

การพัฒนาตรวจจับการแตกหักเศษโลหะโดยใช้สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ

นางสาวกิติกุล กลิ่งผล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

DEVELOPMENT OF CHIP BREAKING DETECTION BY USING CUTTING FORCE AND  
TEMPERATURE SIGNALS

Ms. Kitikun Klungphon

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาตรวจจับการแตกหักเศษโลหะโดยใช้สัญญาณแรง ตัดและอุณหภูมิ
โดย	นางสาวกิติกุล กลิ่งผล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ)

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

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก)

กิติกุล กลิ่งผล : การพัฒนาตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะโดยใช้สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ. (DEVELOPMENT OF CHIP BREAKING DETECTION BY USING CUTTING FORCE AND TEMPERATURE SIGNALS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก: รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ, 150 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะในกระบวนการกลึงขึ้น เนื่องจากตระหนักถึงความจำเป็นในการใช้เครื่องจักรกลอัจฉริยะเพื่อตรวจจับเศษโลหะแบบต่อเนื่องและแบบแตกหัก โดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขในการตัด โดยประยุกต์ใช้ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดพลวัตและค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิตัดพลวัต ซึ่งจะถูกตรวจวัดแรงตัดและอุณหภูมิด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์และเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสในระหว่างการตัด ในขั้นตอนการปฏิบัติงานนั้นต้องการให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหักเพื่อเสถียรภาพในการตัด โดยในการทดลองเบื้องต้นนั้นพบว่าสัญญาณจากแรงตัดและอุณหภูมินั้นสามารถจำแนกได้เป็นสองรูปแบบตามการแตกหักของเศษโลหะทั้งสองชนิด คือ โลหะแบบแตกหักและโลหะแบบต่อเนื่องนั่นเอง

ระบบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่สามารถตรวจจับการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน โดยได้เสนอพารามิเตอร์ AX, AY, AZ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมสะสมของแรงตัดในช่วงความถี่การแตกหักของเศษโลหะเทียบกับระหว่างสามแกนและพารามิเตอร์ AVT ที่หาได้จากอัตราส่วนของค่าอุณหภูมิตัดสูงสุดต่อความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิตัด ระบบนี้ได้รับการตรวจสอบด้วยชุดการทดลองแล้วพบว่าสามารถตรวจจับเศษโลหะแบบแตกหักได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องคำนึงถึงสภาวะเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ตารางรูปร่างเศษโลหะที่ได้จากผลการทดลองสามารถนำมาเป็นแหล่งอ้างอิงเมื่อต้องการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดเพื่อให้ได้เศษโลหะที่แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2554.....

# #5170673321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : TURNING PROCESS / CHIP BREAKING / BROKEN CHIP / CONTINUOUS CHIP / CUTTING FORCE / CUTTING TEMPERATURE

KITIKUN KLUNGPHON: DEVELOPMENT OF CHIP BREAKING DETECTION BY USING CUTTING FORCE AND TEMPERATURE SIGNALS. ADVISOR: ASSOC.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng, 150 pp.

In order to realize the intelligent machines, an in-process monitoring system is developed to detect the continuous chip and the broken chip regardless of the cutting conditions on CNC turning by utilizing the power spectrum density, PSD of dynamic cutting force and the variance of the dynamic cutting temperature, which are measured during the cutting by employing the dynamometer and the infrared pyrometer. The broken chip formation is required for the reliable turning operation. The preliminary experiments suggested that there are basically two patterns of PSDs of chip forms. The variances of the cutting temperature are also significantly different between the broken chip and the continuous chip.

The new algorithm is proposed to obtain the broken chip by changing the cutting conditions during the cutting process. The parameters of AX, AY, AZ which are calculated and obtained by taking the ratio of the cumulative PSDs of three dynamic cutting forces for a certain frequency range, which corresponds to the states of cutting. AVT is defined as the ratio of the maximum variance of cutting temperature to the average variance of cutting temperature. It has been proved by series of cutting experiments that the broken chip can be well identified by the proposed method even though the cutting conditions are changed. The photographs of chips from the experimental results can be used as a reference to changing the cutting conditions and make the continuous chips broken into small pieces.

Department : .....Industrial Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : .....Industrial Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเสียสละเวลาให้คำแนะนำและความรู้ที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาของการจัดทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อ.ดร.ไพโรจน์ ฤตาวิจิตรกุล รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็นเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือ รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี และอุปกรณ์ที่จำเป็น สำหรับการทดลองในครั้งนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ตลอดจน พี่น้องๆ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทบาทระบบอัตโนมัติที่มีต่ออุตสาหกรรมการผลิตในอนาคต.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	8
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	8
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	9
1.8 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	61
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	61
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	61
3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล.....	65
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	69

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	74
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบเศษโลหะกับสัญญาณแรงตัด.....	74
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบเศษโลหะกับสัญญาณอุณหภูมิตัด.....	81
4.3 การจำแนกสถานะการแตกหักเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก...	84
4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิตัดที่ส่งผลต่อรูปแบบเศษโลหะและการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด.....	92
4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	99
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	102
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	103
5.3 อุปสรรคในการวิจัย.....	104
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ สำหรับวิเคราะห์รูปแบบการแตกหักของเศษโลหะด้วยสัญญาณแรงตัด.....	110
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ สำหรับวิเคราะห์รูปแบบการแตกหักของเศษโลหะด้วยสัญญาณอุณหภูมิ.....	115
ภาคผนวก ค โปรแกรม Matlab สำหรับการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและคำนวณค่าความแปรปรวน.....	119
ภาคผนวก ง ตัวอย่างภาพวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตและสัญญาณอุณหภูมิด้วยเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน.....	131
ภาคผนวก จ ขั้นตอนการปฏิบัติงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	150



## สารบัญญัตราสาร

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเลือกใช้ความเร็วตัด อัตราป้อนตัดในงานกลึง สำหรับวัสดุชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า.....	18
ตารางที่ 2.2 แสดงการเลือกใช้เงื่อนไขการตัดตามประเภทการกลึงหยาบและการกลึงละเอียด .....	18
ตารางที่ 2.3 กลไกที่ทำให้เกิดการสึกหรอบนมีดตัด.....	37
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่า sensitivity และช่วงความถี่ใช้งานของเซนเซอร์แรงตัด.....	68
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัดส่วนของความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมบนแรงตัดหลักต่อแรงป้อนตัด (AX) และการคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก (C1).....	85
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าอัตราส่วนของความแปรปรวนอนุหุมิตัดพลวัต (AVT) และการคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก (C4).....	86
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัดส่วนของความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมบนแรงตัดหลักต่อแรงตัดรัศมี (AY) และการคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก (C2).....	88
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัดส่วนของความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมบนแรงป้อนตัดต่อแรงตัดรัศมี (AZ) และการคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก (C3).....	90
ตารางที่ 4.5 แสดงตัวอย่างรูปร่างของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน.....	96
ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขการตัดเพื่อทดสอบยืนยันผลการทดลอง.....	99
ตารางที่ 4.7 แสดงรูปร่างของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะภายใต้เงื่อนไขการตัดเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	101

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 วิวัฒนาการเครื่องจักรกลอัจฉริยะ.....	2
ภาพที่ 1.2 เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามในเครื่องจักรกลอัจฉริยะ.....	3
ภาพที่ 1.3 เศษโลหะพันรอบชิ้นงาน.....	5
ภาพที่ 1.4 เศษโลหะพันรอบมีดตัด.....	5
ภาพที่ 1.5 การทดลองเบื้องต้นแสดงผลของแรงตัดพลวัตและอุณหภูมิในโดเมนเวลา.....	7
ภาพที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการตัดหลัก.....	11
ภาพที่ 2.2 ลักษณะของกระบวนการตัด.....	12
ภาพที่ 2.3 ประเภทของงานกลึง.....	13
ภาพที่ 2.4 แสดงความเร็วตัดในการกลึง.....	16
ภาพที่ 2.5 แรงในการตัดโลหะ.....	19
ภาพที่ 2.6 แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ.....	20
ภาพที่ 2.7 พื้นที่การตัด.....	21
ภาพที่ 2.8 การเกิดเศษโลหะของขบวนการกลึง.....	22
ภาพที่ 2.9 แบบจำลองของการตัด.....	23
ภาพที่ 2.10 รูปแบบหลักของการเกิดเศษโลหะในการตัด.....	25
ภาพที่ 2.11 แสดงการเกิดเศษโลหะไม่ต่อเนื่อง.....	26
ภาพที่ 2.12 แสดงขั้นตอนการยึดติดที่คมตัด.....	27
ภาพที่ 2.13 แสดงรูปแบบของเศษโลหะที่ยอมรับได้และแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น.....	28
ภาพที่ 2.14 การจัดประเภทของรูปแบบของเศษโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1993.....	29
ภาพที่ 2.15 บริเวณที่เกิดความร้อนขณะตัด.....	30
ภาพที่ 2.16 ค่าประมาณของการเกิดความร้อน ของ 3 โซน.....	30
ภาพที่ 2.17 การวัดอุณหภูมิการตัดบนเครื่องจักรกล.....	31
ภาพที่ 2.18 การจัดวางของเทอร์โมคัปเปิลแบบ tool- workpiece.....	32
ภาพที่ 2.19 การจัดวางของอินฟราเรดไพโรมิเตอร์ในกระบวนการกลึง.....	33
ภาพที่ 2.20 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิบน rake face.....	35
ภาพที่ 2.21 ภาพการสึกหรอของมีดตัด แสดงตำแหน่งและรูปแบบของการสึกหรอที่เกิดขึ้น	36
ภาพที่ 2.22 เกณฑ์ในการเลือกมีดตัด.....	38
ภาพที่ 2.23 การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียววัสดุมีดตัด.....	39

ภาพที่ 2.24 แสดงวิธีการตัดเม็ดมีดบนด้ามมีด.....	39
ภาพที่ 2.25 รูปทรงของเม็ดมีด.....	40
ภาพที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอบนผิวหลับกับเวลาที่ใช้ในการตัด.....	41
ภาพที่ 2.27 ผลกระทบของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงในการตัดต่อการสึกหรอบนผิวหลับโดย ให้เกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอบนผิวหลับเป็น 0.5 มิลลิเมตร	41
ภาพที่ 2.28 Natural log-log กราฟระหว่างความเร็วตัดกับอายุการใช้งานของมีดตัด.....	43
ภาพที่ 2.29 สัญญาณคลื่นไซน์เทียบในแกนเวลาและแกนความถี่ของสัญญาณเดียวกัน	44
ภาพที่ 2.30 สัญญาณแบบเรנדอมที่ไม่มีรูปแบบแน่นอนตายตัว.....	44
ภาพที่ 2.31 แสดงการแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปยังโดเมนความถี่.....	45
ภาพที่ 2.32 การเกิด random impact ใน waveform และผลการแปลงความถี่.....	46
ภาพที่ 2.33 การเกิดImpact แบบ random noise ใน waveform.....	47
ภาพที่ 2.34 ภาพนิยามการหา Crest factor.....	47
ภาพที่ 2.35 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป.....	49
ภาพที่ 2.36 แสดงอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะ.....	54
ภาพที่ 2.37 แสดงขั้นตอนการทำงานการเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วตัดโดยการตรวจ ติดตามความสึกหรอบนผิวหลับและการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะ...	56
ภาพที่ 2.38 แสดงแผนภาพระบบตรวจจับการแตกหักเศษโลหะอัตโนมัติ.....	57
ภาพที่ 2.39 แสดงการติดตั้งการทดลองการแตกหักเศษโลหะอัตโนมัติ.....	57
ภาพที่ 3.1 เหล็กที่ใช้ในการทดลอง.....	61
ภาพที่ 3.2 เม็ดมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง.....	62
ภาพที่ 3.3 ด้ามมีดที่ใช้ในการทดลอง.....	62
ภาพที่ 3.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน.....	62
ภาพที่ 3.5 เซนเซอร์วัดแรงตัดพลวัต.....	63
ภาพที่ 3.6 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	63
ภาพที่ 3.7 (a) ชาร์จแอมป์ลิไฟเออร์ และ (b) ออสซิลโลสโคป.....	63
ภาพที่ 3.8 ไฟฉายสำหรับปรับตั้งระยะโฟกัส.....	64
ภาพที่ 3.9 เครื่องไมโครสโคปสำหรับตรวจสอบสภาพความสึกหรอมีดตัด.....	64
ภาพที่ 3.10 ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงตัดและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	66
ภาพที่ 3.11 ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับการดำเนินการทดลอง.....	66
ภาพที่ 3.12 แสดงหน้าจอโปรแกรม Data Temp Multidrop.....	67

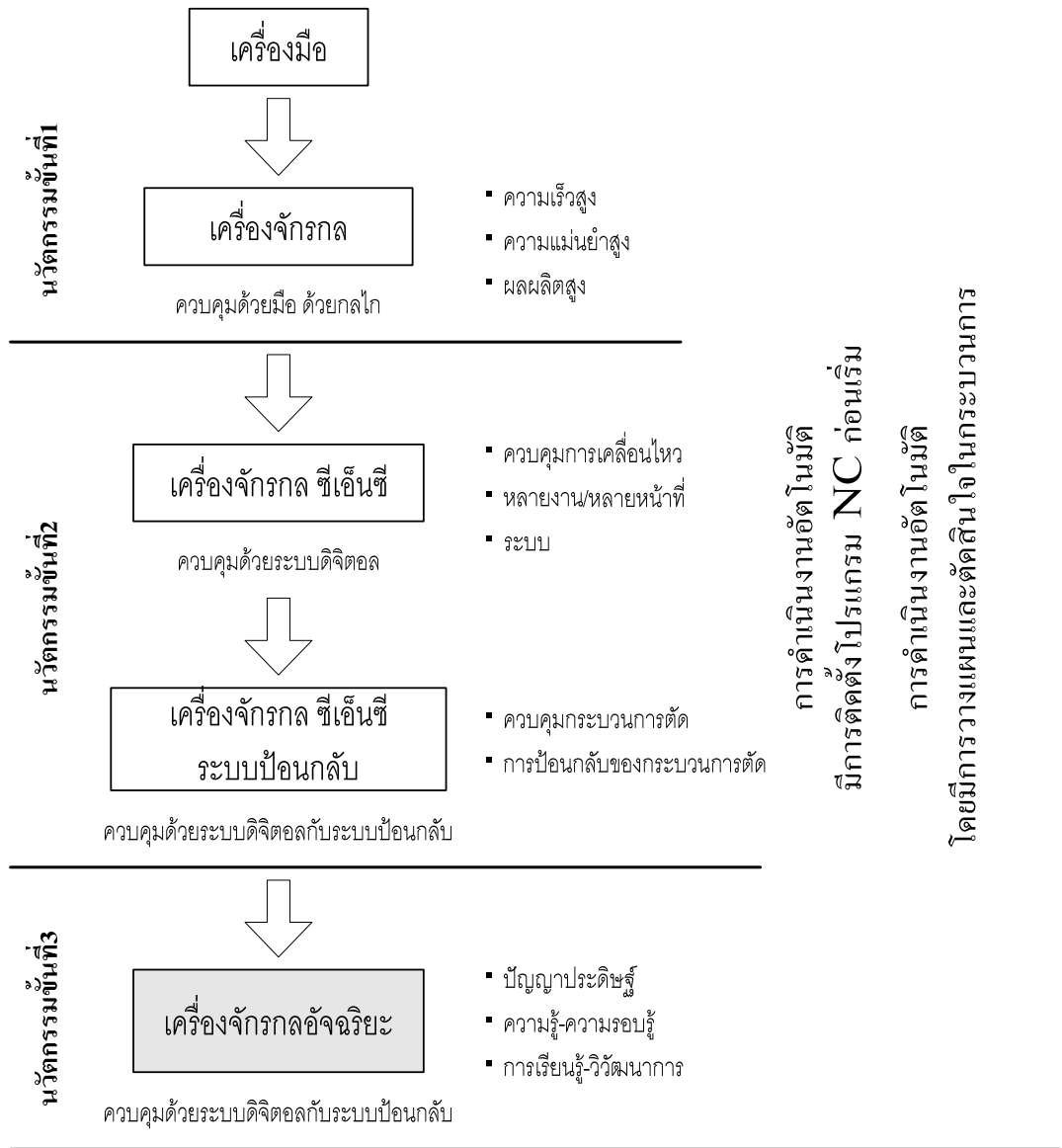
ภาพที่ 3.13	ภาพแสดงการตรวจสอบความลึกหรือของมีดตัด.....	67
ภาพที่ 3.14	ภาพแสดงทิศทางของแรงตัด (แรงรัศมี (Radial Force), แรงป้อนตัด (Feed Force) และแรงตัดหลัก (Main Force)).....	68
ภาพที่ 3.15	ภาพแสดงสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด.....	69
ภาพที่ 3.16	ลักษณะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแรงตัดพลวัตทั้งสามแรง.....	71
ภาพที่ 3.17	ลักษณะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากอุณหภูมิตัดพลวัต.....	72
ภาพที่ 3.18	แสดงตัวอย่างรูปร่างของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะภายใต้เงื่อนไขการ ตัดที่แตกต่างกัน.....	73
ภาพที่ 4.1	แสดงตัวอย่างขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณแรงตัดพลวัต.....	75
ภาพที่ 4.2	แสดงค่าของแรงตัดที่แตกต่างกัน เมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป.....	77
ภาพที่ 4.3	ภาพแสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณ แรงตัดพลวัตทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบ แตกหัก.....	79
ภาพที่ 4.4	แผนภูมิการไหลแสดงวิธีการหาสัดส่วนผลรวมค่าความหนาแน่นเพาเวอร์ สเปกตรัม สำหรับสัญญาณแรงตัดพลวัต.....	80
ภาพที่ 4.5	แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิขณะเศษโลหะเกิดการแตกหัก.....	82
ภาพที่ 4.6	แผนภูมิการไหลแสดงวิธีการหาสัดส่วนความแปรปรวนอุณหภูมิตัดพลวัต สำหรับสัญญาณอุณหภูมิตัด.....	83
ภาพที่ 4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AX กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง.....	87
ภาพที่ 4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AY กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง.....	89
ภาพที่ 4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AZ กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง.....	91
ภาพที่ 4.10	แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AX, AY, AZ และ AVT กับความเร็ว รอบตัด.....	92
ภาพที่ 4.11	แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AVT กับอัตราป้อนตัด.....	93
ภาพที่ 4.12	แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AVT กับความลึกของการตัด.....	94
ภาพที่ 4.13	เปรียบเทียบรูปร่างเศษโลหะที่ได้จากการทดลองกับ ISO 3685-1993.....	95
ภาพที่ 4.14	แสดงอัลกอริทึมตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะแบบแตกหักและต่อเนื่องใน กระบวนการกลึง.....	98
ภาพที่ 4.15	ยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์แรงตัดและค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิ ตัดในพื้นที่อ้างอิง.....	100

## บทที่ 1

### บทนำ

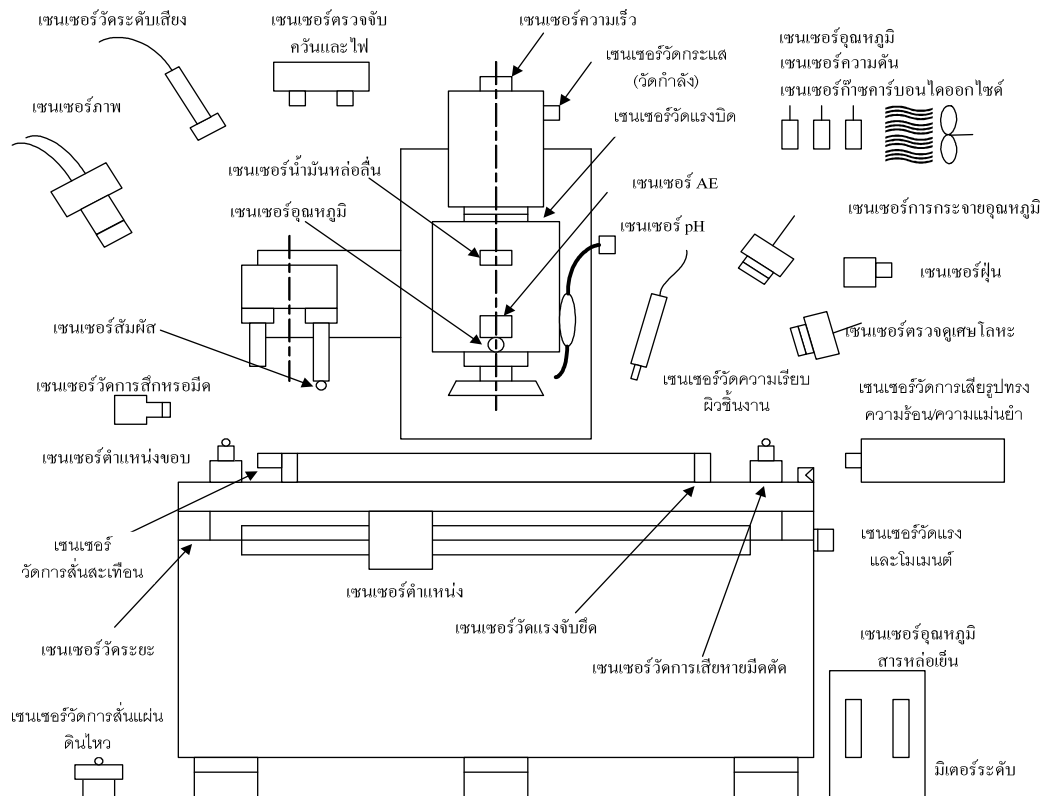
#### 1.1 บทบาทระบบอัตโนมัติที่มีต่ออุตสาหกรรมการผลิตในอนาคต <sup>[1]</sup>

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตได้ประสบกับการเปลี่ยนแปลงและการแข่งขันที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากสภาวะแวดล้อมของธุรกิจที่เปลี่ยนไปตลอดเวลา ดังนั้นระบบการผลิตในอนาคตต้องมีลักษณะคล่องแคล่ว อัจฉริยะ มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง รองรับการผลิตปริมาณน้อย ตอบสนองความต้องการเฉพาะราย เกิดการมีส่วนร่วมกับผู้ซื้อ และตระหนักในสิ่งแวดล้อม ระบบการผลิตที่สามารถสนองตอบต่อคุณลักษณะต่างๆคือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing Systems: IMS) ซึ่งมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ระบบการผลิตอัจฉริยะสามารถที่จะควบคุมและตรวจสอบตัวเองได้ เพื่อที่จะสร้างผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบซึ่งผลิตภัณฑ์จะถูกผลิตได้ในสภาวะแวดล้อมจำลอง ระบบการผลิตอัจฉริยะถูกคาดหวังว่าจะเป็นคำตอบหนึ่งที่จะเอาชนะต่ออุปสรรคของอุตสาหกรรมในช่วงศตวรรษที่ 21 ดังนั้นเครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยเครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะอยู่ภายในจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นและสิ่งอำนวยความสะดวกทางการผลิต ดังนั้นเครื่องจักรกลที่มีการทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นและทำงานได้ด้วยตัวเองนี้ก็จะมีความอัจฉริยะที่สูงมาก ซึ่งวิวัฒนาการเครื่องจักรกลอัจฉริยะแสดงดังรูปที่ 1.1 โดยนวัตกรรมแรกเกิดขึ้นในระหว่างยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรม ซึ่งเครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจาะ และเครื่องไสแบบดั้งเดิมส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาตั้งแต่การปฏิวัติอุตสาหกรรม ส่วนนวัตกรรมขั้นที่สองคือการควบคุมเชิงตัวเลข ความถูกต้องและการวัดซ้ำของเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลขนั้นมีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลที่เดินเครื่องด้วยคนมาก อัตราผลิตภาพจะถูกปรับปรุงอย่างมากโดยการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิต (None – productive time) ในวงจรการผลิต เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนหลายเครื่องได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในทางปฏิบัติ ซึ่งความก้าวหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือการควบคุมที่สามารถปรับได้ (Adaptive control: AC) ตัวอย่างเช่นในกระบวนการตัดที่อยู่ในวงจรของการควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องจักร ในขณะที่มีตัดตัดและโต๊ะงานถูกควบคุมด้วยซีเอ็นซี ซึ่งเซนเซอร์หลายรูปแบบได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในการตรวจจับสถานะของการตัดเพื่อที่จะป้อนกลับสารสนเทศต่างๆด้วย



รูปที่ 1.1 : วิวัฒนาการเครื่องจักรกลอัจฉริยะ

โครงสร้างพื้นฐานของระบบการผลิตอัจฉริยะได้นำเซนเซอร์เข้ามา มีบทบาทในระบบผลิตเป็นอย่างมากในฐานะที่เป็นความต้องการรูปแบบใหม่ที่อยู่ในระบบการตรวจติดตามกระบวนการผลิต สาเหตุของการที่ต้องตรวจติดตามระบบการผลิตก็เพื่อให้แน่ใจว่าระบบการผลิตนี้มีสมรรถนะเหมาะสมที่สุด โดยในการตรวจติดตามจะมุ่งเน้นไปที่เครื่องจักร (ประสิทธิภาพและความบกพร่องต่างๆ), เครื่องมือ (สถานะของการสึกหรอ), ชิ้นงาน (ขนาด, พื้นผิว) และกระบวนการ (รูปแบบของเศษโลหะ, อุณหภูมิ) ซึ่งได้มีการใช้เซนเซอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 : เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามในเครื่องจักรกลอัจฉริยะ <sup>[2]</sup>

จากการพิจารณาแนวโน้มการพัฒนาทางด้านการผลิตด้วยเหตุผลต่างๆที่กล่าวดังต่อไปนี้  
 สามารถที่จะสรุปเพื่ออธิบายว่าทำไมบทบาทของเซนเซอร์และเทคโนโลยีการตรวจติดตามได้กลาย  
 มาเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากขึ้นสำหรับเครื่องจักรกลอัจฉริยะในระบบการผลิตอัจฉริยะ

- ระบบการผลิตปริมาณมาก (Large-scale Manufacturing System) เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ควรที่จะปฏิบัติงานภายใต้ความน่าเชื่อถือและความพร้อม (Availability) ที่สูงเพราะเวลาหยุดที่เกิดจากระบบเกิดการขัดข้องมีอิทธิพลที่มากมายต่อกิจกรรมทางการผลิต ดังนั้นเพื่อที่จะผลิตให้ได้ตามอุปสงค์ตลาดที่เกิดขึ้น แต่ละกระบวนการผลิตควรมีการปฏิบัติงานอย่างระมัดระวังด้วยความช่วยเหลือจากระบบการตรวจติดตามและเซนเซอร์ที่มีความน่าเชื่อถือและทนทาน เนื่องจากการตรวจติดตามระบบที่มีการผลิตปริมาณมากนั้นอยู่นอกเหนือจากความสามารถของมนุษย์ที่จะทำได้

- การเพิ่มขึ้นของค่าแรงงานและการขาดแคลนพนักงานที่มีทักษะ ทำให้จำเป็นต้องมีระบบการผลิตที่มีคนเข้ามาเกี่ยวข้องให้น้อยที่สุด ซึ่งต้องการนำเอาระบบการตรวจติดตามและเซนเซอร์สูงเข้ามาใช้

- การผลิตชิ้นงานที่มีความเล็กและแม่นยำพิเศษ (Ultra-Precision Manufacturing) เช่น ชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ขนาด 1.5 นิ้วและ 2.5 นิ้ว ชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีขนาดเล็ก ชิ้นงานที่ต้องการความเรียบผิวสำเร็จสูงสามารถบรรลุผลสำเร็จได้ด้วยการนำศาสตร์ของ การวัดและเทคโนโลยีการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตขั้นสูงโดยการใช้ระบบเซนเซอร์ที่มีความ น่าเชื่อถือ

- การใช้เครื่องจักรกลที่มีความซับซ้อน ซึ่งต้องการการบูรณาการของระบบการตรวจ ติดตามเพื่อที่จะป้องกันความเสียหายของเครื่องจักร

- เครื่องจักรกลที่ใช้งานหนัก (Heavy-Duty Machine) และความเร็วสูงควรถูกจัดการ ด้วยคนให้น้อยที่สุดด้วยเหตุผลทางด้านความปลอดภัย

- ความตระหนักทางด้านสิ่งแวดล้อม ในการผลิตปัจจุบันทำให้ต้องการเซนเซอร์ที่จะตรวจ ติดตามการปล่อยของเสียจากกระบวนการผลิต ทั้งในอากาศและน้ำ

เซนเซอร์ที่อยู่ในกระบวนการผลิตสำหรับเครื่องจักรกลอัจฉริยะสร้างขึ้นมาจากเทคโนโลยี ขั้นสูง เพื่อช่วยเหลือผู้ผลิตให้สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีความเที่ยงตรงสูงในอนาคต โดยเซนเซอร์ เหล่านี้ได้มีบทบาทที่แตกต่างกัน และสามารถติดตั้งได้กับเครื่องมืออุปกรณ์ กระบวนการผลิต ชิ้นงาน หรือเครื่องจักรกล การรวมความแตกต่างของเซนเซอร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อลดข้อด้อยของ เซนเซอร์เดี่ยว ซึ่งงานวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นไปที่การรวมเซนเซอร์ (Sensor fusion) ซึ่งเป็น ความสามารถในการรวมหรือเพิ่มเติมผลลัพธ์ที่ได้จากเซนเซอร์อื่นๆเพื่อที่จะให้การตัดสินใจที่มี ความแน่นอนมากขึ้น ซึ่งโดยทั่วไป กระบวนการผลิตและระบบการผลิตเกือบจะทุกชนิดต้องการ การตรวจติดตามเพื่อที่จะรักษาความน่าเชื่อถือของกระบวนการและเพื่อหลีกเลี่ยงสภาวะที่ผิดปกติ โดยการปรับปรุงจุดควบคุมให้อยู่เหนือกว่าจุดวิกฤติของกระบวนการผลิต ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการ ปรับปรุงอัตราผลิตภาพ

## 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าของไทยเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญ ในการพัฒนาประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่เชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆเป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เฟอร์นิเจอร์ อาหารกระป๋อง (บรรจุ ภัณฑ์)เครื่องจักรกล และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น และในปัจจุบัน วัสดุประเภทเหล็กกล้า คาร์บอน เช่น S45C ได้ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนสำคัญต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะชิ้นส่วนประกอบ ยานยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องจักร (เพลลา, ล้อเฟือง, สลักเกลียว) โดยการกลึงนั้นเป็นกระบวนการ หนึ่งที่มีความสำคัญในการตัดขึ้นรูปวัสดุดังกล่าวให้ได้รูปร่างตามต้องการ <sup>[3]</sup> ดังนั้นจึงมีความ ต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตให้สูงขึ้นในกระบวนการผลิตอัตโนมัติเพื่อรองรับระบบ



การผลิตอัจฉริยะในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซีในกระบวนการตัดได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและในอนาคตเครื่องจักรกลซีเอ็นซีได้ถูกคาดหวังให้เป็นเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเชิงปัญญาซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในระหว่างกระบวนการตัดจริงได้โดยเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเองเพื่อสนับสนุนระบบการผลิตอัตโนมัติ ในขณะที่เครื่องจักรกลซีเอ็นซีปัจจุบันยังจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นให้แก่เครื่องก่อนที่จะทำการตัดจริงโดยผู้ควบคุมเครื่อง

สำหรับกระบวนการกลึงนั้น สถานะการกลึงมีอิทธิพลต่อคุณภาพของผิวชิ้นงาน, ความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน, อัตราการผลิต, การหยุดของเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนมีดตัดหรือการกำจัดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง รวมถึงเป็นการเพิ่มต้นทุนของการผลิตด้วย ซึ่งในกระบวนการกลึงนั้นมีเงื่อนไขของการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ก็คือ ความเร็วตัด, ความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด โดยเงื่อนไขของการตัดทั้ง 3 ตัวนี้มีผลต่อรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น เช่น เศษโลหะสามารถแตกหักได้ดีเมื่อเพิ่มความลึกในการตัด, เพิ่มอัตราการป้อนตัดและลดความเร็วตัด แต่หากเกิดเงื่อนไขการตัดในทางตรงกันข้ามก็จะเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ซึ่งเศษโลหะแบบนี้มักพบในการกลึงชิ้นงานจำพวก เหล็กกล้าผสม เหล็กเหนียวและพวกอลูมิเนียม การเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องส่งผลต่อเสถียรภาพของกระบวนการกลึง เนื่องจากหากเกิดเศษโลหะชนิดนี้ขณะกลึงบางครั้งจะพันอยู่รอบชิ้นงานและมีดตัดทำให้ผิวชิ้นงานเกิดรอยและเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และ 1.4 ตามลำดับ



รูปที่ 1.3 : เศษโลหะพันรอบชิ้นงาน



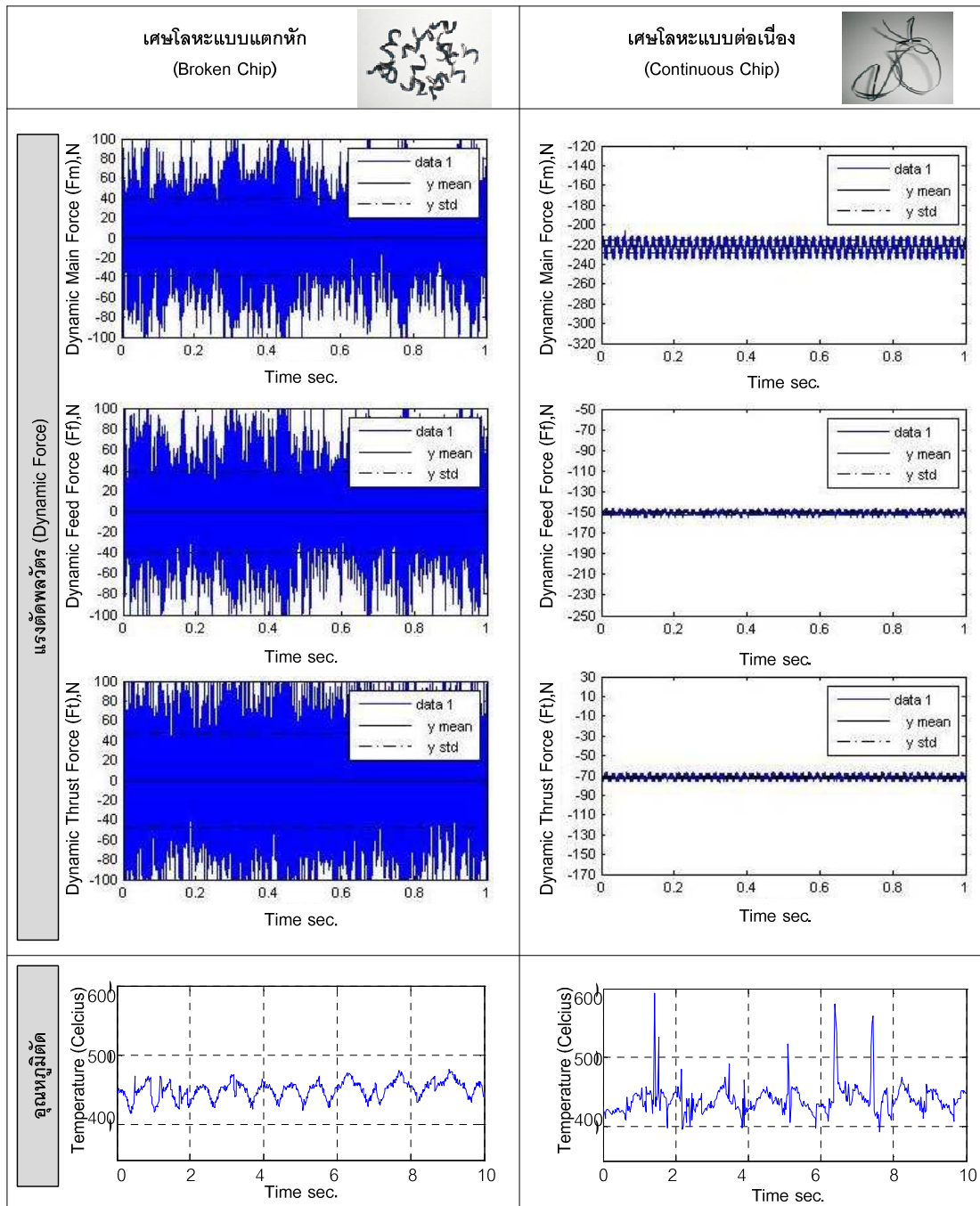
รูปที่ 1.4 : เศษโลหะพันรอบมีดตัด

ซึ่งทำให้ต้องหยุดเครื่องจักร เศษโลหะแบบต่อเนื่องยังกำจัดทิ้งยากและบางครั้งทำให้ผู้ควบคุมเครื่องได้รับบาดเจ็บ ดังนั้นเศษโลหะแบบแตกเป็นชิ้นเล็กๆจึงเป็นเศษโลหะที่ต้องการให้เกิดขึ้นเพื่อเสถียรภาพในกระบวนการกลึงและเป็นเงื่อนไขการตัดที่ต้องการ<sup>[4]</sup> จึงเป็นที่มาของความต้องการที่จะพัฒนาระบบการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะในกระบวนการผลิตอัตโนมัติ โดย

การนำเซนเซอร์มาใช้ช่วยวิเคราะห์สถานะการกลิ้งที่ก่อให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะในขณะกลิ้งจริงโดยติดตั้งเซนเซอร์ 2 ชนิด (เซนเซอร์แรงและเซนเซอร์อุณหภูมิ) บนเครื่องกลิ้งซีเอ็นซีเพื่อตรวจสอบสัญญาณของเซนเซอร์ในขณะกลิ้ง แล้วนำผลของสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิด มาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการตรวจจับในกระบวนการกลิ้งซีเอ็นซี ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและพัฒนาาระบบการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะ โดยการรวมรูปแบบที่แตกต่างกันของเซนเซอร์ เพื่อบ่งชี้สถานะของการกลิ้งอย่างต่อเนื่องด้วยความแม่นยำและความน่าเชื่อถือที่สูง

เซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิดที่เลือกมาใช้ในกระบวนการตรวจติดตามบนเครื่องกลิ้งซีเอ็นซีนั้น เซนเซอร์แต่ละตัวจะมีความสามารถในการบ่งบอกสถานะการแตกหักของเศษโลหะต่างกันซึ่งจะให้สัญญาณในลักษณะที่คล้ายกันคือ เมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip) จะทำให้แรงตัดสูงขึ้น เนื่องจากแรงตัดพลวัตจะแปรผันตามจังหวะการแตกหักของเศษโลหะที่เสียดสีกับมีดตัดหรือชิ้นงานนั่นเอง ซึ่งหากมีการแตกหักของเศษโลหะจำนวนมากจะส่งผลให้แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดใหญ่ ในทางกลับกันหากเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) แสดงว่ามีการแตกหักของโลหะน้อยส่งผลให้แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดเล็ก ส่วนในกรณีสัญญาณอุณหภูมินั้น จะมีแอมพลิจูดของอุณหภูมิขนาดเล็กเมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip) และแอมพลิจูดขนาดใหญ่หากเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) ตรงข้ามกับสัญญาณแรงตัดเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำการตัดโลหะกว่า 80% จะแพร่ไปสู่เศษโลหะ ซึ่งหากเกิดการแตกหักของเศษโลหะจำนวนมาก ความร้อนเหล่านั้นย่อมต้องถ่ายเทสู่เศษโลหะที่แตกหักและหลุดออกไป ทำให้เมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหักจะไม่เกิดการสะสมของความร้อน ดังนั้นสัญญาณอุณหภูมิจึงแปรผกผันกับสัญญาณแรงตัด โดยมีรูปที่ 1.5 ประกอบการอธิบายข้างต้น

จากการเกิดลักษณะของสัญญาณของเซนเซอร์ทั้งสองชนิดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการบ่งชี้สถานะแตกหักของเศษโลหะในกระบวนการกลิ้งได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเซนเซอร์ทั้งสองชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาสถานะการแตกหักของเศษโลหะจากรูปแบบของสัญญาณที่จับได้ และพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นเพื่อช่วยในการตรวจจับการแตกหักเศษโลหะในขณะกระบวนการกลิ้งจริง เนื่องจากในกระบวนการตัดไม่ต้องการให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 1.5 : การทดลองเบื้องต้นแสดงผลของแรงตัดพลวัตและอุณหภูมิในโดเมนเวลา

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาระบบการตรวจจับเศษโลหะภายในกระบวนการกลึงจริงและอัลกอริทึมในการบ่งชี้ รูปแบบของเศษโลหะอย่างอัตโนมัติ
- 2) เพื่อศึกษาสัญญาณจากเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิดคือ เซนเซอร์วัดแรงและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ได้ในกระบวนการกลึงร่วมกัน เพื่อเพิ่มความมั่นใจในขณะทำการตัดชิ้นงานจริง

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาเฉพาะในกระบวนการกลึงปอกโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน S45 C ด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซี(CNC Turning Machine) ของ Mazak รุ่น Quick Turn Nexus 200MY เท่านั้น
- 2) พารามิเตอร์ในกระบวนการกลึง คือ ความเร็วในการตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด
- 3) เม็ดมีดตัดที่ใช้เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide)
- 4) เซนเซอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้
  - เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9720
  - เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Interface Thermometer, Raytek: RAYFA2BCF13)
 และโปรแกรม Data Tempmultidrop สำหรับแสดงผลสัญญาณอุณหภูมิ
- 5) ตัวชี้วัดผลลัพธ์คือความสามารถในการบ่งชี้สถานะ การแตกหักของเศษโลหะด้วยอัลกอริทึมการบ่งชี้การแตกหักเศษโลหะที่พัฒนาขึ้น

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ระบบการตรวจจับเศษโลหะแบบแตกหักสำหรับเหล็กกล้า โดยใช้สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคต

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพิ่มผลผลิตภาพของกระบวนการตัด จากการหยุดเครื่องจักรที่ต้องทิ้งเศษโลหะบ่อยๆและเศษโลหะพันเครื่องจักรและชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเป็นรอยจากการขีดข่วน
- 2) ให้คุณภาพของชิ้นงานที่สูงและป้องกันการชำรุดของเครื่องจักรเนื่องจากเศษโลหะแบบต่อเนื่อง
- 3) ลดความเสี่ยงและอุบัติเหตุขณะปฏิบัติงานของพนักงานเดินเครื่องจักร จากสาเหตุการพันของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

- 4) ระบบการตรวจจับภายในกระบวนการกลึงและอัลกอริทึมในการบ่งชี้สถานะของการกลึงสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคต
- 5) ลดของเสียและเวลาในการหยุดเครื่องจักร

### 1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและสำรวจงานวิจัยต่างๆ รวมถึงตรวจสอบปัจจัยในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าที่สัมพันธ์กับการแตกหักของเศษโลหะ
- 2) ศึกษาเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง วิธีการติดตั้ง การแปลงสัญญาณ การบันทึกข้อมูลของอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการกลึง ขั้นตอนการทำงานต่างๆที่เป็นพื้นฐาน สำหรับการทำงานวิจัย
- 3) ทดลองกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเบื้องต้นเพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดรูปแบบการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักและแบบต่อเนื่อง
- 4) ทำการทดลองกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงCNC ตามเงื่อนไขที่ได้ในข้อ3.พร้อมกับการเก็บสัญญาณจากเซนเซอร์วัดแรงตัดด้วยไดนามิเมตร และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วย Interface Thermometer (บทที่ 3)
- 5) วิเคราะห์แอมปริจูดและวิเคราะห์ผลสัญญาณโดยการแปลงฟูเรียอย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) (บทที่ 3)
- 6) จำแนกรูปแบบเศษโลหะโดยใช้ Pattern Recognition (การรู้จำรูปแบบทางสถิติ) เพื่อกำหนดค่า threshold (ค่าเกณฑ์ตรวจจับรูปแบบของเศษโลหะ) (บทที่ 4)
- 7) พัฒนาอัลกอริทึม เพื่อระบุการแตกหักของเศษโลหะจากการตัดแบบแห้ง
- 8) ยืนยันความสามารถของระบบตรวจจับการแตกหักเศษโลหะ(อัลกอริทึม)เพื่อให้ได้เศษโลหะแบบแตกหัก
- 9) สรุปผลที่ได้จากการวิจัยและข้อเสนอแนะ
- 10) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.8 แผนการดำเนินงานวิจัย

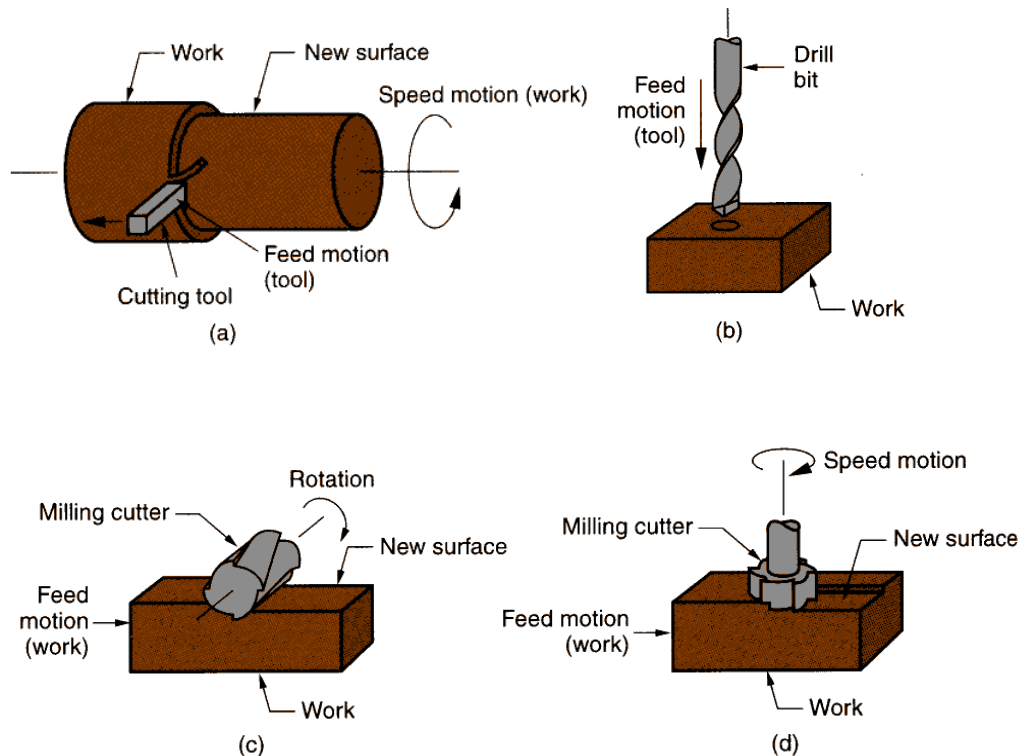
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	เริ่มทำวิทยานิพนธ์ เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2553													
	เดือน													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและสำรวจงานวิจัยต่างๆ	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
2. ศึกษาเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง วิธีการติดตั้ง การแปลงสัญญาณ		■	■	■										
3. ทดลองตัดเพื่อหาเงื่อนไขที่สามารถระบุการแตกหักของเศษโลหะได้			■	■	■									
4. ทดลองกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึง CNC ตามเงื่อนไขที่ได้วางไว้				■	■	■								
5. วิเคราะห์แอมปริจูดและผลสัญญาณโดยการแปลงฟูเรียอย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)					■	■	■							
6. จำแนกรูปแบบเศษโลหะโดยใช้ Pattern Recognition (การรู้จำรูปแบบทางสถิติ) เพื่อกำหนดค่า threshold (ค่าเกณฑ์ตรวจจ็บบรูปแบบของเศษโลหะ)						■	■	■	■					
7. พัฒนาอัลกอริทึม เพื่อระบุการแตกหักของเศษโลหะจากการตัดแบบแห้ง						■	■	■	■	■				
8. ทดสอบการตรวจจ็บบเศษโลหะของอัลกอริทึม เพื่อยืนยันความสามารถของระบบตรวจจ็บบการแตกหักเศษโลหะ						■	■	■	■	■				
9. สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ								■	■	■	■			
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์									■	■	■	■	■	■

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 ลักษณะทั่วไปของกระบวนการตัด <sup>[1][5]</sup>

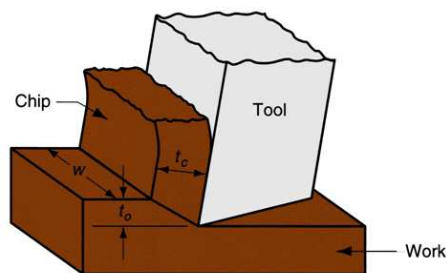
กระบวนการตัด ไม่ได้มีเพียงกระบวนการเดียว แต่ประกอบไปด้วยกลุ่มของกระบวนการ โดยทั่วไปจะใช้เครื่องมือตัดทำให้เกิดเศษโลหะ ซึ่งมาจากการตัดเฉือนชิ้นงาน โดยมีการเคลื่อนที่ อยู่ 2 ประเภท คือ ความเร็วตัด และการป้อนตัด โดยที่เครื่องมือตัดจะเคลื่อนที่ตัดผ่านผิวของ ชิ้นงาน จากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของความเร็วตัดและการป้อนตัด จะทำให้ได้มาซึ่งรูปลักษณะของ ชิ้นงานตามที่ต้องการ กระบวนการตัดนั้นมีอยู่หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทก็จะสามารถที่จะ สร้างชิ้นงานเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ ประเภทของกระบวนการตัด ได้แก่ การกลึง การเจาะ และการกัด ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1



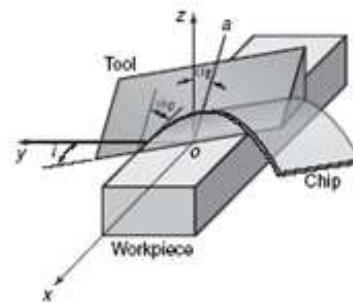
รูปที่ 2.1 : ประเภทของกระบวนการตัดหลัก<sup>[6]</sup>

ในปัจจุบันขบวนการตัดได้พัฒนาไปอย่างมากทั้งทางด้านเครื่องมือกล วัสดุ และการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำให้ปัจจุบันสามารถผลิตชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ ได้อย่าง

แพร่หลายจนแทบจะกล่าวได้ว่าสิ่งของที่ผลิตขึ้นมาเกือบทั้งหมดจะต้องผ่านหรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการตัด นอกจากนี้กระบวนการตัดสามารถแบ่งตามชนิดของเครื่องมือตัดได้เป็น การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดคมตัดเดียว การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดหลายคมตัด และการตัดที่ใช้ล้อหินเจียร และกระบวนการตัดยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของกระบวนการ คือ กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ซึ่งหมายถึงกระบวนการตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษวัสดุตั้งฉากกับคมตัด และขบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting) การเคลื่อนที่ของเศษวัสดุจะทำมุมกับคมตัด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2



(a)



(b)

)

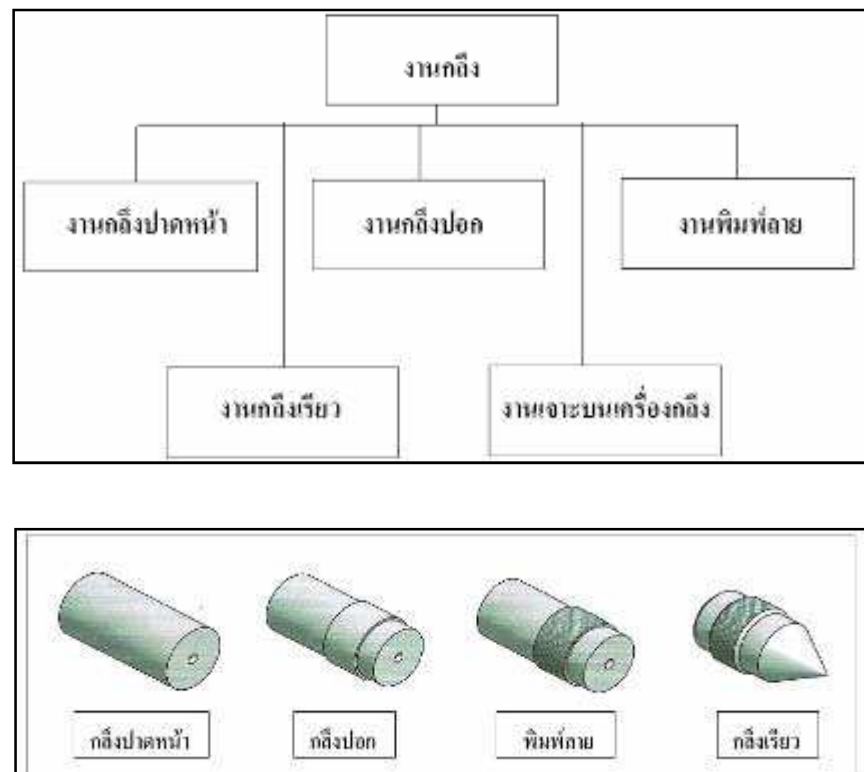
รูปที่ 2.2 : ลักษณะของกระบวนการตัด (a) Orthogonal Cutting (b) Oblique Cutting<sup>[6]</sup>

### 2.1.2 กระบวนการกลึง (Turning Process)<sup>[1][4][7]</sup>

การกลึงเป็นกระบวนการสร้างผิวสำเร็จ จากการหมุนของชิ้นงานและการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดในแนวเส้นตรง หลักการของการกลึงสามารถดัดแปลงให้ผลิตชิ้นงานได้มากมายมีสองลักษณะใหญ่คือ

- การกลึงปาดหน้า คือ การตัดโลหะโดยให้มีดตัดชิ้นงานไปตามแนวขวาง (Across the work)
- การกลึงปอก คือ การตัดโลหะโดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขนานกับแนวแกนของชิ้นงาน รูปที่ 2.3 แสดงถึงประเภทของงานกลึงแบบต่างๆกัน





รูปที่ 2.3 : ประเภทของงานกลึง <sup>[5]</sup>

### 2.1.2.1 เงื่อนไขของการตัดที่สำคัญในกระบวนการกลึง (Cutting Conditions in turning) <sup>[8]</sup>

เพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพตามต้องการจะต้องเรียนรู้เกี่ยวกับการเลือกใช้ความเร็วรอบ ความเร็วตัด และอัตราอัตราการป้อนอย่างถูกต้องและเหมาะสมดังต่อไปนี้

**2.1.2.1.1 ความเร็วตัด (Cutting Speed)** หมายถึงความยาวของเนื้อโลหะที่ถูกตัดเฉือนผ่านปลายคมตัด ในระยะเวลา 1 นาที จะมีความยาวเป็นเมตร

องค์ประกอบที่ทำให้เกิดความเร็วตัด

1. วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Tools) ที่ทำมาจากเหล็กความเร็วสูง (High Speed Steel) สามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงเป็น 2 เท่า ของความเร็วตัดของมีดที่ทำมาจากวัสดุเหล็กคาร์บอน (Carbon Steel) ส่วนวัสดุคมตัดที่มีส่วนผสมพิเศษออกไป (Special Cutting Alloy Steels) สามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่าเหล็กความเร็วสูง จากการค้นคว้าพบว่าวัสดุมีดตัดมี 8 ประเภทดังนี้

- เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steels)

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและใช้มากในงานเจาะ ตีแป มีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลางจะมีอายุมีดตัดจะนานกว่า ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีราคาถูกแล้วลับให้คมได้ง่าย แต่ด้วยความแข็งและการทนต่อการสึกหรอต่ำสำหรับการตัดที่ความเร็วสูง มีดตัดชนิดนี้จึงใช้กับงานตัดที่ความเร็วรอบต่ำ

- เหล็กกล้ารอบสูง (High-speed steels)

ใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของมีดตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ดี

- โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys)

มีความแข็งสูง (58-64 HRC) ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความแข็งสูงแม้ว่าอุณหภูมิใช้งานจะสูงตาม วัสดุนี้ทนแรงกระแทกได้น้อย จึงไม่เหมาะจะใช้กับงานตัดรอบสูง ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ

- คาร์ไบด์ (Cemented or Sintered carbide)

มีความแข็งสูงทุกๆอุณหภูมิ โมดูลัสความยืดหยุ่นและนำความร้อนสูง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น มีดตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบแห้งได้

- โคตต์ ทูล (Coated tools)

ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงาน อายุมีดตัดนานกว่ามีดตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า วัสดุที่ใช้เคลือบมักจะเป็นพวกไทเทเนียมไนไตรด์ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และเซรามิก ความหนาชั้นเคลือบประมาณ 5-10 ไมครอน

- เซรามิก (Ceramics)

ทำจากอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความละเอียดและความบริสุทธิ์สูง วัสดุนี้ทนต่อการขัดสีได้สูง ทนความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ผิวชิ้นงานหลังตัดมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีดตัดชนิดนี้ไม่ทนต่อการกระแทก

- คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride)

เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ทนต่อการสึกหรอและมีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะ จึงไม่เหมาะต่องานที่มีการสั่นสะเทือนเหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งสูง

- เพชร (Diamond)

ทนต่อการสึกหรอได้ดี ลับคมได้ง่ายใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูงมีดตัดเพชรจะไม่แนะนำสำหรับการตัดเหล็ก เพลนคาร์บอน ไททาเนียม นิกเกิล และเหล็กหล่อผสมที่มีโคบอลเป็นพื้นฐานเพราะว่า มันอาจจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นได้ เพชรจะใช้สำหรับการตัดแบบ การ เจียรระโน และการขัดผิวงาน

2. ชนิดของวัสดุ (Type of Materials) ที่จะนำมาทำการตัดเฉือน โดยทั่วไปวัสดุงานที่มีความแข็งมาก จะใช้ความเร็วตัดช้ากว่าวัสดุที่อ่อนกว่าดังตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของวัสดุและค่าความแข็งประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ความเร็วตัด

3. รูปร่างของคมตัด (Form Cutting Tools) มีผลต่อการทำงานมาก เช่นมีดตัดงานขนาด จะใช้ความเร็วรอบต่ำกว่ามีดกลึงปอกผิวงาน

4. ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ถ้าป้อนตัดลึกจะใช้ความเร็วรอบน้อยกว่าป้อนตื้นๆ

5. อัตราป้อน (Feed Rate) ในอัตราการป้อนงานหยาบเช่น อัตราป้อน 3 มม. ความเร็วที่ใช้จะต่ำกว่าอัตราการป้อนงานครั้งสุดท้าย เช่น อัตราป้อน 0.31 มม. เป็นต้น จะใช้ความเร็วรอบสูง

6. การระบายความร้อน (Cutting Lubricant) ความเร็วตัดของวัสดุบางชนิด อาจเพิ่มให้สูงขึ้นได้ เมื่อมีการระบายความร้อน (Lubricant) ที่ถูกต้อง ซึ่งสารระบายความร้อนจะช่วยรักษาอุณหภูมิของคมตัดไม่ให้ร้อนจนเกินไปขณะทำงาน

7. การจับงานให้มั่นคงแข็งแรง (Rigidity of the Work) ในกรณีงานที่ถูกจับด้วยหัวจับ (Chuck) ฝัลดออกมาสั้น ๆ จะใช้ความเร็วได้สูงกว่างานที่ถูกจับให้ฝัลดออกมายาว ๆ

8. ความสามารถและสภาพเครื่อง เครื่องที่แข็งแรงมีกำลังขับสูง สามารถใช้ความเร็วตัดได้สูง อย่างไรก็ตามอย่าให้สูงจนคมตัดใหม่

กฎทั่ว ๆ ไปในการใช้ความเร็วตัดและอัตราป้อน (Cutting Speeds & Feeds)

- ถ้า Feed เพิ่ม Speed ต้องลดลง เมื่อความลึกของการกัดคงที่
- ถ้า Speed เพิ่ม Feed ต้องลดลง เมื่อความลึกของการกัดคงที่
- ถ้าความลึกของการกัดเพิ่มขึ้น Speed ต้องลดลง เมื่อ Feed คงที่

ความเร็วตัด เป็นเรื่องสำคัญที่ให้ผิวเรียบหรือไม่เรียบ เช่น กลึงงานชิ้นหนึ่งหยาบ ๆ ด้วยมีด High Speed Steel อาจใช้ Feed 0.05 นิ้ว (1.5 มม.) แต่ถ้าต้องการให้ผิวเรียบได้ขนาดถูกต้อง ควรจะใช้ Feed เพียง 0.005 นิ้ว (0.1 มม.) เท่านั้น

**2.1.2.1.2 อัตราการป้อน (Feed)** หมายถึงระยะทางการเดินป้อนของมีดไปตามความยาว ของชิ้นงานในแต่ละรอบของการหมุนของเพลลา (Spindle) ของเครื่อง หรืออัตราการป้อนอาจพิจารณาจากความหนาของเศษตัด (Chips) อัตราการป้อน 5 มม. หมายถึง มีดตัด(Cutting tool)

มีการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 5 มม. ตามความยาวของชิ้นงานภายใน 1 นาที จะได้ Feed = 5 มม./นาที

**2.1.2.1.3 ความลึกในการตัด (Depth of Cut)** ทำให้เศษโลหะไหลออกมา ความลึกในการตัด 3 มม. บนชิ้นงานขนาดของชิ้นงานจะลดลง 6 มม. ทุกครั้งที่ทำการกลึงหยาบ ในการตั้งความลึกของการตัด(Depth of Cut) และอัตราป้อนตัด (Feed) จะต้องคำนึงถึงความสามารถของมีดตัด และเครื่องที่จะทนได้ด้วย

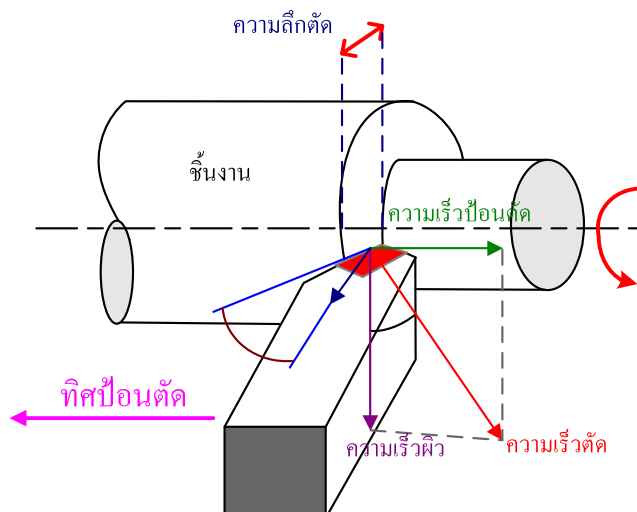
หลักเกณฑ์การพิจารณาการเลือกใช้ความลึกตัด สำหรับงานทั่วไปควรพิจารณาดังนี้

1. ขนาดความโตของชิ้นงานก่อนทำการตัดเฉือน (ขนาดโตกว่าชิ้นงานสำเร็จ ควรจะโตกว่า 3.18 มม. เช่น ขนาดจริง ๑50 มม. ขนาดวัสดุก่อนการตัดเฉือนควรโต  $50 + 3.18 = 53.18$  มม. เพื่อให้แน่ใจว่าความลึกในการกลึงปอกหยาบเพียงพอ สำหรับงานกลึงละเอียด (ผิวงานสำเร็จ) อีกครั้ง โดยที่ไม่ทำให้ขนาดงานเสีย (ขนาดตามแบบงาน)

2. ถ้าคำนวณความเร็วรอบอยู่ในช่วงกลางของค่าสองค่า ให้เลือกใช้ความเร็วรอบขั้นต่ำ ถ้าหากสภาพของเครื่อง มีดกลึงและชิ้นงานเหมาะสม อาจเลือกใช้ความเร็วรอบสูงได้ แต่ถ้าคำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าช่วงสูง ให้เลือกความเร็วในช่วงสูงใช้ได้

3. ความลึกในการกลึงหยาบ ควรป้อนลึกและหยาบมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เหลือไว้ประมาณ 0.76 มม. สำหรับขนาดความโตของชิ้นงานก่อนที่จะกลึงผิวขั้นสุดท้าย

4. ในการกลึงเหล็กหล่อ หรือโลหะอื่น ๆ ซึ่งผิวรอบ ๆ ชิ้นงานเป็นสะเก็ด (Scale) ความลึกในการกลึงครั้งแรก การป้อนมีดกินลึกจะต้องให้คมตัดของมีดกลึงตัดพอที่จะทำให้ส่วนผิวเปลือกแข็งหลุดออกไปให้หมด เพราะผิวเปลือกแข็ง ๆ นี้ทำให้มีดสึกหรอเร็ว



รูปที่ 2.4 : แสดงความเร็วตัดในการกลึง <sup>[1]</sup>

เมื่อพิจารณาความเร็วสัมพัทธ์ที่คมตัดของมีดกลึงในรูปที่ 2.4 พบว่าความเร็วตัดที่หมายถึง ความเร็วของเนื้อวัสดุที่เคลื่อนที่เข้าหาคมตัด เกิดจากผลรวมของความเร็วที่เกิดขึ้นจากการหมุนรอบแกนของชิ้นงานและความเร็วที่เกิดจากการป้อน ดังนั้นความเร็วตัดจึงเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ ของความเร็วที่เกิดจากการหมุนและความเร็วที่เกิดจากการป้อน

ความเร็วรอบในกระบวนการกลึงมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการตัดที่พื้นผิวของชิ้นงานทรงกระบอกดังสมการที่ 2-1

$$N = \frac{v}{\pi D_0} \quad (2-1)$$

โดยที่ N (Rotational Speed) = ความเร็วรอบในการหมุน (รอบ/นาที)  
 V (Cutting Speed) = ความเร็วในการตัด (เมตร/นาที หรือ ฟุต/นาที)  
 D<sub>0</sub> (Diameter of workpeice) = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้น (เมตร หรือ ฟุต)  
 การกลึงชิ้นงานจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานลดลงจาก D<sub>0</sub> เหลือ D<sub>f</sub> เส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลงแสดงถึงความลึกในการตัด (depth of cut, d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2-2

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

ส่วนอัตราการป้อนมีดโดยทั่วไปจะแสดงในหน่วย มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้ว/รอบ และสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร/นาที หรือนิ้ว/นาทีได้ดังสมการที่ 2-3

$$f_r = N \times f \quad (2-3)$$

โดยที่ f<sub>r</sub> (feed rate) = อัตราป้อนตัดมีดเชิงเส้น (มิลลิเมตร/นาที หรือนิ้วต่อนาที)  
 f (feed) = อัตราการป้อนมีด (มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้วต่อรอบ)

เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงานจากด้านหนึ่งของชิ้นงานไปอีกด้านหนึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-4

$$T_m = \frac{L}{f_r} \quad (2-4)$$

โดยที่ T<sub>m</sub> (Time of actual machining) = เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน (นาที)  
 L (Length) = ความยาวของชิ้นงาน (มิลลิเมตร หรือ นิ้ว)

ปริมาตรของวัสดุชิ้นงานที่ถูกกลึงออกไปต่อหน่วยเวลาจะแสดงในรูป อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (Material Removal Rate, MRR) มีหน่วยเป็น ลบ.มม./นาที หรือ ลบ.นิ้ว/นาที จะคำนวณได้จากสมการที่ 2-5

$$MRR = v \times f \times d \quad (2-5)$$

โดยค่าความเร็วตัดและอัตราป้อนนั้นเรามักจะใช้ค่าจากตารางคู่มือมาตรฐานของเครื่องจักรซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุชิ้นงานและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ตามตารางความเร็วตัดและอัตราป้อนในงานกลึงแสดงในตารางที่ 2.1 และความลึกตัดจากตารางที่ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 แสดงการเลือกใช้ความเร็วตัด อัตราป้อนตัดในงานกลึง สำหรับวัสดุชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า<sup>[9]</sup>

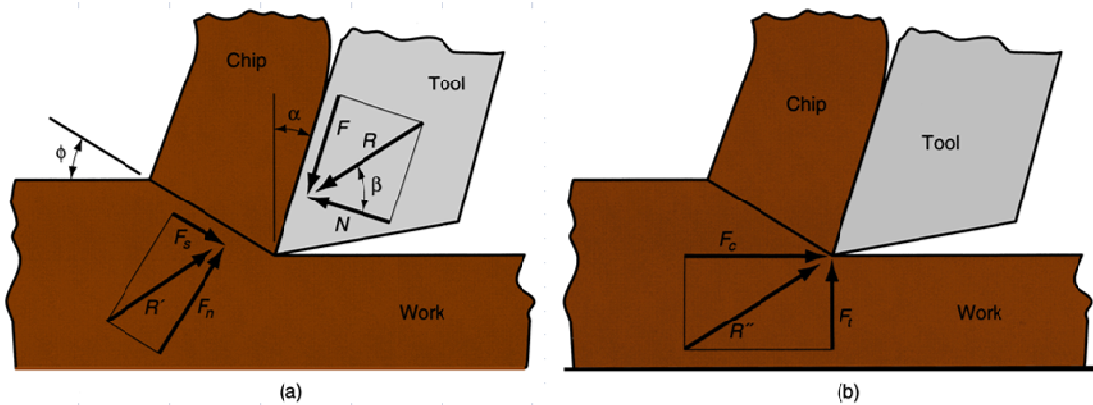
ชนิดของวัสดุชิ้นงาน	ความแข็ง (BHN)	มีดกลึงเหล็กกล้ารอบสูง (HSS)		มีดกลึงคาร์ไบด์ (Carbide)	
		ความเร็วตัด	อัตราป้อน	ความเร็วตัด	อัตราป้อน
		(SFPM)	(IPR)	(SFPM)	(IPR)
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำทั่วไป	170-190	190	0.012	625	0.015
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางทั่วไป	200-230	140	0.012	420	0.012
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำผ่านการอบคลาย (annealed)	110-165	140	0.012	525	0.015
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางผ่านการอบคลาย	120-185	100	0.012	475	0.015
เหล็กกล้าคาร์บอนสูงผ่านการอบคลาย	170-200	90	0.012	425	0.012
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางผ่านการอบคืนตัว	210-250	80	0.010	400	0.012
เหล็กกล้าคาร์บอนสูงผ่านการอบคืนตัว	320-375	50	0.010	225	0.010
เหล็กกล้าผสมผ่านการอบคลาย	150-240	80-110	0.010	300-425	0.020

ตารางที่ 2.2 แสดงการเลือกใช้เงื่อนไขการตัดตามประเภทการกลึงหยาบและการกลึงละเอียด<sup>[10]</sup>

เงื่อนไขการตัด	มีดกลึงเหล็กกล้ารอบสูง (HSS)	มีดกลึงคาร์ไบด์ (Carbide)	
		กลึงหยาบ	กลึงละเอียด
ความเร็วตัด (ม./นาที)	13-18	110-160	160-210
อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	0.05-0.3	0.2-0.4	0.05-0.2
ความลึกตัด (มม.)	0.5-3	2.0-4.0	0.5-2
เกรดเม็ดมีดที่เหมาะสม		P20-P30 coated carbide	P10 coated carbide or cermet

2.1.3 แรงในการตัดโลหะ (Forces in Metal Cutting) <sup>[6]</sup>

การพิจารณาแรงที่กระทำต่อเศษโลหะโดยมีดตัดในการตัดแบบอโทโกนอล ดังรูปที่ 2.5 (a) นั้นสามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 2 แรงซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน คือ แรงเสียดทาน (Friction force, F) ซึ่งเป็นแรงเสียดทานระหว่างมีดตัดและเศษโลหะที่ต่อต้านการไหลของเศษโลหะตามแนวของผิวคายของมีดตัดและแรงที่ตั้งฉากกับแรงเสียดทาน (Normal force to friction, N) โดยส่วนประกอบของแรงทั้ง 2 แรงแนี้สามารถถูกใช้เพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างมีดตัดและเศษโลหะได้ดังสมการที่ 2-6



รูปที่ 2.5: แรงในการตัดโลหะ : (a) แรงที่กระทำต่อเศษโลหะในการตัดแบบอโทโกนอล และ (b) แรงที่กระทำต่อมีดตัดที่สามารถถูกวัดได้ <sup>[1]</sup>

$$\mu = \frac{F}{N} \tag{2-6}$$

แรงเสียดทานและแรงตั้งฉากของมันสามารถถูกรวมแบบเวกเตอร์เพื่อให้ได้แรงลัพธ์ (Resultant force, R) ซึ่งวางตัวทำมุม  $\beta$  กับแรงตั้งฉากของแรงเสียดทาน โดยมุมนี้ถูกเรียกว่ามุมเสียดทาน (Friction angle,  $\beta$ ) และมุมนี้อยู่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน ดังสมการที่ 2-7

$$\mu = \tan \beta \tag{2-7}$$

นอกจากแรงที่กระทำบนเศษโลหะแล้ว ยังมีอีก 2 แรงที่เกิดที่ชิ้นงานบนเศษโลหะ ซึ่งก็คือแรงเฉือน (Shear force,  $F_s$ ) เป็นแรงที่ส่งผลให้เกิดการเสียรูปทรงที่เกิดขึ้นในระนาบเฉือน และแรงตั้งฉากกับแรงเฉือน (Normal force to shear,  $F_n$ ) และจากแรงเฉือนนี้ เราสามารถหาค่าความเค้นเฉือนซึ่งกระทำตามแนวระนาบเฉือนระหว่างชิ้นงานและเศษโลหะได้ดังสมการที่ 2-8

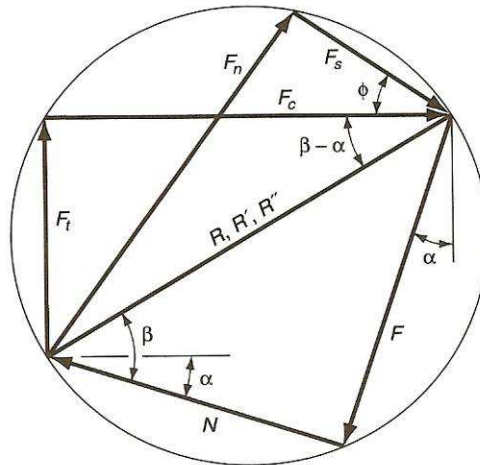
$$S = \frac{F_s}{A_s} \tag{2-8}$$

โดยที่  $A_s$  = พื้นที่ของระนาบเฉือน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A_s = \frac{to w}{\sin \phi} \quad (2-9)$$

ความเค้นเฉือนในสมการที่ 2-8 นั้นสามารถแทนได้ด้วยระดับของความเค้นที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการตัด ดังนั้นความเค้นนี้จะเท่ากับความต้านทานแรงเฉือน (shear strength) ของวัสดุชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขของการตัดที่เกิดขึ้น และการรวมแบบเวกเตอร์ของแรง  $F_s$  และ  $F_n$  จะได้แรงลัพธ์ ( $R'$ ) ซึ่งต้องมีขนาดเท่ากับแรงลัพธ์  $R$  และมีทิศทางตรงข้ามกันเพื่อให้เกิดความสมดุลของแรงที่กระทำต่อเศษโลหะ

จากแรงทั้ง 4 แรงที่ได้กล่าวมานั้น ไม่มีแรงใดที่สามารถที่จะถูกวัดได้โดยตรงจากกระบวนการ เพราะทิศทางของมันแปรผันตามรูปทรงของมีดตัดและเงื่อนไขของการตัด แต่อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ที่จะใช้เครื่องมือวัดแรงที่ถูกเรียกว่าไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ติดตั้งไปที่มีดตัดเพื่อทำการวัดแรงที่เกิดขึ้น โดยแรงที่วัดได้จะเป็นแรงในการตัด ( $F_c$ ) ซึ่งอยู่ในทิศทางเดียวกันกับความเร็วในการตัด และแรงในแนวรัศมี (Thrust force,  $F_t$ ) ซึ่งตั้งฉากกับแรงในการตัด ( $F_c$ ) ซึ่งผลลัพธ์จากการรวมกันแบบเวกเตอร์ของแรงทั้ง 2 นี้จะเท่ากับแรง  $R'$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (b)



รูปที่ 2.6 : แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ ( $F$ ,  $N$ ,  $F_s$ ,  $F_n$ ,  $F_c$ ,  $F_t$ )<sup>[1]</sup>

จากการใช้แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ (Force diagram) ดังรูปที่ 2.6 นั้นจะสามารถหาค่าของแรง  $F$ ,  $N$ ,  $F_s$  และ  $F_n$  ได้โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของแรงที่สามารถวัดได้ ( $F_c$ ,  $F_t$ ) ซึ่งจะได้ค่าของแรงต่างๆดังสมการที่ 2-10 ถึง 2-13

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

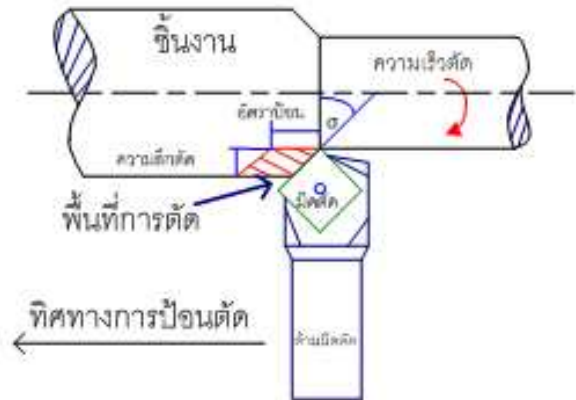
$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2-11)$$

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



$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \tag{2-13}$$

พื้นที่การตัดในกระบวนการกลึงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และคำนวณได้ดังสมการที่ 2-14



รูปที่ 2.7 : พื้นที่การตัด <sup>[1]</sup>

พื้นที่การตัด = อัตราการป้อน x ความลึกตัด

$$A = f \times d \tag{2-14}$$

แรงตัด = ค่าสัมประสิทธิ์แรงตัด x พื้นที่การตัด

$$F = K_s \times A \tag{2-15}$$

โดยที่  $K_s$  = ค่าสัมประสิทธิ์แรงตัด

$$\text{กำลัง} = \text{แรงตัด} \times \text{ความเร็วตัด} \tag{2-16}$$

เมื่อแทนสมการที่ 5.21 จะได้เป็นสมการดังนี้

$$P = K_s \times A \times v \tag{2-17}$$

โดยที่  $P$  = กำลัง

โดยที่แรงตัด  $F$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-15 และแรงตัดที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงตัด โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามวัสดุชิ้นงานที่จะตัด ซึ่งในทางปฏิบัติการหาแรงตัดใน 3 มิติ  $F_r$ ,  $F_t$  และ  $F_c$  นั้น สามารถวัดได้จากเครื่องมือวัดแรงที่เรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ โดยจะถูกติดตั้งอยู่บนมีดตัดในขณะที่กลึงเพื่อวัดแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยแรงตัด  $F_r$  บอกถึงภาระในการป้อนตัดชิ้นงาน เพื่อนำมาคำนวณหากำลังในการป้อนตัดชิ้นงานของเครื่องจักร ส่วนแรงตัด  $F_t$  เป็นแรงที่ชิ้นงานทำกับมีดตัดในแนวตั้งฉาก ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาระยะการชดเชยการแอ่นตัวของ

ชิ้นงานในขณะตัด และแรงตัด  $F_c$  อยู่ในทิศทางเดียวกับความเร็วตัด ซึ่งบอกถึงภาวะตัดชิ้นงานและกำลังของเครื่องจักรที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน

#### 2.1.4 ทฤษฎีการเกิดเศษโลหะ (Theory of chip formation) <sup>[8][11]</sup>

การเกิดเศษตัด รูปแบบของการเกิดเศษตัดเป็นผลมาจากรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือ อัตราป้อนตัด ความเร็วตัด วัสดุที่ทำการตัดซึ่งแสดงในรูปที่ 2.8 สาเหตุเหล่านี้โดยรวมอยู่ในตัวของการทำงานเองหรือรวมกัน อาจมีผลจากแรงม้าที่ต้องการ กำลังในการตัด อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด การสึกหรอของเครื่องมือ การเกิดความร้อนและเสถียรภาพของขนาดชิ้นงานที่กำหนดไว้ได้ง่าย เครื่องมือตัดต้องมีความแข็งแรงกว่าชิ้นงานในขณะเกิดทำการตัดเฉือน มีการต่อต้านการตัดและมีการเคลื่อนที่เครื่องมืออย่างแน่นอนโดยเฉพาะชิ้นงาน

ลักษณะของเศษตัด หมายถึงลักษณะรูปร่างของเศษตัดที่หลังจากจบสิ้นการตัดเฉือน ไหลหลุดพ้นจากผิวคายเศษแล้ว เป็นผลมาจาก อัตราป้อนและความเร็วตัด รวมทั้งมีแนวโน้มผลของความลึกการตัด มุมคายเศษตัดและมุมตั้งสันคมมีดตัด



รูปที่ 2.8 : การเกิดเศษโลหะของขบวนการกลึง

##### 2.1.4.1 แบบจำลองการเกิดเศษโลหะ <sup>[1]</sup>

เมื่อพิจารณาการตัด ตามแบบจำลองอย่างง่ายใน รูปที่ 2.9 พบว่าการตัดวัสดุชิ้นงาน จะรับแรงกระทำจากเครื่องมือตัดผ่านทางคมตัด ซึ่งจะมีผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นในหลายลักษณะ

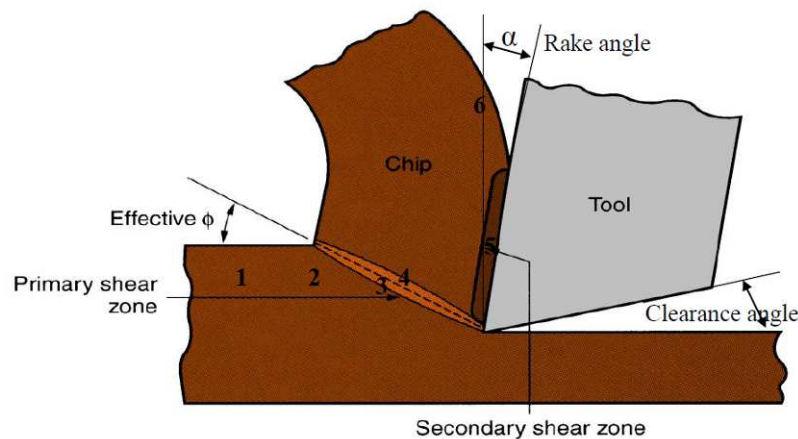
บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่วัสดุจะยังไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เพราะที่ไม่มีแรงกระทำต่อเกรนวัสดุงาน ซึ่งจะเป็นบริเวณที่การตัดที่เม็ดเกรนของวัสดุงานไม่มีการเปลี่ยนแปลง

บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่โลหะ หรือวัสดุงานเกิดการเปลี่ยนรูปโดยอยู่ในช่วงของ Elastic เมื่อไม่มีแรงมากกระทำวัสดุ จะสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้ เป็นจุดก่อนถึงจุดคราก (Yield Point) และจุด Plastic deformation ซึ่งเป็นจุดที่ 3

บริเวณที่ 3-4 จะเกิดความเค้นที่จุดนี้มากขึ้น และการเปลี่ยนรูปถาวรจะกลายเป็นเศษตัดที่บริเวณนี้ เม็ดเกรนของวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวในแนวตัดเฉือน (Shear Plan) เนื่องจากการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุที่บริเวณนี้ และความแข็งจะมากขึ้น ซึ่งเรียกว่าบริเวณการเฉือน (Shear zone)

บริเวณที่ 5 เลยจุดที่เกิดการเคลื่อนตัว (Slip) ของเกรนในแนวเฉือนที่บริเวณการเฉือนไปแล้ว โดยบริเวณนี้เกรนของวัสดุจะเคลื่อนตัวอย่างถาวร นอกจากความแข็งจะมากขึ้นแล้ว ความร้อนหรืออุณหภูมิก็จะสูงขึ้นด้วย และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น

บริเวณที่ 6 เกรนส่วนใหญ่ที่เปลี่ยนรูปไปของวัสดุกลายเป็นเศษที่ได้จากการตัดเฉือน ทำให้เกิดความแตกต่างกันด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์มากขึ้น และความแข็งในเศษตัดมากขึ้น



รูปที่ 2.9 : แบบจำลองของการตัด<sup>[1]</sup>

รูปร่างของมีดตัดสามารถแสดงได้ด้วยมุม 2 มุมคือ มุมคาย (Rake angle ,  $\alpha$ ) และมุมหลบ (Clearance angle) โดยมุมคายจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษกลึงโลหะ ส่วนมุมหลบจะเป็นมุมระหว่างผิวหลบ (flank face) กับผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้ว โดยในระหว่างการตัด คมตัดของมีดจะถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่แน่นอนในระยะที่ต่ำกว่าพื้นผิวของชิ้นงาน รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความลึกตัด ( $t_1$ ) ในขณะที่เศษโลหะกำลังก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาของเศษโลหะจะเพิ่มขึ้นเป็น  $t_2$  อัตราส่วนระหว่าง  $t_1$  กับ  $t_2$  เรียกว่าอัตราส่วนความหนาของเศษโลหะ (Chip thickness ratio ,  $r$ ) ซึ่งอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2-18 และอัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากความหนาของเศษโลหะหลังจากการตัดจะมากกว่าความหนาก่อนการตัดเสมอ

$$r = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-18)$$

และความยาวของระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$l = \frac{t_1}{\sin \phi} = \frac{t_2}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2-19)$$

โดยที่  $l$  = ความยาวระนาบเฉือน (มิลลิเมตร)

$t_1$  = การป้อน หรือความลึกในการตัดแล้วแต่กรณี (มิลลิเมตร)

$t_2$  = ความหนาของเศษโลหะ (มิลลิเมตร)

$\phi$  = มุมระนาบเฉือน (องศา)

$\alpha$  = มุมคายเศษโลหะ (องศา)

จากสมการที่ 2-19

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2-20)$$

จากการที่

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

แทนค่าลงในสมการที่ 2-20 แล้วจัดใหม่สมการใหม่จะได้

$$\tan \phi = \frac{(t_1/t_2) \cos \alpha}{1 - (t_1/t_2) \sin \alpha} \quad (2-21)$$

จากสมการที่ 2-18 แทนค่าลงในสมการที่ 2-21 สามารถเขียนได้เป็น

$$\tan \phi = \frac{r_a \cos \alpha}{1 - r_a \sin \alpha} \quad (2-22)$$

จากสมการที่ 2-22 พบว่า มุมคายเศษวัสดุ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อมุมระนาบเฉือน ในกรณีที่มุมคายเศษวัสดุมีค่ามากขึ้น จะมีผลให้ความหนาของเศษวัสดุมีค่าลดลง และมุมระนาบเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าของมุมระนาบเฉือนสามารถใช้คำนวณค่าที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง คือ พื้นที่ระนาบเฉือนได้ดังนี้

$$A_s = \frac{t_1 b}{\sin \phi} \quad (2-23)$$

โดยที่  $A_s$  = พื้นที่ระนาบเฉือน (ตารางมิลลิเมตร)

$b$  = ความกว้างของการตัด (มิลลิเมตร)

#### 2.1.4.2 อิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะ

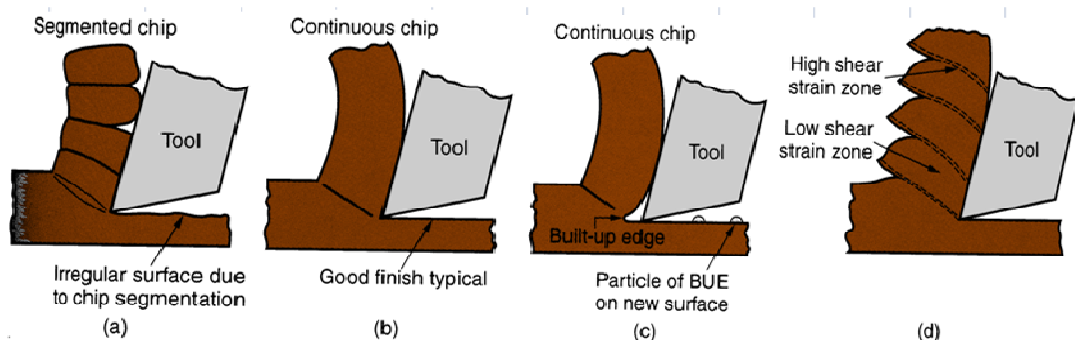
การเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องมักจะพบในการกลึงชิ้นงานจำพวก เหล็กกล้าผสมเหล็กเหนียว และพวกอลูมิเนียม ซึ่งเป็นผลมาจาก อัตราป้อนและความเร็วตัด รวมทั้งมีแนวโน้มผลของความลึกการตัด มุมคายเศษตัดและมุมตั้งสันคมมีดตัด

- เมื่อเพิ่มอัตราป้อน จะทำให้เกิดเศษตัดงอกมากขึ้นและหักง่ายขึ้น

- เมื่อเพิ่มความเร็วตัดสูงขึ้น ทำให้การหักเศษตัดเลวลงและทำให้เศษตัดมีโอกาสเป็นเส้นยาวหรือขดขึง
- เมื่อเพิ่มความลึกการตัดให้มากขึ้น ทำให้การหักเศษตัดยากขึ้น
- เมื่อมุมคายเศษน้อยลงจนมุมมีค่าเป็นลบ ส่วนมากแล้วจะทำให้การหักเศษดีขึ้น
- เมื่อเพิ่มมุมตั้งสันคมมีดตัดมากขึ้น ทำให้การหักเศษดีขึ้น (คือเศษตัดอัดแน่นเข้าด้วยกันและหักได้ง่าย เป็นลักษณะเดียวกันกับการเพิ่มอัตราป้อน)
- มุมเฉียงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเศษตัด <sup>[11]</sup>

#### 2.1.4.3 การเกิดเศษตัดและลักษณะเศษตัด <sup>[8][11]</sup>

ลักษณะของเศษตัด หมายถึงลักษณะรูปร่างของเศษตัดที่หลังจากจบสิ้นการตัดเฉือน ไหลหลุดพ้นจากผิวคายเศษแล้ว เป็นผลมาจาก อัตราป้อนและความเร็วตัด รวมทั้งมีแนวโน้มผลของความลึกการตัด มุมคายเศษตัดและมุมตั้งสันคมมีดตัด อย่างไรก็ตามสภาพการตัดกลึงอาจทำให้เกิดเศษโลหะจากการตัดกลึงเป็นอย่างใดอย่างหนึ่งใน 4 แบบหลักๆดังนี้

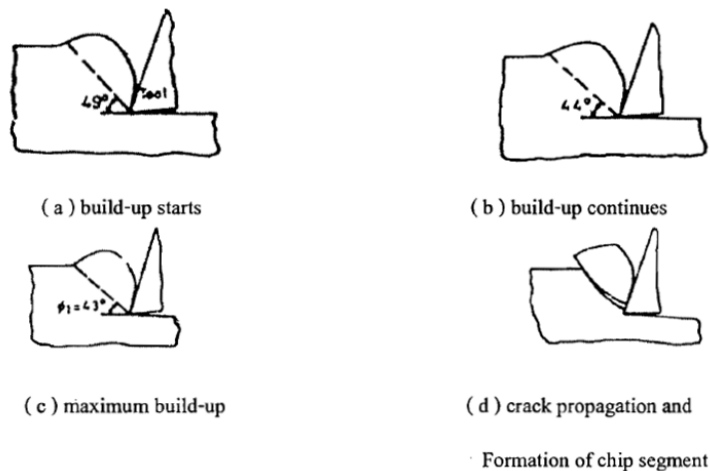


รูปที่ 2.10 : รูปแบบหลักของการเกิดเศษโลหะในการตัด:

- (a) เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง , (b) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง,  
 (c) เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่มีการเยิ้มติดที่คมตัด , (d) เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย <sup>[6]</sup>

##### 2.1.4.3.1 เศษโลหะกลึงแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Chip)

เศษโลหะชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเปราะ เช่น เหล็กหล่อ ทองเหลืองที่มีส่วนผสมของสังกะสีอยู่มาก กลไกของการเกิดเศษโลหะชนิดนี้จะแตกต่างจากกลไกที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเหนียว เนื่องจากวัสดุเปราะมีคุณสมบัติที่ไม่สามารถรับความเค้นเฉือนที่บริเวณเขตการแปรรูปหลัก จึงเกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a), (b), (c) และ (d)



รูปที่ 2.11 : แสดงการเกิดเศษโลหะไม่ต่อเนื่อง

เนื่องจากช่วงเวลาที่เศษโลหะสัมผัสกับเครื่องมือตัดเป็นช่วงเวลาดั้ง ๆ ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจึงติดไปกับเศษโลหะเสียเป็นส่วนมาก คุณสมบัติของเครื่องมือตัดจึงต่ำลง ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดสูงขึ้น

#### 2.1.4.3.2 เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chips)

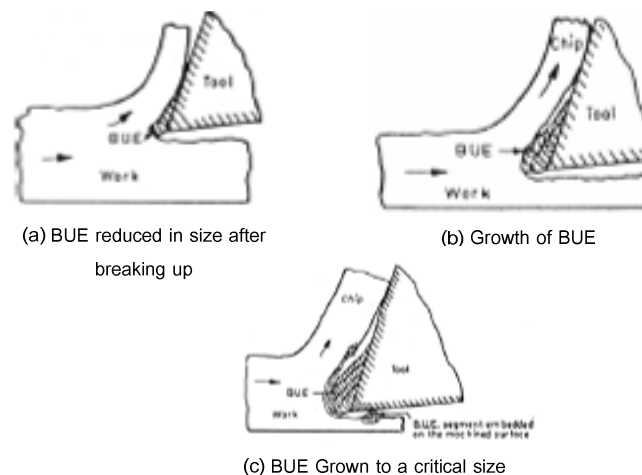
รูปที่ 2.10 (b) เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเหนียว เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียมผสมและ Stainless ลักษณะของเศษโลหะจะเป็นเส้นยาว เคลื่อนที่สัมผัสกับผิวคายเศษโลหะเป็นระยะทางเล็กน้อย จากนั้นก็จะเคลื่อนที่พ้นผิวคายเศษโลหะออกไป การแปรรูปของเศษโลหะเกิดขึ้นในสองบริเวณ คือ เขตการแปรรูปหลัก (Primary Deformation Zone) หรือตามสมมติฐานก็คือ ระบายเฉือน เพราะเนื่องจากการแปรรูปจากวัสดุชิ้นงานกลายเป็นเศษโลหะเกิดขึ้นเพราะการเฉือน บริเวณที่สองเกิดการแปรรูปโดยความดันระหว่างผิวคายเศษโลหะกับเศษโลหะ ส่วนที่สัมผัสกับผิวคายเศษโลหะ เรียกว่า เขตการแปรรูปรอง (Secondary Deformation Zone)

เศษโลหะแบบต่อเนื่องนี้ หากไม่สามารถควบคุมได้จะยากต่อการทำงานและอันตรายมาก เฉพาะอย่างยิ่งกับการกลึงหรือการกระทำอื่น ๆ ที่คล้ายกัน ถ้าเศษโลหะกลึงมีความยาวมากอย่างอิสระจะมีอันตรายต่อการทำงานและร้อน จะเป็นปัญหาต่อพื้นที่การทำงานโดยจะเกิดการม้วนตัวกับชิ้นงาน และมีดกลึงอันตรายที่จะเกิดกับคนควบคุมอาจเกิดการเหวี่ยงของเศษโลหะยาว ๆ ที่ร้อน ๆ ทั้งเพื่อความปลอดภัยและง่ายต่อการควบคุมคงต้องมีการทำให้เศษโลหะขาดลงบ้างด้วยการใช้มีดกลึงตัดให้ขาดเป็นช่วงสั้น ๆ

### 2.1.4.3.3 เศษโลหะต่อเนื่องที่มีการเชื่อมติดที่คมตัด

(Continuous Chips with built-up Edge)

รูปที่ 2.10 (c) เนื่องจากขณะเกิดการตัดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเศษโลหะและเครื่องมือตัดมีอุณหภูมิสูงประกอบกับความดันขนาดมหึมาในบริเวณนั้น ทำให้มีเนื้อบางส่วนของเศษโลหะเชื่อมติดอยู่ที่บริเวณคมตัดและผิวคายเศษโลหะ มีผลให้ความเสียดทานในบริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 2.12 (a) ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ จึงเกิดการพอกตัวเพิ่มของส่วนที่เชื่อมติด รูปที่ 2.11 (b) เมื่อส่วนนี้พอกตัวเพิ่มสูงขึ้นจนถึงขนาดที่เรียกว่า ขนาดวิกฤต (Critical Size) รูปที่ 2.11 (c) ชิ้นส่วนนี้จะหลุดออกมาซึ่งบางส่วนจะติดไปกับเศษโลหะและบางส่วนจะฝังตัวอยู่บนผิวลำเร็ว ซึ่งจะทำให้คุณภาพของผิวสำเร็จเลวลง



รูปที่ 2.12 : แสดงขั้นตอนการเชื่อมติดที่คมตัด

การเชื่อมติดที่คมตัดจะเกิดเป็น วัฏจักร คือ เกิดขึ้นแล้วหลุดออกไปแล้วก็เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งจะเพิ่มอัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัด เนื่องจากส่วนที่หลุดออกไปนี้จะมีเนื้อของเครื่องมือตัดติดออกไปด้วยการเพิ่มความเร็วตัดให้สูงขึ้น มีผลให้ส่วนที่เชื่อมติดอ่อนตัวลง จึงทำให้ขนาดวิกฤตเล็กลงด้วย ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วตัดขึ้นสูงเพียงพอ จะไม่พบส่วนที่เชื่อมติดนี้



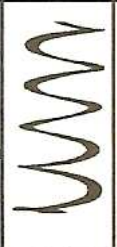







### 2.1.4.3.4 เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย (Serrated chips)

เศษโลหะในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่องและมีรูปร่างคล้ายฟันเลื่อย ซึ่งเกิดจากการเกิดเศษโลหะแบบเป็นวัฏจักรของการสับเปลี่ยนกันระหว่างความเครียดเฉือนที่สูงและความเครียดเฉือนที่ต่ำโดยพื้นที่บริเวณกว้างจะมีความเครียดเฉือนต่ำและพื้นที่ส่วนน้อยเป็น

บริเวณที่มีความเครียดเฉือนสูงดังรูปที่ 2.10 (d) และการเกิดเศษโลหะลักษณะนี้จะเกิดกับวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานอุณหภูมิต่ำพร้อมทั้งมีความแข็งลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีความร้อนเกิดขึ้น เช่น ไทเทเนียม เป็นต้น

จากรูปแบบเศษโลหะที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 4 แบบนั้นเป็นรูปแบบที่เกิดจากการตัดวัสดุที่แตกต่างโดยไม่ผ่านตัวหักเศษ (Chip Breaker) แต่รูปแบบของเศษโลหะที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยนี้หมายถึงเศษโลหะที่ผ่านการตัดแล้วไหลออกมาโดยไม่ค้างถึงตัวหักเศษและเกิดการแตกหักของเศษโลหะ 2 แบบคือ เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) และ เศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip)

จากรูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบของเศษโลหะที่ยอมรับได้และแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น โดยรูปแบบของเศษโลหะแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นนั้นอาจจะไปเสียดสีผิวหน้าชิ้นงานที่ตัดแล้วอีกครั้งหรือเกิดการพันยุ่งเหยิงกับมีดตัด และยากต่อการนำเศษโลหะเหล่านั้นออกจากการตัด ซึ่งลักษณะของเศษโลหะแบบนี้จะเกิดอันตรายกับพนักงานที่ปฏิบัติงานอยู่ด้วย ผลผลิตภาพของการทำงานไม่ดีจะทำให้ผิวชิ้นงานเสียหาย และเศษโลหะก็จะไปรวมและเกาะติดอยู่ที่มุมของมีดตัด ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จัดให้รูปหมายเลข 1-3 เป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) และรูปหมายเลข 4-10 เป็นเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip)

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

รูปที่ 2.13 : แสดงรูปแบบของเศษโลหะที่ยอมรับได้และแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น<sup>[3]</sup>



1. RIBBON CHIPS	2. TUBULAR CHIPS	3. SPIRAL CHIPS	4. WASHER-TYPE HELICAL CHIPS	5. CONICAL HELICAL CHIPS	6. ARC CHIPS	7. ELEMENTAL CHIPS	8. NEEDLE CHIPS
1.1. Long	2.1. Long	3.1. Flat	4.1. Long	5.1. Long	6.1. Connected		
1.2. Short	2.2. Short	3.2. Conical	4.2. Short	5.2. Short	6.2. Loose		

รูปที่ 2.14 : การจัดประเภทของรูปแบบของเศษโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1993 <sup>[12]</sup>

นอกจากนี้ยังมีการจัดประเภทของรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดจากกระบวนการตัดโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1993 โดยขึ้นกับขนาดและรูปทรงของมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งแบ่งเป็น 8 กลุ่มตามรูปทรงของเศษโลหะ โดยในแต่ละกลุ่มจะถูกแบ่งย่อยตามขนาด (ยาว, สั้น) และตามลักษณะทางกายภาพ (พันกัน, เป็นชิ้นเล็ก ๆ) ของมันอีกที ทั้งนี้เศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงอาจเป็นแบบบริบิ้น, แบบหยิกหยอย หรือแบบเกลียว เป็นต้น

### 2.1.5 อุณหภูมิในการตัด

#### (THERMAL ASPECTS DURING CUTTING PROCESSES) <sup>[1]</sup>

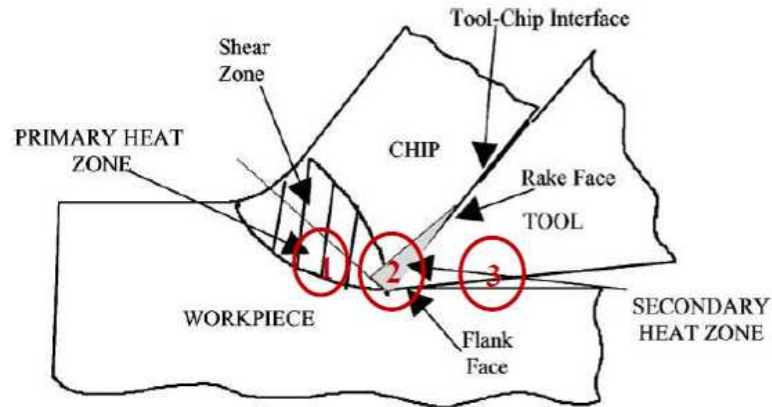
ในการตัดโลหะ กำลังของการตัดโดยมากจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน ทำให้อุณหภูมิของเศษโลหะขึ้นงานและมีดตัดเพิ่มสูงขึ้น

มี 3 แหล่งกำเนิดความร้อนหลักที่ให้เกิดความร้อนในการตัด ซึ่งทั้งสามส่วนจะให้ความร้อนในปริมาณที่ไม่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยเรียงจาก

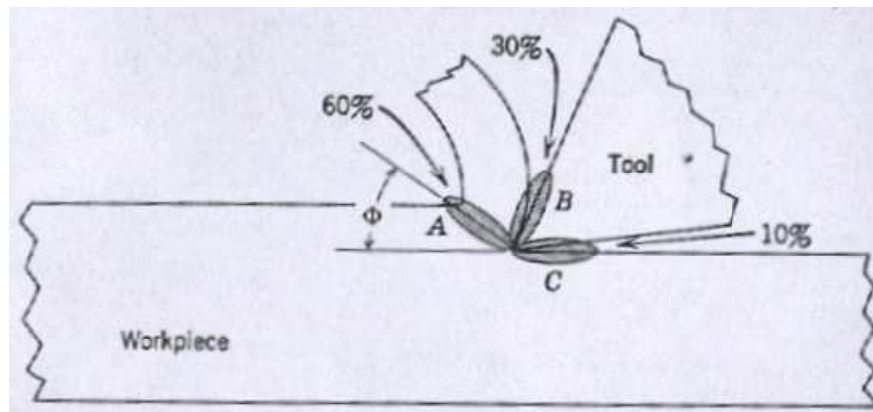
1. ความร้อนจากกระบวนการเฉือนเอง เมื่อมีการเปลี่ยนรูปพลาสติกก็จะมีความร้อนเกิดขึ้นซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนหลัก ส่วนมากความร้อนจะไปอยู่ในตัวของเศษโลหะที่หลุดออกมา

2. ความร้อนที่เกิดที่ผิวหน้าสัมผัสของมีดตัดและเศษโลหะ เมื่อมีการเปลี่ยนรูปพลาสติกของเศษโลหะทำให้มีการเกิดความร้อนขึ้นมา ซึ่งความร้อนจะมาจากการเสียดทานจากการไหลของเศษโลหะ

3. เกิดที่หน้ามุมหลบของมีดตัด เมื่อการตัดชิ้นงานเกิดขึ้นจะได้ผิวหน้าของชิ้นงานใหม่ และความร้อนนี้เกิดจากการขัดถูที่ผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้จากการตัด



รูปที่ 2.15 : บริเวณที่เกิดความร้อนขณะตัด <sup>[13]</sup>



รูปที่ 2.16 : ค่าประมาณของการเกิดความร้อน ของ 3 โซน คือ โซน A บนระนาบเฉือน โซน B บนหน้ามุมคายกับเศษโลหะ โซน C บนผิวชิ้นงานกับหน้ามุมหลบ <sup>[14]</sup>

จากรูปที่ 2.16 พลังงานที่ใช้ไปทั้งหมดในการกระบวนการตัดโลหะ 60% จะถูกใช้ในการเปลี่ยนรูปบริเวณระนาบเฉือนและบนหน้ามุมคาย 30% จะเสียไปในรูปแรงเสียดทานที่เกิดบนหน้ามุมหลบ 10%

ความรู้ทางด้านอุณหภูมิจากการตัดเป็นส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณาเนื่องจาก

1. จะส่งผลในทางตรงกันข้ามกับความแข็งแรง, ความแข็งและความทนต่อการสึกกร่อนของมีดตัด
2. เป็นสาเหตุที่ทำให้ได้ขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชิ้นส่วนที่ทำการตัด ทำให้การควบคุมความถูกต้องแม่นยำของขนาดนั้นเป็นไปได้ยาก

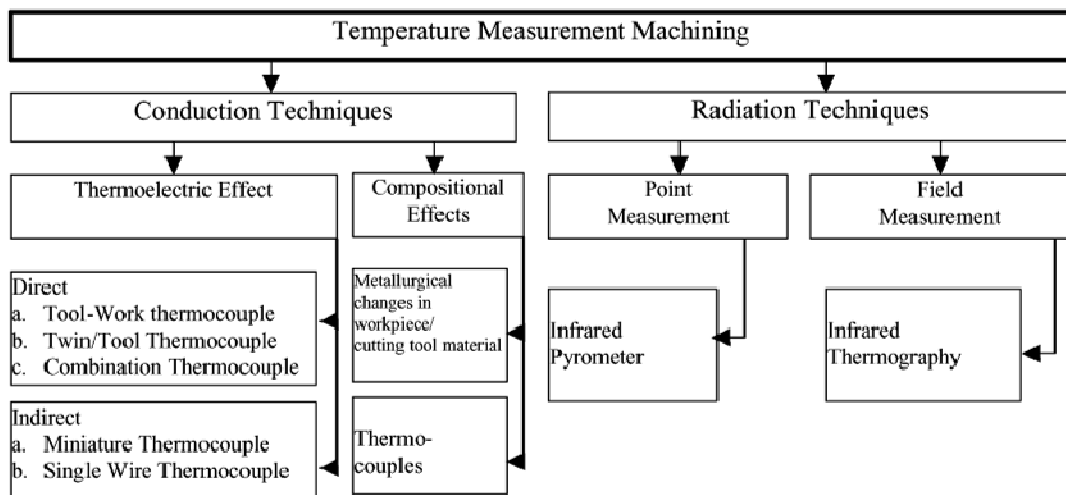
3. ก่อให้เกิดการทำลายกับผิวหน้าที่ได้เนื่องจากความร้อนจากการตัด ซึ่งจะส่งผลกับคุณสมบัติของงานที่ได้เปลี่ยนไป เช่น อาจเกิดความเค้นตกค้าง จนทำให้คุณสมบัติที่ได้ต่ำกว่าคุณสมบัติที่ออกแบบเอาไว้ เป็นต้น

2.1.5.1 อุณหภูมิบนมีดตัด

(EXPERIMENTAL DETERMINATION OF TOOL TEMPERATURES)

การพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิบน Rake face และในมีดตัดเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประมาณการสึกของมีดตัดและอายุการใช้งานของมีดตัด มีเทคนิคหลาย ๆ อย่างที่ใช้เพื่อหาอุณหภูมิที่ถูกต้องบนจุดต่าง ๆ บนมีดตัด ตัวอย่างของเทคนิคที่ใช้ดังรูปที่ 2.17 เช่น

1. การวัดอุณหภูมิระหว่างมีดตัดกับชิ้นงาน (Tool-Workpiece Thermocouple)
2. การใช้เทคนิค photosensitive paints
3. การใช้เทคนิค Metallurgical changes
4. การใช้เทคนิค infrared thermometers



รูปที่ 2.17 : การวัดอุณหภูมิการตัดบนเครื่องจักรกล [13]

2.1.5.2 การวัดอุณหภูมิระหว่างมีดตัดกับชิ้นงาน

จากวิจัยที่ผ่านมาในอดีต การศึกษาด้านการวัดอุณหภูมิบนเครื่องจักรกลที่เพิ่มขึ้นนั้น พบว่ามี 2 เทคนิคหลักๆ ที่นิยมนำมาใช้คือ การวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสและการวัดอุณหภูมิแบบสะท้อนรังสีหรือแบบไม่สัมผัส นั่นเอง ซึ่งมีหลักการดังนี้

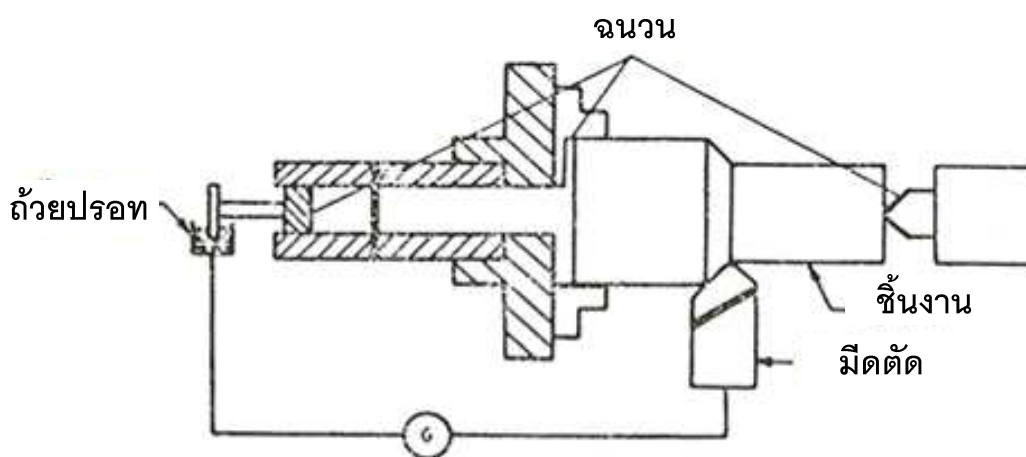
- เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส หมายความว่า เราจะต้องนำโพรบไปสัมผัสกับชิ้นงาน เพื่อให้สามารถวัดค่าอุณหภูมิออกมาได้ โดยความหมายของการสัมผัส ก็จะมีอีกหลาย

ประเภท คือ สัมผัสที่พื้นผิว (Surface), สัมผัสแบบจุ่ม (Immerse), สัมผัสแบบเสียบ (Penetrate) เป็นต้น ซึ่งเราจะต้องเลือกโพรบให้ตรงตามลักษณะงานที่เราต้องการวัด เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (อินฟราเรด) หมายถึง เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้การวัดรังสีอินฟราเรดที่ถูกปล่อยออกจากวัตถุ โดยการวัดเป็นการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิว (Surface) เท่านั้น และการเลือกเครื่องมือวัดชนิดนี้ จะต้องศึกษารายละเอียดหลัก ๆ อยู่ 2 อย่างคือ ค่า Distance to spot ratio และค่า Emissivity เพื่อให้สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้อย่างถูกต้อง

#### 2.1.5.2.1 การวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสด้วยเทอร์โมคอปเปิล

(Tool-Workpiece Thermocouple)

วิธีนี้ใช้ประโยชน์จาก emf ที่ผลิตได้ระหว่างหน้าสัมผัสร้อนของ tool-workpiece และฝั่งที่เย็นของ tool-workpiece ถ้าฝั่งที่เย็นของทั้งสองติดกัน จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งสามารถวัดได้ ดังนั้นการเกิด emf จะสามารถวัดได้ด้วย voltmeter การจัดวางทั่วไปของเครื่องมือแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.18 ตัวชิ้นงานจะถูกหุ้มฉนวนจาก chuck และ tailstock center ปลายของชิ้นงานจะถูกเชื่อมโดยแหวนเลื่อนที่จุ่มลงไปในตัวปรอท การเชื่อมต่อนี้ทำได้โดยอาศัย galvanometer กับด้านปลายของชิ้นงาน ปริมาณของกระแสจะขึ้นกับความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างปลายด้านร้อนกับปลายด้านเย็นและธรรมชาติของมิตตัดและชิ้นงาน การใช้ลวดทองแดงจะไม่ส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิที่รอยเชื่อมต่อของมิตตัดและชิ้นงานยังเท่ากันอยู่ ค่า emf ที่วัดได้หรือกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกคำนวณโดยใช้ calibration curve

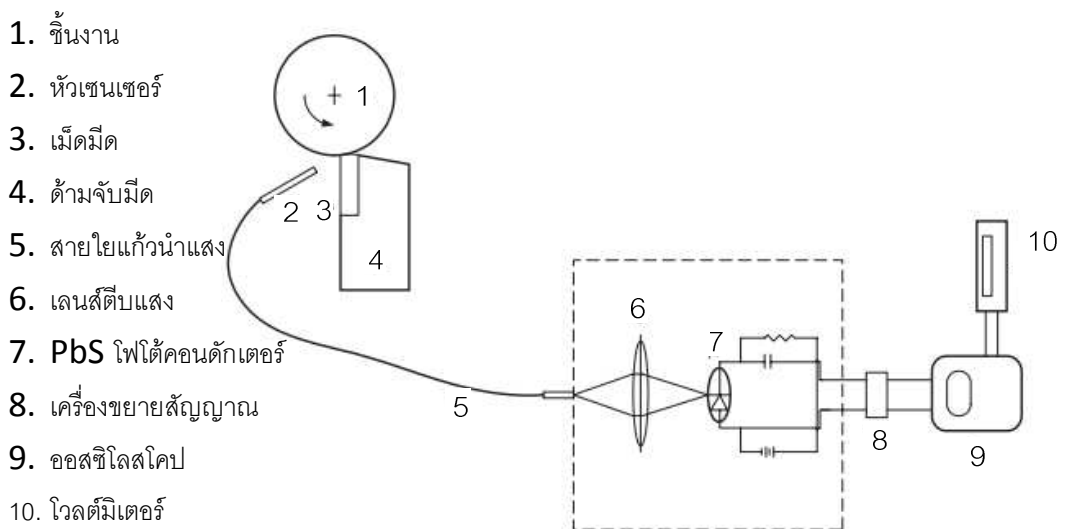


รูปที่ 2.18 : การจัดวางของเทอร์โมคอปเปิลแบบ tool-workpiece<sup>[15]</sup>

### 2.1.5.2.2 การวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสด้วยอินฟราเรดไพโรมิเตอร์

(Infrared pyrometer)

เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดนี้จะรับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากวัตถุ ซึ่งมีหลักการที่ว่ารังสีอินฟราเรดจะเปล่งออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิในตัวมัน ถ้าวัตถุนั้นเปล่งรังสีอินฟราเรดออกมามีความเข้มมาก แสดงว่าวัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูง สำหรับการนำมาใช้งานในการวัดอุณหภูมินั้นรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากวัตถุจะผ่านเลนส์ที่ปรับแสงเพื่อรวมแสงไปที่ตัวโฟโตคอนดักเตอร์และขยายสัญญาณ ผ่านไปยังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อคำนวณค่าแล้วแปลงเป็นค่าอุณหภูมิเพื่อแสดงผลผ่านทางหน้าจอโปรแกรมของชนิดอินฟราเรดไพโรมิเตอร์ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 : การจัดวางของอินฟราเรดไพโรมิเตอร์ในกระบวนการกลึง <sup>[16]</sup>

ความถูกต้องของอุณหภูมิที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับ emissivity, distance to spot size และ field of view ซึ่งเกิดจากหลักการดังต่อไปนี้

-Emissivity วัตถุแต่ละชนิดมีการสะท้อนแสงต่างกัน จึงต้องปรับค่าหนึ่งที่เครื่องมือวัดเพื่อชดเชยการสะท้อนของวัตถุนั้น โดยสามารถดูได้จากตารางคู่มือของเครื่องมือวัด ซึ่งวัตถุนั้นใหญ่จะมีค่า E คงที่ที่ 0.95 และเครื่องมือวัดแบบปรับค่า emissivity จะมีความแม่นยำกว่าเครื่องมือวัดที่ไม่สามารถปรับค่า emissivity

-distance to spot size เป็นการกำหนดระยะทางในการติดตั้ง เพื่อให้ได้พื้นที่ที่ต้องการเฉลี่ยค่าอุณหภูมิมาแสดงผล โดยกำหนดได้จากสูตร  $d=D/F$  ,d แทนขนาดพื้นที่ ที่ต้องการค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ, D แทนระยะจากหน้าเลนส์ถึงกระจก และ F แทน ระยะโฟกัสของเครื่องมือวัดนั้น

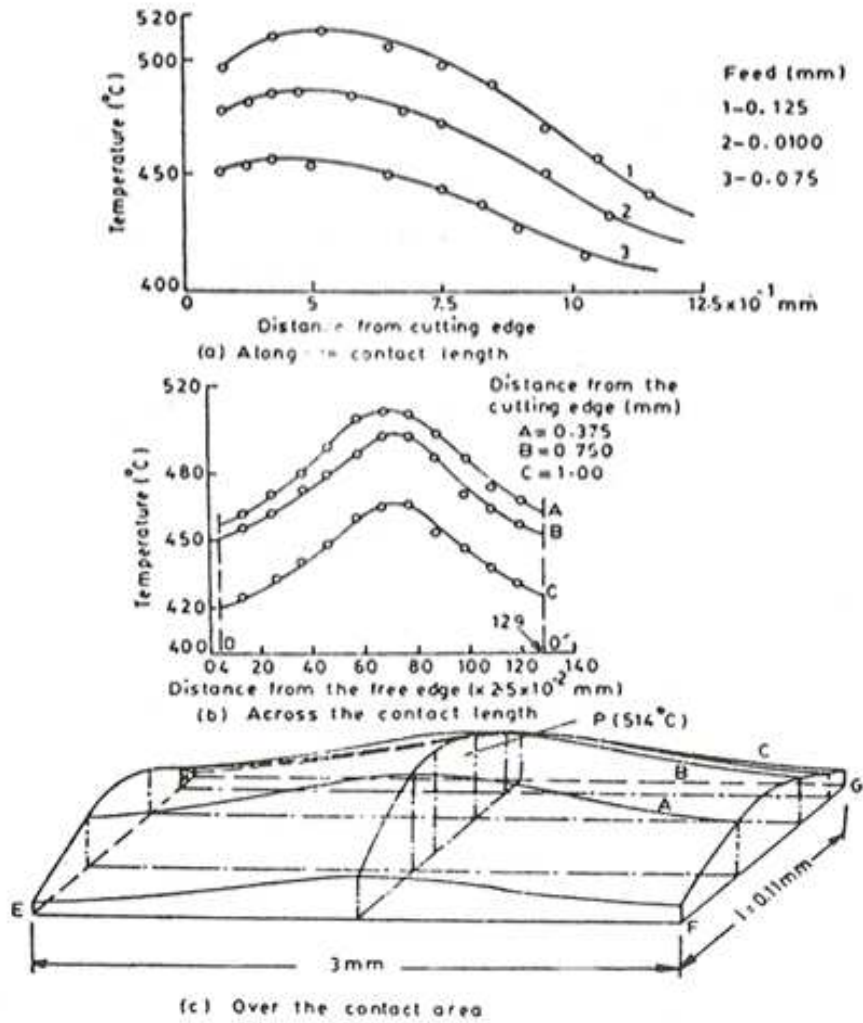
-Field of view เพื่อให้แน่ใจว่าตำแหน่งที่วัดไม่เคลื่อนไป จนทำให้วงที่วัดใหญ่กว่าวัดจากการวัดที่ดี พื้นที่ที่คำนวณออกมาต้องลึกกว่าพื้นที่ที่เราต้องการวัด หากวัดถูกลึกควรติดตั้งให้ใกล้หรือเลือกเครื่องมือวัดที่มีระยะโฟกัสสูงๆ

### 2.1.5.3 การกระจายอุณหภูมิบนหน้ามุมคายเศษโลหะ

(Temperature Distribution on Rake Face by Embedded Thermocouple)

การพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิบน rake face ของมีดตัดเป็นมุมมองที่สำคัญที่นักวิจัยหลายท่านได้พยายามในการค้นหา การพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการทดลองเป็นเรื่องที่ยากเพราะพื้นผิวสัมผัสระหว่าง chip และ tool มีขนาดเล็กแล้วเข้าถึงได้ยาก

Qureshi และ Koenigsberger ได้ทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในรูที่มีขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.425 ถึง 0.475) บน HSS tool ตั้งแต่ด้านหน้าของส่วนล่างไปยังจุดที่ห่างจาก rake face เป็นระยะคงที่ หลังจากที่ได้ทำการวัดอุณหภูมิขณะเจียรอย่างต่อเนื่องแล้ว จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลอยู่ใกล้บริเวณ rake face จากที่ได้ทำการพล็อตจุดการกระจายตัวของอุณหภูมิแล้ว จำเป็นที่จะต้องใช้เทอร์โมคัปเปิลบน rake face หลายตัวมาก เนื่องจากการที่มีรูจำนวนมากบน rake face จะทำให้ค่าที่ได้ต่างจากความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องใช้มีดตัดที่เหมือนกันจำนวนหลายตัวแล้วจึงทำการเจาะรูบนมีดตัด และรูบน rake face เพื่อทำการวัดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของอุณหภูมิบน rake face สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.20 (a), (b) และ (c)



รูปที่ 2.20 : รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิบน rake face<sup>[1]</sup>

### 2.1.6 การสึกหรอของมีดตัด (Tool Wear)<sup>[1][3][7]</sup>

ในการใช้มีดตัดในกระบวนการตัดนั้น แรงในการตัดและอุณหภูมิในการตัดที่สูงจะเป็นสภาพแวดล้อมที่ไม่ส่งผลดีต่อมีดตัด โดยถ้าแรงในการตัดสูงเกินไป มีดตัดจะเกิดการแตกหัก และถ้าอุณหภูมิในระหว่างการตัดสูงเกินไป วัสดุจะอ่อนตัวลงและเกิดการเสียหาย ซึ่งถ้าทั้ง 2 เงื่อนไขดังกล่าวไม่ได้สูงเกินไปและนำมาซึ่งความเสียหายของมีดตัด ก็ยังเกิดการสึกหรออย่างต่อเนื่องของมีดตัดซึ่งนำไปสู่ความเสียหายของมีดตัด ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคโนโลยีในด้านของมีดตัดเข้ามาช่วย โดยจะให้ความสำคัญกับประเด็นหลักใน 2 ด้าน คือด้านของวัสดุของมีดตัด (Tool material) และรูปทรงของเครื่องมือตัด (Tool geometry) ซึ่งในด้านวัสดุของมีดตัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรง, อุณหภูมิ และการสึกหรอในกระบวนการตัด

ส่วนในด้านรูปทรงของเครื่องมือตัดจะพัฒนาเกี่ยวกับการหารูปทรงที่เหมาะสมของมีดตัดสำหรับวัสดุของมีดตัดและสำหรับกระบวนการตัด ทั้งนี้เพื่อให้อายุของมีดตัดยาวนานขึ้น โดยมี 3 สาเหตุหลักๆที่เป็นไปได้ที่ทำให้มีดตัดเกิดความเสียหาย ซึ่งก็คือ

1.) การเสียหายแบบแตกหัก (Fracture failure)

รูปแบบของการเสียหายแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อแรงในการตัดที่จุดตัดมากเกินไป โดยจะนำมาซึ่งความเสียหายแบบทันทีทันใดเนื่องจากการแตกหัก

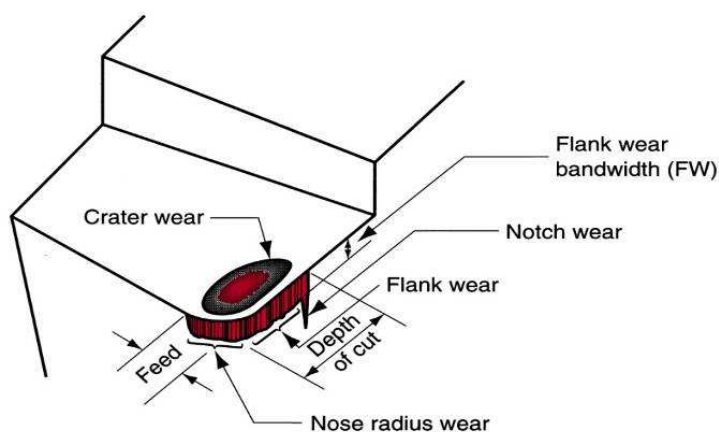
2.) การเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature failure)

การเสียหายนี้เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการตัดสูงเกินไปสำหรับวัสดุของมีดตัด ทำให้วัสดุของมีดตัดอ่อนตัวลง ซึ่งจะเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกและสูญเสียความคมของคมตัดไป

3.) การสึกหรอแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear)

การสึกหรออย่างค่อยเป็นค่อยไปของคมตัดจะทำให้มีดตัดเสียรูปทรงและลดประสิทธิภาพในการตัดลง และสุดท้ายมีดตัดก็จะเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้

การเสียหายแบบแตกหักและการเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลให้มีดตัดเกิดการเสียหายก่อนกำหนด ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น และจากการเสียหายของมีดตัดทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าว การสึกหรออย่างค่อยเป็นค่อยไปจะดีกว่าในอีก 2 แบบที่กล่าวไปข้างต้น เนื่องจากมันมีความเป็นไปได้ที่จะใช้มีดตัดได้ยาวนานกว่าในกรณีที่เกิดการเสียหาย 2 แบบแรก นอกจากนี้ในการพยายามที่จะควบคุมรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้น มันมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาคุณภาพของตัวผลิตภัณฑ์ด้วย คือเมื่อมีดตัดเกิดความเสียหายในระหว่างการตัด มันมักจะเกิดความเสียหายต่อผิวชิ้นงานอย่างทันทีทันใด ซึ่งความเสียหายแบบนี้ สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเลือกเงื่อนไขของการตัดที่ทำให้เกิดการสึกหรอแบบค่อยเป็นค่อยไป และทำได้โดยการเปลี่ยนมีดตัดก่อนที่คมตัดของมีดตัดจะเสียหาย



รูปที่ 2.21 : ภาพการสึกหรอของมีดตัด แสดงตำแหน่งและรูปแบบของการสึกหรอที่เกิดขึ้น<sup>[6]</sup>



โดยทั่วไปแล้ว การสึกหรอของมีดตัดจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear) ซึ่งกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษกึ่งโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งการสึกหรอในรูปที่ 2.21

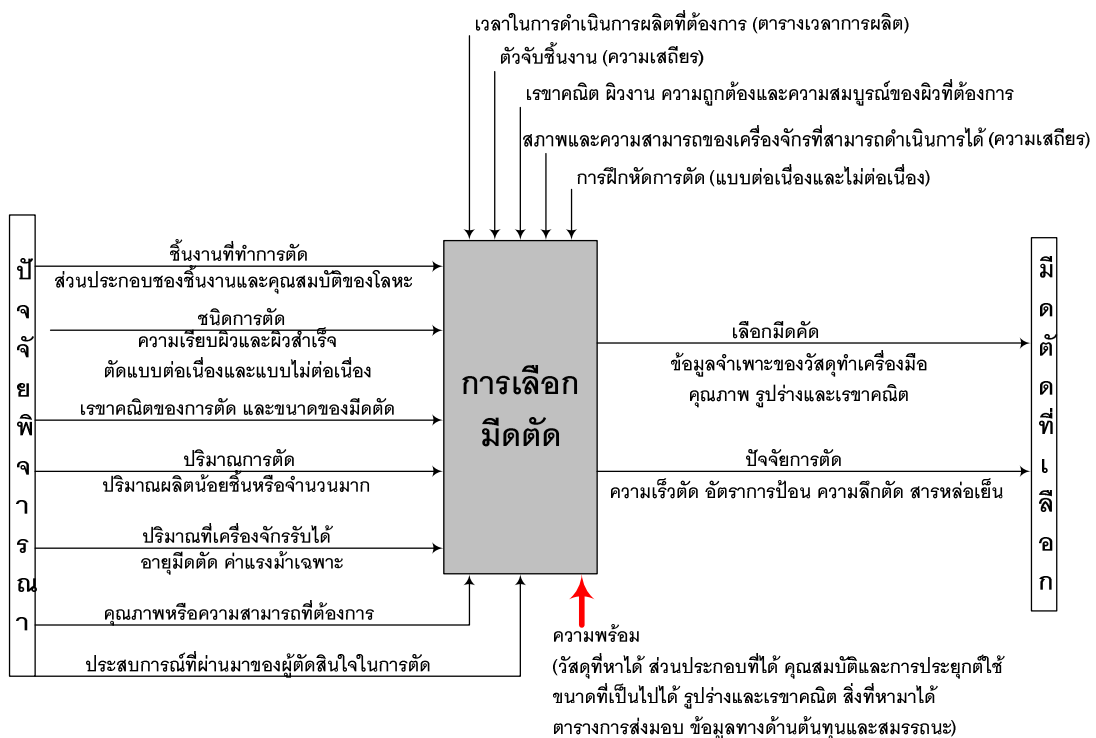
ตารางที่ 2.3: กลไกที่ทำให้เกิดการสึกหรอบนมีดตัด<sup>[6]</sup>

กลไกการสึกหรอ	สาเหตุของการเกิด	ตำแหน่งการสึกหรอ
การเสียดสี (Abrasion)	เมื่อเกิดเศษโลหะชิ้นระหว่างที่โลหะทั้งสองชนิดกำลังขัดสีกันอยู่นอกภาคที่แข็งของชิ้นงานจะทำให้บางส่วนมีดตัดค่อยๆหลุดติดออกมา	- บนผิวหลบ - บนผิวคาย
การยึดติด (Adhesive Wear)	โลหะสองอย่างที่ขัดสีกันภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง ทำให้โลหะที่อ่อนกว่าส่วนหนึ่งเกิดการหลอมละลายไปติดกับโลหะที่แข็งกว่าซึ่งในที่นี้ก็คือมีดตัด ทำให้โลหะที่แข็งกว่าเกิดปุ่มนูนขึ้น ซึ่งปุ่มนูนนั้นจะหลุดออกไปในระหว่างที่โลหะทั้งสองทำการขัดสีกันต่อ	- บนผิวคาย
การแพร่ (Diffusion)	เกิดการแลกเปลี่ยนอะตอมกันระหว่างผิวหน้าของวัสดุ 2 ชนิด อะตอมของมีดตัดจะหายไป ความแข็งแรงลดลงทำให้ง่ายต่อการเกิดการเสียดสีและการยึดติด และจะเกิดได้มากขึ้นเมื่อบริเวณที่เกิดการสัมผัสมีอุณหภูมิสูง และมีความเร็วต่ำ	- บนผิวคาย
ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction)	ความเร็วตัดสูงและอุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เครื่องมือตัดอ่อนลงพร้อมๆกับการสึกหรอที่ขอบคมตัดขึ้น	- บนผิวคาย
การเสียรูปแบบ พลาสติก (Plastic deformation)	เกิดอุณหภูมิที่สูงบริเวณคมตัด คมตัดจะเริ่มเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ทำให้ง่ายต่อการเกิดการเสียดสี	- บนผิวหลบ

2.1.6 มีดตัด (Cutting tool)

2.1.6.1 การเลือกมีดตัด (Tool selection) <sup>[1]</sup>

สาเหตุหลักที่ทำให้มีดตัดเกิดความเสียหายนั้น สามารถที่จะใช้ในการกำหนดคุณสมบัติที่สำคัญที่ควรต้องมีในวัสดุที่ใช้ทำมีดตัด ซึ่งก็คือ ความแกร่ง (Toughness) ซึ่งมีความสัมพันธ์ด้านความแข็งแรงและความเหนียว โดยวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดต้องมีค่าความแกร่งที่สูง เพื่อที่วัสดุจะสามารถดูดซับพลังงานโดยที่ไม่แตกหักได้, ความแข็งที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) เป็นความสามารถของวัสดุที่จะยังคงความแข็งที่อุณหภูมิสูง และการต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) โดยวัสดุที่ใช้ในการทำมีดตัดที่ต่างกันจะมีการรวมกันของคุณสมบัติในแต่ละด้านในระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งการพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุทำมีดตัดเป็นเพียงส่วนหนึ่งของหลักเกณฑ์การเลือกมีดตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.22

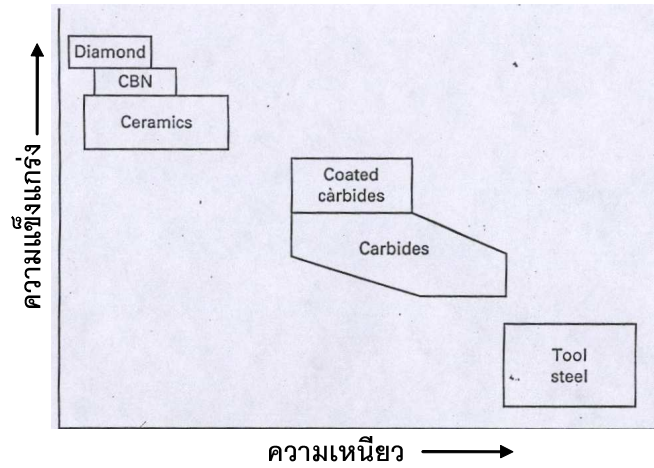


รูปที่ 2.22 : เกณฑ์ในการเลือกมีดตัด <sup>[1]</sup>

2.1.6.2 การเลือกวัสดุที่ใช้ทำมีดตัด (Tool Materials) <sup>[3] [6]</sup>

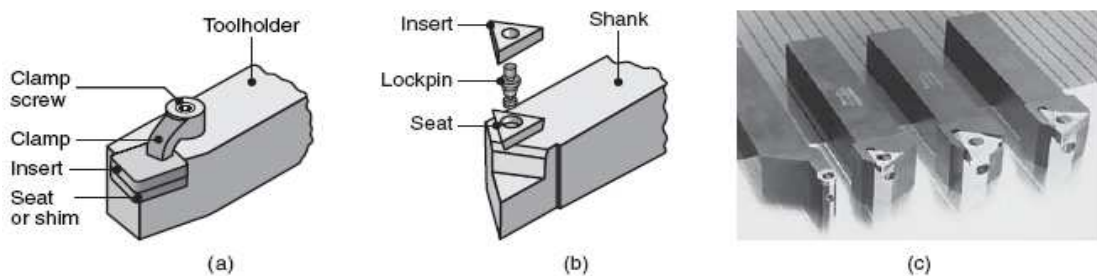
เนื่องจากการยากที่จะหาวัสดุที่มีคุณสมบัติครบถ้วนตามที่กล่าวมาแล้วนี้ได้ทุกประการ ตัวอย่างเช่น วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง มักเปราะจะไม่เหมาะกับงานตัดหยาบ และวัสดุที่ทนทาน

ต่อการสึกหรอจำเป็นจะต้องมีส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ และต้องมีการอบชุบที่ดีจึงทำให้มีราคาแพงขึ้น เป็นต้น ดังนั้นอาจใช้การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียวมาเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุสำหรับมีดตัดตามรูปที่ 2.23



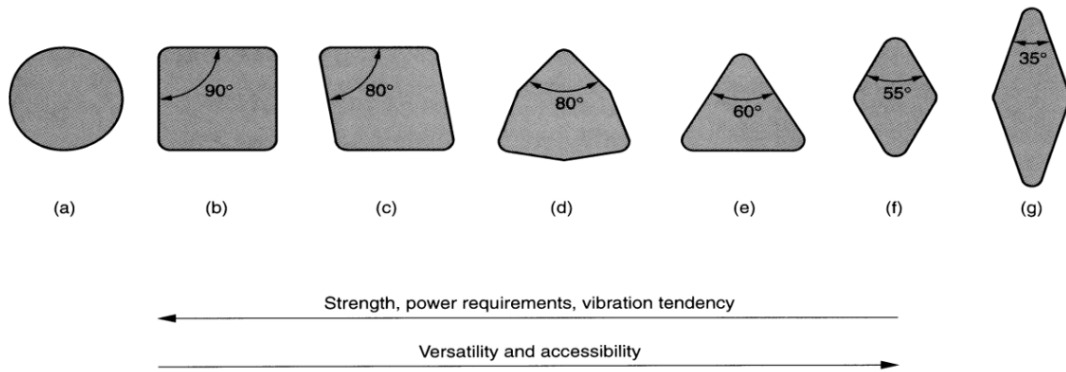
รูปที่ 2.23 : การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียววัสดุมีดตัด [1]

### 2.1.6.3 เม็ดมีด (Inserts)



รูปที่ 2.24 : แสดงวิธีการติดเม็ดมีดบนด้ามมีด (a) การยึดเม็ดมีดกับด้ามมีด, (b) แสดงการประกอบเม็ดมีด, (c) ตัวอย่างของเม็ดมีดที่แตกต่างกันที่ติดอยู่กับด้ามมีด [6]

เม็ดมีดของมีดตัดที่ติดอยู่กับด้ามมีด (Tool holder) จะพบเห็นอย่างมากในกระบวนการตัดเนื่องจากมันมีความคุ้มค่าและสามารถที่จะเปลี่ยนได้หลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งเม็ดมีดนั้นมีหลายรูปทรงและหลายขนาด โดยรูปทรงของเม็ดมีดที่ถูกใช้ในกระบวนการกลึงแสดงดังรูปที่ 2.25



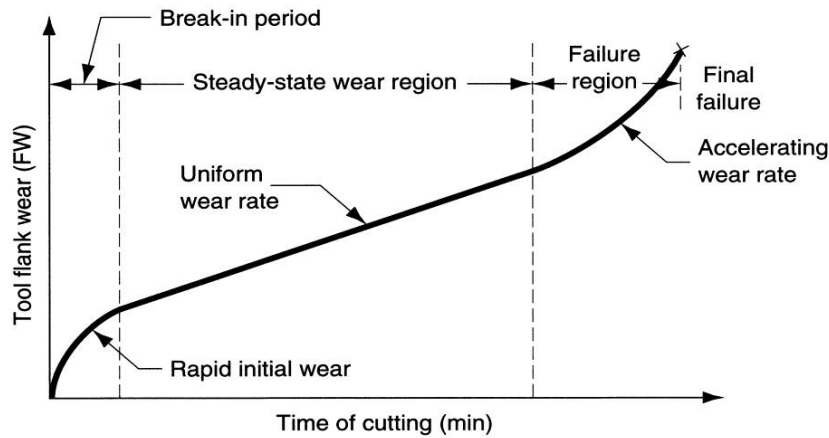
รูปที่ 2.25 : รูปทรงของเม็ดมีด (a) กลม, (b) สี่เหลี่ยม, (c) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม  $80^\circ$ , (d) หกเหลี่ยม, (e) สามเหลี่ยมด้านเท่า, (f) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม  $55^\circ$  และ (g) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม  $35^\circ$  [6]

โดยทั่วไปแล้ว มุมของเม็ดมีดที่มีขนาดใหญ่ควรจะถูกเลือกใช้เมื่อต้องการความแข็งแรงและความคุ้มค่า ในขณะที่มุมของเม็ดมีดที่มีขนาดเล็กควรถูกเลือกใช้เมื่อต้องการการเข้าถึงชิ้นงานที่ง่าย และจากรูปที่ 2.25 จะเห็นว่ามีเม็ดมีดที่มีลักษณะกลม ซึ่งมีข้อดีคือ มันสามารถที่จะถูกใช้ได้มากกว่าเม็ดมีดชนิดอื่น ซึ่งเม็ดมีดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจะมี 4 คมตัด, เม็ดมีดที่มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมจะมี 3 คมตัด ในขณะที่เม็ดมีดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนจะมีเพียง 2 คมตัด โดยคมตัดยิ่งน้อยจะทำให้เกิดต้นทุนสูงขึ้นเนื่องจากสามารถใช้งานได้น้อยกว่าเม็ดมีดที่มีหลายคมตัด

#### 2.1.6.4 อายุใช้งานของมีดตัดและสมการอายุใช้งานของมีดตัดของเทย์เลอร์ (Tool life and the Taylor tool life equation)<sup>[1]</sup>

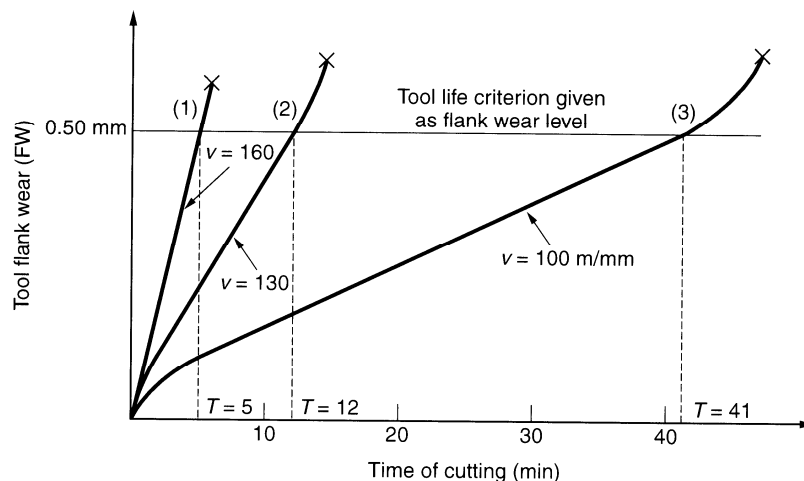
ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่ากลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นล้วนส่งผลต่อระดับการเพิ่มขึ้นของการสึกหรอบนมีดตัด ซึ่งการสึกหรอของมีดตัดนั้นมีความสัมพันธ์กับเวลาในการตัดดังรูปที่ 2.26 และถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ที่แสดงดังรูปจะเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผิวหกลบ แต่ความสัมพันธ์นี้ยังสามารถใช้ได้กับการสึกหรอบนผิวคายด้วย ซึ่งจากรูปจะพบว่าปริมาณการสึกหรอบนผิวหกลบของเครื่องมือตัดกับเวลาที่ใช้ในการตัดแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง โดยในส่วนของ การสึกหรอช่วงแรก (Initial wear) คมตัดจะสึกหรออย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในระยะเวลา 2-3 นาที เนื่องจากการใช้งานมีดตัดที่มีความสมบูรณ์ ในบริเวณส่วนปลายสุดของคมตัดจะมีลักษณะเป็นสันแหลม ซึ่งง่ายต่อการสึกหรอเป็นอย่างมาก เมื่อเกิดการสึกหรอในช่วงนี้ระยะหนึ่ง อัตราการสึกหรอจะลดลง แล้วเข้าสู่ช่วงการสึกหรออัตราคงที่เมื่อเทียบกับเวลาที่ผ่านไป (Steady state wear) ซึ่งเป็นการสึกหรอตามปกติในธรรมชาติ จนถึงเมื่อการสึกหรอเพิ่มขึ้นถึงระยะที่สาม คือ การสึก

หรือที่รวดเร็ว (Accelerating wear) เนื่องจากคมตัดเกิดการสึกหรอมาก จนทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นมาก และอุณหภูมิสูงขึ้นมาก จึงเป็นเหตุที่ทำให้เร่งการสึกหรอให้เร็วขึ้น



รูปที่ 2.26 : ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอบนผิวหลบกับเวลาที่ใช้ในการตัด<sup>[6]</sup>

ความชันของเส้นโค้งของการสึกหรอในช่วงที่ 2 จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขของการตัด โดยวัสดุของชิ้นงานที่แข็งกว่าจะนำมาซึ่งอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าในวัสดุชิ้นงานที่อ่อน และในทำนองเดียวกัน ความเร็วในการตัด, อัตราป้อนตัด และความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้อัตราการสึกหรอที่สูงขึ้นเช่นกัน โดยความเร็วจะส่งผลต่อการสึกหรอมากที่สุด และถ้านำเส้นโค้งของการสึกหรอมาพล็อตระหว่างความเร็วในการตัดเทียบกับเวลาจะได้อผลดังรูปที่ 2.27 ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าความเร็วในการตัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นด้วยและทำให้ระดับของการสึกหรอถึงค่า 0.5 มิลลิเมตรซึ่งเป็นเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอบนผิวหลบเร็วกว่าของความเร็วในการตัดที่ต่ำกว่า



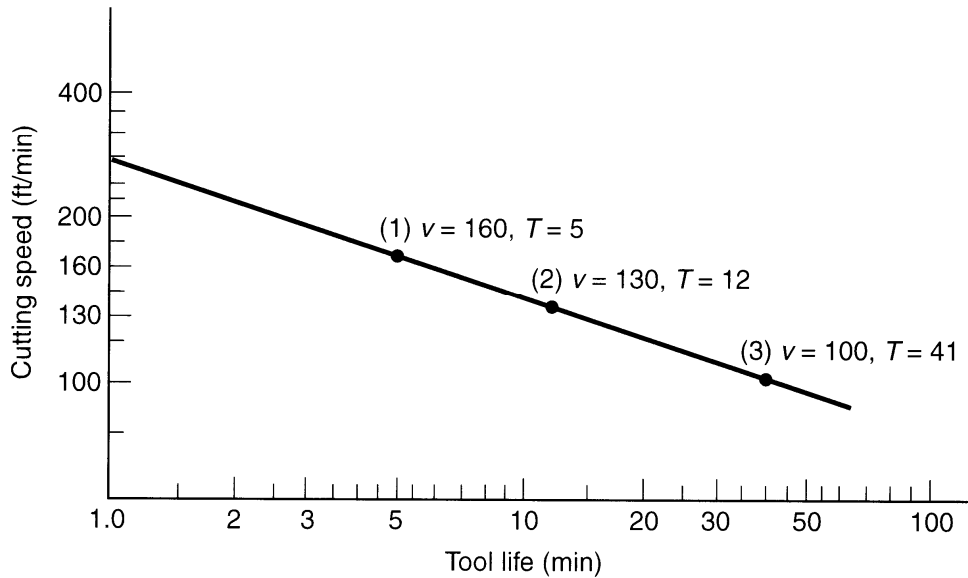
รูปที่ 2.27 : ผลกระทบของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงในการตัดต่อการสึกหรอบนผิวหลบ โดยให้เกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอบนผิวหลบเป็น 0.5 มิลลิเมตร<sup>[6]</sup>

อายุการใช้งานของมีด (Tool life) ถูกกำหนดเป็นระยะเวลาของการตัดที่มีดตัดสามารถใช้งานได้ หรือระยะเวลาที่มีดตัดเริ่มใช้จนกระทั่งมีดตัดเสียหายอย่างมากจนไม่สามารถใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตจริงนั้น ไม่สามารถใช้งานมีดตัดจนกระทั่งมีดตัดเสียหายได้ เนื่องจากความยากในการลับคมมีดตัดใหม่, ปัญหาในเรื่องคุณภาพของชิ้นงาน และปัญหาในเรื่องของความยากในการวัดระดับการสึกหรอรวมถึงเวลาที่ใช้ในการวัด ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอทางเลือกในการกำหนดเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัด (Tool life criterion) ขึ้นมา 9 ทางเลือกซึ่งมีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตมากกว่า ดังนี้

- 1.) มีดตัดถูกใช้งานจนกระทั่งคมตัดเสียหาย (การเสียหายแบบแตกหัก, การเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ หรือการสึกหรอจนกระทั่งมีดตัดไม่สามารถใช้งานต่อไปได้
- 2.) พนักงานใช้สายตาในการตรวจสอบการสึกหรอที่เกิดขึ้น ซึ่งเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดถูกกำหนดโดยขึ้นอยู่กับ การตัดสินใจและความสามารถของพนักงานแต่ละคน
- 3.) พนักงานใช้เล็บมือในการตรวจสอบคมตัดของมีดตัด
- 4.) พนักงานตัดสินใจจากเสียงของกระบวนการผลิตที่เปลี่ยนไป
- 5.) เศษโลหะเริ่มพันกันเป็นสายยาวและยากต่อการจัดการ
- 6.) พื้นผิวสุดท้ายของงานมีคุณภาพลดลง
- 7.) การใช้พลังงานในการตัดเพิ่มขึ้น โดยวัดจากมิเตอร์ที่ต่ออยู่กับเครื่องจักร
- 8.) การนับจำนวนชิ้นงาน โดยพนักงานจะทำการวัดจำนวนชิ้นงานที่ทำได้ และทำการเปลี่ยนมีดตัดเมื่อถึงจำนวนที่กำหนดไว้
- 9.) การนับเวลาที่ใช้ในการตัดทั้งหมด ซึ่งหลักการคล้ายกันกับการวัดจำนวนชิ้นงาน

#### 2.1.6.4.1 สมการอายุใช้งานของมีดตัดของเทย์เลอร์ (Taylor Tool Life Equation)

จากรูปที่ 2.27 ถ้านำค่าอายุการใช้งานของมีดตัดของเส้นโค้งการสึกหรอทั้ง 3 ค่ามาทำพล็อตกราฟ natural log-log ของความเร็วในการตัดกับอายุการใช้งานของมีดตัด จะได้ผลของความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 : Natural log-log กราฟระหว่างความเร็วในการตัดกับอายุการใช้งานของมีดตัด<sup>[6]</sup>

ความสัมพันธ์นี้ได้ถูกค้นพบโดย Frederick W. Taylor ในช่วงทศวรรษที่ 1900 โดยแสดงความสัมพันธ์นี้ออกมาในรูปแบบสมการ ซึ่งต่อมาถูกเรียกว่าสมการอายุการใช้งานของเทย์เลอร์ ดังสมการที่ 2-24

$$v \times T^n = C \quad (2-24)$$

โดยที่ v (Cutting Speed) = ความเร็วในการตัด (เมตร/นาที หรือ ฟุต/นาที)  
 T (Tool life) = อายุการใช้งานของมีดตัด (นาที)  
 n = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุของมีดตัด  
 C = ค่าที่ขึ้นอยู่กับวัสดุของมีดตัด, วัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขของการตัด

### 2.1.7 การประมวลผลสัญญาณเครื่องมือวัด (Signal Analysis)

ในปัจจุบันเทคนิคการวินิจฉัยสภาพและความเสียหายของเครื่องจักรต่างๆ ในขณะทำงาน โดยอาศัยข้อมูลการสั่นสะเทือน กำลังเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยที่บ่งบอกถึงความสำเร็จของงานด้านนี้ หลักๆ ประกอบด้วย การเลือกเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น ซอฟต์แวร์ต่างๆ การเลือกเครื่องมือวัด และ หัววัดให้ถูกต้อง การกำหนดจุดวัดที่เหมาะสม รวมถึงการกำหนดคุณสมบัติการทำงานให้กับเครื่องมือวัดหรือที่เรียกกันทั่วไปว่าพารามิเตอร์ สิ่งต่างๆ เหล่านี้จำเป็นต้องได้รับการวางแผนและกำหนดอย่างเหมาะสม ก่อนการปฏิบัติงาน ซึ่งจะช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถวิเคราะห์

ได้สะดวกขึ้น ทั้งนี้ผู้วิเคราะห์ เองก็ต้องอาศัยความรู้ ประสบการณ์ ความเข้าใจและข้อมูลต่างๆ ของเครื่องจักร เช่นสภาวะโหลด ประเภทของโหลดและอื่นๆ

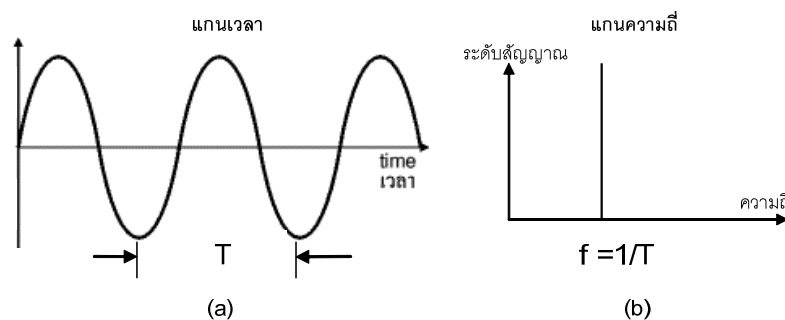
### 2.1.7.1 เทคนิคการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว

(Fast Fourier Transform, FFT Analyzer)<sup>[17]</sup>

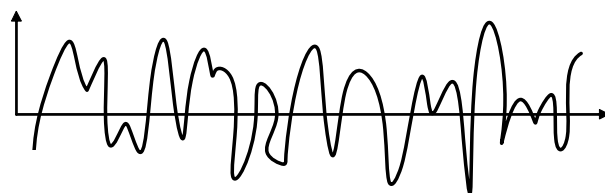
จากความก้าวหน้าทางเทคนิคในการประมวลผลสัญญาณ (signal processing) ทำให้ปัจจุบันเราสามารถบันทึกสัญญาณได้ขณะตัดชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยนำความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแกนอ้างอิงเทียบทางความถี่กับการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการประมวลผลสัญญาณของเครื่องมือวัดทางความสั่นสะเทือนสมัยใหม่นี้ คือเป็นเครื่องวิเคราะห์แบบการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT Analyzer) ซึ่งมีการพัฒนามาจากรากฐานของอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) ซึ่งจะได้กล่าวเน้นความหมายทางกายภาพของอนุกรมนี้ เพื่อเป็นพื้นฐานสำคัญในการใช้เครื่องมือวัดได้อย่างถูกต้องต่อไป

ถ้าพิจารณาแกนอ้างอิงเทียบทางเวลาของสัญญาณไซน์ (Sine wave) เราอาจจะคุ้นเคยรูปลักษณะของมันได้อย่างดีดังในรูปที่ 2.29 (a) โดยจะเห็นได้ว่าสัญญาณนี้จะมีการเกิดซ้ำรูปแบบเมื่อเวลาผ่านไป  $T$  ซึ่งเรียกว่าคาบของสัญญาณ ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ (การแกว่งขึ้นลงครบรอบ) ของคลื่นนี้คือ  $f = 1/T$  คือจำนวนของคาบคลื่นใน 1 วินาที ซึ่งความถี่  $f$  นี้สามารถถูกพลอตในกราฟแกนอ้างอิงเทียบความถี่ดังในรูปที่ 2.29 (b) แต่ในความเป็นจริงสัญญาณที่วัดจริงนั้นมักไม่ได้มีเพียงรูปคลื่นไซน์ความถี่เดียวนี้ แต่อาจเป็นรูปคลื่นใดๆก็ได้ เช่น สัญญาณรบกวนในรูปที่ 2.30

สัญญาณไซน์



รูปที่ 2.29 : สัญญาณคลื่นไซน์แสดงเทียบในแกนเวลาและแกนความถี่ของสัญญาณเดียวกัน<sup>[17]</sup>

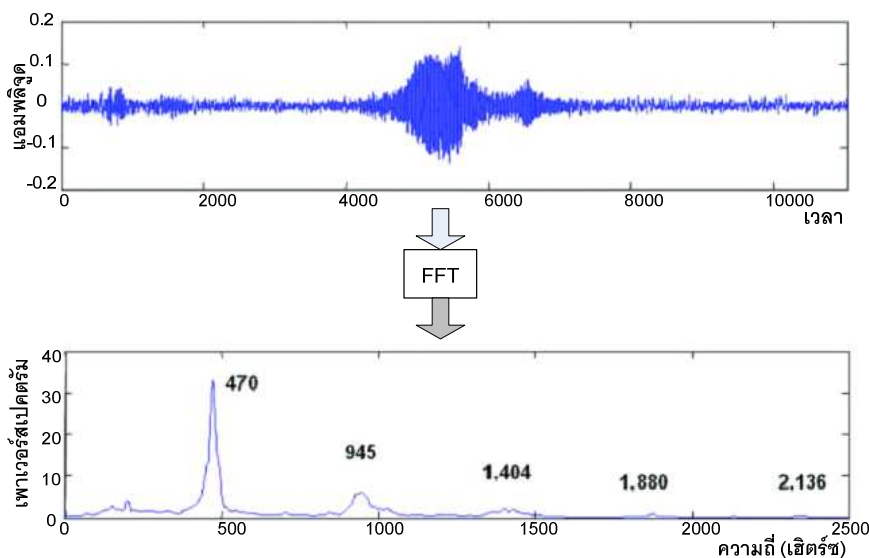


รูปที่ 2.30 : สัญญาณแบบแรนดอมที่ไม่มีรูปแบบแน่นอนตายตัว<sup>[17]</sup>



ดังนั้นเราจะหาวิธีการอย่างไรในการพิจารณาสัญญาณที่ซับซ้อนเช่นนี้ให้สามารถที่จะถูกเขียนอธิบายด้วยคณิตศาสตร์ได้ แต่ปัจจุบันเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณจะใช้วิธีการนำ สัญญาณที่วัดได้มาคำนวณแบบดิจิทัลแล้วแสดงองค์ประกอบทางความถี่หรือสเปกตรัมของสัญญาณออกมา ซึ่งใช้หลักการการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว(FFT) นั่นเอง ซึ่งอาศัยเพียงหน่วยประมวลผล CPU และหน่วยความจำ Memory ของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณเท่านั้น ซึ่ง FFT นี้เองที่ถูกใช้เป็น “ปริซึม” เพื่อแยกองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณออกมา

การวิเคราะห์สัญญาณ เป็นสิ่งสำคัญในการประมวลผลของสัญญาณนั้น ซึ่งถ้ารู้ถึงองค์ประกอบต่างๆของสัญญาณว่าส่วนไหนสำคัญ ส่วนไหนสามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก ก็สามารถที่จะประมวลผลสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ดังรูปที่ 2.31 และสมการที่ 2-25<sup>[18]</sup> โดยที่  $f(t)$  คือสัญญาณใดๆ



รูปที่ 2.31 : แสดงการแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปยังโดเมนความถี่<sup>[19]</sup>

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi fjt} dt \tag{2-25}$$

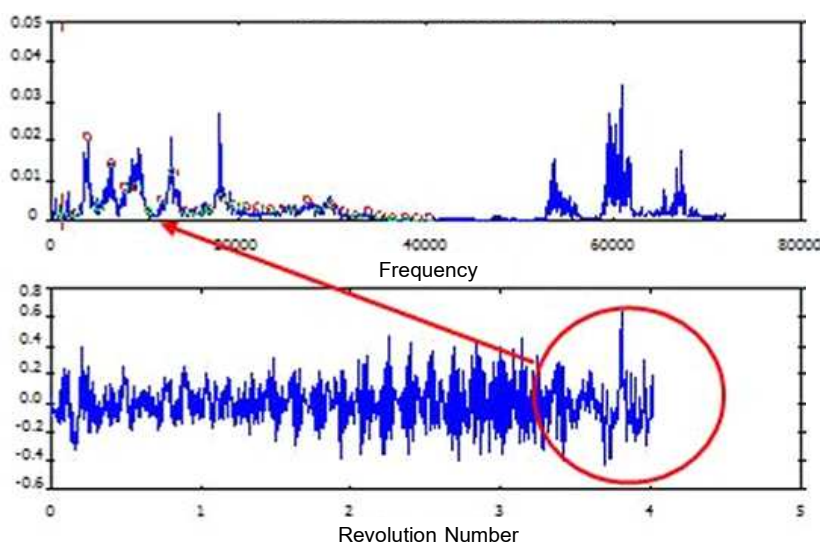
ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆนั้น บางครั้งการพิจารณาที่โดเมนเวลาของสัญญาณอย่างเดียวอาจไม่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอต่อการวิเคราะห์ได้ การเปลี่ยนมุมมองของสัญญาณสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น ซึ่งการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) เป็นตัวอย่างหนึ่งของการเปลี่ยนมุมมองนี้ โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่นั้น ใช้หลักการที่ว่าสัญญาณบางประเภทสามารถสังเคราะห์ได้จากผลรวมของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) ที่ความถี่และขนาดต่างๆได้ เมื่อรู้เกี่ยวกับความถี่และขนาดของฟังก์ชันไซน์ที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ หรือที่เรียกว่าสเปกตรัมของความถี่ (Frequency Spectrum) ของ

สัญญาณนั้น โดยจะทำให้รู้ถึงการกระจายกำลังของสัญญาณในความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สัญญาณนั้นๆ เพราะจะทำให้รู้ว่ากำลังของสัญญาณนั้นอยู่ในย่านไหนของสเปกตรัมของความถี่ และส่วนไหนที่สำคัญหรือไม่สำคัญ

### 2.1.7.2 เทคนิคผลกระทบจากการแปรปรวนของสัญญาณ<sup>[19]</sup>

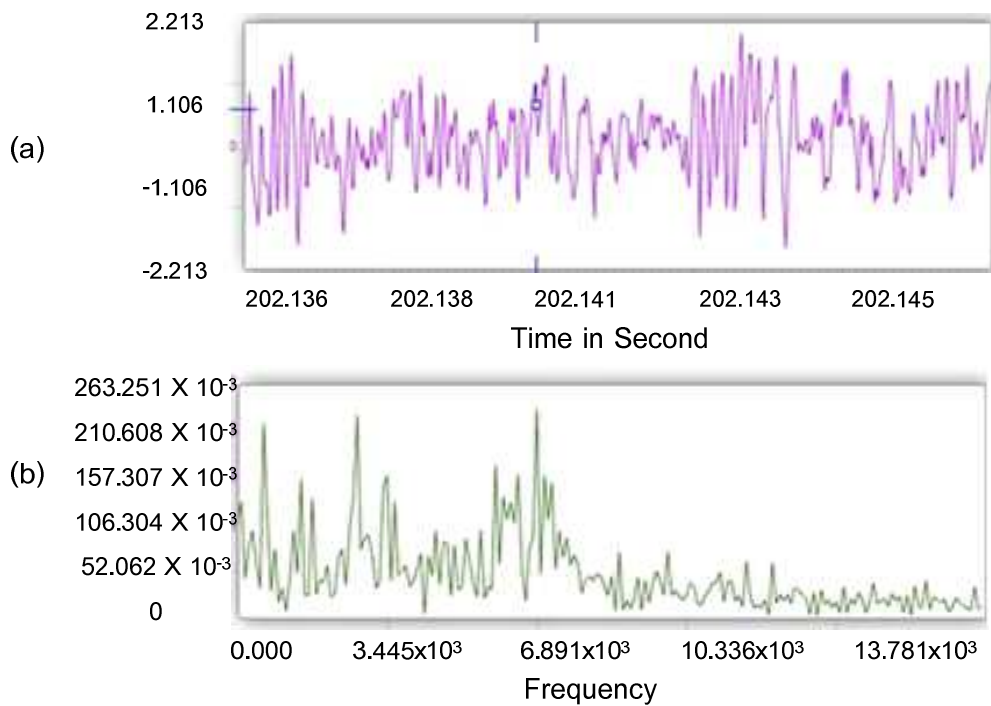
นอกจากนี้ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ และส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการวัด นั่นคือการแปรปรวนของสัญญาณที่วัดที่มีลักษณะไม่เป็นรายคาบ(Random noise) และสัญญาณที่มีขนาดแอมพลิจูดสูงช่วงสั้นๆ หรืออิมพัลส์ (impulse) ซึ่งการวินิจฉัยความถี่ของสัญญาณดังกล่าวด้วยเทคนิค FFT (Fast Fourier Transform) นั้นทำได้ยาก จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากรูปคลื่นสัญญาณประกอบการวินิจฉัยด้วย

ในการวัดสัญญาณสั่นสะเทือน เริ่มต้นตั้งแต่ analyzer สุ่มสัญญาณที่รับมาจากหัววัดสั่นสะเทือนจนถึงสิ้นสุดการสุ่ม โดยมีตัวอย่างของสัญญาณสั่นสะเทือนที่ถูกสุ่ม (samples) ตามที่กำหนด บางครั้งในช่วงระหว่างการบันทึกข้อมูล อาจเกิดการแปรปรวนของแรงสั่นสะเทือนภายนอกอย่างฉับพลัน เช่นจากกระบวนการผลิตของเครื่องจักรเอง การเปลี่ยนโหลดกระทันหัน หรือจากส่วนต่างของเครื่องจักรเอง เช่นเกียร์หรือแบร็ง ที่มีลักษณะการเกิดขึ้นและส่งแรงกระแทกออกมาในช่วงสั้น (impulse) หรือการเสียดสี (random noise) ในกรณีที่แรงกระแทกที่เกิดขึ้น มีขนาดความรุนแรงมากกว่าระดับสัญญาณโดยเฉลี่ยของสัญญาณ ผลจากการแปลง FFT จะเห็นแอมพลิจูดของความถี่หลายๆความถี่ที่ต่อเนื่องกันเป็นช่วงกว้างหรือที่เรียกว่า broad band frequency ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.32 เป็นสัญญาณสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรประเภท Agitator ที่จะมีแรงกระแทกช่วงสั้นๆจากการทำงานของเครื่องจักรเอง



รูปที่ 2.32 : การเกิด random impact ใน waveform และผลการแปลงความถี่ในแถบความถี่<sup>[19]</sup>

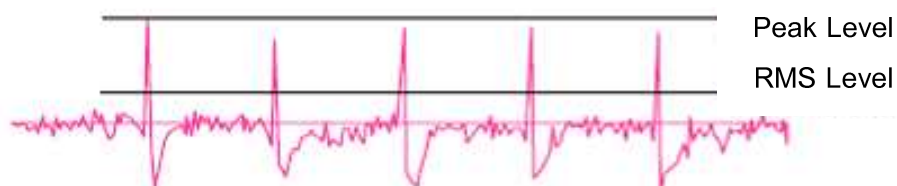
จากที่กล่าวข้างต้นถึงเทคนิคในการแยกหรือพิจารณาองค์ประกอบความถี่ต่างๆ จากสัญญาณ สิ่งหนึ่งที่ส่งผลต่อองค์ประกอบทางความถี่ที่พล็อตออกมาจากการแปลง fft ก็คือการแปรปรวนของสัญญาณที่วัด ในลักษณะไม่เป็นรายคาบ (random) หรือเกิดขึ้นช่วงสั้นๆ (impulse) เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้น ให้ลองพิจารณาสัญญาณในรูปที่ 2.33 ประกอบทำให้ทราบว่าผลของสัญญาณต่างชนิดกันคือ impulse และ random noise ต่างก็ให้ผลการแยกความถี่ในแถบความถี่ในลักษณะ broad band frequency เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันที่ลักษณะของสัญญาณอินพุต บางครั้งเป็นสิ่งที่ยากที่จะตีความหมายของแถบความถี่ที่เห็น รวมถึงการเกิดขึ้นของสัญญาณดังกล่าว



รูปที่ 2.33: การเกิด Impact แบบ random noise ใน waveform<sup>[19]</sup>

(a) สัญญาณในโดเมนเวลา (b) สัญญาณในโดเมนความถี่

แพ็คเกจหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้พิจารณาการแปรปรวนของสัญญาณสั้นๆ เช่นคือ Crest Factor โดย crest factor คืออัตราส่วนของระดับสูงสุดของสัญญาณ (Peak) ต่อค่าเฉลี่ย (RMS) ของสัญญาณ จากรูปที่ 2.34 ค่า crest factor นี้ใช้บ่งบอกว่ามีขนาดของแรงกระแทก (impact) เกิดขึ้นในสัญญาณมากน้อยเพียงใด



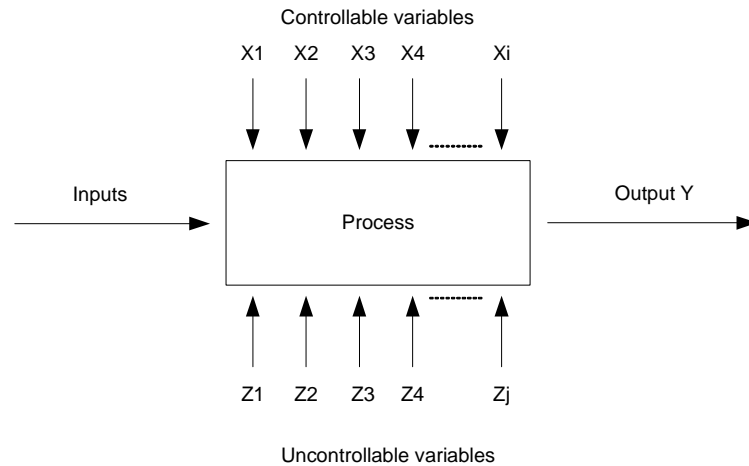
### รูปที่ 2.34: ภาพนิยามการหา Crest factor<sup>[19]</sup>

ในกรณีที่เกิดจากการแยกความถี่ทำไม่ได้ชัดเจน อันเนื่องมาจากความผันผวนหรือแรงกระแทก (Impact) ที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่วัด เราอาจต้องพิจารณาถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นของความถี่นั้น การพิจารณาจากแถบความถี่ที่มีความถี่ต่างๆจำนวนมากปะปนอยู่ในสัญญาณ ทำให้ยากที่จะวินิจฉัย การพิจารณาจาก crest factor ของ สัญญาณ นับเป็นสิ่งที่ทำได้ง่ายและช่วยให้การวินิจฉัยสะดวกยิ่งขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบทั้งหลายเมื่อนำมาเทียบกับค่าเฉลี่ย จะแสดงบทบาทเด่นกว่าสัญญาณที่เป็นรายคาบที่ทำให้ค่าอัตราส่วนที่หารกันนั้นมีค่าสูงขึ้น

#### 2.1.8 การออกแบบการทดลอง

การนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนทดลองเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง และให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูล ยิ่งถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก<sup>[20][21]</sup> ดังนั้นจึงเกิดคำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ โดยหลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เพลลิเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดให้ว่า

การออกแบบการทดลองเป็นการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable variables or factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้<sup>[21]</sup> เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or noise variables or factors) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 : ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป <sup>[21]</sup>

การควบคุมตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบของแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักแล้ว ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวนมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น แหล่งที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ดังนั้นในภาพรวมของการออกแบบการทดลองจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการ ในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ <sup>[14]</sup> ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลองจึงเกี่ยวข้องกับ

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

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

### 2.1.8.1 แนวทางการดำเนินโครงการตามวิธีการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่าเรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้<sup>[20]</sup>

1. การทำความเข้าใจถึงปัญหา (Problem Recognition & Statement) บางคนอาจคิดว่าขั้นตอนนี้ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริงแล้วขั้นตอนนี้ไม่ได้ง่ายอย่างที่คิด ในขั้นตอนนี้เราจะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรมแผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้าและแผนกบุคคล ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรจะมีการทำงานเป็นทีม

2. การเลือกตัวแปรผลตอบ (Choice of Response) ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดสอบควรจะแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัวและมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

3. การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะเป็ขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

4. การทำการทดลอง (Performing the Experiment) เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตาม

แผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

5. การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต (Choice of Factors and Levels) ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรจะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรจะเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

6. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) เราควรจะนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือ ทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7. การสรุปและการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Conclusion and Confirmation Tasting) เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

### 2.1.8.2 การรู้จำรูปแบบทางสถิติ (Pattern Recognition)

การรู้จำรูปแบบ (Pattern Recognition) เป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยกระบวนการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกกลุ่ม การจัดกลุ่ม การรู้จำ (Classification, Clustering, Recognition) ศึกษาถึงความแนวคิดต่างๆ ให้คอมพิวเตอร์สามารถทำงานเหล่านี้ได้โดยใช้เหตุผลหรือคณิตศาสตร์เพื่อหารูปแบบ (Pattern) ซึ่งอาจได้แก่เซตของ การวัด, ข้อสังเกต, หรือคำอธิบายของวัตถุใดๆ โดยจะใช้ความรู้ด้านอื่นๆ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม, ทฤษฎีวิภันัย (Fuzzy Theory) มาช่วยในการวิเคราะห์ เป็นวิทยาการที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานทุกสาขา และเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับงานวิจัยในด้านปัญญาประดิษฐ์ หรือการสร้างฉลาดให้คอมพิวเตอร์ และสามารถประยุกต์ใช้ในสาขาอื่นได้อีกมาก

#### 2.1.8.2.1 รูปแบบการรู้จำ

1. การรู้จำรูปแบบทางสถิติ (Statistic Pattern Recognition) หรือ ทฤษฎีการตัดสินใจ (Decision Theory) โดยจะใช้พื้นฐานของทฤษฎีความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์
2. การรู้จำรูปแบบสังเคราะห์ (Syntactic Pattern Recognition) หรือ Structural Pattern Recognition (Linguistic Method) โดยจะใช้อัลกอริทึมอื่นๆมาวิเคราะห์

#### 2.1.8.2.2 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการการรู้จำ

1. การเก็บข้อมูล (Data Collection) ข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์สำหรับแต่ละงานจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และขอบเขตของงานที่ต้องการ
2. การประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น (Data Pre-Processing)
  - การสร้างและสกัดลักษณะเด่น (Feature Extraction) เป็นการนำข้อมูลดิบที่ได้มาจัดรูปแบบ ให้อยู่ในค่าหรือลักษณะที่เหมาะสม โดยลักษณะหรือคุณลักษณะนั้นจะเป็นเวกเตอร์ของคุณลักษณะของวัตถุ
    - สามารถปรับเปลี่ยนหรือคำนวณได้
    - สามารถนำไปจำแนกประเภทได้ดี
    - ยังคงมีคุณค่าของข้อมูลเดิมอยู่
  - การตัดส่วนที่เป็นค่าผิดพลาด (Outlier Removal)
    - สร้างระยะจุดเปลี่ยน (Threshold Distance) สำหรับข้อมูลที่เป็นค่าผิดพลาด
    - เลือกรหัสข้อมูลที่มีค่าไม่เกินสองหรือสามเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
  - การจัดการข้อมูลที่ขาดหาย (Missing Data)



สำหรับข้อมูลที่ขาดหายหรือไม่ครบ อันจะทำให้ไม่สามารถประมวลผลข้อมูลชุดนั้นได้ วิธีจัดการข้อมูลที่ขาดหายขึ้นอยู่กับความสำคัญของข้อมูลชุดนั้นต่อผลการจำแนก ตัวอย่างวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปเช่น

- การคัดเลือกลักษณะเด่น (Feature Selection)

เป็นส่วนการทำงานที่เลือกลักษณะเด่นที่ได้จากการสร้างและสกัดลักษณะเด่น เพื่อหาลักษณะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละงาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการหาจำนวนลักษณะที่น้อยที่สุดเพื่อให้ความซับซ้อนของการคำนวณน้อย แต่ให้ผลการจำแนกประเภทข้อมูลได้ผลดีที่สุด โดยวิธีที่เลือกใช้เพื่อเปรียบเทียบผลของค่า

- ค่าระยะห่าง (Distance) ของข้อมูลระหว่างสองคลาส

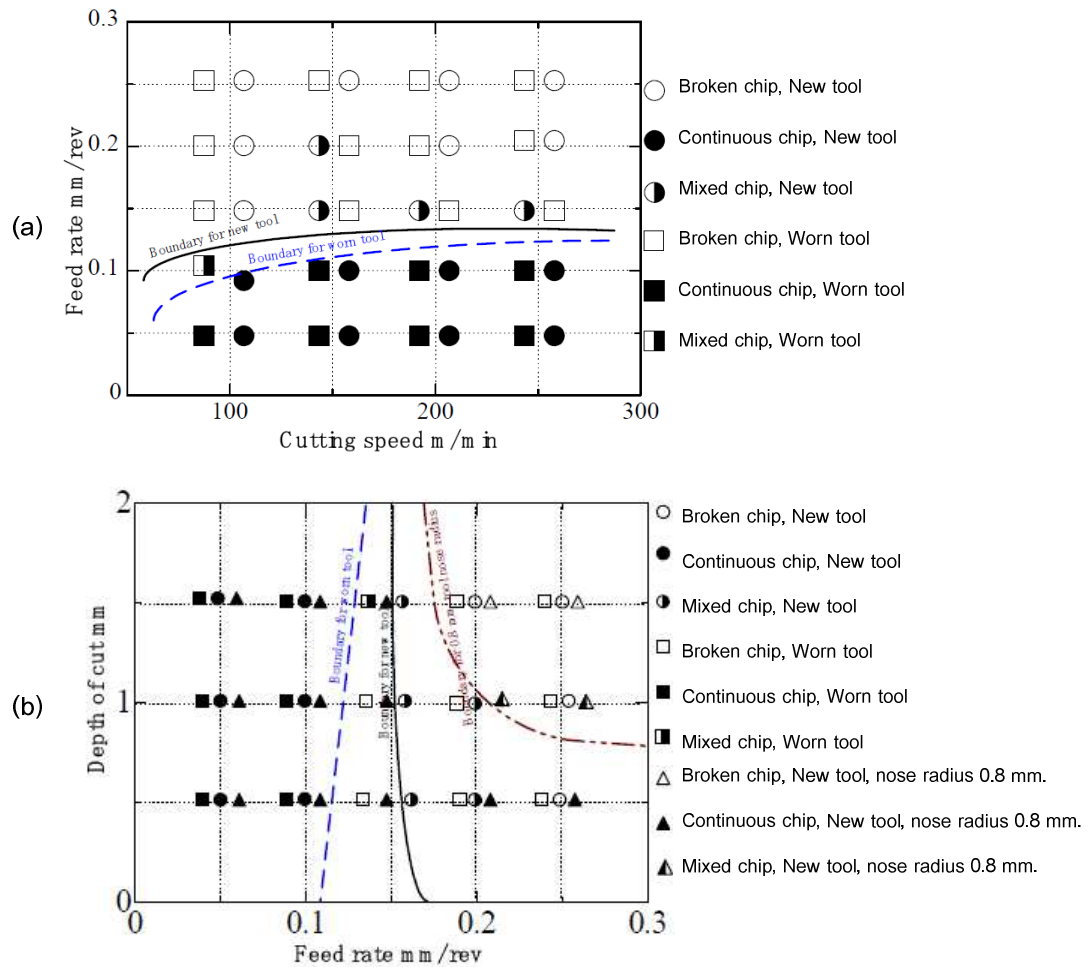
การเลือกคุณสมบัติ โดยใช้ค่าระยะห่างระหว่างสองคลาสนั้น การหาค่าระยะห่างสามารถหาได้หลายวิธี และวิธีที่งานวิจัยนี้เลือกมาใช้คือการหาผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำเป็นค่ามาตรฐานแล้วจะได้ค่าคุณลักษณะของทั้งสองคลาสอยู่บนฐานของข้อมูลชุดเดียวกัน ซึ่งจะเรียกว่า *ค่าระยะห่างสัมพัทธ์ของค่าเฉลี่ย* โดยมีวิธีการดังนี้

- a. จากข้อมูลที่ผ่านการเปลี่ยนเป็นค่ามาตรฐาน
- b. นำค่าของแต่ละคุณลักษณะมาหาค่าความแตกต่าง
- c. นำค่าแตกต่างที่ได้นำมาเทียบ (หาร) กับค่าของคลาสที่เป็น “Non-Fault”
- d. เลือกคุณลักษณะที่มีค่าเริ่มจากค่าน้อยที่สุด เพื่อหาจำนวนคุณลักษณะที่เหมาะสม

3. การจำแนกประเภทข้อมูล (Classification) แต่ละขั้นตอนจะมีวิธีการที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับงานที่นำไปประยุกต์ใช้ ว่าวิธีการใด จะเหมาะสม และให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สำหรับการ Train model ขั้นนี้จะเป็นการนำ feature ของ training data ต่างๆที่ได้จากขั้นแรกมาสร้างเป็น model ไว้สำหรับเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงส่วนการ recognize จะเป็นการนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับ model ที่มีอยู่ แต่ขั้นตอนปลีกย่อยจะแตกต่างกันไปสำหรับ recognizer แต่ละตัว

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Somkiat Tangjitsitcharoen <sup>[4]</sup> ได้กล่าวถึงการตรวจสอบและระบุสถานะการตัดในงานกลึง เพื่อความเชื่อมั่นในเครื่องจักรอัจฉริยะ มีการพัฒนาวิธีการวัดแรงตัดพลวัตและการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นพาเวอริสเปกตรัม (Power Spectrum Density, PSD) โดยแสดงอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่างๆ ที่มีผลต่อรูปร่างของเศษโลหะดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 : แสดงอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะ

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนตัดและความลึกตัด

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบตัดและอัตราป้อนตัด

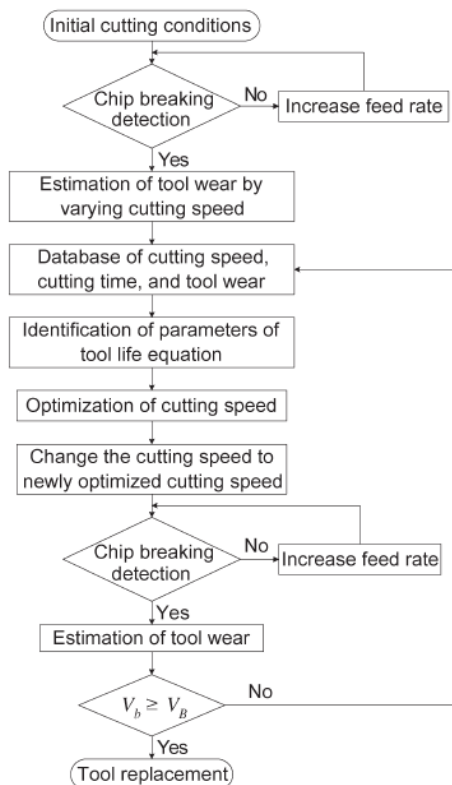
จากผลการทดลองพบว่าแรงป้อนตัดพลวัตและความหนาแน่นพาเวอริสเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตสามารถตรวจจับการเกิดเศษโลหะแบบแตกเป็นชิ้นเล็กๆ โดยการอ้างถึงอัตราส่วนของความหนาแน่นพาเวอริสเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตในช่วงความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะต่อช่วงความถี่ทั้งหมด

Somkiat Tangjitsitcharoen, Moriwaki T.<sup>[22]</sup> ได้พัฒนาวิธีการตรวจจับสถานะการตัดโดยการใช้นิยามการรู้จำ สำหรับกระบวนการกลึงด้วยเครื่องซีเอ็นซีด้วยข้อมูลเวลาการตัดน้อยๆของแรงตัดพลวัต เพื่อจำแนกสถานะการตัดออกเป็น เศษโลหะแตกหัก, เศษโลหะแบบต่อเนื่อง และการเกิดขีดเตอร์ ซึ่งในวิธีการจะใช้ตัวแปร 3 ตัวที่คำนวณได้จากค่าอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนของแรงตัดพลวัตทั้ง 3 แรง (แรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี) ที่ถูกวัดระหว่างการตัดด้วยไดนาโมมิเตอร์ และหาค่าที่เหมาะสมโดยกำหนดได้จากพื้นที่อ้างอิงที่ได้จากการทดลองเพื่อเป็นเกณฑ์ในการแบ่งแยกสถานะการตัด เช่น เศษโลหะแบบต่อเนื่อง, เศษโลหะแบบแตกหัก และขีดเตอร์ ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าในขณะที่เกิดเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดเล็ก แต่เมื่อเศษโลหะเป็นแบบแตกหักแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะแรงป้อนตัดพลวัต และเมื่อเกิดขีดเตอร์ขึ้นแรงตัดหลักพลวัตจะให้แอมพลิจูดขนาดใหญ่ที่สุดในช่วงแรงตัดพลวัตทั้งสาม โดยประโยชน์ที่ได้จากการพัฒนาระบบการตรวจติดตามและบ่งชี้สถานะการตัดในกระบวนการกลึง ก็คือสถานะการตัดสามารถถูกบ่งชี้ได้ง่ายในช่วงกระบวนการกลึงจริงโดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

Somkiat Tangjitsitcharoen<sup>[23]</sup> ได้พัฒนาระบบการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะเชิงปัญญาขึ้นเพื่อประกันความเชื่อมั่นของระบบปฏิบัติการตัดอัตโนมัติให้สูงขึ้นซึ่งการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะมีความสำคัญต่อระบบปฏิบัติการตัดอัตโนมัติอย่างมากในระหว่างกระบวนการตัดจริงโดยใช้ชิ้นงานเหล็กกล้า (JIS: S45C) เงื่อนไขการตัด และไดนาโมมิเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นและติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซี สำหรับใช้วัดแรงตัดในขณะที่ทำการกลึงชิ้นงานโดยสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัตที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์จะถูกขยายและผ่านเครื่องกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 500 เฮิรตซ์ ก่อนที่จะถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขและทำการแปลงอนุกรมฟูเรียร์(FFT transform) ในเครื่องคอมพิวเตอร์

Moriwaki T., Shibasaka T. and Somkiat T.<sup>[24]</sup> ได้พัฒนาระบบการตรวจติดตามและการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการกลึง โดยพัฒนาอัลกอริทึมให้สามารถตรวจจับการแตกหักเศษโลหะและการสึกหรอของมีดตัดในกระบวนการตัดสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีดังรูปที่ 2.37 โดยนำฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลแบบเลื่อนมาใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการตัดเฉพาะและอัตราการป้อนตัด ซึ่งค่าดัชนี  $a$  ในฟังก์ชันถูกกำหนดให้เป็นตัวชี้วัดขนาดของการสึกหรอของมีดตัด ทฤษฎีได้ถูกเสนอให้แทรกคำสั่งเพิ่มเติมในกระบวนการตัดจริงเมื่อต้องการตรวจสอบหาขนาดของการสึกหรอของมีดตัด โดยในคำสั่งเพิ่มเติมจะเปลี่ยนอัตราการป้อน

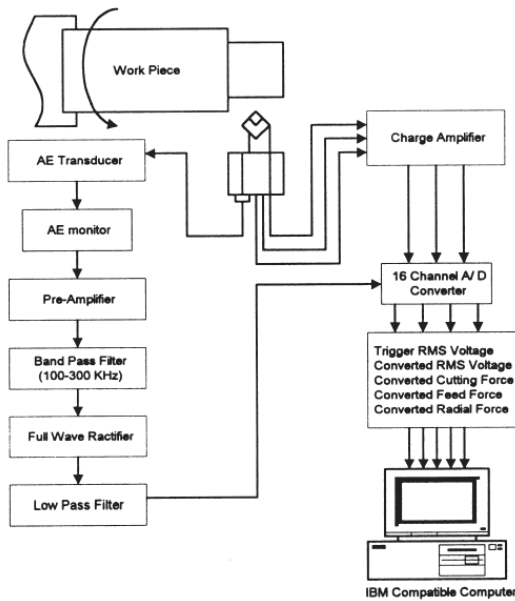
ตัดปัจจุบันในกระบวนการตัดปกติให้เป็นอัตราการป้อนตัดในขั้นขึ้นหรือขั้นลงที่อัตราการป้อนตัดต่ำๆอย่างตั้งใจเพื่อวัดแรงตัดโดยไดนาโมมิเตอร์ได้ถูกติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซีและระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการตัดเฉพาะ จากผลการทดลองการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการตัดจริงได้พิสูจน์ว่า ดัชนี  $a$  จากสมการ  $V_b = \frac{\ln a - \ln 1.06}{1.81}$  เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัดถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะแตกต่างกัน



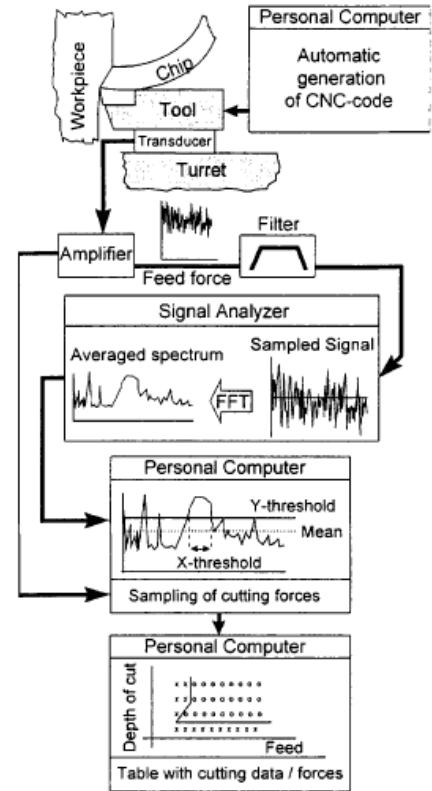
รูปที่ 2.37 : แสดงขั้นตอนการทำงานสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วตัด

โดยการตรวจติดตามความสึกหรอบนผิวหลังและการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะ

Chungchoo และ Saini<sup>[25]</sup> ให้ความสำคัญต่อความถูกต้องของการพยากรณ์ความสึกหรอของเครื่องมือและเพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนเครื่องมือโดยไม่จำเป็นบ่อยครั้ง จึงได้เสนอพารามิเตอร์ใหม่สองตัว คือ พลังงานทั้งหมดและเอนโทรปีทั้งหมดของสัญญาณแรงสำหรับการตรวจสอบสภาพเครื่องมือจาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานของสัญญาณแรงสามารถใช้ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ โดยการตรวจติดตามความสึกหรอบริเวณผิวหลังและบริเวณผิวหน้าในช่วงเงื่อนไขการตัดที่กว้าง อย่างไรก็ตามเอนโทรปีทั้งหมดของแรงไม่ได้มีความไวต่ออัตราการป้อน, มุมคาน และ การสึกหรอ การทดลองยังบอกอีกว่าการสึกหรอบนผิวหน้าทำให้มุมคานกว้างมากขึ้นส่งผลให้พลังงานทั้งหมดลดลง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอิทธิพลการสึกหรอบนผิวหน้าด้วยค่าเฉลี่ยรากกำลังสองของสัญญาณอะคูสติกตามรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 : แสดงแผนภาพระบบตรวจจับ



รูปที่ 2.39 : แสดงการติดตั้งการทดลอง การแตกหักเศษโลหะอัตโนมัติ

Andreasen และ Chiffre<sup>[26]</sup> ได้พัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะในกระบวนการกลึงเพื่อให้ในห้องปฏิบัติการโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถี่ของแรงพลวัตซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นให้ผลการทดลองดีมากทั้งในชิ้นงานเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม โดยสามารถตรวจจับเศษโลหะที่ไม่ได้รับการยอมรับได้มากถึง 98% ซึ่งอัลกอริทึมที่ได้จากการทดลองมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2.39

Fang และ Fei<sup>[27]</sup> ได้เสนอทฤษฎีสำหรับทำนายการแตกหักของเศษโลหะและขนาดรูปร่างของเศษโลหะที่เกิดขึ้นเพื่อใช้วางแผนกระบวนการตัด โดยเสนอวิธีพยากรณ์การแตกหักของเศษโลหะโดยใช้ขนาดของเศษโลหะ เนื่องจากการพัฒนาเป็นสมการเชิงตัวเลขนั้นทำได้ยากมาก เพราะมีปัจจัยหลายตัวเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น วัสดุของชิ้นงาน, รูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด, ตัวหักเศษ และเงื่อนไขการตัด งานวิจัยนี้ได้เสนอโมเดลการจำแนกขนาด, ลักษณะ และจำนวนของการแตกหักเศษโลหะโดยเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลและนำมาพยากรณ์ด้วยโมเดลฟuzzy เมื่อต้องใช้งานจริงเพื่อควบคุมการเกิดเศษตัดที่ตีขึ้น

Kim and Kweun <sup>[28]</sup> งานวิจัยนี้กล่าวว่าความน่าเชื่อถือได้ของกระบวนการกลึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมระบบอัตโนมัติสมัยใหม่ ในกรณีของกระบวนการกลึงในส่วนของเศษตัดมันยาวนั้นเป็นอุปสรรคสำคัญหลักในกระบวนการผลิต ความน่าเชื่อถือได้นี้แสดงถึงการควบคุมเศษตัดนี้จึงเป็นประเด็นสำคัญ การควบคุมเศษหักในกระบวนการกลึงนี้ยากในกรณี Mild Steel เพราะเศษตัดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการพัฒนาของอุปกรณ์หักเศษตัดสำหรับ Mild Steel จึงเป็นหัวข้อสำคัญในกระบวนการกลึง งานวิจัยนี้แสดงถึงรูปแบบของกระบวนการไหลของเศษตัดด้วยการใช้เม็ดเม็ดแบบมุมแตกต่างกันและนำไปสู่ตัวแปรลักษณะสำคัญในการควบคุมเศษตัดนี้ งานวิจัยนี้ได้มุ่งถึงการออกแบบอุปกรณ์หักเศษตัด Chip Breaker และทดลองการกลึงเหล็ก Mild steel ด้วยการใช้อุปกรณ์หักเศษตัดนี้ สำหรับ Mild Steel คำนี้ถึง ความเร็วในการตัด ความลึกตัด และอัตราการป้อน ถูกนำมาวิเคราะห์จากผลการทดลอง

Longbottom และ Lanham <sup>[29]</sup> ได้ทำการศึกษาวิธีวัดอุณหภูมิขณะตัดชิ้นงาน สามารถจำแนกวิธีการวัดอุณหภูมิได้ 2 แบบ คือ conduction methods และ radiation methods โดยจากการทบทวนพบว่า อินฟราเรด ไพโรมิเตอร์ หรือ เทอร์มอมิเตอร์ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยมากกว่าวิธีอื่นๆ โดยนำมาวัดรังสีความร้อนผ่านจุดตัดชิ้นงานโดยตรง หรือผ่านสายเคเบิลไฟเบอร์ออปติก โดยประโยชน์ของอินฟราเรดเซนเซอร์ คือไม่ต้องสัมผัสชิ้นงาน วัตถุประสงค์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งในที่แคบและชัน แต่อาจมีปัญหาจากการปลิวของเศษโลหะและการใช้สารหล่อเย็น หากเกิดปัญหานี้แนะนำให้ใช้ 2 color pyrometer

**สมชาติ** <sup>[5]</sup> สืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันโดยศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของมีดตัด ความเรียบผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาถึงค่าตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการตัด ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง แรงตัดและอุณหภูมิในการตัด ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจติดตามในกระบวนการตัดโดยไดนาโมมิเตอร์และPyrometer ซึ่งติดตั้งบนเครื่องซีเอ็นซีเพื่อใช้วัดแรงและอุณหภูมิในขณะตัด

**พรชัย, วราคม และ เทอดศักดิ์** <sup>[30]</sup> ได้ศึกษาเบื้องต้นถึงการจำลองการตรวจสอบสถานะของมีดด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน เพื่อใช้เป็นวิธีทำนายสถานะของมีดกลึงและความเสียหายที่เกิดขึ้นที่มีดกลึง อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย เครื่องกลึง หัววัดการสั่นสะเทือน หัววัดความเร็วรอบ ชุดขยายสัญญาณ ชุดเก็บข้อมูล คอมพิวเตอร์ และโปรแกรม LabVIEW วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ST-37 และมีดกลึงจะใช้เป็นมีดเล็บทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ สัญญาณ

การสั้นสะเทือนบนโดเมนเวลาที่บันทึกขณะเครื่องกำลังทำงานจะถูกวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติพบว่า ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และพลังงานของสัญญาณสามารถใช้ทำนายสถานะของมิดดัดได้ดีกว่าค่าความเบ้ ค่าความโค้ง และ Crest factor นอกจากนี้การใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั้นสะเทือนบนโดเมนความถี่สามารถใช้ทำนายสถานะของมิดดิ่งได้ด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยในกระบวนการกลึงส่วนใหญ่ จะเน้นการศึกษาสถานะการสึกหรอของมิดดัดและความเรียบผิวของชิ้นงานสำเร็จ โดยการสืบหาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัด(ซึ่งการตรวจติดตามความสัมพันธ์ข้างต้นได้นำเซนเซอร์เข้ามาช่วยในการตรวจรับ เช่น เซนเซอร์เสียง, เซนเซอร์อะคูสติก อิมัลชัน, เซนเซอร์แรงตัด เป็นต้น) ซึ่งเป็นเพียงการตรวจติดตามหลังกระบวนการตัด (post process) ซึ่งหากเกิดความเสียหายขณะทำการตัดจะไม่สามารถทราบได้ โดยนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้จากแต่ละเซนเซอร์ ซึ่งส่วนมากจะเป็นการใช้เซนเซอร์เพียงอย่างเดียว อาจทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำไม่มาก หากมีการรวมความสามารถที่แตกต่างกันของเซนเซอร์แต่ละชนิดจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ได้คุณภาพของกระบวนการตัดที่สูง การตรวจติดตามภายในกระบวนการตัด (In-Process) มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาคุณภาพการตัดได้อย่างทันถ่วงที เช่น แบบต่อเนื่องพันรอบชิ้นงานและมิดดัดส่งผลให้ชิ้นงานและมิดดัดได้รับความเสียหาย ดังนั้นการประยุกต์ใช้เซนเซอร์มากกว่า 1 ชนิดคือ เซนเซอร์วัดแรงตัด และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นการรวมเอาพารามิเตอร์ทางด้านแรงตัด3แกนมาใช้ร่วมกับพารามิเตอร์อุณหภูมิการตัด เพื่อควบคุมงานทางด้านกระบวนการกลึงให้มีคุณภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ในงานการควบคุมเศษตัดก็ยังมีเพียงการพยายามพัฒนาอุปกรณ์หักเศษซึ่งยังคงใช้ได้ไม่ได้นัก สำหรับวัสดุชิ้นงานบางประเภท เช่น Mild Steel

เนื่องจากการศึกษาการตรวจติดตามการหักของเศษโลหะที่ผ่านมา นั้น สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในโดเมนของเวลา และโดเมนความถี่ แต่ข้อเสียของการวิเคราะห์ในโดเมนของเวลานั้น หากเกิดแชตเตอร์ขึ้นจะไม่สามารถติดตามการแตกหักของเศษโลหะได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ โดยการใช้อัตราส่วนเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัด พร้อมทั้งนำพารามิเตอร์ด้านความร้อนของสัญญาณอุณหภูมิตัด มาช่วยวิเคราะห์การปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการตัดเมื่อกระบวนการตัดเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง(Continuous chip) ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ในการตรวจติดตามสถานะการกัดชิ้นงาน ในการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะ การใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิตัดช่วยเสริมการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณแรงตัดความถี่เป็นอย่างดี เนื่องจากขณะทำการตัดชิ้นงานเมื่อเกิดการเสีรูปร่างพลาสติกของเศษโลหะจะเกิดการถ่ายเท

ความร้อนที่เกิดออกไปกับเศษโลหะมากกว่า 80% นั้น แสดงให้เห็นว่าหากเศษโลหะเกิดการแตกหักและหลุดออกไปก็จะสามารถถ่ายเทความร้อนออกไปด้วย ทำให้ทราบรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น

การตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะที่เกิดขึ้น ส่วนมากจะเป็นการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ซึ่งการใช้ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัดสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนสัญญาณอุณหภูมินั้นยังไม่มีการนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจจับเศษโลหะ เป็นเพียงการนำเสนอวิธีการและบริเวณในการวัดความร้อนขณะทำการตัดกลึงชิ้นงาน นอกจากนี้มีการวิเคราะห์รูปแบบของคลื่นสัญญาณความร้อนบนโดเมนเวลาเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงเป็นครั้งแรกที่จะมีการนำสัญญาณอุณหภูมิตัดมาวิเคราะห์รูปแบบการแตกหักของเศษโลหะโดยอาศัยความแปรปรวนของอุณหภูมิตัดบนโดเมนเวลา

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา วิธีการรวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ถูกนำเสนอ จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาในงานวิจัยนี้ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 เซนเซอร์ กับการแตกหักของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือการพัฒนากระบวนการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะโดยใช้สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ เพื่อป้องกันรูปแบบของเศษโลหะขณะตัด ดังนั้นในการทดลองจะต้องทำการแปรผันปัจจัยต่างๆเพื่อให้เกิดสถานะของการกลิ้งที่แตกต่างกันและนำมาใช้ในการจำแนกรูปการเกิดเศษโลหะขณะทำการกลิ้งขึ้นงาน

##### 3.1.1 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ในกระบวนการกลิ้งนั้นมีเงื่อนไขของการตัดที่ส่งผลต่อรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น คือ ความเร็วตัด, ความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด จากการออกแบบเงื่อนไขการตัดได้แบ่งปัจจัยการตัดออกเป็น 2 แบบ คือเงื่อนไขการตัดที่ก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) และ เศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip)

1.) ความเร็วตัด

- 150, 250, 350 เมตร/นาที

2.) อัตราป้อนตัด

- 0.10, 0.125, 0.15, 0.175, 0.20 มิลลิเมตร/รอบ

3.) ความลึกตัด

- 0.50, 0.75, 1.00 มิลลิเมตร

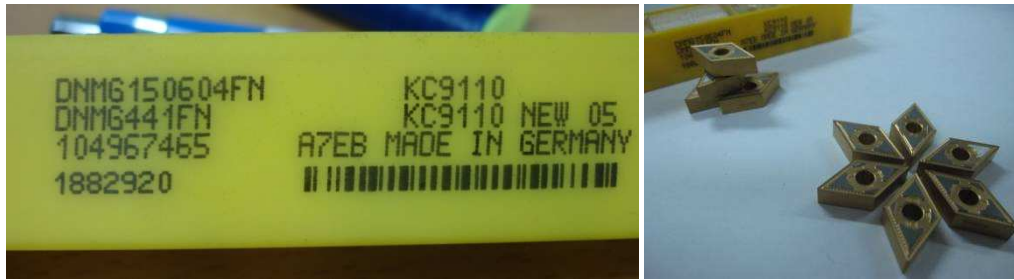
#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.) วัสดุขึ้นงานในการกลิ้งเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 : เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

- 2). เม็ดมีดตัด (Insert) ที่ใช้เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว ยี่ห้อ KENNAMETAL เบอร์ DNMG441FNKC9110 เป็นมีดกลึงสำหรับกลึงละเอียด



รูปที่ 3.2 : เม็ดมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง

- 3). ด้ามมีดตัด (Tool Holder) ยี่ห้อ KENNAMETAL เบอร์ PDJNR2525M15



รูปที่ 3.3 : ด้ามมีดที่ใช้ในการทดลอง

- 4). เครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY



รูปที่ 3.4 : เครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน

5). เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะขณะกลึง

- เซนเซอร์วัดแรงตัดพลวัต (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9720



รูปที่ 3.5 : เซนเซอร์วัดแรงตัดพลวัต

- เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Pyrometer) ยี่ห้อ RAYTEK รุ่น RAYFA2BCF13)



รูปที่ 3.6 : เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

6). ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ของ Kister สำหรับขยายสัญญาณแรงตัดและ  
ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA สำหรับแสดงสัญญาณแรงตัด



(a)



(b)

รูปที่ 3.7 : (a) ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ และ (b) ออสซิลโลสโคป

- 7). ไฟฉายของ Mag-Lite (Mag-Lite Flashlight) สำหรับปรับตั้งระยะโฟกัสของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เนื่องจากจุดโฟกัสมีขนาดเพียง 3 มิลลิเมตร จึงต้องใช้ไฟฉายช่วยในการชี้เป้าจุดโฟกัส



รูปที่ 3.8 : ไฟฉาย สำหรับปรับตั้งระยะโฟกัส

- 8). ดิจิตอล ไมโครสโคป (Digital Microscope) ยี่ห้อ KEYENCE รุ่น VHX-600



รูปที่ 3.9 : เครื่องไมโครสโคปสำหรับตรวจสอบสภาพความสึกหรอมัดตัด

### 3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

การทดลองเพื่อหาสถานะของสัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิที่จะบ่งชี้รูปแบบของเศษโลหะ คือการหาเงื่อนไขการตัดที่จะก่อให้เกิดรูปแบบเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip) และเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) ในขั้นต้นแล้วจึงนำสัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิจากเงื่อนไขการตัดที่ก่อให้เกิดเศษโลหะทั้ง 2 แบบมาวิเคราะห์หาจุดควบคุมที่จะไม่ก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) ขณะกำลังขึ้นงาน ซึ่งผู้ทำการวิจัยได้กำหนดว่าหากเกิดเศษโลหะเป็นแบบ Ribbon chips, tangled chips และ Corkscrew chips ให้จัดเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) โดยการกำลังขึ้นงานในงานวิจัยนี้จะใช้เม็ดมีดใหม่ (New tool) เนื่องจากเม็ดมีดใหม่นั้นจะก่อให้เกิดเศษโลหะในรูปแบบต่อเนื่องได้ง่ายกว่าเม็ดมีดที่สึกหรอ เพราะเมื่อใช้ไประยะหนึ่งเม็ดมีดเกิดการสึกหรอจะทำให้เกิดมุมคายมากขึ้น ทำให้เศษโลหะสามารถไหลออกและแตกหักเป็นชิ้นเล็กได้ ทั้งนี้เพื่อประสิทธิภาพในการหาค่าจุดควบคุม

#### 3.3.1 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

- 1). เตรียมชิ้นงาน (Workpiece) นำเหล็กท่อน (Ingot) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ยึดจับด้วยปากจับ (Chuck) ยันศูนย์ชิ้นงานแล้วทำการปอกผิววนอกที่มีความแข็งกว่าปกติทิ้งไป
- 2). ติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงตัด (Dynamometer) และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Pyrometer) (ภาคผนวก ฉ)

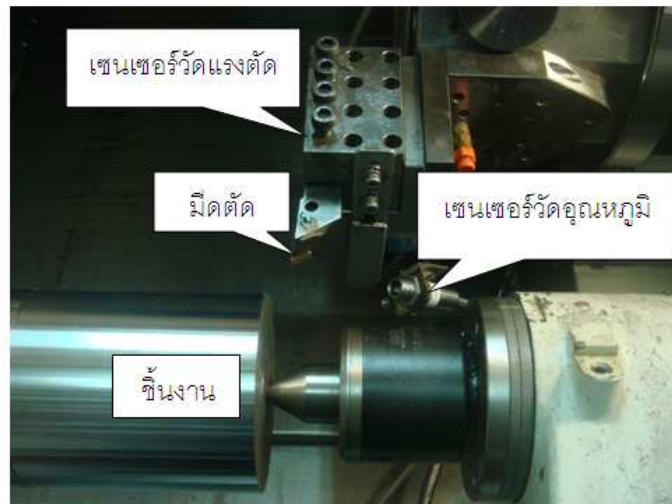
##### 2.1 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงตัด

- ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง (Dynamometer) เข้ากับชุดป้อนมีด (Turret) ของเครื่องกลึง
- เชื่อมต่อสายเซนเซอร์วัดแรงตัดเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณ จากนั้นต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้าเครื่องออสซิลอโคป (Oscilloscope)
- ติดตั้งเม็ดมีดเข้ากับด้ามมีดแล้วนำไปจับยึดเข้ากับชุดจับยึดที่ออกแบบมาเพื่อติดตั้งกับเซนเซอร์วัดแรงตัด
- การปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลอโคป ให้ใช้ค่ากรองความถี่ย่านสัญญาณต่ำ (Low-Pass Filter) ที่ 5,000 เฮิรท์ และอัตราการเก็บข้อมูล (Sampling Rate) ที่ 10,000 ค่าต่อวินาที โดยบันทึกข้อมูล (Record Length) เป็นเวลา 10 วินาที

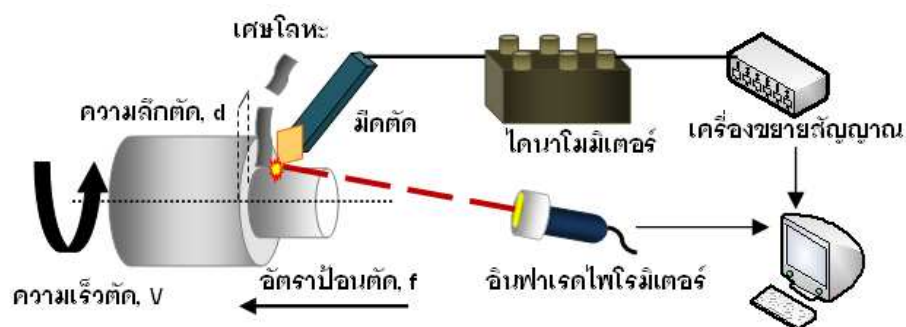
## 2.2 การติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

- ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Pyrometer) ยึดด้วยน็อตหกเหลี่ยมเข้ากับชุดจับยึดของไดนาโมมิเตอร์ที่ได้ติดตั้งอยู่ก่อนหน้านี้

ทำการการปรับตั้งระยะโฟกัสของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ซึ่งมีระยะเซนเซอร์ถึงจุดโฟกัส 102 มิลลิเมตร โดยใช้หลอดไฟฉายของ Mag-Lite ซึ่งมีความเข้มของแสงที่สูงในการปรับตั้งระยะวัดอุณหภูมิ ซึ่งขนาดของโฟกัส (Focused Spot Size) มีขนาดเล็กมาก เพียง 3 มิลลิเมตร ที่ระยะคงที่ 102 มิลลิเมตร (Fixed Focus) การปรับตั้งระยะแต่ละครั้งค่อนข้างจะต้องใช้ความละเอียดของผู้ใช้งานเป็นหลัก อัตราการเก็บข้อมูล (Sampling Rate) ที่ 100 ค่าต่อวินาที โดยบันทึกข้อมูล (Record Length) เป็นเวลา 10 วินาที



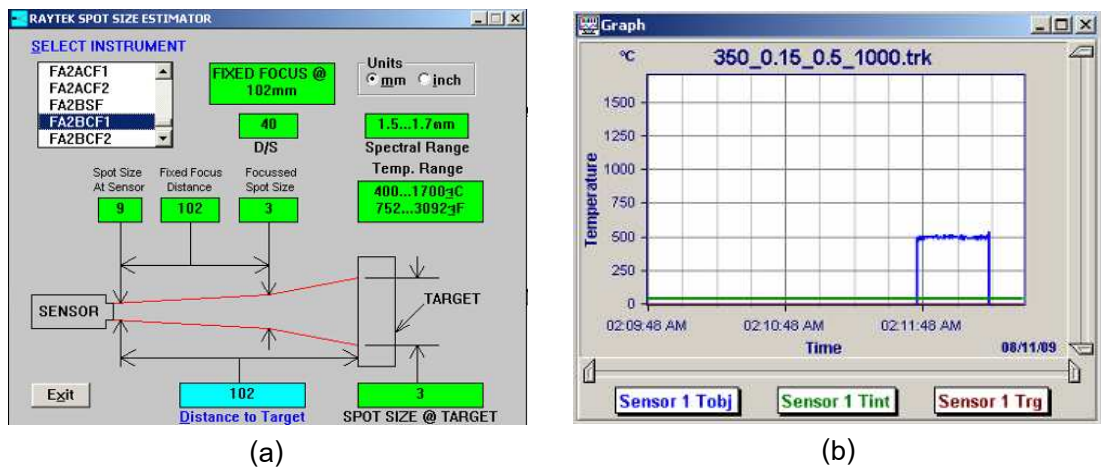
รูปที่ 3.10 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงตัดและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.11 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับการดำเนินการทดลอง

3). เมื่อขึ้นชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจึงทำการเขียนโปรแกรมลงบนเครื่องกล้องซีเอ็นซี เพื่อตัดชิ้นงานให้โดยพิจารณาตามเงื่อนไขการตัดในแต่ละครั้ง

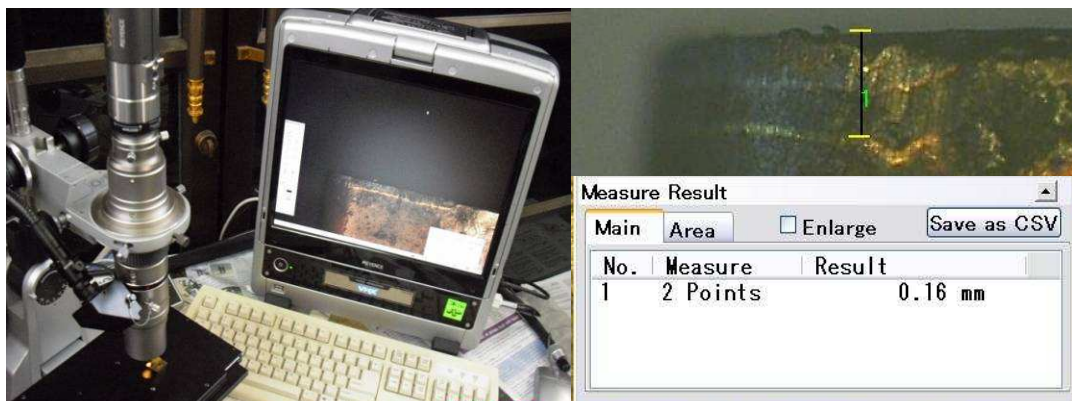
4). ทำการกริ่งปอกผิวด้วยเงื่อนไขการตัดตามหัวข้อ 3.1.1 โดยจะทำการบันทึกสัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ พร้อมทั้งกับการกริ่งปอก โดยสัญญาณแรงตัดจะถูกบันทึกไว้ด้วยออสซิลอสโคป ส่วนสัญญาณอุณหภูมิจะใช้โปรแกรม Data Temp Multidrop ในการดึงสัญญาณมาเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.11 โดยจะเริ่มบันทึกสัญญาณหลักการเริ่มตัด 10 วินาที เพื่อให้สัญญาณแรงตัดเป็นสัญญาณขณะตัดที่แท้จริงและจากการศึกษางานวิจัยพบว่าความร้อนขณะตัดจะคงที่เมื่อผ่านการตัดไปแล้วอย่างน้อย 5 วินาที



รูปที่ 3.12 : แสดงหน้าจอโปรแกรม Data Temp Multidrop

(a) แสดงการปรับตั้งระยะโฟกัส (b) แสดงผลการวัดอุณหภูมิขณะตัด

5). เมื่อกลึงชิ้นงานไประยะหนึ่ง จึงนำมิดตัดมาตรวจความสึกหรอตามรูปที่ 3.12 หากเกิดการสึกหรอแบบ Flank wear มากกว่า 0.07 มิลลิเมตร ให้ถือว่ามิดตัดสึกหรอจะทำการเปลี่ยนมิดตัดและทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดต่อไป

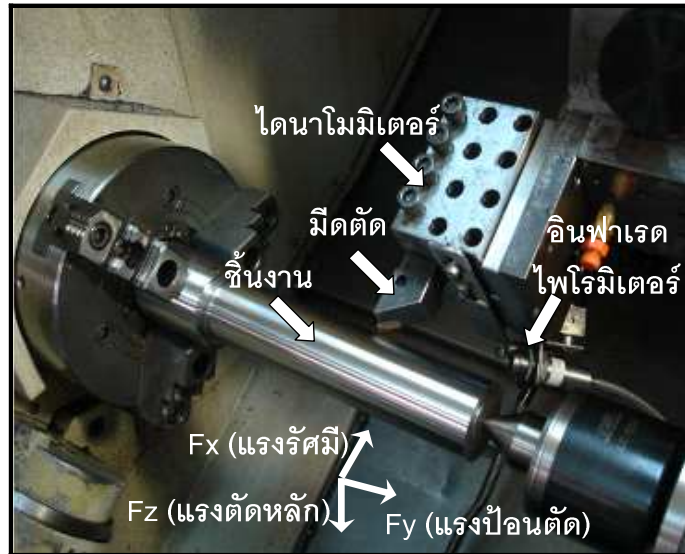


รูปที่ 3.13 : ภาพแสดงการตรวจสอบความสึกหรอของมิดตัด

### 3.3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในหน่วยโวลต์ ต้องนำมาทำการแปลงหน่วยในส่วน  
ของสัญญาณแรงตัด ตามค่า Sensitivity ดังนี้

- แรงรัศมี (Radial Force , N) =  $V_x$  (Volt) x 600 (N / Volt)
- แรงป้อนตัด (Feed Force , N) =  $V_y$  (Volt) x 600 (N / Volt)
- แรงตัดหลัก (Main Force , N) =  $V_z$  (Volt) x -1200 (N / Volt)



รูปที่ 3.14 : ภาพแสดงทิศทางของแรงตัด

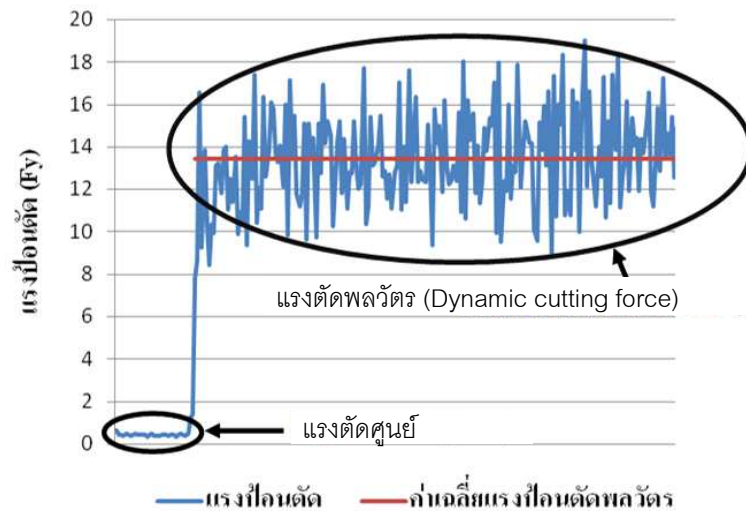
(แรงรัศมี (Radial Force), แรงป้อนตัด (Feed Force) และแรงตัดหลัก (Main Force))

หลังจากทำการแปลงหน่วยแล้ว ในส่วนของสัญญาณแรงตัดนั้นจะนำค่าแรงตัดพลวัตทั้งสามแรง มาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมาลบออกจากค่าเฉลี่ยก่อนนำไปทำการวิเคราะห์สัญญาณในด้านของความถี่และนำค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตมาลบออกด้วยค่าสัญญาณรบกวนเฉลี่ย ดังรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่า sensitivity และช่วงความถี่ใช้งานของเซนเซอร์แรงตัด

เซนเซอร์		Sensitivity	ช่วงความถี่ใช้งาน (Frequency Range)
เซนเซอร์แรงตัด	แรงรัศมี (Fx)	600 V / N	0 – 2,000 Hz
	แรงป้อนตัด (Fy)	600 V / N	
	แรงตัดหลัก (Fz)	-1200 V / N	





รูปที่ 3.15 : ภาพแสดงสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด

ส่วนสัญญาณอนุกรมมิตัดนั้นไม่ต้องมีการแปลงหน่วย ก่อนนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์สัดส่วนความแปรปรวนเฉลี่ย บนโดเมนเวลาจึงสามารถนำค่าที่ได้จากการวัดด้วยไพโรมิเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ในลำดับต่อไปได้เลย

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการทำการทดลองเบื้องต้นได้ทำการจำแนกรูปแบบด้วยสายตาดังรูปที่ 3.18 และนำสัญญาณแรงตัดและอนุกรมมิตัดที่ได้จากเศษโลหะเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์สัญญาณเบื้องต้นพบว่าในขณะเกิดเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดเล็ก แต่เมื่อเศษโลหะเป็นแบบแตกหักแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะแรงป้อนตัดพลวัต ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้<sup>[22]</sup> ส่วนอนุกรมมิตัดนั้นเป็นครั้งแรกที่นำสัญญาณชนิดนี้มาใช้ แต่เมื่อพิจารณาสัญญาณพบว่ามีแอมพลิจูดของอนุกรมมิตัดขนาดเล็กเมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก และแอมพลิจูดขนาดใหญ่หากเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง จากแนวโน้มเหล่านี้จึงนำไปสู่การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของสัญญาณแต่ละชนิดต่อไป

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณแรงตัด

- 1.) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีการแตกหักของเศษโลหะสอดคล้องกับเวลาที่ทำการบันทึกแรงตัดพลวัต นำมาทำการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ด้วยโปรแกรม Matlab (ภาคผนวก ค)
- 2.) วิเคราะห์สัญญาณโดเมนความถี่ของสัญญาณ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นกับการแตกหักของเศษโลหะ

- 3.) ขั้นตอนการคำนวณในส่วนของโดเมนความถี่ เพื่อหาค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน (Power Spectrum Density) ของช่วงความถี่ที่ใช้ในการจำแนกสถานะการแตกหักของเศษโลหะโดยการอินทิเกรตค่ากำลังสองของสเปกตรัม (เพาเวอร์สเปกตรัม) ทุกความถี่ จากทฤษฎีบทพลังงานของเรเลย์ห์ (Rayleigh's Energy Theorem) ดังสมการที่ 3-1

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |V(f)|^2 df \quad (3-1)$$

โดยนำกฎของสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) มาประมาณการหาค่าพื้นที่ใต้กราฟของ Power Spectrum Density (PSD)

- 3.1) คำนวณหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัม (AP) ของแรงตัดพลวัตทั้ง 3 แรง (แรงตัดหลัก (F<sub>m</sub>), แรงป้อนตัด (F<sub>f</sub>), แรงรัศมี (F<sub>t</sub>)), โดยรวมค่าความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตแต่ละแรง (S<sub>x</sub>, S<sub>y</sub> และ S<sub>z</sub> ตามลำดับ) จาก 0 ถึง 1,500 เฮิรตซ์ และหารผลรวมทั้งหมดที่ได้ด้วยช่วงของความถี่

- 3.2) หาความถี่, f<sub>m</sub> ที่มีค่า PSD มากที่สุดของแต่ละแรงตัดพลวัต

- 3.3) คำนวณผลรวมค่าความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตแต่ละแรง (S<sub>m</sub>, S<sub>f</sub> และ S<sub>t</sub> ตามลำดับ) ในช่วงความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะสำหรับค่า PSD ที่มีค่าเกินกว่า 1.5\*AP และอยู่ในช่วงความถี่จาก f<sub>m</sub>-50 เฮิรตซ์ ถึง f<sub>m</sub>+50 เฮิรตซ์

- 3.4) คำนวณสัดส่วนผลรวมค่าความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตแต่ละแรงในช่วงความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะดังนี้

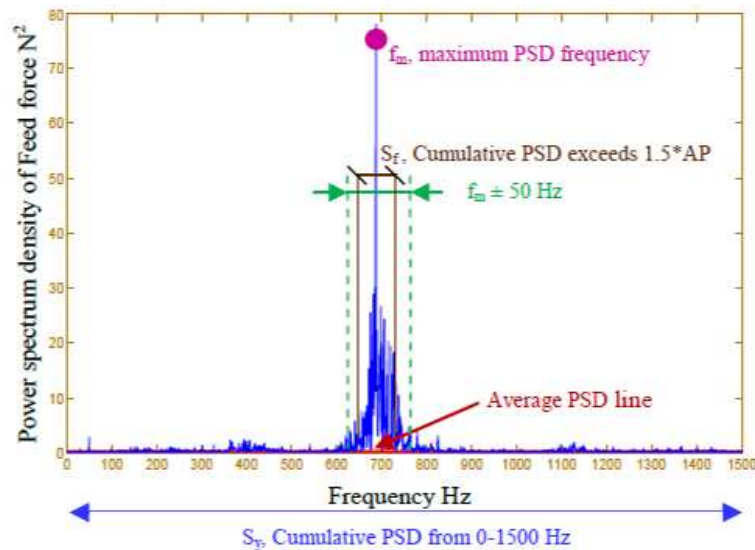
$$AX = S_m / S_f$$

$$AY = S_m / S_t$$

$$AZ = S_f / S_t$$

- 3.5) การตรวจติดตามการแตกหักของเศษโลหะสามารถระบุได้ด้วยค่าเกณฑ์ควบคุม (threshold) AX, AY และ AZ ในพื้นที่อ้างอิง สำหรับจำแนกเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous chips) และเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken chips) ออกจากกัน

โดยรูปที่ 3.16 แสดงการหาค่าตัวแปรต่างๆตามขั้นตอนข้างต้น โดยยกตัวอย่างแรงป้อนตัด



รูปที่ 3.16 : ลักษณะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแรงตัดพลวัตทั้งสามแรง

### 3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณอุทกภูมิ

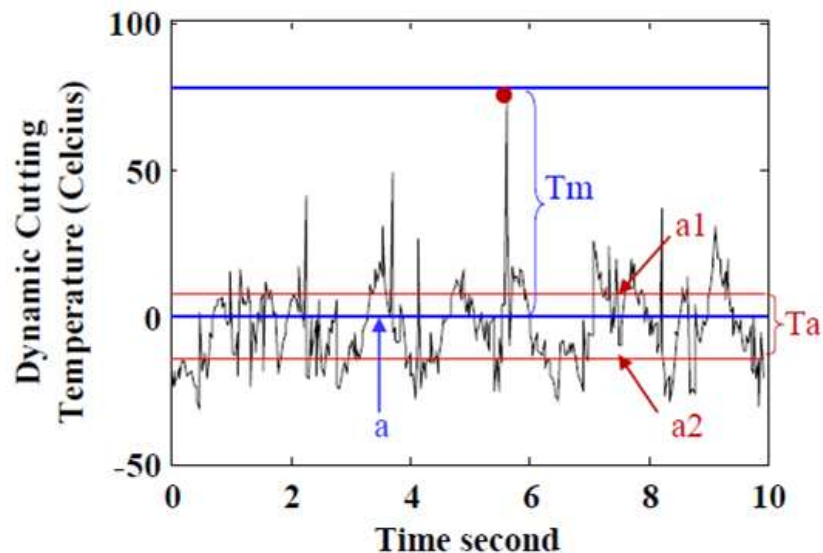
- 1) จากข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง ซึ่งมีการแตกหักของเศษโลหะสอดคล้องกับเวลาที่ ได้ทำการบันทึกอุทกภูมิขณะตัด โดยเป็นสัญญาณบนโดเมนเวลา (Time Domain) นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นกับการแตกหักของเศษโลหะ
- 2) ขั้นตอนการคำนวณในส่วนของโดเมนเวลา ได้พัฒนาพารามิเตอร์ขึ้นมาเรียกว่า สัดส่วนความแปรปรวนของอุทกภูมิตัดพลวัต (AVT) ซึ่งใช้แนวคิดเดียวกับ Crest factor ตามหัวข้อที่ 2.1.7.1 เนื่องจากเห็นว่า crest factor นิยมใช้ในงานวิเคราะห์ สัญญาณที่รูปคลื่นสัญญาณไม่สม่ำเสมอของแต่ละช่วงเวลา แต่มีลักษณะพาเซ แน่นอนในแต่ละลักษณะของการแตกหักของเศษโลหะ<sup>[24]</sup> ซึ่งศึกษาจากการศึกษา เอกลักษณ์ของข้อมูลสัญญาณเบื้องต้นมีลำดับการคำนวณดังนี้

- 2.1) คำนวณหาค่าเฉลี่ยของอุทกภูมิตัดพลวัต ที่เก็บข้อมูลมาในช่วงเวลา 10 วินาที นำข้อมูลสัญญาณลบออกด้วยค่าเฉลี่ย เพื่อเลื่อนแกนสัญญาณให้เริ่มต้นที่ 0 (เส้น a)
- 2.2) หาอุทกภูมิตัดพลวัตที่มีค่ามากที่สุด ( $T_m$ ) ในช่วงค่าบวกของความแปรปรวน (เหนือเส้น a)
- 2.3) หาค่าเฉลี่ยของอุทกภูมิพลวัต ในช่วงค่าบวกของความแปรปรวน (เหนือเส้น a) ตั้งแต่นาทีที่ 0-10 คือเส้น a1
- 2.4) หาค่าเฉลี่ยของอุทกภูมิพลวัต ในช่วงค่าลบของความแปรปรวน (ใต้เส้น a) ตั้งแต่นาทีที่ 0-10 คือเส้น a2

2.5) คำนวณค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนอุณหภูมิตัดพลวัต (Ta)

โดย  $T_a = \sqrt{(\sum (a_1)^2 + (\sum a_2)^2) / 2}$  ซึ่งก็คือสูตรส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (RMS) ที่ประยุกต์มาจากแนวคิดของ crest factor นั้นเอง และนำค่าอุณหภูมิตัดพลวัตที่มีค่ามากที่สุดหารด้วยค่าเฉลี่ยความแปรปรวนอุณหภูมิตัดพลวัต,  $AVT = T_m / T_a$  ดังนั้น AVT ก็คือสัดส่วนของค่าอุณหภูมิตัดพลวัตที่มีค่ามากที่สุดต่อค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิตัดพลวัต

2.6) สามารถหาค่าเกณฑ์ควบคุม (threshold) AVTที่เหมาะสม ในพื้นที่อ้างอิงสำหรับจำแนกเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous chips) และเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken chips) ออกจากกันโดยรูปที่ 3.17 แสดงการหาค่าตัวแปรต่างๆ ตามขั้นตอนข้างต้น



รูปที่ 3.17 : ลักษณะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากอุณหภูมิตัดพลวัต

### 3.4.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสัญญาณและรูปร่างเศษโลหะ

รูปที่ 3.18 แสดงรูปร่างของเศษโลหะที่ได้จากการทดลองภายใต้ความเร็วตัด, อัตราการป้อนตัดและความลึกของการตัดที่แตกต่างกัน โดยใช้มีดตัดใหม่ กำหนดให้ขนาดการสึกหรอด้านข้างของคมตัดไม่เกิน 0.07 มิลลิเมตร รูปร่างของเศษโลหะที่อยู่ในกรอบเส้นหนาแสดงถึงชนิดของเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken chips) คือแบบ helical chips, long tubular chips, short tubular chips, spiral tubular chips, spiral chips, long comma chips และ short comma chips ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 ส่วนรูปที่อยู่ในกรอบเส้นประคือรูปร่างของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous chips) คือแบบ ribbon chips, tangled chips และ corkscrew chips ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 ซึ่งจัดเป็นรูปแบบที่ไม่ได้รับการยอมรับให้เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม

เนื่องจากจะส่งผลเสียต่อขบวนการผลิตได้ในทุกระดับ รูปร่างของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะ นั้นจะขึ้นกับเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ในการทดลองเบื้องต้นจึงจะนำรูปแบบเศษโลหะดังกล่าวมาแยกชนิดตามมาตรฐาน ISO แล้วจึงนำค่าสัญญาณที่ตรวจจับขณะทำการตัดมาพิจารณาเพื่อหาวิธีการตั้งลักษณะเด่นของสัญญาณแต่ละแบบมาแบ่งแยกหรือระบุรูปแบบของเศษโลหะ

	Cutting Speed 150 m/min			Cutting Speed 250 m/min			Cutting Speed 350 m/min		
	Depth of cut (mm)			Depth of cut (mm)			Depth of cut (mm)		
	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00
Feed rate 0.100 mm/rev									
Feed rate 0.125 mm/rev									
Feed rate 0.150 mm/rev									
Feed rate 0.175 mm/rev									
Feed rate 0.200 mm/rev									

รูปที่ 3.18 : แสดงตัวอย่างรูปร่างของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะ  
ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้รับจากผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ทั้งในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วด้วยโปรแกรม Matlab โดย”โดเมน”หมายถึง สิ่งแวดล้อมที่ใช้อธิบายความหมายต่างๆ หรือ ค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งหากการอธิบายกระทำภายใต้ตัวแปรของเวลา (ฟังก์ชัน  $t$ ) ก็จะใช้คำว่า “โดเมนเวลา หรือ โทมโดเมน (Time domain) หรือถ้าหากการอธิบายนั้นกระทำภายใต้ตัวแปรความถี่ (ฟังก์ชัน  $f$  หรือ  $\omega$ ) ก็จะใช้คำว่าโดเมนความถี่ หรือ ฟริควนซีโดเมน (Frequency domain) เป็นต้น เนื่องจากสัญญาณแต่ละสัญญาณอาจมีคุณสมบัติที่เด่นชัดในแต่ละโดเมนแตกต่างกัน หรือแม้แต่สัญญาณเดียวกันอาจมีคุณสมบัติบางอย่างที่อาจมองเห็นได้เด่นชัดในอีกโดเมนหนึ่ง เช่น ในโดเมนเวลาสามารถจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณในขณะที่เวลาเปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจน แต่จะไม่สามารถบอกได้ว่า สัญญาณนั้นมีความถี่ใดบ้างเป็นองค์ประกอบ แต่เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่จะทราบได้ว่าสัญญาณนั้นประกอบด้วยความถี่ใดบ้างและแต่ละความถี่มีค่าพลังงานมากน้อยเพียงใด ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณจากเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิด กับสถานะของการก่อกองคลื่นที่พิเศษเฉพาะที่เกิดขึ้นเป็นแบบต่อเนื่องหรือแบบแตกหัก โดยจะแยกการวิเคราะห์เป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

#### 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบเฉพาะเฉพาะกับสัญญาณแรงตัด

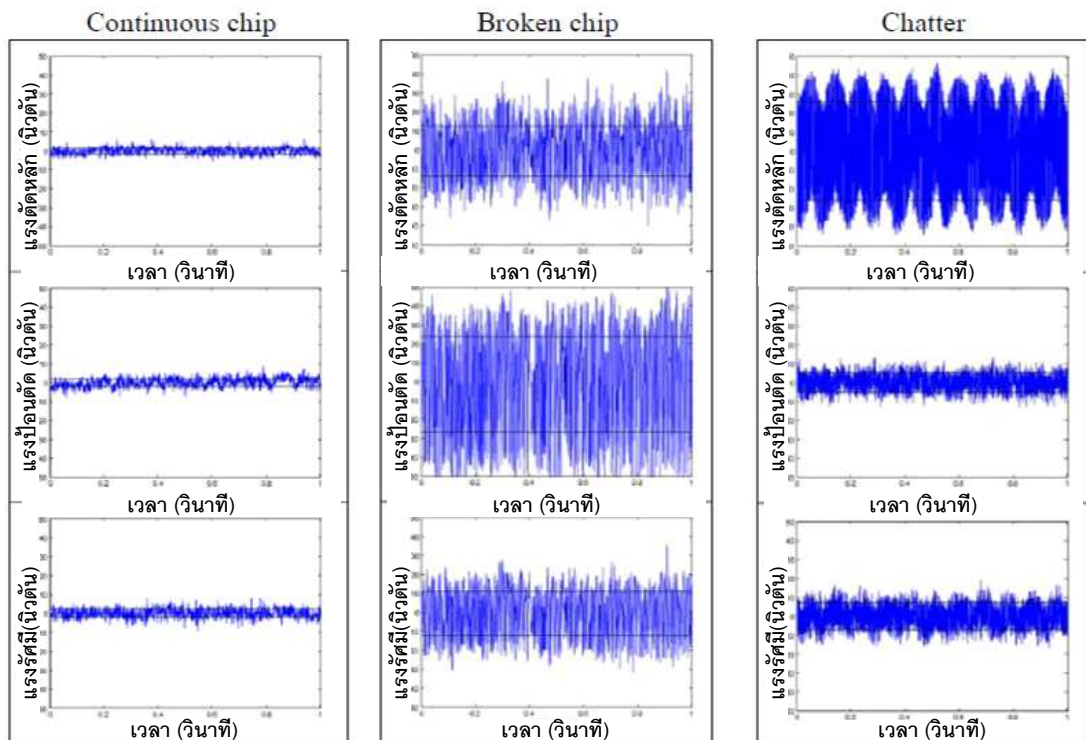
##### 4.1.1 การตรวจจัดการแตกหักเฉพาะโดยสัญญาณแรงตัดบนโดเมนเวลา

การนำสัญญาณแรงตัดมาใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพการก่อกองคลื่นขึ้นงานนั้นถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะสัญญาณแรงตัดบนโดเมนเวลาเนื่องจากสามารถนำมาใช้งานได้ในเวลาอันสั้นโดยไม่ต้องผ่านการแปลงค่าหลายขั้นตอน จากข้อมูล(ภาคผนวก ก) ดังกล่าวสัญญาณแรงตัดพลวัตจึงถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อจำแนกระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดเฉพาะเฉพาะแตกหักและสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดเฉพาะเฉพาะแบบต่อเนื่อง

##### 4.1.1.1 ลักษณะทั่วไปของสัญญาณแรงตัดบนโดเมนเวลา

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้เคยใช้การวิเคราะห์แรงตัดโดยใช้ขนาดแรงตัดพลวัตบนโดเมนเวลาเพื่อหาการเกิดความสั่นสะเทือนของกลไกภายในระบบดังรูปที่ 4.1 พบว่าในระหว่างการก่อกองคลื่นหากเกิดเฉพาะเฉพาะแบบต่อเนื่อง (continuous chip) ขึ้นแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามแรงจะมีขนาดเล็ก ซึ่งแตกต่างกับเมื่อเกิดเฉพาะเฉพาะแบบแตกหัก (broken chip) ที่แอมพลิจูดของแรงตัดทั้งสามแรงจะมีขนาดใหญ่มากเนื่องจากเมื่อเนื้อโลหะเกิดการเปลี่ยนรูปและหลุด

นอกจากผิวชิ้นงานนั้น จะเกิดความเค้นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้ต้องใช้แรงตัดมาก จึงเกิดเป็นช่วงความกว้างของแอมพลิจูด แต่เมื่อพิจารณารูปแบบแอมพลิจูดแบบที่สามที่สัญญาณแรงตัดพลวัตตรวจจับได้ปรากฏว่าเป็นรูปแบบที่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการสั่นของกลไกภายในระบบ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า“แชตเตอร์” (chatter) ซึ่งมีคุณลักษณะของแอมพลิจูดที่แตกต่างกับสองแบบแรก คือ จะมีแอมพลิจูดของแรงตัดหลัก (main force) ขนาดใหญ่กว่าแอมพลิจูดของแรงป้อนตัด (feed force) และแรงรัศมี (thrust force) อย่างเห็นได้ชัด<sup>[31]</sup>



รูปที่ 4.1 : แสดงตัวอย่างขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณแรงตัดพลวัต<sup>[32]</sup>

ซึ่งผลเสียจากการเกิดแชตเตอร์นั้นจะส่งผลต่อความเรียบของผิวชิ้นงาน แต่ไม่ได้ส่งผลต่อการแตกหักของเศษโลหะโดยตรง โดยปัญหาการเกิดแชตเตอร์ไม่สามารถขจัดให้หมดไปอย่างสิ้นเชิงได้ ทำได้แค่เพียงควบคุมให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้เท่านั้น เช่น

- ใช้ด้ามจับมีดตัดที่เหมาะสมกับลักษณะการตัดชิ้นงาน เช่นงานคว้านลึกควรด้ามจับทำจากคาร์ไบด์
- อาศัยประสบการณ์และความชำนาญโดยการปรับ Spindle Override บนตู้คอนโทรลวิธีนี้จะทำให้การทำงานบนเครื่องจักรไม่สั่นมาเมอ แต่ลดอาการแชตเตอร์ได้มาก
- การลดความลึกตัดและเลือกให้มีดตัดที่ยังคงมีความคมสูงจะลดอาการแชตเตอร์ได้

ซึ่งในการศึกษางานวิจัยขั้นนี้ไม่ได้สนใจการเกิดแซตเตอร์ในกระบวนการตัด ดังนั้นหากเกิดแซตเตอร์ขึ้นขณะทำการตัดชิ้นงานจะไม่สามารถทราบได้จึงเห็นว่าไม่ควรใช้สัญญาณแรงตัดพลวัตบนโดเมนเวลามาตรวจจับการแตกหักเศษโลหะ เนื่องจากอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในผลการทดลองและเห็นว่าควรทำการตรวจจับการแตกหักเศษโลหะบนโดเมนความถี่จะให้ผลการทดลองที่แม่นยำกว่า เนื่องจากแอมพลิจูดที่เกิดจากปรากฏการณ์แซตเตอร์ จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมันคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง หากพิจารณาบนโดเมนความถี่จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ ทำให้ทราบตำแหน่งความถี่การเกิดแซตเตอร์ที่แน่นอน และไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้สัญญาณแรงตัดพลวัตพิจารณาแบบของเศษโลหะ

#### 4.1.1.2 ลักษณะเฉพาะของสัญญาณแรงตัดบนโดเมนเวลา

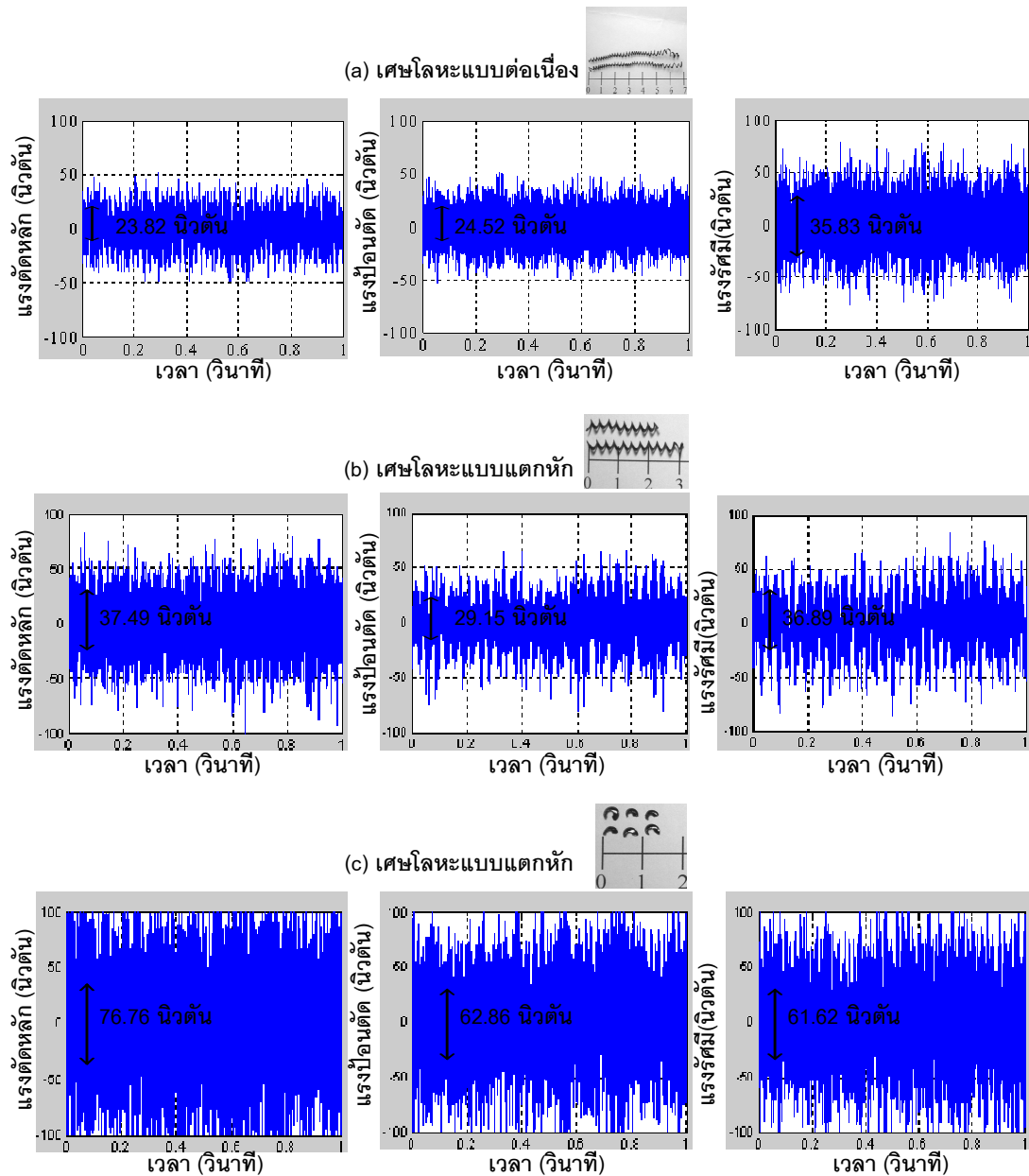
ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองโดยกำหนดช่วงเงื่อนไขการตัดที่จะก่อให้เกิดเศษโลหะทั้งสองแบบ คือเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก ในจำนวนการทดลองที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้ค่าเกณฑ์ควบคุมที่จะนำมาพัฒนาอัลกอริทึมที่มีความแม่นยำมากที่สุด โดยผลสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์จะเป็นสัญญาณแรงตัดพลวัตจากแนวแรงตัดทั้งสามแกนซึ่งใช้กันทั่วไปในการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดในกระบวนการกลึงโดยอาศัยหลักการตรีโกณมิติ

จากการที่เสนอให้มีการนำสัญญาณทั้งสามแกนมาพิจารณาเพื่อจำแนกเศษโลหะออกเป็นแบบต่อเนื่องและแบบแตกหักนั้น เนื่องจากเมื่อทำการตัดชิ้นงานโดยเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด จะทำให้แรงที่ใช้ในการตัดในแต่ละเงื่อนไขแตกต่างกันออกไป โดยเงื่อนไขการตัดที่ก่อให้เกิดเศษโลหะแตกหักจะมีค่ามาก เนื่องจากต้องกำจัดเศษโลหะให้หลุดจากผิวชิ้นงานจึงมีความเค้นจำนวนมากเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเงื่อนไขที่ก่อให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหักต่างก็มีค่าแรงตัดหรือค่าแอมพลิจูดของแรงตัดที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.2 (a) แสดงขนาดแรงตัดพลวัตทั้งสามแกนของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง คือแรงตัดหลักและแรงป้อนตัดจะมีขนาดน้อย ส่วนแรงรัศมีจะมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับแรงตัดหลักและแรงรัศมี แต่ยังคงมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับแรงตัดที่ได้จากรูปที่ 4.2 (b) และ (c) โดยในรูปแสดงขนาดแรงตัดพลวัตทั้งสามแกนของเศษโลหะแบบแตกหัก คือแรงป้อนตัดจะมีขนาดใหญ่มากที่สุด รองลงมาคือแรงตัดหลักและแรงรัศมี ตามลำดับ ดังนั้นเราจึงการหาสัดส่วนระหว่างกันของแรงตัดพลวัตทั้งสามแกนพบว่าค่าสัดส่วนดังกล่าวสามารถนำมาจำแนกการแตกหักของเศษโลหะได้เป็นอย่างดี แต่ในบางกรณีค่าแรงตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องก็มีค่าแรงตัดที่ใกล้เคียงกับค่าแรงตัดจากเศษโลหะแบบแตกหักดัง รูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ารูป(a) เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ในขณะที่รูป (b) และ (c) เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก แต่เมื่อพิจารณาที่ขนาดแอมพลิจูดพบว่ารูป (a) และ (b) มีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากกว่าขนาดแอมพลิจูดของรูป (b) และ (c) เนื่องจากเงื่อนไขการตัดมีความลึกตัดที่น้อยเหมือนกัน จึงเห็นว่าการพิจารณาจำแนกรูปร่างเศษโลหะบนโดเมนเวลานั้นยังมี



ข้อจำกัดจึงนำสัญญาณแรงตัดไปวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ต่อไปจะสามารถเห็นความถี่ของการแตกหักซึ่งจะสามารถจำแนกรูปการเกิดเศษโลหะได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 4.2 : แสดงค่าของแรงตัดที่แตกต่างกัน เมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป

- (a) ความเร็วตัด = 250 ม./นาที, อัตราป้อนตัด = 0.15 มม./รอบและความลึกตัด = 0.5 มม.  
 (b) ความเร็วตัด = 350 ม./นาที, อัตราป้อนตัด = 0.2 มม./รอบและความลึกตัด = 0.75 มม.  
 (c) ความเร็วตัด = 250 ม./นาที, อัตราป้อนตัด = 0.2 มม./รอบและความลึกตัด = 1.0 มม.

#### 4.1.2 การตรวจจับการแตกหักของโลหะด้วยสัญญาณแรงตดบนโดเมนความถี่

##### 4.1.2.1 ลักษณะทั่วไปของสัญญาณแรงตดบนโดเมนความถี่

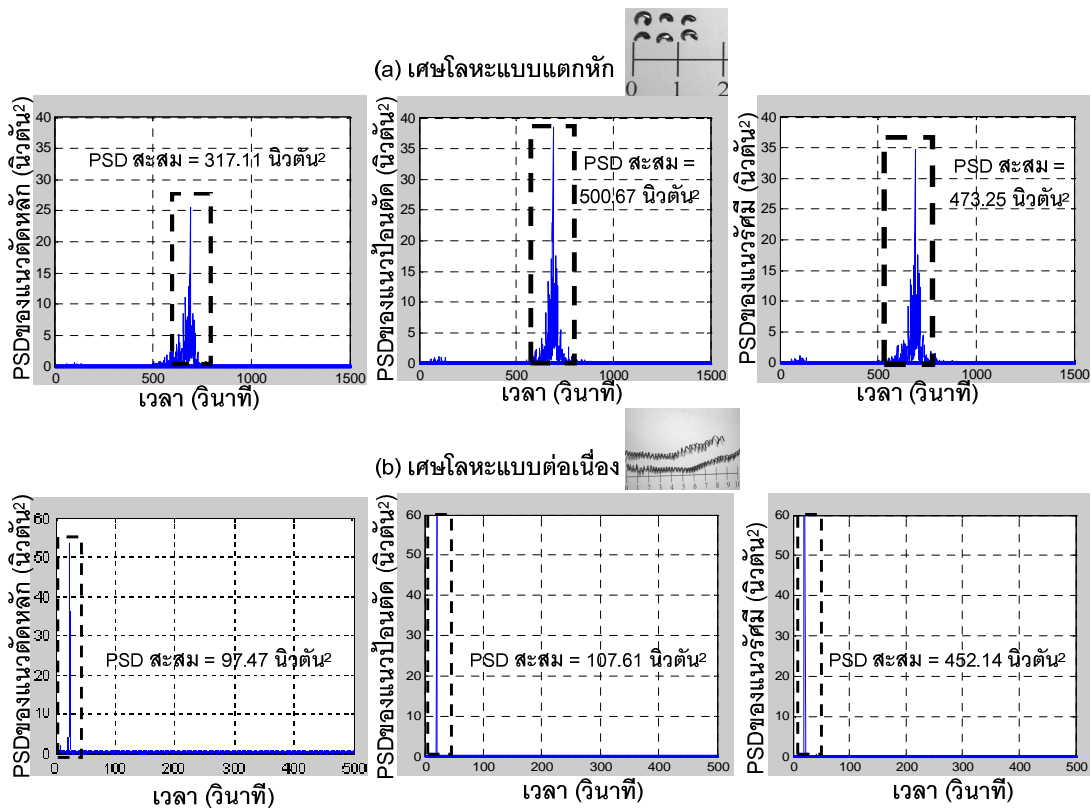
จากผลการทดลอง (ภาคผนวก ก) เมื่อนำสัญญาณแรงตดมาทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วเพื่อวิเคราะห์ในโดเมนความถี่และหาค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมจากการหาพื้นที่ใต้กราฟในช่วงความถี่ของการแตกหักของโลหะแต่ละแบบ จากรูปที่ 4.3 เมื่อเกิดโลหะแบบแตกหัก ค่าพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของสัญญาณแรงตดพลวัตจะมีขนาดใหญ่มากที่ช่วงความถี่คงที่ทั้งสามแกน มากกว่า 500 เฮิรตซ์ และโลหะแบบต่อเนื่อง ค่าพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของสัญญาณแรงตดพลวัตจะมีขนาดใหญ่ที่ช่วงความถี่คงที่ทั้งสามแกนในช่วงของความถี่ต่ำกว่า 100 เฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ของการแตกหักของโลหะ ซึ่งได้ทำการนับจำนวนการแตกหักของโลหะซ้ำเพื่อยืนยันช่วงความถี่ที่เกิดการแตกหักขึ้น ดังนั้นค่าความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมซึ่งได้รับมาจากการอินทิเกรตพาวเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตดพลวัตทั้ง 3 แกนจะถูกนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการจำแนกรูปแบบของโลหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากสามารถแยกแยะช่วงความถี่ของการแตกหักของโลหะทั้งสองชนิดได้อย่างชัดเจน

##### 4.1.2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของสัญญาณแรงตดทั้งสามแกนบนโดเมนความถี่

หากนำค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของทั้งสามแกน คือ ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงตดหลัก ( $S_m$ ), ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงป้อนตด ( $S_f$ ) และค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงรัศมี ( $S_t$ ) มาใช้ในการจำแนกชนิดของโลหะในบางกรณีอาจแบ่งแยกได้ไม่ชัดเจน เช่นจากรูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงรัศมีของโลหะแบบแตกหักและแบบต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจากทฤษฎีที่ว่าแรงตดสามารถคำนวณได้จากหลักการตรีโกณมิติและจากผลการทดลองแสดงให้เห็นแล้วว่าแรงตดที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนไม่เท่ากัน เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะเศษตดที่เกิดขึ้นดังนี้

- เศษโลหะแบบแตกหักนั้นจะมีค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมสูงสุดสำหรับแรงป้อนตด เนื่องจากแรงในแนวแกนนี้ส่งผลต่อความแตกหักโดยตรง ส่วนค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงตดหลักและแรงรัศมีก็มีค่าสูงเช่นกัน
- เศษโลหะแบบต่อเนื่องจะมีค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมสูงสำหรับแรงรัศมี เนื่องจากรูปร่างของเศษโลหะที่หลุดออกจากชิ้นงานได้ยากจึงเกิดแรงเสียดทานในแนวแรงนี้สูง ส่วนค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของตดหลักและแรง

ป้อนตัดนั้นมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมสะสมของ  
เศษโลหะแบบแตกหัก



รูปที่ 4.3: ภาพแสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมของสัญญาณแรงตัดพล  
วัตถุทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก

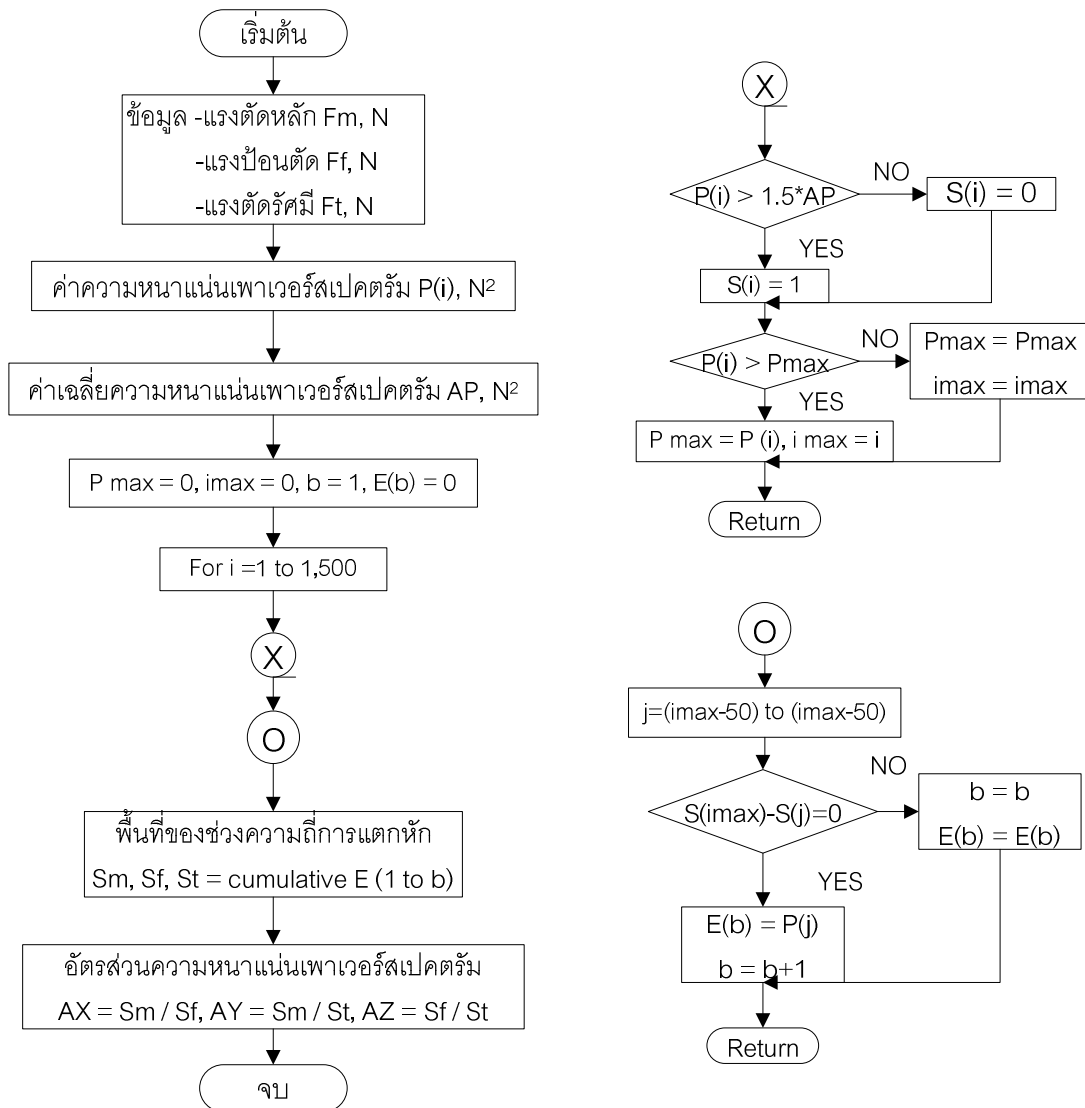
(a) ความเร็วตัด = 250 ม./นาที, อัตราป้อนตัด = 0.2 มม./รอบและความลึกตัด = 0.75 มม.

(b) ความเร็วตัด = 250 ม./นาที, อัตราป้อนตัด = 0.175 มม./รอบและความลึกตัด = 0.5 มม.

ดังนั้นจากรูปที่ 4.3 ผลของค่าความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมสะสมของทั้งสามแกน จะถูกนำไป  
รูปแบบของอัตราส่วนระหว่างค่าความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมสะสม โดยคำนึงค่าเกณฑ์  
ควบคุมที่ได้ใกล้เคียงกับจำนวนเต็มมากที่สุด จึงได้เสนอการให้อัตราส่วนค่าความหนาแน่น  
พาเวอริสเปคตรัมสะสมในแต่ละแกนดังนี้

- อัตราส่วนความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมสะสมของแรงตัดหลักต่อแรงป้อนตัด คือ ตัวแปร "AX"
- อัตราส่วนความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมสะสมของแรงตัดหลักต่อแรงรัศมี คือ ตัวแปร "AY"
- อัตราส่วนความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมสะสมของแรงป้อนตัดต่อแรงรัศมี คือ ตัวแปร "AZ"

โดยไม่ว่าจะเอาค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมสะสมในแรงแกนใดมาทำการหาอัตราส่วนก่อนกัน เช่น เปลี่ยน AX เป็น ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมสะสมของแรงป้อนตัดต่อแรงตัดหลัก ก็ยังสามารถจำแนกรูปแบบรูปแบบของเศษโลหะได้ไม่แตกต่างกัน มีเพียงค่าเกณฑ์ความคมที่เปลี่ยนไปเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.4 : แผนภูมิการไหลแสดงวิธีการหาค่าอัตราส่วนความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมสำหรับสัญญาณแรงตัดพลวัต

ในรูปที่ 4.4 ได้สรุปขั้นตอนการหาสัดส่วนความหนาแน่นพาเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงตัดทั้งสามแกน โดยเริ่มจาก

1. รับข้อมูลแรงตัดที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์บนโดเมนเวลา
2. เปลี่ยนขนาดแรงตัดบนโดเมนเวลาเป็นความหนาแน่นพาเวอร์สเปกตรัมบนโดเมนความถี่ ด้วยวิธี FFT (Fast Fourier Transform) ด้วยโปรแกรม Matlab
3. หาค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปกตรัมสะสม ด้วยกฎพื้นที่ใต้กราฟสี่เหลี่ยมคางหมู บริเวณความถี่ที่เกิดความหนาแน่นพาเวอร์สเปกตรัมสูงสุด ซึ่งเป็นความถี่ที่สอดคล้องกับการแตกหักของเศษโลหะ
4. เมื่อได้ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงตัดทั้งสามแกน จึงนำมาหาอัตราส่วนตามแนวทางของตัวแปร AX, AY และ AZ

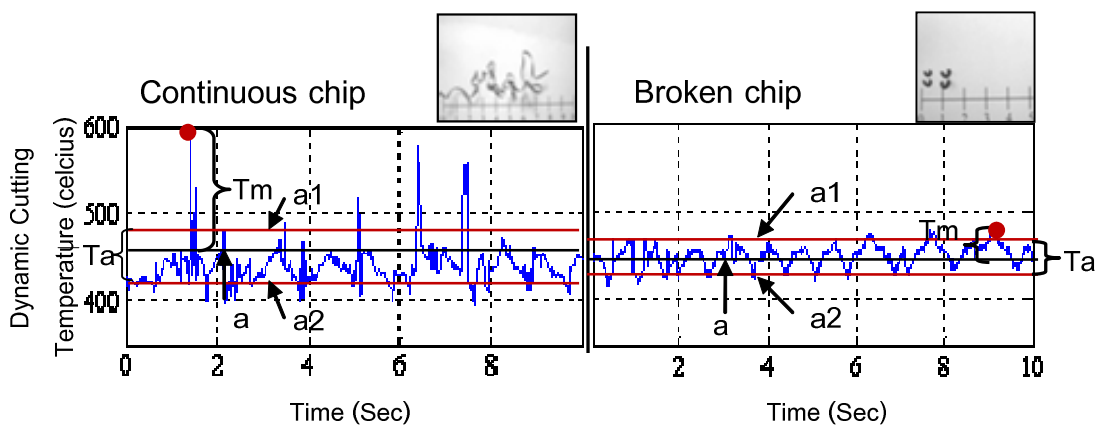
ดังนั้นจึงเสนอให้พัฒนาตรวจจับการแตกหักเศษโลหะด้วยโดเมนความถี่ ซึ่งข้อดีของการใช้โดเมนความถี่คือสามารถจับปัญหาการรบกวนสัญญาณเมื่อเกิดการสั่นของกลไกภายในระบบ (Chatter) และลักษณะของสัญญาณชนิดนี้ยังมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่สามารถนำมาจำแนกได้ง่ายกว่าสัญญาณบนโดเมนเวลา<sup>[31]</sup>

## 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบเศษโลหะกับสัญญาณอุณหภูมิตัด

### 4.2.1 การตรวจจับการแตกหักเศษโลหะด้วยสัญญาณอุณหภูมิตัดบนโดเมนเวลา

สำหรับวัดอุณหภูมิขณะตัดนั้นมีการพัฒนาการตรวจวัดในหลายวิธีมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งวิธีหนึ่งที่น่าสนใจก็คือ การนำอินฟราเรดไพโรมิเตอร์มาใช้ในงานวัดรังสีความร้อนจากบริเวณการตัดโดยตรง เพราะเหมาะกับการวัดอุณหภูมิที่สูงด้วยจุดโฟกัสของอินฟราเรดที่แคบ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะตัดแบบทันทีทันใดทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์รูปแบบที่เปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิขณะตัดได้ง่าย

อุณหภูมิตัดพลวัตมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีเอกลักษณ์ชัดเจน เมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหักและแบบต่อเนื่องโดยอุณหภูมิตัดพลวัตนั้นแปรผันโดยตรงกับจำนวนความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกไปพร้อมกับเศษโลหะที่แตกหักและหลุดออกไป เนื่องจากอุณหภูมิพลวัตเกี่ยวข้องกับเศษโลหะ เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ความร้อนจะไม่สามารถระบายออกและเศษโลหะที่ยาวเกินไปเกิดการเสียดสีกับมีดตัด ทำให้เกิดความร้อนสะสมที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิตัดพลวัตจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ ซึ่งจะช่วยอธิบายปรากฏการณ์แตกหักของเศษโลหะ

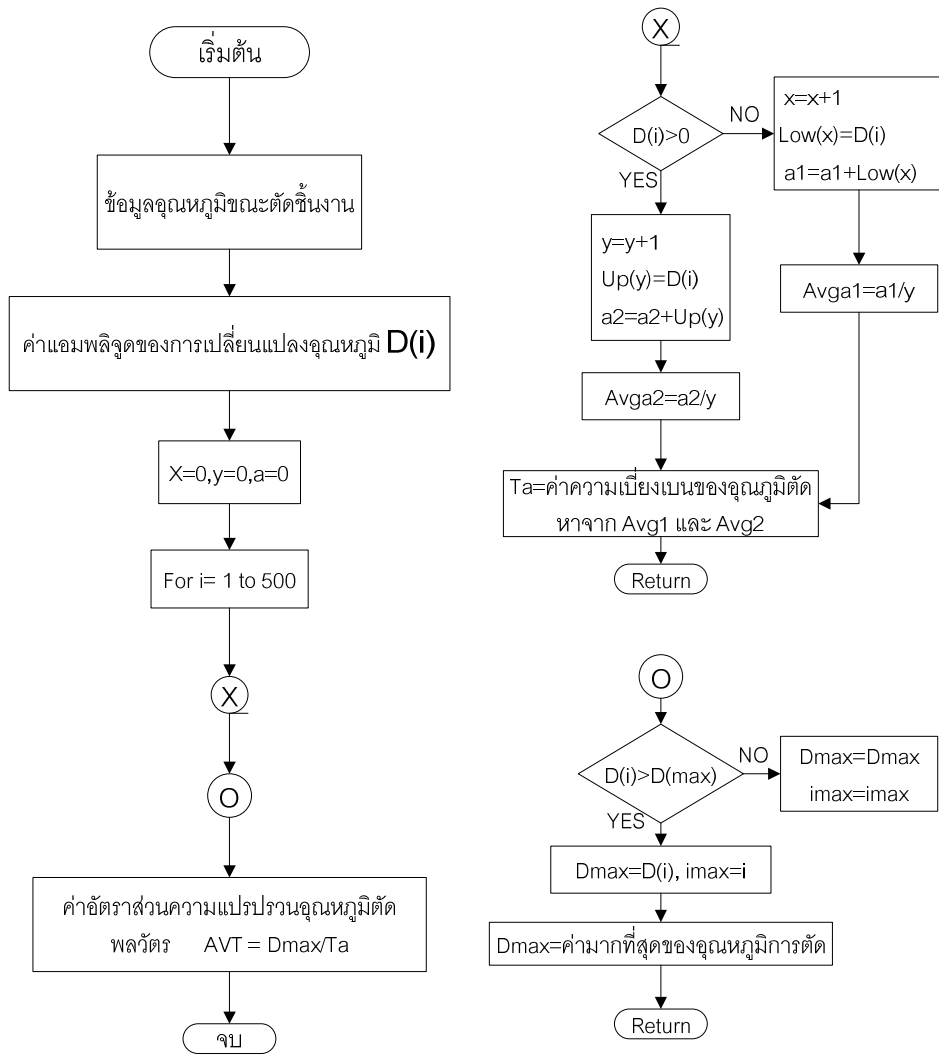


รูปที่ 4.5 : แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิขณะเศษโลหะเกิดการแตกหัก :

- (a) อุณหภูมิขณะเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง      (b) อุณหภูมิขณะเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก

ค่าอุณหภูมิตัดพลวัตสูงสุด ( $T_m$ ) และ ค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิตัดพลวัต ( $T_a$ ) จะมีขนาดเล็กเมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก เนื่องจากความร้อนสามารถออกจากบริเวณการตัดได้ตามปกติเมื่อเป็เศษโลหะแบบสั้น ในทางกลับกันค่าอุณหภูมิตัดพลวัตสูงสุด ( $T_m$ ) ของอุณหภูมิตัดพลวัตจะมีขนาดใหญ่ แต่ค่าความเบี่ยงเบน ( $T_a$ ) จะมีขนาดเล็ก เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เพราะความร้อนไม่ถูกปลดปล่อยออกไปและยังคงสะสมอยู่บนมีดตัดนั่นเอง<sup>[14]</sup> นอกจากนี้จะเห็นได้จากรูปที่ 4.5 ว่าหากปล่อยให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะทำให้อุณหภูมิการตัดโดยรวมมีค่าสูงกว่าการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักมาก ดังนั้นการจัดทำอัตราส่วนความแปรปรวนของอุณหภูมิตัดพลวัต (AVT) ถูกเสนอเพื่อนำไปใช้จำแนกรูปแบบการแตกหักของเศษโลหะตามรูปที่ 4.6 ซึ่งสรุปขั้นตอนการหาอัตราส่วนความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมสะสมของแรงตัดทั้งสามแกน โดยเริ่มจาก

- 1.รับข้อมูลอุณหภูมิตัดที่ได้จากอินฟาเรดไพโรมิเตอร์บนโดเมนเวลา
- 2.หาขนาดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนโดเมนเวลา ด้วยโปรแกรม Matlab
- 3.หาค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทั้งในด้านบวกและด้านลบซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน เพื่อบ่งบอกถึงค่าความเบี่ยงเบนที่แท้จริงของอุณหภูมิตัด แล้วจึงค่าหาสูงสุดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะตัด
- 4.นำค่าเบี่ยงเบนของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะตัด และค่าหาสูงสุดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะตัด มาหาอัตราส่วนเพื่อแสดงความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิของเศษโลหะแบบแตกหักและแบบต่อเนื่อง ด้วยตัวแปร "AVT"



รูปที่ 4.6 : แผนภูมิการไหลแสดงวิธีการหาอัตราส่วนความแปรปรวนอุณหภูมิตัดพลวัต สำหรับสัญญาณอุณหภูมิตัด

ดังนั้นจึงเสนอให้พัฒนาตรวจจับการแตกหักเศษโลหะด้วยโดเมนเวลา ซึ่งข้อดีของการใช้โดเมนความเวลาคือ ลดเวลาและขั้นตอนในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ นอกจากนี้ลักษณะของสัญญาณชนิดนี้ยังมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่สามารถนำมาจำแนกได้ง่ายกว่าสัญญาณบนโดเมนเวลา นอกจากนั้นการนำอินฟราเรดไพโรมิเตอร์ยังมีความเหมาะสมกับงานที่มีพื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์น้อยอย่างเช่นงานกลึงเนื่องจากเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้ไม่ต้องเข้าไปสัมผัสกับชิ้นงานสามารถไฟกัสปริเวณที่เกิดความร้อนขนาดเล็กได้ดี แต่มีข้อเสียที่ความถี่ของข้อมูลมีค่าน้อยกว่าข้อมูลแรงตัด ในการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องต้องใช้เวลากักเก็บข้อมูลทีนานจึงจะเห็นความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ชัดเจน

### 4.3 การจำแนกสถานะการแตกหักเชิงโลหะแบบต่อเนื่องและเชิงโลหะแบบแตกหัก

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของรูปแบบการแตกหักเชิงโลหะกับลักษณะสัญญาณแรงตัดปลั้วและสัญญาณอุณหภูมิตัดปลั้วในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าสามารถใช้พารามิเตอร์ใหม่ 4 ตัว ในการจำแนกรูปแบบของเชิงโลหะแบบแตกหักและต่อเนื่อง คือ

1. ค่าอัตราส่วนของความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดปลั้วทั้ง 3 แกน โดยกำหนดตัวแปรดังนี้

$$AX = \frac{\text{ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดหลัก}}{\text{ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงป้อนตัด}}$$

$$AY = \frac{\text{ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดหลัก}}{\text{ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดรัศมี}}$$

$$AZ = \frac{\text{ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงป้อนตัด}}{\text{ค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดรัศมี}}$$

โดยค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดปลั้วทั้งสามแกนได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณแรงตัด

2. ค่าอัตราส่วนความแปรปรวนอุณหภูมิตัดปลั้ว (AVT)

$$AVT = \frac{\text{ค่าสูงสุดของอุณหภูมิตัด (Tm)}}{\text{ค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิตัด (Ta)}}$$

ซึ่งค่า AVT (Average Variance Temperature) นั้นมีการเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้ครั้งแรกว่าสามารถนำมาใช้ในการจำแนกรูปแบบของเชิงโลหะได้เช่นเดียวกับแรงตัดปลั้วที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยค่า AVT นี้แนวคิดเดียวกับ crest factor ซึ่งใช้วัดความสั่นสะเทือนของเครื่องจักร คือใช้อัตราส่วนสัญญาณที่เปลี่ยนไปสูงสุดต่อค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณทั้งหมด โดยสมการ คือ

$$\text{Crest factor} = \frac{X_{\max}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}} \longrightarrow AVT = \frac{\text{ค่าสูงสุดของอุณหภูมิ}}{\sqrt{((a_1^2 + a_2^2) / 2)}}$$

โดยค่าอัตราส่วนความแปรปรวนอุณหภูมิตัดได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณอุณหภูมิตัด



ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัดส่วนของความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงตัดหลักต่อแรงป้อนตัด (AX) และการคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก (C1)

เงื่อนไข การ ทดลอง	ค่าอัตราส่วนของความหนาแน่น เพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงตัดหลักต่อ แรงป้อนตัด (AX)		เงื่อนไข การ ทดลอง	ค่าอัตราส่วนของความหนาแน่น เพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงตัดหลักต่อ แรงป้อนตัด (AX)	
	เศษโลหะ แบบต่อเนื่อง	เศษโลหะแบบ แตกหัก		เศษโลหะ แบบต่อเนื่อง	เศษโลหะแบบ แตกหัก
1	0.94	0.60	27	1.12	0.59
2	0.84	0.58	28	1.10	0.53
3	1.36	0.62	29	1.14	0.55
4	0.83	0.58	30	1.01	0.50
5	1.06	0.61	31	0.96	0.55
6	1.05	0.59	32	0.94	0.67
7	1.48	0.63	33	1.14	0.48
8	1.07	0.64	34	1.06	0.50
9	1.03	0.58	35	1.31	0.54
10	1.08	0.60	36	1.26	0.57
11	0.93	0.57	37	1.57	0.53
12	0.85	0.58	38	1.12	0.61
13	0.84	0.71	39	-	0.53
14	1.06	0.55	40	-	0.66
15	0.92	0.62	41	-	0.63
16	1.21	0.57	42	-	0.50
17	1.15	0.62	43	-	0.62
18	1.46	0.56	44	-	0.55
19	1.02	0.56			
20	1.07	0.55			
21	0.95	0.56			
22	1.46	0.55			
23	0.90	0.54			
24	1.15	0.51			
25	1.13	0.52			
26	1.09	0.56			

-ค่าเฉลี่ย AX ของข้อมูลเศษโลหะแบบต่อเนื่องเท่ากับ 1.08

-ค่าเฉลี่ย AX ของข้อมูลเศษโลหะแบบแตกหักเท่ากับ 0.57

-ค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของข้อมูลทั้งหมด คือ  $((1.08 \times 38) + (0.57 \times 44))/82 = 0.806$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าอัตราส่วนของความแปรปรวนคุณสมบัติตัดพลวัตร (AVT) และการคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลเฉพาะโลหะแบบต่อเนื่องและโลหะแบบแตกหัก (C4)

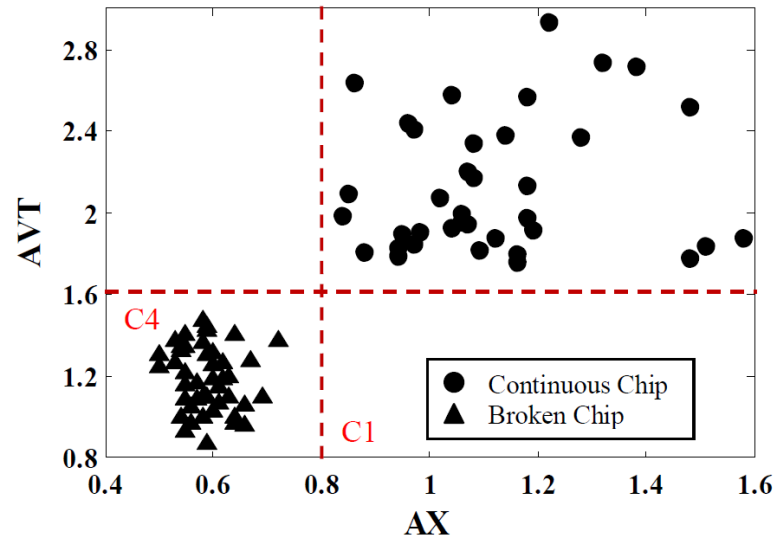
เงื่อนไข การ ทดลอง	ค่าอัตราส่วนของความแปรปรวน คุณสมบัติตัดพลวัตร (AVT)		เงื่อนไข การ ทดลอง	ค่าอัตราส่วนของความแปรปรวน คุณสมบัติตัดพลวัตร (AVT)	
	โลหะ แบบต่อเนื่อง	โลหะแบบ แตกหัก		โลหะ แบบต่อเนื่อง	โลหะแบบ แตกหัก
1	2.41	1.32	27	1.98	1.31
2	2.10	1.06	28	2.38	1.25
3	2.72	0.95	29	2.14	1.07
4	1.97	1.42	30	1.92	1.16
5	1.82	1.13	31	1.90	0.90
6	2.00	1.40	32	2.43	1.28
7	1.84	1.10	33	1.76	1.31
8	2.18	1.41	34	1.95	1.15
9	2.57	1.35	35	2.74	1.00
10	2.34	1.18	36	2.37	1.09
11	1.83	1.26	37	1.86	1.30
12	1.81	1.03	38	1.86	0.96
13	2.63	1.36	39	0.00	1.31
14	1.95	1.39	40	0.00	1.06
15	1.85	1.25	41	0.00	1.10
16	2.94	1.10	42	0.00	1.25
17	2.56	1.18	43	0.00	1.04
18	1.78	1.45	44	0.00	1.00
19	2.08	1.04			
20	2.21	1.22			
21	1.90	0.95			
22	2.51	0.87			
23	1.78	1.32			
24	1.92	1.03			
25	1.80	1.33			
26	1.94	1.00			

-ค่าเฉลี่ย AVT ของข้อมูลโลหะแบบต่อเนื่องเท่ากับ 2.11

-ค่าเฉลี่ย AVT ของข้อมูลโลหะแบบแตกหักเท่ากับ 1.17

-ดังนั้นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของข้อมูลทั้งหมด คือ  $((2.11 \times 38) + (1.17 \times 44))/82 = 1.605$

ซึ่งเมื่อนำข้อมูลค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์จากตัวแปรทั้งสองชนิดจากรายที่ 4.1 และ 4.2 มาพล็อตกราฟลงในพื้นที่อ้างอิงและใช้ค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของข้อมูลการทดลองเป็นค่าเกณฑ์ควบคุมสามารถแสดง ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AX กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง

จากรูปที่ 4.7 เห็นได้ว่าจุดวงกลมที่แสดงในพื้นที่อ้างอิงมุมบนขวานั้น คือกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่ก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องขึ้น เนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ AVT และ AX มีค่าสูงเกินกว่าค่าพารามิเตอร์เงื่อนไขการตัดอื่นๆ ทำให้สามารถพิจารณาค่าเกณฑ์ควบคุมได้ดังนี้  $C1 = 0.8$  และ  $C4 = 1.6$  ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่า เมื่อค่าพารามิเตอร์ AVT และ AX ที่เงื่อนไขการตัดใดมีค่าสูงกว่าค่าเกณฑ์ควบคุมเหล่านี้ ที่สภาวะการตัดนั้นจะเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องรอบวงกระบวนการตัด

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัดส่วนของความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงตัดหลักต่อแรงตัดรัศมี (AY) และการคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก (C2)

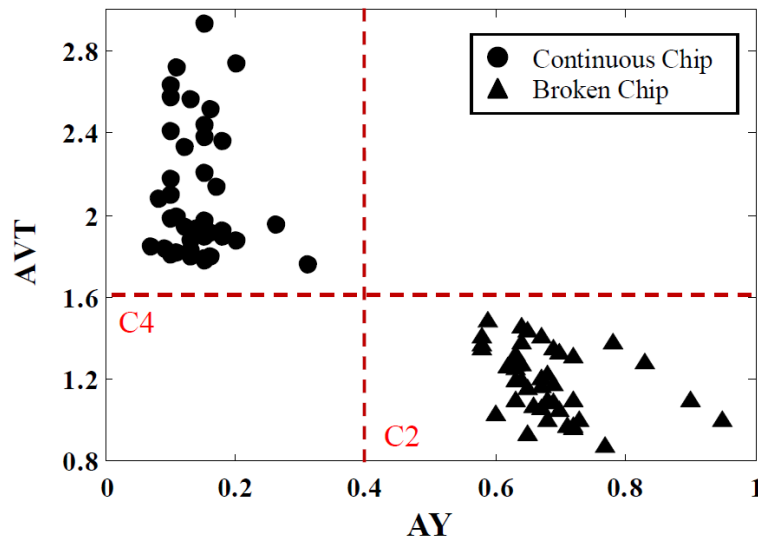
เงื่อนไข การ ทดลอง	ค่าอัตราส่วนของความหนาแน่น เพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงตัดหลักต่อ แรงตัดรัศมี (AY)		เงื่อนไข การ ทดลอง	ค่าอัตราส่วนของความหนาแน่น เพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงตัดหลักต่อ แรงตัดรัศมี (AY)	
	เศษโลหะ แบบต่อเนื่อง	เศษโลหะแบบ แตกหัก		เศษโลหะ แบบต่อเนื่อง	เศษโลหะแบบ แตกหัก
1	0.10	0.63	27	0.14	0.73
2	0.10	0.66	28	0.15	0.72
3	0.11	0.72	29	0.15	0.63
4	0.10	0.62	30	0.17	0.65
5	0.11	0.60	31	0.10	0.67
6	0.11	0.65	32	0.15	0.65
7	0.09	0.68	33	0.13	0.83
8	0.10	0.67	34	0.18	0.62
9	0.10	0.58	35	0.31	0.63
10	0.12	0.63	36	0.12	0.57
11	0.13	0.62	37	0.20	0.68
12	0.10	0.60	38	0.18	0.69
13	0.10	0.78	39	0.00	0.64
14	0.13	0.67	40	0.00	0.62
15	0.24	0.58	41	0.00	0.58
16	0.07	0.64	42	0.00	0.90
17	0.15	0.63	43	0.00	0.63
18	0.13	0.62	44	0.00	0.95
19	0.15	0.59			
20	0.08	0.67			
21	0.15	0.68			
22	0.15	0.71			
23	0.16	0.77			
24	0.15	0.69			
25	0.16	0.70			
26	0.10	0.70			

-ค่าเฉลี่ย AY ของข้อมูลเศษโลหะแบบต่อเนื่องเท่ากับ 0.13

-ค่าเฉลี่ย AY ของข้อมูลเศษโลหะแบบแตกหักเท่ากับ 0.67

-ดังนั้นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของข้อมูลทั้งหมดคือ  $((0.13 \times 38) + (0.67 \times 44))/82 = 0.419$

ซึ่งเมื่อนำข้อมูลค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์จากตัวแปร AVT และ AY จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ มาพล็อตกราฟลงในพื้นที่อ้างอิงและใช้ค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของข้อมูลการทดลองเป็นค่าเกณฑ์ควบคุมสามารถแสดง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AY กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง

จากรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่าจุดวงกลมที่แสดงในพื้นที่อ้างอิงมุมบนซ้ายนั้น คือกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่ก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องขึ้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ AVT มีค่าสูงแต่ AY มีค่าต่ำกว่าค่าพารามิเตอร์เงื่อนไขการตัดอื่นๆ ทำให้สามารถพิจารณาค่าเกณฑ์ควบคุมได้ดังนี้  $C2 = 0.4$  และ  $C4 = 1.6$  ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัดส่วนของความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงป้อนตัดต่อแรงดันตัว (AZ) และการคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลเฉพาะโลหะแบบต่อเนื่องและเฉพาะโลหะแบบแตกหัก (C3)

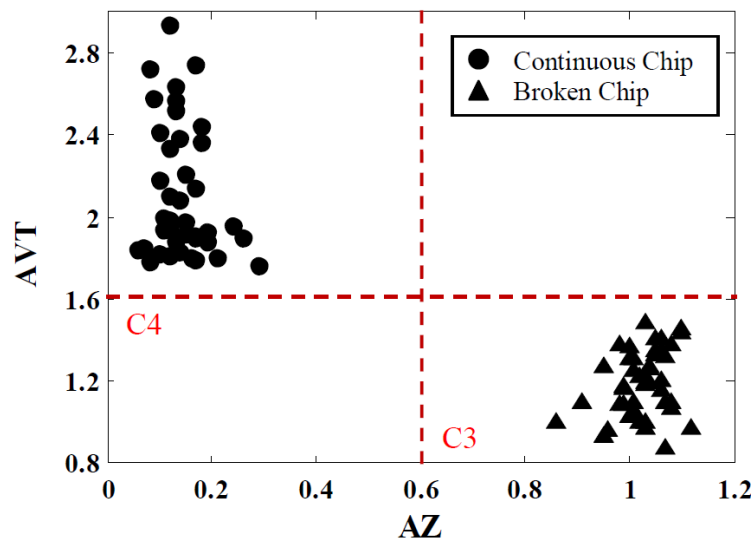
เงื่อนไขการทดลอง	ค่าอัตราส่วนของความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงป้อนตัดต่อแรงดันตัว (AZ)		เงื่อนไขการทดลอง	ค่าอัตราส่วนของความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมบนแรงป้อนตัดต่อแรงดันตัว (AZ)	
	เฉพาะโลหะแบบต่อเนื่อง	เฉพาะโลหะแบบแตกหัก		เฉพาะโลหะแบบต่อเนื่อง	เฉพาะโลหะแบบแตกหัก
1	0.1	1.07	27	0.11	1.03
2	0.12	1.08	28	0.15	1
3	0.08	1.12	29	0.14	0.95
4	0.12	1.1	30	0.13	0.99
5	0.1	1.06	31	0.19	0.99
6	0.11	1.1	32	0.17	0.95
7	0.06	1.08	33	0.18	1.03
8	0.1	1.05	34	0.26	1.01
9	0.09	1	35	0.29	1.01
10	0.12	1.04	36	0.12	0.99
11	0.14	1.04	37	0.17	1.02
12	0.12	1	38	0.18	0.98
13	0.13	1.08	39	0	0.98
14	0.21	1.06	40	0	0.96
15	0.24	1.06	41	0	1.06
16	0.07	1.04	42	0	0.91
17	0.12	1.07	43	0	1.01
18	0.13	1.03	44	0	0.86
19	0.08	1.03			
20	0.14	1.01			
21	0.15	1.02			
22	0.15	1.03			
23	0.13	1.07			
24	0.17	1.05			
25	0.15	1.01			
26	0.16	1.05			

-ค่าเฉลี่ย AZ ของข้อมูลเฉพาะโลหะแบบต่อเนื่องเท่ากับ 0.13

-ค่าเฉลี่ย AZ ของข้อมูลเฉพาะโลหะแบบแตกหักเท่ากับ 1.02

-ดังนั้นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของข้อมูลทั้งหมดคือ  $((0.13 \times 38) + (1.02 \times 44))/82 = 0.607$

จากรูปที่ 4.9 เห็นได้ว่าจุดวงกลมที่แสดงในพื้นที่อ้างอิงมุมบนซ้ายนั้น คือกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่ก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องขึ้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ AVT มีค่าสูงแต่ AZ มีค่าต่ำกว่าค่าพารามิเตอร์เงื่อนไขการตัดอื่นๆ ทำให้สามารถพิจารณาค่าเกณฑ์ควบคุมได้ดังนี้  $C3 = 0.6$  และ  $C4 = 1.6$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AZ กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง

จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 ดังแสดงข้างต้นนั้น สรุปได้ว่าค่าเกณฑ์ในการตรวจจับเศษโลหะแบบแตกหักและแบบต่อเนื่องประกอบด้วย  $C1 = 0.8$ ,  $C2 = 0.4$ ,  $C3 = 0.6$  และ  $C4 = 1.6$  ตามลำดับ ดังนั้นการแตกหักของเศษโลหะสามารถตรวจจับในกระบวนการตัด โดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งรูปแบบในการตัดสินใจระหว่างกระบวนการถึงผิวปกจะอ้างอิงจากค่าพารามิเตอร์ AX, AY, AZ และ AVT โดยสรุปได้ดังนี้

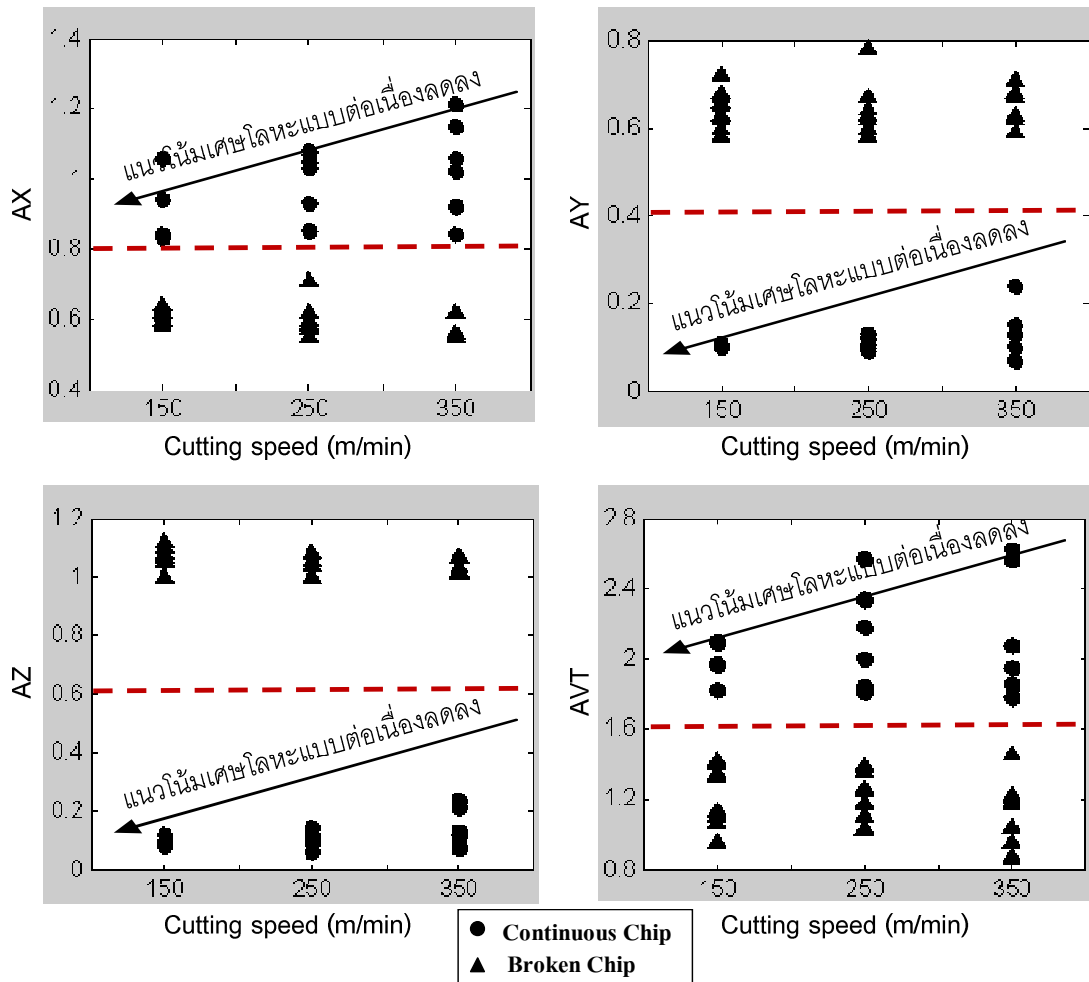
1). เศษโลหะแบบแตกหักจะถูกตรวจจับได้เมื่อค่า AX และ AVT มีค่าน้อยกว่าค่าเกณฑ์การตรวจจับ  $C1$  และ  $C4$  ตามลำดับ ในขณะที่ ค่า AY และ AZ ต้องมีค่ามากกว่าค่าเกณฑ์การตรวจจับ  $C2$  และ  $C3$  ตามลำดับ

2). เศษโลหะแบบต่อเนื่องจะถูกตรวจจับได้เมื่อค่า AX และ AVT มีค่ามากกว่าค่าเกณฑ์การตรวจจับ  $C1$  และ  $C4$  ตามลำดับ ในขณะที่ ค่า AY และ AZ ต้องมีค่าน้อยกว่าค่าเกณฑ์การตรวจจับ  $C2$  และ  $C3$  ตามลำดับ

#### 4.4 อิทธิพลของพารามิเตอร์ AX, AY, AZ และ AVT ที่ส่งผลต่อรูปแบบเศษโลหะและการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด

ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของปริมาณการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัด เพื่อประโยชน์ในการเสนอการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง โดยผลของเงื่อนไขการตัดที่ส่งผลต่อรูปแบบเศษโลหะได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยถัดไป

##### 4.4.1 ผลของความเร็วรอบตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะ



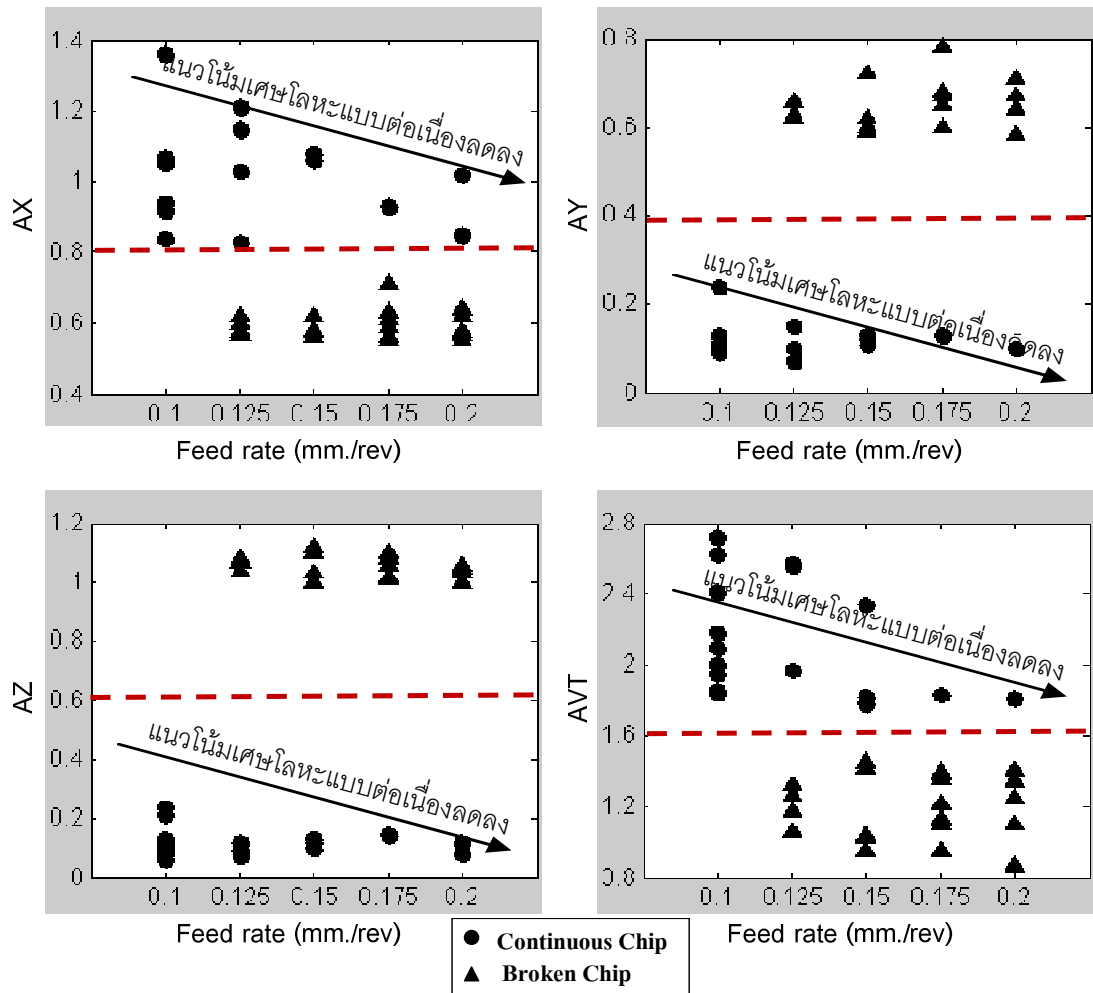
รูปที่ 4.10 : แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AX, AY, AZ และ AVT กับความเร็วรอบตัด

จากรูปที่ 4.10 การแตกหักของเศษโลหะหากวิเคราะห์ที่จำนวนการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะพบว่าหากใช้ความเร็วรอบต่ำในการกลึงชิ้นงานจะก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องน้อยกว่าการใช้ความเร็วรอบสูง เนื่องจากเมื่อใช้ความเร็วรอบตัดสูงจะให้มุมเฉือนที่ใหญ่ขึ้นตามทฤษฎีการตัด ซึ่งมุมเฉือนที่มากขึ้นจะทำให้เศษโลหะที่หลุดออกมาบางลงและแตกหักได้ง่ายขึ้นนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เข้าใจได้ว่าเมื่อความเร็วรอบตัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิการตัด



นั้นสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นจากรูปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ต่อความเร็วตัดช่วยในการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดเพื่อตรวจจับเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้

#### 4.4.2 ผลของอัตราป้อนต่อการแตกหักของเศษโลหะ

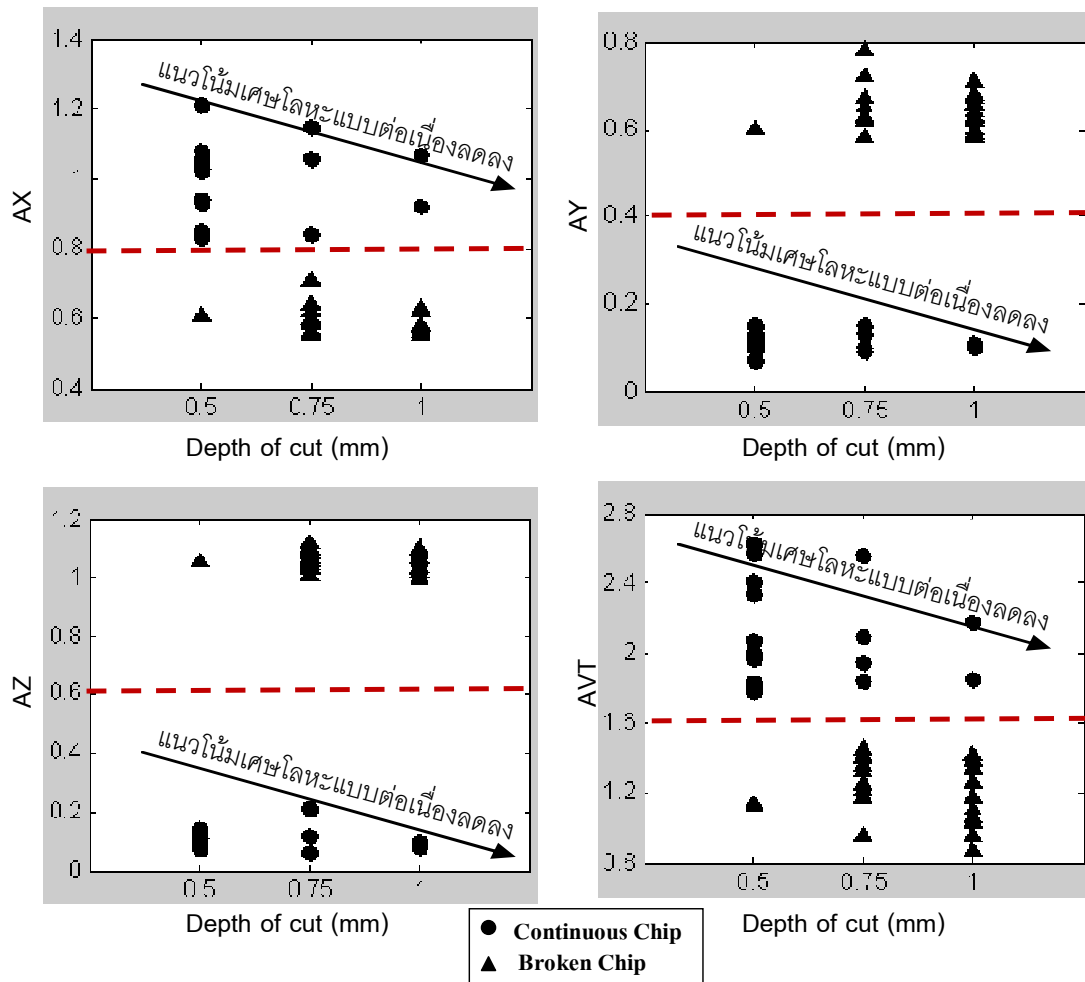


รูปที่ 4.11 : แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AVT กับอัตราป้อนตัด

จากรูปที่ 4.11 หากวิเคราะห์ที่จำนวนการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะพบว่าหากใช้อัตราป้อนตัดต่ำในการกลึงชิ้นงานจะก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องมากกว่าการใช้อัตราป้อนตัดที่สูงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อใช้อัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของเศษโลหะเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มที่จะโค้งมาชนกับเม็ดมีด ทำให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะส่งผลให้ลดการสะสมของความร้อนบนหน้ามีดตัด จากรูปที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 สามารถจำแนกเศษโลหะแบบแตกหักและแบบต่อเนื่องที่อัตราป้อนตัดต่างๆ ได้ เนื่องจากมีของแนวโน้มการลดลงของเศษโลหะแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกันทั้ง 4 พารามิเตอร์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงนำค่าพารามิเตอร์ AX,

AY, AZ และ AVT ต่ออัตราการป้อนตัดมาช่วยในการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดเพื่อตรวจจับเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้

#### 4.4.3 ผลของความลึกตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะ



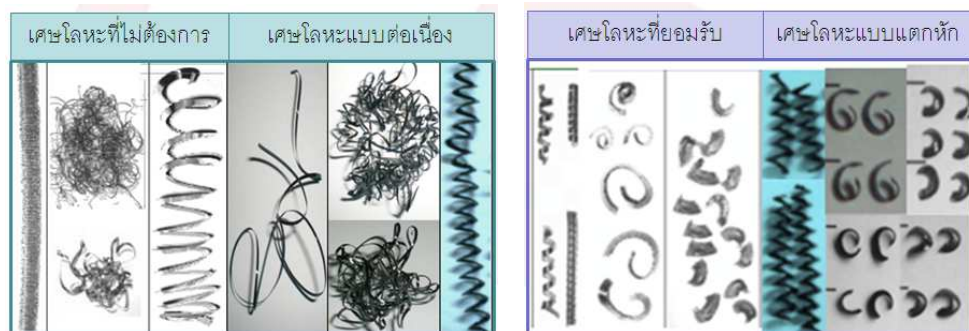
รูปที่ 4.12 : แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AVT กับความลึกของการตัด

จากรูปที่ 4.12 หากวิเคราะห์ที่จำนวนการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะพบว่าหากใช้ความลึกของการตัดต่ำในการกลึงชิ้นงานจะก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องมากกว่าการใช้ความลึกของการตัดสูง เนื่องจากเมื่อใช้ความลึกของการตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาและความกว้างของเศษโลหะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายและสามารถปลดปล่อยความร้อนไปกับเศษโลหะได้มากขึ้น ส่งผลต่อความร้อนสะสมบนหน้ามีดตัดที่ลดลงดังจะเห็นได้จากค่าพารามิเตอร์ AX, AY, AZ และ AVT สามารถจำแนกเศษโลหะแบบแตกหักและแบบต่อเนื่องที่ความลึกของการตัดต่างๆ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 มาช่วยในการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดเพื่อตรวจจับเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้

#### 4.4.4 รูปแบบการแตกหักเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก

จากตารางที่ 4.5 แสดงรูปแบบเศษโลหะที่ได้จากการทดลอง พบว่าเศษโลหะที่จะให้ผลสัญญาณแรงตัดและสัญญาณอุณหภูมิตัดที่สามารถนำมาจำแนกรูปแบบโลหะโดยใช้การรู้จำรูปแบบทางสถิตินั้นจะมีความยาวของเศษโลหะ 2 แบบ คือ

1. แบบที่ยาวน้อยกว่า 5 เซนติเมตร ประกอบด้วยเศษโลหะรูปแบบ helical chips และ short tubular chips จะเกิดที่อัตราป้อนตัดและความลึกตัดน้อยๆ ส่วน spiral chips, และ long comma chips จะเกิดที่อัตราป้อนตัดและความลึกตัดมากๆ ซึ่งเศษโลหะในลักษณะนี้ในงานวิจัยนี้ขอนิยามให้เป็น “เศษโลหะแบบแตกหัก”.
2. แบบที่ยาวเกินกว่า 5 เซนติเมตร ประกอบด้วยเศษโลหะรูปแบบ corkscrew chips จะเกิดที่อัตราป้อนตัดและความลึกตัดน้อยๆ โดยเศษโลหะรูปแบบนี้จะก่อให้เกิดความเสียหายบนคมตัดบริเวณที่เกิดการตัดและด้ามมีดจับ จึงจำเป็นต้องกำจัดเศษโลหะชนิดนี้ออกจากผิวหอบ (the flank of the tool) <sup>[28]</sup> ส่วน ribbon chips, tangled chips จะเกิดที่อัตราป้อนตัดน้อย แต่ความลึกตัดมาก โดยเศษตัดชนิดนี้ไม่ส่งผลเสียต่อคมตัดแต่จะก่อให้เกิดความยุ่งยากในการกำจัดเศษโลหะและอาจทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับความบาดเจ็บได้ ซึ่งเศษโลหะในลักษณะนี้ในงานวิจัยนี้ขอนิยามให้เป็น “เศษโลหะแบบต่อเนื่อง”



รูปที่ 4.13 : เปรียบเทียบรูปร่างเศษโลหะที่ได้จากการทดลองกับ ISO 3685-1993

1. Ribbon chips, 2. Tangled chips, 3. Corkscrew chips

จากการวิเคราะห์ข้างต้นเงื่อนไขการตัดที่ก่อให้เกิดเศษโลหะทั้ง 2 รูปแบบเป็นไปตามทฤษฎี<sup>[33]</sup> จึงมั่นใจได้ว่าการนำสัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิขณะตัดของเศษโลหะเหล่านี้มาใช้มีความแม่นยำและเหมาะสมเพียงพอ

ตารางที่ 4.5 แสดงรูปร่างของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะภายใต้เงื่อนไขการตัดจากการทดลอง

	Cutting Speed 150 m/min			Cutting Speed 250 m/min			Cutting Speed 350 m/min		
	Depth of cut (mm)			Depth of cut (mm)			Depth of cut (mm)		
	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00
Feed rate 0.100 mm/rev									
Feed rate 0.125 mm/rev									
Feed rate 0.150 mm/rev									
Feed rate 0.175 mm/rev									
Feed rate 0.200 mm/rev									

จากหัวข้อที่ 4.4.1 - 4.4.3 ได้เสนอเงื่อนไขเพิ่มเติมเพื่อหลีกเลี่ยงเงื่อนไขการตัดที่ก่อให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง คือเมื่อค่าพารามิเตอร์ AX, AY, AZ และ AVT ไม่เป็นไปตามค่าเกณฑ์ควบคุม อัลกอริทึมจะส่งค่าออกไปให้กลับไปสู่ขั้นตอนการปรับเงื่อนไขการตัดใหม่โดยจะเสนอให้

- เพิ่มอัตราป้อนตัด
- ลดความเร็วรอบในการตัด
- เพิ่มความลึกในการตัด

ซึ่งการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขนี้สอดคล้องกับทฤษฎีการตัดทั่วไปและงานวิจัยที่ผ่านมาเรื่องระบบการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะเชิงปัญญา<sup>[4][32]</sup> โดยมีลำดับการปรับเงื่อนไขการตัดดังนี้

### อันดับ 1. พิจารณาอัตราป้อนตัด

ในกระบวนการกลึงต้องคำนึงถึงคุณภาพของผิวชิ้นงานอัตราการผลิตมาเป็นอันดับหนึ่ง ซึ่งเงื่อนไขการตัดที่ส่งผลต่อความเรียบของผิวชิ้นงานมากที่สุด คือ “อัตราป้อนตัด” โดยทฤษฎีความเรียบผิวสามารถคำนวณได้จากอัตราป้อนตัด ซึ่งกล่าวไว้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัดจะทำให้คุณภาพผิวของชิ้นงานดีขึ้นแต่เพิ่มอัตราป้อนตัดได้เพียงระดับหนึ่งที่มีความเรียบผิวยอมรับได้เท่านั้น และผลจากหัวข้อที่ 4.4.2 ผลของอัตราป้อนตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะยังชี้ให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัดจะช่วยลดการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องได้ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าหากเพิ่มอัตราป้อนตัด จะทำให้เกิดเศษตัดงอและหักง่ายขึ้น

### อันดับ 2. พิจารณาความเร็วตัด

เนื่องจากความเร็วตัดส่งผลต่ออุณหภูมิในการตัดและความเร็วในการผลิตชิ้นงานซึ่งหากลดความเร็วตัดลงต้องใช้เวลาสำหรับการผลิตมากขึ้น และเมื่อเพิ่มความเร็วตัดให้สูงขึ้น จะทำให้มุมเฉือนมีขนาดโตขึ้นส่งผลให้มุมคายเศษโตขึ้น เกิดเศษโลหะแบบบางและหักยาก และจากทฤษฎีอุณหภูมิในการตัดได้อธิบายไว้ว่าความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเปลี่ยนรูปโลหะเป็นเศษโลหะนั้นจะหลุดออกไปกับเศษโลหะมากที่สุด ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิการตัดไม่ให้สูงเกินไปจึงควรใช้ความเร็วตัดน้อยๆเพื่อให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหักและลดการสึกหรอของมีดตัดที่เกิดจากความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลจากหัวข้อที่ 4.4.1 ผลของความเร็วตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะ ซึ่งแนะนำให้ใช้ความเร็วตัดลดลงเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เนื่องจากให้ค่าสัดส่วนความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิตัด (AVT) ที่น้อยกว่า

### อันดับ 3. พิจารณาความลึกตัด

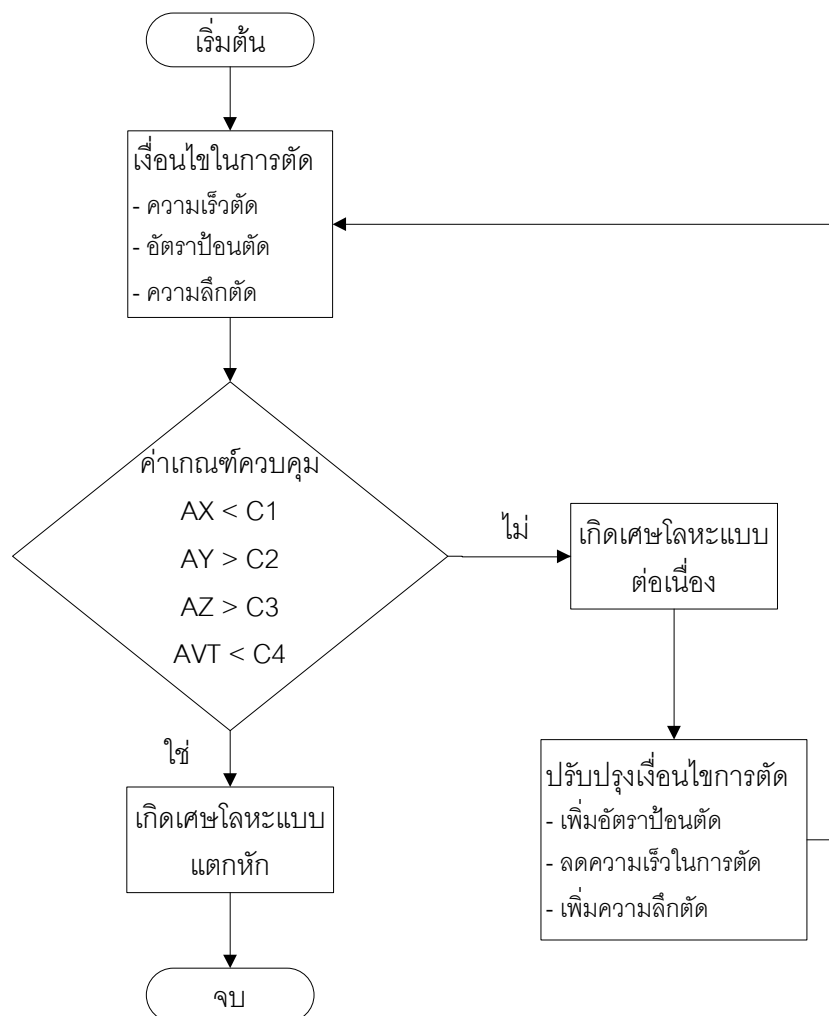
สำหรับการปรับปรุงเงื่อนไขการตัดนั้น จะพิจารณาการปรับเงื่อนไขความลึกตัดไว้ในอันดับสุดท้าย เนื่องจากหากเกิดการปรับค่าความลึกตัดจะส่งผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงานโดยตรงดังนั้นผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่จะหลีกเลี่ยงการปรับค่าความลึกตัดในลำดับแรกๆหากเกิด

ปัญหาระหว่างการกลึง เนื่องจากเมื่อขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขอื่นๆที่ต้องป้อนเข้าสู่เครื่องกลึงซีเอ็นซี

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากหัวข้อที่ 4.1-4.4 จึงเป็นที่มาของอัลกอริทึมแสดงการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะรูปที่ 4.14 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- ป้อนเงื่อนไขการตัดชิ้นงานเข้าสู่เครื่องกลึงซีเอ็นซี ทำการตัดชิ้นงาน เก็บสัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิขณะตัด
- ตรวจสอบสถานะการตัดด้วยค่าเกณฑ์ควบคุมที่สร้างขึ้น และส่งข้อมูลย้อนกลับเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง
- ปรับปรุงเงื่อนไขการตัดโดยลำดับความสำคัญการปรับค่าตามข้อมูลข้างต้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการทดลองบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ยังไม่สามารถป้อนโปรแกรม(Offline) การตรวจจับสถานะการกลึงได้ อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นนี้จึงพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับกระบวนการกลึงชิ้นงานที่สามารถเชื่อมต่อและตอบกลับกระบวนการทำงานแบบทันที (Online) ในอนาคต



รูปที่ 4.14 : แสดงอัลกอริทึมตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะแบบแตกหักและต่อเนื่องในกระบวนการกลึง

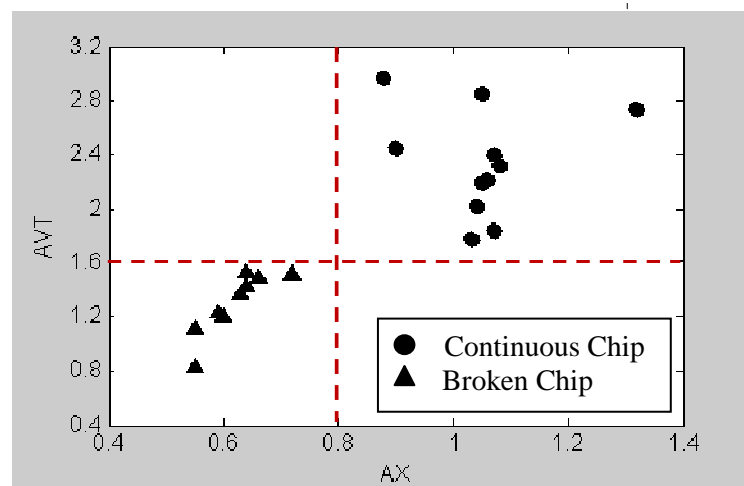
#### 4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมานั้น จำเป็นต้องได้รับการยืนยันความแม่นยำ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบความแม่นยำเพิ่มเติมโดยการขยายขอบเขตเงื่อนไขการตัดออกไป โดยในที่นี้เลือกขยายขอบเขตการตัดด้านความลึกตัด เนื่องจากหัวข้อที่ 4.4.3 แสดงให้เห็นว่า ความลึกตัดมีอิทธิพลต่อการแตกหักของเศษโลหะมากที่สุด ดังนั้นเงื่อนไขในการตัดทดสอบจึงเป็นดังนี้

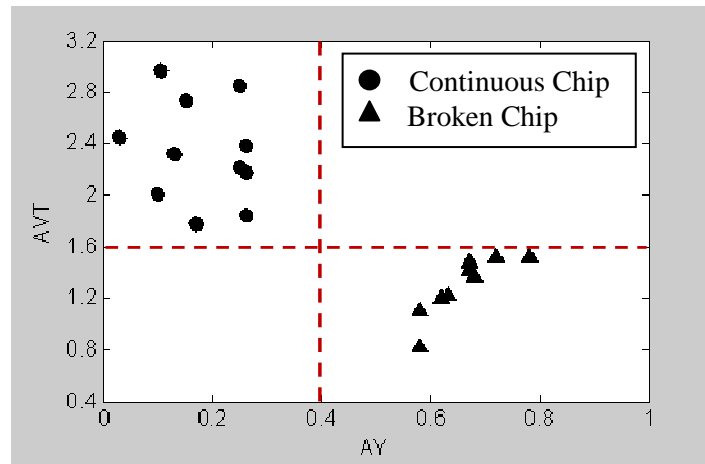
ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขการตัดเพื่อทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

เงื่อนไขของการตัด	
ความเร็วตัด	150, 250, 350
อัตราป้อนตัด	0.100, 0.150, 0.200
ความลึกตัด	0.25, 1.50

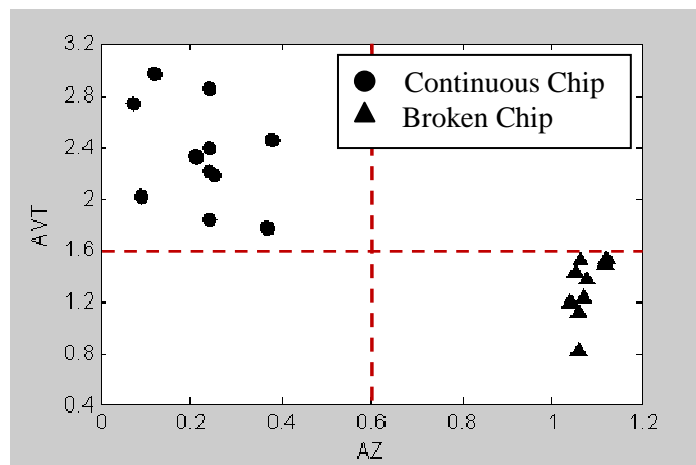
ซึ่งจากผลการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดจากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าเกณฑ์ควบคุมที่ได้จากผลการทดลองก่อนหน้านี้นี้ยังสามารถใช้ได้ดี เมื่อขยายเงื่อนไขการตัดออกไป ทั้งยังสามารถตรวจจับรูปแบบของเศษโลหะที่ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการตัดขึ้นงานได้ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.7 แสดงรูปแบบเศษโลหะแบบแตกหักซึ่งมีความยาวน้อยกว่า 5 เซนติเมตรและเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะมีความยาวมากกว่า 5 เซนติเมตร ซึ่งสามารถรบกวนมีดตัดและส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวของขึ้นงานได้ตามที่ได้อ้างไว้ในหัวข้อที่ 4.4.4



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.15 ยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์แรงตัดและค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิตัดในพื้นที่อ้างอิง

- (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AX กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง
- (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AY กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง
- (c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AZ กับ AVT ในพื้นที่อ้างอิง

ทั้งนี้ลักษณะเศษโลหะที่ได้จากการวิจัยจากตารางที่ 4.5 และ 4.7 สามารถนำมาใช้อ้างอิงในการพิจารณาเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด เมื่อเกิดเศษโลหะที่ส่งผลเสียในระหว่างการตัดได้อีกด้วย



ตารางที่ 4.7 แสดงรูปร่างของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะภายใต้เงื่อนไขการตัดเพื่อยืนยันผลการทดลอง

	Cutting Speed 150 m/min		Cutting Speed 250 m/min		Cutting Speed 350 m/min	
	Depth of cut (mm)		Depth of cut (mm)		Depth of cut (mm)	
	0.25	1.5	0.25	1.5	0.25	1.5
Feed rate 0.10 mm/rev						
Feed rate 0.15 mm/rev						
Feed rate 0.20 mm/rev						
Feed rate 0.25 mm/rev						

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะโดยใช้เซนเซอร์วัดแรงตัดและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิร่วมกันนั้น จากผลการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหักจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของเพาเวอร์สเปคตรัมในช่วงความถี่คงที่ สูงกว่า 500 เฮิรตซ์ ทั้ง 3 แกนของแรงตัด ซึ่งแตกต่างกับการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่จะส่งผลเมื่อค่าความหนาแน่นของเพาเวอร์สเปคตรัมในช่วงความถี่คงที่ ต่ำกว่า 100 เฮิรตซ์ ทั้ง 3 แกนของแรงตัด ส่วนผลการวิเคราะห์สัญญาณอุณหภูมิตัดเมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหักค่าความแปรปรวนสูงสุดและค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของอุณหภูมิตัดนั้น มีขนาดใกล้เคียงกัน แตกต่างกับเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่จะมีค่าความแปรปรวนสูงสุดและค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของอุณหภูมิตัดนั้น แตกต่างกันมาก เนื่องจากสัญญาณเกิดแอมพลิจูดขนาดใหญ่อย่างฉับพลัน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงนำมาวิเคราะห์ในรูปอัตราส่วนเพื่อเสนอพารามิเตอร์ใหม่ 4 ตัว คือ AX, AY, AZ และ AVT ซึ่งผลจากการคำนวณอัตราส่วนความหนาแน่นเพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดพลวัตในแนวแรงทั้ง 3 แกน คือ แรงในแนวรัศมี แรงในแนวป้อนตัด และแรงในแนวหลัก มาพล็อตลงในพื้นที่อ้างอิง ซึ่งสามารถพิจารณากำหนดค่าเกณฑ์ควบคุมได้คือ  $C1= 0.8$ ,  $C2=0.4$ ,  $C3=0.6$  และ  $C4=1.6$  ตามลำดับ โดยเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ค่า AX จะน้อยกว่า 0.8, ค่า AY จะมากกว่า 0.4, ค่า AZ จะมากกว่า 0.6 และ ค่า AVT จะมากกว่า 1.6 ซึ่งจะทำให้ระบบการตรวจจับทราบว่าเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องต้องทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด ทั้งนี้ในอัลกอริทึมที่ได้เสนอไปนั้นยังคงต้องใช้พารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวช่วยในการตรวจจับเศษโลหะถึงแม้ว่าจากรูปที่ 4.6-4.8 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวสามารถจำแนกเศษโลหะได้อย่างชัดเจน แต่เพื่อความแม่นยำของระบบตรวจจับเบื้องต้นจึงแนะนำให้ใช้พารามิเตอร์ทุกตัว เพราะบางกรณีอาจเกิดเศษโลหะที่ไม่พึงประสงค์นอกเหนือจากที่ได้ทำการทดลองมา

ทั้งนี้พารามิเตอร์ทั้งหมดเมื่อถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อบ่งชี้รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้จดจำแล้วนั้น ได้ถูกนำมาเสนอเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะและขั้นตอนในการหลีกเลี่ยงการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความเสถียรและความน่าเชื่อถือให้แก่กระบวนการกลึง โดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ตารางที่ 4.5 และ 4.7 ยังสามารถนำมาเป็นคู่มือในการเลือกใช้เงื่อนไขการตัดที่ไม่ก่อให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในกระบวนการกลึงได้อีกด้วย

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

- 1) การเลือกใช้อัตราส่วนค่าความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมแรงตัดพลวัตและค่าความแปรปรวนอุณหภูมิตัดมาทำการศึกษานั้น เนื่องจากข้อมูลทั้งสองค่ามีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่เหมาะสมสำหรับการตรวจจ็บบรูปแบบของเศษโลหะ ทั้งยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ถึงแม้ว่าเงื่อนไขของการตัดจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม
  - 2) ช่วงความถี่ของการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักที่เกิดขึ้นที่ช่วงมากกว่า 500 เฮิร์ตซ์ที่นำมาใช้ตรวจจ็บบการแตกหักของเศษโลหะในงานวิจัยนี้ เป็นช่วงความถี่ที่ขึ้นกับวัสดุของชิ้นงานและมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเมื่อเปลี่ยนวัสดุ อาจส่งผลให้ช่วงความถี่การแตกหักของเศษโลหะที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงได้
  - 3) จากผลการทดลองที่ได้รับจะเห็นได้ว่า สัญญาณจากเซนเซอร์แรงตัดจะมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าสัญญาณจากเซนเซอร์อุณหภูมิตัดซึ่งมีสาเหตุมาจากเซนเซอร์แรงตัดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่มั่นคงที่สุดเพราะติดอยู่กับชุดป้อมมีด (Turret) ของเครื่องกลึง ส่วนเซนเซอร์วัดอุณหภูมินั้นต้องใช้ fixture ตัวยึดหัววัดไพโรมิเตอร์เพื่อยึดให้หัววัดอินฟราเรดทำมุมกับเม็ดมีดในองศาที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ ซึ่งมีความมั่นคงน้อยกว่าเซนเซอร์แรงตัดแต่มุมที่ติดตั้งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้เท่านั้น
  - 4) เซนเซอร์แต่ละชนิดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ แต่ละตัวจะมีลักษณะที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการตรวจจ็บบการแตกหักของเศษโลหะขณะทำการกลึงแตกต่างกัน ดังนี้
    - เซนเซอร์แรงตัดจะเหมาะสมสำหรับการตรวจจ็บบการแตกหักของเศษโลหะขณะทำการกลึงมากที่สุด เพราะสามารถตรวจสอบช่วงความถี่ที่เกิดการแตกหักของเศษโลหะได้ เนื่องจากแรงตัดจะสูงขึ้นตามการแตกหักที่เพิ่มขึ้น
    - เซนเซอร์อุณหภูมิตัดชนิดไม่สัมผัสหรืออินฟราเรดไพโรมิเตอร์ มีความเหมาะสมกับการนำมาตรวจจ็บบความร้อนที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วบริเวณการตัดของกระบวนการกลึงมากที่สุด เนื่องจาก
      - สามารถวัดรังสีความร้อนจากจุดตัดชิ้นงานได้โดยตรง และไม่ต้องสัมผัสกับตัวชิ้นงาน
      - สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว
      - ใช้ได้ง่ายในการวัดอุณหภูมิการตัดที่สูง โดยปราศจากการรบกวนจากการกระจายตัวของความร้อน เหมาะกับการวัดอุณหภูมิในพื้นที่การตัดที่จำกัด เป้าหมายมีขนาดเล็กแคบและลาดชัน
- จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นเซนเซอร์อุณหภูมิตัดจึงสามารถวัดความแปรปรวนของอุณหภูมิขณะเกิดการแตกหักของเศษโลหะในกระบวนการกลึงได้เป็นอย่างดี

### 5.3 อุปสรรคในการวิจัย

- 1) เนื่องจากทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล เพื่อหาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดที่มีต่อรูปแบบของเศษโลหะ ทำให้มีจำนวนการทดลองต่อครั้งจำนวนมาก งานวิจัยนี้จึงไม่มีการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไขการตัดของการทดลอง เนื่องจากมีดกึ่งและชิ้นงานที่ใช้ทดลองนั้นมีราคาต่อหน่วยสูงมาก ซึ่งการทำซ้ำจะทำให้ผลการทดลองที่ได้รับมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น
- 2) ปัญหาของการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากการทดลองบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีครั้งนี้ต้องติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้วัด 2 ชนิดใหม่ทุกครั้งที่ทำการทดลอง โดยเฉพาะการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ต้องใช้ความเชี่ยวชาญของผู้ติดตั้งในการปรับระยะไฟกึ่งที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ติดตั้งภายในเครื่องกลึงในแต่ละครั้งอาจแตกต่างกันเล็กน้อย อาจส่งผลทำให้สัญญาณที่ได้รับในแต่ละครั้งของการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนได้
- 3) ในการทดลองแต่ละครั้งต้องมีผู้ปฏิบัติงานอย่างน้อยสองคน เนื่องจากต้องทำการเปิดรับและบันทึกสัญญาณแรงตัดและสัญญาณอุณหภูมิพร้อมๆกันในขณะที่ต้องป้อนเงื่อนไขการตัดให้แก่โปรแกรมบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไปควรมีการปรับปรุงกรณีให้สามารถรวบรวมสัญญาณจาก 2 เซนเซอร์ได้ ณ จุดเดียวกัน

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการทดลองควรทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขการตัด เพื่อให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือมากขึ้น
- 2) สำหรับการวัดอุณหภูมิเพื่อให้ผลการศึกษาน่าเชื่อถือได้มากขึ้นควรมีการวัดอุณหภูมิด้วยวิธีการอื่นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากไพโรมิเตอร์ เช่น ใช้เทอร์โมคัปเปิล(Thermo Coupler)
- 3) ในบางการทดลองจะต้องเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) ม้วนยาว ควรจะต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษในการใช้งานของเครื่องมือต่างๆ เช่น สายของเครื่องวัดอุณหภูมิ, สายวัดแรงตัด และการที่เศษโลหะเข้าไปติดระหว่างมีดตัดและชิ้นงาน
- 4) ในการวัดสัญญาณควรที่จะต้องมีการลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น โดยการต่อสายดิน, การใช้ฉนวนห่อหุ้มสายสัญญาณ

- 5) หลักเกณฑ์การหาเส้นแบ่งเพื่อกำหนดค่าเกณฑ์ควบคุมในงานวิจัยนี้ ใช้การหาค่าเฉลี่ยโดยถ่วงน้ำหนัก ซึ่งเหมาะกับงานวิจัยที่ออกแบบมาให้สมาชิกในกลุ่มการทดลองแต่ละกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน แต่หากงานวิจัยใดมีค่าสมาชิกในกลุ่มการทดลองที่แตกต่างกันมากควรเปลี่ยนแปลงวิธีหาเส้นแบ่งกลุ่มใหม่ เช่น การนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) มาใช้

## รายการอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ. เอกสารประกอบการสอนวิชา Advanced Manufacturing Engineering, 2008.
- [2] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ. โลกแห่งการผลิตในอนาคต.วารสารข่าวและความรู้, 2551.
- [3] ปิยะ ศิริธรรมปิติ. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [4] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ. ระบบการตรวจจัดการแตกหักของเศษโลหะเชิงปัญญา. Proceedings of IE Network Conference, Thailand, 2005. (3-5 October 2005).
- [5] นายสมชาติ อารยพิทยา. การสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้ง, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [6] Groover, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 2<sup>nd</sup> Edition. USA: John Wiley & Sons, 2004.
- [7] Kalpakjian, S., and Schmid, S. Manufacturing Engineering and Technology. 5<sup>th</sup> Edition. Singapore: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [8] ชาญ ราชวงศ์. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในการกลึงงานแข็ง, วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [9] อำนาจ ทองแสน. ทฤษฎีและการเขียนโปรแกรม CNC สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลด้วย คอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control). กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544.
- [10] Uddeholm Corrax. CUTTING DATA RECOMMENDATIONS, Sweden, 2007.
- [11] Milton, C.S. Metal Cutting Principles, 2<sup>nd</sup> Edition. Oxford & I B H Publishing Co., 2005
- [12] International standard ISO 3685. Tool-life testing with single-point turning tool. 2<sup>nd</sup> edition. Switzerland: 1993.
- [13] O'Sullivan, D., and Cotterell, M. Temperature measurement in single point turning Journal of Materials Processing Technology, 2001.
- [14] Bruce, R. G., Tomovic, M. M., Neely, J. E. and Kibbe, R.R. Modern materials and manufacturing Process : 1998.

- [15] Abhang, L.B., and Hameedullah, M. Chip tool interface temperature prediction model for turning process. International Journal of Engineering Science and Technology 2 (2010): 382-392.
- [16] Lin, J., and Liu C.Y., Measurement of cutting tool temperature by an infrared pyrometer. Measurement Science Technology 12 (2001): 1243-1249.
- [17] จักร จันทลักษณ์. การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) และการประยุกต์ใช้เพื่อวินิจฉัยสภาพเครื่องจักร. วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา สจพ 14 (ต.ค.-ธ.ค. 2545).
- [18] Rayleigh, J.W.S. On the character of the complete radiation at a given temperature. Philosophical Magazine 27 (1889): 460-469.
- [19] สุวัฒน์ชัย เกิดกล้าผล. เทคนิค FFT และผลกระทบจากความแปรปรวนของสัญญาณต่อการวัดสั่นสะเทือน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.tgipmt.com> [2554, พฤษภาคม 18]
- [20] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [21] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป, 2545.
- [22] Somkiat, T., and Moriwaki, T. Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and chatter on CNC turning machine. Journal of Manufacturing Processes 10(2008): 40-46.
- [23] Somkiat, T. Intelligent Identification of Cutting States by Spectrum Analysis for CNC Turning. Proc. 1st Asia-Pacific Conference on Manufacturing Systems, 2007.
- [24] Moriwaki, T., Shibasaka, T., and Somkiat T. Development of in-process tool wears monitoring system for CNC turning. JSME International Journal Series C 47 (2004):933-938.
- [25] Chungchoo, C., and Saini, D. The total energy and the total entropy of force signals- new parameters for monitoring oblique turning operations. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000):1879-1897.
- [26] Andreasen, J. L., and Chiffre, L. D. Automatic chip-breaking detection in turning by frequency analysis of cuttingforce. Annals of the CIRP 42 (1993): 45-48.

- [27] Fang X. D., Fei J., and Jawahir I. S. A hybrid algorithm for predicting chip form/chip breakability in machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture 36 (1996): 1093-1107.
- [28] Kim J. D., and Kweun O. B. A chip-breaking system for mild steel in turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture 37 (1997): 607-617.
- [29] Longbottom, J.M., and Lanham, J.D. Cutting temperature measurement while machining – a review. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal 77 (2005): 122-130.
- [30] พรชัย นิเวศน์รังสรรค์, วราคม เนินน้อย และ เทอดศักดิ์ ใจงาม. การตรวจสอบสภาวะของมีดตัดด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 2552.
- [31] ณรงค์ศักดิ์ พงศธรวิวัฒน์. การตรวจจับแซเตอร์ในระบบการตัดเหล็กกล้าโดยใช้ใบมีดแบบหัวบอลบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [32] Somkiat T. In-process monitoring and identification of cutting states based on power spectrum density analysis, NAMRI/SME 37 (2009): 15-24.
- [33] Kluft, W., König, W., Lutervelt, C. A. van, Nakayama, K., and Pekelharing, A. J. Present Knowledge of Chip Control. Annals of the Cirp 28 (1979): 441-455.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ  
สำหรับวิเคราะห์รูปแบบการแตกหักของเศษโลหะด้วยสัญญาณแรงตัด

เงื่อนไขของการตัด			รูปแบบของ เศษโลหะ	แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัต บนโดเมนเวลา			ความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน บนโดเมนความถี่		
ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)		แรงตัดหลัก	แรงป้อนตัด	แรงรัศมี	แรงตัดหลัก	แรงป้อนตัด	แรงรัศมี
150	0.100	0.50							
150	0.100	0.75	แบบต่อเนื่อง	16.93	13.17	14.66	5.70	6.71	56.63
150	0.100	1.00	แบบต่อเนื่อง	21.91	14.55	16.82	9.75	11.96	56.17
150	0.125	0.50	แบบต่อเนื่อง	21.19	39.00	51.23	16.66	763.00	1482.00
150	0.125	0.75	แบบแตกหัก	30.39	26.99	32.35	62.75	106.19	99.20
150	0.125	1.00	แบบแตกหัก	24.01	25.31	26.50	38.91	64.09	59.39
150	0.150	0.50	แบบต่อเนื่อง	30.66	29.22	26.15	288.00	518.00	477.00
150	0.150	0.75	แบบแตกหัก	35.09	38.34	35.66	32.68	93.02	109.06
150	0.150	1.00	แบบแตกหัก	32.57	39.05	44.49	127.19	198.10	176.43
150	0.175	0.50	แบบแตกหัก	30.33	55.00	74.88	109.56	1449.00	3162.00
150	0.175	0.75	แบบแตกหัก	38.31	38.54	33.99	212.75	362.17	329.22
150	0.175	1.00	แบบแตกหัก	37.60	42.26	37.82	174.85	287.15	269.99
150	0.200	0.50	แบบแตกหัก	-	-	-	-	-	-
150	0.200	0.75	แบบแตกหัก	41.35	41.96	35.75	231.60	366.41	338.63

เงื่อนไขของการตัด			รูปแบบของ เศษโลหะ	แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัต บนโดเมนเวลา			ความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน บนโดเมนความถี่		
ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)		แรงตัดหลัก	แรงป้อนตัด	แรงรัศมี	แรงตัดหลัก	แรงป้อนตัด	แรงรัศมี
150	0.200	1.00							
250	0.100	0.50	แบบต่อเนื่อง	17.36	12.80	15.40	6.29	4.53	55.25
250	0.100	0.75	แบบต่อเนื่อง	17.15	12.68	16.72	6.82	8.11	66.57
250	0.100	1.00	แบบต่อเนื่อง	12.24	8.98	14.71	6.42	5.90	60.44
250	0.125	0.50	แบบต่อเนื่อง	30.12	19.52	21.86	7.09	6.66	62.73
250	0.125	0.75	แบบแตกหัก	27.03	19.00	20.44	30.32	51.97	51.88
250	0.125	1.00	แบบแตกหัก	18.11	18.20	20.00	53.60	71.39	59.21
250	0.150	0.50	แบบต่อเนื่อง	23.82	24.52	35.83	43.14	651.36	1441.00
250	0.150	0.75	แบบแตกหัก	-	-	-	-	-	-
250	0.150	1.00	แบบแตกหัก	28.33	28.76	34.69	42.49	71.79	68.79
250	0.175	0.50	แบบต่อเนื่อง	11.32	14.64	27.44	97.47	107.61	452.14
250	0.175	0.75	แบบแตกหัก	18.83	20.10	32.02	16.13	27.00	27.17
250	0.175	1.00	แบบแตกหัก	47.13	42.07	43.40	48.65	67.29	62.24
250	0.200	0.50	แบบต่อเนื่อง	55.33	51.36	71.79	93.35	991.00	2614.00

เงื่อนไขของการตัด			รูปแบบของ เศษโลหะ	แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัต บนโดเมนเวลา			ความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน บนโดเมนความถี่		
ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)		แรงตัดหลัก	แรงป้อนตัด	แรงรัศมี	แรงตัดหลัก	แรงป้อนตัด	แรงรัศมี
250	0.200	0.75							
250	0.200	1.00	แบบแตกหัก	76.76	62.86	61.62	897.32	1638.00	1549.00
350	0.100	0.50	แบบต่อเนื่อง	15.51	10.62	16.33	8.62	3.72	56.67
350	0.100	0.75	แบบต่อเนื่อง	14.61	10.00	14.79	5.60	5.49	58.19
350	0.100	1.00	แบบต่อเนื่อง	9.50	7.36	12.77	5.37	5.60	56.27
350	0.125	0.50	แบบต่อเนื่อง	20.67	13.74	23.39	7.92	7.31	62.91
350	0.125	0.75	แบบต่อเนื่อง	20.26	14.69	18.22	7.85	8.35	60.00
350	0.125	1.00	แบบแตกหัก	16.25	14.52	17.41	18.52	29.97	28.92
350	0.150	0.50	แบบต่อเนื่อง	17.40	12.10	18.96	7.14	8.10	68.59
350	0.150	0.75	แบบแตกหัก	22.29	20.89	31.15	32.53	54.37	57.10
350	0.150	1.00	แบบแตกหัก	27.42	31.31	36.17	155.56	263.84	247.10
350	0.175	0.50	แบบต่อเนื่อง	-	-	-	-	-	-
350	0.175	0.75	แบบแตกหัก	34.28	31.29	34.85	171.12	274.34	266.27
350	0.175	1.00	แบบแตกหัก	41.10	41.46	44.28	451.64	785.21	763.80
350	0.200	0.50	แบบต่อเนื่อง	12.66	13.50	24.80	45.52	78.64	354.91

เงื่อนไขของการตัด			รูปแบบของ เศษโลหะ	แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัต บนโดเมนเวลา			ความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน บนโดเมนความถี่		
ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)		แรงตัดหลัก	แรงป้อนตัด	แรงรัศมี	แรงตัดหลัก	แรงป้อนตัด	แรงรัศมี
350	0.200	0.75							
350	0.200	1.00	แบบแตกหัก	51.57	55.23	59.16	775.31	1414.00	1333.00

ภาคผนวก ข  
ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ  
สำหรับวิเคราะห์รูปแบบการแตกหักของเศษโลหะด้วยสัญญาณอุณหภูมิต

เงื่อนไขของการตัด			รูปแบบของเศษโลหะ	อุณหภูมิสูงสุดขณะตัด(C°)	อุณหภูมิเฉลี่ยขณะตัด(C°)	ค่าความแปรปรวนสูงสุด	ค่าความแปรปรวนเฉลี่ย
ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)					
150	0.100	0.50	แบบต่อเนื่อง	640.00	443.36	59.58	24.75
150	0.100	0.75	แบบต่อเนื่อง	480.00	431.58	42.39	20.17
150	0.100	1.00	แบบต่อเนื่อง	491.00	430.45	33.44	18.12
150	0.125	0.50	แบบต่อเนื่อง	478.00	429.31	48.69	23.38
150	0.125	0.75	แบบแตกหัก	457.00	433.28	21.70	16.46
150	0.125	1.00	แบบแตกหัก	456.00	431.48	21.23	19.81
150	0.150	0.50	แบบต่อเนื่อง	567.00	459.49	43.00	21.97
150	0.150	0.75	แบบแตกหัก	545.00	465.45	44.45	26.22
150	0.150	1.00	แบบแตกหัก	477.00	453.66	22.64	23.26
150	0.175	0.50	แบบแตกหัก	503.00	447.35	42.27	23.82
150	0.175	0.75	แบบแตกหัก	533.00	471.39	33.46	23.10
150	0.175	1.00	แบบแตกหัก	488.00	460.06	21.92	19.03
150	0.200	0.50	แบบแตกหัก	-	-	-	-
150	0.200	0.75	แบบแตกหัก	524.00	486.36	22.20	20.15
150	0.200	1.00	แบบแตกหัก	499.00	471.55	25.31	17.95



เงื่อนไขของการตัด			รูปแบบของเศษโลหะ	อุณหภูมิสูงสุดขณะตัด(C°)	อุณหภูมิเฉลี่ยขณะตัด(C°)	ค่าความแปรปรวนสูงสุด	ค่าความแปรปรวนเฉลี่ย
ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)					
250	0.100	0.50	แบบต่อเนื่อง	537.00	458.59	65.95	24.27
250	0.100	0.75	แบบต่อเนื่อง	557.00	444.02	44.94	22.61
250	0.100	1.00	แบบต่อเนื่อง	545.00	442.42	35.00	19.24
250	0.125	0.50	แบบต่อเนื่อง	540.00	468.60	46.34	23.16
250	0.125	0.75	แบบแตกหัก	559.00	458.56	24.83	18.09
250	0.125	1.00	แบบแตกหัก	470.00	445.72	24.00	21.89
250	0.150	0.50	แบบต่อเนื่อง	533.00	453.39	70.60	23.98
250	0.150	0.75	แบบแตกหัก	-	-	-	-
250	0.150	1.00	แบบแตกหัก	479.00	450.69	27.46	21.72
250	0.175	0.50	แบบต่อเนื่อง	519.00	467.39	51.61	20.12
250	0.175	0.75	แบบแตกหัก	570.00	429.16	21.44	20.86
250	0.175	1.00	แบบแตกหัก	467.00	439.10	21.06	15.23
250	0.200	0.50	แบบต่อเนื่อง	555.00	466.60	32.57	18.25
250	0.200	0.75	แบบแตกหัก	593.00	494.05	16.79	14.00
250	0.200	1.00	แบบแตกหัก	514.00	491.91	20.65	14.65

เงื่อนไขของการตัด			รูปแบบของเศษโลหะ	อุณหภูมิสูงสุดขณะตัด(C°)	อุณหภูมิเฉลี่ยขณะตัด(C°)	ค่าความแปรปรวนสูงสุด	ค่าความแปรปรวนเฉลี่ย
ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)					
350	0.100	0.50	แบบต่อเนื่อง	492.00	451.79	42.21	22.88
350	0.100	0.75	แบบต่อเนื่อง	481.00	449.71	45.57	20.95
350	0.100	1.00	แบบต่อเนื่อง	493.00	440.94	49.83	19.31
350	0.125	0.50	แบบต่อเนื่อง	596.00	466.08	37.28	15.96
350	0.125	0.75	แบบต่อเนื่อง	577.00	470.29	30.34	16.59
350	0.125	1.00	แบบแตกหัก	483.00	461.91	20.76	16.32
350	0.150	0.50	แบบต่อเนื่อง	584.00	479.20	33.39	18.44
350	0.150	0.75	แบบแตกหัก	621.00	483.68	26.16	16.74
350	0.150	1.00	แบบแตกหัก	502.00	481.61	20.40	18.49
350	0.175	0.50	แบบต่อเนื่อง	-	-	-	-
350	0.175	0.75	แบบแตกหัก	515.00	498.69	16.00	13.40
350	0.175	1.00	แบบแตกหัก	519.00	501.61	17.08	11.54
350	0.200	0.50	แบบต่อเนื่อง	608.00	438.33	36.14	20.12
350	0.200	0.75	แบบแตกหัก	-	-	-	-
350	0.200	1.00	แบบแตกหัก	534.00	509.90	16.00	11.82

ภาคผนวก ค  
โปรแกรม Matlab  
สำหรับการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็วและคำนวณค่าความแปรปรวน

## โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตึง

```

clear;

samp=10000;          % Sampling Frequency

fname = 'F1';        %input(' Data file name = test1 ','s');
ext = '.txt';
filename = [fname,ext];
load (filename);
eval(['data=',[fname],'.']);
[N,n]=size(data);

f=(0:N-1)/N*samp;
t=1/samp;
X=fft(data(:,1))/N*2;
Y=fft(data(:,2))/N*2;
Z=fft(data(:,3))/N*2;
tt=(0:t*(N-1));
freq=f(1:N/2);
sf=size(freq);

absX=abs(X(1:N/2));
PabsX=absX.^2;
KX=sum(PabsX(:));
avgPabsX=KX/sf(:,1);
%
G1=0;
for o1=1:N/2
    if PabsX(o1) > 1.5*avgPabsX

```

```

    overX=PabsX(o1);
    A1(o1)=overX;
else
    overX=0;
    A1(o1)=overX;
end
if A1(o1)>G1
    G1=A1(o1);
    P1=o1;
end
end
M11=max(A1)
B1=0;
C1=0;
F1=0;
for r1=1:N/2
    if A1(r1)-C1 > 0
        B1=B1+1;
        s1(B1) = r1;
    end
end
for d1=1:B1
    if abs(P1-s1(d1)) < 50
        F1=F1+1;
        E1(F1)=s1(d1);
    end
end

figure(15);
plot(E1(:),PabsX(E1(:)));grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 30]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Main force N^2');hold on;

```

```

plot(freq,1.5*avgPabsX,'g');grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 30]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Main force N^2');hold on;
%bar(E1(:),PabsX(E1(:)),0.2,'r');

```

```

absY=abs(Y(1:N/2));
PabsY=absY.^2;
KY=sum(PabsY(:));
avgPabsY=KY/sf(:,1);
%
G2=0;
for o2=1:N/2
    if PabsY(o2) > 1.5*avgPabsY
        overY=PabsY(o2);
        A2(o2)=overY;
    else
        overY=0;
        A2(o2)=overY;
    end
    if A2(o2)>G2
        G2=A2(o2);
        P2=o2;
    end
end
M12=max(A2)
B2=0;
C2=0;
F2=0;
for r2=1:N/2
    if A2(r2)-C2 > 0
        B2=B2+1;
        s2(B2) = r2;
    end
end

```

```

    end
end
for d2=1:B2
    if abs(P2-s2(d2)) < 50
        F2=F2+1;
        E2(F2)=s2(d2);
    end
end

figure(16);
plot(E2(:),PabsY(E2(:)));grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 30]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Feed force N^2');hold on;
plot(freq,1.5*avgPabsY,'g');grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 30]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Feed force N^2');hold on;
%bar(E2(:),PabsY(E2(:)),0.2,'r');
%

absZ=abs(Z(1:N/2));
PabsZ=absZ.^2;
KZ=sum(PabsZ(:));
avgPabsZ=KZ/sf(:,1);
%
G3=0;
for o3=1:N/2
    if PabsZ(o3) > 1.5*avgPabsZ
        overZ=PabsZ(o3);
        A3(o3)=overZ;
    else
        overZ=0;
        A3(o3)=overZ;
    end
end

```

```

if A3(o3)>G3
    G3=A3(o3);
    P3=o3;
end
end
M13=max(A3)
B3=0;
C3=0;
F3=0;
for r3=1:N/2
    if A3(r3)-C3 > 0
        B3=B3+1;
        s3(B3) = r3;
    end
end
for d3=1:B3
    if abs(P3-s3(d3)) < 50
        F3=F3+1;
        E3(F3)=s3(d3);
    end
end
%

figure(17);
plot(E3(:),PabsZ(E3(:)));grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 30]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Thrust force N^2');hold on;
plot(freq,1.5*avgPabsZ,'g');grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 30]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Thrust force N^2');hold on;
%bar(E3(:),PabsZ(E3(:)),0.2,'r');
%
```



```
s_form=[freq,PabsX,PabsY,PabsZ];
```

```
a=0;
```

```
df=samp/N;
```

```
i=1;
```

```
j=1;
```

```
%areaXX(j)=0;
```

```
areaX(j)=0;
```

```
areaY(j)=0;
```

```
areaZ(j)=0;
```

```
for b=df:df:(samp/2)-1
```

```
    j=j+1;
```

```
    XX=a:df:b;
```

```
    %YYYX=absX(1:i+1,1);
```

```
    YYX=PabsX(1:i+1,1);
```

```
    YYY=PabsY(1:i+1,1);
```

```
    YYZ=PabsZ(1:i+1,1);
```

```
    %ZZZX(i)=trapz(XX,YYYX);
```

```
    ZZX(i)=trapz(XX,YYX);
```

```
    ZZY(i)=trapz(XX,YYY);
```

```
    ZZZ(i)=trapz(XX,YYZ);
```

```
    %areaXX(j)=ZZZX(i);
```

```
    areaX(j)=ZZX(i);
```

```
    areaY(j)=ZZY(i);
```

```
    areaZ(j)=ZZZ(i);
```

```
    %pareaXX(i)=ZZZX(i)-areaXX(j-1);
```

```
    pareaX(i)=ZZX(i)-areaX(j-1);
```

```
    pareaY(i)=ZZY(i)-areaY(j-1);
```

```
    pareaZ(i)=ZZZ(i)-areaZ(j-1);
```

```

m(i)=i;
i=i+1;
end
%kXX=pareaXX(:)/ZZZX(i-1);
kX=pareaX(:)/ZZX(i-1);
kY=pareaY(:)/ZZY(i-1);
kZ=pareaZ(:)/ZZZ(i-1);

%if P < 50

AX1=(ZZX(E1(F1)-1)-ZZX(E1(1)-1));
AY1=(ZZY(E2(F2)-1)-ZZY(E2(1)-1));
AZ1=(ZZZ(E3(F3)-1)-ZZZ(E3(1)-1));

AX1=(ZZX(E1(F1)-1)-ZZX(E1(1)-1))/ZZX(i-1)
AY1=(ZZY(E2(F2)-1)-ZZY(E2(1)-1))/ZZY(i-1)
AZ1=(ZZZ(E3(F3)-1)-ZZZ(E3(1)-1))/ZZZ(i-1)

IndexA1=AX1/AY1
IndexA2=AX1/AZ1
IndexA3=AY1/AZ1
figure(21);
subplot(1,3,1);
plot(tt,data(:,1));grid;zoom on;axis([0 N*t -100 100]);xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic
Main force N');
subplot(1,3,2);
plot(tt,data(:,2));grid;zoom on;axis([0 N*t -100 100]);xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic
Feed force N');
subplot(1,3,3);
plot(tt,data(:,3));grid;zoom on;axis([0 N*t -100 100]);xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic
Thrust force N');

```

```
figure(4);
subplot(1,3,1);
plot(freq,avgPabsX,'b');grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 20]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Main force N^2');hold on;
plot(freq,PabsX);grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 20]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Main force N^2');hold on;
%bar(freq(1:51),PabsX(1:51),0.2,'r');

subplot(1,3,2);
plot(freq,avgPabsY,'b');grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 20]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Main force N^2');hold on;
plot(freq,PabsY);grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 20]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Feed force N^2');hold on;
%bar(freq(1:51),PabsY(1:51),0.2,'r');

subplot(1,3,3);
plot(freq,avgPabsZ,'b');grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 20]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Main force N^2');hold on;
plot(freq,PabsZ);grid;zoom on;axis([0 samp/2 0 20]);xlabel('Frequency
Hz');ylabel('Power spectrum density of Thrust force N^2');hold on;
%bar(freq(1:51),PabsZ(1:51),0.2,'r');
```

## โปรแกรมสำหรับการคำนวณค่าความแปรปรวนของสัญญาณอุณหภูมิ

```

clear;

samp=500;           %Sampling Frequency

fname = 'T1';      % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext = '.txt';      % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname,ext]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);   % เรียกไฟล์
eval(['data=',[fname],'];');

[N,n]=size(data); % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถว และ n เป็น
จำนวนคอลัมน์

t=10/samp;
tt=(0:t*(N-1));   %Using plot graph __ time domain

Data1=data(:,1);

Avg1=mean(data(:,1)); %หาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ

CumUpper1=0;      %สำหรับเก็บค่าสัญญาณที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย

NoUp1=0;          %สำหรับเก็บจำนวนสัญญาณที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย

CumLower1=0;     %สำหรับเก็บค่าสัญญาณที่มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย

NoLow1=0;        %สำหรับเก็บจำนวนสัญญาณที่มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย

```

```

for i=1:N                                %Loop สำหรับเก็บค่าสัญญาณตาม 4 ตัวแปรข้างบน
    if Data1(i)>= Avg1                    %ข้อมูลคอลัมน์ที่ 1
        CumUpper1=CumUpper1+Data1(i); %เก็บค่าที่มากกว่าค่าเฉลี่ย
        NoUp1=NoUp1+1;
    else
        CumLower1=CumLower1+Data1(i); %เก็บค่าที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ย
        NoLow1=NoLow1+1;
    end
end

end

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

Amp(1)=sqrt(((AvgUpper1)^2+(AvgLower1)^2)/2); %หาค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณ
โดยเอาค่าขอบบนและขอบล่างมาใช้

Amplitude=Amp                            %เก็บผลของค่าที่ได้ %
%ใช้สำหรับ plot กราฟของขนาดแอมพลิจูดทางแกน x
AA=max(tt);
qq(1)=0;
qq(2)=AA;

for j=1:2
    AvgU1(j)=AvgUpper1;
    AvgL1(j)=AvgLower1;
end

%
Tmax=abs(max(data));
Tmin=abs(min(data));

```

```
for y1=Tmax&Tmin
    if ( Tmax>Tmin )
        y1 =Tmax ;
    else
        y1 =Tmin ;
    end
end
peak=y1
crest=peak/amp

figure(1); %Time domain Graph
plot(tt,data(:,1),qq,AvgU1,'r',qq,AvgL1,'r',qq,peak,'r',qq,crest,'r');grid;zoom on ;
xlabel('Time Sec');ylabel('Dynamic Cutting Temperature (Celcius)');
legend('broken');
```

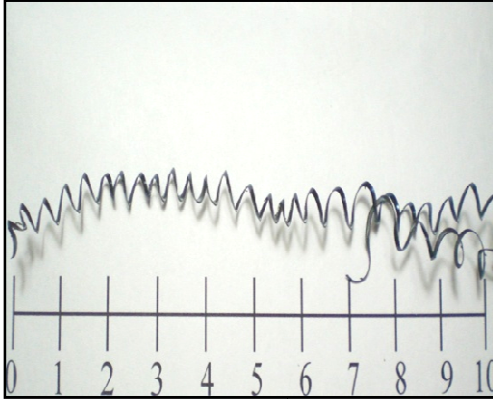
ภาคผนวก ง

ตัวอย่างภาพวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตและสัญญาณอุณหภูมิด้วย  
เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน

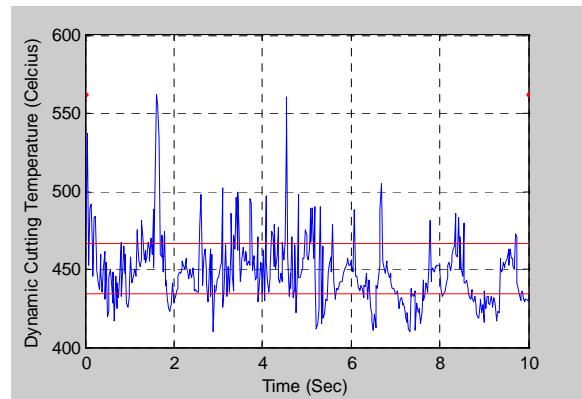
เงื่อนไขการตัด >> ความเร็วตัด = 150 เมตร/นาที, อัตราป้อนตัด = 0.1 มิลลิเมตร/รอบ,

>> ความลึกตัด = 0.50 มิลลิเมตร

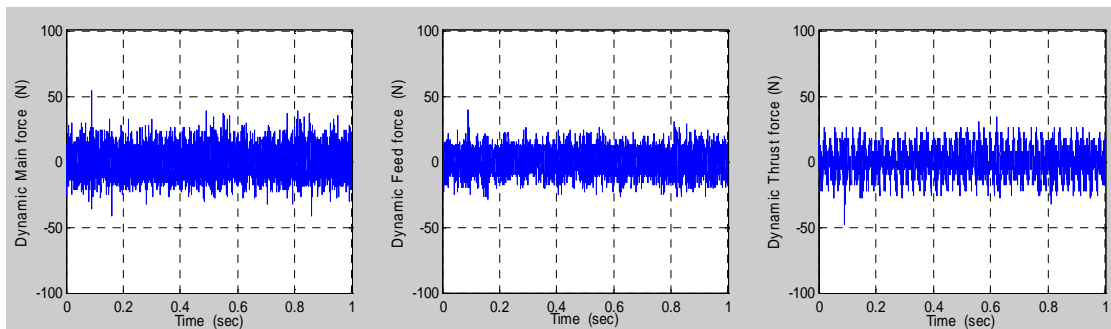
>> เกิดเศษโลหะแบบ “ต่อเนื่อง”



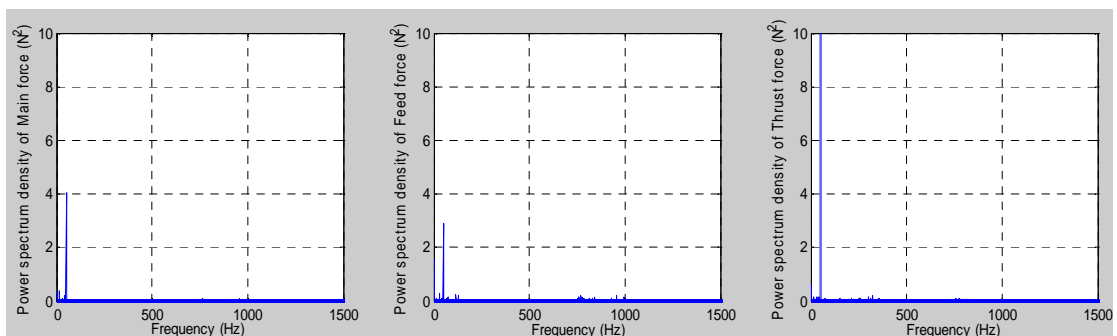
เศษโลหะแบบต่อเนื่อง



กราฟแสดงอุณหภูมิการตัด



กราฟแสดงแอมพลิจูดแรงตัดพลวัต ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ



กราฟแสดงความหนาแน่นพาเวอริสเปกตรัมแรงตัดพลวัต

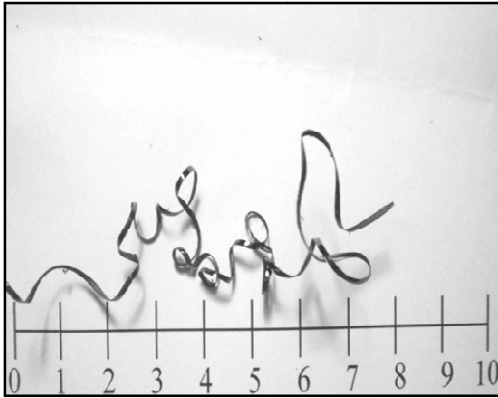
ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ



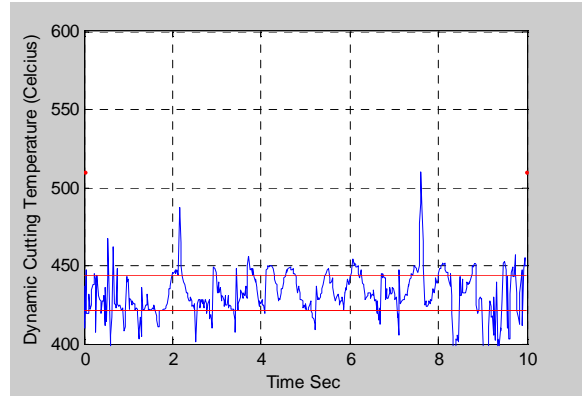
เงื่อนไขการตัด >> ความเร็วตัด = 150 เมตร/นาที, อัตราป้อนตัด = 0.1 มิลลิเมตร/รอบ,

>> ความลึกตัด = 0.75 มิลลิเมตร

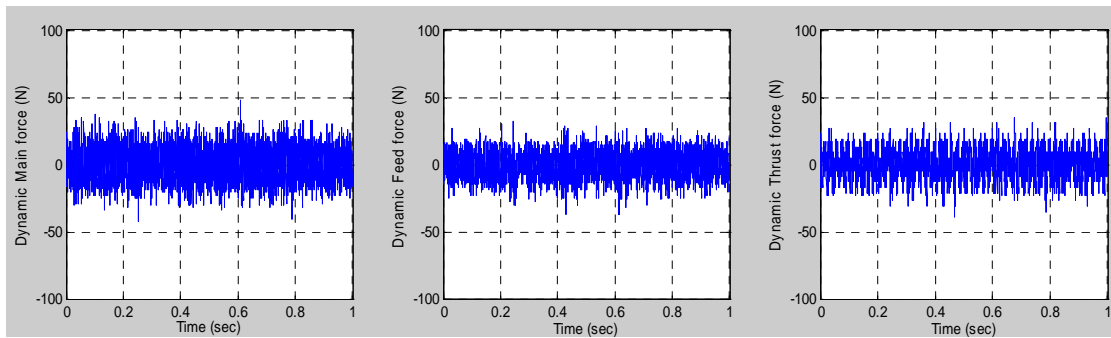
>> เกิดเศษโลหะแบบ “ต่อเนื่อง”



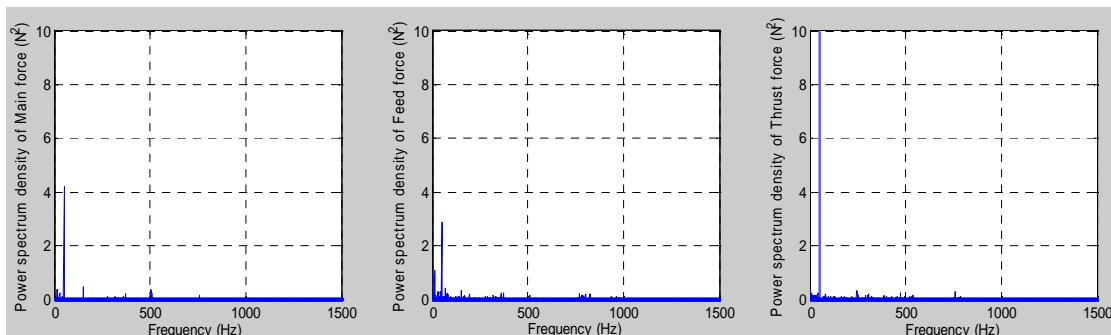
เศษโลหะแบบต่อเนื่อง



กราฟแสดงอุณหภูมิการตัด



กราฟแสดงแอมพลิจูดแรงตัดพลวัต ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ



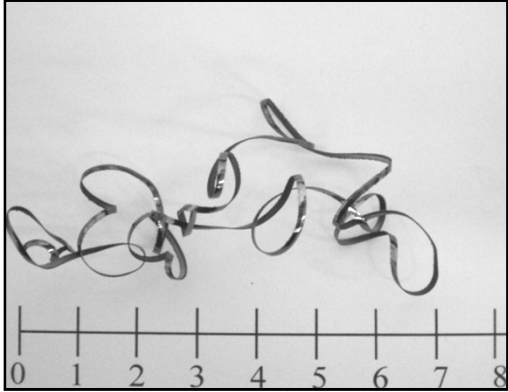
กราฟแสดงความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมแรงตัดพลวัต

ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ

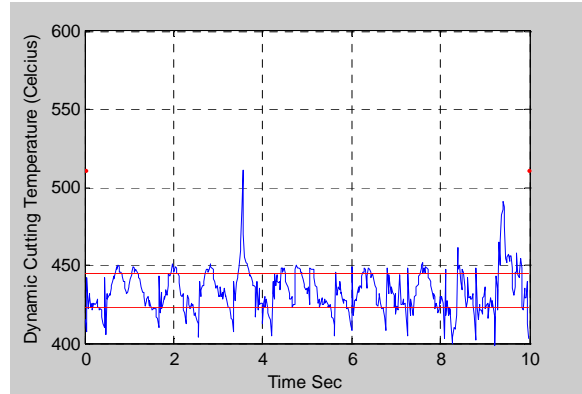
เงื่อนไขการตัด >> ความเร็วตัด = 150 เมตร/นาที, อัตราป้อนตัด = 0.1 มิลลิเมตร/รอบ,

>> ความลึกตัด = 1.00 มิลลิเมตร

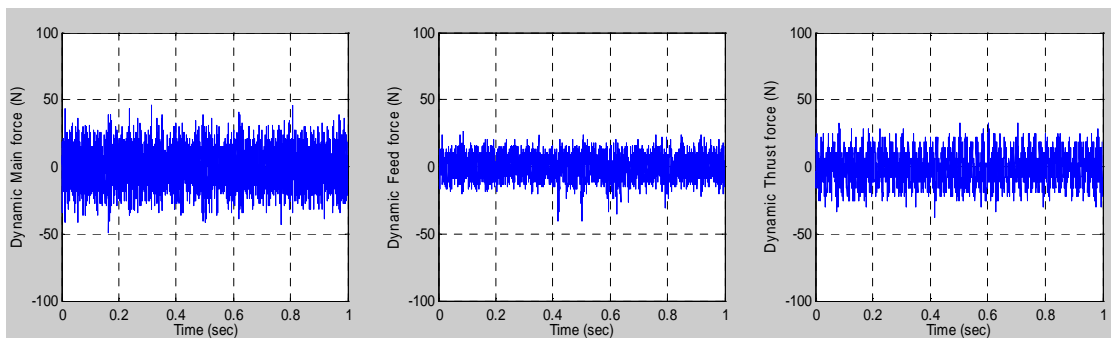
>> เกิดเศษโลหะแบบ “ต่อเนื่อง”



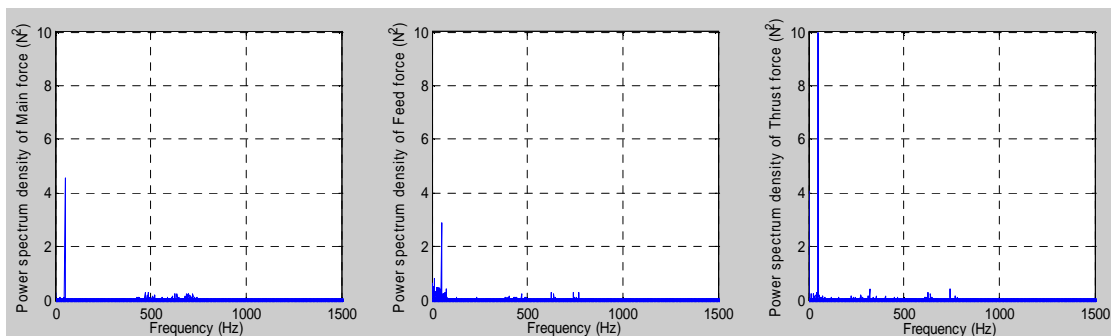
เศษโลหะแบบต่อเนื่อง



กราฟแสดงอุณหภูมิการตัด



กราฟแสดงแอมพลิจูดแรงตัดพลวัต ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ



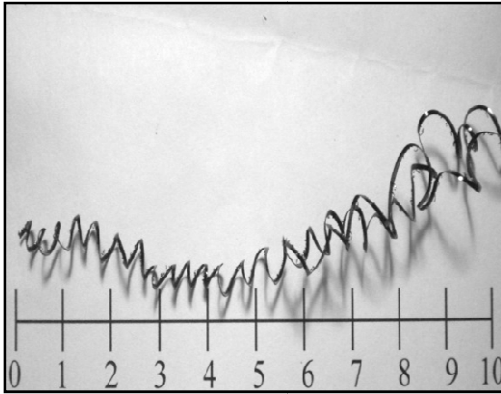
กราฟแสดงความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมแรงตัดพลวัต

ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ

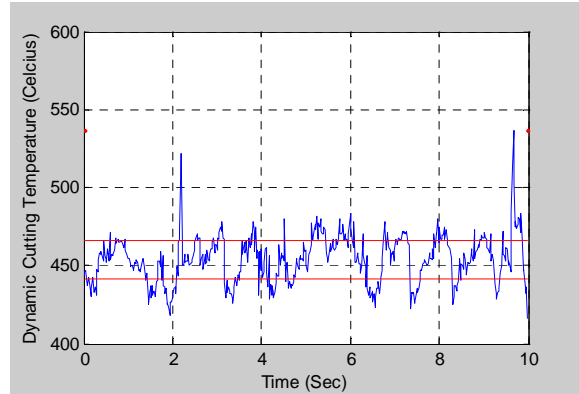
เงื่อนไขการตัด >> ความเร็วตัด = 250 เมตร/นาที, อัตราป้อนตัด = 0.1 มิลลิเมตร/รอบ,

>> ความลึกตัด = 0.50 มิลลิเมตร

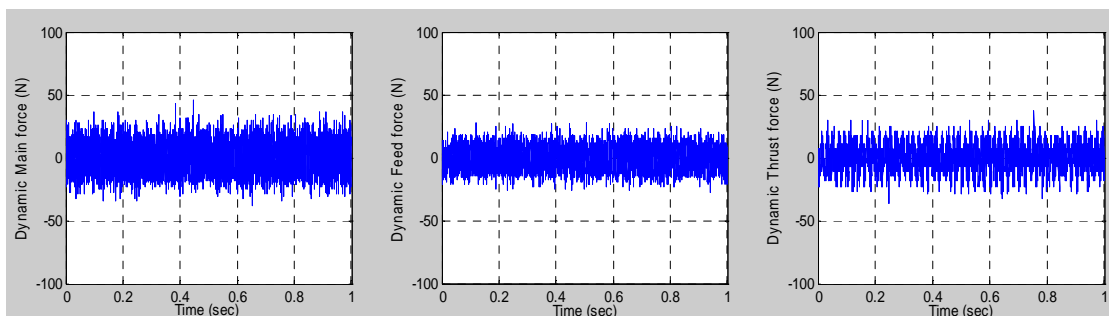
>> เกิดเศษโลหะแบบ “ต่อเนื่อง”



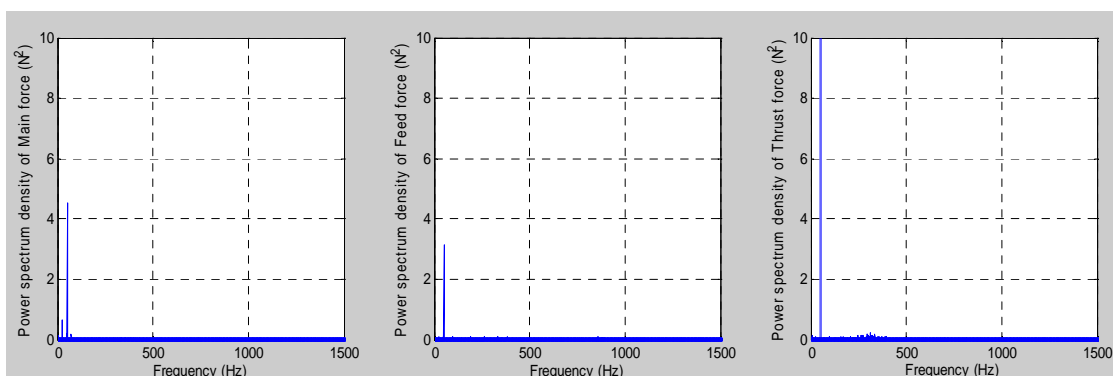
เศษโลหะแบบต่อเนื่อง



กราฟแสดงอุณหภูมิการตัด



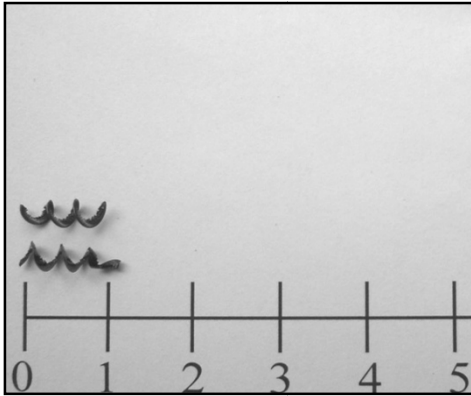
กราฟแสดงแอมพลิจูดแรงตัดพลวัต ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ



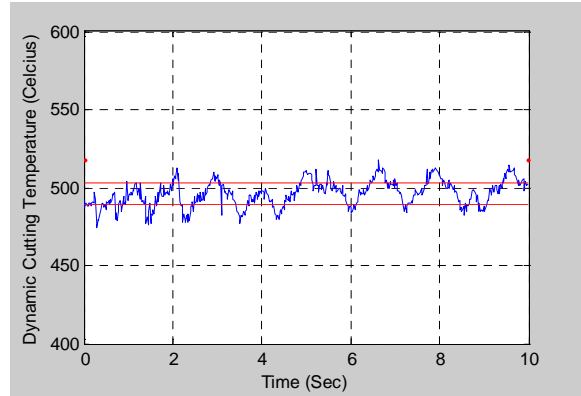
กราฟแสดงความหนาแน่นพาเวอริสเปกตรัมแรงตัดพลวัต

ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ

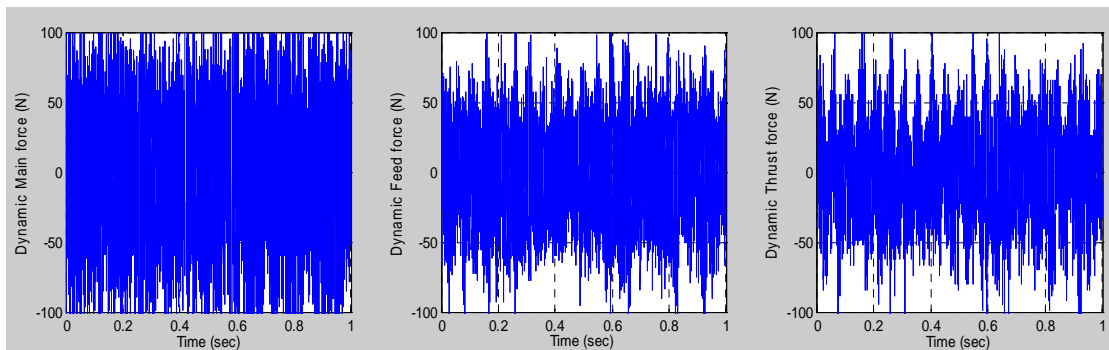
เงื่อนไขการตัด >> ความเร็วตัด = 250 เมตร/นาที, อัตราป้อนตัด = 0.2 มิลลิเมตร/รอบ,  
 >> ความลึกตัด = 0.75 มิลลิเมตร  
 >> เกิดเศษโลหะแบบ “แตกหัก”



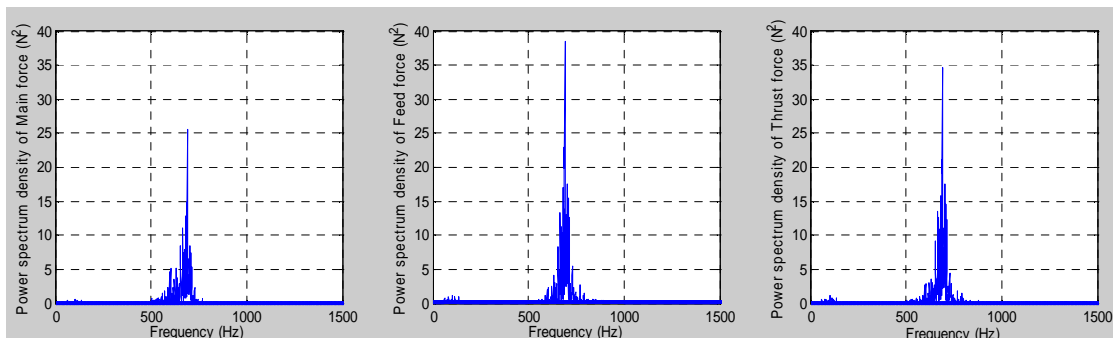
เศษโลหะแบบแตกหัก



กราฟแสดงอุณหภูมิการตัด



กราฟแสดงแอมพลิจูดแรงตัดพลวัต ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ

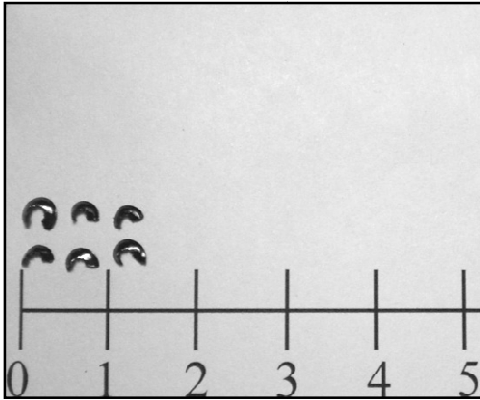


กราฟแสดงความหนาแน่นพาเวอริสเปคตรัมแรงตัดพลวัต  
 ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ

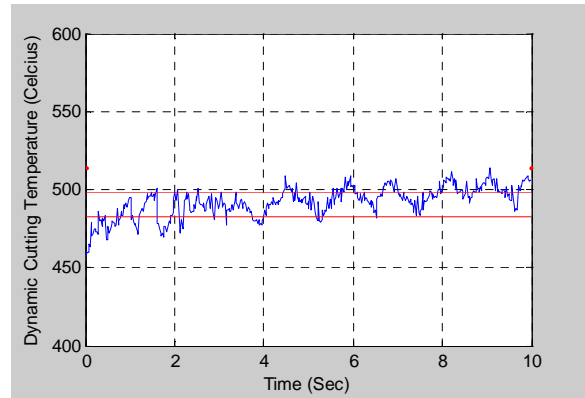
เงื่อนไขการตัด >> ความเร็วตัด = 250 เมตร/นาที, อัตราป้อนตัด = 0.2 มิลลิเมตร/รอบ,

>> ความลึกตัด = 1.00 มิลลิเมตร

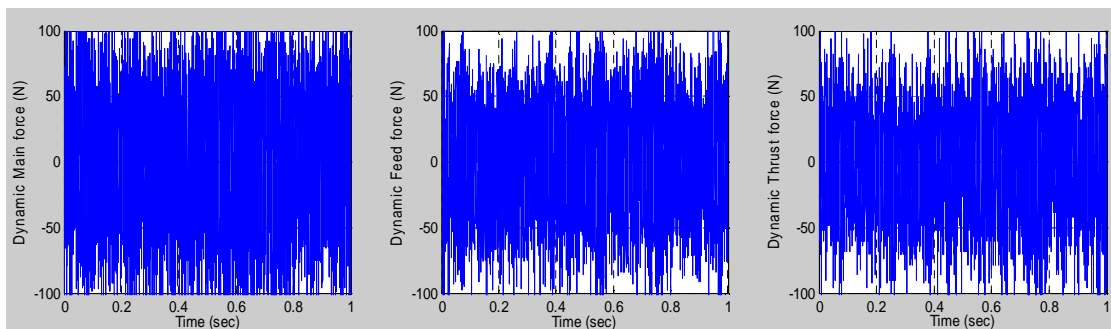
>> เกิดเศษโลหะแบบ “แตกหัก”



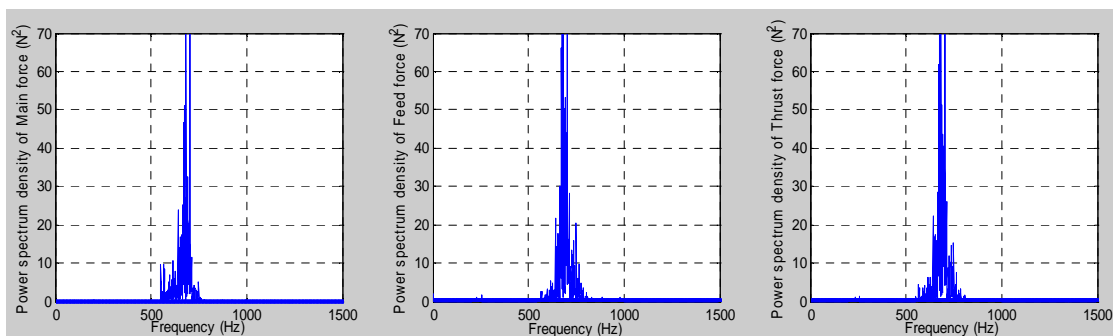
เศษโลหะแบบแตกหัก



กราฟแสดงอุณหภูมิการตัด



กราฟแสดงแอมพลิจูดแรงตัดพลวัต ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ



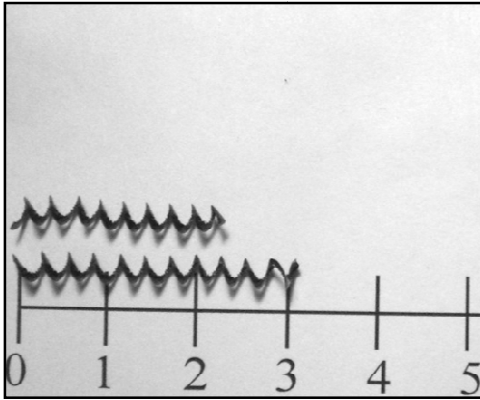
กราฟแสดงความหนาแน่นพาเวอร์สเปคตรัมแรงตัดพลวัต

ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ

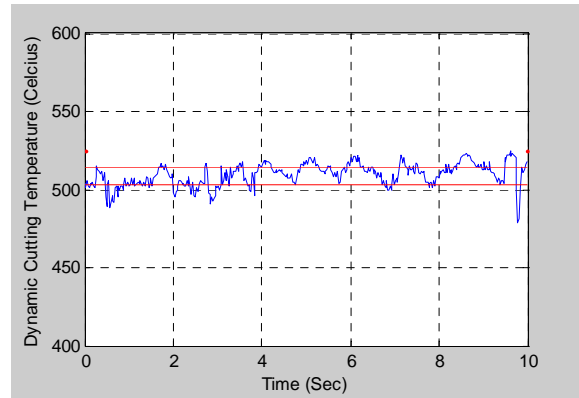
เงื่อนไขการตัด >> ความเร็วตัด = 350 เมตร/นาที, อัตราป้อนตัด = 0.2 มิลลิเมตร/รอบ,

>> ความลึกตัด = 0.75 มิลลิเมตร

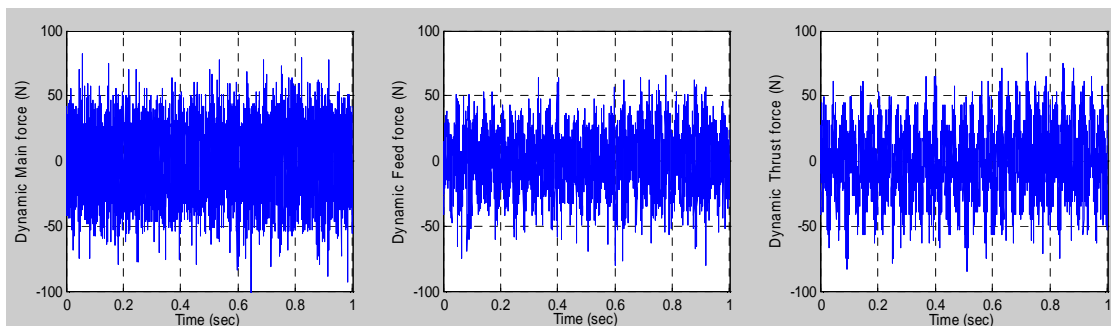
>> เกิดเศษโลหะแบบ “แตกหัก”



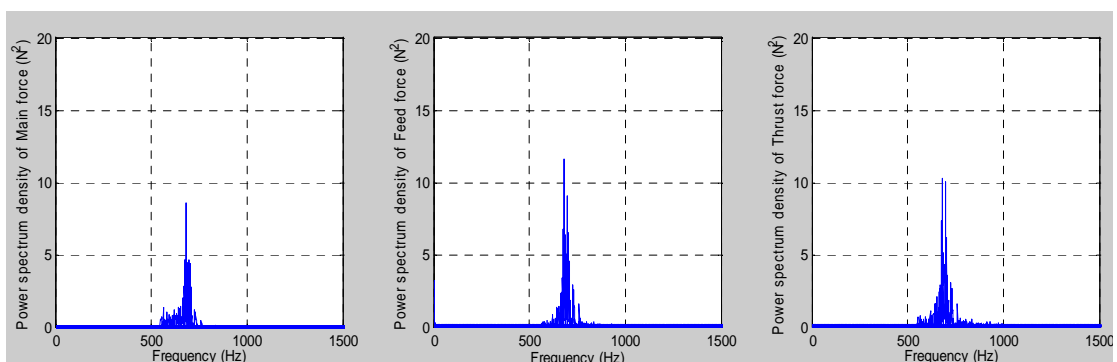
เศษโลหะแบบแตกหัก



กราฟแสดงอุณหภูมิการตัด



กราฟแสดงแอมพลิจูดแรงตัดพลวัต ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ



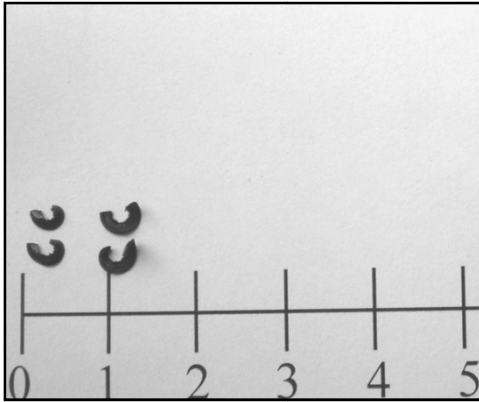
กราฟแสดงความหนาแน่นพาเวอริสเปกตรัมแรงตัดพลวัต

ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ

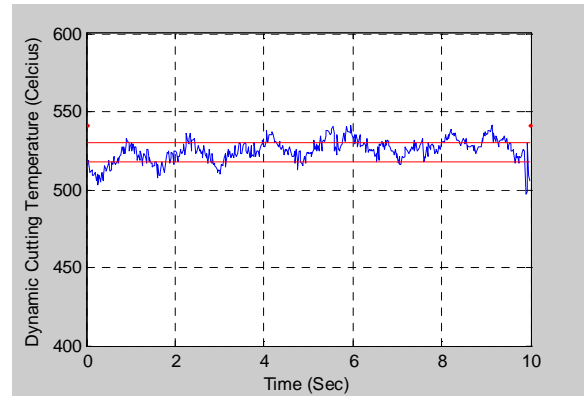
เงื่อนไขการตัด >> ความเร็วตัด = 350 เมตร/นาที, อัตราป้อนตัด = 0.2 มิลลิเมตร/รอบ,

>> ความลึกตัด = 1.00 มิลลิเมตร

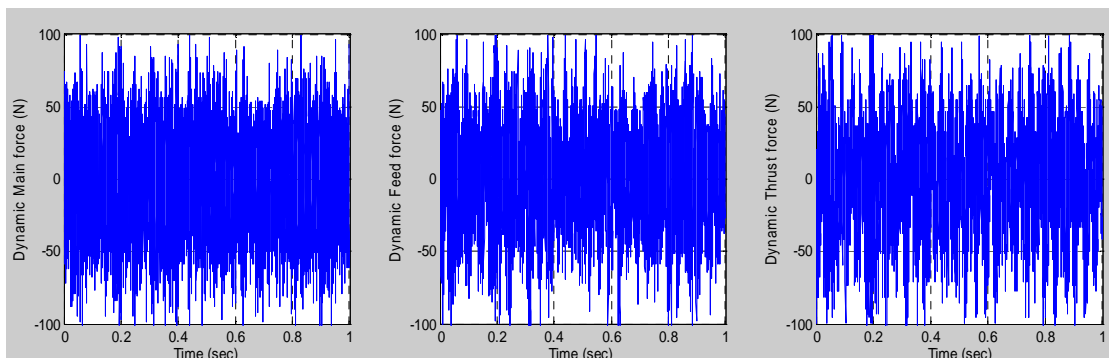
>> เกิดเศษโลหะแบบ “แตกหัก”



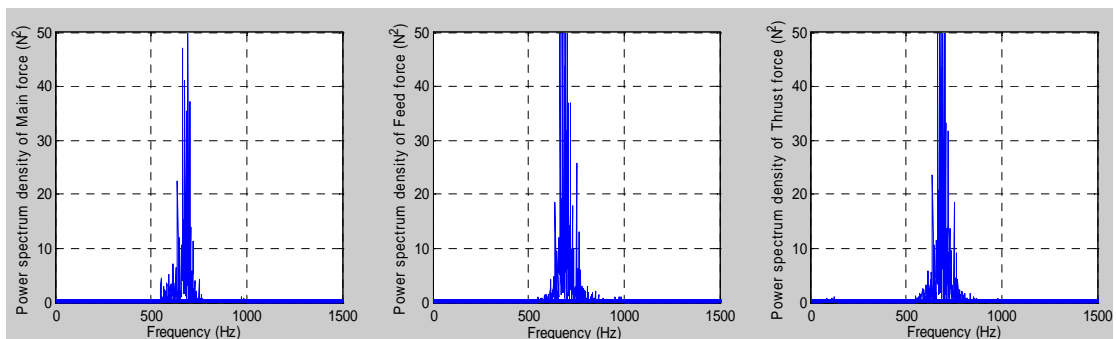
เศษโลหะแบบแตกหัก



กราฟแสดงอุณหภูมิการตัด



กราฟแสดงแอมพลิจูดแรงตัดพลวัต ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ



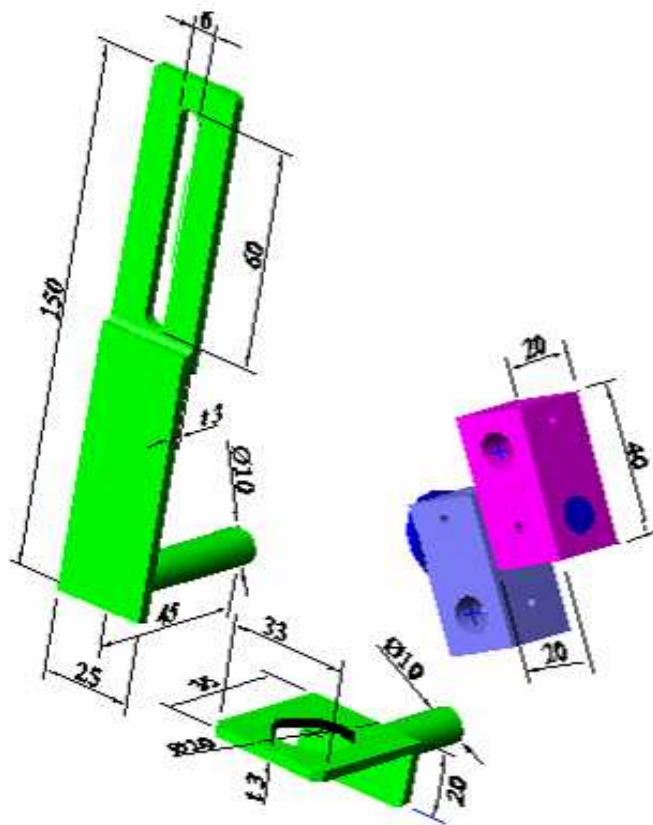
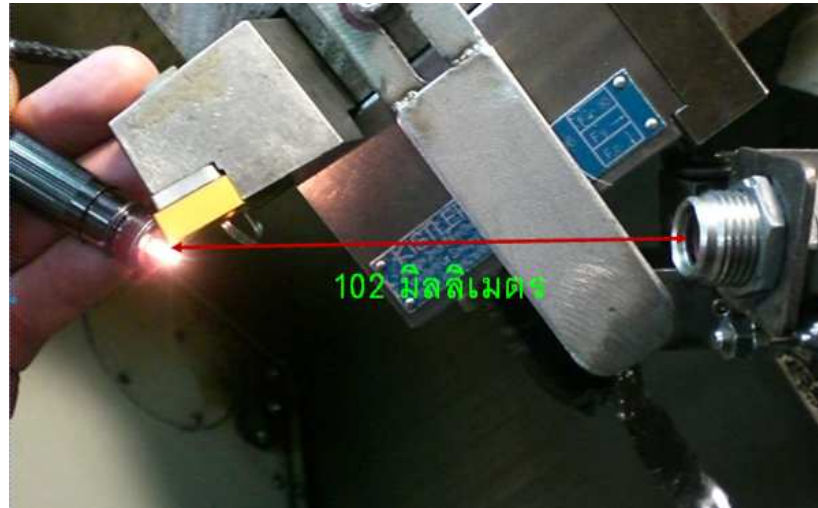
กราฟแสดงความหนาแน่นเพาเวอร์สเปคตรัมแรงตัดพลวัต

ในแกนแรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี ตามลำดับ

ภาคผนวก จ  
ขั้นตอนการปฏิบัติงานบนเครื่องกลึง ซี เอ็น ซี



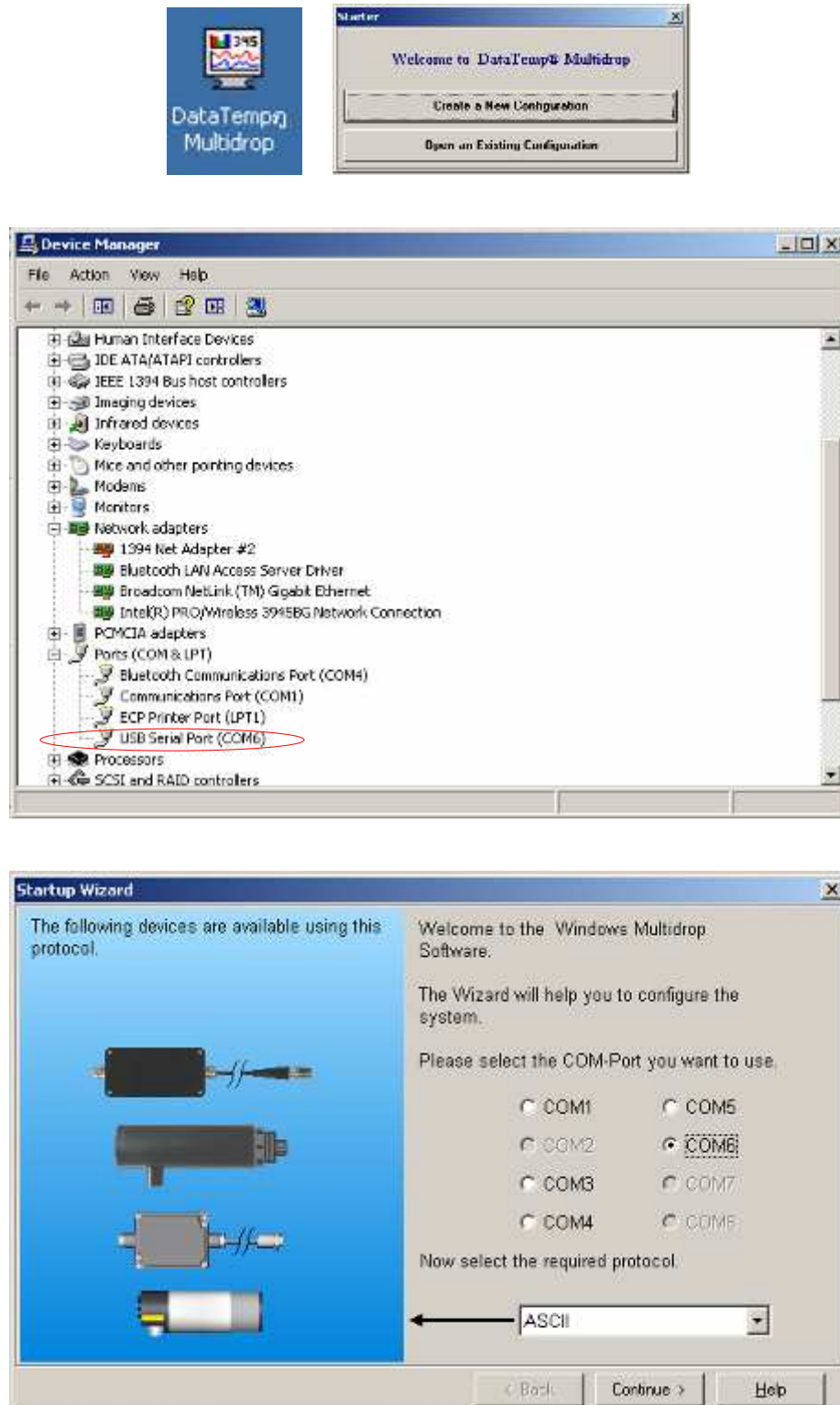
ภาพแสดงรายละเอียดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 1 : แสดงแบบ Fixture ตัวยึดหัววัดอุณหภูมิ Pyrometer และ การปรับระยะไฟกัส

ตารางที่ 1 : แสดง Specification ของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Pyrometer)

Measurement	
Model	FA2B
Spectral Response/Detector	1.6 $\mu$ m (InGaAs detector)
Fiber Cable Length	3m (10')
Accuracy	$\pm$ (0.3%Tmeas+2°C
Repeatability	$\pm$ 1°C
Temperature Resolution	$\pm$ 0.05°C
Response Time	10 mSec ; average selectable to 10 Sec
Emissivity	0.1 to 1.0 in 0.01 increments
Signal Processing	Peak Hold, Valley Hold, Averaging
Optical	
Model (D:S)*	Focus Distance (CF2)
FA2B (40)	2.5mm @ 102mm (0.1"@4")
Electrical	
Outputs	0/4-20 mA; RS-485, 2-wire/4-Wire, networkkable to 32sensors; Relay (SPST 48V, 300 mA , response time < 2mSec
Power requirements	24 VDC, 250 mA , $\pm$ 20%



รูปที่ 2 : แสดงส่วนหนึ่งการเชื่อมต่อเครื่องวัดอุณหภูมิโดย Port ระหว่าง Device กับ COM-Port  
จะต้องตรงกันโปรแกรมจึงจะสามารถทำงานได้

**Sensor Setup FA - Device 1 : Sensor 1**

Sensor Constants		Sensor Data	
Serial Number:	031405	Object Temperature:	-999.2 $\mu$ C
Device Type:	FA2	Internal Temperature:	37.0 $\mu$ C
Model Lower Limit:	400.0 $\mu$ C	Output Current:	Min mA
Model Upper Limit:	1700 $\mu$ C	Percent of Range:	-107.63 %
Firmware Revision:	1B	Trigger Status:	inactive
Communication Mode:	4-Wire		

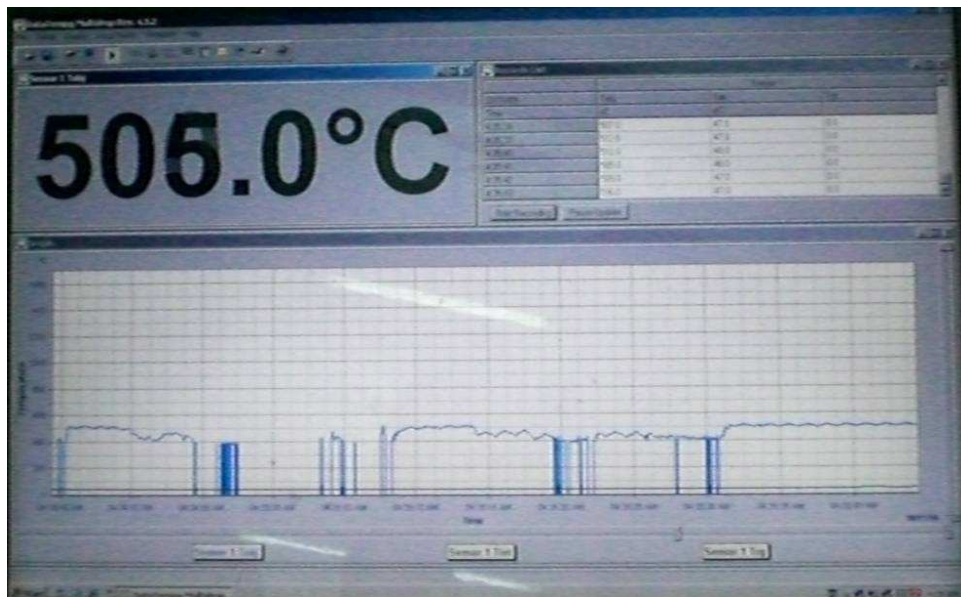
Signal Processing Setup				Output Signal Setup			
Mode:	Off	Emissivity:	0.92 Ap	Temperature Unit:	$\mu$ C	Output Range:	4...20mA
Hold Time:	..... s	Average Time:	..... s	Upper Range Limit:	1700 $\mu$ C	Lower Range Limit:	400 $\mu$ C
Hold Threshold Temp:	..... $\mu$ C	Ambient Control:	Internal	Alarm Mode:	Failsafe N.O.	Upper Alarm Limit:	..... $\mu$ C
Hold Hysteresis:	..... $\mu$ C	Ambient Temperature:	..... $\mu$ C	Lower Alarm Limit:	..... $\mu$ C	DeadBand:	..... $\mu$ C
Hold Decay:	..... $\mu$ C/s						

Maintenance	
Polling Address:	0
Baud Rate:	38400
Switch Panel Lock:	<input type="checkbox"/>

OK Cancel Save Load Help

รูปที่ 3 : แสดงตัวแปรต่างๆและค่าที่ได้ปรับตั้งไว้ของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส



รูปที่ 4 : แสดงตัวอย่างหน้าจอโปรแกรม Data Temp Multidrop ขณะทำการวัดอุณหภูมิติด

ภาพแสดงรายละเอียดเซนเซอร์วัดแรงตัด



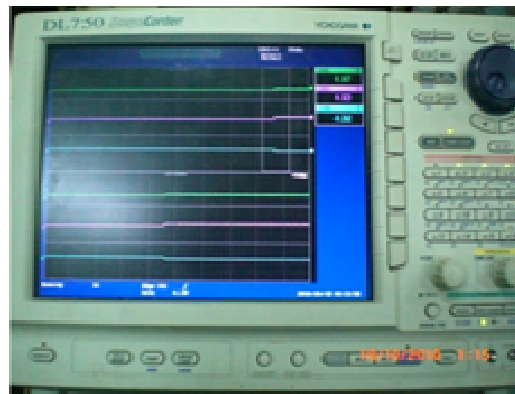
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 5 : แสดงขั้นตอนการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงตัด (a) การติดตั้งมิตตัดและไดนาโมมิเตอร์บน turret (b) ต่อสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณเข้าสู่เครื่องออสซิลโลสโคป (c) เครื่องขยายสัญญาณแรงตัดทั้งสามแกน (d) จอแสดงผลและคีย์บอร์ดปรับตั้งค่าของเครื่องออสซิลโลสโคป

## ภาพแสดงขั้นตอนการปฏิบัติงานบนเครื่องกลึง ซีเอ็นซี

ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
	<p>แสดงเครื่องกลึง ซีเอ็นซี ที่ใช้ในการทดลอง</p>
	<p>เปิดสวิตช์ปุ่มลมและสวิตช์อุปกรณ์ระบายความร้อน</p>
	<p>เปิดเบรกเกอร์เครื่องกลึงซีเอ็นซี</p>

ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
	<p>เปิดสวิทช์คอมพิวเตอร์ด้านหน้าเครื่อง</p>
	<p>การกลับไปยังจุดศูนย์ของเครื่อง (Home)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-กดปุ่มเลือกไปที่Position จะปรากฏหน้าจอดังรูป</li> <li>-กดปุ่ม Home ที่แผงควบคุม</li> <li>-กดปุ่มปรับระยะทางแกน X, Y และ Z โดยกดค้างไว้สักครู่แล้วปล่อย จากนั้นรอจนกระทั่งตำแหน่งแกนต่างๆเป็นศูนย์</li> </ul>
	<p>การเซ็ตตำแหน่งของปลายมีด</p> <p>กดปุ่มเลือกไปที่ TOOL DATA</p> <p>จากนั้น MSR UNIT ON (เซ็นเซอร์จะเลื่อนออกมา)</p>

ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
	<p>การเลื่อนปลายมีดสามารถทำได้โดยเลือกแกน Axis Select ก่อน จากนั้นหมุนปุ่มปรับเพื่อเลื่อนทิศทางปลายมีดไปตามที่ต้องการ</p>
	<p>กดปุ่ม Toolset Measure จากนั้นเลื่อนปลายมีดมาแตะที่เซ็นเซอร์โดยใช้ปุ่มควบคุม จนมีเสียงดัง แล้วจึงเลื่อนปลายมีดออก (ทั้งแกน X และแกน Z)</p> <p>* ในการเลื่อนปลายมีดควรใช้ปุ่มควบคุมเท่านั้น</p> <p>* กดปุ่ม Toolset Measure ก่อนทำการเลื่อนปลายมีดแตะที่เซ็นเซอร์ทุกครั้ง</p>
	<p>การใส่ชิ้นงาน</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-กดปุ่ม MPI ที่แผงควบคุมพร้อมกับ C-AX CONNECT</li> <li>-คลายปากจับ (Chuck) ทั้ง 3 ด้านออกให้มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่ต้องการใส่เล็กน้อย</li> </ul>



ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
	<p>การโปรแกรมการกลึง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-กดปุ่ม PROGRAM</li> <li>-ทำการโปรแกรมการตัดการตัดตามที่ต้องการ</li> <li>-กด Tool Path แล้วกด Check Continue หรือ Check Step</li> </ul>
  	<p>การกลึงขึ้นงาน</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-กดปุ่ม Memory จากนั้นควรปรับ Rapid ที่แผงวงจรควบคุมลงจาก 100% เป็นประมาณ 25% (เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่โดยที่มีดกling ไม่สัมผัสชิ้นงาน)</li> <li>*ป้องกันการเคลื่อนที่ของมีดกlingเร็วเกินไป</li> <li>-ปิดกุญแจ Program ที่แผงควบคุมจาก Enable ไปที่ Lock</li> <li>-กดปุ่ม Cycle Start เพื่อเริ่มกระบวนการกลึงขึ้นงาน</li> <li>-กดปุ่ม Coolant Stop เพื่อไม่ใช้สารหล่อเย็น</li> </ul>
 	<p>การบันทึกสัญญาณเพื่อนำไปวิเคราะห์</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-กดปุ่ม start/stop เพื่อหยุดการเคลื่อนที่ของกราฟแรงตัดและเลือกตำแหน่งที่ต้องการข้อมูล</li> <li>-กดปุ่ม select เพื่อบันทึกค่าแรงตัดโดยบันทึกไฟล์ลงบน hard disc</li> </ul>

รูปที่ 6 : แสดงลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกิติกุล กลิ่งผล เกิดวันที่ 18 มิถุนายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปีการศึกษา 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2551