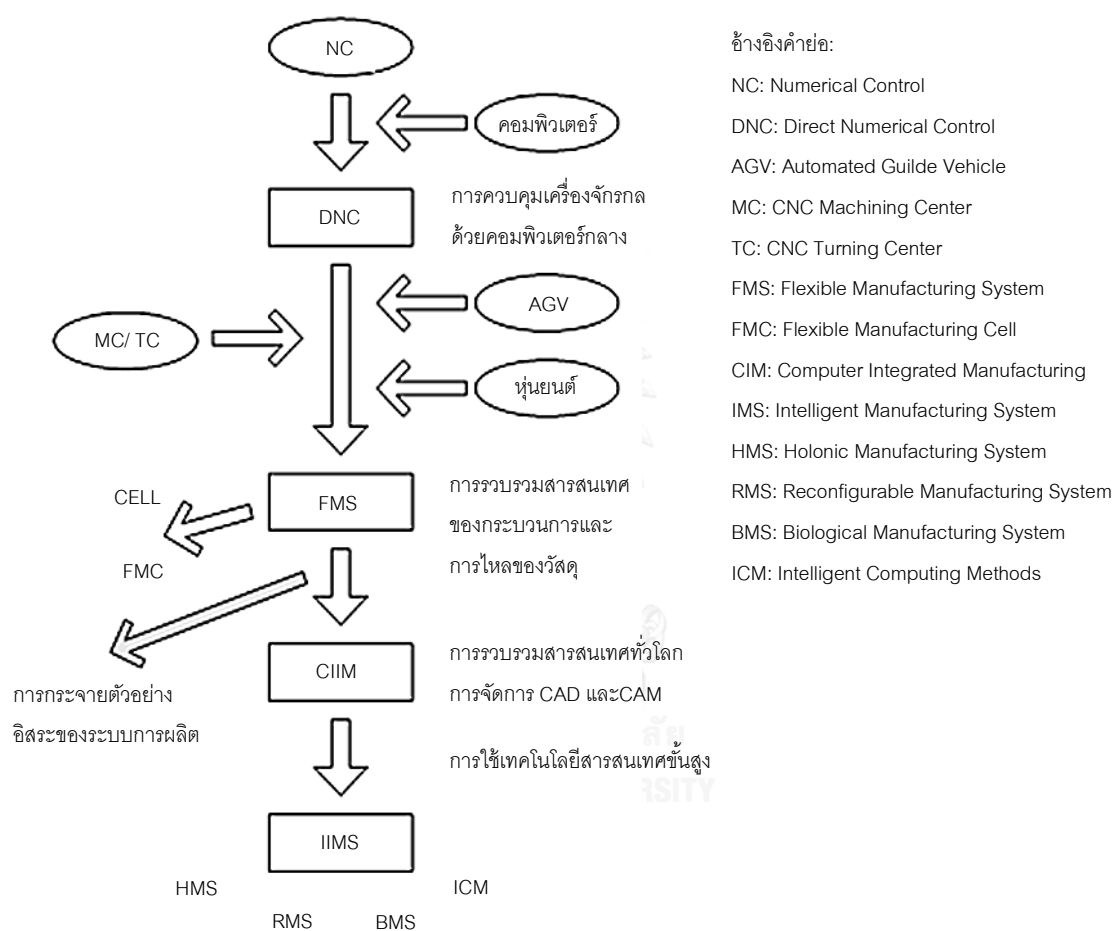
ดังที่กล่าวมา ปัญหาการสึกหรอของมีดตัดมีผลกระทบต่อทั้งด้านผลิตภาพและด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการกลึงตัดโลหะจึงมีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องจักรกลให้มีความเป็นอัจฉริยะที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเองหรือมีระบบอัตโนมัติ เพื่อใช้ในการตรวจติดตามสภาวะการตัด ขนาดชิ้นงาน ความเรียบผิว ขนาดการสึกหรอของมีดตัดในขณะกลึงชิ้นงานได้ ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ได้แก่ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด หรือความลึกตัดที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อตรวจติดตามแจ้งข้อมูลสภาพความเรียบผิว ขนาดการสึกหรอ แก่ผู้ปฏิบัติงานในการควบคุมคุณภาพการผลิตได้ถูกต้องและแม่นยำ ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่าย ในการผลิตผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ให้ตรงตามความต้องการและมีคุณภาพต่อไปได้

1.1.1 บทบาทเครื่องจักรกลอัจฉริยะต่ออุตสาหกรรมกลึงในอนาคต

เครื่องจักรกลอัจฉริยะจะเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากระบบอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันมีการแข่งขันสูง สภาวะแวดล้อมทางธุรกิจมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา รวมไปถึงกฎหมายที่เข้มงวดในการควบคุมการผลิตให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผู้ผลิตต้องการเทคโนโลยีให้เครื่องจักรกลทำงานแทนมนุษย์ และมีความเป็นอัจฉริยะที่สามารถผลิตชิ้นส่วนได้ถูกต้องตามที่ต้องการ ออกแบบไว้ เครื่องจักรกลสามารถตอบสนองผู้ใช้งาน ควบคุมการทำงานด้วยตัวเอง ตรวจสอบข้อมูลสภาวะการผลิตย้อนหลังได้ เพื่อให้ควบคุมการผลิตชิ้นส่วนอย่างมีคุณภาพ ไม่เกิดของเสียระหว่างกระบวนการ และสามารถผลิตได้ทันความต้องการของลูกค้าได้ ซึ่งระบบการผลิตดังกล่าวมาข้างต้น คือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System : IMS) โดยข้อมูลประวัติการพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตอัจฉริยะ ในกระบวนการผลิตจากอดีตไปจนถึงอนาคต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1

จุดเริ่มต้นของระบบการผลิตแบบอัตโนมัติ คือระบบควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control) และถูกพัฒนาเป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct NC, DNC) เครื่องจักรหลาย ๆ เครื่องได้ถูกควบคุมเชิงตัวเลขโดยผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนกลางโดยระบบจะควบคุมการไหลของวัสดุในระบบการผลิตด้วยข้อมูลสารสนเทศ ในการผลิตซึ่งก็คือระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System, FMS) โดยชิ้นงานและเครื่องมือต่างๆ ได้ถูกลำเลียงจากคลังสินค้าไปสู่เครื่องจักรอย่างอัตโนมัติด้วยรถเอจีวี (Automated Guide Vehicles, AGVs) โดยใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการลำเลียงระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นนี้สามารถรองรับการใช้งานเครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่มีความซับซ้อนได้ แต่การติดตั้งระบบนี้จำเป็นต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง และการเปลี่ยนโครงสร้างระบบแต่ละครั้งทำได้ยาก เพื่อที่จะตอบสนองต่อและรองรับกับปริมาณการผลิต

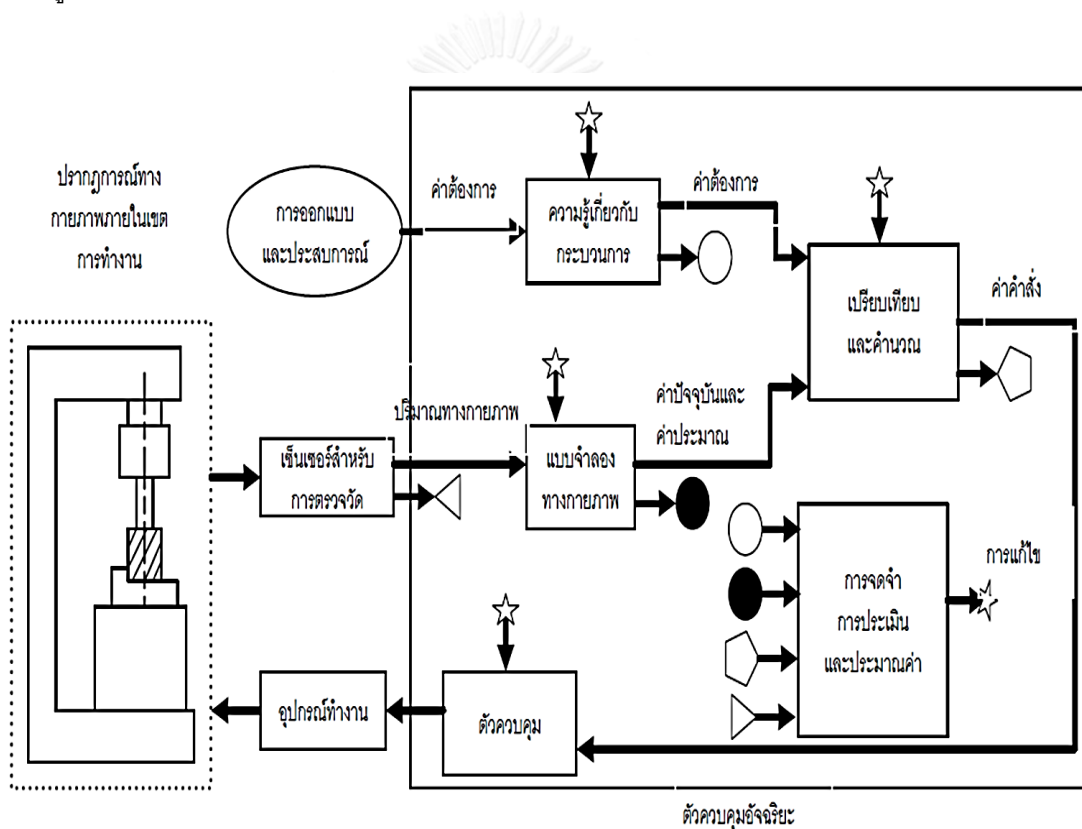
และชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ระบบนี้จึงถูกแทนที่ด้วย ระบบการผลิตแบบเซลล์ (Flexible Manufacturing Cell, FMC) ข้อดีของระบบการผลิตแบบเซลล์คือ ระบบมีขนาดเล็กและมีต้นทุนในการตั้งระบบต่ำกว่าแบบยืดหยุ่น มีการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติได้ด้วยตัวเอง มีความง่ายในการใช้งานเครื่องจักรและยืดหยุ่นสูงกว่าเพียงพอที่จะจัดการ เปลี่ยนแปลงระบบการผลิตจากการสั่งซื้อของลูกค้า



รูปที่ 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล [2]

หลังจากนั้น มีการพัฒนาระบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลข้อมูลสารสนเทศ ได้แก่ ข้อมูลการตลาด การจัดการ การควบคุมการผลิต หรือการบริการ (Computer Integrated Manufacturing, CIM) แต่มีข้อบกพร่องคือ ไม่มีความยืดหยุ่นและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงระบบเพื่อรองรับการผลิตที่เพิ่มขึ้นได้จริง ด้วยเหตุนี้จึงมีความคาดหวังว่าระบบการผลิตที่แจกจ่ายได้ด้วยตัวเอง (Autonomous distributed manufacturing systems) ที่มีเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูงจะ

สามารถรองรับและจัดการกับการเปลี่ยนแปลงการผลิตในอนาคตได้เนื่องมาจากอุปสงค์ที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ระบบนี้มีชื่อว่าระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System, IMS) ดังที่กล่าวมาแล้วเครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงมีความจำเป็นและได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกต่อระบบการผลิตที่มีความเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในกระบวนการผลิตชิ้นงานในอนาคต เครื่องจักรกลอัจฉริยะมีระบบอัตโนมัติในการตัดสินใจแทนผู้ปฏิบัติงานและเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดได้ด้วยตัวเอง ซึ่งได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด หรือความลึกตัดให้เหมาะสมกับสภาวะการตัดชิ้นงาน ในขณะที่เครื่องจักรกลปัจจุบัน ผู้ปฏิบัติงานต้องกำหนดเงื่อนไขการตัดก่อนที่จะเริ่มทำการตัดทุกครั้งโดยระบบการทำงานของเครื่องจักรกลอัจฉริยะแสดงได้ดังรูปที่ 1.2

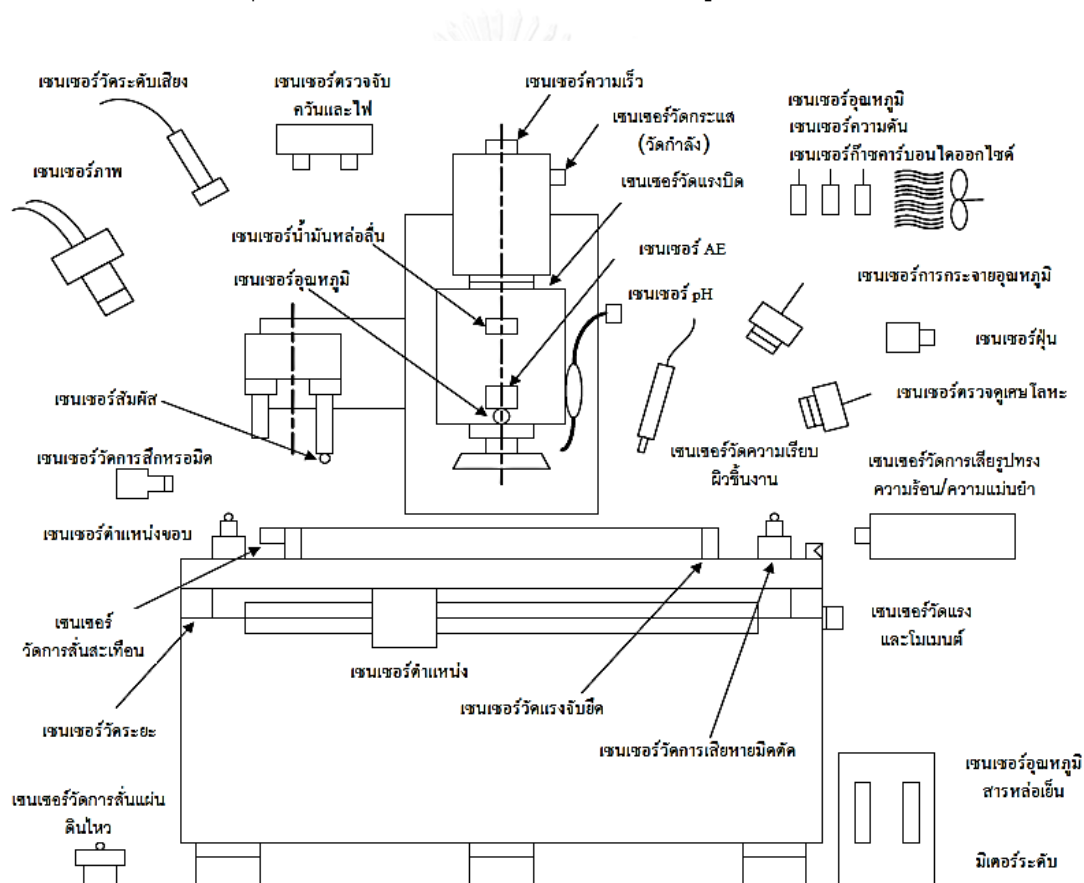


รูปที่ 1.2 ระบบการทำงานของเครื่องจักรกลในระดับการสั่งการอัจฉริยะ [2]

ในการพัฒนาเครื่องจักรกลให้มีความอัจฉริยะ มีความจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีในการตรวจบันทึกสัญญาณที่ได้จากการผลิต ได้แก่ สัญญาณทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง แรงหรือเสียงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เซนเซอร์ และเพื่อป้อนกลับ

สัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นในการกลั่นขึ้นงาน ไปประมวลผลสภาวะการผลิต เพื่อให้แน่ใจว่าระบบการผลิตนี้มีประสิทธิภาพ เครื่องจักรไม่ทำงานผิดพลาดและไม่ทำให้เกิดของเสีย

เซนเซอร์ในทางอุตสาหกรรมการกลั่นมีหลายชนิด การเลือกใช้ใช้งานควรคำนึงถึงลักษณะความเหมาะสมกับแต่ละประเภทเซนเซอร์ เพื่อให้ได้ผลสัญญาณจากการผลิตมีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด เพื่อป้องกันของเสียที่อาจเกิดขึ้นจากการผลิต ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณ การรวมเซนเซอร์หลายๆชนิดเข้าด้วยกัน (Multi-sensor systems) หรือเซนเซอร์อัจฉริยะ (Intelligent sensors) ทำให้เครื่องจักรทราบถึงสภาวะการผลิตมากขึ้นจากสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นและสามารถนำมาใช้ตรวจติดตามในระหว่างกระบวนการผลิตได้ละเอียดดียิ่งขึ้นมีเซนเซอร์หลายชนิดในอุตสาหกรรมการผลิตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 เซนเซอร์ต่างๆที่มีใช้ในการตรวจติดตามในเครื่องจักรกล [3]

ในการตรวจติดตามปัญหาที่มีตัดสึกหรอในขณะกลั่นขึ้นงานจะใช้ระบบการตรวจจับสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Continuous measurement system) เนื่องจากสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะกลั่นขึ้นงานทั้งกระบวนการจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดการสึกหรอของมีดตัดที่มากขึ้น

หรือค่าความขรุขระของชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น ข้อมูลที่ได้มีความละเอียดมากและทำให้ทราบถึง การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณและความผิดปกติเช่นมีดตัดสึกหรอ หรือพังในระหว่างกระบวนการกลึง ชิ้นงาน การใช้ระบบการวัดทางตรงจะให้ได้ปริมาณของตัวแปรที่ต้องการวัดนั้นอย่างแท้จริง (Real quantities) เช่น การวัดขนาดการสึกหรอของมีดตัด แต่ในทางปฏิบัติยังไม่สามารถวัดขนาดการ สึกหรอมีดตัดได้จริงในขณะกลึงชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องตรวจวัดสัญญาณทางอ้อม โดยใช้ปริมาณ เสริม (Auxiliary quantities) เช่น แรงตัดที่เกิดขึ้น หรือสัญญาณอื่นๆเข้ามาช่วยเพื่อหา ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามทั้งหมดจากการทดลอง (Empirically determined correlations) ดังนั้นระบบการวัดแบบต่อเนื่องโดยใช้สัญญาณตัวแปรอื่นๆที่เกิดขึ้นเข้ามาช่วยหา ขนาดการสึกหรอมีดตัดได้ทางอ้อม จะสามารถใช้ตรวจติดตามขนาดการสึกหรอของมีดตัดได้

1.1.2 การพัฒนาการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัด

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัด แรงตัดและขนาดการสึกหรอของมีดตัด พบว่าเงื่อนไขการตัดได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัดรัศมีจุมุมมีด และมุมคาย เฉพาะโลหะคือปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดการสึกหรอของมีดตัด โดยเฉพาะแรงตัดซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตาม เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป [3-6] หากพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นการตัดด้วย เงื่อนไขการตัด อัตราการป้อนตัดน้อยหรือใช้ความลึกตัดน้อย แรงตัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย แนวโน้ม เกิดการสั่นสะเทือนต่ำผิวชิ้นงานมีความเรียบผิวดี หรือขรุขระน้อย และมีดตัดมีขนาดการสึกหรอ เกิดขึ้นช้า ในทางกลับกันการตัดด้วยอัตราการป้อนตัดมากหรือใช้ความลึกตัดมาก แรงตัดที่ใช้จะมี ค่ามาก มีดตัดสึกหรอไว แนวโน้มเกิดการสั่นสะเทือนสูงจนส่งผลให้ชิ้นงานมีความเรียบผิวไม่ดีหรือ ขรุขระมาก การตัดด้วยความเร็วตัดสูงนี้ยังจะทำให้มีดตัดเกิดการสั่นสะเทือนและเกิดการสึกหรอ ได้ไวขึ้น ส่วนรัศมีจุมุมมีด มีดตัดที่ผ่านการใช้งานจะมีรัศมีจุมุมมีดใหญ่ขึ้นจากการสึกหรอ พื้นที่ สัมผัสระหว่างชิ้นงานและมีดตัดจะมีมากขึ้นเมื่อเทียบกับมีดตัดใหม่ที่มีรัศมีจุมุมมีดขนาดเล็ก ส่งผลทำให้แรงตัดมีค่ามากและในขณะที่การตัดด้วยมุมคายเฉพาะโลหะที่เป็นค่าลบ จะทำให้เศษ โลหะไหลออกไม่ดี แนวโน้มเกิดการสั่นสะเทือนมากกว่าการตัดด้วยมุมคายเฉพาะโลหะที่เป็นค่าบวก แรงตัดที่ใช้จะมีค่ามาก ทำให้มีดตัดสึกหรอได้ไวขึ้น และส่งผลต่อกระทบความเรียบผิวของชิ้นงาน ดังนั้น แรงตัดที่เกิดขึ้นจะแปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดและขนาดการสึกหรอที่เกิดขึ้น

จากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้แรงตัดในการตรวจติดตามการสึกหรอของ มีดตัด สามารถนำเสนอสรุปได้ในตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการ
ตรวจติดตามการสึกหรอของมีดตัด

งานวิจัย	เงื่อนไขการตัด	รายละเอียด	ข้อจำกัด
[7]	ความต้านทาน การตัดอัตรา การบ่อน	งานวิจัยที่สามารถตรวจสอบขนาดความสึกหรอ ของมีดตัดขณะตัด ในเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดย ประยุกต์ใช้สมการเอ็กโพเนนเชียลแบบเสื่อมถอย เป็นตัวแทนอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการบ่อน ตัดและความต้านทานตัด (ตัวดัชนี a) ที่เกิดขึ้นไม่ ว่าเงื่อนไขการตัดเช่นความเร็วตัด ความลึกตัด เม็ด มีดตัด หรือวัสดุชิ้นงานจะเป็นอย่างไร ความ ต้านทานตัดสามารถถูกนำมาวิเคราะห์หาอัตราการ สึกหรอของมีดตัดได้	ไม่ได้กล่าวถึง ความสัมพันธ์ของ ความเร็วตัดและ ความลึกตัดที่มี ผลต่อแรงตัด ไม่ได้กล่าวถึง พารามิเตอร์อิสระ ตัวอื่นเช่น อัตราส่วนแรงตัด ซึ่งสามารถลบ อิทธิพลของ เงื่อนไขการตัด ต่างออกไปได้ [8]
[8]	ความเร็วตัด อัตราการบ่อน ตัด ความลึกตัด แรงตัด รัศมีจุมูกมีด	งานวิจัยในการสร้างโมเดลเพื่อทำนายค่าความ เรียบผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการกลึง โดย อาศัยอัตราส่วนแรงตัดในขณะตัดจริงเข้ามาตรวจ ติดตาม โมเดลสมการแสดงความเรียบผิวชิ้นงาน โมเดลถูกแสดงด้วยสมการเอ็กโพเนนเชียลจากห่า ปัจจัยเงื่อนไขการตัด ซึ่งสามารถพยากรณ์ค่าความ ขรุขระผิวชิ้นงานได้ และมีความถูกต้อง แม่นยำสูง	ไม่สามารถทราบ ได้ว่า สภาพความ เรียบผิวของ ชิ้นงานดีหรือไม่ดี การประยุกต์ใช้ หลักการควบคุม คุณภาพระหว่าง การตรวจติดตาม เป็นสิ่งจำเป็น
[9]	ความเร็วตัด อัตราการบ่อน สเปคตรัมกำลัง	งานวิจัยในการพัฒนาระบบการกลึง โดยสร้าง ระบบและขั้นตอนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เครื่อง ซีเอ็นซี สามารถตรวจสอบอัตราการสึกหรอและอายุ การใช้งานของเม็ดมีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ได้ โดย	แบบจำลองที่ได้ ไม่สามารถ พยากรณ์ค่า

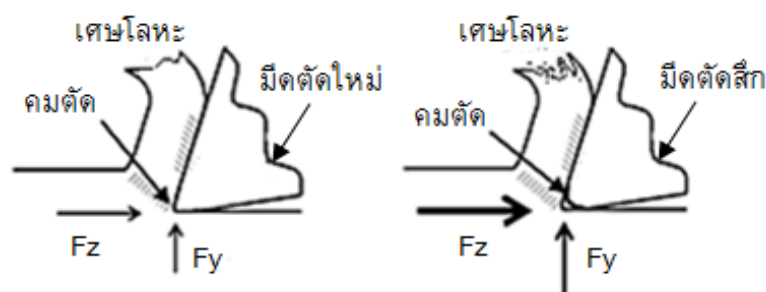
งานวิจัย	เงื่อนไขการตัด	รายละเอียด	ข้อจำกัด
	ค่าความต้านทานการตัดแรงตัด	ตรวจจับสัญญาณแรงตัดจากการแปรเปลี่ยนค่าความเร็วตัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกหรือของเม็ดมีดตัดที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัด และตรวจสอบเสถียรภาพของการตัดโดยตรวจสอบสภาพเศษโลหะที่เกิดขึ้นหลังจากการตัด เพื่อหาอายุการใช้งานของมีดตัด	ความขรุขระผิวได้ในขณะตัดจริง
[10]	ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน	งานวิจัยในการปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานโดยการควบคุมขนาดความลึกหรือแรงแวรและความเรียบผิวชิ้นงานขณะตัดของกระบวนการกลึงด้วยเครื่องซีเอ็นซีโดยการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ด้วยการออกแบบการทดลองแบบทาคูจิเพื่อหาพารามิเตอร์ของกระบวนการตัดที่เหมาะสมซึ่งจะมีผลกระทบต่อขนาดความลึกหรือและความเรียบผิวสำเร็จ ผลการวิจัยได้สรุปว่าความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อขนาดความลึกหรือและความเรียบผิวสำเร็จชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ	แบบจำลองที่ได้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่มีความเร็วรอบสูงและไม่สามารถพยากรณ์ขนาดความลึกหรือเม็ดตัดในขณะตัดจริง
[11]	ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด ชิ้นงาน ไทเทเนียม อัลลอย เม็ดมีด กลึงเคลือบผิว คาร์ไบด์ แรงตัด	งานวิจัยนี้พัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ของเม็ดมีดกลึง ด้วยแรงตัดหลัก (Fz) ในกระบวนการกลึงไทเทเนียมอัลลอย ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Full factorial) ปัจจัย ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด แต่ละปัจจัยมีสามระดับ สร้างรูปแบบสมการจำลองถดถอยเชิงเส้นตรง ในการทำนายค่าขนาดการสึกหรอ ผลการทดลอง แรงตัดหลัก (Fz) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเชิงเส้นตรง เมื่อขนาดการสึกหรอเม็ดมีดกลึงมีขนาดมากขึ้น โดยการเพิ่มความลึกตัดและอัตราการป้อนตัดส่งผลต่อ	แรงตัดหลัก (Fz) ที่นำมาใช้ไม่ได้ ทำอัตราส่วนแรงตัดเพื่อขจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่างๆ ความแข็งวัสดุชิ้นงานออกไป สมการทำนายขนาดการสึกหรอ

งานวิจัย	เงื่อนไขการตัด	รายละเอียด	ข้อจำกัด
		ขนาดการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ สมการถดถอยมีความแม่นยำ 90.01%	เม็ดเม็ดกลิ้งเป็นแบบเชิงเส้นตรง แต่ในทางทฤษฎีของสมการเทอร์เลอร์แล้วขนาดการสึกหรอควรจะมีลักษณะเป็นแบบฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลไม่ใช่เชิงเส้นตรง
[12]	ความเร็วตัด อัตราการบิ่น ตัด ความลึกตัด ชิ้นงาน โครเมียม อัลลอย เม็ดเม็ด กลิ้งเซรามิก	งานวิจัยนี้แสดงการตรวจติดตามสภาพขนาดการสึกหรอเม็ดเม็ดกลิ้ง ด้วยการใช้สัญญาณเซนเซอร์หลายๆชนิด ได้แก่เซนเซอร์วัดแรง เซนเซอร์วัดความสั่นสะเทือน และเซนเซอร์เสียง โดยประมวลผลจากสัญญาณในโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ด้วยการแปลงสัญญาณเวฟเล็ต ทำการคัดเลือกสัญญาณสำหรับการตรวจสอบขนาดการสึกหรอ คัดแยกโดยกรองสัญญาณคลื่นความถี่ต่ำโดยพิจารณารูปร่าง สัญญาณที่เกี่ยวข้องทั้งหมด มีการทดลองทำซ้ำ ความถูกต้องของสัญญาณจะถูกประเมินย้อนกลับไปที่เหมาะสมของเซนเซอร์ด้วย ผลการทดลองพบว่าสัญญาณจากเซนเซอร์วัดแรงให้สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับขนาดการสึกหรอมากที่สุด รองลงมาคือ เซนเซอร์วัดความสั่นสะเทือน และเซนเซอร์เสียง	ไม่ได้พิจารณาถึงการขจัดอิทธิพลอื่นๆที่มีผลกับแรงตัด เพราะใช้แรงตัดมาพิจารณาแค่แรงในแนวเดียว (Fz) ไม่มี การตรวจติดตามขนาดการสึกหรอจากการตัด ชิ้นงานที่มีลักษณะขรุขระ และยังไม่มีการทดสอบสมการตรวจติดตามที่สร้างขึ้นว่ามีความแม่นยำเพียงใด

งานวิจัย	เงื่อนไขการตัด	รายละเอียด	ข้อจำกัด
[13]	ความเร็วตัด อัตราการป้อน ตัด ความลึกตัด เหล็กเกรด EN 8 เม็ดมีดกลึง HSS-M2	งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองกลึงชิ้นงานเหล็กเกรด EN 8 ด้วยเม็ดมีดกลึง HSS-M2 ด้วยเงื่อนไขการตัดคงที่แล้ววัดขนาดการสึกหรอจริง พร้อมกับบันทึกแรงตัดที่เกิดขึ้น ผลการทดลองพบว่า แรงตัดหลัก (Fz) มีขนาดใหญ่กว่าแรงป้อนตัด (Fy) เมื่อขนาดการสึกหรอมัดกลึงมีขนาดใหญ่ขึ้น มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) ในการวิเคราะห์รูปภาพความตึงเครียดที่เกิดที่คมตัดของเม็ดมีดกลึง รวมถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เพื่อใช้พัฒนาการทำนายขนาดการสึกหรอในระหว่างตัดชิ้นงาน ได้ถูกคาดหวังไว้ว่า FEM จะเป็นที่ยอมรับในอนาคต	ไม่ได้พิจารณาถึง การขจัดอิทธิพล อื่นๆที่มีผลกับแรง ตัดด้วยอัตราส่วน แรงตัด ยังไม่มีการสร้าง สมการทำนาย ขนาดการสึกหรอ ใช้เงื่อนไขการตัด เดียวในการทำ วิจัยไม่มีความ ยืดหยุ่น

นอกจากนั้นยังมีผลงานวิจัยการตรวจติดตามการสึกหรอของเม็ดตัดเพิ่มเติมในอดีต เช่น ในปี 1990 ผลงานวิจัยของ Cuppini และ Errico [14] ใช้วิธีการตรวจติดตามการสึกหรอแบบต่อเนื่องในกระบวนการกลึง โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของใบมีดและกำลังในการตัด แต่เงื่อนไขการตัดเช่น วัสดุชิ้นงาน อัตราการป้อนตัด ความเร็วตัด และความลึกตัดไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา ในปี 1991 ผลงานวิจัยของ Oraby และ Hayhurst [15] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของเม็ดตัดโดยเปรียบเทียบกับเวลาและแรงตัด ซึ่งพบได้ว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับขนาดความสึกหรอของเม็ดตัด ในปี 1997 ผลงานวิจัยของ Moriwaki และ Shamoto [16] ได้พัฒนาการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอของเม็ดตัดในกระบวนการกัด โดยสร้างแบบจำลองแรงตัดและค่าความต้านทานการตัดเพื่อคำนวณหาขนาดสึกหรอของเม็ดตัด แต่ขาดความยืดหยุ่นในเงื่อนไขการตัดต่างๆเช่น วัสดุชิ้นงาน อัตราการป้อนตัด ความเร็วตัด และความลึกตัดซึ่งส่งผลต่อความต้านทานการตัดไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาร่วมด้วย และ ในปี 2000 ผลงานวิจัยของ Choudhury และ Kishore [17] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทดลองขนาดการสึกหรอของเม็ดตัดของกระบวนการกลึง โดยใช้อัตราส่วนแรงตัดได้ถูกสร้างขึ้นแต่ไม่ได้พิจารณาอิทธิพลของวัสดุชิ้นงาน ด้วยเพราะเหตุนี้ จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาไม่ค่อยถูกนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติเนื่องจากขาดความยืดหยุ่นและความสามารถที่นำไปใช้งานได้จริง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [7-9, 18] แรงตัดที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อขนาดการสึกหรอของมีดตัด ในขณะที่ตัดกิ่งชิ้นงาน มีสองแรงคือ แรงป้อนตัด (F_y) ในทิศการป้อนตัดซึ่งมีผลต่อความขรุขระชิ้นงานและแรงตัดหลัก (F_z) ในทิศของการหมุนของชิ้นงานซึ่งมีค่าแปรผันกับเงื่อนไขการตัด ความแข็งแรงชิ้นงานหรือขนาดการสึกหรอของมีดตัด ส่วนแรงตัดในแนวรัศมีชิ้นงาน (F_x) มีผลกระทบน้อยต่อขนาดการสึกหรอของมีดตัด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างมีดตัดใหม่และมีดที่สึกหรอ ดังรูปที่ 1.4 พบว่า มีดตัดที่สึกมากจะมีรัศมีมุมมีดใหญ่ขึ้นทำให้มีดตัดชิ้นงานได้ยาก เกิดการสั่นสะเทือนระหว่างมีดกับชิ้นงานสูง ส่งผลให้แรงตัดหลักในทิศการหมุนของชิ้นงานสูงขึ้นกว่าแรงป้อนตัดอย่างเด่นชัด



รูปที่ 1.4 เปรียบเทียบขนาดแรงตัดมีดตัดใหม่กับมีดตัดสึกหรอ

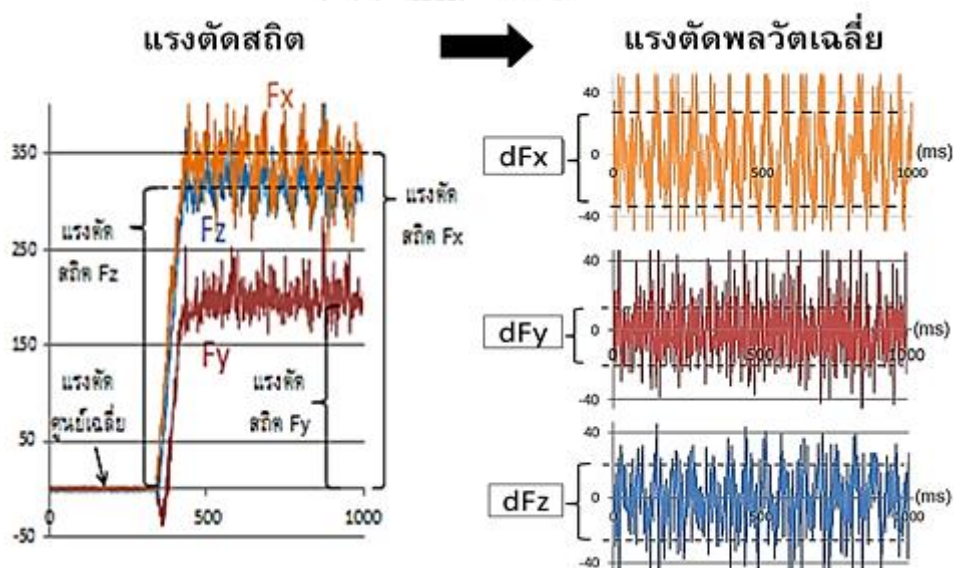
จากรูปที่ 1.4 แรงตัดส่งผลต่อสภาพค่าความเรียบผิวหรือความขรุขระของชิ้นงาน เนื่องจากเกิดการสึกหรอของมีดตัด ค่าความขรุขระของชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อขนาดการสึกหรอของมีดตัดมีขนาดใหญ่ขึ้น [3] มีงานวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาการตรวจติดตามสภาพการสึกหรอของมีดตัดโดยวัดสัญญาณแรงตัดที่ได้จากจากเซนเซอร์วัดแรง หรือไดนาโมมิเตอร์ [7-10] ที่ติดตั้งภายในเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะเงื่อนไขการตัดต่างๆ แรงตัดที่เกิดขึ้นคือแรงป้อนตัดในทิศทางการป้อน (F_y) ซึ่งมีผลต่อสภาพความเรียบผิวของชิ้นงาน และแรงตัดหลัก (F_z) ในทิศการหมุนของชิ้นงาน ทั้งแรงป้อนตัดและแรงตัดหลักถูกใช้ในการตรวจติดตามค่าความเรียบผิวของชิ้นงานในขณะที่ตัด [9] โดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดสามารถกำจัดอิทธิพลที่จากเงื่อนไขการตัดและสภาพของวัสดุชิ้นงานออกได้ โดยไม่ว่าเงื่อนไขการตัดหรือชนิดวัสดุชิ้นงานจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม [8] อัตราส่วนแรงตัดจึงถูกนำมาใช้ในการตรวจติดตามค่าความเรียบผิวมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้อัตราส่วนแรงตัดจึงถูกเสนอเพื่อประมาณขนาดการสึกหรอของมีดตัดได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการใช้แรงตัดสถิตในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับขนาดการสึกหรอ [18-20] แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแรงตัดพลวัตในการวิเคราะห์ความสึกหรอของมีดตัดและเงื่อนไขการตัด เนื่องจาก ความขรุขระกับความสึกหรอมีความสัมพันธ์กันซึ่งจากงานวิจัยที่

ผ่านมามีการใช้แรงตัดพลวัตในการทำนายความขรุขระ [6] ดังนั้นในงานวิจัยนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอของมีดตัดจึงใช้แรงตัดพลวัตเหมือนกัน

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ F_y คือ แรงป้อนตัดในทิศทางของการป้อนตัด (Feed force) โดยมีแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) เป็นองค์ประกอบและ F_z คือ แรงตัดหลัก (Main force) ในทิศทางของการหมุนของชิ้นงาน โดยมีแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) เป็นองค์ประกอบและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต คือ dF_y/dF_z ซึ่ง F_y และ F_z โดยทั่วไปสามารถวัดได้ด้วยไดนามิเตอร์ [5] ส่วนแรงตัดในแนวรัศมีชิ้นงาน (F_x) มีผลกระทบน้อยต่อขนาดการสึกหรอมีดตัด ไม่นำมาพิจารณา

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณแรงตัด ลักษณะแรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัต ดังรูปที่ 1.5 จะพบว่าลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตให้ผลตามความเป็นจริงว่าลักษณะสัญญาณแรงตัดสถิต เพราะแรงตัดสถิตเกิดจากการคำนวณค่าเฉลี่ยหลังจากหากลบค่าแรงตัดศูนย์ออกไปในขณะที่ยังมีแรงตัดพลวัตจะให้ผลแรงตัดที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัดซึ่งสัญญาณแรงตัดที่วัดได้มีขนาดแอมพลิจูดมากขึ้นตามค่าความขรุขระชิ้นงานที่มากขึ้นและขนาดการสึกหรอของมีดตัดที่เพิ่มขึ้น [6, 21-23]



รูปที่ 1.5 เปรียบเทียบลักษณะแรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัต ในโดเมนเวลาที่อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตรความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ที่ขนาดความสึกหรอ(V_b)เท่ากับ 0.176 มิลลิเมตร

จากการศึกษาผลงานวิจัยดังกล่าวมา ในงานวิจัยเล่มนี้ได้ศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของการสึกหรอด้านข้างคมตัดหรือแฟรงแวร์ (Cutting flank wear, V_b) ของเม็ดมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ที่เกิดขึ้นขณะตัดจริง ซึ่งจะถูกรวบรวมโดย

เซนเซอร์วัดแรง หรือไดนาโมมิเตอร์ที่ติดตั้งไว้กับมีดตัดภายในเครื่องกลึงซีเอ็นซี บันทึกสัญญาณแรงตัดจากขนาดความลึกหรือที่เกิดขึ้นผ่านเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าหรือออสซิลโลสโคป เลือกระมวลผลด้วยค่าแรงตัดพลวัต เพื่อให้ได้แรงตัดซึ่งเกิดจากขนาดการสึกหรอจริง เพื่อใช้คำนวณหาอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ในการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอของมีดตัดในกระบวนการกลึงชิ้นงานในการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry cutting) ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆที่กำหนด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิวกับแรงตัดที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆที่กำหนด
- 2 เพื่อพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1 ใช้กระบวนการตัดกลึงปอกผิวชิ้นงานทรงกระบอกในการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry cutting) บนเครื่องกลึงซีเอ็นซียี่ห้อ MAZAK รุ่น Quick turn NEXUS 200MY/MSY
- 2 กำหนดปัจจัยอิสระของกระบวนการกลึงคือ อัตราการป้อนตัด ความเร็วตัดความลึกตัดที่มีผลต่อขนาดความลึกหรือของเม็ดมีดโดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยกำหนดปัจจัยอิสระเป็นสามระดับตามงานวิจัยก่อนหน้า [24] ที่ได้ศึกษามาแล้วพบว่าเป็นเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมในการตัดเพราะว่าไม่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบยาวต่อเนื่องจนพัวพันกับมีดตัดและอุปกรณ์เซนเซอร์วัดแรงภายในเครื่องกลึงซีเอ็นซี
 - ความเร็วตัด 100, 150, 200 เมตรต่อนาที
 - อัตราการป้อนตัด 0.15, 0.20, 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ
 - ความลึกตัด 0.4, 0.6, 0.8 มิลลิเมตร
- 3 กำหนดค่าคงที่การตัด โดยเลือกใช้วัสดุมีดคมมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร
- 4 กำหนดค่ามุมลบคายเศษโลหะชิ้นงานเท่ากับ -6 องศา
- 5 ตัวชี้วัดผลลัพธ์โดยสร้างโมเดลสมการการทำนายขนาดความลึกหรือของเม็ดมีดกลึงตัดจะอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ของค่าวัดขนาดความลึกหรือจริง

- 6 กำหนดขนาดความลึกหรือไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ANSI/ASME B94.55M-1985 หรือเม็ดมีดตัดเกิดความเสียหายก่อน
- 7 วัสดุที่ใช้ตัดชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนทรงกระบอกเกรด S45C
- 8 เม็ดมีดกลึง (อินเสิร์ตคาร์ไบด์) ยี่ห้อ CERATIP รุ่น TNMG160404HQ CA5525
- 9 ด้ามยึดเม็ดมีดกลึง ยี่ห้อ KYOCERA รุ่น WTJNR2525M-16N
- 10 เซนเซอร์วัดแรงหรือไดนามิเตอร์ ยี่ห้อ Kistler Force Sensor รุ่น 9121
- 11 เครื่องขยายสัญญาณจากเซนเซอร์วัดแรง ยี่ห้อ Kistler Charge Amplifier รุ่น 5038
- 12 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOGOGAWA DL750
- 13 ScopeCoder โดยกำหนดการตั้งค่าค่าบันทึกสัญญาณแรงตัดด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป ดังนี้
 - Low-pass filter bandwidth เท่ากับ 500 Hz
 - Sampling rate เท่ากับ 1kS/s, 1s/div, Record length เท่ากับ 10k
- 14 อุปกรณ์วัด เช่น เวอร์เนีย (Mitutoyo) สำหรับกำหนดขนาดชิ้นงาน
- 15 กล้องไมโครสโคปยี่ห้อ Keyence ในการวัดขนาดความลึกหรือของเม็ดมีดตัดกลึง
- 16 สมการต้นแบบทำนายขนาดความลึกหรือของเม็ดมีดตัดจะประกอบด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัดความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัดชิ้นงานจริง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1 สามารถใช้สมการทำนายที่ได้พัฒนาขึ้นมาในตรวจติดตามขนาดความลึกหรือของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิวในกระบวนการกลึง
- 2 เพื่อเตรียมความพร้อมในการเปลี่ยนมีดใหม่เพื่อป้องกันความสูญเสียของชิ้นงานเนื่องจากเม็ดมีดตัดหมดสภาพ
- 3 พัฒนาเทคโนโลยีการตรวจติดตามในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรงมาใช้ในการตรวจจับสัญญาณแรงตัด ซึ่งเป็นการเลือกใช้เทคโนโลยีให้เกิดประโยชน์
- 4 เพื่อใช้สมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรกลอัจฉริยะในอนาคต

1.5 ทฤษฎีและสมมติฐาน หรือกรอบแนวคิดของการวิจัย

แรงตัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆส่งผลต่อสภาพชิ้นงานและอายุของมีดตัด จากงานวิจัยที่ผ่านมา [8] การนำแรงตัดที่เกิดขึ้นมาทำอัตราส่วนแรงตัด (Ratio of cutting force) เพื่อขจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดและชนิดวัสดุชิ้นงานออกไปได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายขนาดการสึกหรอของมีดตัดกลึงในกระบวนการกลึงได้ เพราะอัตราส่วนแรงตัดเป็นพารามิเตอร์อิสระที่ไม่ขึ้นกับกับเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปหรือตามชนิดวัสดุชิ้นงานอัตราส่วนแรงตัดสามารถใช้ประมาณค่าความเรียบผิวของชิ้นงานได้จริง และขนาดความสึกหรอของมีดตัดก็ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานด้วย ดังนั้นจึงนำอัตราส่วนแรงตัดมาใช้ในหาความสัมพันธ์ของขนาดความสึกหรอของมีดตัดกับแรงตัดที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัดต่างๆและวัสดุชิ้นงานต่างๆได้

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1 ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ การเก็บข้อมูลสำหรับแรงตัด วิธีการใช้งานเครื่องกลึงซีเอ็นซี และการวัดขนาดความสึกหรอของมีดมีดตัดด้วยกล้องไมโครสโคป และโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ
- 2 กำหนดเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมต่อการทดลอง ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยกำหนดค่าความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีงูมูกมีดและค่ามุมคายเศษโลหะที่เหมาะสมต่อการทดลอง
- 3 ทำการทดลองเพื่อศึกษาวิจัย และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์การตัดระหว่างขนาดความสึกหรอ และอัตราส่วนแรงตัดในการตัดแบบแห้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี
- 4 ทำการเก็บค่าแรงตัดและตรวจสอบขนาดความสึกหรอของมีดมีดกลึง (Flank wear)
- 5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองทางสถิติ
- 6 ทดสอบแบบจำลอง เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองในการทำนายขนาดการสึกหรอของมีดมีดด้วยแรงตัดพลวัต
- 7 สรุปผล และข้อเสนอแนะ
- 8 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีการตัด [25]

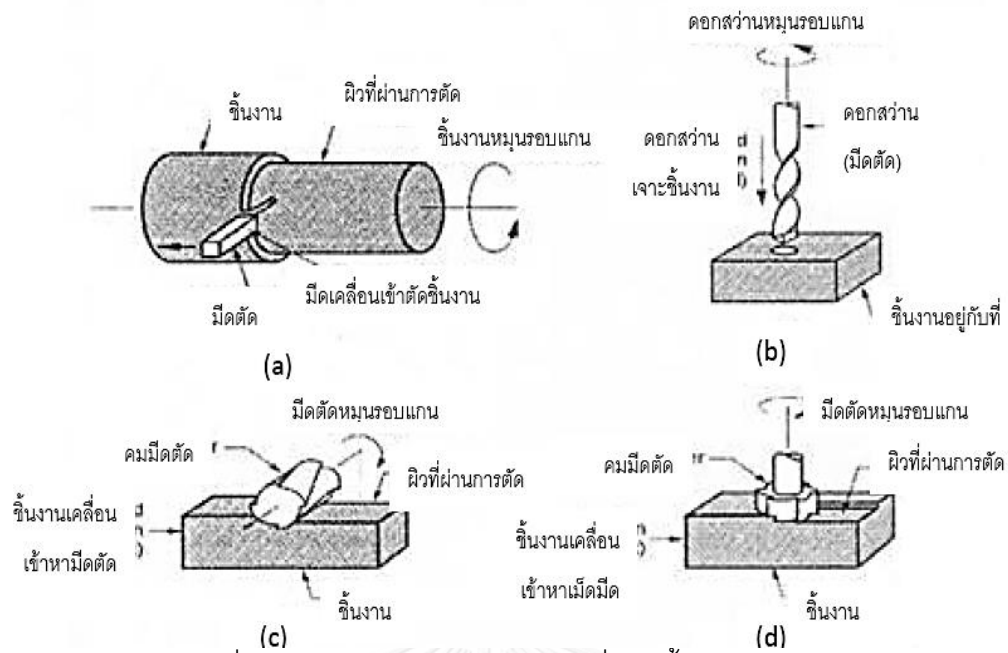
กระบวนการตัดเป็นกระบวนการขึ้นชิ้นงานรูปโลหะด้วยการใช้ปลายมีดตัด ตัดชิ้นงานส่วนที่ไม่ต้องการออกในรูปของเศษโลหะ เพื่อให้ได้รูปร่างชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยเศษโลหะจากชิ้นงานจะหลุดออกมา ผิวชิ้นงานที่ผ่านการตัดจากแรงเฉือนของมีดมีดกึ่ง จะแสดงให้เห็นสภาพผิวของชิ้นงานหลังการตัด โดยปกติแล้วกระบวนการตัดถูกประยุกต์ใช้บ่อยในการตัดโลหะเพื่อหารูปร่างชิ้นงานและขนาดที่ต้องการ ภายหลังจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะ จากการหล่อหรือการทุบเป็นต้น

ข้อดีของกระบวนการตัดมีดังนี้

- 1 วัสดุที่ใช้ตัดมีความหลากหลาย นอกจากเหล็กแล้ว พลาสติก ยัง สามารถถูกใช้ตัดได้
- 2 สามารถตัดวัสดุให้มีความรูปร่าง รูปทรงที่แตกต่างกัน เพราะกระบวนการตัดสามารถใช้ตัดเพื่อขึ้นรูปทรงต่างๆได้ เช่นระนาบ รูกกลม และทรงกระบอก โดยการเปลี่ยนรูปร่างมีดมีดกึ่ง
- 3 ควบคุม ความถูกต้องของขนาด มิติ ของชิ้นงานได้ สามารถควบคุมค่าพิสัยความเผื่อได้ถึง ± 0.025 มิลลิเมตร
- 4 สามารถควบคุมค่าความหยาบของผิวชิ้นงานได้ดี สามารถควบคุมได้ถึง 0.4 ไมโครเมตรโดยการตัดทั่วไป

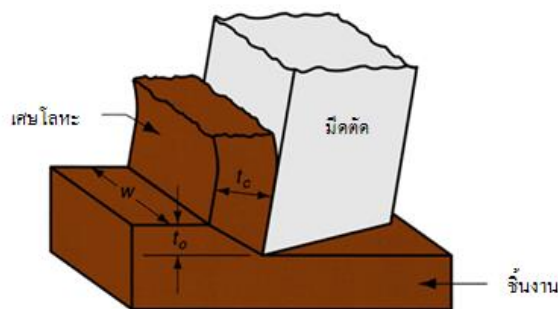
ถึงอย่างไรก็ตามกระบวนการตัดยังมีข้อเสีย อาทิเช่น เกิดการสะสมของเศษโลหะหลังการตัดที่ไม่ต้องการ และกระบวนการตัดค่อนข้างใช้เวลาสูง

ในปัจจุบันกระบวนการตัดได้พัฒนาไปอย่างมากทั้งทางด้านเครื่องมือกล วัสดุ และการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำให้ปัจจุบันสามารถผลิตชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างแพร่หลายจนแทบจะกล่าวได้ว่าสิ่งของที่ผลิตขึ้นมาเกือบทั้งหมดจะต้องผ่านหรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดชนิดของกระบวนการตัดมีหลายชนิด รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการตัดแบบต่างๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญ แต่ละชนิดสามารถก่อให้เกิดรูปร่างชิ้นงาน และสภาพความเรียบผิวของชิ้นงานต่างๆกันได้

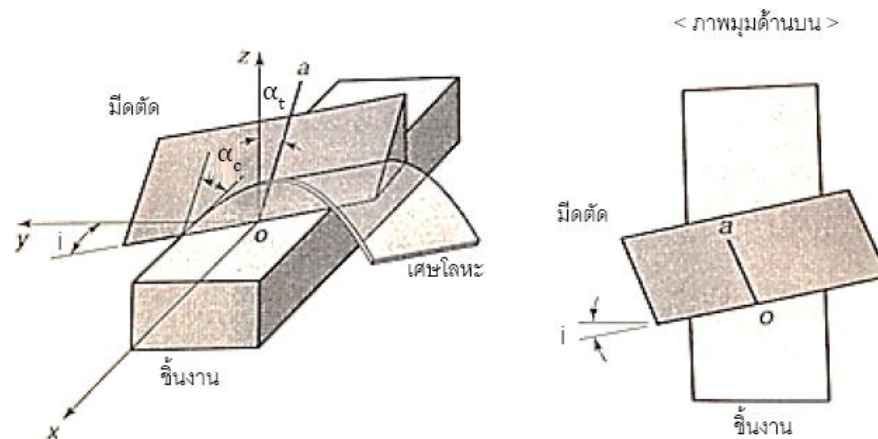


รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดแบบต่างๆที่เป็นพื้นฐานสำคัญ [25]

นอกจากนี้ กระบวนการตัดสามารถแบ่งตามชนิดของเครื่องมือตัดได้เป็น การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดคมตัดเดียว การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดหลายคมตัด และการตัดที่ใช้ล้อหินเจียร และกระบวนการตัดยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของกระบวนการ คือ กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ซึ่งหมายถึงกระบวนการตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษวัสดุตั้งฉากกับคมตัด และกระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting) การเคลื่อนที่ของเศษวัสดุจะทำมุมกับคมตัด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



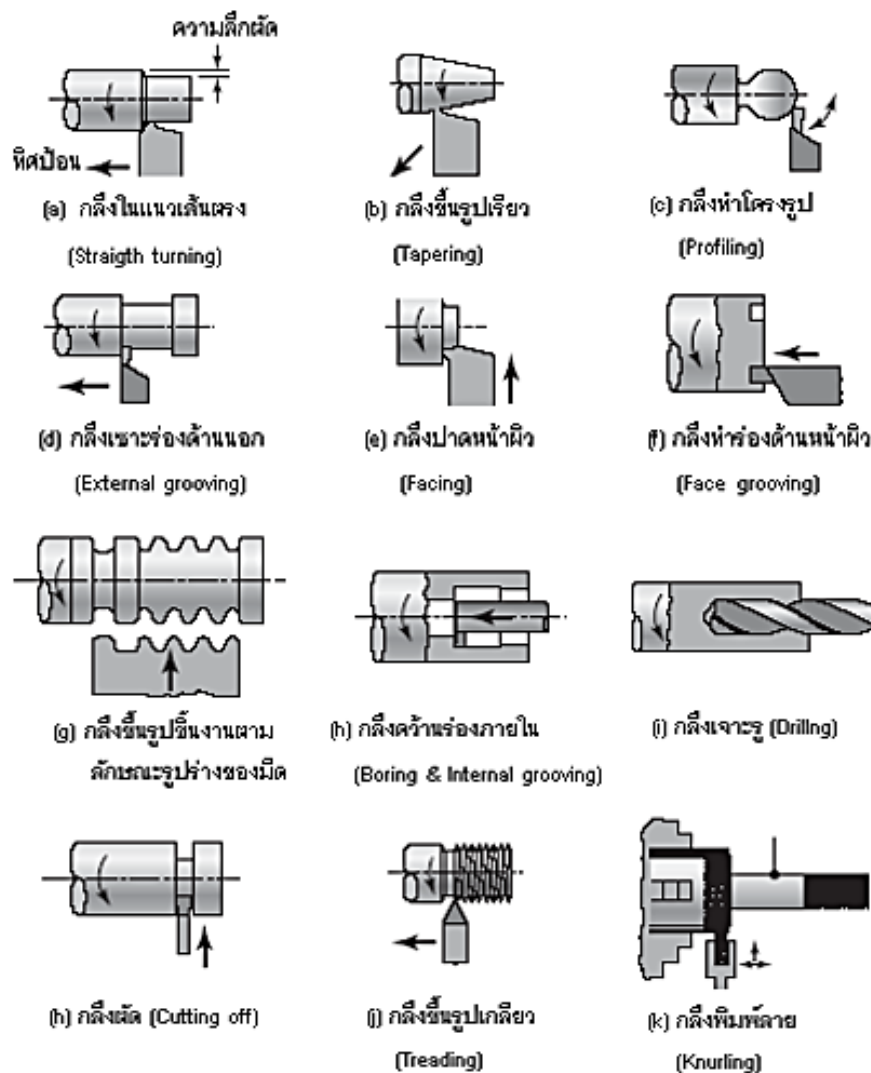
รูปที่ 2.2 กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) [25]



รูปที่ 2.3 กระบวนการตัดแบบเฉียง (Oblique Cutting) [26]

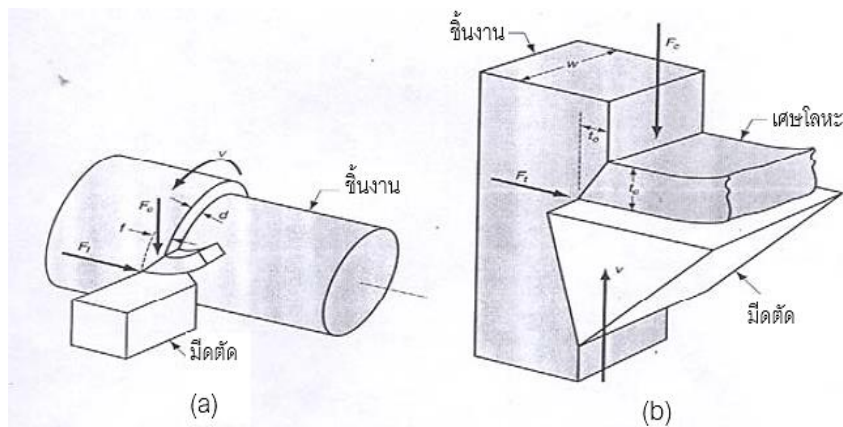
2.1.2 กระบวนการกลึง (Turning) [27-29]

การกลึงเป็นกระบวนการสร้างผิวหน้าใหม่ด้วยการกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากพื้นผิวของชิ้นงานทรงกระบอกที่กำลังหมุนอยู่โดยใช้เครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดียวเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน การกลึงมีสองลักษณะใหญ่ๆ คือ การกลึงปาดหน้า เป็นการตัดโลหะโดยให้มีดตัดชิ้นงานไปตามแนวขวางและการกลึงปอก เป็นการตัดโลหะโดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขนานกับแนวแกนของชิ้นงาน โดยหลักการของการกลึงสามารถดัดแปลงให้ผลิตชิ้นงานได้มากมายดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.4



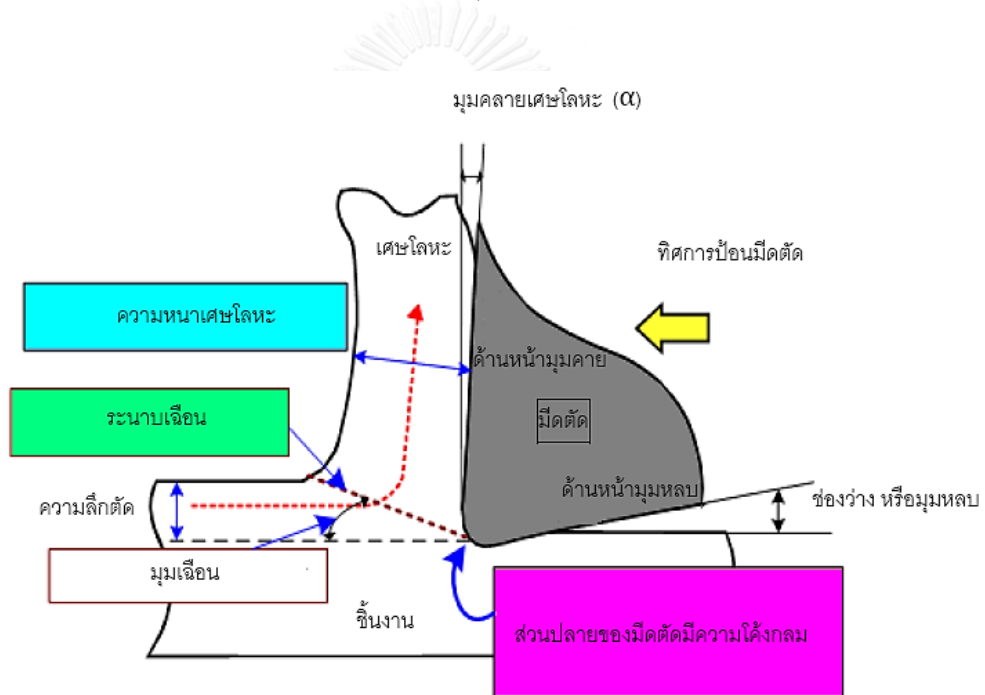
รูปที่ 2.4 ลักษณะงานที่สร้างขึ้นจากการกลึง [26]

ในกระบวนการกลึง (Turning) ปลายแหลมของเม็ดมีดกลึงจะถูกใช้ตัดเศษโลหะออกจากชิ้นงานทรงกระบอกที่หมุนอยู่ ดังรูป 2.5 (a) ความเร็วหมุนตัดนั้นมาจากการหมุนชิ้นงาน และเม็ดมีดกลึงตัดถูกป้อนเข้ามาในแนวเดียวกับแกนของชิ้นงานทรงกระบอก และรูป 2.5 (b) แสดงการตัดฉาก (Orthogonal cutting) จะใช้มีดตัดที่มีลักษณะเป็นลิ้มซึ่งคมตัดของมีดตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วในการตัด และเมื่อมีดตัดถูกป้อนเข้าไปในเนื้อวัสดุของชิ้นงาน จะทำให้เกิดเศษโลหะขึ้นตามระนาบเฉือน (Shear Plane) และทำมุมกับระนาบของผิวชิ้นงานเป็นมุมเฉือน (Shear angle) ซึ่งบริเวณระนาบเฉือนจะเป็นบริเวณที่พลังงานเชิงกลส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการตัด และทำให้เกิดการเสียรูปเชิงกลแบบพลาสติก (Plastically deformed) ของชิ้นงานถาวร [29]



รูปที่ 2.5 (a) กระบวนการกลึงทั่วไปและรูปที่ 2.5 (b) กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal cutting)

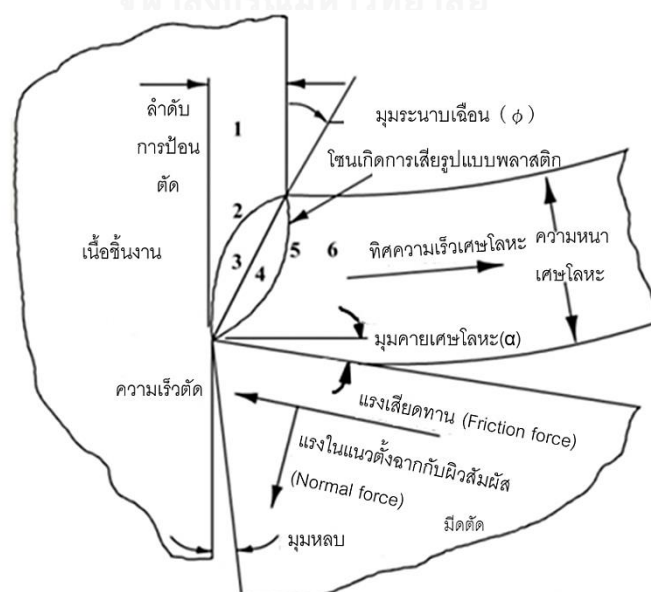
[27, 28]



รูปที่ 2.6 กระบวนการตัดฉากใน 2 มิติ [27, 28]

จากรูปที่ 2.6 ด้านบน องค์ประกอบความสัมพันธ์ ขณะทำการตัดฉาก (Orthogonal cutting) ที่เม็ดมีดกลึงถูกป้อนเข้ามาเฉือนตัดชิ้นงาน โดยจะมีด้านสองด้านคือด้านหน้ามุมคาย เศษโลหะ (Rake face) คือด้านที่เม็ดมีดกลึงสัมผัสกับชิ้นงานอยู่ เป็นด้านที่เศษกลึงโลหะจากการตัดส่วนมากไหลออก โดยด้านปลายเม็ดมีดกลึง จะทำมุมกับผิวของเศษโลหะของชิ้นงานที่ไหลออก เราจะเรียกว่า มุมคายเศษโลหะ (Rake angle, α) หรือมุมคาย (ระหว่างผิวสัมผัสหน้ามีดกับเศษกลึงโลหะที่ไหลออกไปจากการตัด)

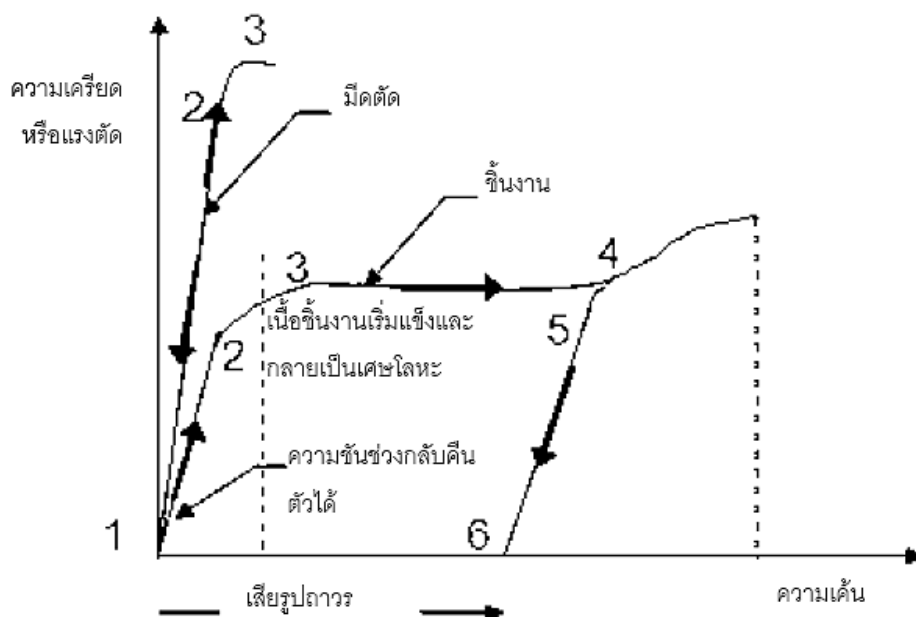
มุมคายเศษโลหะ (Rake angle, α) ถ้ามุมนี้มีค่าบวกซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพารามิเตอร์ตัวสำคัญคือ ระนาบเฉือน (Shear plan) เป็นระนาบด้านตรงข้ามมุมฉากของด้านระยะความลึกตัดจากผิวชิ้นงาน (Depth of cut) กับด้านความยาวจากปลายของความลึกตัด (Depth of cut) ถึงส่วนปลายคมมีดตัด (Flank edge) ทำให้ระนาบเฉือนนี้มีค่าน้อย เศษกึ่งโลหะ (Chip) จากการตัดจะบางมากใช้แรงตัดน้อย เม็ดมีดกึ่งไม่สะท้อนขณะตัด เศษกึ่งโลหะไหลออกได้ดีซึ่งทำให้สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงาน หลังการตัดเรียบดีมาก แต่เศษโลหะที่ไหลออกจะมีลักษณะยาว แหวมคม ไม่มันวาวเข้าหากันและไม่แตกหัก ซึ่งทำให้การเก็บกวาดลำบาก และอาจทำอันตรายได้แก่ผู้เก็บกวาดได้เนื่องจากเศษโลหะมีลักษณะแหวมคมในทางกลับกัน ถ้ามุมคายนี้มีค่าลบ ระนาบเฉือน (Shear plan) จะยาว เศษกึ่งโลหะ (Chip) จะหนา ซึ่งต้องใช้แรงตัดสูง และเกิดความสั่นสะเทือนของเม็ดมีดกึ่งตัด ขณะตัดมาก เศษโลหะหลังการตัดไหลออกได้ไม่ดีเกิดการแตกหักของเศษโลหะขณะตัดได้ง่ายซึ่งจะทำให้สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานมีลักษณะหยาบ กระจ่างไม่เรียบแต่เศษโลหะที่แตกหัก ไม่ต่อเนื่อง ทำให้ง่ายต่อการเก็บกวาด ทำความสะอาดส่วนอีกด้านหนึ่งคือ ด้านหน้ามุมหลบ (Flank face) ซึ่งจะมีช่องว่าง (Clearance) อยู่ที่ด้านปลายคมของมีด (Flank edge) โดยมีหน้าที่ป้องกันการเสียดสีระหว่างชิ้นงานและเม็ดมีดกึ่ง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการกำหนดสภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานหลังการตัดด้วย มุมหลบ (Relief angle) นี้จะอยู่ระหว่างเม็ดมีดกึ่งและผิวชิ้นงาน ซึ่งจำเป็นต้องมีค่ามาก เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวชิ้นงานสำเร็จหลังการตัดเป็นรอยเนื่องจากสัมผัสโดนเม็ดมีดกึ่ง



รูปที่ 2.7 แบบจำลองสภาพการเศษโลหะที่ไหลออกขณะตัด ใน 2 มิติ [27, 28]

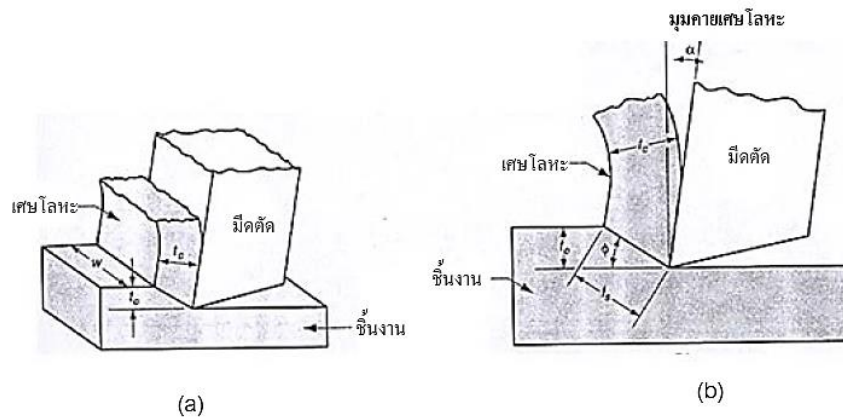
จากรูป 2.7 สามารถแบ่งสภาพการตัดได้โดยพิจารณาสภาพเนื้อชิ้นงานได้ดังนี้

- 1 ช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เกิดความเครียด (No stress) เนื่องจากยังไม่โดนตัด
- 2 ช่วงที่เนื้อชิ้นงานเกิดความเครียดแต่ยังไม่เสียรูปถาวรยังสามารถคืนตัวได้บ้าง
- 3 ช่วงที่เนื้อชิ้นงานเกิดความเครียดและเริ่มสูญเสียรูปเชิงกลพลาสติกจะไม่สามารถคืนตัวได้
- 4 ช่วงที่เนื้อชิ้นงานเกิดความเครียดและเริ่มแข็งและกลายเป็นเศษโลหะ
- 5 Work hardening on chip
- 6 เกิดความเครียดในเนื้อชิ้นงานถาวรและเนื้อชิ้นงานแข็งและกลายเป็นเศษโลหะถาวร (Chip formation)
- 7 ช่วงเกิดเศษชัดเจนเนื้อชิ้นงานไม่ถูกตัดและไม่เกิดความเครียด (No stress)



รูปที่ 2.8 ความเครียดและความเค้นที่เกิดขึ้นในมิดตัด [27, 28]

จากรูป 2.8 แรงที่ใช้ตัดจะเพิ่มมากขึ้นในช่วง - 1 2 3 - โดยมีมิดตัดจะไม่เสียรูปเพราะใช้วัสดุที่แข็งกว่าตัด แต่ชิ้นงานจะเสียรูปถาวร ตั้งแต่ช่วง - 3 4 5 6 - โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.7 ร่วมด้วย รูปที่ 2.9 กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) (a) ใน 3 มิติ และ (b) ใน 2 มิติ [27, 28]



รูปที่ 2.9 กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) (a) ใน 3 มิติ (b) ใน 2 มิติ [27, 28]

รูป 2.9 แสดงสภาพเมื่อดมดกลิ้งขณะตัดชิ้นงานในสามมิติจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

W คือความกว้างของชิ้นงานที่ถูกตัดด้วยมีดตัด (Width of cut) ที่ทำให้เกิดเศษโลหะ

t_0 คือความลึกของเมื่อดมดกลิ้งที่ใช้ตัดเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน (Depth of cut)

t_c คือความหนาของเศษโลหะที่เกิดขึ้นหลังโดนตัด

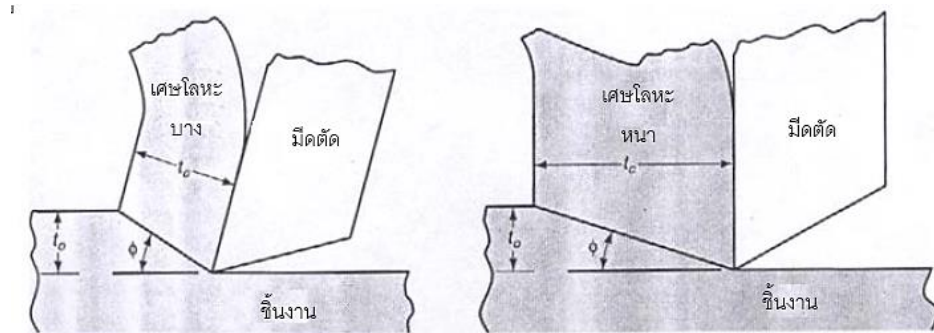
มุมเฉือน (Shear angle, ϕ) คือมุมของระนาบเฉือน (Shear plane) ที่เกิดขึ้นขณะตัด ชิ้นงานระนาบเฉือนเป็นระนาบที่แบ่งลักษณะการเสียรูปเชิงพลาสติกของเนื้อชิ้นงานในขณะตัด (Before & After plastic deformation range) พารามิเตอร์ t_0 และ t_c มีสัมพันธ์กันในรูปของ อัตราส่วนที่เรียกว่า อัตราส่วนเศษกลิ้งโลหะ (Chip ratio, r) ดังสมการด้านล่าง

$$r = \frac{t_0}{t_c} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2-1)$$

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (2-2)$$

โดยปกติค่าอัตราส่วนเศษกลิ้งโลหะ หรือ r จะอยู่ในช่วง $0 < r < 1$ สำหรับชิ้นงานที่ต้องการผิวค่อนข้างเรียบดี (Surface finish cut) ค่า r จะมีค่าประมาณ 0.8 แต่ถ้าต้องการชิ้นงานที่มีผิวหยาบ ค่า r จะต่ำลงไปประมาณ 0.5 ส่วนมุมเฉือน (Shear angle, ϕ) ซึ่งเป็นมุมที่มีความสำคัญมากในการกำหนดสภาพผิวชิ้นงานหลังการตัด มุมนี้สามารถกำหนด ขนาดของเศษกลิ้งโลหะว่าจะหนาหรือบางได้ โดยจะเกี่ยวข้องกับขนาด ความยาวของระนาบเฉือน (Shear

plane) ที่มาจากการปรับตั้งองศาของมุมคายเศษโลหะของมีดตัด (Rake angle, α) โดยกำหนดให้เป็นมุมบวก หรือมุมลบดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น และแสดงดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ผลกระทบของมุมเฉือน (shear angle, ϕ) ที่เปลี่ยนแปลงกับลักษณะขนาดของเศษกลึงโลหะในขณะตัด [27, 28]

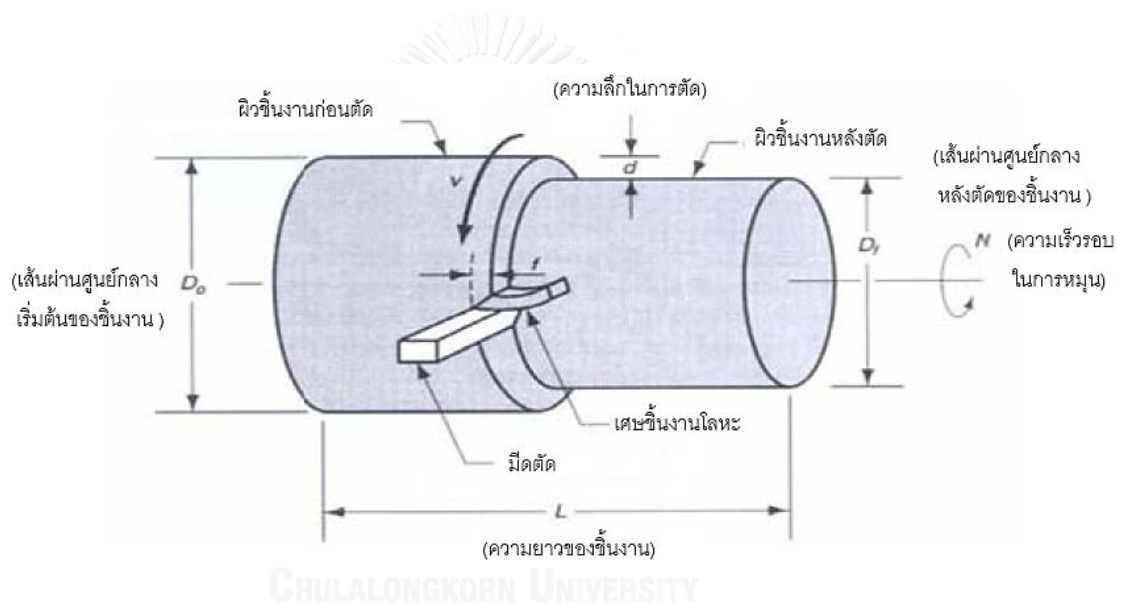
จากรูปด้านซ้ายบน มุมคายเศษโลหะเป็นบวก (Positive rake angle, $+\alpha$) ระบายเฉือนจะสั้น (Shorter shear plane) ทำให้มุมเฉือนมีค่ามากขึ้น (Bigger shear angle, ϕ) ใช้แรงในการตัดต่ำ มีดจะไม่สะเทือน มีดสึกหรอต่ำเศษกลึงโลหะ (Chip) จะไหลออกได้ราบเรียบดี (Smooth draining flow) สภาพเนื้อผิวชิ้นงานหลังการตัด (Surface finish cut) จะเรียบดี เหมาะกับการตัดทำผิวสำเร็จ (Finish cut) แต่เศษหลังหลังการตัดจะเป็นเส้น ยาว มีความคม ซึ่งจะลำบากในการเก็บกวาด

ในทางกลับกันรูปด้านขวา มุมคายเศษโลหะเป็นลบ (Negative rake angle, $-\alpha$) ระบายเฉือน จะยาว (Longer shear plane) ทำให้มุมเฉือนมีค่าน้อยลง (Smaller shear angle, ϕ) แรงที่ใช้ในการตัดจะมาก มีดมีดสึกสะเทือนมากเศษกลึงโลหะจะไหลออกลำบาก (Unsmooth draining flow) เพราะเกิดแรงต้านจากเนื้อชิ้นงานขนาดใหญ่ สภาพเนื้อผิวสำเร็จชิ้นงานหลังการตัดจะหยาบกระด้าง ไม่เหมาะกับการตัดทำผิวสำเร็จ (Surface Finish cut) แต่เศษกลึงโลหะหลังการตัดจะแตกหักได้ดี ขนาดเล็ก สั้นไม่ค่อยคม ซึ่งจะเก็บกวาดง่าย แต่จะส่งผลกระทบต่อให้มิดดสึกหรอเร็วขึ้นเนื่องจากการแตกหักและแรงตัดที่ใช้สูง

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการกลึง [29] คือ อัตราป้อนตัด (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ความลึกตัด (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือน (Workpiece) ความเร็วตัด (Cutting Speed) คือ ความเร็วชิ้นผิวที่ต้องการกำจัดออกจากชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านขอบคมตัดของมีดมีดกลึง (Cutting edge) มีหน่วยเป็น เมตรต่อ

นาที (m/min) หรือฟุตต่อนาที (ft/min) อัตราการป้อน (Feed Rate) คือ อัตราเร็วของการเดินมีดไปในทิศทางตามแกนการหมุนของชิ้นงาน กล่าวคือระยะทางที่เม็ดมีดเคลื่อนที่ไปได้ต่อการหมุนของชิ้นงานหนึ่งรอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/r) หรือนิ้วต่อรอบ (in/r) และความลึกตัด (Depth of cut) คือ ระยะกินลึก คือ ความหนาของชั้นผิวชิ้นงานที่ต้องการจะกำจัดออก วัดในแนวรัศมีและตั้งฉากกับแกนการหมุนของชิ้นงาน โดยทั่วไปมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) หรือนิ้ว (in) ผลที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือ ขนาดของชิ้นงาน (Workpiece Dimension) ความละเอียดของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) เศษโลหะ (Chip) การสึกหรอของมีดตัดกลึง (Tool Wear)

2.1.3 เงื่อนไขการตัดในกระบวนการกลึง [24, 25, 30]



รูปที่ 2.11 ปัจจัยต่างๆในกระบวนการกลึง [24, 25, 30]

ความเร็วรอบในกระบวนการกลึงมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการตัดที่พื้นผิวของชิ้นงานทรงกระบอกดังสมการที่ 2-3

$$N = \frac{v}{\pi D_0} \quad (2-3)$$

โดยที่ N (Rotational Speed) คือความเร็วรอบในการหมุน (รอบ/นาที)

v (Cutting Speed) คือความเร็วตัด (เมตร/นาทีหรือฟุต/นาที)

D_0 (Diameter of work piece) คือเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น (เมตรหรือฟุต)

การกลึงชิ้นงานจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานลดลงจาก D_0 เหลือ D_f เส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลงแสดงถึงความลึกในการตัด (depth of cut, d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2-4

$$D_0 - D_f = 2d \quad (2-4)$$

ส่วนอัตราการป้อนมีดโดยทั่วไปจะแสดงในหน่วย มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้ว/รอบ และสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วยมิลลิเมตร/นาที หรือนิ้ว/นาทีได้ดังสมการที่ 2-5

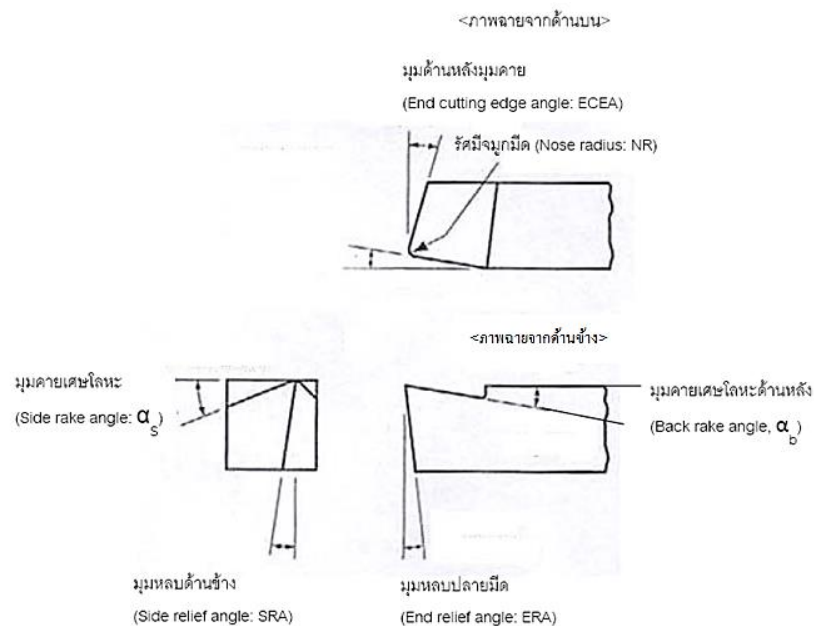
$$f_r = N \times f \quad (2-5)$$

โดยที่ f_r (feed rate) คืออัตราป้อนตัดมีดเชิงเส้น (มิลลิเมตร/นาที หรือนิ้ว/นาที)
 f (feed) คืออัตราการป้อนมีด (มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้วต่อรอบ)

2.1.4 เครื่องมือตัด (The Cutting Tool) [29]

เครื่องมือตัดที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานให้เป็นรูปร่างต่างๆมีทั้งหนึ่งคมตัดและหลายคมตัด แต่สำหรับในกระบวนการกลึงจะเป็นคมตัดเดี่ยวโดยเครื่องมือตัดจะต้องมีความแข็งสูงกว่าวัสดุชิ้นงาน จึงจะเกิดการตัดได้ แต่ความแข็งเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ ยังต้องมีคุณสมบัติที่จำเป็นต้องพิจารณา ได้แก่ ความสามารถในการต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ความมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ความต้านทานต่อการขีดสี และความเหนียวที่เพียงพอในการต้านทานต่อการแตกร้าวได้ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติข้างต้นซึ่งต้องคำนึงถึงคือวัสดุที่ใช้ทำมีดตัด (Tool materials) และรูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด (Tool geometry)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้ทำมีดตัดมีหลายประเภทได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง เหล็กกล้ารอบสูง โคบอลต์หล่อผสม คาร์ไบด์เคลือบผิว เซรามิก คิวบิกโบรอนไนไตรด์ เพชร เป็นต้น โดยวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดที่ต่างกันจะมีการรวมกันของคุณสมบัติในแต่ละด้านในระดับที่แตกต่างกัน เพื่อให้เหมาะสมกับประเภทและลักษณะงานนั้นๆ



รูปที่ 2.12 ภาพฉายสามด้านของเรขาคณิตของมีดกลึง [3, 27, 29, 31]

มุมด้านข้างคมตัด (Side cutting edge angle: SCEA) มุมนี้จะเอียงเข้าหาชิ้นงาน เพื่อลดแรงตัดเหมาะกับการทำผิวสำเร็จ ให้ผิวชิ้นงานออกมาเรียบดีการเอียงมุมแบบนี้จะทำให้อัตราการป้อนเม็ดมีดกลึงเกิดขึ้นจริงขณะตัดน้อยกว่า อัตราที่ถูกโปรแกรมไว้ในเครื่องแล้ว ผลดีคือว่าคมมีดไม่สัมผัสชิ้นงานมาก แรงที่ใช้ตัดมีค่าน้อย เนื้อชิ้นงานถูกเฉือนได้ง่าย เราสามารถเพิ่มอัตราการป้อนเม็ดมีดกลึงเข้าตัดได้มากขึ้น เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตได้จริง

มุมด้านหลังมุมคาย (End cutting edge angle: ECEA) ถ้าค่ามุมมาก ส่วนปลายคมอีกด้านของมีดจะห่างจากชิ้นงานมากขึ้น ทำให้มีช่องว่างระหว่างปลายมีดและชิ้นงาน

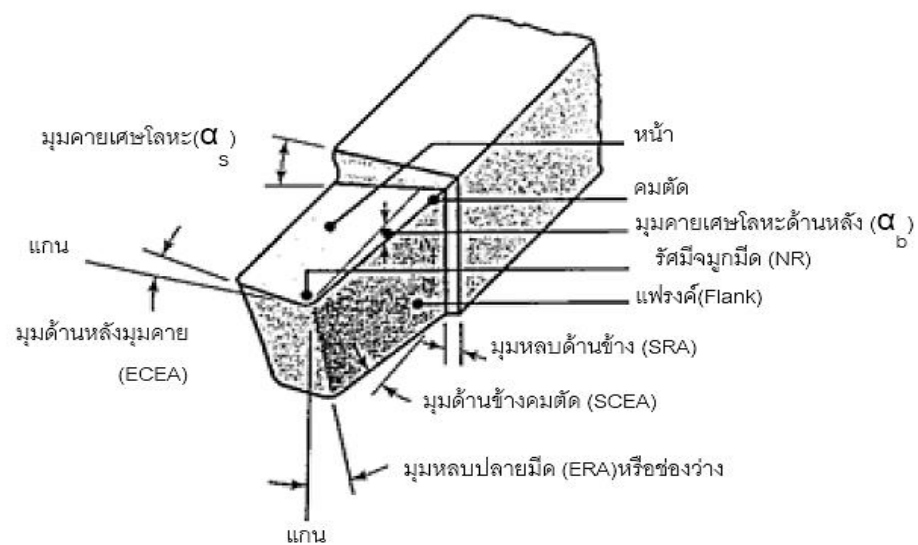
รัศมีจมูกมีด (Nose radius: NR หรือ Rn) คือส่วนโค้งด้านปลายคมของเม็ดมีดกลึงมีไว้เพื่อจะช่วยลดรอย จากการป้อนตัด (Feed mark) ทำให้ผิวชิ้นงานเรียบขึ้น

มุมคายเศษโลหะ (Side rake angle: α_s) คือมุมที่เม็ดมีดกลึงเอียงลงจากด้าน Back rake ถ้าค่ามุมบวก จะทำให้เม็ดมีดกลึงสัมผัสกับชิ้นงานน้อยลง จะลดแรงสะท้อน ผิวชิ้นงานที่ได้จะเรียบดี ถ้าแต่ค่ามุมเป็นลบ เม็ดมีดกลึงสัมผัสกับชิ้นงานมากขึ้น เพิ่มแรงสะท้อน ผิวชิ้นงานที่ได้จะหยาบ

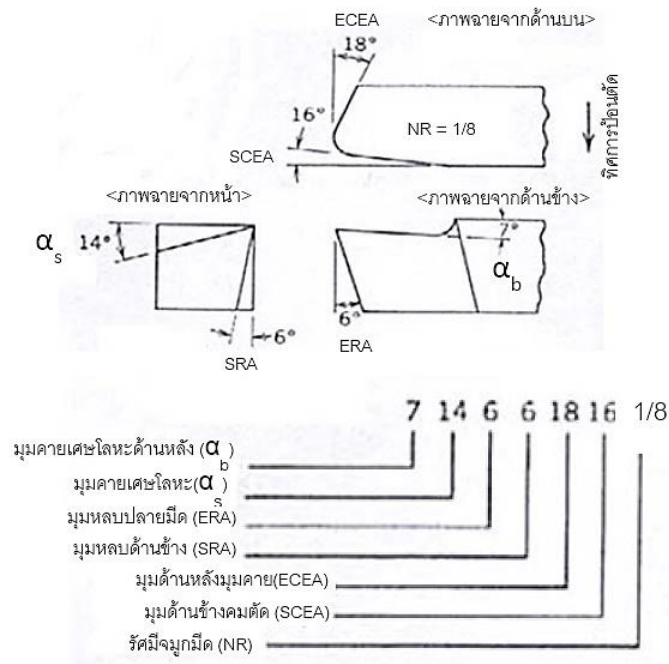
มุมหลบปลายมีด (End relief angle: ERA) มีไว้เพื่อหลบการเสียดสีระหว่างเม็ดมีดกลึงกับชิ้นงาน

มุมหลบด้านข้าง (Side relief angle: SRA) ถ้าค่ามุมมากจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดมีดกับชิ้นเม็ดมีดจะไม่เสียดสีกับผิวชิ้น ผิวชิ้นงานที่ได้จะเรียบดี แต่ถ้าค่ามุมเป็นน้อยโอกาสเม็ดมีดกับชิ้นสัมผัสกับชิ้นงานมากขึ้น เกิดการเสียดสี ผิวชิ้นงานที่ได้จะหยาบ

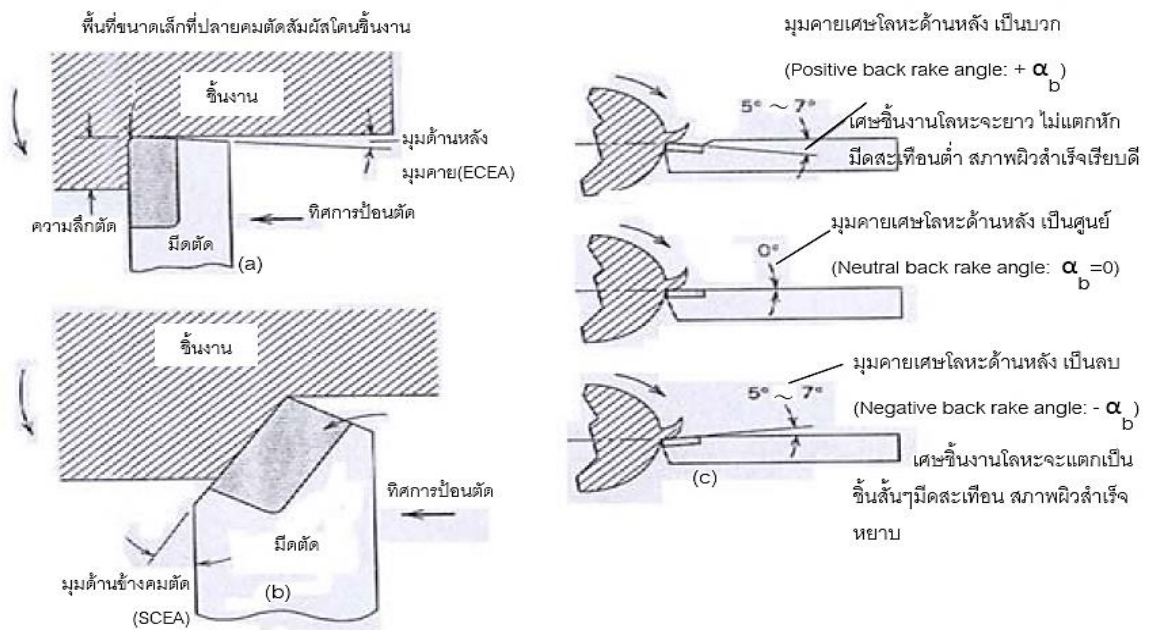
มุมคายเศษโลหะด้านหลัง (Back rake angle: α_b) มีไว้เพื่อลดแรงตัดชิ้นงาน และบังคับให้เศษกลึงไหลไปในทางที่กำหนดไว้ได้ ถ้ามุมเป็นบวก สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานหลังการตัดจะดีมาก



รูปที่ 2.13 ภาพฉายไอโซเมตริกของเรขาคณิตของมีดกลึง [3, 26]



รูปที่ 2.14 การอ่านค่าเรขาคณิตของด้ามมีดกลึง [3, 27]

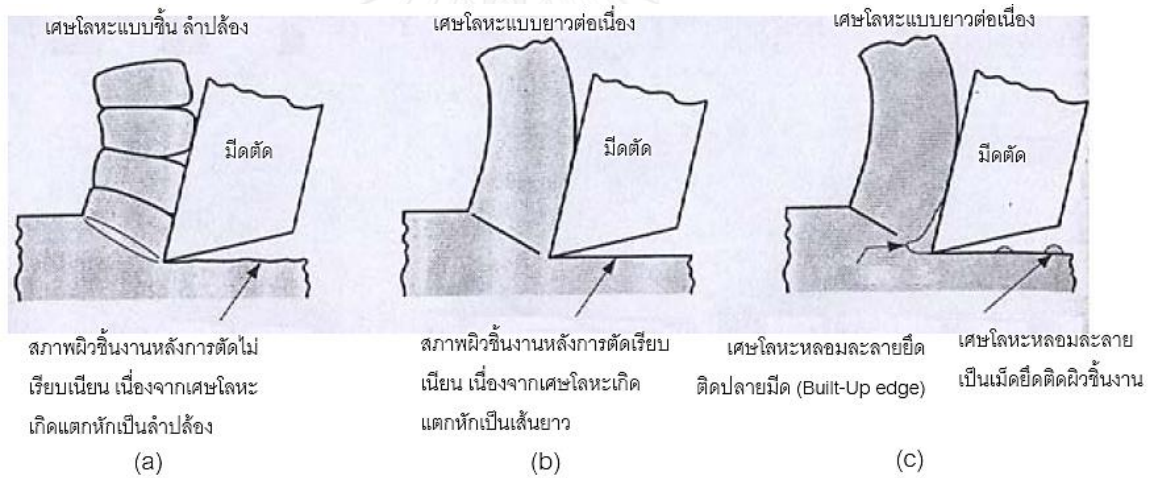


รูปที่ 2.15(a) (b) และ (c) ผลกระทบของค่ามุมด้านบวกและด้านลบของมุมคายเศษโลหะด้านหลังของมีดกับลักษณะรูปร่างเศษโลหะที่เกิดขึ้น [27]

รูปที่ 2.15 (a) ด้านบนซ้ายแสดง การตัดโดยไม้ใช้มุมด้านข้างคมตัด (Side-cutting edge angle, SCEA) เข้าช่วย จะทำให้โอกาสที่มีดเสียดสีกับชิ้นงานมากขึ้น แรงสั่นสะเทือนสูง สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานหลังการตัดจะหยาบ ไม่ดี และทำให้มีดมีดสึกหรือไว (High cutting tool wear)

แต่ รูปที่ 2.15 (b) ด้านล่างซ้ายแสดง การตัดโดยใช้มุมด้านข้างคมตัด (Side-cutting edge angle, SCEA) เข้าช่วย จะทำให้โอกาสที่มีดเสียดสีกับชิ้นงานน้อย แรงสั่นสะเทือนต่ำ ตัดชิ้นงานได้ง่าย สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานหลังการตัดจะดี และชะลอการสึกของมีดมีดได้ดี (Low cutting tool wear)







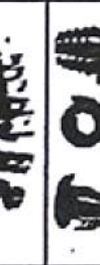

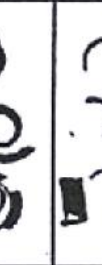

ส่วนรูปที่ 2.15 (c) ด้านขวาแสดงการตัดโดยใช้มุมคายเศษโลหะด้านหลัง (Back rake angle, α_b) เข้าช่วย โดยถ้ามุมมีค่าบวกจะทำให้สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานหลังการตัดจะดี แต่เศษเกล็ดโลหะหลังการตัดจะยาวเป็นยาว แหลมคม ไม่แตกหัก ส่วนถ้ามุมมีค่าลบ สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานหลังการตัดจะหยาบ ไม่ดี แต่เศษเกล็ดโลหะจะแตกหักง่าย เป็นชิ้นๆ สั้นๆ ซึ่งสามารถเก็บกวาดได้ง่าย



รูปที่ 2.16 ลักษณะสภาพการเกิดเศษโลหะตามลักษณะวัสดุที่แตกต่างกัน [27, 28]

รูปที่ 2.16 (a) วัสดุที่ถูกตัดมีลักษณะแข็ง เพราะโดยการตัดที่ความเร็วตัดต่ำภายใต้อุณหภูมิ ต่ำลักษณะเศษเกล็ดโลหะที่ได้จะแตกหัก เป็นลักษณะเป็นปลั่งๆ ติดกันไม่ขาด ผิวชิ้นงานที่ได้จะค่อนข้างหยาบ ส่วนรูปที่ 2.16 (b) แสดงการตัดวัสดุที่มีลักษณะเหนียวเหนียว (Ductile material) โดยกำหนดมุมคายเศษโลหะเป็นมุมค่าบวกมากๆ (Positive rake angle, $+\alpha$) เข้าตัด ด้วยความเร็วตัดสูง แรงตัดที่เกิดขึ้นต่ำ สภาพผิวชิ้นงานผิวชิ้นงานที่ได้จะเรียบดีมาก แต่เศษเกล็ดโลหะหลังการตัด จะยาวเป็นเส้น เรียบ แหลมคม ทำให้ไม่สะดวกในการเก็บกวาดและรูปที่ 2.16 (c)

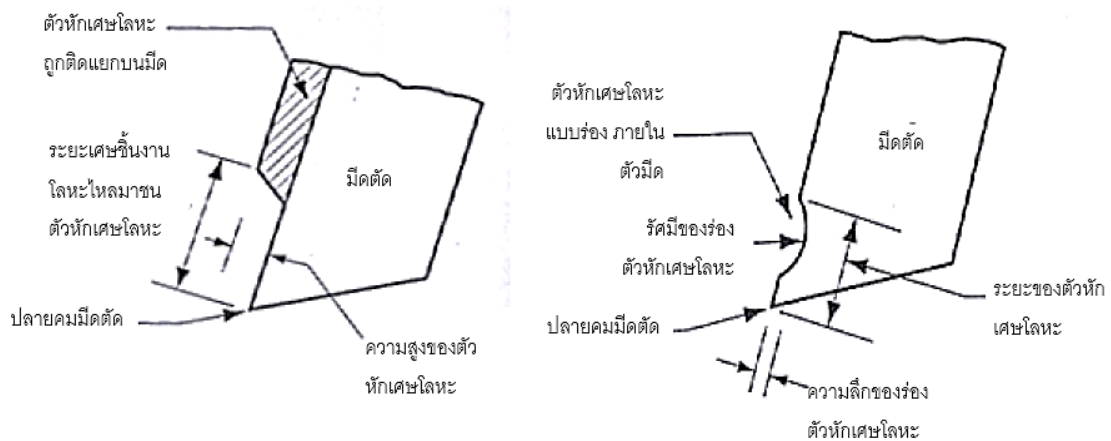
แสดงการตัดวัสดุที่มีลักษณะเหนียวหนืด (Ductile material) โดยใช้มุมคายเศษโลหะ (Positive rake angle, $+\alpha$) น้อยๆ เข้าตัด ด้วยความเร็วตัดที่ต่ำ เศษโลหะที่เกิดภายหลังจากการตัดจะเกาะติดผิวชิ้นงานและมีดตัดและแรงตัดเกิดขึ้นมาก เนื่องจากปลายคมตัดไม่คม เพราะถูกเคลือบเกาะติดด้วยเศษวัสดุและเศษเกล็ดโลหะ จะไหลออกยาก ทำให้ชิ้นงานมีสภาพผิวสำเร็จหลังการตัดไม่ดีและสูญเสียเม็ดมีดใช้งานอีกต่อไปไม่ได้ ซึ่งเป็นอุปสรรคแก่การตัดอย่างมาก

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									
ฉีกเป็นเส้นยาว	เส้นม้วนพันกันยุ่ง	ม้วนเกลียวยาว	ขาดเป็นเกลียวสั้นและถี่	เป็นทอปล้องยาว	เป็นทอปล้องสั้น	ปล้องกันหอย	กันหอย	แตกเป็นชิ้นเล็กๆ	แตกเป็นเสี้ยวๆ
ไม่ต้องการ			ดี						
			ยอมรับได้						

รูปที่ 2.17 แสดงสภาพลักษณะเศษเกล็ดโลหะจากการกลึง [3, 27, 28]

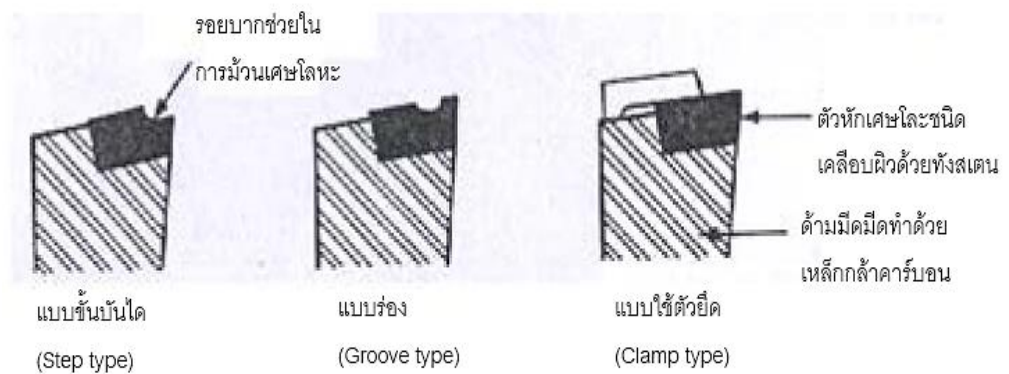
หมายเลข 1 ถึง 3 เศษเกล็ดโลหะที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาว แหวมคม เก็บกวาดลำบาก บางครั้งอาจจะม้วนเข้าไปพันชิ้นงานได้ ไม่เป็นที่ต้องการในกระบวนการตัดหมายเลข 4 ถึง 9 เศษเกล็ดโลหะจะเริ่มขาดตัวเป็นเกลียว มากขึ้น สั้นขึ้น จนแตกหักออกจากกัน เป็นชิ้นเล็กๆ การเก็บกวาดจะทำได้รวดเร็ว โดยเศษเกล็ดโลหะ ที่ได้หลังจากการตัดช่วงหมายเลข 6 ถึง 8 เป็นช่วงที่ดีที่สุด เพราะชิ้นเล็ก เก็บกวาดทำได้สะดวก

ในกรณีต้องการชิ้นงานที่มีสภาพผิวสำเร็จเรียบร้อยดีแต่ลักษณะการตัดจะต้องกำหนด การตัดแบบให้เกิดเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อช่วยให้เศษเกล็ดโลหะ เกิดการแตกหักและเพื่อช่วยต่อการเก็บกวาด ตัวหักเศษโลหะ (Chip breaker) ถูกนำมาติดตั้งที่ปลายมีดตัด เพื่อให้เกิดเศษโลหะแบบเส้นยาวต่อเนื่องซึ่งจะไหลไหลมาชน กับตัวหักเศษโลหะ เพื่อม้วนตัวเอง โค้งไปชนชิ้นงานหรือมีดตัด ทำให้ตัวเองแตกหัก ง่ายต่อการเก็บกวาด ดังรูปที่ 2.18



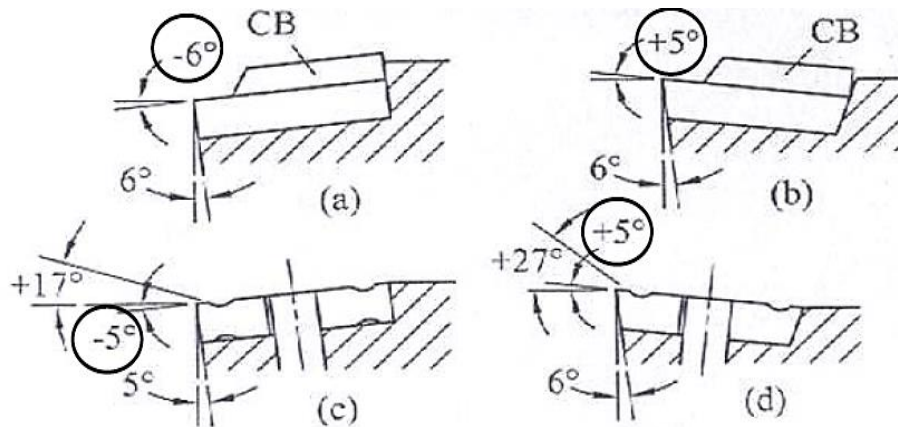
รูปที่ 2.18 การเลือกใช้ชนิดของตัวหักเศษโลหะ [25, 27, 28]

รูปด้านบนซ้ายตัวหักเศษโลหะถูกติดตั้งไว้บนปลายมีด เศษกลึงโลหะจะไหลมาชน แล้วมีวนตัวเองจนแตกหักได้ง่าย ส่วนรูปด้านบนขวา การเจาะร่อง (Groove) ที่ปลายคมตัดมีด เพื่อให้เศษกลึงโลหะไหลเข้าไปในร่องแล้วจะมีวนตัวจนแตกหักได้



รูปที่ 2.19 ชนิดของตัวหักเศษโลหะ [27, 28]

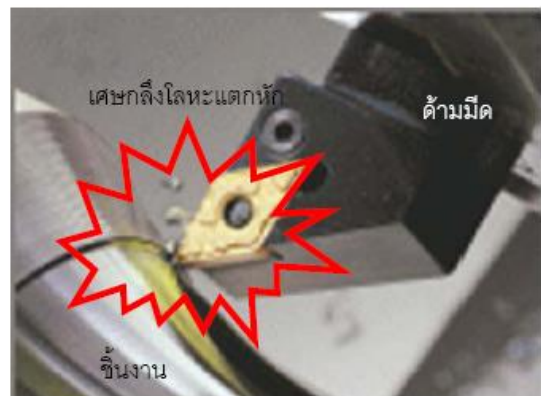
จากรูปด้านบน แสดงชนิดของตัวหักเศษโลหะแบบขั้นบันได (Step) และแบบร่อง (Groove) ที่ติดตั้งไว้ใกล้ปลายมีดตัด ส่วนแบบใช้ตัวยึด (Clamp) ถูกติดตั้งแยกไว้บนปลายมีด เพื่อให้เศษกลึงโลหะไหลมาชนและเกิดการแตกหัก



รูปที่ 2.20 ผลกระทบต่อรูปร่างเศษโลหะ เมื่อมุมคายเศษโลหะเป็นบวกหรือลบ [27]

รูปที่ 2.20 (a) และ (c) มุมคายเศษโลหะมีค่าลบ (Negative rake face) ซึ่งโอกาสที่หน้ามีดสัมผัสกับชิ้นงานมีมากอยู่แล้วเศษกึ่งโลหะจึงแตกหักได้ง่าย บวกกับการติดตั้งตัวหักเศษโลหะเข้าไปอีกทำให้ยิ่งเพิ่มโอกาสในการแตกหักของเศษกึ่งโลหะได้มากขึ้นส่วนรูป (b) และ (d) ปรับมุมบวก (Positive rake face) โอกาสที่หน้ามีดมีดกึ่งสัมผัสกับชิ้นงานมีน้อย เศษกึ่งโลหะไหลออกเป็นเส้นยาว (Continuous chip) จึงเกิดขึ้นเยอะ แต่จะถูกทำให้แตกหักโดยตัวหักเศษโลหะที่ติดตั้งเพิ่มเข้าไป

เม็ดยัดออกแบบให้เป็นลักษณะร่องนูน สูงต่ำ
เพื่อช่วยให้การแตกหักให้ดีขึ้น

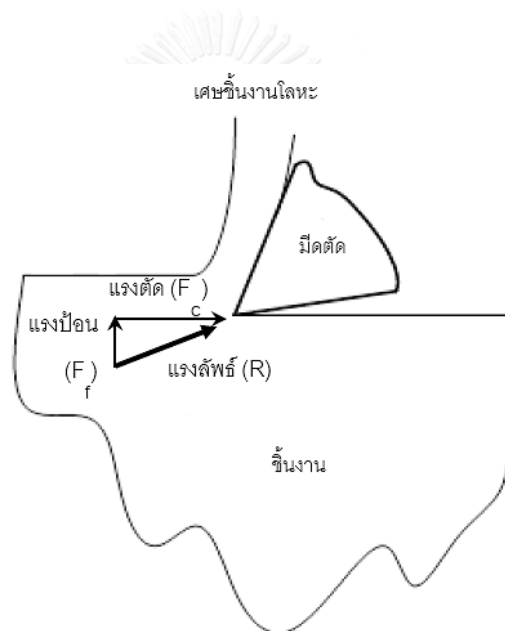


รูปที่ 2.21 เม็ดยัดกึ่งเคลือบผิวคาร์ไบด์ที่มีลักษณะเป็นร่องนูน สูงต่ำเพื่อช่วยให้เศษโลหะโค้งตัวเกิดแตกหักในขณะตัด [27]

2.1.5 แรงในการตัดชิ้นงาน [27-29]

2.1.5.1 แรงบนคมตัด

แรงบนคมตัดหมายถึง แรงที่กระทำที่คมตัดของเครื่องมือตัดขณะเกิดการตัด ในเบื้องต้นนี้จะใช้แบบจำลองของการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ในการวิเคราะห์เนื่องจากทำให้ระบบของแรงบนคมตัดมีเพียง 2 มิติเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จากรูปที่ 2.22 พบว่าแรงลัพธ์ (Resultant force) สามารถแยกออกเป็น 2 องค์ประกอบย่อย คือ แรงในทิศขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัด (Cutting force) และแรงในทิศขนานกับทิศของการป้อน เรียกว่าแรงป้อน (Feed force) ซึ่งแรงตัด และแรงป้อนนี้สามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงตัด ทำให้สามารถคำนวณแรงลัพธ์ได้จากสมการที่ 2-6 และ 2-7



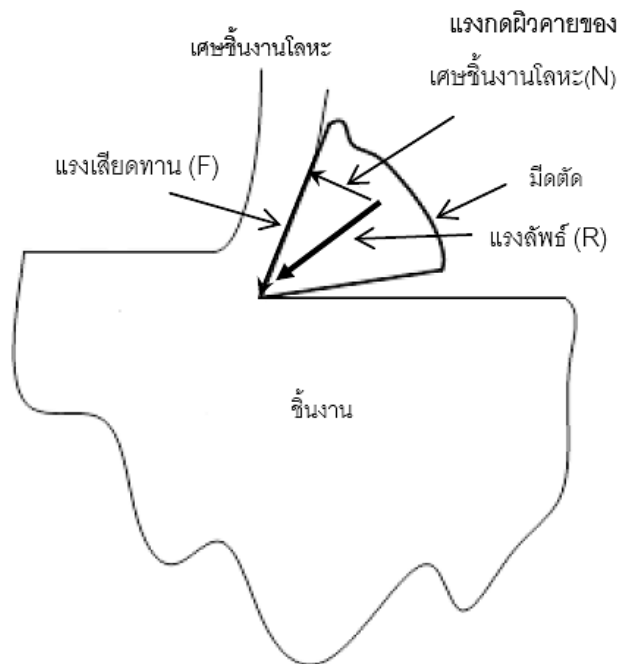
รูปที่ 2.22 ระบบแรงบนคมตัดของการตัดฉาก [27-29]

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad (2-6)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{F_f}{F_c} \quad (2-7)$$

2.1.5.2 แรงเสียดทาน

การที่เศษวัสดุเคลื่อนที่ผ่านผิวคายเศษวัสดุของเครื่องมือตัด ทำให้เกิดแรงขึ้นอีกระบบหนึ่งดังในรูปที่ 2.23 คือแรงเสียดทาน (Friction force) และแรงกดบนผิวคายเศษวัสดุ (Normal force on force) สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเศษวัสดุและผิวคายเศษวัสดุเมื่อกำหนดให้ β คือมุมเสียดทาน (Friction angle) ได้จากสมการที่ 2-8



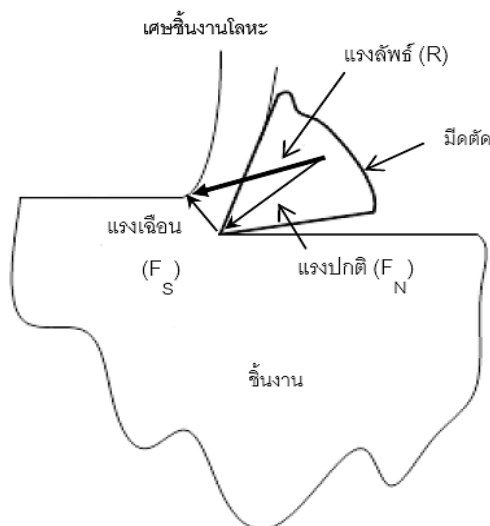
รูปที่ 2.23 ระบบแรงเสียดทาน [27-29]

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\beta \quad (2-8)$$

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

2.1.5.3 แรงเฉือน

แรงเฉือน หมายถึง แรงที่กระทำบนระนาบเฉือน เป็นแรงที่ทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดการแปรสภาพถาวรกลายเป็นเศษวัสดุ แสดงในรูปที่ 2.24



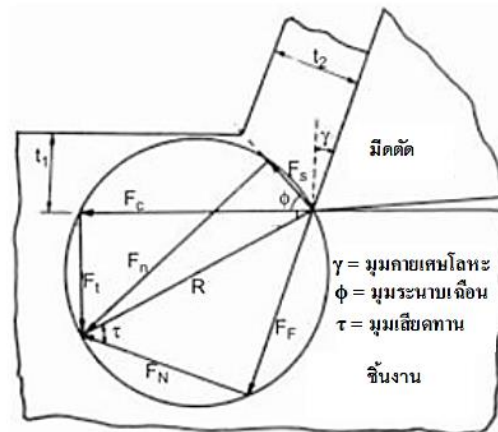
รูปที่ 2.24 ระบบของแรงเฉือน [27-29]

โดยกำหนดให้ F_s คือ แรงเฉือน (Shear force) และ F_n คือ แรงกดบนระนาบเฉือน (Normal force on shear plane) พบว่า

$$R = \sqrt{F_s^2 + F_n^2} \quad (2-9)$$

2.1.5.4 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงของการตัด

การใช้รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงเป็นวิธีทางกราฟที่ใช้แรงแทนการคำนวณได้อย่างสะดวก และถูกต้องดังในรูปที่ 2.24 โดยการกำหนดเวกเตอร์ของแรงตัดและแรงป้อนจะได้ผลลัพธ์โดยการบวกเวกเตอร์ทั้งสอง (ขั้นตอนที่ 1) ใช้แรงลัพธ์เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางสร้างวงกลมจากนั้นลากเส้นต่อจากผิวคายเศษวัสดุตัดกับวงกลมจะได้แรงเสียดทานและแรงกดผิวคายเศษวัสดุ (ขั้นตอนที่ 2) คำนวณมุมระนาบเฉือน (ϕ) จากนั้นกำหนดมุมนี้ลงในรูป จากจุดตัดของมุมนี้กับวงกลมจะได้แรงเฉือนและแรงกดบนระนาบเฉือน (ขั้นตอนที่ 3) สามารถวัดขนาดของแรงได้จากรูปที่สร้างขึ้นเทียบกับมาตราส่วนที่กำหนดเอาไว้



รูปที่ 2.25 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงและวิธีการสร้าง [24, 27-29]

จากรูปที่ 2.25 การใช้แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ (Force diagram) นั้นจะสามารถคำนวณค่าของแรงเสียดทาน (F) แรงกดผิวคายของเศษโลหะ (N) แรงเฉือน (F_s) และ แรงปกติ (F_n) ได้โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของแรงที่สามารถวัดได้คือ แรงตัด (F_c) และแรงป้อน (F_f) ซึ่งจะได้ค่าของแรงต่างๆดังสมการที่ 2-10 ถึง 2-13

$$F = F_c \sin \mu + F_f \cos \alpha \quad (2-10)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_f \sin \alpha \quad (2-11)$$

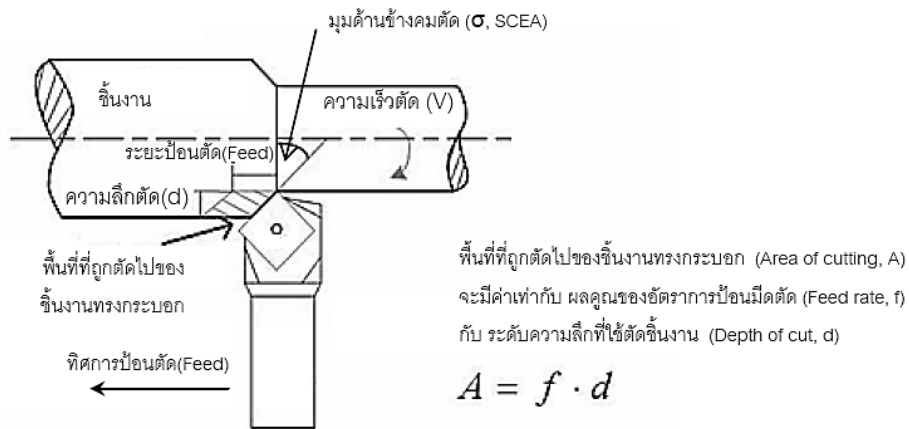
$$F_s = F_c \cos \phi - F_f \sin \phi \quad (2-12)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_f \cos \phi \quad (2-13)$$

2.1.5.5 ความเค้นเฉือน

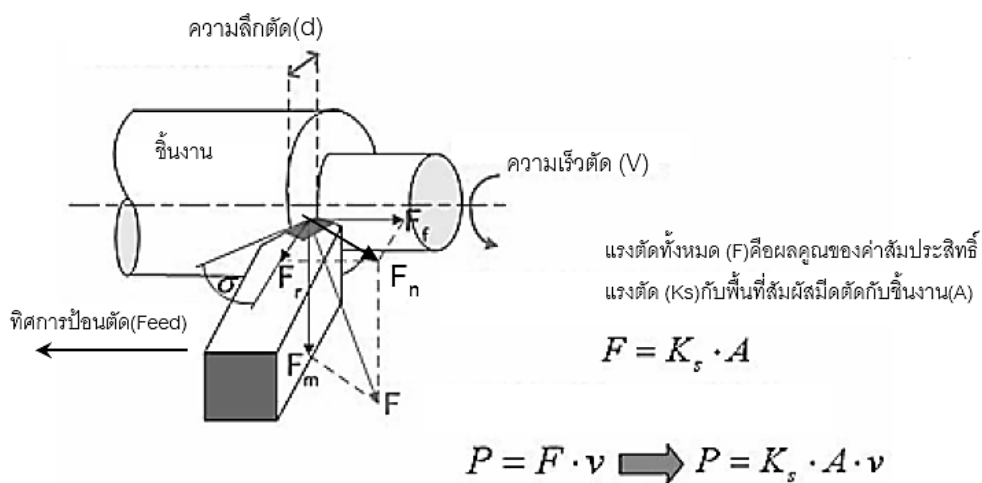
ในการตัดความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบเฉือนจะเท่ากับความแข็งแรงทางเฉือน สำหรับการตัดในขณะนั้น กรณีนี้ต้องทำความเข้าใจว่าความแข็งแรงทางเฉือนของการตัด อาจไม่เท่ากับค่าความแข็งแรงทางเฉือนที่ได้จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางกล เนื่องจากการตัดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมากกว่าการเฉือนในทางกลศาสตร์ รวมถึงอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

2.1.5.6 องค์ประกอบของแรงตัดในกระบวนการกลึง



รูปที่ 2.26 เรขาคณิตพื้นฐานของกระบวนการกลึง [27, 28]

จากรูป 2.26 แสดงภาพการกลึง โดยชิ้นงานทรงกระบอกจะถูกยึดเข้ากับแกนหมุนของเครื่อง CNC จะหมุนด้วยความเร็วตัด (Cutting speed, v) เม็ดมีดกลึงมัดจะตัดเข้าไปในเนื้องานที่ 39 ระดับความลึก (Depth of cut, d) ถูกป้อนด้วยอัตราการป้อนตัดของเม็ดตัด (Feed rate, f) หน้ามุมของเม็ดมีดกลึงทำมุมเฉียง (σ , SCEA) กับเข้าตัดชิ้นงานประโยชน์เพื่อจะลดโอกาสที่มีเดเสียดสีกับชิ้นงาน แรงสั่นน้อย ตัดง่าย สิ้นสละเทือนต่ำเพื่อให้สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานหลังการตัดดี และชะลอกการสึกของเม็ดมีดกลึงสังเกตได้ว่าพื้นที่ที่ถูกตัดไปของชิ้นงานทรงกระบอก (Area of cutting, A) จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของอัตราการป้อนเม็ดมีดกลึง (Feed rate, f) กับ ระดับความลึกที่ใช้ตัดชิ้นงาน (Depth of cut, d)



รูปที่ 2.27 องค์ประกอบของแรงตัดทั้งหมดในกระบวนการกลึง [27, 28]

จากรูป 2.27 แรงตัดที่เกิดในการกลึงชิ้นงานจะไม่เท่ากันเพราะจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ (K_s) ของแต่ละวัสดุ โดยแรงลัพท์ (F) จะเท่ากับผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์ (K_s) กับพื้นที่ของชิ้นงานทรงกระบอกที่ถูกตัดไป (A) โดยสามารถหาค่าพลังงานที่เกิดจากการตัด (P) ได้จากผลคูณของแรงลัพท์ (F) และความเร็วที่ใช้ตัด (v) ได้ด้วยและในการหาค่าแรงลัพท์ (F) ที่เกิดขึ้นขณะตัด อีกวิธีหนึ่ง สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของปีทาโกรัส จะใช้ผลรวมของแรงตัดหลัก (Main force, F_m) ซึ่งอยู่ในทิศความเร็วตัดกับแรงกดผิวคายของเศษกลึงโลหะ (Normal to cutting edge, N) โดยนำมามีดทำมุมเฉียง (σ , SCEA) กับเข้าตัดชิ้นงาน

รายละเอียดความหมายของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศณูกนิยามดังนี้

- 1 แรงป้อนตัด (Feed force, F_f) คือ แรงที่กระทำต่อชิ้นงานในทิศอัตราการป้อนตัด
- 2 แรงแนวรัศมี (Radial force, F_r) คือ แรงที่เกิดขึ้นในทิศรัศมีของชิ้นงาน ถูกกำหนดมาเพื่อตรวจสอบดูว่าในตำแหน่งของมีดตัดและชิ้นงาน เกิดการเบี้ยวหรือแอ่นหรือไม่
- 3 แรงตัดหลัก (Main force, F_m) คือ แรงที่อยู่ในทิศของความเร็วตัด (Cutting speed, v) ซึ่งแรงนี้ถูกใช้ในการหาค่าพลังงานในการตัดจากที่กล่าวไว้ข้างต้น
- 4 แรงกดผิวคายของเศษกลึงโลหะ (Normal to cutting edge, F_n) มาจากผลรวมกำลังสองของแรงป้อนตัด (Feed force, F_f) กับแรงแนวรัศมี (Radial force, F_r) ตามทฤษฎีของปีทาโกรัส

แรงตัดที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะรวมกันอยู่มากในพื้นที่ส่วนใกล้ๆปลายคมมีดมีดกลึง ส่วนนี้ จะมีความกดดันสูงมาก (High pressure) เพราะต้องถูกกด เพื่อ ตัดชิ้นงานดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำมีดมีดกลึงจะต้องแข็งแรง (High strength) พอที่จะต้านทาน และสามารถดูดซับแรงที่เกิดขึ้นได้โดยมีดมีดกลึงไม่หัก (High toughness) มีดตัดจะต้องมีความแข็งแรง (Strength) สูงพอที่จะต้านทานโหลดที่เกิดขึ้นได้ดี วัสดุที่ใช้ทำมีดมีดกลึงจะต้องคงทน ค่าความแข็งเพียงพอ ในกรณีอุณหภูมิสูงขึ้นมากจากการเสียดสีมีดมีดกลึงกับชิ้นงาน มีดมีดกลึงจะต้องไม่สูญเสียความแข็งไปและไม่แตกหักไป (Being hot hardness and toughness) โดยปกติแล้ววัสดุที่มีค่าความแข็งมากจะมีค่าต้านทานแรงถูกกระทำต่ำ (Toughness) ดังนั้นการเลือกวัสดุที่ใช้ผลิตมีดตัด (Cutting tool material decision) สามารถเลือกได้ดังนี้

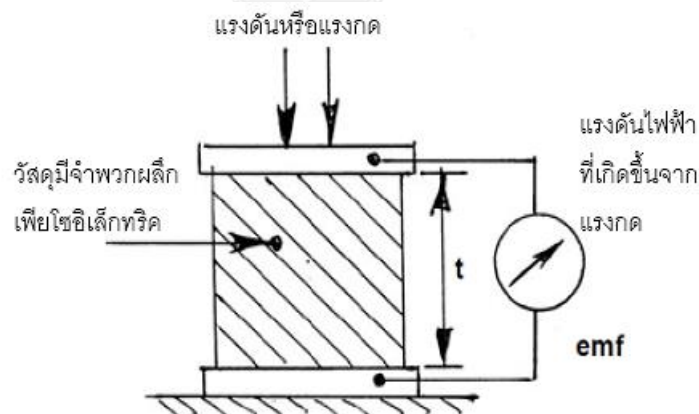
- 1 เลือกวัสดุที่มีความสามารถในการรักษาความแข็งไว้ได้ แม้อุณหภูมิสูงขึ้นมาๆ
- 2 เลือกวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับแรงที่เกิดขึ้น โดยไม่ถูกทำลาย หรือแตกหัก
- 3 เลือกวัสดุที่ทนต่อการสึกหรอ (วัสดุเคลือบด้วยคาร์ไบด์หรือเพชร)

4 เลือกว่าวัสดุที่มีความเสถียรต่อปฏิกิริยาเคมี

ในเทคโนโลยีปัจจุบัน เราสามารถตรวจติดตามสภาพการตัดที่เกิดขึ้นจริงขณะตัด เพื่อตรวจติดตามสภาพพื้นผิวสำเร็จชิ้นงาน (Surface finish) การสึกหรอ ของมีดตัด (Tool wear) ได้ดูจากแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยใช้เซ็นเซอร์วัดแรงกระทำ แล้วเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อสัญญาณกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลให้ทราบได้

2.1.6 เซ็นเซอร์วัดแรง

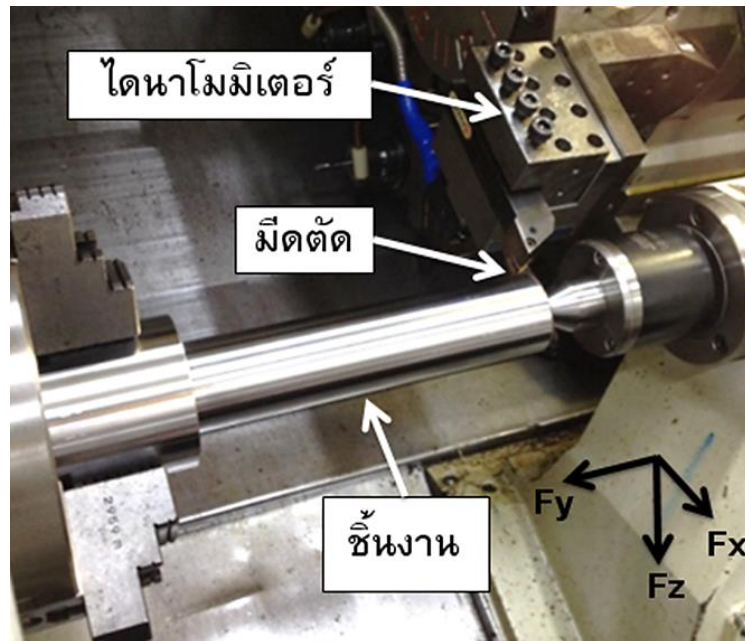
เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric transducer) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับค่าแรงกระทำที่เกิดขึ้นทางกลในที่นี้คือแรงตัด โดยจะเปลี่ยนแรงตัดที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ (Voltage หน่วยเป็น emf) โครงสร้างภายในตัวเพียโซอิเล็กทริกจะมีแผ่นไดอะแฟรม หรือ ลูกสูบไว้รับแรงกด แรงที่กดลงมาที่ ตัวผ่านตัวเพียโซคริสตัล ซึ่งเป็นวัสดุจำพวกขั้วไฟฟ้า เช่นควอตซ์ (Quartz) ซึ่งมีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเมื่อรับแรงทางกลแล้วจะเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณทางกลให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามสัดส่วนแรงกดเข้ามา นั่นก็คือแรงตัดที่กระทำ ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ [27]

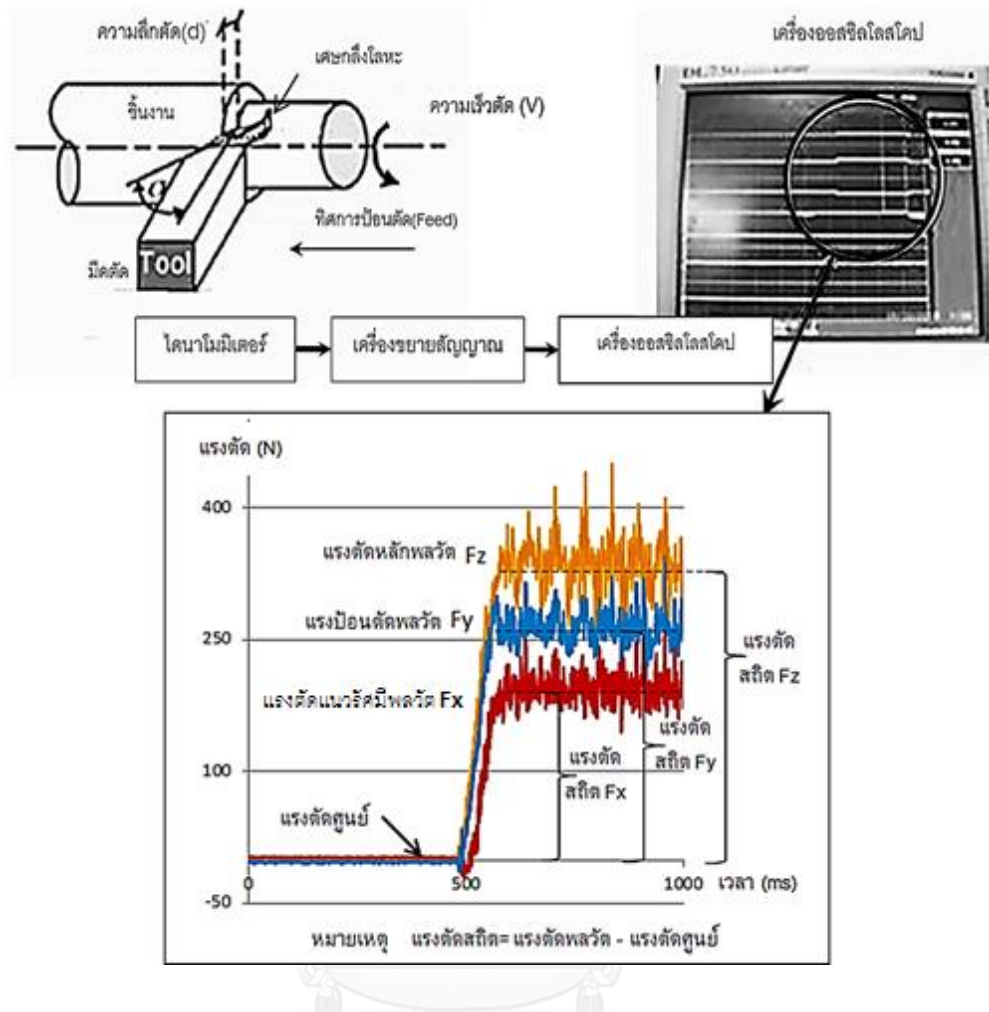
ในอนาคต การพัฒนาเครื่องมือตัดให้เป็นระบบอัตโนมัติในการตรวจติดตามสภาพการตัดในขณะตัดจริงมีความสำคัญมาก จะไม่ต้องพึ่งพาพนักงานประจำโรงงาน (Operator) หรือวิศวกร (Engineer) อีกต่อไป โดยอาศัยตัวเซ็นเซอร์ หรือทรานสดิวเซอร์ ไว้ตรวจจับสัญญาณและประมวลผล เพื่อบอกสภาพการตัดว่าเป็นอย่างไร เช่น การตรวจสอบระยะเวลาเหมาะสมที่ควรจะต้องเปลี่ยนมีดกลึงหรือตรวจสอบสภาพชิ้นงานหลังการตัด ขนาดชิ้นงานบางลงไปขนาดไหน

สภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ตีพอหรือไม่ เป็นต้นรูป 2.29 ด้านล่างแสดงการวัดแรงตัดขณะตัดจริง โดยใช้เซนเซอร์วัดแรง (Force sensor)



รูปที่ 2.29 การต่อไดนาโมมิเตอร์กับมีดกลึงเพื่อวัดแรงตัด [24]

แรงตัดที่เกิดขึ้นถูกใช้เพื่อแสดงสภาพกระบวนการตัดชิ้นงาน ตัวเซนเซอร์วัดแรงเป็นเพียงไฮดรอลิกไดนาโมมิเตอร์ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนตัวจับยึดเม็ดมีดกลึง (Turret) ของเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อใช้วัดแรงตัดขณะตัดในกระบวนการกลึง แรงตัดที่วัดได้นั้นจะนำมาวิเคราะห์สภาพการกลึงชิ้นงานภายใต้สภาวะการกลึงตัดที่ต้องการทราบ ซึ่งสามารถกำหนดเองได้โดยจากการอินพุทข้อมูลคำสั่งที่ต้องการลงในเครื่องกลึงซีเอ็นซี



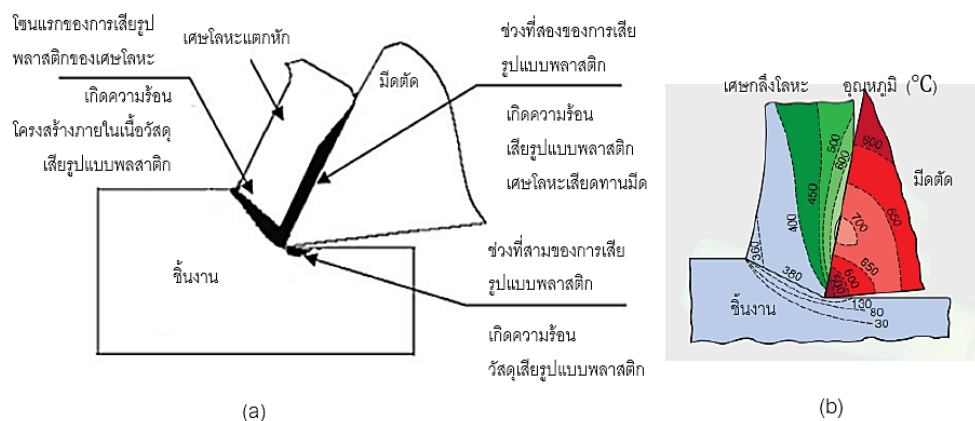
รูปที่ 2.30 กระบวนการเชื่อมต่อสัญญาณโดยการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรงซึ่งสัญญาณแรงตัดถูกแสดงผ่านเครื่องออสซิลโลสโคป [27, 32]

จากรูป 2.30 การตรวจจับสัญญาณของเซนเซอร์วัดแรง จะใช้หลักการสุ่ม (Sampling) การแตกหักของเศษกลึงโลหะ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าสูงต่ำสลับกันไป กราฟที่ได้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปลักษณะเดียวกันกัน สัญญาณที่อ่านได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป สัญญาณแรงตัดจากไดนามิเตอร์ ประกอบด้วยสัญญาณแรงสามชนิด คือแรงตัดพลวัต แรงตัดสถิตและแรงตัดศูนย์ โดยขณะที่มีดยังไม่ตัดชิ้นงานจะมีสัญญาณแรงตัดศูนย์เกิดขึ้น เกิดจากสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้อุปกรณ์ไดนามิเตอร์สั่นสะเทือน จากการทำงานของเครื่องกลึงซีเอ็นซี แรงตัดพลวัตคือแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่มีดตัดเข้าตัดกลึงชิ้นงาน และแรงตัดสถิตคือแรงตัดเฉลี่ย ที่กำจัดสัญญาณรบกวนออกไปเกิดจาก ผลต่างของแรงตัดพลวัตกับแรงตัดศูนย์

2.1.7 อุณหภูมิการตัด (Cutting Temperature)

ในกระบวนการตัดพลังงานทั้งหมดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนในบริเวณการตัด เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และการเสียดสี ดังนั้นในการตัดสามารถจำแนกแหล่งที่ทำให้เกิดความร้อนได้เป็น 3 แหล่งดังแสดงในรูปที่ 2.31

- 1 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเนื่องจากการเฉือนในบริเวณเฉือนหลัก
- 2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยแรงเฉือนและความเสียดทานบนผิวคายของมีดตัด
- 3 การเสียดสีระหว่างชิ้นงานและมีดตัดบนผิวหลบ



รูปที่ 2.31 (a) และ (b) การกระจายความร้อนในบริเวณตัด [2, 27-29]

อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 2.31 (a) ความร้อนที่เกิดขึ้นได้แผ่กระจายไปใน 3 แหล่งคือเศษโลหะตัวชิ้นงานและ มีดตัด โดยความร้อนที่แผ่กระจายไปในแต่ละแหล่งมีค่าแตกต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 2.31 (b) ความร้อนส่วนใหญ่ประมาณ 60-80% จะแผ่กระจายสู่เศษโลหะความร้อนประมาณ 10-20% แผ่กระจายสู่ชิ้นงานความร้อนอีกประมาณ 10% แผ่กระจายสู่มีดตัด

2.1.8 การพังของมีดตัด (Tool failure) [25]

ในการตัดชิ้นงาน มีดตัดจะต้องทนต่อแรงและอุณหภูมิที่สูงในระหว่างการตัด ถ้าแรงในการตัดมากเกินไปจะทำให้มีดตัดหักได้หรือถ้าอุณหภูมิมีดสูงเกินไปจะทำให้มีดตัดอ่อนและเสื่อมได้เร็วเช่นเดียวกัน เทคโนโลยีด้านมีดตัดจะให้ความสำคัญกับประเด็นหลัก 2 ประการคือ เรื่องวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดและรูปร่างของมีดตัด ทั้งนี้เพื่อทำให้อายุการใช้งานของมีดตัดนานขึ้น ในด้านวัสดุของมีดตัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรง อุณหภูมิ และการสึก

หรือในกระบวนการตัด ส่วนในด้านรูปทรงของเครื่องมือตัดจะพัฒนาเกี่ยวกับการหารูปทรงที่เหมาะสมของมีดตัดสำหรับวัสดุของมีดตัด

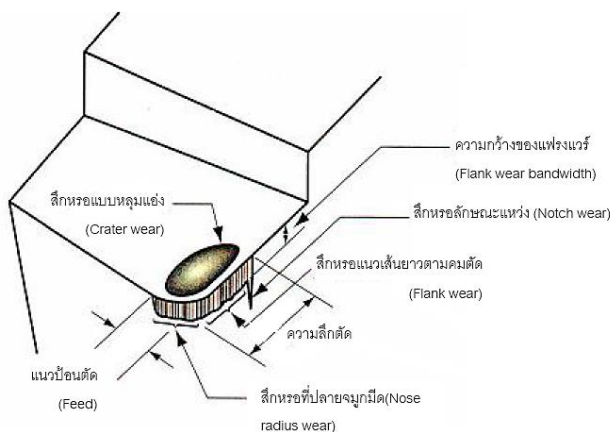
การพังเนื่องจากการแตกหักและอุณหภูมิทำให้เกิดสูญเสียการใช้งานของมีดตัดก่อนเวลาซึ่งเป็นที่ที่ไม่พึงปรารถนาในงานตัดแต่การพังเนื่องจากการสึกหรอนั้นสามารถพิจารณาการใช้งานและยืดอายุการใช้งานของมีดตัดได้คุณภาพของงานตัดเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาเช่นกัน เนื่องจากหากมีดตัดเสื่อมสภาพในระหว่างการตัดจะมีผลต่อผิวสำเร็จของชิ้นงานอันเป็นผลให้ต้องมีการปรับผิวชิ้นงานใหม่ ความเสียหายเหล่านี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเลือกสภาวะการตัดให้มีมีดตัดค่อยๆสึกหรอมากกว่าที่จะเสื่อมสภาพไป เนื่องจากการแตกหักหรือจากอุณหภูมิสูง รวมถึงการเปลี่ยนมีดตัดก่อนที่การสูญเสียคมตัดจะเกิดขึ้น สำหรับกระบวนการตัดความเสียหายของมีดตัดเกิดขึ้นได้ด้วยสาเหตุหลักๆ 3 อย่าง ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้ว การสึกหรอของมีดตัดจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear) ซึ่งกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษกึ่งโลหะและบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดเสียหายของมีดตัด

รูปแบบการเสียหาย	สาเหตุ	ผลลัพธ์
ความเสียหายจากการแตกหัก (Cracking)	ใช้แรงตัดมากเกินไป	เครื่องมือตัด มีดกึ่งแตกทันที
ความเสียหายจากอุณหภูมิ (Temperature deformation)	สภาวะการเกิดอุณหภูมิสูง	เครื่องมือตัด อ่อนและเสียรูป ส่งผลให้ความคมของมีดตัดลดลง
มีการสึกหรอ (Gradual wear)	เกิดการสึกหรอของคมตัดของมีดตัด	เนื้อมีดตัดหายไปบางส่วน ทำให้ประสิทธิภาพในการตัดลดลง เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็วที่สภาวะสุดท้ายของมีดตัด มีลักษณะเสียหายคล้ายกับความเสียหายจากอุณหภูมิ

2.1.8.1 การสึกหรอของมีดตัด (Tool Wear) [25]

จากรูป 2.32 แสดงมีดตัดคมเดียวมีลักษณะการสึกหรอแบบต่างๆ และ ในการเกิดการสึกหรอการสึกหรอของมีดตัดจะเกิดขึ้นสองตำแหน่งหลักๆ บนมีดตัดได้แก่ ด้านบนของหน้าผิวคาย (Top rake face) และบริเวณคมตัด (Flank) ซึ่งการสึกหรอนี้ถูกแยกตามหัวข้อดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะการสึกหรอของมีดตัดที่ตำแหน่งหลักของมีดตัด [25, 27, 28]

- 1 การสึกหรอแบบหลุมแอ่ง (Crater wear) เป็นการสึกหรอเป็นบริเวณกว้างลึกมีลักษณะคล้ายกับแอ่ง อยู่บนหน้าผิวคายเศษโลหะ (Rake face) ของมีดตัด ซึ่งเกิดจากเศษโลหะที่ถูกตัดไหลผ่านไปบนผิว โดยผิวจะเกิดความเครียดสูง (High stress) และมีอุณหภูมิสูงซึ่งก่อให้เกิดการสึกหรอแบบนี้ไม่นิยมวัดการสึกหรอ เพราะต้องวัดความลึกในแอ่ง ซึ่งทำได้ลำบาก
- 2 การสึกหรอของคมตัดที่เป็นแนวยาวหรือแฟรงแวร์ (Flank wear) เป็นการสึกหรอบริเวณผิวด้านผิวคาย (Relief face) ของมีดตัด ซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างเนื้อชิ้นงานก่อตัวเป็นเศษโลหะที่หน้าคมตัดโดยความกว้างของแฟรงแวร์ จะเท่ากับขนาดความลึกตัด การวัดอัตราการสึกหรอซึ่งเกิดเป็นแนวเส้นตรง จึงสามารถใช้กล้องขยายกำลังสูง (Microscope) ส่องดูและลากเส้นหาความยาวเพื่อหาขนาดการสึกหรอได้
- 3 การสึกหรอลักษณะแหวน (Notch wear) เกิดขึ้นบนผิวคายของมีดตัด รอยสึกเกิดที่เส้นขอบของขนาดความลึกตัด และเป็นรอยบากที่มีขนาดใหญ่ ถ้าเปรียบเทียบกับ การสึกหรอชนิดอื่นๆ รอยบากแสดงให้เห็นได้ชัด ในแนวเดียวกับ แฟรงแวร์ การมี

นี่ชแวร์ไม่อันตรายแต่จะส่งผลให้ชิ้นงานไม่เรียบ ต้องเสียเวลาขัดผิวอีกรอบ ในงานที่ต้องการสภาพผิวสำเร็จเรียบดี

- 4 การสึกหรอที่ปลายจมูกมีด (Nose radius wear) เกิดที่ตำแหน่งปลายจมูกส่วนโค้ง (Nose radius) ของขอบคมตัดใกล้หน้ามุดคายนุ้คยเคสโลหะ การวัดจะวัดที่ความสูงในทิศของความเร็วตัดกลไกต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

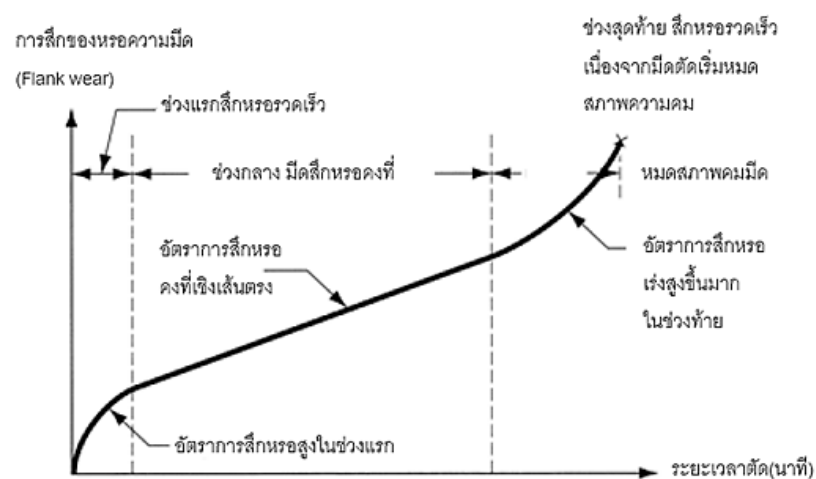
ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด [2]

รูปแบบการสึกหรอ	สาเหตุ	ผลลัพธ์
การขูดขีด	บางส่วนของมีดตัดจะค่อยๆหลุดออกมาจากการเสียดสี ขัดถู ของอนุภาคที่มีลักษณะแข็งของชิ้นงาน ทำให้เกิดสึกหรอทางกล ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการสึกหรอด้านข้างคมตัดหรือแฟรงแวร์ (Flank wear, FW)	มีรอยสึกหรอบนผิวหลบและผิวคายนุ้คย
การยึดติด	อนุภาคของโลหะของชิ้นงานและมีดตัดเกาะติดกันภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง ซึ่งได้แก่เศษโลหะและวัสดุด้านหน้ามีด เมื่อเศษโลหะเคลื่อนผ่านหน้ามีดจะทำให้วัสดุทั้งสองที่ติดกันหลุดออกไปทำให้ด้านหน้ามีดสึกหรอ	มีรอยสึกหรอบริเวณผิวคายนุ้คย
การแพร่	เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนอะตอมระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุสองชนิดจากการสึกหรอ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างเศษตัดกับมีดตัด โดยผิวหน้าของมีดตัดจะเสียดอะตอมทำให้ ความแข็งของมีดตัดลดลง การแลกเปลี่ยนอะตอมเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการสึกหรอ การขูดขีดและการยึดติดเกิดได้ง่ายขึ้น กลไกนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสึกหรอแบบแอ่ง (Crater wear, CW)	มีรอยสึกหรอบริเวณผิวคายนุ้คย
ปฏิกิริยาเคมี	ใช้ความเร็วตัดสูงและเกิดอุณหภูมิสูง เครื่องมือตัดอ่อนลงจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้น	มีรอยสึกหรอบริเวณผิวคายนุ้คย

รูปแบบการสึกหรอ	สาเหตุ	ผลลัพธ์
การเสียรูปแบบ พลาสติก	เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรคมมีดตัด เนื่องจากแรงตัด ที่กระทำต่อคมมีดที่อุณหภูมิสูง คมมีดเสียรูปร่าง ถาวรและส่วนใหญ่มีผลจากการขูดขีด	มีรอยสึกหรอ บริเวณผิวหอบ

2.1.8.2 อายุของเครื่องมือตัด (Tool life) [2, 25]

อายุเครื่องมือตัด นิยามคือ เวลาตัดโดยนับจากเริ่มต้นการใช้เครื่องมือตัดที่ไม่เคยใช้งานมาก่อนตัดชิ้นงานชนิดเดียวและในสภาวะเดียวกัน จนกระทั่งไม่สามารถใช้เครื่องมือตัดชิ้นงานต่อไปได้อีก เนื่องจากมีดตัดสึกหรอแบบต่างๆที่ได้กล่าวมา โดยช่วงของการสึกหรอสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด

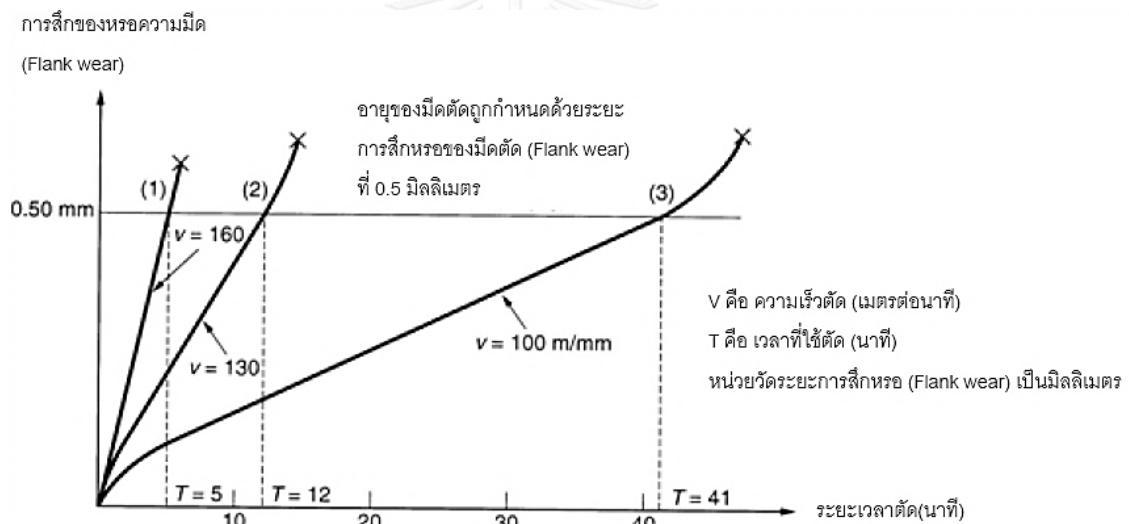
[2, 25, 27, 28]

จากกราฟรูปที่ 2.33 สามารถแบ่งได้ 3 ช่วงเวลาของการสึกหรอของเครื่องมือตัด

- 1 ช่วงแรกในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการตัดชิ้นงาน ในช่วง 2 ถึง 3 นาทีแรก ของการตัด ในช่วงนี้คมของมีดตัดจะสึกหรออย่างรวดเร็ว เนื่องจากแรงกระแทกของมีดตัดต่อชิ้นงานที่กำลังหมุนด้วยความเร็วตัด
- 2 ช่วงกลาง กราฟขนาดการสึกหรอมีเกิดมากขึ้นแต่จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในเชิงเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

- 3 ช่วงสุดท้ายเมื่ออัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูงมาก มีดสึกหรอเร็วมาก เนื่องจากคมมีด ตัดหมดสภาพ ตัดชิ้นงานลำบาก สั่นสะเทือน ถ้ายังใช้งานมีดตัดต่อจะเกิดการพังของมีดตัด

วัสดุชิ้นงานและเงื่อนไขของการตัดมีผลต่อความชันเส้นโค้งของการสึกหรอในช่วงกลาง โดยการตัดชิ้นงานวัสดุแข็ง ทำให้เกิดอัตราการสึกหรอสูงกว่าการตัดชิ้นงานวัสดุอ่อน ในทำนองเดียวกัน ความเร็วในการตัด อัตราป้อนตัด และระดับความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการสึกหรอสูง โดยความเร็วตัดมีผลต่อการสึกหรอมากที่สุดดังรูปที่ 2.33 จากกราฟจะเห็นว่า การเพิ่มความเร็วดำเนินการทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นด้วย และขนาดการสึกหรอสูงถึง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นตัวอย่างเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดของการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Flank wear)



รูปที่ 2.34 ผลกระทบของความเร็วตัดที่เปลี่ยนแปลงในการวัดขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด

โดยกำหนดเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดเป็น 0.5 มิลลิเมตร [25]

อายุการใช้งานของมีดเป็นระยะเวลาเริ่มต้นใช้มีดตัดตัดชิ้นงานจนกระทั่งมีดตัดเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ แต่ในทางอุตสาหกรรมการผลิตจริง ไม่สามารถทราบได้ว่ามีดตัดสึกหรอไปเท่าใด ใช้งานมีดตัดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีดตัดหมดอายุโดยไม่ทำการตรวจสอบขนาดการสึกหรอมีดตัดไม่สามารถทำได้ และการลับคมมีดตัดใหม่ทำได้ยาก จึงเกิดปัญหาที่มีดตัดสึกหรอทำให้คุณภาพของชิ้นงานไม่ดี มีความยากในการวัดขนาดการสึกหรอ รวมถึงไม่สามารถ

กำหนดเวลาที่ใช้ในการวัดเนื่องจากมีดตัดสึกหรอไม่เท่ากันต่อเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีข้อเสนอ 8 ข้อในการกำหนดเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดดังนี้

- 1 พิจารณาการพังของมีดตัดเช่นเกิดการแตกหัก คมตัดเสียรูปเนื่องจากความร้อน
- 2 ตรวจสอบการสึกหรอของมีดตัดด้วยตาเปล่าวิธีนี้อาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน
- 3 เสียงที่เกิดจากการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากมีดตัดสึกหรอ พนักงานใช้เล็มมือตรวจดูวิธีทั้งคู่อาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานเช่นกัน
- 4 รูปร่างของเศษตัดเริ่มโค้งงอต่อกันยาวเหมือนริบบิ้น หรือพันติดค้างอยู่กับชิ้นงาน
- 5 ผิวสำเร็จของชิ้นงานไม่เรียบไม่สม่ำเสมอเหมือนตอนเริ่มแรก
- 6 ใช้กำลังงานในการตัดเพิ่มขึ้นโดยการวัดด้วยวัตต์มิเตอร์
- 7 พิจารณาจากจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้เช่นมีการกำหนดว่าต้องมีการเปลี่ยนมีดตัดเมื่อทำงานไปได้กี่ชิ้น
- 8 พิจารณาจากระยะเวลาการใช้งานของมีดตัดวิธีนี้มีหลักการคล้ายการนับจำนวนชิ้นงานกล่าวคือกำหนดระยะเวลาการใช้งานของมีดตัดก่อนต้องมีการเปลี่ยนมีดตัดใหม่วิธีนี้สะดวกสำหรับเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลเวลาในการตัดได้

2.1.9 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Material) [2]

ในทางอุดมคติ ลักษณะมีดตัดต้องการความแข็งแรงในขณะตัดที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) โดยวัสดุยังคงความแข็งแรง รับแรงกระแทกได้ดี มีความแข็งแรง มีความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) และมีความเหนียว (Toughness) จะส่งผลให้มีดตัดมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้วคุณสมบัติดังกล่าวไม่สามารถพบได้ในวัสดุมีดตัดชนิดเดียว การรวมวัสดุชนิดต่างๆเพื่อใช้ทำมีดตัดเพื่อสร้างคุณสมบัติที่ต้องการให้แก่มีดตัดมีดังนี้

- 1 เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steels) มีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลาง วัสดุนี้มีราคาถูก และลับให้คมได้ง่าย มีความแข็งแรง แต่ทนต่อการสึกหรอต่ำ ไม่มีความทนทานการตัดที่อุณหภูมิสูงจึงเหมาะจะใช้กับงานตัดที่ความเร็วตัดต่ำ
- 2 เหล็กกล้ารอบสูง (High-speed steels) เหมาะสมในการตัดที่ความเร็วตัดสูง มีความทนต่อการสึกหรอและราคาไม่แพง และพบว่าวัสดุประเภททนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก รองรับการสั่นสะเทือนได้ดี

- 3 โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys) มีความแข็งสูง (58-64 HRC) สามารถทนต่อการสึกหรอได้ดีและสามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูง มีความแข็งสูง แต่วัสดุนี้ทนต่อแรงกระแทกได้น้อย ไม่เหมาะในงานการตัดรอบสูง แต่ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ
- 4 คาร์ไบด์ (Cemented or Sintered carbide) ค่าความแข็งไม่ค่อยลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น นำความร้อนดี แต่ไม่แพร่ความร้อน คาร์ไบด์มี 2 ชนิดคือ ไทเทเนียมคาร์ไบด์และทังสเตนคาร์ไบด์ พบว่าการผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่ความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอจะลดลง อย่างไรก็ตามสามารถเพิ่มความแข็งเพื่อทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม คาร์ไบด์เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ ไม่เหมาะสมต่อการสั่นสะเทือน
- 5 เครื่องมือเคลือบผิว (Coated tools) การเคลือบผิวให้เครื่องมือตัดสามารถช่วยให้ตัดชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดสูงๆ เหมาะกับใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงานและลดต้นทุนในการตัด โดยปกติแล้ว สารเคลือบที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) จะทำให้มีดตัดมีความเสียดทานต่ำ มีความแข็งสูง ต้านทานอุณหภูมิที่สูง และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เคลือบอยู่บนทังสเตนคาร์ไบด์อีกชั้นหนึ่ง จะสามารถต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น
- 6 เซรามิกเคลือบอลูมินัมออกไซด์ (Al₂O₃) มีความทนทานการตัดที่อุณหภูมิได้ดี และมีอัตราการนำความร้อนต่ำ สามารถต้านทานต่อการสึกหรอที่ผิวหลบและผิวคายได้ดี และไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี
- 7 เซรามิก (Ceramics) ทนต่อการขีดสี ความร้อนได้ ชิ้นงานหลังการตัดด้วยเซรามิกมีความเรียบสูง เนื่องจากมีดตัดมีความแข็งมากจึงไม่ทนต่อการกระแทก แต่ทนแรงกดดันสูงและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี อย่างไรก็ตาม เซรามิกไม่มีความเหนียว ผลของการตัดด้วยความเร็วสูง เกิดสั่นสะเทือนทำให้มีดตัดแตกหักได้
- 8 คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride : CBN) มีความแข็งมากที่สุด ทนต่อการขีดสี และสึกหรอ มีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะมาก ไม่เหมาะในการตัดชิ้นงานที่สั่นสะเทือน แต่เหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งสูง
- 9 ซิลิกอนไนไตรด์ (SiN) เป็นวัสดุที่ทำมีดตัด โครงสร้างพื้นฐานมีซิลิกอนไนไตรด์แต่มีการเติมพวก ยึดที่ยึดออกไซด์ อลูมินัมออกไซด์ และไททาเนียมไนไตรด์ เข้าไป

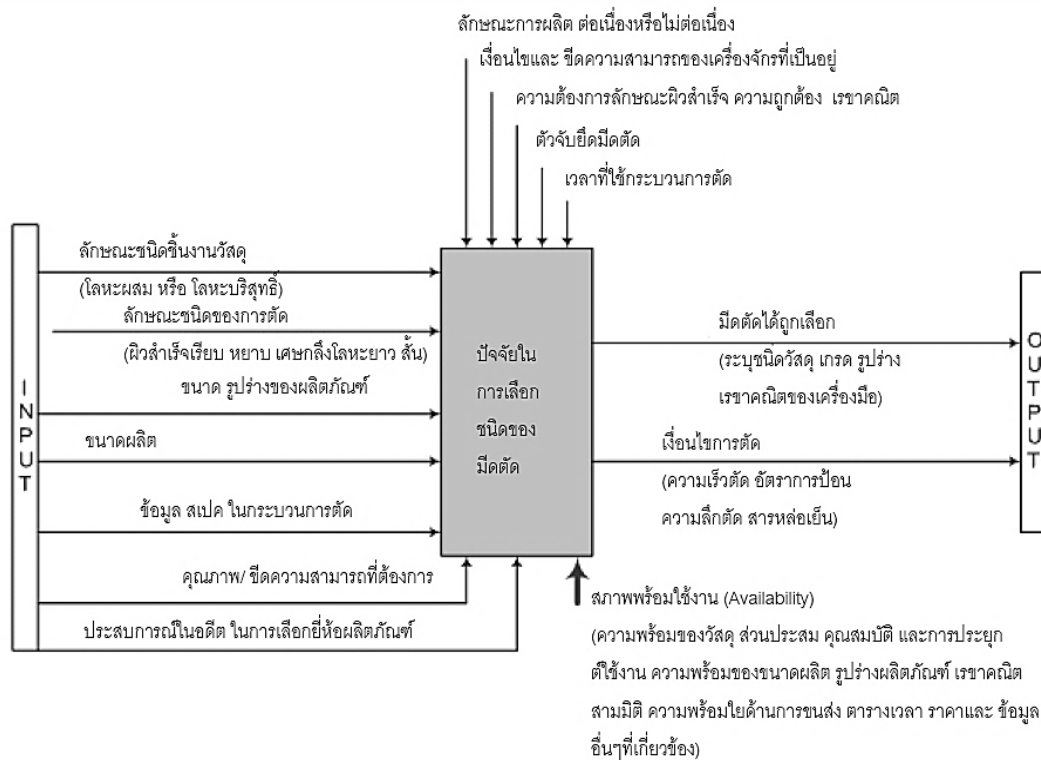
ทำให้มีความเหนียวและมีความทนต่อความร้อนสูง และไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ความร้อนสูงที่เกิดขึ้น

- 10 เพชร (Diamond) มีความเสียดทานต่ำ ทนต่อการสึกหรอได้ดี ใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูงให้ผิวงานสำเร็จดี ขนาดชิ้นงานมีความถูกต้องสูง

2.1.10 ปัจจัยที่มีผลต่อการพิจารณาเลือกเม็ดมีดกลึง

ความเร็วตัดที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้นได้ แต่อาจจะต้องเปลี่ยนเม็ดมีดกลึงหรือมีดตัดบ่อย เนื่องจากมีการสึกหรอสูง ดังนั้นการเลือกเครื่องมือตัดที่มีอัตราการสึกหรอต่ำเพื่อที่จะได้ไม่เสียเวลาเปลี่ยนมีดตัดบ่อยๆ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตให้ได้ ซึ่งนำไปสู่หลักการหาจุดที่เหมาะสม (Optimization) เพื่อหาจุดที่ลงตัวที่สุด ของเวลา ต้นทุน และอัตราการผลิต อย่างไรก็ตาม การหยุดพักแล้วตัดสลับกันไป ช่วยชะลอการสึกหรอของมีดตัดได้ แต่มีอัตราการผลิตลดลง

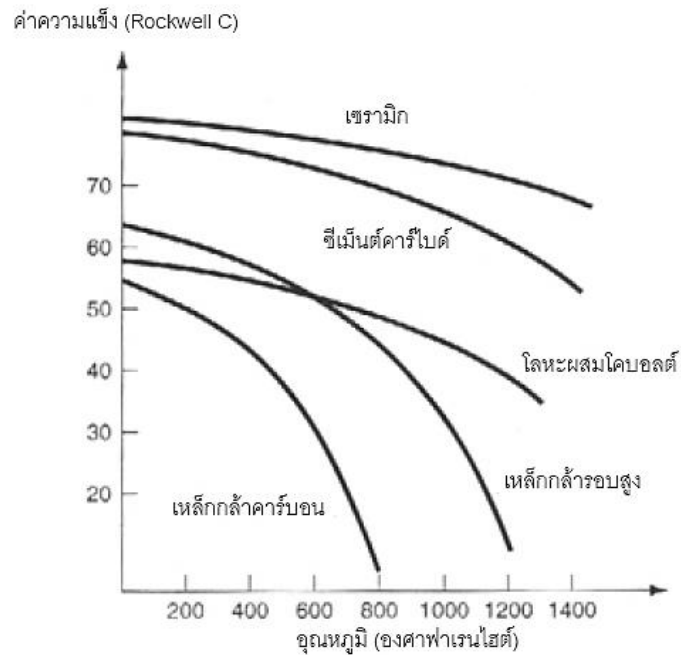
การทำให้สภาพผิวสำเร็จชิ้นงานหยาบ ทำได้โดยการปรับมุมมีดตัด มุมด้านข้างคมตัด (Side cutting edge) น้อยๆ หรือเป็นมุมค่าลบ เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเสียดสีเม็ดมีดกลึงกับชิ้นงาน แต่มีดอาจจะสึกหรอเร็ว แต่เพื่อเพิ่มโอกาสเศษโลหะแตกหัก (Broken chip) วัสดุที่ใช้ทำเม็ดมีดกลึงสามารถเลือกให้ที่มีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูง (High Toughness) ทดแทน เนื่องจากเครื่องกลึงซีเอ็นซีต้องทำงานเป็นระยะเวลายาวนานต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อการตรวจเช็คสภาพการสึกหรอของมีดตัด (Tool wear) ได้ง่าย การเลือกวัสดุที่มีค่าความแข็งวัสดุที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) ค่าสูงๆ เพื่อคงสภาพความแข็งแม้ว่าอุณหภูมิสูงขึ้น ในส่วนของตัวจับยึดก็เช่นเดียวกัน ต้องมั่นคงและมีความเสถียร แม้ว่าขณะตัดจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น แต่ตัวมันเองยังคงต้องรักษาสภาพการจับยึดชิ้นงานที่มั่นคงเอาไว้ได้ ขนาดของจำนวนผลิต (Lot size) มีความสำคัญมากสำหรับการผลิตเชิงอุตสาหกรรม เพราะจะต้องเตรียมสภาพเครื่องจักร จำนวนมีดตัด ให้พร้อมต่อการตัดชิ้นงานจำนวนมาก ดังนั้น ความพร้อมของเครื่องจักร เครื่องมือ ข้อมูลจำนวนผลิต จึงจำเป็น (Availability)



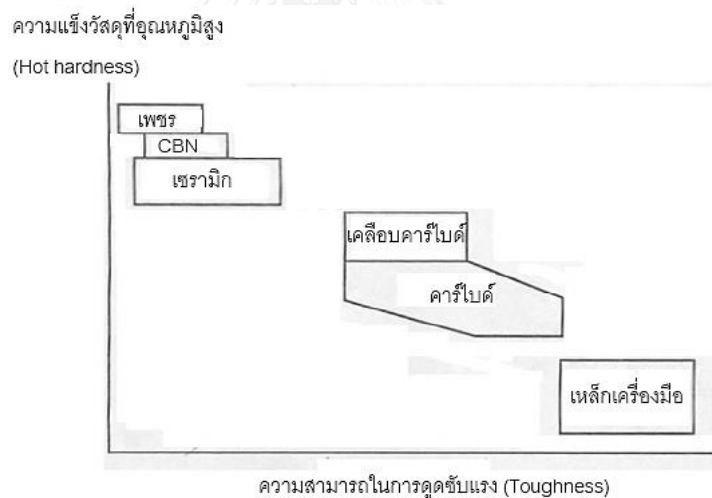
รูปที่ 2.35 ปัจจัยในการเลือกเครื่องมือตัด [27, 28]

2.1.11 หลักการพิจารณาเลือกวัสดุที่ใช้ทำอินเสิร์ต [27]

- 1 ค่าความแข็ง (Hardness) จะต้องคงสภาพความแข็ง (Hardness) และความแข็งเกร็ง (Strength) เอาไว้ได้ แม้ว่าจะเกิดการตัดที่อุณหภูมิสูง เม็ดมีดกลึงจะไม่โดนทำลายไป
- 2 ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก (Toughness) เป็นความสามารถของวัสดุที่จะรับพลังงานโดยไม่เกิดการพังหรือแตกหักวัสดุที่จะใช้ทำมีดตัดควรมีลักษณะผสมระหว่างความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Ductility)
- 3 ความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) เป็นความสามารถของวัสดุในการต้านทานการสึกหรอซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดในการต้านทานการสึกหรอคือความแข็งเพื่อไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนเม็ดมีดกลึงบ่อยๆ ลดเวลา เพื่อเพิ่มอัตราการผลิต
- 4 เสถียรภาพต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical stability) มีดตัดต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งวัสดุเมื่อดัดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [25, 27]



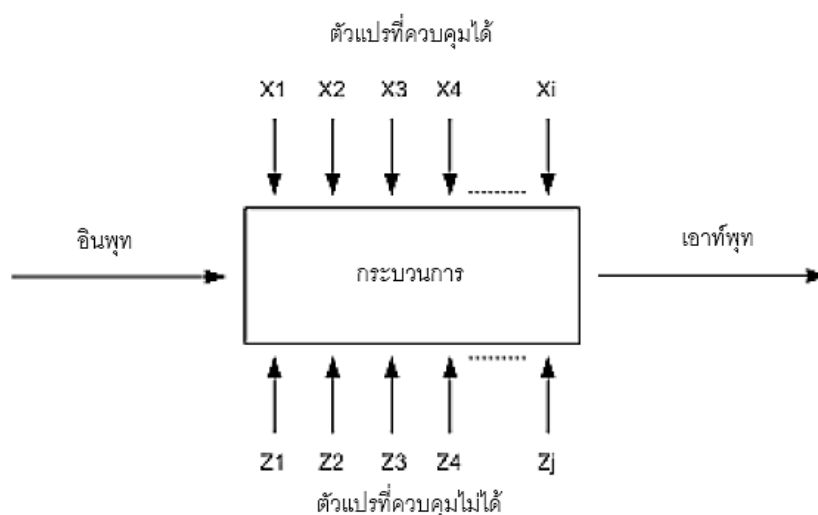
รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ของความแข็งวัสดุกับความความสามารถในการดูดซับแรงกระทำของมีดตัด

[27]

ค่าความแข็ง (Hardness) จะตรงข้ามกับค่าความสามารถในการดูดซับแรง (Toughness) ดังนั้นในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำมีดตัด จะต้องเลือกค่าความแข็งและค่าความสามารถในการดูดซับแรงที่สูงควบคู่กันไป พบว่าวัสดุจำพวกคาร์ไบด์มีความเหมาะสมที่สุด เพราะราคาถูกและมีสมรรถนะดี

2.1.12 การออกแบบการทดลอง [33]

การออกแบบการทดลองคือการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือหลายครั้งต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุท (Input variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจ เพื่อให้สามารถสังเกต และชี้ถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable variables or factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or noise variables or factors) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป [33]

การควบคุมตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบของแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักแล้ว ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวนมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น แหล่งที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ วัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลองจึงต้อง

- 1 หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบ Y
- 2 หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ Y อยู่ที่ค่าที่ต้องการ

- 3 หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ Y มีค่าน้อย
- 4 หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

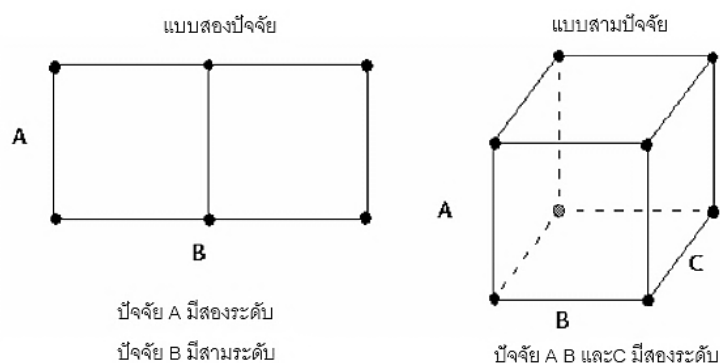
วัตถุประสงค์ของการทดลองคือหาผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้กับผลตอบของระบบ โดยทั่วไปการทดลองจะเกี่ยวเนื่องกับปัจจัยหลายตัว

ในการออกแบบทดลองแบบ AB Factorial ค่าตอบสนอง (Response) จะถูกวัดค่าที่ทุกๆเงื่อนไขของทุกๆค่าระดับปัจจัยที่มีในการทดลอง โดยเงื่อนไขการทดลอง (Combination of factor levels) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนอง โดยที่เงื่อนไขการทดลองแต่ละเงื่อนไขเรียกว่า รัน (Run) การทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนองจากชุดข้อมูลทั้งหมดในทุกรันจะเรียกว่าแบบการทดลอง (Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design) คือการทดลองพิจารณาผลที่เกิดร่วมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ มีประโยชน์คือสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ และสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นๆได้ และทำให้เราสามารถสรุปอย่างเหตุผลของทุกเงื่อนไขของการทดลองได้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

- 1 2^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยสามารถกำหนดระดับของปัจจัยแค่ 2 ระดับ เท่านั้น ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย
- 2 3^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยสามารถกำหนดระดับของปัจจัยแค่ 3 ระดับ เท่านั้น ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย ในกรณีนี้จะได้ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง เพราะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยที่สนใจในลักษณะลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติก

ตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.39 แสดงตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย โดยจุดจะเป็นแสดงถึง เงื่อนไขการทดลองแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง เช่น ในตัวแบบ 2 ปัจจัยจุดที่มุมล่างด้านซ้ายเป็นรันของการทดลองที่มี ค่าระดับปัจจัย A เป็นค่าต่ำและค่าระดับปัจจัย B เป็นค่าต่ำ



รูปที่ 2.39 ตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย [33]

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือผลการทดลองและให้เกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อมูลสรุปที่มีเหตุผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และความผิดพลาดในการทดลอง วิธีทางสถิติถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองได้ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติจึงมีความสัมพันธ์ เพราะวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้น ขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ หลักการพื้นฐาน 3 อย่างในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

- 1 เพลกเคชัน (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำเพื่อทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลอง เพลกเคชันทำให้สามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้น
- 2 แรนดอมไมเซชัน (Randomization) คือการทดลองที่มีลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) ข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริงการที่เราแรนดอมไมซ์การทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้
- 3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งหมายถึง ส่วนหนึ่งของการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน

2.1.13 แนวทางการดำเนินโครงการตามวิธีการออกแบบการทดลอง [33]

มีทั้งสิ้น 7 ขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1 การทำความเข้าใจถึงปัญหา (Problem Recognition & Statement)
- 2 การเลือกตัวแปรผลตอบ (Choice of Response) ควรจะคิดคำนึงถึงเป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบสนองหลายตัว ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริงจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่าจะอะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร
- 3 การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) วางแผนก่อนการทดลองอย่างถูกต้อง และพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจ
- 4 การทำการทดลอง (Performing the Experiment)
- 5 การเลือกปัจจัยระดับและขอบเขต (Choice of Factors and Levels)
- 6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) เป็นการนำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ
- 7 สรุปและการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Conclusion and Confirmation Tasting)

2.1.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน [33]

ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป และต้องทำการทดสอบเพียงครั้งเดียว สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการทำการทดสอบทีละคู่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) เป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติ ถูกใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองหรือลักษณะทางคุณภาพ และสนใจศึกษาผลลัพธ์จากระบบหรือกระบวนการ ในการวิเคราะห์จะต้องแยกสาเหตุของความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

- 1 ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัยหรือวิธีปฏิบัติ ที่ถูกใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between group variations)

- 2 ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากขาดความรู้เกี่ยวกับระบบยังไม่มากพอ ในบางครั้งอาจเกิดจากกรณีที่ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงความแตกต่างในส่วนนี้ในรูปของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error or residual) ถ้าผู้ทดลองมีความรู้หรือความสามารถในการควบคุมการทดลองมากขึ้น ความผิดพลาดส่วนนี้ก็จะลดลง

2.1.15 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ [33]

วิธีการทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ

- 1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่ามีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ จึงใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R_{adj}^2) แทน
- 2 การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit test; LOF) การทดสอบนี้จะทำขึ้นในกรณีที่มีการเก็บข้อมูลซ้ำ แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ ทำการพิจารณาจากค่า P-Value ของ LOF ถ้ามีค่ามากกว่าค่า α ที่กำหนดแล้ว สมการจะมีความเหมาะสม
- 3 การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง (Hypothesis testing for regression coefficients and interval estimation) การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยจัดได้ว่าเป็นขั้นตอนสำคัญสุดท้ายก่อนนำสมการไปใช้ในทำนาย โดยจะทำการประมาณค่าทำนายที่ต้องการโดยใช้ค่าประมาณแบบจุดหรือช่วงต่อไป โดยทั่วไปมักนิยมทดสอบ

สมมติฐาน เพราะค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย จะทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะสามารถลดรู้อีกหรือไม่

2.1.16 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis)

[34]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัว หรือปัจจัยตั้งแต่สองตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม หรือค่าตอบสนอง แนวทางปฏิบัติอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความสัมพันธ์ สามารถเกิดได้หลายกรณี โดยสรุปแบ่งได้เป็น 5 กรณี คือ

- 1 ค่าผิดพลาดจากการวัดที่เกิดจากความผิดพลาดในการวัดส่วนบุคคลหรือขาดการปรับตั้งเครื่องจักรก่อนวัด
- 2 ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการละตัวแปรอิสระเกิดจากการใส่ตัวแปรในสมการประมาณน้อยกว่าความสัมพันธ์ที่แท้จริง
- 3 ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเพิ่มตัวแปรอิสระเกิดในกรณีใส่ตัวแปรอิสระลงในสมการถดถอยมากเกินไปเกินความสัมพันธ์ที่แท้จริง
- 4 ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกรูปแบบสมการผิดเกิดในกรณีที่ผู้ศึกษากำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระผิดไปจากที่ควรเป็น
- 5 ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์

การสร้างสมการถดถอยเชิงพหุสามารถพิจารณาได้ 3 วิธีคือ

- 1 วิธี Backward elimination เริ่มจากการสร้างสมการเต็มรูปแบบแล้วลดรูปโดยพิจารณาจากค่า P-Value ของตัวแปรอิสระ ที่มีค่า $P\text{-Value} > \alpha$ และมีค่าสูงสุดจะถูกเลือกออกจากสมการจนไม่สามารถลดรูปได้อีก
- 2 วิธี Forward elimination เริ่มจากสมการถดถอยอย่างง่ายและพิจารณาเพิ่มตัวแปรอิสระทีละตัว โดยดูจากค่านัยสำคัญ P-Value ที่น้อยที่สุดเป็นตัวเริ่ม แล้วเพิ่มจนกว่าจะเพิ่มไม่ได้อีก
- 3 วิธี Stepwise selection เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป เนื่องจากเป็นหลักการของวิธี Backward elimination และ Forward elimination คู่กัน โดยทุกครั้งที่เลือกตัว

แปรอิสระตัวใหม่เข้าในสมการจะทำการพิจารณาว่า ตัวแปรอิสระควรอยู่ในสมการหรือควรตัดออกไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T.Moriwaki, S.Tangjitsitcharoen and T.Shibasaka (2004) [7] ได้นำเสนองานวิจัยที่สามารถตรวจสอบขนาดความสึกหรอ ของมีดตัดขณะตัด ในเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยประยุกต์ใช้สมการเอ็กโพเนนเชียลแบบเสื่อมถอยเป็นตัวแทนอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนตัดและความต้านทานตัดที่เกิดขึ้น ตัวดัชนี a ในสมการเอ็กโพเนนเชียลถูกใช้แสดงแทนอัตราการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง หรือ Flank wear ตัวดัชนี a จะมีค่าเทียบเท่ากับอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานในขณะตัด ในตอนที่อัตราการป้อนตัดมีเท่ากับศูนย์ ซึ่งเปรียบเทียบกับอัตราการป้อนตัด ณ ค่าอนันต์ ตัวดัชนี a สามารถหาค่าได้โดย ทำการแทรกและเปลี่ยนอัตราการป้อน ในระหว่างรอบการตัดปกติ เพื่อที่จะวัดค่าความต้านทานการตัดที่เกิดขึ้น ทำโดยการตรวจจับแรงตัดในขณะตัดที่เพิ่มขึ้น ไดนาโมมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้เพื่อวัดแรงตัด ในขณะที่อัตราการป้อนตัดมีค่าน้อยๆ การทำการทดสอบวัดค่าความต้านทานด้วยแรงตัด แบบนี้จะถูกทำซ้ำหลายๆรอบ ในการหาอัตราการสึกหรอของเม็ดมีด และผลการทดลองได้สามารถพิสูจน์ได้ว่า แม้ว่าเงื่อนไขการตัดมีความแตกต่างกัน ความเร็วตัด ความลึกตัด เม็ดมีดตัด หรือวัสดุชิ้นงานที่แตกต่างกัน ตัวดัชนี a นี้สามารถถูกใช้เป็นตัววัดค่าอัตราการสึกหรอของเม็ดมีดได้ดี

T.Moriwaki, S.Tangjitsitcharoen and T.Shibasaka (2006) [9] ได้นำเสนองานวิจัยในการพัฒนาระบบการกลึง โดยสร้างระบบและขั้นตอนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เครื่องซีเอ็นซีสามารถตรวจสอบอัตราการสึกหรอและอายุการใช้งานของเม็ดมีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ได้ โดยนำไดนาโมมิเตอร์มาตรวจวัดแรงตัดขณะตัด ที่เกิดขึ้นจากการแปรเปลี่ยนค่าความเร็วตัด และตรวจสอบเสถียรภาพของการตัดโดยตรวจสอบสภาพเศษโลหะที่เกิดขึ้นหลังจากการตัด เพื่อหาอายุการใช้งานของมีดตัดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดความสึกหรอของเม็ดมีดตัดที่เกิดขึ้นกับความเร็วตัดที่ใช้ตัดจริง สมการหาอายุมีดตัดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ได้ ถูกนำไปเพื่อใช้หาขนาดความเร็วตัดที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากต้นทุนการผลิตต่ำสุดหรืออัตราการผลิตสูงสุด ระบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อหาความเร็วตัดที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการกลึง โดยระบบนี้ไม่จำกัดชนิดชิ้นงานวัสดุ เครื่องสามารถหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม ได้เองโดยขนาดความสึกหรอของเม็ดมีดตัด ถูกบ่งบอกด้วยขนาดแรงตัดและลักษณะ

เศษโลหะที่เกิดขึ้น เครื่องซีเอ็นซีที่ถูกโปรแกรมจะปรับความเร็วตัดชิ้นงานให้เหมาะสม ตามลักษณะเศษโลหะที่เกิดขึ้น เพื่อยืดอายุและลดอัตราการสึกหรอของเม็ดมีดได้

S.Tangjitsitcharoen (2010) [8] ได้นำเสนองานวิจัยในการสร้างโมเดลเพื่อทำนายค่าความเรียบผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการกลึงโดยอาศัยสัดส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยได้นำมิติเตอร์ได้ถูกนำมาติดตั้งภายในเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อวัดแรงตัด โมเดลสมการแสดงความเรียบผิวชิ้นงานสามารถถูกแสดงด้วยสมการเอ็กโพเนนเชียลที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดหกปัจจัยคือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด หน้ามุมคายเม็ดมีดตัด รัศมีจุมุมกัด ความลึกกัด และสัดส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้น สมการถดถอยพหุคูณถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด แม้ว่าทุกค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยในสมการจะมีลักษณะเฉพาะในตัวเอง สมการความเรียบผิวชิ้นงานนี้สามารถทำนายความเรียบผิวชิ้นงานขณะตัดได้ถูกต้องที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

S.Tangjitsitcharoen (2010) [35] ได้นำเสนองานวิจัยในการพัฒนาการตรวจติดตามสภาพการสึกหรอของมีดตัดในขณะตัดและสภาพการแตกหักของเศษกลึงโลหะที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้าคาร์บอนของกระบวนการกลึงโดยเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยการนำเซนเซอร์ต่างๆที่สามารถตรวจจับสัญญาณตามลักษณะการตัดที่เกิดขึ้นได้ ได้แก่ เซนเซอร์วัดแรง วัดเสียง วัดความเร่ง และอะคูสติกเซนเซอร์ ซึ่งสัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกผ่านทอรวมกันผ่านโครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการจำแนกรูปอย่างลักษณะสัญญาณ เพื่อแสดงผลของสภาพการสึกหรอของเศษโลหะและสภาพเศษโลหะขณะตัดในขณะนั้น แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสามารถบ่งบอกสภาพการแตกหักของเศษโลหะได้ว่าเป็นแบบใด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แรงตัด ความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณความเร่งจากเซนเซอร์วัดความเร่งที่เกิดขึ้นขณะตัด และระดับความหนาแน่นของสัญญาณเสียงและอะคูสติกที่ออกมา สามารถบ่งบอกสภาพการสึกหรอของเม็ดมีดในขณะนั้นได้ จากการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ต่างๆ มากด้วยสัญญาณมาตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการตัด สามารถใช้ในการติดตามสภาพความสึกหรอของมีดตัด ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและเชื่อถือได้

S.Tangjitsitcharoen (2010) [36] ได้นำเสนองานวิจัยในการพัฒนาโมเดลการทำนายความเรียบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ถูกตัดกลึงด้วยเม็ดมีดตัดเคลือบผิวคาร์ไบด์ ในกระบวนการกลึงโดยเครื่องกลึงซีเอ็นซีภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันด้วยการทดลองแบบบล็อกเบ็งเคน และพื้นผิวตอบสนอง ในกระบวนการกลึง แรงตัดที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิขณะตัด ถูกวัดและวิเคราะห์ ความสัมพันธ์กับสภาพความเรียบผิว และเงื่อนไขการตัด ด้วยเครื่องมือไดนาโม

มิเตอร์และไพโรมิเตอร์ที่ติดตั้งภายในเครื่องกลึงซีเอ็นซี ข้อมูลสัญญาณที่ได้มาจากการทดลองจะถูกใช้ในการพัฒนาสมการทำความเข้าใจ เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุด คือต้องการค่าความเรียบผิวชิ้นงานให้มีค่าน้อยโดยการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิขณะตัดจะสูงขึ้นเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความเรียบผิวของชิ้นงานก็จะดีขึ้น อัตราการบิ่นตัดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงาน ซึ่งในขณะที่ระดับความลึกตัดน้อยๆ จะทำให้ค่าความเรียบผิวชิ้นงานนั้นเรียบดี ประสิทธิภาพของสมการในการทำนายค่าความเรียบผิวได้ถูกพิสูจน์โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุดที่น้อยที่สุดจากเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดสามารถทำนายได้จากโมเดลสมการนี้

S.Tangiitsitcharoen (2008) [37] ได้นำเสนองานวิจัยในการพัฒนากระบวนการในการตรวจสอบสภาพการตัดที่เกิดขึ้นอย่างอัตโนมัติในกระบวนการตัดกลึงโดยใช้เครื่องซีเอ็นซี และโดยสภาพการตัดขณะนั้นจะถูกเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติตามการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขการตัด การตรวจติดตามและระบุเงื่อนไขที่เกิดขึ้นขณะนั้น ถูกพัฒนาแก่เครื่องซีเอ็นซี ให้ตรวจสอบและปรับปรุง เสถียรภาพของกระบวนการตัด โดยใช้หลักการของ Power Spectrum Density (PSD) ในการแสดงลักษณะสัญญาณของเศษโลหะหลังที่เกิดขึ้นจากการตัดไม่ว่าจะเป็นเศษโลหะแบบม้วนยาวที่ไม่แตกหัก แตกหัก และสั้นสะเทือนก็สามารถตรวจสอบได้ การตัดชิ้นงานให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหักเป็นที่ต้องการของงานวิจัย การหา PSD ด้วยวิธี หาค่าความหนาแน่นค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นทั้งสามแกนด้วยพารามิเตอร์ AX AY และ AZ และ หาอัตราส่วน Ratio ของความเข้มข้นหรือความเข้มในรูปของพลังงานที่กระจุกอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มตามลักษณะความถี่ที่เกิดขึ้นจากแรงตัดชิ้นงาน ตามสภาพการตัดในขณะนั้น กับช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นทั้งหมด เพื่อจำแนกลักษณะการเกิดเศษโลหะขณะตัดว่าเศษโลหะนั้นเกิดขึ้นนั้นแล้วเป็นชนิดใด รูปแบบอังกอร์ทิมได้ถูกพัฒนาเพื่อหาค่า Threshold เพื่อจำแนกสภาพการตัด ผลลัพธ์จากการทำการทดลองหลายๆ ค่า สภาพการตัดในขณะนั้นสามารถถูกแยกตามเงื่อนไขการตัดได้ไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเป็นแบบใด โดยอังกอร์ทิมได้ถูกพัฒนาในการหาสภาพการแตกหักของเศษโลหะ เพื่อที่จะเพิ่มเสถียรภาพและความเชื่อมั่นในกระบวนการตามการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

A.D.Bagawade, P.G.Ramdas, R.S.Pawade, and P.K.Bramhankar (2012) [38] ได้นำเสนองานวิจัยที่ทำการทดลองอย่างเป็นระบบในการศึกษา อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆต่อแรงตัดที่ใช้ในกระบวนการกลึงเหล็กกล้า EN31 ด้วยเมตต์มีดอินเสิร์ตแบบไม่เคลือบโพสิทริคตันลินคิวบิกไนไตรด์ (PCBN) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการตัดต่างๆ ด้วยการออกแบบการ

การหมุนของชิ้นงานซึ่งมีผลกระทบต่อขนาดการสึกหรอมาก เหตุผลในการเลือกวัสดุชิ้นงานไทเทเนียมอัลลอยเนื่องจากวัสดุมีความแข็งแรงมาก และทนต่อปฏิกิริยาเคมี และวัสดุไทเทเนียมอัลลอยมีสภาพการนำพาความร้อนต่ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่มีดกตั้งเป็นหลัก ดังนั้นมีดกตั้งจะเสียหายเร็วขึ้นเนื่องจากอิทธิพลเสริมของความร้อน เงื่อนไขการตัดที่ใช้คือ อัตราการป้อนตัด 45 60 และ 75 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 0.30 และ 0.35 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัดเท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลครบทุกเงื่อนไข จากผลการทดลองพบว่า แรงตัดหลัก (F_z) มากขึ้นตามขนาดการสึกหรอเพิ่มขึ้น การใช้อัตราการป้อนตัดสูงและความลึกตัดมาก ทำให้มีดกตั้งสึกหรอไว สมการถดถอยประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และ ความลึกตัดในรูปแบบสมการเชิงเส้น ถูกทดสอบความถูกต้อง พบว่าสมการทำนายมีความแม่นยำที่ 90.01 %

Krzysztof Jemielniak, Tomasz Urbanski, Joanna Kossakowska, and Sebastian Bombinski (2012) [12] ได้นำเสนองานวิจัยในการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอเม็ดมีดกตั้งเซรามิก ในการกลึงชิ้นงานวัสดุเทคนิคเคลือบโครเมียมซูเปอร์อัลลอย (Inconel 625) เนื่องจากวัสดุทนต่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงและทนต่อการถูกกัดกร่อน ด้วยการรวมกันใช้สัญญาณเซนเซอร์หลายชนิด ได้แก่ เซนเซอร์วัดแรง เซนเซอร์วัดความสั่นสะเทือน และเซนเซอร์เสียง เพื่อประมวลผลรูปร่างของสัญญาณที่มีความเกี่ยวข้องกับขนาดการสึกหรอ สัญญาณที่วัดได้อยู่ในรูปแบบโดเมนเวลาถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบโดเมนความถี่ด้วยการแปลงสัญญาณเวฟเล็ตสามระดับ เพื่อคัดแยกรูปร่างสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับสภาพการสึกหรอของมีดกตั้ง โดยพิจารณาคลื่นสัญญาณคลื่นความถี่ต่ำในการกรอง การพิจารณาผลโดยใช้รูปร่างสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับขนาดการสึกหรอมากที่สุดโดยการคำนวณค่า RMSE (Root Mean Square Error) ผลการทดลอง พบว่าสัญญาณจากเซนเซอร์วัดแรงตัดให้สัญญาณเกี่ยวข้องกับขนาดการสึกหรอมากที่สุด และรองลงมาคือเซนเซอร์วัดความสั่นสะเทือน และเซนเซอร์เสียง

Vikas B. Magdum and Vinayak R. Naik [13] ได้เสนองานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกลึงชิ้นงานเหล็กเกรด EN 8 ด้วยเม็ดมีดกตั้ง HSS-M2 ด้วยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วตัด 572 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.13 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร แล้ววัดขนาดการสึกหรอจริงพร้อมกับบันทึกแรงตัดที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา ผลการทดลองพบว่า แรงตัดหลัก (F_z) มีขนาดใหญ่กว่าแรงป้อนตัด (F_y) และจะมีขนาดมากขึ้นเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และทำการวัดน้ำหนักของมีดกตั้งที่หายไปเนื่องจากการสึกหรอ มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) ในการวิเคราะห์ความตึงเครียดที่เกิดที่คมตัดของ

เม็ดมีดกลึงรวมถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะตัด เพื่อตรวจติดตาม และใช้พัฒนาการทำนายขนาดการสึกหรอในระหว่างตัดชิ้นงาน ได้ถูกกล่าวไว้ว่า การประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) จะเป็นที่นิยมในอนาคตในการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอ แทนการตัดชิ้นงานจริงประหยัดค่าใช้จ่ายได้

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัด (Flank wear) ของเม็ดกลึง ได้ทำการสรุปความแตกต่างกับงานวิจัยเล่มนี้ไว้ในตารางที่ 2.3 จะพบว่างานวิจัยส่วนมากยังไม่มีการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดในการอธิบายความสัมพันธ์กับขนาดการสึกหรอ ส่วนมากจะเป็นงานวิจัยเพื่อหาขนาดแรงตัดที่เกิดขึ้นว่าสัมพันธ์กันอย่างไรเมื่อขนาดการสึกหรอเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่มีวัตถุประสงค์คล้ายคลึงกับงานวิจัยในเล่มนี้ พบว่า งานวิจัย [11] มีการสร้างสมการทำนายขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Flank wear) โดยสมการถดถอยอยู่ในรูปเชิงเส้นตรง ประกอบด้วยความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัดและแรงตัดในทิศการหมุนชิ้นงาน (F_z) แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นมีอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัด ความแข็งวัสดุชิ้นงานรวมอยู่ด้วย การนำเอาขนาดแรงตัดซึ่งไม่ได้ถูกลบอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดเหล่านี้ออกไปมาทำนายขนาดการสึกหรอและพบว่ารูปแบบสมการที่ได้อยู่ในรูปเชิงเส้นตรงซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีสมการของเทย์เลอร์ซึ่งขนาดการสึกหรอสัมพันธ์กับเวลาในรูปแบบสมการเอ็กโปเนนเชียลไม่ใช่เชิงเส้นตรง อาจจะทำให้สมการทำนายของงานวิจัยนี้ไม่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากนัก

นอกจากนั้นยังพบว่ามีงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดในการประมาณค่าความขรุขระชิ้นงาน [6, 8] โดยสร้างโมเดลสมการประมาณค่าความขรุขระ และด้วยความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่างความขรุขระและขนาดการสึกหรอของเม็ดตัด เพราะความขรุขระผิวชิ้นงานเกิดจากขนาดการสึกหรอของเม็ดตัดที่มากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำอัตราส่วนแรงตัดมาประยุกต์ใช้ในการทำนายขนาดการสึกหรอเม็ดตัดได้ เพราะอัตราส่วนแรงตัดเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับเงื่อนไขการตัด วัสดุชิ้นงาน ความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 1 และในงานวิจัยนี้ทำการประมวลสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีผลต่อขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Flank wear) ของเม็ดกลึงเนื่องจากแรงตัดพลวัตให้ลักษณะสัญญาณตามถูกต้องความเป็นจริง โดยแรงตัดพลวัตที่เกี่ยวข้องมีสองแรงได้แก่แรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) และแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) เพื่อใช้ในการทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ในการทำนายขนาดการสึก

หอรรมีดกลิ่งร่วมกับปัจจัยเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการบ่อนตัด และความลึกตัด เพื่อสร้างสมการทำนายให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อแตกต่างจากผลงานวิจัยในอดีต

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
[7]	การตรวจสอบขนาดความลึกหอรรมีดตัด (Flank wear) ในการกลิ่งซีเอ็นซี โดยประยุกต์สมการเอ็กโปเนนเชียลถดถอย เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการบ่อนตัดและความต้านทานตัด (ตัวดัชนี a) ที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเงื่อนไขการตัด เช่น ความเร็วตัด ความลึกตัด มีดตัด หรือวัสดุชิ้นงานจะเป็นอย่างไร ความต้านทานตัดใช้อธิบาย อัตราการสึกหอรรมีดตัดได้ พบว่าอัตราการบ่อนมีดตัดมีผลต่อการสึกหอรรมีดตัด	การกลิ่ง	- สมการถดถอยแบบเอ็กโปเนนเชียล - การสร้างเส้นจำลองด้วยวิธี Steepest descent method	- เหล็กอัลลอยด์ SNCM420 - เหล็ก S45C - อัตราบ่อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - รัศมีจุมูกมีด - มุมคายเศษโลหะ - มีดกลิ่งเคลือบผิวคาร์ไบด์ - ตัดแบบแห้ง - แรงตัดพลวัต
	สรุปข้อแตกต่าง		- เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล - ไม่มีการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหอรรมีดตัดและแรงตัดที่เกิดขึ้น - ไม่มีการใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อใช้ในการทำนายขนาดการสึกหอรรมีดตัด	

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
[8]	<p>การพัฒนาระบบและขั้นตอนที่เหมาะสมที่สุด ให้เครื่องซีเอ็นซีตรวจสอบอัตราการผลิตและอายุการใช้งานของมีดกลึงได้ โดยตรวจวัดแรงตัดในขณะที่ตัด การเปลี่ยนค่าความเร็วตัด และตรวจสอบสภาพเศษโลหะหลังจากการตัด เพื่อหาอายุการใช้งานของมีดตัด ระบบนี้ไม่จำกัดชนิดชิ้นงานวัสดุ สามารถหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมเครื่องซีเอ็นซีจะปรับความเร็วตัดชิ้นงานให้เหมาะสมตามลักษณะเศษโลหะที่เกิดขึ้น เพื่อยืดอายุและลดอัตราการผลิตของมีดตัดได้</p>	การกลึง	<p>- การหาอัตราการผลิตที่มาก - ราคาต่ำที่สุดจาก - การใช้ความเร็วตัดที่เหมาะสมที่สุด</p>	<p>- เหล็ก S45C - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - แรงตัดพลวัต - รัศมีจุมุมมีด - มุมคายเศษโลหะ - มีดกลึง - เคลือบผิวคาร์ไบด์ - ตัดแบบแห้ง - ความต้านทานการตัด</p>
	สรุปข้อแตกต่าง		<p>- เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล - ไม่มีการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการผลิตและแรงตัดที่เกิดขึ้น - ไม่มีการใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อทำนายขนาดการผลิต - ขนาดการผลิตไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาแต่แตกต่างกันตามเงื่อนไขการตัด</p>	

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
[35]	<p>การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ต่างๆ เช่น เซนเซอร์วัดแรง เซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์วัดเสียงในการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอ มีดกึ่งในขณะกึ่ง โดยจำแนกลักษณะเศษโลหะและสัญญาณความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอธิบายด้วย PSD (Power spectrum density)</p> <p>พบว่าความถี่ของเศษโลหะแตกหักเนื่องเกิดขึ้นสอดคล้องกันจากสามชนิดเซนเซอร์และขนาด PSD มีขนาดใหญ่ในช่วงความถี่ต่ำเนื่องจากการสึกหรอ</p>	การกึ่ง	<p>- การประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network and back propagation)</p> <p>- หลัก PSD วิเคราะห์ขนาดในโดเมนความถี่</p>	<p>- เหล็ก S45C</p> <p>- อัตราบ้อนตัด</p> <p>- ความเร็วตัด</p> <p>- ความลึกตัด</p> <p>- ตัดแบบแห้ง</p> <p>- มีดกึ่ง</p> <p>- เคลือบผิวคาร์ไบด์</p> <p>- แรงตัดพลวัต</p>
	สรุปข้อแตกต่าง		<p>- เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล</p> <p>- ไม่มีการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอและแรงตัดที่เกิดขึ้น</p> <p>- ไม่มีการใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อทำนายขนาดการสึกหรอ</p>	

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
[9]	<p>การสร้างสมการทำนายค่าความเรียบผิวชิ้นงานในการกลึงโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ตรวจจับแรงตัดในการทำสัดส่วนแรงตัด โมเดลสมการทำนายถูกพัฒนาด้วยสมการเอ็กโปเนนเชียลที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ สมการถดถอยพหุคูณถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สมการทำนายความเรียบผิวชิ้นงานนี้มีความแม่นยำที่ระดับความเชื่อมั่น 95%</p>	การกลึง	<ul style="list-style-type: none"> - การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงพหุ - วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least mean square method) 	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - รัศมีจุกมีด - สัดส่วนแรงตัด - เหล็ก S45C - ตัดแบบแห้ง - มีดกลึง - เคลือบผิวคาร์ไบด์ - แรงตัดพลวัต
	สรุปข้อแตกต่าง		<ul style="list-style-type: none"> - เป็นสมการทำนายความขรุขระผิว - ไม่มีการควบคุมขนาดการสึกหรอของมีดกลึงซึ่งส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวได้ 	
[35]	<p>การตรวจติดตามขนาดการสึกหรอของมีดกลึงในขณะตัดและเศษโลหะโดยใช้เซนเซอร์ต่างๆที่สามารถตรวจจับสัญญาณตามลักษณะการตัดที่เกิดขึ้นได้ เช่น เซนเซอร์วัดแรง วัดเสียง วัดความเร่ง และอะคูสติคเซนเซอร์ ซึ่งสัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกประมวลผล</p>	การกลึง	<ul style="list-style-type: none"> - การประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network and back propagation) 	<ul style="list-style-type: none"> - เหล็ก S45C - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - ตัดแบบแห้ง - มีดกลึง - เคลือบผิวคาร์ไบด์

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
	ด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ต่างๆ ร่วมกัน สามารถใช้ในการติดตามสภาพความสึกหรอของมีดตัด ได้อย่างแม่นยำ พบว่าแรงบั่นตัด ส่งผลให้เศษโลหะแตกหักมากที่สุด		- หลัก PSD วิเคราะห์ขนาดในโดเมนความถี่	- แรงตัดพลวัต
	สรุปข้อแตกต่าง		- เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลจำเป็นต้องคอยโปรแกรมและสอนให้ระบบจดจำเงื่อนไขการตัดใหม่ๆ ก่อนปฏิบัติงานจึงไม่สะดวกต่อการใช้งาน - ไม่มีการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอและแรงตัดที่เกิดขึ้น - ไม่มีการใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อทำนายขนาดการสึกหรอ	
[29]	การพัฒนาสมการทำนายความเรียบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ด้วยมีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน ด้วยการทดลองแบบ บ็อกเบ็งเคน และพื้นผิวตอบสนอง แรงตัดที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิขณะตัด นำมาสร้างความสัมพันธ์ พบว่า อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความเรียบผิวของชิ้นงานดีขึ้น อัตราการบั่นตัดมีผลต่อความ	การกลึง	- ออกแบบการทดลองแบบ บ็อกเบ็งเคน - การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงพหุ - วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least mean square method)	- เหล็ก S45C - อุณหภูมิ - อัตราบั่นตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - รัศมีจุกมิด - สัดส่วนแรงตัด - ตัดแบบแห้ง

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
	เรียบผิวชิ้นงาน สมการทำนายความเรียบผิวชิ้นงานนี้มีความแม่นยำที่ระดับความเชื่อมั่น 95%		- วิธีพื้นผิวตอบสนอง	- มีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ - แรงตัดพลวัต
	สรุปข้อแตกต่าง	- เป็นสมการทำนายความขรุขระผิว - วิธีการออกแบบการทดลอง - ไม่มีการควบคุมขนาดการสึกหรอของมีดกลึงซึ่งแรงตัดที่เปลี่ยนแปลงไปจากขนาดการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวได้		
[38]	การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆว่ามีผลต่อแรงตัดอย่างไรในการกลึงเหล็กกล้า EN31 ด้วยมีดกลึงแบบไม่เคลือบผิว โพลีคริสตัลลีนคิวบิกไนไตรด์ (PCBN) ด้วยวิธีการของทาคูจิ พบว่ามีแรงตัดทั้งหมดมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด	การกลึง	- ออกแบบการทดลองทาคูจิ - วิธีพื้นผิวตอบสนอง	- เหล็ก AISI 52100 - ตัดแบบแห้ง - มีดกลึงไม่เคลือบผิว CBN - อุณหภูมิ - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - แรงตัดพลวัต
	สรุปข้อแตกต่าง	- เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล - ไม่มีการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอและแรงตัดที่เกิดขึ้น		

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
		- ไม่มีการใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อทำนายขนาดการสึกหรอ		
[10]	การปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานโดยควบคุมขนาดความสึกหรอและความเรียบผิวชิ้นงานขณะกลึงโดยหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม ออกแบบการทดลองแบบทาคูจิ พบว่าความเร็วตัดส่งผลต่อขนาดความสึกหรอของมีดตัดและความเรียบผิวสำเร็จชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ	การกลึง	- ออกแบบการทดลองทาคูจิ	- เหล็กกล้าคาร์บอน - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน - ตัดแบบแห้ง
	สรุปข้อแตกต่าง	- เป็นสมการทำนายความขรุขระผิว - วิธีการออกแบบการทดลอง - ไม่มีการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอและแรงตัดที่เกิดขึ้น - ไม่มีการใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อทำนายขนาดการสึกหรอ		
[39]	การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงตัด ความเรียบผิวและขนาดการสึกหรอของมีดกลึง ที่เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันของมีดกลึงเคลือบผิวไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เทียบกับชนิดไม่เคลือบผิว ตัดชิ้นงาน	การกลึง	- ออกแบบการทดลองทาคูจิ	- เหล็ก AISI 4340 - มีดกลึงเคลือบผิวไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN)

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
	เหล็กกล้า AISI4340 พบว่าแรงตัดมีค่าน้อยเมื่อใช้มีดกลึงแบบไม่เคลือบ ตรงข้ามกับมีดกลึงเคลือบผิวแรงตัดมีค่ามาก การใช้ความเร็วตัดสูง และอัตราการป้อนตัดต่ำกับวัสดุชิ้นงานแข็งมาก ควรเลือกใช้เม็ดมีดแบบเคลือบผิว จะประหยัดกว่าแบบไม่เคลือบผิว เพราะทนทานต่อการสึกหรอ			<ul style="list-style-type: none"> - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - ตัดแบบแห้ง - แรงตัดพลวัต
	สรุปข้อแตกต่าง	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีการออกแบบการทดลอง - ไม่มีการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอและแรงตัดที่เกิดขึ้น - ไม่มีการใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อทำนายขนาดการสึกหรอ 		
[11]	สร้างพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Flank wear) ของมีดกลึงด้วยแรงตัดหลัก (Fz) ในการกลึงวัสดุไทเทเนียมอัลลอย ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด สร้างรูปแบบสมการจำลองถดถอยเชิงเส้นตรง เพื่อทำนายขนาดการสึกหรอ พบว่าแรงตัดหลัก (Fz) เพิ่มขึ้นอย่าง	การกลึง	<ul style="list-style-type: none"> - ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล - สร้างสมการถดถอยเชิงเส้นตรง 	<ul style="list-style-type: none"> - ไทเทเนียมอัลลอยชิ้นงาน - มีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - ตัดแบบแห้ง - แรงตัดพลวัต

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
	<p>รวดเร็วเชิงเส้นตรง เมื่อมีดสักหรอมากขึ้น การเพิ่มความลึกตัดและอัตราการป้อนตัดส่งผลต่อขนาดการสักหรออย่างมีนัยสำคัญ</p> <p>สมการถดถอยมีความแม่นยำ 90.01%</p>			
	<p>สรุปข้อแตกต่าง</p>		<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุไทเทเนียมอัลลอยด์มีการนำความร้อนต่ำและทนต่อการสักหรอได้ดีกว่าเหล็กกล้า S45C - วิเคราะห์แรงตัดในแนวการหมุนชิ้นงาน (Fz) เท่านั้นกับขนาดการสักหรอ - ไม่ได้ทำอัตราส่วนแรงตัดเพื่อขจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่างๆ ความแข็ง วัสดุชิ้นงานออกไป - ได้สมการทำนายเป็นเชิงเส้นตรงเทียบกับเวลา แต่ในทางทฤษฎีของสมการเทอร์เลอร์แล้วขนาดการสักหรอควรจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลไม่ใช่เชิงเส้นตรง เพราะขนาดการสักหรอเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายมีดตัดใกล้หมดสภาพ 	
[12]	<p>การตรวจติดตามสภาพขนาดการสักหรอมีดกลึง โดยใช้สัญญาณจากเซนเซอร์หลายชนิด ได้แก่ เซนเซอร์วัดแรง เซนเซอร์วัดความสั่นสะเทือน และเซนเซอร์เสียง เพื่อ</p>	การกลึง	<p>- การตัดแยกสัญญาณในโดเมนความถี่ (Wavelet)</p>	<p>- วัสดุชิ้นงาน นิคเคิล โครเมียมซูเปอร์อัลลอย (Inconel 625)</p>

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
	หาสัญญาณที่เหมาะสมกับสภาพการสึกหรอ แยกสัญญาณในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงสัญญาณเวฟเล็ตในคลื่นความถี่ต่ำ พบว่าสัญญาณจากเซนเซอร์วัดแรงให้สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับขนาดการสึกหรอมากที่สุด รองลงมาคือเซนเซอร์วัดความสั่นสะเทือน และเซนเซอร์เสียง		- ประมวลผลด้วยหลัก RMSE (Root mean square error)	- มีดกึ่งเซรามิก - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - ตัดแบบแห้ง - แรงตัดพลวัต
	สรุปข้อแตกต่าง		- ใช้แรงตัดมาพิจารณาแค่แรงในแนวเดียว (Fz) - ไม่มีการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอ - ไม่ได้พิจารณาถึงการขจัดอิทธิพลอื่น ๆ ที่มีผลกับแรงตัด ด้วยอัตราส่วนแรงตัด - ไม่มีการสร้างสมการทำนายขนาดการสึกหรอ	
[13]	การทดลองกึ่งชิ้นงานเหล็กเกรด EN 8 ด้วยมีดกึ่ง HSS-M2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ขนาดการสึกหรอ (Flank wear) กับแรงตัดที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา พบว่าแรงตัดในทิศการหมุนชิ้นงาน (Fz) มีขนาดใหญ่กว่าแรงป้อนมีดตัด (Fy) และมีขนาดมากขึ้นเมื่อขนาดการสึก	การกึ่ง	- วิเคราะห์ขนาดแรงตัดเทียบกับระยะการสึกหรอ	- เหล็กชิ้นงาน EN-8 - มีดกึ่งวัสดุ HSS-M2 - อัตราป้อนตัด - ความเร็วตัด - ความลึกตัด - ตัดแบบแห้ง

งานวิจัย	เนื้อหางานวิจัย	เงื่อนไขการตัด		
		ชนิดการตัด	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
	หอรอบมากขึ้น มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) ในการวิเคราะห์ความตึงเครียดที่เกิดที่คมตัดของเม็ดมีดกลึง รวมถึงคุณสมบัตินี้ที่เกิดขึ้นในขณะตัด เพื่อใช้พัฒนาการทำนายขนาดการสึกหรอในระหว่างตัดขึ้นงานได้			- แรงตัดพลวัต
	สรุปข้อแตกต่าง			<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ได้พิจารณาถึงการขจัดอิทธิพลอื่น ๆ ที่มีผลกับแรงตัดด้วยอัตราส่วนแรงตัด - ไม่มีการสร้างสมการทำนายขนาดการสึกหรอ - ใช้เงื่อนไขการตัดเดียวในการทำวิจัย - ไม่มีความยืดหยุ่น - มีการจำลองลักษณะความเครียดบนเม็ดตัดโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้นำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัยชนิดเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยการติดตั้งอุปกรณ์ ขั้นตอนการดำเนินการทดลองวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลการออกแบบการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกหรือของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิวกับแรงตัดที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆที่กำหนด ในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี จากความสัมพันธ์ที่ได้จะถูกใช้เพื่อพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงต่อไป

3.1 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระดับปัจจัยอิสระที่ส่งผลต่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดตัดในกระบวนการกลึงมี 4 อย่าง คือ ปัจจัยจากชนิดวัสดุมีดตัด ปัจจัยจากชนิดวัสดุชิ้นงาน ปัจจัยจากเงื่อนไขการตัด และปัจจัยที่เกิดจากธรรมชาติของการตัด โดยพบว่าปัจจัยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด ขนาดรัศมีจมูกมีดตัด และแรงตัดที่เกิดขึ้นตามสภาวะเงื่อนไขการตัดมีผลต่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดตัดดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกปัจจัยอิสระดังกล่าวที่มีผลต่อขนาดความลึกหรือของเม็ดมีดมาใช้ในการทดลอง

3.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

เลือกกำหนดปัจจัยอิสระในการตัด ซึ่งเป็นเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมในการตัดเพราะว่าไม่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบยาวต่อเนื่องจนพันกันกับมีดตัดและอุปกรณ์เช่นเซอร์วิดแรงภายในเครื่องกลึงซีเอ็นซี

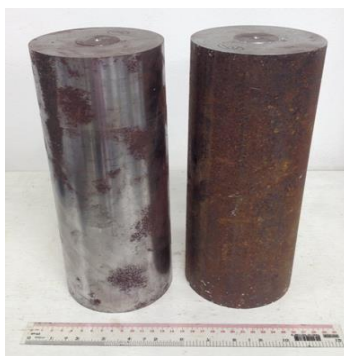
- ความเร็วตัด 100, 150, 200 เมตรต่อนาที
- อัตราการป้อนตัด 0.15, 0.20, 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ
- ความลึกตัด 0.4, 0.6, 0.8 มิลลิเมตร

โดยกำหนดค่าคงที่ในการตัดได้แก่ รัศมีจมูกมีดตัด (Cutting tool nose radius) 0.4 มิลลิเมตรและกำหนดค่ามุมลบคายเศษโลหะชิ้นงานเท่ากับ -6 องศา (Negative rake angle) ทั้งนี้เพราะเพื่อให้เกิดแรงตัดชิ้นงานที่มากขึ้นเพื่อเพิ่มโอกาสให้เศษโลหะแตกหักได้มากขึ้นและทำให้มีดตัดสึกหรอได้เร็วขึ้น ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 1

3.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุชิ้นงาน (Work piece)

เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1 และแสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ใช้ในการกลึง

ตารางที่ 3.1 ค่ามาตรฐานส่วนประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน [29]

ค่ามาตรฐาน				
JIS	S45C			
AISI	1045			
DIN	Ck45			
ส่วนประกอบทางเคมี (%)				
C	Mn	Si	P	S
0.42 - 0.48	0.60 - 0.90	0.15 - 0.35	≤ 0.030	≤ 0.035
คุณสมบัติทางกล				
Density (kg/m ³)	7700 - 8030			
Young's Modulus (GPa)	190 - 210			
Tensile Strength (MPa)	569 (Standard) 686 (Quenching, Tempering)			
Yield Strength (MPa)	343 (Standard) 490 (Quenching, Tempering)			
Poisson's ratio	0.27 - 0.30			
Brinell Hardness (HB)	160 - 220 (Annealed)			

3.2.2 เม็ดมีดกลึง (Insert)

ยี่ห้อ CERATIP รหัส TNMG 160404HQ CA5525 (รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร) เป็นเม็ดมีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์ ใช้สำหรับด้ามมีดตัดรหัส WTJNR2525M-16N ใช้ในงานกลึงหยาบ



รูปที่ 3.2 เม็ดมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3 ด้ามมีดตัด (Tool Holder)

ยี่ห้อ KYOCERA รหัส WTJNR2525M-16N มีมุมคายเศษโลหะ -6 องศา



รูปที่ 3.3 ด้ามมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine)

ยี่ห้อ MAZAK รุ่น Quick turn NEXUS 200MY/MSY มี 4 แกน



รูปที่ 3.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 ไดนาโมมิเตอร์ หรือ เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer)

ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121 ใช้สำหรับวัดสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะกลึงชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์หรือเซนเซอร์วัดแรงตัดยี่ห้อKISTLER รุ่น 9121

3.2.6 เครื่องขยายสัญญาณแรงตัด (Charge Amplifier)

ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 5038 เป็นอุปกรณ์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัดที่ส่งมาจากไดนามอมีเตอร์



รูปที่ 3.6 เครื่องขยายสัญญาณแรงตัด

3.2.7 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 ใช้สำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรง ตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 3.7 เครื่องออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด

3.2.8 กล้องไมโครสโคป (Microscope)

ยี่ห้อ Keyence รุ่น VHX 600 ใช้ขยายเพื่อส่องวัดขนาดความลึกหรือของเม็ดมีด

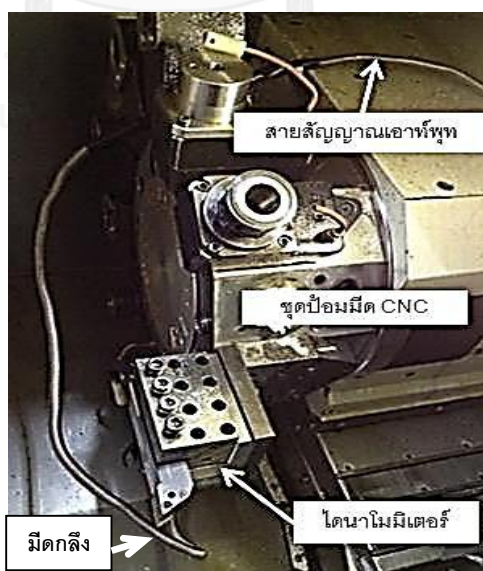


รูปที่ 3.8 กล้องไมโครสโคปส่องเม็ดมีด

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

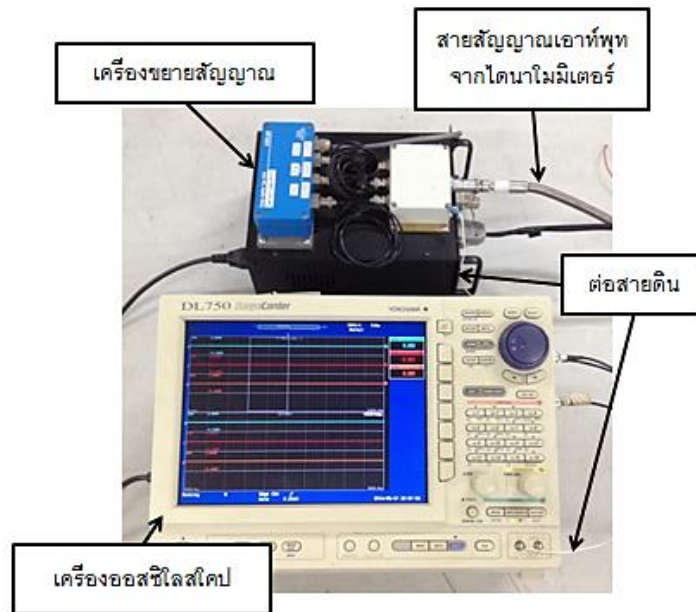
3.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

- 1 ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงตัดหรือไดนาโมมิเตอร์เข้ากับชุดป้อนมีดซีเอ็นซีดังรูปที่ 3.9



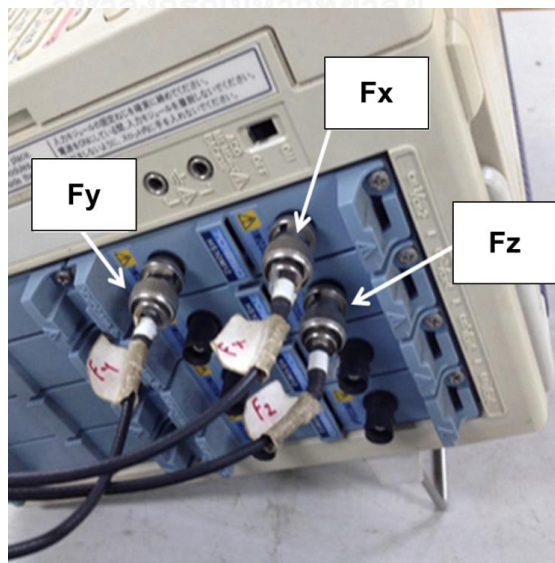
รูปที่ 3.9 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์บนชุดป้อนมีดเครื่องซีเอ็นซี

- 2 ต่อสายสัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์วัดแรงตัดเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การต่อสายสัญญาณจากไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ

- 3 ทำการต่อสายเอาต์พุตของเครื่องขยายสัญญาณเข้าเครื่องบันทึกสัญญาณแรงตัด (Oscilloscopes) ดังรูป 3.11 ให้มีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 3.12

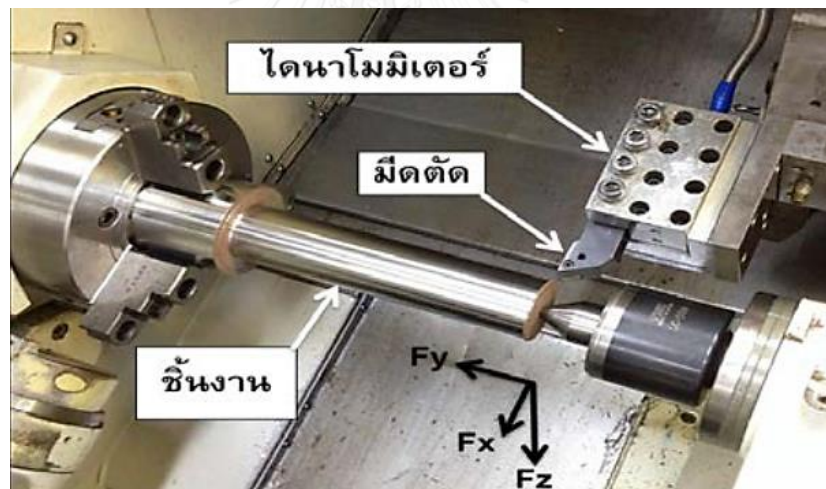


รูปที่ 3.11 การต่อสายสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกสัญญาณ



รูปที่ 3.12 การติดตั้งเครื่องขยายสัญญาณและเครื่องบันทึกสัญญาณ

- 4 นำชิ้นงานเข้าเครื่องซีเอ็นซี โดยจะถูกยึดจับด้วยตัวปากจับชิ้นงาน (Chuck) รูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การติดตั้งชิ้นงานและไดนาโมมิเตอร์ในเครื่องซีเอ็นซี

3.3.2 วิธีการทดลอง

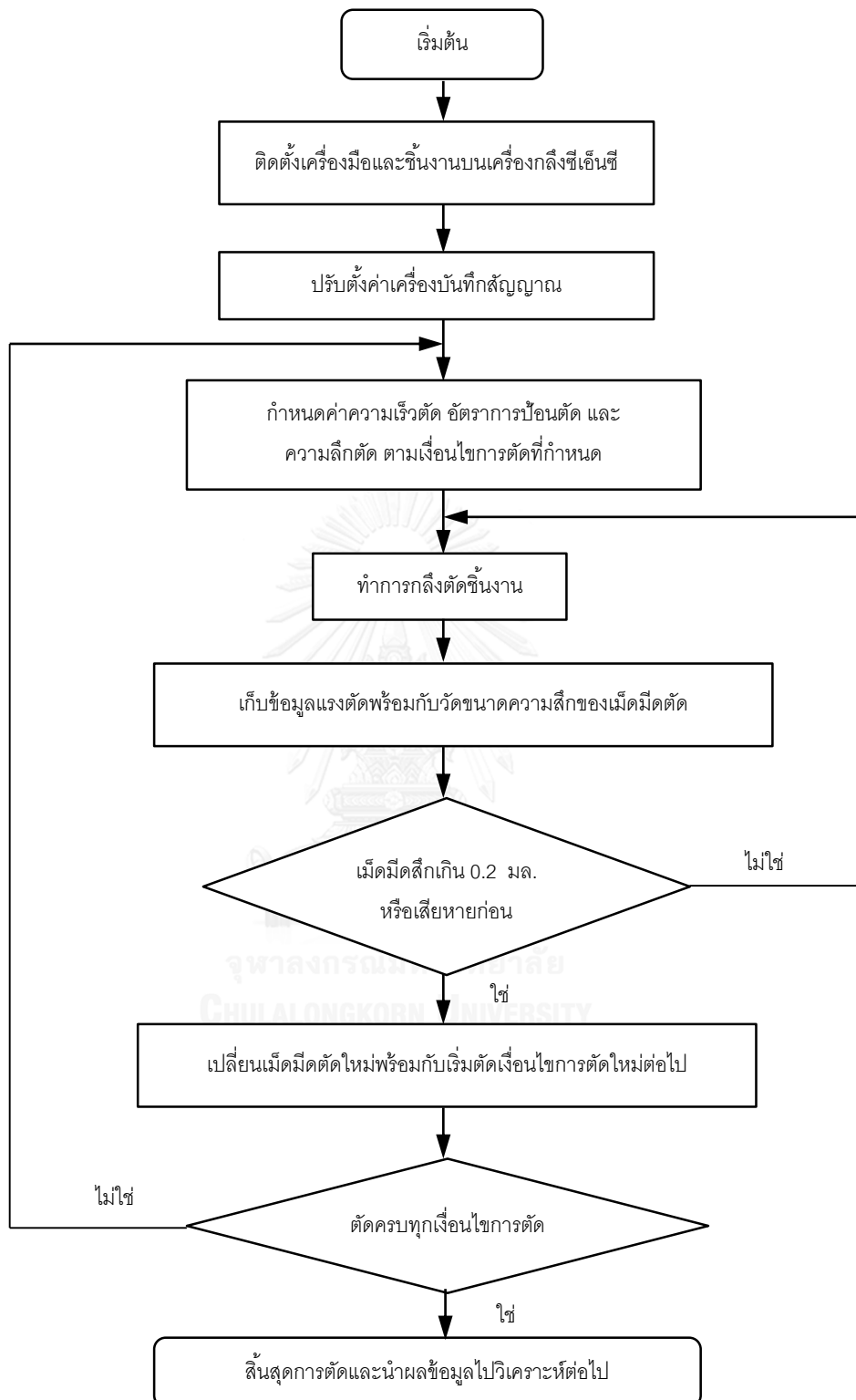
หลังจากติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์เสร็จแล้ว จะทำการทดลองด้วยกระบวนการตัดกลึง ปอกซึ่งเป็นการตัดแบบแห้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆที่กำหนดไว้ ได้แก่

- ความเร็วตัด 100, 150, 200 เมตรต่อนาที
- อัตราการป้อนตัด 0.15, 0.20, 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ
- ความลึกตัด 0.4, 0.6, 0.8 มิลลิเมตร

โดยใช้เมล็ดมีดัดขนาดรัศมีจมูกมีดัด 0.4 มิลลิเมตรและมุมลบคายเศษโลหะเท่ากับ -6 องศา ที่ด้ามมีดัดโดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1 บ่อนโปรแกรมการตัดตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.2
- 2 ตัดกลึงชิ้นงานตามเงื่อนไขการตัดที่กำหนดไว้
- 3 เก็บข้อมูลแรงตัดอย่างสม่ำเสมอพร้อมกับการวัดขนาดการสึกหรอในขณะนั้น โดยทำการเปลี่ยนเมล็ดมีดัดชิ้นใหม่ ทุกครั้งที่เปลี่ยนเงื่อนไขการตัดค่าใหม่ ทำการตัดไปจนมีดัดสึกหรอที่ 0.2 มิลลิเมตรหรือมีดัดเกิดความเสียหายก่อน
- 4 นำข้อมูลแรงตัดที่ได้มาบันทึกค่าและสร้างกราฟความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอและอัตราส่วนแรงตัดโดยลำดับขั้นตอนทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูป 3.14





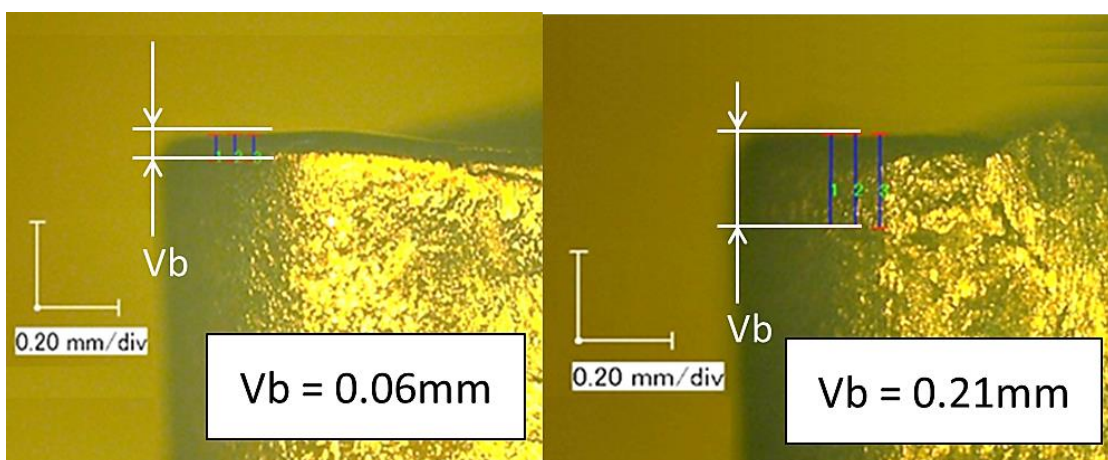
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูล que เก็บรวบรวมได้ขณะทำการทดลองประกอบด้วย ขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัด หรือ แฟรงค์แวร์ (Flank wear, V_b) และขนาดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด ณ ขนาดความลึกค่านั้นๆ โดยข้อมูลถูกสุ่มเก็บตั้งแต่เริ่มตัดชิ้นงานใหม่ๆ เม็ดมีดยังไม่สึกถึงค่ากำหนด ไปจนถึงตัดชิ้นงานจนเม็ดมีดสึกถึงค่ากำหนดแล้ว การสุ่มเก็บข้อมูลขนาดการสึกหรอและแรงตัดจะไม่ใช้เวลาเป็นตัวกำหนด เพราะอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีค่าไม่คงที่ อัตราการสึกหรอช้าหรือเร็ว นั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลา แต่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัดเป็นตัวกำหนด แรงตัดที่เกิดขึ้นตามขนาดการสึกหรอก็จะไม่สามารถใช้เวลาเป็นตัวกำหนดได้

3.3.3.1 ขนาดการสึกหรอของมีดตัด (Flank wear, V_b)

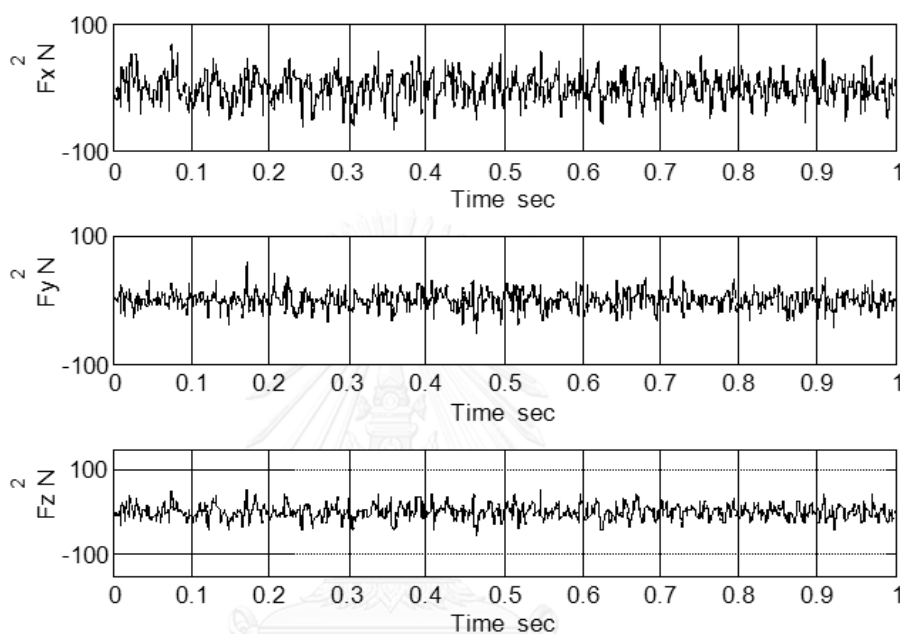
การสึกหรอด้านข้างคมตัดเกิดที่ผิวคายด้านข้างคมตัดของมีดตัดมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงสึกกินลงมาด้านข้างคมตัด ในการวัดจำเป็นต้องส่องดูด้วยกล้องขยายกำลังสูง (Microscope) วัดโดยลากเส้นตรงจากขอบด้านบนหน้าผิวคาย เพื่อหาความยาวเฉลี่ยของขนาดการสึกหรอ ดังรูปที่ 3.15 โดยปกติจะใช้เส้นขอบด้านบนของคมตัดเป็นระดับอ้างอิง (Datum) แต่หลังจากกลึงชิ้นงาน ระดับอ้างอิงของเส้นขอบคมตัดนี้จะหายไปเนื่องจากมีดตัดสึกหรอ การวัดโดยการลากเส้นจะต้องใช้เส้นขอบคมตัดที่ไม่สึกหรอเป็นระดับอ้างอิง เพื่อลดความแปรปรวนของการวัด และอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบทำให้ขนาดการสึกหรอที่เกิดขึ้นผิดจากตำแหน่งเดิมเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนจากการถอดและใส่มีดตัดเข้ากับด้ามมีดไม่ตรงตำแหน่ง ซึ่งได้กล่าวอธิบายในส่วนข้อเสนอนะของบทที่ 5



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการวัดขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดตัด

3.3.3.2 สัญญาณแรงตัด

สัญญาณแรงตัดที่บันทึกได้จากเครื่องวัดสัญญาณแรงตัดจะอยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกในโดเมนเวลา ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งประกอบด้วยแรงตัดแนวรัศมีพลวัต (Dynamic Radial Force, dFx) แรงป้อนตัดพลวัต (Dynamic Feed Force, dFy) และแรงตัดหลักพลวัต (Dynamic Main Force, dFz)

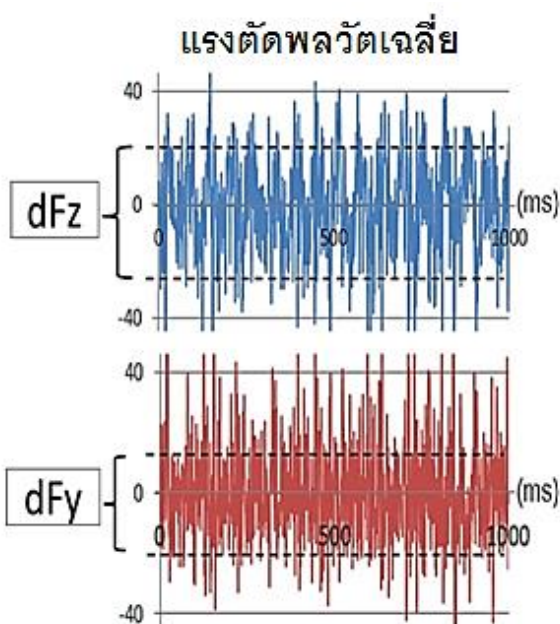


รูปที่ 3.16 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ที่ขนาดความลึกหราชอาณาจักรของมีดตัดเท่ากับ 0.20 มิลลิเมตร

อย่างไรก็ตามแรงตัดพลวัตที่เก็บมาได้ นั้น ยังอยู่ในหน่วยของโวลต์ (V) จึงมีจำเป็นต้องแปลงหน่วยสัญญาณจากหน่วยโวลต์ (V) เป็นหน่วยของนิวตัน (N) ตามค่าความไว (Sensitivity) ของเครื่องขยายสัญญาณ โดยสามารถแปลงได้ดังนี้

- ขนาดแรงตัดแนวรัศมีพลวัต dFx หน่วยนิวตัน (N) = V_x (Volt) x 600 (N/Volt)
- ขนาดแรงป้อนตัดพลวัต dFy หน่วยนิวตัน (N) = V_y (Volt) x 600 (N/Volt)
- ขนาดแรงตัดหลักพลวัต dFz หน่วยนิวตัน (N) = V_z (Volt) x 1,200 (N/Volt)

ในงานวิจัยนี้เหตุผลในการเลือกใช้แรงป้อนตัดพลวัต dF_y ในทิศการป้อน และแรงตัดหลักพลวัต dF_z ในทิศการหมุนของชิ้นงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัด ความแข็งวัสดุ หรือ ขนาดตามขนาดการสึกหรอ ในการทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) [3] โดยคำนวณหาขนาดแรงป้อนตัดพลวัต dF_y และ แรงตัดหลักพลวัต dF_z ทำได้โดยการหาขนาดค่าสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยแรงตัดในด้านบวกและค่าเฉลี่ยแรงตัดด้านลบ แสดงได้ดังตัวอย่างรูปที่ 3.17 ส่วนสาเหตุที่ไม่เลือกแรงตัดแนวรัศมีพลวัต dF_x เนื่องจากแรงตัดอยู่ในแนวรัศมีชิ้นงาน ซึ่งมีผลกระทบต่อ การสึกหรอ



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการคำนวณขนาดแรงตัดพลวัตเฉลี่ย dF_z และ dF_y

3.3.4 การออกแบบการทดลอง

จากการศึกษาระดับปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 3.2 ถูกเลือกมาสร้างตารางออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีผลกระทบร่วมจากสามปัจจัยตัวแปรต้น คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด ส่งผลให้เกิดตัวแปรตอบสนอง คือขนาดการสึกหรอ และแรงตัดที่เกิดขึ้น ทุกปัจจัยถูกรวบรวมไว้ในตารางการออกแบบการทดลองที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัยตัวแปรต้น	ระดับของปัจจัย	สัญลักษณ์
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	100, 150, 200	V
อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	0.15, 0.20, 0.25	F
ความลึกตัด (มม)	0.4, 0.6, 0.8	D

ตารางที่ 3.3 ตารางการออกแบบการทดลองของทุกเงื่อนไขการตัดทั้งหมด

เงื่อนไขการตัด	ความเร็วตัด (เมตร/นาที): V	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ): F	ความลึกตัด (มม): D	อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มม): Vb
1	100	0.15	0.4		
2	150	0.15	0.4		
3	200	0.15	0.4		
4	100	0.20	0.4		
5	150	0.20	0.4		
6	200	0.20	0.4		
7	100	0.25	0.4		
8	150	0.25	0.4		
9	200	0.25	0.4		
10	100	0.15	0.6		
11	150	0.15	0.6		
12	200	0.15	0.6		
13	100	0.20	0.6		
14	150	0.20	0.6		
15	200	0.20	0.6		
16	100	0.25	0.6		
17	150	0.25	0.6		
18	200	0.25	0.6		
19	100	0.15	0.8		

เงื่อนไขการตัด	ความเร็วตัด (เมตร/นาที): V	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ): F	ความลึกตัด (มม): D	อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มม): Vb
20	150	0.15	0.8		
21	200	0.15	0.8		
22	100	0.20	0.8		
23	150	0.20	0.8		
24	200	0.20	0.8		
25	100	0.25	0.8		
26	150	0.25	0.8		
27	200	0.25	0.8		

หมายเหตุ: ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือข้อมูลขนาดการสึกหรอของมีดตัดซึ่งถูกเก็บรวบรวมจาก 0.01 ถึง 0.2 มิลลิเมตรและขนาดแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) และแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอของมีดตัดในขณะนั้น โดยนำมาสร้างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตซึ่งรายละเอียดจะถูกกล่าวต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.4.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล [33]

ข้อมูลที่ได้รับรวบรวมมาถูกออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์โดยโปรแกรมทางสถิติชื่อ มินิแท็บ (Minitab) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ เพราะมีรูปแบบการใช้งานที่เข้าใจง่ายและสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้ดี

3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางการออกแบบการทดลอง [33]

จากตารางการออกแบบการทดลองทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่มีผลต่อปัจจัยตัวแปรตอบสนองในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมสถิติคำนวณค่า P-Value ซึ่งเป็นระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุดที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลักซึ่งกล่าวได้ว่า ปัจจัยตัวนั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยทำการเปรียบเทียบค่า P-Value ของทุกปัจจัยกับระดับนัยสำคัญหรือ α ถ้าค่า P-

Valueของปัจจัยตัวนั้นมีค่าน้อยกว่า α แสดงว่าสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยตัวตัวนั้นมีผลต่อตัวแปรผลตอบสนอง โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระดับนัยสำคัญหรือ α เท่ากับ 0.05

3.4.3 การตรวจสอบความเพียงพอของเพื่อสร้างแบบจำลองสมการทำนาย ขนาดเล็กหรือของมีดัด (Model adequacy checking) [33]

ผลข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวมมาไว้ในของตารางการออกแบบผลการทดลอง จะต้องผ่านการทดสอบ ตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง จึงจะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้อย่าง สมบูรณ์ โดยจะต้องผ่านการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้างของข้อมูล (Residual) คือ การ ทดสอบแจกแจงแบบปกติ การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการทดสอบความมี เสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

3.4.3.1 การทดสอบการกระจายตัวข้อมูลแบบแจกแจงปกติ

เป็นการตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับ ค่าความน่าจะเป็นสะสม นำมาสร้างกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normality plot)ของค่าส่วน ตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็น ค่าส่วนตกค้าง แล้วพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล การกระจายตัวควรอยู่ตามเส้นตรง หรือ แนวโน้มเป็นเส้นตรง ข้อมูลจึงมีการกระจายตัวแบบปกติ

3.4.3.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ เป็นการทดลองสุ่มที่เหมาะสม เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่า ส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แต่ละค่าส่วนตกค้าง ต้องเป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้มั่นใจได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระ และน่าเชื่อถือ หากข้อมูลมีความ เป็นอิสระต่อกันแล้ว กราฟความสัมพันธ์จะมีการกระจายตัวไม่เกิดเป็นแนวโน้ม นั่นก็คือข้อมูลมี ความเหมาะที่จะนำไปใช้ต่อไป

3.4.3.3 การทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนของข้อมูลที่เกิดขึ้นมา เพื่อให้มั่นใจได้ว่า ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ โดยสร้างกราฟการกระจายของส่วนตกค้าง (Residual) ในแกนตั้ง กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในแกนนอน การกระจายไม่ควรมีลักษณะเป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบตรง หรือกรวยปากเปิด จึงจะถือว่ามีความเสถียรภาพของความแปรปรวน และข้อมูลจะมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอและไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใดๆ ถ้าลักษณะกราฟที่ได้มีลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลง แสดงว่าข้อมูลที่เกิดขึ้นนั้นไม่มีความเสถียรภาพของความแปรปรวน



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตารางการออกแบบการทดลองที่ 3.3 แบบแฟคทอเรียลแบบสามระดับ ข้อมูลผลการทดลองได้ถูกที่เก็บรวบรวมมาเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่มีต่อปัจจัยตัวแปรผลตอบสนอง ปัจจัยตัวแปรต้นคือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต ส่วนปัจจัยตัวแปรผลตอบสนอง คือ ขนาดการสึกหรอของมีดตัด (Flank wear, V_b) และเพื่อใช้ในการสร้างสมการแบบจำลองทางสถิติ เพื่อพัฒนาสมการทำนายขนาดความสึกหรอของมีดมีดตัดในขณะตัดชิ้นงานจากเงื่อนไขต่างๆ ดังที่กล่าวมา ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลอง สร้างสมการแบบจำลองสถิติทำนายขนาดการสึกหรอ และทดสอบสมการเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการทำนายที่สร้างขึ้น

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองคือกราฟความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของมีดมีดกลึง และอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆจากตารางการออกแบบการทดลองที่ 3.3 ข้อมูลจากการทดลอง ได้ถูกเก็บรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก ภาคผนวกข และภาคผนวก ค เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอของมีดมีดตัดต่อไป

แรงตัดที่เกิดจากการทดลองตัดชิ้นงานประกอบไปด้วยแรงป้อนตัด (F_y) ซึ่งมีองค์ประกอบคือแรงป้อนตัดพลวัตในแนวทิศการป้อนตัด (dF_y) แรงตัดหลัก (F_z) ในทิศความเร็วตัด ซึ่งมีแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) เป็นองค์ประกอบ และแรงตัดในแนวทศรัศมีชิ้นงาน (F_x) ซึ่งมีแรงตัดแนวรัศมีพลวัตเป็นองค์ประกอบ (dF_x) โดยทุกแรงถูกคำนวณ อ้างอิงได้จากตัวอย่าง รูปที่ 3.13 และ 3.16 ของบทที่ 3

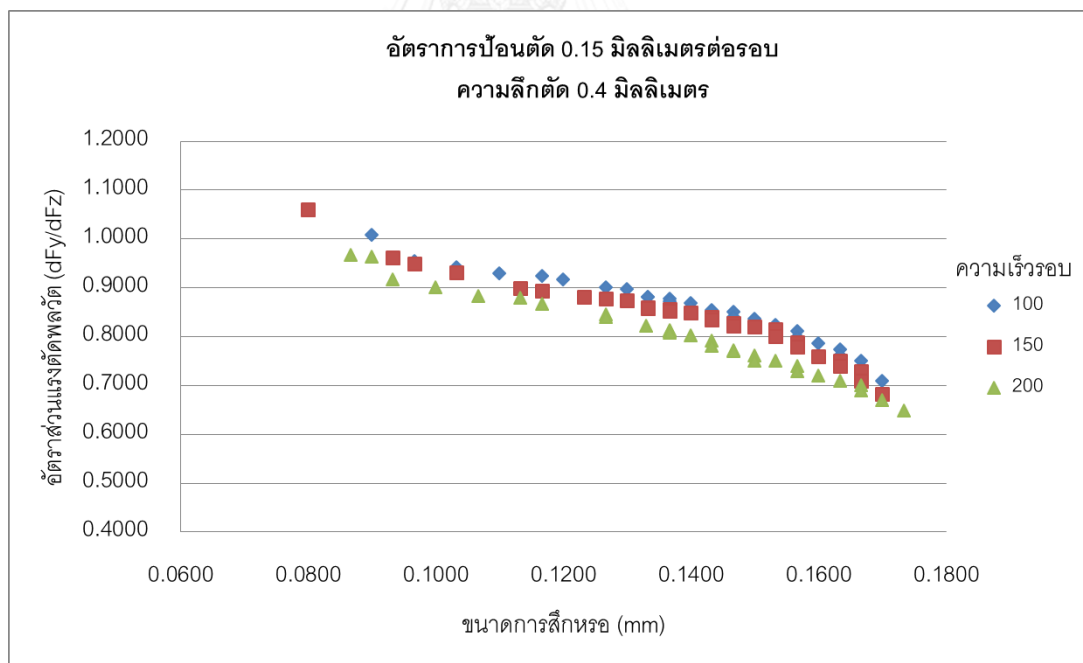
โดยทั่วไปขนาดการสึกหรอของมีดมีดตัดส่งผลต่อขนาดแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วแรงตัดจะเพิ่มมากขึ้นหากเพิ่มค่าอัตราการป้อนตัดและค่าความลึกตัดในการตัด [3] เมื่อมีดมีดเกิดการสึกหรอ พื้นที่สัมผัสระหว่างคมมีดและชิ้นงานมีขนาดใหญ่มากขึ้นซึ่งทำให้การตัดชิ้นงานทำได้ยากขึ้น มีแนวโน้มเกิดการสั่นสะเทือน จะทำให้ผิวชิ้นงานขรุขระ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแรงป้อนตัดในทิศอัตราการป้อนตัดส่งผลต่อค่าความขรุขระของชิ้นงาน ด้วยเหตุผลนี้ แรงป้อนตัดพลวัตในทิศการป้อนตัด (dF_y) จึงมีผลกระทบต่อขนาดการสึกหรอของมีดมีดตัด และแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ในทิศทางความเร็วตัด ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุชิ้นงาน เงื่อนไขการตัดต่างๆ

ขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดตัดและความสั่นสะเทือน (Chatter) ดังนั้น แรงตัดพลวัตถูกเลือกใช้ในการทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัตคือ dF_y/dF_z ถูกเลือกมาทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัตเพื่อกำจัดอิทธิพลต่างๆออกไป แรงตัดแนวรัศมีพลวัต (dF_x) ถูกไม่ถูกนำมาทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัตเนื่องจากมีผลกระทบน้อยต่อขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดตัด [8]

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด กับขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดตัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

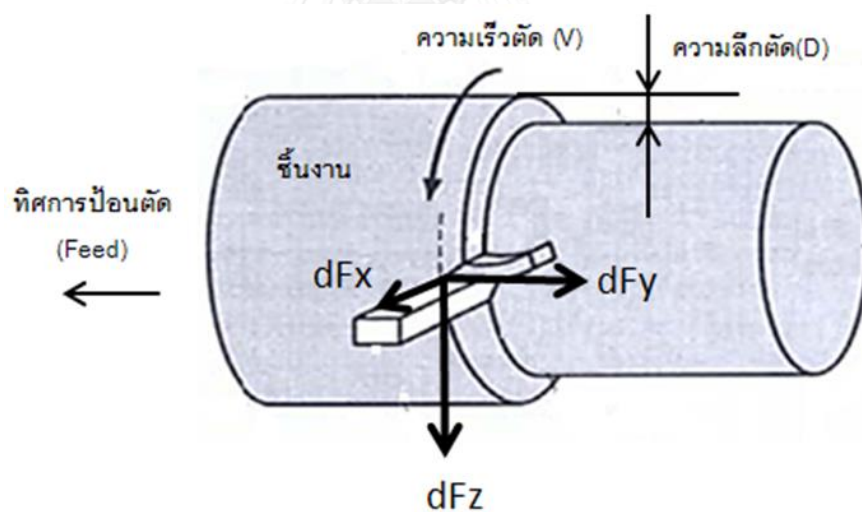
นำข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมมาทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น ณ เงื่อนไขการตัดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป

4.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดการสีกหรือเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวที่ความเร็วตัดเปลี่ยนแปลง

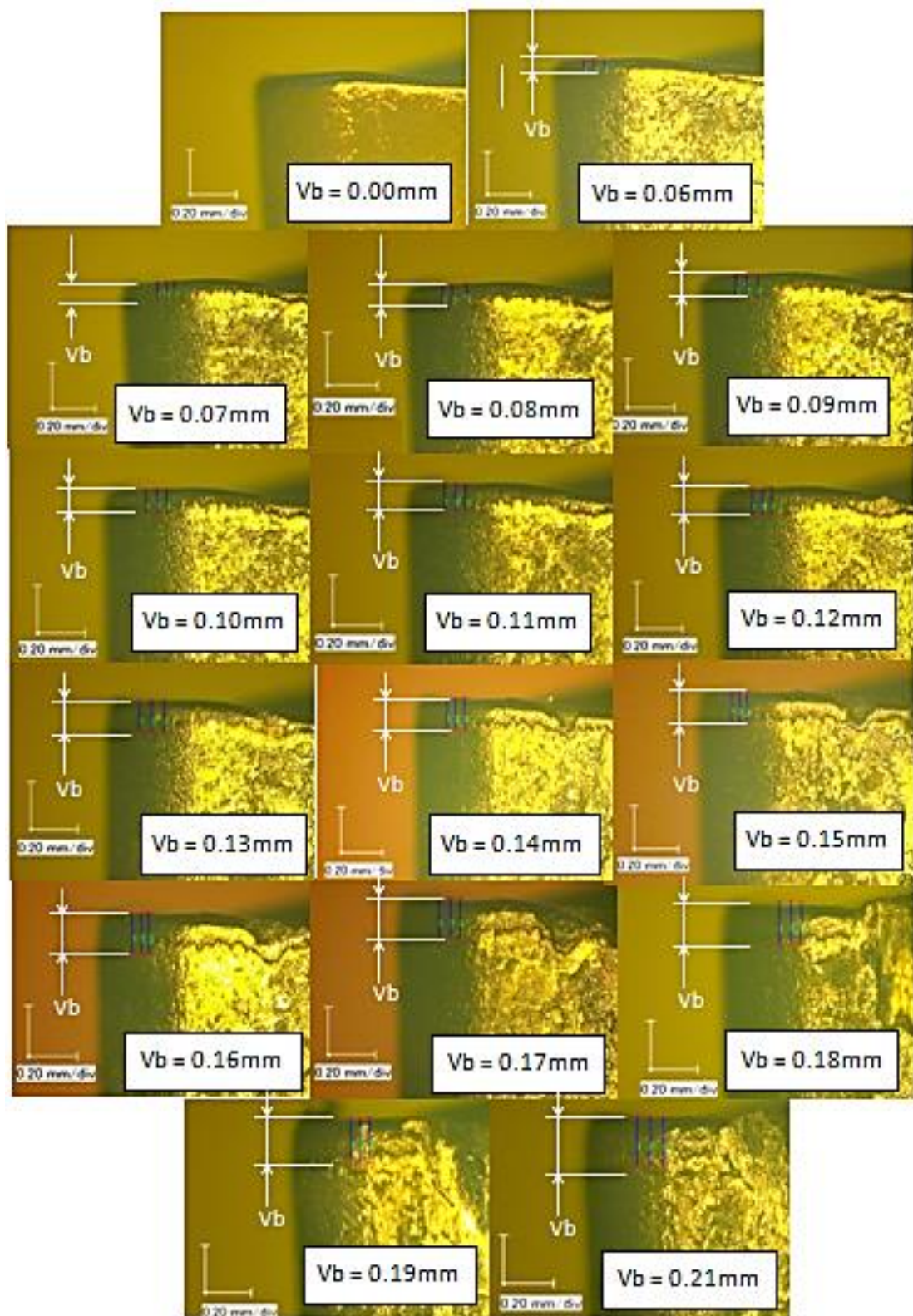


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงตัด โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดต่างๆให้คงที่ เช่น อัตราการป้อนตัดและความลึกตัด แต่เปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด จะพบว่าเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีค่าน้อย จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง (dF_y/dF_z) แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตต่ำ โดยอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นทุกๆความเร็วรอบตัด เนื่องจากแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีทิศทางการหมุนในทางเดียวกับชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.2 เมื่อความเร็วตัดมากขึ้น ทำให้มีดตัดสึกหรอมากขึ้น จึงส่งผลทำให้แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีขนาดมากขึ้น เมื่อเทียบกับแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีขนาดลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อมีดตัดมีขนาดการสึกหรอมากขึ้น รัศมีจุมกมีดจะใหญ่ขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานมากขึ้น ทำให้ตัดชิ้นงานได้ยาก เกิดการสั่นสะเทือนสูง ส่งผลให้แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีขนาดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลง เช่นเดียวกับกับการเพิ่มความเร็วดัด ดังที่กล่าวไปแล้ว



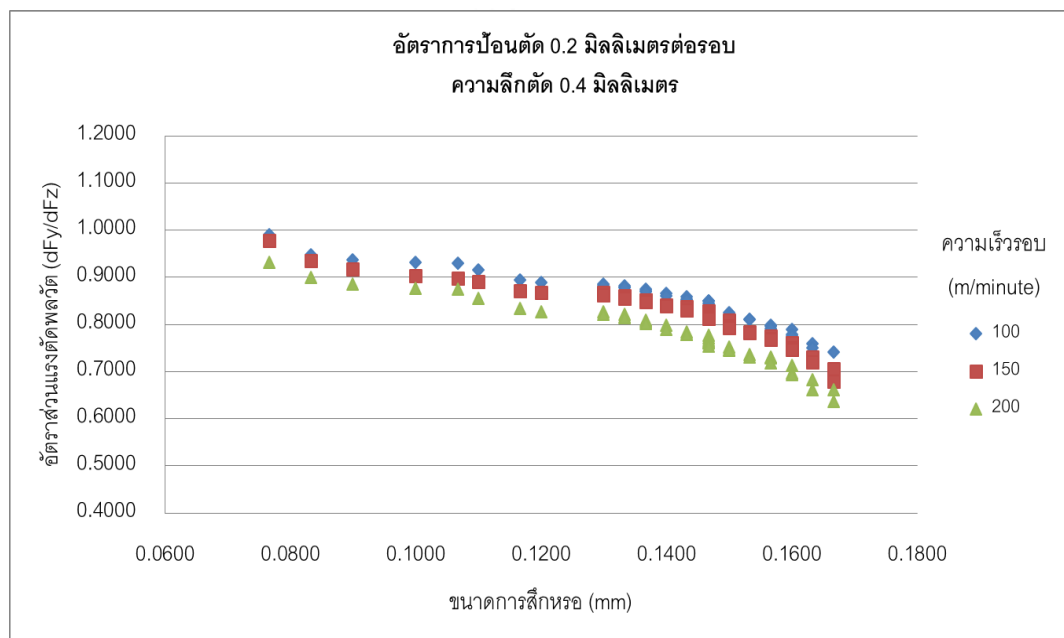
รูปที่ 4.2 ทิศของแรงตัดพลวัตสัมพันธ์กับทิศการหมุนของชิ้นงาน



รูปที่ 4.3 ภาพขนาดการสีกหรือด้านข้างความตัดของเม็ดมีดกลึงที่ขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าลักษณะการสึกหรอเป็นแนวยาวหรือแฟรงแวร์ (Flank wear, Vb) ที่ผิวด้านผิวคาย (Relief face) ของเม็ดมีดกลึงเกิดจากการเสียดสีระหว่างเนื้อชิ้นงานกับตัวเป็นเศษโลหะที่หน้าคมเม็ดมีดกลึง ความกว้างของขนาดการสึกหรอจะเท่ากับระดับความลึกตัด (Depth of cut) ขนาดการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและเม็ดตัดมากขึ้น ทำให้ตัดชิ้นงานได้ยากและเกิดสนิมสะท้อนสูง ทำให้แรงตัดสูงขึ้นไปตาม ดังที่กล่าวไปแล้ว

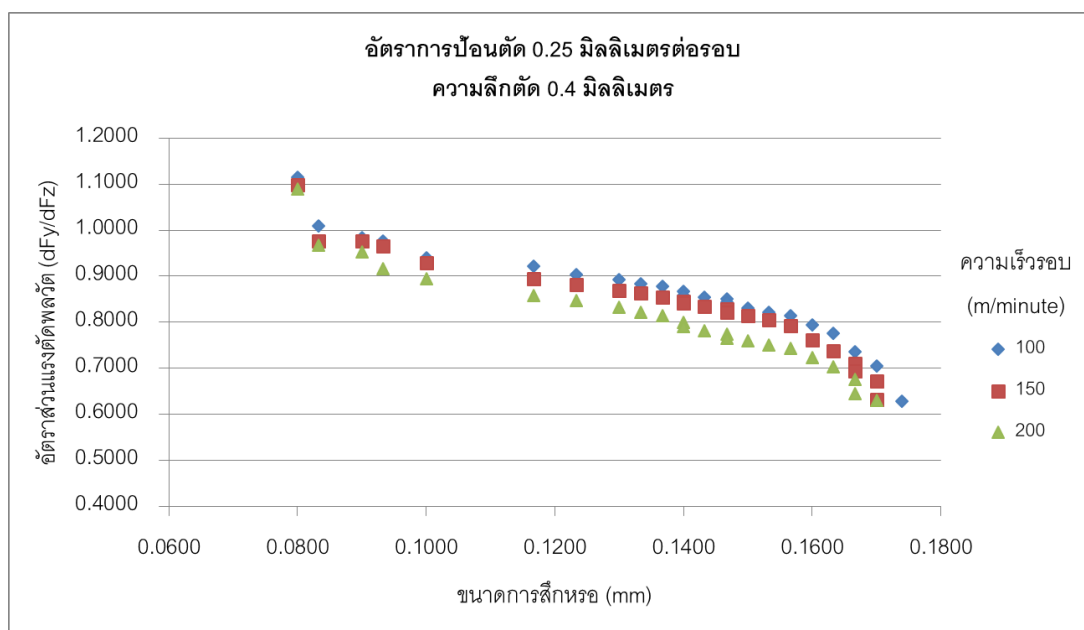
ดังนั้น จากผลการทดลองอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นในทุกความเร็วตัดแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขความเร็วตัดที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีค่าต่ำ จะให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่สูง แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตต่ำ เมื่อขนาดความสึกหรอมีค่าเท่ากันแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) จะมีค่าคงที่จากอัตราการป้อนตัด (Feed rate) ที่คงที่ แต่เมื่อใช้ความเร็วตัดมากเม็ดตัดเกิดความสึกหรอมากขึ้น แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีค่าสูงมากขึ้น จะทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ลดลง เมื่อขนาดการสึกหรอมัดตัดมีมากขึ้น รัศมีจุมกมีดจะบานมากขึ้น พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดตัดกับชิ้นงานจะมีมากขึ้น ทำให้ตัดชิ้นงานได้ยาก

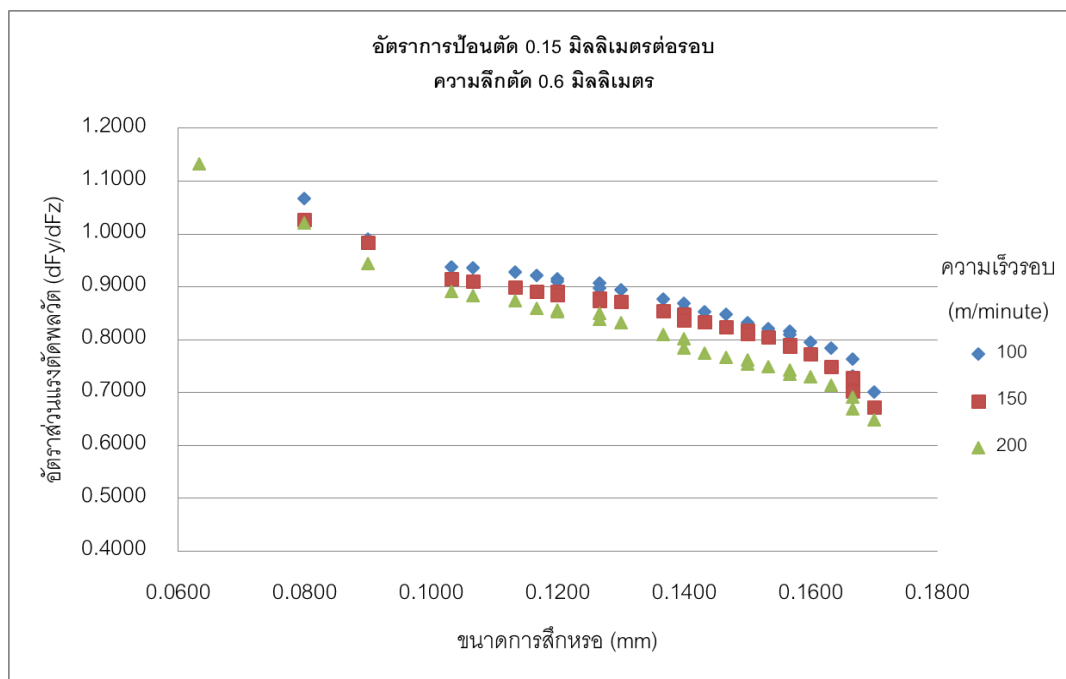
เกิดสั่นสะเทือนสูง ส่งผลให้แรงตัดหลักพลวัต dF_z มีขนาดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแรงป้อนตัดพลวัต dF_y จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีค่าลดลงด้วย จากกราฟความสัมพันธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงในทุกความเร็วตัดเมื่อขนาดการสึกหรอมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วตัดไม่ได้ส่งผลต่อแนวโน้มของกราฟ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ โดยกราฟยังมีแนวโน้มลดลงเช่นเดิม



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

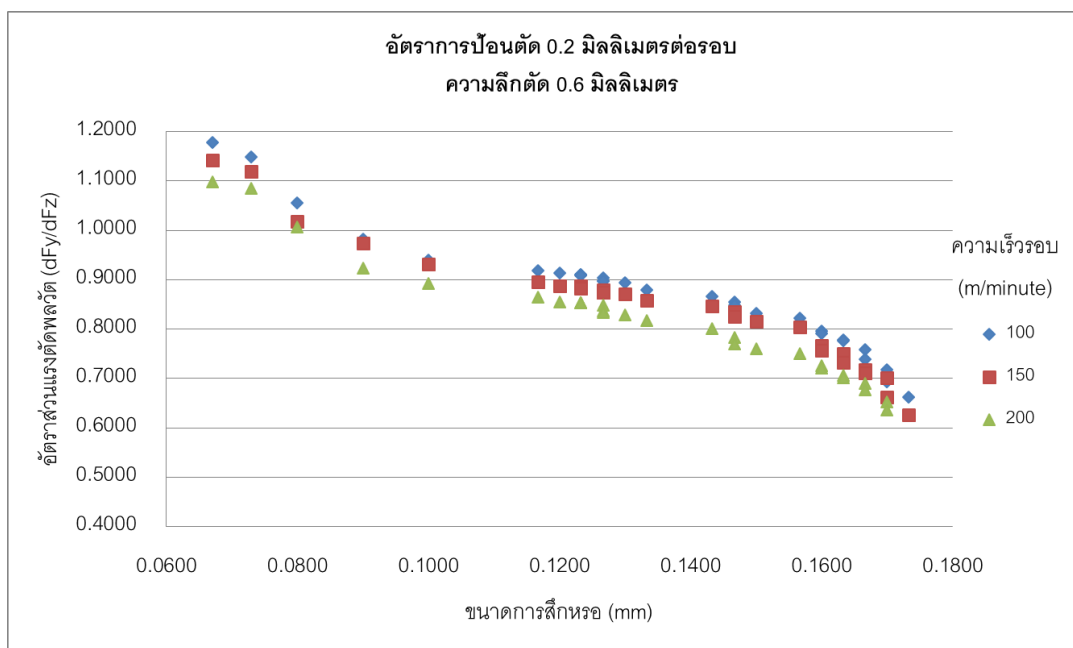
จากรูปที่ 4.5 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) และขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิมเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นในทุกค่าความเร็วตัด ในขณะที่เริ่มตัดขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดถึงมีค่าต่ำจะให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) สูง และเมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขความเร็วตัดที่เปลี่ยนแปลงไปและเมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความสึกหรอค่าเดียวกัน แรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) มีค่าคงที่ จากอัตราการป้อนตัด (Feed rate) ค่าคงที่ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) จากการตัดชิ้นงานที่ความเร็วตัดสูง มีค่าขนาดต่ำกว่าการตัดชิ้นงานที่ความเร็วตัดต่ำ เป็นเพราะแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีทิศทางการหมุนในทางเดียวกับชิ้นงาน เมื่อ

ความเร็วตัดมากขึ้นแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีขนาดมากขึ้น เมื่อเทียบกับแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ส่งผลทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) มีขนาดลดลงตาม



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

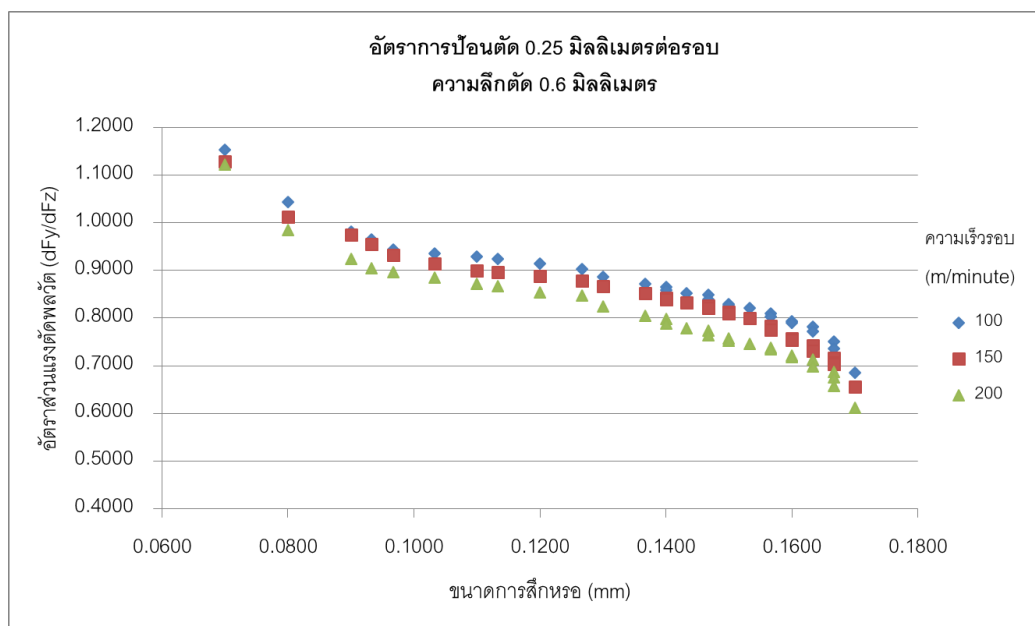
จากรูปที่ 4.6 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม เมื่อขนาดความลึกหรอมีค่าเท่ากัน แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ซึ่งมีขนาดคงที่ด้วยอัตราการป้อนตัด (Feed rate) ที่คงที่ แรงตัดที่ความเร็วตัดสูงแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเพราะอยู่ในทิศการหมุนของชิ้นงาน จะทำให้มีอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับการตัดชิ้นงานด้วยความเร็วตัดต่ำ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดถึงมีขนาดมากขึ้น รัศมีจุมูกมีดบ้านมากขึ้น พื้นที่สัมผัสของมีดตัดและชิ้นงานมีมากขึ้น ทำให้ตัดชิ้นงานได้ยาก เกิดสิ้นสะเกเทือน แรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีขนาดมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ลดลงกราฟจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ในทุกๆความเร็วตัด แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัด ไม่ได้ส่งผลทำให้กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตาม



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิมในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัด แสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ได้ทำให้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตาม อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง คือ รัศมีจุมูกมีดที่ป้านมากขึ้นจากการสึกหรอ พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและคมมีดตัดมีมากขึ้น ส่งผลให้แรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีขนาดมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) มีค่าลดลง ดังที่กล่าวไว้แล้ว

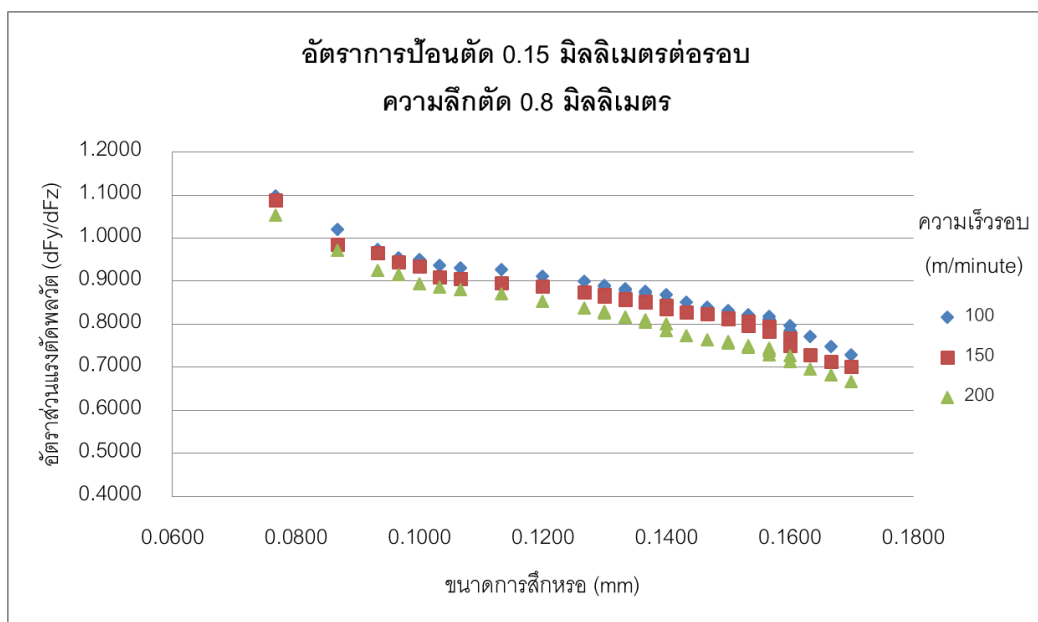
เมื่อทำการวิเคราะห์มีดตัดที่มีขนาดความลึกหรอเท่ากัน แรงตัดที่ความเร็วตัดสูงแรงตัดหลักพลวัต (Fz) มีค่าสูง เพราะแรงตัดหลักมีทิศทางเดียวกับความเร็วตัด ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) มีค่าลดลงในขณะที่การตัดที่ความเร็วตัดต่ำแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีค่าไม่มากกว่าเรื่องป้อนตัดพลวัต (dFy) มากนัก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีขนาดสูง เมื่อแรงป้อนตัดพลวัตมีค่าคงที่ (dFy) จากอัตราการป้อนตัด (Feed rate) ที่คงที่



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตร/รอบความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

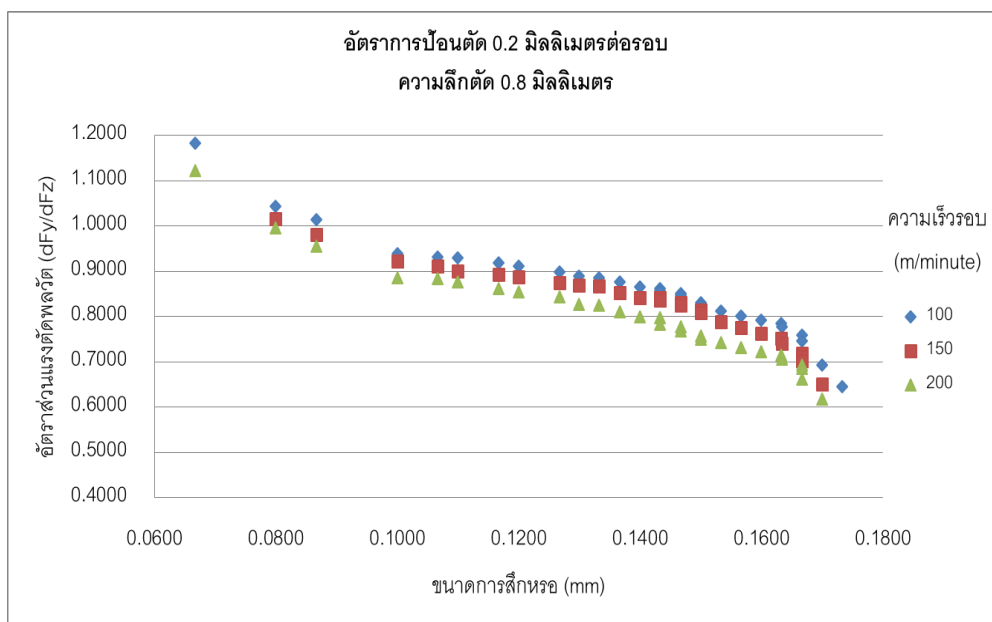
จากรูปที่ 4.8 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) และขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเหมือนเดิมเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้น ในเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงทุกความเร็วตัด ในขณะที่เริ่มตัดขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีค่าต่ำ จะให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) สูง และเมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้น รัศมีจุ่มกมิตมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีขนาดมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีขนาดลดลง แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขความเร็วตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

และเมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความสึกหรอค่าเดียวกัน แรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) มีค่าคงที่ จากอัตราการป้อนตัด (Feed rate) ค่าคงที่ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) จากการตัดชิ้นงานที่ความเร็วตัดสูง มีค่าขนาดต่ำกว่าการตัดชิ้นงานที่ความเร็วตัดต่ำ เป็นเพราะแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีทิศทางการหมุนในทางเดียวกับชิ้นงาน เมื่อความเร็วตัดมากขึ้นแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีขนาดมากขึ้น เมื่อเทียบกับแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีขนาดลดลงตาม



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

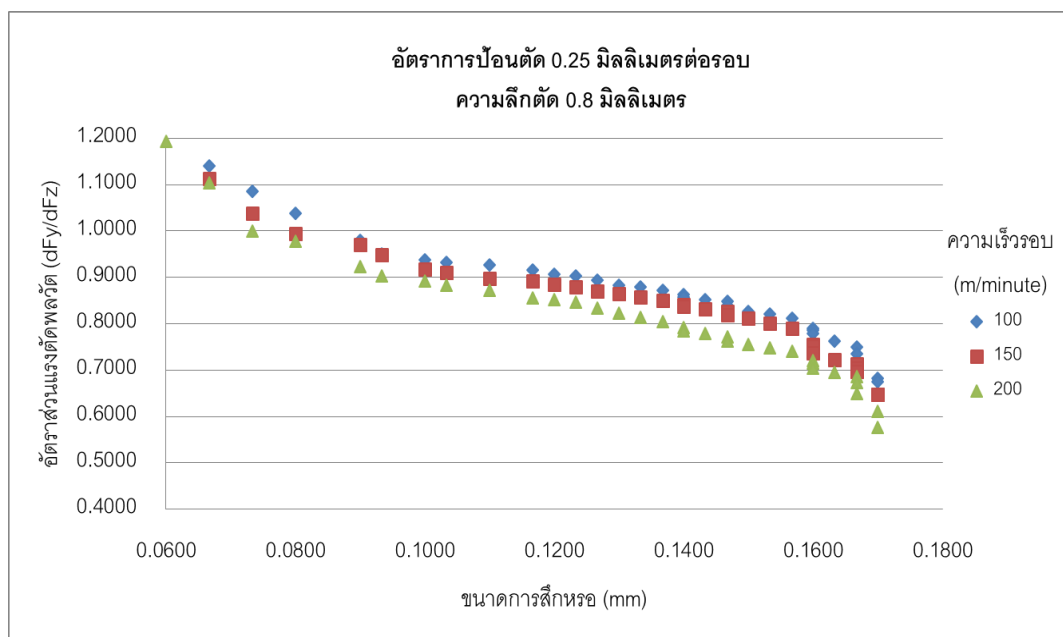
จากรูปที่ 4.9 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสีกหรือยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมีผลต่ออัตราส่วนแรงตัดพลวัต โดยพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสีกหรือยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม เมื่อขนาดความลึกหรมีค่าเท่ากัน แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ซึ่งมีขนาดคงที่ด้วยอัตราการป้อนตัด (Feed rate) ที่คงที่ แรงตัดที่ความเร็วตัดสูงแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเพราะอยู่ในทิศการหมุนของชิ้นงาน จะทำให้มีอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับการตัดชิ้นงานด้วยความเร็วตัดต่ำ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดกลึงมีขนาดมากขึ้น รัศมีจุมกมีดบ้านมากขึ้น พื้นที่สัมผัสของมีดตัดและชิ้นงานมีมากขึ้น ทำให้ตัดชิ้นงานได้ยาก เกิดสั่นสะเทือน แรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีขนาดมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ลดลง กราฟจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ในทุกๆ ความเร็วตัด แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงความเร็วตัด ไม่ได้ส่งผลทำให้กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสีกหรือไม่ได้แปรเปลี่ยนตาม



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม ในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัด แสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ได้ทำให้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตาม อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง คือ รัศมีจุมูกมีดที่ป้านมากขึ้นจากการสึกหรอ พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและคมมีดตัดมีมากขึ้น ส่งผลให้แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีขนาดมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีค่าลดลง ดังที่กล่าวไว้แล้ว

เมื่อทำการวิเคราะห์หิมิตตัดที่มีขนาดความลึกหกรอเท่ากัน แรงตัดที่ความเร็วตัดสูงแรงตัดหลักพลวัต (F_z) มีค่าสูง เพราะแรงตัดหลักมีทิศเดียวกับความเร็วตัด ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีค่าลดลง ในขณะที่การตัดที่ความเร็วตัดต่ำแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีค่าไม่มากกว่าเรื่องป้อนตัดพลวัต (dF_y) มากนัก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีขนาดสูง เมื่อแรงป้อนตัดพลวัตมีค่าคงที่ (dF_y) จากอัตราการป้อนตัด (Feed rate) ที่คงที่

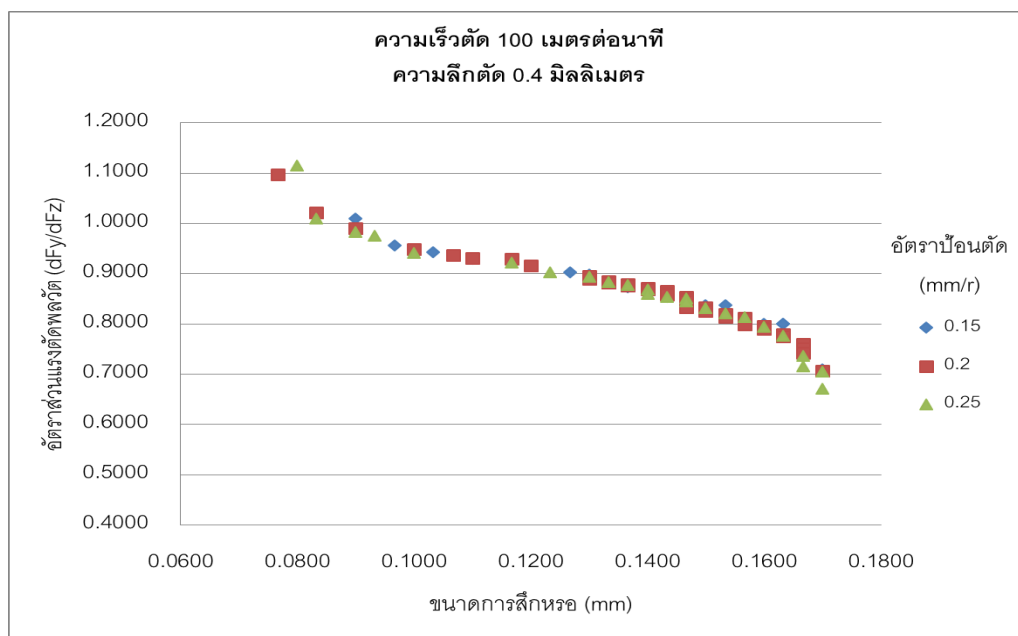


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสีกหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนของแรงตัด (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตร/รอบความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตรที่ความเร็วตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดมีค่าต่ำ จะให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่สูง แต่เมื่อขนาดการสีกหรือสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตต่ำ เมื่อขนาดความลึกหรือมีค่าเท่ากัน แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) จะมีค่าคงที่จากอัตราการป้อนตัด (Feed rate) ที่คงที่ แต่เมื่อใช้ความเร็วตัดมาก มีดตัดเกิดความสึกหรอมากขึ้น แรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีค่าสูงมากขึ้น จะทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ลดลง เมื่อขนาดการสีกหรือมีค่ามากขึ้น วัสดุมีจุ่มมีดจะป้านมากขึ้น พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานจะมีมากขึ้น ทำให้ตัดชิ้นงานได้ยาก เกิดสนิมสะท้อนสูง ส่งผลให้แรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีขนาดสูงขึ้น เมื่อเทียบกับแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) มีค่าลดลงด้วย

จากกราฟความสัมพันธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงในทุกความเร็วตัดเมื่อขนาดการสีกหรือมีค่ามากขึ้น การเปลี่ยนแปลงความเร็วตัดไม่ได้ส่งผลต่อแนวโน้มของกราฟ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสีกหรือไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขความเร็วตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

4.2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดการสึกหรอเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวที่อัตราการป้อนตัดเปลี่ยนแปลง



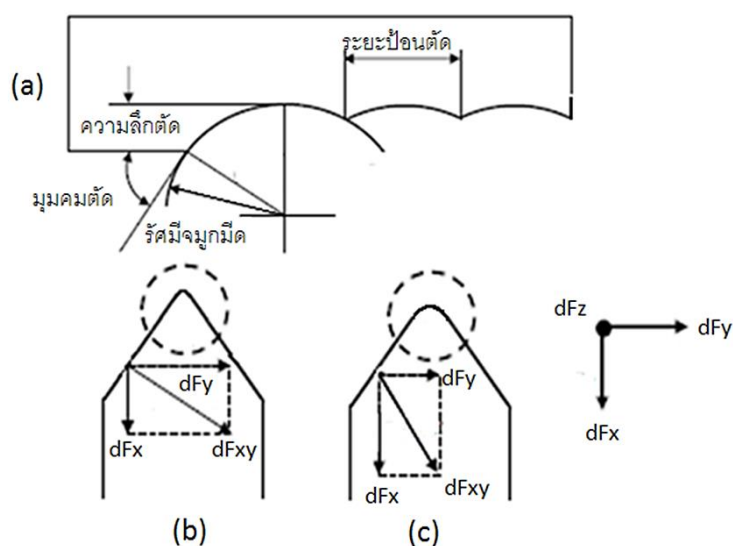
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดมีค่าน้อย จะให้ค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่สูง แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตตัดมีค่าต่ำ โดยอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเมื่อมีขนาดการสึกหรอมากขึ้นทุกๆ อัตราการป้อนตัด

อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดความสึกหรอเท่ากัน ค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจากการป้อนด้วยอัตราการป้อนตัดมาก จะมีขนาดอัตราส่วนแรงตัดพลวัตน้อยกว่าการป้อนตัดด้วยอัตราการป้อนตัดน้อย เนื่องจากการป้อนมีดตัดด้วยอัตราการป้อนตัดมาก มีดตัดมีขนาดสึกหรอสูงขึ้น พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและเม็ดตัดมีมากขึ้น ทำให้การตัดชิ้นงานยากขึ้นแนวโน้มเกิดการสั่นสะเทือนสูงผิวชิ้นงานมีรอยขรุขระมากจากการป้อนตัดด้วยอัตราการป้อนตัดมาก แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่าสูงกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่เกิดขึ้น ทำให้ค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลงแต่เมื่อตัดใช้อัตราการป้อนตัดน้อย แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่าน้อย ผิวชิ้นงานเรียบดี

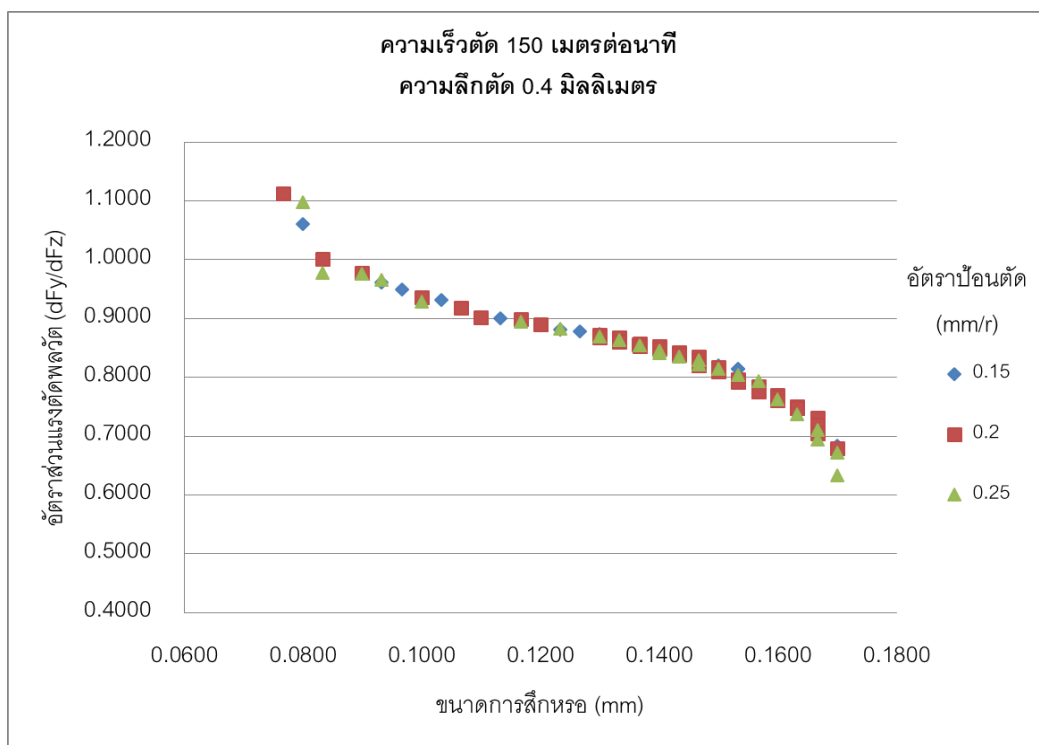
ขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ไม่ได้ขนาดสูงกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) มากจึงทำให้มีค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมากขึ้น

อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง คือ ขนาดของรัศมีจุมุกมีด ดังที่กล่าวไปแล้ว มีดตัดมีรัศมีจุมุกมีดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการสึกหรอ พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและ มีดตัดมีมากเมื่อเทียบกับมีดตัดที่มีรัศมีจุมุกมีดขนาดเล็ก จึงทำให้แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ซึ่งตรงข้ามกับการตัดโดยใช้รัศมีจุมุกมีดเล็กๆ หรือในขณะตัดด้วยมีดตัดที่ยังไม่สึกหรอซึ่งจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตค่าสูงดังแสดงในรูป 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดรัศมีจุมุกมีดและแรงตัดพลวัต [29]

จากรูป 4.13 การป้อนด้วยอัตราการป้อนตัดมาก มีดสั้นสะเทือน สึกหรอมากขึ้น แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มีขนาดมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ในขณะที่รัศมีจุมุกมีดมีขนาดใหญ่มากขึ้นจากการสึกหรอในรูปที่ 4.13 (c) ซึ่งเป็นผลให้แรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ลดลง ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ลดลงซึ่งตรงข้ามกับรูป 4.13 (b) แรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) จะมีค่ามากกว่ารัศมีจุมุกมีดขนาดเล็กในขณะที่มีดมีดยังไม่สึกหรอมากอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจึงมีค่าสูงดังนั้นเมื่อขนาดการสึกหรอของมีดมีดกลิ้งมีขนาดมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะยังมีแนวโน้มลดลงในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการป้อนตัด แสดงให้เห็นว่าการเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัดไม่ทำให้แนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอแปรเปลี่ยนตาม

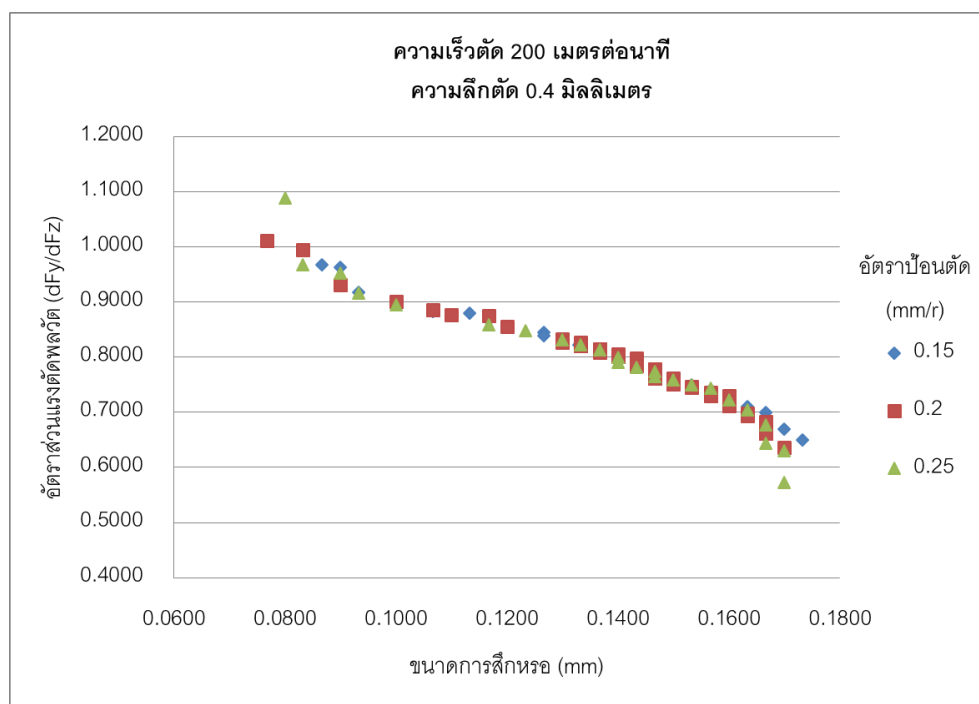


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดคิ่งน้อยอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามาก แรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีค่าน้อย ผิวชิ้นงานเรียบดี ขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ไม่สูงกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูงอย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตตัดมีค่าลดลง เนื่องจากมีดสึกหรอ พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและเม็ดมีดมีมากขึ้น ทำให้การตัดชิ้นงานยากขึ้นแนวโน้มเกิดสันสะเทือนสูงผิวชิ้นงานไม่ดี มีรอยขรุขระมากจากการป้อนตัดด้วยอัตราการป้อนตัดมากแรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีค่าสูงกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่เกิดขึ้น ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง

จากกราฟความสัมพันธ์ ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดคิ่งมีขนาดใหญ่มากขึ้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันในทุกๆการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด แสดงให้เห็นว่าการเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการป้อนตัดต่างกันโดยคงที่

ความเร็วตัดและความลึกตัด ไม่ทำให้แนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอแปรเปลี่ยนตาม

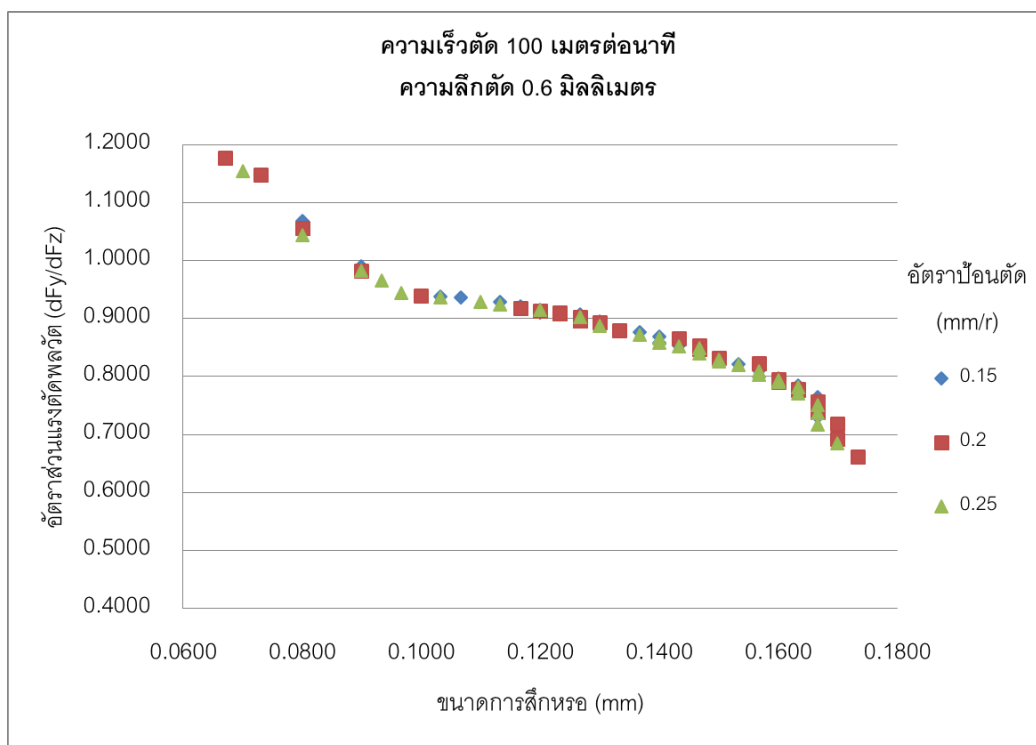


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) จะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้น ในทุกๆอัตราการป้อนตัด ในขณะที่เริ่มขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดถึงขนาดเล็ก จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด ไม่ทำให้รูปกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอแปรเปลี่ยนตาม

เมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความสึกหรอค่าเดียวกันจากอัตราการป้อนเม็ดมีดตัดค่าสูง มีดตัดสึกหรอไว เกิดแนวโน้มสั้นสะเทือนของมีดตัดแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีค่ามากขึ้น มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) จึงทำให้เกิดอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแรงตัดที่อัตราการป้อนตัดรอบน้อยเม็ดมีดตัดไม่สะเทือนซึ่งแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีค่าน้อย ไม่มากไปกว่าแรง

ป้อนตัดพลวัต (dFy) มากนัก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามาก จากกราฟความสัมพันธ์ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตาม เงื่อนไขการตัดนี้

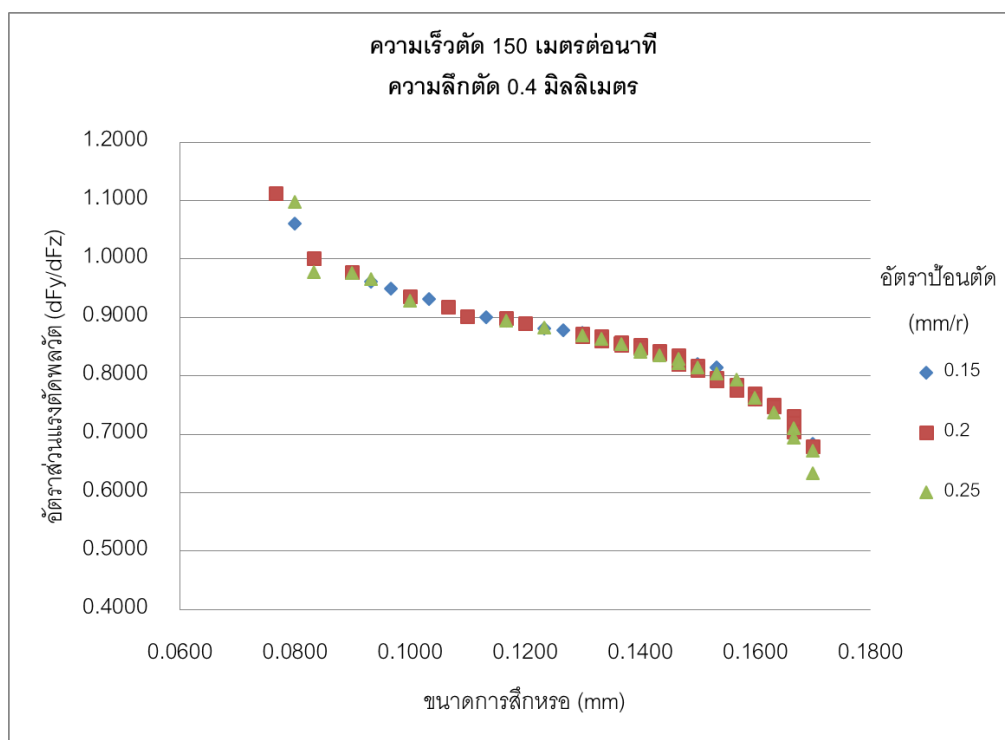


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตร ต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.16 พบว่าความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาด การสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม ในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลง อัตราการป้อนตัด เมื่อเริ่มตัดขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดถึงมีค่าน้อย จะมีอัตราส่วนแรงตัด พลวัตสูง เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง

เมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความสึกหรอค่าเดียวกัน อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจากอัตราการ ป้อนเม็ดมีดตัดสูง มีดตัดสึกหรอไว รัศมีจุมูกมีดที่ใหญ่มากขึ้น เกิดรอยจากการป้อนตัด เกิด แนวโน้มมันส์สะท้อนของมีดตัด แรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีจึงค่ามากขึ้น มากกว่าแรงป้อนตัด พลวัต (dFy) จึงทำให้เกิดอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง

เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีขนาดมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะยังมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันในทุกๆ การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด แสดงให้เห็นว่าภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด โดยคงที่ความเร็วตัดและความลึกตัด ไม่ทำให้แนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอแปรเปลี่ยนตาม

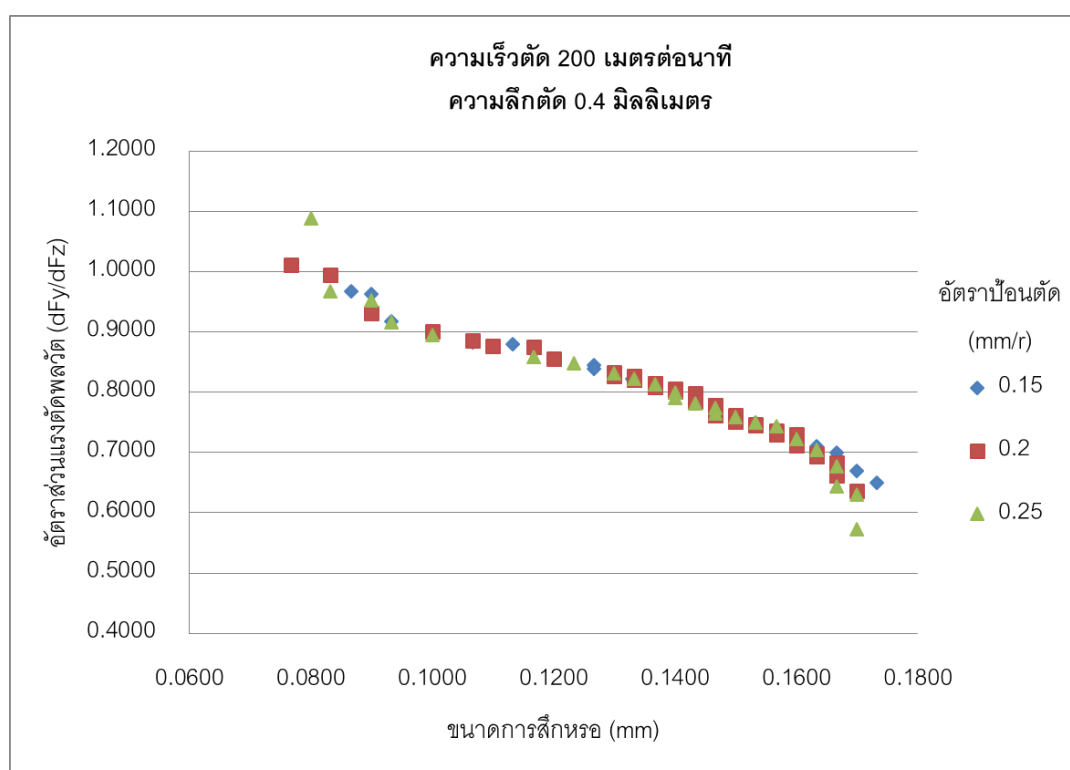


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.17 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนตัด เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีค่าน้อย อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าสูง แรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีค่าน้อย ผิวชิ้นงานเรียบดี ขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ไม่สูงกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นอัตราส่วนแรงตัดพลวัตตัดมีค่าลดลง เนื่องจากมีดสึกหรอ พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและมีดตัดมีมากขึ้น ทำให้การตัดชิ้นงานยากขึ้น แนวโน้มเกิดสั่นสะเทือนสูง ผิวชิ้นงานไม่ดี มีรอยขรุขระ

มากจากการบั่นตัดด้วยอัตราการบั่นตัดมากแรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีค่าสูงกว่าแรงบั่นตัดพลวัต (dFy) ที่เกิดขึ้น ทำให้ค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง

จากกราฟความสัมพันธ์ ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีขนาดใหญ่มากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันในทุกๆการเปลี่ยนแปลงอัตราการบั่นตัด แสดงให้เห็นว่าการเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการบั่นตัดต่างกัน โดยคงที่ ความเร็วตัดและความลึกตัด ไม่ทำให้แนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอแปรเปลี่ยนตาม

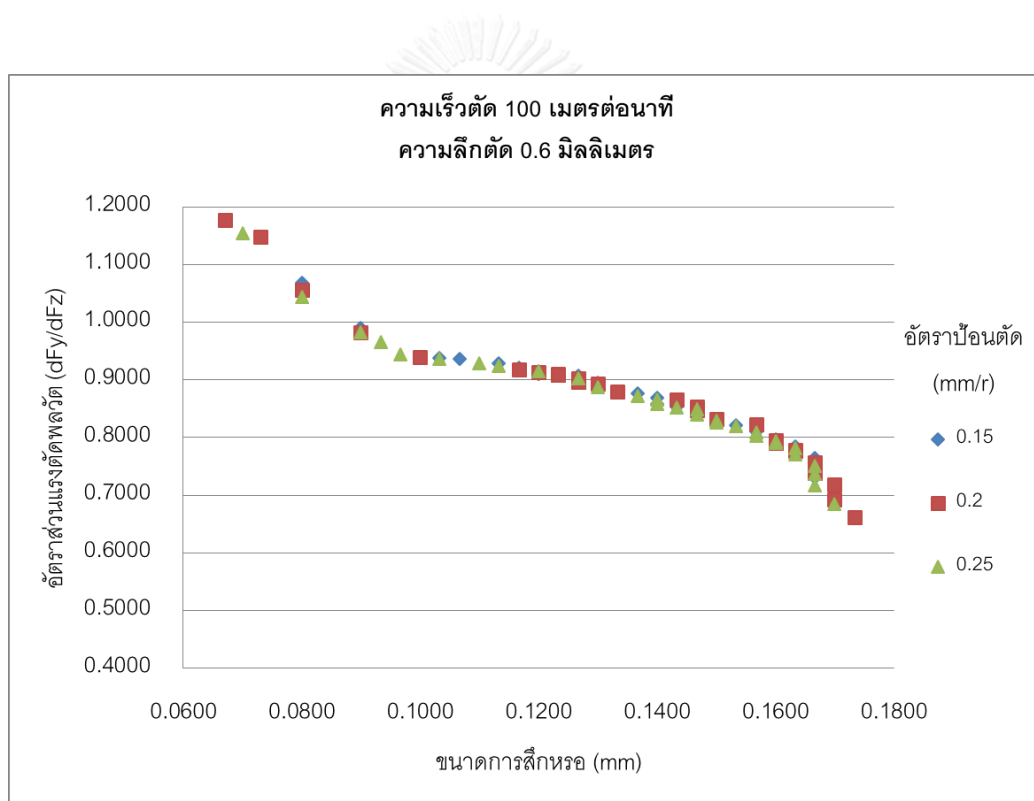


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร ที่อัตราการบั่นตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.18 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) จะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้น ในทุกๆอัตราการบั่นตัด ในขณะที่เริ่มขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงขนาดเล็ก จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตรา

การบั่นตัด ไม่ทำให้รูปกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอเปลี่ยนแปลงตาม

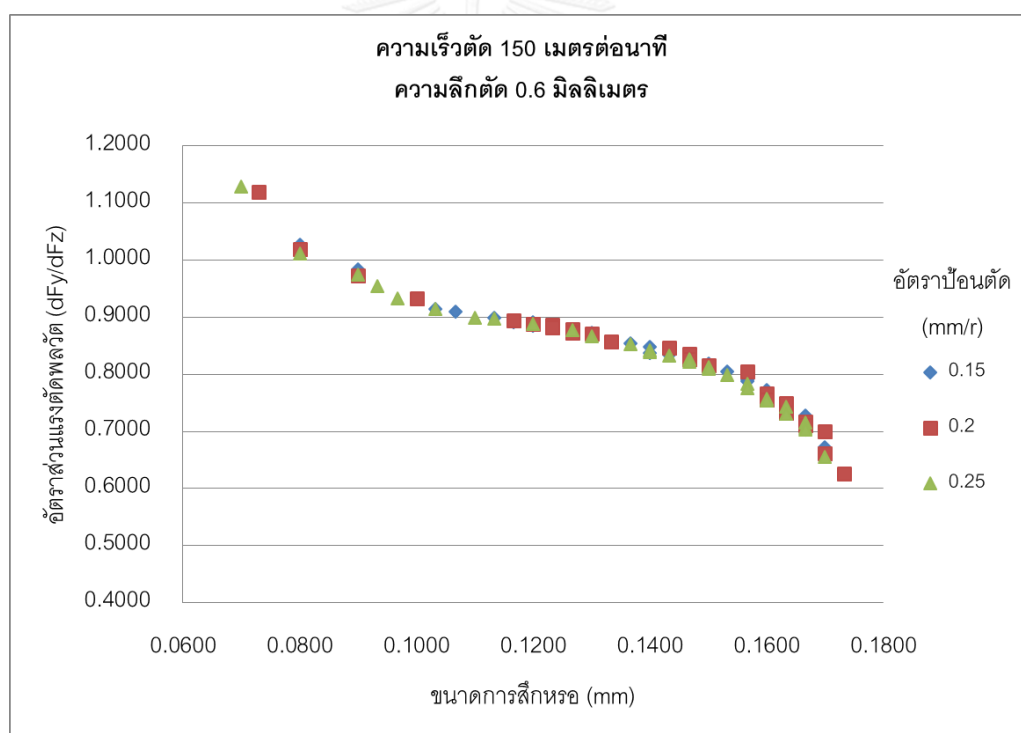
เมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความสึกหรอค่าเดียวกัน จากอัตราการบั่นเม็ดเม็ดตัดค่าสูง มีเม็ดตัดสึกหรอไว เกิดแนวโน้มสันตะเทือนของเม็ดตัด แรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีค่ามากขึ้น มากกว่าแรงบั่นตัดพลวัต (dFy) จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแรงตัดที่ใช้ อัตราการบั่นตัดน้อย เม็ดตัดไม่สะเทือน ซึ่งแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีค่าน้อย ไม่มากไปกว่าแรงบั่นตัดพลวัต (dFy)มากนัก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามาก จากกราฟความสัมพันธ์ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ ไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการตัดนี้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดเม็ดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตรต่ออนาที ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร ที่อัตราการบั่นตัดต่างกัน

ผลการทดลองการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดดังรูป 4.19 โดยกำหนดให้ความเร็วตัด 200 เมตรต่ออนาที ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตรให้คงที่ทั้งสองค่าและตัดชิ้นงานที่อัตราการบั่นตัดต่างกัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ ยังคงมีแนวโน้มลดลงไป

ในทิศทางเดียวกันเช่นเดิมในทุกๆอัตราการป้อนตัด และพบว่าที่ขนาดการสึกหรอค่าเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนมีผลต่ออัตราส่วนแรงตัดพลวัต อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจากอัตราการป้อนเม็ดมีดตัดมาก จะมีค่าแรงตัดสูง อิทธิพลขององค์ประกอบแรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีค่าสูงจากผลการสั่นสะเทือนของมีดมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่เกิดขึ้น จึงทำให้เกิดอัตราส่วนแรงตัดพลวัตน้อย โดยเปรียบเทียบกับแรงตัดที่อัตราการป้อนตัดน้อยเม็ดมีดตัดไม่สะเทือนซึ่งแรงตัดหลัก (Fz) มีค่าต่ำ ไม่มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) มากนัก จึงทำให้มีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตขนาดสูง เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลิ้งมีขนาดมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ในทุกๆอัตราการป้อนตัด แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ได้ทำให้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตาม

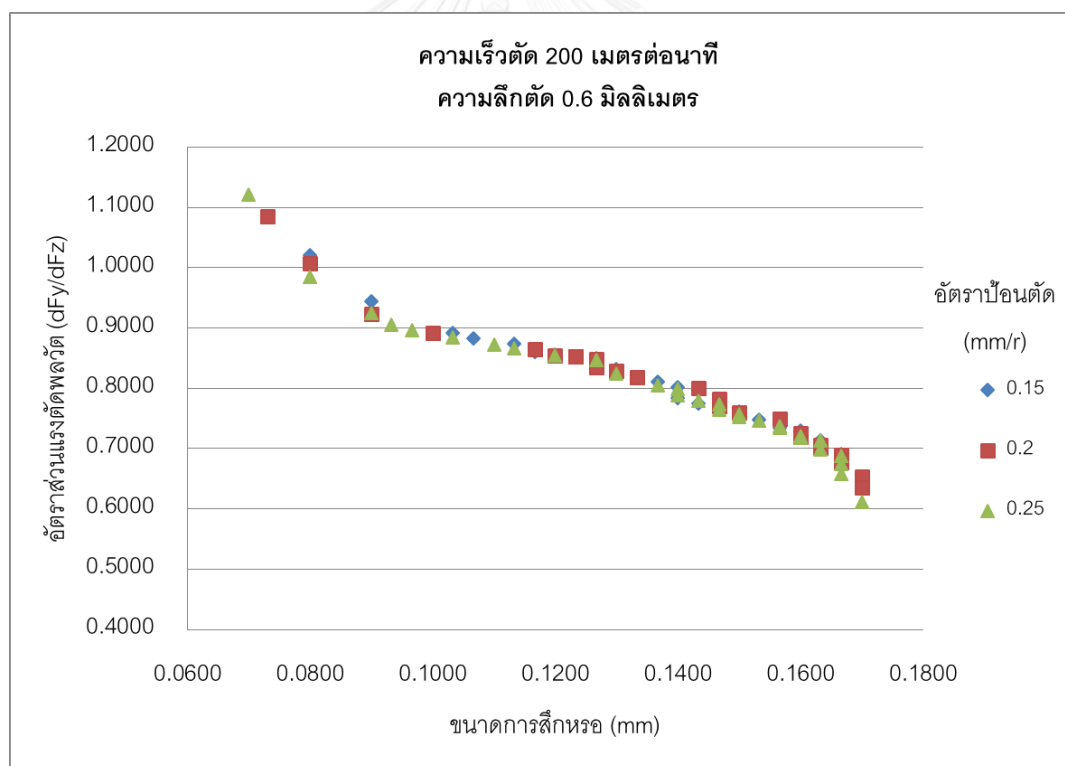


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน

ผลการทดลองการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดดังรูป 4.20 โดยคงค่าความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตรและตัดชิ้นงานที่อัตราการป้อนตัดต่างกัน พบว่า

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเหมือนเดิม เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีขนาดมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ได้ทำให้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตาม

อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความลึกหรือค่าเดียวกัน อัตราการบิ่นเม็ดมีดตัดที่มีค่าสูง มีดตัดจะสึกหรอไว เกิดการสั่นสะเทือนของมีดตัด แรงตัดหลัก (dFz) มีค่ามากขึ้นและมากกว่าแรงบิ่นตัดพลวัต (dFy) ทำให้เกิดอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแรงตัดที่มีอัตราการบิ่นตัดน้อย เม็ดมีดตัดจะสั่นสะเทือนน้อย ทำให้แรงตัดหลัก (dFz) มีค่าไม่มากไปกว่าแรงบิ่นตัดพลวัต (dFy) ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามาก จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มอัตราส่วนพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัดนี้

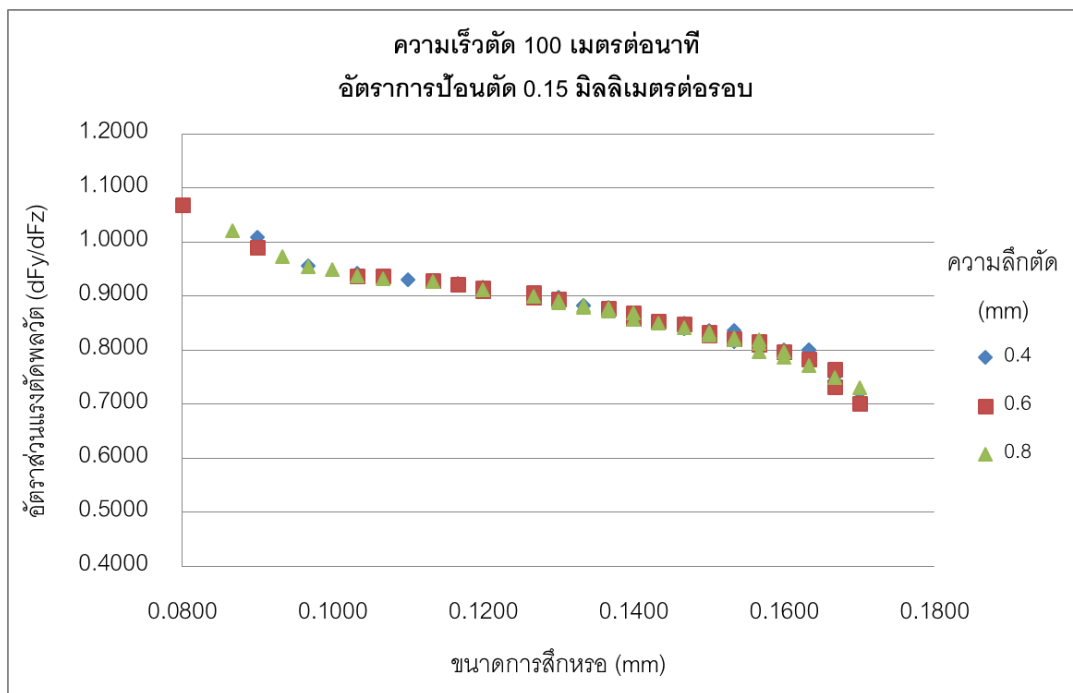


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร ที่อัตราการบิ่นตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.21 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสีกหรือยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) จะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเมื่อขนาดการสีกหรือมากขึ้น ในทุกๆอัตราการบ้อนตัด ในขณะที่เริ่มขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดถึงขนาดเล็ก จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง เมื่อขนาดการสีกหรือสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการบ้อนตัด ไม่ทำให้อุปกรณ์กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสีกหรือแปรเปลี่ยนตาม

เมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความสีกหรือค่าเดียวกัน จากอัตราการบ้อนเม็ดมีดตัดค่าสูง มีดตัดสีกหรือไว เกิดแนวโน้มสันสะเทือนของมีดตัด แรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีค่ามากขึ้น มากกว่าแรงบ้อนตัดพลวัต (dFy) จึงทำให้เกิดอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแรงตัดที่อัตราการบ้อนตัดน้อย เม็ดตัดไม่สะเทือน ซึ่งแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีค่าน้อย ไม่มากไปกว่าแรงบ้อนตัดพลวัต (dFy)มากนัก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่ามาก จากกราฟความสัมพันธ์ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสีกหรือ ไม่ได้แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดนี้

4.2.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดการสึกหรอเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวที่ความลึกตัดเปลี่ยนแปลง

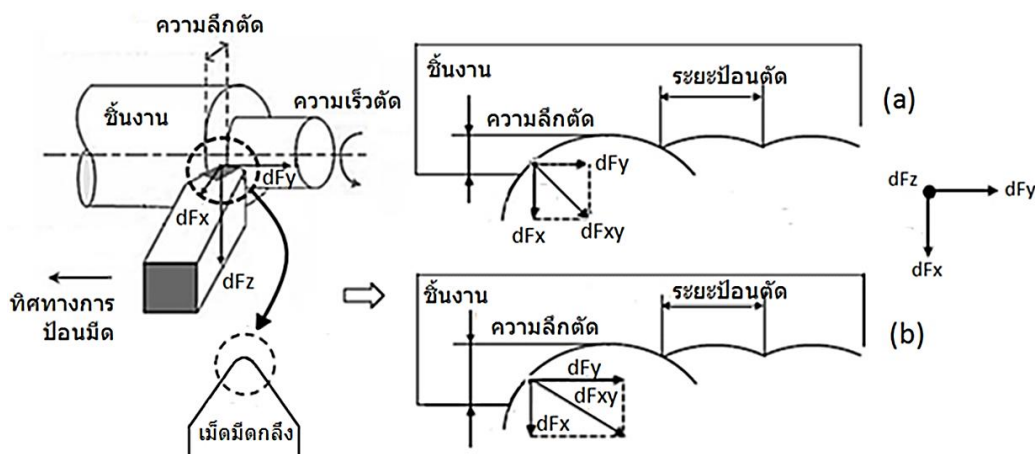


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงตัด โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดต่างๆ ให้คงที่ เช่น ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัด แต่เปลี่ยนแปลงค่าความลึกตัด จะพบว่าเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดตัดน้อย จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้นจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตต่ำ โดยอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นทุกๆ ค่าความลึกตัด

เมื่อวิเคราะห์เม็ดมีดตัดที่มีขนาดความสึกหรอเท่ากันอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจากการตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดมาก จะมีขนาดน้อยกว่าการตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดน้อย เนื่องจากการตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดมาก มีดตัดจะสึกหรอไว แรงตัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงระดับความลึกตัดที่สูงขึ้นทำให้การตัดชิ้นงานทำได้ยากขึ้น เกิดจากการสั่นสะเทือน ความเร็วผิวชิ้นงานไม่ดีหรือขรุขระมาก ทำให้ขนาดแรงตัดหลักพลวัต dF_z มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต dF_y ที่เกิดขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดชิ้นงานตัดที่ค่า

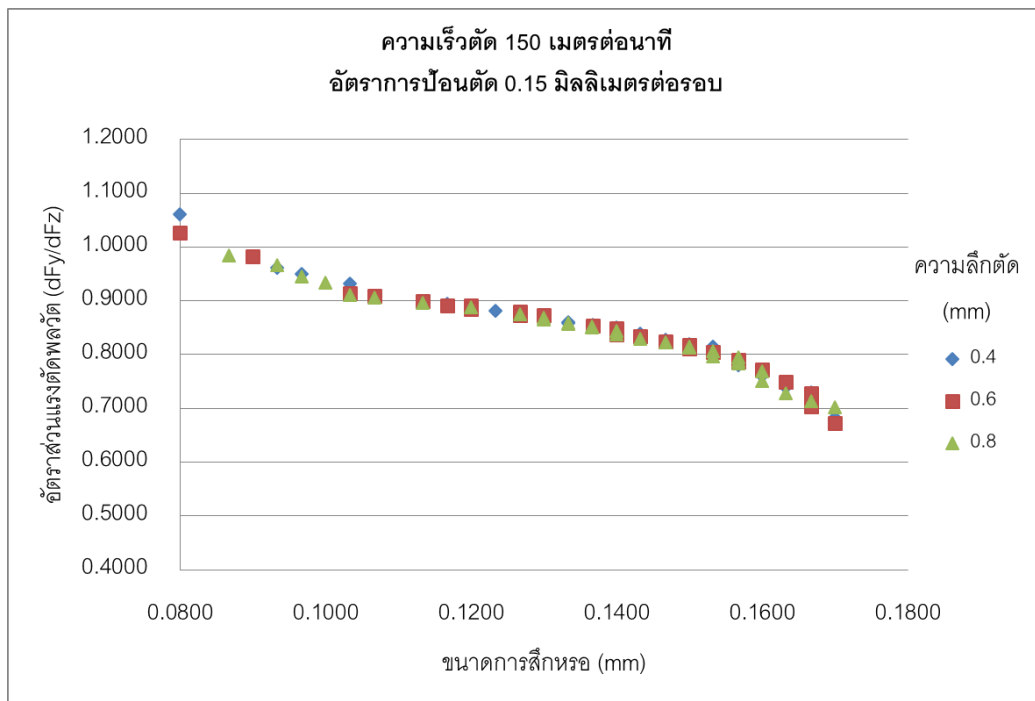
ความลึกตัดน้อยขนาดแรงตัดหลักพลวัต dF_z จะมีค่าต่ำ ไม่เหนือกว่าแรงป้อนตัดพลวัต dF_y มากนัก จึงทำให้มีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความลึกตัดและแรงตัดพลวัต [29]

จากรูป 4.23 (a) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ของขนาดแรงตัดเมื่อค่าความลึกตัดเปลี่ยนแปลงไป จะพบว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) มีค่าสูงขึ้นเมื่อความลึกตัดมากขึ้น เพราะความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของคมตัดด้านข้างของเม็ดมีดกลึงกับชิ้นงานมากขึ้น เกิดแรงตัดมากขึ้น มีดสึกหรอไวขึ้น อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่มากขึ้นนั้นยังไม่เท่ากับขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ซึ่งมีขนาดมากกว่า แรงตัดพลวัต (dF_z) จะแปรผันกับเงื่อนไขการตัด และการสึกหรอ เนื่องจากความลึกตัดมากขึ้น เกิดแนวโน้มสั่นสะเทือน เพราะมีดสัมผัสชิ้นงานมากขึ้นจากการสึกหรอ

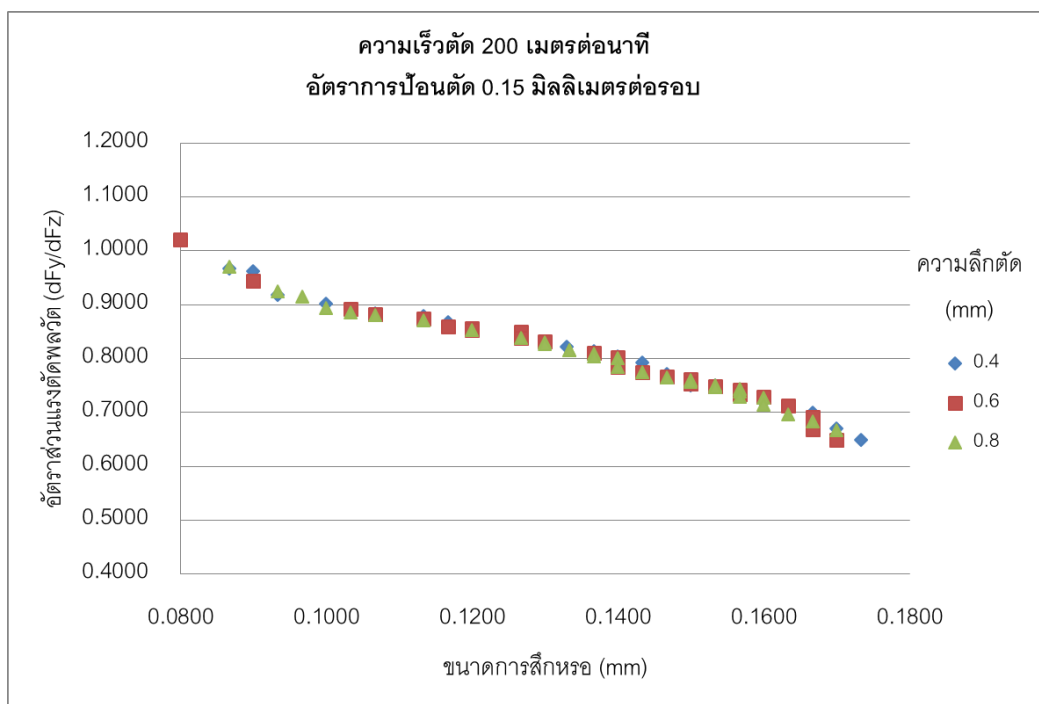
อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่ใช้ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงระดับความลึกตัดนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อแนวโน้มความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

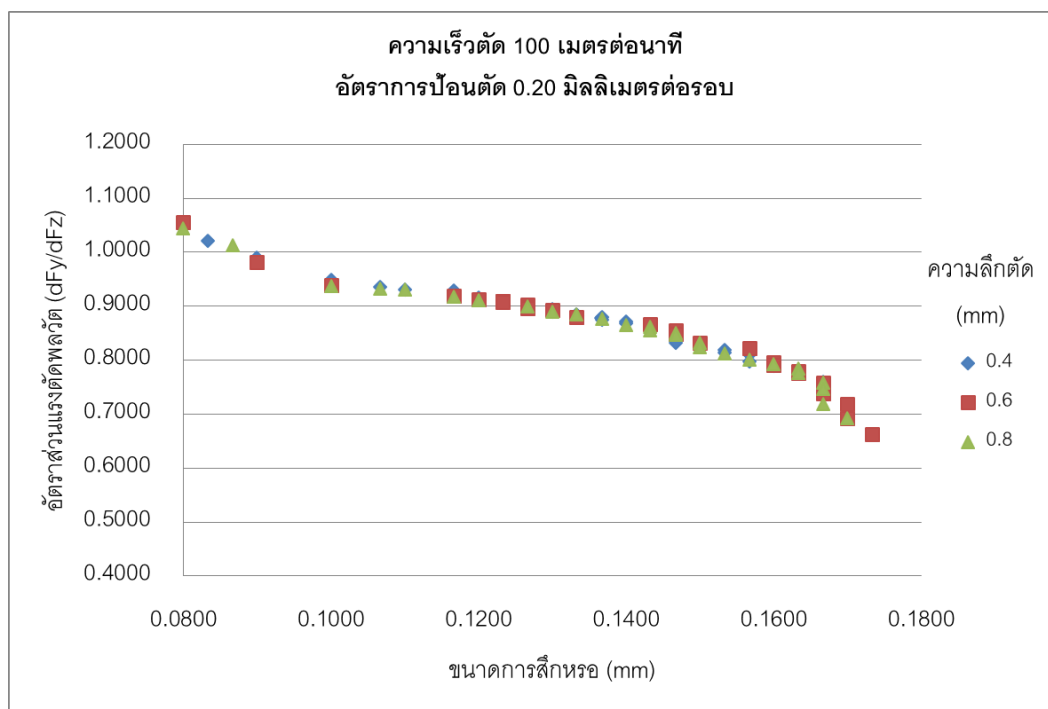
จากรูปที่ 4.24 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอมีดตัดมีขนาดมากขึ้น ในทุกๆการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกตัด แสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ในตอนเริ่มตัดเม็ดมีดกลึงยังไม่สึกมากจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง เพราะแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ยังมีค่าน้อย แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ลดลงในทุกๆระดับความลึกตัด เป็นเพราะการเปลี่ยนระดับความลึกตัด คมมีดตัดชิ้นงานมีพื้นที่สัมผัสมากขึ้น เกิดแรงตัดสูงขึ้นมาก มีดสึกหรอมากและไวขึ้น ผิวชิ้นงานหยาบ ไม่ดีเกิดรอยขรุขระ มีแนวโน้มเกิดสันสะเทือนสูง แรงตัดหลักพลวัต (dFz) สูงมากขึ้นกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) จึงมีขนาดลดลง

จากกราฟ เมื่อขนาดการสึกหรอของมีดตัดมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขการตัดนี้ การใช้ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดคงที่ แต่เปลี่ยนระดับความลึกตัดนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อแนวโน้มความสัมพันธ์ของกราฟอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดเม็ดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

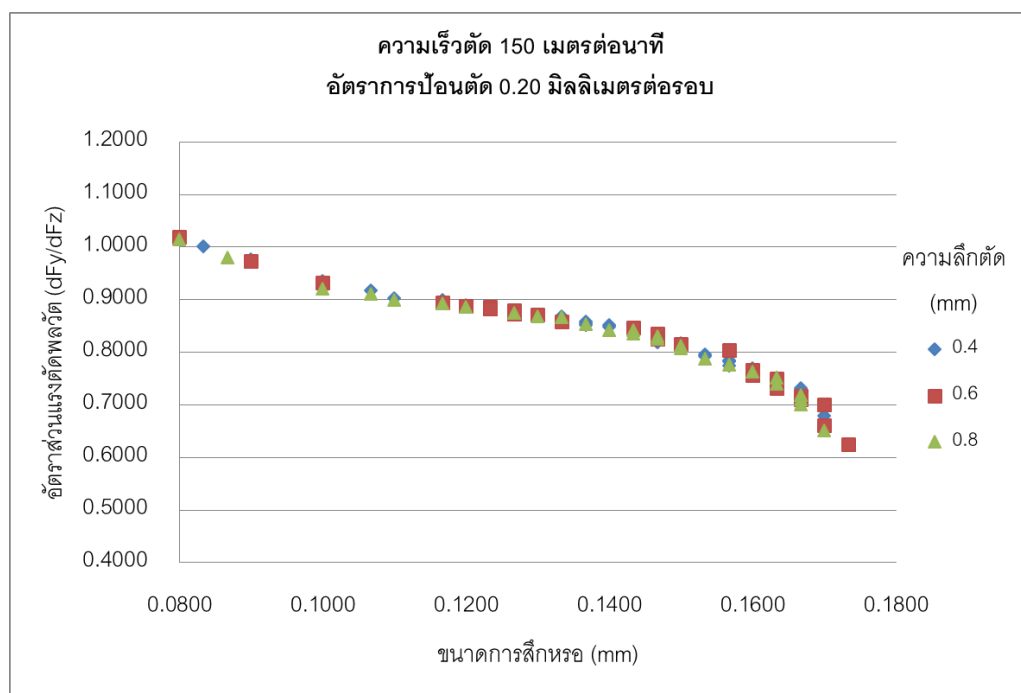
จากรูปที่ 4.25 พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต และขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิมแม้ว่าเปลี่ยนระดับความลึกตัด ในตอนเริ่มตัดขนาดการสึกหรอของเม็ดตัดมีค่าน้อย จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดนี้เมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดการสึกหรอเท่ากันการตัดที่ระดับความลึกตัดมาก จะมีค่าแรงตัดสูง องค์ประกอบแรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีค่าสูงชันกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) เพราะพื้นที่สัมผัสของคมเม็ดตัดและชิ้นงานมีมากขึ้น มีดสึกหรอมากกว่า มีแนวโน้มเกิดสั่นสะเทือนสูง ผิวชิ้นงานเกิดรอยขรุขระมาก จึงให้ให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกน้อย ซึ่งแรงตัดหลักพลวัต (dFz)จะมีค่าต่ำ ไม่เหนือไปกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy)มากนัก ซึ่งให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อขนาดการสึกหรอของมีดตัดน้อย จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง แต่เมื่อมีดสึกหรอมากขึ้นจะให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตต่ำ โดยกราฟมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นทุกๆเงื่อนไขการเปลี่ยนระดับความลึกตัด เมื่อวิเคราะห์ที่มีดตัดมีขนาดความสึกหรอเท่ากัน อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจากการตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดสูง จะมีขนาดน้อยกว่าการตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดต่ำ เนื่องจากการตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดมาก มีดตัดจะสึกหรอไว แรงตัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงระดับความลึกตัดที่สูงขึ้น ทำให้การตัดชิ้นงานทำได้ยากขึ้น เกิดจากการสั่นสะเทือน ความเรียบผิวชิ้นงานไม่ดีหรือขรุขระมาก ทำให้ขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่เกิดขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดชิ้นงานตัดที่ค่าความลึกตัดน้อย ขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่าต่ำ ไม่เหนือกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) มากนัก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูงอย่างไรก็ตามเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดถึงมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า ภายใต้เงื่อนไข

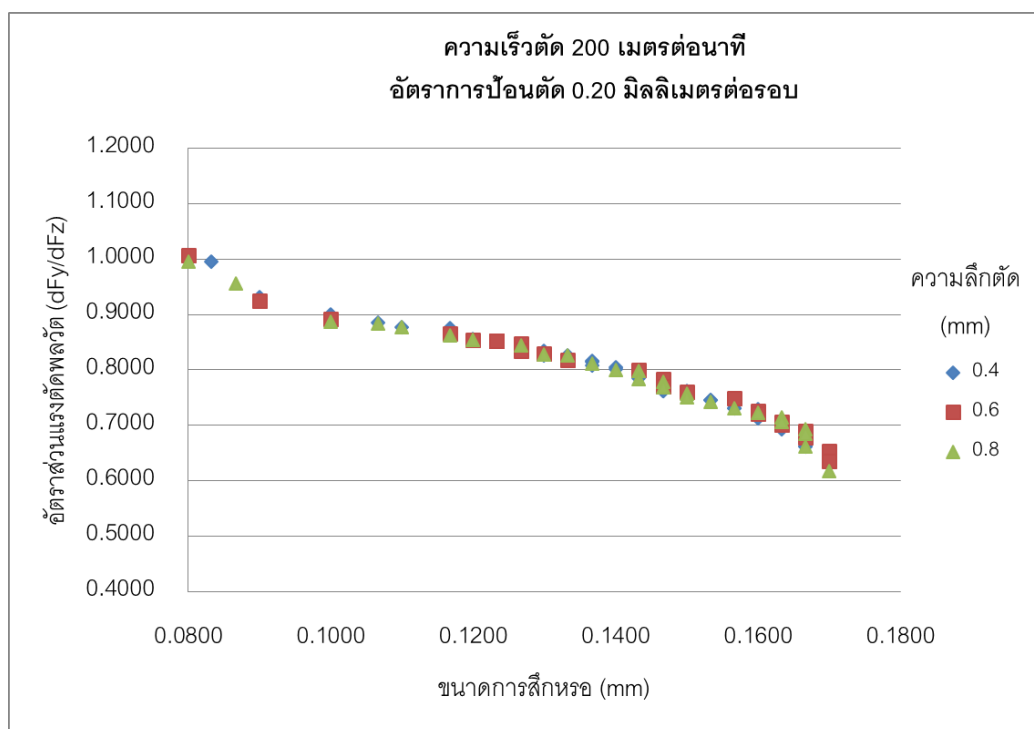
การตัด โดยใช้ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงระดับความลึกตัดนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อแนวโน้มความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) และขนาดการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอมัดตัดมีขนาดมากขึ้น ในทุกๆการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกตัด แสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ในตอนเริ่มตัดเม็ดมีดกลึงยังไม่สึกมากจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง เพราะแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ยังมีค่าน้อย แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ลดลงในทุกระดับความลึกตัด เป็นเพราะการเปลี่ยนระดับความลึกตัด คมมีดตัดชิ้นงานมีพื้นที่สัมผัสมากขึ้น เกิดแรงตัดสูงขึ้นมาก มีดสึกหรอมากและไวขึ้น ผิวชิ้นงานหยาบ ไม่ดีเกิดรอยขรุขระ มีแนวโน้มเกิดสนิมสะเทือนสูงแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) สูงมากขึ้นกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) จึงมีขนาดลดลง

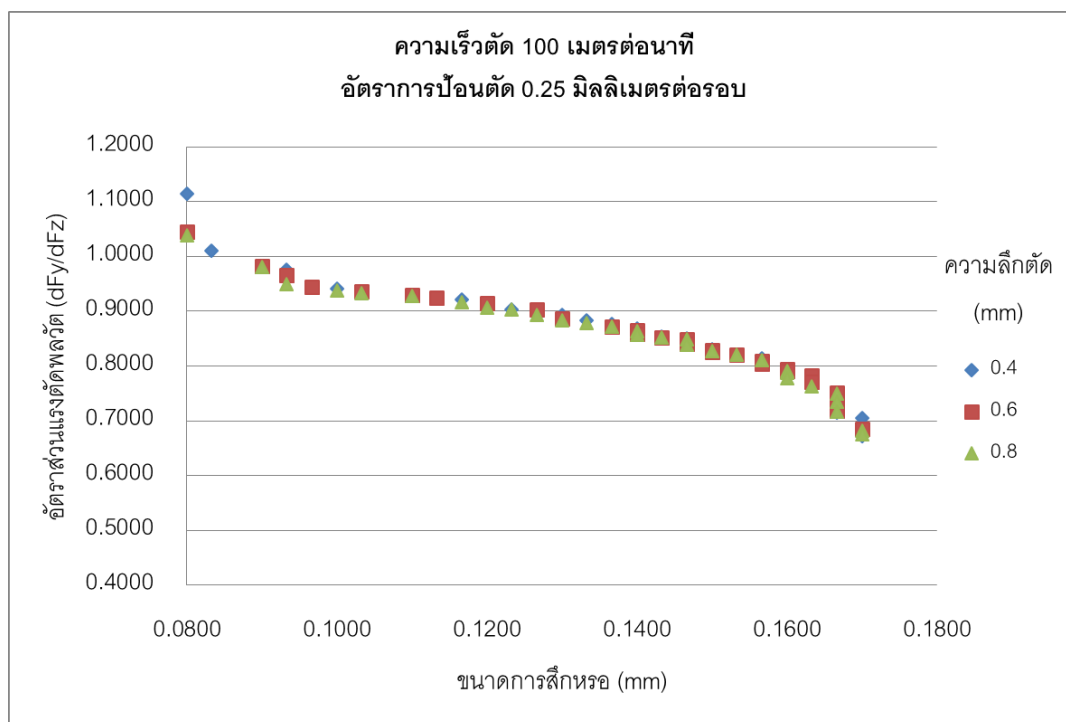
จากกราฟ เมื่อขนาดการสึกหรอของมีดตัดมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขการตัดนี้ การใช้ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดคงที่ แต่เปลี่ยนระดับความลึกตัด นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อแนวโน้มความสัมพันธ์ของกราฟ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.28 พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต และขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิมแม้ว่าเปลี่ยนระดับความลึกตัด ในตอนเริ่มตัดขนาดการสึกหรอของมีดตัดมีค่าน้อย จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ ไม่ได้แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดนี้ เมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความสึกหรอเท่ากัน การตัดที่ระดับความลึกตัดมาก จะมีค่าแรงตัดสูง องค์ประกอบแรงตัดหลักพลวัต (dFz) จะมีค่าสูงชันกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) เพราะพื้นที่สัมผัสของคมมีดตัดและชิ้นงานมีมากขึ้น มีดสึกหรอมากกว่า มีแนวโน้มเกิดสันสะเทือนสูง ผิวชิ้นงานเกิดรอยขรุขระ

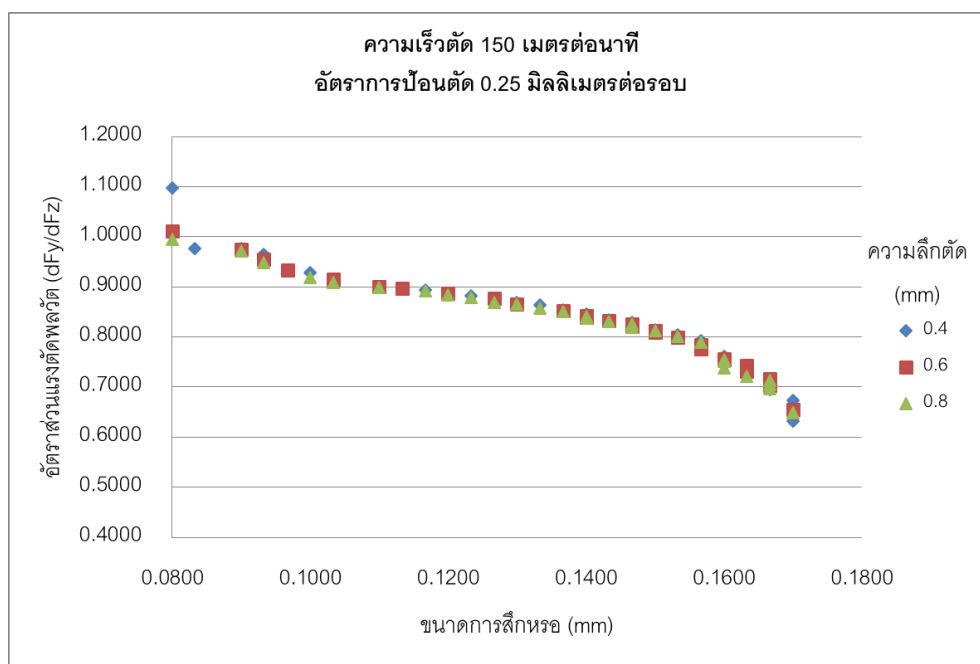
มาก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดชิ้นงานที่ระดับความลึก น้อย ซึ่งแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่าต่ำ ไม่เหนือไปกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) มากนัก ซึ่ง ให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 100 เมตร ต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดตัดน้อย จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัต สูง แต่เมื่อมีดสึกหรอมากขึ้น จะให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตต่ำ โดยกราฟมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นทุกๆเงื่อนไขการเปลี่ยนระดับความลึกตัด เมื่อวิเคราะห์ที่มีดตัดมีขนาดความสึกหรอเท่ากัน อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจากการตัดชิ้นงานที่ระดับ ความลึกตัดสูง จะมีขนาดน้อยกว่าการตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดต่ำ เนื่องจากการตัดชิ้นงาน ที่ระดับความลึกตัดมาก มีดตัดจะสึกหรอไว แรงตัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงระดับความลึกตัดที่สูงขึ้น ทำให้การตัดชิ้นงานทำได้ยากขึ้น เกิดจากการสั่นสะเทือน ความเรียบผิวชิ้นงานไม่ดีหรือขรุขระ มาก ทำให้ขนาดแรงตัดหลักพลวัต dF_z มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต dF_y ที่เกิดขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดชิ้นงานตัดที่ค่าความลึกตัดน้อย

ขนาดแรงตัดหลักพลวัต dF_z จะมีค่าต่ำ ไม่เหนือกว่าแรงป้อนตัดพลวัต dF_y มากนัก จึงทำให้มีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูงอย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า ภายใต้เงื่อนไขการตัด โดยใช้ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงระดับความลึกตัดนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อแนวโน้มความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ

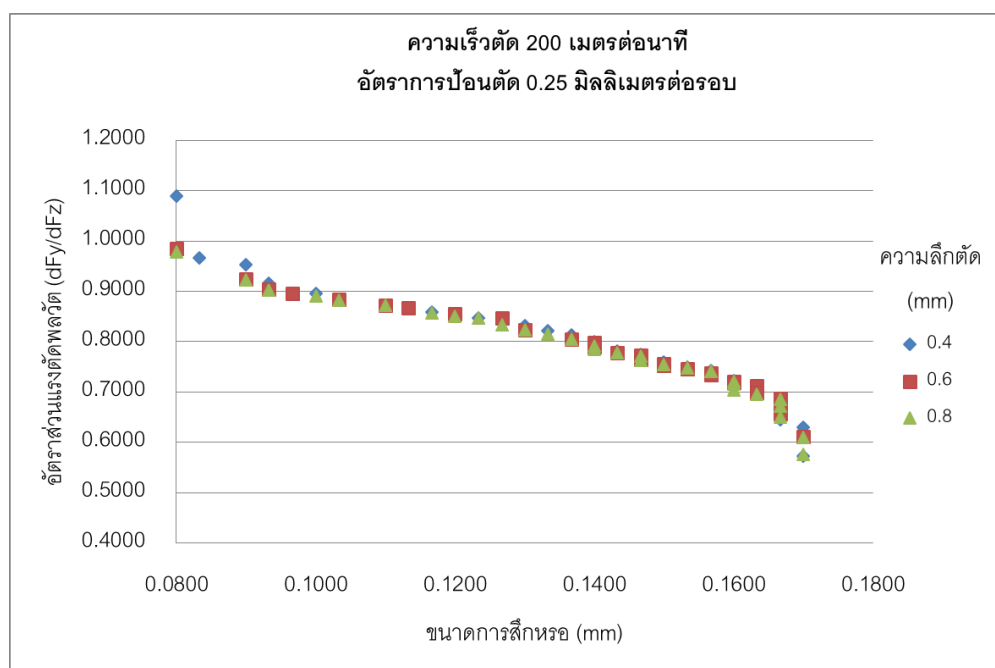


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) และขนาดการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอมัดตัดมีขนาดมากขึ้น ในทุกๆการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกตัด แสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอไม่ได้แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ในตอนเริ่มตัดเม็ดมีดกลึงยังไม่สึกมากจะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง เพราะแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ยังมีค่าน้อย แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ลดลงในทุกๆระดับความลึกตัด เป็นเพราะการเปลี่ยนระดับความลึกตัด คมมีดตัดชิ้นงานมีพื้นที่สัมผัสผิวกว้างขึ้น เกิดแรงตัดสูงขึ้นมาก มีดสึกหรอมากและไวขึ้น ผิวชิ้นงานหยาบ ไม่ดีเกิดรอยขรุขระ มีแนวโน้มเกิดสนิมสะเทือนสูง

แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) สูงมากขึ้นกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) จึงมีขนาดลดลง

จากกราฟ เมื่อขนาดการสึกหรอของมีดตัดมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขการตัดนี้ การใช้ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดคงที่ แต่เปลี่ยนระดับความลึกตัด นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อแนวโน้มความสัมพันธ์ของกราฟ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ



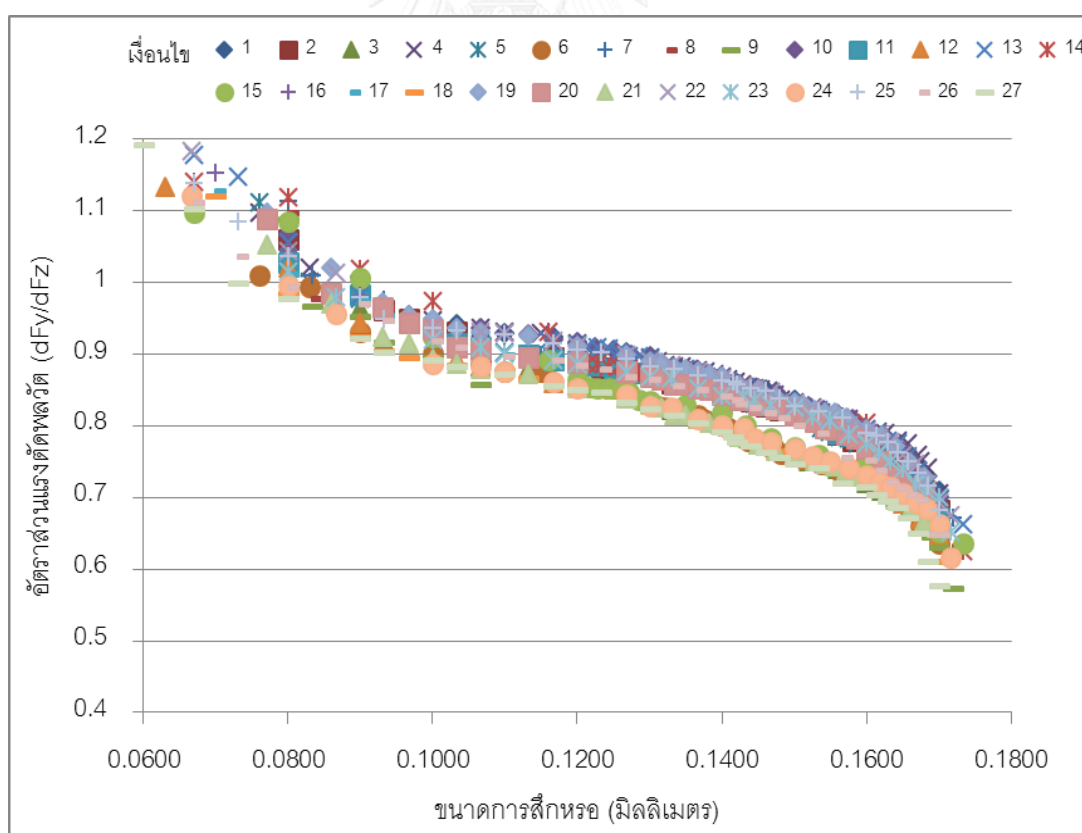
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) โดยกำหนดเงื่อนไขการตัดคงที่ได้แก่ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ระดับความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.31 พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัต และขนาดการสึกหรอยังคงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิมแม้ว่าเปลี่ยนระดับความลึกตัด ในตอนเริ่มตัดขนาดการสึกหรอของมีดตัดมีค่าน้อย จะมีอัตราส่วนแรงตัดพลวัตสูง แต่เมื่อขนาดการสึกหรอสูงขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและขนาดการสึกหรอ ไม่ได้แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดนี้ เมื่อวิเคราะห์ที่ขนาดความสึกหรอเท่ากัน การตัดที่ระดับความลึกตัดมาก จะมีค่าแรงตัดสูง องค์ประกอบแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่าสูงขึ้นกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) เพราะพื้นที่สัมผัสของคมมีดตัด

และชิ้นงานมีมากขึ้น มีดสีหรือมากกว่า มีแนวโน้มเกิดสันสะท้อนสูง ผิวชิ้นงานเกิดรอยขรุขระมาก จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกน้อย ซึ่งแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่าต่ำ ไม่เหนือไปกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) มากนัก ซึ่งให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตค่อนข้างสูง

4.2.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดกับขนาดการสึกหรอเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวในทุกปัจจัยของการตัด

หลังจากที่วิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความสึกหรอของเม็ดมีดกลึงและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตในการคิดแยกวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในแต่ละปัจจัยความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และระดับความลึกตัดแล้ว การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทั้งหมดของทุกปัจจัยมีความจำเป็นเพื่อให้ทราบถึงลักษณะแนวโน้มความสัมพันธ์ทั้งหมดโดยรวมของของทุกปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อขนาดความสึกหรอและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต ตามเงื่อนไขการตัดในตารางการออกแบบการทดลองที่ 3.3



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ในทุกเงื่อนไขการตัด

จากรูปที่ 4.32 ผลการทดลองของกระบวนการกลึงตัดชิ้นงาน ในทุกเงื่อนไขการตัดทั้งหมด จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พบว่า แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีขนาดลดลงตามขนาดการสึกหรอที่มากขึ้น การทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด ค่าอัตราป้อนตัด หรือระดับความลึกตัด ไม่ได้ทำให้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอเปลี่ยนแปลงตาม แนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตยังคงมีแนวโน้มลดลงเหมือนเดิม ไม่ว่าจะเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดตัดสามารถทำนายได้จากอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะตัด

ผลการทดลองนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดตัดในขณะกลึงชิ้นงานโดยอาศัยอัตราส่วนแรงตัดพลวัตในกระบวนการกลึงต่อไปได้

4.3 สมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษามา พบว่า แรงตัด ณ เงื่อนไขต่างๆ ส่งผลต่อสภาพชิ้นงาน ความเรียบผิวหรือ ความขรุขระและอายุของเม็ดตัด หรือในทางกลับกันขนาดการสึกหรอมีผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้นด้วย การทำอัตราส่วนแรงตัดได้ถูกนำมาใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระได้อย่างแม่นยำ [24, 29] เนื่องจากความขรุขระชิ้นงานมีผลจากการสึกหรอของเม็ดตัด ดังนั้นในงานวิจัยเล่มนี้ จึงอ้างอิงรูปแบบสมการประมาณค่าความขรุขระตามซึ่งทฤษฎีการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีรูปแบบเอ็กโปเนนเชียลฟังก์ชัน [8] เช่นเดียวกันกับลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอของเม็ดตัดเมื่อเวลาผ่านไป ขนาดการสึกหรอจะมีลักษณะเส้นกราฟตามทฤษฎีของเทอร์เลอร์ซึ่งมีรูปแบบเอ็กโปเนนเชียล ดังรูปที่ 2.33 เหมือนกัน ดังนั้น จึงสามารถใช้รูปแบบเอ็กโปเนนเชียลมาอธิบายลักษณะความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอได้ และการทำอัตราส่วนแรงตัดมีความจำเป็น เนื่องจากอัตราส่วนแรงตัดเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับอิทธิพลต่างๆของวัสดุ ชิ้นงาน ความแข็ง ขนาดการสึกหรอ หรือ เงื่อนไขการตัดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไป [3, 8] ทำให้สามารถใช้ทำนายขนาดความสึกหรอในกระบวนการกลึงตัดได้จริง โดยรูปแบบสมการการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงถูกพัฒนาแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยหาความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการตัดต่างๆที่กำหนดตามตารางการออกแบบการทดลองที่ 3.3 ที่ผ่านมา

ในการพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ ความเร็วรอบตัด อัตราการป้อน ระดับความลึกตัด อัตราส่วนแรงตัดพลวัต และขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเอ็กโปเนนเชียล ดังสมการ 4-1

$$V_b = C \cdot V^{a_1} \cdot F^{a_2} \cdot D^{a_3} \cdot \left(\frac{dF_y}{dF_z}\right)^{a_4} \quad (4-1)$$

โดย V_b คือ ขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดหรือแฟรงค์แวร์ (Flank wear) ที่เม็ดมีดกลึง

V คือ ความเร็วตัด หน่วย เมตรต่อนาที

F คือ อัตราการป้อนตัด หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ

D คือ ระดับความลึกตัด หน่วย มิลลิเมตร

dF_y/dF_z คือ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต

C คือ ค่าคงที่

a_1, a_2, a_3, a_4 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากสมการเอ็กโปเนนเชียล 4-1 ซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น ถูกแปลงโดยใช้ทฤษฎีของลอการิทึมให้อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรงพหุคูณ ดังนี้ [8]

$$\ln V_b = \ln C + a_1 \ln V + a_2 \ln F + a_3 \ln D + a_4 \ln \left(\frac{dF_y}{dF_z}\right) \quad (4-2)$$

จากการวิเคราะห์สมการ 4-2 สามารถจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปแบบสมการการถดถอยพหุคูณได้ดังนี้ [8]

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (4-3)$$

โดยที่ค่า y_1 คือค่าตอบสนองของการทำนายขนาดการสึกหรอเป็นตัวแทนของ $\ln V_b$

$X_1, X_2, X_3,$ และ X_4 คือ ตัวแทนของ $\ln V, \ln F, \ln D$ และ $\ln (dF_y/dF_z)$

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ และ β_4 คือ สัมประสิทธิ์สมการถดถอยพหุคูณ

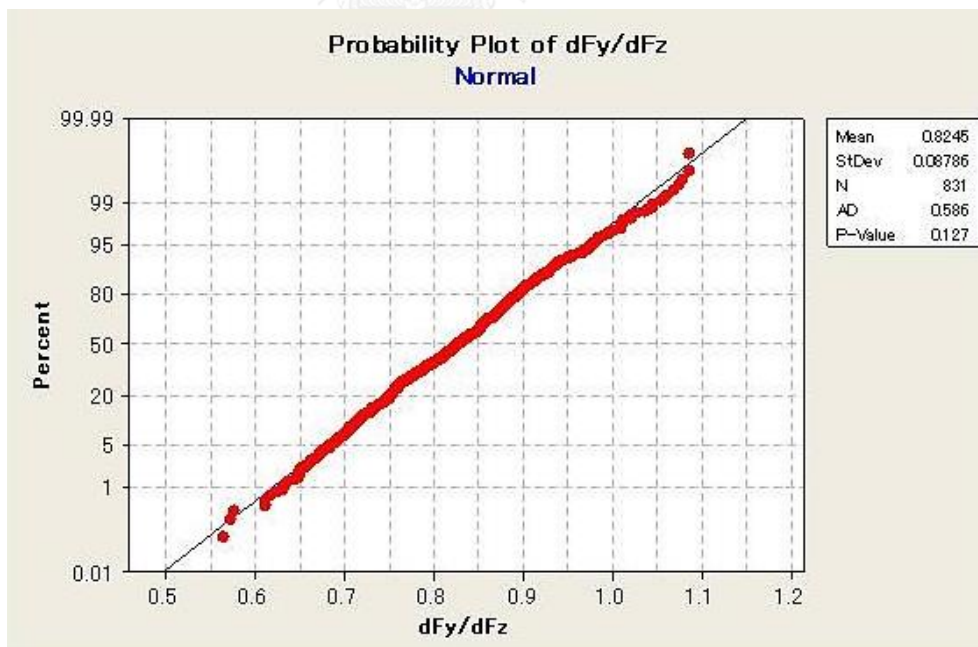
สัมประสิทธิ์สมการถดถอยพหุคูณแต่ละพารามิเตอร์สามารถหาได้จากกราฟลิ่งขึ้นงานพารามิเตอร์ทุกตัวถูกวิเคราะห์เชิงถดถอยพหุคูณโดยวิธีการประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุด

(Least square method) โดยที่ β_0 คือ ค่า y_1 ที่ตัดแกน y เมื่อพารามิเตอร์ X_1, X_2, X_3 , และ X_4 มีค่าเป็นศูนย์ [8] ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลทุกพารามิเตอร์ ถูกตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล โดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ทั้งสามส่วนดังนี้

- 1 การทดสอบการกระจายตัวข้อมูลแบบแจกแจงปกติ
- 2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของขนาดการสึกหรอเม็ดมีดกลึง

4.3.1 ผลการทดสอบการกระจายตัวข้อมูลแบบแจกแจงปกติ

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้างกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normality plot) ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้างแล้วพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล การกระจายตัวควรอยู่ตามเส้นตรง หรือแนวโน้มเป็นเส้นตรงข้อมูลจึงมีการกระจายตัวแบบปกติ



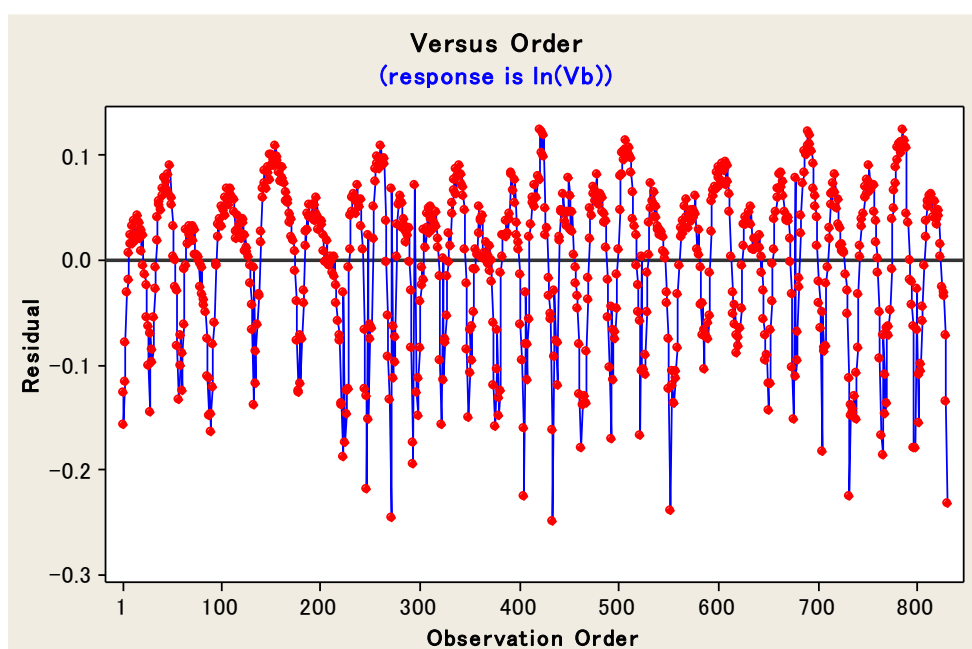
รูปที่ 4.33 Normal Probability Plot ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z)

การทดสอบการกระจายแบบปกติของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต แสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดีมากค่า $P\text{-value} = 0.127$ ซึ่งมากกว่า 0.05 ที่ระดับ

ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลอัตราส่วนแรงตัดพลวัต มีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

4.3.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลของขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (V_b) แสดงดังรูปที่ 4.33

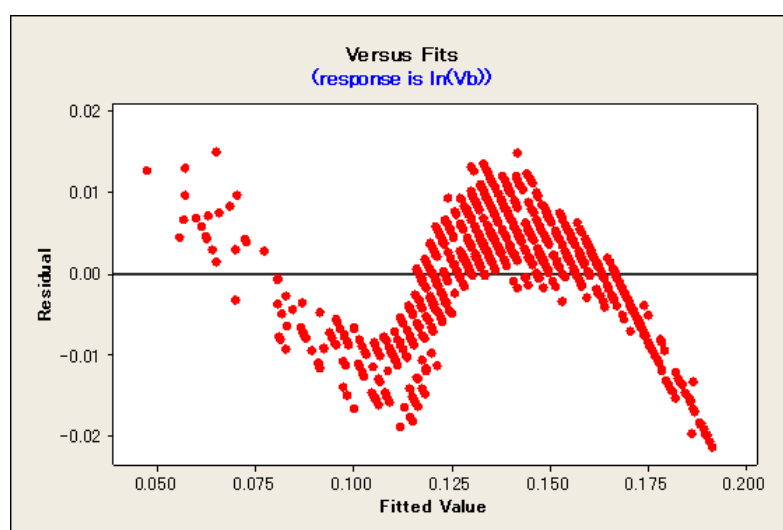


รูปที่ 4.34 แสดงการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด หรือแฟรงค์แวร์ (Flank wear) ของเม็ดมีดกลึง

จากรูป 4.34 พิจารณาค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง พบว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลส่วนมากอยู่เหนือแนวเส้นศูนย์ ซึ่งส่งผลทำให้ความแปรปรวนข้อมูลขนาดการสึกหรอไม่คงที่ ไม่สอดคล้องกันในทางสถิติเท่าที่ควร ที่เป็นไปในลักษณะนี้อาจเป็นไปได้ว่า มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนจากการเก็บข้อมูลในทางปฏิบัติ เพราะการเก็บข้อมูลทำตามขั้นตอนและวิธีการออกแบบการทดลอง แต่พบว่ามีปัจจัยอื่น นั่นคือ เกิดความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งมีดตัดเข้ากับด้ามมีดในขณะทดลอง เนื่องจากมีความจำเป็นจะต้องถอดประกอบมีดตัดจากด้ามมีดตัดเพื่อไปวัดขนาดการสึก

หรืออย่างสม่ำเสมอ การถอดประกอบมีดตัดเข้าออกจากด้ามมีดตัดส่งผลทำให้ตำแหน่งปลายคมตัดไม่ตรงตามตำแหน่งเดิม ทำให้ขนาดการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าขนาดการสึกหรอด้วย ซึ่งทำให้ความแปรปรวนของข้อมูลขนาดการสึกหรอไม่คงที่

แต่อย่างไรก็ตาม ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น หรือลดลงจากแนวเส้นศูนย์ ดังนั้นจากเหตุผลที่ได้อธิบายไปจึงสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.35 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง

จากรูป 4.35 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพความแปรปรวนของข้อมูลขนาดการสึกหรอพบว่าลักษณะกราฟของข้อมูลไม่สอดคล้องกันในทางสถิติเท่าที่ควร ซึ่งกราฟควรกระจายตัวเฉลี่ยอย่างสม่ำเสมอรอบแนวเส้นศูนย์เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกันกับการวิเคราะห์รูปที่ 4.34 ดังที่กล่าวไปแล้ว ข้อมูลขนาดการสึกหรอมีความแปรปรวนไม่คงเกิดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการถอดประกอบมีดตัดเข้ากับด้ามมีดตัดในขณะที่ทดลองอย่างสม่ำเสมอ จึงส่งผลทำให้ตำแหน่งปลายคมตัดไม่ตรงตามตำแหน่งเดิม ทำให้ขนาดการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าขนาดการสึกหรอด้วย มีผลทำให้ความแปรปรวนของข้อมูลขนาดการสึกหรอไม่คงที่

แต่อย่างไรก็ตาม ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม พบว่าตัวแปรต้นที่เลือกมา คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต มีความเกี่ยวข้องกันตามทฤษฎีการกลึง มีความสัมพันธ์ส่งผลต่อตัวแปรตามขนาดการสึกหรออย่าง

มีนัยสำคัญ (มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หรือ R-Square สูง) ซึ่งรายละเอียดจะถูกอธิบายต่อไปในหัวข้อ 4.4

4.4 การประมาณค่าขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาสร้างสมการทำนายขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Vb) ด้วยการใช้วิธีการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจากข้อมูลการตัดจริงทุกปัจจัยได้ดังนี้

Regression Analysis: $\ln(Vb)$ versus $\ln(V)$, $\ln(F)$, $\ln(D)$, $\ln(dFy/dFz)$

The regression equation is

$$\ln(Vb) = -1.43 - 0.209 \ln(V) - 0.0574 \ln(F) - 0.0340 \ln(D) - 1.81 \ln(dFy/dFz)$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.43046	0.05500	-26.01	0.000
$\ln(V)$	-0.20872	0.01026	-20.34	0.000
$\ln(F)$	-0.05740	0.01382	-4.15	0.000
$\ln(D)$	-0.034042	0.009731	-3.50	0.000
$\ln(dFy/dFz)$	-1.80614	0.02391	-75.55	0.000

S = 0.0811474 R-Sq = 87.5% R-Sq(adj) = 87.4%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	37.9110	9.4778	1439.32	0.000
Residual Error	826	5.4391	0.0066		
Total	831	43.3502			

Source	DF	Seq SS
$\ln(V)$	1	0.0019
$\ln(F)$	1	0.0155
$\ln(D)$	1	0.3114
$\ln(dFy/dFz)$	1	37.5822

รูปที่ 4.36 การวิเคราะห์ห้สมการถดถอยเชิงพหุคูณด้วยการแปลงลอการิทึม

ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาถูกทดสอบทางสถิติด้วยค่า P-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือความผิดพลาดเท่ากับ 0.05 (Error =0.05) การวิเคราะห์ความแปรปรวนทุกปัจจัยตัวแปรต้นว่ามีผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ของ

สมการถดถอยพหุคูณที่ถูกสร้างขึ้นโดยตรวจสอบว่าตัวแปรที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ตามสมมติฐานดังนี้

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

$$H_1: \text{มี } \mu \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน}$$

พบว่า สมการถดถอยพหุคูณมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ด้วยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ 87.5% ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (Adjusted-R-Square) คือ 87.4% ดังนั้นสามารถแสดงว่าสามารถใช้สมการนี้ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ หรือกล่าวได้ว่า ปัจจัยตัวแปรต้น ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีผลต่อตัวแปรตามขนาดการสึกของเม็ดมีดกลึงตัดอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่

$$H_0: \beta_j = 0 \text{ ทุกค่าสัมประสิทธิ์แต่ละปัจจัยมีค่าเท่ากับศูนย์}$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ ทุกค่าสัมประสิทธิ์แต่ละปัจจัยมีค่าไม่เท่ากับศูนย์}$$

สมมติฐาน H_0 ทุกค่าสัมประสิทธิ์แต่ละพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์จะต้องถูกปฏิเสธเพื่อแสดงให้เห็นว่าทุกปัจจัย ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะมีผลต่อขนาดการสึกของเม็ดมีดกลึงตัดอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ทุกพารามิเตอร์มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ทุกปัจจัย ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือขนาดการสึกของเม็ดมีดกลึงตัดอย่างมีนัยสำคัญ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ 87.5% ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (Adjusted-R-Square) คือ 87.4% ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า ทุกปัจจัยตัวแปรต้น ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือขนาดการสึกหรือของเม็ดมีดกลึงอย่างสัมพันธ์กัน ทุกปัจจัยที่ถูกเลือกมามีความเหมาะสม

ซึ่งสามารถแปลงรูปสมการทำนายขนาดการสึกหรือจากรูปแบบลอการิทึมให้อยู่ในรูปสมการเอ็กโปเนนเชียลได้ดังนี้

$$V_b = e^{-1.43} \cdot V^{-0.209} \cdot F^{-0.0574} \cdot D^{-0.034} \cdot \left(\frac{dF_y}{dF_z}\right)^{-1.81} \quad (4-4)$$

จากสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงที่ได้มา (สมการที่ 4-4) แต่ละพารามิเตอร์ของตัวมีค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันโดยค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพารามิเตอร์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางที่ส่งผลต่อตัวแปรตามซึ่งคือขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึง (Flank wear หรือ V_b) ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเป็นบวกมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามในลักษณะแปรผันตรง แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเป็นลบหมายความว่าพารามิเตอร์นั้นส่งผลต่อตัวแปรตามในลักษณะตรงข้าม ส่วนค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์จะบ่งบอกถึงขนาดที่จะส่งผลต่อตัวแปรตาม ถ้ามีขนาดมากก็จะส่งผลมากต่อตัวแปรตามถ้ามีขนาดน้อยก็จะส่งผลน้อยต่อตัวแปรตามเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของสมการทำนายที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์เงื่อนไขการตัดทั้งหมด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ระดับความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบสามารถแยกอธิบายพารามิเตอร์แต่ละตัวได้ดังนี้

เมื่อกลึงชิ้นงานด้วยความเร็วตัดที่สูงขึ้นแต่คงที่อัตราการป้อนตัดและระดับความลึกตัด ชิ้นงานหมุนด้วยความเร็วที่สูงขึ้น เกิดแรงกระทำต่อมีดตัดในทิศของความเร็วตัดมากขึ้นในขณะตัดชิ้นงาน เกิดแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ซึ่งมีทิศอยู่ในทิศการหมุนของชิ้นงานจะมีขนาดสูงชันมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลง จากสมการเมื่อเปรียบเทียบขนาดค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) คือ 1.81 มีขนาดมากกว่าค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วตัดคือ 0.209 จึงสรุปได้ว่า ขนาดการสึกหรอของมีดตัดแปรผันตามความเร็วตัดที่สูงขึ้น

เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัด แต่คงที่ความเร็วตัดและระดับความลึกตัด การป้อนมีดตัดด้วยอัตราการป้อนตัดค่าสูงสัมพันธ์กับแรงตัดที่เกิดขึ้น พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและมีดตัดมีมากขึ้น ทำให้การตัดชิ้นงานยากขึ้นแนวโน้มเกิดการสั่นสะเทือนสูงผิวชิ้นงานมีรอยขรุขระมากจากการป้อนตัดด้วยอัตราการป้อนตัดค่าสูง แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่าสูงกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่เกิดขึ้น ทำให้ค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตลดลง เมื่อพิจารณาสมการ ขนาดค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) คือ 1.81 มีขนาดมากกว่าค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการป้อนตัด คือ 0.0574 จึงสรุปได้ว่า มีดตัดมีขนาดการสึกหรอมากขึ้นจากอัตราการป้อนตัดที่สูงขึ้น

เมื่อเพิ่มระดับความลึกตัด แต่คงที่ค่าความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัด การตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดมากแรงตัดมีค่ามากขึ้นจากการตัดชิ้นงานที่ทำได้ยากขึ้น เนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือน ความเรียบผิวชิ้นงานไม่ดีหรือขรุขระมาก ทำให้ขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) มากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่เกิดขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าน้อยจากสมการเมื่อพิจารณาขนาดค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) คือ 1.81 และค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของระดับความลึกตัด คือ 0.034 เมื่อระดับความลึกตัดมากขึ้น สัมพันธ์กับขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ที่มากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลง และด้วยขนาดค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีมากกว่าระดับความลึกตัดแล้วจึงกล่าวได้ว่า ขนาดการสั่นหรือของมีดตัดแปรผันตามระดับความลึกตัดที่มากขึ้น

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีค่าเป็นลบ เมื่อพิจารณาสมการ จะพบว่า แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ส่งผลโดยตรงต่อขนาดการสั่นหรือของมีดตัด เมื่อตัดชิ้นงานด้วยความเร็วตัดคงที่ อัตราการป้อนตัดคงที่ และระดับความลึกตัดคงที่ แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะสูงขึ้นตามขนาดการสั่นหรือที่มากขึ้น พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น แนวนวมเกิดสั่นสะเทือน ทำให้ตัดชิ้นงานทำได้ยากขึ้น แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่ามากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่เกิดขึ้น หากพิจารณาค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์ของทุกพารามิเตอร์จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีขนาดใหญ่ที่สุด คือ 1.81 ส่งผลต่อขนาดการสั่นหรือมากที่สุด รองลงมาคือ ความเร็วตัดคือ 0.209 อัตราการป้อนตัดคือ 0.0574 และระดับความลึกตัดคือ 0.034 ตามลำดับ

สาเหตุอื่นๆ ที่ค้นพบจากการทดลองตัดจริง พบว่าการตัดกลิ้งชิ้นงาน อุณหภูมิชิ้นงานเนื่องจากความร้อนที่สูงภายในชิ้นงาน เมื่อเพิ่มความเร็วตัดมากขึ้นซึ่งทำให้เนื้อวัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มมากขึ้น คมมีดตัดชิ้นงานได้ง่าย ใช้แรงตัดน้อยหรือตัดได้ง่ายขึ้นเป็นผลให้อัตราการขนาดการสั่นหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลิ้งมีแนวมเกิดขึ้นซ้ำขนาดการสั่นหรือมีดตัดเกิดขึ้นซ้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดชิ้นงานในขณะที่ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานยังไม่สูงมาก ซึ่งแรงตัดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดมากกว่า ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานในขณะที่ตัดเป็นอีกสาเหตุซึ่งส่งผลให้ขนาดการสั่นหรือของเม็ดมีดกลิ้งลดลง และมีอิทธิพลอื่นจากขนาดรัศมีมุมมีดที่ใหญ่บ้างมากขึ้นนั่นเอง ขนาดการสั่นหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลิ้งจึงเกิดได้ซ้ำ

4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ

สมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงที่สร้างขึ้นมาจากการทดลองตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขการตัดของตารางที่ 3.3 สมการถูกนำมาตรวจสอบเพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการที่จะสามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ ในการทดสอบสมการ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเงื่อนไขการตัดใหม่ภายนอกช่วงตารางการออกแบบการทดลองตารางที่ 3.3 ที่ผ่านมา จะถูกแทนค่าในสมการทำนายนี้ค่าขนาดความสึกหรอที่ได้จากสมการทำนายจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าขนาดการสึกหรอจากการตัดชิ้นงานจริง เพื่อตรวจสอบว่า ค่าขนาดการสึกหรอจากสมการทำนายอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าขนาดความสึกหรอจากการตัดจริงหรือไม่ ถ้าเป็นเช่นนั้นแสดงว่าสมการทำนายมีความแม่นยำโดยเงื่อนไขการตัดใหม่ในการทดสอบ สมการมีดังนี้

4.5.1 ผลการทดสอบสมการด้วยเงื่อนไขการตัดใหม่ภายนอกช่วงการทดลอง

กำหนดพารามิเตอร์เงื่อนไขการตัดใหม่ และนำมาสร้างตารางออกแบบการทดลองที่

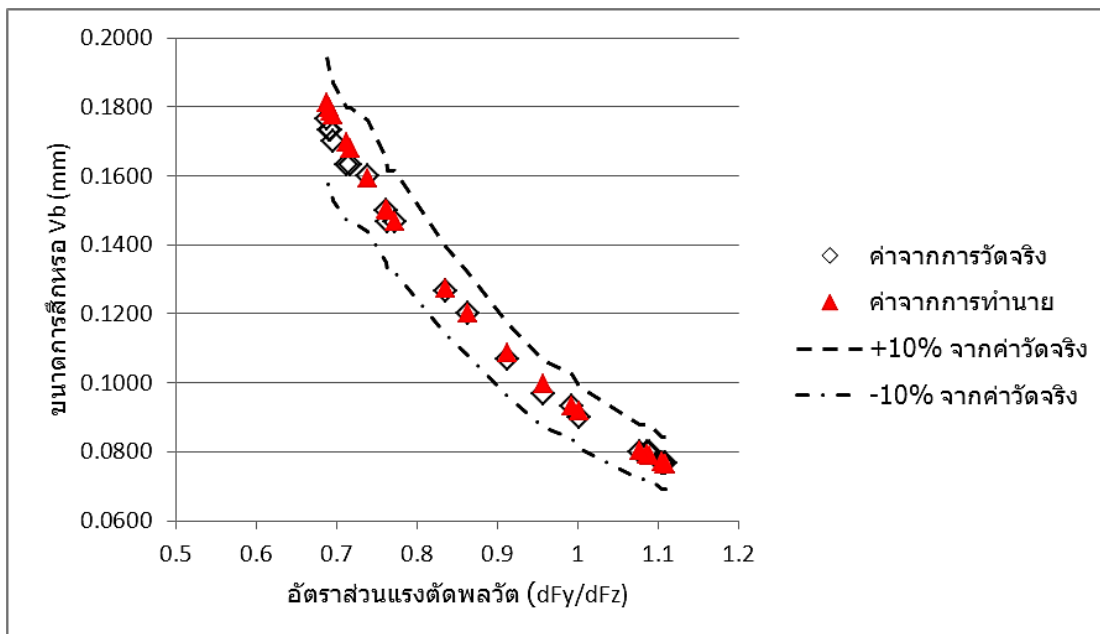
4.1

- ความเร็วตัด 220, 250 เมตรต่อนาที
- อัตราการป้อนตัด 0.05, 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ
- ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.1 การทดสอบความแม่นยำสมการเงื่อนไขการตัดนอกระยะการทดลอง

Run order	ความเร็วตัด (เมตร/นาที): V	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ): F	ความลึกตัด (มิลลิเมตร): D
1	220	0.05	1.0
2	250	0.05	1.0
3	220	0.1	1.0
4	250	0.1	1.0

ผลที่ได้จากการทดลองตัดชิ้นงานจริงจากตารางการออกแบบการทดลองที่ 4.1 มี 4 ผลการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายดังรูปที่ 4.37 ถึงรูปที่ 4.40



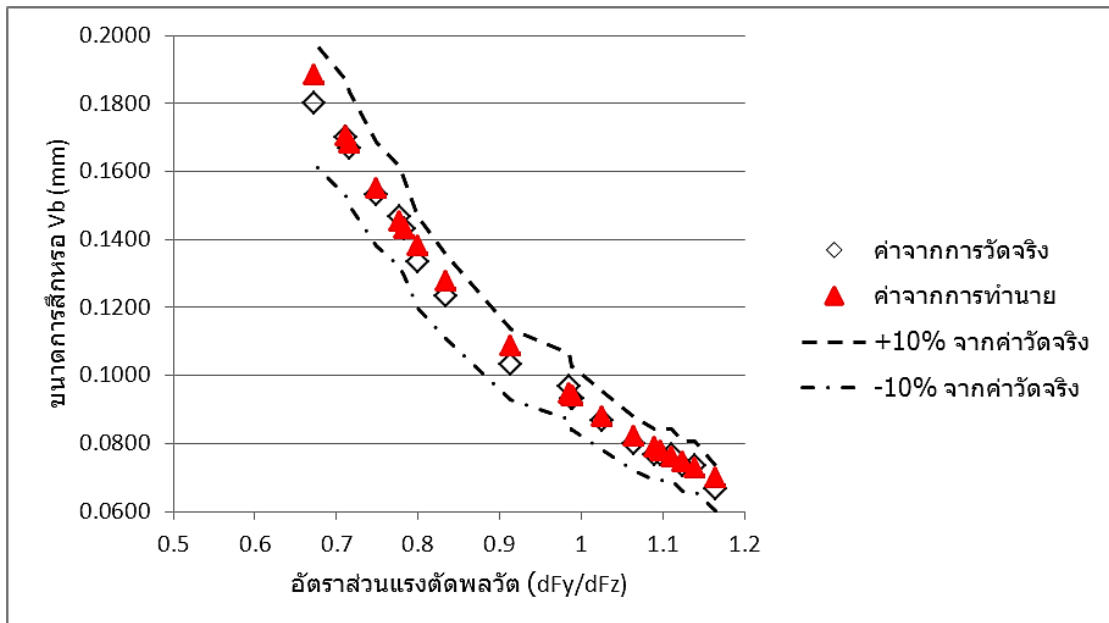
รูปที่ 4.37 ผลการทดลองที่ 1 การทดสอบความม่นยำสมการทำนายขนาดการร้าวด้านข้าง
คมตัดของเม็ดมีดกลิ้งที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงได้แก่ ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที

อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร

จากรูป 4.37 เส้นกราฟค่าทำนายขนาดการร้าว หาได้จากการป้อนค่าพารามิเตอร์
ต่างๆที่เกิดจากการตัดจริงภายใต้เงื่อนไขใหม่ลงในสมการทำนาย (สมการที่ 4-4) เมื่อนำไปค่า
ขนาดความร้าวจากการตัดจริงมาเปรียบเทียบกับกันจะเห็นได้ว่า ค่าขนาดความร้าวจากการ
ทำนายมีค่าอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าขนาดความร้าวที่ได้จากการวัดจริง และ
เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ความม่นยำจะสามารถหาได้จากสมการด้านล่าง

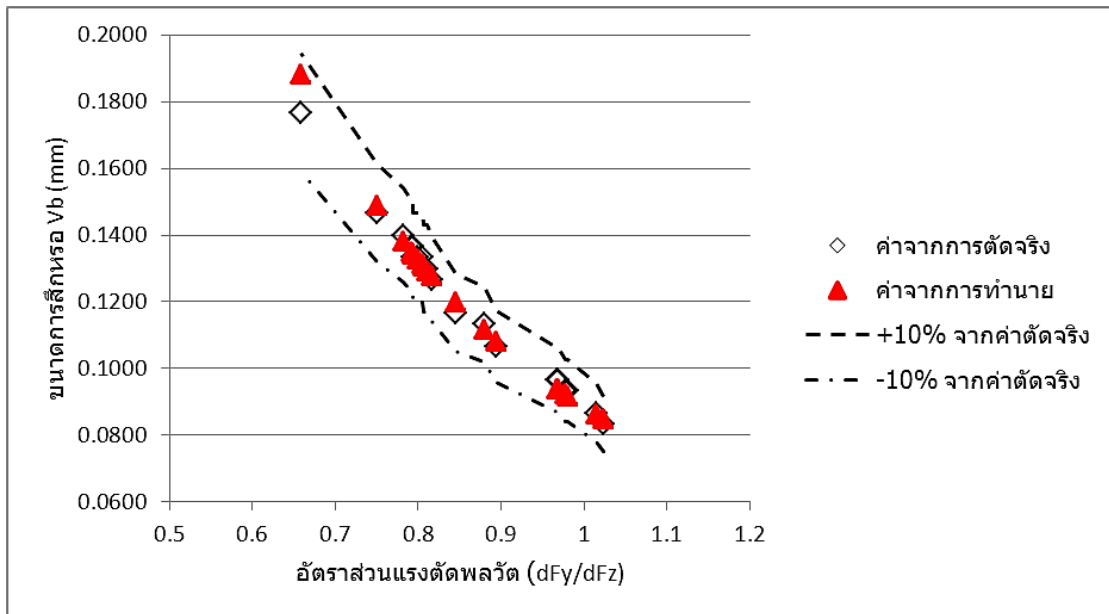
$$100 - \left[\left(\frac{\text{ค่าความร้าวที่วัดได้จริง} - \text{ค่าความร้าวที่ได้จากสมการ}}{\text{ค่าความร้าวที่วัดได้จริง}} \right) \times 100 \right] \quad (4-5)$$

ดังนั้น ภายใต้เงื่อนไขการตัดนอกช่วงของผลการทดลองที่ 1 พบว่าสมการทำนายมีค่า
ความม่นยำต่ำสุดเท่ากับ 95.6% ที่ค่าขนาดการร้าวเท่ากับ 0.17 มิลลิเมตร



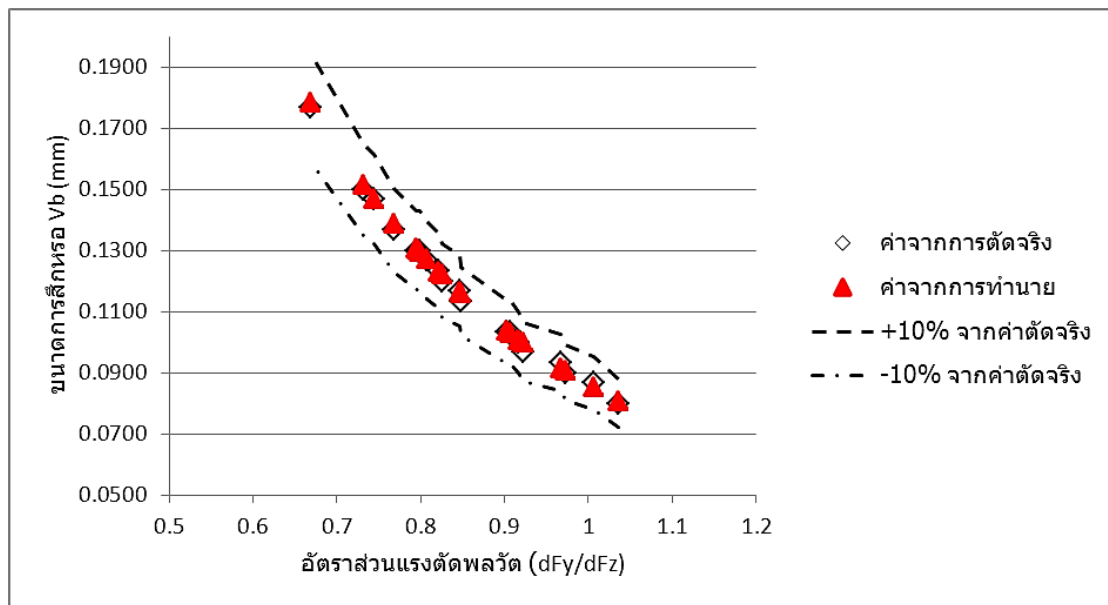
รูปที่ 4.38 ผลการทดลองที่ 2 การทดสอบความแม่นยำสมการทำนายขนาดการสีกหรือด้านข้าง
คมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงได้แก่ ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที
อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองที่ 2 รูปที่ 4.38 เส้นกราฟค่าทำนายขนาดการสีกหรือจากการวัดจริง
มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ $\pm 10\%$ ซึ่งครอบคลุม ค่าขนาดการสีกหรือจากการทำนาย ภายใต้
เงื่อนไขการตัดใหม่นี้ โดยสมการทำนายมีค่าความแม่นยำต่ำสุดเท่ากับ 94.92% ณ จุดที่ค่าความ
สีกหรือเท่ากับ 0.1033 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.39 ผลการทดลองที่ 3 การทดสอบความแม่นยำสมการทำนายขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงได้แก่ ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองที่ 3 รูปที่ 4.39 เห็นกราฟค่าทำนายขนาดการสึกหรอจากการวัดจริง มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ $\pm 10\%$ ซึ่งครอบคลุม ค่าขนาดการสึกหรอจากการทำนาย ภายใต้เงื่อนไขการตัดใหม่นี้ โดยสมการทำนายมีค่าความแม่นยำต่ำสุดเท่ากับ 93.52 % ณ จุดที่ค่าความสึกหรอเท่ากับ 0.1767 มิลลิเมตร



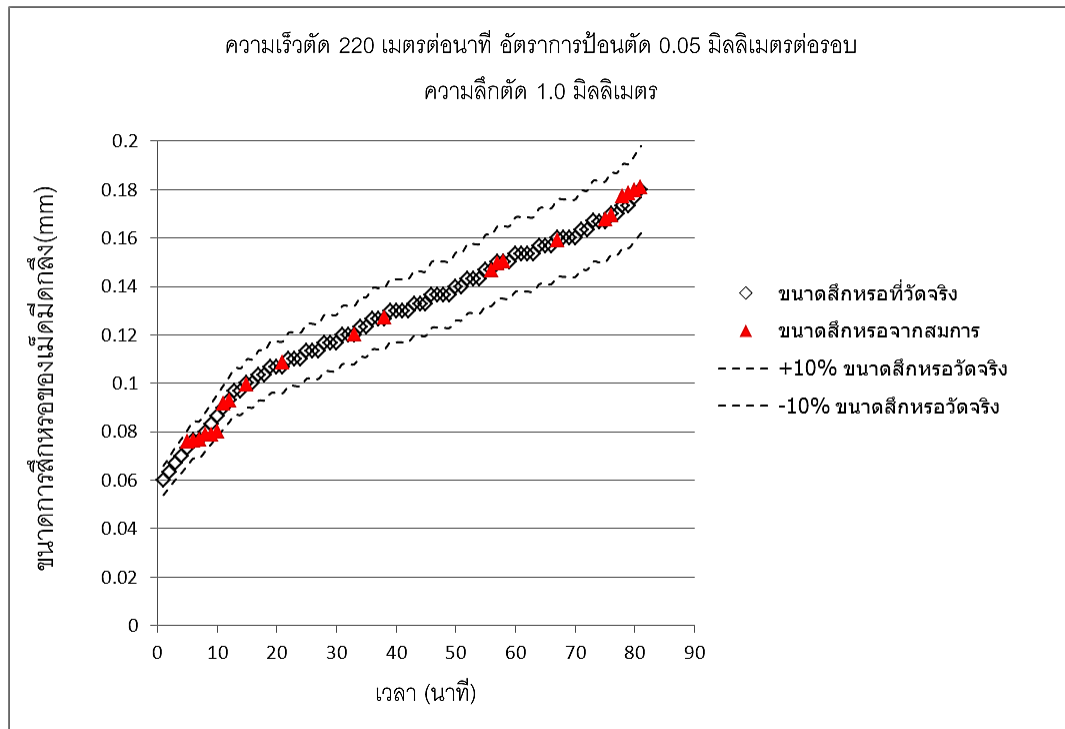
รูปที่ 4.40 ผลการทดลองที่ 4 การทดสอบความแม่นยำสมการทำนายขนาดการลึกรหรือด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วงได้แก่ ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองที่ 4 รูปที่ 4.40 เห็นกราฟค่าทำนายขนาดการลึกรหรือจากการวัดจริง มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ $\pm 10\%$ ซึ่งครอบคลุม ค่าขนาดการลึกรหรือจากการทำนาย ภายใต้เงื่อนไขการตัดใหม่นี้ โดยสมการทำนายมีค่าความแม่นยำต่ำสุดเท่ากับ 96.81% ณ จุดที่ค่าความลึกรหรือเท่ากับ 0.0967 มิลลิเมตร

จากผลการทดสอบสมการทำนายเงื่อนไขการตัดใหม่ภายนอกช่วงการทดลอง แสดงให้เห็นว่า สมการที่สร้างขึ้นจากเงื่อนไขการตัดในตารางที่ 3.3 สามารถทำนายค่าขนาดความลึกรหรือจากการตัดนอกช่วงได้แม่นยำ ภายใต้การตัดชิ้นงานจริงด้วยเงื่อนไขการตัดนอกช่วงที่กำหนด ค่าขนาดความลึกรหรือของเม็ดมีดกลึงที่ได้จากการทำนายนั้นมีความแม่นยำมากกว่า 90% ซึ่งอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ของค่าขนาดความลึกรหรือที่วัดได้จริง จึงกล่าวได้ว่าการทำนายขนาดการลึกรหรือของเม็ดมีดกลึงนี้ สามารถใช้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตเป็นตัวช่วยในการทำนายค่าได้ ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด หรือความลึกตัดเปลี่ยนแปลงไป อัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะไม่ตอบสนองตามหรือไม่เปลี่ยนแปลงตาม

4.5.2 ผลการทดสอบความแม่นยำสมการด้วยเงื่อนไขการตัดใหม่ภายนอกช่วงการทดลองเทียบกับเวลา

ทดสอบสร้างกราฟความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอโดยเทียบกับเวลา ตามตารางการออกแบบการทดลองที่ 4.1 เงื่อนไขการตัดใหม่ภายนอกช่วง

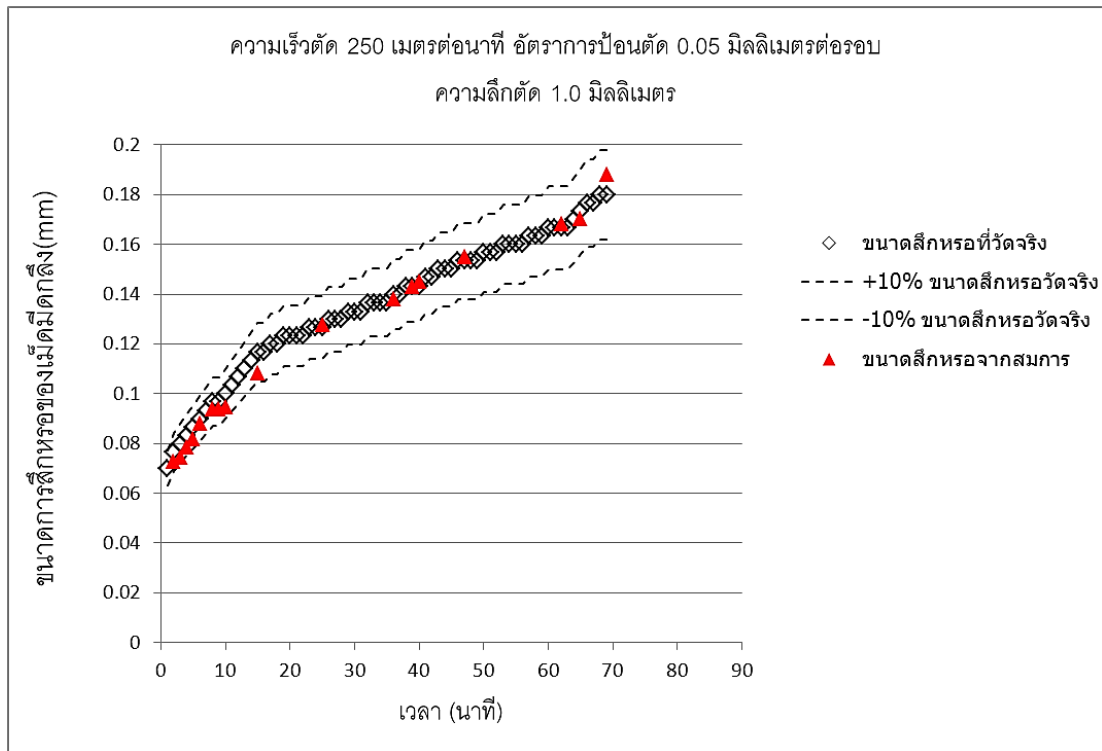


รูปที่ 4.41 ผลการทดลองที่ 1 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ

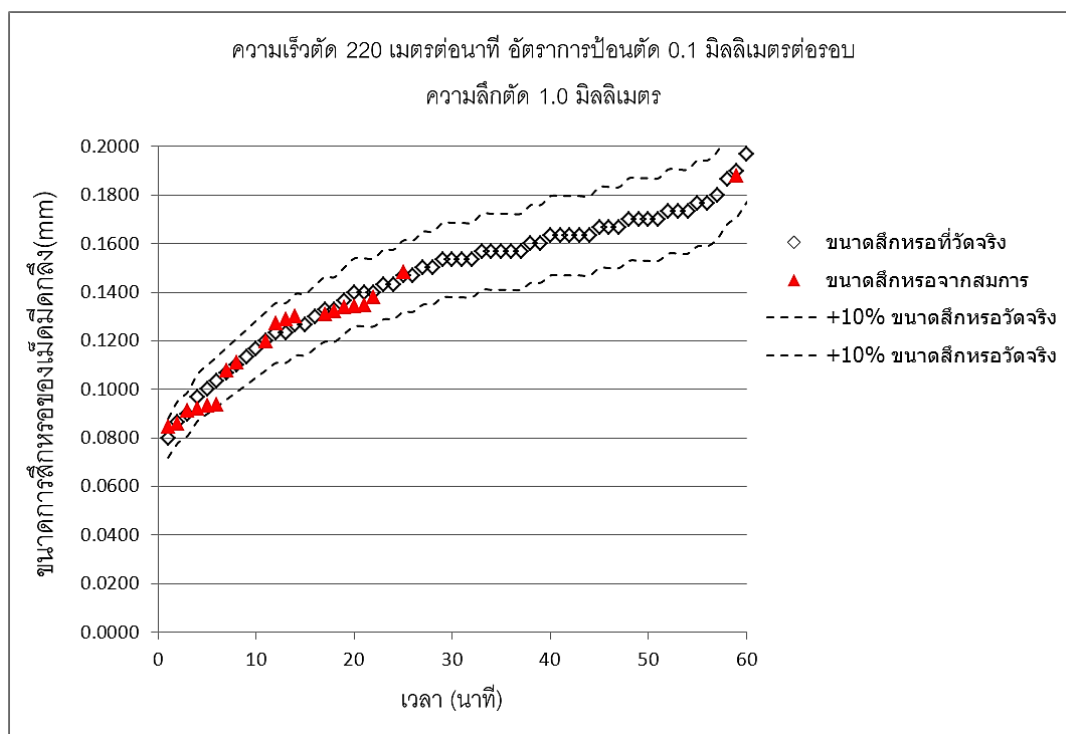
ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ภายนอกช่วงโดยเปรียบเทียบกับเวลา

ที่เงื่อนไข ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ

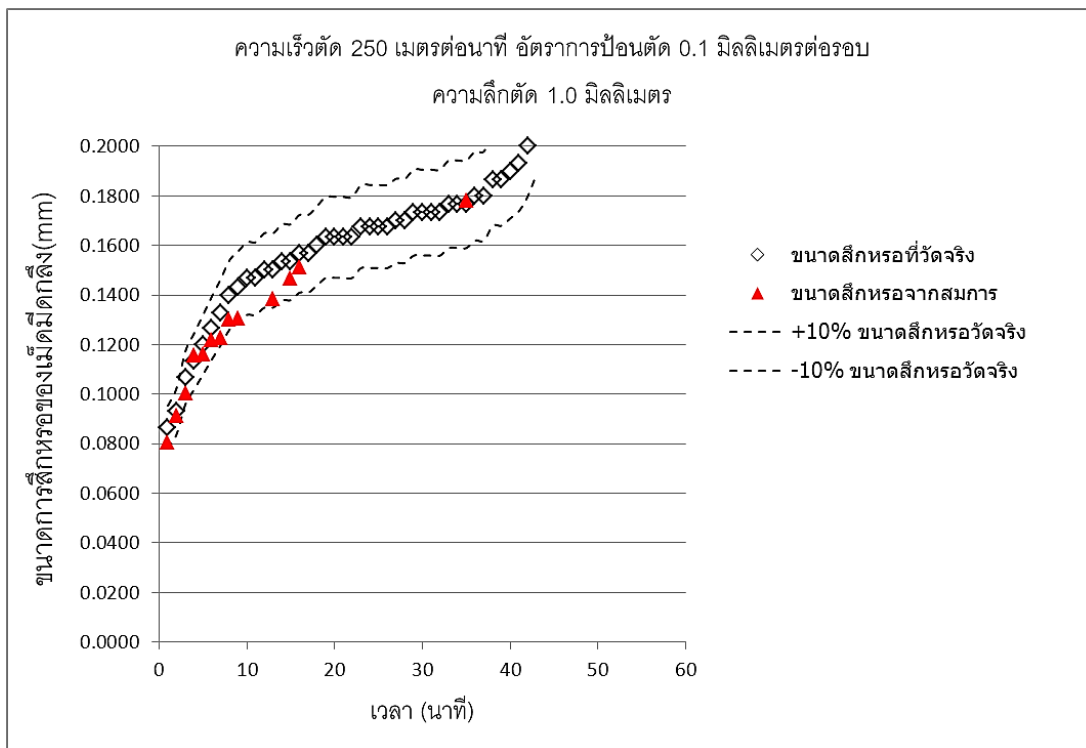
ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.42 ผลการทดลองที่ 2 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกช่วง โดยเปรียบเทียบกับเวลาที่เงื่อนไข ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.43 ผลการทดลองที่ 3 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ
ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่นอกช่วงโดยเปรียบเทียบกับเวลา
ที่เงื่อนไข ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.44 ผลการทดลองที่ 4 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดใหม่นอกช่วง โดยเปรียบเทียบกับเวลาที่เงื่อนไข ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.41 ถึงรูปที่ 4.44 พบว่าค่าขนาดการสึกหรอที่คำนวณได้จากสมการอยู่ในช่วง +10% และ -10% ของขนาดการสึกหรอที่เกิดจากการตัดจริง ซึ่งการทดสอบสมการนี้แสดงให้เห็นว่า สมการทำนายขนาดการสึกหรอเม็ดมีดกลึงที่ได้พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำและสามารถนำไปใช้ประมาณค่าขนาดการสึกหรอเม็ดมีดกลึงได้จริง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Flank wear) ของเม็ดมีดตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆที่เกิดจากการทดลองตัดจริง ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกในการตัด โดยอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) นี้ได้ถูกเสนอและสามารถคำนวณได้จากแรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dF_y) ในทิศอัตราการป้อนตัดต่อแรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dF_z) ในทิศความเร็วตัดที่เกิดขึ้นจากการตัดจริงในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ในสภาวะการตัดแบบแห้งโดยใช้การออกแบบทดลองแฟคทอเรียล เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของทุกปัจจัยเงื่อนไขการตัด และจากความสัมพันธ์ที่ได้ ถู้นำมาสร้างสมการจำลองเพื่อทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง เพื่อใช้ในการตรวจติดตามขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึง ในขณะกลึงชิ้นงานในอุตสาหกรรมกระบวนการกลึงได้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองของกระบวนการกลึงชิ้นงาน ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเงื่อนไขการตัดต่างๆ คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) ถู้นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับขนาดการสึกหรอของเม็ดมีด โดยพบว่าแนวโน้มของอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dF_y/dF_z) มีขนาดลดลงตามขนาดการสึกหรอที่มากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดต่างๆ ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ชิ้นงานหมุนด้วยความเร็วตัดสูงขึ้น เกิดแรงกระทำต่อเม็ดมีดในทิศของความเร็วตัดมากขึ้น เม็ดมีดเกิดการสึกหรอไวขึ้นกว่าการตัดด้วยความเร็วตัดค่าน้อยแรงตัดหลักพลวัต (dF_z) ซึ่งมีทิศทางอยู่ในทิศการหมุนของชิ้นงานจึงมีขนาดสูงขึ้น ผลการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการป้อนตัดพบว่า การป้อนมีดตัดด้วยอัตราการป้อนตัดค่าสูง เม็ดมีดมีขนาดสึกหรอสูงขึ้นพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและเม็ดมีดมีมากขึ้น ทำให้การตัดชิ้นงานยากขึ้นแนวโน้มเกิดการสั่นสะเทือนสูง ทำให้ผิวชิ้นงานมีรอยขรุขระมาก แรงตัดหลักพลวัต (dF_z) จะมีค่าสูงกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dF_y) ที่เกิดขึ้น ส่วนผลการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกตัดพบว่า การตัดชิ้นงานที่ระดับความลึกตัดมากขึ้นพื้นที่สัมผัสระหว่างคมมีดตัดกับชิ้นงานมีมากขึ้น เกิดแรงกระทำต่อเม็ดมีดมากขึ้น เม็ดมีดสึกหรอไว แรงตัดที่เกิดขึ้น

จะมีค่าสูงมีแนวโน้มสั่นสะเทือนสูงมากการตัดชิ้นงานทำได้ยากขึ้นความเรียบผิวชิ้นงานไม่ดีหรือ
ขรุขระมากขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีขนาดมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่เกิดขึ้น

จากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดต่างๆ ไม่ได้ทำให้ความสัมพันธ์ของ
อัตราส่วนแรงตัดพลวัตกับขนาดการสึกหรอเปลี่ยนแปลงตาม แนวโน้มของกราฟอัตราส่วนแรง
ตัดพลวัตมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันเมื่อขนาดการสึกหรอของมีดตัดมีขนาดมากขึ้น ไม่
ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จึงกล่าวได้ว่า ขนาดการสึกหรอของมีดตัด
สามารถถูกทำนายได้จากอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดและผลการทดลองนี้สามารถ
นำไปใช้เป็นแนวทางการพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอของมีดตัดในขณะกลึงชิ้นงาน
โดยอาศัยอัตราส่วนแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้นได้

ในการสร้างแบบจำลองสมการทำนายขนาดการสึกหรอของมีดกลึง ความสัมพันธ์ของ
ขนาดการสึกหรอของมีดตัด อัตราส่วนแรงตัดพลวัต ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และระดับ
ความลึกตัดตัวแปรทั้งหมดได้ถูกนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบจำลองสมการแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนน
เชียล เพราะมีรูปแบบสมการในลักษณะเดียวกับสมการทฤษฎีการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน
[24, 25] ซึ่งค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานมีผลจากการสึกหรอของมีดตัดด้วย และรูปแบบ
ความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอกับเวลาตามทฤษฎีของเทย์เลอร์มีลักษณะเป็นแบบเอกซ์โปเนน
เชียลด้วย ดังนั้นจึงอาศัยความสัมพันธ์นี้พัฒนาสมการจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร
ตอบสนอง ได้แก่ ขนาดการสึกหรอของมีดตัด กับตัวแปรต้น ได้แก่ค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัต
ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และระดับความลึกตัด ตัวแปรทั้งหมดถูกวิเคราะห์ความสัมพันธ์
ร่วมกัน โดยวิธีวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองสมการ
ทำนายสามารถหาได้ด้วยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งมีสมการดังนี้

$$V_b = e^{-1.43} \cdot V^{-0.209} \cdot F^{-0.0574} \cdot D^{-0.034} \cdot \left(\frac{dF_y}{dF_z}\right)^{-1.81}$$

จากสมการทำนายพบว่า อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ส่งผลต่อขนาดการสึก
หรอของมีดตัดมากที่สุด รองลงมาคือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัดและระดับความลึกตัด
ตามลำดับ จากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดไม่ว่าการเพิ่มความเร็วตัด การเพิ่มอัตราการป้อน
ตัด หรือการเพิ่มระดับความลึกตัด ส่งผลให้แรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีขนาดมากกว่าแรงป้อนตัด
พลวัต (dFy) ของทุกเงื่อนไขการตัดจึงส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าลดลง และด้วยขนาด

สัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์เลขยกกำลังของอัตราส่วนแรงตัดพลวัตซึ่งมีค่ามากที่สุดดังนั้นก็จึงทำให้ขนาดการสึกหรอจึงมีขนาดมากขึ้นตาม

การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการทำนายขนาดการสึกหรอ โดยทดลองตัดชิ้นงานจริง จากการกำหนดเงื่อนไขการตัดใหม่ภายนอกขอบเขตที่ไม่ซ้ำกับการทดลองเดิม สำหรับการทดสอบภายนอกขอบเขตของการทดลองเดิม ที่เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 220 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตรสมการทำนายมีความแม่นยำเท่ากับ 93.52 % จากผลการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการ แสดงให้เห็นว่าสมการทำนายขนาดการสึกหรอของมีดตัดมีความแม่นยำ และสามารถใช้ในการทำนายขนาดการสึกหรอได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง สมการทำนายขนาดการสึกหรอของมีดกลึงในกระบวนการกลึง ถูกโปรแกรมลงในระบบการตรวจติดตามของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ ระบบจะตรวจจับสัญญาณแรงตัดและคำนวณหาอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น ในขณะนั้น เพื่อประมวลผลหาขนาดการสึกหรอของมีดกลึงที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ภายใต้เงื่อนไขการตัดใดๆจะทำให้เครื่องจักรกลอัจฉริยะทราบหรือแจ้งให้ผู้ปฏิบัติงานทราบถึงขนาดการสึกหรอของมีดกลึงในขณะนั้น เพื่อเตรียมความพร้อมในการเปลี่ยนมีดกลึงใหม่ เพื่อป้องกันไม่ให้งานมีความเรียบผิวไม่ดีจากการใช้มีดตัดที่สึกหรอเกินกำหนด หรือใช้สัญญาณแรงตัดในขณะนั้นเป็นตัวกำหนดให้เครื่องจักรกลอัจฉริยะเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดใหม่เพื่อให้มีดตัดสึกหรอช้ามากขึ้น และสามารถยืดอายุการใช้งานมีดได้ เป็นผลให้ระบบกระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้ผลิตผลมากขึ้น ปัญหาของเสียอันเนื่องมาจากผิวชิ้นงานไม่ดีจะลดน้อยลงเป็นประโยชน์แก่อุตสาหกรรมกระบวนการกลึงต่อไปในอนาคตได้

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

การทดลองกลึงชิ้นงานตามวัตถุประสงค์งานวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอของมีดมีดกลึงและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขการตัดต่างๆ จึงได้ออกแบบการทดลองโดยเลือกการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น เพื่อลดเวลาในการทดลอง เพื่อให้มีดกลึงสึกหรอได้รวดเร็ว และแรงตัดที่เกิดขึ้น มีความชัดเจนอันเนื่องมาจากไม่มีชั้นฟิล์มของสารหล่อเย็นมาเป็นตัวกั้นระหว่างชิ้นงานกับมีดตัด และออกแบบโดยเลือกมุมคายเศษโลหะเป็นมุมลบเพื่อให้เศษโลหะแตกหักได้ดี เกิดแรงตัดชัดเจนซึ่งส่งผลให้มีดกลึงสึกหรอได้รวดเร็ว มากกว่าการเลือกใช้มุมคายเศษโลหะมุมบวก

จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอของมีดกลึงและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่เกิดขึ้น พบว่าที่เงื่อนไขการตัดต่างๆกัน ขนาดแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นตามระยะของการสึกหรอมีขนาดไม่เท่ากันในทุกเงื่อนไขการตัด ในขณะที่เริ่มแรกตัดชิ้นงานด้วยมีดตัดใหม่ มีดตัดจะสึกหรอไวและแรงตัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย ในขณะที่แรงตัดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดมากขึ้นตามขนาดการสึกหรอที่มากขึ้นการเพิ่มความเร็วดัด อัตราการป้อนตัด และระดับความลึกตัดทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้นมีขนาดมากขึ้นด้วย เนื่องจากมีดตัดสัมผัสกับชิ้นงานมากขึ้น แรงตัดที่เกี่ยวข้องของในงานวิจัยนี้มีสองแรงคือ แรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ซึ่งอยู่ในทิศทางการป้อนตัดซึ่งจะแปรผันตามความขรุขระของชิ้นงานที่มากขึ้นอันเนื่องมาจากการสึกหรอของมีดกลึง และแรงตัดหลักพลวัต (dFz) ซึ่งมีทิศอยู่ในทิศการหมุนของชิ้นงานซึ่งจะแปรผันตามชนิดวัสดุชิ้นงาน ปริมาณเศษโลหะ การสั่นสะเทือนและขนาดการสึกหรอของมีดตัด แรงตัดทั้งสองชนิดส่งผลโดยตรงต่อขนาดการสึกหรอของมีดมีดกลึง โดยปกติแล้วขนาดแรงตัดจะมีขนาดมากหรือน้อยตามชนิดวัสดุชิ้นงานที่ถูกตัดและเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน และการนำแรงตัดที่เกิดขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับขนาดการสึกหรอที่เกิดขึ้นนั้นจำเป็นต้องกำจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดวัสดุ ความแข็งชิ้นงานที่ไม่เกี่ยวข้องเหล่านี้ออกไปโดยการทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ซึ่งสามารถกำจัดอิทธิพลที่ไม่เกี่ยวข้องนี้ออกไปได้ ส่วนแรงตัดแนวรัศมีพลวัต (dFx) ไม่ถูกนำมาใช้ทำอัตราส่วนแรงตัดเนื่องจากแรงตัดอยู่ในแนวรัศมีชิ้นงาน ซึ่งมีผลกระทบน้อยต่อการสึกหรอ [8]

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอของมีดกลึงและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) พบว่ากราฟความสัมพันธ์มีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ไม่ว่าจะเงื่อนไขการตัดเช่น ความเร็วดัด อัตราการป้อนตัด หรือระดับความลึกตัดจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ดังเช่น การทดลองตัดชิ้นงานด้วยเงื่อนไขที่กำหนดเดิม หรือเงื่อนไขการตัดที่กำหนดใหม่ ภายนอกขอบเขตการทดลองเดิม เมื่อขนาดการสึกหรอมากขึ้นมีดตัดสัมผัสกับชิ้นงานที่หมุนด้วยความเร็วดัดซึ่งมีแรงตัดหลักพลวัต (dFz) เป็นองค์ประกอบในทิศการหมุนมีขนาดมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่เกิดขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) มีค่าลดลงในทุกเงื่อนไขการตัดที่เกิดขึ้น ดังนั้นจากผลการทดลองของทุกเงื่อนไขการตัด กราฟความสัมพันธ์มีแนวโน้มลดลงไม่เปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) เป็นตัวแปรอิสระที่ไม่ขึ้นกับเงื่อนไขการตัดใดๆ จึงสามารถใช้ในการทำนายขนาดการสึกหรอของมีดกลึงได้

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการทำวิจัย

- 1 สมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงที่ได้มามีความแม่นยำที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ถูกสร้างขึ้นจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลภายใต้เงื่อนไขการตัดที่กำหนดไว้ดังตารางการออกแบบการทดลองที่ 3.3 เท่านั้น ดังนั้นการนำสมการไปใช้งานที่เงื่อนไขการตัดอื่น ๆ นอกเหนืองานวิจัยเล่มนี้ควรศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น
- 2 เงื่อนไขการตัดในงานวิจัยเล่มนี้ เหมาะสมกับการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S45C บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ด้วยเม็ดมีดกลึงเคลือบผิวคาร์ไบด์เท่านั้น การเปลี่ยนวัสดุชิ้นงานและชนิดของเม็ดมีดกลึงเพื่อใช้ในการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดนี้ หรือเงื่อนไขการตัดใหม่ จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้นได้ก่อนทำการทดลอง เพื่อความปลอดภัยในขณะปฏิบัติงาน
- 3 การติดตั้งเครื่องมือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องของทั้งหมดในการทำวิจัยบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีใช้เวลาติดตั้งค่อนข้างนานรวมถึงใช้เวลาการดำเนินการทดลองเพื่อวัดขนาดการสึกหรอ ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานควรเตรียมร่างกายให้พร้อม และต้องมีทักษะ มีความชำนาญในการใช้เครื่องมือเพื่อความปลอดภัย
- 4 ความคลาดเคลื่อนจากการถอดและใส่มีดตัดเข้าด้ามมีด และความคลาดเคลื่อนของการวัดขนาดการสึกหรอ เนื่องจากมีความจำเป็นต้องถอดและใส่มีดกลึงเข้าออกจากด้ามมีดตัดเพื่อนำไปวัดขนาดการสึกหรออย่างสม่ำเสมอ ทำให้ตำแหน่งของปลายคมมีดตัดคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเดิม ทำให้มีดตัดสึกหรอเกิดไม่ตรงตำแหน่งเดิม และเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดได้
- 5 ในการกลึงชิ้นงานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาาน คมมีดตัดเกิดความร้อนสูง ทำให้วัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มมากขึ้น มีผลกระทบต่อค่าแรงตัดที่เกิดขึ้น เพราะมีดกลึงจะเข้าตัดชิ้นงานได้ง่ายและแรงตัดจึงมีขนาดน้อยกว่าการกลึงชิ้นงานที่อุณหภูมิชิ้นงานเย็นตัว

5.4 ข้อเสนอแนะ

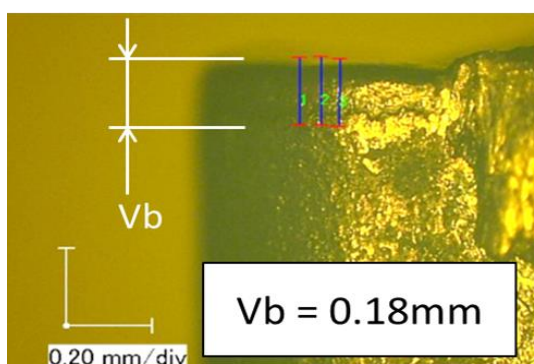
5.4.1 ข้อเสนอแนะในการใช้งานเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

- 1 ควรปรับตั้งค่าพิกัดตำแหน่งปลายคมตัดของมีดกลึง (Calibration) ก่อนการตัดชิ้นงานทุกครั้ง เพื่อมีดกลึงสามารถตัดชิ้นงานได้ตรงตำแหน่งลึกหรือเดิม วิธีนี้สามารถช่วยลดความแปรปรวนของตำแหน่งคมมีดตัด และเพื่อควบคุมการสึกหรอให้ตรงตำแหน่งเดิม และสามารถวัดตรงตำแหน่งลึกหรือเดิมได้อย่างถูกต้อง
- 2 เนื่องจากงานวิจัยนี้เลือกใช้เม็ดมีดกลึงเคลือบผิวด้วยคาร์ไบด์ ในงานวิจัยในอนาคต ควรลองใช้เม็ดมีดกลึงแบบไม่เคลือบผิว เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณแรงตัดและขนาดการสึกหรอมีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดรวมไปถึงศึกษาไปถึงปัจจัยเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงที่แตกต่างกัน
- 3 ในการใช้งานเครื่องกลึงซีเอ็นซี ควรทำความสะอาด เป่าลมเศษโลหะ ไม่ให้ไปแทรกเกาะระหว่างชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ได้ ภายในเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยเฉพาะด้ามมีดตัดทุกครั้งก่อนดำเนินการตัดชิ้นงาน เพราะเศษโลหะที่ไม่ต้องการหลุดอาจจะเข้าไปแทรกระหว่างฐานรองเม็ดมีดของด้ามมีดตัด ซึ่งจะส่งผลให้ตำแหน่งของปลายมีดตัดเปลี่ยนไป และอาจทำให้เกิดการสึกหรอลักษณะแหงนได้ (Notch wear)
- 4 ในการใช้งานเครื่องขยายสัญญาณแรงตัด (Charge amplifier) ควรต่อสายดินและกดสวิตช์รีเซ็ตสัญญาณทุกครั้งก่อนทำการบันทึกสัญญาณแรงตัดลงในเครื่องฮาร์ดดิสก์ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนภายนอก และสัญญาณแรงตัดเก่าที่อาจค้างค่าอยู่ภายในเครื่องขยายสัญญาณ
- 5 ในการทำวิจัยในอนาคตที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบขนาดการสึกหรอและแรงตัด ควรลองเปลี่ยนวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งมากกว่า เกรด S45C เพื่อศึกษาขนาดการสึกหรอและสัญญาณแรงตัดที่เปลี่ยนแปลงไป เพราะมีดตัดจะสึกหรอไวขึ้นเนื่องจากวัสดุชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น
- 6 ในการทำวิจัยในอนาคต ควรลองใช้ มุมคายเศษโลหะค่าบวก (Positive rake angle) ตัดชิ้นงาน เพื่อศึกษาลักษณะการสึกหรอ เศษโลหะ และเปรียบเทียบสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น และเพื่อพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอได้ครอบคลุมการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมมากขึ้น

5.4.2 ข้อเสนอแนะในการประมวลผลสัญญาณแรงตัด

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6] ได้มีข้อเสนอแนะในการศึกษาเพื่อเติม เพื่อปรับปรุงผลการประมวลผลสัญญาณแรงตัดพลวัตที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์ ในโดเมนความถี่ โดยทำการคัดแยกสัญญาณความถี่ในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป เช่น แรงจากการแตกหักของเศษโลหะ เพื่อแยกให้เหลือแต่แรงตัดพลวัตที่ไม่ได้มีอิทธิพลจากแรงของเศษโลหะปนอยู่ เพื่อทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัตในการประมาณค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานให้ถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถคัดแยกสัญญาณแรงตัดอื่นๆซึ่งถูกรวมกันอยู่ออกไปได้ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่เพื่อใช้ในการแยกสัญญาณต่างๆในแต่ละช่วงความถี่ให้ชัดเจน

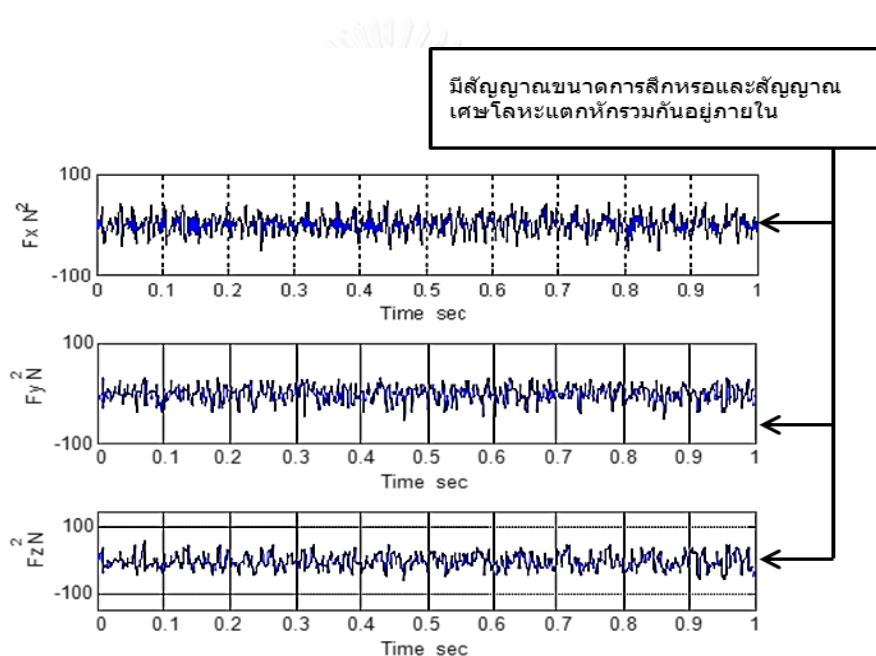
จากเหตุผลดังกล่าว พบว่าความขรุขระของชิ้นงานมีมากขึ้นตามขนาดการสึกหรอของมิดตัดที่เพิ่มขึ้น เศษโลหะจะแตกหักมากขึ้น โดยพิจารณาจากตัวอย่างผลการทดลองตัดชิ้นงาน ที่ขนาดการสึกหรอของมิดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.1 มีลักษณะการแตกหักของเศษโลหะ ดังรูปที่ 5.2 พบว่าขนาดแรงตัดพลวัตที่บันทึกได้จากไดนาโมมิเตอร์ในโดเมนเวลามีอิทธิพลจากแรงเศษโลหะแตกหักรวมอยู่ด้วยดังรูปที่ 5.3 ถ้าไม่แยกสัญญาณโลหะแตกหักออกไป อัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดนี้จะไม่สามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ของขนาดการสึกหรอของมิดตัดที่แท้จริงได้ถูกต้องมากนัก ดังนั้นสัญญาณแรงตัดที่บันทึกได้ ในรูปโดเมนเวลารูปที่ 5.3 ถูกแปลงให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์เพื่อแยกช่วงความถี่แรงตัดพลวัตที่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก หรือความถี่ของขนาดการสึกหรอมิดตัดแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



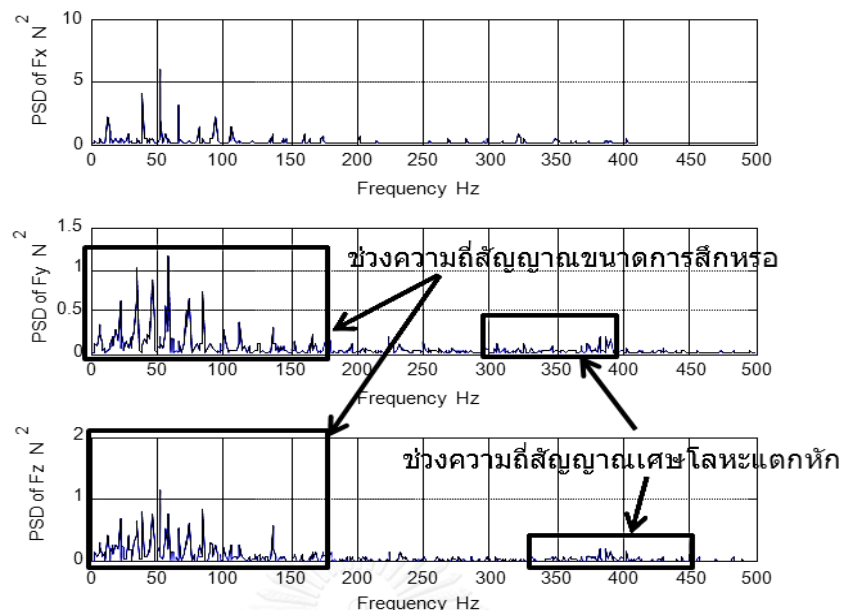
รูปที่ 5.1 ตัวอย่าง ขนาดการสึกหรอของมิดมีดถึงเท่ากับ 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างเศษโลหะแตกหัก ที่ขนาดการสีกหรือของเม็ดมีดถึงเท่ากับ 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา ที่ให้เศษโลหะแตกหัก ที่ขนาดการสีกหรือของเม็ดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ ที่ให้เศษโลหะแตกหัก ที่ขนาดการสึกหรอของมีดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร

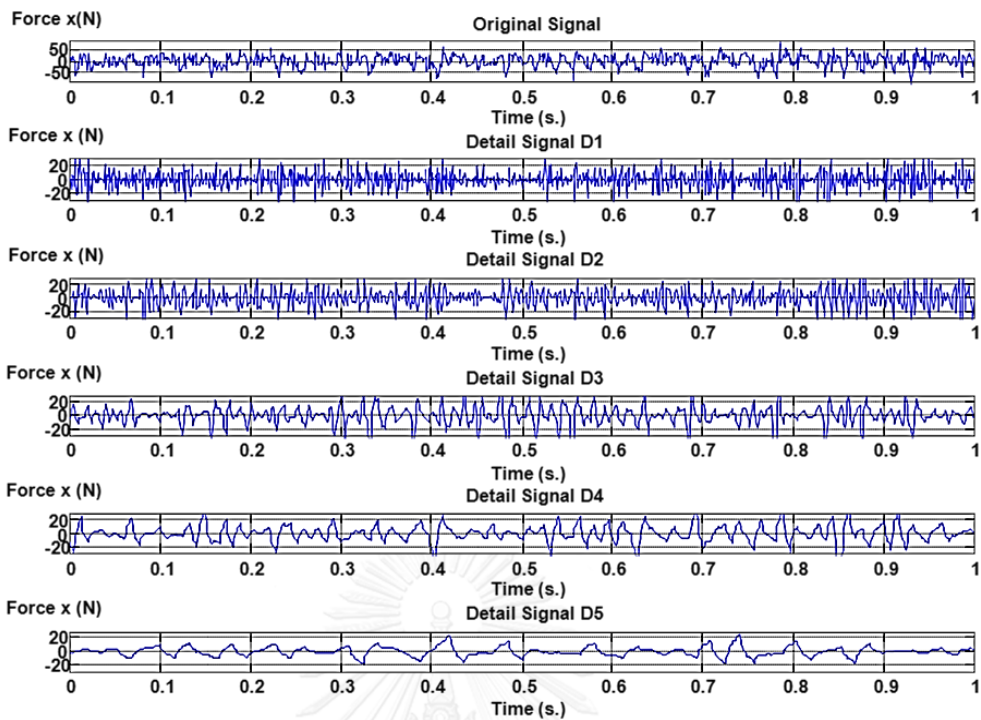
จากรูปที่ 5.4 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นการแตกหักแบบผสม (Mixed broken chip) เพราะมีทั้งเศษโลหะเกลียวยาวและเกลียวสั้นผสมกัน โดยปกติแล้วความถี่เศษโลหะแบบแตกหักเกลียวสั้นจะอยู่ในช่วงความถี่สูงกว่าเศษโลหะแบบต่อเนื่องเกลียวยาว [3] ส่วนความถี่ขนาดการสึกหรอสามารถวิเคราะห์ได้จากขนาดค่าความแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมซึ่งมีบริเวณกว้างและแอมพลิจูดแรงตัดพลวัตมีขนาดใหญ่ ซึ่งหมายถึงมีพลังงานสะสมเกิดมากเนื่องจากมีดสึกหรอไปแล้ว ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้า [35, 37, 40] เนื่องจากคมมีดสึก มีดตัดขึ้นงานลำบาก เกิดแนวโน้มสั่นสะเทือน (Chatter) เศษโลหะแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ ความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมมีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ในรูปที่ 5.4 ความถี่ของเศษโลหะแบบแตกหักยังผสมกับความถี่ขนาดการสึกหรออยู่ ซึ่งยังไม่ได้ถูกแยกออกจากกัน การทำอัตราส่วนแรงตัดพลวัตจะไม่นำช่วงสัญญาณความถี่ที่เกี่ยวกับเศษโลหะแตกหักมาพิจารณาเพื่อความแม่นยำในการทำนายค่าขนาดการสึกหรอของมีดตัด

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการเพื่อแยกสัญญาณความถี่ออกจากกันได้ดียิ่งขึ้น คือ การวิเคราะห์การแยกสัญญาณด้วยโปรแกรมเวฟเล็ต (Wavelet) [41] เป็นการเปลี่ยนสัญญาณแรงตัดพลวัตจากโดเมนเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งจะช่วยให้แยกสัญญาณแรงตัดพลวัตของช่วงความถี่ต่างๆออกจากกันในแต่ละระดับชั้นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เพื่อที่จะนำมาใช้หาช่วงความถี่ที่เกิด

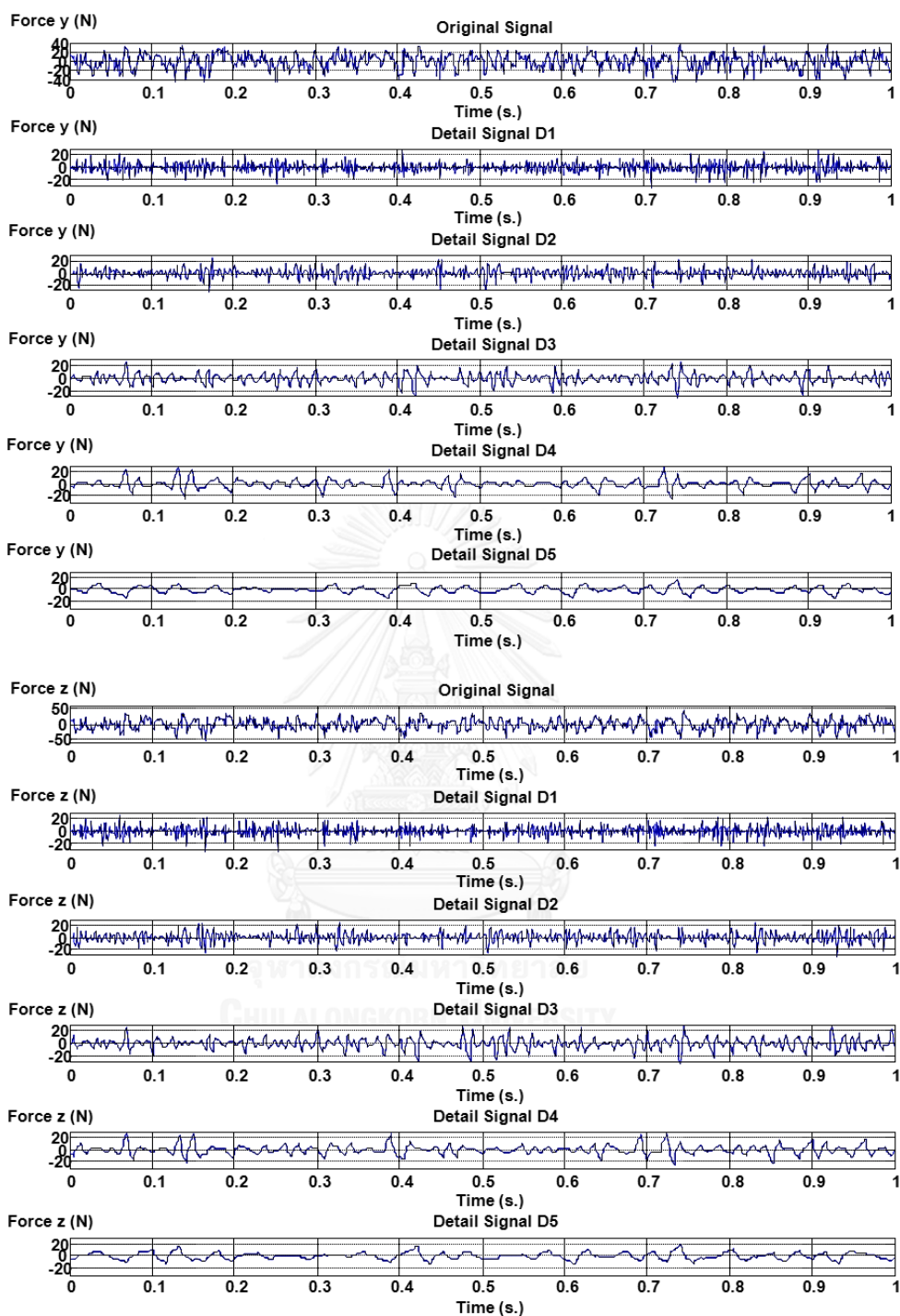
จากขนาดการสีกหรือที่แท้จริง เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของขนาดการสีกหรือและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตได้อย่างถูกต้องมากขึ้น แม้ว่าที่เงื่อนไขการตัดจะให้เศษโลหะเป็นแบบใดก็ตาม

การแปลงเวฟเล็ตสามารถวิเคราะห์สัญญาณได้ทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [42, 43] ลักษณะสัญญาณเวฟเล็ตมีหลายลักษณะ โดยเรียกลักษณะต่างๆเหล่านี้ว่า แฟมิลี (Family) ซึ่งแต่ละแฟมิลีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป เช่น เวฟเล็ตแบบฮาร์ เวฟเล็ตแบบเมเยอร์ เวฟเล็ตแบบคอปเชิส เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ ส่วนข้อเสนอแนะได้เลือกการทดลองใช้เวฟเล็ตแบบคอปเชิส (Daubechies) ในการคัดกรองสัญญาณ เพราะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา อีกทั้งยังเป็นคลื่นเวฟเล็ตที่นิยมใช้กันในงานวิจัยอย่างแพร่หลาย ที่สามารถแยกสัญญาณอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปได้ เช่นการแยกสัญญาณเศษโลหะแตกหักออกจากสัญญาณขนาดสีกหรือของมีดตัดได้ [44-46]

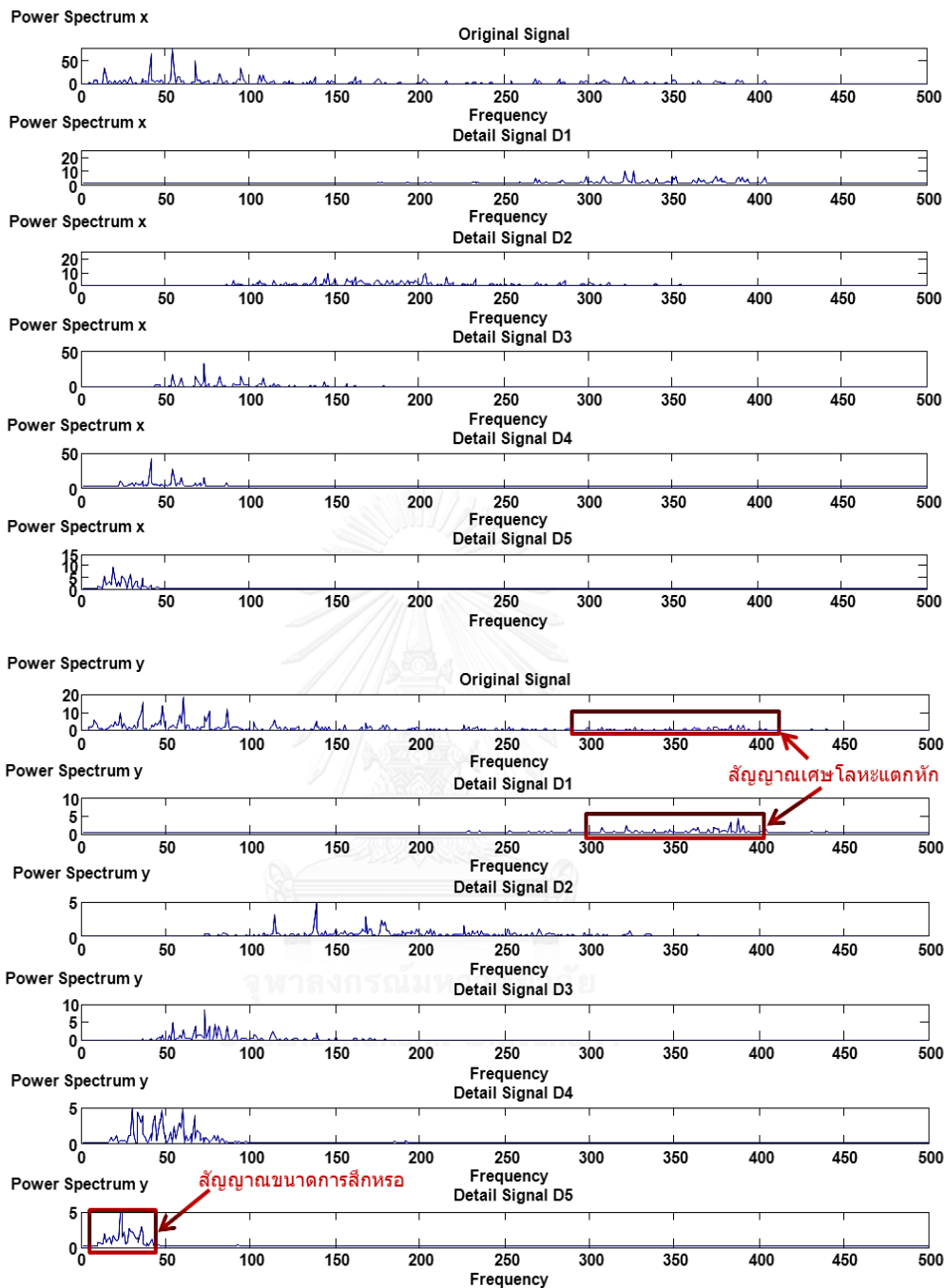
รูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 แสดงตัวอย่างผลการทดลองทำการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา ส่วนรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างผลการทดลองทำการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ ด้วยโปรแกรมเวฟเล็ตที่เงื่อนไขการตัดเดียวกันจะพบว่า เวฟเล็ตสามารถการแยกสัญญาณข้อมูลในแต่ละระดับได้อย่างชัดเจน สัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ที่ยังไม่ถูกแยกซึ่งอยู่ในระดับบนสุดเรียกว่าระดับศูนย์จะถูกแยกสัญญาณลงไปเป็นระดับหนึ่ง สัญญาณระดับหนึ่งจะถูกแยกลงไปได้สัญญาณระดับสอง สัญญาณจะถูกแยกลงไปตามลำดับจนครบที่ระดับที่ห้าระดับสุดท้ายตามที่โปรแกรมเวฟเล็ตถูกออกแบบไว้ โดยสังเกตรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ที่ระดับบนคือระดับหนึ่ง สามารถแยกสัญญาณข้อมูลความถี่สูงซึ่งเป็นสัญญาณเศษโลหะชิ้นๆเล็กๆแตกหัก และที่ระดับสุดท้ายด้านล่างระดับที่ห้าสามารถแยกสัญญาณความถี่ต่ำได้นั้นคือสัญญาณแรงตัดพลวัตจากขนาดการสีกหรือมีดตัดได้ โดยสังเกตจากขนาดความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมที่มีฐานกว้างและมีแอมพลิจูดขนาดใหญ่ ซึ่งหมายถึงมีพลังงานสะสมของแรงตัดพลวัตที่เกิดจากมีดตัดสีกหรือ ดังนั้นเมื่อทราบช่วงความถี่ของสัญญาณขนาดการสีกหรือมีดตัดแล้ว จึงสามารถนำสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาของระดับที่ห้าของรูปที่ 5.6 นี้ ไปประมวลผลอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) เพื่อนำไปอธิบายความสัมพันธ์กับขนาดการสีกหรือของมีดตัดได้ดียิ่งขึ้น



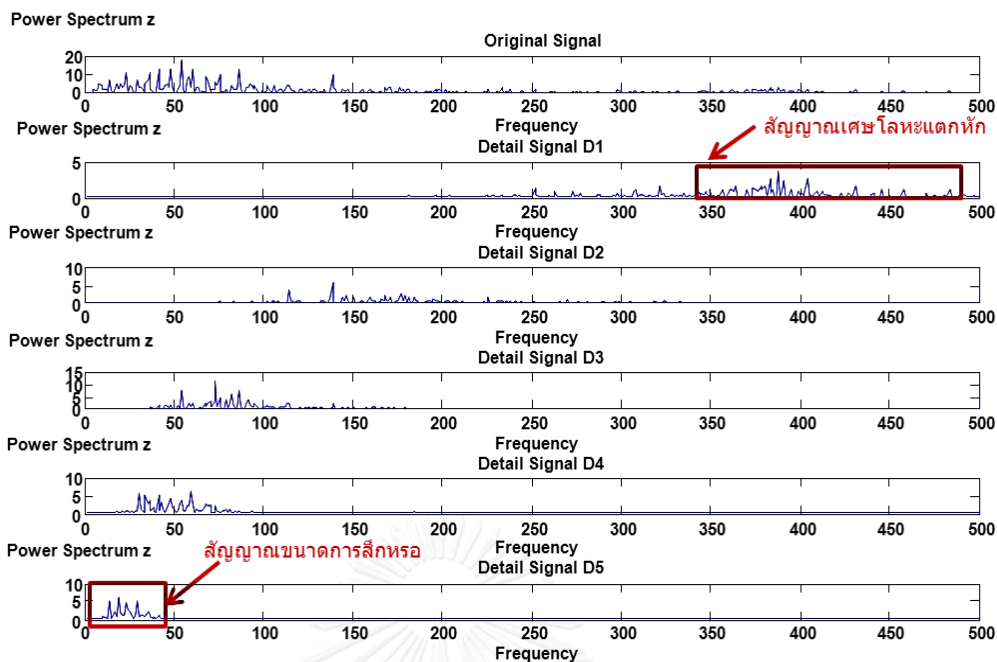
รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFx ในโดเมนเวลา ด้วยการแปลงเวฟเล็ต
 ที่ขนาดการสีกหราชอาณาจักรของมีดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ
 ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงตัดพลวัต dF_y และ dF_z ในโดเมนเวลา ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ที่ขนาดการสีกหรือของมีดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร

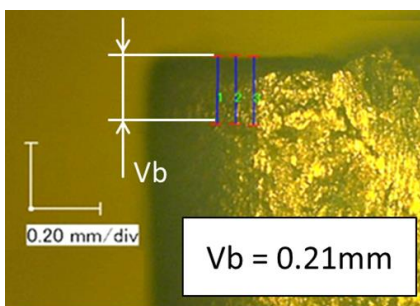


รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFx และ dFy ในโดเมนความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ที่ขนาดการสั่นไหวของมีดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร

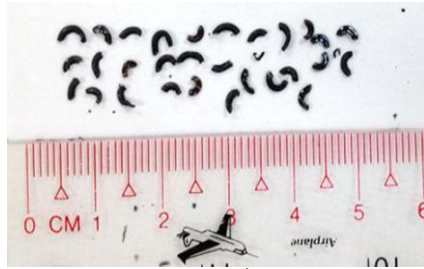


รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFz ในโดเมนความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ที่ขนาดการสีกหระของมีดตัด 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร

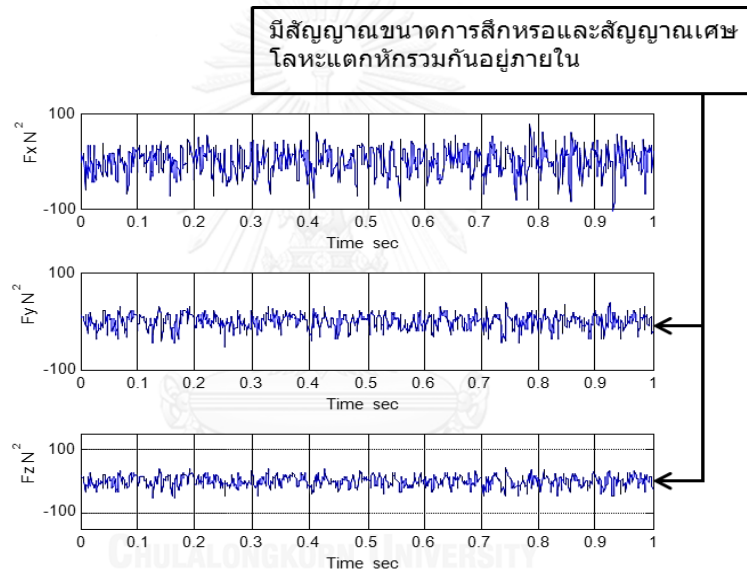
ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการทดลองตัดชิ้นงาน ที่ขนาดการสีกหระของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.9 มีลักษณะการแตกหักของเศษโลหะดังรูปที่ 5.10



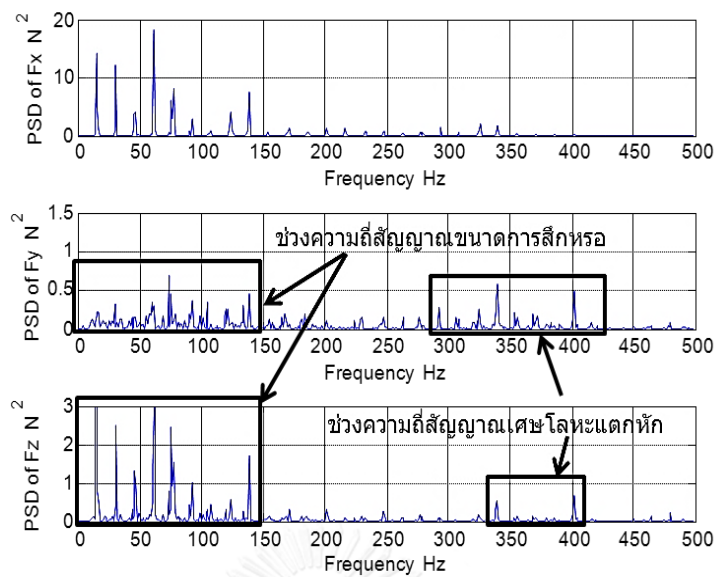
รูปที่ 5.9 ตัวอย่างขนาดการสีกหระของมีดตัด เท่ากับ 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



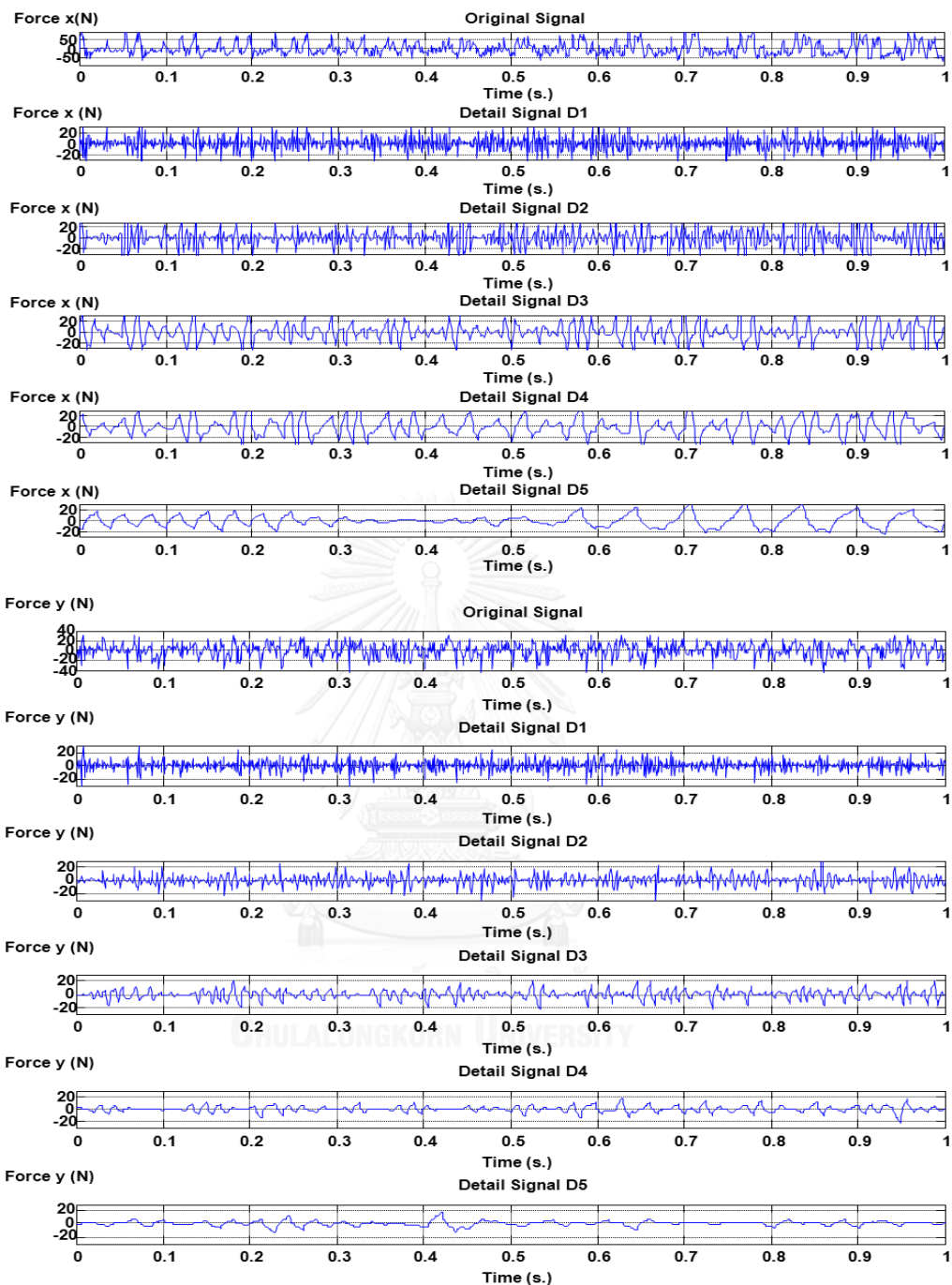
รูปที่ 5.10 ตัวอย่างเศษโลหะแตกหัก ที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดถึงเท่ากับ 0.18 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



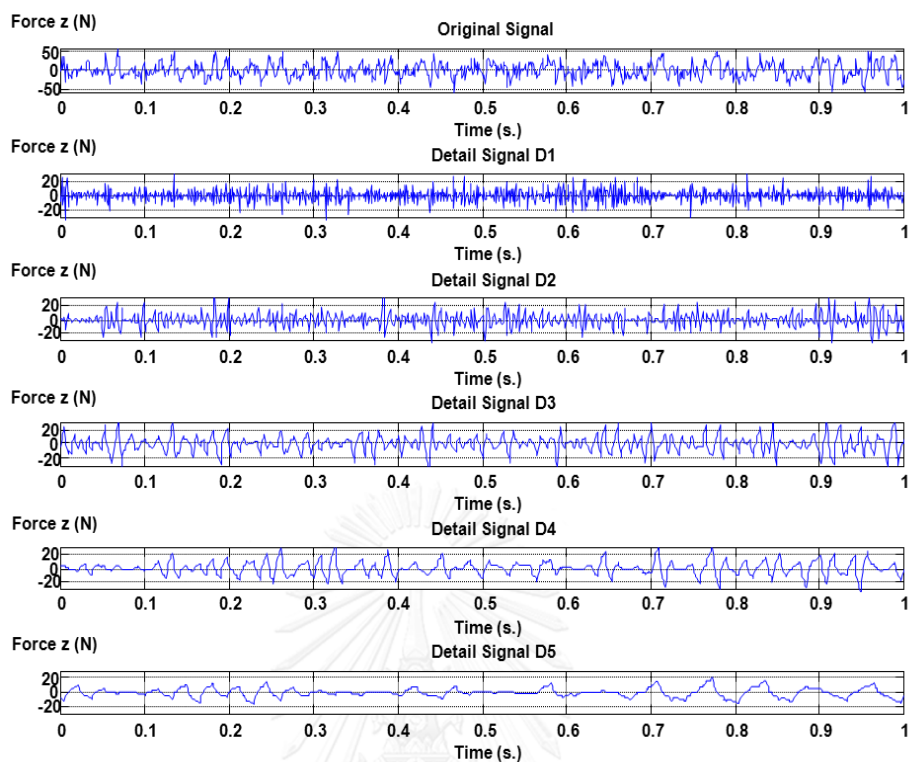
รูปที่ 5.11 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา ที่ให้เศษโลหะแตกหัก ที่ขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



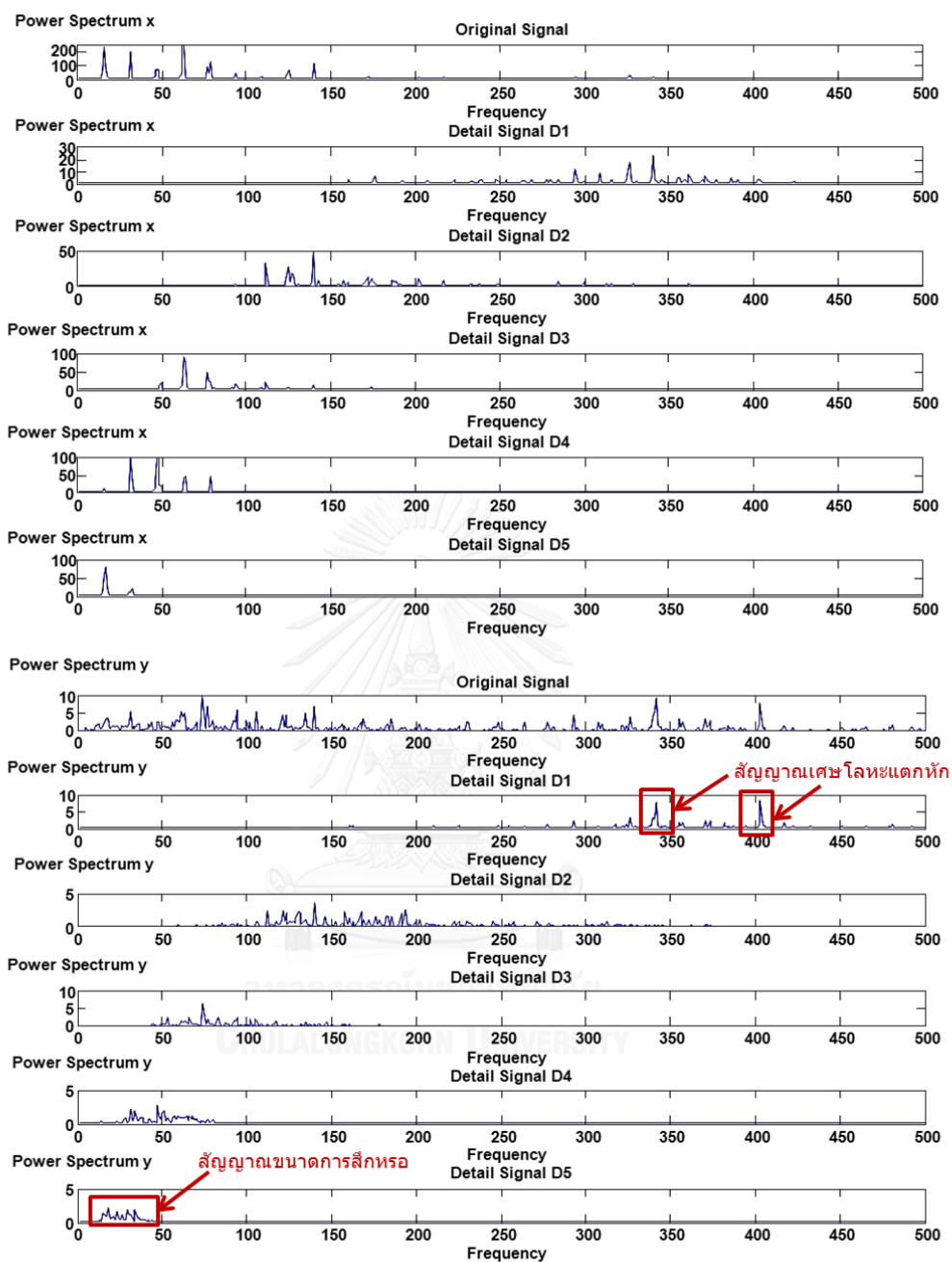
รูปที่ 5.12 ตัวอย่างลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ ที่ให้เศษโลหะแตกหัก ที่ขนาดการสีกหรือของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



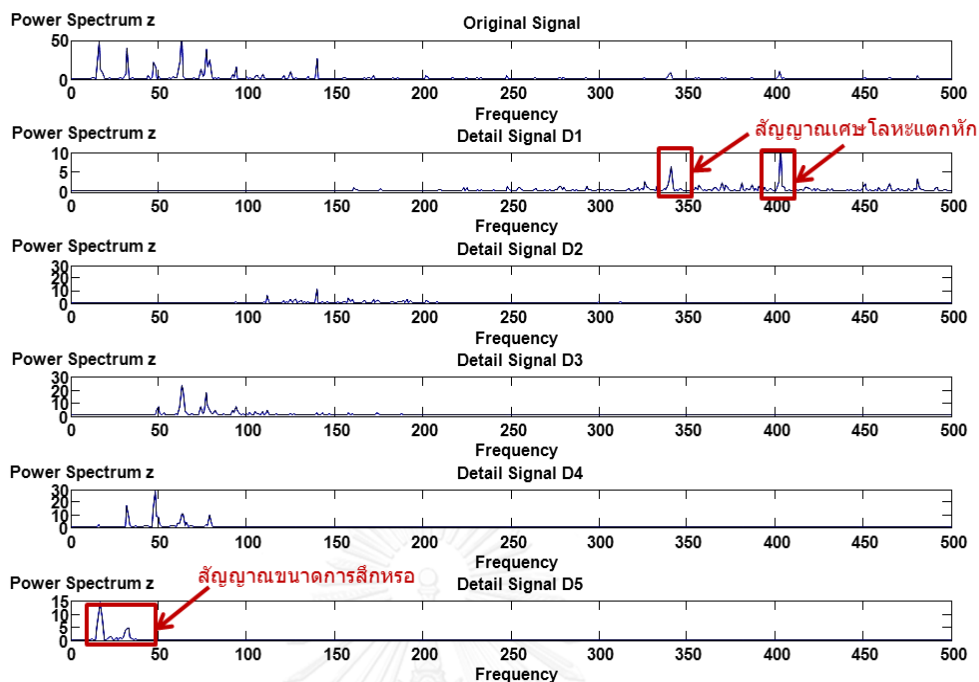
รูปที่ 5.13 สัญญาณแรงตัดพลวัต dF_x และ dF_y ในโดเมนเวลา ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ที่ขนาดการสีกหรือของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.14 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFz ในโดเมนเวลา ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ที่ขนาดการสีกหระของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงตัดพลวัต dF_x และ dF_y ในโดเมนความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ที่ขนาดการสีกหรือของมิดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการบ้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.16 สัญญาณแรงตัดพลวัต dFz ในโดเมนความถี่ ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ที่ขนาดการสีกหรือของมีดตัด 0.21 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาทีและความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร

เมื่อมีดตัดมีขนาดการสีกหรือ 0.21 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.9 จะให้เศษโลหะแตกหักมีขนาดเล็กลักษณะแตกเป็นชิ้นเล็กๆลักษณะคล้ายใบหู (Ear broken chip) ดังรูปที่ 5.10 แสดงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นการแตกหักแบบชิ้นเล็กๆมีลักษณะขนาดใกล้เคียงกัน [3] ผลสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาในรูปที่ 5.11 มีสัญญาณเศษโลหะแตกหักและสัญญาณขนาดการสีกหรือมีดตัดผสมอยู่ จึงทำการวิเคราะห์แปลงสัญญาณเศษโลหะแตกหักออกจากสัญญาณขนาดการสีกหรือมีดตัดในโดเมนความถี่ พบว่าเศษโลหะแตกหักที่ช่วงความถี่สูงดังรูปที่ 5.12 ส่วนความถี่ขนาดการสีกหรือสามารถวิเคราะห์ได้โดยดูจากขนาดค่าความแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมสะสม ซึ่งมีบริเวณกว้างและแอมพลิจูดแรงตัดพลวัตมีขนาดใหญ่ นั่นคือเกิดแรงตัดพลวัตมากเนื่องจากมีดสีกหรือ [35, 37] อย่างไรก็ตามความถี่ของเศษโลหะแบบแตกหักยังมีผลกับความถี่ขนาดการสีกหรืออยู่ ซึ่งยังไม่ได้ถูกแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงทำการทดลองแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 และแยกในโดเมนความถี่ดังรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 ด้วยโปรแกรมเวฟเล็ตภายใต้เงื่อนไขการตัดและขนาดการสีกหรือนี้ จะพบว่าสัญญาณที่ระดับบนถูกแยกสัญญาณข้อมูลเป็นความถี่สูงซึ่งเป็น

สัญญาณเศษโลหะแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ และที่ระดับด้านล่างระดับสามารถแยกสัญญาณความถี่ต่ำได้ ซึ่งนั่นก็คือสัญญาณแรงตัดพลวัตจากขนาดการสั่นหรือมีดตัดได้ สังเกตจากค่าขนาดความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมที่มีฐานกว้างและมีแอมพลิจูดแรงตัดพลวัตขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้ จึงสามารถนำสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดจากขนาดการสั่นหรือโดยไม่มีอิทธิพลของสัญญาณอื่นรบกวน ไปประมวลผลอัตราส่วนแรงตัดพลวัตเพื่อนำไปอธิบายความสัมพันธ์กับขนาดการสั่นหรือของมีดได้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้น การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตเพื่อแยกวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ ด้วยโปรแกรมเวฟเล็ตถูกเสนอแนะและคาดหวังว่าจะสามารถใช้ในการวิจัยต่อยอดในการอธิบายความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นหรือมีดตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตได้ถูกต้องดียิ่งขึ้น เพราะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนที่ไม่เกี่ยวข้องกับสัญญาณการสั่นหรือ ดังเช่น รูปที่ 5.7 รูปที่ 5.8 รูปที่ 5.15 และ รูปที่ 5.16 ที่ผ่านมา ข้อมูลที่ถูกคัดแยกมามีความน่าเชื่อถือ และทำให้สมการทำนายขนาดการสั่นหรือมีดตัดมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Somkiat Tangjitsitcharoen, "Monitoring of dry cutting and applications of cutting fluid," *Proceedings of the IMechE Part J: J. Engineering Tribology* vol. 24, pp. 209-219, 2009.
- [2] ชาญณรงค์ รุ่งเรือง, "อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นของกระบวนการตัดเหล็กกล้าโดยใช้มีดกัดหัวบอล," วศ.ม., ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [3] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [4] Hamdi Aouici, Mohamed Athmane Yallese, Kamel Chaoui, Tarek Mabrouki, and Jean-François Rigal, "Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization," *Measurement*, vol. 45, pp. 344-353, 2012.
- [5] LLR Rodrigues, AN Kantharaj, B Kantharaj, WRC Freitas, and BRN Murthy, "Effect of Cutting Parameters on surface roughness and cutting force in turning Mild Steel," *Research Journal of Recent Sciences* vol. 2277, p. 2502, 2012.
- [6] กัญยกานต์ สมนามิต, "การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรดS45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว," วศ.ม., ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [7] Toshimichi Moriwaki, Toshiroh Shibasaka, and Somkiat Tangjitsitcharoen, "Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning," *JSME International Journal Series C*, vol. 47, pp. 933-938, 2004.
- [8] Somkiat Tangjitsitcharoen, "In-Process Monitoring and Prediction of Surface Roughness in CNC Turning Process," *Advanced Materials Research*, vol. 199, pp. 1958-1966, 2011.
- [9] T Moriwaki, S Tangjitsitcharoen, and T Shibasaka, "Development of intelligent monitoring and optimization of cutting process for CNC turning," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 19, pp. 473-480, 2006.

- [10] Badru Doja and DK Singh, "Analysis and effect of input parameters on surface roughness and tool flank wear in turning operation," *International Journal Engineering Science and Technology*, vol. 4, pp. 2759-2765, 2012.
- [11] Satyanarayana Kosaraju, Venu Gopal Anne, and Bangaru Babu Popuri, "Online Tool Wear Monitoring using Cutting Forces in Turning Ti-6Al-4V," in *International Conference on Trends in Industrial and Mechanical Engineering (ICTIME'2012) Dubai, 2012*, pp. 24-25.
- [12] Krzysztof Jemielniak, Tomasz Urbanowski, Joanna Kossakowska, and Sebastian Bombiński, "Tool condition monitoring based on numerous signal features," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, pp. 73-81, 2012.
- [13] Vikas B Magdum and Vinayak R Naik, "Tool wear monitoring when turning EN 8 Steel with HSS-M2 tool," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 1706-1711, 2013.
- [14] D Cuppini, G D'errico, and G Rutelli, "Tool wear monitoring based on cutting power measurement," *Wear*, vol. 139, pp. 303-311, 1990.
- [15] SE Oraby and DR Hayhurst, "Development of models for tool wear force relationships in metal cutting," *International journal of mechanical sciences*, vol. 33, pp. 125-138, 1991.
- [16] T Moriwaki and E Shamoto, "Intelligent tool condition monitoring for milling," in *CIRP 29th Seminar on Manufacturing Systems*, 1997, pp. 287-292.
- [17] SK Choudhury and KK Kishore, "Tool wear measurement in turning using force ratio," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 899-909, 2000.
- [18] Jae-Woong Youn and Min-Yang Yang, "A study on the relationships between static/dynamic cutting force components and tool wear," *Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 123, pp. 196-205, 2001.
- [19] C Scheffer, H Kratz, PS Heyns, and F Klocke, "Development of a tool wear-monitoring system for hard turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 973-985, 2003.

- [20] Jeffrey L Stein and Kunsoo Huh, "Monitoring cutting forces in turning: a model-based approach," *Journal of Manufacturing science and engineering*, vol. 124, pp. 26-31, 2002.
- [21] Joon Hwang, Ey Hyoun Jeong, Eui Sik Chung, and Steven Y Liang, "Assessment of the Cutting Tooling Effect on Turning Chatter," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 433, pp. 2101-2106, 2014.
- [22] William Joseph Endres, JW Sutherland, RE DeVor, and SG Kapoor, "A dynamic model of the cutting force system in the turning process," University of Illinois at Urbana-Champaign, 1990.
- [23] LC Lee, KS Lee, and CS Gan, "On the correlation between dynamic cutting force and tool wear," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 29, pp. 295-303, 1989.
- [24] ปวริต กীরติภราดร, "การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระชิ้นงานและแรงตัดพลวัตบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี," วศ.บ., ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [25] M Goover, *Fundamentals of modern manufacturing*, 2 ed.: USA: John Wiley and Sons, 2004.
- [26] RS Schmid and S Kalpakjian, "Manufacturing engineering and technology," *Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ*, 2006.
- [27] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, "Machining Technology เอกสารประกอบการสอนวิชา Materials and Processing รหัสวิชา 2104626," ed. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [28] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, "เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมการผลิตขั้นสูงรหัสวิชา 2104711," ed. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [29] ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง, "การพยากรณ์ความขรุขระผิวสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง," วศ.ม., ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [30] สมชาติ อารยพิทยา, "การสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้ง," วศ.ม., ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

- [31] Okushima Keiji and Hitomi Katsundo, "Flank Wear Progress and Variation of Tool Forces," *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, vol. 29, pp. 304-309, 1963.
- [32] ศิริพงษ์ ดำรงทวีศักดิ์, "การพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี," วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, "การพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี," วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [33] ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [34] ประไพ ศรีสุทัศน์ ณ อยุธยา and พงศ์ชนัน เหลืองไพฑูริย์, การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2545.
- [35] Somkiat Tangjitsitcharoen, Channarong Rungruang, and Narongsak Pongsathornwiwat, "Advanced monitoring of tool wear and cutting states in CNC turning process by utilizing sensor fusion," *Advanced Materials Research*, vol. 189, pp. 377-384, 2011.
- [36] Somkiat Tangjitsitcharoen, A Somchart, and T Sirichan, "In-Process Monitoring and Prediction of Surface Roughness on CNC Turning by using Response Surface Analysis," in *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*, 2010, pp. 213-216.
- [37] Somkiat Tangjitsitcharoen, "Development of intelligent identification of cutting states by spectrum analysis for CNC turning," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 2, pp. 366-377, 2008.
- [38] AD Bagawade, PG Ramdasi, RS Pawade, and PK Bramhankar, "Evaluation of Cutting Forces in Hard Turning of Aisi 52100 Steel by Using Taguchi Method," in *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2012.
- [39] Supriya Sahu, "Performance evaluation of uncoated and multi-layer Tin coated carbide tooling hard turning," Master of technology in mechanical engineering, National Institute of Technology Rourkela India, 2012.
- [40] C. Chungchoo and D. Saini, "The total energy and the total entropy of force signals-new parameters for monitoring oblique turning operations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1879-1897, 2000.

- [41] Somkiat Tangjitsitcharoen, Tanintorn Saksri, and Suthas Ratanakuakangwan, "Advance in chatter detection in ball end milling process by utilizing wavelet transform," *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-15, 2013.
- [42] แพร เทศนิยม, "การทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานโดยใช้แรงตัดพลวัตในกระบวนการกัดหัวบอล," วศ.ม., ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [43] ธนินธรณ์ ศักดิ์ศรี, "การตรวจจับแฉตเตอร์ในกระบวนการกัดโดยประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต," วศ.ม., ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [44] Paul S Addison, "The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering," *Medicine and Finance. IOP Publishing, Bristol*, 2002.
- [45] Todor Ganchev, Mihalis Siafarikas, Iosif Mporas, and Tsenka Stoyanova, "Wavelet basis selection for enhanced speech parametrization in speaker verification," *International Journal of Speech Technology*, vol. 17, pp. 27-36, 2014.
- [46] Jae-Seob Kwak, "Application of wavelet transform technique to detect tool failure in turning operations," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, pp. 1078-1083, 2006.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

งานวิจัยในเล่มนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยในกระบวนการกลึงชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ด้วยมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยตัวแปรต้น ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปัจจัยตัวแปรตอบสนองที่เกิดขึ้นคือขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (Flank wear หรือ V_b) ข้อมูลทั้งหมดถูกนำไปใช้ในการพัฒนาสมการทำนายขนาดการสึกหรอของเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว ซึ่งถูกกำหนดไว้ตามเงื่อนไขการตัดตามตารางการออกแบบการทดลองที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วยเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 27 เงื่อนไข โดยข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองถูกเก็บรวบรวมไว้เป็นหมวดในภาคผนวก ได้แก่ ภาคผนวก ก ภาคผนวก ข และภาคผนวก ค ซึ่งสามารถแยกอธิบายได้ดังนี้

ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลผลการทดลองของทุกเงื่อนไขการตัด โดยพบว่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) มีขนาดลดลง เมื่อขนาดการสึกหรอมัดตัดมีขนาดมากขึ้นของทุกเงื่อนไขการทดลอง

ภาคผนวก ข แสดงรายละเอียด ขนาดแรงตัดป้อนตัดพลวัต (dFy) ขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dFz) อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) และขนาดการสึกหรอที่เกิดขึ้นในขณะกลึงชิ้นงาน ของทุกเงื่อนไขการตัด โดยในแต่ละเงื่อนไขการตัดแบ่งช่วงการสึกหรอได้สามช่วงได้แก่ ช่วงต้นการสึกหรอ ช่วงกลางการสึกหรอ และช่วงปลายการสึกหรอของทุกเงื่อนไขการทดลอง พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการตัดชิ้นงานด้วยมีดตัดใหม่ อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่เนื่องจากคมมีดตัดมีสภาพใหม่ยังไม่สึกหรอ ขนาดแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีขนาดไม่มากไปกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ที่เกิดขึ้น แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงกลางของการตัด ขนาดการสึกหรอมีขนาดใหญ่มากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีขนาดลดลงเนื่องจากแรงตัดหลักพลวัต (dFz) มีขนาดมากขึ้นตามขนาดการสึกหรอและมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) ในลักษณะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการสึกหรอคงที่ จนกระทั่งมีดตัดสึกหรอมากขึ้นจนเริ่มหมดสภาพและเข้าสู่ช่วงปลายของการตัดชิ้นงาน มีดตัดหมดสภาพคมตัด ชิ้นงานมีความเรียบผิวไม่ดี แรงตัดหลักพลวัต (dFz) ที่เกิดขึ้นมีขนาดมากกว่าแรงป้อนตัดพลวัต (dFy) อย่างเด่นชัด ทำให้อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz) ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันนี้ในทุกเงื่อนไขการทดลอง

ภาคผนวก ค แสดงภาพขนาดการสึกหรอของมีดตัดและเศษโลหะที่เกิดขึ้นในช่วงปลายการสึกหรอของทุกเงื่อนไขการตัด พบว่าเศษโลหะแตกหักมากขึ้นเมื่อเงื่อนไขการตัดมีอัตราการตัดเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด หรือความลึกตัด ส่งผลให้เกิดเศษโลหะ

แตกหักเป็นชิ้นเล็กมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดการสึกหรอมีดัดเท่ากันในช่วงปลายของการสึกหรอ



ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลวัต	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
1	100	0.15	0.4	1.4547	0.0700
2	100	0.15	0.4	1.0092	0.0900
3	100	0.15	0.4	0.9555	0.0967
4	100	0.15	0.4	0.9423	0.1033
5	100	0.15	0.4	0.9298	0.1100
6	100	0.15	0.4	0.9241	0.1167
7	100	0.15	0.4	0.9166	0.1200
8	100	0.15	0.4	0.9020	0.1267
9	100	0.15	0.4	0.8981	0.1300
10	100	0.15	0.4	0.8823	0.1333
11	100	0.15	0.4	0.8817	0.1333
12	100	0.15	0.4	0.8783	0.1367
13	100	0.15	0.4	0.8725	0.1367
14	100	0.15	0.4	0.8694	0.1400
15	100	0.15	0.4	0.8605	0.1400
16	100	0.15	0.4	0.8539	0.1433
17	100	0.15	0.4	0.8505	0.1467
18	100	0.15	0.4	0.8399	0.1467
19	100	0.15	0.4	0.8367	0.1500
20	100	0.15	0.4	0.8240	0.1533
21	100	0.15	0.4	0.8150	0.1533
22	100	0.15	0.4	0.8125	0.1567
23	100	0.15	0.4	0.8000	0.1567

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
24	100	0.15	0.4	0.7873	0.1600
25	100	0.15	0.4	0.7746	0.1633
26	100	0.15	0.4	0.7619	0.1633
27	100	0.15	0.4	0.7500	0.1667
28	100	0.15	0.4	0.7350	0.1667
29	100	0.15	0.4	0.7096	0.1700
30	150	0.15	0.4	1.0604	0.0800
31	150	0.15	0.4	0.9617	0.0933
32	150	0.15	0.4	0.9497	0.0967
33	150	0.15	0.4	0.9320	0.1033
34	150	0.15	0.4	0.8999	0.1133
35	150	0.15	0.4	0.8948	0.1167
36	150	0.15	0.4	0.8811	0.1233
37	150	0.15	0.4	0.8784	0.1267
38	150	0.15	0.4	0.8739	0.1300
39	150	0.15	0.4	0.8607	0.1333
40	150	0.15	0.4	0.8582	0.1333
41	150	0.15	0.4	0.8561	0.1367
42	150	0.15	0.4	0.8529	0.1367
43	150	0.15	0.4	0.8497	0.1400
44	150	0.15	0.4	0.8396	0.1433
45	150	0.15	0.4	0.8344	0.1433
46	150	0.15	0.4	0.8274	0.1467
47	150	0.15	0.4	0.8228	0.1467
48	150	0.15	0.4	0.8202	0.1500
49	150	0.15	0.4	0.8150	0.1533

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
50	150	0.15	0.4	0.8013	0.1533
51	150	0.15	0.4	0.7890	0.1567
52	150	0.15	0.4	0.7800	0.1567
53	150	0.15	0.4	0.7600	0.1600
54	150	0.15	0.4	0.7500	0.1633
55	150	0.15	0.4	0.7400	0.1633
56	150	0.15	0.4	0.7300	0.1667
57	150	0.15	0.4	0.7100	0.1667
58	150	0.15	0.4	0.6832	0.1700
59	200	0.15	0.4	0.9670	0.0867
60	200	0.15	0.4	0.9631	0.0900
61	200	0.15	0.4	0.9181	0.0933
62	200	0.15	0.4	0.9018	0.1000
63	200	0.15	0.4	0.8836	0.1067
64	200	0.15	0.4	0.8799	0.1133
65	200	0.15	0.4	0.8677	0.1167
66	200	0.15	0.4	0.8456	0.1267
67	200	0.15	0.4	0.8395	0.1267
68	200	0.15	0.4	0.8216	0.1330
69	200	0.15	0.4	0.8133	0.1367
70	200	0.15	0.4	0.8119	0.1367
71	200	0.15	0.4	0.8109	0.1367
72	200	0.15	0.4	0.8076	0.1367
73	200	0.15	0.4	0.8034	0.1400
74	200	0.15	0.4	0.7919	0.1433
75	200	0.15	0.4	0.7819	0.1433

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
76	200	0.15	0.4	0.7721	0.1467
77	200	0.15	0.4	0.7700	0.1467
78	200	0.15	0.4	0.7622	0.1500
79	200	0.15	0.4	0.7500	0.1500
80	200	0.15	0.4	0.7500	0.1533
81	200	0.15	0.4	0.7400	0.1567
82	200	0.15	0.4	0.7300	0.1567
83	200	0.15	0.4	0.7200	0.1600
84	200	0.15	0.4	0.7100	0.1633
85	200	0.15	0.4	0.7000	0.1667
86	200	0.15	0.4	0.6900	0.1667
87	200	0.15	0.4	0.6700	0.1700
88	200	0.15	0.4	0.6496	0.1733
89	100	0.2	0.4	1.0980	0.0767
90	100	0.2	0.4	1.0218	0.0833
91	100	0.2	0.4	0.9900	0.0900
92	100	0.2	0.4	0.9481	0.1000
93	100	0.2	0.4	0.9363	0.1067
94	100	0.2	0.4	0.9310	0.1100
95	100	0.2	0.4	0.9296	0.1167
96	100	0.2	0.4	0.9154	0.1200
97	100	0.2	0.4	0.8951	0.1300
98	100	0.2	0.4	0.8896	0.1300
99	100	0.2	0.4	0.8854	0.1333
100	100	0.2	0.4	0.8825	0.1333
101	100	0.2	0.4	0.8824	0.1333

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
102	100	0.2	0.4	0.8792	0.1367
103	100	0.2	0.4	0.8781	0.1367
104	100	0.2	0.4	0.8754	0.1367
105	100	0.2	0.4	0.8718	0.1400
106	100	0.2	0.4	0.8689	0.1400
107	100	0.2	0.4	0.8652	0.1433
108	100	0.2	0.4	0.8608	0.1433
109	100	0.2	0.4	0.8583	0.1433
110	100	0.2	0.4	0.8540	0.1467
111	100	0.2	0.4	0.8519	0.1467
112	100	0.2	0.4	0.8507	0.1467
113	100	0.2	0.4	0.8497	0.1467
114	100	0.2	0.4	0.8443	0.1467
115	100	0.2	0.4	0.8358	0.1467
116	100	0.2	0.4	0.8329	0.1467
117	100	0.2	0.4	0.8329	0.1500
118	100	0.2	0.4	0.8267	0.1500
119	100	0.2	0.4	0.8257	0.1500
120	100	0.2	0.4	0.8189	0.1533
121	100	0.2	0.4	0.8134	0.1533
122	100	0.2	0.4	0.8116	0.1567
123	100	0.2	0.4	0.8102	0.1567
124	100	0.2	0.4	0.7983	0.1567
125	100	0.2	0.4	0.7962	0.1600
126	100	0.2	0.4	0.7914	0.1600
127	100	0.2	0.4	0.7898	0.1600

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
128	100	0.2	0.4	0.7790	0.1633
129	100	0.2	0.4	0.7756	0.1633
130	100	0.2	0.4	0.7600	0.1667
131	100	0.2	0.4	0.7513	0.1667
132	100	0.2	0.4	0.7419	0.1667
133	100	0.2	0.4	0.7065	0.17
134	150	0.2	0.4	1.1121	0.0767
135	150	0.2	0.4	1.0016	0.0833
136	150	0.2	0.4	0.9771	0.0900
137	150	0.2	0.4	0.9358	0.1000
138	150	0.2	0.4	0.9180	0.1067
139	150	0.2	0.4	0.9026	0.1100
140	150	0.2	0.4	0.8988	0.1167
141	150	0.2	0.4	0.8903	0.1200
142	150	0.2	0.4	0.8718	0.1300
143	150	0.2	0.4	0.8682	0.1300
144	150	0.2	0.4	0.8681	0.1333
145	150	0.2	0.4	0.8623	0.1333
146	150	0.2	0.4	0.8599	0.1333
147	150	0.2	0.4	0.8578	0.1367
148	150	0.2	0.4	0.8557	0.1367
149	150	0.2	0.4	0.8526	0.1367
150	150	0.2	0.4	0.8522	0.1400
151	150	0.2	0.4	0.8479	0.1400
152	150	0.2	0.4	0.8418	0.1433
153	150	0.2	0.4	0.8393	0.1433

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
154	150	0.2	0.4	0.8374	0.1433
155	150	0.2	0.4	0.8354	0.1467
156	150	0.2	0.4	0.8306	0.1467
157	150	0.2	0.4	0.8293	0.1467
158	150	0.2	0.4	0.8268	0.1467
159	150	0.2	0.4	0.8239	0.1467
160	150	0.2	0.4	0.8201	0.1467
161	150	0.2	0.4	0.8198	0.1467
162	150	0.2	0.4	0.8166	0.1500
163	150	0.2	0.4	0.8120	0.1500
164	150	0.2	0.4	0.8092	0.1500
165	150	0.2	0.4	0.7964	0.1533
166	150	0.2	0.4	0.7925	0.1533
167	150	0.2	0.4	0.7842	0.1567
168	150	0.2	0.4	0.7828	0.1567
169	150	0.2	0.4	0.7752	0.1567
170	150	0.2	0.4	0.7701	0.1600
171	150	0.2	0.4	0.7676	0.1600
172	150	0.2	0.4	0.7610	0.1600
173	150	0.2	0.4	0.7512	0.1633
174	150	0.2	0.4	0.7470	0.1633
175	150	0.2	0.4	0.7313	0.1667
176	150	0.2	0.4	0.7200	0.1667
177	150	0.2	0.4	0.7053	0.1667
178	150	0.2	0.4	0.6801	0.17
179	200	0.2	0.4	1.0109	0.0767

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
180	200	0.2	0.4	0.9947	0.0833
181	200	0.2	0.4	0.9309	0.0900
182	200	0.2	0.4	0.9004	0.1000
183	200	0.2	0.4	0.8859	0.1067
184	200	0.2	0.4	0.8767	0.1100
185	200	0.2	0.4	0.8755	0.1167
186	200	0.2	0.4	0.8560	0.1200
187	200	0.2	0.4	0.8336	0.1300
188	200	0.2	0.4	0.8269	0.1300
189	200	0.2	0.4	0.8267	0.1333
190	200	0.2	0.4	0.8210	0.1333
191	200	0.2	0.4	0.8210	0.1333
192	200	0.2	0.4	0.8154	0.1367
193	200	0.2	0.4	0.8153	0.1367
194	200	0.2	0.4	0.8085	0.1367
195	200	0.2	0.4	0.8052	0.1400
196	200	0.2	0.4	0.8015	0.1400
197	200	0.2	0.4	0.7979	0.1433
198	200	0.2	0.4	0.7901	0.1433
199	200	0.2	0.4	0.7845	0.1433
200	200	0.2	0.4	0.7785	0.1467
201	200	0.2	0.4	0.7784	0.1467
202	200	0.2	0.4	0.7771	0.1467
203	200	0.2	0.4	0.7727	0.1467
204	200	0.2	0.4	0.7664	0.1467
205	200	0.2	0.4	0.7621	0.1467

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
206	200	0.2	0.4	0.7619	0.1467
207	200	0.2	0.4	0.7619	0.1500
208	200	0.2	0.4	0.7540	0.1500
209	200	0.2	0.4	0.7520	0.1500
210	200	0.2	0.4	0.7463	0.1533
211	200	0.2	0.4	0.7448	0.1533
212	200	0.2	0.4	0.7368	0.1567
213	200	0.2	0.4	0.7314	0.1567
214	200	0.2	0.4	0.7305	0.1567
215	200	0.2	0.4	0.7294	0.1600
216	200	0.2	0.4	0.7189	0.1600
217	200	0.2	0.4	0.7123	0.1600
218	200	0.2	0.4	0.6978	0.1633
219	200	0.2	0.4	0.6930	0.1633
220	200	0.2	0.4	0.6834	0.1667
221	200	0.2	0.4	0.6621	0.1667
222	200	0.2	0.4	0.6613	0.1667
223	200	0.2	0.4	0.6370	0.17
224	100	0.25	0.4	1.1148	0.0800
225	100	0.25	0.4	1.0100	0.0833
226	100	0.25	0.4	0.9831	0.0900
227	100	0.25	0.4	0.9756	0.0933
228	100	0.25	0.4	0.9408	0.1000
229	100	0.25	0.4	0.9219	0.1167
230	100	0.25	0.4	0.9033	0.1233
231	100	0.25	0.4	0.8931	0.1300

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
232	100	0.25	0.4	0.8827	0.1333
233	100	0.25	0.4	0.8772	0.1367
234	100	0.25	0.4	0.8680	0.1400
235	100	0.25	0.4	0.8589	0.1400
236	100	0.25	0.4	0.8536	0.1433
237	100	0.25	0.4	0.8501	0.1467
238	100	0.25	0.4	0.8442	0.1467
239	100	0.25	0.4	0.8312	0.1500
240	100	0.25	0.4	0.8211	0.1533
241	100	0.25	0.4	0.8142	0.1567
242	100	0.25	0.4	0.7947	0.1600
243	100	0.25	0.4	0.7762	0.1633
244	100	0.25	0.4	0.7368	0.1667
245	100	0.25	0.4	0.7151	0.1667
246	100	0.25	0.4	0.7045	0.1700
247	100	0.25	0.4	0.6716	0.1700
248	150	0.25	0.4	1.0980	0.0800
249	150	0.25	0.4	0.9772	0.0833
250	150	0.25	0.4	0.9765	0.0900
251	150	0.25	0.4	0.9656	0.0933
252	150	0.25	0.4	0.9284	0.1000
253	150	0.25	0.4	0.8940	0.1167
254	150	0.25	0.4	0.8826	0.1233
255	150	0.25	0.4	0.8695	0.1300
256	150	0.25	0.4	0.8633	0.1333
257	150	0.25	0.4	0.8539	0.1367

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
258	150	0.25	0.4	0.8456	0.1400
259	150	0.25	0.4	0.8407	0.1400
260	150	0.25	0.4	0.8349	0.1433
261	150	0.25	0.4	0.8292	0.1467
262	150	0.25	0.4	0.8214	0.1467
263	150	0.25	0.4	0.8139	0.1500
264	150	0.25	0.4	0.8047	0.1533
265	150	0.25	0.4	0.7933	0.1567
266	150	0.25	0.4	0.7618	0.1600
267	150	0.25	0.4	0.7378	0.1633
268	150	0.25	0.4	0.7099	0.1667
269	150	0.25	0.4	0.6946	0.1667
270	150	0.25	0.4	0.6727	0.1700
271	150	0.25	0.4	0.6329	0.1700
272	200	0.25	0.4	1.0894	0.0800
273	200	0.25	0.4	0.9671	0.0833
274	200	0.25	0.4	0.9525	0.0900
275	200	0.25	0.4	0.9167	0.0933
276	200	0.25	0.4	0.8950	0.1000
277	200	0.25	0.4	0.8587	0.1167
278	200	0.25	0.4	0.8475	0.1233
279	200	0.25	0.4	0.8318	0.1300
280	200	0.25	0.4	0.8222	0.1333
281	200	0.25	0.4	0.8136	0.1367
282	200	0.25	0.4	0.8004	0.1400
283	200	0.25	0.4	0.7903	0.1400

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
284	200	0.25	0.4	0.7816	0.1433
285	200	0.25	0.4	0.7742	0.1467
286	200	0.25	0.4	0.7649	0.1467
287	200	0.25	0.4	0.7595	0.1500
288	200	0.25	0.4	0.7499	0.1533
289	200	0.25	0.4	0.7432	0.1567
290	200	0.25	0.4	0.7225	0.1600
291	200	0.25	0.4	0.7040	0.1633
292	200	0.25	0.4	0.6764	0.1667
293	200	0.25	0.4	0.6444	0.1667
294	200	0.25	0.4	0.6305	0.1700
295	200	0.25	0.4	0.5728	0.1700
296	100	0.15	0.6	1.3470	0.0633
297	100	0.15	0.6	1.0680	0.0800
298	100	0.15	0.6	0.9906	0.0900
299	100	0.15	0.6	0.9373	0.1033
300	100	0.15	0.6	0.9362	0.1067
301	100	0.15	0.6	0.9281	0.1133
302	100	0.15	0.6	0.9210	0.1167
303	100	0.15	0.6	0.9156	0.1200
304	100	0.15	0.6	0.9099	0.1200
305	100	0.15	0.6	0.9068	0.1267
306	100	0.15	0.6	0.8985	0.1267
307	100	0.15	0.6	0.8949	0.1300
308	100	0.15	0.6	0.8773	0.1367
309	100	0.15	0.6	0.8692	0.1400

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
310	100	0.15	0.6	0.8579	0.1400
311	100	0.15	0.6	0.8530	0.1433
312	100	0.15	0.6	0.8478	0.1467
313	100	0.15	0.6	0.8327	0.1500
314	100	0.15	0.6	0.8277	0.1500
315	100	0.15	0.6	0.8215	0.1533
316	100	0.15	0.6	0.8165	0.1567
317	100	0.15	0.6	0.8103	0.1567
318	100	0.15	0.6	0.7962	0.1600
319	100	0.15	0.6	0.7839	0.1633
320	100	0.15	0.6	0.7642	0.1667
321	100	0.15	0.6	0.7315	0.1667
322	100	0.15	0.6	0.7006	0.1700
323	150	0.15	0.6	1.2411	0.0633
324	150	0.15	0.6	1.0275	0.0800
325	150	0.15	0.6	0.9833	0.0900
326	150	0.15	0.6	0.9149	0.1033
327	150	0.15	0.6	0.9098	0.1067
328	150	0.15	0.6	0.8990	0.1133
329	150	0.15	0.6	0.8916	0.1167
330	150	0.15	0.6	0.8909	0.1200
331	150	0.15	0.6	0.8856	0.1200
332	150	0.15	0.6	0.8794	0.1267
333	150	0.15	0.6	0.8741	0.1267
334	150	0.15	0.6	0.8728	0.1300
335	150	0.15	0.6	0.8543	0.1367

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
336	150	0.15	0.6	0.8481	0.1400
337	150	0.15	0.6	0.8371	0.1400
338	150	0.15	0.6	0.8342	0.1433
339	150	0.15	0.6	0.8237	0.1467
340	150	0.15	0.6	0.8185	0.1500
341	150	0.15	0.6	0.8109	0.1500
342	150	0.15	0.6	0.8051	0.1533
343	150	0.15	0.6	0.7909	0.1567
344	150	0.15	0.6	0.7873	0.1567
345	150	0.15	0.6	0.7728	0.1600
346	150	0.15	0.6	0.7486	0.1633
347	150	0.15	0.6	0.7278	0.1667
348	150	0.15	0.6	0.7034	0.1667
349	150	0.15	0.6	0.6725	0.1700
350	200	0.15	0.6	1.1332	0.0633
351	200	0.15	0.6	1.0212	0.0800
352	200	0.15	0.6	0.9443	0.0900
353	200	0.15	0.6	0.8919	0.1033
354	200	0.15	0.6	0.8828	0.1067
355	200	0.15	0.6	0.8744	0.1133
356	200	0.15	0.6	0.8602	0.1167
357	200	0.15	0.6	0.8564	0.1200
358	200	0.15	0.6	0.8534	0.1200
359	200	0.15	0.6	0.8502	0.1267
360	200	0.15	0.6	0.8383	0.1267
361	200	0.15	0.6	0.8320	0.1300

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลัง	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
362	200	0.15	0.6	0.8105	0.1367
363	200	0.15	0.6	0.8021	0.1400
364	200	0.15	0.6	0.7845	0.1400
365	200	0.15	0.6	0.7744	0.1433
366	200	0.15	0.6	0.7668	0.1467
367	200	0.15	0.6	0.7620	0.1500
368	200	0.15	0.6	0.7541	0.1500
369	200	0.15	0.6	0.7484	0.1533
370	200	0.15	0.6	0.7428	0.1567
371	200	0.15	0.6	0.7340	0.1567
372	200	0.15	0.6	0.7292	0.1600
373	200	0.15	0.6	0.7135	0.1633
374	200	0.15	0.6	0.6909	0.1667
375	200	0.15	0.6	0.6693	0.1667
376	200	0.15	0.6	0.6485	0.1700
377	100	0.2	0.6	1.1780	0.0670
378	100	0.2	0.6	1.1483	0.0730
379	100	0.2	0.6	1.0559	0.0800
380	100	0.2	0.6	0.9817	0.0900
381	100	0.2	0.6	0.9395	0.1000
382	100	0.2	0.6	0.9187	0.1167
383	100	0.2	0.6	0.9128	0.1200
384	100	0.2	0.6	0.9097	0.1233
385	100	0.2	0.6	0.9095	0.1233
386	100	0.2	0.6	0.9085	0.1233
387	100	0.2	0.6	0.9033	0.1267

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
388	100	0.2	0.6	0.8972	0.1267
389	100	0.2	0.6	0.8971	0.1267
390	100	0.2	0.6	0.8934	0.1300
391	100	0.2	0.6	0.8794	0.1333
392	100	0.2	0.6	0.8664	0.1433
393	100	0.2	0.6	0.8544	0.1467
394	100	0.2	0.6	0.8478	0.1467
395	100	0.2	0.6	0.8319	0.1500
396	100	0.2	0.6	0.8224	0.1567
397	100	0.2	0.6	0.7954	0.1600
398	100	0.2	0.6	0.7904	0.1600
399	100	0.2	0.6	0.7788	0.1633
400	100	0.2	0.6	0.7766	0.1633
401	100	0.2	0.6	0.7578	0.1667
402	100	0.2	0.6	0.7389	0.1667
403	100	0.2	0.6	0.7180	0.1700
404	100	0.2	0.6	0.6930	0.1700
405	100	0.2	0.6	0.6622	0.1733
406	150	0.2	0.6	1.1414	0.0670
407	150	0.2	0.6	1.1197	0.0730
408	150	0.2	0.6	1.0188	0.0800
409	150	0.2	0.6	0.9738	0.0900
410	150	0.2	0.6	0.9323	0.1000
411	150	0.2	0.6	0.8950	0.1167
412	150	0.2	0.6	0.8875	0.1200
413	150	0.2	0.6	0.8866	0.1233

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
414	150	0.2	0.6	0.8838	0.1233
415	150	0.2	0.6	0.8825	0.1233
416	150	0.2	0.6	0.8797	0.1267
417	150	0.2	0.6	0.8737	0.1267
418	150	0.2	0.6	0.8735	0.1267
419	150	0.2	0.6	0.8713	0.1300
420	150	0.2	0.6	0.8578	0.1333
421	150	0.2	0.6	0.8467	0.1433
422	150	0.2	0.6	0.8356	0.1467
423	150	0.2	0.6	0.8259	0.1467
424	150	0.2	0.6	0.8151	0.1500
425	150	0.2	0.6	0.8049	0.1567
426	150	0.2	0.6	0.7665	0.1600
427	150	0.2	0.6	0.7561	0.1600
428	150	0.2	0.6	0.7502	0.1633
429	150	0.2	0.6	0.7318	0.1633
430	150	0.2	0.6	0.7171	0.1667
431	150	0.2	0.6	0.7104	0.1667
432	150	0.2	0.6	0.7007	0.1700
433	150	0.2	0.6	0.6619	0.1700
434	150	0.2	0.6	0.6255	0.1733
435	200	0.2	0.6	1.0987	0.0670
436	200	0.2	0.6	1.0848	0.0730
437	200	0.2	0.6	1.0072	0.0800
438	200	0.2	0.6	0.9241	0.0900
439	200	0.2	0.6	0.8925	0.1000

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
440	200	0.2	0.6	0.8650	0.1167
441	200	0.2	0.6	0.8543	0.1200
442	200	0.2	0.6	0.8531	0.1233
443	200	0.2	0.6	0.8530	0.1233
444	200	0.2	0.6	0.8529	0.1233
445	200	0.2	0.6	0.8477	0.1267
446	200	0.2	0.6	0.8362	0.1267
447	200	0.2	0.6	0.8343	0.1267
448	200	0.2	0.6	0.8287	0.1300
449	200	0.2	0.6	0.8179	0.1333
450	200	0.2	0.6	0.8006	0.1433
451	200	0.2	0.6	0.7827	0.1467
452	200	0.2	0.6	0.7699	0.1467
453	200	0.2	0.6	0.7598	0.1500
454	200	0.2	0.6	0.7496	0.1567
455	200	0.2	0.6	0.7252	0.1600
456	200	0.2	0.6	0.7201	0.1600
457	200	0.2	0.6	0.7067	0.1633
458	200	0.2	0.6	0.7019	0.1633
459	200	0.2	0.6	0.6900	0.1667
460	200	0.2	0.6	0.6775	0.1667
461	200	0.2	0.6	0.6530	0.1700
462	200	0.2	0.6	0.6355	0.1700
463	100	0.25	0.6	1.1539	0.1733
464	100	0.25	0.6	1.0443	0.0800
465	100	0.25	0.6	0.9823	0.0900

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
466	100	0.25	0.6	0.9657	0.0933
467	100	0.25	0.6	0.9441	0.0967
468	100	0.25	0.6	0.9360	0.1033
469	100	0.25	0.6	0.9290	0.1100
470	100	0.25	0.6	0.9246	0.1133
471	100	0.25	0.6	0.9148	0.1200
472	100	0.25	0.6	0.9024	0.1267
473	100	0.25	0.6	0.8869	0.1300
474	100	0.25	0.6	0.8724	0.1367
475	100	0.25	0.6	0.8652	0.1400
476	100	0.25	0.6	0.8587	0.1400
477	100	0.25	0.6	0.8523	0.1433
478	100	0.25	0.6	0.8487	0.1467
479	100	0.25	0.6	0.8399	0.1467
480	100	0.25	0.6	0.8286	0.1500
481	100	0.25	0.6	0.8257	0.1500
482	100	0.25	0.6	0.8207	0.1533
483	100	0.25	0.6	0.8096	0.1567
484	100	0.25	0.6	0.8038	0.1567
485	100	0.25	0.6	0.7941	0.1600
486	100	0.25	0.6	0.7903	0.1600
487	100	0.25	0.6	0.7821	0.1633
488	100	0.25	0.6	0.7714	0.1633
489	100	0.25	0.6	0.7508	0.1667
490	100	0.25	0.6	0.7366	0.1667
491	100	0.25	0.6	0.7176	0.1667

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
492	100	0.25	0.6	0.6847	0.1700
493	150	0.25	0.6	1.1283	0.0700
494	150	0.25	0.6	1.0121	0.0800
495	150	0.25	0.6	0.9744	0.0900
496	150	0.25	0.6	0.9552	0.0933
497	150	0.25	0.6	0.9330	0.0967
498	150	0.25	0.6	0.9148	0.1033
499	150	0.25	0.6	0.8998	0.1100
500	150	0.25	0.6	0.8971	0.1133
501	150	0.25	0.6	0.8879	0.1200
502	150	0.25	0.6	0.8778	0.1267
503	150	0.25	0.6	0.8663	0.1300
504	150	0.25	0.6	0.8526	0.1367
505	150	0.25	0.6	0.8422	0.1400
506	150	0.25	0.6	0.8388	0.1400
507	150	0.25	0.6	0.8329	0.1433
508	150	0.25	0.6	0.8263	0.1467
509	150	0.25	0.6	0.8212	0.1467
510	150	0.25	0.6	0.8134	0.1500
511	150	0.25	0.6	0.8101	0.1500
512	150	0.25	0.6	0.7996	0.1533
513	150	0.25	0.6	0.7841	0.1567
514	150	0.25	0.6	0.7761	0.1567
515	150	0.25	0.6	0.7568	0.1600
516	150	0.25	0.6	0.7546	0.1600
517	150	0.25	0.6	0.7426	0.1633

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
518	150	0.25	0.6	0.7309	0.1633
519	150	0.25	0.6	0.7161	0.1667
520	150	0.25	0.6	0.7061	0.1667
521	150	0.25	0.6	0.7029	0.1667
522	150	0.25	0.6	0.6558	0.1700
523	200	0.25	0.6	1.1216	0.0700
524	200	0.25	0.6	0.9845	0.0800
525	200	0.25	0.6	0.9251	0.0900
526	200	0.25	0.6	0.9049	0.0933
527	200	0.25	0.6	0.8965	0.0967
528	200	0.25	0.6	0.8846	0.1033
529	200	0.25	0.6	0.8726	0.1100
530	200	0.25	0.6	0.8671	0.1133
531	200	0.25	0.6	0.8546	0.1200
532	200	0.25	0.6	0.8467	0.1267
533	200	0.25	0.6	0.8242	0.1300
534	200	0.25	0.6	0.8057	0.1367
535	200	0.25	0.6	0.7990	0.1400
536	200	0.25	0.6	0.7891	0.1400
537	200	0.25	0.6	0.7787	0.1433
538	200	0.25	0.6	0.7735	0.1467
539	200	0.25	0.6	0.7643	0.1467
540	200	0.25	0.6	0.7569	0.1500
541	200	0.25	0.6	0.7528	0.1500
542	200	0.25	0.6	0.7467	0.1533
543	200	0.25	0.6	0.7372	0.1567

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลัง	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
544	200	0.25	0.6	0.7349	0.1567
545	200	0.25	0.6	0.7214	0.1600
546	200	0.25	0.6	0.7186	0.1600
547	200	0.25	0.6	0.7132	0.1633
548	200	0.25	0.6	0.6988	0.1633
549	200	0.25	0.6	0.6873	0.1667
550	200	0.25	0.6	0.6749	0.1667
551	200	0.25	0.6	0.6575	0.1667
552	200	0.25	0.6	0.6113	0.1700
553	100	0.15	0.8	1.0986	0.0767
554	100	0.15	0.8	1.0211	0.0867
555	100	0.15	0.8	0.9732	0.0933
556	100	0.15	0.8	0.9541	0.0967
557	100	0.15	0.8	0.9495	0.1000
558	100	0.15	0.8	0.9362	0.1033
559	100	0.15	0.8	0.9317	0.1067
560	100	0.15	0.8	0.9266	0.1133
561	100	0.15	0.8	0.9118	0.1200
562	100	0.15	0.8	0.8991	0.1267
563	100	0.15	0.8	0.8903	0.1300
564	100	0.15	0.8	0.8879	0.1300
565	100	0.15	0.8	0.8818	0.1333
566	100	0.15	0.8	0.8789	0.1333
567	100	0.15	0.8	0.8768	0.1367
568	100	0.15	0.8	0.8719	0.1367
569	100	0.15	0.8	0.8688	0.1400

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
570	100	0.15	0.8	0.8562	0.1400
571	100	0.15	0.8	0.8506	0.1433
572	100	0.15	0.8	0.8407	0.1467
573	100	0.15	0.8	0.8322	0.1500
574	100	0.15	0.8	0.8278	0.1500
575	100	0.15	0.8	0.8227	0.1533
576	100	0.15	0.8	0.8195	0.1533
577	100	0.15	0.8	0.8191	0.1567
578	100	0.15	0.8	0.8117	0.1567
579	100	0.15	0.8	0.7964	0.1567
580	100	0.15	0.8	0.7962	0.1600
581	100	0.15	0.8	0.7860	0.1600
582	100	0.15	0.8	0.7719	0.1633
583	100	0.15	0.8	0.7490	0.1667
584	100	0.15	0.8	0.7299	0.1700
585	150	0.15	0.8	1.0885	0.0767
586	150	0.15	0.8	0.9848	0.0867
587	150	0.15	0.8	0.9661	0.0933
588	150	0.15	0.8	0.9446	0.0967
589	150	0.15	0.8	0.9342	0.1000
590	150	0.15	0.8	0.9106	0.1033
591	150	0.15	0.8	0.9055	0.1067
592	150	0.15	0.8	0.8965	0.1133
593	150	0.15	0.8	0.8878	0.1200
594	150	0.15	0.8	0.8751	0.1267
595	150	0.15	0.8	0.8684	0.1300

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
596	150	0.15	0.8	0.8656	0.1300
597	150	0.15	0.8	0.8583	0.1333
598	150	0.15	0.8	0.8573	0.1333
599	150	0.15	0.8	0.8530	0.1367
600	150	0.15	0.8	0.8508	0.1367
601	150	0.15	0.8	0.8440	0.1400
602	150	0.15	0.8	0.8368	0.1400
603	150	0.15	0.8	0.8286	0.1433
604	150	0.15	0.8	0.8234	0.1467
605	150	0.15	0.8	0.8151	0.1500
606	150	0.15	0.8	0.8123	0.1500
607	150	0.15	0.8	0.8062	0.1533
608	150	0.15	0.8	0.7968	0.1533
609	150	0.15	0.8	0.7956	0.1567
610	150	0.15	0.8	0.7890	0.1567
611	150	0.15	0.8	0.7837	0.1567
612	150	0.15	0.8	0.7684	0.1600
613	150	0.15	0.8	0.7507	0.1600
614	150	0.15	0.8	0.7287	0.1633
615	150	0.15	0.8	0.7133	0.1667
616	150	0.15	0.8	0.7015	0.1700
617	200	0.15	0.8	1.0535	0.0767
618	200	0.15	0.8	0.9712	0.0867
619	200	0.15	0.8	0.9244	0.0933
620	200	0.15	0.8	0.9150	0.0967
621	200	0.15	0.8	0.8941	0.1000

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
622	200	0.15	0.8	0.8864	0.1033
623	200	0.15	0.8	0.8800	0.1067
624	200	0.15	0.8	0.8717	0.1133
625	200	0.15	0.8	0.8536	0.1200
626	200	0.15	0.8	0.8384	0.1267
627	200	0.15	0.8	0.8294	0.1300
628	200	0.15	0.8	0.8262	0.1300
629	200	0.15	0.8	0.8159	0.1333
630	200	0.15	0.8	0.8158	0.1333
631	200	0.15	0.8	0.8098	0.1367
632	200	0.15	0.8	0.8049	0.1367
633	200	0.15	0.8	0.8016	0.1400
634	200	0.15	0.8	0.7844	0.1400
635	200	0.15	0.8	0.7741	0.1433
636	200	0.15	0.8	0.7647	0.1467
637	200	0.15	0.8	0.7600	0.1500
638	200	0.15	0.8	0.7561	0.1500
639	200	0.15	0.8	0.7506	0.1533
640	200	0.15	0.8	0.7474	0.1533
641	200	0.15	0.8	0.7438	0.1567
642	200	0.15	0.8	0.7385	0.1567
643	200	0.15	0.8	0.7295	0.1567
644	200	0.15	0.8	0.7275	0.1600
645	200	0.15	0.8	0.7145	0.1600
646	200	0.15	0.8	0.6964	0.1633
647	200	0.15	0.8	0.6832	0.1667

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
648	200	0.15	0.8	0.6674	0.1700
649	100	0.2	0.8	1.1836	0.0667
650	100	0.2	0.8	1.0436	0.0800
651	100	0.2	0.8	1.0132	0.0867
652	100	0.2	0.8	0.9380	0.1000
653	100	0.2	0.8	0.9319	0.1067
654	100	0.2	0.8	0.9301	0.1100
655	100	0.2	0.8	0.9183	0.1167
656	100	0.2	0.8	0.9115	0.1200
657	100	0.2	0.8	0.8991	0.1267
658	100	0.2	0.8	0.8898	0.1300
659	100	0.2	0.8	0.8849	0.1333
660	100	0.2	0.8	0.8769	0.1367
661	100	0.2	0.8	0.8654	0.1400
662	100	0.2	0.8	0.8615	0.1433
663	100	0.2	0.8	0.8557	0.1433
664	100	0.2	0.8	0.8511	0.1467
665	100	0.2	0.8	0.8469	0.1467
666	100	0.2	0.8	0.8314	0.1500
667	100	0.2	0.8	0.8246	0.1500
668	100	0.2	0.8	0.8118	0.1533
669	100	0.2	0.8	0.8014	0.1567
670	100	0.2	0.8	0.7923	0.1600
671	100	0.2	0.8	0.7853	0.1633
672	100	0.2	0.8	0.7768	0.1633
673	100	0.2	0.8	0.7589	0.1667

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
674	100	0.2	0.8	0.7469	0.1667
675	100	0.2	0.8	0.7187	0.1667
676	100	0.2	0.8	0.6929	0.1700
677	150	0.2	0.8	1.2398	0.0667
678	150	0.2	0.8	1.0154	0.0800
679	150	0.2	0.8	0.9807	0.0867
680	150	0.2	0.8	0.9214	0.1000
681	150	0.2	0.8	0.9107	0.1067
682	150	0.2	0.8	0.9003	0.1100
683	150	0.2	0.8	0.8925	0.1167
684	150	0.2	0.8	0.8869	0.1200
685	150	0.2	0.8	0.8754	0.1267
686	150	0.2	0.8	0.8683	0.1300
687	150	0.2	0.8	0.8665	0.1333
688	150	0.2	0.8	0.8531	0.1367
689	150	0.2	0.8	0.8425	0.1400
690	150	0.2	0.8	0.8416	0.1433
691	150	0.2	0.8	0.8357	0.1433
692	150	0.2	0.8	0.8301	0.1467
693	150	0.2	0.8	0.8259	0.1467
694	150	0.2	0.8	0.8133	0.1500
695	150	0.2	0.8	0.8080	0.1500
696	150	0.2	0.8	0.7881	0.1533
697	150	0.2	0.8	0.7760	0.1567
698	150	0.2	0.8	0.7635	0.1600
699	150	0.2	0.8	0.7509	0.1633

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
700	150	0.2	0.8	0.7399	0.1633
701	150	0.2	0.8	0.7182	0.1667
702	150	0.2	0.8	0.7104	0.1667
703	150	0.2	0.8	0.7014	0.1667
704	150	0.2	0.8	0.6514	0.1700
705	200	0.2	0.8	1.1215	0.0667
706	200	0.2	0.8	0.9962	0.0800
707	200	0.2	0.8	0.9559	0.0867
708	200	0.2	0.8	0.8865	0.1000
709	200	0.2	0.8	0.8837	0.1067
710	200	0.2	0.8	0.8764	0.1100
711	200	0.2	0.8	0.8618	0.1167
712	200	0.2	0.8	0.8535	0.1200
713	200	0.2	0.8	0.8435	0.1267
714	200	0.2	0.8	0.8278	0.1300
715	200	0.2	0.8	0.8254	0.1333
716	200	0.2	0.8	0.8106	0.1367
717	200	0.2	0.8	0.8002	0.1400
718	200	0.2	0.8	0.7975	0.1433
719	200	0.2	0.8	0.7837	0.1433
720	200	0.2	0.8	0.7777	0.1467
721	200	0.2	0.8	0.7679	0.1467
722	200	0.2	0.8	0.7570	0.1500
723	200	0.2	0.8	0.7506	0.1500
724	200	0.2	0.8	0.7424	0.1533
725	200	0.2	0.8	0.7308	0.1567

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
726	200	0.2	0.8	0.7225	0.1600
727	200	0.2	0.8	0.7142	0.1633
728	200	0.2	0.8	0.7061	0.1633
729	200	0.2	0.8	0.6926	0.1667
730	200	0.2	0.8	0.6850	0.1667
731	200	0.2	0.8	0.6625	0.1667
732	200	0.2	0.8	0.6170	0.1700
733	100	0.25	0.8	1.2129	0.0600
734	100	0.25	0.8	1.1395	0.0667
735	100	0.25	0.8	1.0856	0.0733
736	100	0.25	0.8	1.0377	0.0800
737	100	0.25	0.8	0.9803	0.0900
738	100	0.25	0.8	0.9496	0.0933
739	100	0.25	0.8	0.9370	0.1000
740	100	0.25	0.8	0.9329	0.1033
741	100	0.25	0.8	0.9274	0.1100
742	100	0.25	0.8	0.9156	0.1167
743	100	0.25	0.8	0.9072	0.1200
744	100	0.25	0.8	0.9026	0.1233
745	100	0.25	0.8	0.8932	0.1267
746	100	0.25	0.8	0.8834	0.1300
747	100	0.25	0.8	0.8790	0.1333
748	100	0.25	0.8	0.8714	0.1367
749	100	0.25	0.8	0.8635	0.1400
750	100	0.25	0.8	0.8574	0.1400
751	100	0.25	0.8	0.8522	0.1433

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
752	100	0.25	0.8	0.8484	0.1467
753	100	0.25	0.8	0.8392	0.1467
754	100	0.25	0.8	0.8273	0.1500
755	100	0.25	0.8	0.8207	0.1533
756	100	0.25	0.8	0.8109	0.1567
757	100	0.25	0.8	0.7905	0.1600
758	100	0.25	0.8	0.7870	0.1600
759	100	0.25	0.8	0.7781	0.1600
760	100	0.25	0.8	0.7635	0.1633
761	100	0.25	0.8	0.7500	0.1667
762	100	0.25	0.8	0.7349	0.1667
763	100	0.25	0.8	0.7174	0.1667
764	100	0.25	0.8	0.6823	0.1700
765	100	0.25	0.8	0.6757	0.1700
766	150	0.25	0.8	1.2022	0.0600
767	150	0.25	0.8	1.1126	0.0667
768	150	0.25	0.8	1.0372	0.0733
769	150	0.25	0.8	0.9946	0.0800
770	150	0.25	0.8	0.9709	0.0900
771	150	0.25	0.8	0.9480	0.0933
772	150	0.25	0.8	0.9181	0.1000
773	150	0.25	0.8	0.9095	0.1033
774	150	0.25	0.8	0.8983	0.1100
775	150	0.25	0.8	0.8924	0.1167
776	150	0.25	0.8	0.8844	0.1200
777	150	0.25	0.8	0.8790	0.1233

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
778	150	0.25	0.8	0.8697	0.1267
779	150	0.25	0.8	0.8653	0.1300
780	150	0.25	0.8	0.8565	0.1333
781	150	0.25	0.8	0.8504	0.1367
782	150	0.25	0.8	0.8412	0.1400
783	150	0.25	0.8	0.8370	0.1400
784	150	0.25	0.8	0.8315	0.1433
785	150	0.25	0.8	0.8262	0.1467
786	150	0.25	0.8	0.8187	0.1467
787	150	0.25	0.8	0.8121	0.1500
788	150	0.25	0.8	0.8004	0.1533
789	150	0.25	0.8	0.7901	0.1567
790	150	0.25	0.8	0.7554	0.1600
791	150	0.25	0.8	0.7521	0.1600
792	150	0.25	0.8	0.7378	0.1600
793	150	0.25	0.8	0.7220	0.1633
794	150	0.25	0.8	0.7136	0.1667
795	150	0.25	0.8	0.7049	0.1667
796	150	0.25	0.8	0.6974	0.1667
797	150	0.25	0.8	0.6483	0.1700
798	150	0.25	0.8	0.6483	0.1700
799	200	0.25	0.8	1.1931	0.0600
800	200	0.25	0.8	1.1032	0.0667
801	200	0.25	0.8	0.9998	0.0733
802	200	0.25	0.8	0.9780	0.0800
803	200	0.25	0.8	0.9229	0.0900

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลัง	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
804	200	0.25	0.8	0.9023	0.0933
805	200	0.25	0.8	0.8913	0.1000
806	200	0.25	0.8	0.8830	0.1033
807	200	0.25	0.8	0.8718	0.1100
808	200	0.25	0.8	0.8565	0.1167
809	200	0.25	0.8	0.8511	0.1200
810	200	0.25	0.8	0.8469	0.1233
811	200	0.25	0.8	0.8328	0.1267
812	200	0.25	0.8	0.8235	0.1300
813	200	0.25	0.8	0.8144	0.1333
814	200	0.25	0.8	0.8048	0.1367
815	200	0.25	0.8	0.7917	0.1400
816	200	0.25	0.8	0.7851	0.1400
817	200	0.25	0.8	0.7781	0.1433
818	200	0.25	0.8	0.7716	0.1467
819	200	0.25	0.8	0.7625	0.1467
820	200	0.25	0.8	0.7553	0.1500
821	200	0.25	0.8	0.7480	0.1533
822	200	0.25	0.8	0.7414	0.1567
823	200	0.25	0.8	0.7204	0.1600
824	200	0.25	0.8	0.7158	0.1600
825	200	0.25	0.8	0.7046	0.1600
826	200	0.25	0.8	0.6953	0.1633
827	200	0.25	0.8	0.6860	0.1667
828	200	0.25	0.8	0.6726	0.1667
829	200	0.25	0.8	0.6503	0.1667

ลำดับ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด พลังวัตต์	ขนาดการ สึกหรอ (มิลลิเมตร)
830	200	0.25	0.8	0.6105	0.1700
831	200	0.25	0.8	0.5768	0.1700



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายละเอียด ขนาดแรงตัดพลวัต อัตราส่วนแรงตัดพลวัต รูปขนาดการสึกหรอด้านข้างคมตัด
ของเม็ดมีดกลึงที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

ผลการทดลอง ตัวอย่างที่	เงื่อนไขการตัดที่	ช่วงการสึกหรอ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
1	1	ช่วงต้น	100	0.15	0.4
2	1	ช่วงกลาง	100	0.15	0.4
3	1	ช่วงปลาย	100	0.15	0.4
4	2	ช่วงต้น	150	0.15	0.4
5	2	ช่วงกลาง	150	0.15	0.4
6	2	ช่วงปลาย	150	0.15	0.4
7	3	ช่วงต้น	200	0.15	0.4
8	3	ช่วงกลาง	200	0.15	0.4
9	3	ช่วงปลาย	200	0.15	0.4
10	4	ช่วงต้น	100	0.20	0.4
11	4	ช่วงกลาง	100	0.20	0.4
12	4	ช่วงปลาย	100	0.20	0.4
13	5	ช่วงต้น	150	0.20	0.4
14	5	ช่วงกลาง	150	0.20	0.4
15	5	ช่วงปลาย	150	0.20	0.4
16	6	ช่วงต้น	200	0.20	0.4
17	6	ช่วงกลาง	200	0.20	0.4
18	6	ช่วงปลาย	200	0.20	0.4
19	7	ช่วงต้น	100	0.25	0.4
20	7	ช่วงกลาง	100	0.25	0.4
21	7	ช่วงปลาย	100	0.25	0.4
22	8	ช่วงต้น	150	0.25	0.4

ผลการทดลอง ตัวอย่างที่	เงื่อนไขการตัดที่	ช่วงการลึกลงหรือ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
23	8	ช่วงกลาง	150	0.25	0.4
24	8	ช่วงปลาย	150	0.25	0.4
25	9	ช่วงต้น	200	0.25	0.4
26	9	ช่วงกลาง	200	0.25	0.4
27	9	ช่วงปลาย	200	0.25	0.4
28	10	ช่วงต้น	100	0.15	0.6
29	10	ช่วงกลาง	100	0.15	0.6
30	10	ช่วงปลาย	100	0.15	0.6
31	11	ช่วงต้น	150	0.15	0.6
32	11	ช่วงกลาง	150	0.15	0.6
33	11	ช่วงปลาย	150	0.15	0.6
34	12	ช่วงต้น	200	0.15	0.6
35	12	ช่วงกลาง	200	0.15	0.6
36	12	ช่วงปลาย	200	0.15	0.6
37	13	ช่วงต้น	100	0.20	0.6
38	13	ช่วงกลาง	100	0.20	0.6
39	13	ช่วงปลาย	100	0.20	0.6
40	14	ช่วงต้น	150	0.20	0.6
41	14	ช่วงกลาง	150	0.20	0.6
42	14	ช่วงปลาย	150	0.20	0.6
43	15	ช่วงต้น	200	0.20	0.6
44	15	ช่วงกลาง	200	0.20	0.6
45	15	ช่วงปลาย	200	0.20	0.6
46	16	ช่วงต้น	100	0.25	0.6
47	16	ช่วงกลาง	100	0.25	0.6
48	16	ช่วงปลาย	100	0.25	0.6

ผลการทดลอง ตัวอย่างที่	เงื่อนไขการตัดที่	ช่วงการลึกลงหรือ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
49	17	ช่วงต้น	150	0.25	0.6
50	17	ช่วงกลาง	150	0.25	0.6
51	17	ช่วงปลาย	150	0.25	0.6
52	18	ช่วงต้น	200	0.25	0.6
53	18	ช่วงกลาง	200	0.25	0.6
54	18	ช่วงปลาย	200	0.25	0.6
55	19	ช่วงต้น	100	0.15	0.8
56	19	ช่วงกลาง	100	0.15	0.8
57	19	ช่วงปลาย	100	0.15	0.8
58	20	ช่วงต้น	150	0.15	0.8
59	20	ช่วงกลาง	150	0.15	0.8
60	20	ช่วงปลาย	150	0.15	0.8
61	21	ช่วงต้น	200	0.15	0.8
62	21	ช่วงกลาง	200	0.15	0.8
63	21	ช่วงปลาย	200	0.15	0.8
64	22	ช่วงต้น	100	0.20	0.8
65	22	ช่วงกลาง	100	0.20	0.8
66	22	ช่วงปลาย	100	0.20	0.8
67	23	ช่วงต้น	150	0.20	0.8
68	23	ช่วงกลาง	150	0.20	0.8
69	23	ช่วงปลาย	150	0.20	0.8
70	24	ช่วงต้น	200	0.20	0.8
71	24	ช่วงกลาง	200	0.20	0.8
72	24	ช่วงปลาย	200	0.20	0.8
73	25	ช่วงต้น	100	0.25	0.8
74	25	ช่วงกลาง	100	0.25	0.8

ผลการทดลอง ตัวอย่างที่	เงื่อนไขการตัดที่	ช่วงการลึกรหรือ	ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
75	25	ช่วงปลาย	100	0.25	0.8
76	26	ช่วงต้น	150	0.25	0.8
77	26	ช่วงกลาง	150	0.25	0.8
78	26	ช่วงปลาย	150	0.25	0.8
79	27	ช่วงต้น	200	0.25	0.8
80	27	ช่วงกลาง	200	0.25	0.8
81	27	ช่วงปลาย	200	0.25	0.8



ผลการทดลองตัวอย่างที่ 1

เงื่อนไขการตัดที่ 1 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	1.7904	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-1.783	
ขนาดแรงป้อน ตัดพลวัต สัมบูรณ์	3.5739	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	0.2479	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	- 2.208	
ขนาดแรงป้อน ตัดหลักสัมบูรณ์	2.4568	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
1.4547	0.0700	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 2

เงื่อนไขการตัดที่ 1 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.4990	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-4.454	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	8.9539	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.0153	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.753	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	9.7683	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.9166	0.1200	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 3

เงื่อนไขการตัดที่ 1 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	6.9522	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.3888	
ขนาดแรงป้อน ตัดพลวัต สัมบูรณ์	14.3410	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	8.5277	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-8.6127	
ขนาดแรงป้อน ตัดหลักสัมบูรณ์	17.1404	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8367	0.1500	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 4

ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	1.6703	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-1.423	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	3.0940	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	1.7109	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-1.546	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	3.2578	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.9497	0.0967	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 5

เงื่อนไขการตัดที่ 2 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.9788	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.4464	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	10.4252	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.3563	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.5737	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	11.9300	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8739	0.1300	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 6

เงื่อนไขการตัดที่ 2 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.4505	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-6.6943	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	14.1448	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	8.3357	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-12.368	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	20.7040	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ
0.6832	0.1700	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 7

เงื่อนไขการตัดที่ 3 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.0122	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.7546	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	10.7668	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.0054	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.1287	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	11.1342	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.9670	0.0867	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 8

เงื่อนไขการตัดที่ 3 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.0955	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-6.4532	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	12.5487	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.4723	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-7.8008	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	15.2731	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.8216	0.1330	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 9

เงื่อนไขการตัดที่ 3 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.6433	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-9.0931	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	15.7365	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.7979	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-12.838	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	20.6365	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7626	0.1467	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 10

เงื่อนไขการตัดที่ 4 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.0659	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-4.375	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	8.4414	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.5333	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.547	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	9.0805	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.9296	0.1167	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 11

เงื่อนไขการตัดที่ 4 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.6053	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.6105	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	11.2158	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.3769	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.6524	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	13.0293	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8608	0.1433	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 12

เงื่อนไขการตัดที่ 4 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.6876	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.2299	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	12.9175	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.9301	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-9.2933	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	16.2235	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7962	0.1600	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 13

เงื่อนไขการตัดที่ 5 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	2.0357	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-1.898	
ขนาดแรงป้อน ตัดพลวัต สัมบูรณ์	3.9337	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	1.9732	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-1.563	
ขนาดแรงป้อน ตัดหลัก สัมบูรณ์	3.5371	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
1.1121	0.0760	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 14

เงื่อนไขการตัดที่ 5 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.1300	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.5063	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	10.6363	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.0206	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.4101	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	12.4307	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8557	0.1367	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 15

เงื่อนไขการตัดที่ 5 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.4220	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.4524	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	11.8744	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.0192	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-9.1223	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	15.1415	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7842	0.1567	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 16

เงื่อนไขการตัดที่ 6 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	1.9991	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-2.154	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	4.1540	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.2634	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-1.912	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	4.1761	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.9947	0.0833	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 17

เงื่อนไขการตัดที่ 6 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.7329	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.5445	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	14.2775	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.8118	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-9.3164	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	17.1282	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8336	0.1300	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 18

เงื่อนไขการตัดที่ 6 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.9096	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.216	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	16.1264	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	11.4263	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-13.890	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	25.3165	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.6370	0.1700	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 19

เงื่อนไขการตัดที่ 7 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.3333	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.479	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	6.8129	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.2743	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.837	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	6.1115	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ
1.1148	0.0800	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 20

เงื่อนไขการตัดที่ 7 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.8616	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-4.6496	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	9.5112	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.3135	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-5.6437	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	10.9572	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8680	0.1400	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 21

เงื่อนไขการตัดที่ 7 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.4785	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-6.6687	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	12.1472	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	10.2665	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-13.014	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	23.2810	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.5218	0.1767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 22

เงื่อนไขการตัดที่ 8 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.2645	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-2.827	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	6.0920	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.0584	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.489	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	5.5483	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
1.0980	0.0800	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 23

เงื่อนไขการตัดที่ 8 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.8530	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-6.7308	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	13.5838	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.6702	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-7.9531	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	15.6233	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.8695	0.1300	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 24

เงื่อนไขการตัดที่ 8 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	9.0929	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-9.9812	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	19.0741	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	19.4013	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-14.788	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	34.1893	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.5579	0.1767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 25

เงื่อนไขการตัดที่ 9 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	1.6927	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-1.961	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	3.6537	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.0632	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-1.924	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	3.9856	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.9167	0.0933	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 26

เงื่อนไขการตัดที่ 9 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.9688	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-9.2265	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	14.1953	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.0658	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-11.269	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	18.3348	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7742	0.1467	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 27

เงื่อนไขการตัดที่ 9 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.4

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	10.8743	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-10.939	
ขนาดแรงป้อน ตัดพลวัตสัมบูรณ์	21.8136	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	22.1403	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-22.831	
ขนาดแรงป้อน ตัดหลักสัมบูรณ์	44.9722	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.4850	0.1767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 28

เงื่อนไขการตัดที่ 10 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.1702	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-1.739	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	3.9092	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	0.4361	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.466	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	2.9022	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
1.3470	0.0633	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 29

เงื่อนไขการตัดที่ 10 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.7370	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.932	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	7.6697	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.1902	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.137	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	8.3274	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.9210	0.1167	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 30

เงื่อนไขการตัดที่ 10 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.1008	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.6370	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	14.7378	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.7861	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-11.013	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	18.7798	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.7839	0.1633	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 31

เงื่อนไขการตัดที่ 11 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.5445	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.692	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	7.2366	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.8878	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-3.471	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	7.3592	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.9833	0.0900	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 32

เงื่อนไขการตัดที่ 11 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.5724	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.0054	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	9.5779	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.1368	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.3054	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	11.4422	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.8371	0.1433	

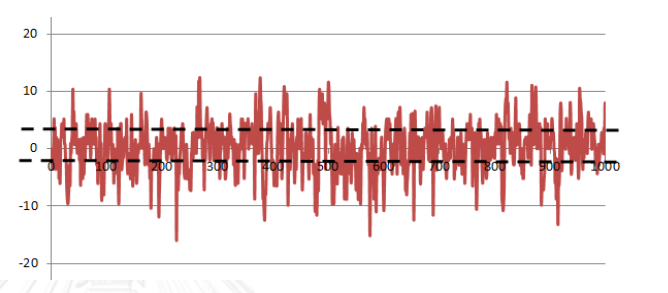
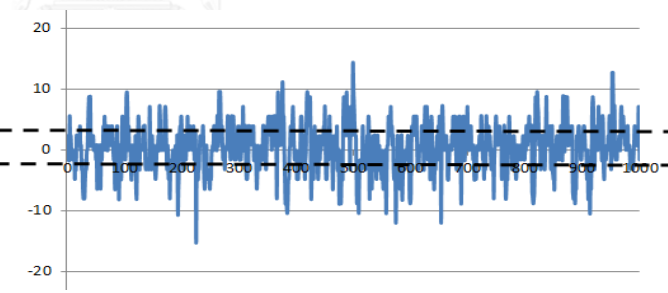
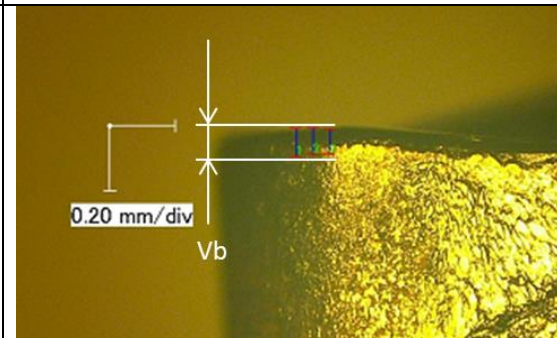
ผลการทดลองตัวอย่างที่ 33

เงื่อนไขการตัดที่ 11 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.9233	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.3538	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	14.2771	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.1231	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-11.350	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	18.4740	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ
0.7728	0.1600	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 34

เงื่อนไขการตัดที่ 12 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.4571	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.784	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	7.2420	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.2487	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-3.843	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	7.0917	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
1.0212	0.0800	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 35

เงื่อนไขการตัดที่ 12 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.0599	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-6.2222	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	12.2821	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.3542	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-7.0927	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	14.4469	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ
0.8502	0.1267	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 36

เงื่อนไขการตัดที่ 12 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.3096	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.6172	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	14.9268	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.9121	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-13.693	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	21.6054	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.6909	0.1667	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 37

เงื่อนไขการตัดที่ 13 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.0139	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-1.725	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	3.7397	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	0.0967	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.214	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	2.3116	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
1.6178	0.0600	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 38

เงื่อนไขการตัดที่ 13 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.7546	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.106	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	8.8608	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.1620	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-5.714	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	9.8765	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8972	0.1267	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 39

เงื่อนไขการตัดที่ 13 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	5.0977	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.4620	
ขนาดแรงป้อน ตัดพลวัต สัมบูรณ์	12.5600	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	6.5283	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-10.965	
ขนาดแรงป้อน ตัดหลักสัมบูรณ์	17.4932	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7180	0.1667	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 40

เงื่อนไขการตัดที่ 14 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.5260	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.671	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	7.1966	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.4693	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.249	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	7.7192	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.9323	0.1000	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 41

เงื่อนไขการตัดที่ 14 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.9280	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.914	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	7.8424	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.6712	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.306	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	8.9776	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8735	0.1267	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 42

เงื่อนไขการตัดที่ 14 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.8536	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.9053	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	13.7589	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.7693	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-11.180	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	17.9495	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7665	0.1600	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 43

เงื่อนไขการตัดที่15 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	1.8873	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-1.8718	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	3.7592	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	1.9498	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-1.514	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	3.4652	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
1.0848	0.0733	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 44

เงื่อนไขการตัดที่ 15 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.6018	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.796	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	7.3984	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.3679	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.467	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	9.0461	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.8179	0.1367	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 45

เงื่อนไขการตัดที่ 15 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	5.5161	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.1890	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	10.7050	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	15.4203	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-13.083	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	28.5033	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.3756	0.1767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 46

เงื่อนไขการตัดที่ 16 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.7360	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.2355	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	9.9715	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.1115	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-5.7887	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	10.9002	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.9148	0.1200	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 47

เงื่อนไขการตัดที่ 16 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.3098	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.9257	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	11.2354	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.7908	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-7.2939	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	13.0848	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.8587	0.1433	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 48

เงื่อนไขการตัดที่ 16 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.7453	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.9324	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	16.6778	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	13.3186	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-11.683	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	25.0025	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.6670	0.1733	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 49

เงื่อนไขการตัดที่ 17 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.5843	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-2.297	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	4.8817	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.3008	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.025	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	4.3268	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
1.1283	0.0700	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 50

เงื่อนไขการตัดที่ 17 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.4222	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.9655	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	12.3877	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.9297	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-7.5632	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	15.4928	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.7996	0.1533	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 51

เงื่อนไขการตัดที่ 17 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	8.6198	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-10.576	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	19.1965	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	15.8784	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-14.564	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	30.4427	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.6306	0.1733	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 52

เงื่อนไขการตัดที่ 18 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.3690	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-4.522	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	8.8919	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.1019	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.724	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	9.8268	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.9049	0.0933	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 53

เงื่อนไขการตัดที่ 18 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.0121	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.2409	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	14.2530	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.0708	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-11.232	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	18.3034	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7787	0.1433	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 54

เงื่อนไขการตัดที่ 18 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.6

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	8.5400	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.9768	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	17.5168	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	14.0422	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-14.610	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	28.6529	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.6113	0.1700	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 55

เงื่อนไขการตัดที่ 19 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.5851	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.463	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	7.0490	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.5287	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.887	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	6.4163	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
1.0986	0.0767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 56

เงื่อนไขการตัดที่ 19 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.4179	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.5223	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	10.9402	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.2523	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.1951	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	12.4474	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8789	0.1367	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 57

เงื่อนไขการตัดที่ 19 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	8.3772	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-9.3276	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	17.7047	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	14.3898	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-17.238	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	31.6280	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.5598	0.1767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 58

เงื่อนไขการตัดที่ 20 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.3319	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.0190	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	10.3509	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.7751	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.0533	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	11.8284	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.8751	0.1267	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 59

เงื่อนไขการตัดที่ 20 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	8.3265	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.6937	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	17.0201	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	11.0113	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-10.705	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	21.7171	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.78373	0.1567	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 60

เงื่อนไขการตัดที่ 20 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	8.6163	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-9.3711	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	17.9873	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	17.2226	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-15.824	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	33.0466	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.5443	0.1767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 61

เงื่อนไขการตัดที่ 21 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.3910	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-4.224	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	8.6153	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.3253	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.545	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	8.8710	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.9712	0.0867	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 62

เงื่อนไขการตัดที่ 21 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.8601	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.4738	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	10.3339	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.3824	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-7.3788	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	12.7612	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8098	0.1367	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 63

เงื่อนไขการตัดที่ 21 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.15	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.8899	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.414	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	13.3041	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.4546	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-13.019	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	19.4740	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.6832	0.1667	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 64

เงื่อนไขการตัดที่ 22 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.0935	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-2.776	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	5.8700	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.7274	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.232	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	4.9595	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
1.1836	0.0667	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 65

เงื่อนไขการตัดที่ 22 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.6428	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.495	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	7.1385	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.9985	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-4.250	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	8.2491	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8654	0.1400	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 66

เงื่อนไขการตัดที่ 22 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.7434	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.2217	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	15.9650	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	18.5053	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-19.106	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	37.6113	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.4245	0.1767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 67

เงื่อนไขการตัดที่ 23 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.4809	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-4.9305	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	9.4115	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.6887	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-5.5255	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	10.2142	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.9214	0.1000	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 68

เงื่อนไขการตัดที่ 23 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.8862	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.5910	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	9.4772	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.7440	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.3648	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	11.1088	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8531	0.1367	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 69

เงื่อนไขการตัดที่ 23 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	9.9824	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-10.309	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	20.2915	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	17.7793	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-17.830	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	35.6098	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.5698	0.1733	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 70

เงื่อนไขการตัดที่ 24 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.2108	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.3521	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	10.5629	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.7308	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-6.3215	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	12.0524	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสีก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสีกหรือ
0.8764	0.1100	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 71

เงื่อนไขการตัดที่ 24 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.1614	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-6.9352	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	12.0965	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.9458	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-9.4891	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	15.4348	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7837	0.1433	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 72

เงื่อนไขการตัดที่ 24 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.20	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	8.1782	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.915	
ขนาดแรงป้อน ตัดพลวัตสัมบูรณ์	16.0938	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	19.7444	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-24.962	
ขนาดแรงป้อน ตัดหลักสัมบูรณ์	44.7071	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.3600	0.1767	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 73

เงื่อนไขการตัดที่ 25 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.0683	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.204	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	6.2730	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.8258	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.346	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	5.1719	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
1.2129	0.0600	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 74

เงื่อนไขการตัดที่ 25 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.6370	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-6.5500	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	11.1870	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.0586	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-7.7787	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	12.8373	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8714	0.1367	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 75

เงื่อนไขการตัดที่ 25 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
100	0.25	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.3606	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.5879	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	11.9485	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.4758	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-10.455	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	15.9309	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7500	0.1667	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 76

เงื่อนไขการตัดที่ 26 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	1.9747	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-4.000	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	5.9747	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	2.6319	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.337	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	4.9697	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
1.2022	0.0600	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 77

เงื่อนไขการตัดที่ 26 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.8651	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-5.1443	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	10.0094	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	6.0151	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-5.9431	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	11.9582	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.8370	0.1433	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 78

เงื่อนไขการตัดที่ 26 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
150	0.25	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	7.9977	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-8.795	
ขนาดแรงป้อนตัด พลวัตสัมบูรณ์	16.7933	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	13.9707	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-11.933	
ขนาดแรงป้อนตัด หลักสัมบูรณ์	25.9038	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึก หรือ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรือ
0.6483	0.1733	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 79

เงื่อนไขการตัดที่ 27 (ช่วงต้น)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy)(นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.0286	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-3.124	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	6.1532	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	3.1739	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-2.980	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	6.1547	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.9998	0.0733	

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 80

เงื่อนไขการตัดที่ 27 (ช่วงกลาง)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.8

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	4.9671	
แรงค่าลบ(เฉลี่ย)	-7.1697	
ขนาดแรงป้อนตัดพลวัตสัมบูรณ์	12.1368	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก(เฉลี่ย)	5.9547	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-9.3754	
ขนาดแรงป้อนตัดหลักสัมบูรณ์	15.3301	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.7917	0.1400	

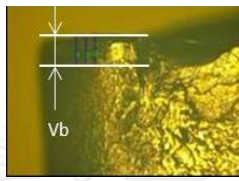

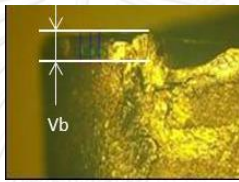
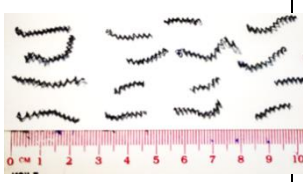
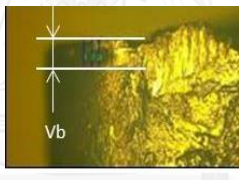

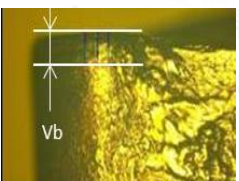

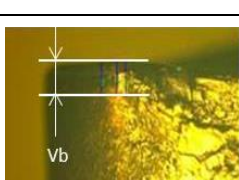
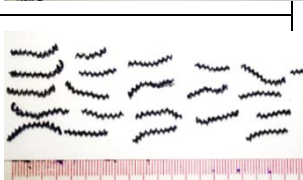
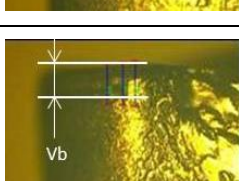

ผลการทดลองตัวอย่างที่ 81

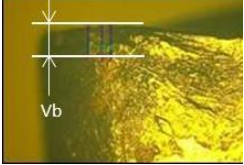
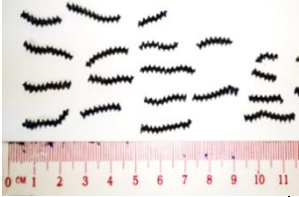
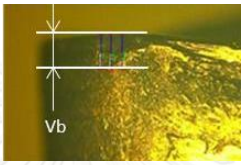
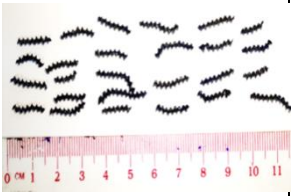
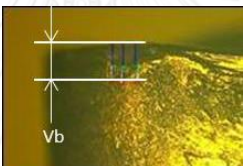
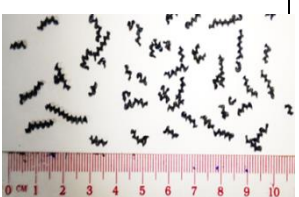
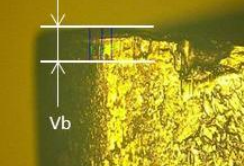
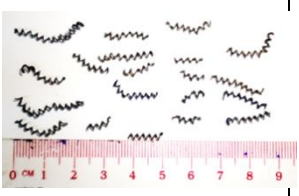
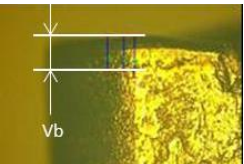

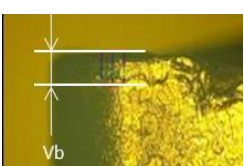

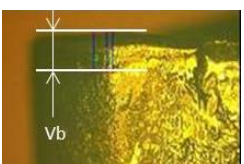
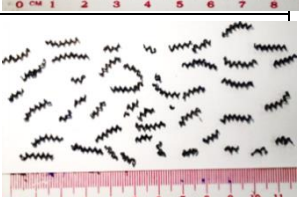
เงื่อนไขการตัดที่ 27 (ช่วงปลาย)		
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
200	0.25	0.8

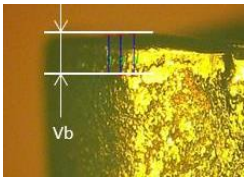

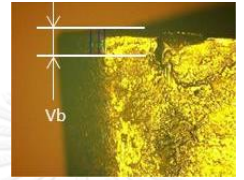

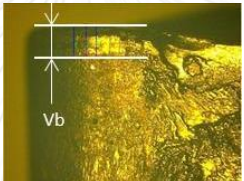

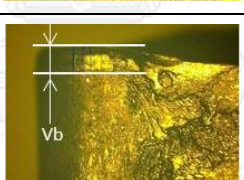

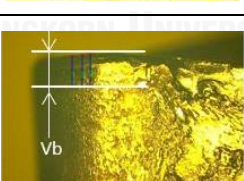

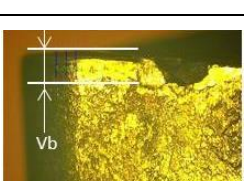

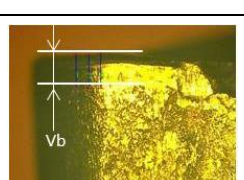

ผลการทดลอง		
แรงป้อนตัดพลวัตเฉลี่ย (dFy) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	9.9172	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-10.442	
ขนาดแรงป้อน ตัดพลวัต สัมบูรณ์	20.3614	
แรงตัดหลักพลวัตเฉลี่ย (dFz) (นิวตัน)		
แรงค่าบวก (เฉลี่ย)	16.6842	
แรงค่าลบ (เฉลี่ย)	-14.627	
ขนาดแรงป้อน ตัดหลัก สัมบูรณ์	31.3117	
อัตราส่วนแรงตัดพลวัต (dFy/dFz)	ขนาดการสึกหรอ (มิลลิเมตร)	รูปการสึกหรอ
0.6503	0.1667	

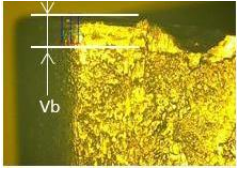

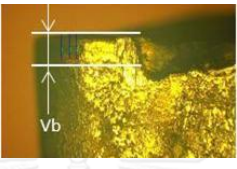

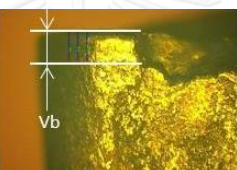

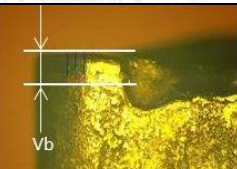

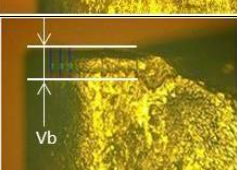

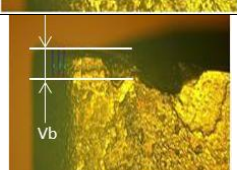

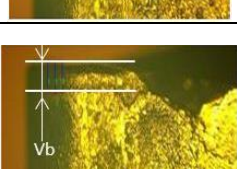

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงภาพเศษโลหะภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่ขนาดการสึกหรอมีดกลึง 0.17 มิลลิเมตร

ลำดับที่	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อนตัด (mm /rev)	ความลึกตัด (mm.)	ภาพขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของมีด มีดกลึง (Flank wear, Vb)	ขนาดการสึกหรอ (mm.)	ภาพเศษโลหะ
1	100	0.15	0.4		0.17	
2	150	0.15	0.4		0.17	
3	200	0.15	0.4		0.17	
4	100	0.20	0.4		0.17	
5	150	0.20	0.4		0.17	
6	200	0.20	0.4		0.17	

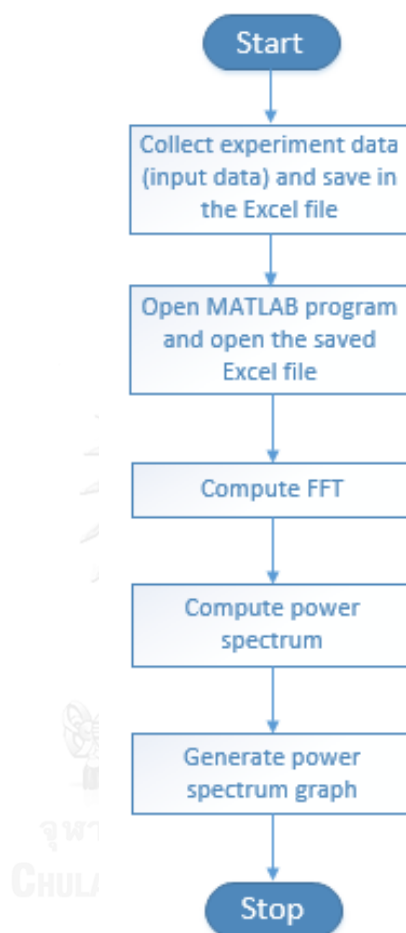
ลำดับที่	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm.)	ภาพขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึง (Flank wear, Vb)	ขนาดการสึกหรอ (mm.)	ภาพเศษโลหะ
7	100	0.25	0.4		0.17	
8	150	0.25	0.4		0.17	
9	200	0.25	0.4		0.17	
10	100	0.15	0.6		0.17	
11	150	0.15	0.6		0.17	
12	200	0.15	0.6		0.17	
13	100	0.20	0.6		0.17	

ลำดับที่	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm.)	ภาพขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึง (Flank wear, V_b)	ขนาดการสึกหรอ (mm.)	ภาพเศษโลหะ
14	150	0.20	0.6		0.17	
15	200	0.20	0.6		0.17	
16	100	0.25	0.6		0.17	
17	150	0.25	0.6		0.17	
18	200	0.25	0.6		0.17	
19	100	0.15	0.8		0.17	
20	150	0.15	0.8		0.17	

ลำดับที่	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราการป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm.)	ภาพขนาดการสึกหรอ ด้านข้างคมตัดของเม็ดมีดกลึง (Flank wear, Vb)	ขนาดการสึกหรอ (mm.)	ภาพเศษโลหะ
21	200	0.15	0.8		0.17	
22	100	0.20	0.8		0.17	
23	150	0.20	0.8		0.17	
24	200	0.20	0.8		0.17	
25	100	0.25	0.8		0.17	
26	150	0.25	0.8		0.17	
27	200	0.25	0.8		0.17	

ภาคผนวก ง

โปรแกรมMATLABในการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วในวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัต



โปรแกรมMATLAB

```
clear;
samp = 1000; %Sampling Frequency
fname1 = 'd1'; % ชื่อไฟล์ Notepad "d1" ที่ต้องการเปิด
ext1 = '.txt'; % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname1,ext1]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename); % เรียกไฟล์
eval(['data1=',[fname1],',']); % โหลดไฟล์ข้อมูลจากภายนอก
```

```

[N1,n1]=size(data1);           % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถวและ n เป็น
                               % จำนวนคอลัมน์

fname2 = 'n27';               % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext2 = '.txt';                 % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname2,ext2];     % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);              % เรียกไฟล์
eval(['data2=',fname2,'];');  % โหลดไฟล์ข้อมูลจากภายนอก
[N2,n2]=size(data2);         % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถว และ
                               % n เป็น จำนวนคอลัมน์

t=1/samp;
tt=(0:t:t*(N2-1));           %Using plot graph __ time domain
f=(0:N1-1)/N1*samp;
freq=f(1:N1/2);               %Using plot graph __ frequency domain
FX=fft(data1(:,1))/(N1*2);    % column 1 __ take FFT of dFx
absFX=abs(FX(1:N1/2));
PabsFX=absFX.^2;
FY=fft(data1(:,2))/(N1*2);    % column 2 __ take FFT of dFy

absFY=abs(FY(1:N1/2));
PabsFY=absFY.^2;
FZ=fft(data1(:,3))/(N1*2);    % column 3 __ take FFT of dFz
absFZ=abs(FZ(1:N1/2));
PabsFZ=absFZ.^2;

figure(102);
subplot(3,1,1);plot(freq,PabsFX);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fx
N^2');
axis([0 500 0*10^-3 1000*10^-3])
subplot(3,1,2);plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fy
N^2');

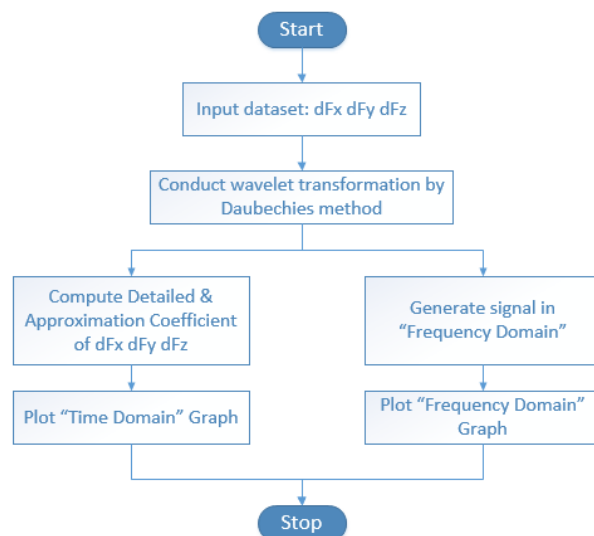
```

```
axis([0 500 0*10^-3 1500*10^-3])
subplot(3,1,3);plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fz
N^2');
axis([0 500 0*10^-3 1500*10^-3])
figure(103);
subplot(3,1,1);plot(tt,data2(:,1));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic radial
force(N)');
axis([0 1 -55 55])
subplot(3,1,2);plot(tt,data2(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic feed
force(N)');
axis([0 1 -55 55])
subplot(3,1,3);plot(tt,data2(:,3));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic main
force(N)');
axis([0 1 -55 55])
```



ภาคผนวก จ

โปรแกรม MATLAB ในการแปลงสัญญาณแบบเวฟเล็ตในการวิเคราะห์แรงตัดพลวัต



โปรแกรม MATLAB

```
% โหลดข้อมูลแรงตัดในแกน dFx, dFy, dFz เข้าสู่โปรแกรม
forcedynamic = textread('d1.txt');
L_x1 = length(forcedynamic);
fx = forcedynamic(:,1); fy = forcedynamic(:,2); fz = forcedynamic(:,3);
[N,n]=size(forcedynamic);
samp = 1000;
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-1));
f=(0:N-1)/N*samp;
freq1 = f(1:N/2);

%แปลงสัญญาณเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย(Discrete wavelet transform)
โดยใช้การแปลงแบบคอบเบชีส์
[cAx1,cDx1] = dwt(forcedynamic(:,1),'db2');
```

```
[cAy1,cDy1] = dwt(forcedynamic(:,2),'db2');
```

```
[cAz1,cDz1] = dwt(forcedynamic(:,3),'db2');
```

```
[cAx2,cDx2] = dwt(cAx1,'db2');
```

```
[cAx3,cDx3] = dwt(cAx2,'db2');
```

```
[cAx4,cDx4] = dwt(cAx3,'db2');
```

```
[cAx5,cDx5] = dwt(cAx4,'db2');
```

```
[cAy2,cDy2] = dwt(cAy1,'db2');
```

```
[cAy3,cDy3] = dwt(cAy2,'db2');
```

```
[cAy4,cDy4] = dwt(cAy3,'db2');
```

```
[cAy5,cDy5] = dwt(cAy4,'db2');
```

```
[cAz2,cDz2] = dwt(cAz1,'db2');
```

```
[cAz3,cDz3] = dwt(cAz2,'db2');
```

```
[cAz4,cDz4] = dwt(cAz3,'db2');
```

```
[cAz5,cDz5] = dwt(cAz4,'db2');
```

```
%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Detail coefficientsของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFx
```

```
Dx1 = upcoef('d',cDx1,'db2',1,l_x1);
```

```
Dx2 = upcoef('d',cDx2,'db2',2,l_x1);
```

```
Dx3 = upcoef('d',cDx3,'db2',3,l_x1);
```

```
Dx4 = upcoef('d',cDx4,'db2',4,l_x1);
```

```
Dx5 = upcoef('d',cDx5,'db2',5,l_x1);
```

```
%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Approximation coefficientsของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFx
```

```
Ax1 = upcoef('a',cAx1,'db2',1,l_x1);
```

```
Ax2 = upcoef('a',cAx2,'db2',2,l_x1);
```

```
Ax3 = upcoef('a',cAx3,'db2',3,l_x1);
```

```
Ax4 = upcoef('a',cAx4,'db2',4,l_x1);
```

```
Ax5 = upcoef('a',cAx5,'db2',5,l_x1);
```

```
%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Detail coefficientsของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFy
```

```
Dy1 = upcoef('d',cDy1,'db2',1,l_x1);
```

```
Dy2 = upcoef('d',cDy2,'db2',2,l_x1);
```

```
Dy3 = upcoef('d',cDy3,'db2',3,l_x1);
```

```
Dy4 = upcoef('d',cDy4,'db2',4,l_x1);
```

```
Dy5 = upcoef('d',cDy5,'db2',5,l_x1);
```

```
%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Approximation coefficientsของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFy
```

```
Ay1 = upcoef('a',cAy1,'db2',1,l_x1);
```

```
Ay2 = upcoef('a',cAy2,'db2',2,l_x1);
```

```
Ay3 = upcoef('a',cAy3,'db2',3,l_x1);
```

```
Ay4 = upcoef('a',cAy4,'db2',4,l_x1);
```

```
Ay5 = upcoef('a',cAy5,'db2',5,l_x1);
```

```
%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Detail coefficientsของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFz
```

```
Dz1 = upcoef('d',cDz1,'db2',1,l_x1);
```

```
Dz2 = upcoef('d',cDz2,'db2',2,l_x1);
```

```
Dz3 = upcoef('d',cDz3,'db2',3,l_x1);
```

```
Dz4 = upcoef('d',cDz4,'db2',4,l_x1);
```

```
Dz5 = upcoef('d',cDz5,'db2',5,l_x1);
```

```
%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Approximation coefficientsของสัญญาณแรงตัดพลวัต dFz
```

```
Az1 = upcoef('a',cAz1,'db2',1,l_x1);
```

```
Az2 = upcoef('a',cAz2,'db2',2,l_x1);
```

```
Az3 = upcoef('a',cAz3,'db2',3,l_x1);
```

```
Az4 = upcoef('a',cAz4,'db2',4,l_x1);
```

```
Az5 = upcoef('a',cAz5,'db2',5,l_x1);
```

```
%สร้างกราฟในโดเมนเวลา
```

```
time = 0.001:0.001:l_x1/1000;
```

```
t = 1/samp;
```

```
time = (0:t*(N-1));
```

```
max_TD = 100;
```

```
min_TD = -1*max_TD;
```

```
figure(1);
```

```
subplot(6,1,1);
```

```
plot(time,forcedynamic(:,1));
```

```
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x(N)');title('Original Signal');ylim([-40 40]);
```

```
subplot(6,1,2)
```

```
plot(time,Dx1)
```

```
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-30 30]);
```

```
subplot(6,1,3)
```

```
plot(time,Dx2)
```

```
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-30 30]);
```

```
subplot(6,1,4)
```

```
plot(time,Dx3)
```

```
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-30 30]);
```

```
subplot(6,1,5)
```

```
plot(time,Dx4)
```

```

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-30
30]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dx5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-30
30]);

figure(2);
subplot(6,1,1);
plot(time,forcedynamic(:,2));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Original Signal');ylim([-40 40]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dy1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-30
30]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dy2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-30
30]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dy3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-30
30]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dy4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-30
30]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dy5)

```



```

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-30
30]);

figure(3);
subplot(6,1,1);
plot(time,forcedynamic(:,3));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Original Signal'); ylim([-40 40]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dz1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-30
30]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dz2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-30
30]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dz3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-30
30]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dz4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D4'); ylim([-30
30]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dz5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D5'); ylim([-30
30]);

```

%สร้างสัญญาณในรูปแบบโดเมนความถี่

```
[N1,M1] = size(Dx1);
[N2,M2] = size(Dx2);
[N3,M3] = size(Dx3);
[N4,M4] = size(Dx4);
[N5,M5] = size(Dx5);
```

```
sample = N;
t = 1/sample;
tt = (0:t:t*(N-1));
f = (0:N-1)/N*sample;
freq = f(1:N/2);
```

```
fx0 = fft(forcedynamic(:,1))/N*2;
fx1 = fft(Dx1)/N*2;
fx2 = fft(Dx2)/N*2;
fx3 = fft(Dx3)/N*2;
fx4 = fft(Dx4)/N*2;
fx5 = fft(Dx5)/N*2;
```

```
fx0abs = abs(fx0(1:N1/2));
fx1abs = abs(fx1(1:N1/2));
fx2abs = abs(fx2(1:N2/2));
fx3abs = abs(fx3(1:N3/2));
fx4abs = abs(fx4(1:N4/2));
fx5abs = abs(fx5(1:N5/2));
```

```
fx0abs2 = fx0abs.^2;
fx1abs2 = fx1abs.^2;
fx2abs2 = fx2abs.^2;
```



```
fx3abs2 = fx3abs.^2;
```

```
fx4abs2 = fx4abs.^2;
```

```
fx5abs2 = fx5abs.^2;
```

```
fy0 = fft(forcedynamic(:,2))/N^2;
```

```
fy1 = fft(Dy1)/N^2;
```

```
fy2 = fft(Dy2)/N^2;
```

```
fy3 = fft(Dy3)/N^2;
```

```
fy4 = fft(Dy4)/N^2;
```

```
fy5 = fft(Dy5)/N^2;
```

```
fy0abs = abs(fy0(1:N1/2));
```

```
fy1abs = abs(fy1(1:N1/2));
```

```
fy2abs = abs(fy2(1:N2/2));
```

```
fy3abs = abs(fy3(1:N3/2));
```

```
fy4abs = abs(fy4(1:N4/2));
```

```
fy5abs = abs(fy5(1:N5/2));
```

```
fy0abs2 = fy0abs.^2;
```

```
fy1abs2 = fy1abs.^2;
```

```
fy2abs2 = fy2abs.^2;
```

```
fy3abs2 = fy3abs.^2;
```

```
fy4abs2 = fy4abs.^2;
```

```
fy5abs2 = fy5abs.^2;
```

```
fz0 = fft(forcedynamic(:,3))/N^2;
```

```
fz1 = fft(Dz1)/N^2;
```

```
fz2 = fft(Dz2)/N^2;
```

```
fz3 = fft(Dz3)/N^2;
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
fz4 = fft(Dz4)/N*2;
```

```
fz5 = fft(Dz5)/N*2;
```

```
fz0abs = abs(fz0(1:N1/2));
```

```
fz1abs = abs(fz1(1:N1/2));
```

```
fz2abs = abs(fz2(1:N2/2));
```

```
fz3abs = abs(fz3(1:N3/2));
```

```
fz4abs = abs(fz4(1:N4/2));
```

```
fz5abs = abs(fz5(1:N5/2));
```

```
fz0abs2 = fz0abs.^2;
```

```
fz1abs2 = fz1abs.^2;
```

```
fz2abs2 = fz2abs.^2;
```

```
fz3abs2 = fz3abs.^2;
```

```
fz4abs2 = fz4abs.^2;
```

```
fz5abs2 = fz5abs.^2;
```

```
%สร้างกราฟในโดเมนความถี่
```

```
figure(4);
```

```
subplot(6,1,1);
```

```
plot(fx0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Original Signal');
```

```
xlim([0 500]); ylim([0 10]);
```

```
subplot(6,1,2);
```

```
plot(fx1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D1');
```

```
xlim([0 500]); ylim([0 10]);
```

```
subplot(6,1,3);
```

```
plot(fx2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D2');
```

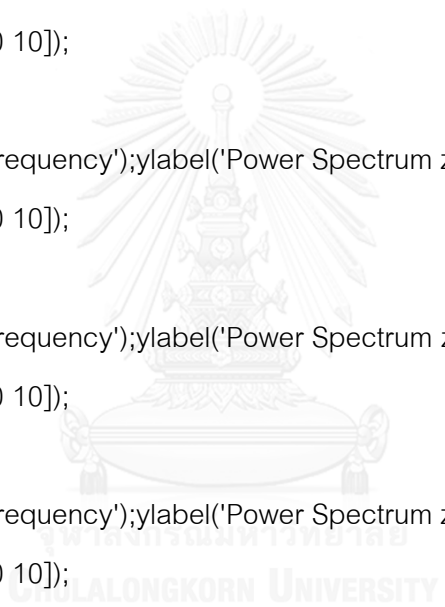
```
xlim([0 500]); ylim([0 10]);
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
subplot(6,1,4);
plot(fx3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,5);
plot(fx4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,6);
plot(fx5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
figure(5);
subplot(6,1,1);
plot(fy0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Original Signal');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,2);
plot(fy1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D1');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,3);
plot(fy2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D2');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,4);
plot(fy3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,5);
plot(fy4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,6);
plot(fy5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
```

```
figure(6);
subplot(6,1,1);
plot(fz0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Original Signal');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,2);
plot(fz1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D1');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,3);
plot(fz2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D2');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,4);
plot(fz3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,5);
plot(fz4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,6);
plot(fz5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 10]);
```

The watermark is a circular emblem with a central sunburst. Below the sunburst is a tiered structure resembling a traditional Thai stupa or a similar religious monument. The entire emblem is surrounded by a decorative border. Below the emblem, the text 'RAJABHAT SAKON NAKHON UNIVERSITY' is written in a stylized font, with 'SUKHOLONGKORN UNIVERSITY' written in a simpler font below it.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชวลิต วงศ์ตั้งถิ่นฐาน เกิดเมื่อวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกาฬสินธุ์ เมื่อ พ.ศ. 2543 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายสายวิทย์-คณิตจากโรงเรียนกาฬสินธุ์พิทยาสรรพ จังหวัดกาฬสินธุ์ จากนั้น พ.ศ. 2544 ได้โควตาช่างเผือกเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สาขาอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล (Mechatronics) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMUTL) และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2547 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

